



Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Villamosmérnöki és Informatikai Kar
Villamos Energetika Tanszék

Több receptoros villámvédelmi felfogó- val rendelkező szélgenerátorok vonzási terének vizsgálata

Készítette

Palotai Roland

Konzulens

Dr. Kiss István

2016

TARTALOMJEGYZÉK

1.	Bevezetés, absztrakt	3
1.1.	Megújuló energiaforrások	3
1.2.	Szélenergia	5
2.	Szélerőművek villámvédelme	8
2.1.	Felfogó pontok modellezése.....	8
2.2.	Becsapási eloszlás számítása numerikus módszerrel	11
3.	A PMAS módszer.....	16
3.1.	Vonzási tér elmélete	16
3.2.	PMAS szimuláció.....	18
4.	Laboratóriumi mérések elméleti alapjai	23
5.	Előzetes kísérletek.....	28
5.1.	Előzetes mérések - Összehasonlító kísérletek szigeteletlen és szigetelt modellen ..	30
5.2.	Előzetes mérések - Kísérletek szigetelt és szigeteletlen rúdon	36
6.	Felfelé irányuló villámcsapások kialakulásának laboratóriumi vizsgálata	42
7.	Konklúzió.....	48
	Köszönetnyilvánítás	50
	Irodalomjegyzék.....	51

1. Bevezetés, absztrakt

A mai modern világunk működésének egyik alappillére a megfelelő és hatékony energia-ellátás. Ahhoz hogy ez megvalósulhasson, arra van szükség, hogy az összes gazdaságosan hozzáférhető energiatermelési lehetőség kiaknázásra kerüljön. Ezért egyre nagyobb szerepet kapnak a megújuló energiaforrások, köztük az egyik legdinamikusabban fejlődő a szélenergia.

Szélturbináknál, a felépítésükből kifolyólag, nagy jelentősége van a megfelelő villámvédelemnek, a biztonságos üzemvitel szempontjából. A vizsgálatainkhoz a Dr. Horváth Tibor professzor úr által kidolgozott valószínűséggel súlyozott vonzási tér (PMAS – Probability Modulated Attraction Space) módszert használjuk fel.

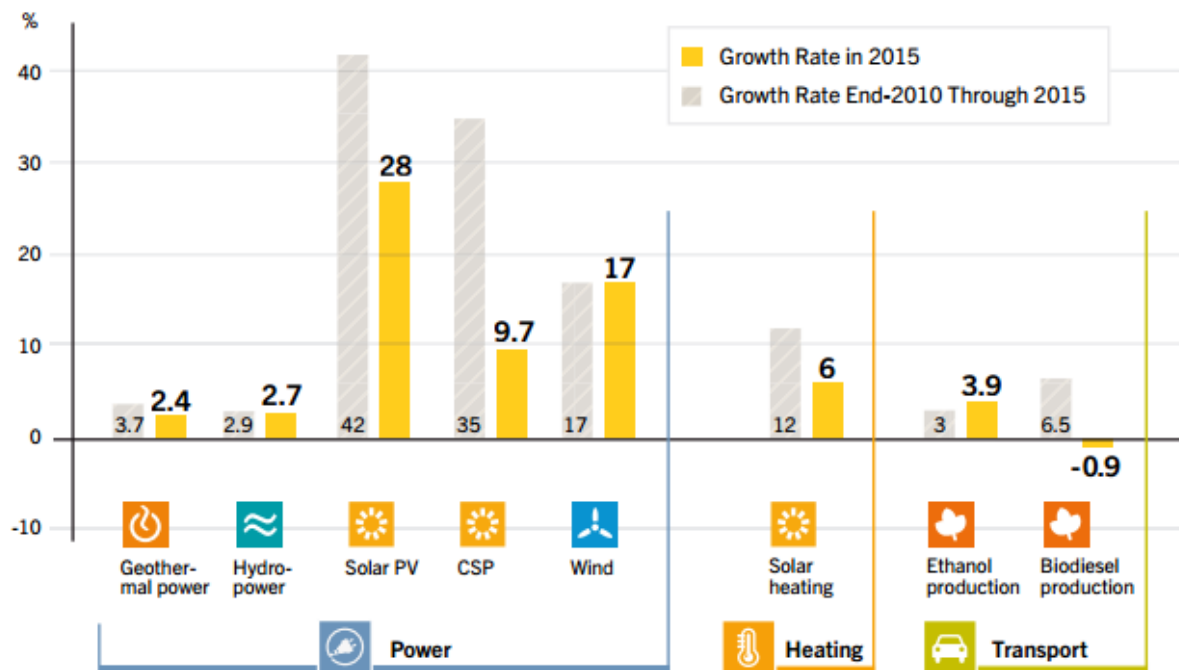
A dolgozatom elején röviden áttekintést adok a szélerőművek felépítését, a ma is használatos villámvédelmi megoldásokat, és azok típusait, a receptorok számát, és elhelyezkedését illetően. Majd, egy a PMAS elvén működő szoftverrel, megvizsgáljuk a több receptorral rendelkező szélturbina vonzási terét. Megalkotunk egy fizikai modellt, mely arányaiban megegyezik egy ma is használatos szélturbina méreteivel, és kialakítjuk rajta a szükséges több receptoros felfogó rendszert. Ezt követően a laboratóriumi mérések segítségével megvizsgáljuk a kialakult vonzási tér alakját, és a különböző felfogókhoz tartozó térrészek egymáshoz viszonyított arányát. A méréseinket követően kiszámítjuk a különböző receptorokhoz tartozó várható villámcsapás számot, és a kapott eredményt összevetjük a szabványban leírt értékekkel. Meghatározzuk továbbá azt is, hogy a kialakított receptorok közül melyek a legveszélyeztetettebbek, melyekbe érkezik legnagyobb valószínűséggel villámcsapás. Szeretnénk kideríteni azt is, hogy ilyen elrendezés esetén létrejöhet-e olyan kisülés, ami a lapát felszínét érintve záródik, mert valóságban ez a jelenség a lapáton sérüléseket okozhat. A mérési sorozatunkat különféle receptor számú és elrendezésű felfogó rendszerrel, illetve különböző feszültség szinteken és polaritással is szeretnénk lefolytatni.

1.1. Megújuló energiaforrások

Rohamosan fejlődő világunkban az emberiség energiaigénye folyamatosan növekszik, ennek kielégítése érdekében szükségünk van minden gazdaságos energiatermelési lehetőség kiaknázására. A legkézenfekvőbb megoldás a fosszilis energiahordozók alkalmazása, sajnos az ilyen energiaforrások kihasználása egyre több nehézségbe ütközik. Ahogy a felszín közelében lévő könnyen kinyerhető lelőhelyek apadnak, úgy drágul az ezzel a módszerrel előállított ener-

gia is. A környezettudatos szemléletmód elterjedésével a környezetszennyező kőolajon, kőszénen és földgázon alapuló energiatermelés a társadalom szemében is nemkívánatossá vált. Ezen folyamatok kényszerítették az energiaszektort arra, hogy a figyelmüket a megújuló energiaforrások felé fordítsák.

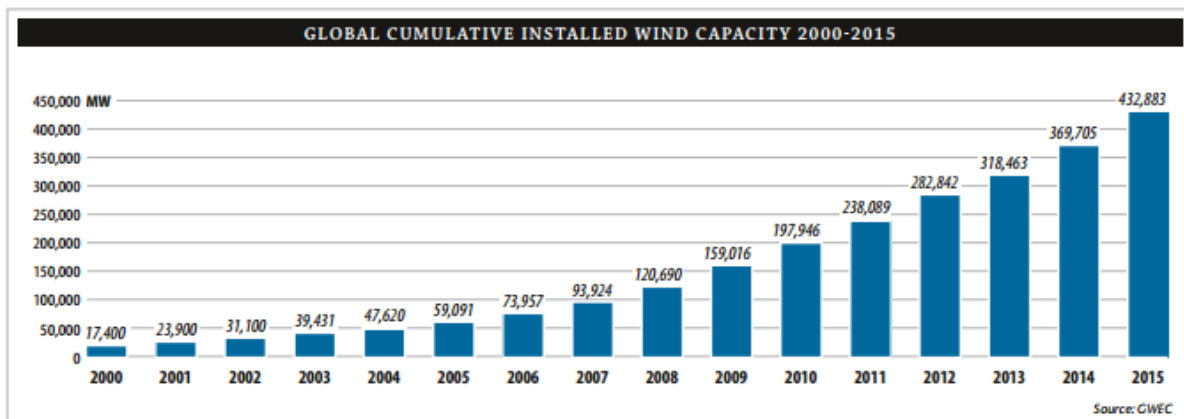
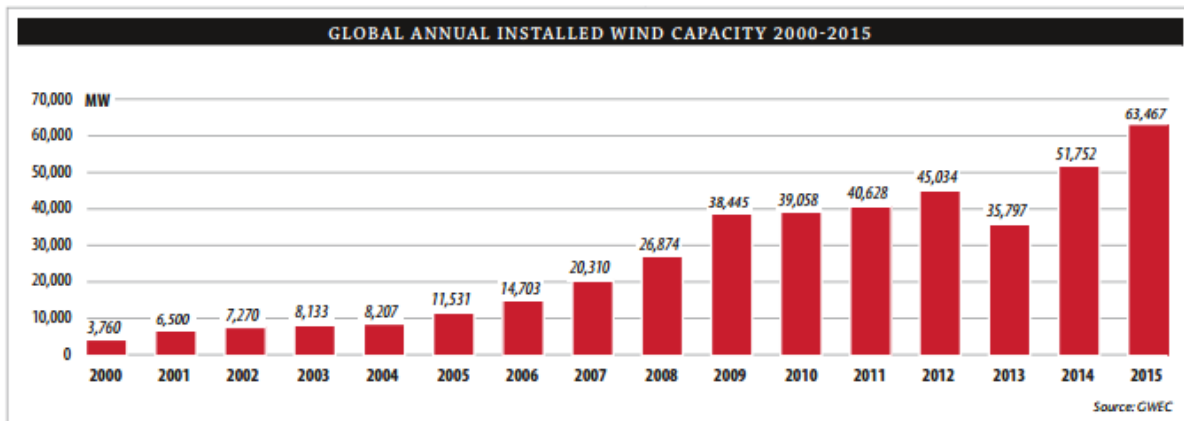
Megújuló energiaforrásoknak nevezzük azokat a természeti jelenségeket, amelyekből energia nyerhető ki és jelentősebb emberi beavatkozás nélkül újrafelhasználhatóak. Ilyenek például a víz-, a nap-, a szélenergia és a geotermikus jelenségek. A megújuló energiaforrásokon alapuló termelés beruházási és üzemeltetési költségei még nem olyan kedvezőek, mint a foszszilis energia előállításé, de az utóbbi években a technológia fejlődésének köszönhetően rohamos csökkenés tapasztalható.



1-1. ábra – Megújuló energia kapacitás és bio üzemanyag előállítás, átlagos évi növekedése 2010 és 2015 között illetve 2015-ben [1]

1.2. Szélerergia

A megújuló energia felhasználás egyik rohamosan fejlődő ága a szélerergia. A 2000-es évek elejétől kezdve felhasználása gyors ütemben emelkedni kezdett, ahogy az országok felfedezték a benne rejlő lehetőségeket.



1-4. ábra - Évenkénti / összes szélerergia kihasználás 2000 - 2015 [2]

A szélerergia pozitív tulajdonságai közé tartozik, hogy nincs szükség különleges természeti feltételekre, a szélturbina nem igényel nagy helyet, illetve telepíthető vízfelszínre is. Tulajdonságai miatt a világ nagyon sok országában adottak a feltételek jelentősebb szélerőmű park kialakítására, ennek ellenére főleg a gazdaságilag fejlettebb régiókban használták ki a szélerergiát nagy arányban. Ez indokolható a szélerőmű parkok magas beruházási és karbantartási költségeivel.

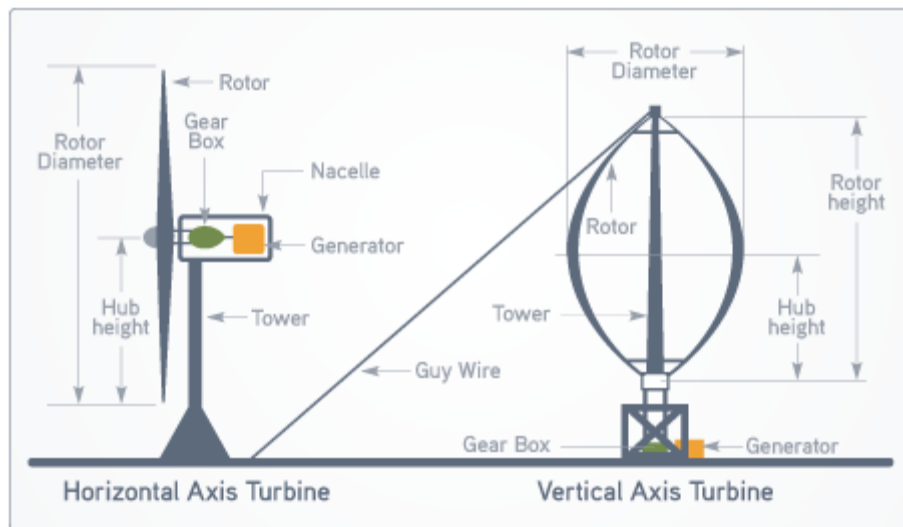
Természetesen a szélerőműveknek is rengeteg különböző típusa létezik, és ezeket sokféleképpen csoportosíthatjuk. Talán a legelterjedtebb szempont a tengelyelrendezés szerinti megkülönböztetés, amivel két nagy csoportba sorolhatjuk a szélturbinákat.

Tengelyelrendezés szerint:

- Horizontális tengelyű
- Vertikális tengelyű

A horizontális tengelyű szélturbina egy magas oszlopon helyezkedik el, ezzel kihasználva, hogy nagyobb magasságban nagyobb az átlagos szélesség és így több a kitermelhető szélenergia. Ebből a tulajdonságából ered, hogy a nagyobb teljesítményű szélerőművek óriási méreteket ölthetnek, amihez komoly alapzatra van szükségük, ezáltal jelentősen megnövekszik a beruházási költségük. Hátránya továbbá, hogy a vízszintes tengelye miatt a szélerőmű irányfüggő, tehát a megfelelő működés érdekében a tengelyt egy automatika segítségével mindig szélirányba kell fordítani. Negatívumai ellenére a jelentősen nagyobb kiadott teljesítmény miatt az energiaiparban gyakorlatilag csak ilyen kialakítású szélerőműveket alkalmaznak.

A vertikális tengelyű szélturbinák sokkal kisebb teljesítményt képesek leadni, mint horizontális társaik, viszont lényegesen kisebb felépítményt igényelnek, és az előbbiekkal ellentétben irányfüggetlenek. Eltérő tulajdonságaik miatt alkalmasak lehetnek városi környezetben való alkalmazásra, ahol a turbulens légáramlatok gyakran változtatják a szélirányt. Kevésbé elterjedt, mint a horizontális típusú szélerőművek.



1-5. ábra - Horizontális- és vertikális tengelyű szélturbina [3]

Működésüket tekintve nincs nagy különbség a szélturbina típusok között. A lapátok keresztmetszete a repülőgép szárnyaihoz hasonló alakú, rajtuk nyomáskülönbség következtében felhajtó erő jön létre, ami forgómozgássá alakul. Ez a forgás általában túl lassú egy generátor közvetlen meghajtásához, így egy váltóművön keresztül csatlakozik a generátor forgórészéhez. Horizontális tengelyű szélturbina típus esetén a váltómű és a generátor is a torony tetején, a

hub-ban helyezkedik el, illetve itt található az érzékelő és az automatika, ami a szélturbinát szélirányba állítja.

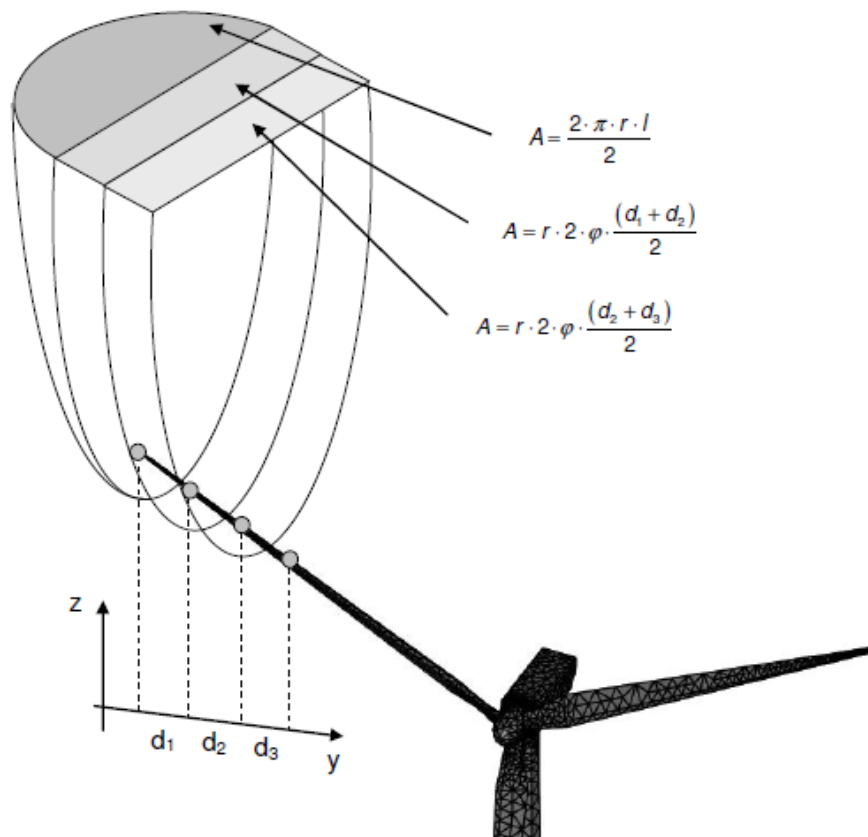
2. Szélerőművek villámvédelme

Mint már említettem, a szélerőműveket a nagyobb teljesítmény elérése érdekében nagy magasságokban telepítjük, így érjük el, hogy nagyobb átlagos szélesebességnek legyen kitéve a szélkerék. A nagy magasság azt is jelenti, hogy a szélerőmű általában kiemelkedik a környezetéből, így jelentősen megnő annak az esélye, hogy villámcsapás éri. Létezik olyan villámvédelmi megoldás, ami a szélerőmű mellé különálló védőtorny kialakítását írja elő, de ez sem jelent teljes védelmet, ezzel szemben jelentősen megnöveli egy szélturbina beruházási költségét. A legelterjedtebb villámvédelmi elrendezés a lapátok végén elhelyezett felfogó elektródákból, és a hozzájuk kapcsolódó, a földdel közvetlen kontaktust kialakító levezető rendszerből áll. A beépített felfogó- és levezető rendszer általában jó vezetőképességű anyagból (rendszerint fémötvözet) készül, így biztosítva a töltések lapáton való biztonságos áthaladását.

2.1. Felfogó pontok modellezése

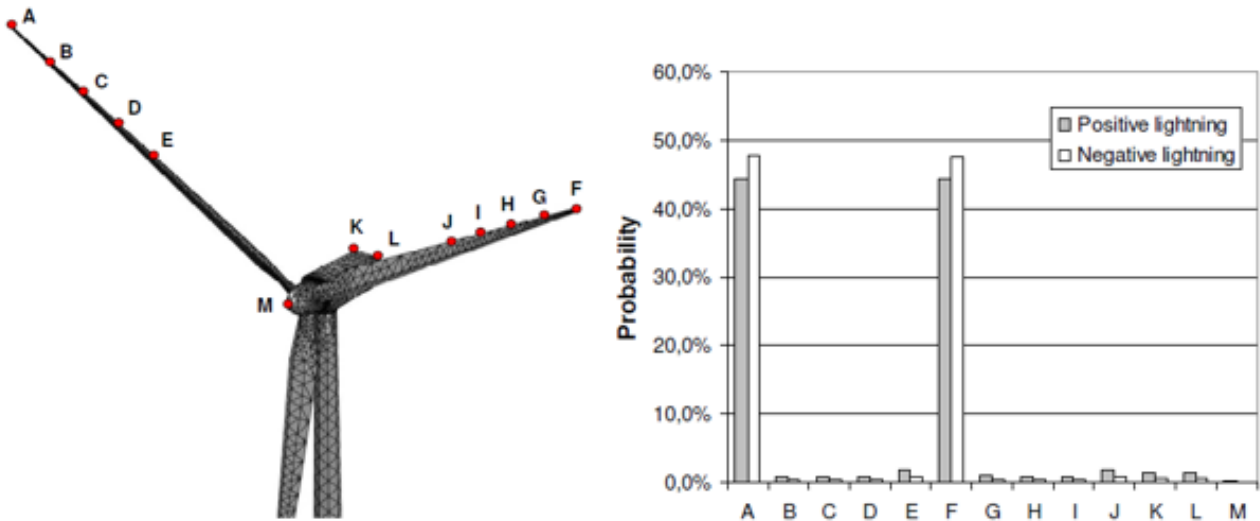
Ahhoz hogy a szélturbinák villámvédelmi rendszerét hatékonyan meg tudjuk tervezni, jó módszer, ha előtte számítógépes szimulációt készítünk, és azt vizsgálva döntjük el, hogy milyen felfogó rendszert érdemes az adott körülmények között kialakítani. Az általam feldolgozott szakirodalmak között is volt olyan, ami ezzel a vizsgálati formával foglalkozott.

Az alábbiakban kifejtett szimulációk során, például egy Vestas V90 típusú szélturbina háromdimenziós méretarányos modelljét hozták létre, Comsol Multiphysics és Matlab programok segítségével. A megalkotott modell köré felvettek egy 1 km x 1 km alapterületű és 3 km magasságú térrészt, amiben a villámok végpontját tudják mozgatni, ezzel vizsgálva a vonzási teret. Az általam elvégzett mérésekhez hasonlóan, vizsgálatok itt is ugyanabban a három fő rotorlapát állásban kerültek elvégzésre. Ezeket a lapátállásokat 30°-os, 60°-os és 90°-osnak nevezték el, aszerint hogy a kijelölt él mennyivel tér el a vízszintestől. A szimuláció során a szerzők kijelölték a szélturbina lapátján és kosarán számos pontot, ahol a számításokat el fogják végezni, és a becsapási valószínűséget meg fogják állapítani. Ezek a pontok a lapát élein egymástól 5 méteres távolságban, illetve a szélturbina kosarának tetején helyezkednek el.



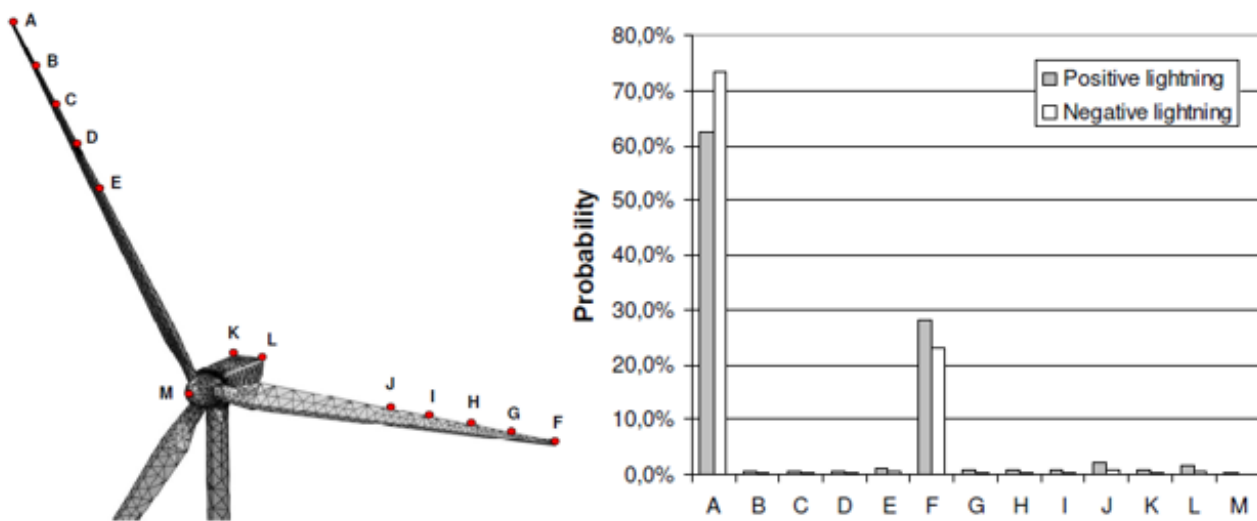
2-1. ábra – A becsapási pontokhoz tartozó vonzási tér [4]

A szerzők egy bonyolult algoritmus segítségével számolták a becsapási valószínűséget, amihez kiszámították az adott ponthoz tartozó becsapási távolságot, a vonzási tér nagyságát, illetve az úgynevezett stabilizációs térnek (Stabilisation Field) nevezett térerősség értéket. A szorosan egymás mellé helyezett felfogó pontok vonzási terét a 2-1. ábrán is látható módon határozták meg. Ezzel a módszerrel a közepen elhelyezkedő pontok vonzási tere egy parabola alakú szelet lesz, aminek a vastagságát a két vizsgált pont közötti távolság szabja meg. Ezeket a számításokat minden pontra elvégzik különböző villámáram értékek esetén. A vizsgált villámáramok pozitív polaritás esetén 1 kA és 250 kA közötti értékek 5 kA-es lépésenként, illetve negatív polaritás esetén 5 kA és 90 kA közti értékek, szintén 5 kA-es lépésközzel.



2-2. ábra – 30°-os lapátállás vizsgált pontjai és az azokhoz tartozó becsapási valószínűség [4]

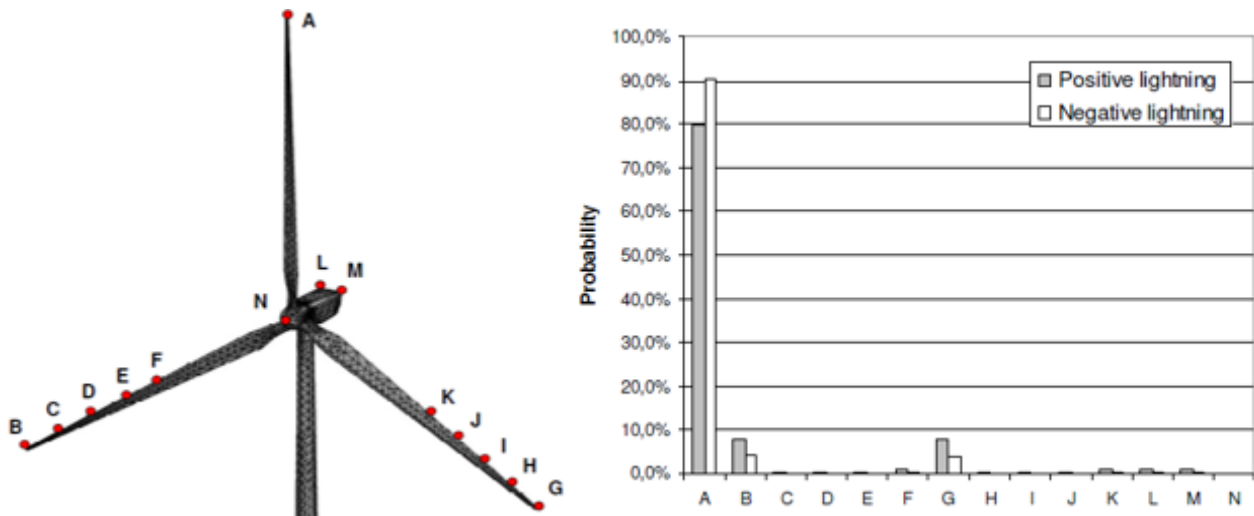
A fenti ábrán látható az úgynevezett 30°-os lapátállás, és a vizsgált pontjaihoz tartozó kiszámított becsapási valószínűség. Jól látható hogy a becsapások döntő többsége a két lapátcsúcsot érte, mind pozitív mind, negatív villámcsapás esetén. Ezen kívül megfigyelhető az a jelenség is, hogy a pozitív becsapások közül több kerülte el a csúcsokat, mint a negatív esetén.



2-3. ábra – 60°-os lapátállás vizsgált pontjai és az azokhoz tartozó becsapási valószínűség [4]

A 60°-os lapátállásban a kritikus pontok hasonlóan lettek felvéve, mint az előző esetben, a kiszámított valószínűség értékekben azonban jól látható eltérés van. Látható ugyanis hogy a felfelé álló lapát kapta a villámcsapások több mint 60%-án mindkét polaritás esetén, míg a vízszintes lapátnak csak ennek mintegy felét sikerült felfognia. Megfigyelhető itt is hogy a felfelé álló lapát kevesebb pozitív villámcsapást kapott mint negatívát, ellentétben a

többi ponttól, illetve jól látható hogy az A és F pontok kivételével a többi pont ismét rendkívül kevés becsapást szenvedett el.



2-4. ábra – 90°-os lapátállás vizsgált pontjai és az azokhoz tartozó becsapási valószínűség [4]

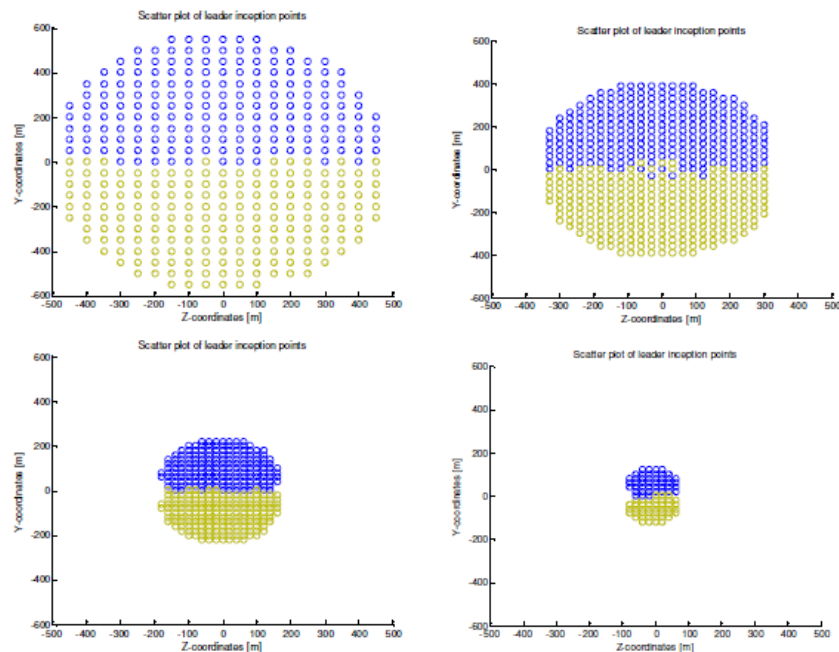
Az ábrán látható hogy ebben az esetben eggyel több pontot vizsgálunk, mint az előző kettő lapátállásnál, ugyanis a felfelé álló lapát csúcsát is megjelöltük. Természetesen ebben az esetben a becsapások nagy részét itt a függőleges lapát csúcsa fogja fel, míg a lefelé álló lapátokat a villámcsapások kevesebb, mint 10%-a találja meg. A többi pont becsapási valószínűsége itt is rendkívül kicsi.

A kapott eredményekből jól látszik, hogy bármely lapátállást is vesszük alapul, a kisülések döntő többsége a lapátok csúcsába érkezik, ettől függetlenül nem elhanyagolható a többi pont jelenléte sem. Ha egy valós villámvédelmi rendszert tervezünk, akkor érdemes a lapát mentén beljebb lévő pontokba is felfogó elektródákat elhelyezni, ezzel minimálisra csökkentve az esélyét annak, hogy a kisülés mégis a lapát szigetelő felületét érje. A cikk megjegyzi még, hogy ezek a számítások csak a lefelé irányuló villámcsapásra érvényesek, de igen magas szél-turbinák esetén előszeretettel alakul ki felfelé irányuló kisülés is. Ezek a felfelé irányuló villámcsapások azonban a megfigyelések szerint minden esetben a lapát csúcspontjából indulnak. Ezek a villámcsapások is képesek jelentős mennyiségű kárt okozni, így vizsgálatuk szintén igényelt.

2.2. Becsapási eloszlás számítása numerikus módszerrel

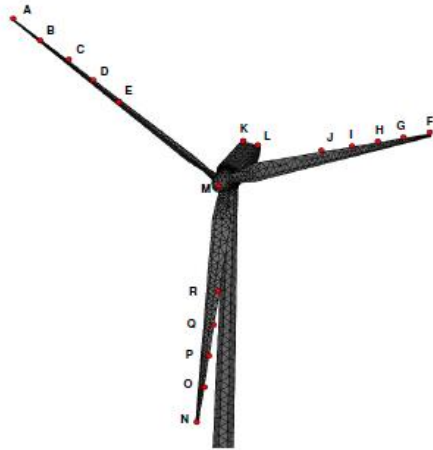
Az 2.1-es fejezetben feldolgozott cikkhez hasonlóan itt is szimulációs modell készítésével kezdődnek a vizsgálatok. Ugyanazokat az AutoCAD modelleket használja ez a kísérletsorozat is, mint ami az előző fejezetben felhasználásra került, ugyanolyan lapátállásokban és hasonlóan

osztja el a vizsgált pontokat is. A különbség viszont az, hogy itt az eloszlásszámítás után laboratóriumi mérésekre is sor kerül, az eredmények ellenőrzése céljából. A szimuláció során, minden lapátállásban négy különböző villám-áramerősséget használtak, ezek rendre 60 kA, 40 kA, 20 kA, 10 kA.



2-10. ábra – A szimuláció során használt orientációs pontok „30°” lapátállásban, mind a négy villámáram esetén [5]

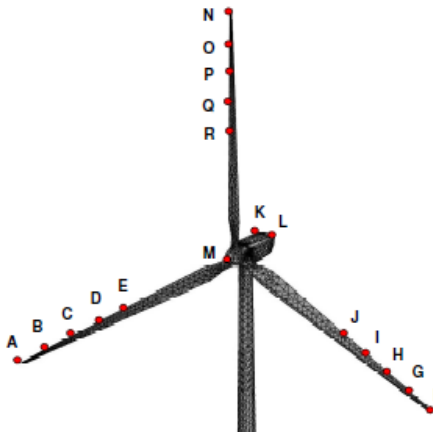
A 2-10. ábrán felülnézetből láthatóak azok a pontok, amiket a szimuláció során orientációs pontnak használtak. Ezek a diagramok a 2-11. ábrán is látható „30°” lapátállásban készültek, rendre 60/40/20/10 kA-es villámáramok esetén. Kék illetve zöld színnel lettek jelezve hogy az adott pontban melyik felfelé mutató lapát végét érte a kisülés. A 2-11. ábrán látható továbbá egy táblázat, amely tartalmazza azt a két pontot, amelyekbe érkezett kisülés, ezek az A, és F pontok, illetve a kisülések eloszlását e két pont között százalékban. Mind a fenti diagramok, mind az alább lévő táblázat jól mutatja, hogy a kisülések egyenletesen oszlottak el a lapát csúcsában lévő pontok között.



30° - Probabilities [%]				
Point	60kA	40kA	20kA	10kA
A	50	50	50	50
F	50	50	50	50

2-11. ábra - A vizsgált pontok, és becsapás eloszlás „30°” lapátállásban [5]

A 2-12. ábrán a második, „90°”-os lapátállás látható illetve a hozzá tartozó eloszlásos táblázat, itt nem meglepő módon a függőlegesen felfelé álló lapátba érkeztek a kisülések, kivétel nélkül az összes.

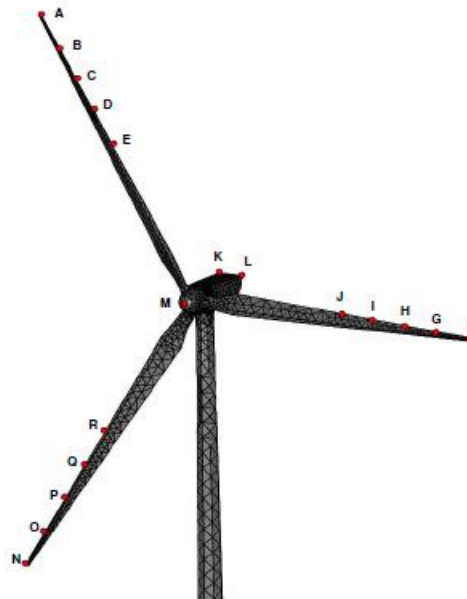


90° - Probabilities [%]				
Point	60kA	40kA	20kA	10kA
N	100	100	100	100

2-12. ábra - A vizsgált pontok, és becsapás eloszlás „90°” lapátállásban [5]

Végül a harmadik lapátállás a „60°”-os, is szimulációra került, ez az elrendezés a 2-13. ábrán látható. Itt egy kicsit érdekesebben alakultak az eredmények, hiszen jól látható, hogy a villámáram csökkentésével a vízszintes lapát végébe is elkezdett beérkezni néhány kisülés. A

szimulációt kisebb áramerősségen nem futtatták le, de feltételezhetjük, hogy az áramerősséget tovább csökkentve, a becsapási valószínűség ebben a pontban, hasonló arányban növekedne.



60° - Probabilities [%]				
Point	60kA	40kA	20kA	10kA
A	100	100	99	98
F	0	0	1	2

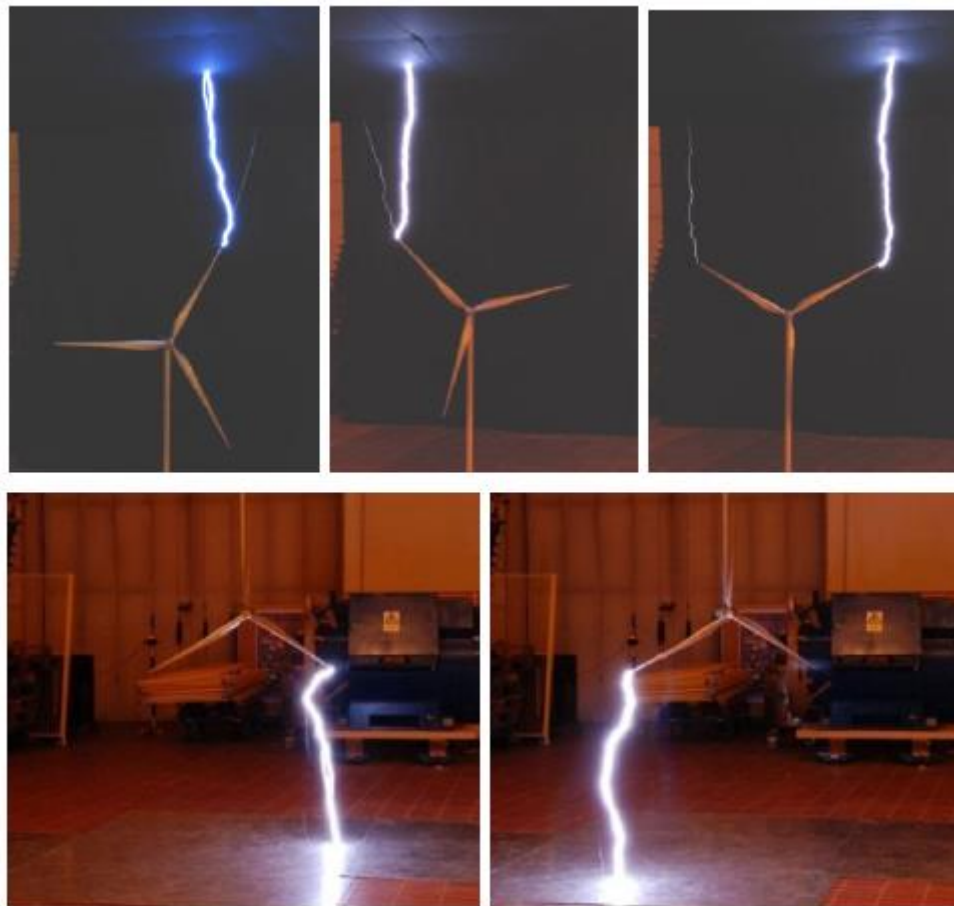
2-13. ábra - A vizsgált pontok, és becsapás eloszlás „60°” lapátállásban [5]

Ahhoz hogy a fentiekben leírt szimulációs adatokat valós mérésekkel is alátámasszák, a cikk szerzői laboratóriumi kísérleteket is lefolytattak. Ehhez először elkészítették a szimulációhoz is alapul vett Vestas V90-es szélgenerátor 1:62 arányban lekicsinyített modelljét, amit alumíniumból alakítottak ki. Észrevehető hogy a kialakított modellen nem csak a szimuláció során figyelembe vett pontokon található felfogó, hanem a lapát egésze fémből készült. Ez nem okoz problémát, csupán annyi különbséget vet föl, hogy míg a szimulációk során a becsapások eloszlása diszkrét a vizsgált pontokra, addig a modell esetében ez folytonos. A mérési elrendezés a 2-14. ábrán is látható módon alakították ki, a modellt egy nagy kiterjedésű földelt fémlapra helyezték majd fölé, egy szintén nagy fémlapot emeltek, amit a lökésgerjesztő potenciáljára kapcsoltak.

A kísérleteket először úgy végezték, hogy a felhő töltését modellező felső fémlapra negatív polaritású kisülést kapcsoltak, minden sorozatban 160 kisülést hoztak létre. Olyan esetekben, amikor valamelyik lapát csúcspontja magasabban volt, mint bármelyik másik csúcs, akkor azt a csúcspot érte minden kisülés. Abban az esetben, amikor a lapátok a „30°”-os állásban voltak, a két felfelé mutató csúcs között 87-73 arányban oszlottak meg a kisülések.

A második sorozatnál ugyanezt a kísérletet végezték el, annyi különbséggel, hogy a felső fémlapot most pozitív kisülésekkel terhelték. Az eredmény igen meglepő lett, ugyanis a kisülések nagy része nem a fémlap alatt elhelyezkedő modellbe érkezett, hanem a mérés környezetében lévő más laboratóriumi berendezésbe, vagy a modell mellé a földelt fémlapba. Ez azért is különös mivel a modell csúcsa, és a fémlap között csak 80 cm- légréteg volt, a többi kisülés alkalmával több, mint 2 méternyi levegőréteget kellett a kisülésnek átütnie, hogy elérje a környező berendezéseket. Erre a jelenségre a cikk nem ad magyarázatot, csak kiküszöböli egy olyan megoldással, hogy a modellt fejjel lefelé felakasztja, és így negatív polaritású impulzust ráadva, a kisülés a földelt fémlapot éri. Ezzel a megoldással hasonló eredményekre jut, mint a negatív polaritású vizsgálatok esetén. Az elrendezés a 2-14. ábra alsó képein is látható.

A cikk, ezzel igazoltnak tekinti a szimulációk során kapott eredményeket.



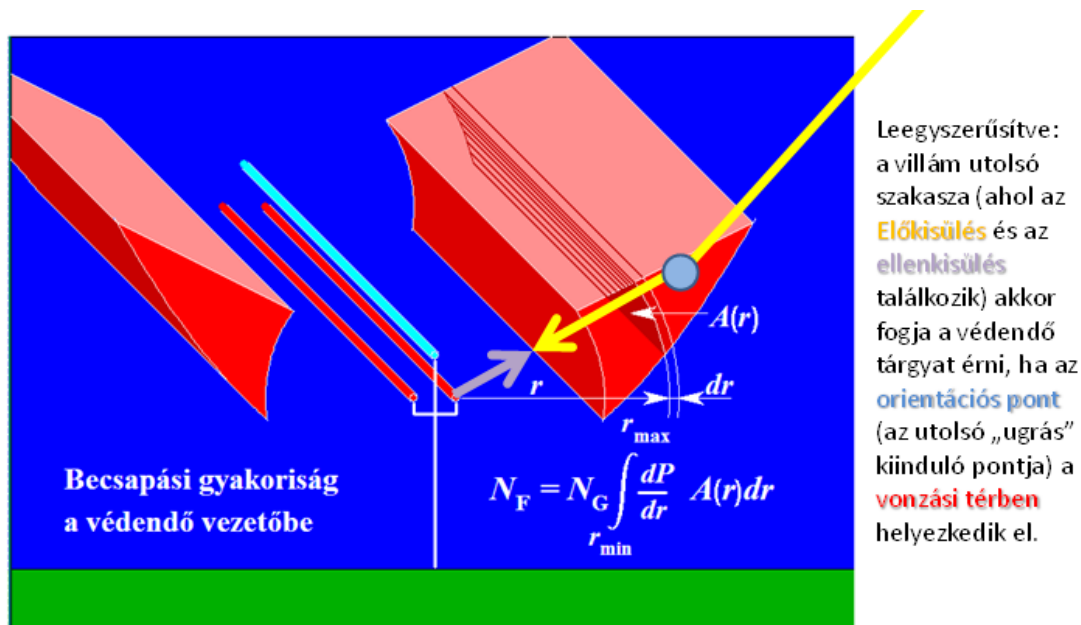
2-14. ábra – A laboratóriumi mérés negatív és pozitív polaritás esetén [5]

3. A PMAS módszer

A PMAS (Probability Modulated Attraction Space) módszer, egy a vonzási tér meghatározására szolgáló eljárás, amit Dr. Horváth Tibor professzor úr fejlesztett ki. Ez a módszer meglehetősen pontosan képes bonyolult objektumok vonzási terét leírni.

3.1. Vonzási tér elmélete

Orientációs pontnak azt a pontot nevezzük, ahol a villám csúcsa akkor van, amikor az ellenkiszülés elindul. Ezen orientációs pont és a becsapási pont között lévő távolság az orientációs távolság, ami a villám áramától függ. Figyelembe véve hogy a villámáram nem lehet akármilyen kicsi, definiálunk egy minimális orientációs távolságot, aminél az orientációs pont nem lehet közelebb az objektumhoz. Azon pontok halmaza, amelyekre igaz, hogy a lehetséges orientációs pontok közelebb vannak egy objektumhoz, az adott objektum vonzási terének nevezük.



3-1. ábra - Távvezeték vonzási tere [6]

A 3-1. ábrán látható távvezetéknel a piros színel jelölt tér a piros fázisvezető vonzási tere, az itt lévő pontok közelebb vannak ehhez a vezetékhez, mint a kék védővezetőhöz vagy a földhöz. Ezt a teret három felület határolja, az első egy hengerfelület, amely a legkisebb orientációs távolsághoz tartozik. A másik a vezetékre merőleges, függőleges síkmetszeten a fel-fogó és a védendő vezetők középpontjait összekötő felezőmerőleges által meghatározott sík, a

harmadik pedig a földtől és a védendő vezetőtől egyenlő távolságra lévő pontok görbéje (parabola) által meghatározott ívelt felület.

A valóságban természetesen a vonzási tér nem határolható el ilyen élesen, egy orientációs pontról nem feltétlenül mondható meg, hogy hova fog becsapni a villám, csak egy bizonyos valószínűséggel. Tehát a valóságban egy objektum vonzási tere azokat a pontokat foglalja magába ahol nagyobb a valószínűsége, hogy a villám az említett objektumba csap, mint máshova. Így a tér határfelületeit azok a pontok határozzák meg ahol a becsapási valószínűség (kis b -vel jelöljük) $b=0,5$. A vonzási tér egyes pontjaihoz hozzárendelhető egy dP/dr érték az alábbi egyenlet alapján:

$$\frac{dP}{dr} = \frac{k * p}{\sqrt{2\pi} * r} * \exp\left(-\frac{1}{2} * k^2 * p^2 * \left(\ln \frac{r}{r_m}\right)^2\right)$$

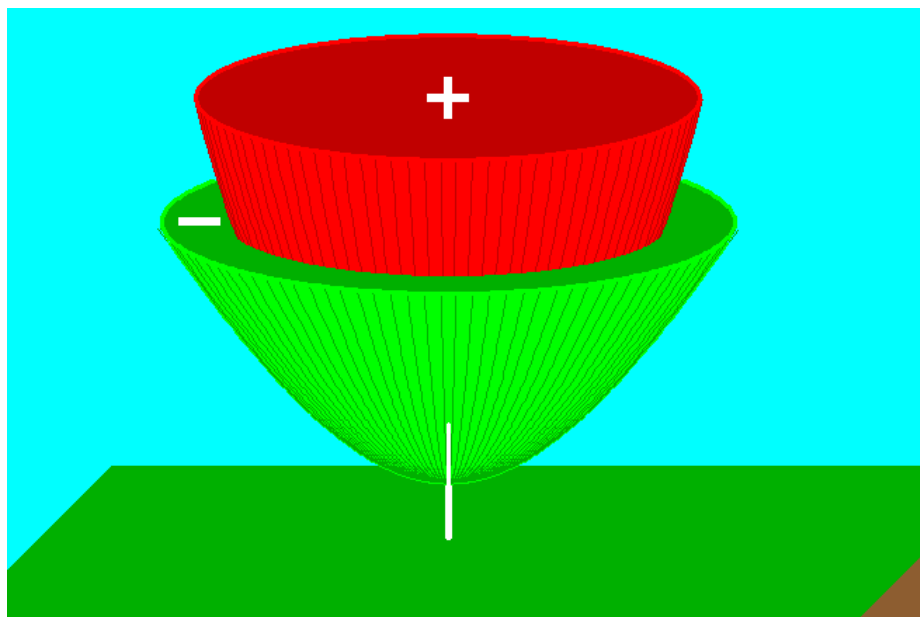
3-1. képlet – dP/dr kiszámítása

Ahol, k a villám polaritásától függő paraméter, p különböző szerzők által 1,2-2 közé eső érték, r_m az orientációs távolság medián értéke, r az orientációs távolság. A vonzási tér pontos meghatározásával, és ábrázolásával, illetve az ábrázol térrész alakjának és nagyságának vizsgálatával képesek vagyunk becslést adni arra vonatkozólag, hogy a vizsgált objektumot milyen gyakran érheti villámcsapás. Erre az úgynevezett egyenértékű területek módszerét használjuk. A módszer alapja hogy a vizsgált objektumunk vonzási terét le tudjuk képezni egy sík területre, amely ugyanannyi villámcsapást kap egy év alatt, mint az eredeti vonzási tér. E terület nagyságából és az objektum földrajzi helyzetéhez tartozó villámsűrűségből meghatározható hogy milyen sűrűn érkehetnek az objektumba villámcsapások, és ezek mekkora villámárammal rendelkeznek. Az egyenértékű terület számítása:

$$A_{eq} = \int_{V_c} \frac{dP}{dr} dV$$

3-2. képlet – Egyenértékű terület kiszámítása

Ahol az A_{eq} az egyenértékű terület, a V_c pedig a vonzási tér térfogata. A továbbiakban fontos megjegyeznünk, hogy a vonzási tér pozitív és negatív polarításra eltérő.

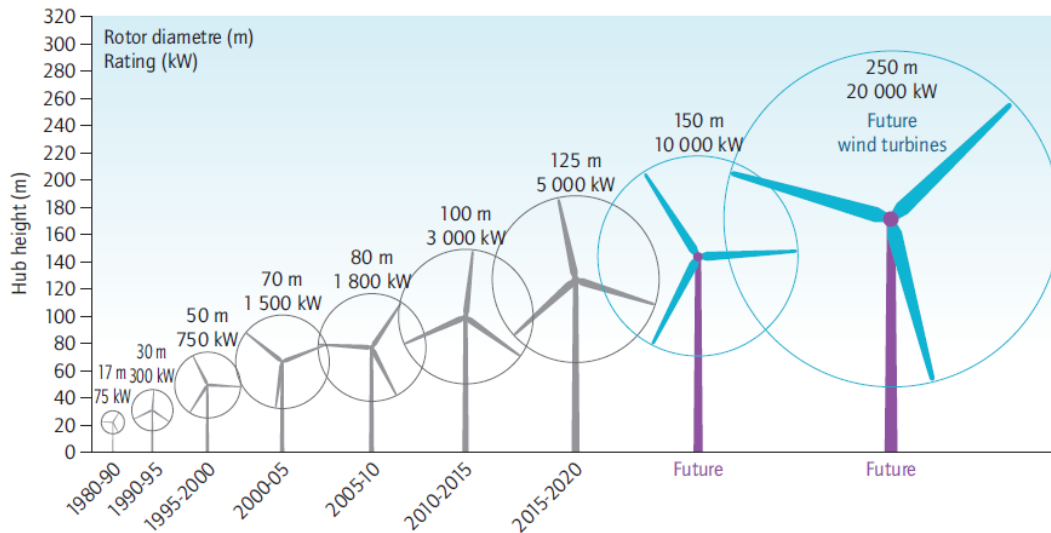


3-2. ábra - Torony pozitív és negatív vonzási tere [6]

3.2. PMAS szimuláció

A szélturbina PMAS módszerrel történő vonzási tér számításához egy speciálisan erre a feladatra készült programot használtunk. Ahhoz hogy a program a számításokat el tudja végezni, szükség van a szélkerék modelljére DXF formátumban, illetve egy PAR formátumú file-ra, ami a szélturbinát magába foglaló szimulációs tér adatait adja meg.

A DXF formátumú modell megalkotásához használhatunk egyszerű szövegszerkesztő programot, vagy megrajzolhatjuk AutoCAD segítségével és utána menthetjük DXF formátumba. Mi az utóbbit választottuk, és az egyszerűség kedvéért az egyvonalas modell mellett döntöttünk, így könnyebben azonosíthatjuk a különböző részekhez tartozó vonzási tereket. A modelljeink méreteinek meghatározásához nem egy mai szélturbinát vettünk alapul, hanem egy jövőbeni szélerőmű becsült méreteit. Ez azért fontos, mert így előrejelzést tudunk adni a jövőben épülő turbinák esetleges problémáira, illetve a lapát/torony méretarány növekedésével szintén elősegítjük a vonzási terek megkülönböztetését.

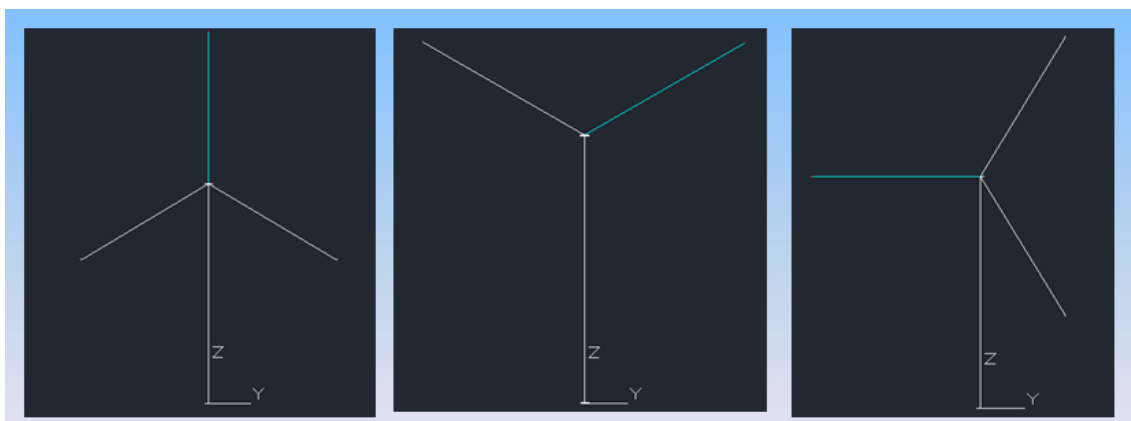


3-3. ábra - Szélturbinák méreteinek növekedése [7]

Ezek alapján a jövőbeni turbinák akár elérhetik a 180 m-es toronymagasságot, valamint a 250 m-es lapátátmérőt is. Mivel a segédprogramunk milliméteres beosztást használ, így a mi modellünk így 180 mm magas lett, 125 mm-es lapáthosszal, 0,5 mm-es felfogóval a lapátvégeken. Ahhoz hogy a vonzási tereket jól megkülönböztethessük, a felfogóhoz piros LAYER-t, míg a lapáthoz cían színű LAYER-t használtunk a DXF file-unkban. A megfelelő vizsgálhatóság érdekében nem csak egy modell készült, hanem három és mindegyik egy fő lapátállást reprezentál.

Modellek:

- "A" állás - Egyik lapát függőlegesen felfelé
- "B" állás - Egyik lapát függőlegesen lefelé
- "C" állás - Egyik lapát vízszintesen oldalra



3-4. ábra - A három lapátállás

A DXF life-on kívül létre kell még hoznunk a szimulálandó teret leíró PAR file-t. A file-nak tartalmaznia kell a tér méreteit, a vonzási tér típusát, a tér pontjainak sűrűségét, illetve a vonzási tér megjelenítésének paramétereit, az elkészítéshez egyszerű szövegszerkesztőt használunk. A PAR file kódja:

```
-350 * xmin
-350 * ymin
50 * zmin
350 * xmax
350 * ymax
500 * zmax
200 * nx, legfeljebb 200
200 * ny, legfeljebb 200
200 * nz legfeljebb 200
5 * ns, a síkmetszetek száma ábrázoláshoz
3 * a síkmetszet típusa: 1=xy, 2=xz, 3=yz
20 * a 3 koordináta értéke INDEXBEN, tehát 1..nx v. 1..ny, v. 1..nz értékű
1 * ábrázolás típusa: 1=csak vonzási tér 2=p.modulált vonzási tér
3 * a síkmetszet típusa: 1=xy, 2=xz, 3=yz
60 * a 3 koordináta értéke INDEXBEN, tehát 1..nx v. 1..ny, v. 1..nz értékű
1 * ábrázolás típusa: 1=csak vonzási tér 2=p.modulált vonzási tér
3 * a síkmetszet típusa: 1=xy, 2=xz, 3=yz
100 * a 3 koordináta értéke INDEXBEN, tehát 1..nx v. 1..ny, v. 1..nz értékű
1 * ábrázolás típusa: 1=csak vonzási tér 2=p.modulált vonzási tér
3 * a síkmetszet típusa: 1=xy, 2=xz, 3=yz
140 * a 3 koordináta értéke INDEXBEN, tehát 1..nx v. 1..ny, v. 1..nz értékű
1 * ábrázolás típusa: 1=csak vonzási tér 2=p.modulált vonzási tér
3 * a síkmetszet típusa: 1=xy, 2=xz, 3=yz
180 * a 3 koordináta értéke INDEXBEN, tehát 1..nx v. 1..ny, v. 1..nz értékű
1 * ábrázolás típusa: 1=csak vonzási tér 2=p.modulált vonzási tér
```

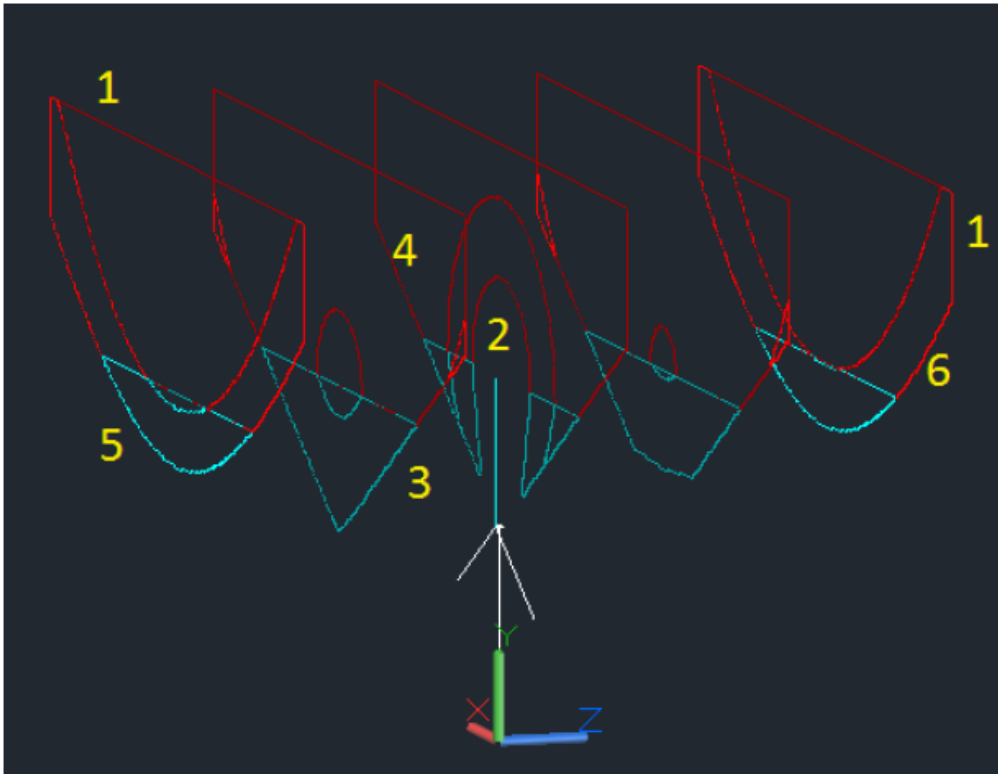
A szimuláció lefuttatásához, a programunk megnyitása után, a "Load DXF file" és a "Load params" parancsokkal bevisszük az elkészült file-jainkat. A program lehetőséget ad az elrendezés ellenőrzésére gördülő gömb módszerrel, a "Rolling Spere" gomb segítségével. Beállíthatjuk, hogy a szimulált villám paramétereit a magas épületeknél jelentkezővel (Tower) vagy lapos területeken tapasztalhatóval (Plane) egyezzen meg. A "Calculate" gomb megnyomásával a vonzási tér kiszámítása ténylegesen megtörténik, utána kiválaszthatjuk, hogy az eredményt DXF file-be mentjük, vagy MATLAB-os ellenőrzés céljából M kiterjesztésű file-ba.

The screenshot shows the PMAS program control interface. It includes several input fields and buttons for configuration. The 'Radius of rolling sphere [m]' is set to 100. The 'Ratio of + lightning' is 0.100000. The 'Im [kA]' is 61. The 's' value is 1.325000. The 'Override m[m]' is 120. The 'Bundled operation' section shows parameters: p=1.5, a=0.100000, b=0.699999, cp=1, cn=644, dp=31.60000, and dn=32.5. Below these is a table showing lightning strike frequency for different objects and current levels.

obj\I0	1 kA	2 kA	5 kA	10 kA	20 kA	35 kA	50 kA	100 kA	200 kA	300 kA
1(RED)	11797.538	10891.046	3872.6332	488.24383	0	0	0	0	0	0
2(CYAN)	1239.7484	976.95468	163.74037	0	0	0	0	0	0	0
3(BLUE)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4(Purple)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5(Yellow)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total:	13037.287	11868.001	4036.3737	488.24383	0	0	0	0	0	0

3-5. ábra - A PMAS program kezelőfelülete [8]

Az alul látható táblázatok cellái az úgynevezett egyenértékű területet adják meg. Ez az érték mutatja meg nekünk, hogy mekkora az a síkterület, melybe ugyanannyi az oszlop által megadott áramerősségnél nagyobb erejű villám fog becsapni egy év alatt.

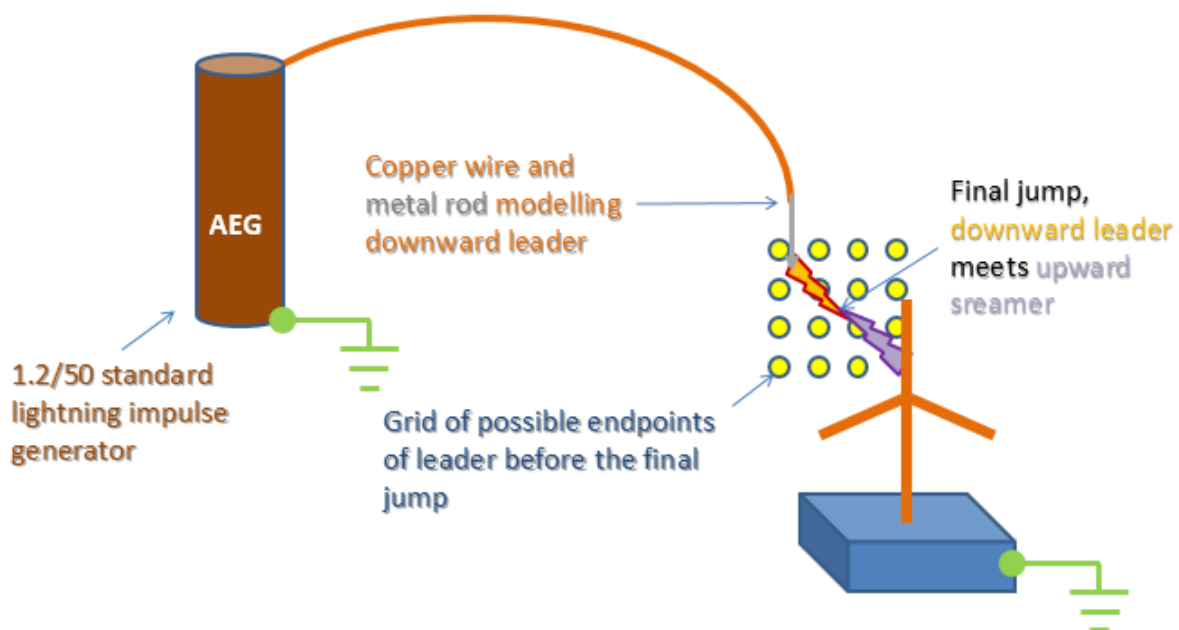


3-6. ábra - "A" lapátállás, függőleges lapát vonzási tere [8]

A DXF file-ba mentett szimulált vonzási teret AutoCAD programmal megnyitva vizsgáltuk meg. Az ábrán jól láthatóan elkülönül a lapát és a felfogó tere, a vonalak pedig a határoló felületeket jelképezik. Az 1-essel jelölt részek a szimulált tér maximális kiterjedéséből adódnak, a 2-essel jelölt félgömb pedig a minimális orientációs távolságból következik. A 3-as és 4-es vonalak a nem vizsgált lapát és a kiemelt részekről egyenlő távolságra lévő síkot adják meg. Az 5-ös és 6-os görbék pedig a kiemelt lapát, illetve felfogó és a föld között egyenlő távolságra lévő felületek.

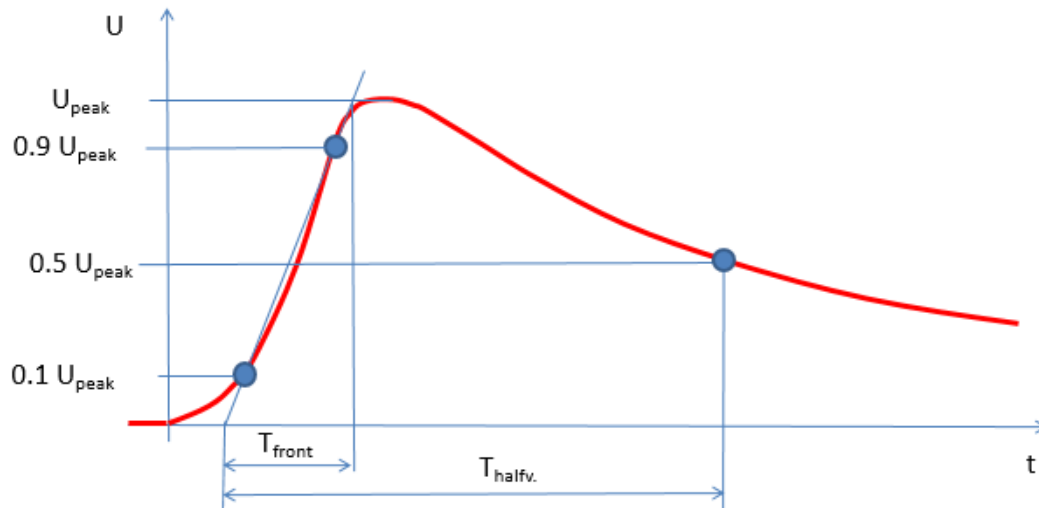
4. Laboratóriumi mérések elméleti alapjai

A PMAS programunk által kiszámított vonzási teret laboratóriumi körülmények között is ellenőrizzük, annak érdekében, hogy megbizonyosodjunk a helyességéről. Ezen méréseket a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Villamos Energetika Tanszék Nagyfeszültségű Laboratóriumában végeztük, az ott található 1 MV-os AEG gyártmányú lökésgerjesztővel. A mérési elrendezésünk a 4-1. ábrán található, a lökésgenerátor kimenete egy merev sárgaréz elektródára van kötve, ennek a végpontja lesz az orientációs pont. Ehhez képest mozgatjuk a szélturbina modellünket.



4-1. ábra - A mérési elrendezés [9]

A méréseink során egy a 4-2. ábrán látható standard 1,2/50-es impulzust használunk, ami azt jelenti, hogy az impulzus felfutási ideje (T_{front}) 1,2 μs , a féltrék idő (T_{halfv}) pedig 50 μs . Ez megfelel az IEC 60060-1:2010 szabványban leírt villámcsapáskor létrejövő feszültségimpulzusnak.



4-2. ábra - A lökésgerjesztővel előállított hullámforma [9]

A valóságban villámcsapás két féle módon jöhet létre a gyakoribb, amikor az előkiszülés a töltéssel rendelkező felhőből indul meg, és a föld felé tart, ez a lefelé irányuló villámcsapás. Amint az előkiszülés elég közel ér a szélturbinához, megjelenik az ellenkiszülés és létrejön az orientációs pont. A mérésünk során az orientációs pont rögzítve van az elektróda végén, így nem képes mozogni a villámáram függvényében, és ezzel sok eltérést kapunk a természetes esethez képest. A vizsgálatunk akkor pontos, ha az adott elektróda-modell távolságban akkora feszültséget hozunk létre a lökésgerjesztővel, hogy az átütés éppen létrejön. Ha ennél kisebb a feszültség, az átütés nem történik meg, ha viszont nagyobb, akkor az orientációs pont, ami messzebb lenne, a modell közelébe kényszeríti az elektróda, ezzel torzítva a vonzási teret. Ezt a feszültséget a lökésgerjesztő szikraközeinek állításával tudjuk szabályozni.

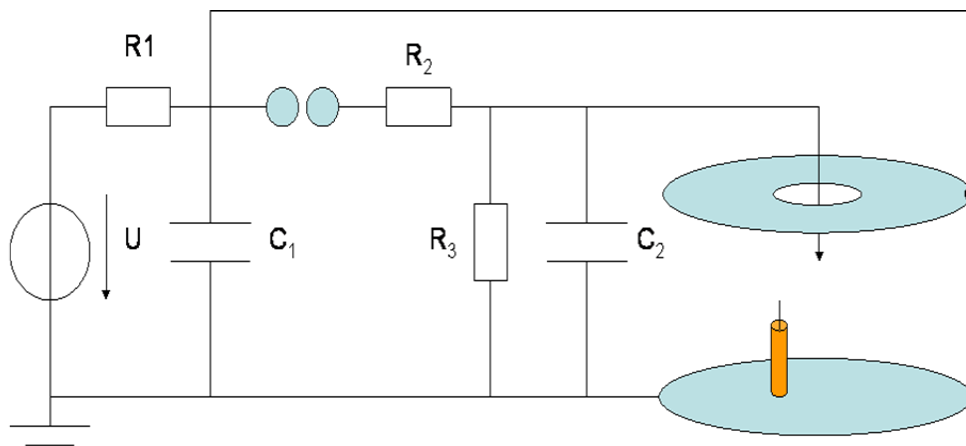


4-3. ábra – Felfelé irányuló villámcsapás [10]

Ha a szikraközöket elég nagyra állítjuk, akkor előfordulhat, hogy az előkisülés nem az elektródából indul meg, hanem a modellünkből, ez az úgynevezett felfelé irányuló villámcsapás. A természetben az ilyen villámcsapások a magasan elhelyezkedő, például hegytetőn lévő épületeknél szoktak kialakulni. Az ilyen típusú villámcsapásoknál nem tudunk orientációs pontot megállapítani ugyanis a kisülés közvetlenül a modellünkből indul, így vonzási térről sem tudunk ilyen esetben beszélni. Ettől függetlenül a felfelé irányuló villámcsapások a sérülések vizsgálata szempontjából igen fontosak lehetnek, tekintve hogy a kisülés a szélturbina lapátjából indul. Az elektródán és a levezetőn átfolyó nagy áramok miatt fellépő elektrodinamikus erőhatások során, az szélturbina jelentős sérüléseket szenvedhet. Illetve vannak olyan különleges időjárással rendelkező területek, például Japánban a Japán-tenger partvidékén, az úgynevezett „téli villámok esetén” a nagyméretű turbináknál a villámcsapások közel 100%-a felfelé irányuló villám.

Azon vizsgálatainkhoz, amit a felfelé irányuló villámcsapások tanulmányozásához készítünk, elengedhetetlenül szükséges, hogy a felhő töltését is képesek legyünk modellezni. Így korábbi kutatásokat alapul véve, ahol még a felhőmodellek használatban voltak, kialakítottunk

egy mérési elrendezést, amivel a későbbiekben a vizsgálatainkat végezzük. Ezt az elrendezést az alábbi ábrán láthatjuk:



4-4. ábra – A felfelé irányuló villámokhoz használt mérési elrendezés

Az ábrán jól látszik, hogy a lökésgerjesztő fokozat, kisütő elektródája köré egy fém gyűrű van illesztve, amire egyenfeszültséget kapcsolunk, és így modellezzük a felhő töltését. Ebben a kapcsolásban az egyenfeszültséget a lökésgerjesztő töltőfeszültsége adja. Az ábrán látható kapcsolással ellentétben a Nagyfeszültségű Laboratóriumban található lökésgerjesztők kaszkád kialakításúak, így nem egyértelmű hogy melyik fokozatról érdemes az egyenfeszültséget levennünk.

Úgy döntöttünk, hogy az első mérési sorozatunknál a felhő töltését jelképező fémlap, illetve a kisülést létrehozó elektróda azonos potenciálra kötjük. Nevezetesen a Nagyfeszültségű Laboratórium 750 kV-os TUR lökésgerjesztőének legfelső fokozatára kötjük. Ezzel a módszerrel nem feltétlenül a legpontosabban modellezzük a valós körülményeket, de megfelelő közelítéssel fogadható becslést tudunk adni arra, hogy a valós jelenségek hogy játszódnak le az általunk vizsgált esetben. A későbbiekben megpróbálunk pontosabb mérési elrendezést kialakítani, majd az azon elvégzett méréseket összehasonlítani a mostaniakkal.

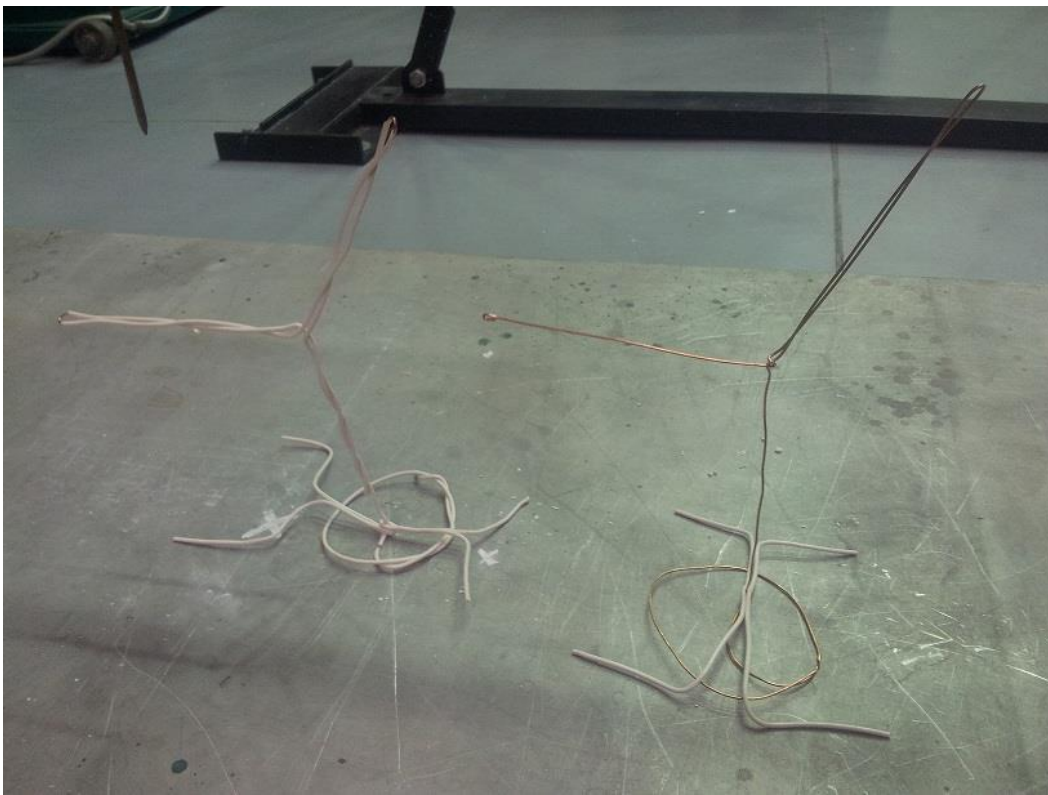
Ezen kívül érdemes még a méréseknél figyelembe venni, hogy milyen polaritású kisüléssel dolgozunk. Ahogy a 3-2. ábrán is látható a vonzási tér eltérő pozitív és negatív kisülés esetén. A negatív kisülés jobban keresi a csúcsokat így a vonzási tere is szélesebb, míg a pozitív kisülés vonzási tere szűkebb ugyanarra az objektumra nézve. A vizsgálatainkhoz elengedhetetlen hogy mind a két polaritással végezzünk méréseket, tekintve hogy a negatív villámcsapások a gyakoribbak, de a pozitív villámcsapások a kisebb vonzási terük miatt nagyobb eséllyel csapnak a védendő objektumba. Meg kell említenünk még a vegyes polaritású villámokat ahol a

villámcsapás többszörös kisülései közben polaritást váltanak. Fontos továbbá, hogy az eltérő polaritású villámcsapások különböző sérüléseket okoznak. Míg a negatív villámcsapásoknál gyakoribb a sok impulzussal rendelkező többszörös villám, addig a pozitív kisülések esetén gyakoribb a hosszabb ideig tartó, nagy energiát hordozó villámcsapás.

A fentiekből megállapítható hogy az egyszerűnek tűnő mérési összeállításunk mögött bonyolult folyamatok játszódnak le, és a vizsgálataink során rendkívül körültekintően kell eljárunk ahhoz, hogy a kapott eredményeik helyesek, és a valóságnak megfelelőek legyenek.

5. Előzetes kísérletek

Mint azt a fentiekben már említettem, a méréseinket a Villamos Energetika Tanszék Nagyfeszültségű Laboratóriumában végeztük. A vizsgálatainkhoz elengedhetetlenül fontos egy megfelelő modell készítése. A mi modelljeink között megtalálható két szélturbina modell, és egy rúd modell. A szélgenerátor modellekből az egyik csupasz vezetőből készült, míg a másik egy szigetelő burkolattal van ellátva, a rúd modellünkből csak szigeteltet készítettünk. A modelljeink mindegyike 1,5 mm átmérőjű rézvezeték-ből készült, ami mint azt később láthatjuk, az egyszerűsége ellenére meglepően jól modellezi a valóságot.



5-1. ábra – A szigetelt és szigeteletlen turbina modell [8]

A szigeteletlen modellünk úgy lett kialakítva, hogy a rézvezeték-ről lefejtettük a szigetelést, majd megfelelő formára hajtogattuk. A modellünknek csak két lapátját alakítottuk ki, de a karok szimmetrikussága miatt nem szükséges mind a hármat elkészítenünk. A hajlékony anyagának köszönhetően minden mérésnél beállíthatjuk az éppen szükséges lapátállást. A lapátok végét lekerekítettük, hogy jobban hasonlítson a valóságos szélgenerátor lapátra, és így kiküszöböltük a hegyes vezeték csúcshatásából létrejövő vonzási tér torzulást is. A modell méreteit tekintve 22,5 cm magas, a lapátok pedig 19,5 cm hosszúak.

A szigetelt modell annyiban különbözik az előzőtől, hogy fent hagytuk a szigetelését majdnem mindenhol. Ahhoz hogy a valóságoshoz a legjobban közelítsünk a modellünkkel, ki kell alakítanunk a felfogó elektródát is. Ezt úgy oldottuk meg, hogy a lapát végén megbontottuk a szigetelést így létrehozva egy kis vezető részt, ez modellezi a felfogó elektródánkat, ezen kívül megbontottuk a szigetelést a modellünk talpán is, hogy a vezető padlóval érintkezzen így le tudja vezetni a kisüléseket. Természetesen itt is behajlítottuk a lapátok végét, méreteiben megegyezik a szigeteletlennel.



5-2. ábra - A szigetelt rúd modell

A szigetelt rúd modellünk az előzőekhez hasonlóan 1,5 mm átmérőjű vezetékből készült, és 55 cm magas. A szigetelt szélturbina modellhez hasonlóan a szigetelés csak a modell csúcán

illetve a talpán van megbontva a kisülés levezetése érdekében. Ezen kívül használtunk még egy szintén 55 cm magas réz rudat, hogy a szigetelt rúddal mért eredményeinket össze tudjuk hasonlítani egy ugyanolyan, de vezető anyagból készült modellel.

Ahhoz hogy a modellünk illetve az orientációs pont helyzetét pontosan le tudjuk írni, szükségünk volt egy koordináta rendszerre, amiben ezeket elhelyezhetjük, és mozgathatjuk. A koordináta rendszerünk origóját, az elektróda földre vetített dőfspontjában határoztuk meg. Továbbá rögzítettük, hogy az X koordinátánk a lapátok síkjával párhuzamos vízszintes irány, az Y koordináta a lapátok által meghatározott síkra merőleges vízszintes irány, illetve a Z koordináta a függőleges irány legyen. Mivel az elektródánk rögzítve van, csak függőlegesen, Z koordináta szerint tudjuk mozgatni, ezért ha az orientációs pont X-Y síkban történő elmozdítására van szükség, akkor modellünket kell a mérések során arrébb helyezni. Az orientációs pontjaink precíz felvételét elősegítendő, készítettünk egy sablont, amire felrajzoltuk a vonzási teret, és felvettük az aktuális mérendő pontokat. A mérés során a kisülések árama nem volt akkora, hogy a beállított elrendezést képes lett volna deformálni, így az 50 kisülékes sorozatot folyamatosan magszakítás nélkül tudtuk lemérni.

5.1. Előzetes mérések - Összehasonlító kísérletek szigeteletlen és szigetelt modellen

A PMAS programba bevitt modellt a program a számítás során úgy kezeli, mintha az teljes egészében vezető anyagból készült volna. Így a kiszámított vonzási tér a szigetelés nélküli modellünk terével kell megegyeznie. A valóságban azonban a lapátok szigetelő anyagból készülnek, és csak a villámáram levezetők fém anyagúak, ezért jobban modellezi a valóságot, ha a próbatárgyunk lapátjait szigetelővel borítjuk. Az előzetes méréseink során ennek a szigetelő borításnak a hatását vizsgáltuk a vonzási térre.

A mérés előtt úgy döntöttünk, hogy elsősorban a 3-4. ábrán látható "C" lapátállásban vizsgálódunk. Méréseink során négy objektumot különböztetünk meg, ezek a bal felfogó, bal lapát, jobb felfogó és jobb lapát. Sajnos előfordult olyan mérési sorozat is, amikor a kisülés a helyett, hogy a felfogón keresztül záródott volna, vagy a szigetelő felületén végig futott volna, a szigetelő réteget átütve érte el a fém részt. Ez azért probléma, mert a sérülést okozó átütést követő összes kisülés, a sérült részen záródik, és ezzel hamisítja az eredményünket. Szerencsére a modellünket könnyen tudtuk pótolni, így nem nehézséget a mérések folytatása.



5-5. ábra – Az átütés során keletkezett sérülés

Miután a modellek pótlásának kérdése megoldódott, kezdetét vette a valódi mérés. A következőekben azt vizsgáltuk, hogy a vonzási tér hogyan változik a szigetelt lapátmodell esetében, ehhez részletesen fel kellett térképeznünk egy kitüntetett lapát vonzási terét. A "C" lapátállítás vízszintes lapátját választottuk erre a feladatra. A mérés folyamán az orientációs pontot jelképező elektródát csak X és Z koordináták mentén mozgattuk, tehát az Y koordináta minden mérési pontban 0. Minden pontban 50 kisülést hoztunk létre, aminek a polaritása ezúttal pozitív, mert ezek a kisülések kevésbé keresik a csúcokat, ezáltal nagyobb a valószínűsége hogy kárt okoznak. A mérés során 5 különböző pontot vettünk fel X koordináta szerint, ezek rendre 5,10,12,14,15 a távolságok természetesen cm-ben vannak megadva. Ezeket a pontokat 4 különböző rendre 33,35,37,39 cm magasságokban vettük fel. Így összesen 20 pontban vizsgálódunk, minden alkalommal szigetelt modellt használtunk.

Mérési pontok (X,Y,Z cm-ben)	Béérkezett találatok száma			
	Bal felfogó	Bal lapát	Jobb lapát	Jobb felfogó
15/0/33	46	4	0	0
14/0/33	37	13	0	0
12/0/33	27	24	0	0
10/0/33	1	10+6	0	0
15/0/35	47	3	0	0
14/0/35	40	10	0	0
12/0/35	27	25	0	0
10/0/35	3	47	0	0
5/0/35	0	0+22	0	0
5/0/35 (újra)	0	3+44	0+5	0
15/0/37	44	6	0	0
14/0/37	38	15	0	0
12/0/37	18	33	0	0
10/0/37	3	48	0	0
5/0/37	0	0	0+10	0
15/0/39	54	2	0	0
14/0/39	40	13	0	0
12/0/39	24	28	0	0
10/0/39	7	43	3	0
5/0/39	0	4	3+16	0

5-4. táblázat – A negyedik mérés eredménye

A táblázat értelmezése: A táblázat első oszlopa tartalmazza az orientációs pont helyzetét a koordináta rendszerünkben, a számok rendre az X/Y/Z koordinátákat jelölik. A többi oszlopban lévő szám adja meg hogy hány kisülés érkezett a modellünk adott részébe, illetve a "+" jel utáni szám a szigetelő átütése utáni kisüléseket jelenti. Az X= 5 cm, Z= 33 cm koordinátájú pontban nem végeztünk mérést, tekintve hogy az X= 10 cm-es pontnál is hamar átütés keletkezett. Feltételezhetjük, hogy a közelebbi pontban is hasonló lenne az eredmény. Az X= 5 cm, Z= 35 cm-es pontnál az első alkalommal azonnali átütést tapasztaltunk, ezért úgy döntöttünk, hogy ebben a pontban megismételjük a vizsgálatot. A fent említett pontban történő ismételt mérés során viszont érdekes jelenséget tapasztaltunk, az átütés után is volt olyan kisülés, ami ahelyett,

hogy a már sérült ponton keresztül záródott volna, a jobb lapát szigetelését átütve, új sérülést hozott létre és többször ezen keresztül jutott a földbe.

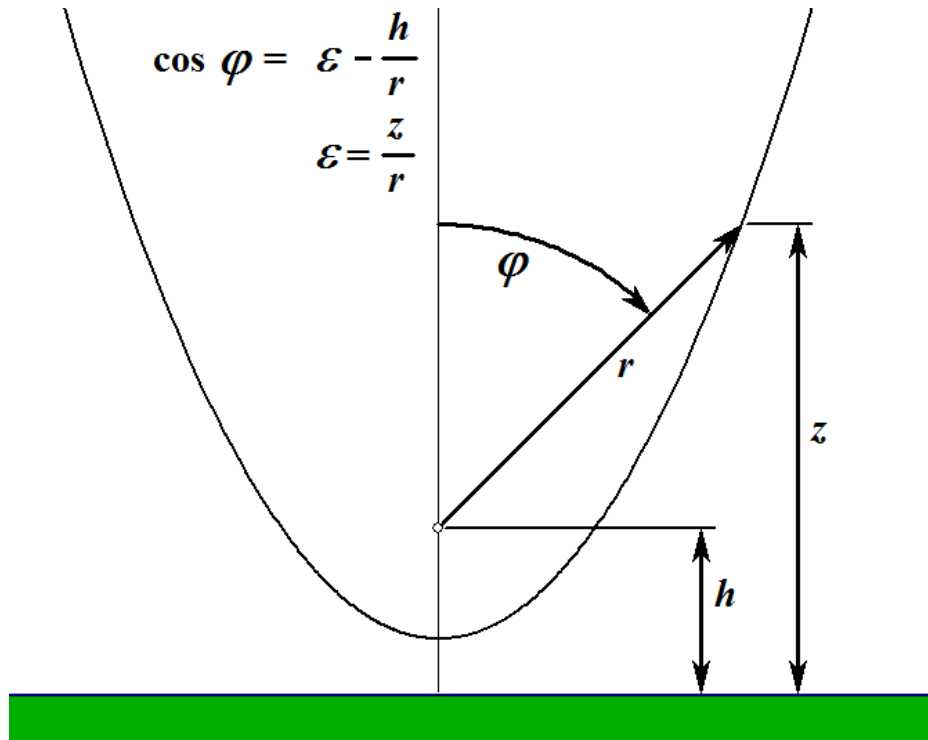
A vizsgálat során Y koordináta szerint is mozgattuk a modellünket, és így ellenőrzünk néhány orientációs pontot. Ezen kívül az egyik kijelölt pontban nem csak a megszokott "C" lapátállásban, de a másik kettő, eddig nem vizsgált állásban is végeztünk méréseket. A méréseknél a két lapáton és két felfogón kívül, egy ötödik objektumot is meg kell különböztetnünk, ez pedig a föld. Az előzőekhez hasonlóan itt is 50 darab pozitív polaritású kisülést hoztunk létre minden mérési pontban, viszont az orientációs pontok meghatározásához nem a megszokott X, Y, Z koordinátákat használtuk. Kijelöltünk 3 pontot, amiket csak a földtől, és a felfogóktól való távolságukkal jellemeztünk. Az 1. pontban az elektródánk csúcsa 31 cm-re van a földtől, és 35 cm-re mind a jobb mind a bal felfogótól. A 2. pontunknál a föld és mind a két elfogó 31 cm távolságban van. A 3. pontnál pedig a föld 31cm, míg a felfogók 28,5 cm távolságban vannak az orientációs ponttól.

Mérési pontok	Beérkezett találatok száma				
	Bal felfogó	Bal lapát	Jobb lapát	Jobb felfogó	Föld
1. pont "C"	1	0	0	0	49
2. pont "C"	1	17	16	0	19
3. pont "C"	2	33	17	0	0
2. pont "B"	4	15	19	8	6
2. pont "A"	0	0	47	1	2

5-5. táblázat – Az ötödik mérés eredményei

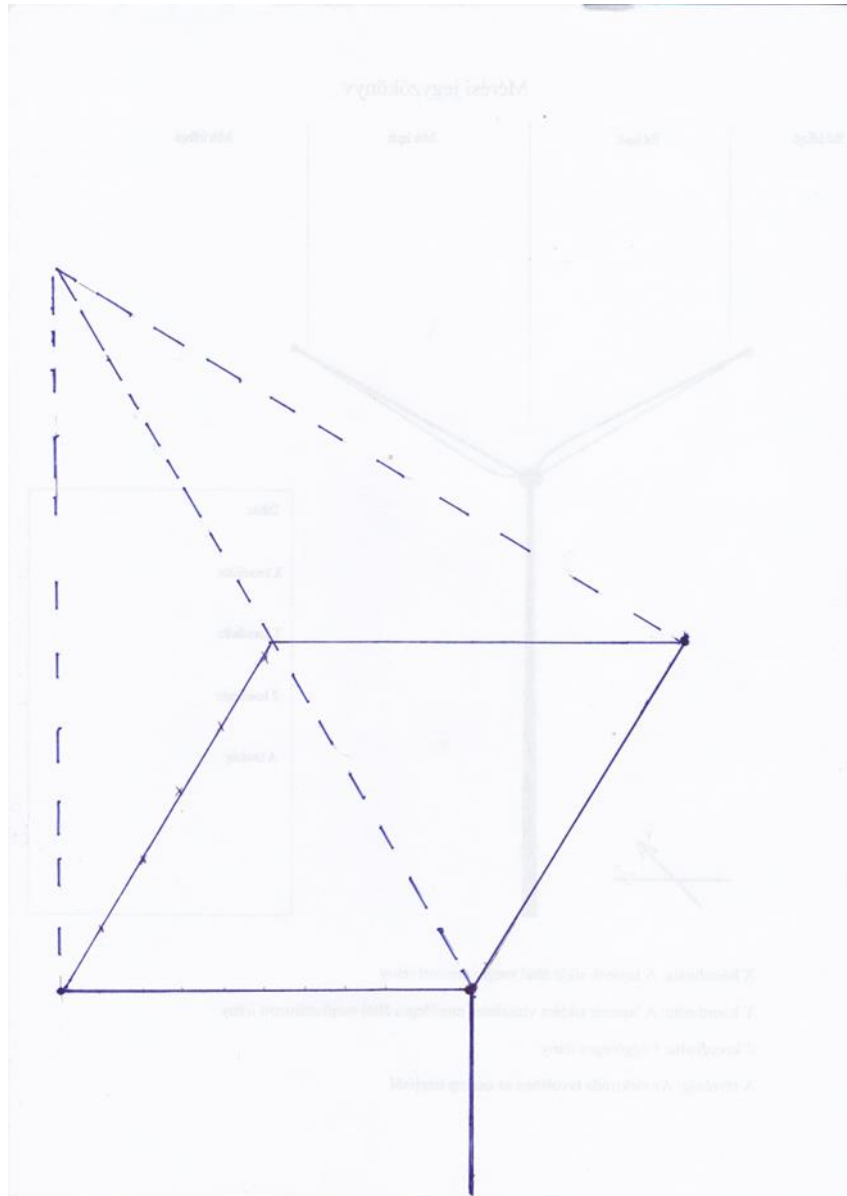
A táblázat értelmezése a korábban leírtakhoz hasonló, annyi különbséggel, hogy a mérési pontoknál megjelöltük a lapátállást is. Érdeemes megemlíteni az "A" lapátállással végzett mérést, itt a jobb lapát volt, amelyik vízszintesen felfelé állt. A vizsgálat során az elektródánk csúcspontja lejjebb volt a lapát legmagasabb pontjánál, de a legtöbb esetben a kisülés vízszintesen találta el a lapátot, majd a felszínén végigfutva a felfogón keresztül záródott. A jobb felfogót ért egyetlen közvetlen találatnál azt tapasztaltuk, hogy a kisülés nem az elektróda csúcsából, hanem a szárából indult ki, és szintén vízszintesen érte a felfogót.

A Dr. Horváth Tibor professzor úr által kidolgozott PMAS módszerben ϵ -al jelöljük azt a tényezőt, amely egy vonzási tér határvonalát írja le, egy arányszámmal.



5-14. ábra – Az ε kiszámítása [6]

A fenti ábrán látható az ε kiszámításának módja egy torony, vagy rúd esetében. Ha a vonzási térben lévő objektumok mindegyike fémből készült, tehát ugyanolyan mértékben vonzza a kisüléseket, akkor az ε értéke mindig 1. A PMAS program által szimulált esetben is ez a helyzet, de a szigetelt modell megváltozott vonzási terénél már az ε értéke is változni fog. Érdekes tehát a fentebb kiszámított négy határpontunkra is meghatározni az ε értékét. A mi esetünkben a Z távolság a pont és a lapát távolsága, míg az R, a pont és a felfogó távolsága. A szükséges adatok meghatározása után minden pontra külön kiszámoltuk az ε arányt, ezek rendre: 0,7773/0,8269/0,9006/0,9103. Ha a fenti eredmények átlagát vesszük, megkapjuk a legvalószínűbb ε értéket, ami 0,8537. Mivel az eredményül kapott arány 1-nél kisebb, tehát a Z távolság kisebb az R-nél, vagyis a vonzási tér határa a szélkerék közepe felé fog behajlani. Kijelenthetjük, hogy a szigeteléssel ellátott lapátunk vonzási tere valóban lecsökkent a szimulálthoz képest. Ezután a kapott ε értéket felhasználva, megszerkeszthető az új vonzási tér.

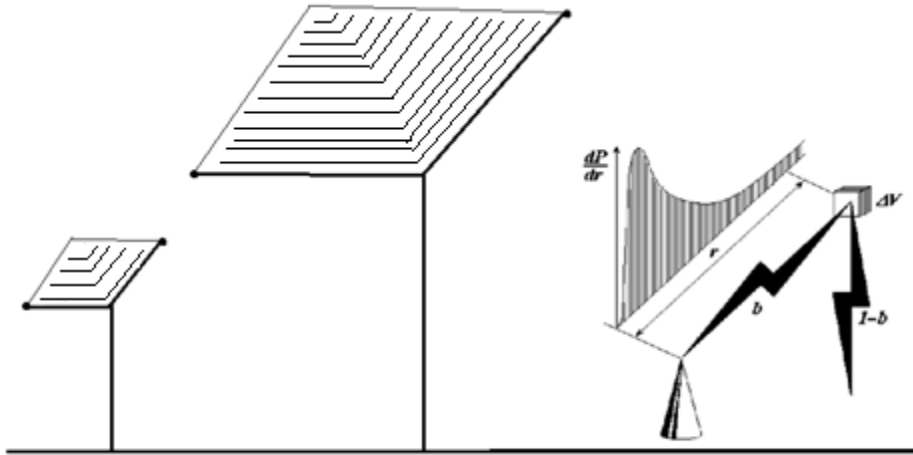


5-15. ábra – A lecsökkenet vonzási tér

Az ábrán látható esetben, a lapát végétől mérve két centiméterenként meghatároztuk a tér határán lévő pontot, és ezeket összekötve rajzolódik ki a vonzási tér. A számításokat csak a vízszintes lapátra végeztük el, de a szélkerék szimmetrikus volta miatt feltételezhetjük, hogy a másik lapát esetén is hasonló eredményt kapunk. Az ábrán jól látható, a szaggatott vonallal jelölt eredeti vonzási tér, és a lecsökkenet közötti különbség.

A becsapási valószínűség nem csak és kizárólag a vonzási tér alakjától függ, fontos befolyásoló tényező még a szélturbina fizikai mérete, magassága. Ezt a függést a dp/dr érték írja le. (3-1 képlet)

Ennek következtében két ugyanolyan felépítésű, de eltérő nagyságú szélturbinának, még ha a vonási térük alakja meg is egyezik, a lapátokba csapási valószínűség jelentősen eltérhet. Egy kicsi, háztartási méretű szélgenerátornál a becsapási valószínűség, szinte elhanyagolható, míg egy nagy energiatermelő szélkeréknél ez a valószínűség már jelentős



5-16. ábra - A dP/dr -el súlyozott vonzási tér [11]

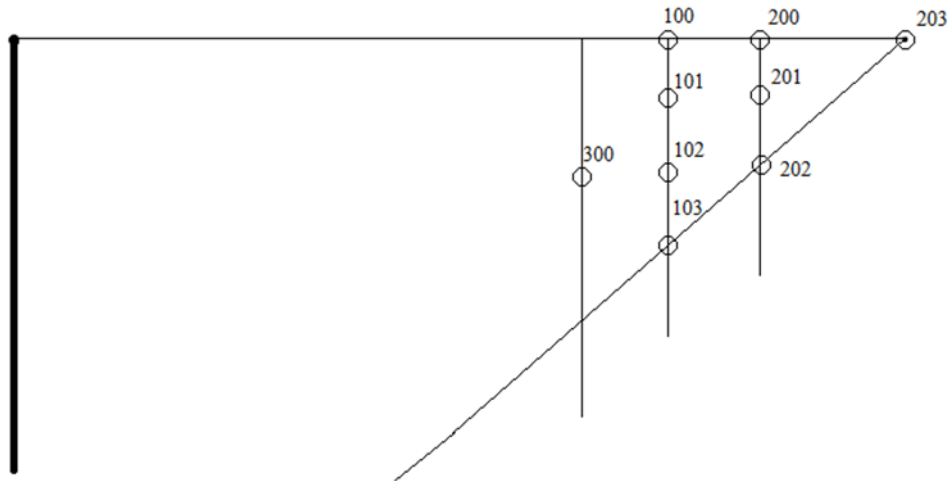
Kijelenthetjük tehát, hogy a szélgenerátorok méretének növekedésével megnő a valószínűsége annak is, hogy a lapátokat villámcsapás éri, bár bizonyos turbinamagasság felett egyre több lesz a lapát végéből induló, felfelé haladó villám.

5.2. Előzetes mérések - Kísérletek szigetelt és szigeteletlen rúdon

A szélturbina modellen elvégzett mérések után úgy döntöttünk, néhány vizsgálatot egyszerű szigetelt illetve szigetelés nélküli rúdon is érdemes lenne elvégezni. Úgy gondoltuk hasznos lehet megvizsgálni a Dr. Horváth Tibor professzor úr által kiszámított vonzási tér alakját az orientációs távolsággal összemérhető rúd esetére. Így visszaigazolást kapunk a korábban mért, és megállapított vonzási tér változásra szigetelő jelenlétében, illetve ilyen magas rúdnál megvizsgálhatjuk a rúd oldalába érkező villámcsapások kialakulásának feltételeit és valószínűségét is.

A mérési sorozatban az orientációs távolsággal összemérhető 55 cm magas szigetelt és szigeteletlen modellt használtunk. Ez az elrendezés különösen magas toronyszerű épületeket, illetve magas helyre, pl. hegytetőre épült épületeket modellez. Feltételezésünk szerint ilyen esetekben számolni kell azzal, hogy létrejöhöz olyan kisülés, ami a rúd csúcsa helyett az oldalát

találja el. A valóságban az ilyen kisülések nagyon veszélyesek lehetnek, tekintve hogy az épületek oldalán nem található villám felfogó és levezető rendszer, illetve a becsapás közelében akár emberek is tartózkodhatnak.



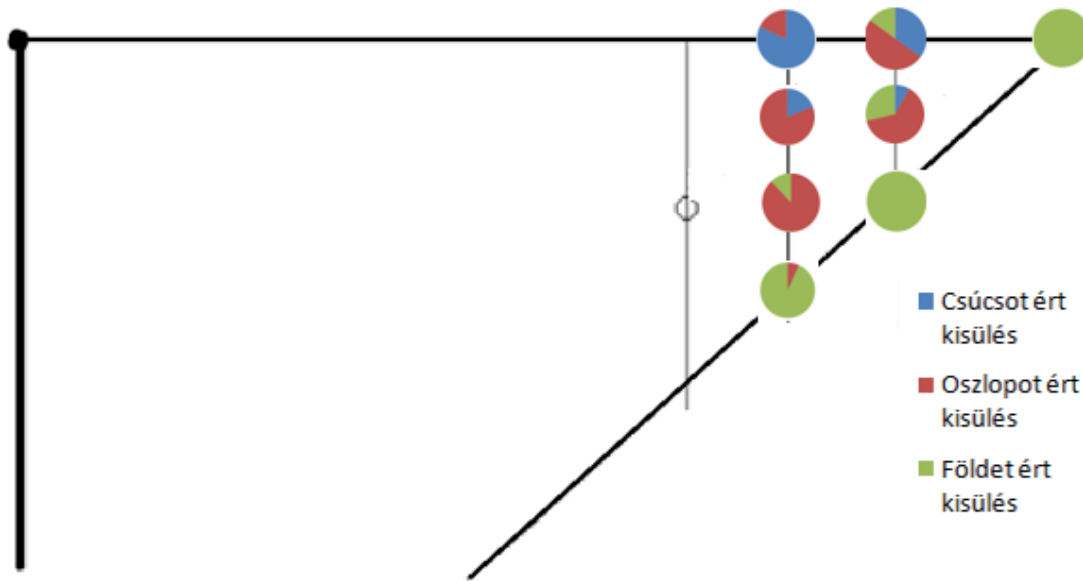
5-9. ábra – A vizsgált orientációs pontok, nagy rúd esetén

Ahogy az ábrán is látható az orientációs pontok kijelölésénél arra a térrészre koncentráltunk ahol a felfogó, a rúd és a föld vonzási tere találkozik. A vizsgálatunk célja az volt, hogy kiderítsük szigeteletlen esetben a vonzási tér eltér-e az elméletitől, és ha igen mennyire, illetve ennek függvényében milyen változást tapasztalunk szigetelt esetben. A vizsgálatokat a megadott pontokra a szokásos módon végeztük el, 50 darab pozitív polaritású kisüléssel. Az elrendezés itt is körszimmetrikus, a szikraközt az első mérés előtt 17 mm-re állítottuk, de a későbbiekben volt olyan helyzet ahol nem jött létre átütés, ekkor néhány milliméterrel megnöveltük a közt.

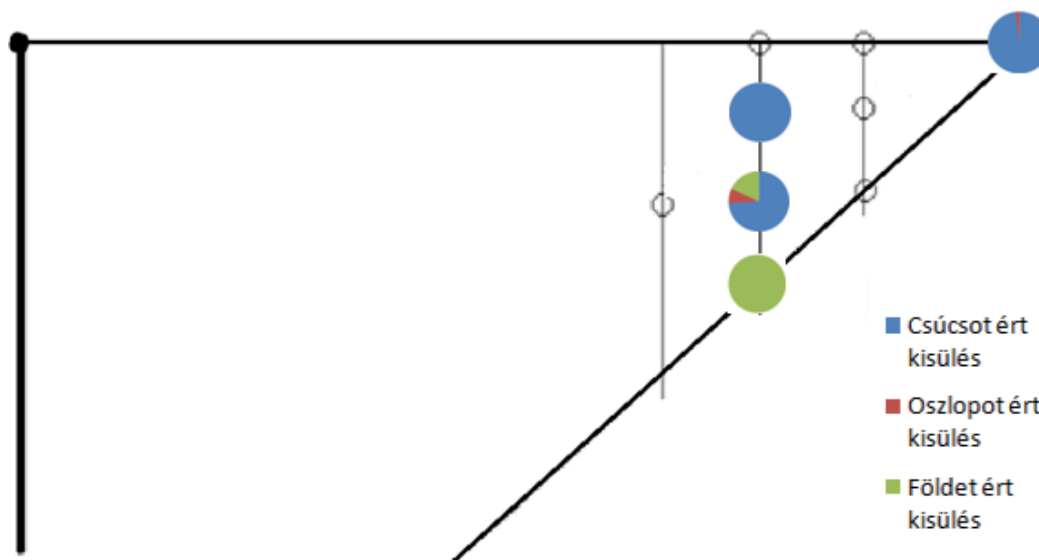
Mérési pont	Szigetelés	Csúcsot ért kisülés	Oszlopot ért kisülés	Földet ért kisülés
100	Nincs	41	9	0
101	Nincs	10	42	0
102	Nincs	0	44	6
103	Nincs	0	3	47
202	Nincs	0	0	50
201	Nincs	4	31	14
200	Nincs	21	30	9
203	Nincs	0	0	50
103	Van	0	0	50
102	Van	37	4	9
101	Van	50	0	0
300	Van	46	13	0

5-7. táblázat – A nagy rúdon végzett mérés eredményei

Több érdekes eredményt is kaptunk a mérések során. Szigeteletlen esetben többnyire az elvárásainknak megfelelően alakultak az eredmények. A 200-as pontban meglepően nagy az oszlopot ért kisülések aránya, attól függetlenül, hogy ezt a mérést egyszer megismételtük az elektróda kismértékű elmozdulása miatt. A szigetelt esetben még ennél is érdekesebbek az eredmények. Az első meglepő tapasztalatunk az volt, hogy az 50 kisülés leadása után a modellünk szigetelése statikusan jelentősen feltöltődött. Erre magyarázat lehet, hogy volt olyan a mérés során hogy nem jött létre átütés, akkor azonban korona kisülés végbemegy, ami feltöltheti a szigetelést. Ezen kívül meglepően nagy a csúcsot ért találatok arány már a földhöz egész közeli 102-es pontban is. Végül pedig a 300-as mérőpontban már olyan közel jutott az orientációs pont a modellünkhöz, hogy előfordult olyan kisülés, ami nem az elektróda csúcsából indult, hanem annak a szárából. A szemléletesség kedvéért készítettünk egy olyan ábrát ahol minden mért ponthoz egy kördiagramot rendeltünk, amin színekkel jelöltük azt, hogy milyen arányban éri a kisülés a felfogót, oszlopot vagy a földet.



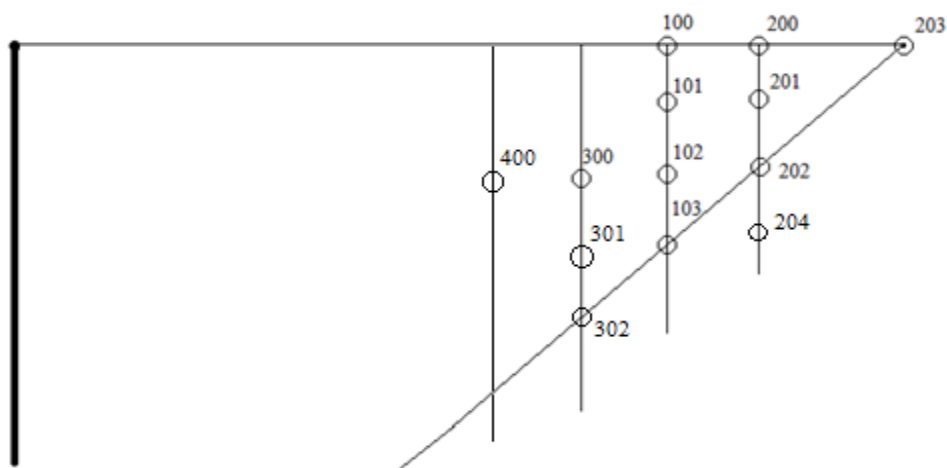
5-10. ábra – A kisülések eloszlása, szigetelés nélküli rúd esetén



5-11. ábra – A kisülések eloszlása, szigetelt rúd esetén

Az ábrákból jól látszik, hogy a szigetelt esetben jelentősen lecsökkent a rúd oldalát ért találtak száma, még az olyan pontokban is ahol egyértelműen az oszlop vonzási terében van az orientációs pont.

A harmadik mérési sorozat nagyon hasonló az előtte elvégzethez, annyi különbséggel hogy itt csak a szigetelés nélküli modellel mértünk, illetve a kisülések polaritását negatívrá változtattuk.



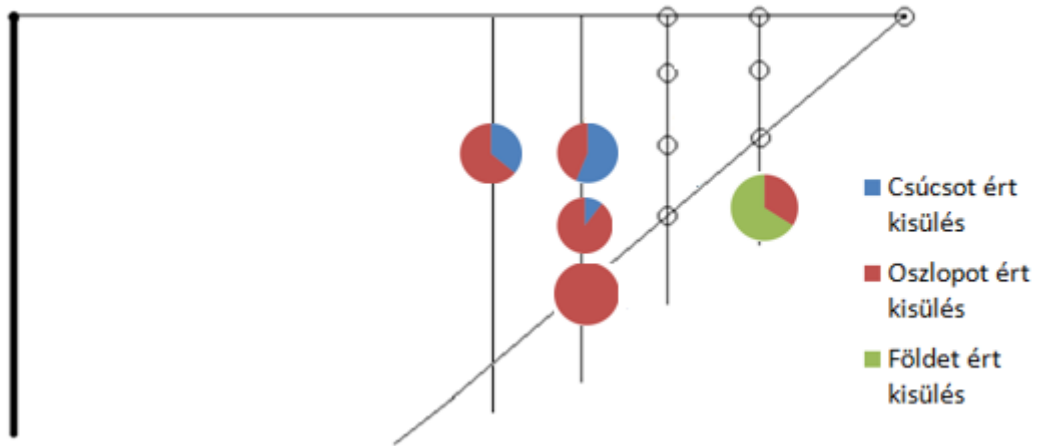
5-12. ábra – Vizsgált orientációs pontok, nagy rúd esetén, negatív polaritással

A 5-12. ábrán jól látható hogy az előző mérési sorozathoz képest felvettünk még néhány pontot a vizsgált terünkben, és azon kívül is. A mérés során minden alkalommal 50 db kisülést hoztunk létre. Az első mérési pontban (203) észrevettük, hogy a kisülések nem minden alkalommal az elektróda csúcsából indulnak ki, hanem előfordult, hogy az elektróda oldalának különböző pontjaiból. Ezért készítettünk egy 45°-ban hajlított szárú elektródát, így biztosak lehetünk abban, hogy a kisülés a kívánt pontból induljon. A mérési sorozat elején a szikraközt 20 mm-re állítottuk, de ahol szükség volt rá ott megnöveltük 27 mm-re.

Mérési pont	Szikraköz	Csúcsot ért kisülés	Oszlopot ért kisülés	Földet ért kisülés
300	27mm	33	18	0
300	20mm	27	21	0
400	20mm	18	32	0
301	20mm	5	42	0
302	20mm	0	50	0
204	27mm	0	17	33

5-8. táblázat – A harmadik nagy rúdon végzett mérés eredményei

Az első érdekesség a már említett, az elektróda oldalából kilépő kisülés volt, ezen kívül megfigyeltük, hogy a rúd vonzási tere itt is lecsökkent, nagymértékben be kellett hatolnunk az elméleti vonzási térbe ahhoz, hogy egyáltalán tapasztaljunk ilyen kisülést. Megállapítottuk, még hogy nem csak a rúd vonzási tere csökkent, de a földé is nagymértékben torzult. A 302-es pontban elvileg a két vonzási tér határfelületén voltunk, mégsem tapasztaltunk földbe érkező kisülést, illetve a 204-es pontban ahol már bőven a föld vonzási terében voltunk még nagy arányban érték az oszlopot is kisülések. Ehhez a méréshez is készítettünk kördiagramos ábrát.



5-13. ábra – A kisülések eloszlása szigeteletlen rúd esetén, negatív polaritásnál

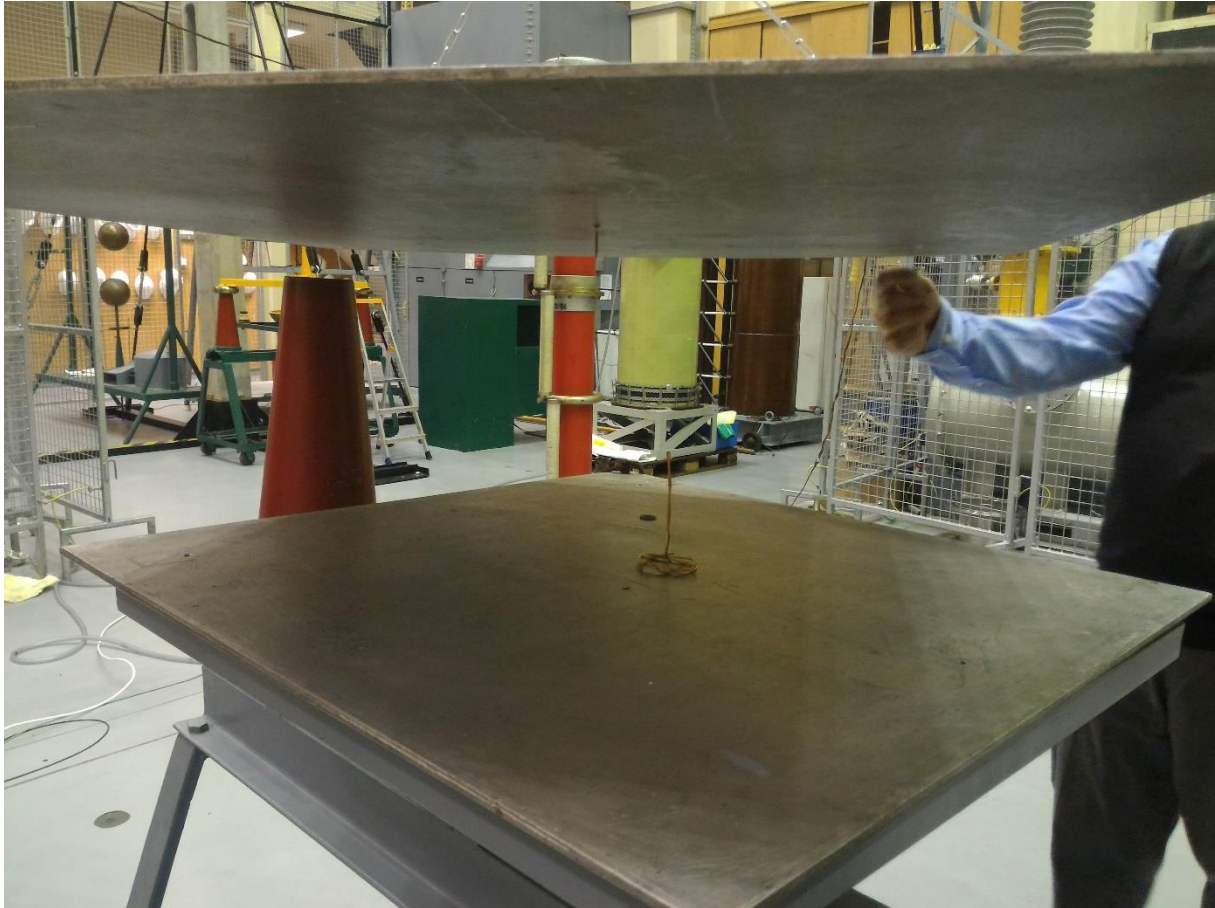
A szigetelő és szigeteletlen rúdon való méréseinkből kiderült, hogy nem csak az olyan közelmúltban elterjedő bonyolult kialakításoknál, mint a szélturbina van lehetőség a villámvédelmi rendszerek fejlesztésére, hanem olyan egyszerű építményeknél is, mint a magas toronyházak. A méréseink rávilágítottak arra, hogy ilyen épületeknél nem csak a tetőn elhelyezett villámvédelmi felfogót érheti becsapás, hanem az épület oldalát is, ami nagy veszélyeket rejt magában.

6. Felfelé irányuló villámcsapások kialakulásának laboratóriumi vizsgálata

A több receptoros mérések tervezésénél ütköztünk abba a problémába, hogy érdekes és hasznos lenne a vizsgálata nem csak a felfelé irányuló, de a felfelé irányuló villámcsapásoknak is. A szakirodalmi kutatásaink során nem talákoztunk azonban olyan módszerrel, ami elfogadottan, és valóságűen modellezi ezt a jelenséget. Ezért úgy döntöttünk érdemes lenne egy egyszerűbb modellel megvizsgálni azt, hogy egyáltalán milyen lehetőségei vannak a felfelé irányuló villámcsapások vizsgálatának laboratóriumi körülmények között, és ezek mennyire felelnek meg a valós körülményeknek.

Így igyekeztünk egy olyan mérési elrendezést kialakítani, ami szerintünk a legjobban modellezi a valós körülményeket, de eközben is ütköztünk néhány nehézségbe. Mint azt a 4. fejezet második felében már kifejtettem, az ehhez szükséges mérési elrendezés kifejezetten bonyolult, és a Budapesti Műszaki Egyetem Nagyfeszültségű Laboratóriumában nem áll rendelkezésünkre olyan berendezés, amely önmagában képes lenne megvalósítani az ott leírtakat. Így sajnos egyszerűsítésekhez kellett folyamodnunk a mérésünk során, úgy döntöttünk, hogy a [5]-es szakirodalomban is használt vizsgálati módszer vesszük alapul a saját kísérleteinkhez.

Természetesen változtattunk néhány részletet, annak érdekében, hogy jobban megfeleljen a mi céljainknak és laboratóriumi körülményeinknek. Első lépésként az összetett szélturbina modellt lecseréltük egy egyszerű, 10 cm magas réz rúdra, így körszimmetrikussá téve a méréseinket. A rúd modellt használva nem kell figyelembe vennünk azt, hogy a kisülés mely irányból közelít a modellünk felé, illetve a szélturbina különböző lapátállásait sem kell megkülönböztetnünk. Ezzel szemben a rúd modellre levont következtetéseinket könnyen tudjuk alkalmazni a szélturbina modellünkre is.

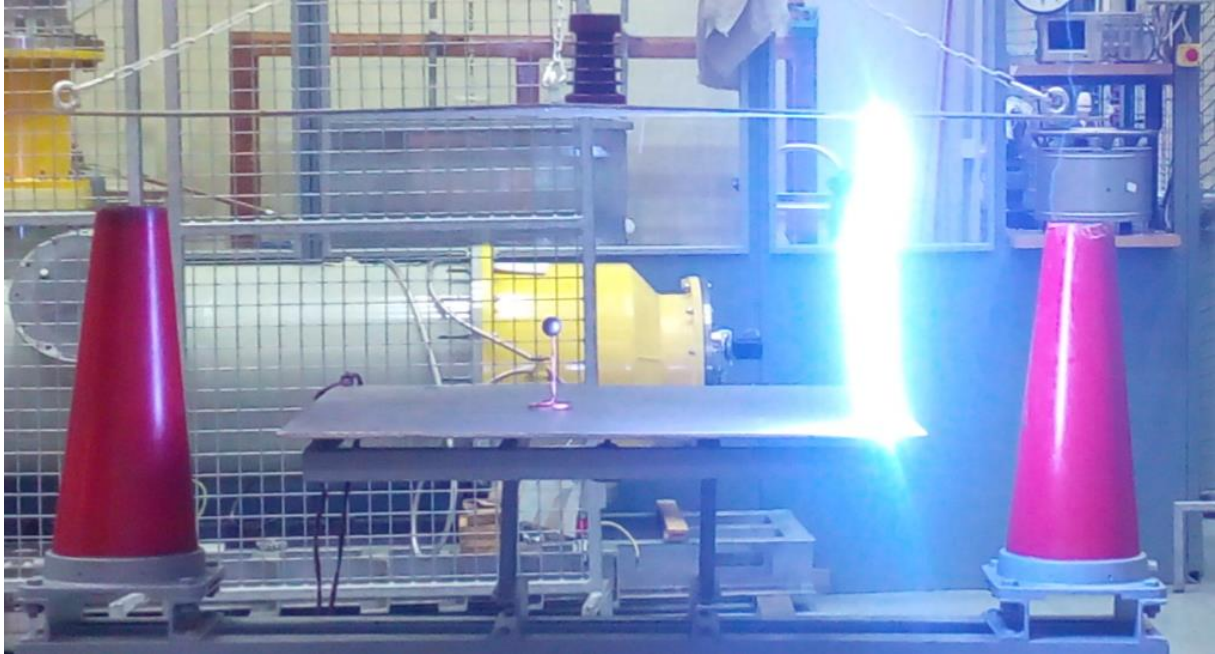


6-1. ábra – A mérési elrendezés

A méréseinkhez a Nagyfeszültségű Laboratórium TUR gyártmányú 750 kV-os lökésgerjesztőjét használtuk. A modellünket egy emelvényen elhelyezkedő földelt fém lapra helyeztük, fölé pedig egy másik alumíniumból készült lapot akasztottunk, majd a felső lapot a lökésgerjesztő kimenetére kötöttük. A felső fémlap modellezi a töltött felhőréteget a kísérletünkben, míg a megindult előkiszülést egy hegyes, 5 cm hosszú elektróda helyettesíti, amit egy mágnes segítségével rögzítettünk a fémlaphoz. Így az elrendezésünk annyiban tér el a 4 fejezetben részletezethez képest, hogy a felhő elektróda, és a csúcs elektróda nincs elválasztva egymástól, és mindkettő a lökőfeszültség generátorról érkező feszültség impulzust kapja meg. A mérések során úgy helyeztük el a két fémlapot, hogy köztük 32 cm távolságban, és egymással párhuzamosan helyezkedjenek el, hogy a lehető leghomogénebb villamos teret hozzák létre.

Az első két mérési sorozat alkalmával negatív feszültség impulzust adtunk a felső fémlapra. Az egyik esetben felhelyeztük az előkiszülést modellező hegyes elektródánkat a felső lapra és a rúd modellünket közvetlenül alá állítottuk, a másik esetben eltávolítottuk az előkiszülés elektródát. Mindkét alaklommal 25 kiszülést hoztunk létre és figyeltük, hogy ezek honnan indulnak és hova érkeznak. Hegyes előkiszülés elektródával vizsgálva mind a 25 kiszülés lefelé

irányuló volt az elektróda csúcsából indult, és a rúdmodell csúcsába érkezett. Előkisülés elektróda nélkül minden kisülés a modellünk csúcsából indult, és a felső lapba érkezett, így felfelé irányuló villámcsapásnak tekinthetjük.



6-2. ábra – A modellt elkerülő kisülés

A harmadik méréstől kezdve minden esetben pozitív feszültség hullámot adtunk ki, ebből is 25-öt minden elrendezés esetén. Az első ilyen esetben előkisülés elektróda nélkül, vizsgáltunk, és azt a meglepő eredményt kaptuk, hogy az összes kisülés elkerülte a modellünket, és a felső fémlapból közvetlenül az alsó fémlapba érkezett. Ez azt jelenti, hogy a kisüléseink 32 cm-es légréteget ütöttek át, ahelyett hogy a modellünk csúcsába érkeztek volna, ami csak 22 cm-es levegőréteget jelent. Ez a jelenség hasonló ahhoz, mint amit a [5]-es szakirodalomban is tapasztaltak, úgy döntöttünk, hogy ezt érdemes jobban megvizsgálni.

A negyedik mérés során a modellünk csúcsára egy 1 cm sugarú réz gömböt helyeztünk, nagymértékben lekerekítve ezzel, de az eredmény így sem változott. Ezek után megpróbáltunk más eredményt elérni azzal, ha a modellünket elmozgatjuk a fémlapok középpontjából. Megfigyeltük az előző mérések alkalmával, hogy sok kisülés jön létre a két fémlap szélé közelében, így az ötödik mérés során a modellünket is ide helyeztük. Az eredményen ez az áthelyezés sem változtatott, az előbbiekhöz hasonlóan mind a 25 kisülés elkerülte a modellt, bár tapasztaltunk egészen közeli becsapásokat is.



6-3. ábra – A földelő csatlakozóhoz közel helyezett modell

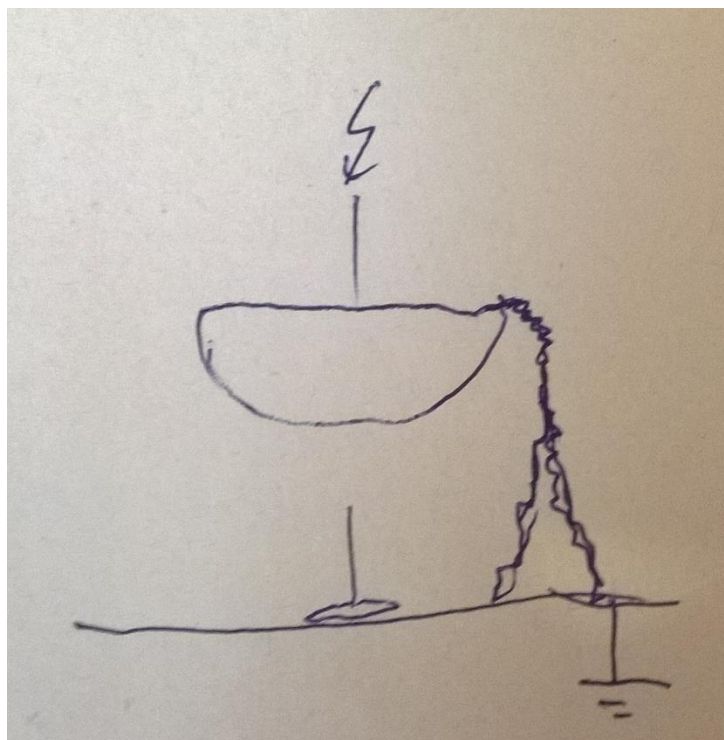
Megfigyeltük, hogy több kisülés érkezik abba a pontba, ahol a földező vezetékünk csatlakozik az alsó elektródához, a csatlakozás miatt, itt egy kis kiemelkedés található, az amúgy sík fémlapon. A hatodik mérésünk során ennek a pontnak a közelébe helyeztük a modellünket, és így a 25 kisülés mindegyike a rúd csúcsát érte. Ezen kívül megfigyeltük, hogy a kisülések többsége függőlegesen indul felső fémlapból, majd a modellünk közelébe érve kanyarodik a modell csúcsához.

Ezek után megpróbáltunk megkeresni egy olyan pontot ebben az elrendezésben ahol tapasztalunk modellt érő, és modellt elkerülő kisüléseket is. Ezt a pontot a földelő vezeték csatlakozásától a fémlap középpontja felé 18 cm-es távolságban találtuk meg. Itt a 25 kisülésből 14 a modell csúcsát érte, és 11 az alsó fémlapot. A modellünk tetejéről eltávolítva az 1 cm sugarú gömböt, az arány 7 és 17 -re módosul, az előbbi sorrendben, illetve tapasztaltunk egy olyan kisülést, ami egy szerez érte a modell csúcsát és a mellette lévő lapot is.



6-4. ábra – Elrendezés Rogowsky elektródával

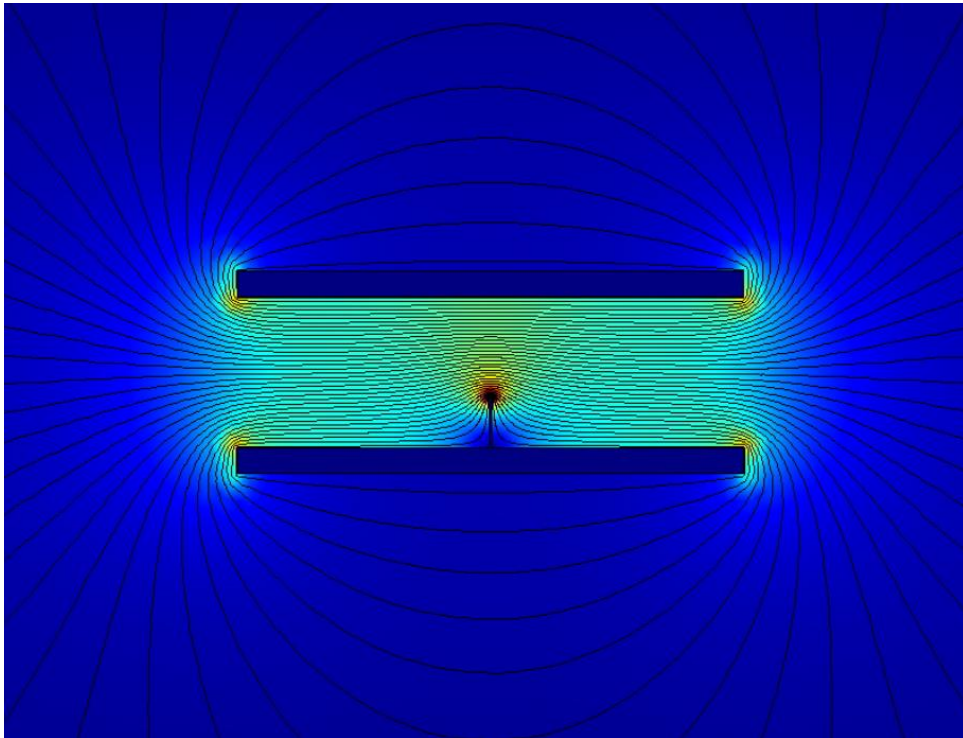
A létrehozott villamos tér még homogénebbé tétele érdekében az utolsó mérés során a felső fémlapot egy Rogowsky elektródára cseréltük, és a modellt az elektróda középpontja alá helyeztük. A távolságot úgy állítottuk be, hogy az előző méréseknél használt 32 cm-es elektródaköz itt is meglegyen, ahhoz hogy ebben az elrendezésben kisülést tudjunk létrehozni, meg kellett emelnünk a lökésgerjesztő feszültségét. Az eredmény így sem változott, minden kisülés elkerülte a modellt. Néhány kisülésnél még azt is megfigyeltük, hogy nem a Rogowsky elektróda aljából indul, hanem a felfelé mutató pereméből, és nagy ívet leírva éri a földelt lapot, így jelentősen megnövelve azt a levegőréteget, amit át kell ütni. Sajnos erről az esetről nem tudtunk felvételt készíteni, így csak utólag ábrázoltuk.



6-5. ábra – Az ábrázolt elkerülő kisülés Rogowsky elektródával

7. Konklúzió

A fentiekben leírt tapasztalatok értékelése érdekében készítettünk egy szimulációt ahol, 2 dimenzióban ábrázoltuk azt a kritikus elektróda elrendezést, ahol a váratlan eredményeket kaptuk. Megalkottuk a két fém elektródát, és a közte lévő modellt, és szimuláltuk a köztük lévő villamos potenciált és térerősséget, ehhez Comsol Multiphysics programot használtuk. Az ábrán színezéssel jelöltük a villamos térerősséget, és kontúrvonalakkal pedig az ekvipotenciális felületeket. A pirosra színezett részekből jól látható, hogy a legnagyobb térerősség a modellünk körül, illetve a lapok szélén jön létre, ez hozzájárulhat ahhoz, hogy a lap szélén alakult ki a legtöbb kisülés. Ezen kívül látható, hogy az, hogy a modellünk körül jelentősen megnőtt a térerősség, nem feltétlenül jelenti azt, hogy ott ki is alakul kisülés.



7-1. ábra – A pozitív polaritású síklap és földelt modell potenciál eloszlása, és villamos tere [12]

A további kutatásaink során kiderült, hogy ehhez hasonló jelenség ismert a nagyfeszültségű technikában, például olyan megszakítóknál, ahol sík-csúcs elektróda elrendezés található. De villámtnai kísérletek során történő megállapítása, és vizsgálata mégis újszerű eredmény. Ugyanis ezekből a tapasztalatokból levonható az a következtetés, hogy a felfelé kialakuló vilámcsapások vizsgálata ilyen típusú elrendezéssel, és lökésgerjesztő által létrehozott impulzussal, nem fedl a valós körülményeket. Így az ilyen vizsgálati eredmények sem felelnek meg a

valós körülmények között tapasztaltaknak. Az általunk alapul vett [5]-es számú tanulmány pozitív polarításra vonatkozó mérési eredményei és következtetései így szintén megkérdőjelezhetővé válnak. Az általuk nyújtott feloldás, miszerint felakasztották a modellt fejjel lefelé, és negatív impulzussal táplálták, szintén megkérdőjelezhető, ugyanis itt az elrendezés maga alapvetően nem tükrözi a valós körülményeket.

Az általunk javasolt megoldás ilyen vizsgálatra mindenképpen a 4-4. ábrán is bemutatott elrendezés, miszerint a felhő töltését modellező lap egyenfeszültséggel van táplálva, ezzel előfeszíti az elrendezésünket, majd a különálló csúcsos elektródára feszültség impulzust adunk. Sajnos ilyen mérést mi nem tudtuk elvégezni, mert a Nagyfeszültségű Laboratóriumban nincs olyan eszköz, amivel megfelelő nagyságú egyenfeszültséget tudnánk előállítani. A vizsgálatokat viszont mindenképpen érdemes lefolytatni, mert érdekes eredményekkel kecsegtetnek. Így későbbiekben tervezzük, hogy a mérést egy olyan laboratóriumban elvégezzük, ahol rendelkezésre állnak a szükséges eszközök, vagy beszerzünk a Nagyfeszültségű Laboratóriumba is megfelelő eszközt.

Köszönetnyilvánítás

Ezúton szeretnék köszönetet nyilvánítani a családomnak, barátaimnak, akik támogattak a kihívások leküzdésében. Köszönöm Dr. Németh Bálintnak, Cselkó Richárdnak, és Göcsei Gábornak hogy bátorítottak a Tudományos Diákköri Konferencián való részvételre. Köszönöm Dr. Horváth Tibor professzor úrnak a támogatását és szakértelmét. Elsősorban azonban konzulensemnek, Dr. Kiss Istvánnak tartozom köszönettel a rengeteg segítségért, a jó hangulatú és izgalmas mérésekért, és minden támogatásáért.

2016.október.26

Palotai Roland

Irodalomjegyzék

- [1] Renewable Energy Policy Network for the 21st Century (REN21), *Global Status Report 2016*,
http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2016/06/GSR_2016_Full_Report_REN21.pdf
- [2] Global Wind Energy Council (GWEC), *Global Wind Report - Annual Market Update 2015*,
http://www.gwec.net/wp-content/uploads/vip/GWEC-Global-Wind-2015-Report_April-2016_22_04.pdf
- [3] Hill Country Wind Power, Wind Basics, <http://www.hillcountrywindpower.com/wind-basics.php>
- [4] K. Bertelsen, H.V. Erichsen, M.V.R Skov Jensen, S.F. Madsen, "Application of numerical models to determine lightning attachment points on wind turbines" in International Conference on Lightning and Static Electricity, Paris, France, 2007
- [5] Søren Find Madsen, Hans V. Erichsen, "Numerical model to determine lightning point distribution on wind turbines according to the revised IEC 61400-24" in International Conference on Lightning and Static Electricity, Pittsfield, USA, 2009
- [6] Dr. Horváth Tibor, VE-2009, "Villám és villámvédelem" segédprogram, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, 2009
- [7] International Energy Agency, "Technology Roadmap - Wind Energy" in International Energy Agency, 9 rue de la Fédération, 75015 Paris, France, 2013
- [8] Kukucska Tamás, Szakdolgozat, "Szélerőművek villámvédelmének értékelése", Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, 2014
- [9] Dr. Kiss István, Szerző, „Introduction to lightning protection and protection of wind turbines and other renewable generation units”, Performance, 2015
- [10] Tom A. Warner, „Rare upward lightning videos reveal potential downward triggers”, Photo, 2012 <http://blogs.agu.org/geospace/2012/10/05/rare-upward-lightning-videos/>
- [11] Horváth Tibor, "Comparative Study on the Interception Concepts" in International Conference on Lightning Protection, Birmingham, United Kingdom, 1998
- [12] Tóth Zoltán, Szerző, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, 2016