

Szent István Egyetem
Mezőgazdaság- és Környezettudományi Kar,
Környezettudományi Intézet
Talajtani és Agrokémiai Tanszék

Talajosztályozási egységek meghatározása reflektancia spektroszkópia alkalmazásával

Készítette: Saárossy Márton Gergely
Évfolyam: Mezőgazdasági mérnöki szak III. évfolyam

Belső konzulens: Dr. Michéli Erika
Beosztása: tanszékvezető, egyetemi tanár, MKK, KÖTI, Talajtani és Agrokémiai Tanszék

Külső konzulens: Csorba Ádám
Beosztása: PhD hallgató MKK, KÖTI, Talajtani és Agrokémiai Tanszék/ VM Mezőgazdasági
Gépesítési Intézet

Gödöllő
2013

Tartalom

1.	Bevezetés.....	3
1.1.	Célkitűzések.....	3
2.	Irodalmi áttekintés.....	5
2.1.	A szikesdés bemutatása.....	5
2.2.	Magyarországi szikes talajok.....	6
2.3.	Szikes talajok osztályozása.....	9
2.3.1.	Magyarországi osztályozás.....	9
2.3.2.	WRB (World Reference Base for Soil Resources, Világ Talaj Referenciabázis)) ..	11
2.4.	A reflektancia spektroszkópia.....	12
3.	Anyag és módszer.....	15
3.1.	Az apaji és karcagi mintaterület jellemzése.....	15
3.2.	Talajminták és laboratóriumi adatok.....	15
3.2.1.	Talajkémiai paraméterek.....	15
3.2.2.	Talajfizikai talajparaméterek.....	16
3.3.	Spektrális mérések.....	17
3.4.	Laboratóriumi adatok elemzése.....	18
3.4.1.	Az adatok jellemzése leíró statisztikákkal.....	18
3.4.2.	Korreláció-analízis.....	18
3.4.3.	Főkomponens analízis (PCA).....	18
3.5.	Spektrális adatok elemzése.....	18
3.5.1.	A spektrális adatok jellemzése leíró statisztikákkal.....	18
3.5.2.	Főkomponens analízis.....	18
3.5.3.	Kemometriai elemzés: Partial Least Squares Regression (PLSR).....	19
4.	Eredmények.....	20
4.1.	A mintaterületek bemutatása.....	20

4.1.1.	Apaji terület bemutatása	20
4.1.2.	Karcagi terület bemutatása	22
4.2.	Laboratóriumi adatok elemzése	24
4.2.1.	Az adatok jellemzése leíró statisztikákkal.....	24
4.2.2.	A talajkémiai paraméterek elemzése	24
4.2.3.	Talajfizikai paraméterek elemzése	28
4.2.4.	A laboratóriumi adatok elemzése korreláció-analízissel.....	29
4.2.5.	A laboratóriumi adatok elemzése főkomponens analízissel.....	32
4.3.	A spektrális adatok vizsgálata.....	36
4.3.1.	A spektrális adatok vizsgálata szemrevételezéssel.....	36
4.3.2.	A spektrális adatok elemzése főkomponens analízissel	37
4.3.3.	A spektrális adatok elemzése kemometriai módszerekkel	40
5.	Összefoglalás.....	45
6.	Köszönetnyilvánítás	46
7.	Irodalomjegyzék.....	47

1. Bevezetés

A mezőgazdasági termelés legfőbb célja, hogy a gazdaságos módon termeljenek, a minőségi és mennyiségi követelményeknek is megfelelő növényi termékeket úgy, hogy közben az adott terület talajában ne következzenek be kedvezőtlen változások. A termelés szempontjából a talaj legfontosabb tulajdonsága a termékenység. Ennek megállapításához azonban nélkülözhetetlen az adott talaj pontos ismerete, a benne játszódó folyamatok és egyéb jellemzők feltárása. Ezen tényezők alapján létrehozhatók osztályozási rendszerek, melyek különböző tulajdonságok alapján csoportosítják a talajokat. A talajosztályozási rendszerek túlnyomó része a modern talajfelvételezési eszközök és számítógépes feldolgozás megjelenése előtt keletkezett. Ezek a rendszerek elsősorban hagyományos helyszíni morfológiai vizsgálatok alapján megállapított talajképző folyamatok meghatározását és esetenként hagyományos laboratóriumi méréseket alkalmaznak a talajok osztályba sorolásához.

A korszerű diagnosztikus szemléletű osztályozási rendszerek, szigorúan definiált, számszerű határértékekkel meghatározott diagnosztikai szintek elkülönítésének a segítségével csoportosítják a talajokat. A diagnosztikai egységek elkülönítő bélyegei sokszor szabad szemmel is jól megállapíthatóak vagy egyszerű terepi eszközök használatával kimutathatóak. Egyes jellemzők pontos megállapításához azonban laboratóriumi vizsgálatokra van szükség, melyek sok esetben idő és költségigényesek, valamint számos esetben a környezetre káros vegyszerek használatát teszik szükségessé. Az elmúlt évtizedek talajok spektrális tulajdonságainak vizsgálatát célzó munkái egyértelművé tették, hogy az elektromágneses spektrum látható és közeli-infravörös tartományában végzett reflektancia mérések alkalmasak a talajok számos szerves és szervetlen összetevőinek minőségi és mennyiségi meghatározására (VISCARRA ROSSEL et al., 2006). Ez a gyors, költséghatékony és környezetbarát felvételezési technika a hagyományos laboratóriumi eljárásoknak nemcsak hasznos kiegészítőjét, hanem bizonyos esetekben alternatíváját is jelentheti.

1.1. Célkitűzések

TDK dolgozatomban a szikes talajok jellemzésére szolgáló tulajdonságok korszerű eszközökkel történő meghatározásával és kapcsolódó adatok osztályozási célú feldolgozásával foglalkozom.

Munkám során a következő célokat tűztem ki:

1. a szikesedéssel foglalkozó főbb irodalmak áttekintése, különös hangsúlyt fektetve a szikesek osztályozására;

2. megismerni a reflektancia spektroszkópia elméleti alapjait, betekintést nyerni a mérési módszerbe és megvizsgálni a szikes talajok jellemzésére történő alkalmazhatóságát;
3. a rendelkezésemre álló apaji és karcagi szikes területekről származó talajminták laboratóriumi adatainak vizsgálata leíró és többváltozós statisztikai módszerekkel;
4. a talajmintákról felvett spektrumok alapján olyan modell megalkotása, amellyel lehetőség nyílik a szikes talajok szempontjából diagnosztikus szintek elkülönítéséhez szükséges talajparaméterek kellően pontos megállapítására, lehetőséget nyújtva ezzel a talajosztályozási folyamat felgyorsítására, illetve költséghatékonyságának növelésére.

2. Irodalmi áttekintés

2.1. A szikesedés bemutatása

A szikes talajok Magyarország legjellegzetesebb talajképződményei közé tartoznak. Kialakulásuk, elterjedésük, hasznosításuk és élőviláguk szorosan kapcsolódik a geológiai, hidrológiai, éghajlati viszonyokhoz. Jelentőségüket jól érzékelteti, a hazai irodalomban való igen széleskörű feldolgozás, könyvek, monográfiák, tudományos dolgozatok, térképek formájában.

A szikesek keletkezésével már a múlt század elején is foglalkoztak. TREITZ (1924) és 'SIGMOND (1923) a nátrium felhalmozódását a növények bomlástermékeiből is származtatták. A későbbi kutatások a kőzetekből, közvetve, a mélységi és a talajvizek közvetítésével magyarázzák az oldható sók nagymennyiségű jelenlétét (KREYBIG & ENDRÉDY, 1935; SÜMEGHY, 1953; SZABOLCS, 1961; RÓNAI, 1965; VÁRALLYAY, 1967). TREITZ (1924) és 'SIGMOND (1927) a szikesedés fontos fázisának írja le az agyagtalajú síkságokon kiszáradás utáni sóbetöményedést, amellyel a későbbi szakirodalom is egyetért.

A szikesek osztályozásában a legjelentősebb hazai és nemzetközi tevékenysége Szabolcs Istvánnak volt, aki az európai szikesek térképezését is koordinálta (SZABOLCS, 1974).

A **szikesedés** olyan degradációs folyamatok együttes elnevezése, amely során a talajban az oldható sók hatására kedvezőtlen tulajdonságok alakulnak ki.

Az egyik ilyen folyamat az *oldható sók felhalmozódása* a talajban (*salinization*). A felhalmozódó sók főként a nátrium, a magnézium és a kalcium, és ezek karbonátjai, bikarbonátjai, kloridjai vagy szulfátjai. A sók felhalmozódása lehet természetes folyamat, vagy emberi hatás eredménye. A természetes, vagy elsődleges folyamat a helyi mállási folyamatokból, vagy transzport folyamatokból származó sófelhalmozódás a talajképző üledékben, vagy a talajvízben. A másodlagos folyamat a nem megfelelő öntézési technika és/vagy öntözővíz, vagy a nem megfelelő vízelvezetési gyakorlat eredménye.

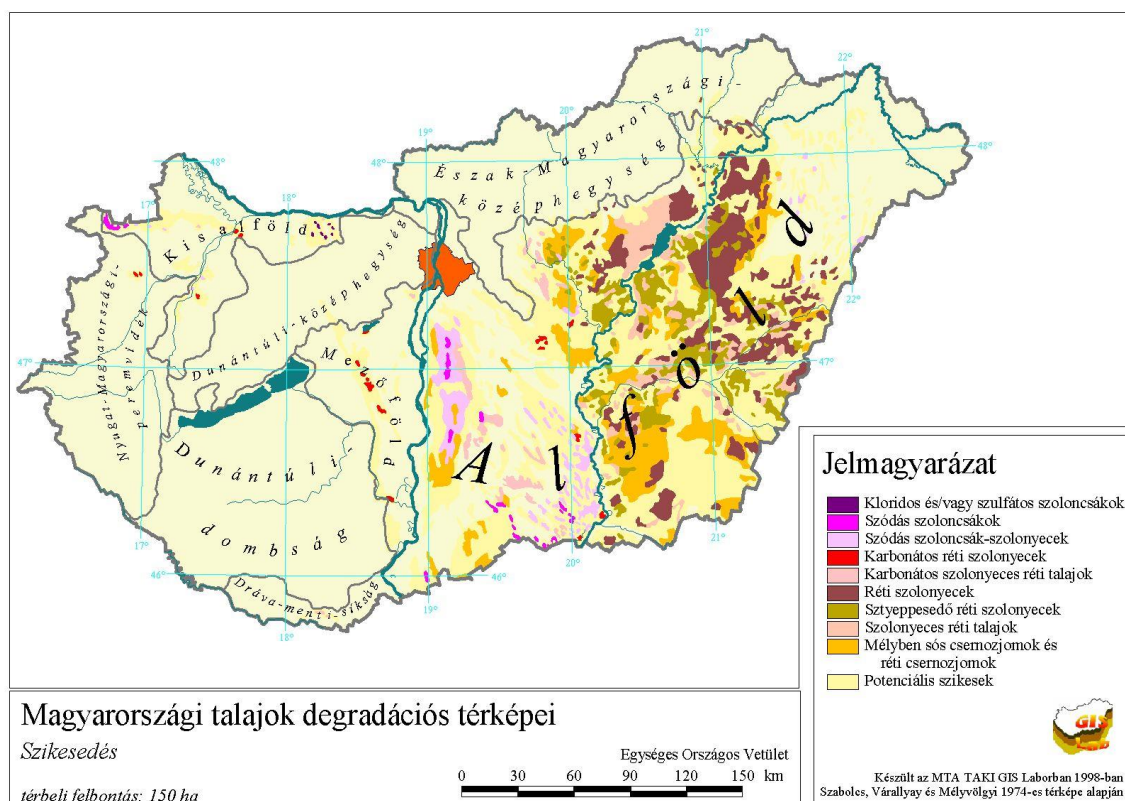
A szikesedés másik jellemző folyamata a szódásodás (*sodification*), amely során *nátrium ionok halmozódnak* fel a talajban szilárd, *kristályos* (NaHCO_3 vagy Na_2CO_3) sók formájában, vagy erős lúgosságot okozva (*alkalization*) *oldott formában*, vagy *kicserélhető ionok formájában* a kolloidok felületén. Ezek a kedvezőtlen folyamatok a talajok fizikai és vízgazdálkodási tulajdonságainak leromlását vonják maguk után; lecsökken a hidraulikus- és kapilláris vezetőképesség, megnő a holtvíztartalom és ezzel együtt lecsökken a hasznosítható vízkészlet. Ez befolyásolja belvíz- és aszályérzékenységet egyaránt; valamint a tápanyagfelvétel akadályozása révén csökkenti a talaj

termékenységet. A kedvezőtlen kémhatás viszonyok a talajok kémiai és kolloid tulajdonságait, és talajban élő szervezetek összetételét és működését határozzák meg.

A talajban megjelenő sók mennyisége, összetétele, formája, mélységi megjelenése és időbeni dinamikus változása határozza meg a kedvezőtlen hatások mértékét, és így a termékenységet és a lehetséges talajhasználatot.

2.2. Magyarországi szikes talajok

Hazánkban a szikes területek mintegy 1 millió hektárt foglalnak el. VÁRALLYAY et al. (2009) Magyarország talajainak állapotára vonatkozó közlése szerint a szikes talajok mező- és erdő-gazdaságilag művelt területeknek 9v%-át borítják (az ország területének (8 %-a), a mélyebb rétegekben szikesedési folyamatokat mutató területek pedig mező- és erdő-gazdaságilag művelt területeknek 2,9 %-át (az ország területének (2,68 %-át) borítják. A hazai szikes területek kiterjedését és az egyes típusok megoszlását az 1. ábra mutatja be.

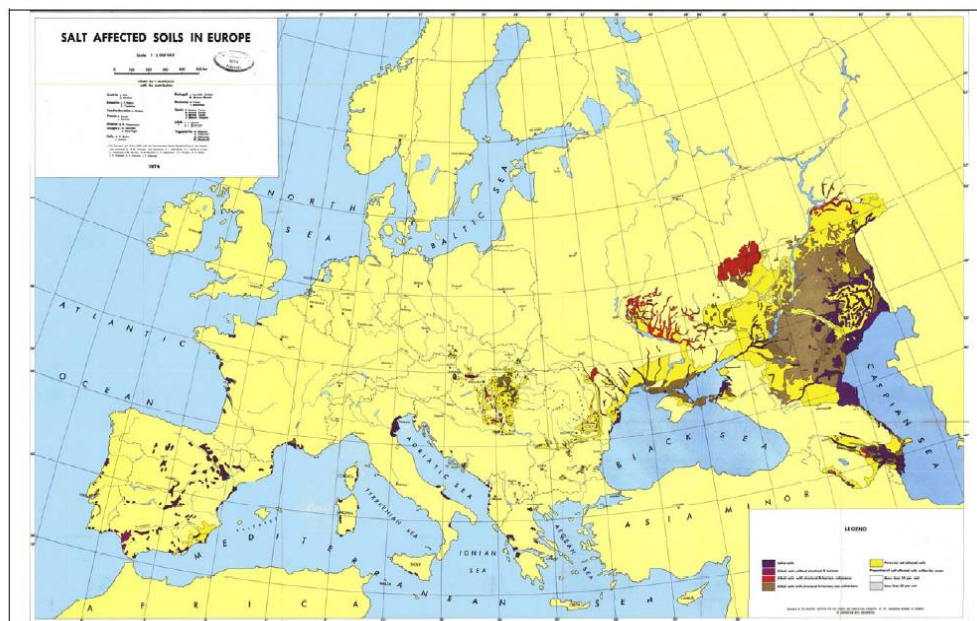


1. ábra. A hazai szikes területek kiterjedése és típusonkénti megoszlása (MTA TAKI GIS Labor, 1998).

A szikesek legnagyobb kiterjedésben a Hortobágyon, a Csongrádi-síkon, a Békés-síkon, a Körös menti-síkon, a Szolnok–Túri-síkon, a Tiszafüredi–Kunhegyesi-síkon, a Hevesi-síkon és a Békési-háton találhatók. A szikesek kistájon belüli területi arányát TÓTH ÉS SZENDREI (2006) igen nagy részletességgel adja meg. Adataik szerint több mint 70 %-kal kiemelkedő a Hortobágy és a Csongrádi-sík. A Tiszafüred–Kunhegyesi-sík, a Békési-sík, a Körösmenti-sík, a Nagy-Sárrét, a Solti-sík, a Borsodi-Mezőség legalább területének felén szikes talajokat tartalmaz. A Körösszög, a Békési-hát, a Csanádi-hát, a Kis-Sárrét, a Bihari-sík, a Jászság, a Hevesi-ártér, a Gerje–Perje-sík kistájának legalább egyharmada szikes talajokkal borított.

Európában és világviszonylatban is meghatározó a hazai szakmai hozzájárulás, mind a szikesek osztályozáshoz, mind pedig térképezéséhez. SIGMOND (1934) osztályozási koncepciója, SZABOLCS (1974) térképezési és általános szikes tanulmányai szolgáltak alapul a mai besorolási és térképi megjelentési eredményekhez (TÓTH et al. 2008).

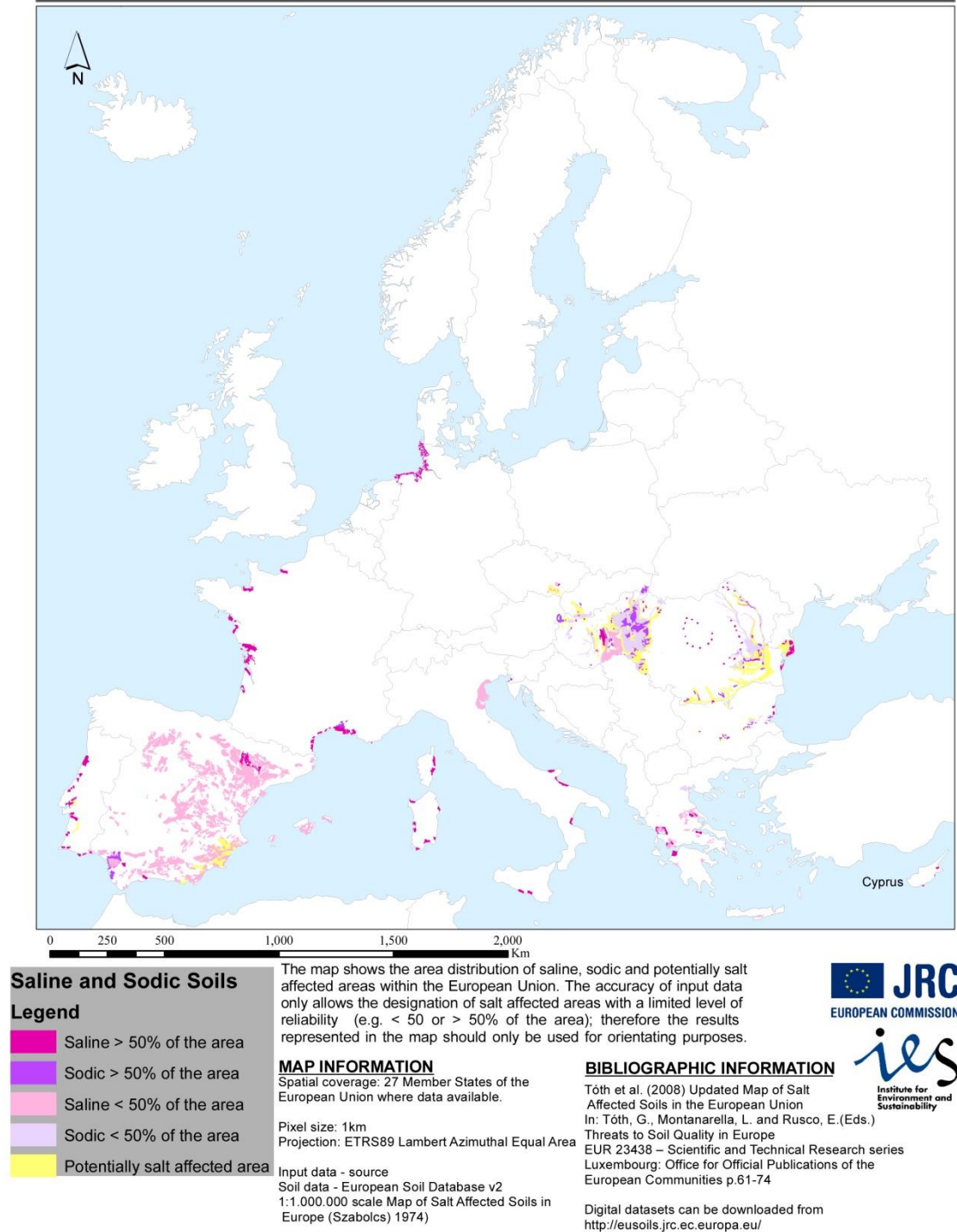
A 2. ábra SZABOLCS (1974) eredeti adatait, míg a 3. ábra (TÓTH et al., 2008) Szabolcs adatai és az Európai Talajadatbázis (European Soil Database - ESDB) feldolgozásával készült szikes eloszlási térképet mutatnak.



2. ábra: Az európai szikes területek megoszlása SZABOLCS (1974) nyomán.

1. Saline soils (szoloncsákok) – **sötétkék**; 2. alkalikus talajok, szolonyeces B szint nélkül – **lila**;
3. alkalikus talajok, szolonyeces B szinttel, karbonátos – **piros**; 4. alkalikus talajok, szolonyeces B szinttel, nem karbonátos – **barna**; 5. potenciális szikesek – **sárga**

Saline and Sodic Soils in European Union



3. ábra SZABOLCS (1974) eredeti adatai és az Európai Talajadatbázis (European Soil Database (ESDB) feldolgozásával készült, a szikes talajok európai eloszlását mutató térkép (TÓTH et al., 2008).

2.3. Szikes talajok osztályozása

2.3.1. Magyarországi osztályozás

A dokucsajevi alapokon nyugvó magyarországi, természettudományos alapokon nyugvó **genetikai és talajföldrajzi** talajosztályozási rendszer a talajokat fejlődésükben vizsgálja, szem előtt tartva a földrajzi törvényszerűségeket (MICHÉLI, 2011). A szikes talajokat a vízben oldható sók (1. táblázat), és a kicserélhető Na^+ ionok mennyisége alapján (2. táblázat) csoportosítjuk, és erre épül hazai, genetikai osztályozásuk is.

1. táblázat. A szikes talajok csoportosítása a vízben oldható sók mennyisége alapján

(STEFANOVITS et al., 1999 nyomán)

< 0,05%	nyomok, amelyre a termesztett növények még nem érzékenyek
0,05 - 0,15%	gyengén szoloncsákos, sóérzékeny növények nem termesztethetők
0,15 - 0,40%	szoloncsákos, melyben csak kevés sótűrő növény él meg
> 0,40 %	erősen szoloncsákos, kultúrnövények nem termesztethetők

2. táblázat. A szikes talajok csoportosítása kicserélhető Na^+ mennyisége alapján (STEFANOVITS et al., 1999 nyomán)

< 5 S%	nem szikes
5 – 15 S%	gyengén szolonyeces
15 – 25 S%	erősen szolonyeces
> 25 S %	erősen szolonyec

$S \% = \text{kicserélhető } \text{Na}^+ \text{ százalékos aránya az összes megkötött (adszorbeált) kation között}$

A szikes talajok fő típusába azokat a talajokat soroljuk, melyek kialakulásában és tulajdonságaiban a vízben oldható sók döntő szerepet játszottak. Az osztályozás a fő típuson belül elkülönít szoloncsák, szoloncsák-szolonyec, réti szolonyec, sztyeppesedő réti szolonyec és másodlagosan elszikesedett talajokat.

A **szoloncsák talajok** elsősorban a magas talajvízállású, mélyebb fekvésű területeken alakultak ki. A nagy sótartalmú talajvíz általában 1 m-es mélységen belül, de gyakran ennél jóval sekélyebben megtalálható. A talajvízből a kapillárisan felemelkedő sós víz elpárolog, és a talaj felszínén visszamaradnak a sók. A vízben oldható sók mennyisége legtöbbször már a feltalajban eléri a 0,3-0,5 %-ot, és a só felhalmozódás maximuma is a feltalajban van. Száraz időszakban a felszínen a só kivirágzik így a feltalaj színe szárazon gyakran fehér vagy világosszürke, a mélyebben fekvő rétegeké néhány árnyalattal sötétebb, rozsdás erekkel tarkított, de genetikai talajszintek nem igen különíthetők el, inkább csak a talajképző üledékek rétegei jelennek meg. A

szoloncsákok altípusait az osztályozás alacsonyabb szintjén a vízdoldható sók összetétele alapján különítjük el (*karbonátos, karbonát-szulfátos, karbonát-kloridos*) (STEFANOVITS et al., 1999).

A **szoloncsák-szolonyec talajokban** még észlelhetők a szoloncsákokra jellemző tulajdonságok, ugyanakkor felfedezhetőek a szolonyecsedés jegyei is, mint például az oszlopos szint kialakulása. Szelvényfelépítésükben az egyes szintek már jobban elkülöníthetőek, megjelenik a gyengén oszlopos szolonyeces B-szint. Itt figyelhető meg a sófelhalmozódás maximuma is. A szoloncsák-szolonyec talajok vízáteresztő képessége igen rossz. Az altípusok meghatározásánál az elkülönítés alapja sók minősége. Ezek alapján elkülöníthetünk karbonátos, karbonát-szulfátos és karbonát-kloridos altípust (STEFANOVITS et al., 1999).

A **réti szolonyec talajok** esetében a sófelhalmozódási maximum már a szelvény mélyebb rétegeiben található, ezért a felsőbb rétegekben jóval alacsonyabb a vízben oldható sók koncentrációja. A kicserélhető kationok között jelentős a nátrium mennyisége (több mint 15 S%). A típus legszembevetőbb jellemzője az oszlopos szerkezetű, szolonyeces B-szint. A talajvízszint mélysége 1,5-3 m között változhat, de vízrendezés esetén akár 5 m-re is lecsökkenhet. Az A-szint általában vékonyabb, mint 15 cm, kémhatása semleges, vagy közel semleges, humusztartalma pedig 2-3 % között változik. Vízgazdálkodása és tápanyag-szolgáltatása is kedvezőbb az előbbi két típusnál. Az altípusok elkülönítése a réti szolonyecok esetében a szolonyeces szint alapján történik. A kérges szolonyecok esetében az A-szint vastagsága nem nagyobb mint 5-7 cm, a közepes szolonyecoknál ez az érték 8-20 cm közé esik, a mély szolonyecok pedig azok a szelvények amelyekben a B-szint 20 cm-nél is mélyebben található (STEFANOVITS et al., 1999).

A **sztyeppesedő réti szolonyec talajokat** a szikesedés mellett, a sztyeppesedés jellemzi, ugyanis a talajvíz süllyedése miatt a talaj felsőbb rétegeire a talajvíz már nincs hatással. Az A-, és B-szintekben a csapadék hatására megindul a kilúgzás folyamata, így a vízben oldható sók a szelvény mélyebben fekvő rétegei felé vándorolnak. Ezt a típust jellemzi a viszonylag mély A-szint (kb. 20-30 cm). A kicserélhető nátriumtartalom értéke és a vízben oldódó sók koncentrációja is a szolonyeces szint alsó felében éri el a maximumot. A talajvízszint általában mélyebben van, mint 3m. A növénytermesztés szempontjából talán az egyik legkedvezőbb szikes talajtípus, hiszen nagy mennyiségű víz befogadására és megtartására képes. A jobban levegőzött feltalajnak köszönhetően a tápanyag-szolgáltatása is kedvezőbb. Két altípust különböztetünk meg: a közepes sztyeppesedő réti szolonyec, ahol A-szint 25 cm-nél vékonyabb és a mély sztyeppesedő réti szolonyec, ahol az A-szint 25 cm-nél vastagabb (STEFANOVITS et al., 1999).

A **másodlagosan szikesedett talajok** jellemzője, hogy megőrzik az eredeti talajtípus morfológiai bélyegeit ugyanakkor megjelennek bennük a vízben oldható sók és a kicserélhető nátrium is. Kialakulásukat emberi tevékenységek okozzák, mint például a nem szakszerű öntözési módszerek alkalmazása, vagy a rossz minőségű öntözővíz használata. A víz-, és tápanyag-gazdálkodást alapvetően az elsődleges talajtípus tulajdonságai befolyásolják, ám ezeket jóval kedvezőtlenebbül tudják reprezentálni. Az altípusokat az határozza meg, hogy milyen típusból alakult ki a talaj, ezek alapján beszélhetünk másodlagosan elszikesedett csernozjomról, réti talajról vagy öntéstalajról (STEFANOVITS et al., 1999).

2.3.2. WRB (*World Reference Base for Soil Resources, Világ Talaj Referenciabázis*))

A genetikai és talajföldrajzi szemléletű haza talajosztályozástól eltérően a Word Reference Base for Soil Resources rendszere (IUSS, WORKING GROUP WRB, 2006) diagnosztikai alapokra helyezi a talajok osztályba sorolását. A genetikai szemléletű osztályozástól eltérő módon (mely a talajszelvényben lezajlott talajképző tényezők és folyamatoknak a felismerésén alapszik), a diagnosztikai szemlélet a talajképző folyamatok által létrejött, jól meghatározható és lehetőség szerint számszerűen talajszintek és talajtulajdonságok alapján történik a talajok elkülönítése (MICHÉLI, 2011).

A WRB kétszintű osztályozási rendszer, melynek első szintjén 32 „Reference Soil Group (RSG)” áll, a második szintjén pedig az úgynevezett prefix qualifier-ek (előtag-minősítők) és suffix qualifier-ek (utótag-minősítők) állnak, melyek az RSG-k tulajdonságait hivatottak finomítani.

A **salic szint**: (a latin sal, só szóból) olyan felszíni, vagy sekély felszín alatti szintet jelöl, mely könnyen (gipsznél könnyebben) oldható sók másodlagos felhalmozódását tartalmazza. A salic szint a sófelhalmozódás folyamatának diagnosztikai szintje, mely a vezetőképesség és a magas pH alapján kerül meghatározásra (MICHÉLI, 2011). A talajvíz közelségének és sótartalmának következményeként, az erőteljes párolgás és a növények párologtatása révén, a felszínen vagy a felszín közelben történő sófelhalmozódást STEFANOVITS (1999) a szoloncsák, a másodlagos szikes és a szoloncsákos réti talajok jellemző folyamataiként jelöli.

A szint diagnosztikai kritériumai (részletes leírás a WRB útmutatóban (IUSS, WORKING GROUP WRB, 2006):

1. az év nagy részében, a telítési kivonatának elektromos vezetőképessége (EC_e) 25 °C-on legalább 15 dS/m, **vagy** 25 °C-on legalább 8 dS/m, amennyiben a telítési kivonatának a pH-ja legalább 8,5; **és**
2. az év nagy részében a szint vastagságának és az EC_e értékének szorzata legalább 450, **és**

3. legalább 15 cm vastagságúnak kell lennie.

Tehát a **salic** szint definiálásánál a telítési kivat vezetőképessége és a pH szerepelnek, mint meghatározandó paraméterek.

A **natric szint** (az arab *natroon*, só szóból) egy magas kicserélhető Na és/vagy Mg tartalmú, kemény felszínalatti szintet jelöl, mely számottevően magasabb agyagtartalommal jellemezhető, mint a felette lévő szint, vagy szintek. A natric szint a kicserélhető Na-ban gazdag (és általában oszlopos szerkezetű) szintet jelent, mely a hazai szolonyeces B-szinthez hasonló kritériumokkal és határértékekkel definiálható. Az oszlopos szint kialakulása a kicserélhető Na-ban gazdag, az erősen duzzadó és zsugorodó agyagos talajszintek, váltakozó száradásnak és nedvesedésének a hatására formálódik hasábokra, majd oszlopokra. A hazai nomenklatúrában a réti szolonyec és szoloncsák szolonyec talajok jellemző folyamata.

A szint diagnosztikai kritériumai (részletes leírás a WRB útmutatóban (IUSS, WORKING GROUP WRB, 2006):

1. szövete vályogos homok, vagy finomabb és a földes részben 8 %-nál több agyagtartalommal rendelkezik; **és**
2. a felette lévő szinthez képest minimálisan meghatározott százalékkal magasabb agyagtartalommal rendelkezik a felette lévő szint agyagtartalmának függvényében **vagy** agyagbemosódás jegyeit viselni magán; **és**
3. a felszíntől 30 cm-en belül kezdődik (ha a felette lévő szinttől nem litológiai diszkontinuitás választja el); **és**
4. masszív oszlopos, vagy prizmás szerkezeti megjelenése van; **és**
5. a felső 40 cm-en belül a kicserélhető Na tartalom (ESP) minimum 15, **vagy** a Mg és Na összege több, mint a Ca és a kicserélhető aciditás összege (8,2-es pH-n); **és**
6. pontosan definiált vastagsági kritériumnak kell megfelelnie.

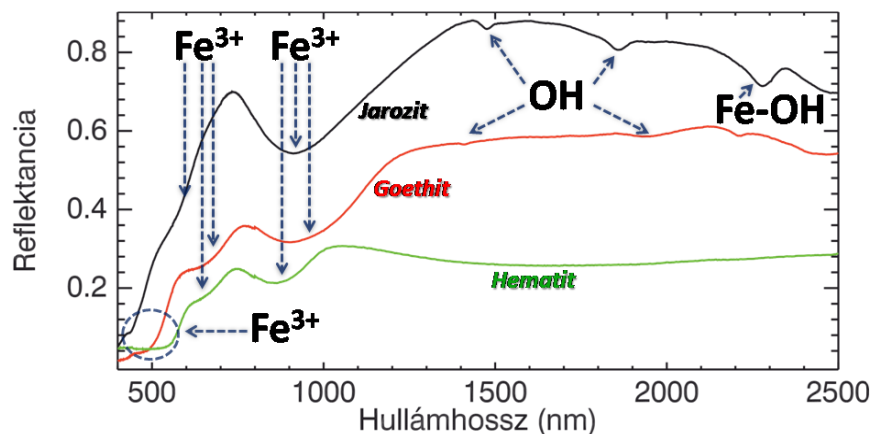
Tehát a natric szint definiálásánál a textúra, az agyagtartalom, a pH és a kicserélhető kationok mennyisége szerepel, mint meghatározandó paraméter.

A **sodic minősítő** a kicserélhető Na-nak a szikesekre jellemző határértékénél kisebb felhalmozódásra vonatkozik. A WRB-ben a kicserélhető Na-nak legalább 15 %-nyi felszaporodását a **sodic**, a kisebb, de legalább 6%-nyi jelenlétét **hyposodic** minősítővel jelzi.

2.4. A reflektancia spektroszkópia

Az elektromágneses (EM) spektrum látható és közeli infravörös tartományában végzett reflektancia spektroszkópiai vizsgálatok alapját a különböző anyagok hullámhossztól függő spektrális tulajdonságai képezik. A 350 és 2500 nm közötti tartományban a talajok spektrumában atomi és molekulapályák közötti elektronátmenetekhez, illetve ezekkel kombinált molekuláris alaprezgések felharmonikusaihoz és kombinációihoz köthet abszorpciós sávok detektálhatók (CLARK, 1999).

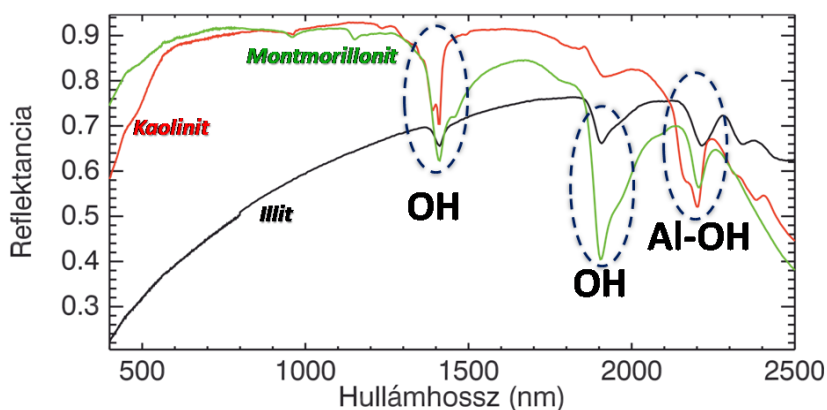
A vizsgált spektrális tartomány rövidebb hullámhosszai (350 - ~1100 nm) mutatkozó, elektronátmentekre visszavezethető (kristálytér-hatás, töltésátviteli jelenségek) elnyelési maximumok alapján elsősorban a vastartalmú ásványok (pl. goethit, hematit) mutathatók ki (CLARK, 1999). Továbbá ezekhez a talajalkotókhoz köthető talajtulajdonságokról nyerhető információ (SCHWERTMANN, 1993).



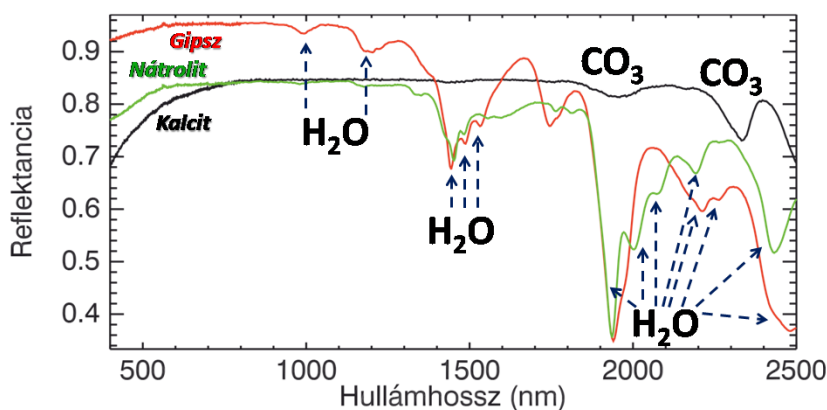
4. ábra: A jarozit, goethit és hematit ásványok reflektancia spektruma (forrás: JPL spektrális könyvtár), feltüntetve a karakterisztikus elnyeléseket létrehozó összetevőket. Ezekben az ásványokban az elektromos folyamatok dominánsak (CLARK, 1999 nyomán).

Ebben a tartományban mutatkozik a talaj szerves anyagának jellegzetes spektrális elnyelése is (STEVENS et al., 2010). A szerves anyag növekvő mennyisége az általános reflektancia csökkenésében, illetve a spektrum alakjának meredekebbé válásában mutatkozik meg (STEVENS et al., 2010).

A hosszabb hullámhosszakon (~1100 – 2500 nm) mutatkozó keskenyebb abszorpciós sávok elsősorban a SO_4 , CO_3 és OH csoportok, továbbá számos egyéb szervetlen és szerves vegyület – az EM spektrum középső infravörös tartományában mutatkozó – alaprezgési folyamatainak kombinációs és felharmonikus rezgéseire kapcsolhatóak (CLARK, 1999). Ebben a tartományban jelennek meg többek között a legfontosabb talajalkotók közül az agyagásványok, karbonátok és egyéb sók, valamint a víz karakterisztikus spektrális ujjlenyomatai (CLARK, 1999).



5. ábra: A montmorillonit, illit és kaolinit ásványok reflektancia spektruma (forrás: JPL spektrális könyvtár), feltüntetve a karakterisztikus elnyeléseket létrehozó összetevőket. Ezekben az ásványokban a rezgési folyamatok dominánsak. (CLARK, 1999 nyomán)



6. ábra: A gipsz, nátrólit és kalcit ásványok reflektancia spektruma (forrás: JPL spektrális könyvtár), feltüntetve a karakterisztikus elnyeléseket létrehozó összetevőket. Ezekben az ásványokban a rezgési folyamatok dominánsak (CLARK, 1999 nyomán).

A talajokról felvett reflektancia spektrum tehát információban rendkívül gazdag, így lehetőség nyílik egyetlen görbe alapján számos ásványtani, kémiai és fizikai paraméter egyidejű leszűrésére (VISCARRA ROSSEL et al., 2006).

3. Anyag és módszer

3.1. Az apaji és karcagi mintaterület jellemzése

A 2013 tavaszán megrendezésre került, a SZIE Talajtani és Agrokémiai Tanszéke által szervezett talajtani szakmérnöki tanulmányúton elsősorban a hazai szikes talajokat tanulmányozása volt a cél. A terepgyakorlaton több hallgatótársammal részt vettem, így megismerhettem a jelenlegi vizsgálat alapját képező talajminták származási helyének talajtani adottságait. A terepen hagyományos szelvényleírás, valamint a talajok magyar és WRB szerinti osztályozását is elvégeztük, melynek eredményét a 4.1. fejezetben közlöm.

3.2. Talajminták és laboratóriumi adatok

A vizsgálathoz felhasznált minták a Mezőgazdasági Szakigazgatási Hivatal Növény-, Talaj- és Agrárkörnyezet-védelmi Igazgatóság Szolnoki Talajvédelmi Laboratóriumából származnak. A minták Apaj és Karcag környékéről kerültek begyűjtésre 2011-ben a laboratórium munkatársai, valamint a SZIE Talajtani és Agrokémiai Tanszékének kutatói által. Munkámhoz az apaji területről 50 db minta fúrásból (0-25, 25-50, 50-75, 75-100, 100-150 cm mélységből), 10 minta szelvényből származik (genetikai szintenként mintázva). A karcagi területről 15, szelvényből származó, genetikai szintenként vett minta szolgált az elemzések alapjául. A talajminták mellé, a laboratórium munkatársai rendelkezésemre bocsájtották a kapcsolódó vizsgálati jegyzőkönyvet, mely tartalmazza a talajtani alapvizsgálatok (humusz- és CaCO_3 -tartalom, vizes kémhatás, elektromos vezetőképesség és össz sótartalom), a mechanikai elemzés eredményeit (kötöttség, homok-, iszap-, agyagfrakció), valamint a talaj kicserélhető kationjainak (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , S-érték, T-érték) meghatározását. A laboratóriumi mérésekből két további paramétert az ESP-t, és bázistelítettséget számítottam ki.

3.2.1. Talajkémiai paraméterek

A vizsgálati jegyzőkönyvek a következő talajparamétereket tartalmazzák:

pH (H_2O): a talajok folyékony fázisának kémhatása, mely érték a H^+ ion koncentrációjának negatív 10-es alapú logaritmusát jelenti. A mérés 1:2,5 talaj:desztillált víz arányú szuszpenzióból történik, elektrokémiás módszerrel (BÚZÁS, 1988, VAN REEUWIJK, 2002).

Só %: a talajok vízben könnyen oldható sótartalmát fejezi ki tömeg %-os formában. Származtatása a talajminták **elektromos vezetőképességének (EC)** mérésén alapszik, melyet a

telítési paszta vizes kivonatából határozzuk meg, és többnyire dS/m-ben fejezzük ki (Búzás, 1988, VAN REEUWIJK, 2002).

Humusz: a Tyurin-féle kálium-bikromátos oxidációval meghatározott humusztartalom %-os formában kifejezve (BÚZÁS, 1988).

CaCO₃: a talajban lévő összes karbonát tömeg %-ban kifejezett értéke, melyet a Scheiber-módszerrel, kalciméteres eljárással határoznak meg. A talajmintát sósavval hozzuk reakcióba, és a fejlődő CO₂ gáz mennyiségéből következtetünk a karbonát mennyiségére (BÚZÁS, 1988).

S-érték: az erős bázisokat képező összes kicserélhető kation mennyiségét adja meg egységnyi tömegű talajban, azaz a Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺ és K⁺ ionok cmol/kg-ban kifejezett értékeit jelenti. Meghatározása a Mehlich módszerrel történik (BÚZÁS, 1988, VAN REEUWIJK, 2002).

T-érték: kationcsere-kapacitás, mely kifejezi, hogy egységnyi tömegű talaj mennyi kationt tud kicserélhető formában megkötni, más szóval a kolloidok felületén lévő negatív töltések mennyiségét adja meg cmol/kg-ban. Meghatározása a Mehlich módszerrel történik (BÚZÁS, 1988, VAN REEUWIJK, 2002).

A kicserélhető bázikus kationok (Ca, Mg, Na,(K)): az S-érték %-ában kifejezett kicserélhető bázisok mennyiségét jelenti (BÚZÁS, 1988, VAN REEUWIJK, 2002). A K értéke minden esetben a kimutatási határ alattinak bizonyult, így az adatelemzésben ez a kation nem vett részt. Meghatározásuk szintén a Mehlich módszerrel történik (BÚZÁS, 1988, VAN REEUWIJK, 2002).

B%: a bázistelítettség megmutatja, hogy az adszorpcióra képes helyek hány %-át kötik meg kicserélhető bázikus kationok. Számítását az alábbi képlet szerint végeztem el:

$$B\% = \frac{S - \text{érték}}{T - \text{érték}} \times 100$$

ESP (Exchangeable Sodium Percentage): a talajok kicserélhető Na-tartalmának mérőszáma, mely a kicserélődési komplex Na telítettségét fejezi ki az alábbi képlet szerint.

$$ESP = \frac{\text{Kicserélhető Na (cmol/kg)}}{T - \text{érték (cmol/kg)}} \times 100$$

3.2.2. Talajfizikai talajparaméterek

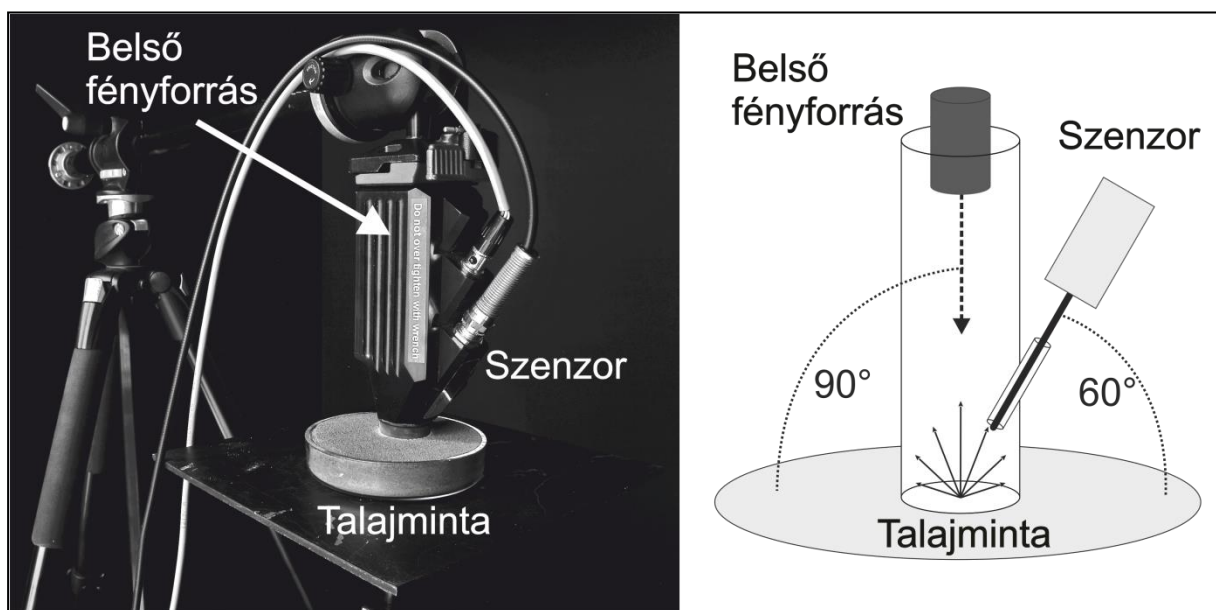
Kötöttség (Arany-féle kötöttségi szám, KA): a légszáraz talaj vízfelvevő képességét adja meg, mely a finom részecskék részarányának növekedésével arányosan nő. Értéke azt a cm³-ben megadott vízmennyiséget jelenti, mely 100 g talaj képlékenységi határának eléréséhez szükséges (BÚZÁS, 1988).

Szemcsősszetétel (homok, iszap, agyag %): a három fő szemcsefrakció százalékos arányát mutatja, tömeg %-os mértékegységben. Meghatározása a Stoke törvényen alapuló szemcseülepitési módszeren alapul (BÚZÁS, 1988).

Leiszapolható rész (számított): az agyag és iszapfrakció összes mennyiségét adja meg, azaz az Atterberg féle osztályozásnál a 0,02, míg az USA-ban használt felosztás szerint a 0,05 mm-nél kisebb szemcsék tömegét kell meghatározni (STEFANOVITS et al., 1999).

3.3. Spektrális mérések

A VIS-NIR reflektancia spektroszkópai méréseket a Vidékfejlesztési Minisztérium Mezőgazdasági Gépesítési Intézetének Hiperspektrális Laboratóriumában az ott dolgozó munkatársak segítségével, több hallgatótársammal együtt az Analytical Spectral Devices (ASD) FieldSpec 3 MAX hordozható spektrométerrel végeztem el. A műszer a 350 és 2500 nm közötti spektrális tartományban készít méréseket. A mérések során a talajminták reflektancia spektrumát az ASD High Intensity Contact Probe szenzorral rögzítettem, mely lehetővé teszi a mintával való közvetlen érintkezést, így a méréseket negatívan befolyásoló környezeti tényezők hatása (pl. légköri pára, por) minimálisra csökkent. Ezt a szenzort használva egy mérés alkalmával 10 mm átmérőjű területről kaptam spektrális információt. Minden talajmintáról 4 ponton mért, egyenként 75 mérés átlagából számított reflektancia spektrum került rögzítésre. Az ASD High Intensity Contact Probe alkalmazása esetén a mérési elrendezés a 7. ábrán bemutatottak szerint valósul meg (CSORBA et al., 2012).



1. ábra: A reflektancia-mérések során alkalmazott mérési elrendezés (CSORBA et al., 2012 nyomán)

3.4. Laboratóriumi adatok elemzése

3.4.1. Az adatok jellemzése leíró statisztikákkal

A laboratóriumi mérések eredményeit leíró statisztikákkal (minimum, maximum, átlag, szórás) jellemeztem. Ezzel képet kaptam későbbi munkám alapjait szolgáló adataim általános tulajdonságairól, és az egyes talajparaméterek alapvető jellegzetességeiről.

3.4.2. Korreláció-analízis

Az egyes talajparaméterek között fennálló összefüggések feltárásához első lépésben korreláció-analízist végeztem el. A Pearson-féle korrelációs együttható kiszámításával képet kaptam azokról az alapvető kapcsolatokról, melyek a vizsgált minták alapján számottevő befolyással bírnak a talajban zajló folyamatokra.

3.4.3. Főkomponens analízis (PCA)

A talajparaméterek közötti összefüggések feltárásához második lépésként főkomponens analízist végeztem el. Ez a többváltozós statisztikai módszer az adatsor dimenzionalitását csökkenti. Az eljárás a sok változót tartalmazó (azaz nagy dimenzionalitással bíró) adatsort leegyszerűsíti oly módon, hogy az eredeti változók által hordozott információt néhány új, de kevesebb számú változóba (főkomponensbe) sűríti, úgy, hogy az első néhány kifejezze az adatokban rejlő változékonyság legnagyobb hányadát. A PCA ezen felül lehetőséget biztosít a változók (az eredeti laboratóriumi adatok) közötti kapcsolat kvantitatív jellemzésére is.

3.5. Spektrális adatok elemzése

3.5.1. A spektrális adatok jellemzése leíró statisztikákkal

A laboratóriumi adatokhoz hasonlóan a spektrális adatok elemzését is a leíró statisztikák elemzésével, valamint a spektrumok szemrevételezésével kezdtem.

3.5.2. Főkomponens analízis

A talajmintákról felvett a reflektancia spektrumot 2151 spektrális csatornán rögzíti az ASD spektrométer, azaz talajmintánként 2151 változót kell kezelnünk. Hagyományos, leíró statisztikai módszerekkel csak átfogó (és szubjektív) képet kaphatunk a spektrumok által hordozott információról, így a laboradatokhoz hasonló módon, a spektrális adatokon is PCA-t végeztem el. Az eljárás eredményeképpen megállapítottam azokat a hullámhossz tartományokat, melyek fontosnak bizonyultak a spektrális adatok alapján. A rendelkezésre álló információk, és eddigi ismereteim

alapján ezekhez a hullámhosszakhoz talajalkotókat is rendeltem, felvázolva, hogy melyek mennyiségében és/vagy minőségében bekövetkező változások, és milyen mértékben tehetők felelőssé az adatokban megfigyelhető változékonyságért (DUCKWORTH et al., 1998)..

3.5.3. Kemometriai elemzés: *Partial Least Squares Regression (PLSR)*

Munkám fő eredményét a PLSR elemzés szolgáltatta. Ennek a többváltozós matematikai-statisztikai alapokon nyugvó kemometriai eljárás alkalmazásának a célja a független (X) változók (spektrális adatok) és a függő (Y) változók (a talajparaméterek) közötti összefüggés számszerűsítése (VISCARRA ROSSEL, 2008). A módszer szoros rokonságban áll a főkomponens analízissel, és annak kemometriai változatával, a főkomponens regresszióval (Principal Component Regression, PCR) abban a tekintetben, hogy a spektrális adatok dimenzionalitását lecsökkenti, és csak az első néhány főkomponensbe összesűrített információt használja a paraméterek becsléséhez (DUCKWORTH et al., 1998). A többváltozós modellezéshez és a paraméterek becsléséhez a The Unscrambler (CAMO software) programot alkalmaztam.

4. Eredmények

4.1. A mintaterületek bemutatása

A szelvény leírását a SZIE Talajtani és Agrokémia Tanszéke által szervezett, 2013. évi szakmérnöki tanulmányúton történt feljegyzések alapján adom meg.

4.1.1. Apaji terület bemutatása

A szelvény leírását a SZIE, Talajtani és Agrokémia Tanszék 2013. évi szakmérnöki tanulmányúton történt feljegyzések alapján adom meg.

Az apaji mintaterület domborzatát tekintve közel sík terület, amelyet gyérfűvű szikfoltos legelőként hasznosítanak. A feltárt talajszelvényt hat genetikai szintre oszthatjuk. A legfelső szint (O_{izk}) 0-1 cm-ig terjed, színe fakószürke, szerkezete elporosodó, gyökerekkel nemezszerűen átszőtt. HCl-el erősen reagál, kémhatása 8. Ezután éles átmenettel jelenik meg a következő szint (A_{zkl_n}), ami 10cm-es mélységig tart. Ez szürke, száraz, erősen tömődött, oszlopos szerkezetű vályog, amelyben jelentős mennyiségben vannak jelen gyökerek. HCl-el robbanásszerűen reagál, kémhatása 9. A harmadik szint



8. ábra: az apaji szelvény fényképe

(B_{zhl_n}) 10-30 cm-ig tart, barnássárga, nyirkos, prizmás szerkezetű vályog, melyben glejes foltosság jelenik meg. Szerkezete kevésbé tömődött. HCl-el robbanásszerűen reagál, kémhatása 9 feletti. A negyedik szint (C_{zlh} , 30-60 cm) sárgás szürke, mozaikos tarkasággal jellemezhető nyirkos, tömődött, lemezes-prizmás szerkezetű iszapos vályog. Megfigyelhetőek szürke iszapfoltok és lehúzódnak, sötét humuszerek. HCl-el robbanásszerűen reagál, kémhatása 9 feletti. A következő szint (C_{zcr}) sárga, nyirkos, gyengén iszapos homok. A szint lefelé fokozatosan homokosodik. Megjelennek a gyökér

menti humuszfoltok, illetve a vasrozsdák mennyisége növekszik. A hatodik szint (C_{zr}) sárgásszürke színű, nyirkos, iszapos homok. Lefelé fokozatosan nedvesedik, homokosodik és lazul. Sok rozsdás vasszíneződés figyelhető meg. Egy méter alatt már omlós, vizes, szürke durva homok. HCl-el erősen reagál, kémhatása 8 körüli.

Megfigyelt főbb talajképző folyamatok: felszínközeli sófelhalmozódás, Na-felhalmozódás, humuszosodás, glejesedés, karbonát-felhalmozódás

A szelvény magyar osztályozás szerinti besorolása: **karbonátos szoloncsák-szolonyec**

Felszíni diagnosztikus szintek: Salic

Felszín alatti diagnosztikus szintek: Calcic

Diagnosztikus tulajdonságok és anyagok: Gleyic color pattern, reducing conditions

Prefix minősítők: Epigleyic, Calcic

Suffix minősítők: Clayic

A szelvény WRB szerinti besorolása: Calcic Epigleyic **Solonchak** (Sodic)

Azaz az apaji szelvény egy olyan, felszíni sófelhalmozódással jellemezhető talaj, mely rendelkezik olyan szinttel, melyben a CaCO_3 tartalom legalább 15 cm-es vastagságban 15 % feletti, és 50 cm-en belül az időszakos túlnedvesedés hatására glejes színmintázatot mutat, valamint 50 cm-en belül a kicserélhető Na (+ Mg) a 15 %-ot meghaladja.

3. táblázat: az apaji szelvény genetikai szintjeiből vett minták laborvizsgálati eredményei

Genetikai szint	Mélység cm	pH _{H2O}	CaCO ₃ %	Humusz %	Homok %	Iszap %	Agyag %
O _{izk}	0-1	7,99	11,4	7,84	56,72	30,72	12,56
A _{zklh}	1-10	8,97	23,3	1,44	35	34,8	30,2
B _{zhln}	10-30	9,75	40,6	0,53	15,62	37,97	46,41
C _{zlh}	30-60	9,75	34,7	0,33	35,7	38,89	25,41
C _{zcr}	60-100	9,45	28,3	0,57	19,6	62,8	17,6
C _{zr}	100-	9,35	14,0	0,25	57,6	33,71	8,69

4.1.2. Karcagi terület bemutatása

A szelvény leírását a SZIE, Talajtani és Agrokémia Tanszék 2013 évi szakmérnöki tanulmányúton történt feljegyzések alapján adom meg.

A karcagi mintaterület domborzata sík, hasznosításának fő formája a legeltetés, az erre alkalmas növénytakarónak köszönhetően (pl.: *Festuca pseudovina*). A szelvényben öt genetikai szintet különíthetünk el. A felszínhez legközelebb eső szint (A), szárazon sötét szürkésbarna (10YR4/2), nedvesen sötét szürkésbarna (10YR3/2) színű. Ez a szint gyökerekkel sűrűn átszőtt és sok, csak részlegesen lebomlott szerves maradvány van benne. Szerkezete laza, gyengén fejlett és morzsás. A felszínen 1 cm széles repedések vannak. A második szint (Btn1) élesen elhatárolódik az előzőtől. Színe nedvesen nagyon sötétszürke (10YR3/1), szárazon sötétszürke (10YR6/1). Igen erősen tömődött, megjelennek az oszlopos szerkezeti elemek. A következő szintre (Btn2) nedves körülmények között szintén a nagyon sötétszürke szín a jellemző (10YR3/1), míg szárazon a színe sötét szürkésbarna (10YR4/2) sötétszürke (10YR3/1). A szerkezete erősen tömődött, közepes méretű szemcsés-morzsás. Szervesanyag bevonat figyelhető meg a szerkezeti elemek felületén. Ezen kívül megfigyelhetők finom porszerű karbonát kiválások és bevonatok. A negyedik szint (Btnk) szárazon sötét szürkésbarna (10YR4/2), nedvesen nagyon sötétszürke (10YR3/1) színű. Tulajdonságai megegyeznek az előző szinttel, azzal a különbséggel, hogy itt fokozottabban van jelen a karbonát kiválás. Az ötödik elkülöníthető genetikai talajszint (Cl) színe nedvesen szürkésbarna (10YR5/2) szárazon pedig sárgásbarna (10YR5/4). 0,5 –2 cm átmérőjű karbonát konkréciók láthatók benne. Jellemzi a tömődött, szerkezet nélküli „löss struktúra”.

Megfigyelt főbb talajképző folyamatok: mállás, humuszosodás, agyag-felhalmozódás, sófelhalmozódás, Na-



9. ábra: a karcagi szelvény fotója

felhalmozódás, karbonát-felhalmozódás, glejesedés

A szelvény magyar osztályozás szerinti besorolása: **kérges réti szolonyec**

Felszíni diagnosztikus szintek: nincsenek

Felszín alatti diagnosztikus szintek: Calcic, Natric

Diagnosztikus tulajdonságok és anyagok: Gleyic color pattern, reducing conditions

Prefix minősítők: Endogleyic, Epicalcic

Suffix minősítők: Epiclayic

A szelvény WRB szerinti besorolása: Epicalcic Endogleyic **Solonetz** (Epiclayic)

Azaz a karcagi szelvény egy erőteljes Na-felhalmozódással jellemezhető talaj, melyben 50 cm alatt az időszakos túlnedvesedés okozta glejes foltosság mutatkozik, és rendelkezik olyan szinttel, melyben a CaCO_3 tartalom legalább 15 cm-es vastagságban 15 % feletti, valamint felszíntől számított 50 cm-en belül agyag fizikai féleséggel rendelkezik.

4. táblázat: a karcagi szelvény genetikai szintjeiből vett minták laborvizsgálati eredményei

Genetikai	Mélység	pH	SOM	CaCO_3	T érték	B	$\Sigma\text{só}$	ESP	Homok %	Vályog %	Agyag %	Térfogat-tömeg
szint	(cm)	H_2O	%	%	cmol/kg	%	%	%	2-0,02 mm	0,02-0,002 mm	<0,002 mm	(g cm^{-3})
A	0 - 5	5,9	2,5	0	31	51	0,05	1,5	4,4	94,2	1,4	1,21
Btn1	5 - 20	7,7	2,0	0	35	85	0,12	16,1	0,3	43,7	56	1,41
Btn2	20 - 30	9,2	1,3	0,5	31	100	0,31	30,9	0,2	45,8	54	1,45
Btnk	30 - 50	9,7	0,7	15,2	31	100	0,56	41,8	0,2	38,6	61,2	1,57
Cl	50 -	10,1	0,3	8,2	24	100	0,47	41,7	4,4	94,2	1,4	1,21

4.2. Laboratóriumi adatok elemzése

4.2.1. Az adatok jellemzése leíró statisztikákkal

A munkám során felhasznált talajadatok leíró statisztikáit az 5. táblázatban adom meg.

5. táblázat: a dolgozatban felhasznált talajparaméterek alapstatisztikai mutatói

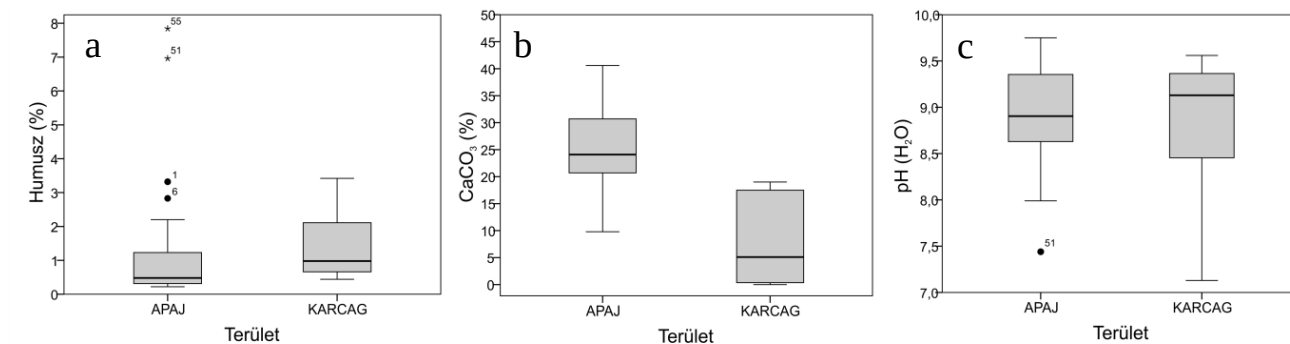
	N (db)	Minimum	Maximum	Átlag	Szórás
pH (H ₂ O)	75	7,13	9,75	8,92	0,56
EC (dS/m)	75	0,47	9,61	1,56	1,44
Só (%)	75	0,03	1,29	0,18	0,20
CaCO ₃ (%)	75	0,00	40,60	21,90	10,26
Humusz (%)	74	0,22	7,84	1,07	1,32
Kicserélhető Ca (S%)	75	15,86	88,22	61,59	15,90
Kicserélhető Mg (S%)	75	7,85	34,71	18,16	5,20
Kicserélhető Na (S%)	75	1,31	62,69	19,88	14,45
S-érték (cmol/kg)	75	4,62	45,73	16,92	9,73
T-érték (cmol/kg)	75	4,62	48,23	17,87	10,50
ESP	75	1,24	59,44	18,99	13,77
B%	75	70,13	100,00	95,37	5,43
Kötöttség	75	27,00	81,00	42,61	13,71
Homokfrakció (%)	75	0,60	86,91	36,29	25,22
Iszapfrakció (%)	75	8,58	73,70	40,26	13,49
Agyagfrakció (%)	75	3,26	61,34	23,45	16,29

4.2.2. A talajkémiai paraméterek elemzése

A humusz és CaCO₃-tartalom, valamint a vizes pH értékének összefoglaló statisztikáit box-diagramon ábrázoltam (10. ábra), mely az egyik leggyakrabban alkalmazott módszer az adatok eloszlásának megjelenítésére. A diagramokon a szürke négyzetekben látható vízszintes vonal jelenti az értékek mediánját. A négyszögek alsó széle jelzi az 25. percentilist, ami azt jelenti, hogy e pont által jelölt értéknél az adatok 25%-a alacsonyabb értékkel bír. Ehhez hasonlóan a négyszög felső része jelzi a 75. percentilist, ami azt jelenti, hogy e pont által jelölt értéknél az adatok 25 %-a bír magasabb értékkel. Ez kifejezi, hogy a négyszögben lévő értékek az adatok 50%-át teszik ki.

A T alakú oszlopokat „bajuszoknak” nevezzük. A vízszintes vonalak a 25. és 75. percentilis által jelölt értékek másfélszeresére nyúlnak. Amennyiben nincs az adatokban kiugró érték, akkor

feltételezhető, hogy az értékek ~95 %-a a két „bajusz” közé esik. Ha van kiugró érték, azt a box-diagramokról ponttal jelöljük, sőt ha extrém kiugró értékről van szó, egy rombuszsal.



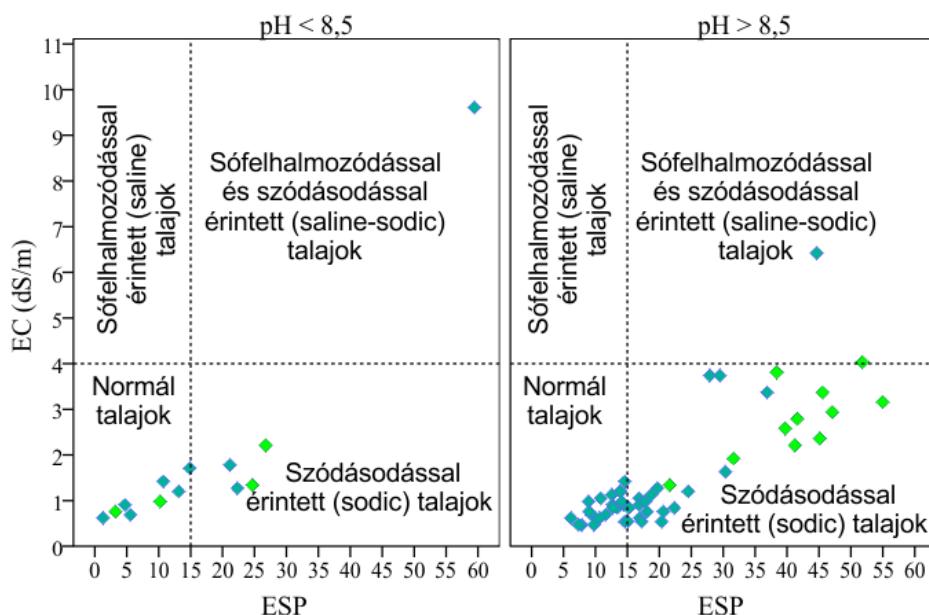
10. ábra: az apaji és karcagi minták a.) a humusztartalmának, b.) CaCO₃-tartalmának és c.) pH-jának statisztikai mutatói box-diagramon ábrázolva

A box-diagramokról leolvasható, hogy az apaji terület átlagos humusztartalom-értékei alacsonyabbak a karcagi talajokénál, azonban az adatokból több kiugró, sőt extrém értéket mutatnak. Ez valószínűsíthetően nagy mennyiségű humusz - kis mélységben felhalmozódott sók felett - kis vastagságban történt akkumulációjára vezethető vissza. A karcagi minták nem mutatnak kiugró értékeket, és átlagos humusztartalmuk is magasabb.

Az apaji minták átlagos CaCO₃ tartalma jóval magasabb a karcagiakénál.

Az apaji minták kémhatása átlagosan alacsonyabb, mint a karcagi területről származóké, azonban maximum értéke meghaladja az utóbbiakét.

Az *EC* és *ESP* értékek alapján BRADY és WEIL (1999) 3 (+1) csoportját különíti el a sófelhalmozódással érintett talajokat, mely kategóriák a 11. ábrán vannak feltüntetve. A diagramon ábrázolt határértékeket figyelembe véve az apaji és karcagi mintákat ábrázoltam ilyen módon.



11. ábra: az apaji (◆) és karcagi (◆) minták csoportosítása a EC és ESP, valamint a pH tartományuk alapján értékük. A csoportosítás és a határértékek BRADY és WEIL (1999) nyomán kerültek megadásra

Az első kategóriába azok a minták esnek, melyek vezetőképessége 4 dS/m és ESP értékük 15 alatt marad. Ezeket a mintákat e kategorizálás alapján a normál, sófelhalmozódással nem érintett, vagy a növényzet számára jelentéktelen sótartalommal bíró talajoknak nevezhetjük.

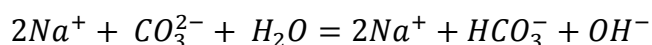
A *sófelhalmozódással érintett talajok* (saline soils, $EC > 4$ dS/m, $ESP < 15$) olyan talajok, melyeket főként Na, Ca, Mg és K kloridjainak, és szulfátjainak felhalmozódása érintett. Ilyen talajokban a sófelhalmozódás, már lehet olyan mértékű, hogy gondot okozhat bizonyos növények számára. Az ilyen talajok kicserélődési komplexében a Ca és Mg a domináns, így az ESP értéke alacsony. A magas sótartalom ilyen talajok esetében nem feltétlenül jelenti a talaj fizikai leromlását, csak abban az esetben, ha a kicserélhető kationok között megjelenik a Na. Előbbi esetben a sók meggátolják a talajszemcsék diszpergálódását, stabilizálják a szerkezeti elemeket. Vizsgálataim során megállapítottam, hogy sem az apaji, sem a karcagi minták nem esnek ebbe a kategóriába.

A *sófelhalmozódással és szódásodással érintett talajok* (saline-sodic soils, $EC < 4$ dS/m, $ESP > 15$) átmeneti jelleget mutatnak a dominánsan sófelhalmozódást és dominánsan szódásodást mutató talajok között. A sós talajokhoz képest magasabb ESP értéket mutatnak, így megjelenik a Na ion hatása. Az ilyen fizikai és kémiai tulajdonsággal rendelkező talajok fizikai és kémiai tulajdonságai a semlegesítő hatással bíró sók jelenlétének köszönhetően azonban még hasonlóak a sós talajokéhoz. Az ilyen sók ugyanis túlsúlyt biztosítanak olyan kationokból, melyek közel férközve a negatív

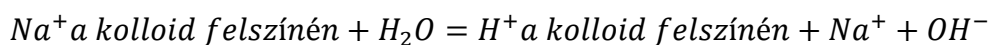
töltésű kolloidfelszínhez megakadályozzák a diszpergálódását, azaz a talajszemcsék egymástól való eltávolodását, így a szerkezet leromlását.

Számos esetben azonban ez az állapot nem tartós, ugyanis ezek a sók, általában magas Na tartalmú vizek érkezésekor gyorsan kimosódnak a talajból. Ebben az esetben a kicserélhető Na mennyisége megnövekszik, mely magával vonja a pH növekedését is (általában 8,5 fölé). A Na jellemzője, hogy nem helyezkedik el olyan közel a talajkolloidokhoz, mint a Ca és Mg, valamint, hogy a méretéhez képest igen nagy hidrátburok veszi körül ha nedvesség (pl. csapadék, öntözés, áradás) éri. Előbbi tulajdonsága előidézi a negatív töltésű talajszemcsék egymástól való eltávolodását, míg az utóbbi fizikailag távolítja el egymástól a részecskéket. A diszpergált szemcsék eltömítik a talaj pórusait, így a talaj vízgazdálkodása rendkívüli mértékben leromlik.

A szódásodással érintett talajok esetében a semlegesítő sók kis aránya ($EC < 4$ dS/m), illetve a magas kicserélhető Na tartalom teremtik a legproblémásabb feltételeket. A kémhatása ezeknek a talajoknak 8,5 és 10 között mozog, mely magas értékek a Na-karbonát hidrolízisének köszönhető:



A kicserélődési komplexben jelen lévő Na is hidrolizálódik:



A létrejövő körülményeket nagyon kevés növény viseli el, ugyanis a Na^{+} , OH^{-} és HCO_3^{-} túlsúlya mérgező mértékű, valamint a talajok fizikai tulajdonságainak leromlása a nedvesség beszívargását is meggátolja a mélyebb rétegekbe. Ilyen extrém magas kémhatás esetében a humuszanyagok oldatba mehetnek, majd a kapilláris vízmozgás során a felszínre kerülve, az oldat bepárlódásával kicsapódnak, létrehozva a jellegzetes fekete Na-humát gazdag „tócsákat”, mint azt a karcagi területen is megfigyeltem (12. ábra).



12. ábra: a karcagi területen megfigyelt Na-humátban gazdag „tócsa”

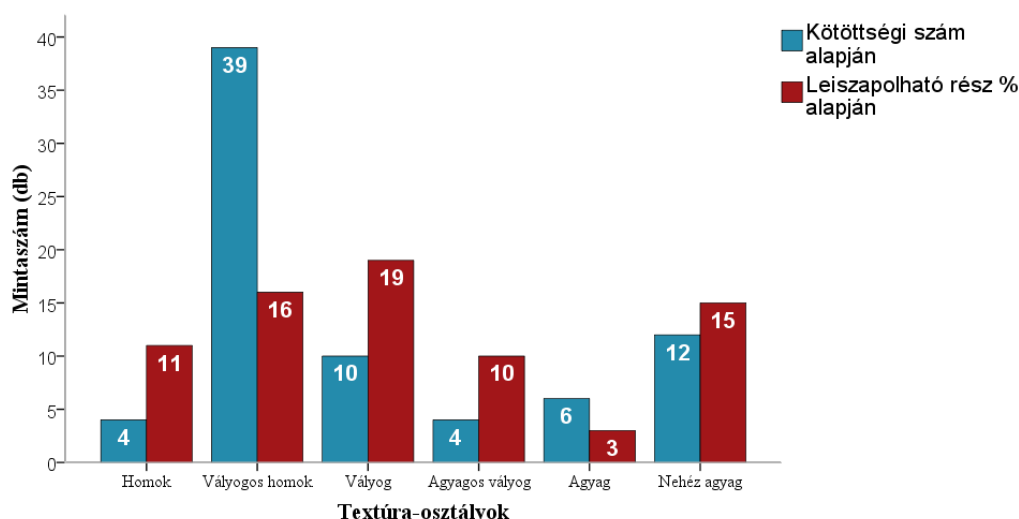
4.2.3. Talajfizikai paraméterek elemzése

Az Arany féle kötöttségi szám elsősorban a textúrával összefüggő paraméter, így értékéből következtethetünk a talajminták textúrájára. A leiszapolható rész meghatározása hasonló módon alkalmazható a szövet jellemzésére.

6. táblázat: a textúraosztályok megállapítására szolgáló talajfizikai paraméterek határértékei ásványi talajoknál (STEFANOVITS et al., 1999 nyomán)

Textúra-csoport	Leiszapolható rész % (<0,02 mm)	KA
Durva homok	<10	<25
Homok	10-20	25-30
Homokos vályog	20-35	30-38
Vályog	35-60	38-42
Agyagos vályog	60-70	42-50
Agyag	70-80	50-60
Nehéz agyag	>80	>60

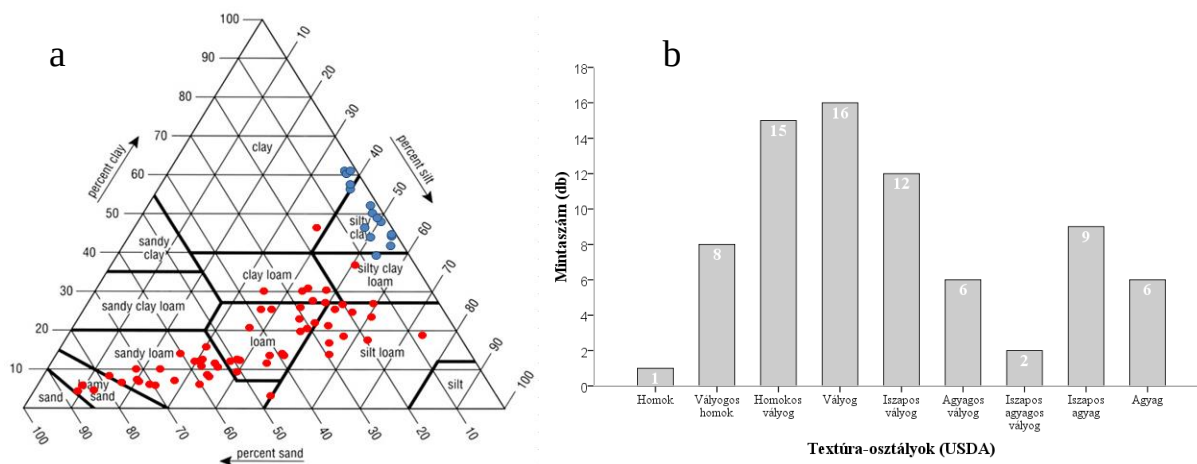
A 6. táblázatban megadott textúra-határértékek alapján szerkesztett diagramon (13. ábra) látható, hogy a kötöttség és a leiszapolható rész alapján igen eltérő eredményekhez jutunk. A kötöttségi szám alapján a minták többsége durva-közepesen durva osztályba (homok - vályog), kisebb hányada a finom szövetű csoportba (agyag – nehéz agyag) került. A leiszapolható rész alapján kiegyenlítettebb képet kaptam a szöveti kategóriák megoszlásáról, körülbelül egyenlő arányban képviseli magát minden csoport.



13. ábra A kötöttségi szám és leiszapolható rész határértékek alapján meghatározott textúra-osztályok

Talajfizikai paraméterek elemzése

A szemcseösszetétel szerint a talajokat textúracsoportokba lehet sorolni. Az ábrázolás a három fő szemcsefrakció %-os ábrázolására épül. A legszélesebb körben ismert és elfogadott az USA Talajtani Szolgálat (USDA) által kidolgozott textúraminősítés. Ezt a kategorizálást alkalmaztam az 14. ábrán, ahol a három frakció %-os megoszlását ábrázoltam háromszögi diagramon.



14. ábra: a.) a karcagi (●) és apaji (●) minták textúrájának ábrázolása az USDA szerinti háromszögi diagramon és b.) a textúra-osztályok megoszlása a mintaszám függvényében

A diagramról leolvasható, hogy a vizsgált talajminták igen nagy változékonyságot mutatnak a textúrájuk tekintetében. Azonban egyértelmű, hogy a Karcagról származó minták rendelkeznek a legfinomabb szövettel, mindegyik az agyag, iszapos agyag és iszapos agyagos vályog kategóriába esik, míg az apaji talajok szélesebb skálán (homok – agyag) mozognak.

4.2.4. A laboratóriumi adatok elemzése korreláció-analízissel

Annak érdekében, hogy a talajban lejároló folyamatokat megértsük nem elegendő az egyes talajparamétereket egyesével, külön-külön vizsgálni. A talaj egy igen komplex rendszer és a benne zajló folyamatok is igen bonyolultak. Az egyes talajparaméterek között fennálló összefüggés feltárásához első lépésben korreláció-analízist végeztem el a laboratóriumi adatokon. A 6. táblázat az apaji és karcagi minták laboratóriumi adatai és az azokból számolt paraméterek értékei közötti Pearson-féle korrelációs koefficiens értékeket tartalmazza. Ez az együttható a lineáris korreláció mérőszáma, a változók (talajparaméterek) közötti kapcsolat szorosságát fejezzük ki vele. A koefficiens -1 és 1 közötti értéket vehet fel. Alacsony értéke (0 közeli) azt jelenti, hogy a két változó között nincs lineáris kapcsolat, egymástól függetlenek. Amennyiben két változó között korreláció közelít az 1-hez, vagy a -1-hez, megállapíthatjuk, hogy a két paraméter között szoros a kapcsolat. Előbbi esetben (1 közeli érték) ha az egyik paraméter növekszik, a másik is egyenes

arányban növekszik, míg az utóbbiban (-1 közeli érték) az egyik paraméter növekedése a másik paraméter csökkenését vonja maga után, azaz fordítottan arányos a változás.

A könnyebb áttekinthetőség érdekében a korreláció mértékét színekkel is jelöltem, melynek magyarázatát a táblázat melletti színskálán ábrázoltam.

A következőkben a legfontosabb, a korrelációs mátrixból leszűrhető legfontosabb összefüggéseket, és azok magyarázatát fejtem ki.

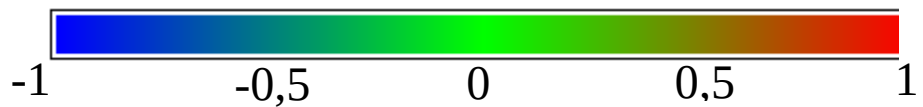
A legerősebb összefüggések természetesen azok között a paraméterek között mutatkoznak, melyek egymásból származtathatóak. Az EC és a sótartalom, valamint az ESP és a kicserélhető Na tartalom magas korrelációs együtthatója ezzel magyarázható.

A legmarkánsabb az EC (sótartalom) és a kicserélhető Na (és ESP) közötti magas, korrelációs érték mutatkozik. Közepesen magas az EC valamint az S-érték, T-érték és kötöttség közötti lineáris összefüggés, illetve közepes erősségű kapcsolat mutatkozik a humusztartalommal. Erős negatív korrelációt figyelhetünk meg viszont e paraméterek és a kicserélhető Ca között. Ezekben az értékekben tükröződik, hogy az általam vizsgált mintákban a textúra finomodásával a kicserélhető Na tartalom értékek (a kicserélhető Ca rovására) növekednek. A finom szövetű talajok kolloidokban gazdagok, így a nagy fajlagos felületen sok hely áll rendelkezésre kicserélhető ionok megkötésére, és ezzel magyarázható a kötöttséggel növekvő T-érték is. A növekvő S-érték pedig a bázikus kationokban való gazdagodást jelenti, azaz a sófelhalmozódás következtében, az EC érték növekedésével a rendelkezésre álló helyeket egyre nagyobb arányban tölti be elsősorban Na. Utóbbi folyamat természetesen az ESP értékek növekedésében is megmutatkozik. A humusztartalom valamint a T (és S)-érték közötti közepes korreláció a humuszanyagok jelentős töltéshordozó szerepét magyarázza.

Gyenge korrelációt figyelhetünk meg a CaCO_3 és a pH között. A tapasztalat az esetek többségében jóval erősebb összefüggést állapít meg e két paraméter között, ugyanis nem szikes talajoknál a CaCO_3 -nak rendkívül nagy szerepe van a pH kialakításában és szinten tartásában. A szikes talajok tárgyalásánál azonban figyelembe kell vennünk, hogy a pH-t a CaCO_3 kívül még a jelenlévő, rendkívül változatos összetételű sók is befolyásolják.

6. táblázat: a Pearson-féle korrelációs együttható-értékeket tartalmazó korrelációs mátrix

	pH (H ₂ O)	EC (dS/m)	Só (%)	CaCO ₃	Humusz	Kicserélhető Ca (S%)	Kicserélhető Mg (S%)	Kicserélhető Na (S%)	S-érték (cmol/kg)	T-érték (cmol/kg)	ESP	B%	Kötöttség	Homok (%)	Iszap (%)	Agyag (%)
pH (H ₂ O)	1															
EC (dS/m)	-0,01	1														
Só (%)	-0,01	0,99	1													
CaCO ₃	0,40	-0,21	-0,21	1												
Humusz	-0,67	0,54	0,54	-0,35	1											
Kicserélhető Ca (S%)	-0,25	-0,74	-0,74	0,40	-0,08	1										
Kicserélhető Mg (S%)	-0,06	-0,04	-0,04	-0,17	-0,08	-0,44	1									
Kicserélhető Na (S%)	0,32	0,81	0,81	-0,37	0,09	-0,94	0,11	1								
S-érték (cmol/kg)	-0,16	0,69	0,69	-0,36	0,53	-0,58	0,05	0,60	1							
T-érték (cmol/kg)	-0,21	0,67	0,67	-0,42	0,55	-0,56	0,05	0,58	1	1						
ESP	0,34	0,81	0,81	-0,34	0,08	-0,94	0,11	0,99	0,59	0,56	1					
B%	0,33	0,00	0,00	0,45	-0,20	-0,02	-0,02	0,04	-0,10	-0,22	0,10	1				
Kötöttség	-0,07	0,64	0,64	-0,54	0,37	-0,81	0,27	0,79	0,79	0,79	0,77	-0,15	1			
Homok (%)	0,00	-0,25	-0,25	0,21	-0,16	0,46	-0,18	-0,43	-0,63	-0,64	-0,42	0,09	-0,66	1		
Iszap (%)	0,07	0,01	0,01	0,15	0,10	-0,15	0,06	0,14	0,29	0,28	0,16	0,14	0,25	-0,81	1	
Agyag (%)	-0,07	0,37	0,37	-0,45	0,16	-0,58	0,24	0,55	0,73	0,75	0,52	-0,26	0,82	-0,88	0,43	1



4.2.5. A laboratóriumi adatok elemzése főkomponens analízissel

Környezeti vizsgálatoknál mintánként általában sok 10 vagy 100 változóval kell dolgozni. Ezek által az adatok által kifejezett információ kinyerése egyszerű statisztikai módszerekkel nem, vagy csak korlátozottan lehetséges. Ha egy adatsor sok változót tartalmaz, azaz nagy dimenzionalitással bír, úgynevezett dimenziócsökkentő módszereket kell alkalmazni, hogy az első pillantásra kaotikusnak nevezhető adatsorban rejlő információ átláthatóvá váljon. Egy adatsor annyi dimenzióval bír, ahány változót tartalmaz. A főkomponens analízis (Principal Component Analysis, PCA) eljárás az adatsor dimenzionalitását csökkenti úgynevezett főkomponensek létrehozásával, melyek közül az első néhány kifejezi az adatokban rejlő változékonyság legnagyobb hányadát.

Munkám során 75 db mintával és 16 db hagyományos laboratóriumi adattal (változóval) dolgoztam. A PCA-t azért végeztem el, hogy képet kapjak az adataim szerkezetéről, és megállapítsam, mely változók azok, melyek a legnagyobb mértékben befolyásolják a változékonyságát. Az PCA eredményeképp számos diagramot kapunk, melyek közül a következőkben a legfontosabbakat mutatom be.

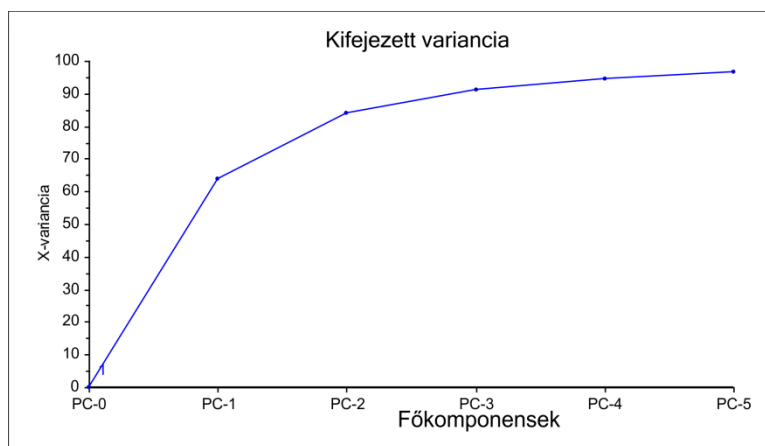
Explained variance (kifejezett variancia): a PCA algoritmus által létrehozott új változók (főkomponensek) által kifejezett varianciát ábrázolja. A PCA elve, hogy a legtöbb információt az első komponensbe sűríti, az ezután következőkbe egyre kevesebbet.

Principal Component Scores (főkomponens értékek): a diagramon a minták két főkomponensen felvett értékeit ábrázoljuk két dimenziós koordináta-rendszerben. Az esetek többségében az 1. és 2. főkomponens értékeit ábrázolva képet kaphatunk az adatokban rejlő változékonyság legnagyobb hányadáról. A diagramon megfigyelhető „mintázat”, azaz hogy a minták hogyan helyezkednek el ebben a koordináta-rendszerben, kiemelt fontossággal bír. Azok a minták, melyek az első és második főkomponens értékeik alapján hasonlóak egymáshoz, a térben közel helyezkednek el, és mivel a főkomponensekben a laboratóriumi adatok információ-tartalma került „összegzésre”, ezek a minták a fizikai és kémiai paramétereik alapján is hasonló tulajdonsággal bírnak. Az egymástól távol elhelyezkedő minták ennek megfelelően különbözőek.

Principal Component Loadings (főkomponens faktorsúlyok): míg a főkomponens értékek megmutatják a minták hasonlóságát és különbözőségét, azaz, hogy hogyan helyezkednek el a főkomponens-térben, a faktorsúly diagramok megmutatják, hogy mi az oka ennek a mintázatnak. A faktorsúlyok esetében egy, a főkomponens értékekhez hasonló 2

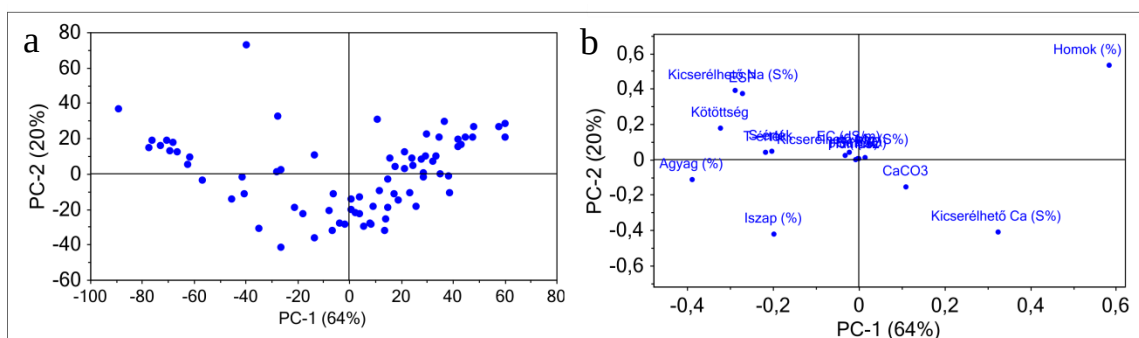
dimenziós diagramot kapunk, melyen a változók vannak feltüntetve. A faktorérték diagrammal együtt elemezve képet kaphatunk azokról a talajparaméterekről, melyek a legnagyobb mértékben felelősek az adatok változékonyságának kialakításában.

Az 15. ábra mutatja be a főkomponensek által kifejezett variancia %-os megoszlását. A diagramról leolvasható, hogy az első főkomponens kifejezi az adatokban rejlő változékonyság 64, a második 20, a harmadik pedig 11 %-át. Azaz, az első két főkomponens értékeit ábrázoljuk, az adatokban lévő változékonyság 84 %-ról kapunk képet.

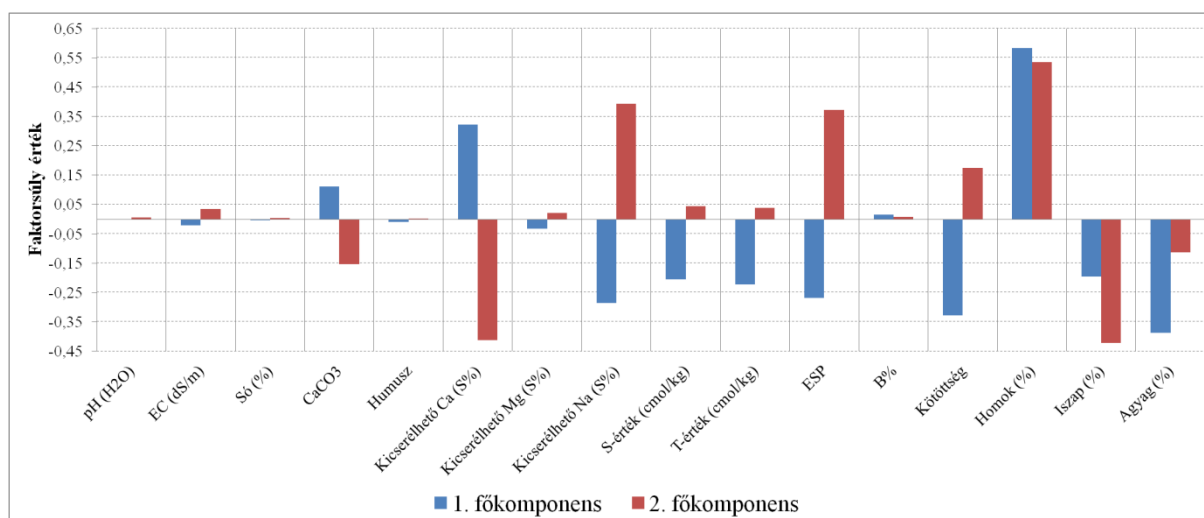


15. ábra: A laboratóriumi adatokon elvégzett PCA során létrehozott első 5 főkomponens által kifejezett variancia (%)

Az első két főkomponens értékeit ábrázolja a 16/a ábra, míg a faktorsúlyokat a 16/b ábra. A faktorsúly értékeket a könnyebb áttekinthetőség érdekében oszlopdiagramokon is ábrázoltam a 17. ábrán. A faktorérték diagramon (16/a ábra) két egymástól jól elkülöníthető pontthalmaz figyelhető meg, egyik az első főkomponens tengely negatív, a másik a pozitív oldalon. Ezt az elrendeződést magyarázza a faktorsúly diagram (16/b és 17. ábra). Az ábra origójához közel az EC és sótartalom, Humusz, pH, kicserélhető Mg és a bázistelítettség helyezkedik el. Ezek a változók tehát nem bírnak nagy jelentőséggel az első két főkomponens tengelyen, azaz változékonyságuk nem számottevő. Az első főkomponens tengely negatív végén helyezkedik el az iszap frakció, agyagfrakció, T és S-érték, kicserélhető Na és ESP. Ezek a paraméterek a korrelációanalízis fejezetnél már tárgyalt folyamatokban játszanak jelentős szerepet. A főkomponens pozitív oldalán a homok, a kicserélhető Ca és a CaCO_3 helyezkedik el.



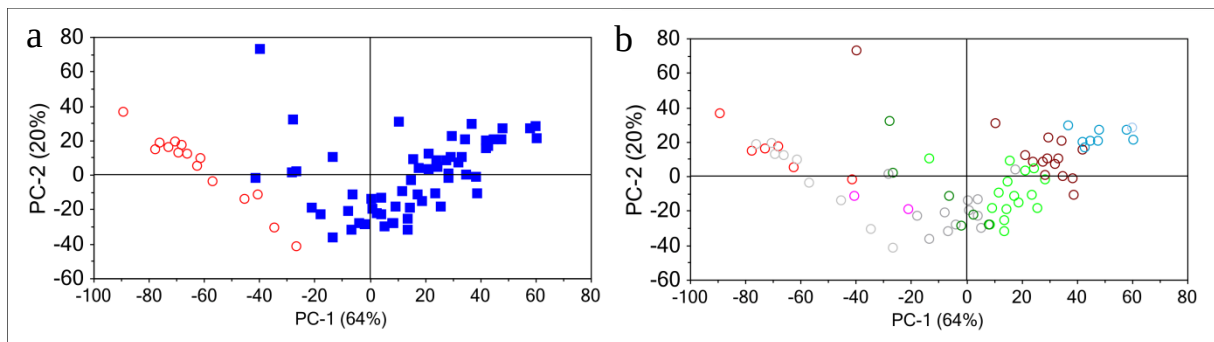
16. ábra: a.) a minták főkomponens faktorértékei az első 2 komponensen és b.) a változók faktorsúly értékei az első 2 komponensen



17. ábra: A változók faktorsúly értékei az első 2 komponensen, oszlopdiagramon feltüntetve

A diagramok értelme szembetűnővé válik, ha feltüntetjük egyrésről a minták származási helyét (18/a. ábra), valamint az USDA textúra csoportokat (18/b. ábra). A térben elkülönül az apaji és karcagi mintaterület, valamint a textúra-osztályok is rendezett képet mutatnak. Elmondható tehát, hogy a laboratóriumi adatok alapján az adatokban rejlő legnagyobb változékonyságért elsősorban a szemcse-összetételbeli és texturális paraméterek, valamint ezekkel a paraméterekkel szoros összefüggésben lévő kolloidkémiai tulajdonságok felelősek.

A térben elkülönül a finom szövettel, magas kicserélhető Na tartalommal (és ESP-vel), magas T és S-értékkel jellemezhető karcagi, valamint a durvább szövettel, magasabb kicserélhető Ca tartalommal jellemezhető apaji mintaterület.

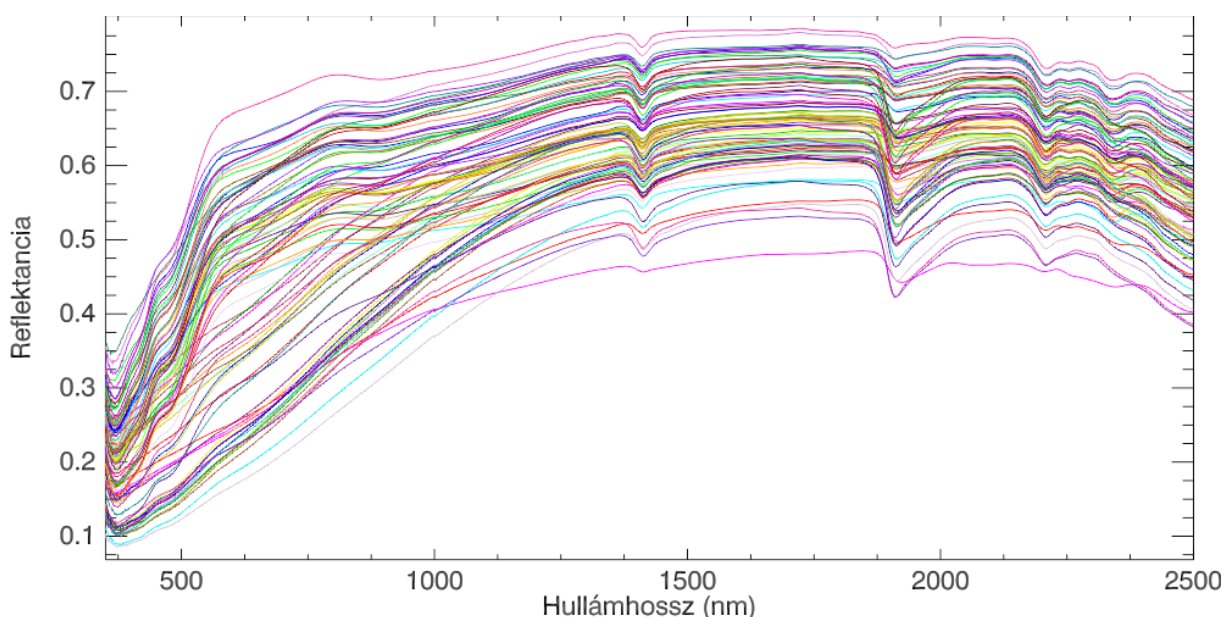


18. ábra: a.) a minták faktorértékei az első 2 komponensen a mintaterület szerint csoportosítva és b.) az USDA textúra osztályok szerint csoportosítva

4.3. A spektrális adatok vizsgálata

4.3.1. A spektrális adatok vizsgálata szemrevételezéssel

Munkám során 75 minta spektrális reflektanciáját rögzítettem, az elektromágneses spektrum 350 és 2500 nm közötti tartományában, mely az ultraibolya hosszabb hullámhosszúságú tartományát (350 - 450 nm), a látható tartományt (450 – 650 nm), valamint a közeli infravörös tartományt (650 – ~ 1100 nm) valamint a rövidhullámú infravörös tartományt (~1100 – 2500 nm) foglalja magába. A talajmintákról felvett reflektancia görbéket az 19. ábra mutatja be.



19. ábra: a kutatás során az apaji és karcagi mintákról felvett reflektancia görbék

Fontosnak tartom, hogy mindennemű bonyolultabb statisztikai feldolgozás megkezdése előtt általános képet kapjak a spektrális adatsor főbb jellemzőiről. A spektrális görbék szemrevételezése alapján mutatom be a talajok spektrális tulajdonságait meghatározó atomi-molekuláris szinten végbemenő folyamatokat is.

A görbék szemrevételezése során a legszembetűnőbb különbség a görbék általános alakjában mutatkozik meg. Az átlagosan alacsony reflektancia értéket mutató spektrumok alapja „homorú”, míg az átlagosan magas értékekkel rendelkezők „domború” alakot vesznek fel. Ez a jellegzetesség tipikusan a minták szerves anyag-tartalmában lévő különbségek hatására alakul ki. A szerves anyagoknak eltérően a jól definiálható kristályszerkezettel és összetétellel rendelkező ásványoktól nincs pontosan leírható fizikai-kémiai összetétele, így karakterisztikus elnyelési sávja a spektrumokban nehezen definiálható (STEVENS et al., 2010).

A szerves anyagot felépítő molekulák igen változatos összetétellel bírnak, és a vizsgált spektrális tartomány rövidebb hullámhosszúságú tartományában (350- ~1100 nm) sok elnyelést hoznak létre. Ezek az abszorpciós sávok azonban egymástól nem elkülönülten, hanem egymást átfedve, vagy akár elnyomva jelentkeznek. Az szerves anyagot felépítő talajalkotók elnyelésinek összegződése adja azt a képet, hogy mennyiségük növekedésével - emelkedő szerves anyag-tartalommal - a görbék alakja homorúvá válik a sok kisebb abszorpciós sáv összegződése miatt.

Ahol a szerves anyag elnyelése nem nyomja el, szemrevételezéssel is megfigyelhetők 350 és 900 nm közötti széles elnyelési sávok, melyek a vas-oxidokhoz köthetőek. A vizsgált minták vas-oxidjai elsősorban a talajvíz hatására, a glejesedés hatására halmozódnak fel a szelvényekben.

Az 1400 és 1900 nm-es tartományban, a mintákban kémiaiilag és fizikailag kötött víz OH csoportjának elnyelése is figyelhető meg. Ezek az elnyelések is diagnosztikusok azokra az alkotókra, melyekben előfordulnak.

A 2200 nm környéki sáv az agyagásványokban előforduló Al-OH molekula, valamint ennél hosszabb hullámhosszúságú tartomány a különböző sók CO_3 , SO_4 molekuláinak elnyelése.

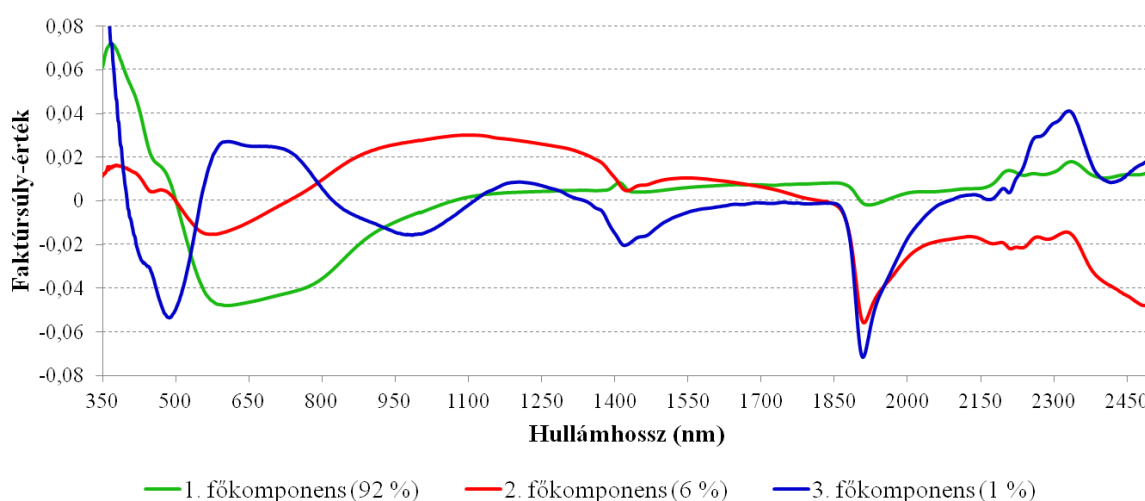
4.3.2. A spektrális adatok elemzése főkomponens analízissel

A talajmintákról felvett reflektancia spektrumok rendkívül információ-gazdagok. Szemrevételezéssel, és szubjektív megítélésünkre hagyatkozva (annak ellenére, hogy számos hasznos információhoz jutunk) csak átfogó, és csak kvalitatív eredményhez jutunk. Annak érdekében, hogy a spektrális adatokban rejlő változékonyságot kvantitatívan jellemezhessük, többváltozós matematikai-statisztikai módszert kell alkalmaznunk.

A 4.2.4. fejezetben, a laboradatok elemzése esetében már bemutatásra kerül a főkomponens analízis, mely eljárás a spektrális adatsorra is alkalmazható. A laboratóriumi adatsortól eltérően – ahol 16 változóval dolgoztam – egy reflektancia-spektrum felvételével 2151 változóhoz jutunk, ugyanis ennyi spektrális csatornán rögzíti az ASD spektrométer a reflektancia-értékeket. Belátható, hogy ekkora számú változót kezelni és szubjektív módon interpretálni lehetetlen feladat. Ilyen esetekben alkalmazzunk a dimenzió-csökkentő többváltozós statisztikai módszereket, melyek célja, hogy az elsőre kaotikusnak tűnő adatsorban jelen lévő változékonyságot, néhány – a variancia jelentős hányadát megmagyarázó – főkomponensbe sűrítse össze.

A legnagyobb különbség a laboradatokra alkalmazott főkomponens analízishez képest, hogy a spektrális adatok esetén az egyes főkomponenseket magyarázó faktorsúly értékeket nem kétdimenziós koordináta-rendszerben ábrázoljuk. A spektrális adatok esetében a főkomponens faktorsúlyokat a hullámhossz szerint ábrázoljuk (20. ábra), így meg tudjuk határozni azokat a hullámhosszakat és hullámhossz-tartományokat, melyek nagy jelentőséggel bírnak az adott főkomponensen. Amennyiben ezekhez a spektrális tulajdonságokhoz talajalkotókat, vagy akár talajfolyamatokat tudunk társítani, lehetővé válik előzetes információt leszármazni azokról a folyamatokról, melyek a spektrális adatok alapján dominánsnak bizonyulnak.

A PCA eredményeképpen kapott első a variancia 92, a második 6 és a harmadik 1 %-át, magyarázza az adatokban rejlő változékonyságnak.



20. ábra: a spektrális adatokon elvégzett PCA eredménye: a változók faktorsúly-értékei az első 3 főkomponensen

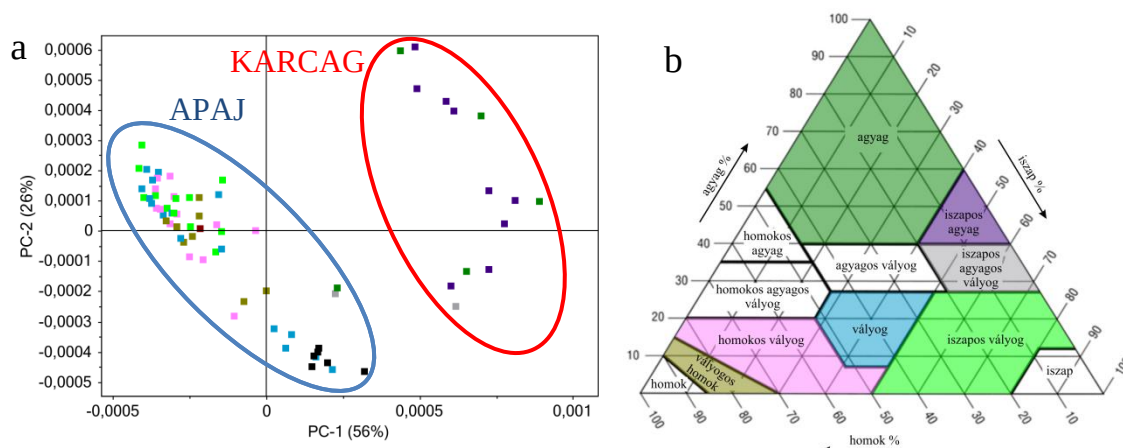
Az teljes variancia 92 %-át magyarázó első főkomponensen a 350 és ~1000 nm közötti tartományban mutatkoznak nagyon magas és alacsony értékek. STEVENS et al. (2010) szerint ezt a jelenséget a talaj szerves anyaga okozza. Mint korábban említésre került, eltérően a talajok ásványi összetevőiből, melyek meghatározott kristályszerkezettel rendelkeznek, az amorf szerves anyagok több individuális sáv összegződésének eredményeit figyelhetjük meg a görbéken. Spektrális jellegzetességük a 350 és ~1200 nm között mutatkozik. Magas szerves anyag-tartalmú talajok spektrális görbéje „homorú” formát mutat, míg csökkenő mennyisége a spektrumok domborúvá válásában mutatkozik meg. Az első főkomponensen gyengébb pozitív csúcsok figyelhetők meg a kémiai kötött víz 1400 környéki, és az 2200 nm-nél hosszabb hullámhosszúságú tartományban, melyek szintén köthetők a szerves anyaghoz. Így

elmondható, hogy a spektrális adatokban rejlő változékonyság legnagyobb hányadáért ennek a talajparaméternek a mennyiségében (vagy minőségében) bekövetkező változások felelnek.

Az adatokban rejlő változékonyság 6%-át kifejező 2. komponens faktorsúly diagramján a legszembetűnőbb az 1900 nm-nél mutatkozó negatív csúcs, mely az ásványokban fizikailag kötött vízhez köthető. A görbe lefutása a 350 és 1400 nm közötti régióban hasonlóságot mutat az 1. komponens faktorsúly diagramján megfigyelthez. Valószínűsíthető a szerves anyag további befolyása ezen a komponensen is. Azonban a rendelkezésemre álló laboratóriumi információk ismeretében is bizonytalan ennek a komponensnek a magyarázata.

A variancia 1%-át kifejező 3. komponensen a látható és közeli infravörös tartomány rövidebb hullámhosszain (350 - ~1200 nm) jelentkező, széles spektrális tartományban mutatkozó negatív és pozitív faktorsúlyok valószínűsíthetően az átmeneti fémeket tartalmazó ásványok befolyását jelzi. Összevetve az 4. ábrán bemutatott görbékkel, és megfigyelve a vas-oxidok spektrumában ~490, ~620 és ~1100 nm környékén jelentkező széles elnyelési sávokat megállapítható ezeknek a talajkomponenseknek a jelentőse e komponensen. Ezen felül negatív értékek mutatkoznak az 1400 és 1900 nm-es régióban, valamint pozitívak a 2200 felettiben. Ezek a tartományokban detektáljuk a molekuláris rezgések lenyomatait. Amennyiben összevetjük a 6. ábrán bemutatott sók spektrális jellegzetességeit a faktorsúly diagramokkal, hasonlóságot állapíthatunk közöttük. A sók, eltérően az agyagásványoktól és az vas-oxidoktól, jellegzetes „többcsúcsú” elnyeléssel jellemezhetőek ezekben a régiókban. A faktorsúly diagramokon is megfigyelhető „hullámos” lefutású görbe indikálhatja a sók befolyást ezen a főkomponensen.

A PCA másik fő eredményét, a főkomponens faktorérték diagramot tanulmányozva elmondható, hogy a spektrális tulajdonságaik alapján az apaji és karcagi minták egyértelműen elkülöníthetőek egymástól (21/a ábra). Az ábrán a minták az USDA szerinti textúrájuk (21/b) szerint is jelölésre kerültek. Megfigyelhető, hogy az apaji minták iszapos vályog, vályog, homokos vályog, agyagos vályog, iszapos agyagos vályog valamint a karcagiak finomabb iszapos agyag és agyag szövetük alapján is rendezettséget mutatnak a főkomponens térben.

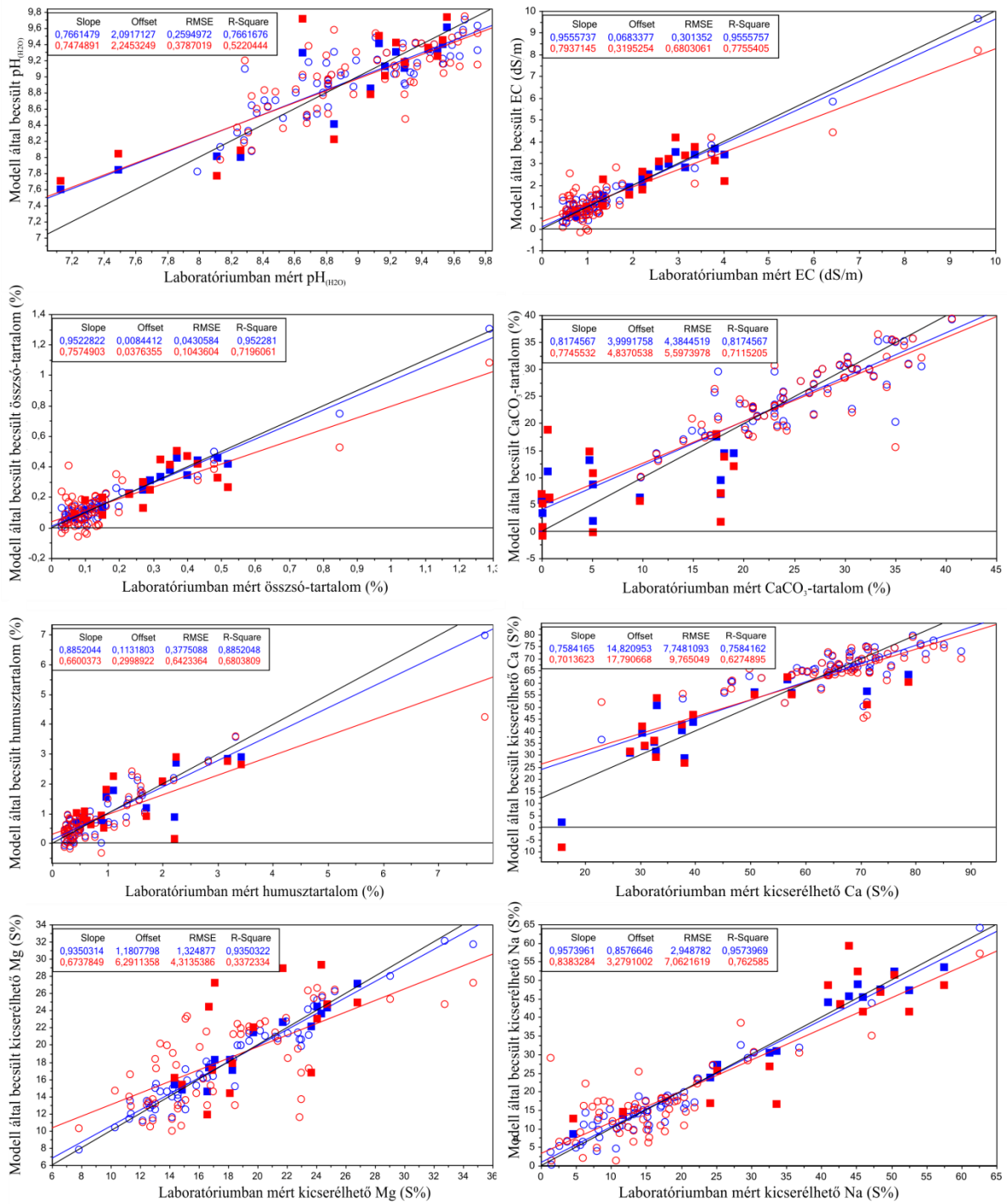


21. ábra: a spektrális adatokon elvégzett PCA eredménye a.) Az apaji és karcagi minták faktorértékei az első 2 főkomponensen. A pontok színe a minták USDA szerinti textúra osztályát jelöli melyek a b.) textúra háromszög-diagramon ábrázolt osztályokat reprezentálják

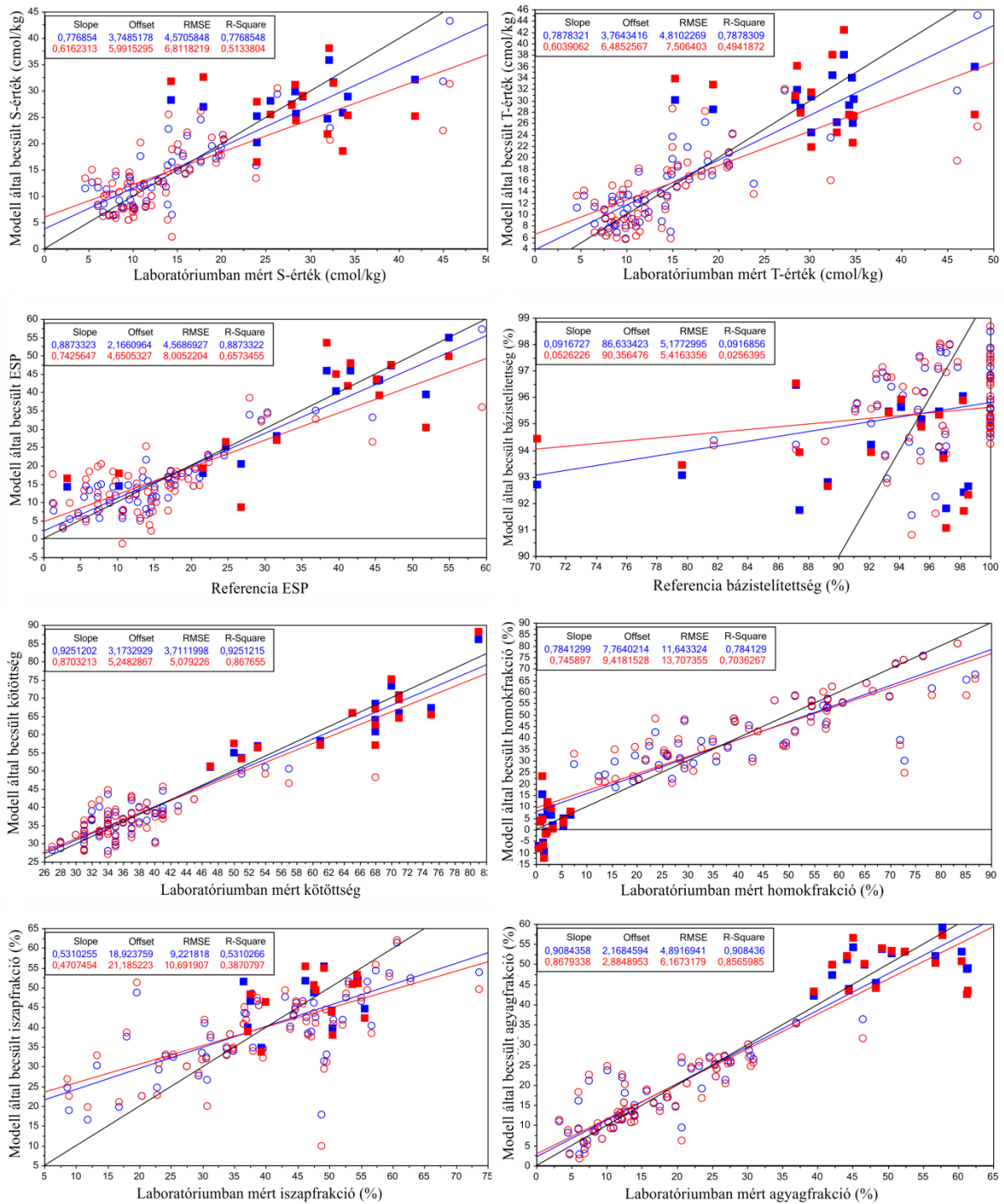
4.3.3. A spektrális adatok elemzése kemometriai módszerekkel

A kemometriai modellek validációjának eredményét 22. ábrán tüntettem fel minden, a vizsgálatba bevont talajparaméterre. A diagramok vízszintes tengelyén a laboratóriumban mért, a függőleges tengelyről pedig a modell által becsült értékek szerepelnek. Az apaji mintákat körrel, a karcagiakat négyzettel jelöltem. Mivel a PLSR algoritmus két lépésben végzi el a modell validációját, ezért minden minta kétszer szerepel az ábrán. Első lépésként a létrehozott modellt arra az adatsorra alkalmazzuk, mellyel azt kalibráltuk, ennek az eredményét jelölik a kék színű pontok. Második lépésben az úgynevezett hagyj-ki-egy (leave-one-out) kereszt-validáció során egy mintát kiveszünk az adatsorból, és úgy végezzük el a becslést. Ha elvégeztük a validációt a mintát visszatesszük, és egy másikat veszünk ki és végezzük el a becslést. A validációs folyamat addig tart, amíg minden minta egyszer ki nem maradt. Így minden szakaszban egy – az eredeti adatsorhoz képest - megváltozott statisztikai mutatókkal rendelkező adatsorra végezzük el a becslést. A folyamat végeztével minden egyes becslési szakasz statisztikáit összegezzük, és így kapjuk meg a végső eredményt. Ennek a validációnak az eredményét jelöltem piros színnel.

A fent vázoltaknak megfelelően az első lépés statisztikai mutatói jobb modell képét adják, ugyanis ugyanarra az adatsorra végeztük el a validálást, amivel a modellt kalibráltuk. A hagyj-ki-egy validáció statisztikai mutatói lényegesen rosszabb modellt indikálnak, azonban ez az eredmény realisabban reprezentálja a modellünk teljesítményét.



22. ábra: a PLSR validáció eredménye a vizsgálatba bevont talajparaméterekre



22. ábra (folytatás)

A modellek teljesítményének jellemzésekor a hagyj-ki-egyert keresztvalidáció eredményét vettem alapul. A statisztikai mutatók közül az R^2 (lineáris korreláció mérőszáma) és az RMSE (négyzetes középhiba) értékét vizsgáltam. Előbbi (0 és 1 közé eső) érték mutatja azt, hogy a spektrális adatok alapján mekkora százalékát tudjuk kifejezni adott talajparaméter értékeiben mutatkozó változékonyságot. Példának okáért ha $R^2=1$, akkor a spektrális adatok 100%-ban alkalmasak arra, hogy a talajparamétert megbecsüljük, ha $R^2=0,7$, akkor ennek megfelelően (30 %-al) kisebb hatásfokkal tudjuk a spektrumokat alkalmazni erre a célra. Az RMSE annak a – az adott talajparaméter mértékegységében kifejezett – mérőszáma, hogy átlagosan mekkora hibával tudjuk becsülni az adott talajparamétert. Értéke minél alacsonyabb, annál pontosabb a modellünk.

Az alap-paraméterek közül néhány mintától eltekintve az elektromos vezetőképesség (és a sótartalom) valamint a humusztartalom becsülhető jó hatásfokkal. Néhány minta kiugrónak bizonyult, ezek valószínűleg spektrálisan és/vagy laboratóriumi adataik alapján nem illeszkednek a modellekbe. Ennek oka lehet fizikai/kémiai eltérés, de akár mérési hiba is. Szembetűnő, hogy e paraméterek becslési bizonytalansága az alacsonyabb tartományokban magasabb. Valószínűsíthető, hogy további – magasabb, és szélesebb talajparaméter értéktartományt reprezentáló – mintákat bevonva a modellezésbe, az algoritmusnak több információt szolgáltatva az adott paraméterről, azok teljesítménye javulhat. A kémhatás és a CaCO_3 tartalom becslési bizonytalansága igen magas. Korábbi tanulmányok igazolják (CSORBA et al., 2012), hogy mindkét paraméter megfelelő pontossággal és megbízhatósággal becsülhető nem szikes talajokban, megállapítva azt, hogy a pH értéke a CaCO_3 -tartalom alapján közvetve becsülhető a spektrális adatok alapján. Szikes talajokban azonban a különböző sók kémhatást szabályozó, valamint a karbonátok spektrális tulajdonságait módosító és felülíró viselkedése igen bonyolult (utóbbi esetben nem is ismert). Valószínűleg ez játszik szerepet a pH és CaCO_3 becslését célzó modellek rosszabb teljesítményében.

A kationok és a hozzájuk kapcsolódó paraméterek (T- és S-érték, ESP) közül a kicserélhető Na becslése bizonyult a legmegbízhatóbbnak. A kicserélhető Mg és Ca becsülhetősége lényegesen rosszabb, ennek megfelelően e kationok mennyiségének összegét jelentő S-érték és – lúgos és erősen lúgos talajokban – T-érték. Az ESP is a jól becsülhető kicserélhető Na mennyiségéből, és a rosszabbul becsülhető T-értékből kerül kiszámításra, ennek megfelelően rosszabb a modellek teljesítménye.

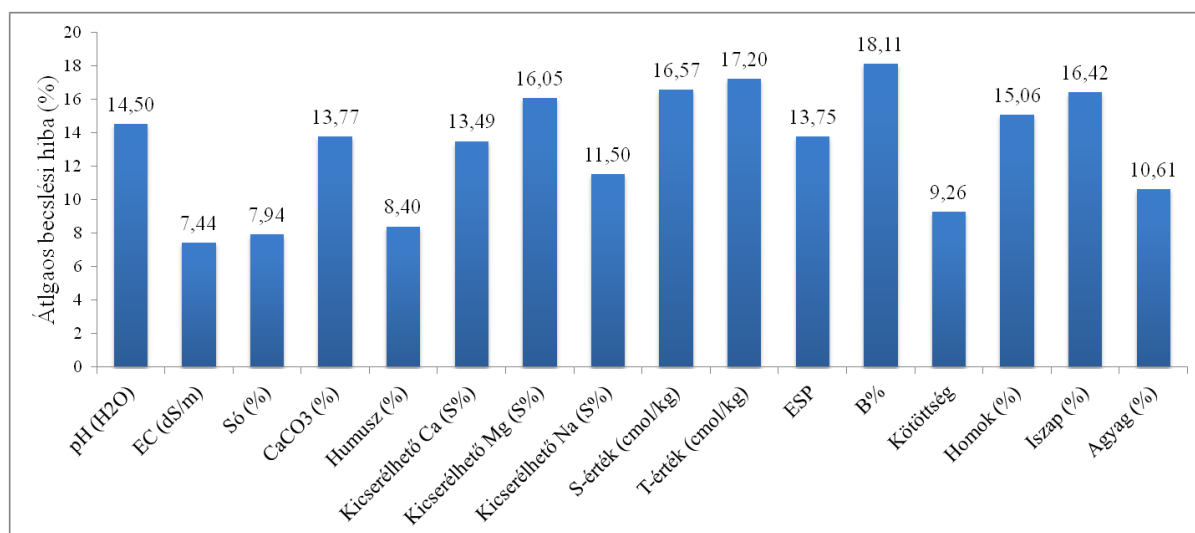
A fizikai paraméterek közül a kötöttség és az agyagtartalom becslését célzó modellek bizonyultak a legmegbízhatóbbnak. Annak fényében, hogy a kötöttség erősen függ az

agyagtartalomtól, és az agyagtartalom a mintákban lévő – karakterisztikus spektrális ujjlenyomattal rendelkező – agyagásványok mennyiségével korrelál jól, a modellek teljesítménye ennek megfelelően az elvárásoknak megfelelően kielégítő. Az iszapfrakció nem kötődik konkrét anyaghoz így becslhetősége is rosszabb. A homok esetében olyan anyag becslése történik (elsősorban kvarc), mely nem rendelkezik jellegzetes spektrális tulajdonsággal, így becslhetősége is ennek megfelelően rosszabb, mint az agyagfrakciónak.

Az átlagos becslési hibát százalékban kifejezve a 20. ábrán mutatom be. Számítása a következő egyenlet szerint valósult meg:

$$\text{Átlagos becslési hiba (\%)} = \frac{RMSE \times 100}{\text{Talajparaméter értékének tartománya}}$$

Hangsúlyozandó, hogy átlagos értékekről van szó, így csupán közelítő mutatószámai az egyes minták esetében megfigyelt tényleges becslési bizonytalanságnak.



23. ábra: Az átlagos becslési hiba %-os értékei az egyes talajparaméterek esetében

Összefoglalva elmondható, hogy munkám alapján a szikesedés szempontjából fontos talajparaméterek közül az elektromos vezetőképesség, a sótartalom, a kicserélhető Na-tartalom és az agyagtartalom jó hatásfokkal becslhető. A kémhatás, a kicserélhető Mg és Ca, valamint az S és T érték, továbbá az ESP közepes megbízhatósággal prediktálható.

5. Összefoglalás

Dolgozatomban azt a célt tűztem ki, hogy a szikes talajok jellemzésére szolgáló talajtulajdonságok reflektancia spektroszkópiai alapon történő meghatározásával és kapcsolódó adatok osztályozási célú feldolgozásával foglalkozom.

Munkám során:

1. áttekintettem a szikesedéssel foglalkozó alapvető irodalmakat, kiemelten koncentrálni a szikesedés folyamatát feltáró, a hazai és európai szikes talajok elterjedését meghatározó, valamint a só- és Na-felhalmozódással érintett talajok osztályozását célzó forrásmunkákra;
2. áttekintettem a reflektancia spektroszkópia elméleti alapjait, valamint felvázoltam a szikes talajok vizsgálatában betöltött potenciális szerepét;
3. apaji és karcagi szikes talajminták laboratóriumi vizsgálati adatait elemeztem leíró és többváltozós statisztikai módszerekkel;
4. a talajmintáról felvett reflektancia spektrumok elemzését szemrevételezéssel, valamint többváltozós statisztikai módszerekkel végeztem el;
5. Kemometriai módszerrel (PLSR) számszerűsítettem a laboratóriumi talajparaméterek és a spektrális reflektancia közötti kapcsolatot, létrehozva modelleket, melyek az egyes talajparaméterek megbecslésére alkalmasak.

Megállapítottam, hogy

1. a laboratóriumi adatokban megfigyelhető változékonyság legnagyobb hányadáért a minták texturális paramétereiben mutatkozó változások, valamint a kicserélhető kationok mintaterületenkénti eltérése a felelős;
2. a spektrális adatokban megfigyelhető változékonyság több mint 90 %-áért valószínűsíthetően a szerves anyag mennyiségében és minőségében bekövetkező változások, valamint ~7 %-áért a vas-oxidok és sók szelvényben történő felhalmozódása tehetők felelőssé;
3. a spektrális adatok alapján, kemometriai módszerek alkalmazásával a szikes talajok osztályozásában kulcsfontosságú szerepet betöltő talajparaméterek közül az elektromos vezetőképesség, a sótartalom, a kicserélhető Na-tartalom és az agyagtartalom jó hatásfokkal becsülhető. A kémhatás, a kicserélhető Mg és Ca, valamint az S és T érték, továbbá az ESP közepes megbízhatósággal prediktálható.

6. Köszönetnyilvánítás

Ezúton szeretném megköszönni belső témavezetőmnek, Dr. Michéli Erikának és külső konzulensemnek, Csorba Ádámnak azokat a hasznos tanácsokat és észrevételeket, melyekkel segítették a dolgozatom elkészítését. Hasonlóan köszönettel tartozom Gergely Ildikónak a laboratóriumi mérési eredmények értékelésében nyújtott önzetlen segítségéért. Hálásan köszönöm Szabari Szabolcsnak, és a Szolnoki talajlaboratóriumnak, hogy talajmintáikat és mérési eredményeiket a rendelkezésemre bocsátották. Végül, de nem utolsó sorban, szeretném megköszönni a Talajtani és Agrokémiai Tanszék, valamint a Vidékfejlesztési Minisztérium Mezőgazdasági Gépesítési Intézet minden dolgozójának azt, hogy odafigyelésükkel, eszközeikkel és tanácsaikkal támogatták a munkámat.

7. Irodalomjegyzék

- BRADY, N. C., WEIL, R. R. (1999): Alkaline and Salt Affected Soils and Their Management. – In: BRADY, N. C., WEIL, R. R.: The Nature and Properties of Soils. Twelfth Edition. Prentice – Hall, New Jersey. 378-401.
- BÚZÁS I. (szerk.) (1988): Talaj- és agrokémiai vizsgálati módszerkönyv 2. A talajok fizikai-kémiai és kémiai vizsgálati módszerei. – Mezőgazda Kiadó. Budapest.
- CLARK, R. N. (1999): Spectroscopy of Rocks and Minerals, and Principles of Spectroscopy. – In: RENCZ, A. (szerk.): Manual of Remote Sensing. John Wiley and Sons Inc. New York. 3-58.
- CSORBA, Á., LÁNG, V., FENYVESI, L., MICHÉLI, E. (2012): Reflektancia spektroszkópia alkalmazása talajok szervesszén- és CaCO_3 -tartalmának becslésében. – Agrokémia és Talajtan. 61 (2): 277-290.
- DUCKWORTH, J. H. (1998): Spectroscopic Quantitative Analysis. – In: WORKMAN, J., SPRINGSTEEN, A. (eds.): Applied Spectroscopy. Academic Press, San Diego, California, 539 p., 93–163. p.
- IUSS WORKING GROUP WRB (2006): World reference base for soil resources 2006. 2nd ed. – World Soil Resources Reports, No. 103. FAO, Rome.
- KREYBIG, L., ENDRÉDY, A. (1935): Über die Abhängigkeit des Vorkommens von Alkaliböden im Oberen Tisza-Gebiete Ungarns von der absoluten Höhenlage. – Transactions III. International Congress of Soil Science, Oxford, I. 357 – 360.
- MICHÉLI, E. (2011): A talajképző folyamatok megjelenése a diagnosztikus szemléletű talajosztályozásban. – Agrokémia és Talajtan. 60/1: 17-32.
- RÓNAI, A. (1965): A felszín alatti vizek minőségének megváltozása a mélységgel az Alföldön. – Hidrológiai Közlöny. 9:419 – 425.
- SCHWERTMANN, U. (1993): Relations between iron oxides, soil color, and soil formation. – In: Bigham, J. M., Ciolkosz, E. J. (szerk): Soil Color. SSSA Special Publ. No. 31. SSSA. Madison, WI.
- SIGMOND, E. (1923): A hazai szikesek és megjavítási módjaik. Magyar Tudományos Akadémia. Budapest.

'SIGMOND, E. (1927): Hungarian alkali soils and methods of their reclamation. University of California Printing Office, Berkeley.

'SIGMOND, E. (1934): Általános talajtan. A szerző kiadása. Budapest.

STEFANOVITS, P., FILEP, GY., FÜLEKY, GY. (1999): Talajtan. – Mezőgazda Kiadó. Budapest.

STEVENS, A., UDELHOVEN, T., DENIS, A., TYCHON, B., LIOY, R., HOFFMANN, L., WESMAEL, B. (2010): Measuring soil organic carbon in croplands at regional scale using airborne imaging spectroscopy. – *Geoderma*. 158: 32-45.

SÜMEGHY, J. (1953): Medencéink pliocén és pleisztocén rétegtani kérdései. – Magyar Állami Földtani Intézet Évi Jeletése az 1951. évről. 83 – 109.

SZABOLCS, I. (1961): A vízrendezések és öntözések hatása a tiszántúli talajképződési folyamatokra. – Akadémiai Kiadó, Budapest.

SZABOLCS, I. (1974): Salt-Affected Soils in Europe. – Martinus Nijhoff – The Hague and RISSAC – Budapest. 63 pp. + 1:1,000,000 scale Map of Salt Affected Soils in Europe.

TÓTH, G., MONTANARELLA, L., RUSCO, E. (2008): Updated Map of Salt Affected Soils in the European Union. – In: Tóth, G., Montanarella, L., Rusco, E. (szerk): Threats to Soil Quality in Europe. EUR 23438 –Scientific and Technical Research series Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities . 61-74.

TÓTH, T., SZENDREI, G. (2006): A hazai szikes talajok és a szikesedés, valamint a sófelhalmozódási folyamatok rövid jellemzése. – *Topographia Mineralogica Hungariae*. Miskolc. Vol.IX: 7-20.

TREITZ, P. (1924): Sós és szikes talajok természetrajza. – Budapest, 224-263.

VAN REEUWIJK L. P., 2002. Procedures for Soil Analysis. – International Soil Reference and Information Centre. Wageningen.

VÁRALLYAY, GY. (1967): A dunavölgyi talajok sófelhalmozódási folyamatai. – *Agrokémia és Talajtan*. 16: 327 – 356.

VÁRALLYAY, GY., SZABÓNÉ KELE, G., BERÉNYI-ÜVEGES, J., MARTH, P., KARKALIK, A., THURY, I. (2009): Magyarország talajainak állapota a Talajvédelmi Információs és Monitoring Rendszer alapján. – Földművelésügyi és Vidékfejlesztési Minisztérium. Budapest.

VISCARRA ROSSEL, R. A. (2008): ParLeS: Software for chemometric analysis of spectroscopic data. – *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*. 90: 72-83.

VISCARRA ROSSEL, R. A., WALVOORT, D. J. J., MCBRATNEY, A. B., JANIK, L. J., SKJEMSTAD, J. O. (2006): Visible, near-infrared, mid-infrared or combined diffuse reflectance spectroscopy for simultaneous assessment of various soil properties. – *Geoderma*. 131: 59-75.

VISCARRA ROSSEL, R. A., WALVOORT, D. J. J., MCBRATNEY, A. B., JANIK, L. J., SKJEMSTAD, J. O. (2006): Visible, near-infrared, mid-infrared or combined diffuse reflectance spectroscopy for simultaneous assessment of various soil properties. – *Geoderma*. 131: 59-75.