

Napelem panelek felületén megtapadó szennyeződések vizsgálata

EÖTVÖS LORÁND TUDOMÁNYEGYETEM TERMÉSZETTUDOMÁNYI KAR

KÖZETTANI ÉS GEOKÉMIAI TANSZÉK

Bodóczy Iliana Dimitrula

TDK dolgozat

Budapest, 2021

Témavezetők:

Aradi László Előd

ELTE TTK, Földrajz- és Földtudományi Intézet,

Kőzettani és Geokémiai Tanszék, Litoszféra Fluidum Kutató Laboratórium

Lovász Anikó

SolServices Kft.



SOLSERVICES

Napelem panelek felületén megtapadó szennyeződések vizsgálata

Tartalomjegyzék

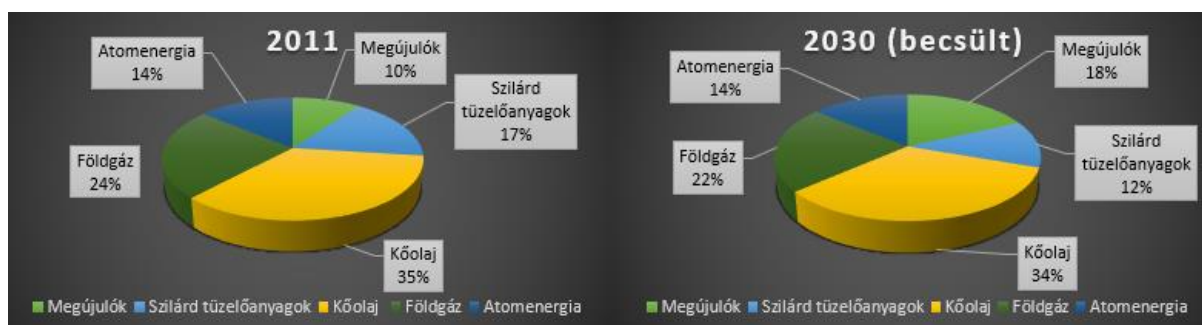
1. Bevezetés és célkitűzés	3
2. Mintavétel és mérési módszerek	6
3. Eredmények	9
3.1. Makroszkópos és sztereomikroszkópos vizsgálat	9
3.2. Röntgen-pordiffrakciós vizsgálat eredményei	12
3.3. Pásztázó elektronmikroszkópos vizsgálat eredményei	14
4. Diskusszió	17
5. Következtetés, összefoglalás	19
Köszönetnyilvánítás	20
Felhasznált irodalom	22

Ábrajegyzék

1. ábra A bruttó áramfogyasztás energiaforrások szerinti megoszlása	3
2. ábra Magyarország napenergia potenciálja	4
3. ábra A mintázási pontok megjelölve a napelempark műholdképén	6
4. ábra Időjárási adatok a mintázás napján, illetve az azt megelőző 14 napon	7
5. ábra Mintavételezés	8
6. ábra A helyszínen megfigyelt szennyeződések	9
7. ábra A panelek felületéről gyűjtött minták és a talajminta sztereomikroszkópos képei	11
8. ábra A vizsgált minták jellemző diffraktogramjai	14
9. ábra Az elektronmikroszkóppal vizsgált minták	14
10. ábra A és talajminta BSE felvétele, valamint néhány jellemző EDS spektrum	16
11. ábra A vizsgált napelempark (bordóval jelölve) környezetének földtani adottságai	18

1. Bevezetés és célkitűzés

A világ energiafelhasználása az évek során egyre inkább növekszik és az igény egyre kielégíthetlenebbé válik, ami azonban jelentős környezetterheléssel jár. A környezetterhelés mérséklésének céljából a primer energiahordozók felhasználása mára társadalmi prioritássá vált és a megújuló energiaforrások egyre nagyobb szerepet látnak el a széndioxid kibocsátás csökkentését célzó törekvéseknek köszönhetően (IPCC, 2014; IPCC, 2021; The Paris Agreement, 2016; UNFCCC, 1992; Kyoto Protocol, 1997). Az elmúlt években az egész világon egyre elterjedtebbé váltak a környezetbarát és fenntartható megoldások, így a zöld energián alapuló energiatermelés is. Az Európai Bizottság szerint például a 2011-es adatokhoz képest 2030-ra 8%-os emelkedés prognosztizálható a megújuló energiaforrások terén Európában (1. ábra).



1. ábra A bruttó áramfogyasztás energiaforrások szerinti megoszlása 2011-ben és 2030-ra becsült arányai az Európai Unióban (adatok forrása: Bartholy et al., 2013)

A természeti folyamatok során rendelkezésre álló vagy emberi időléptékben újratermelődni képes energiahordozókat nevezzük megújuló energiaforrásoknak, ilyen például a nap-, a szél-, a víz-, geotermikus és a biomasszából nyert energia (Boyle, 2004).

A megújulóknak közül a nap az egyik legstabilabb és a legnagyobb mennyiségben rendelkezésünkre álló energiaforrás. Ennek a hatalmas energiaforrásnak a megoszlása természetesen nem egyenlő arányú a különböző éghajlati övekben, de szinte minden országnak van lehetősége a napenergiát hasznosítani, így egyre több helyen létesítenek fotovoltaikus (photovoltaic - PV) napelemparkokat, vagy háztetőkre napelem paneleket. A PV növekvő jelentőségének jó mutatója, hogy míg napjainkban a világ PV kapacitása

773,2 GW, addig egyes előrejelzések szerint 2050-re 10 000 GW-ra, több mint tízszeresére fog emelkedni (IEA, 2021). A Földre érkező napenergia átlagos éves mennyiségének földrajzi eloszlása igen változatos, a trópusi övben 2438 kWh/m²/év, míg a pólusok környékén ennek az értéknek csak kevesebb mint a fele, 1024 kWh/m²/év (Bartholy et al., 2013; Global Solar Atlas, 2021). A beeső sugárzás éves értékei Magyarországon átlagosan 1233 kWh/m²/év, míg az ország déli térségében, akár 1253 kWh/m²/év is lehet (2. ábra) (Global Solar Atlas, 2021).



2. ábra Magyarország napenergia potenciálja (Global Solar Atlas, 2021 alapján)

A napenergia ipari felhasználásának jelentős szerepe van a villamosenergia termelésében Magyarországon is (2020-ban 2450 MW), valamint a PV lakossági felhasználásra is alkalmazható, aminek köszönhetően az egyik legelterjedtebb megújuló energiaforrás a családi házakban (MEKH, 2020). Hazánkban a háztartási méretű kiserőművek (<50 kW) mellett a néhány 100 kW-os, esetleg néhány MW-os méretű napelemparkok terjedtek el, azonban Kaposvár mellett 2021-ben épült 100 MW-os beépített kapacitással bíró napelempark is, mely Közép-Európa legnagyobb napelemparkja (CMC, 2019).

Mint minden megújulón és nem megújulón alapuló technológiában, így a PV esetében is léteznek olyan tényezők, melyek csökkenthetik a termelést. Az energiatermelést negatívan befolyásoló környezeti hatások közül a besugárzás mértékének csökkenése, a hőmérséklet emelkedése és a panelek felületének szennyeződése, az ún. *soiling* a legjelentősebb (John et al., 2015). Olyan lokális hatások befolyásolhatják a lerakódó szennyeződések mennyiségét és jellegét, mint a környezeti és időjárási körülmények, a panelek dőlésszöge, tájolása, a tartószerkezet felépítése, a zöldfelület kezelése vagy a panelek talajfelszíntől való távolsága (pl. Rynningen és Kvande, 2016). A szennyeződések anyagát tekintve lehet közet és talaj eredetű szálló por, homok, virágpor, virágszirom, madárürülék és moha. Ezek a szennyeződések bizonyos esetekben a hagyományos mosási módszerekkel már nem távolíthatóak el, aminek következtében akár több tíz százalékos veszteséget is okozhatnak az áramtermelésben, valamint jelentősen csökkenthetik a napelemek élettartamát is (Mani és Pillai, 2010). Tekintettel arra, hogy az egyes földrészekben más és más a szennyeződések forrása, valamint a természetes tisztulást segítő időjárás is eltérő, így nem létezik globális szinten működő egységes megoldás a *soiling* kezelésére. Míg a sivatagos területeken a homokviharok okoznak kihívást a naperőművek üzemeltetőinek, addig az északi területeken a hótakaró (Mani és Pillai, 2010; Cordero et al., 2018). Az eddig megjelent tanulmányok túlnyomó többségében a szennyeződések bonyolult azonosítására és mérésére hivatkozva csupán a közvetett hatást, a hatásfok csökkenését vizsgálták (pl. Maghami et al., 2016; Nagy, 2016), fontos lenne azonban ismerni a szennyezők összetételét és forrását a megfelelő tisztítási eljárás kidolgozásának érdekében.

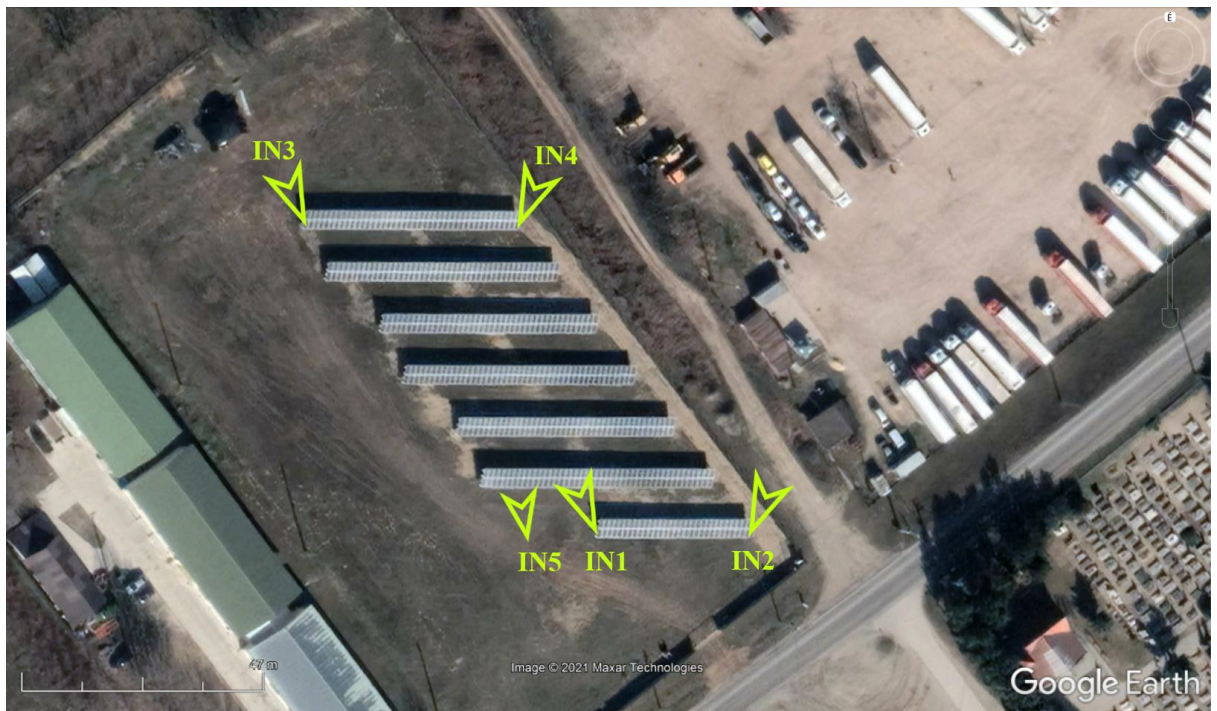
Jelen kutatás célja a szennyeződéseknek az azonosítása, azok összetételének, az esetlegesen kialakult cement anyagának a meghatározása, valamint javaslat megfogalmazása az eltávolításuk módjára. Kérdés az is, hogy az adott éghajlati hatások, mint a csapadék, napsugárzás, szél intenzitása és iránya vajon milyen hatással lehetnek a panelek szennyeződésére Magyarországon.

A TDK dolgozat a tervezett kutatás első lépését foglalja össze, melyben bemutatok egy olyan mintavételi és analitikai módszertant, amellyel a napelemeken található szennyeződések anyagvizsgálata lehetővé válhat. A dolgozat keretein belül a kidolgozott mintázási metódus bemutatásán túl szeretnék képet adni egy inárcsi napelempark szennyeződéseinek összetételéről optikai és elektronmikroszkópos, valamint röntgen-

pordiffrakciós vizsgálat segítségével. A kutatás során négy napelempark mintázását fogom elvégezni Magyarország területén három havonta, egy éven keresztül.

2. Mintavétel és mérési módszerek

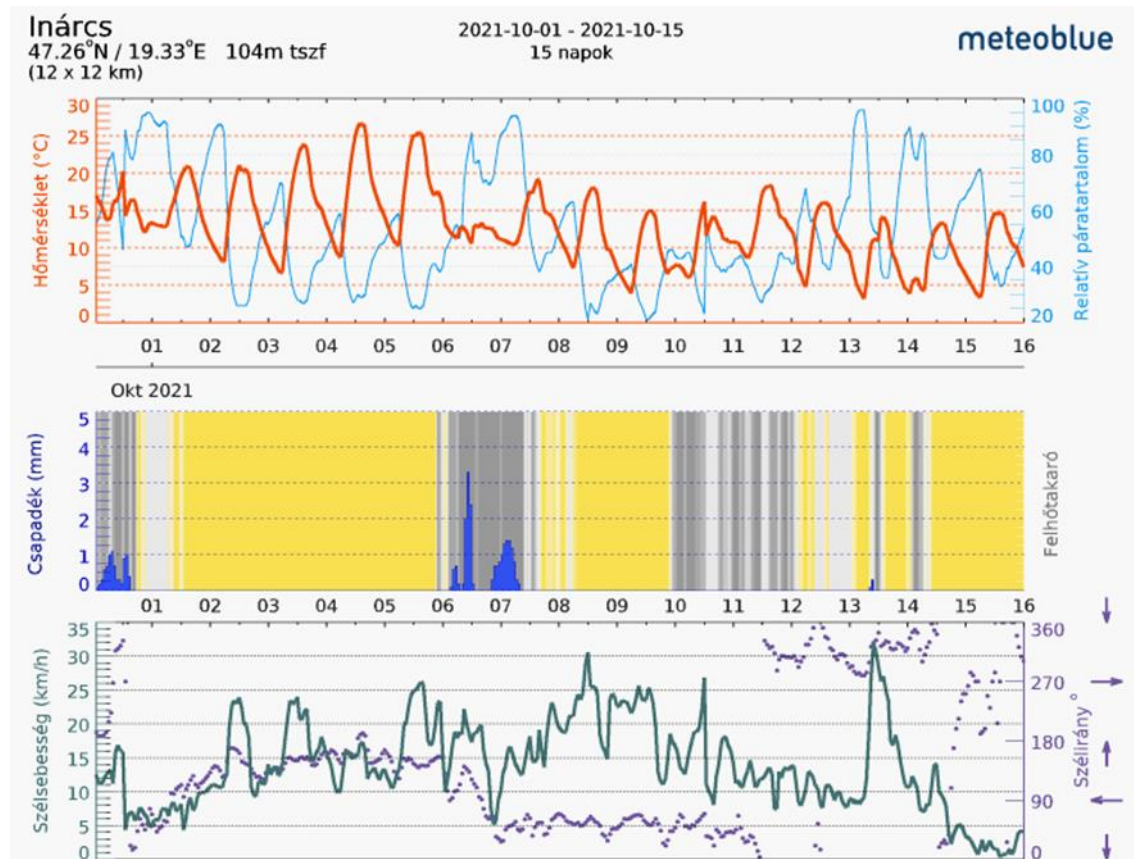
A vizsgált mintaterület egy Inárcs községben telepített 0,25 MW-os napelempark volt, melynek építése két lépcsőben zajlott, 2019-ben, majd pedig 2020 októberében készült el. A telepített napelemek típusa JA-Solar, amik 380W-os teljesítményt adnak le, a modulok félcellás monokristályos napelemek, antireflexiós réteggel ellátott üveggel borítva. A modulokat dőlésiránya déli és 23 fokos dőlésszöggel telepítették, a 7 db sor egymástól 9 m távolságra helyezkedik el (3. ábra). A talajtól való távolságuk pedig 90 cm körüli.



3. ábra A mintázási pontok megjelölve a napelempark műholdképén (Google Earth, 2021)

A mintavételezés 2021. október 15-én történt, mely időpont előtt a szennyeződést fokozni képes zöldfelület kezelésére (fünyírás és permetezés) három hónappal került sor, takarítás pedig az installáció óta nem történt, így egy éve szennyeződtek a panelek. A mintázás napján csapadékmentes volt az időjárás, a hőmérséklet maximuma 15 °C volt, szélcsend. A napelempark területén a 2 órás mintázást 11:00 óra magasságában kezdtük el. A

meteoblue archivált adatai alapján elmondhatjuk, hogy a mintázási nap előtt egy héttel hullott 2-4 mm csapadék, illetve a látogatásunk előtt két nappal is hullott a térségben 1 mm alatti mennyiségben (4. ábra). A szél az októberi hónapban nem volt kimagaslóan erős, csupán október 13-án, amikor közel 35 km/h volt a szélsébség és észak-északnyugati szélirány uralkodott (4. ábra).



4. ábra Időjárási adatok a mintázás napján, illetve az azt megelőző 14 napon (meteoblue, 2021)

Mintát vettünk a talajból, valamint a park négy sarkában lévő panelről (3. ábra): a panelek felületéről (azok alsó $\frac{2}{3}$ -áról, A minták) és az alsó peremen összegyűlt anyagból (B minták). A mintázott paneleket végül lemostuk. Egy minta esetében próbaképpen felfogtuk a lemosott szennyeződést is (C minta).

A panelek felszínéről gumírozott műanyag lehúzóval gyűjtöttük össze a lerakódott anyagot, annak érdekében nehogy megsértssem a napelemek felszínét (5./a ábra). Az alsó peremen felgyűlt szennyeződéseket műanyag szívószállal gyűjtöttem össze (5./b ábra).

Az egyik panelről lemosott mintát szintén gumírozott műanyag lehúzóval gyűjtöttük össze a panel alján egy műanyag mintavevő zacskóba.

a



b



5. ábra Mintavételezés gumírozott műanyag lehúzóval (a) és műanyag szívószállal (b)

A röntgen-pordiffrakciós vizsgálatok a CsFK Földtani és Geokémiai Intézet RIGAKU Miniflex 600 típusú készülékén történtek 45 kV feszültséggel, 35 mA csőárammal, grafit monokromátort és Cu K α sugárzást alkalmazva.

A SEM-EDS mérések az ELTE TTK KKIC Hitachi TM4000 Plus típusú pásztázó elektronmikroszkópjával készültek - amely Quantax 75 SDD EDS detektorral van felszerelve -, 15 kV gyorsítófeszültség, 0.8 nA sugáráram mellett. Az EDS spektrumok 30 s mérési idővel készültek. A képek visszaszórt elektron (BSE) detektorral készültek.

3. Eredmények

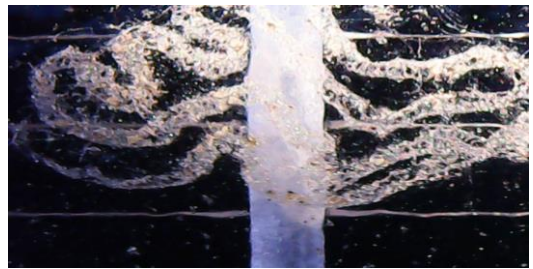
3.1. Makroszkópos és sztereomikroszkópos vizsgálat

A panelek felületén a helyszínen az egységes por rétegen túl vízfolyás által felhalmozott szennyeződést (6./a ábra), a panelre cementálódott -feltételezhetően- biológiai eredetű szennyeződést (6./b ábra), valamint kitin maradványokat, csigaház törmelékét figyeltünk meg.

a



b



c



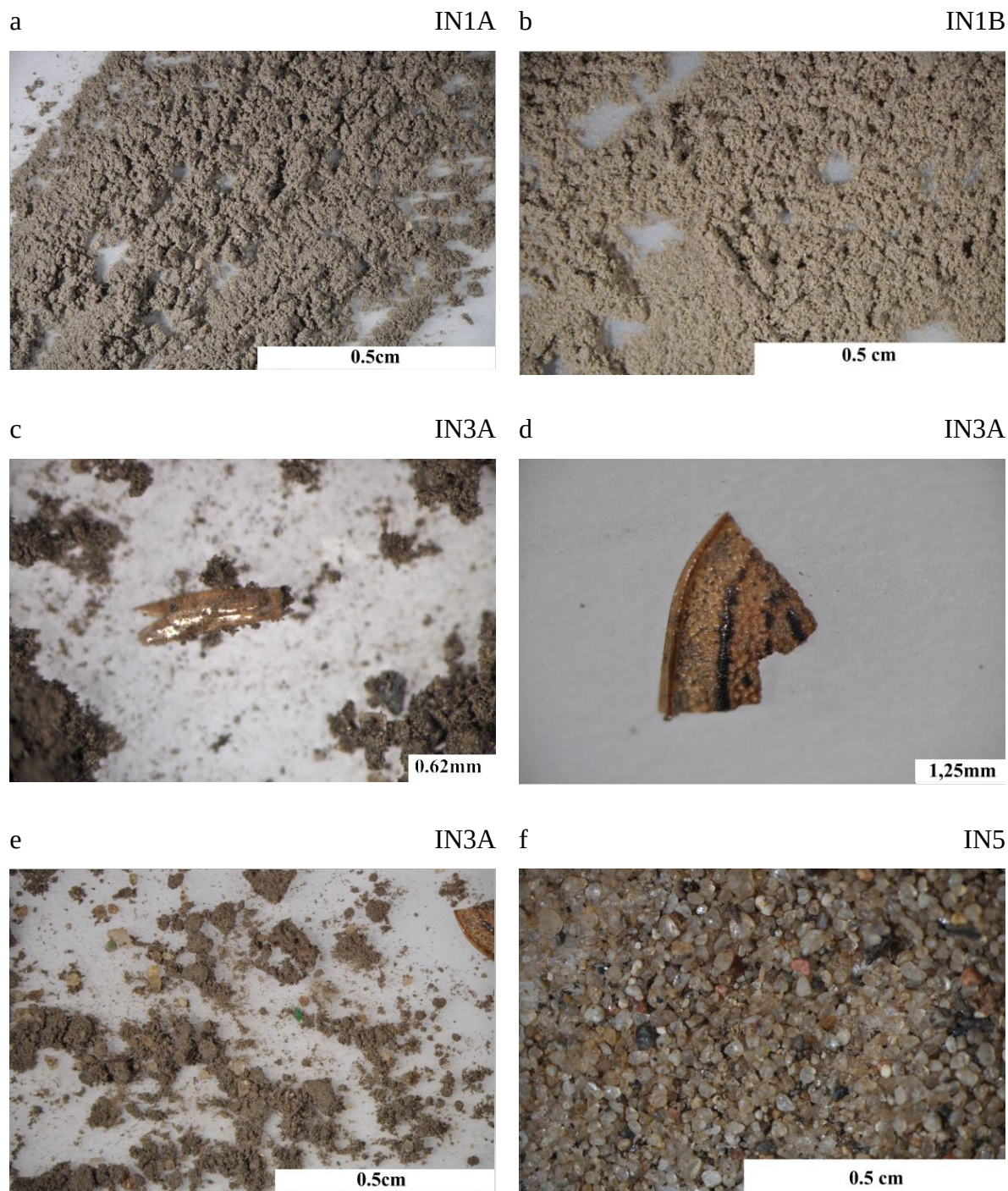
d



6. ábra A helyszínen megfigyelt szennyeződések (egy cella mérete 15 X 15 cm). a: érintetlen felszín vízfolyás nyomokkal; b: biológiai eredetű cementált anyag (képmagasság: 6 mm); c: felkapart soiling; d: a panel alsó peremén összegyűlt szennyeződés

A panelek felületéről vett *A* minták mennyisége kevesebb, színük sötétebb szürke, a *B* minták mennyisége pedig jóval több és világosabb szürke színűek. Az *A* mintákban jellemzően finomabb szemcseméretű (agyag, aleurit) ásványok vannak túlnyomó többségben összetapadva, aggregátumokat alkotva, valamint változatos szerves maradványok (növényi törmelék, rovar páncél, csigaház töredék) is megjelennek, míg a *B* mintákban nagyobb mennyiségben van jelen homok (7./a, b, e, f ábra). A homok frakcióban sztereomikroszkóp alatt kvarcot, csillámokat (színtelen és barna) és földpátokat sikerült azonosítani. Az IN1C minta színében és szemcseméretében egyezik a hozzá tartozó IN1A mintával. A talajmintában a kvarc, csillámok és a földpátok mellett vöröses és fekete, feltehetően kőzettörmelék eredetű szemcsék is megfigyelhetők voltak (7./e ábra).

Az *A* minták között mennyiségi különbséget tapasztaltam: a déli sorban lévő panelek szennyezettebbek, a DNY-i panelen (IN1) figyeltem meg a legnagyobb mértékű szennyeződést, a legkisebbet pedig az ÉK-i sarokban lévők (IN4).



7. ábra A napelempanelek felületéről gyűjtött minták és a talajminta sztereomikroszkópos képei. a: sötétszürke színű minta az IN1 panel felszínéről; b: világosabb szürke minta ugyanazon panel alján összegyűlt anyagból; c: rovar maradvány; d: mészváz darab; e: jól kivehető átlátszó kvarc darabok fedezhetőek fel a finomszemcsés anyagban; f: a park talajának sztereomikroszkópos képe (többségében kvarc, de jól kivehetőek a hússzínű kálföldpát szemcsék is).

3.2. Röntgen-pordiffrakciós vizsgálat eredményei

A röntgen-pordiffrakciós vizsgálatok során a begyűjtött minták 63 μm alatti szemcsefrakcióját vizsgáltam. Ezt száraz szitálással értem el, a szemcseméret szerinti elválasztást csökkenő lyukméretű (1 mm, 125 μm , 63 μm) szitákkal végeztem, egymás alá helyezve, a szitalap síkjában rázogatva. Az IN1-es panelről felfogott lemosott szennyeződést (IN1C minta) egy Petri-csészében ülepítettem, majd ezt is leszitáltam.

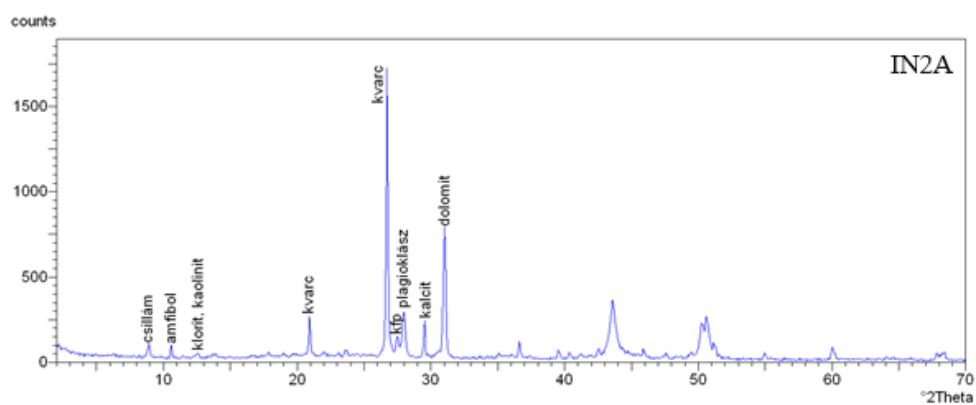
Az IN1, IN2, IN3-as minták esetében lehetett a 63 μm alatti szemcseméretű frakción röntgen-pordiffrakciós vizsgálatot végezni, az IN4A mintáról a kevés mintamennyiség miatt nem készült felvétel.

A röntgen-pordiffrakciós vizsgálatok segítségével kvalitatív képet kaptunk arról, hogy milyen ásványfázisok alkotják a napelemek felületén leülepedő szennyeződéseket. A mérések alapján az A felületi minták igen hasonlóak, mindhárom mintában megjelenik kvarc, káliföldpát, plagioklász, dolomit, kalcit, valamint csillám, amfibol és klorit/kaolinit is (8./a ábra). Az IN1C ülepített minta fázisai (8./b ábra) szinte teljes egészében megegyeznek az IN1A-val, egyedül gipszre jellemző csúcs jelenik meg újdonságként.

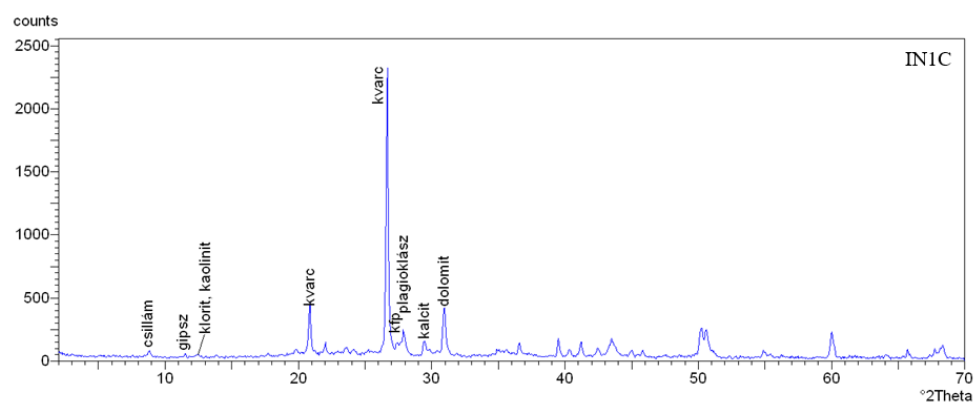
A panelek alsó pereméről gyűjtött B mintákban az A mintákhoz hasonlóan mindegyikben megjelenik a kvarc, káliföldpát, plagioklász, dolomit és a kalcit. Ezeken kívül csillám, klorit/kaolinit rendre az összes mintában fellelhető, amfibol azonban csak egyben, az IN3B jelűben (8./c ábra).

A talajból vett mintában kvarc, káliföldpát, plagioklász, kalcit, dolomit, klorit, csillám amfibol, és/vagy kaolinit volt azonosítható (8./d ábra).

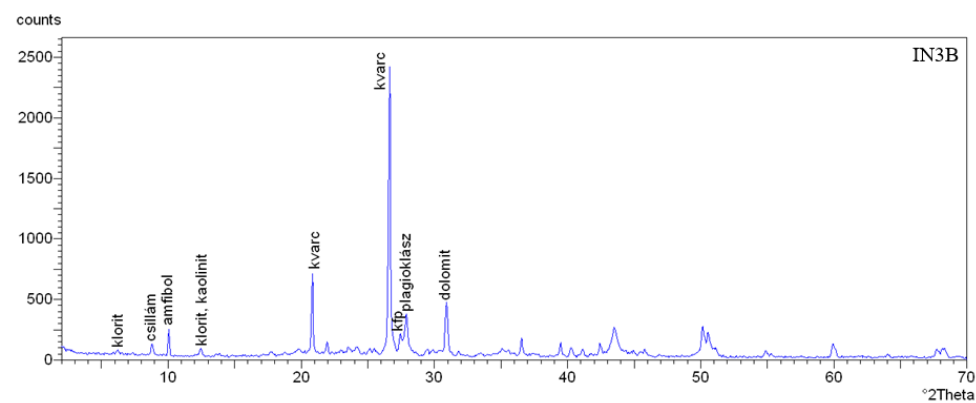
a



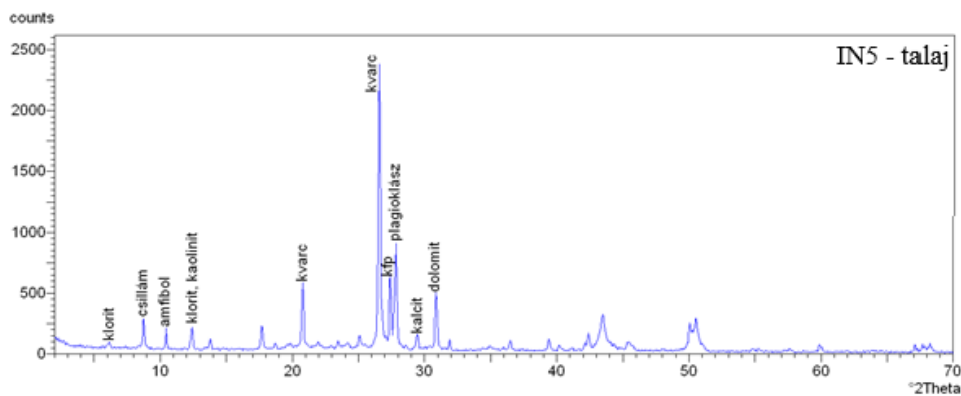
b



c



d



8. ábra A vizsgált minták jellemző diffraktogramjai. a: A, felületi minta; b: C, lemosott és ülepített minta; c: B, panel alján összegyűlt anyag; d: talajminta

3.3. Pásztázó elektronmikroszkópos vizsgálat eredményei

A pásztázó elektronmikroszkópos vizsgálatokhoz egy tárgylemezre szénragasztó csíkokat illesztettem, amire 63 μm alatti A (napelem felületi minták) és talajmintát szórtam (9. ábra). Majd a vizsgálatához nagyon vékony szén réteget párologtattunk a felszínére. A napelem alá lehordott szennyeződések (*B minta*) a továbbiakban nem vizsgáltuk, a napelem felületén megtapadó szennyeződésekre fókuszáltunk. Az XRD által kimutatott ásványok mellett elektronmikroszkóppal azonosítottunk olyan fázisokat is, amiket nem láthattunk a diffraktogramokon.



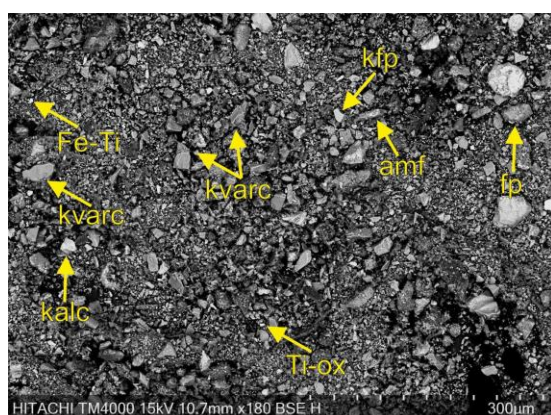
9. ábra Az elektronmikroszkóppal vizsgált A minták és talajminta 63 μm alatti szemcsefrakciója szénszalagra rögzítve (képszélesség: 4,5 cm)

A 10. ábrán egy A és a talajminta BSE felvételeit, valamint néhány jellemző EDS spektrumot láthatunk összehasonlítva. A panelek felületéről (A) gyűjtött mintákat

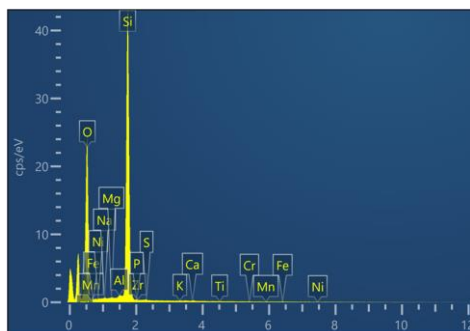
megvizsgálva a leggyakoribb fázis a kvarc volt, ami a talajmintában is a legfőbb fázis. Megtalálható volt még a dolomit, kalcit, kálföldpát, plagioklász, amfibol és a csillám (ami elsősorban muszkovit volt). A talajmintában is ezen fázisok voltak a leggyakoribbak.

Az alábbi ábrán azon fázisokat is szemléltetem, amiket a röntgen-pordiffrakciós vizsgálatok nem mutattak ki, sem a talajban, sem a panelek felületén. Ilyen a vas-oxid és/vagy -hidroxid, (10.1/d, 10.2/d ábrák); titán-oxid (rutil/anatáz/brookit; 10.1/b ábra) és az albitos plagioklász (10./2c ábra), amik mindegyik felületi mintára jellemzőek voltak.

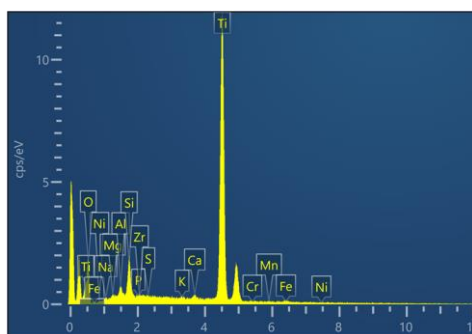
1.IN3A



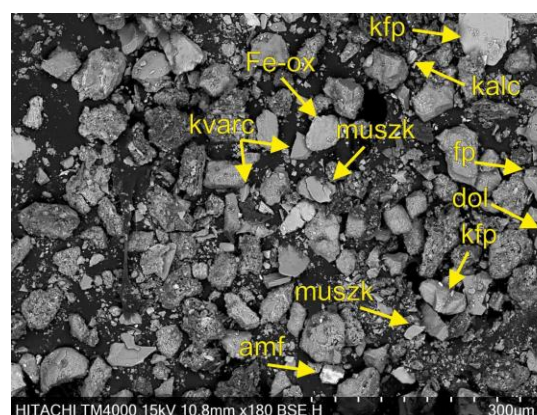
1.a Kvarc



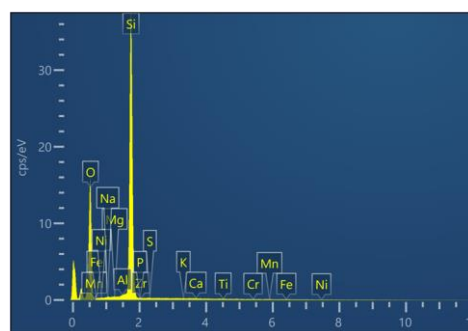
1.b Titán-oxid (rutil/anatáz/brookit)



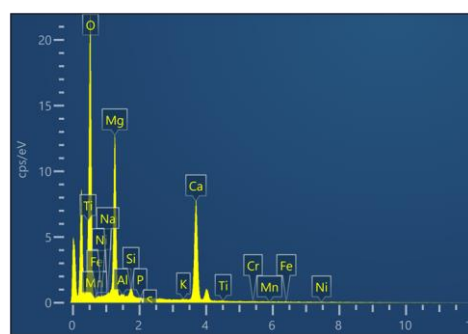
2.IN5 talaj



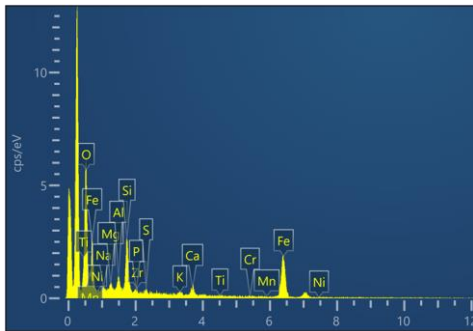
2.a Kvarc



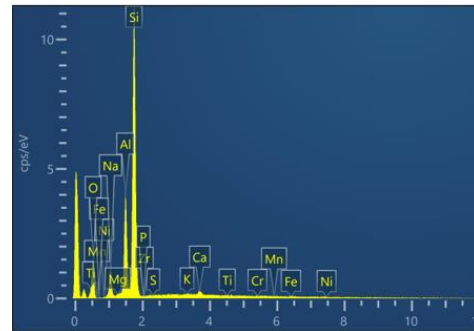
2.b Dolomit



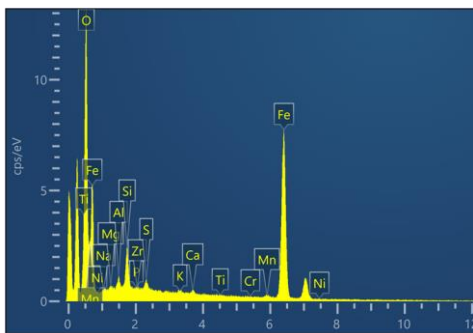
1.c Káliföldpát



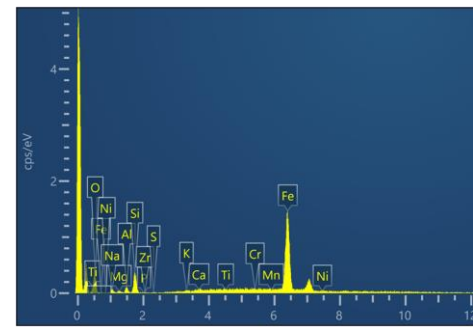
2.c Albitos plagioklász



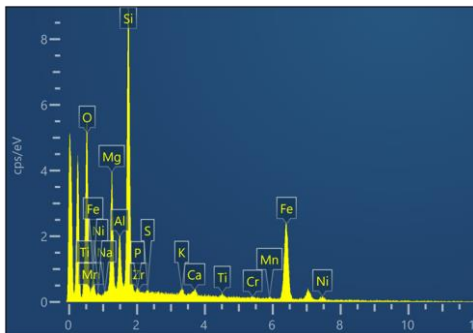
1.d Fe- oxid/hidroxid



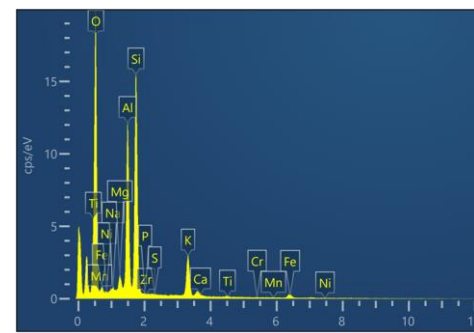
2.d Fe-oxid/hidroxid



1.e Amfibol



2.e Muszkovit



10. ábra A és talajminta BSE felvétele, valamint néhány jellemző EDS spektrum. 1: a, Kvarc; b, Titán-oxid; c, Albit; d, Fe-oxid/hidroxid; e, amfibol. 2: a, Kvarc; b, dolomit; c, Albit; Fe-oxid/hidroxid; e, muszkovit.

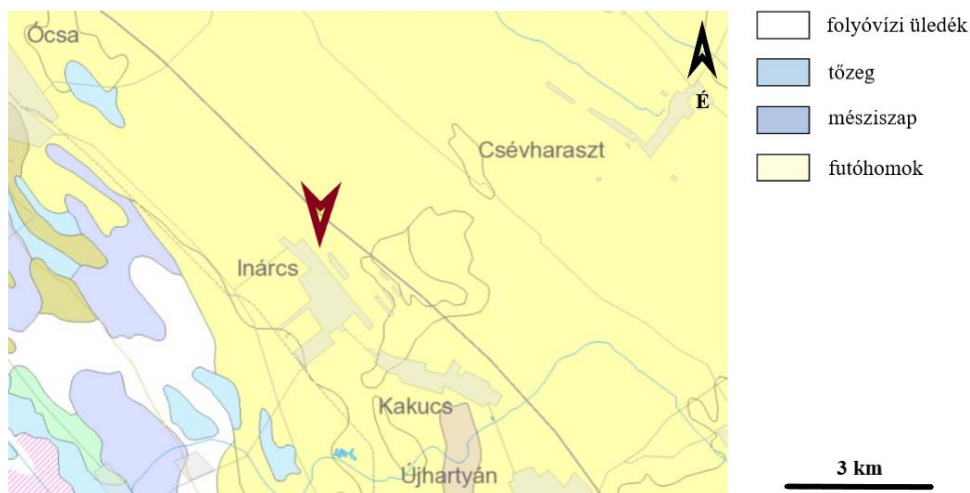
4. Diszkusszió

A napelempanellek felszínén lerakódó és megtapadó szennyeződés mennyiségét alapvetően befolyásolják a lokális időjárási viszonyok, elsősorban a szél és a csapadék (Ryningen és Kvande, 2016). A mintázás előtti napokban regisztráltak ugyan jelentősebb szélsébséget, a szélirány azonban É / ÉÉNy-i volt (4. ábra; forrás meteoblue, 2021). Mivel déli tájolásúak a panelek, így a szél nem a panelek felszínét, hanem a hátsó szerkezetét érte, így valószínűleg nem befolyásolta a szennyeződés mértékét. A mintázás előtt 1 héttel hullott jelentősebb mennyiségben eső, melynek nyomát tapasztaltuk szinte az összes napelem felszínén (6./a ábra). Az így akkumulálódó por lokálisan árnyékolva termelés kiesést okozhat. A minták makroszkópos és sztereomikroszkópos vizsgálata során jól detektálható volt az *A* és a *B* minták közti különbség, mind színben, mennyiségben és szemcseméretben is. A felületi és peremi mintákról elmondhatjuk, hogy kvarc a fő alkotója és mindegyikben kimagasló mennyiségben van a többi ásványhoz képest, viszont a *B* mintákban sokkal magasabb volt az arányuk. Gravitációs úton is történhetett a felhalmozódás, illetve a csapadék elősegíthette a nagyobb szemcseméretű anyag leöblítését a felszínről, amit a *B* minták jól mutatnak: a homok szemcseméret nagyobb mennyiségben volt tapasztalható a panelek alján felhalmozódva. Ez okozza a minták közötti színkülönbséget is, ugyanis a *B* minták nagyobb mennyiségben tartalmaztak elsősorban kvarcból, plagioklászából és káliföldpátból álló homokot. Mennyiségben az *A* minták között is volt eltérés, ugyanis az északi sor mintáiban (IN3 és IN4) sokkal kevesebb szennyeződés volt a napelemek felszínén a déli első sor (IN1 és IN2) mintáihoz képest.

A *C* típusú, leöblített minta ásványos összetétele az XRD mérések alapján nagyon hasonló az ugyanonnan vett *A* mintáéval, így a módszerrel el lehet végezni a kevésbé szennyezett napelemek mintázását. Erre jó példa az ÉK-i sarokban lévő IN3-as napelem, melyen szemmel láthatóan kevés szennyeződés volt, majd a szitálás során nem sikerült elegendő anyagmennyiséget szeparálni XRD vizsgálatra, szükséges lett volna *C* minta felfogására is. A szennyeződés mértéke a lokációval és a közvetlen környezettel magyarázható: a park ÉK-i oldala egy keskeny növény sávval részben védve van (3. ábra), míg a legszennyezettebb panel a DNy-i sarokban lévő IN1, közvetlen közelében napi szinten munkagépek haladnak el.

Az XRD és SEM vizsgálatok alapján a szennyező szerves anyagok nagy részének forrása a környék talajából származó ásványok lehetnek, ugyanis az azonosított fázisok megtalálhatók a környezet felszíni képződményében is. A vizsgált inárcsi napelempark térségét kvarter futóhomok fedi (11. ábra), a parkot üzemeltető cég közlése alapján a talaj humuszmentes, középszemcsés homokos váztalaj, mely a területet fedő kvarter futóhomokon alakult ki. Zentay et al. (2004) alapján a Duna-Tisza köze térségéből vett különböző futóhomok minták röntgendiffrakciós vizsgálata jól megegyező eredményeket mutat az inárcsi napelempark talajmintájával. A Duna-Tisza közti futóhomok mintákban kiemelkedő a kvarc, plagioklász, káliföldpát, kalcit, dolomit jelenléte és kisebb mennyiségben muszkovitot is tartalmaznak. Mindez megegyezik a napelempark talaján végzett röntgendiffrakciós mérések eredményeivel (8./d ábra).

Vizsgálataim alapján elmondható, hogy a napelemek felületén található szerves szennyeződés legnagyobb tömege a környék talajából származhat. A parkon belül különböző helyeken található paneleken (3. ábra) lévő szennyeződés mennyisége erősen változó volt. Szintén a talaj eredetét erősíti meg az a megfigyelés, hogy a munkagépek útvonalának közvetlen közelében található panelen (IN1) volt található a legnagyobb mennyiségű szennyeződés, míg a munkagépek útvonalától legmesszebb fekvő IN4-es panelről alig sikerült mintát begyűjteni.



11. ábra A vizsgált napelempark (bordóval jelölve) környezetének földtani adottságai (forrás: Magyar Bányászati és Földtani Szolgálat (MBFSZ), Magyarország Felszíni Földtana, 1:100 000, map.mbfsz.gov.hu)

5. Következtetés, összefoglalás

Jelen dolgozat tárgya napelem felületek szennyeződésének vizsgálatához mintázási metódus kidolgozása, annak értékelése, valamint előzetes vizsgálati módszerek alkalmazása volt. A helyszínen a mintázás során megfigyelhető volt, hogy a panelek felületén egységes por réteg rakódott le, valamint különböző biológiai eredetű szennyeződések is megtalálhatók voltak. Sztereomikroszkópos vizsgálatok során megállapítható volt a panel felületéről és a panelek alján összegyűlt minták elkülönülése, mind színben és mennyiségükben, valamint aggregáltságukban is. Sztereomikroszkóppal kvarcot, káliföldpátot és csillámot sikerült azonosítani ezek alapján.

Ezt követően röntgen-pordiffrakciós és pásztázó elektronmikroszkópos vizsgálatokra került sor, melyek képet adtak arról, hogy további fázisokat találhatunk a panel felszíni és talajmintákban. A főbb ásványok a kvarc, plagioklász, dolomit, földpát, káliföldpát és a csillám voltak. Ezek alapján feltételezhető, hogy a panelek felszínének szennyeződése talaj eredetű lehetett, ami jelen esetben adott, hiszen a panelek mentén egy forgalmas földút volt, így a munkagépek erőteljesen felkavarhatták a futóhomokra települt váztalajt, ami könnyen ráülepedhet a napelemekre. Ez a jelenség felhívja a figyelmet arra, hogy az üzemeltetőnek célszerű csökkentenie a talajból közvetlenül felvert por mennyiségét a napelemet közelében, például telepített növényzettel (figyelve az árnyékolásra). Ezek alapján fontos befolyásuk lehet a szennyeződés mennyiségére és minőségére a lokális hatásoknak.

A dolgozat elkészítésével távlati célom további szennyeződések azonosítása, azok összetételének, cementáltságának, a cement anyagának és vastagságának meghatározása, illetve a mintázási metódus továbbfejlesztése. Céljaim között szerepel a cement anyagát létrehozó fázisok, elsősorban a karbonátok vizsgálata. A gipsz gyakori fázis a szálló porban, aeroszolokban, és a napelemeken található szennyeződések cementációjában is szerepet játszhat. Azonban csak a vízzel lemosott és kiülepített minta esetében sikerült a jelenlétét bizonyítani, így ennek szerepe egyelőre nem tisztázott.

Továbbá a dolgozattal megalapozok egy egy éven át rendszeres mintavételezéssel tervezett hazai kutatást, melynek célja a magyarországi napenergia termelés egyik problémájának, a *soiling*-nak, azaz a napelempanelek szennyeződésének teljeskörű megismerése (anyag, szemcseméret, cementáltság, időjárási tényezők hatása).

Mindezt 3 másik napelempark meglátogatásával teszem majd az ország különböző pontjain negyedévenkénti mintavételezéssel és vizsgálatok elvégzésével. Ez lehetőséget teremt majd az eltérő időjárási viszonyok hatásának értékelésére, illetve az eltérő lokális hatások kiértékelésére. Lényeges a továbbiakban a páratartalommal összefüggésben is vizsgálni a panelek felszínét, vajon a szennyeződések jobban tapadnak-e, esetleg erősebben cementálódik a szennyezőanyag magasabb páratartalom mellett és emiatt könnyebben takaríthatóbbá válik szárazabb környezetben.

További kutatások tárgyát képezhetik az emberi tevékenységből származó - elsősorban szerves - anyagok vizsgálatai is (pl. Raman spektroszkópiával). Ezen anyagok vizsgálata nemcsak a napelemek szennyeződéséről adhatnak többletinformációt, hanem a levegő minőségéről is, hiszen a panelek kiváló felületek a felhalmozódó szálló és ülepedő por megmintázására. Ez különösen városi környezetekben, vagy forgalmas útvonalak közelében lehet fontos.

Köszönetnyilvánítás

Ezúton szeretnék köszönetet mondani témavezetőimnek, Lovász Anikónak és Aradi László Elődnek, akik szakértelmükkel, hasznos magyarázataikkal és a konzultációk során hatalmas türelemmel, megértéssel és elengedhetetlen tanácsokkal segítséget nyújtottak TDK dolgozatom elkészítésében. Továbbá szeretnék köszönetet mondani a CsFK Földtani és Geokémiai Intézet dolgozóinak, Szabó Máténak a röntgen-pordiffrakciós vizsgálatok elvégzéséért, illetve Kovács Ivettnek a felvételek kiértékeléséért. Köszönöm az ELTE TTK pásztázó elektronmikroszkópos laboratórium munkatársának Szabó Ábelnek a pásztázó elektronmikroszkópos mérésekben való segédkezését. Hálás vagyok a SolServices Kft.-nek a terepi mintázás lehetőségéért, a mérések támogatásáért, továbbá köszönöm Kulcsár Eszternek a mintázásban való segédkezését. Köszönettel tartozom az Litoszféra Fluidum Kutató Laboratórium minden tagjának a munkám során nyújtott segítségükért. Végül szeretnék köszönetet mondani Gál Norbertnek, aki segítségünkre volt a terepi helyszín bejárásán, illetve köszönöm, hogy a parkról feltett kérdésekre mindig készséggel válaszolt.

Felhasznált irodalom

Bartholy, J.; Breuer, H.; Pieczka, I.; Pongrácz, R. és Radics, K. 2013: Megújuló energiaforrások, ELTE

Boyle, G. 2004: Renewable Energy, pp. 456. Oxford University Press, May 2004., ISBN-10: 0199261784

Cordero, R. R.; Damiani, A.; Laroze, D.; MacDonell, S.; Jorquera, Sepúlveda. E.; Feron.S.; Llanillo, P.; Labbe, F.; Carrasco, J.; Ferrer, J.; Torres, G. 2018: Effects of soiling on photovoltaic (PV) modules in the Atacama Desert. Scientific Reports. 8. 1-14. 10.1038/s41598-018-32291-8.

IEA – International Energy Agency, 2021: World Energy Outlook 2021, Paris

IPCC, 2014: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 1-31.

IPCC, 2021: Summary for Policymakers. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press

John, J.J.; Warade, S.; Tamizhmani, G. és Kottantharayil, A. 2015: Study of Soiling Loss on Photovoltaic Modules With Artificially Deposited Dust of Different Gravimetric Densities and Compositions Collected From Different Locations in India

Kimber, A.; Mitchell, L.; Nogradi, S.; Wenger, H. 2006: The Effect of Soiling on Large Grid-Connected Photovoltaic Systems in California and the Southwest Region of the United States

Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change, Dec. 11, 1997, 2303 U.N.T.S. 162.

Magyar Energia és Közmű-szabályozási Hivatal (MEKH) 2021: ENERGIASZTISZTIKA 2020. ÉVES RIPIORT – ELŐZETES ADATOK; http://www.mekh.hu/download/6/8d/f0000/Energiastisztika_2020e.pdf

Mani, M.; Pillai, R. 2010: Impact of dust on solar photovoltaic (PV) performance: Research status, challenges and recommendations, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 14, Issue 9, Pages 3124-3131, ISSN 1364-0321, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.07.065>

Nagy, É. V. 2016: Napelemek szennyeződés miatti hatásfok romlása, TDK dolgozat, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Villamosmérnöki és Informatikai Kar, Villamos Energetika Tanszék, BUDAPEST

Ryningen, B. és Kvande, R. 2016: Cleaning of solar modules - A literature review, Sintef, Norvégia

United Nations Framework Convention on Climate Change, May 9, 1992, S. Treaty Doc No. 102–38 (1992), 1771 U.N.T.S. 107 [hereinafter UNFCCC]

United Nations, 2015: The Paris Agreement

Zentay, T.; Kuti, L.; Vermes, J.; Kalmár, J. 2004: Futóhomok-fáciesek a Duna–Tisza köze területén. A Magyar Állami Földtani Intézet Évi Jelentése, pp. 81–93.

Online források

CMC - China National Machinery Import and Export Corporation, 2019, cmc. com, <http://www.cmc.com.cn/en/NewsDetail-191-11299.html> (elérés: 2021.11.26.)

Global Solar Atlas, <https://globalsolaratlas.info/> (2021.11.23.)

Google Earth, 2021, earth.google.com, <https://earth.google.com/web/@-5.41519848,6.99547775,-13637.80689761a,15799152.52911329d,35y,-0h,0t,0r> (elérés: 2021. 11. 26.)

MBFSZ, Magyarország Felszíni Földtana, 1:100 000, map.mbfsz.gov.hu,
<https://map.mbfsz.gov.hu/fdt100/> (elérés: 2021.11.28.)

meteoblue, [meteoblue.com](https://www.meteoblue.com/hu/id%C5%91j%C3%A1r%C3%A1s/h%C3%A9t/in%C3%a1rcs_magyarorsz%C3%a1g_3051133),
https://www.meteoblue.com/hu/id%C5%91j%C3%A1r%C3%A1s/h%C3%A9t/in%C3%a1rcs_magyarorsz%C3%a1g_3051133 (elérés: 2021.11.24.)