

VILLÁMOK AZ ÚJ NEMZETI ALAPTANTERV TÜKRÉBEN

Takátsné Lucz Ildikó – Budapest II. Kerületi Szabó Lőrinc Kéttannyelvű Általános Iskola és Gimnázium
Tasnádi Péter – ELTE TTK Meteorológiai Tanszék

Az új NAT [1] és a ráépülő kerettanterv [2] gyökeresen megváltoztatta a fizikatanítás kereteit, lehetőségeit és tartalmát is. A tanterv fejezetei nem a fizika hagyományos fejezetei mentén kerültek kijelölésre, szokatlan címek jelentek meg a tartalmi anyag leírásában. (A közlekedés fizikája, szikrák és villámok stb.) Nagyot csökkent a kötelező óraszám és a többi természettudományos tárgyhoz hasonlóan az általános tantervű osztályok fizika tananyagát is be kell fejezni a tizedik osztály végéig. A természettudományos alapokat igénylő pályák felé orientálódó diákoknak lényegében 16 éves korukban el kell dönteni, hogy milyen pályára készülnek, hiszen a természettudományos felvételre csak fakultatív órákon tudnak felkészülni. A tantervkészítők által célként kitűzött tananyagcsökkentés elsősorban a feldolgozás mélységét érintette, tartalmilag rengeteg új, eddig nem szereplő, lényegében csak verbálisan, közlés szintjén feldolgozható téma jelent meg. Így a fizika tanításában is tudomásul kell venni, hogy az absztrakcióigényes részek, illetve fogalmilag nehezebb feldolgozás alig-alig illeszthető be a tananyagba. A fizika tantárgy korábban megfogalmazott céljai, a természettudományos törvények fogalomrendszerének, törvényeinek mennyiségi felhasználása, a természettudományos modellalkotás és a lényegi vonások kiemelésének bemutatása érdemben már csak a természettudományos irányban továbbtanulók számára, a fakultatív órakeretben valósítható meg.

E cikkben semmiképpen sem a NAT-ot vagy a kerettantervet kívánjuk értékelni. Célunk „cseppben a tengerként” az egyik új kerettantervi fejezetben, a

A tanulmány elkészítését a Magyar Tudományos Akadémia Tantárgy-pedagógiai Kutatási Programja támogatta.



Takátsné Lucz Ildikó az ELTE Fizika Doktori Iskola Fizika Tanítása alprogram PhD-hallgatója, az MTA-ELTE Fizika Tanítása Kutatócsoport tagja, a Budapest II. Kerületi Szabó Lőrinc Kéttannyelvű Általános Iskola és Gimnázium matematika- és fizikaszakos tanára.

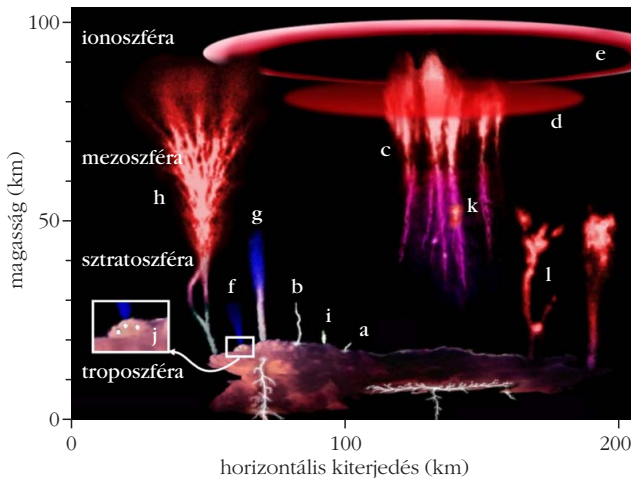


Tasnádi Péter matematika–fizika tanár, meteorológus, az ELTE TTK nyugalmazott egyetemi tanára. Tíz évig volt a TTK Oktatási dékánhelyettese. Egyetemi, középiskolai és általános iskolai tankönyvek szerzője. Kutatási területe a dinamikus meteorológia és a fizikatanítás szakmódszertana, korábban a fémfizika volt.

Szikrák és villámokban a villámok tanítási szerepének vizsgálata. A NAT-ot áttekintve nyilvánvaló, hogy a törvényalkotók a szikrák, villámok témakörön, a fizika irodalmában és a korábbi tantervekben elektrosztatika cím alatt tárgyalt anyagot értik. A villámok fizikája azonban lényegét illetően nem tárgyalható az elektrosztatika keretében. Szikrák, villámok akkor keletkeznek, amikor a sztatikus töltésfelhalmozódás miatt létrejövő feszültség meghaladja a közeg átütési szilárdságát, és a pozitív és negatív töltésű tartományok között lavinaszerű töltésmozgással kiegyenlítődik. Amikor a sztatikus tér növekedése miatt megjelennek a szikrák és villámok, akkor a sztatika törvényei már nem elegendők a bekövetkező jelenségek magyarázatához. Sarkosan fogalmazva, ahol a villámok megjelennek, ott ér véget az elektrosztatika. A villámban lefutó egy más utáni áramlökések bonyolult, az elektromágneses hullámok széles spektrumát mutató hullámteret hoznak létre. Cikkünkkel rá szeretnénk mutatni, hogy a villámokhoz hasonló komplex témák feldolgozása nem köthető a fizika egyetlen részfejezetéhez, a komplex téma csak abban az esetben lesz igazán hasznos, ha a fizika különböző fejezeteiben újra és újra visszatérünk hozzá, és ha kompromisszumokon és elhallgatásokon keresztül is, de eljutunk – az adott diákcsoport szintjén – a teljes leíráshoz.

A villámok témaköre véleményünk szerint motiváló ereje, érdekessége miatt került nagy súllyal a NAT kötelező anyagába, hiszen a napjainkban egyre gyakrabban tapasztalható extrém időjárási jelenségek, heves zivatarok és a velük együttjáró, időnként emberek életét is követelő, jelentős anyagi károkat okozó villámcsapások a társadalmi érdeklődés középpontjába is kerültek. Az új kerettantervben egyúttal hangsúlyosabbá válik a korábban kiegészítő vagy olvasmányrészben található villámvédelem kérdése is, ezen belül elsősorban a villámhárító működése. Új elemként jelenik meg a zivataros időben való helyes magatartás kialakításának igénye.

Mit és hogyan tanítsunk diákjainknak ezekből a témakörökből, figyelembe véve a problémakör összetettségét, a gyakorlatorientáltságot, az összóraszám csökkenését, ugyanakkor a témában rejlő óriási motivációs lehetőséget? Hogyan kerülhető el, hogy a fizika elveszítse talán legfontosabb szerepét, a természeti jelenségek mennyiségi leírásának megmutatását, és leíró jellegű tárggyá váljék? (Erre véleményünk szerint csak akkor van lehetőség, ha a tanárok több szabadságot kapnak kiegészítő tananyagok készítésére és tárgyalására.) További problémát jelent, hogy ezen témakörök – amint a NAT-ba beemelt sok egyéb témának is – rengeteg részlete még tisztázatlan, tudományosan is vizsgálat tárgya. Emiatt nagy terhet ró ránk, tanárookra a korántsem mindig világos tudományos magya-



1. ábra. Felsőlégi elektro-optikai jelenségek: a) közönséges, felfelé irányuló villámkisülés, b) felfelé irányuló óriás kisülés, c) vörös lidérc, d) lidércudvar, e) gyűrűlidérc, f) kis kék nyaláb, g) kék nyaláb, h) óriás nyaláb, i) törpe, j) tündérekék, k) troll, l) pálma lidérek (Élet és Tudomány 2013/15 nyomán).

rázatok megértése, illetve a bonyolult matematikát alkalmazó elméletek diákjaink szintjén történő interpretálása. Nem beszélve arról, hogy a frissen megjelenő tudományos eredmények könnyen válhatnak a tankönyvi anyag leggyorsabban avuló részévé.

A következőkben kifejezetten a légköri elektromosságra koncentrálna analizáljuk, hogy a villámok témaköre miként illeszthető be a tananyagba, mennyire kell kiegészíteni a kérdéskör pusztán elektrosztatikai ismeretekre támaszkodó tárgyalását ahhoz, hogy a fizikai szemlélet ne sérüljön. A szakmai anyag teljességében nyilván nem fér a tananyagba, azonban szakkörön kibontható, és hasznos kiegészítést jelent mind a fizika, mind a földi légkör sajátosságainak jobb megismeréséhez. Véleményünk szerint, ha nem elégszünk meg a villámok egyes tulajdonságainak felvillantásával és a villámvédelem rövid taglalásával, hanem a kérdéskört a légköri elektromosság tágabb kontextusában tárgyaljuk, akkor a tananyag kis bővítésével a tanulók fizikai szemléletét sokkal hatékonyabban fejleszthetjük, mintha a témát szűkre szabva a villámokra korlátozzuk.

Mit tudnak a diákok a villámokról?

A villámokat minden diák ismeri, így a téma megkezdésekor érdemes a tanulók tapasztalataira támaszkodva összegyűjteni az előismereteket. Általános tantervű gimnáziumi tizedik osztályban írtunk egyszerű tesztet, hogy a felmérjük a diákok „hozott” ismereteit. Az előzetes felmérés azért is hasznos, mert a különböző diákcsoportok ismeretei jelentősen eltérhetnek, és a felmérés birtokában alkalmazkodhatunk az előzetes tudáshoz, illetve megismerhetjük a jellegzetes tévképzeteket. A kérdéssort a témakör tárgyalásának befejezése után is megírtattuk a célból, hogy megvizsgáljuk az elsajátított ismeretek alakulását. A tesztből azokat a kérdéseket ragadtuk ki, amelyek jelen cikk témakörébe tartoznak.

1. Normál körülmények között a levegő jó szigetelő. A villámok kialakulásához a levegőnek vezetővé kell válnia. Szerinted hogyan lehetséges ez?

2. Tudod-e, hogyan csoportosíthatjuk a villámokat?

3. Mit gondolsz, hogyan jön létre a mennydörgés?

4. Milyen hatásait ismered a villámoknak?

5. A villámhárító feltalálója *Benjamin Franklin* volt.

a) Mit gondolsz, mi a villámhárító szerepe?

b) Helyes-e a „villámhárító” elnevezés? Válaszodat indokold!

6. A dörgés és a villámlás észlelése között eltelt idő ismeretében szerinted hogyan határozható meg a villámlás távolsága?

7. Az űrhajósok és a repülőgép-pilóták a felső légkörben kiterjedt fénytűnényeket észleltek. Hallottál róluk? Nevez meg közülük néhányat (1. ábra)!

A felmérésben 28 fő vett részt. Az ő eredményeik láthatók a 2. ábrán. A kérdések sorszáma a fenti lista kérdéssorára vonatkozik.

Néhány, a kérdésekhez kapcsolódó észrevétel:

2. kérdés: a villámok csoportosításának kétféle lehetőségére is kitért 5 tanuló.

4. kérdés: előzetes megkérdezéskor a tanulók csak a halált említették a villámcsapás hatásaként, míg utólagos válaszadáskor 18 fő legalább négyféle hatást sorolt fel.

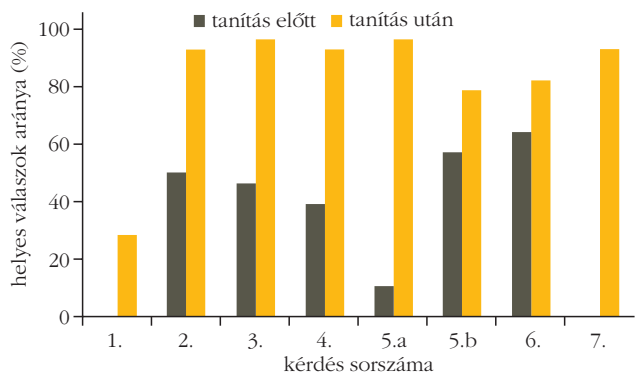
7. kérdés: mindegyiket 3 fő, legalább tizet 17 fő, legalább a felét 23 fő ismerte fel.

A teszt rávilágított arra, hogy a témakör elsősorban verbális ismeretekre épül, erre utal a tanítás utáni majdnem 100%-os eredmény, valamint az, hogy a felsőlégi fénytűnényeket korábban egyetlen tanuló sem ismerte. A tananyag órai megtárgyalása ezért nem megértési, hanem tényanyagbeli hiányosságokat pótol. Nagy a felelősségünk tehát abban, hogy a villámok témakörből mit emeljük be a tananyagba, hogy a hétköznapi ismeretek mellé szemléletformáló többletet adjunk, ugyanakkor hagyjunk időt az elektrosztatika fontos fogalmainak kellő súlyú tárgyalására is.

A légkör elektromos kisülései, a villámok

E fejezetben a villámok keletkezésére, tulajdonságaira, hatására és a Föld légkörében betöltött szerepére vonatkozó ismereteket foglaljuk össze. Az összefogla-

2. ábra. Az előzetes és utólagos felmérés eredményei. Vízszintesen a kérdések sorszáma, függőlegesen a megoldottság mértéke látható.



lás tanári szemmel a tudományos anyag tanítási reprodukciójának (Modeling Education Reconstruction) szempontjait követve tesszük meg.

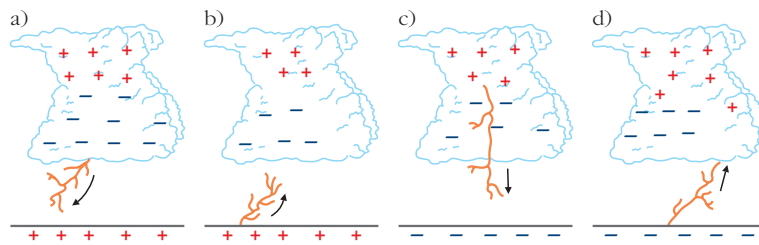
Egy kis fizikatörténet

A légköri elektromosság vizsgálatának első lépéseit Benjamin Franklin tette meg a 18. század második felében. Abban az időben kétféle elektromosságot ismertek, az úgynevezett üvegelektromosságot és a gyantaelektromosságot. Mindkettő dörzsölés hatására keletkezett és megállapították, hogy a kétféle elektromosság vonzza egymást. Franklin egyetlen töltésfajtát tételezett fel, az üvegtöltést. A test elektromos állapota szerinte attól függ, hogy ebből az elektromos töltésből a testen a normálnál több van-e, vagy éppen hiány (ő vezette be a negatív és pozitív töltés fogalmát is). Franklin úgy magyarázta az elektromos jelenségeket, hogy a villamos töltés önmagára taszító hatást fejt ki, viszont a villamos töltés és az anyag vonzza egymást.

Zivatartelől elsőként *Thomas-François D'Alibard* nyugalmazott dragonyos katona csapott le szikrákat 1752. május 10-én egy Párizs melletti kis francia faluban (Marly-la-Ville) egy 12 m hosszú vasrúddal, amit a földtől borosüvegekkel szigetelt el. Benjamin Franklin megismételte D'Alibard kísérletét, és a szikrákat az elektromossággal hozta kapcsolatba. Ebben az időben sok tudós írta le a laboratóriumi kísérletek és a villámlás közötti hasonlóságot. A kísérletet több országban (Olaszország, Hollandia, Anglia) is megismételték, és maga Benjamin Franklin is többször elvégezte. Franklin kísérletei közül a legismertebb a „sárkányos” kísérlet. Ebben közel 1 méter széles sárkányt használt, amelynek zsinórja 2,5 m hosszú nedves kendermadzagból készült, amelybe vashuzalt szöttek. A zsinór végén rézből készült kulcs függött, a kísérletező (Benjamin Franklin) a jobb kezén pedig aranygyűrűt viselt. A gyűrű és a kulcs között már akkor szikrák keletkeztek, amikor a felhő még nem mutatott zivatartevékenységet.

A történeti összefoglalás jó kapcsolódási lehetőséget jelent az elektrosztatika fogalomrendszerének kialakításához.

Benjamin Franklint követően a 19. század végi spektroszkópia és fotográfia megjelenéséig nem volt jelentős tudományos előrelépés a villámlás folyamatának megértésében. A villámlás olyan gyors folyamat, hogy időbeli lefolyása hozzáférhetetlen volt a kutatók számára. Az áttörés akkor következett be, amikor 1900-ban *Charles Vernon Boys* speciális fényképezőgépet talált fel, amely lehetővé tette, hogy a villámlásról nagyon rövid idő alatt sorozatfelvétel készüljön. A fényképezőgép lencséje mögött a film gyorsan mozgott és a filmen széthúzva egymás mellett jelentek meg a villám időbeli fázisait mutató képek. A felvételekkel 1 mikroszekundumos felbontásban vált nyomon követhetővé a villámlás folyamata. A felvétel természetesen csak a villámlás fázisait teszi elkülöníthetővé, a folyamat okára és a villám viselkedésre nem ad magyarázatot.



3. ábra. A lecsapó villámok csoportosítása. a) negatív felhő-föld villám, b) pozitív föld-felhő villám, c) pozitív felhő-föld villám, d) negatív föld-felhő villám.

A villámok tulajdonságai

Normál körülmények között (10^5 Pa és 293 K) a levegő kiváló szigetelő, átütési szilárdsága a tengerszinten 3 MV/m (a magasság növekedésével értéke csökken). Ez azt jelenti, hogy ha az elektromos térerősség meghaladja ezt az értéket, akkor a levegő vezetővé válik, benne különböző kisülési jelenségek jöhetnek létre. Ilyenek a villámok is. Villámok keletkezhetnek felhőkön belül, két felhő között, illetve felhő és a Föld felszíne között is. Villámcsapáskor a térerősség értéke hirtelen lecsökken, majd rövid időn belül (néhány másodperc elteltével) exponenciálisan növekedve visszaáll eredeti értékre, ami a felhő ismételt feltöltéséhez vezet.

A felhő-föld, úgynevezett lecsapó villámoknak négy csoportját különböztetjük meg a villám kiindulási helyének és a benne szállított töltés előjelének megfelelően. Ezeket a típusokat szemlélteti a 3. ábra.

A villámlás folyamatát ma már jól ismerjük, gyorsfilmes eljárásokkal pontosan megállapították a villám időbeli lefolyásának szakaszait [3–6]. (Megjegyezzük, hogy a villámokról jelenleg már félmillió képkočka/másodperc sebességgel készített videofelvételek is rendelkezésre állnak.)

A villám szakaszai a következők:

1. Elővillám (átütés a felhőalap ellentétes előjelű tartományai között) és a felhőn belüli, két irányban terjedő vezetőcsatorna kialakulása,
2. lépcsős vezetés létrejötte a felhőn belül (az elnevezés eredete, hogy a vezető csatorna nagyon rövid ideig tartó lépcsőfokokhoz hasonló felvillanásokban terjed, a felvillanások között 10–100 μ s idő telik el),
3. a lépcsős vezetés megindul a föld felé, ugyanakkor vele egyidejűleg a vezetési csatorna másik része pozitív töltést szállít a felhő negatív töltésközpontja felé,
4. a lefelé gyorsan mozgó töltések ionizálják, így vezetővé teszik a levegőt, és kialakul a villámcsatorna,
5. a lefelé haladó vezetési csatorna megosztó hatásának és a földön található hegyes objektumok körüli csúcshatásnak köszönhetően a földről úgynevezett csatoló vezető indul a felhő felé,
6. amikor a felhőből lefelé és a földről felfelé tartó vezetési front összekapcsolódik, létrejön az első „visszacsapás”. Ekkor a villámcsatorna felfénylik, a vezetési csatorna hirtelen felmelegszik, kitágul, lökéshullámot generál a környező levegőben. Ez a mennydörögés oka.

7. A visszacsapó front eléri a felhőt, a villámlás egy pillanatra megszűnik, de megmarad az ionokkal teli villámcsatorna,

8. megindul az első dárda (gerely) villám a föld felé (a dárдавillám a felhőn belül ott keletkezik, ahol a vezetési csatorna megszakadt, de a visszacsapó villám a lépcsős vezetés során kialakult, még forró csatornát helyreállítja, a dárдавillám ebben a csatornában halad megszakítások és újabb ágak létrehozása nélkül). A dárдавillám nevét az egyenes terjedésről kapta.

9. Megindul a második visszacsapás,

10. a dárдавillám-visszacsapó villám kialakulási folyamata többször ismétlődik.

A villámnak mind térbeli, mind időbeli szerkezete bonyolult, és nyilvánvaló, hogy a tanításban megelégedhetünk a folyamat két szakaszra, az elővillámra és a fővillámnak nevezhető visszacsapóvillám-szakaszra bontásával. Az elővillámot a lefelé haladó és ennek során vezetési csatornát kialakító kisüléssel érdemes azonosítani, míg a fővillámot a visszacsapó szakasszal. A fővillám töltéskiegyenlítődési folyamata a fénysebességgel összemérhető sebességű hullámként szalad a föld felől a felhő felé. Az áramerősség csúcserőssége ezekben a folyamatokban 30 000 amper, de extrém esetben a 80 000 amper is elérheti. A visszacsapásban a földre jutó negatív töltés 5 coulombra becsülhető. A nagy áramerősség komoly hő keletkezésével jár. A visszacsapás során a vezető csatorna hőmérséklete a 36 000 kelvint is elérheti. A szinte pillanatszerűen felszabaduló hő hozza létre a korábban már említett lökéshullámot és mennydörgést. A visszacsapó szakasz a villámlás legfontosabb része, a pusztító hatás és a mennydörgés is ennek következménye. A hirtelen megnövekvő áram erős elektromágneses hullámot is kelt, ez zavarja például a rádióadást, de tönkretelheti a számítógépeket is. Pusztán szemmel nem különíthetők el a villám fényes és sötét szakaszai. Amit érzékelünk, az általában a lépcsős csatorna fénye, ami nem különül el a visszacsapás fényhatásától, és a villám lecsapása után rövid ideig folyamatosan fényes marad. A visszacsapás néhány száz mikroszekundum alatt lezajlik. Ezután a csatorna már nem fénylik, azonban hőmérséklete még néhány száz milliszekundumon keresztül több ezer kelvin hőmérsékletű marad. Ezzel a villám élete befejeződhet, gyakoribb azonban, hogy az első folyamatban

keletkező forró vezető csatornán többször is megismétlődő újabb villámcsapás fut végig.

A villámcsapás fizikai tulajdonságai közül a villámok (káros) hatását meghatározó elemek a következők:

- a *villámáram csúcserőssége* a becsapási pontban,
- a becsapási ponton *kiegyenlítő töltésmennyiség*,
- az áramhullám kezdeti felfutó szakaszán fellépő

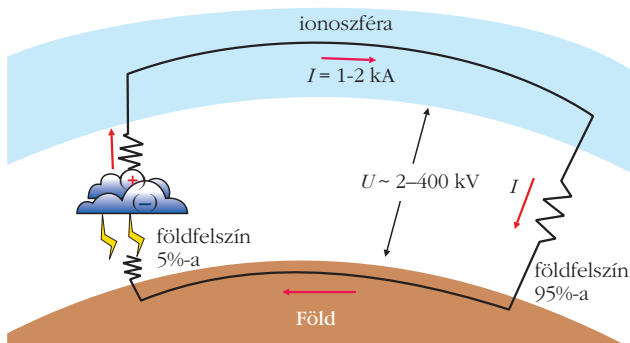
úgynevezett *árammeredekség*, amely azt mutatja meg, hogy az áramerősség 1 mikroszekundum alatt hány kiloamperrel változik (ez a mágneses tér változásán keresztül az indukált elektromos teret szabja meg),

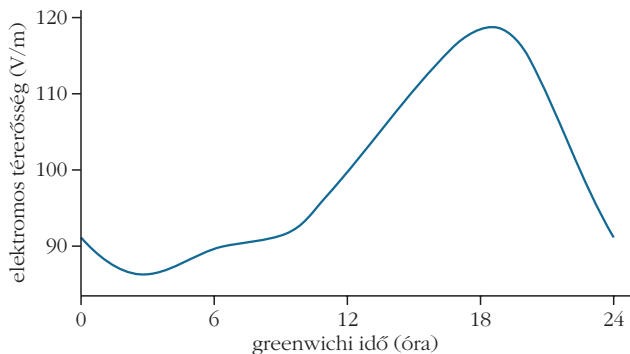
- a *fajlagos energia*, ez az energia a villámáram hatására az 1Ω ellenálláson felszabaduló energiát jelenti, így a villámok több káros hatása szempontjából is kiemelkedő jelentőségű.

A Föld légkörének elektromos szerkezete – a nagy légköri elektromos áramkör

A villámok keletkezése és szerepe a légköri elektromosságban nem érthető meg néhány fontos, a földi légkörre vonatkozó tény ismerete nélkül. A továbbiakban ezeket részletezzük. A tapasztalat szerint a Föld negatív töltésű és mintegy 50 km magasságban ionokból álló réteg (ionoszféra) veszi körül, amelynek eredő töltése pozitív. Mind a földfelszín, mind az ionoszféra jó vezetőnek tekinthető, így a két réteg hatalmas gömbkondenzátort alkot, amelynek feszültsége jó közelítéssel 400 kV. Ezt a kondenzátort levegő tölti ki, amely ilyen nagy feszültség mellett rossz szigetelő. Bár a felszín felé folyó áramsűrűség átlagos értéke rendkívül kicsiny, ha a teljes földfelszíntől induló áramot kiszámítjuk körülbelül $1-2 \cdot 10^3$ A-t kapunk. Ez az áram nagyjából állandó, és pozitív töltéseket szállít a felszínre. (Az áram teljesítménye közel $7 \cdot 10^8$ W.) Azonnal felmerül a kérdés, hogy ezen áram hatására miért nem szűnik meg a Föld negatív töltése? A földfelszín irányába folyó mintegy $1-2 \cdot 10^3$ A áram ugyanis körülbelül fél óra alatt kisütné a Föld negatív töltését [7]! A kérdésre a választ a Nobel-díjas *C. T. R. Wilson* adta meg egyszerű modell formájában. Wilson egyszerű áramkört képzel el a talaj és az ionoszféra között (4. ábra). Alapgondolata szerint a Föld és az ionoszféra által alkotott hatalmas kondenzátor lemezeit a zivatarok villámai folyamatosan újratöltik! A zivatarokban szétváló töltések miatt a felhő-föld villámok folyamatosan negatív töltést szállítanak a Földre, míg a felhőtető és az ionoszféra között folyó áramok pozitív töltést visznek az ionoszférába. Egy zivartart átlagosan 1 A áramot keltő generátornak tekinthetünk, így a Földön összességében nagyjából mindig 1000–2000 zivatar tombol. Azonnal megállapítható, hogy a felhőmentes „szépidő-zónák” és felhős, zivataros tartományok elektromos szempontból is nagyon eltérnek egymástól. A „szépidő-zónák” kiterjedése bármely időpillanatban sokkal nagyobb, mint a zivatarosaké. (A zivataros területek nagysága a teljes földfelszín nagyjából 4-5%-a [3, 6]. Természetesen az átlagtól sokféle eltérés tapasztalható, a zivata-

4. ábra. A nagy légköri elektromos áramkör.





5. ábra. A térerősség napi alakulása a „szépidő-zónában”.

rok számának évszakos és napi menete is van. A 4. ábra áramköre a szépidő-zónákat egyetlen ellenállással, a zivataros területeket pedig egyetlen generátorral helyettesíti.

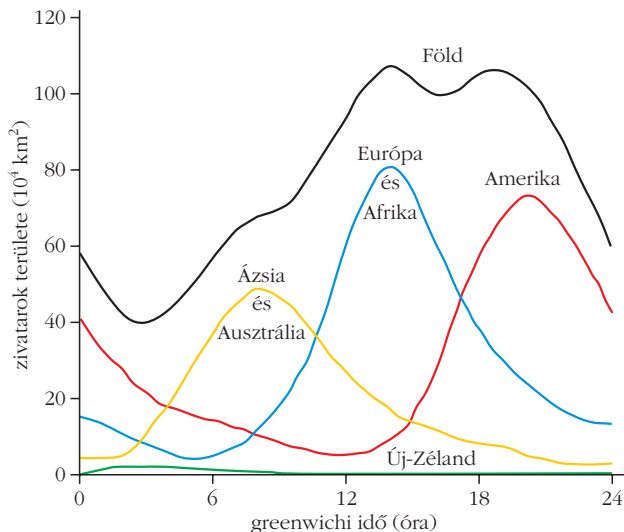
Az elektromos térerősség napi menete

A mérések szerint a potenciálgradiens derült időben, a Föld óceánjai felett, a helytől függetlenül jó közelítéssel minden pillanatban azonos, azaz napi menete nem a lokális, hanem az abszolút időtől függ (5. ábra). (A méréseket azért érdemes az óceánokon végezni, mert a helyi szennyeződések nagyot változtathatnak a potenciálgradiens értékén, az óceánok felett azonban többnyire tiszta a levegő.) A helytől való függetlenségét a Nobel-díjas *Edward Victor Appleton*, az ionosféra egyik felfedezője éppen azzal magyarázta, hogy a Föld körül elhelyezkedő nagy vezetőképességű réteg (az ionosféra) lehetetlenné teszi a lokális potenciálkülönbségeket. Az 5. ábra azt mutatja, hogy akárhol is végezzük a méréseket, a térerősség maximuma a greenwichi időnek megfelelően este hét órákor, minimuma pedig hajnali négy órákor következik be. A mérések szerint ugyanezt a menetet követi a Föld összesített zivatarvekenysége is (6. ábra)!

A 6. ábráról könnyen megérthetjük az első pillantásra misztikusnak tűnő időfüggés okát is. A Föld zivatarvekenységében Afrika és az amerikai kontinens egyenlítői területei domináns szerepet játszanak. Akkorra esik a Föld zivatarvekenységének maximuma, illetve a minimuma, amikor ezeken a kontinenseken a legtöbb, illetve legkevesebb zivatar alakul ki [3, 8]. Az ionosféra és a föld közötti elektromos feszültség (így a térerősség is) érthetően akkor a legnagyobb, amikor a zivatargenerátorok legintenzívebben működnek.

Töltésszétválás a zivatarfelhőben

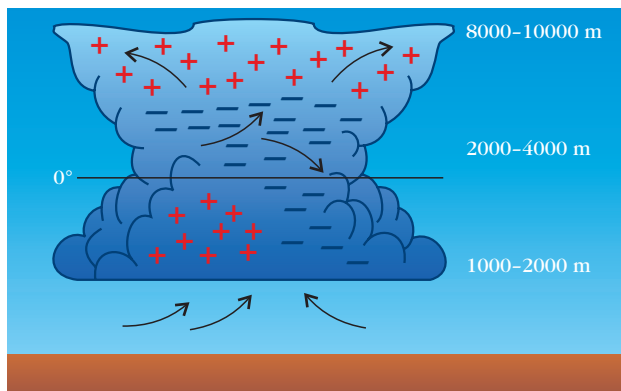
A zivatarfelhő (cumulonimbus) feltűnő megjelenésű, könnyen felismerhető felhőtípus. Mind vízszintes, mind függőleges irányban nagy kiterjedésű, sötét színű felhő, amely kisebb zivatarcella esetén is körülbelül 20 millió tonna levegőt, 100–300 ezer tonna vizgőzt és nagyjából ugyanennyi folyadékvizet tartalmaz különböző formákban. Magassága akár 12 km is le-



6. ábra. A napi zivatarvekenység globális eloszlása.

het, oldalról toronyszerű, hegységre emlékeztető felépítésű, míg a felhőtető jellemzően ellaposodó, üllő alakban szétterülő. Kialakulását a Föld felszínének felmelegedése miatt létrejövő nagy intenzitású konvekció okozza, amely egyben meghatározza a felhő elektromos szerkezetét is (7. ábra). Létrejöttét heves záporok, mennydörgés és villámlás kíséri. Ez utóbbit a zivatarfelhő töltéseloszlása határozza meg, amelynek egyszerűsített, de a lényegét kifejező változatát szemlélteti a 7. ábra. A kutatók a 20. század elején kezdték vizsgálni a felhők elektromos tulajdonságait, először megszületett a „felhő-dipól” elképzelés, amelyet később tripólusszerkezetté egészítettek ki. Ma már ballonos mérések adatai alapján egyértelműen tudjuk, hogy valóságban a helyzet ennél sokkal bonyolultabb. A felhőfizikai kutatások következő, zivatarfelhőkkel kapcsolatos nagy kérdése a töltések keletkezésének magyarázata volt. A folyamatra kielégítő választ még nem sikerült adni. A mechanizmus nagyon összetett, a jelenleg leginkább elfogadott magyarázat szerint a töltésszétválás többé-kevésbé független az elektromos térerősségtől. Az elmélet szerint a töltéseloszlás a könnyű jégkristályok és a nagyobb graupelek (nagy jégzemcsék) ütközésén, s a felhőben lévő túlhűlt víz mennyiségén múlik. Laboratóriumi mérések szerint a felhőelemek ütközését követően

7. ábra. Töltéseloszlás a zivatarfelhőben.



a részecskék töltésének előjele a hőmérséklettől függ [3, 9]. Ütközés után a lefelé eső graupelek töltése -15 °C-nál alacsonyabb hőmérsékleten negatív, a kisebb jégkristályoké pedig pozitív lesz. A -15 °C-nál magasabb hőmérséklet-tartományban a töltések éppen ellenkező módon alakulnak, a nagy graupelek töltése lesz pozitív és a kicsiny jégkristályoké negatív. Az elmélet szerint a kritikus -15 °C-os szinten negatív töltések halmozódnak fel. Ez már megmagyarázza a -15 °C-os izotermánál megjelenő negatív töltésű tartományt, s a felette a feláramlással felfelé sodort könnyű pozitív jégkristályokból kialakuló pozitív tartományt (7. ábra).

A levegő vezetőképesége

A légkör alsóbb rétegeiben a gázok semleges atomok vagy molekulák formájában fordulnak elő, ezért ott a levegő szigetelőként viselkedik. A felszín közelében – a földkéregben található radioaktív anyagok sugárzásának köszönhetően – a levegőben csekély számban előfordulnak szabad elektronok (1 cm³ levegőben 10 darab szabad elektron), de ez önmagában még nem elegendő ahhoz, hogy a levegő vezetővé váljon. A levegő mindig tartalmaz „szennyeződések” (finom porszemekhez hasonló talajrészecskéket, vagy tengervízcseppekből visszamaradó NaCl kristályokat stb.), amelyek a levegőben lebegve feltöltődnek. Ezen lassú mozgású, nagy ionok száma időben és térben nagyon eltérő lehet. Ők okozzák a levegő vezetőképeségének változékonyságát. A felszíntől távolodva a légköri vezetőképeség alakulását a naptevékenységből származó töltött részecskék, valamint a kozmikus sugárzás határozza meg. A kozmikus sugárzás hatására keletkező kicsiny ionok sokkal mozgékonyabbak, mint a „szennyező” magként megjelenő nagy ionok. A magassággal a levegőben található ionok és töltött részecskék száma ugrásszerűen megnő, ami a vezetőképeség rohamos emelkedéséhez vezet. Ennek egyik oka a kozmikus sugárzás keltette ionizáció fokozódása, a másik a levegő sűrűségének csökkenése, amelynek következtében megnő az ionok szabad úthossza. Körülbelül 50 km-es magasságban a légkör vezetővé válik.

A villámok keletkezése

Felmerül a kérdés, vajon mitől függ, hogy adott pillanatban történik-e villámcsapás. Egyszerűnek tűnik a válasz: amint a kondenzátor lemezei között akkor keletkezik átütés (szikra), amikor az elektromos tér eléri a szigetelőanyag átütési szilárdságát, a levegő ellentétes töltésű tartományai között is ez a villámlás (átütés) feltétele.

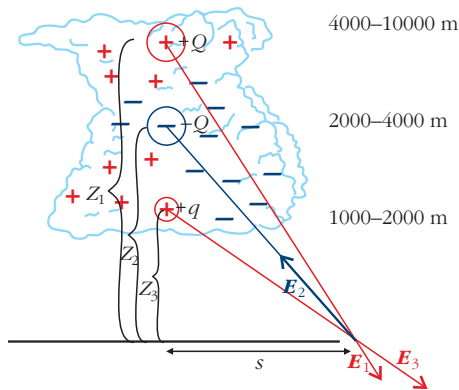
A felhőkben végzett mérések azonban kellemetlen meglepetéssel szolgáltak. Bár a levegő nem tökéletes szigetelőanyag, átütési szilárdsága, ahogyan korábban már említettük, normál körülmények között igen nagy (2-3 MV/m). A felhőkben az elektromos tér ezt

sohasem éri el, villámok tehát egyáltalán nem is keletkezhetnének. A tapasztalat szerint azonban a villámok keletkezéséhez nagyjából 200 kV/m térerősség elegendő lehet. Elegendő lehet, de nem mindig elegendő! A helyzet fizikailag teljesen érthetetlennek tűnik, értelmes magyarázat csak akkor adható, ha levegő átütési szilárdsága valamilyen hatás miatt nagyot csökken.

A klasszikus elméletek a villám keletkezését a lokális elektromos tér nagymértékű, az átütési szilárdság fölé növekedésének tulajdonítják, a lokális térerősség-növekedést pedig a felhő töltött részecskéinek ütközésével magyarázzák. Feltételezik például, hogy az ütközések miatt egymás közelébe kerülő töltött részecskék egyetlen elnyúlt alakzattá rendeződnek, amelynek tere meghaladhatja a levegő átütési szilárdságát. Az elektromos tér növekedése létrejöhet a levegő meghatározott térfogatrészének turbulens folyamatok miatti hirtelen, nagymértékű összenyomódása következtében is. Ekkor az összenyomódó térfogatban a töltések is összesűrűsödnek, így az eredő térerősség lokálisan hirtelen megnövekszik, és bekövetkezhet az átütés. A lokálisan hatalmasra növekedő tér azonban sohasem figyelhető meg. Az elmélet szerint azért nem, mert a térerősség-növekedés lokálisan és csak átmenetileg, rövid időtartamban történik meg, így előre nem jósolható, hogy mikor és hol kellene mérni. Amennyiben azonban a felhő kicsiny tartományában átütés keletkezik, akkor már csak 250 kV/m szükséges ahhoz, hogy vezető csatorna jöjjön létre, amelynek terjedéséhez már csak 100 kV/m térerősség szükséges, s ilyen háttér-térerősségben már egymást követhetik a villámterjedés korábban megtárgyalt szakaszai.

A fenti kép azonban inkább azt a hatást kelti bennünk, hogy a tapasztalat szerint villámok léteznek, de keletkezésük oka nem világos számunkra.

Alekszander Gurevics orosz fizikus a múlt század kilencvenes éveiben a kozmikus sugárzásban vélte megtalálni a levegő vezetőképeségét megnövelő hatást. A kozmoszból a légkörbe érkező nagyenergiájú részecskék a levegőt ionizálják, és az így keletkező kozmikus záporban gyors elektronok is keletkeznek, amelyek a felhő elektromos terében felgyorsulnak és a levegő molekuláival ütközve további ionokat keltenek, s ezzel megnövelik a levegő vezetőképeségét, csökkentik az átütési szilárdságot. Az átütési szilárdság csökkenését döntően a nagyenergiájú, úgynevezett „szökő” elektronok (runaway electrons) hozzák létre, magát a jelenséget szökő átütésnek nevezhetjük. A nagyenergiájú elektronokból álló lavina már lassú elektronokból is olyan sokat kelt, hogy a nagyszámú töltéshordozó összesített hatására a levegő átütési szilárdsága lecsökken. Nagyon fontos, hogy a gyors elektronok továbbgyorsulásához szükséges elektromos tér csupán tizede a levegő átütési szilárdságának. Gurevics elméletét azzal támasztotta alá, hogy kísérletileg ellenőrizte a kiterjedt kozmikus záporok bekövetkezésének és a villámcsapások keletkezésének időbeli egyezését.



8. ábra. A felhő elektromos tere a Föld felszínén.

A villámok beépítése a fizika tananyagba

Pontos képet az új tanterv alkalmazásáról csak hosszabb tanítási tapasztalat után adhatunk, néhány következtetés és ajánlás azonban már most is tehető. Mindenképpen megerősíthető, hogy a villámok felkeltik a diákok érdeklődését, javítják a fizika iránti attitűdöt. A villámok tulajdonságainak tárgyalása a fizika több ágával kapcsolatba hozható, fejleszti a diákok természettudományos szemléletét és a különböző témakörben tanult törvények felhasználásával elősegíti a tudástranszfert. Tantervi beiktatása az elektrosztatikába indokolható, de igazán csak akkor lehet hatékony és a fizika egészébe jól beépülő, ha a villámok tulajdonságainak tárgyalására az elektromágneses hullámok keretében is visszatérünk. A tantervi kényszer miatt el kell gondolkozni azon, hogy az elektrosztatika keretében hol és milyen mélységben érdemes a témát feldolgozni. Nyilvánvaló, hogy inkább a viharfelhők elektrosztatikus terének egyszerű modelljeit tudjuk használni, és a villámokra csak keletkezésük feltételeinek vizsgálata kapcsán kerülhet sor. A tanításban mindenképpen az elektrosztatika törvényrendszerének megismertetését kell elsődlegesen tekinteni, s ehhez alkalmazkodva kell megválasztanunk a villámmal kapcsolatos ismeretanyagot. Hangsúlyoznunk kell az egyszerűsítések szerepét.

Az elektrosztatika bevezetésekor bemutatatható kísérletek, a dörzselektromos szikrák, illetve a Van de Graaff-generátor és a leydeni palack nagyobb szikráinak bemutatása, valamint a villámokkal való analógiák jó alkalmat szolgáltatnak arra, hogy a villámkeletkezésről és a zivatarfelhő elektromosságáról egyszerű képet mutassunk be tanulóink számára. A következőkben azokat a csatlakozási pontokat emeljük ki, ahol a sztatika tananyagban érdemes villámokkal kapcsolatos ismereteket feldolgozni.

1. A Coulomb-törvény alkalmazásaként a felhők hárompólusú modelljét használva és a töltéseket pontszerűnek tekintve kiszámíthatjuk a felhőtől távolodva a télerősséget. Alkalmos töltésmennyiségekkel meghatározhatjuk, hogy felhő–felhő, illetve felhő–föld villám hatására hogyan változik a télerősség. Több töltés terének összegzésével illusztrálhatjuk, hogy az elektrosztatikus térre érvényes a szuperpozíció elve.

A töltéscentrumoktól származó télerősségvektorok a földfelszín egy pontjában (lásd a 8. ábrát):

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_1 &= k \frac{Q}{r_1^2} \frac{\mathbf{r}_1}{r_1}, & \mathbf{E}_2 &= k \frac{Q}{r_2^2} \frac{\mathbf{r}_2}{r_2}, \\ \mathbf{E}_3 &= k \frac{q}{r_3^2} \frac{\mathbf{r}_3}{r_3}, & \mathbf{E} &= \mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2 + \mathbf{E}_3. \end{aligned}$$

A töltéscentrumoktól származó télerősségvektorok felszínre merőleges komponensei a földfelszín egy pontjában (lásd újra a 8. ábrát):

$$\begin{aligned} E_1 &= -k \frac{2Qz_1}{(z_1^2 + s^2)^{3/2}}, & E_2 &= k \frac{2Qz_2}{(z_2^2 + s^2)^{3/2}}, \\ E_3 &= -k \frac{2qz_3}{(z_3^2 + s^2)^{3/2}}, & E &= E_1 + E_2 + E_3, \end{aligned}$$

ahol $k = 9 \cdot 10^9 \text{ Nm}^2\text{C}^{-2}$, Q a felhő felső pozitív, $-Q$ a felhő középső negatív, q a felhő alsó pozitív tartományának töltése; r_1 , r_2 , r_3 a földfelszín vizsgált pontjának távolsága az egyes töltéscentrumoktól, z_1 , z_2 , z_3 , valamint s ezen \mathbf{r} vektorok függőleges, illetve vízszintes komponensei.

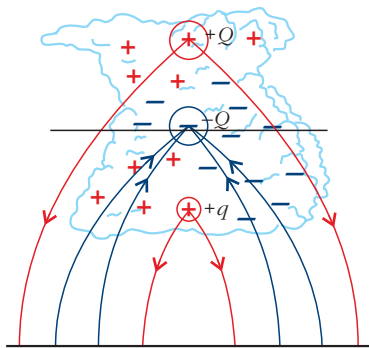
A földfelszín először síknak érdemes tekinteni, és a télerősségek vektori összegzése mellett a felszínre merőleges télerősség-összetevőt is meghatározni (8. ábra). Számítógépes ábrával jól bemutatatható ezen összetevő változása.

$$\Delta E = k \frac{2qz_3}{(z_3^2 + s^2)^{3/2}} - k \frac{2(Q - Q')z_2}{(z_2^2 + s^2)^{3/2}},$$

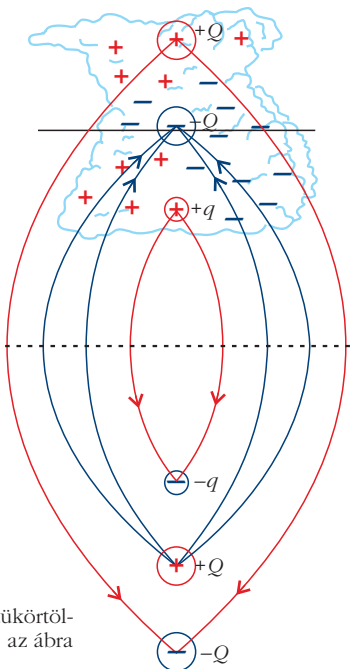
ahol $Q' = Q - \Delta Q$. A számítások során feltételeztük, hogy a felhő–föld villám a felhő alsó pozitív tartományát teljesen semlegesíti. Ha egy villámlás alkalmával a negatív töltéscentrum töltésmennyiségének változása $-\Delta Q$, akkor a villám a felszín felé $-\Delta Q + q$ töltést szállít. A tanítás során azonban érdemes megjegyeznünk, hogy valójában a felhő töltéscentrumainak megfelelő töltésmennyiségek nem tekinthetők pontszerűnek.

2. A feladat kapcsán megbeszélhető, hogy mekkora télerősség, illetve feszültség szükséges ahhoz, hogy a villámcsapás bekövetkezzék. Tisztázható az átütési feszültség fogalma. A nagyságrendek ismertetésekor elfogadtatható, hogy ilyen télerősségek mellett a föld (és az emberi test is) jó vezető, így a Föld felszíne ekvipotenciális felület. (Ezt az elektrosztatikus kísérletek is jól alátámasztják.)

3. Ismerve, hogy a Föld negatív töltéssel rendelkezik, furcsa, hogy a felhő–föld villámok negatív töltést szállítanak a földre. Az ellentmondásosnak látszó tény magyarázata jó példa a megosztás jelenségére, tehát arra, hogy az elektromos térbe helyezett vezetőkből a töltések átrendeződnek. (A többlettöltés a vezetők felszínén helyezkedik el, a külső tér merőleges a felületre, belül a télerősség zérus, és a teljes térfogat ekvipotenciális.) A felhő központi, nagy negatív töltése



9. ábra. A felhő elektromos tere (az egyes töltések terét 2-2 erővonallal szemléltetjük, az ábra nem a három töltés eredő terét mutatja).



10. ábra. Tükörtöltéspárok tere (az ábrán a tükörtöltéspárok terét 2-2 erővonallal szemléltetjük, az ábra nem a három töltéspár eredő terét mutatja).

miatt a föld töltésseloszlása megváltozik, a felhő alatt nagy tartományban pozitív töltéstöbblet keletkezik (9. ábra). (Ez természetesen nem sérti a szuperpozíció elvét, mert amikor a töltésseloszlás sztatikusává válik, a kialakuló tér az öt létrehozó töltések függetlenül számítható tereinek szuperpozíciója lesz. Érdekes a diákokkal felrajzoltatni, hogyan képzelik a földelt vezető sík és egyetlen ponttöltés terének erővonalképét, berajzolva az ekvipotenciális felületeket is.

4. A földelt vezető sík és a ponttöltés terének számítása megoldható a tükörtöltés-módszerrel. Tükrözzük a ponttöltést a síkra és előjelét változtassuk ellenkezőre, majd vegyük el a vezető síkot. A két ponttöltés tere megegyezik az eredeti töltés és a síklap terével (természetesen csak abban a félsíkban, amelyben az eredeti töltés van, hiszen a másik félteret a vezető sík árnyékolja). Ha a ponttöltés potenciáljára vonatkozó

$$U = k \frac{Q}{r}$$

formulát a diákok ismerik, akkor a tükörtöltésmódszer helyessége – a vezető sík ekvipotenciális (zérus potenciálú) tulajdonságát felhasználva – szép, egyszerű gondolatmenettel igazolható (10. ábra). Induljunk ki a töltés és a tükörtöltés teréből. Azonnal adódik, hogy a két töltést összekötő egyenest felező merőleges sík potenciálja zérus, hiszen a felező merőleges sík minden pontja egyenlő távolságban van a töltésektől, így a két ellentétes töltés potenciáljának összege a sík minden pontjában zérus. A tükörtöltésmódszerrel meghatározható a jó vezetőnek tekintett földön kialakuló tér nagysága.

5. Tisztázható a földből kiemelkedő csúcsok szerepe a villámcsapás kialakulásában. A jó vezető földhöz csatlakozó hegyes tereptárgyak jó vezetőként azonos potenciálra kerülnek a földdel, a térerősség azonban

a csúcsok környezetében megnövekszik, emiatt ott a levegő vezetőképessége nő, az átütési szilárdság csökken a csúcs hatás miatt. (Ez a kérdés bonyolult, legegyszerűbb, ha kísérlettel, a csúcs hatás bemutatásával illusztráljuk.)

Az elektrosztatikai tárgyalás itt lezárul.

6. Az áramok témakörére áttérve a villámokban bekövetkező töltésmozgást is elkezdhetjük – egyszerűsített formában – tárgyalni. Ha a villám szakaszaival nem foglalkozunk, az egyetlen villámcsapás által szállított Q töltést elosztva a villámcsapás idejével definiálhatjuk a villám átlagos áramerősségét, és becslést adhatunk a villámcsapás energiájára is.

Összefoglalás

A villámok fizika tananyagba történő bevonása felkelti a tanulók érdeklődését és javítja a fizika iránti attitűdjüket. A villámok érdemi tárgyalása azonban nehéz. Az

elektrosztatikában lényegében a felhők elektromos szerkezetének egyszerűsített modelljei és az átütés kérdései tárgyalhatók, a villámok lefolyása és tulajdonságainak ismertetése a tananyag tartalmi bővítését teszi szükségessé és pusztán elektrosztatikai ismereteket használva döntően csak tanári közlésekre szorítkozva tehető meg. A tanulók önálló munkája elektrosztatikai kísérletek elvégzése, illetve internetes anyagok felkutatása és kiselőadások tartása lehet. Az utóbbi azonban óvatosan kell kezelni, mert a villámokról rendelkezésre álló tudományos ismeretanyag jelenleg is alakul, változik, ami szükségessé teszi, hogy tanárként kövessük az új fejleményeket, s ez még az internet lehetőségeit használva sem könnyű feladat.

A tananyag verbális részének növelése mindenképpen időt vesz el az elektrosztatika alapvető fogalmainak (feszültség, térerősség, mezőszemlélet stb.) megismertetésétől, így ügyelnünk kell a fogalmi rész és a „verbális mese” arányaira.

Irodalom

1. *Magyar Közlöny* 2020. január 31. 17. száma, 382–391, <https://magyarkozlony.hu/dokumentumok/3288b6548a740b9c8daf918a399a0bed1985db0f/megtekintes>
2. Kerettanterv a gimnáziumok 9–12. évfolyama számára; https://www.oktatas.hu/koznevelas/kerettantervek/2020_nat/kerettanterv_gimn_9_12_evf
3. Tasnádi P.: Léggöri elektromosság. in *A Fizika Tanítása II.* (szerk. Juhász A., Tasnádi P., Gócz E.) Kézirat
4. Tasnádi P., Illy J.: *Víz a léggömbben és a talajban. Villámok, gejzirek, cseppkövek és más természeti csodák.* ELTE, Budapest, 2018.
5. Horváth T.: *Villámvédelem.* Magyar Elektronikai Egyesület, Budapest, 1997.
6. V. Cooray: *An introduction to lightning.* Springer, 2015.
7. R. Feynmann: *Mai fizika* 5. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1986, 122–126.
8. R. G. Harrison: The carnegie curve. *Surveys in Geophysics* 34/2 (2013) 209–232.
9. Bartoli A., Mészáros R., Geresdi I., Matyasovszky I., Pongrácz R., Weidinger T.: *Meteorológiai alapismeretek.* ELTE, 2013, 11. fejezet.

