

POSSIBLE EFFECTS OF FIRE EXTINGUISHER POWDERS TO THE MOBILITY OF HEAVY METALS IN SOILS**TŰZOLTÓPOROK LEHETSÉGES HATÁSAI A TALAJOKBAN TALÁLHATÓ NEHÉZFÉMSZENNYEZŐK MOBILITÁSÁRA**STADLER Tamás¹**Abstract**

Fire extinguisher powders are common extinguishing agents that can be used for ABC types of fires. The main component of these powders is sodium-hydrogen-carbonate, which can be decomposed by heat to carbon-dioxide and water, as these compounds are useful for extinguishing the fire. Therefore the sodium-hydrogen carbonate can dissolve in water quite well and produce a slightly alkaline pH solution. This solution should affect the cation adsorption in the interlaminar spaces of phyllosilicate clay minerals. The carbonate anion from the extinguisher powder can react with free heavy metal ions, such as Pb^{2+} , Cd^{2+} , and create new, stable phases, like cerussite and otavite. The higher-grade adsorption and the stable mineral phases possibly reduce the mobility of heavy metals in soils, which means an environmentally safer state.

Keywords

extinguisher powder, soil, heavy metals, adsorption, mobility, environment

Absztrakt

A tűzoltóporok a tűzoltási gyakorlatban széleskörben alkalmazott tűzoltóanyagok, amelyek ABC típusú tüzeknél használhatók. E tűzoltóporok zöme nátrium-hidrogén-karbonátot tartalmaz, amelynek a hőbomlásával szén-dioxid és vízgőz szabadul fel ezzel elősegítve a tűz eloltását. Ugyanakkor a szódabikarbóna egy vízben közepesen-jól oldódó vegyület, amely vizes közegben enyhén bázisos kémhatású. E tulajdonságok alapján feltételezhető, hogy a szabad téren, nehézfémekkel szennyezett ipari közegben a szódabikarbónás tűzoltópor használata elősegítheti a szabad nehézfém ionok (pl. Pb^{2+} , Cd^{2+}) megkötését az agyagásványok felületén. A karbonát komplex anion vegyületet képez az egyes nehézfém-kationokkal és így alacsony oldhatóságú fázisok jönnek létre. Az adszorbeált nehézfém-ionok és a stabilis karbonátfázisok alkalmasak lehetnek arra, hogy egy nehézfém-szennyezést lokálisan immobilizáljanak, ezzel a környezeti terhelést csökkentve.

Kulcsszavak

tűzoltópor, talaj, nehézfém, adszorpció, mobilitás, környezet

¹ stadlert@nsszk.gov.hu | ORCID: 0009-0003-8564-594X | PhD student, Doctoral School of Military Engineering, University of Public Service | PhD hallgató, Nemzeti Közszoigálati Egyetem Katonai Műszaki Doktori Iskola

BEVEZETŐ

A természeti és épített környezet védelme a XXI. század modern társadalmának egyik alapvető célkitűzése. Az egyes műszaki eszközök és technológiai anyagok fejlesztésénél szintén elérendő cél a környezet- és egészségvédelmi követelményeknek való megfelelés, amely alól nem kivételek a tűzoltási és egyéb kárelhárítási tevékenység során felhasznált anyagok sem. E törekvésnek különös hangsúlyt adnak a közelmúltban történt, tűzoltóanyagokkal, például halogénezett (elsősorban fluorozott) szerves vegyületekkel kapcsolatos környezetvédelmi incidensek is [1], [2].

A tűzoltóanyagok között előkelő helyet elfoglaló tűzoltóporok olyan, főleg szervetlen komponensekből állnak, amelyek környezet- és egészségvédelmi szempontokból tulajdonképpen biztonságosnak tekinthetők. A vonatkozó szakirodalom áttekintésével, valamint elméleti megfontolásokkal ugyanakkor szeretném bemutatni, hogy a tűzoltóporok kültéri alkalmazása mégis képes lehet a talajokban változást előidézni, elsősorban a rétegszilikát-ásványok rétegekzi terében és rácsszéli pozícióiban elhelyezkedő nehézfém-ionok adszorpciójának befolyásolásával, valamint újonnan létrejövő fémvegyületek létrehozásával. E tulajdonságok együttesen befolyásolhatják egy kárhelyen található fémszennyezés viselkedését és mobilitását. Utóbbi érdeemben képes befolyásolni a szennyezőanyag transzportját és a különböző élő szervezetek általi felvehetőségét. E tulajdonságok különösen előnyösek lehetnek fémtüzek, ipari létesítmények káreseményeinél, ezért vizsgálatuknak gyakorlati alkalmazhatósága is felmerülhet, ha a talaj mélyebb rétegeibe is bejuttatható a tűzoltópor vizes oldata.

A TŰZOLTÓPOROK ÁLTALÁNOS JELLEMZÉSE

A tűzoltóporok jól kezelhető, hatékony, száraz oltóanyagok, amelyek szilárd-, folyadék-, valamint gáz (ABC) tüzek oltásához egyaránt felhasználhatók. Szállításuk és tárolásuk egyszerű, akár évekig is eltarthatók. Alkalmazhatók kézi porral oltó készülékről kis mennyiségben, ugyanakkor önálló szerként, tehergépjárműre is telepíthető porral oltó felépítmény.

A tűzoltóporok oltóhatása a – későbbiekben részletesen ismertetésre kerülő – komponensek hőbomlása során felszabaduló vízgőzhez és szén-dioxidhoz, valamint a tűzre jutott anyag fojtó- és hűtő hatásához köthető [3].

A tűzoltóporok szemcsemérete a 20-80 μm tartományban helyezkedik el, az átlagos szemcseméret jellemzően 40 μm körül található [4]. E szemcseméret-tartomány már hatékony tűzoltó tulajdonságú, azonban egyes kísérletek szerint a még finomabbá őrölt, mindössze 5-30 μm átmérőjű szemcsék hőbomlása alacsonyabb hőmérsékleten történik meg, még több vízgőzt és szén-dioxidot bocsájtva az égő anyagra [5].

A TŰZOLTÓPOROK ÖSSZETÉTELE ÉS OLDHATÓSÁGA VIZES KÖZEGBEN

A tűzoltóporok összetételének meghatározásánál a fő szempont a minél hatékonyabb oltóhatás kifejtése, azonban nagy súllyal szerepel a csöveken való szállíthatóság és a környezetre (emberi egészségre) való ártalmatlanság igénye is. E faktorok ismeretében az 1. számú táblázatban ismertetett összetételű tűzoltóporok kerültek kifejlesztésre, illetőleg vannak használatban a tűzoltási gyakorlatban.

Érdeemes megjegyezni, hogy a táblázatban nem megtalálható, széleskörben használt Monnex tűzoltópor egyik fő komponense szerves vegyület (kálium allofanát) [6], amely a tanulmány további részében ismertetett fizikai-kémiai folyamatokban feltehetően nem vesz részt, ezért ismertetése jelen cikk látókörén túl helyezkedik el.

Oltópor fajtája	Összetevők	Összetevők	Összetevő vízdoldhatósága	pH
Hagyományos oltópor	Nátrium-hidrogén-karbonát	97%	100 g/l (25°C) [7]	8-9 [7]
	Kovaföld	3%	Vízben nem oldódik [8]	–
Lángoltó por	Nátrium-hidrogén-karbonát	98%	100 g/l (25°C) [7]	8-9 [7]
	Magnézium-sztearát	2%	Vízben nem oldódik [9]	
Parázsoltó por	Ammónium-hidrogén-foszfát	60%	695 g/l (25°C) [10]	8 [10]
	Ammónium-szulfát	22%	764 g/l (25°C) [11]	5,5 [11]
	Bárium-szulfát	15%	0,0031 g/l (20°C) [12]	7 [12]
	Magnézium-sztearát	3%	Vízben nem oldódik [9]	–

1. Táblázat: a leggyakrabban alkalmazott tűzoltópor-típusok és összetételük, Restás 2014 szerint. [4]. A vízdoldhatósági és kémhatás adatok a PubChem adatbázisból származnak.

Az 1. Táblázatban szereplő oltóporok fő tömegét a nátrium-hidrogén-karbonát (más néven szódabikarbóna), valamint az ammónium-hidrogén-foszfát vegyületek adják. Mindkét vegyület kimeríti a tűzoltással kapcsolatos alapvető követelményeket, ugyanakkor vízben jól, illetve kiválóan oldódó anyagokról van szó. A levegőben lévő nedvesség már elég vizet biztosít az aggregátumok képződéséhez (és ezzel a por csövezetéken történő továbbításának akadályozásához), ezért a porszemcséket hidrofobizáló anyaggal – például magnézium-sztearáttal – vonják be [13].

A hidrofobizálás azonban mindössze a levegő nedvességtartalmával szemben képes hatékony védelmet biztosítani [4], nagyobb mennyiségű víz (például csapadék) hatására a fő komponensek oldatot képezhetnek. Semleges kémhatásúnak tekintett vízben a szódabi-

karbóna és az ammónium-hidrogén-foszfát egyaránt 8-9, tehát enyhén bázisos irányba mozdítja el a pH-t. A pH megváltozását természetesen befolyásolhatja a víz iniciális kémhatása (például a felvett szén-dioxidtól enyhén savas csapadékvízé), illetve – kültéri viszonyok esetén – a kárhely talajának összetétele is.

A NEHÉZFÉM-SZENNYEZŐK ADSZORPCIÓJA TALAJALKOTÓ AGYAGÁSVÁNYOKON

A nehézfémek (más néven potenciálisan toxikus elemek – PTE) kifejezés alatt általában olyan átmeneti- és félfémeket értünk, amelyek rendszáma $Z > 20$ és sűrűségük $\rho > 5 \text{ g/cm}^3$. A szakirodalom elsősorban 11 toxikus elemet sorol a nehézfémek közé, amelyek az arzén (As), kadmium (Cd), króm (Cr), kobalt (Co), réz (Cu), higany (Hg), ólom (Pb), mangán (Mn), nikkel (Ni), szelén (Se) és cink (Zn). Ugyanakkor környezeti szempontból jelentős hatású az antimon (Sb), bárium (Ba), arany (Au), molibdén (Mo), ezüst (Ag), tallium (Tl), ón (Sn), volfrám (W), urán (U) és vanádium (V) is [14].

A nehézfémek természetes módon, például érces területeken [15][16], leggyakrabban azonban antropogén közreműködés eredményeként halmozódhatnak fel az egyes környezeti elemekben [17]–[21].

A talaj a nehézfém-szennyezéseknek leginkább kitett környezeti elemek közé tartozik, az élelmezésben betöltött kulcsszerepének ellenére. Definíciója szerint a „talaj a Föld legkülső szilárd burka, mely a növények termőhelyéül szolgál. Alapvető tulajdonsága a termékenység, vagyis az a képesség, hogy kellő időben és a szükségelt mennyiségben képes ellátni a növényeket vízzel és tápanyaggal” [22]. A talaj komplexitását az összetétele adja: három fázisú rendszer, ahol a talajgázok és a talajnedvesség/talajvíz mellett ásványos komponensek és élő/holt szerves anyag is jelen van [23]. Az egyes nehézfémek megkötéséért a talajban található holt szerves anyag (azaz a humusz), valamint a rétegszilikát agyagásványok felelősek [24]. Az előbb említett alkotók közül továbbiakban a rétegszilikát-ásványokra (agyagásványokra) kívánok fókuszálni.

A rétegszilikátok szerkezetében az egyik rétegtípust SiO_4 tetraéderek (tetraéderes réteg, T) alkotják, míg a másikat magnézium vagy alumínium kationnal rendelkező oktaéderek (brucit/gibbsit réteg, O). E rétegek változásából TO, TOT, illetve TOTO struktúrák jönnek létre. A rétegszilikátok további fontos tulajdonsága a szubsztitúció: a tetraéderes pozícióban található Si^{4+} iont Al^{3+} helyettesítheti és az oktaéderes rétegben található $3+$ vegyértékű kationok helyett is beléphet $2+$ vegyértékű. A töltések egyensúlyának megváltozása egyrészt a tetraéderes és oktaéderes rétegek váltakozásával igyekszik kiegyenlítődni, másrészt az ásvány szerkezetébe (elsősorban a rétegeközi térbe) különböző töltés kiegyenlítő kationok kötődnek be. Utóbbi elsősorban a rétegszilikát agyagásványokra jellemző tulajdonság [22], [25].

Bár az agyagásványokban létre jövő negatív töltésfelesleg lehetővé teszi a pozitív töltésű nehézfém-ionok megkötését, a folyamat pH függő is: több kutatás is kimutatta, hogy bázisos kémhatású közegben a nehézfémek adszorpciója hatékonyabban végbemegy, mint savas környezet esetén [24], [26], [27].

Fontos megemlíteni, hogy a különböző agyagásványok eltérő kationmegkötő képességgel rendelkeznek: a TOT szerkezetű vermikulit vagy a szmektit ásványok (például montmorillonit, szaponit), jellemzően sokkal több pozitív töltésű iont tudnak megkötni, mint a TO szerkezetű kandit csoport (pl. kaolinit, nakrit, dickit) ásványai [28].

TÚZOLTÓPOROK LEHETSÉGES INTERAKCIÓJA A SZERVETLEN TALAJALKOTÓKKAL

Környezetvédelmi szempontból – ahol cél a talajban vagy felszín alatti vízben lévő szennyezőanyag eltávolítása vagy mobilizációjának megakadályozása, illetőleg az expozíciós útvonal megszakítása – tehát egy talajban lévő nehézfém-szennyezés esetén kitüntetett szerepe van a kémhatásnak és az agyagásványos összetételnek. Mivel az egyes talajok ásványos összetétele természetszerűen adottnak tekinthető, a szorpciós folyamatot a talaj (és a talajban lévő fluidum) pH-ja szabályozza. Gyakorlati szempont szerint nézve tehát: amennyiben az adott talaj enyhén savas vagy semleges kémhatású, úgy a pH-t megemelve lehetőség van a fémionok hatékony megkötésére az agyagásványokon.

A pH megemelése a korábban hivatkozott laboratóriumi kísérletekben erős bázisokkal (pl. NaOH) történt, amelynek természetes környezetben való alkalmazása kockázatos. Biztonságosabb, rutinszerűen alkalmazott megoldás mészhozzáadása a talajhoz. A CaO és MgO reakcióba lép a nehézfémekkel és kevésbé vízoldható komplexeket, például hidroxidokat hoz létre, valamint a pH-t is 9-10 körüli értékre emeli meg. A CaO és MgO mellett hasonló tulajdonsággal bír a közönséges portlandcement is [29]. A reaktív oxidok mellett alkalmazhatók a különféle kalcium-karbonát módosulatokból (jellemzően trigonális szerkezetű kalcitból és rombos aragonitból) álló állati (puhatestű) vázak, héjak is.[30] Utóbbi megoldás azonban a tengerparttal és jelentékeny halászattal rendelkező országokban lehet megoldás az immobilizációra.

A fentiek fényében célszerű tehát megvizsgálni, hogy a tűzoltóporok fő komponenseként alkalmazott szódabikarbóna és ammónium-foszfát talajhoz keverése – elméletben – milyen változást indukálhat. A korábban bemutatott hivatkozások alapján mindkét komponens jó vízoldhatósággal rendelkezik és vizes oldaltuk pH értéke enyhén bázisos. E tekintetben tehát joggal feltételezhető, hogy az adott talaj agyagásvány-együttesén (főleg ha azok vermikulitot vagy szmektitet is tartalmaznak) elősegíti a nehézfémionok adszorpcióját.

Ugyancsak érdemes megvizsgálni, hogy a különböző fémionok milyen komplexeket (vegyületeket) képeznek vizes közegben. A vizes közegben, hidrátburokkal határolt nehézfémionok, például a Pb^{2+} és a Cd^{2+} képesek reakcióba lépni a karbonátokkal és önálló karbonátfázisokat (cerusszitot és otavitot) alkotnak [31]. Ezen komponensek oldhatósága rendkívül alacsony (gyakorlatilag mindkét vegyület vízben oldhatatlan) [32], [33], így semleges/bázisos pH-n stabilnak, a fém szennyezők immobilisnak tekinthetők. A talaj enyhén savas környezetében azonban a kadmium-karbonát enyhén képes lehet oldódni.

A költséges komponensek miatt ritkábban alkalmazott parázsoló porban lévő ammónium-foszfát és –szulfát elsősorban nehézfém-szulfát és –foszfát fázisokat hoz létre. Az ólom példáján látható, hogy a foszfát fázis viszonylag stabilnak tekinthető, míg a az ólom-szulfát képes beoldódni – ezzel időben elnyújtva a szennyezést [34], [35].

Az esetleges gyakorlati alkalmazhatóság tekintetében az oldatba vitt tűzoltópor bejuttatása akkor válhat jelentékeny tényezővé, ha a szennyezőanyag is képes a talaj mélyebb rétegeibe bemosódni, beszivárogni. Feltételezhető, hogy rövid ideig tartó, ám jelentékeny mértékű szennyezőanyagot a környezetbe juttató, havária jellegű események során a szennyezőanyag elsősorban a talajfelszínen, kisebb mértékben a felszínközeli rétegekben halmozódik fel. A szennyezőanyag tűzoltóporral, illetve annak vizes oldatával való betérítés során az immobilizációs kémiai folyamatok közül az új, stabilis fázisok kialakulása már itt

megtörténhet. Amennyiben a talajfelszín agyagos jellegű, az önálló fázist nem alkotó fémionokat ugyancsak megköthetik a reaktív rétegszilikátok. E tekintetben tehát pont a gyorsbeavatkozások során lenne a leginkább felhasználható a leírt módszer.

ÖSSZEFOGLALÁS

A konvencionális tűzoltóporok a kárhelyen érintetlenül hagyva, de főképp a talaj mélyebb rétegeibe leszivároghva, képesek lehetnek kémiai kapcsolatba kerülni a szerves talajalkotó fázisokkal. Vizes közeg megléte esetén a hagyományos, szódabikarbóna alapú oltópor, a pH megváltoztatásával hatékonyabbá teheti a nehézfém-ionok megkötését az agyagásványokon, valamint olyan karbonát fázisokat hoz létre, amelyek az adott kémiai viszonyok között stabilisak. E stabil fázisok ugyanakkor immobilizálják a nehézfémeket, csökkentve ezzel a környezeti kockázatot.

A parázsszórt porban lévő ammónium-szulfát és -foszfát vegyületek nehézfém szulfátokat és -foszfátokat alkotnak, amelyek közül az előbbiek vízben oldhatók, így a nehézfémek immobilizálására nem alkalmasak.

A fenti elméleti megfontolásokat ugyanakkor követnie kell kísérleti munkának is, amelyben az egyes tűzoltóporok nehézfém-oldatokkal történt reagálását, új fázisok létrejöttét és az agyagásványok ioncserélő-képességére gyakorolt hatását lehet vizsgálni fázisanalitikai (például röntgendiffrakciós) és elemanalitikai (például induktív csatolású plazma tömegspektrométeres) módszerekkel.

FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] A. Kärman *et al.*, “Study of environmental and human health impacts of firefighting agents,” 2016. [Online].
Elérhető: <https://www-edit.msb.se/siteassets/dokument/ammesomraden/skydd-mot-olyckor-och-farliga-amnen/raddningstjanst/rapport-avseende-innehall-i-och-mil-jopaverkan-av-slackskum.pdf>
- [2] S.-H. Lo, C.-C. Chan, W.-C. Chen, and J.-D. Wang, “Grand Rounds: Outbreak of Hematologic Abnormalities in a Community of People Exposed to Leakage of Fire Extinguisher Gas,” *Environ. Health Perspect.*, vol. 114, no. 11, pp. 1713–1717, Nov. 2006, doi: 10.1289/ehp.9197.
- [3] C.-H. Su, C.-C. Chen, H.-J. Liaw, and S.-C. Wang, “The Assessment of Fire Suppression Capability for the Ammonium Dihydrogen Phosphate Dry Powder of Commercial Fire Extinguishers,” *Procedia Eng.*, vol. 84, pp. 485–490, Jan. 2014, doi: 10.1016/j.proeng.2014.10.459.
- [4] Á. Restás, *Égés- és tűzoltáselmélet*. Budapest: Nemzeti Közszolgálati Egyetem, 2014. [Online].
Elérhető: <https://tudasportal.uni-nke.hu/xmlui/bitstream/handle/20.500.12944/10409/Teljes%20sz%c3%b6veg%21?sequence=3&isAllowed=y>
- [5] D. Du, X. Shen, L. Feng, M. Hua, and X. Pan, “Efficiency characterization of fire extinguishing compound superfine powder containing Mg(OH)₂,” *J. Loss Prev. Process Ind.*, vol. 57, pp. 73–80, Jan. 2019, doi: 10.1016/j.jlp.2018.08.016.
- [6] “Kerr Fire.” [Online]. Elérhető: <https://kerrfire.co.uk/monnex-dry-powder/how-does-monnex-work/>

- [7] PubChem, “Sodium Bicarbonate.” Letöltve: Dec. 28, 2023. [Online]. Elérhető: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/516892>
- [8] PubChem, “Silicon Dioxide.” Letöltve: Dec. 28, 2023. [Online]. Elérhető: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/24261>
- [9] PubChem, “Magnesium Stearate.” Letöltve: Dec. 28, 2023. [Online]. Elérhető: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/11177>
- [10] PubChem, “Ammonium Phosphate, Dibasic.” Letöltve: Dec. 28, 2023. [Online]. Elérhető: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/24540>
- [11] PubChem, “Ammonium Sulfate.” Letöltve: Dec. 28, 2023. [Online]. Elérhető: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/6097028>
- [12] PubChem, “Barium Sulfate.” Letöltve: Dec. 28, 2023. [Online]. Elérhető: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/24414>
- [13] H. Ibrahim and J. R. Patruni, “Experimental investigation on extinguishing performance of a novel nanocomposite for gaseous fires,” *J. Loss Prev. Process Ind.*, vol. 65, p. 104143, May 2020, doi: 10.1016/j.jlp.2020.104143.
- [14] B. J. Alloway, “Sources of Heavy Metals and Metalloids in Soils,” in *Heavy Metals in Soils: Trace Metals and Metalloids in Soils and their Bioavailability*, B. J. Alloway, Ed., Dordrecht: Springer Netherlands, 2013, pp. 11–50. doi: 10.1007/978-94-007-4470-7_2.
- [15] U. Fügedi, “Geokémiai háttér és nehézfémzennyezés Gyöngyösorsoszi térségében,” *Földt. Közlöny*, vol. 134, no. 2, Art. no. 2, 2004.
- [16] Antalné Belcsev Raskov E., “A felszín alatti vizek és az ivóvíz arzén-, nikkel-, és ólom-tartalma a Dél-Alföldi régióban,” Jan. 2019, Accessed: Dec. 28, 2023. [Online]. Elérhető: <http://hdl.handle.net/2437/262770>
- [17] G. Abbaszade *et al.*, “Lead and stable lead isotopes as tracers of soil pollution and human health risk assessment in former industrial cities of Hungary,” *Appl. Geochem.*, vol. 145, p. 105397, Oct. 2022, doi: 10.1016/j.apgeochem.2022.105397.
- [18] P. Völgyesi, G. Jordan, D. Zacháry, C. Szabó, A. Bartha, and J. Matschullat, “Attic dust reflects long-term airborne contamination of an industrial area: A case study from Ajka, Hungary,” *Appl. Geochem.*, vol. 46, pp. 19–29, Jul. 2014, doi: 10.1016/j.apgeochem.2014.03.010.
- [19] D. Zacháry, G. Jordan, P. Völgyesi, A. Bartha, and C. Szabó, “Urban geochemical mapping for spatial risk assessment of multisource potentially toxic elements — A case study in the city of Ajka, Hungary,” *J. Geochem. Explor.*, vol. 158, pp. 186–200, Nov. 2015, doi: 10.1016/j.gexplo.2015.07.015.
- [20] Ü. Mander, A. Kull, and J. Frey, “Residual Cadmium and Lead Pollution at a Former Soviet Military Airfield in Tartu, Estonia,” in *Biogeochemical Investigations of Terrestrial, Freshwater, and Wetland Ecosystems across the Globe*, R. K. Wieder, M. Novák, and M. A. Vile, Eds., Dordrecht: Springer Netherlands, 2004, pp. 591–606. doi: 10.1007/978-94-007-0952-2_40.
- [21] G. R. W. Denton, C. A. Emborski, A. A. B. Hachero, R. S. Masga, and J. A. Starmer, “Impact of WWII dumpsites on Saipan (CNMI): heavy metal status of soils and sediments,” *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol. 23, no. 11, Art. no. 11, Jun. 2016, doi: 10.1007/s11356-016-6603-7.
- [22] P. Stefanovits, *Talajtan*. Mezőgazda Kiadó, 1975.

- [23] Z. Szalai and G. Jakab, *Bevezetés a talajtanba környezettanósoknak*. Typotex, 2017.
- [24] P. Sipos, T. Németh, I. Mohai, and I. Dódy, “Effect of soil composition on adsorption of lead as reflected by a study on a natural forest soil profile,” *Geoderma*, vol. 124, no. 3, Art. no. 3, Feb. 2005, doi: 10.1016/j.geoderma.2004.05.011.
- [25] S. Koch and K. Sztrókay, *Ásványtan (II. kötet)*. Budapest: Tankönyvkiadó, 1967.
- [26] P. Sipos, T. Németh, V. K. Kis, and I. Mohai, “Sorption of copper, zinc and lead on soil mineral phases,” *Chemosphere*, vol. 73, no. 4, Art. no. 4, Sep. 2008, doi: 10.1016/j.chemosphere.2008.06.046.
- [27] H. Farrah and W. F. Pickering, “pH effects in the adsorption of heavy metal ions by clays,” *Chem. Geol.*, vol. 25, no. 4, pp. 317–326, Jun. 1979, doi: 10.1016/0009-2541(79)90063-9.
- [28] K. G. Bhattacharyya and S. S. Gupta, “Adsorption of a few heavy metals on natural and modified kaolinite and montmorillonite: A review,” *Adv. Colloid Interface Sci.*, vol. 140, no. 2, pp. 114–131, Aug. 2008, doi: 10.1016/j.cis.2007.12.008.
- [29] W. Li, P. Ni, and Y. Yi, “Comparison of reactive magnesia, quick lime, and ordinary Portland cement for stabilization/solidification of heavy metal-contaminated soils,” *Sci. Total Environ.*, vol. 671, pp. 741–753, Jun. 2019, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.03.270.
- [30] V. Santás-Miguel, C. Campillo-Cora, A. Núñez-Delgado, D. Fernández-Calviño, and M. Arias-Estévez, “Chapter 9 - Utilization of mussel shell to remediate soils polluted with heavy metals,” in *Biomass-Derived Materials for Environmental Applications*, I. Anastopoulos, E. Lima, L. Meili, and D. Giannakoudakis, Eds., Elsevier, 2022, pp. 221–242. doi: 10.1016/B978-0-323-91914-2.00017-9.
- [31] Y. Kim, A. Tekawade, S. S. Lee, and P. Fenter, “Morphological and crystallographic controls in the replacement of calcite and aragonite by cerussite and otavite,” *Geochim. Cosmochim. Acta*, vol. 341, pp. 16–27, Jan. 2023, doi: 10.1016/j.gca.2022.11.010.
- [32] PubChem, “Lead carbonate.” Letöltve: Jan. 02, 2024. [Online]. Elérhető: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/11727>
- [33] PubChem, “Cadmium carbonate.” Letöltve: Jan. 02, 2024. [Online]. Elérhető: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/10564>
- [34] PubChem, “Lead phosphate.” Letöltve: Jan. 02, 2024. [Online]. Elérhető: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/24009>
- [35] PubChem, “Lead sulfate.” Letöltve: Jan. 02, 2024. [Online]. Elérhető: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/24008>