

## Hiperspektrális technológiák alkalmazhatósága in situ fitoremediáció megalapozására

Nagy Attila – Tamás János

Debreceni Egyetem Agrár- és Műszaki Tudományok Centruma,  
Mezőgazdaságtudományi Kar,  
Víz- és Környezetgazdálkodási Tanszék, Debrecen  
anagy@gissserver1.date.hu

### ÖSSZEFOGLALÁS

Nehézfémekkel szennyezett területek felmérése, vizsgálata meglehetősen nehéz feladat, köszönhetően szennyezők változatos térbeli eloszlásának. Így olyan komplex állapot-felmérési módszert kell kidolgozni, amellyel pontosan meg lehet határozni a szennyezőanyag milyenségét, koncentrációját és azok térbeli eloszlását. A vizsgált terület egy felhagyott, nehézfémekkel súlyosan szennyezett Pb-Zn bányá flotációs iszap tározója, amely Észak-Magyarországon, Gyöngyösorszi térségében található.

A DLR HySens Program keretében került sor Magyarországon az első hiperspektrális repülési kampányra, amely során DAIS 7915 kamerát használtak, s ez szolgáltatta a hiperspektrális adatokat, képeket a vizsgált területről. A hiperspektrális adatok eredményeinek alátámasztására a repüléssel párhuzamosan talajmintavétel, és azok nehézfém meghatározása is megtörtént a vizsgált flotációs zagytározó területén. A nehézfém meghatározás terepi hordozható röntgen-floureszcenciás spektrométerrel, a NITON XL-700-zal történt.

A nehézfém tartalmú ásványok meghatározását a spektrális szögek eltérése módszerrel (Spectral Angle Mapper) végeztük, amely során a pixelek spektrális profiljának és a vizsgálandó ásványok (galenit, szfalerit, goethit, pirit, jarosit) USGIS standard spektrális görbéjének összevetésével történt. A vizsgált ásványok elsősorban a Szárazvölgyi zagytározó kopár területein, rézsűin találhatóak meg a legnagyobb koncentrációban. A talajminták nehézfém tartalmát fémek közötti főkomponens analízissel és korrelációs vizsgálatokkal elemeztük. Erős korrelációt mutat a Pb-Zn, Fe-Zn és Fe-Pb együttes előfordulása. Ezt bizonyítja a főkomponens analízis eredménye, ahol a Pb, a Zn és Fe a meghatározó.

A hiperspektrális felvétel segítségével a vizsgálati területen vegetáció elemzést is végeztünk tanító területek alapján és vizsgáltuk a módszer alkalmazhatóságát. Ellenőrzött osztályba sorolás során nyolc vegetáció típust különítettünk el a tanító területek eltérő spektrális tulajdonságai révén. Az eredményeket összevetettük a terepi bejárás során készült GPS adatok, légi felvételek és topografikus térképek alapján elkészített földi valóságot ábrázoló képpel. Az eredmények értelmében a (hiper) téglá osztályozás (parallelepiped classifier) esetén a vegetáció analízis során 54%-os teljes pontosságot értünk el, köszönhetően a terület heterogenitásának.

A hiperspektrális adatok és a talajminta nehézfém tartalom elemzések tükrében elmondható, hogy a Pb, Zn, Fe tartalmú ásványok térbeli eloszlása hasonló a vizsgált, növényzettel nem borított területen. A vizsgálatok arra is rámutattak, hogy a hiperspektrális távérzékelés hatékony eszköz lehet a nehézfémekkel szennyezett területeken a Pb, Zn és Fe tartalmú ásványok térbeli eloszlásának meghatározására, modellezésére, továbbá a vegetációs vizsgálatok alapján meghatározható a fitoremediációra alkalmazható növényfajok köre.

**Kulcsszavak:** hiperspektrális távérzékelés, nehézfémek növényborítottság vizsgálat

### SUMMARY

The characterization of heavy metal polluted abandoned mining sites is a complicated assignment due to the variable spatial distribution of the pollutants, therefore complex integrated method is required in order to assess precisely the amount and the distribution of the contaminants. The examined area is flotation sludge reservoir of abandoned Pb-Zn mining site with serious heavy metal contamination. located in Gyöngyösorszi, Northern Hungary.

The hyperspectral image of the flotation sludge is obtained by using a Digital Airborne Imaging Spectrometer DAIS 7915, in the frame of DLR HySens first Hungarian hyperspectral flight campaign (21/08/2002). Parallel to the flight campaign heavy metal content of soil samples were examined from the area of the flotation sludge. The analysis of hyperspectral data was verified by the examination of mine tailing samples by FPXRF (Field Portable X-ray Fluorescence spectrometry) (NITON XL-703).

Determinations of heavy metal containing minerals are based on the spectral profiles of the pixels of the area with using USGIS standard spectral profiles of the examined materials (galena, pyrite, sphalerite, goethite and jarosit).

Applying the Spectral Angle Mapper with BandMax classification the distribution of minerals (galena, pyrite, sphalerite, goethite, jarosit) in the area was defined. The mineral formation occurs especially at the levees and the barren places of the Szárazvölgyi flotation sludge reservoir. Based on the statistic results of the samples, principal component analysis and correlation coefficient between the different metal content of the samples were calculated. The highest correlations were found between Pb-Zn, Fe-Zn and between Fe-Pb. This prove the results of the principal component analysis, where usually Pb, Zn, Fe introduce the main component.

Canopy analysis was also carried out with the hyperspectral image in order to classify the differences between vegetation types at the Szárazvölgy flotation sludge reservoir and analyse the applicability of it. Supervised classification methods were used to distinguish 8 vegetation types based on the spectral properties of the area. The results of the classifications were compared to a ground truth image, based on orthophoto, topographic map, and GPS based field data collection. According to results of the comparison, the parallelepiped classification method is proved to be appropriate method based on the overall accuracy of canopy classification, which was 54% due to heterogeneity of the vegetation.

The results of hyperspectral data and FPXRF analysis suggest that Pb, Zn and Fe containing minerals have similar spatial distribution in the examined and barren area.

*Based on this study hyperspectral remote sensing is likely to be an effective tool for the characterization and modeling the distribution of Pb, Zn and Fe containing minerals at the examined heavy metal polluted sites. Further more, based on the vegetation analysis plant species for phytoremediation can be defined.*

**Keywords:** *hyperspectral remote sensing, heavy metals, canopy analysis*

## BEVEZETÉS

Napjainkban a környezetről gyűjtött és hatékonyan feldolgozott információk kiemelt szerepet kapnak a gazdasági, ipari és környezetvédelmi folyamatok azonosításában, értékelésében és tervezésében.

Azonban a nehézfémekkel szennyezett területek felmérése, gyors részletes megismerése meglehetősen komplikált az eltérő viselkedésük, és térbeli eloszlásuk miatt. Számos kutató (Szűcs et al., 2002; Yan és Bradshaw, 1995) foglalkozott savas bányameddők karakterizálásával és talaj-növény kapcsolatrendszer elemzésével (Kabata-Pendias, 2001; Csathó, 1994; Abdorhim et al., 2004; Kádár 1991), de a távérzékelési, térképészeti módszerrel történő nehézfém térbeli eloszlás felmérés még nem kiforrott, általánosan elterjedt alkalmazás. Ennek ellenére számos kutató (Kardeván et al., 2003; Juhász et al., 2004; Burai, 2006) foglalkozik a távérzékelés, azon belül a hiperspektrális technológia alkalmazhatóságával.

A távérzékelési módszerek a földfelszín különböző anyagú és hőmérsékletű elemeiről visszaverődő, vagy azokból kibocsátott elektromágneses hullámok érzékelésén alapulnak, fizikai alapja tehát az elektromágneses sugárzás térbeli és időbeli változásainak detektálása (Sabins, 1997). A földfelszínre vonatkozó információk gyűjtése céljából ezeket az elektromágneses spektrumokat rögzítik és értelmezik olyan berendezések alkalmazásával, amelyek nincsenek közvetlen kapcsolatban a vizsgálat tárgyával, hanem attól különböző távolságra helyezkednek el. Korunkban a távérzékelésnél használt eszközök és módszerek gyors fejlődésével lehetőség nyílik az elektromágneses spektrum mind szélesebb tartományából történő információgyűjtésre. Az adatgyűjtésre használatos szenzorok különböző hordozóeszközökön helyezkedhetnek el, légi és földi egységeken egyaránt. Az információk feldolgozása és kiértékelése során azonban szükségesek a klasszikus mintavételezési eljárásokkal gyűjtött referencia adatok is. Az elmúlt évtizedekben az adatrögzítő eszközök is egyre tökéletesebbé, egyre nagyobb kapacitásúvá váltak, amelyek lehetővé teszik a nagy területről azonos felmérés során gyűjtött információhalmaz tárolását, valamint az adatok későbbi reprodukálhatóságát (Berke et al., 2004).

A terület geológiai viszonyainak, ásványainak meghatározása, az adott terület vegetációjának feltérképezése az adott területről készült multispektrális, hiperspektrális felvételtől leolvasható

spektrális tulajdonságok alapján határozható meg (Sabins, 1999; Jung et al., 2006). Az ásvány- és vegetációelemzés során fő problémát a széles hullámhossz sávokat alkalmazó multispektrális szenzorok okozhatják, hiszen ezek nem biztosítanak elegendően nagy spektrális felbontást az adott területről, a finom spektrális különbségek nem érzékelhetők, így az elemzés eredménye is elnagyoltabb, felületesebb (Kruse et al., 2003).

A hiperspektrális szenzorok azonban nagyban különböznek a multispektrálistól. A hiperspektrális szenzor nagy spektrális felbontást biztosít úgy, hogy a nagyszámú, akár több mint száz keskenysávú (20 nm vagy kisebb szélesség) csatorna fedje le a spektrális görbét (Polder és van der Heijden, 2001). Ennek köszönhetően konkrét anyagokat, ásványokat, illetve növényfajokat lehet meghatározni, míg a multispektrális technológiák alkalmazása során csak anyagcsoportok közötti különbségek meghatározására van lehetőség (Kruse et al., 2003).

A vizsgált terület egy felhagyott, nehézfémekkel súlyosan szennyezett Pb-Zn bánya flotációs iszap tározója, amely Észak-Magyarországon, Gyöngyösorszi térségében található (Záray, 1991). Az itt megtalálható, lerakott meddőanyag eltérő technológiai eredetükből adódóan tulajdonságait és összetételét tekintve meglehetősen változékony minőségű és térbeli kiterjedésű. Ugyanakkor a domborzati és hidrológiai viszonyok is rendkívül változatosak, amely hozzájárul a meddőhányók eróziójához, és ezen keresztül a környező területek diffúz szennyezéséhez (Jordan és D'Alessandro, 2004).

A DLR HySens Program keretében került sor Magyarországon az első hiperspektrális repülési kampányra, amely során DAIS (Digital Airborne Imaging Spectroscopy) 7915 0,4-12,3  $\mu\text{m}$  hullámhossz tartományt lefedő 79 csatornás kamerát használtak, s ez szolgáltatta a hiperspektrális adatokat, képeket a vizsgált területről. A DAIS 7915 szenzor 1,5-1,8  $\mu\text{m}$  és 2-2,5  $\mu\text{m}$  között is felméri a terület spektrális tulajdonságait, amely tartományok adatai alapján meghatározhatóak a területen megtalálható ásványok, ásványtársulások (Kardeván et al., 2003). A hiperspektrális adatok eredményeinek alátámasztására a repüléssel párhuzamosan talajmintavétel és azok nehézfém meghatározása is megtörtént a vizsgált flotációs zagytározó területén. A nehézfém meghatározás terepi hordozható röntgenfluoreszcenciás spektrométerrel, a NITON XL-700-zal történt, amelyet Kovács és Tamás (2002) alkalmazott elsőként Magyarországon nehézfém tartalmú meddő gyors és költségkímélő analízisére. Továbbá ez a technológia minta extrahálást, roncólást nem igényel, bár meg kell említeni, hogy ez a technológia érzékeny a szemcseméretre és a közeg nedvességtartalmára (Shefsky, 1997; Kalniczky és Singhvi, 2001).

Vegetáció elemzésre is alkalmas a hiperspektrális felvétel. A spektrum látható tartományában jelentkező minimum a növényi levelekben található pigmenthez köthető. A klorofil erősen elnyeli a 450-670 nm közötti hullámhossztartományt.

Az infravörös tartomány felé haladva 700 nm-nél az egészséges növényzet visszaverődése ugrásszerűen megnő. A 700-1300 nm közötti sávban az egészséges növényzet a beérkezett energia 40-50%-át visszaveri. A növényzet visszaverő képessége a 700-1300 nm közötti sávban főleg a levélzet belső szerkezeti sajátosságából következik. Így a mért visszaverődés lehetőséget ad a fajok elkülönítésére, még akkor is, ha ezek a fajok nagyon hasonlóak a látható fény alapján (Berke et al., 2004).

## ANYAG ÉS MÓDSZER

A tanulmány alapvető célja volt az in-situ fitoremediációs kármentesítési technológia megalapozása a Szárazvölgyi tározó területén úgy, hogy a hiperspektrális felvétel alapján először leválogattuk a növényzettel nem borított területeket, majd azon ásványtani elemzést végeztünk, a maradék (növényzettel borított) területen pedig vegetáció elemzést. A vízzel borított területeket mindkét esetben kimaszkoltuk, az elemzésben nem használtuk fel. A kopár területek leválogatása továbbá a pontos ásvány-meghatározást is szolgálta, hiszen növényborítás esetén az adatok pontatlanok. Feltételeztük, hogy a kopár területeken a magas nehézfém koncentráció okozta a vegetáció hiányát, és az esetleges fitoremediációs technológia korlátozott használhatóságát. A vegetációelemzés során a növényzettel borított diffúz szennyezett terület (Záray, 1991) növényfajait térképeztük fel, amelyek alapján a területeknek leginkább megfelelő fitoremediációs technológiát lehet a későbbiekben kialakítani.

A hiperspektrális felvétel elemzését ENVI 4.3 térinformatikai szoftver segítségével végeztük. A kopár területek leválogatását NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) alapú maszk készítésével oldottuk meg. A klorofiltartalommal szoros összefüggést mutató NDVI index értékeit a közép infravörös (NIR; 730-1100 nm) és a vörös (R; 580-680 nm) hullámhossztartományok felhasználásával, az alábbi formula segítségével számítjuk:

$$NDVI = (NIR - R) / (NIR + R)$$

A kopár területeken galenit (PbS), goetit (FeO(OH)), jarosit (KFe<sub>3</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>(OH)<sub>6</sub>), szfalerit ((Zn, Fe)S), pirit (FeS<sub>2</sub>) nehézfém tartalmú ásványokat határoztunk meg a Spektrális Szögek Módszere (Spectral Angle Mapper (SAM)) alapján, mely módszer egyike a legelső hiperspektrális céltárgy detektáló algoritmusnak, és mindmáig az egyik leghatékonyabbnak mutatózó osztályozó rendszer (Boardman, 1993; CSES, 1992; Kruse et al., 1993). Az algoritmus meghatározza a spektrális hasonlóságot két spektrum között, amelyek közül az egyik lehet egy tetszőleges kép spektrum, vagy bármely terepi vagy laboratóriumi spektrum, amelyet tesztelni szeretnénk, és a másik egy referencia spektrum, amely szintén tartozhat bármely kategóriához.

A módszer alkalmazásakor feltételezzük, hogy a spektrumok relatív reflektanciára vannak korrigálva, amely műhold- vagy légi képek esetén a sötét-áramos (dark current) és az atmoszferikus korrekció elvégzését jelenti. A terepi méréseket a fehér felületre vonatkozó referenciamérésekkel kell korrigálni.

A módszer a spektrumokat n-dimenziós vektoroknak tekinti, ahol n a spektrális csatornák száma, és a közöttük lévő szöveget számítja ki. Egyszerűsített magyarázatot az 5. ábra mutatja 2 dimenziós esetre. Az 1. és 2. sávok mint koordináták által kifeszített 2-dimenziós síkban a teszt spektrumot és a referencia spektrumot egy-egy pont képviseli, amelyeknek koordinátái a spektrális csatornákon mért reflektanciák.

A spektrum pontok az origóval összekötő egyenesen fekszenek az ugyanarra az anyagra vonatkozó spektrumok, amelyeket különböző megvilágításnál vettek fel. A megvilágításbeli különbségek adódhatnak pl. egy képkockánál a domborzati különbözőségek miatt. A kevésbé megvilágított pixelek az origóhoz közelebb fekszenek, a jobban megvilágítottak távolabb. A közöttük lévő szög azonban változatlan marad. A számítás során a két vektor belső vagy skaláris szorzatának arccos képzésével számítjuk ki radiánban a vektorok közötti szöveget. Az algoritmus a geometriai interpretáció általánosítása n-dimenziós esetre. Kétdimenziós térben a teszt spektrumot és a referencia spektrumot egy-egy pont képviseli. A feléjük mutató vektorok közötti szög független a megvilágítás intenzitásától (1. ábra).

1. ábra: Kétdimenziós vektortér

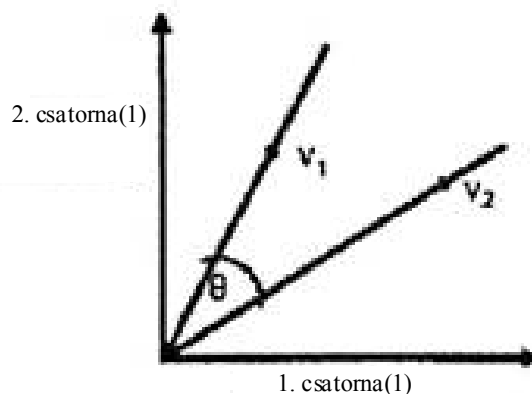


Figure 1: 2-D scatter plot Channel(1)

A SAM módszer tehát nem érzékeny a megvilágítás változására, ami egy terepi méréskor lehel-felhők hatása, erősítések driftje, stb.

A két vektor közötti a szöveget az alábbi képlettel számoljuk, ahol a tört nevezőjében az n-dimenziós vektorok n-dimenziós térbeli normája szerepel, ami esetünkben azonos a referencia vektor (r) és a teszt vektor (t) abszolút értékeivel.

$$\alpha = \cos^{-1} \left( \frac{\mathbf{r}_t \cdot \mathbf{r}_r}{\|\mathbf{r}_t\| \cdot \|\mathbf{r}_r\|} \right)$$

Kétdimenziós térben a teszt spektrumot és a referencia spektrumot egy-egy pont képviseli. A feljük mutató vektorok közötti szög független a megvilágítás intenzitásától.

A számításra is alkalmas képlet n-dimenziós általánosítása, amelyben a vektor komponensek szerepelnek.

$$\alpha = \cos^{-1} \left( \frac{\sum_{i=1}^n t_i \cdot r_i}{\left( \sum_{i=1}^n t_i^2 \right)^{1/2} \cdot \left( \sum_{i=1}^n r_i^2 \right)^{1/2}} \right)$$

A SAM módszer alkalmas a spektrumok osztályozására, ha az a szögre előírunk egy bizonyos küszöbértéket, amelynél nagyobb spektrum eltéréseket mutató spektrumokat, mint eltérőeket minősítünk, a küszöbértéknél kisebb szögek esetén a spektrumokat hasonlóknak tekintjük.

A vegetáció analízist is az ENVI 4.3 szoftverrel, ellenőrzött osztályba sorolással végeztük, tanító területek kijelölésével, melyet terepi bejárás és topográfiai térképek alapoztak meg, csakúgy, mint a földi valóság kialakításánál. Az ellenőrzött osztályba sorolásnál a teljes spektrumot és a 700-1300 nm közötti spektrum tartományt vizsgáltuk SAM és hipertégla (paralelepiped) módszerrel. A hipertégla osztályozás (paralelepiped classifier) során a burkoló, koordináta-tengelyekkel párhuzamos oldalú téglalapot tekintjük az osztály intenzitásterének. A felvételek sávjai között viszont többé-kevésbé szoros korreláció van, és ezért a tematikus osztályok eloszlásai ferdek, elnyúltak. Az átfedő régiókban, a régiókon kívüli területeken a döntés feloldására kiegészítéseket kell tenni. Az osztályozás pontosságához szükséges tehát, hogy az egyes tematikus osztályok szórását is figyelembe vegyük (Czimer, 2001). Ellenőrzött osztályba sorolás során nyolc vegetáció típust különítettünk el a tanító területek eltérő spektrális tulajdonságai révén; erdő – javarészt tölgy (*Quercus sp.*) –, erdő újulat, vízparti növényzet – javarészt nád (*Phragmites sp.*) –, gyalogakácos (*Amorpha fruticosa*), fekete fenyő (*Pinus nigra*), cserjés – javarészt kőkeny (*Prunus spinosa*) és csipkebogyó (*Rosa sylvestre*) –, szeder (*Rubus caesius*) és alacsony biomasszájú fenyves terület.

## EREDMÉNYEK ÉS ÉRTÉKELÉSÜK

Vizsgálataink során elsőként az NDV Indexet határoztuk meg a DAIS 7915 szenzor 10. (650 nm) és 22. (870 nm) csatornák felhasználásával. Az NDVI kép alapján nem felügyelt osztályozással, klaszterezéssel lehatárolhatóak, meghatározhatóak a terület növényborítottságának eltérései (2. ábra). Jelen tanulmány során viszont a növényzettel borított területeket (NDVI>0,3) és a növényzettel nem

borított területeket (0,3>NDVI>0) különítettük el, képeztünk maszkot belőlük a további vizsgálatokhoz.

2. ábra: A Szárazvölgyi tározó NDVI képe



Figure 2: NDVI image of Szárazvölgyi reservoir

Az NDVI kép alapján készített, az északi tározót nyugat-kelet irányban keresztülmetsző spektrális profilon is szembevetendő a víz negatív, míg az azt körbevevő növényzet kiugróan magas NDVI értékei (3. ábra).

3. ábra: Az északi tározó NDVI keresztmetszete

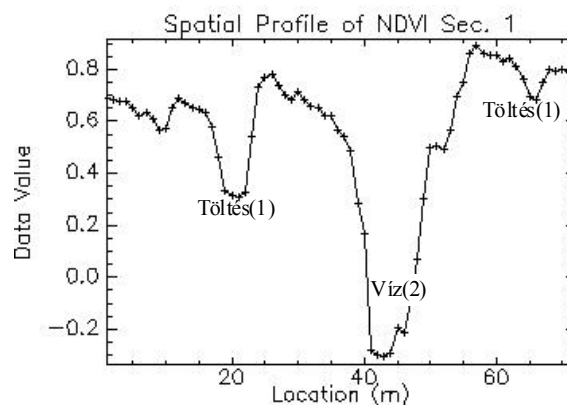


Figure 3: Spatial profile of the Northern reservoir Level(1), water(2)

Következő lépésként a vizsgált nehézfém tartalmú ásványok, galenit (PbS), goetit (FeO(OH)), jarosit (KFe<sub>3</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>(OH)<sub>6</sub>), szfalerit ((Zn, Fe)S), pirit (FeS<sub>2</sub>) térbeli eloszlás vizsgálatára került sor a kopár, 0,3 és 0 NDV Indexű területen. Az ásványok térbeli eloszlását SAM módszerrel 0,10 radián maximális szögérték mellett 1,5 1,8 és 2-2,5 μm közötti hullámhossztartományokat tartalmazó spektrális sávok felhasználásával határoztuk meg USGIS standard spektrális profilok segítségével, amelyek a vizsgálandó ásványaink tiszta spektrumát, azok tiszta reflektanciáját adják meg (4. ábra).

4. ábra: USGIS háttér spektrumok

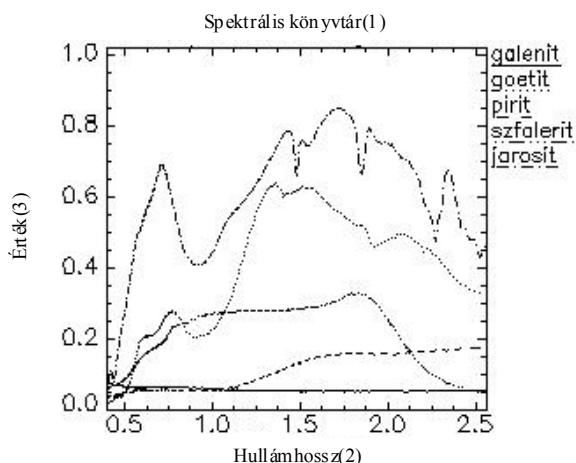


Figure 4: USGIS standard spectral profiles as backgrounds Spectral library(1), wavelength(2), value(3)

A hiperspektrális felvétel SAM módszerrel történő elemzésének eredményeképp megállapítható, hogy a nehézfém tartalmú ásványok, galenit szfalerit a vizsgált terület egészén jelen vannak eltérő mértékben. Ez különös környezeti kockázatot jelent, hiszen vízerózió, kisebb mértékben defláció hatására ezek az ásványok mobilizálódhatnak, és így potenciális veszélyforrást jelentenek a környezetre (5. ábra). Éppen ezért ezen területek mielőbbi stabilizációját kell végrehajtani. Ezt magasabb rendű növényekkel, pázsitfűfélékkel lenne célszerű, azok ökológiai igényeinek megteremtésével, tehát adalékanyagok (mész, komposzt, szennyvíziszap) felhasználásával. További problémát jelent, hogy a nehézfém tartalmú ásványok mellett a pirit és jarosit is jelen van, amely a közeg savasságáért, a meddő anyagban található nehézfém mobilizációért felel.

5. ábra: Az eredeti és a növényzettel nem borított terület SAM eredményei

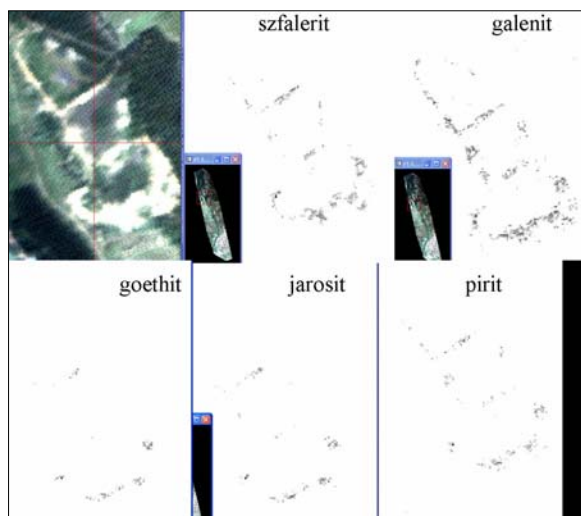


Figure 5: The original and the SAM classified barren places

A hiperspektrális elemzések mellett a Szárazvölgyi tározó területén vett talajminták is jelentős nehézfém koncentrációt mutattak. Jelentős, a 10/2000 KöM EüM FVM KHVM együttes rendeletben szereplő intézkedési szennyezettségi határérték feletti koncentrációkat mértünk a legtöbb fém esetében, amelyek közül kiemelkedő volt az Pb és a Zn szennyezettség (1 táblázat).

1. táblázat

Általános statisztika Zn, Pb és Fe elemekre

	Zn	Pb	Fe
Minimum	44	20.8	14092.8
Maximum	245965	17395	445645
Átlag(1)	3269.32869	592.63659	44564.2745
Median	267.8	181.2	38784
Standard hiba(2)	982.098435	77.184633	1717.60363
Variancia(3)	470684460	2865541.9	1457380140
Standard eltérés(4)	21695.2635	1692.7911	38175.6486

Table 1: General statistic for Pb, Zn and Fe Mean(1), standard error(2), variance(3), standard deviation(4)

A talajminták statisztikai elemzése során a nehézfémek közötti korrelációt és főkomponens analízist végeztünk. A korreláció elemzés során a Pb-Zn, Fe-Zn, Fe-Pb fémek között volt a legszorosabb, amely a fémek együttes előfordulását, és így a hiperspektrális elemzés valódiságát mutatja (2. táblázat). Ezt a következtetést lehet levonni a főkomponens analízis eredményeiből is, ahol az első komponens a Pb, Zn és Fe alkotják 44,97 variancia érték mellett (3. táblázat). A statisztikai elemzés eredményei együttesen arra engednek következtetni, hogy a vizsgált területen a nehézfémek hasonló térbeli eloszlást mutatnak, alátámasztva és bizonyítva a hiperspektrális képelemzés alkalmazhatóságát nehézfémekkel terhelt területek felmérésében.

2. táblázat

Nehézfémek közötti korreláció

	R <sup>2</sup>
Pb-Zn	0.902*
Pb-Fe	0.828*
Pb-As	0.225*
Pb-Cu	0.414
Zn-Fe	0.877*
Zn-Cu	0.171*
As-Fe	0.181*
As-Zn	0.210
Ni-Cr	0.329*
Ni-Cu	0.115
Cu-Cr	0.060

\*szignifikáns p<0,01(1)

Table 2: Correlations between heavy metals Significant(1)

3. táblázat

Főkomponens analízis eredménye – rotált komponens mátrix

	1	2	3
<b>Pb</b>	<b>0.905</b>	0.023	0.331
<b>As</b>	0.038	-0.109	<b>0.766</b>
<b>Zn</b>	<b>0.967</b>	0.037	0.016
<b>Cu</b>	0.171	0.174	<b>0.712</b>
<b>Ni</b>	-0.086	<b>0.917</b>	0.128
<b>Fe</b>	<b>0.930</b>	0.047	0.117
<b>Cr</b>	0.540	<b>0.621</b>	-0.192
<b>KMO</b>		0.592	

Table 3: Rotated Component Matrix of Principal component analysis

A vegetáció analízist ellenőrzött osztályba sorolással végeztük SAM és hipertégla (paralelpiped) módszerrel a 496-1300 nm, 496-727 és a 693-1300 nm közötti spektrum tartományt vizsgálva. A tanító területek kijelölését, melyet terepi bejárás, és a területről készült légifelvétel topográfiai térképek alapozták meg, csakúgy, mint a földi valóságról alkotott tematikus térkép kialakítását. A tanító területek spektrális tulajdonságait elemezve megállapítható, hogy egyes növénytársulások, főleg a nád, szeder és cserjés közösség, spektrális tulajdonságaikat tekintve igen hasonlóak, ezért az elemzés, osztályozás során ezen csoportokat szűkebb határértékkel kell kezelni az átfedések, és így a nem megfelelő osztályozás elkerülése érdekében (6. ábra).

6. ábra: Tanító területek reflektancia görbéi

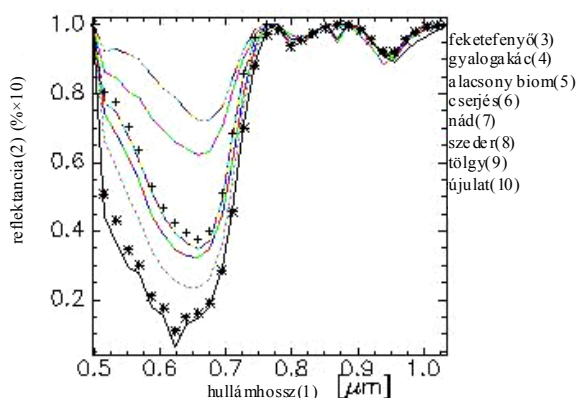


Figure 6: Reflectance curves of training sites

Wavelength(1), reflectance(2), Australian pine(3), false indigo(4), low biomass(5), shrub(6), common reed(7), blackberries(8), oak forest(9), young deciduous forest(10)

Ellenőrzött osztályba sorolás során nyolc vegetáció típust különítettünk el a tanító területek eltérő spektrális tulajdonságai révén; erdő – javarészt tölgy (*Quercus sp.*) –, erdő újulat, vízparti növényzet – javarészt nád (*Phragmites sp.*) –, gyalogakácos (*Amorpha fruticosa*), fekete fenyő (*Pinus nigra*), cserjés – javarészt kökény (*Prunus spinosa*) és

csipkebogyó (*Rosa sylvestre*) –, szeder (*Rubus caesius*) és alacsony biomassájú füves terület. Az osztályozás pontosságát a Kappa indexszel fejeztük ki. A SAM eljárás során mindhárom sáv tartomány esetén csak gyenge közepes eredményt értünk el (4. táblázat).

4. táblázat

A SAM módszer eredményei

SAM	496–1300 nm	496–727 nm	693–1300 nm
K index	0,33	0,25	0,35

Table 4: Results of SAM for vegetation analysis

A hipertégla (paralelpiped) osztályozás esetén közepesen jó eredményeket értünk el, különösen a 496-727 nm és a 496-1300 nm közötti hullámhossz tartományok vizsgálata során (5. táblázat). Ezt jól magyarázza, hogy az 500-800 nm-es hullámhossz-tartományban találhatóak a legnagyobb különbségek a tréning területek spektrális reflektancia görbéi között. A természetközeli nem rendezett állapotok miatt közepes, közepesen jó eredmény alapvetően a terület növényállományát jellemző heterogenitásnak köszönhető, hiszen egyik növénycsoport esetében sem beszélhetünk homogén állományokról, más fajok, illetve a más csoportok fajai kisebb-nagyobb mértékben előfordulnak az osztályozás során adott növénycsoportnak megfelelő területeken.

5. táblázat

A hipertégla osztályozás eredményei

paralelpiped	496–1300 nm	496–727 nm	693–1300 nm
K index	0,46	0,51	0,42

Table 5: Results of parallelepiped classification for vegetation analysis

A Kappa index ugyanakkor önmagában a teljes osztályozás pontosságát adja meg, az egyes osztályok osztályba sorolási pontosságát nem mutatja. Ennek érdekében kétféle módon vizsgáltuk az egyes osztályokat. Egyik esetben azt vizsgáltuk, hogy az adott növénycsoporthoz tartozó földi valóság osztály hány százalékát találták el az ugyanahhoz a növénycsoporthoz, osztályhoz tartozó, tanító terület alapján beosztályozott pixelek (találati pontosság – production accuracy), a másik esetben azt vizsgáltuk, hogy az adott növénycsoporthoz, osztályhoz tartozó pixelek hány százaléka került az ugyanahhoz a növénycsoporthoz tartozó földi valóságnak megfelelő osztályba, az összes ugyanazon beosztályozott pixelhez képest (user accuracy – hasznosulási pontosság). A 496-727 nm közötti hullámhossz tartomány találati és hasznosulási pontosságát vizsgálva arra a következtetésre jutottunk, hogy az osztályozás különösen jó eredményt mutat fekete fenyő, erdő (javarészt tölgy) és cserjés területek esetén azok homogénebb állománya, és zártabb lombozata, így kevesebb zavaró hatás eredményeként (6. táblázat).

6. táblázat

A klasszifikáció osztályonkénti értékelése

Osztályok(1)	Találati pontosság, %(2)	Hasznosulási pontosság, %(3)
Feketefenyő(4)	66,54	99,45
Gyalogakác(5)	43,73	50,44
Alacsony biomassza(6)	67,98	47,30
Cserjés(7)	69	47,04
Nád(8)	51,08	20,09
Szedér(9)	54,02	89,68
Tölgy(10)	71,35	91,91
Újulat(11)	44,22	42,39

Table 6: Results of classification for each group

Groups(1), production accuracy(2), user accuracy(3), Australian pine(4), false indigo(5), low biomass(6), shrub(7), common reed(8), blackberries(9), oak forest(10), young deciduous forest(11)

KÖVETKEZTETÉSEK

A hiperspektrális adatok és a talajminta nehézfém tartalom elemzések tükrében elmondható, hogy a Pb, Zn, Fe tartalmú ásványok térbeli eloszlása hasonló a vizsgált, növényzettel nem borított területen. Ez bizonyítja, hogy a hiperspektrális távérzékelés hatékony eszköz lehet a nehézfémekkel szennyezett területek felmérésére, Pb, Zn és Fe tartalmú ásványok térbeli eloszlásának meghatározására, modellezésére. Továbbá a vegetációs vizsgálatok alapján meghatározható a területen megtalálható növénycsoportok főbb osztályai fajai, amelyek segítséget nyújthatnak az alkalmazható fitoremediációs technológia és a fitoremediációra alkalmazható növényfajok kiválasztásában.

IRODALOM

- Abdorhim H.-Khalif A. A.-Hosam E.-Bayuomi H. T.-Villányi I.-Heltai Gy.-Kecskés M. (2004): Szennyvíziszap-adagok hatása a növény (*Triticum vulgare* L.)-talaj rendszer néhány mikrobiológiai és biokémiai tulajdonságára. *Agrokémia és Talajtan* 53. 3-4: 413-432.
- Berke J.-Kelemen D.-Szabó J. (2004): Digitális képfeldolgozás és alkalmazásai. PICTRON Kft., Keszthely.
- Boardmann, J. W. (1993): Spectral Angle Mapping: a Rapid Measure of Spectral Similarity (unpublished).
- Burai P. (2006): Földhasználat-elemzés és növény-monitoring különböző adattartalmú és térbeli felbontású távérzékelési felvételek alapján. *Agrártudományi Közlemények*, 22: 7-12.
- Csathó P. (1994): A környezet nehézfém szennyezettsége és az agrártermelés. RISSAC, 1-176.
- Czímber K. (2001): Geoinformatika – Elektronikus jegyzet, Sopron.
- Jordán, G.-D'Alessandro, M. (2004): Mining, mining waste and related environmental issues: problems and solutions in Central and Eastern European Candidate Countries, Office for Official Publications of the European Communities, 21.
- Juhász, Cs.-Tamás, J.-Burai, P. (2004): Case study to evaluate good ecological status of Berettyó river watershed. III. Alps-Adria Scientific Workshop. 1-6 March 2004, Dubrovnik, Croatia, 58-61.
- Jung, A.-Kardeván, P.-Tökei, L. (2006): Hyperspectral technology in vegetation analysis. *Progress in Agricultural Engineering Sciences*, 2. 1: 93-115.
- Kabata-Pendias, A. (2001): Trace Elements in Soils and Plants – Third Edition. CRC Press, Boca Raton, FL.
- Kádár I. (1991): A talajok és növények nehézfém-tartalmának vizsgálata. Ed: Ligetiné Nechai, E., KTM-MTA TAKI, Budapest, 104.
- Kalnicky, D. J.-Singhvi, R. (2001). Field portable XRF analysis of environmental samples. *Journal of Hazardous Materials*, 83: 93-122.
- Kardeván, P.-Vekerdy, Z.-Róth, L.-Sommer, S. T.-Kemper, T. H.-Jordán, Gy.-Tamás, J.-Pechmann, I.-Kovács, E.-Hargitai, H.-László, F. (2003): Outline of scientific aims and data processing status of the first Hungarian hyperspectral data acquisition flight campaign, HYPESENS 2002 HUNGARY. 3rd EARSEL Workshop on imaging spectroscopy, 324-332.
- Kovács E.-Tamás J. (2002): Terepi röntgen-floreszcens spektrofotométer megbízhatóságának elemzése. In: Proc. Innováció, A tudomány és a gyakorlat egysége az ezredforduló agráriumban. Környezetvédelem, Debrecen, 11-17.
- Kruse, F. A.-Lefkoff, A. B.-Boardman, J. W.-Heidebrecht, K. B.-Shapiro, A. T.-Barloon, J. P.-Goetz, A. F. H. (1993): The spectral image processing system (SIPS) – Interactive visualization and analysis of imaging spectrometer data: *Remote Sensing of Environment*, 44: 145-163.
- Kruse, F. A.-Boardman, J. W.-Huntington, J. F. (2003): Comparison of airborne hyperspectral data and EO-1 hyperion for mineral mapping, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41. 6: 1388-1400.
- Polder, G.-van der Heijden, G. W. A. M. (2001): Multispectral and hyperspectral image acquisition and processing. In: Tong, Q.-Zhu, Y.-Zhu, Z. (Editors), *Proceedings of SPIE*, 4548.
- Sabins, F. F. (1997): *Remote Sensing – Principles and Interpretation*, 3rd edn., W.H. Freeman, New York, NY., 494.
- Sabins, F. F. (1999): Remote sensing for mineral exploration, *Ore Geology Reviews* 14. 3-4: 157-183.
- Shefsky, S. (1997): Comparing Field Portable X-Ray Fluorescence (XRF) to laboratory analysis of heavy metals in soil. International symposium of field screening methods for hazardous wastes and toxic chemicals, Las Vegas, Nevada, USA.
- Szűcs, A.-Jordán, G.-Qvarfort, U. (2002): Geochemical modelling of acid mine drainage impact on wetland stream using landscape geochemistry, GIS and statistical methods. In: Fabbri, A.G.-Gaal, G.-McCammon, R. B.: *Deposit and Geoenvironmental Models for Resource Exploitation and Environmental Security* NATO Science Series, 2. Environmental Security. Kluwer Acad. Publ., 80: 425-460.
- Yan, G.-Bradshaw, A. D. (1995): The containment of toxic wastes: II. Metal movement in leachate and drainage at Parc Lead-Zinc Mine, North Wales, *Environmental Pollution*, 90. 3: 379-382.
- Záray, Gy. (1991): Environmental assessment of the impact of mine tailing dumps in the valley of Toka-stream – case-study (in Hungarian) ELTE TTK Department of inorganic and analytical chemistry, 86.

CSES (Center for the Study of Earth from Space) (1992): SIPS User's Guide, The Spectral Image Processing System, v. 1.1, University of Colorado, Boulder, 74.

10/2000 KöM EüM FVM KHVM együttes rendelete a felszín alatti víz és a földtani közeg minőségi védelméhez szükséges határértékekről.