

Регистрација и анализа параметара
експериментално одређених атмосферских
пражњења

Садржај

1. Увод	3
2. Електрични и метеоролошки параметри атмосферског пражњења	4
2.1. Електрични параметри	4
2.1.1. Амплитуда струје грома	5
2.1.2. Облик струје грома.....	5
2.1.3. Стрмина струјног таласа.....	7
2.1.4. Количина електрицитетета.....	8
2.1.5. Квадратни импулс струје грома или топлотни импулс комплетног пражњења....	10
2.1.6. Број пражњења у једном удару грома	11
2.2. Метеоролошки параметри.....	12
2.2.1. Општи метеоролошки параметри атмосферских пражњења	12
2.2.2. Број пражњења у електроенергетске објекте	
2.3. Ефекти атмосферских пражњења	
2.3.1. Оптички ефекти атмосферских пражњења	
2.3.2. Акустички ефекти атмосферских пражњења.....	
2.3.3. Механички ефекти атмосферских пражњења.....	
2.3.4. Термички ефекти атмосферских пражњења	
3. Приказ закона расподеле параметара грома.....	
3.1. Експоненцијални закон	
3.2. Логаритамско нормални закон	
3.3. Heidlerova формула	
3.4. Закон расподеле дефинисан према CIGRE Paris.....	
3.5. Закон расподеле дефинисан према IEEE.....	
4. Упоредна анализа метода за регистрацију параметара атмосферског пражњења на високим стубовима на различитим локацијама	16
4.1. Систем базиран на одређивању правца магнетског поља - MDF метода.....	18
4.2. Систем базиран на мерењу кашњења сигнала - TOA метода.....	19
4.3. Комбинована метода - MDF - TOA	20
5. Примери из праксе	25
5.1. Мерења у Швајцарској.....	25
5.2. Мерења у Бразилу	30
5.3. Мерења у Јапану.....	33
5.4. Мерења у Аустрији	34
5.5. Упоредна анализа извршених мерења.....	35
6. Закључак	39
7. Литература.....	40

1. Увод

Атмосферско пражњење је један од главних узрока кварова у електроенергетској мрежи који за крајњу последицу имају прекид напајања потрошача. Атмосферски пренапони који се јављају на надземним водовима могу настати на различите начине. То може бити удар у земљу поред вода, при чему се пренапони индукују на проводницима, удар у заштитно уже надземног вода или у врх стуба, након чега може доћи до повратног прескока на фазни проводник. Најопаснији су директни удари у фазни проводник, који настају веома ретко, али су ипак могући.

Атмосферски пренапони, који настају због атмосферских пражњења у надземне водове веома су чест узрок прескока на изолацији водова који могу проузроковати пролазне кварове који се успешно елиминишу операцијом аутоматског поновног укључења (АПУ). Међутим, мањи број прескока може изазвати пробој изолаторских чланака, што доводи до слабења линијске изолације и појаве трајних кварова.

За истраживање атмосферских пражњења потребно је њихово посматрање у простору и времену. Тако можемо доћи до важних података као што су максимална и просечна вредност густине удара грома, промена параметара атмосферских пражњења у зависности од локације и годишњих доба. Помоћу тих посматрања и података о атмосферским пражњењима које нам пружају системи за њихово праћење, можемо повезати однос између атмосферских пражњења и догађаја у електроенергетским системима, а тиме и повећати сигурност и поузданост рада електроенергетског система у будућности.

Електроенергетски систем (ЕЕС) представља изузетно сложен скуп међусобно повезаних елемената у једну целину. У ширем смислу говорећи, састоји се од четири дела: производње, преноса, дистрибуције и потрошње. Сваки од поменутих делова обилује мноштвом електроенергетских елемената. Елементи ЕЕС-а су углавном сачињени од скупочених материјала, па им је због тога и цена висока. Квар неког елемента, који је настао као последица дејства пренапона може утицати на неки од основних захтева који се задају ЕЕС-у, а то је да обезбеди сигурно, поуздано и економично снабдевање потрошача довољним количинама квалитетне електричне енергије. Такође и материјалне штете, које могу настати услед квара, су огромне. Због тога се јавља потреба да се сваки елемент ЕЕС-а заштити, како би се број кварова свео на минимум и како би животни век сваког елемента био што дужи.

Праћење и надзор атмосферских пражњења у реалном времену и простору може бити ефикасно средство и значајна помоћ у вођењу ЕЕС-а. У свету се такви системи раширено користе и непрекидно усавршавају већ више од двадесетак година. Велике развијене земље су у потпуности покривене с више различитих система за локацију удара грома, док је и наша земља у скоријој прошлости такође покривена системом за праћење атмосферских пражњења (систем EUCLID).

2. Електрични и метеоролошки параметри атмосферског пражњења

Систематска мерења параметара атмосферских пражњења 60-тих до 80-тих година прошлог века вршена су у више земаља (Јужна Африка, Чехословачка, Италија, САД), али се као најрепрезентативнији резултати због дугог периода регистровања и великог броја узорака могу сматрати мерења у Швајцарској на брду Монте Сан-Салваторе на два телевизијска торња, под руководством професора Бергера. И данас се ти резултати мерења сматрају референтним и налазе се у званичним међународним документима. Снимања су рађена осцилоскопски, преко отпорничких шантова. На основу ових резултата су рађени анализе и статистички прорачуни атмосферских пражњења.

При процењивању угрожености објеката од атмосферских пражњења неопходно је познавати поједине електричне и метеоролошке параметре грмљавинске активности.

Основни електрични параметри атмосферског пражњења су:

- амплитуда струје грома,
- облик струје грома,
- поларитет струје атмосферског пражњења,
- стрмина струјног таласа,
- ударна количина електрицитета,
- количина електрицитета првог удара,
- укупна количина електрицитета комплетног пражњења,
- топлотни импулс комплетног пражњења,
- број појединачних удара у једном комплетном пражњењу.

Метеоролошки параметри атмосферских пражњења дају информацију о грмљавинској активности на неком подручју. Могу се поделити на две групе:

- општи метеоролошки параметри пражњења (кераунички ниво, густина пражњења),
- параметри пражњења везани за електроенергетске објекте (број пражњења у водове).

2.1. Електрични параметри

2.1.1. Амплитуда струје грома

Са становишта заштите најважнија величина је **струја грома** јер она приликом удара протиче кроз погођени објекат. Та струја није константна у времену, него она врло брзо нарасте до максималне вредности и даље постепено опада (приближно експоненцијално). Ова максимална вредност струје грома назива се **амплитуда струје грома**. Време од почетка појаве до постизања амплитуде струје називамо **челом грома**. Негативни удари грома стварају струјне таласе који се по облику могу релативно много разликовати. У првом пражњењу трајање чела негативног пробоја је 10-15 μs . При следећим пражњењима (ако постоје) трајање чела је пуно краће али струја опада спорије. Такође, при тим пробојима, амплитуда струје мања је него при првом пробоју.

Позитивни удари грома се обично састоје од једног пражњења које траје од 0,1-0,2 s. Трајање чела је релативно дуго и креће се од 20 до 50 μs , а амплитуда позитивне струје може нарасти и на више од 1000 kA па има разорније дејство. Амплитуда струје грома је најважнија величина јер се помоћу ње може израчунати пад напона који она ствара протичући кроз неки објекат на земљи коришћењем израза $U = I_g \cdot R$. Стога је она битна за прорачунавање заштите од грома.

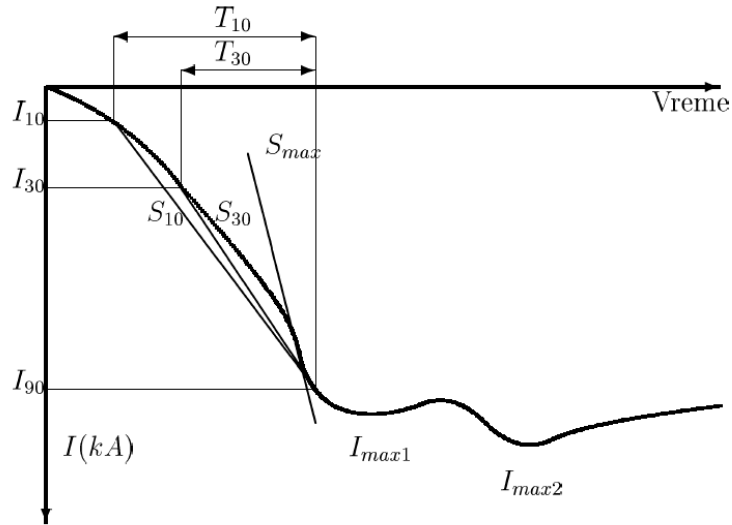
2.1.2. Облик струје грома

Најчешће су облаци носиоци негативног наелектрисања, тако да су и пражњења у већини случајева негативна. Када се пражњење одвија у ниске објекте или у земљу, тада је оно најчешће силазног карактера. Једино се код врло високих објеката (телевизијски торњеви, врло високе зграде) појављују узлазна пражњења иницирана са врха објекта.

Може се сматрати да је већина пражњења у електроенергетске објекте силазног типа и негативне поларности.

Утврђено је да се позитивна пражњења састоје из само једног удара. Позитивна пражњења су знатно ређа од негативних, али могу да имају разорније дејство због веће амплитуде струје главног пражњења.

На слици 2.1.2.1 дат је типичан временски облик негативног струјног таласа првог удара. На слици су дате дефиниције стрмине струје грома.



Слика 2.1.2.1: Дефиниција стрмине чела за типичан облик негативног силазног првог удара

На слици 2.1.2.1 ознаке имају следеће значење:

I_{10} - струја која има вредност 10% од првог максимума струје I_{max1} ,

I_{30} - струја која има вредност 30% од првог максимума струје I_{max1} ,

I_{90} - струја која има вредност 90% од првог максимума струје I_{max1} ,

T_{10} - временски интервал између тренутака када наступа I_{10} и I_{90} ,

T_{30} - временски интервал између тренутака када наступа I_{30} и I_{90} ,

S_{max} - максимална стрмина таласа која се појављује у било ком тренутку на челу,

S_{10} - средња стрмина таласа у временском интервалу T_{10} :

$$S_{10} = \frac{I_{90} - I_{10}}{T_{10}} \quad (2.1.2.1)$$

S_{30} - средња стрмина таласа у временском интервалу T_{30} :

$$S_{30} = \frac{I_{90} - I_{30}}{T_{30}} \quad (2.1.2.2)$$

Са слике 2.1.2.1 може се уочити да струјни талас има најчешће два максимума I_{max1} и I_{max2} . Све величине које дефинишу облик таласа са слике 2.1.2.1 одређене су у односу на први максимум.

2.1.3. Стрмина струјног таласа

Поред амплитуде струје грома веома важан параметар за анализу угрожености електроенергетских објеката од атмосферских пражњења представља стрмина струје грома на челу таласа. Стрмина струје грома представља такође случајну величину која има врло широк дијапазон вредности. Уочено је да техника мерења може да допринесе великим разликама у вредности статистичких параметара стрмине струје грома.

Стрмина струјног таласа или стрмина струје грома је брзина постизања амплитуде струје грома, а израчунавамо је тако да поделимо вредност амплитуде струје са трајањем чела таласа или као $s = \frac{di}{dt}$.

Она је за нас битна јер нагле промене струје стварају исто тако брзо променљива магнетна поља, а од брзине промене магнетног поља директно зависи величина напона који се индукује на објектима унутар тог поља. Што је већа стрмина струје грома индуковаће се већи напони и појавити веће струје на објектима у близини пражњења (објектима који не морају бити директно погођени громом). Ти напони добијају се из израза $U = L \frac{di}{dt}$. Ако тим објектима и не нашкоде индуковани напони и струје у њима, могу им нашкодити електромагнетне силе које се појављују због протицања струја кроз њих.

Приликом прорачуна громобранске инсталације мора се водити рачуна и о томе да силе на делове громобрана не буду превелике и не оштете сам громобран.

Амплитуда и стрмина струје грома су најважнији параметри за процену угрожености електроенергетских објеката. Остали параметри нису од толике важности за координацију изолације електроенергетских објеката. Параметри атмосферских пражњења могу имати вредности у веома широком опсегу, па је због тога неопходно статистички обрадити и представити их одговарајућим законима расподеле.

Данас се спроводи статистички поступак координације изолације, помоћу кога се процењује средњи број година без квара изолације (означава се са МТВФ од енглеског Mean Time Between Failures) и упоређује се са технички дозвољеним бројем година без квара.

2.1.4. Количина електрицитетa

Количина електрицитетa представља мерило енергије која се преноси атмосферским пражњењем. Ова величина је значајна за процену термичких ефеката ради спречавања топљења металних површина услед удара грома.

При разматрању количине електрицитетa атмосферских пражњења разликује се:

- Ударна количина електрицитетa,

$$Q_{ud} = \int_{t_{ud}} idt \quad (2.1.4.1)$$

која представља количину електрицитетa која протекне за време трајања ударне струје у временском периоду t_{ud} , а односи се само на део пражњења који се одликује брзом променом струје.

Ударна количина електрицитетa је укупно наелектрисање које се неутралише приликом једног удара $q = \int idt$, а обухвата струју скоковитог лидера и струју главног пражњења.

- Количина електрицитетa првог удара,

$$Q = \int idt \quad (2.1.4.2)$$

која обухвата и струју скоковитог лидера и струју након завршетка главног пражњења.

- Укупна количина електрицитетa комплетног пражњења,

$$Q_u = \sum_{i=1}^n \int idt \quad (2.1.4.3)$$

где је: n - број узастопних пражњења. Ова величина представља укупну количину електрицитетa која протиче у земљу у току свих n пражњења и обухвата дуготрајну струју пражњења која има знатно мању амплитуду, али релативно дуже трајање, а може се јавити пре и после главног пражњења.

У табlici 2.1.4.1 приказане су статистичке вредности количине електрицитета првог удара и укупне количине електрицитета комплетног пражњења под претпоставком да су и ове величине распоређене по логаритамско-нормалном закону.

У табlici 2.1.4.1 дати су параметри расподеле ударне количине електрицитета првих негативних, пратећих негативних и позитивног комплетног пражњења (које је увек једноструко). У табlici 2.1.4.2 дати су параметри расподеле количине електрицитета првих негативних пражњења, комплетних негативних пражњења и позитивних удара.

	$Q_{ud, sr} (C)$	$\sigma_{\ln Q_{ud}}$
Први негативни удари	4,5	0,87
Пратећи негативни удари	0,95	0,87
Позитивна пражњења	16	1,31

Табела 2.1.4.1: Параметри расподеле ударне количине електрицитета

Ознаке у таблицама имају следеће значење:

$Q_{ud, sr}$ - средња ударна количина електрицитета,

$\sigma_{\ln Q_{ud}}$ - стандардно одступање логаритма ударне количине електрицитета.

	$Q_{sr} (C)$	$\sigma_{\ln Q}$
Први негативни удари	5,2	0,93
Пратећи негативни удари	1,4	1,2
Пратећи комплетни удари	7,5	1,03
Позитивна пражњења	80	0,86

Табела 2.1.4.2: Параметри расподеле количине електрицитета комплетног пражњења

Q_{sr} - средња количина електрицитета,

$\sigma_{\ln Q}$ - стандардно одступање логаритма количине електрицитета.

Може се уочити да је количина електрицитета позитивних удара знатно већа од негативних.

2.1.5. Топлотни импулс струје грома или топлотни импулс комплетног пражњења

Топлотни импулс је величина значајна за процену количине топлоте која се ослобађа при протицању струје комплетног пражњења кроз проводнике одређеног пресека, као и за процену механичких ефеката струје грома.

Како се на месту удара при неутралисању наелектрисања ослобађа топлотна енергија, количина наелектрисања ће утицати на топљење врха громобрана или алуминијумског оклопа авиона. Та енергија се може добити као $E = qU_{ak}$, где је q неутралисана количина наелектрисања (најчешће вредности 50 As, до максимално 300 As), а U_{ak} катодни пад напона на месту удара (при додиру предводника пражњења са врхом громобрана ова вредност је око 10 V). Добијају се доста мале вредности, па су оштећења на месту удара мала, и то објашњава зашто се у природи тешко налазе места удара грома.

Струја грома је одговорна и за загревање проводника којима пролази. Прорачун загревања громобранске инсталације која проводи струју грома, врши се према изразу $E = R \int i_g^2 dt$, где је R омски отпор проводника, i тренутна вредност струје грома, а t време.

Густина расподеле вероватноће топлотног импулса $A = \int i^2 dt$ може се представити логаритамско-нормалном расподелом, чији су параметри приказани у табели 2.1.5.1.

	$A_{sr} (A^2 s)$	$\sigma_{\ln A}$
Први негативни удари	$5,5 \cdot 10^4$	1,38
Пратећи негативни удари	$6,0 \cdot 10^3$	1,38
Позитивна пражњења	$6,5 \cdot 10^5$	1,94

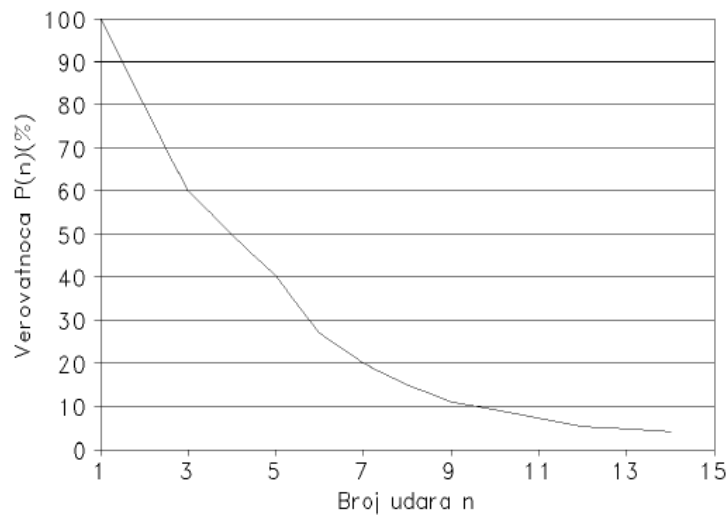
Табела 2.1.5.1: Параметри расподеле топлотног импулса $A = \int i^2 dt (A^2 / s)$

Може се уочити да је топлотни импулс позитивних удара више од 10 пута већи него код негативних удара.

2.1.6. Број пражњења у једном удару грома

Већина атмосферских пражњења има вишеструку природу. Зато је уведен појам комплетног пражњења који обухвата целокупан процес вишеструких узастопних пражњења и појам појединачног удара који обухвата свако појединачно пражњење у процесу комплетног пражњења.

На слици 2.1.6.1 приказана је на ординатној оси вероватноћа појаве пражњења са већим бројем компонентних удара од задатог броја удара n приказаних на апцисној оси:



Слика 2.1.6.1: Вероватноћа појављивања пражњења са већим бројем удара од задатог на апцисној оси

У табели 2.1.6.1 приказани су збирни резултати електричних параметара атмосферских пражњења и вероватноћа прекорачења одређених вредности за сваки од електричних параметара [5].

вероватноћа прекорачења	амплитуда струје грома	наелектрисање	стрмина	квадратни импулс струје	трајање
[%]	[kA]	[As]	[kA/ μ s]	[kA ²]	[s]
50	26	9	48	0,54	0,09
10	73	69	54	1,5	0,56
1	180	330	97	35	2,7

Табела 2.1.6.1: Карактеристичне вредности струја грома

2.2. Метеоролошки параметри

Метеоролошки параметри атмосферских пражњења дају информацију о грмљавинској активности на неком подручју. Могу се поделити на две групе:

- Општи метеоролошки параметри пражњења,
- Параметри пражњења везани за електроенергетске објекте.

2.2.1. Општи метеоролошки параметри атмосферских пражњења

Један од најчешће коришћених општих метеоролошких параметара атмосферских пражњења који служи као мерило грмљавинске активности на неком подручју је кераунички ниво.

Кераунички ниво T_d се дефинише као просечан број дана са грмљавином у току једне године на одређеном подручју. Одређује се осматрањем.

Грмљавински дан за неко подручје се дефинише као дан када се бар једном у току дана чује грмљавина. Кераунички ниво је једина величина за чије одређивање нису потребни никакви инструменти. Са друге стране, кераунички ниво је значајан показатељ грмљавинске активности неког подручја.

Основни недостатак коришћења керауничког нивоа као јединог мерила грмљавинске активности је недостатак података о интензитету грмљавинске активности.

Овај податак се може добити на основу густине пражњења у површину земље. Дневна густина пражњења N_d представља број атмосферских пражњења у току једног грмљавинског дана у хоризонталну површину земље по km^2 . Годишња густина пражњења N_g представља број атмосферских пражњења у земљу у току једне године по km^2 .

Постоји следећа веза између годишње густине пражњења, дневне густине пражњења и керауничког нивоа:

$$N_g = N_d T_d \quad (2.2.1.1)$$

Густина пражњења се може одређивати осматрањем, коришћењем бројача пражњења или постављањем станица за локализацију места пражњења. Осматрањем се може добити број пражњења само приближно за мању територију док се систематским праћењем грмљавинске активности помоћу бројача пражњења може добити релативно тачна слика о грмљавинској активности на једној територији.

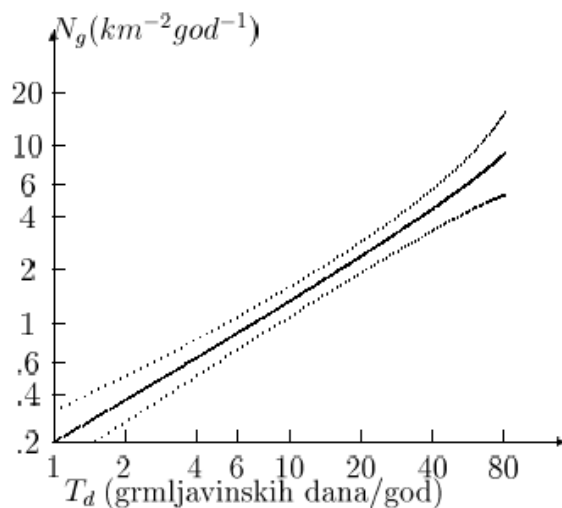
Станице за локализацију пражњења дају информацију и о месту на коме се пражњење догодило, али захтевају велика улагања у развој и одржавање мреже станица за праћење грмљавинске активности.

Да би се добила информација о годишњој густини пражњења за територију земље у којој се не врши инструментално одређивање овог параметра, може се користити приближна емпиријска формула за добијање густине пражњења на основу керауничког нивоа:

$$N_g = 0,04T_d^{1,25} \quad (2.2.1.2)$$

На слици 2.2.1.1 приказани су резултати регистрације за четворогодишњи период и регистрованих 310 пражњења за које је изведена емпиријска формула 2.2.1.2 [1]. Може се уочити корелација између керауничког нивоа датог на апсцисној оси и густине пражњења дате на ординати. На основу те корелације изведена је формула 2.2.1.2.

Овакве емпиријске формуле могу бити од велике користи при одређивању угрожености појединих објеката од атмосферских пражњења, али их треба стално кориговати у складу са повећањем броја узорака при систематском праћењу и регистровању атмосферских пренапона.

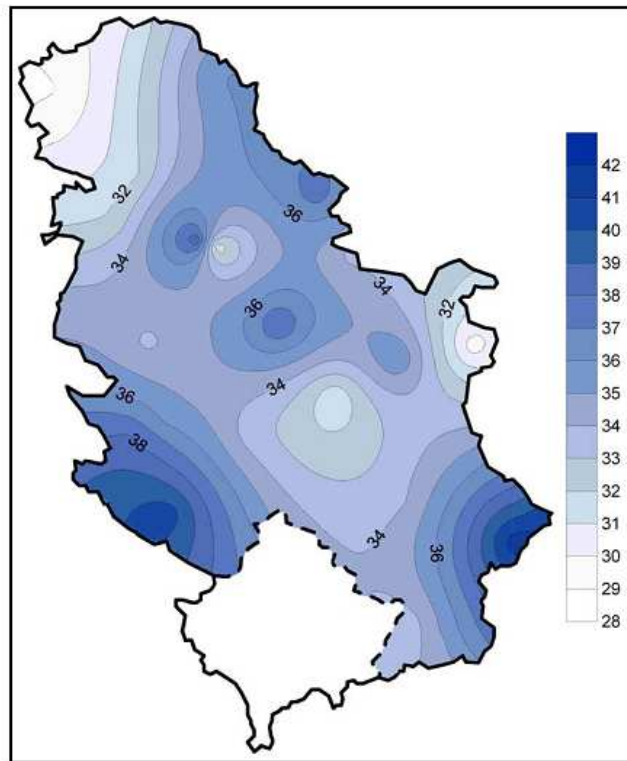


Слика 2.2.1.1: Зависност годишње густине атмосферских пражњења од керауничког нивоа

Просечна вредност густине грома на подручју Србије у периоду од 1.1.2010 до 10.12.2014 (4 године) износила је:

- за северни део Србије - 2,34/ km²/год.
- за централни део Србије - 1,53/ km²/год.
- за јужни део Србије - 0,78/ km²/год.
- за целу регију Србије - 1,55/ km²/год.

Иновирана изокерауничка карта Србије приказана је на слици 2.2.1.2. Подаци за Косово и Метохију нису познати.



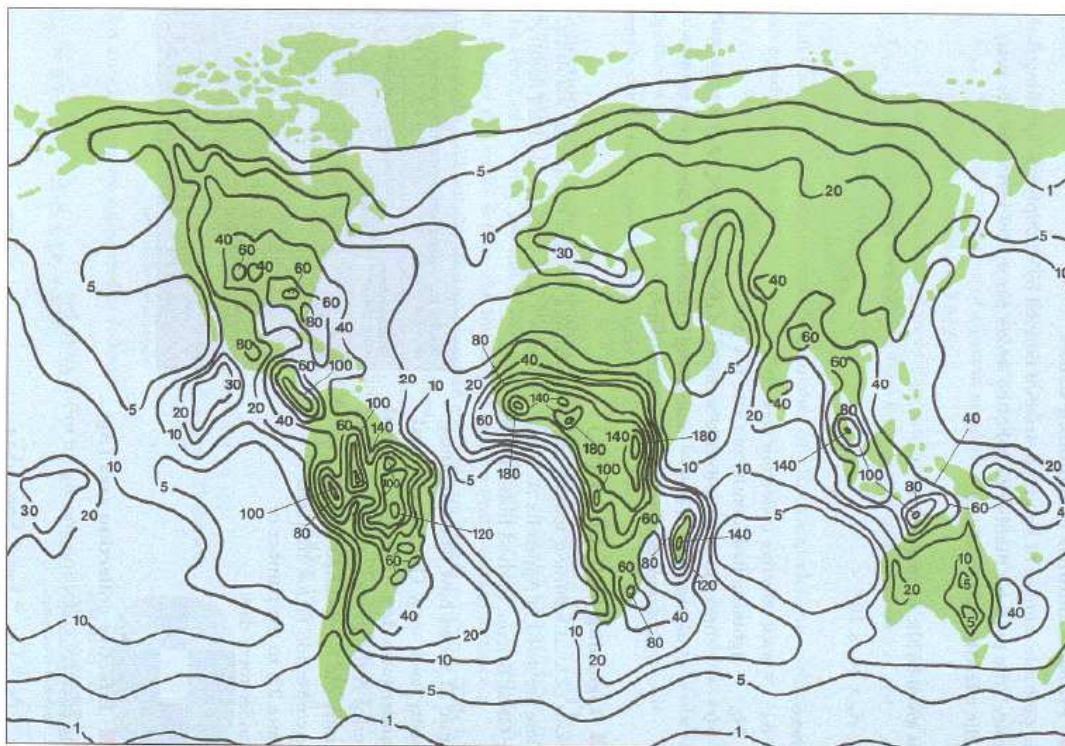
Слика 2.2.1.2: Изокерауничка карта Србије

На слици 2.2.1.3 приказана је изокерауничка карта света, тј. просечан годишњи број удара грома по km². На глобалном нивоу, просечно се догоди 40 до 50 удара грома у секунди, или близу милијарду удара годишње. Расподела грмљавинске активности на Земљи је далеко од униформне. Идеални услови за за настанак атмосферских пражњења и олуја са грмљавином јављају се тамо где се топао, влажан ваздух подиже и меша са хладним ваздухом изнад. Ови услови се у многим деловима Земље јављају скоро свакодневно, док се у другим областима јављају ретко. Много више удара грома се јавља на копну, него на океану, јер Сунце преко дана загрева површину земље брже

од океана. Загрејана површина земље загрева ваздух изнад њега, а тај топли ваздух се диже и судара са хладним ваздухом изнад. Интеракција између ваздушних маса различите температуре подстиче настанак олуја са грмљавином. Мапе такође показују да се више муња јавља у близини екватора него на половима. Полови имају врло мало удара грома, јер њихове беле снегом и ледом покривена површине Сунце не загрева ефикасно да би створило конвекцију. Такође влажност ваздуха на половима је јако мала. Ови фактори значајно смањују количину грмљавинске активности близу полова.

Неколико области на Земљи погађа неубичајено велики број атмосферских пражњења: Демократска Република Конго, северозападни део Јужне Америке, Хималајски басен, централна Флорида, аргентински пампаси и Индонезија. Тачка на Земљи са највише удара муња је језеро Маракаибо, на северозападу Венецуеле, где је просечан годишњи број дана са атмосферским пражњењима 297, а просечан број удара грома 232 удара/ $\text{km}^2/\text{год}$.

Мапе које приказују расподелу атмосферских пражњења на Земљи су важне из економских, еколошких и сигурносних разлога.



Слика 2.2.1.3: Изокерауничка карта света

У табели 2.2.1.1 приказана је расподела вероватноћа струја удара грома.

Струја удара грома у стуб (kA)	5	10	15	20	30	40	50	60
Процент од свих удара грома	14	40	62	79	91	95	98	99

Табела 2.2.1.1: Расподела вероватноћа струја удара грома

Основа за одређивање струје удара грома су подаци о учесталости атмосферског пражњења, број грмљавинских дана у години или број удара грома по јединици површине, дистрибуција темене вредности струје у стази грома и жељени ниво сигурности, с обзиром на вероватни број повратних прескока у једној години.

3. Упоредна анализа метода за регистрацију параметара атмосферског пражњења на високим стубовима на различитим локацијама

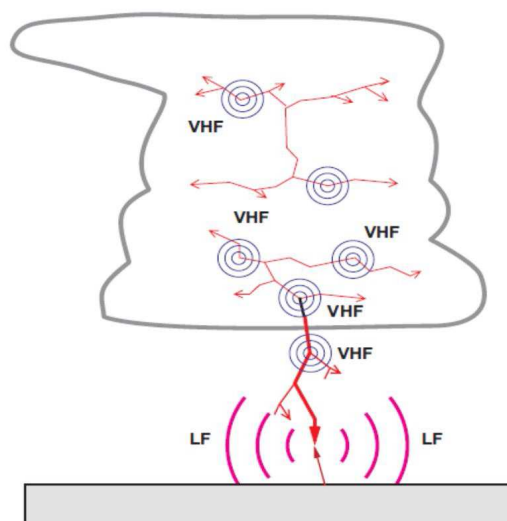
Системи за локацију атмосферских пражњења се развијају од краја 70-тих година прошлог века. Данас они представљају најважнији систем за одређивање метеоролошких параметара атмосферских пражњења и утврђивање регионалних карактеристика терена у погледу броја атмосферских пражњења. Поред тога, ови системи омогућавају праћење тренутне грмљавинске активности, односно краткорочно прогнозирање у циљу обавештавања одређених корисника о наиласку грмљавинске активности. Посебно осетљиви корисници су аеродроми, електропривредна предузећа, телекомуникациони системи и друге службе осетљиве на атмосферске ударе. Системи за локацију пражњења имају базу података о свим пражњењима на одређеној територији коју покривају у комплетном периоду регистрације, која омогућава накнадне експертизе о могућим штетним догађајима проузрокованих атмосферским пражњењима. Ово је посебно интересантно за електропривредна предузећа, где се накнадно може утврдити да ли је неки штетан догађај повезан са атмосферским пражњењем. Други важан корисник ових података су осигуравајућа друштва, која их користе за утврђивање повезаности пријављене штете код осигураника са атмосферским пражњењима.

Постоји више принципа рада локатора атмосферских пражњења, од којих су најважнији:

- Уређаји који раде на принципу одређивања правца магнетног и електричног поља,
- Уређаји који раде на принципу мерења кашњења сигнала из различитих мерних тачака,
- Уређаји који раде на оба принципа.

Сензори су грађени са антенама за мерење електростатичког поља (E field) и са антенама за мерење магнетног поља (B field). Те антене су кључни део технологије за ефикасну класификацију удара грома, облак-облак или унутар облака. Мреже које употребљавају само магнетно поље имају потешкоће са муњама, које се појаве близу сензора (мање од 20 km) јер су сигнали у магнетном пољу веома слични IC (између облака) и CG (облак-земља), посебно ако се узме у одабир да је око 90 % догађања у облацима (IC појаве). Због тога мреже сензора које су грађене само са електростатичким антенама имају потешкоће са дискриминацијом и производе превише CG појава. Сви сензори се часовно синхронизују преко GPS навигационог сателита.

На слици 4.1 шематски је приказано коју врсту зрачења изазива поједини тип пражњења. Са слике се види да пражњења између облака производе високо-фреквенцијско (VHF, 30-300 MHz) и ниско-фреквенцијско (LF, 30-300 kHz) поље, док пражњења између облака и земље производе ниско-фреквенцијско поље.



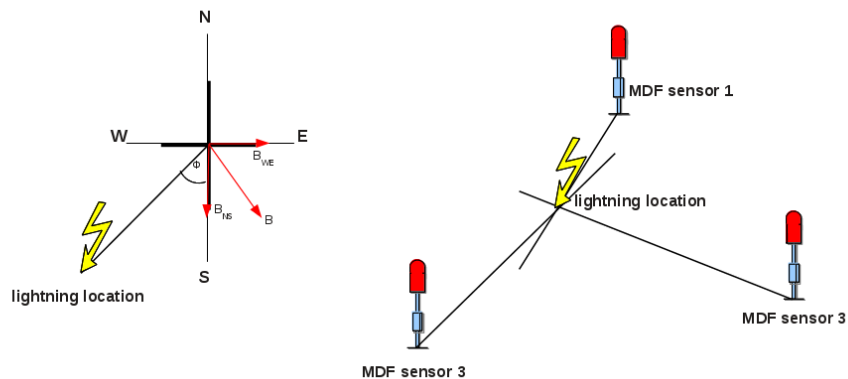
Слика 3.1: Шематски приказ зрачења приликом атмосферског пражњења између два облака или облака и земље

4.1. Систем базиран на одређивању правца магнетског поља - MDF метода

MDF (Magnetic Direction Finding) метода детекције грома базира се на мерењу електромагнетског поља која обухвата LF фреквенције (low frequency од 300 Hz – 450 kHz).

За детекцију атмосферских пражњења путем детекције правца електромагнетног таласа грома потребна су нам два или више сензора, који мере азимут (угао од севера) између сензора и тачке удара грома. Сензори су састављени од две ортогоналне омчасте антене. Када три или више сензора пошаљу податке о атмосферском пражњењу, почиње поступак локализације грома и оптимизације, који смањује грешке угла. Тај поступак је приказан на слици 4.1.1. Тачке означавају могућу локацију удара грома. У случају да само два сензора пошаљу податак о атмосферском пражњењу, почиње локализација метода триангулације.

MDF - magnetic direction finding



Слика 4.1.1: Детекција применом методе детекције смера MDF

Поред антена за регистровање магнетског поља поставља се хоризонтални ротациони сензор електростатичког поља. Снимањем електричног поља одређује се поларитет облака, што искључује могућност грешке у смеру магнетског поља. Овај систем поред антена за регистрацију магнетског и електричног поља има и GPS за прецизно одређивање времена, као и видео камеру за снимак атмосферског пражњења.

Електронски склопови за процесирање сигнала могу да репродукују таласне облике магнетског поља који одговарају главним пражњењима првих и узастопних удара. Помоћу оваквих комплексних станица може се вршити тестирање станица, јер се

упоређују регистровани подаци са подацима видео записа, који одговарају истом атмосферском пражњењу. Видео запис омогућава добијање информација о томе да ли је удар силазни или узлазни и колико је компоненти имао.

Централни рачунар за сакупљање података повезан је телекомуникационом мрежом са свим станицама за локацију места пражњења. У случају атмосферског пражњења свака станица за детекцију пражњења шаље сакупљене податке из локалне меморије у централни компјутер. Све станице морају имати синхронизоване часовнике да би се могла детектовати појава сигнала која одговара једном пражњењу у више станица. Свака станица може да одреди један правац (али не и удаљеност) места пражњења од места регистрације. У пресеку правца детектованих из три станице за локацију места удара добија се оријентациони положај атмосферског пражњења. Грешка у локацији би требала да буде мања од 150 m. Уколико су регистрационе станице ближе, грешка је мања.

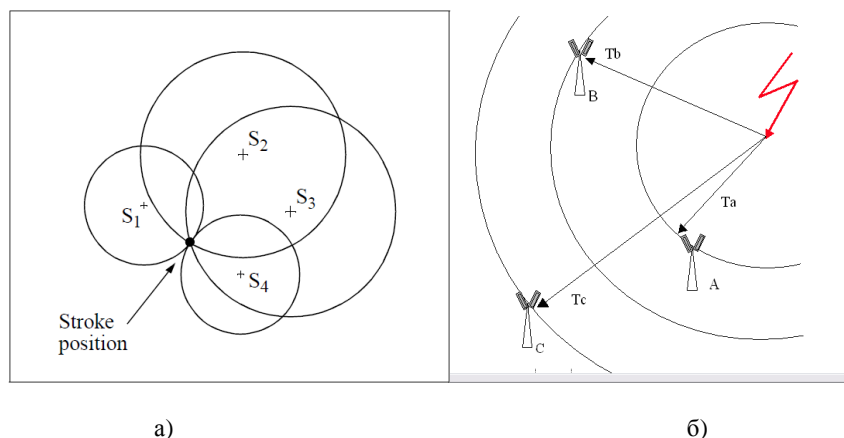
MDF сензори у одређеним ситуацијама пошаљу лоше резултате. Рецимо када гром удари дуж линије између два сензора, који су као једини сензори детектовали тај гром. Затим се могу јавити грешке у одређивању локације удара грома, јер се пресек смерова налази на вези између сензора и тада се не може одредити локација. Због те потешкоће систем мора забележити гром помоћу 3 или више сензора.

4.2. Систем базиран на мерењу кашњења сигнала - ТОА метода

ТОА (Time of Arrival) метода детекције грома базира се на мерењу електромагнетског поља која обухвата LF фреквенције (low frequency, од 300 Hz – 450 kHz).

За детекцију атмосферских пражњења путем детекције времена од удара грома морамо имати три или више сензора, који мере време од удара грома до момента када сензор детектује удар грома. Применом ове методе сваки пар сензора направи хиперболичну криву, која описује могућу локацију удара грома, која одговара измереној разлици у времену. Три или четири сензора могу помоћу крива да одреде тачку удара грома, која се налази на тачки укрштања крива. Криве од три сензора могу под одређеним условима одредити две тачке удара грома, као што је приказано на слици 4.2.1 (а). Ову потешкоћу можемо избећи ако четири сензора детектују гром.

Мерење времена кашњења сигнала је илустровано на слици 4.2.1 (б). Мерење електромагнетног поља се врши у 3 станице, које региструју пражњење у различито време. На основу разлика времена простирања до појединих станица може се прорачуном проценити место пражњења. Осим локације пражњења, добија се и приближна вредност амплитуде струје.



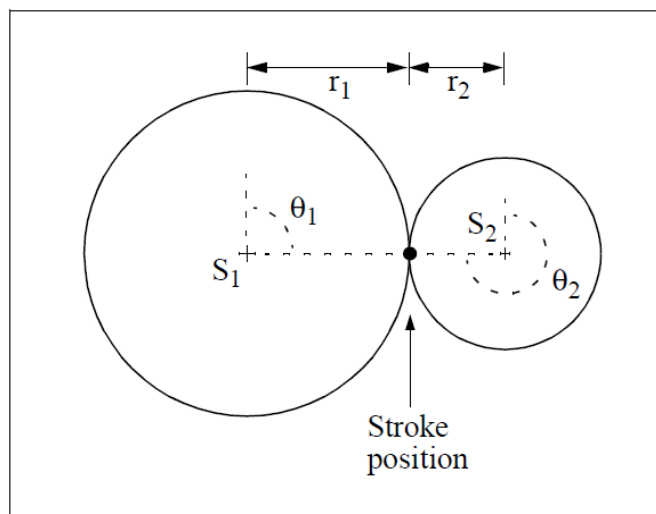
Слика 4.2.1: а) ТОА метода – кружни пресеци смерова и б) Разлика времена простирања у три мерне станице за лоцирање атмосферских удара

Станице су умрежене и могу се користити различити типови комуникационих медија, мада најсавременији системи углавном користе бежичне интернет протоколе за умрежавање. Брзина размене сигнала није битна, јер свака станица која шаље свој пакет података у централни процесор између осталих података шаље тачно сателитско време када је пражњење регистровано, што дефинише регистровани удар. У општем случају удар може бити регистрован од стране неколико станица. Станице је потребно разместити на растојања од 100 до 300 km.

4.3. Комбинована метода - MDF - ТОА

У последњим деценијама развијен је комбиновани систем за детекцију атмосферских пражњења. Овај систем детектује гром помоћу смера електромагнетног таласа грома, као и путем детекције временских разлика. Ову методу су назвали IMPACT (Improved Accuracy using Combined Technology) метода. Оваквим приступом, систем за детекцију електромагнетног таласа пружа податак о азимуту, а систем за детекцију времена пружа податак о времену удара грома. Ти подаци су употребљени у реалном времену и уопштавају методе кружних пресека, да би оптимизирали оцене о громовима између облака и земље помоћу свих расположивих података. Такав приступ нема препрека, које су специфичне за појединачну методу, као што је то претходно описано. На пример, гром који удари дуж линије између два сензора применом те методе има тачно одређену локацију на пресеку вектора азимута и кружних пресека, као што је приказано на слици 4.3.1. На наведеној слици је податак о азимуту за сензор S_1 угао q_1 а подручје вредности (с обзиром на време детекције грома) је r_1 . Важно је да знамо да у овом случају имамо четири резултата мерења, два угла и два времена детекције грома. Та мерења нам дају три податка: географску дужину, географску ширину и време удара грома. На тај начин метода IMPACT пружа додатне информације, које омогућавају

оптимизирану оцену места удара грома, чак и када је удар грома детектован само помоћу два сензора. Оцене ове методе су показале да комбинирана метода надмашује сваку појединачну методу и то у прецизности одређивања локација удара грома, као и у могућностима детекције.



Слика 4.3.1: MDF + TOA метода, дуж линије између два сензора

Ефикасност система за лоцирање атмосферских пражњења се непрекидно побољшава, тако да се са све већом поузданошћу може прво предвидети појава грмљавине на неком подручју, а потом лоцирати место и време удара појединих муња. У протеклом времену развоја система за лоцирање атмосферских пражњења показано је да су такви системи ефикаснији што покривају веће географско подручје. Тако се нпр. у САД развија национална мрежа за детекцију муња (енг. National Lightning Detection Network; LDN) која покрива готово целокупно географско подручје САД-а, а у Европи се развијају системи EUCLID и LINET.

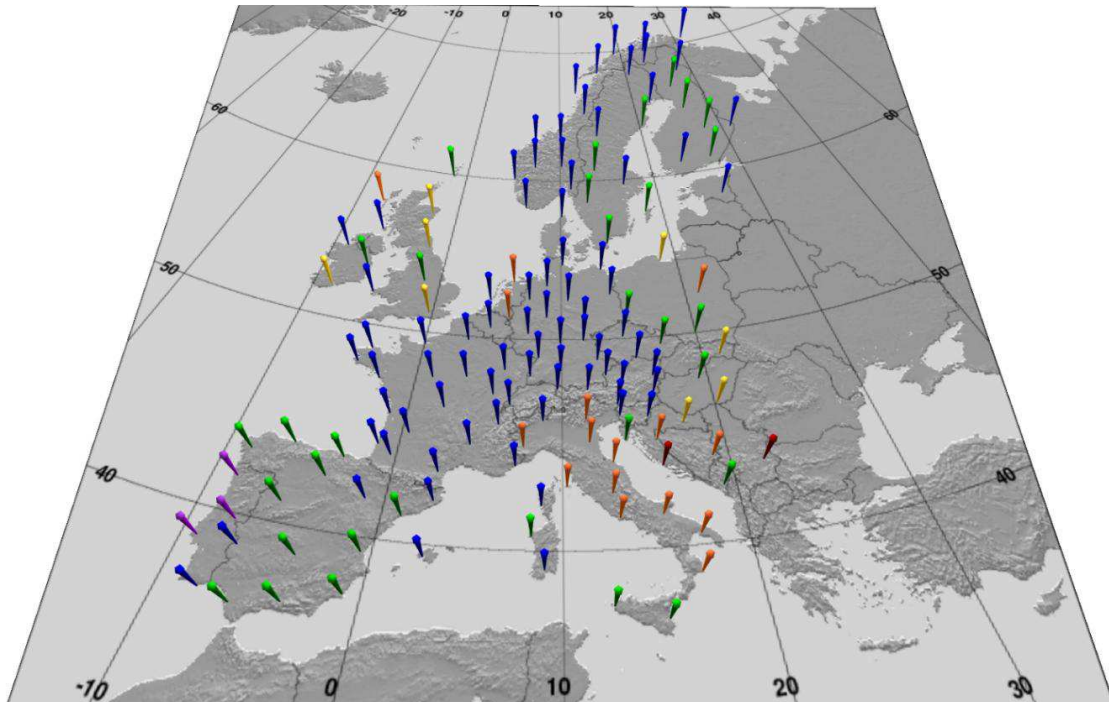
Најважније карактеристике система за локализацију пражњења су:

- вероватноћа детекције пражњења, DE , који представља проценат детектованих пражњења у односу на укупан број пражњења,
- вероватноћа детекције свих компоненти вишеструког пражњења,
- одређивање густине пражњења према земљи,
- тачност регистрације амплитуде струја,
- одређивање просечне вишеструкости пражњења регистрацијом броја компоненти сваког удара.

Национална мрежа за детекцију муња (NLDN) и други слични системи за лоцирање атмосферских пражњења калибрисани су само за негативне пратеће ударе, при чему је средња апсолутна грешка од 10 до 20%. Процене грешака за вршне струје за негативне прве ударе и за позитивна пражњења тренутно нису познате. Поред система типа NLDN (као што су европски системи који учествују у EUCLID-у или национални и регионални системи у Јапану), постоје и други системи који лоцирају место удара грома и вршне струје, укључујући LINET (углавном у Европи), USPLN (у САД, али слични системи функционишу и у другим земљама), WTLN (у САД и другим земљама), WWLLN (глобални) и GLD360 (глобални). Грешке процене вршних струја за ове системе тренутно нису познате.

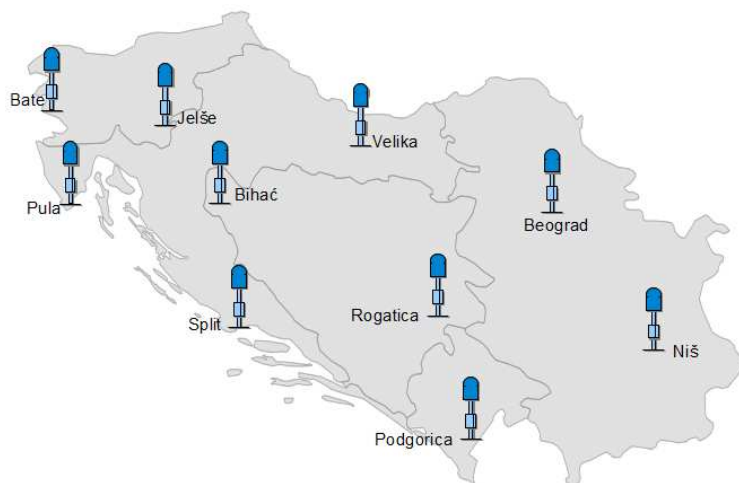
EUCLID (European Cooperation for Lightning Detection) је европска мрежа за локализацију муња настала сарадњом и удруживањем мрежа појединих земаља са циљем откривања и лоцирања муња, са ефикасном селекцијом и прецизним лоцирањем на подручју читаве Европе. Подаци EUCLID-а се користе у метеорологији, хидрологији, електроенергетским системима, телекомуникацијама, шумарству, ваздушном саобраћају,... Циљ ове мреже је да се на основу сарадње појединих националних мрежа за локализацију муња успостави јединствена мрежа на подручју већег дела Европе.

Локације сензора система за локализацију пражњења EUCLID мреже су приказане на слици 4.2.



Слика 3.2: Локације сензора EUCLID мреже

Конфигурација сензора у оквиру система SCALAR (Slovenski Centar za Avtomatsko Lokalizacijo Atmosferskih Razelekritev), који је развијен у Словенији, за мониторинг атмосферских пражњења у реалном времену и који ради у сарадњи са аустријским системом, је приказана на слици 4.3. Систем SCALAR, који је пуштен у погон 1997. године, је део EUCLID мреже, тако да за локализацију места удара грома користи податке и од сензора система EUCLID, што повећава тачност локализације места атмосферског пражњења. За лоцирање места удара грома на простору бивше Југославије користе се 3 сензора у Хрватској, 2 сензора у Словенији, 2 сензора у Босни и Херцеговини, 1 сензор у Црној Гори, 2 сензора у Србији, као и остали сензори из система EUCLID.



Слика 3.3: Локације сензора система SCALAR

На слици 4.4 приказан је један од сензора система SCALAR.



Слика 3.4: Сензор система SCALAR

NDLN (National Lightning Detection Network) – америчка национална мрежа за детекцију муња је започела са радом 1987. године уједињавањем сензора постављених у западном и источном делу САД-а.

Поред система за локализацију атмосферских пражњења који користе сензоре (који се базирају) који користе ТОА и MDF технике детекције грома (уређаје које раде на принципу одређивања правца магнетног и електричног поља и на принципу мерења кашњења сигнала из различитих мерних тачака) у једном периоду су веома били раширени бројачи атмосферских пражњења и вештачки иницирана атмосферска пражњења помоћу ракета. Бројачи атмосферских су уређаји чија је улога била одређивање средње густине пражњења у току једне године на одређеном подручју и који су радили на принципу детектовања наглих промена електричног поља које настају услед атмосферских пражњења. Вештачки иницирана атмосферска пражњења су рађена помоћу ракета везаних проводном жицом за вертикалне уземљивачке сонде забодене у тло. Након пражњења, жица би испарила, формирајући канал атмосферског пражњења веома сличан природном каналу, који се најчешће поклапа са путањом жице која је испарила. На овај начин веома су се веома успешно могли мерити електрични параметри атмосферских пражњења.

4. Примери из праксе

У ближој прошлости директна мерења струја при атмосферским пражњењима вршена су на торњевима у Русији, Јужној Африци, Канади, Немачкој, Бразилу, Јапану, Аустрији и Швајцарској (на више различитих места).

Резултати из бразилских, јапанских и аустријских студија су приказани и упоређени са Бергеровим подацима у наставку текста.

Примери извршених мерења налазе се у наставку.

5.1. Мерења у Швајцарској

Мерења су вршена на торњу на брду Monte San Salvatore, од 1955-1963. године. Торањ висине 70 m налазио се на надморској висини од 640 m.

За потребе мерења користили су се осцилографи (за мерење струје пражњења у торањ као функције времена), двостепени шант (за мерење струје грома), фотографска опрема

и брзе камере. Годишња регистрована густина пражњења била је око 4 удара по km^2 , од чега је већина атмосферских пражњења била узлазна.

У табелама 5.1.1 и 5.1.2 приказани су резултати извршених мерења [4].

		Период истраживања
Годишњи број атмосферских пражњења у торањ	17~25	1955-1963
Поларитет атмосферских пражњења	85,5% негативних 12,1% позитивних 2,4% биполарних	1955-1963
Процент узлазних пражњења	73,9%	1955-1963
Карактеристике иницирања и развоја узлазног лидера са торња	Брзина узлазног позитивног лидера ($4 \times 10^4 \sim 1 \times 10^6$ m/s), дужина лидера (4~40 m), интервал између пражњења (40~120 μs) Брзина узлазног негативног лидера ($8 \times 10^4 \sim 4,5 \times 10^5$ m/s), дужина корака (3~20 m), интервал између пражњења (30~50 μs)	1955-1963

Табела 5.1.1: Карактеристике удара муње снимљених на торњу на брду Monte San Salvatore

	Јединице	Број узорака	Процент преласка табларне вредности		
			90%	50%	10%
Вршна струја повратног удара	kA	176	4,2	10	25
Трајање повратног удара	ms	888	0,57	3,6	22
Наелектрисање повратног удара	C	579	0,14	0,77	4,1

Табела 5.1.2: Узлазно негативно пражњење

Параметри	Јединице	Број узорака	Процент преласка табларне вредности		
			95%	50%	5%
Вршна струја (минимум 2 kA)					
Први удар	kA	101	143	30	80
Накнадна пражњења		135	4.6	12	30
Наелектрисање (укупно наелектрисање)					
Први удар	C	93	1.1	5.2	24
Накнадна пражњења		122	0.2	1.4	11
Укупно пражњење		94	1.3	7.5	40

<u>Ударно наелектрисање</u> (искључујући дуготрајне струје)	C				
Први удар		90	1,1	4,5	20
Накнадна пражњења		117	0,22	0,25	4
<u>Трајање чела (максимум 2 kA)</u>	μs				
Први удар		89	1.8	5.5	18
Накнадна пражњења		118	0.22	1.1	4.5
<u>Максимум d_i/d_t</u>	kA/μs				
Први удар		92	5,5	12	32
Накнадна пражњења		122	12	40	120
<u>Трајање зачелја</u>	μs				
Први удар		90	30	75	200
Накнадна пражњења		115	6.5	32	140
<u>Топлотни импулс ($\int i^2 dt$)</u>	A ² s				
Први удар		91	6.0×10^3	5.5×10^4	5.5×10^5
Накнадна пражњења		88	5.5×10^2	6.0×10^3	5.2×10^4
Период између пражњења	ms	133	7	33	150
<u>Трајање пражњења</u>	ms				
Први удар		94	0,15	13	1100
Накнадна пражњења		39	31	180	900

Табела 5.1.3: Параметри струје удара за негативна пражњења (Berger, 1975.)

У табели 5.1.3 приказани су параметри струје удара за негативна пражњења које је Berger обрадио у студији 1975. године. У студији су обрађени параметри струје пражњења за 101 негативно силазно пражњење и 26 позитивних пражњења између облака и земље. Овај преглед користи се као референтни, као стандард и за истраживања [3].

	Јединице	Број узорака	Процент преласка табларне вредности		
			90%	50%	10%
Вршна струја	kA	132	0,21	1,5	11
Трајање удара	ms	138	24	72	215
Промена наелектрисања	C	137	3,7	26	187

Табела 5.1.4: Узлазно позитивно пражњење

Резултати мерења за узлазна позитивна пражњења приказани су у табели 5.1.4, а за биполарна у табели 5.1.6 [4].

Параметри	Јединице	Број	Процент преласка табеларних
-----------	----------	------	-----------------------------

		узорака	вредности		
			95%	50%	5%
Вршна струја (минимум 2 kA)	kA	26	4.6	35	250
Наелектрисање (укупно наелектрисање)	C	26	20	80	350
Ударно наелектрисање (искључујући дуготрајне струје)	C	25	2.0	16	150
Трајање чела	μs	19	3.5	22	200
Максимум d_i/d_t	kA/ μs	21	0.20	2.4	32
Трајање зачеља	μs	16	25	230	2000
Топлотни импулс ($\int i^2 dt$)	A ² s	26	2.5×10^4	6.5×10^5	1.5×10^7
Трајање пражњења	ms	24	14	85	500

Табела 5.1.5: Параметри струје удара за позитивна пражњења (Berger, 1975.)

У табели 5.1.5 приказани су параметри струје удара за позитивна пражњења које је Berger обрадио у студији 1975. године [3].

	Јединице	Број узорака	Процент преласка табларне вредности		
			90%	50%	10%
Максимална негативна струја	A	30	50	350	2400
Максимална позитивна струја	kA	30	0,18	1,5	13
Наелектрисање негативне струје	C	30	0,8	12	181
Наелектрисање позитивне струје	C	30	1,5	25	345

Табела 5.1.6: Узлазно биполарно пражњење

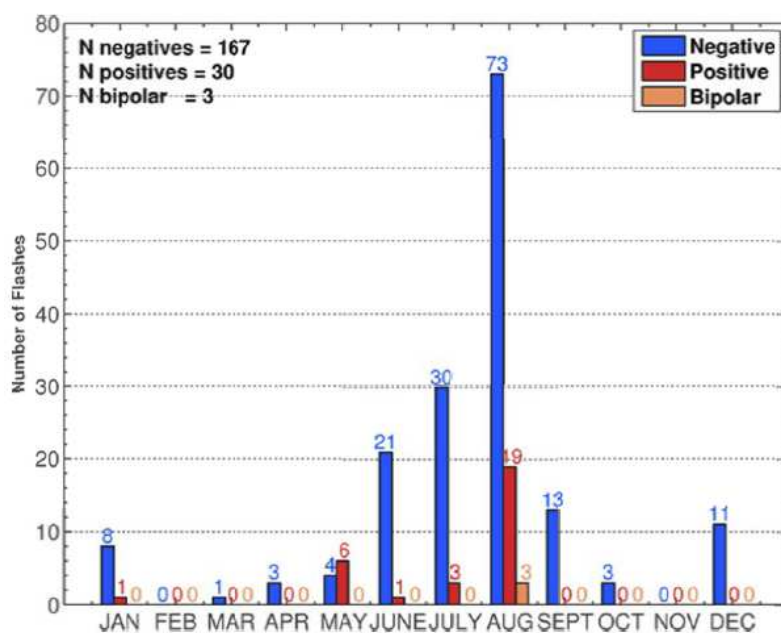
Нова мерења у Швајцарској

Од маја 2010. године на североистоку Швајцарске обављена су нова мерења на брду Säntis у Алпима. Торањ висине 124 m налазио се на надморској висини од 2502 m на врху брда. За потребе мерења инсталирана су два калема Роговског на висини од 24 m и још два додатна сензора на висини од 72 m за мерење струје (до 120 kA) и стрмине атмосферског пражњења. Већина узлазних пражњења (изнад 80%) са Säntis торња је иницирана без претходног атмосферског пражњења у близини. Негативна и позитивна

пражњења су концентрисана у летњим месецима. Август је месец у којем је регистрован највећи број позитивних пражњења, за разлику од мерења извршених у Аустрији на Gaisberg-овом торњу где су грмљавинска пражњења распоређена уједначено током читаве године

На слици 5.1.1 приказани су резултати прикупљених мерења на Sântis торњу у периоду од маја 2010. године до јанура 2012. године. Током овог периода укупно је регистровано 200 удара, укључујући 30 позитивних и 3 биполарна удара [4].

Максимална измерена вредност вршне струје узлазних негативних пражњења током периода мерења износи 26,5 кА, а средња 6,4 кА. Ове вредности су приближне резултатима забележеним на другим високим торњевима у осталом делу света.



Слика 5.1.1: Месечна расподела броја атмосферских пражњења на на Sântis торњу од маја 2010. године до јанура 2012. године

У следећој табели (табела 5.1.7) приказани су резултати мерења статистичких параметара струје пражњења на Sântis торњу.

Параметар	Број узорака	Процент преласка табларне вредности				
		95%	90%	50%	10%	5%
Извод вршне струје (кА/μs)	1850	3,9	4,8	19,9	46,5	56,3
Вршна струја (кА)	1986	2,9	3,4	6,4	11,9	14,1
t ₁₀₋₉₀ (μs)	1986	0,49	0,51	0,86	3,29	4,36

Ударно наелектрисање (C)	1986	0,2	0,3	0,6	1,6	2,3
Период између удара (ms)	1817	2,57	4,15	17,2	50,1	75,1
Број вишеструких удара	167	1	2,2	8	29	37
Трајање удара (μ s)	1978	141	166	262	724	978

Табела 5.1.7: Преглед статистичких параметара струје пражњења узлазних негативних удара мерених на Sântis торњу

Од маја 2010. године до јануара 2012. године на Sântis торњу регистровано је 30 позитивних узлазних пражњења. Позитивна пражњења имају средњу вредност вршне струје од 11,1 kA и средње трајање пражњења од 80 ms, што је у складу са подацима добијеним у Аустрији. Измерена средња вредност пренетог наелектрисања за позивне ударе на Sântis торњу је око 6 пута већа од вредности измерених на брду Monte San Salvatore и од мерења у Јапану, а око 3 пута већа од вредности измерених у Аустрији.

5.2. Мерења у Бразилу

Извршена су мерења на торњу Morro do Chachimbo Station (MCS), у тропском подручју на југоистоку Бразила у два различита периода, од 1985-1998. године и од 2008. до данас. Торањ висине 60 m налази се на врху брда изнад језера Lugano на надморској висини од 640 m.

За потребе мерења инсталирани су струјни сензори (Pearson–ов намотај за мерење струје пражњења у опсегу 20-200 kA), брзе камере високе резолуције, оптички сензори и систем за мерење електричног поља. У близини торња инсталирана су два распона далековода за потребе истраживања индукованих напона и расподеле струја при ударима у близини далековода.

У табели 5.2.1 приказани су резултати извршених мерења [4].

Врста атмосферског пражњења	Број догађаја
Облак-земља пражњење	49
Позитивно	2
Негативно	48
Први негативни повратни удар облак-земља	47
Накнадни негативни повратни удар облак-земља	74
Узлазно пражњење (од 2010.г.)	9
Позитиван узлазни лидер (од 2009.)	35

Табела 5.2.1: Преглед броја атмосферских пражњења на торњу MCS (до маја 2014.)

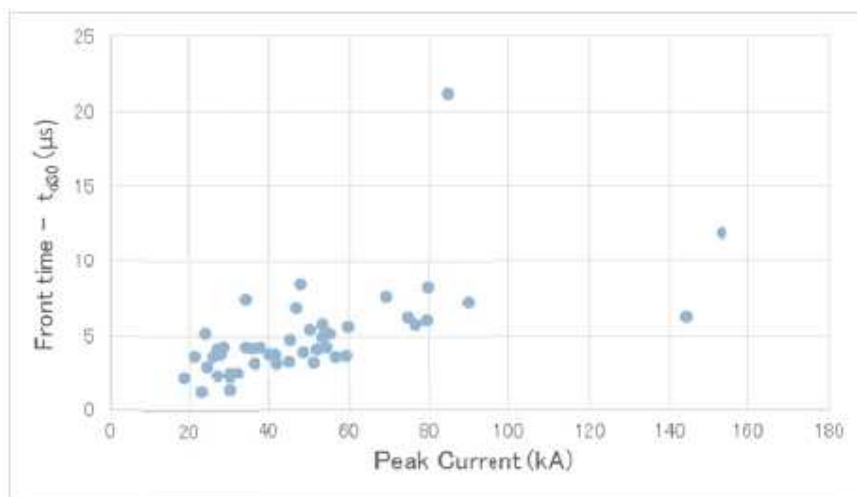
Према подацима 42% измерених негативних пражњења између облака и земље имају вишеструке ударе. Просечан број накнадних удара по једном атмосферском пражњењу је 3.7.

У табели бр. 5.2.2 су представљене одговарајуће 5%, 50% и 95% вредности узете из апроксимације логаритамско-нормалне расподеле за вршне струје, времена чела и специфичне енергије за атмосферска пражњења негативне поларности [4].

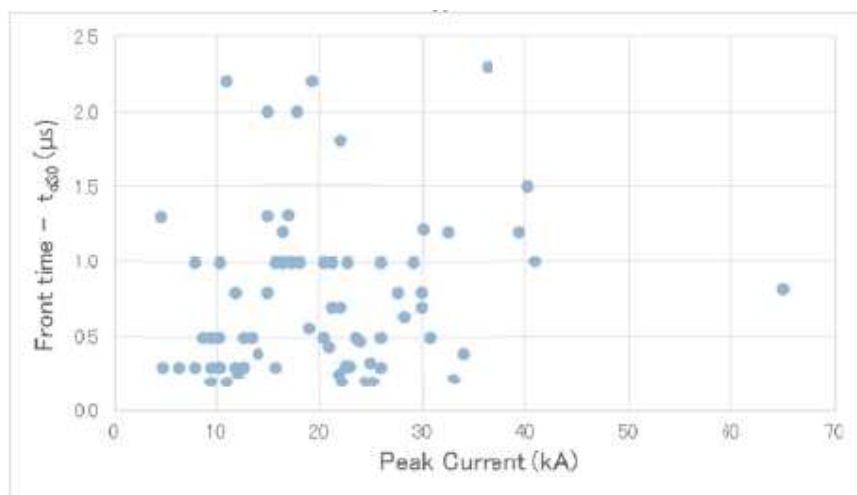
Параметар	Прва главна пражњења 47 узорка					Накнадна главна пражњења 74 узорка				
	Статистички параметар		Процент случајева који не прелазе табеларне вредности			Статистички параметар		Процент случајева који не прелазе табеларне вредности		
	Геометријска средина	$\sigma \log$	5%	50% средина	95%	Геометријска средина	$\sigma \log$	5%	50% средина	95%
Вршна струја (kA)	44.3	0.47	20.3	44.3	96.4	17.8	0.52	7.6	17.8	41.5
T_{d-10} (μs)	6.5	0.41	3.3	6.5	12.8	0.8	0.74	0.2	0.8	2.7
T_{d-30} (μs)	4.4	0.50	1.9	4.4	10.0	0.6	0.68	0.2	0.6	1.8
Топлотни импулс ($10^3 \text{ A}^2\text{s}$)	101	1.21	13.74	101	734	7.75	1.56	0.60	7.75	100.81

Табела 5.2.2: Статистички подаци измерених параметара торњу MCS

На слици 5.2.1 приказане су зависности трајања времена чела код првих (а) и накнадних (б) удара грома од вршних струја. Са слике се види јасан тренд повећања чела првих повратних удара са порастом вршне струје, што се не примећује за пратеће ударе [4].



(a)



(б)

Слика 5.2.1: Зависности трајања времена чела код првих (а) и накнадних (б) удара грома од вршних струја

Током два периода мерења регистрована су само два позитивна пражњења, између облака и земље, што одговара мање од 5% укупног броја пражњења. Због малог броја регистрованих пражњења они нису узети у даље разматрање.

У периоду 2010-2014. године укупно је регистровано 9 узлазних атмосферских пражњења и сва су пражњења била негативног поларитета, а два пражњења су имала повратно дејство.

У табели бр. 5.2.3 приказане су средње вредности главних параметара од почетног нивоа струја узлазних пражњења мерених на торњу MCS [4].

Параметар	Вредност
Максимална струја (А)	-672
Трајање пражњења унутар облака (ms)	25,8
Просечна вредност струје (А)	-188
Пренесено наелектрисање (С)	-4,9
Топлотни импулс пражњења (A^2s)	1,6

Табела 5.2.3: Средња вредност параметара узастопних струја узлазних пражњења

Поређећи ове податке са узлазним пражњењима измереним у умереним регионима, пражњења мерена на MCS-у приказују значајно веће средње вредности просечне струје (око 2 пута) и 10 пута краће трајање, док је специфична енергија око 1,5-3 пута мања.

5.3. Мерења у Јапану

Мерења су извршена на торњу Tokyo Skytree (TST), у Токију у периоду од 2008. године до данас. Торањ висине 634 m налази се на надморској висини мора (0 m).

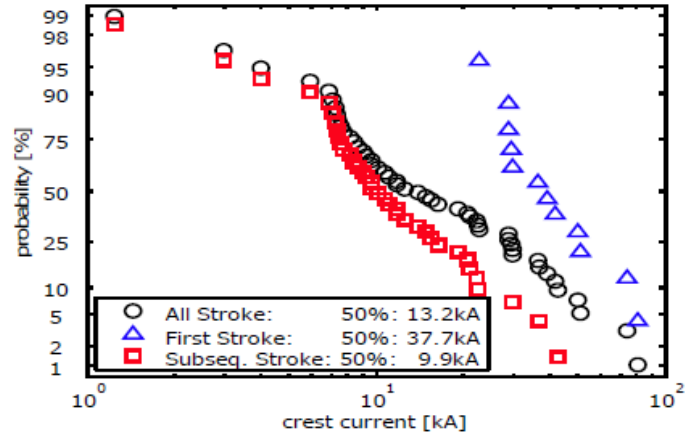
За потребе мерења инсталирани су струјни сензори (намотај Роговског за мерење облика струје пражњења), брзе камере високе резолуције за посматрање развоја лидера и систем за праћење електромагнетског поља.

Према подацима измерено је 11 узлазних и 13 силазних пражњења. Већина пражњења која се догодила у лето 2012. године била је узлазног, а у лето 2013. силазног типа, док је неколико пражњења која су се догодила током зимске сезоне између 2012. и 2013. било узлазног карактера.

У приобалном подручју Јапанског мора детектован је велики број пражњења током зиме, која показују некарактеристично понашање у поређењу са летњим грмљавинама. Једна од величина која се разликује је пренесено наелектрисање које често прелази и преко неколико стотина кулона, упркос томе што је број вишеструких удара веома мали (обично 1 до 2 удара).

Са друге стране, у Kanto-вој равници која гледа ка Тихом океану, пражњења се јављају јако ретко током лета. Међутим, и поред тога регистрована су 4 атмосферска пражњења у зимском периоду између 2012. и 2013. Осим тога, једно од ових пражњења (биполарно) садржи изузетно велики број од чак 12 повратних удара (позитиван почетни и 11 негативних повратних удара).

Слика 5.3.1 приказује кумулативну расподелу вршних струја посматраних повратних удара. Постоји јасна разлика између првих и накнадних удараца. Геометријска средина накнадних удара је слична осталим посматрањима, али код првог удараца је већа од вредности других посматрања [4].



Слика 5.3.1: Кумулативна расподела вршних струја посматраних повратних удара негативних пражњења

5.4. Мерења у Аустрији

Мерења су извршена на радио торњу Gaisberg Tower (GBT), на брду близу Салзбурга у периоду од 1998. године до данас. Торањ висине 100 m налази се на врху брда Gaisberg на надморској висини од 1287 m изнад нивоа мора (800 m изнад околног терена).

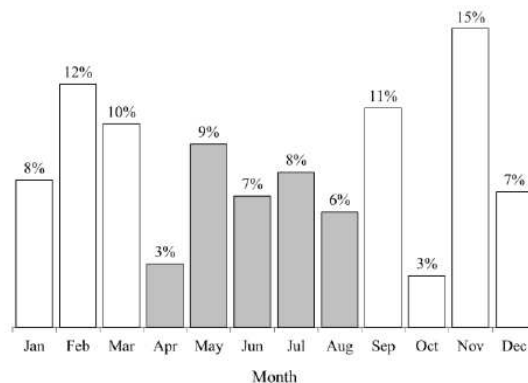
За потребе мерења инсталирани су отпорнички шантови, оптичка влакна, оптички предајници, 2 одвојена оптичка канала (један са струјним опсегом од ± 2 kA за мерење струја мале амплитуде и други са опсегом ± 40 kA за мерење вршних струја повратних удара).

Велика количина, тј. 87% (179/205) узлазних пражњења са GBT је отпочела без претходног атмосферског пражњења у близини, док је 13% пражњења иницираних са врха торња претходила грмљавинска активност у близини. Већина (85%) окидача узлазних пражњења догодила се од априла до августа.

Примећено је да је сезонска појава узлазних пражњења на GBT потпуно другачија од појаве силазних. Узлазна пражњења на GBT јављају се више или мање уједначено распоређена током целе године и независно од укупне грмљавинске активности у Аустрији, у којој је изразита грмљавинска активност током летње сезоне. У осмогодишњем периоду од 2000-2007. године 56% негативних узлазних пражњења са GBT је регистровано током хладне сезоне (од септембра до марта), а 44% за време топле сезоне (од априла до августа). На осталим географским подручјима сезонска појава узлазног пражњења иницирана са високих структура може се доста разликовати од пражњења регистрованих на GBT.

На слици 5.4.1 приказана је месечна грмљавинска активност забележена на Gaisberg-овом торњу од 2000. до 2007. године. Осенчени стубови представљају конвективну

сезону (април - август), а неосенчени хладну (неконвективну) сезону (септембар - март) [4].



Слика 5.4.1: Месечна грмљавинска активност забележена на Gaisberg-овом торњу од 2000. до 2007. године

5.5. Упоредна анализа извршених мерења

Директна мерења струје

Директна посматрања струје на ниским торњевима са инструментима дала су најпрецизнија мерења вршне струје првог и накнадног повратног удара и трајања чела. Међутим, у многим студијама број случајева је толико мали да је статистички значај ограничен. Осим тога, варијације у мерењима вршне струје и трајању чела могу бити проузроковане малим разликама у инструментацији или анализи података од једне до друге студије, као и локалном топографијом која утиче на ефикасну висину торња.

Табела 5.5.1 приказује средњу вредност вршне струје израчунату из горе наведених података. Неки интересантни аспекти везани за ова запажања су наведени у наставку [7]:

Локација	Вршна струја (кА)	Број догађаја (мерења)
Швајцарска	30	101
Бразил	45	31
Јапан	29	120
Италија	33	42

Табела 5.5.1: Средње вредности вршне струје првог удара измерене на различитим торњевима

- a. У Бразилу је летња средња вредност вршне струје иста као за остале сезоне, док је у Швајцарској за 20% већа него током остатка године (37 кА). Ово указује на могућу сезонску зависност.

- b. У Бразилу у раздобљу од 1985-1988. нису забележене ниже вредности вршне струје од 20 kA. Ова чињеница делимично објашњава већу вредност за Бразил (50% већа од вредности за Швајцарску, коју је објавио К. Бергер) приказану у табели 5.5.1. Међутим, може се приметити да су вредности испод 20 kA измерене након 2007. године.
- c. Јапанска мерења су ограничена на вршне струје изнад 9 kA.
- d. У свим посматрањима не може се искључити могуће постојање узлазних пражњења, мада је мало вероватно, судећи по измереним струјним таласима.

Јасно је да су потребна додатна директна мерења струје првих удара.

У табели 5.5.2 приказан је преглед средњих вредности вршних струја, пренетог наелектрисања и трајања пражњења за 30 узлазних позитивних пражњења разматраних у студијама које су рађене у Швајцарској (Monte San Salvatore), Јапану и Аустрији (Gaisberg Tower) [4]. Број узорак је дат у заградама.

Студија	Вршна струја (kA)	Трајање пражњења (ms)	Пренето наелектрисање (C)	
Брдо Monte San Salvatore, Швајцарска	1.5 (132)	72 (138)	26 (137)	-
Nikaho Kougen ветропарк, Јапан	6.5 (16)	40 (16)	30.2 (16)	-
Gaisberg-ов торањ, Аустрија	11* (26)	82 (26)	58 (26)	0.16 (25)
Säntis торањ, Швајцарска	11.1* (30)	80 (30)	169 (30)	0.4 (30)

Табела 5.5.2: Поређење средњих вредности параметара узлазних позитивних пражњења из различитих студија (* означава пулсирајућу вршну струју)

Број удара при силазном негативном пражњењу између облака и земље

Типично негативно облак-земља пражњење састоји се од 3 до 5 удара (секвенци лидер/повратни удар), са типичним интервалима између од неколико десетина милисекунди. Највећи број удара по пражњењу, регистрован је у Новом Мексику (26 удара).

У табели 5.5.3 приказани су статистички подаци о просечном броју удара грома по пражњењу и процентуалне вредности једноструких удара муње регистрованих на различитим локацијама, користећи прецизне методе бројања удара. Из табеле се види да је проценат једноструких удара које је претходно препоручио CIGRE (45%) за више

од два пута већи од измерених вредности на свим локацијама. Процент једноструких удара у тропским подручјима (Шри Ланка и Малезија) је приближно исти као и у умереним регионима [3].

Положај (лоакција,место)	Просечан број удара по пражњењу	Процент појединачних (једноструких) удара муња	Број узорака (мерења)
Нови Мексико	6.4	13%	83
Флорида	4.6	17%	76
Шведска	3.4	18%	137
Шри Ланка	4.5	21%	81
Бразил	4.6	17%	883
Аризона	3.9	19%	209
Малезија	4.0	16%	100

Табела 5.5.3: Број удара при негативном пражњењу и проценат појединачних удара муње

Из директних мерења струје, средња вредност вршне струје главног пражњења је око 30 кА за негативне прве ударе у Швајцарској, Италији, Јужној Африци и Јапану и око 10-15 кА за пратеће ударе у Швајцарској и за иницирана и узлазна пражњења. Одговарајуће вредности мерења у Бразилу су 45 кА и 18 кА. Потребна су додатна мерења. „Глобалне” расподеле вршних струја негативних првих удара које тренутно препоручују CIGRE и IEEE (слика 3.5.1) се базирају на мешавини директних мерења струја и мање прецизних индиректних мерења, од којих су нека недозвољеног квалитета.

Више од 90% пражњења између облака и земље је негативног поларитета, од чега око 95% негативних првих удара прелази 14 кА, 50% прелази 30 кА, 5% прелази 80 кА, а неколико процената прелази вредност од 100 кА.

Мање од 10% укупних светских силазних пражњења између облака и земље је позитивно, док 20% позитивних пражњења прелази вредност од 100 кА.

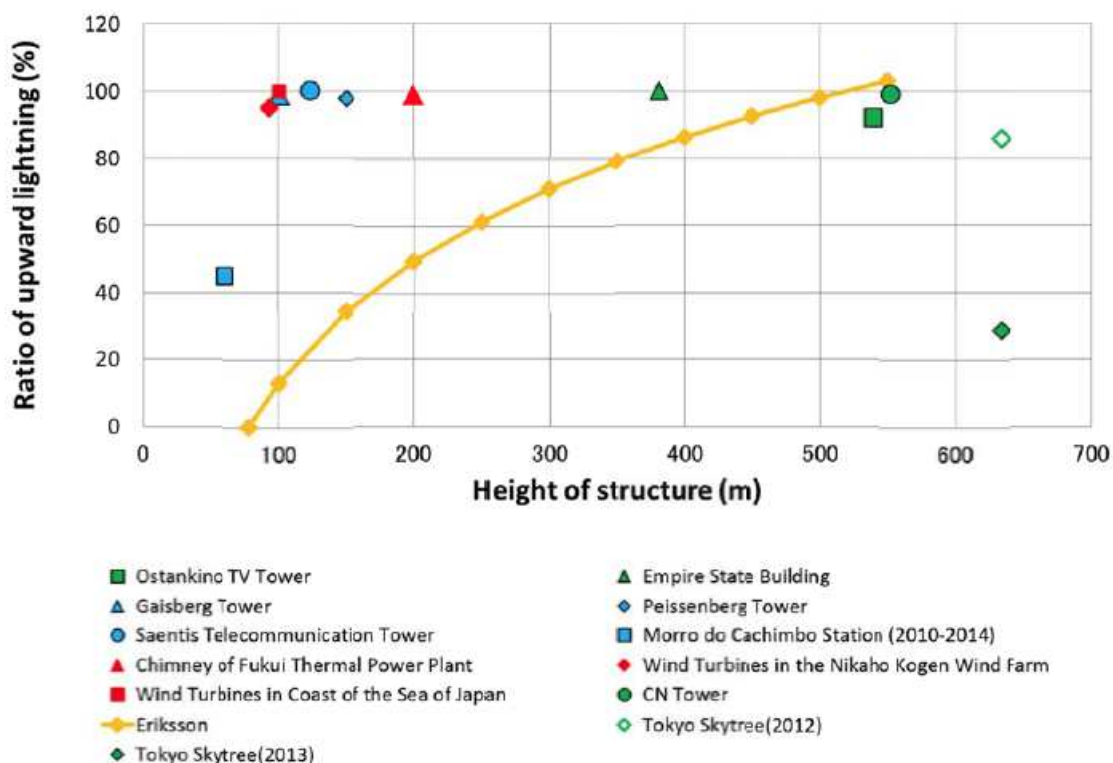
Директна мерења струје пражњења на торњевима са инструментима треба наставити. Тренутно, директна мерења струје се врше на торњевима у Аустрији, Бразилу, Канади, Немачкој и Швајцарској, иако је претежна већина регистрованих пражњења (осим за Бразил) узлазног типа.

Географске и сезонске варијације у параметрима пражњења

На могућу зависност параметара пражњења од географског положаја указивано је већ дуго низ година, посебно на вршне струје првих удара. Међутим, убедљиви докази нису објављени до сада, делимично због потешкоћа у добијању статистички значајних узорака података, а делимично због ефеката узрокованих разликама у инструментацији и методологији анализе података присутних у посматрањима на различитим локацијама.

Са физичке тачке гледишта, географске или сезонске варијације параметара грома би биле узроковане варијацијама у структури грмљавине које су резултат географских или сезонских фактора. „Географске варијације” у параметрима пражњења би биле оне повезане са променама у географској ширини, топографији, континенталности или другим карактеристикама терена. „Сезонска варијација” би се односила на температуру, влажност, општу атмосферску циркулацију или друге метеоролошке карактеристике.

Електрично поље на врху конструкције је важан фактор појаве узлазних пражњења. Слика 5.5.1 показује везу између стварне висине структуре и узлазног пражњења. У случају структура на брдским теренима (плаве тачке), однос узлазне муње је већи од вредности коју је предложио Ериксон (Ериксонова крива). У случају структура у зимској грмљавинској области у Јапану (црвене тачке), однос узлазног пражњења је такође већи од вредности коју је предложио Ериксон. У случају структура у равничарским пределима (зелене тачке), однос узлазног пражњења је скоро исти као и вредности које је предложио Ериксон. Међутим, у случају Токуо Skytree, однос узлазног пражњења се веома мења из године у годину [4].



5. Закључак

У раду су приказани параметри и закони расподеле атмосферских пражњења. Извршена је упоредна анализа метода за регистрацију параметара атмосферског пражњења. Приказани су и анализирани резултати мерења параметара грома на високим стубовима на различитим локацијама и указано је на тешкоће у обједињавању резултата због различитих климатских, географских и локалних тополошких услова на месту мерења.

Данас се користе закони расподела амплитуда струја грома најчешће у логаритамско-нормалном облику, који су добијени на основу већег броја регистрација струја у више земаља света. Закони расподела струја атмосферског пражњења се користе у инжењерској пракси при пројектовању громобранске заштите различитих објеката, али се посебна пажња посвећује заштити електроенергетских објеката. Због тога је велики број истраживања карактеристика атмосферских пражњења инициран потребама електропривреда у разним земљама. Из тог разлога постоје закони расподеле амплитуда струја атмосферских пражњења који су добијени сакупљањем резултата регистрација са наменом да се користе за потребе заштите електроенергетских објеката од атмосферских пренапона.

Према доступним информацијама у литератури, нема доказа о зависности параметара негативних пражњења између облака и земље од географске локације, осим за вршне струје првог и пратећих удара, за које је зависност мања од 50% са могућим варијацијама. Не може се искључити могућност да посматране разлике у мерењима струје настају због других разлога, а не због „географске локације”, због ограниченог броја узорака код појединих мерења. Такође, нема поузданих података о сезонској зависности атмосферских пражњења, као ни података о зависности негативних пражњења између облака и земље од географске локације или годишњег доба. Локални услови на појединим географским подручјима (на пример, зимске олује у Јапану) могу проузроковати чешћа појављивања неуобичајених типова атмосферских пражњења, првенствено узлазног типа, чији се параметри могу значајно разликовати од „стандардних” атмосферских пражњења. Додатна истраживања су неопходна да би се разјаснили ти услови и њихова могућа зависност од географског положаја, односно локације.

Системи за лоцирање атмосферских пражњења непрестано се унапређују и развијају, те су данас изузетно важни у пројектовању, заштити и управљању електроенергетских мрежа, те бројних других технолошких система изложених атмосферским условима. Праћење и надзор удара муња у реалном времену и простору може бити ефикасно средство и значајна помоћ при управљању електроенергетским системом. Како би се побољшала тачност развијених модела, потребно је осигурати континуирано прикупљање релевантних података о испадима електроенергетских објеката и потребних података из система за лоцирање атмосферских пражњења.

6. Литература

- [1] Милан Савић, Златан Стојковић: Техника високог напона – атмосферски пренапони, Електротехнички факултет, Београд, 2001.
- [2] Златан Стојковић: Материјали са предавања из предмета Техника високог напона 1, Електротехнички факултет, Београд, сајт катедре за ЕЕС, ees.etf.rs
- [3] Радна група C4.407: Lightning Parameters for Engineering Applications, CIGRE, август 2013.
- [4] Радна група C4.410: Lightning Striking Characteristics To Very High Structures, CIGRE, октобар 2015.
- [5] Институт Milan Vidmar: Заштита нисконапонских дистрибутивних мрежа и инсталација од атмосферског пражњења, Љубљана, јун 2015.
- [6] Милан Савић са сарадницима: Примена пренапонске заштите преносних надземних водова високог напона у циљу смањења броја кварова услед атмосферских пренапона, студија, Електротехнички факултет, Београд, децембар 2013.
- [7] Fridolin Heidler, Јован Цветић: A Class of Analytical Functions to Study the Lightning Effects Associated With the Current Front, ЕТЕП 12. део, број 2, март/април 2002.
- [8] Carlo Alberto Nucci: A survey on CIGRÉ and IEEE procedures for the estimation of the lightning performance of overhead transmission and distribution lines, Електротехнички одсек Универзитета у Болоњи, Болоња, Италија, новембар 2009.
- [9] Николина Остојић: Уређаји за регистрацију атмосферског пражњења, мастер рад, Електротехнички факултет у Београду, 2017.
- [10] Тања Торлак: Анализа параметара експериментално одређених атмосферских пражњења, мастер рад, Електротехнички факултет у Београду, 2017.

