

TÍZ ÉV A HORDOZHATÓ XRF TÁRSASÁGÁBAN, AZAZ EGY ARCHEOMETRIAI UTAZÁS TÖRTÉNETE

TEN YEARS USING PORTABLE XRF. OUR STORY OF A JOURNEY IN ARCHAEOLOGY •

MAY Zoltán¹

¹Természettudományi Kutatóközpont, Anyag- és Környezetkémiai Intézet,
H-1117 Budapest, Magyar tudósok körútja 2.

E-mail: may.zoltan@ttk.hu

Abstract

More than ten years ago a new type of analyser was purchased by Plasma Chemistry Research Group in Institute of Materials and Environmental Chemistry, which opened up numerous possibilities in the field of analytical chemistry, and fruitful and versatile relationships were formed with colleagues whose work is the research, examination, conservation and preservation of cultural heritage objects. This instrument is a handheld portable X-ray fluorescence spectrometer (XRF) and by now this technique became very general and sometimes indispensable in archaeometric research and restoration works. Thanks to this instrument, we started numerous projects and joined many exciting and interesting works and research during the past ten years. In this paper we give a short survey about these works and demonstrate the possibilities and extremely useful role of the handheld XRF technique showing and emphasising problems and limitations of this method, and situations in which this technique is not suitable or sufficient.

Kivonat

Több mint tíz évvel ezelőtt az Anyag- és Környezetkémiai Intézet Plazmakémiai Kutatócsoportjának műszerparkja egy új műszerrel bővült, amelynek köszönhetően számos új lehetőség nyílt meg számunkra az elemanalitika területén, és egyben igen szerteágazó és gyümölcsöző munkakapcsolat alakult ki azon kollégákkal, akik az emberiség tárgyi emlékeivel, azok vizsgálatával, feldolgozásával és megóvásával foglalkoznak. A műszer egy kézi hordozható röntgenfluoreszcens spektrométer (XRF), amely technika mára már az archeometriai kutatások és restaurátori munkák egyik alapműszerévé vált. A készüléknek köszönhetően az eltelt bő tíz év során számos rendkívül érdekes és izgalmas munkákba, kutatásokba kapcsolódtunk be. A jelen cikkben ezekből szemezgetünk, és egyben bemutatjuk a módszer lehetőségeit és a rendkívül fontos, néha nélkülözhetetlen szerepét ezekben a munkákban. Különös hangsúlyt fektetünk a módszer korlátaira és azoknak a szituációknak, problémáknak a bemutatására, amelyekre ez a technika nem elegendő vagy nem megfelelő.

KEYWORDS: PORTABLE XRF, ARCHAEOLOGY, INTERDISCIPLINARITY, RESTORATION

KULCSSZAVAK: HORDOZHATÓ XRF, ARCHAOMETRIA, INTERDISCIPLINARITÁS, RESTAURÁLÁS

Áttekintés, eredmények

A Természettudományi Kutatóközpont (TTK) Anyag- és Környezetkémiai Intézetében (AKI) működő Plazmakémiai Kutatócsoportjának 2008-ban sikerült beszereznie egy Thermo Fischer Scientific által forgalmazott, NITON X3lt 900 típusú kézi hordozható XRF készüléket, amely új perspektívát nyitott a csoport számára a már meglévő ICP-OES készülék és az ezzel végzett kutatási témák mellett, egyben kitűnő kiegészítő eszközként funkcionált a roncsolásos elemanalitikához.

Köszönhetően annak, hogy az eszköz hordozható és segítségével teljesen roncsolásmentes kémiai elemzések végezhetők, hamar kezdtek kialakulni a munkakapcsolatok a restaurálásban és régészetben dolgozó kollégákkal és intézményeikkel. Már a legelső évben, 2008-ban tesztméréseket végeztünk a Magyar Képzőművészeti Egyetem restaurátor szakos hallgatóinak diplomatárgyain és tulajdonképpen ezzel indítottuk el az archeometriai témájú méréseket a Plazmakémiai Kutatócsoportban.

• How to cite this paper: MAY Z. (2020): Tíz év a hordozható XRF társaságában, azaz egy archeometriai utazás története / Ten years using portable XRF. Our story of a journey in archaeology, *Archeometriai Műhely* XVII/3 229–242.

Ezek a vizsgálatok a végzős hallgatók diplomatárgyain azóta is rendszeresek. A következő, 2009-es év több fontos és nagyobb lélegzetű kutatási témát hozott a területen, hiszen ekkor indult egy saját, posztdoktori OTKA pályázat (2009-2012), aminek keretében hazai történelmi téglák és kerámiák vizsgálata volt a téma, különös tekintettel az aquincumi bélyeges téglákra. Ebben a projektben központi szerepet kapott a kézi XRF készülék, amivel a kísérleti munkák zömét tudtuk elvégezni (helyszíni, terepi kémiai elemzések) (May et al. 2011). Ezen OTKA pályázat mellett egy másik igen jelentős OTKA kutatási témába (2009-2015) kapcsolódhattunk az XRF készülékünknek köszönhetően, aminek keretében a hazai köz- és magángyűjteményekben fellelhető habán kerámiák archeometriai kutatását (Bajnóczi et al. 2014), valamint egy hiánypótló, hazai számítógépes adatbázis létrehozását kezdhettük el, felhasználva az XRF vizsgálatokkal kapott kémiai adatokat. A kerámiák és mázak vizsgálata mellett festmények pigmentjeinek vizsgálatába is bekapcsolódhattunk ebben az évben, egy Édouard Manet festmény (Hölgy legyezővel) XRF vizsgálatával, amit a Szépművészeti Múzeumban végeztünk.

A 2010-es év új témákat és vizsgálatokat hozott, mivel lehetőségünk nyílt régészeti fémek és ötvözetek elemzésére (Horváth et al. 2009, Horváth et al. 2013, Horváth et al. 2017), és ez az anyag típus, aminek XRF elemzésénél a legmegbízhatóbb eredményeket lehet elérni (pontosság, érzékenység). Egy Marcus Aurelius bronzszobor vizsgálata mellett elindítottuk régészeti feltárásokban előkerült pénzérme leletek szisztematikus mérését, Visegrádon előkerült, késő középkori pénzermék vizsgálatával. Az elkövetkező években egyre nagyobb igény merült fel a kézi XRF készülékekkel történő elemzésekre, így egyre több partnerrel és intézménnyel kerültünk munkakapcsolatba, köztük galériákkal, magángyűjtőkkel, valamint budapesti múzeumokkal és az ELTE Régészettudományi Intézetével. A habán kerámiás projektnek köszönhetően kapcsolatba kerültünk számos külföldi múzeummal és kollégával is, így elmondhatjuk, hogy az XRF technikával nemzetközi viszonylatban is sikeres mérésorozatokat végezhetünk (Bécs, Torino, Kolozsvár, Gyulafehérvár, Brno, Mikulov).

A 2011-2014 közötti időszakban is számos izgalmas és fontos területen tudtuk hasznát venni a kézi XRF technikának. Technikailag jelentős lépés volt a készülék felújítása, aminek során egy új és érzékenyebb GOLDD detektor (geometriaileg optimalizált nagy felületű drift detektor) került a gépbe a régi Si-PIN típusú helyett, továbbá új kalibrációs csomagot vásároltunk a készülékbe és ezzel lehetővé vált néhány új elem mennyiségi mérése is. Ezzel a nagyobb érzékenységű

detektorral kiváltottuk a korábban a könnyebb elemek (Mg, Al, Si, P, S, Cl) mérésére használt, hordozható és az XRF készülékhez csatlakoztatható héliumpalackunkat.

2011-ben lehetőségünk nyílt az Ernst Galériában méréseket végezni Gádor jelzetű kerámiákon, valamint a Magyar Képzőművészeti Egyetemen restaurálás alatt lévő, a Nemzeti Múzeum gyűjteményében őrzött Herendi díszkancsókon (Hugyecsek & May 2010; Hugyecsek & May 2017). Mindkét esetben a kerámia alaptesten kívül izgalmas eredményeket hozott a mázak vizsgálata. Nagy örömeinkre szolgált egy nagy lélegzetű doktori disszertáció témáját adó kora-hellenisztikus kori makedón aranyművesség számos ékszerét (arany fülbevalók) végig elemezni, fontos információkat szolgáltatva ezen tárgyak további vizsgálataihoz (Dági 2012). Hasonlóan érdekes és sikeres mérésorozat volt 2012-ben egy bronz Vénusz szobor vizsgálata a Szépművészeti Múzeumban, amiből egy máig is sokat idézett cikk is született (Lakatos et al. 2012). Fontosnak tartjuk azokat az XRF méréseket is, amelyek a Zeneakadémia teljes felújításához kapcsolódtak, aminek keretében restaurálandó lámpákat, lámpatesteket vizsgáltunk. Szintén 2013-ban egy rendkívül izgalmas és érdekes mérésorozatot végezhetünk el egy restaurálandó gabonamúmián, Ozirisz i. e. 1. évezred második feléből származó gabonamúmiájának aranyozott maszkián. Ugyanebben az évben a Magyar Nemzeti Múzeumban őrzött, Közép-Tisza-vidék népvándorlás kori bronztárgyainak XRF vizsgálatát is elvégeztük (Horváth et al. 2013).

2014-ben is folytatódott a különböző, népvándorlás kori bronztárgyak vizsgálata (May & Szenthe 2015, Rácz & May 2018) és ezzel párhuzamosan elindult egy négy éves mérésorozat, amely talán a legjelentősebb projekt a tíz év alatt, amit a kézi XRF készülékünkkel végeztünk, hiszen elindult a késő római császárkor egyik legjelentősebb ezüst kincsleletének, a Seuso-kincs edényeinek a szisztematikus kézi XRF vizsgálata. 2014 áprilisában a Parlamentben még csak előzetes XRF méréseket végeztünk egy-két tárgyon és egy-két ponton, de már akkor láttuk, milyen jelentős eredmények várhatók az ezüstedények természettudományos kutatásában. Ezeket az előzetes és ekkor még nem publikus méréseket követte mind a 14 ezüstitárgy, valamint a hozzájuk kapcsolódó rézüst négy évig tartó részletes és aprólékos XRF elemzése. Ezekből az XRF mérési eredményekből és más anyagvizsgálási módszerekkel kapott adatokból fokozatosan születtek és születnek jelenleg is (2020) publikációk, bel- és külföldi konferencia poszterek és előadások (Mozgai et al. 2017; Mozgai et al. 2018a; Mozgai et al. 2020), valamint részét képezik Mozgai Viktória doktori disszertációjának is, és

nem utolsó sorban fontosak a médiában való megjelenései is ezeknek a kutatásoknak.

A régészeti nemesfémek vizsgálatát egy másik kor aranytárgyainak XRF vizsgálatával is kiegészítettük a szarmata arany ékszerek elemzésénél 2015-ben (Mozgai et al. 2018b). Ebben az évben egy nagyot ugrottunk vissza az időben, amikor az Eötvös Loránd Tudományegyetem kollégáival közösen nagyszámú, a Réka-völgyből származó jurakori kőzetmintát elemeztünk és eredményeinket rangos nemzetközi folyóiratban publikáltuk (Müller et al. 2017). A 2015-ös év hozott még egy igazi csemegét számunkra, amikor a magyar történelem egyik meghatározó alakjának, Corvin Mátyás királynak és feleségének, Aragóniai Beatrix királynénak híres márvány domborművét vizsgálhattuk. Kimutattuk az alakokat megformázó márvány rendkívüli tisztaságát, valamint bebizonyosodott, hogy a sötétzöld (szinte fekete) háttér anyaga nem jápsis, ahogy eddig vélték, hanem feltehetően szerpentin, ami az XRF mérés során kimutatott, jellemzően nagy alumínium-, magnézium-, vas- és szilíciumtartalom alapján valószínűsíthető (Szócs et al. 2018). Ezzel jól összecseng az is, hogy a korabeli firenzei templomok díszítéseinél is előszeretettel használták a szerpentinét.

2016-ban tovább folytatódott a régészeti fém és ötvözet mérések egy Ócsa környékéről fémkeresés során előkerült hun kori üstöredék XRF elemzésével (Masek 2017), valamint magyarországi középkor és kora újkor pénzhamisító műhelyekből előkerült érmeleletek vizsgálatával (Nagy et al. 2016). Szintén ebben az évben kezdtünk el a Szépművészeti Múzeum felkérésére egy XRF vizsgálatosorozatot a múzeum több száz darabos gemma gyűjteményén (Antik Gyűjtemény), amelynek alapvető cél volt a gemmák csoportosítása anyagfajtájuk alapján. A múzeum Egyiptomi Gyűjteményében pedig múmiák fakoporsóinak felületén lévő díszítések és motívumok pigment anyagait elemeztük a kézi XRF készülékkel. A 2014. évhez hasonlóan 2016-ban is visszatértünk az Országházba, ahol a Parlament főemeleti kerámiaszobrának restaurálását megelőző állapotfelmérésben működünk közre a helyszíni XRF mérésekkel.

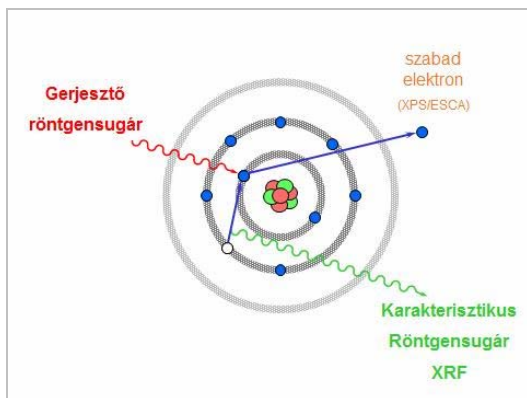
Az utóbbi négy év sem telt el tétlenül, ami a kézi XRF méréseket illeti, hiszen ebben az időszakban is számos izgalmas és rendkívül érdekes anyagvizsgálatokban vehettünk részt. A Petőfi Irodalmi Múzeum (PIM) fotógyűjteményében igen ritka fényképeket, dagerrotípiákat vizsgálhattunk a magyar fotózás korai szakaszából.

A Magyar Nemzeti Galéria restaurátorműhelyében Csontváry Kosztká Tivadar az Öreg halász című festményének alapos XRF elemzését végeztük el, hogy beazonosítsuk a képen használt lehetséges pigmenteket. Hasonló festményvizsgálatra került

sor olasz kollégákkal való együttműködésben Carlo Crivelli reneszánsz festő képeinek XRF elemzésével a Múcsarnokban. Szintén fontos mérésorozatot végeztünk a Szépművészeti Múzeumban őrzött számos márványszobron, hiszen itt a márványban lévő kísérő-, illetve nyomelemek (ami közül a legfontosabb a stroncium) meghatározásán keresztül hasznos információkat kaphatunk a márvány nyersanyag eredetéről. A pénzérme leletek XRF vizsgálatai is folytatódtak ebben az utóbbi négy éves időszakban, hiszen lehetőségünk nyílt több nagyobb leletegyüttes vizsgálatára is. Ezek egyike az Orosháza mellett feltárt fémlelet együttes, ami a 12-13. században itt élt muszlim kereskedőtől maradt hátra, amelyek közül pár tucat friesachi dénár, illetve korabeli hamisítvány (Rózsa et al. 2019). A másik jelentős leletegyüttes a kunmadarasi lengyel ezüstpénzlelet, aminek XRF vizsgálatát Szolnokon a Damjanich János Múzeumban végeztük el, és amelyből kiadvány is született könyv formájában (Nagy et al. 2019). 2018 őszén alkalmunk nyílt XRF méréseket végezni a Bécsi Szépművészeti Múzeum kihelyezett részlegében, a Kincstárban (Schatzkammer) őrzött Bocskai koronán, amelynek során a drágakőberakások vizsgálata, lehetséges azonosítása volt az elsődleges feladatunk, de ellenőriztük a korona alapjául szolgáló aranylemezt is. Ezek a mérések és az erről szóló összefoglaló a médiában is megjelent nem sokkal a mérések után, ezzel is népszerűsítve a módszert: (<https://www.facebook.com/muzeum.bocskaiistvan/muzeum/videos/2358973347488674/>)

Az XRF módszer

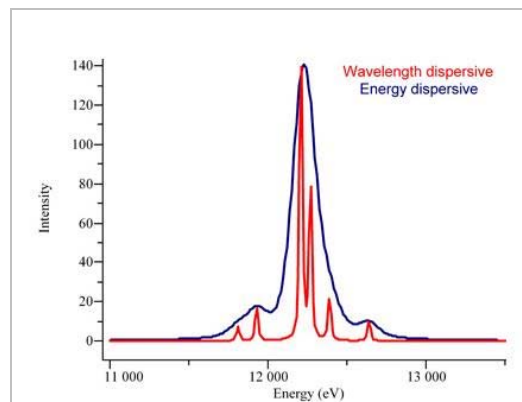
Az XRF technika elemanalitikai módszer, amely során a vizsgált felületről kapunk minőségi és mennyiségi kémiai információt, azaz meghatározhatjuk, hogy mely kémiai elemek (minőségi) milyen mennyiségben, koncentrációban (mennyiségi) építik fel a vizsgált mintát. A vizsgálat során a mintát alkotó atomok a készülékből kilépő gerjesztő röntgensugárzás hatására magasabb energiaállapotba kerülnek (gerjesztett állapot, elektronátmenetekkel és ionizációval), ami rendkívül rövid élettartamú, nem stabil állapot, így ezek az atomok rögtön visszatérnek az alapállapotukba (relaxáció), miközben kisugározzák a két energiaszint (alap és gerjesztett) közötti különbséget karakterisztikus röntgensugárzás formájában (**1. ábra**). Ebben a minta által kibocsátott röntgensugárzásban a mintát felépítő atomokra jellemző energiájú és hullámhosszú röntgensugarak vannak (karakterisztikusak), melyeknek intenzitásai arányosak az adott kémiai elem koncentrációjával a mintában.



1. ábra: A karakterisztikus röntgensugárzás keletkezése az XRF mérés során.

Fig. 1.: Formation of characteristic X-rays during XRF measurement.

A kézi XRF készülékek kivétel nélkül az energiájuk szerint válogatják szét ezeket a mintából kilépő másodlagos (karakterisztikus) röntgensugarakat és alkotják meg a mintára jellemző spektrumokat. Ezt nevezzük energiadiszperzív detektálásnak (EDXRF), szemben a laboratóriumi hullámhossz-diszperzív módszerrel (WDXRF). Legnagyobb előnye a kézi XRF készülékeknek, hogy könnyen vihetők helyszínre és teljes roncsolásmentes kémiai elemzést tesznek lehetővé, mintavétel sem szükséges a vizsgált tárgyól. Érzékenységre jellemző, hogy a legkisebb koncentráció, amit ki lehet ezzel a készülékekkel mutatni, átlagosan 10 mg/kg (ppm), ami egyben a készülékek átlagos kimutatási határa (természetesen ez függ a mátrixtól, azaz, hogy milyen anyagban kell kimutatni a kérdéses elemet, illetve a kimutatandó elem rendszámától). Azonban az energiadiszperzív detektálásból adódóan az EDXRF készülékek, így a kéziek is, kisebb spektrális felbontással rendelkeznek (összevetve a WDXRF műszerekkel), aminek következtében számos elem egymás mellett történő egyidejű mérése ugyanazon mintából csak nehezen vagy egyáltalán nem lehetséges (**2. ábra**). További, mindig szem előtt tartandó tulajdonsága a módszernek, hogy felületanalitikai elemzést ad, azaz a tárgy legfelső (átlagosan pár száz mikron) rétegéről, térfogatáról kapunk elemösszetétel adatokat. Ez a behatolási (információs) mélység a mátrixban lévő és a meghatározandó elemek átlagos rendszámától és a gerjesztő röntgensugárzás energiájától is függ. Korrodálódott, ásatáson előkerült fémtárgyak (ötvözetek) mérésénél tehát alapvetően a korróziós termékeket fogjuk elemezni egy ilyen mérés során és nem az alapötvözetről kapunk információt. Ehhez el kell távolítani a felső 'zavaró' réteget (pl. a restaurálás során, vagy roncsolásos módszerrel, reszeléssel), ami a tárgyra nézve beavatkozást, roncsolást jelent.



2. ábra: Az energia- és a hullámhossz-diszperzív detektálás összehasonlítása, különös tekintettel a spektrális felbontásra.

(https://www.horiba.com/fileadmin/_migrated/pics/tutorial10.jpg).

Fig. 2.: Comparison of energy and wavelength dispersive detection and spectral resolution (https://www.horiba.com/fileadmin/_migrated/pics/tutorial10.jpg).

Másik alapvető jellemzője a kézi XRF készülékeknek, hogy a periódusos rendszer mely elemeit képesek mérni és melyeket nem (**3. ábra**). Napjaink érzékeny félvezető detektoraival felszerelt kézi XRF készülékei a magnéziumtól az uránig képesek mérni elméletileg, gyakorlatilag ez az adott készülék gyári beállításaitól függ (kalibrációk, korrekciók, stb.).

A kisebb rendszámú elemeket (3. periódus) nagyobb, a közepes és nagy rendszámú nehéz elemeket (4. periódustól felfelé) kis kimutatási határ mellett lehet meghatározni. Sajnálatos módon a 3. periódusban lévő, magnézium előtti nátriumot egyik kézi XRF készülék sem tudta kimutatni, ami több anyagfajta elemzésénél is hátrányt jelent (üvegeknél, pigmenteknél, kerámiáknál). Ilyen esetekben egyéb műszeres vizsgálat válhat szükségessé. Az azonosítható elemek sorából jól látszik, hogy a magnézium alatti (kisebb rendszámú) kémiai elemek egyáltalán nem mérhetők, amiből fakad a következő korlátja a módszernek, nevezetesen, hogy szerves anyagokat nem lehet elemezni és jellemezni kézi XRF készülékekkel. Kimondható tehát, hogy a módszer alapvetően szerves anyagok mérésére alkalmas (lévén, hogy a szén, hidrogén, oxigén, nitrogén a magnéziumnál kisebb rendszámúak). Természetesen szerves összetevők szerves mátrixban történő elemzése lehetséges (pl. papíron vagy bőrön lévő festékanyagok elemzése) és a nemfémek közül a kén és foszfor, mint szerves molekulákban gyakran megtalálható heteroatomok is meghatározhatók, közvetett információt nyerve a szerves mátrixról.

3. ábra: Kézi hordozható XRF módszerrel kimutatható elemek. Szürke: nem mérhető, sárga: mérhető, de nagyobb kimutatási határral (párszáz ppm-től), kék: jól mérhető (átlagosan 10 ppm-től). Hordozható XRF készülékeknél a kimutatható elemek a Mg és U között található a periódusos rendszerben (Na nem mérhető!). (<https://www.thermofisher.com/blog/wp-content/uploads/2016/04/periodictable-9.jpg>)

Fig. 3.: Elements which can be detected by handheld XRF method. Gray: not measurable, yellow: measurable, but with a higher detection limit (from a few hundred ppm), blue: well measurable (from an average of 10 ppm). For portable XRF devices, the detectable elements are in the periodic table between Mg and U (Na can not be measured!). (<https://www.thermofisher.com/blog/wp-content/uploads/2016/04/periodictable-9.jpg>)

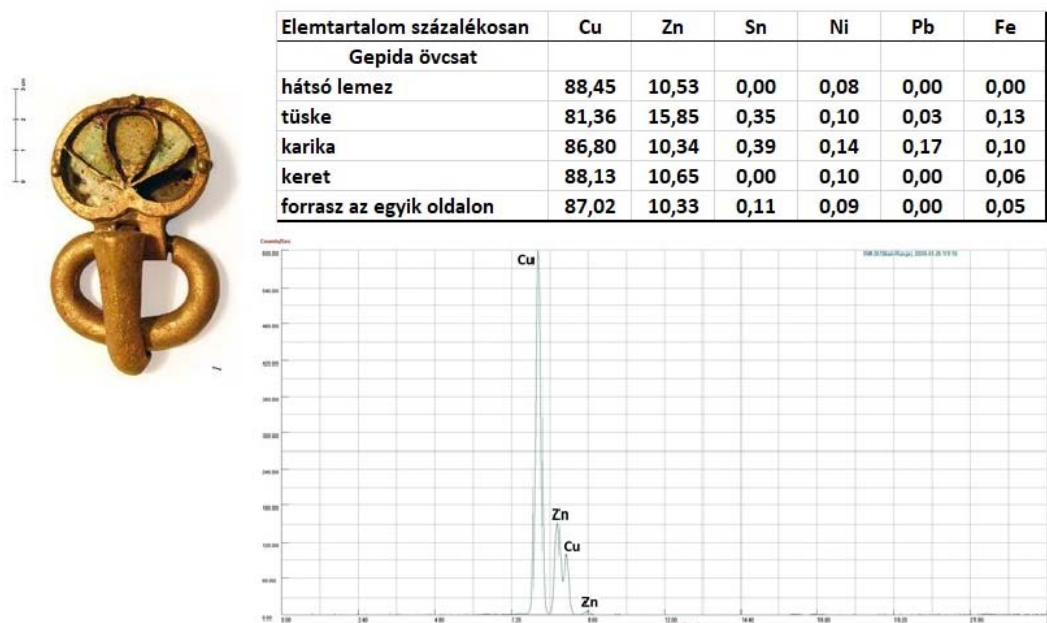
A vizsgálandó anyagok halmazállapotát tekintve az XRF technika leginkább szilárd anyagok mérésére alkalmas. További fontos paraméter a kézi XRF mérések pontosságának szempontjából a vizsgálandó mintának, tárgynak az alakja, geometriája, hozzáférhetősége. Ideális esetben a készüléknek jól kell illeszkednie a mért felülethez és minimálisnak kell lenni a gép és a minta közötti távolságnak, csökkentve a minta által emittált karakterisztikus röntgensugárzás szóródását, elnyelődését a készülék és a mért felület közötti légrétegben. Mindebből tehát az következik, hogy a legpontosabb méréseket sík mintafelületen lehet végezni.

Esettanulmányok

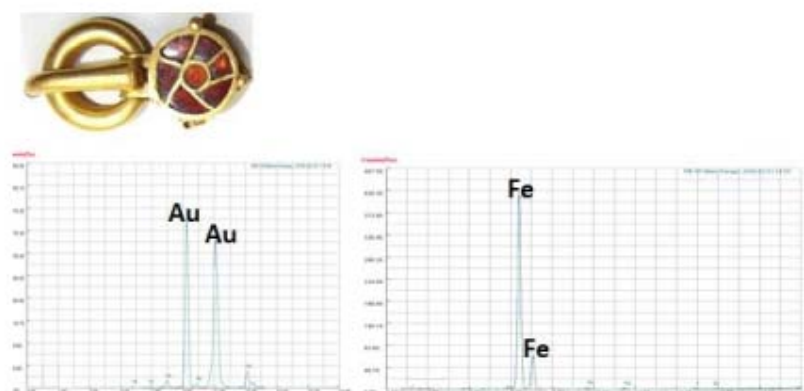
A következőekben néhány esettanulmányon keresztül mutatjuk be a kézi XRF technika előnyeit, lehetőségeit, nem megfelelően a módszer korlátairól.

A készülékkel való munkács elején, 2009-ben egy nagyobb szabású mérésorozatot végeztünk népvándorlás kori gepida és avar, bronznak ismert és publikált tárgyakon, ötvözeteken, melyek között volt számos övcsat. Ezek a tárgyak több hazai múzeum gyűjteményében vannak. A mérések alapján kiderült, hogy az elemzett tárgyak egyike sem tartozik a bronznak nevezett anyagcsoportba, mivel az öntartalmuk minimális, vagy kimutatási határ alatti (**4. ábra**). Ellenben a réztartalom mellett igen jelentős cinktartalom volt mérhető, így kijelenthető volt, hogy ezeknek a tárgyaknak az anyaga sárgaréz és nem bronz (Horváth et al. 2009).

A népvándorlás korából származó példaink sorát gyarapítja továbbá egy hun kori tömör arany övcsat is (Horváth 2012), ahol a méréseink révén a fém alapanyag tisztaságát, valamint a gránátberakások fajtáját ellenőriztük. Előbbi esetében közel 95-96 tömeg % aranytartalmat mértünk, utóbbi esetben el kellett döntenünk, hogy a gránátberakás anyaga pirop vagy almandin (**5. ábra**).



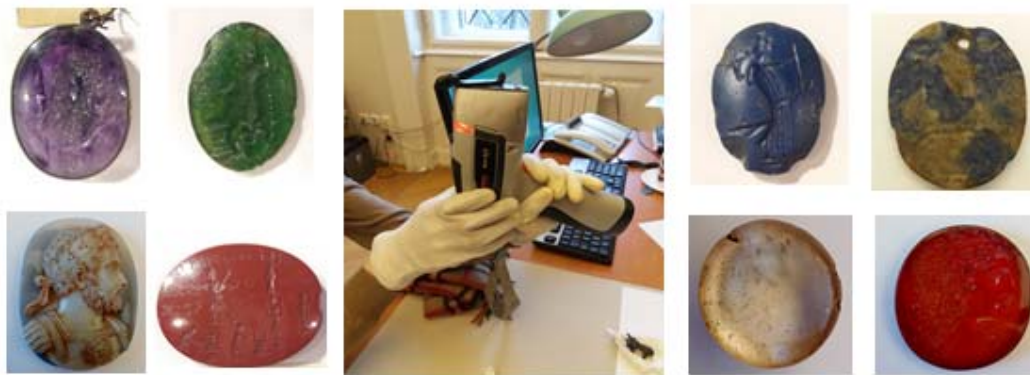
4. ábra: Gepida kori övcsat Rákóczifalva-Kastélydombról. Az XRF mérések helyei és eredményei
Fig. 4.: A Gepidian belt buckle from Rákóczifalva-Kastélydomb. XRF measuring spots and results



5. ábra: Hun kori gránátberakásos arany övcsat Lébény-Magasmarttól. Az arany és a berakás XRF spektruma.
Fig. 5.: Gold belt buckle found in Lébény-Magasmart with garnet inlay from the Hunnic period. XRF spectrum of the gold body and the inlay.

A gránátban mért jellemzően nagy vas- és kis magnéziumtartalom alapján a gránátot almandinnak valószínűsítettük. Mindkét gránátfajta alumíniumszilikát ásvány, egymástól alapvetően a vas-, illetve magnéziumtartalom dominanciájában különböznek. Természetesen, mivel az XRF elemanalitikai

módszer, így a gránát pontos ásványtani besorolása nem lehetséges, csak közvetett módon, az elemösszetétel (Si, Al, Mg, Fe, Ca, Mn) és egyéb fizikai jellemzők (pl. fénytörés, szín, keménység) alapján.

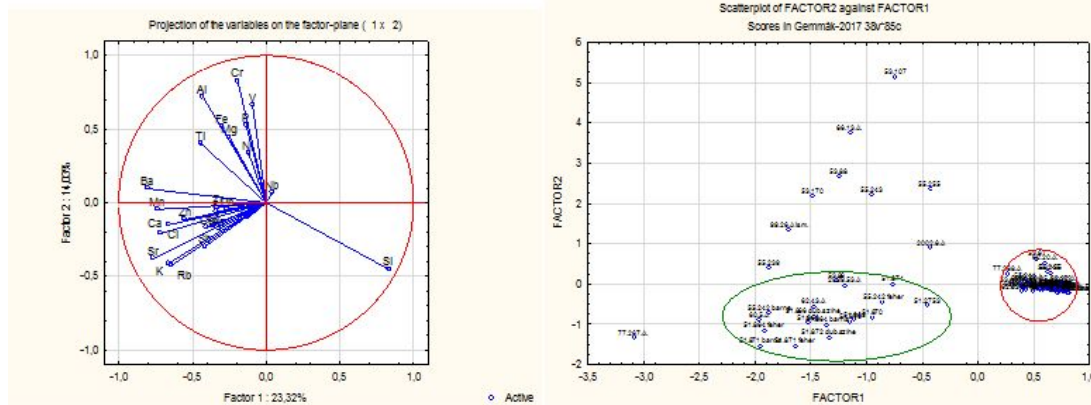


6. ábra: Gemmák a Szépművészeti Múzeum Antik Gyűjteményéből

Fig. 6.: Gems from the Antique Collection of the Museum of Fine Arts

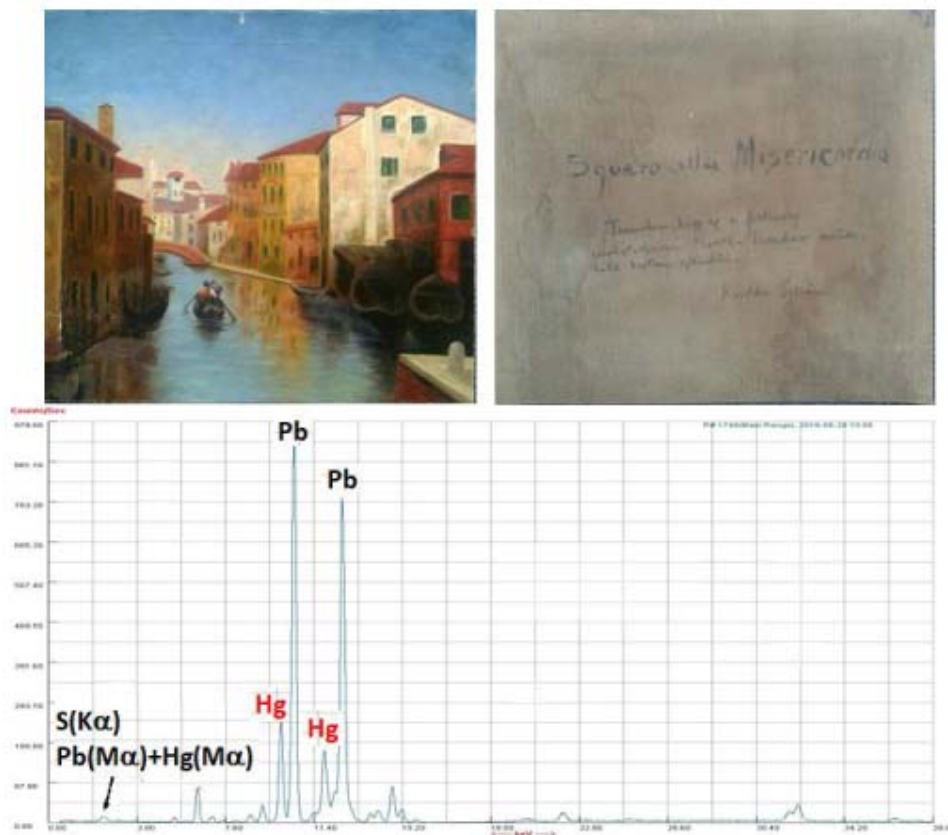
A gemmák (drágakövek) vizsgálatának nehézségeit jól mutatta a 2016-ban kezdett vizsgálatosorozat a Szépművészeti Múzeum Antik Gyűjteményének darabjain, amelyek igen változatosak voltak megjelenésükben és anyagukban egyaránt (**6. ábra**). A gyűjtemény nagy része különböző kvarc módosulatokból áll, amelyek bár makroszkóposan igen eltérők, kémiai szempontból nagyon hasonlóak, vagy azonosak. Ezekben az esetekben az XRF mérések során alapvetően a szilíciumot tudtuk kimutatni és az esetleges szennyező, kísérő nyomelemeket (vas, ittrium, urán). Ez utóbbiak viszont fontos információt hordozhatnak a geológiai és geokémiai környezetről, ahonnan származnak és egyben színcentrumok is, amelyek az adott kvarc módosulat színét adják. A vizsgált gemmák között számos karneol, achát, kalcedon, ónix, prázem, ametiszt, opál, citrin, nicolo és szardónix néven leírt tárgy van, amik mind szilícium-dioxid (kvarc) módosulatok, és amelyek között tehát XRF módszerrel különbséget nem tudunk tenni. A

gyűjtemény egy kisebb része üvegnek és egyéb anyagokból álló köveknek (gránát, hematit, smaragd, fajansz, lápisz, jáspis, szerpentin) volt leírva. Ezeket az egyéb anyagú köveket a kvarcoktól azonban jól el tudtuk választani az XRF mérésekkel kapott elemösszetételek alapján. Az üvegekben mindig mérhető olvadáspont csökkentő és hálózatot módosító alkáli- vagy hálózatot stabilizáló alkáliföldfém a szilícium, mint fő összetevő mellett. Itt jegyzendő meg, hogy mivel a kézi XRF készülékekkel nem lehet nátriumot mérni, továbbra is kérdéses lehet a nátronüveg azonosítása, hiszen ez esetben is csak a szilíciumot detektálja a gép. A többi anyagfajta esetében is volt egy-két árulkodó kémiai elem, ami alátámasztotta a feltételezést. Itt is igaz azonban, hogy a konkrét ásványfajtákat továbbra sem tudjuk beazonosítani pusztán az elemösszetétel alapján, ehhez kiegészítő és megerősítő szerkezetvizsgáló módszerek kellenek, mint amilyen az XRD (röntgendiffrakció) vagy FT-IR/Raman módszerek.



7. ábra: A vizsgált gemmák csoportosítása az XRF eredmények alapján, főkomponens és faktoranalízis segítségével

Fig. 7.: Grouping of analysed gems based on XRF results using main component and factor analysis



8. ábra: A *Squero alla Misericordia* című festmény és a hátoldala. A piros háznál mért spektrumon a Hg L-vonalai látszanak, ami a cinóber pigmentre utal (HgS). A Pb és a Hg M-vonalai átfedésben vannak a S (kén) K-vonalával.

Fig. 8.: *Squero alla Misericordia*, front and back. On the XRF spectrum measured at the red house the L-lines of Hg can be seen, which refers to the cinnabar pigment (HgS). The M-lines of Pb and Hg overlap with the K-line of S (sulphur).

Ezen mérősorozatok alapján alapvetően három nagyobb csoportra tudtuk osztani a gyűjteményt: kövek (kvarc módosulatok), üvegek és egyéb anyagok (7. ábra, piros körben a kvarc módosulatok, a zöld körben az üvegek csoportosulnak).

A festményvizsgálatok közül most egy 2016-ban végzett elemzést mutatunk be, amely során egy Csontváry Kosztká Tivadarnak tulajdonított kép vizsgálatát kérték tőlünk. A „*Squero alla Misericordia*” című festmény (8. ábra) esetében is hasonlóan jártunk el, mint más képek vizsgálatánál, azaz minden színnél és a kép hátoldalán is elvégeztük az XRF elemzéseket, hogy lássuk, milyen elemek mutathatók ki adott szín, motívum esetében, ezzel közelebb kerülve a használt pigment azonosításához. Huszadik századi festmények esetében mindig nagyon fontos kérdés a titán

mérése, hiszen a titánfehér nevű vegyületet (TiO_2) csak 1921-től kezdték használni a festők (fehér alapozás, fehér színek). A mi esetünkben egyik mérési ponton sem volt kimutatható mennyiségben titán (nyolc helyen végeztünk a festményen elemzést), így a kép századfordulón való készítésének kérdése alátámasztható, illetve nem cáfolható. (Természetesen ez nem jelenti azt, hogy a festő 1921 után ne használhatott volna titánmentes fehér pigmentet, azonban a titánfehér rendkívül népszerű lett és széles körben használt). Jelen kép esetében az ólom- és báriumtartalom minden mért felületen jellemző, ami az ólomfehér és baritfehér (ólom-karbonát és bárium-szulfát) vegyes használatára, mint fehér alapozásra utal. A baritfehér pigment kéntartalma a magas ólomkoncentráció mellett nem mérhető a kén K-alfa és az ólom M-alfa csúcsainak átfedése (kézi XRF készülékek kisebb spektrális felbontása) miatt.



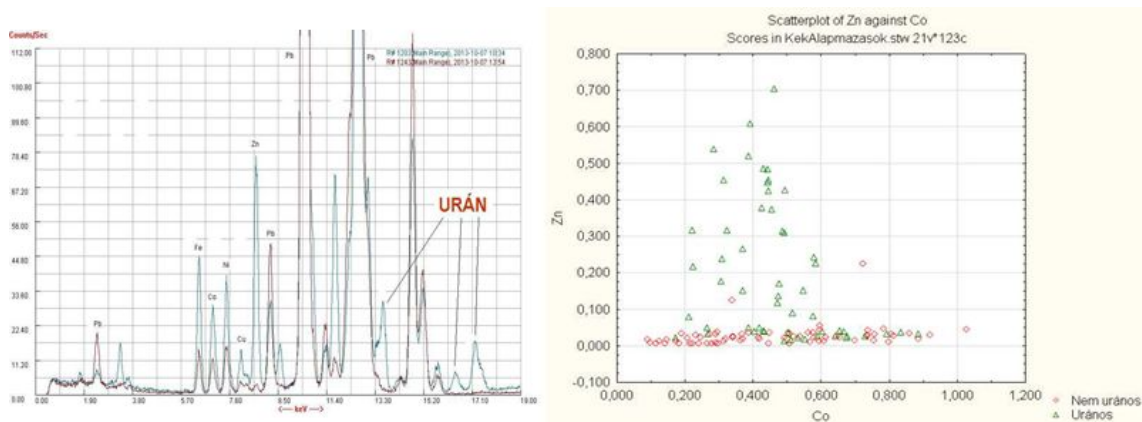
9. ábra: Fehér- és kékmázás habán kerámiák. A fotón látható tárgyak a Magyar Nemzeti Múzeum gyűjteményéből valók. A tárgyak sorrendben, leltári számuk szerint: MNM1954.408, MNM1885.11, MNM 1939.59, MNM1973.10, MNM1963.130, MNM 1954.366. A fényképeket Ormos József készítette. Az 1939.59 leltári számú tál mérésének fényképét Bajnóczi Bernadett készítette.

Fig. 9.: White and blue glazed haban ceramics. The objects shown in the photo are from the collection of the Hungarian National Museum. Items in order, according to their inventory number: MNM 1954.408, MNM 1885.11, MNM 1939.59, MNM 1973.10, MNM 1963.130, MNM 1954.366. The photos were taken by József Ormos. The photo of measurement of the 1939.59 bowl was taken by Bernadett Bajnóczi.

A kék égbolt esetében az XRF elemzés jelentősebb kobalt- és alumíniumkoncentrációt mutatott, ami a kobaltkék nevű vegyes Co-Al-oxid vegyületre utal, mint kedvelt és a korban is használt kék pigmentre. Természetesen nem zárhatjuk ki szerves kék használatát (pl. indigó), továbbá egy esetleges ultramarinos kék alkalmazása sem kizárható, mivel az egyik kulcseleme, a nátrium nem mérhető XRF technikával (az ultramarin másik két indikátor eleme, az alumínium és szilícium közül az előbbi eleve benne van a kobaltkékben, az utóbbi könnyű elem lévén nehezebben mérhető). A festmény többi színénél is beazonosíthatók voltak azok a kémiai elemek, amelyek a lehetséges pigment használatára utalnak. Ezek a javasolt pigmentek (cinóber, krómsárga, okker, viridián, malachit) a festmény készítésének korában elterjedtek voltak, közöttük a kadmiumsárga (kadmium-szulfid) is, amit már az 1840-es évektől kezdtek a művészek használni. Ebben a vizsgálatban tehát nem tudtuk cáfolni a Csontvárynak vélt festmény eredetiségét, ugyanakkor nagyon fontosak a kiegészítő műszeres vizsgálatok is egy végső döntés kimondásában,

mivel az XRF mérés önmagában általában nem elegendő festmények eredetiségének megállapításában.

A 2009-2015 közötti időszak nagyon izgalmas volt az XRF mérések szempontjából és az egyik projekt során igazán kiismerhettük a kézi XRF készülékünket, megtapasztalhattuk a lehetőségeit és elmerülhettünk a kapott eredmények, adathalmazok értékelésében, a kinyert spektrumok tüzesebb vizsgálatában és értelmezésében. Ez egy közel hatéves mérésorozatot jelentett a „Magyarországi köz- és magángyűjteményekben fellelhető habán kerámiák művészettörténeti és archeometriai kutatása, számítógépes adatbázis és katalógus elkészítése” címmel futó konzorcialis OTKA pályázat keretében a Magyar Nemzeti Múzeum, az Iparművészeti Múzeum és a Néprajzi Múzeum, valamint az MTA CSFK Földtani és Geokémiai Intézet részvételével. Ennek során több mint 500 darab, hutterita, habán, késő habán és poszthabán tárgyat (elsősorban tálak, bokályok, korsók, kályhacsempék, valamint régészeti töredékek) mértünk végig a kézi XRF készülékkel (9. ábra).



10. ábra: Urántartalmú kék mázak jellegzetes XRF spektruma és a Zn-U korreláció ábrázolása (minden urános máz - zöld háromszög- cinktartalmú is egyben).

Fig. 10.: Characteristic XRF spectrum of uranium-bearing blue glazes and representation of Zn-U correlation (all uranium glazes - green triangles – contain zinc as well).

Ez volt az első nagyszabású projekt, amihez kapcsolódni tudunk már egy évvel a készülék beszerzését követően, 2009-ben. A nagyszámú mérések során elsődlegesen a habán tárgyak mázáit vizsgáltuk, és ahol volt rá lehetőség, ott a mázatlan alaptesten is történtek mérések a felületi, szennyezett réteg szakszerű, restaurátor általi lekaparását követően.

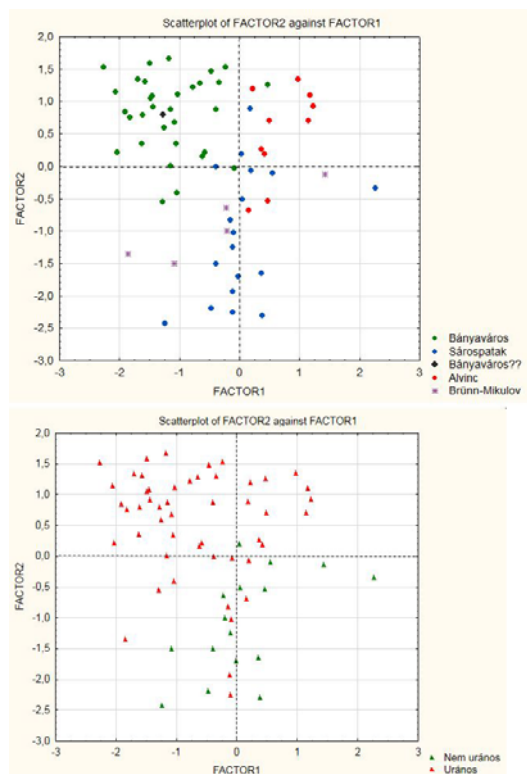
Az ónműzas fajansztechnika elterjedése a 16-18. századi Kelet-Közép-Európában jelentős részben az anabaptista habánokhoz (hutteriták) köthető és nekik köszönhető. A pontos receptúra és kerámiakészítési technológia korabeli írott forrása nem maradt fenn (Bajnóczi et al. 2014).

Az ásatásokon előkerült habán töredékeken a kézi XRF mérések mellett készültek SEM-EDX, XRD/ μ -XRD és ICP-OES/MS elemzések is (Bajnóczi et al. 2014; Bajnóczi et al. 2015). A mázak XRF elemzése kapcsán fontos felismerés és egyben újdonság volt, hogy 107 kerámiánál a kék mázban (alpmáz, díszítés) urántartalom is mérhető volt. Az urán a kék mázak színét adó kobalttartalmú pigmentek kísérőeleme, amennyiben a pigment olyan kobaltércből készült, aminek urántartalma is van (ún. Ni-Co-As-Ag-Bi+U típusú ércesedés), ugyanakkor a cinktartalommal való pozitív korrelációját is megfigyeltük (Ridovics et al. 2015; Ridovics et al. 2017) (**10. ábra**). Az urántartalmat az XRF mérés első éveiben még nem tudtuk pontosan meghatározni mennyiségileg, mivel a készülék akkori gyári kalibrációjában ez az elem nem szerepelt, de a gép 2012-es fejlesztésénél már bekerült. Ez előtt csak a felvett spektrumokon tudtuk beazonosítani az urán csúcsait és így elkülöníteni az urántartalmú kerámiák csoportját. Ez azért volt fontos eredmény, mert ezzel közelebb

kerültünk a kobaltos pigmentek eredetének meghatározásához. Ahhoz a lehetséges származási helyhez, ahonnan azt a habán mesterek is beszerezhették. A pontosabb meghatározáshoz azonban még további kutatás szükséges. A mért habán kerámiákon belül fontos a mintegy 140 darabos kékmáz (kék alpmáz) kerámia csoportja. Az XRF mérések során bebizonyosodott, hogy a kékmáz kerámiák mázaiban többkevesebb óntartalom van jelen. Még a rendkívül kis mennyiségben mért ónkoncentráció (150 ppm, 0,015 tömeg %) is szándékos hozzáadagolás eredménye, és SEM-EDX méréssel is kimutatható a mázhoz adagolt ón-oxid szemcsék jelenléte, ami fontos technológiai adat (Bajnóczi et al. 2015).

A kékmáz kerámiák mázainak XRF elemzéséből kapott adatokból statisztikai módszerekkel (többváltozós adatelemzéssel) kíséreltük meg az egyes habán fazekasműhelyek körét meghatározni (**11. ábra**). Jól elkülönült az úgynevezett 'bányavárosi műhelyben' készült tárgyak csoportja, amelyre jellemző az urántartalmú kék máz.

A habán kerámiák kézi XRF mérésénél ugyanakkor figyelembe kell venni, hogy akár a kék, akár a fehér alpmáz tárgyak kapcsán a jellemzően nagy ólom- és óntartalom miatt a kalcium, kálium, foszfor és kén elemek kimutatása és mennyiségük meghatározása nem igazán lehetséges az ólom M-vonala, az ón L-vonala és a felsorolt elemek K-vonalainak spektrális átfedése (interferencia) miatt. Sárga máz esetében a színt adó pigmenthez kapcsolódó antimon L-vonalai is hozzáadódnak a vonalak átfedéseikhez.



11. ábra: Kékmázás kerámiák XRF elemzésének eredményei faktoranalízissel feldolgozva.

Fig. 11.: Results of XRF analysis of blue-glazed ceramics processed by factor analysis.

Ez a majd hat éven át tartó habán projekt arra is remek példa volt, hogy ilyen esetekben, amikor a műtárgyak többsége ép, vagy belőlük minta nem vehető, akkor az egyetlen elemanalitikai módszer a kézi XRF technika marad, amivel igen hasznos, értékes és hiánypótló kémiai információk nyerhetők a tárgyakból, szem előtt tartva a módszer korlátait.

Összefoglalva az eddigieket és áttekintve ezt a bő tíz évet, elmondható, hogy ennek a módszernek köszönhetően számos nagyon izgalmas és fontos kutatási témákba tudunk bekapcsolódni, vagy tudunk elindítani hiánypótló és unikális vizsgálatsorozatokat, aminek köszönhetően gyümölcsöző munkakapcsolatokat alakítottunk ki hazai és külföldi kollégákkal. A módszer legnagyobb szépsége, hogy összehozza a különböző tudományterületen dolgozó szakembereket és közös gondolkodásra sarkallja a természet- és bölcsészettudomány művelőit. Bízunk benne, hogy az ez idő alatt elkezdett és valamilyen szinten befejezett kutatási témákat a jövőben folytatni tudjuk, illetve új irányokat jelölhetünk ki, hiszen a régészet, művészettörténet, valamint a műtárgyak restaurálása és állagmegóvása folyamatos feladatokkal látja el a kémikus analitikust.

Köszönetnyilvánítás

Mindenekelőtt köszönetemet és hálámat szeretném kifejezni Tóth Máriának 'Totyinak', aki elindított ezen az úton, és aki nélkül nem lett volna lehetőségem bekapcsolódni ezekbe az archeometriai kutatásokba, és aki nélkül nem ismertem volna meg azokat a csodálatos kollégákat és intézményeket, akikkel most együtt dolgozhatok. Köszönetemet fejezem ki Ridovics Annának, Bajnóczi Bernadettnek, Horváth Eszternek, Lakatos Szilviának, valamint Mráv Zsoltnak a közös munkákért és hozzájárulásukért az itt bemutatott eredmények és ábrák közléséhez, valamint lelkiismeretes szakmai segítségükért.

A római bélyeges téglák vizsgálata, valamint a habán kerámiák kutatása a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal támogatásával történt (NKFIH, régebbi nevén OTKA 75740 és K81201, K81213 és K81133 számú szerződések).

Irodalomjegyzék

BAJNÓCZI, B.; NAGY, G.; TÓTH, M.; RINGER, I. & RIDOVICS, A. (2014): Archaeometric characterization of 17th-century tin-glazed Anabaptist (Hutterite) faience artefacts from North-East-Hungary. *Journal of Archaeological Science* 45 1–14.

BAJNÓCZI, B.; MAY, Z.; RIDOVICS, A.; SZABÓ, M.; NAGY, G. & TÓTH, M. (2015): The tin content of the blue-glazed Hutterite and Haban ceramics – implications for the production technology based on results of the handheld XRF and electron microprobe analyses. *Acta Ethnographica Hungarica* 60/2 517–534.

DÁGI, M. (2012): Aranyművesek és készítési technikák. Arany mirtuszkoszorúk a későklasszikus – korahellénisztikus kori Makedóniában. In: KREITER, A.; PETŐ, Á. & TUGYA, B. szerk., *Környezet-Ember-Kultúra. Az alkalmazott természettudományok és a régészet párbeszéde* (Magyar Nemzeti Múzeum Nemzeti Örökségvédelmi Központ 2010. október 6-8-án megrendezett konferenciájának tanulmánykötete). Magyar Nemzeti Múzeum Nemzeti Örökségvédelmi Központ, Budapest 279–289.

HORVÁTH, E.; MAY, Z.; KOVÁCS J. & TÓTH, M. (2009): An early medieval buckle with cloisonné decoration. The localization of workshop area by archaeometrical investigation (Egy kora középkori cloisonné díszes övcsat. A műhelykörzet lokalizálása archeometriai módszerekkel) *Archeometriai Műhely* VI/4 15–29.

HORVÁTH, E. (2012): Ékkő- és üvegberakásos ötvösmunkák a Kárpát-medence hun kori és kora Meroving-kori leletanyagában. *PhD disszertáció kézirat*. Eötvös Loránd Tudományegyetem Budapest, pp. 179.

- HORVÁTH, E.; BENDŐ, Zs. & MAY, Z. (2013): One hundred years later... Characteristics of the materials technology and workshop affinities of the polychrome metalwork from Gáva (North-East Hungary). In: HARDT, M. & HEINRICH-TAMÁSKA, O. (eds.): *Macht des Goldes, Gold der Macht: Herrschaft- und Jenseitsrepräsentation zwischen Antike und Frühmittelalter im mittleren Donauraum*. Akten des 23. Internationalen Symposiums der Grundprobleme der Frühgeschichtlichen Entwicklung im Mittleren Donauraum. Verlag Bernhard Albert Greiner, Weinstadt, 251–280.
- HORVÁTH, E. & MAY, Z. (2017): The Archaeometric Investigation of the Early Byzantine Jug Decorated with Hunting Scenes from Budakalász. In: VIDA, T. (ed.): *Die frühbyzantinische Messingkanne mit Jagdszenen von Budakalász (Ungarn)*. MTA BTK Régészeti Intézet, Budapest, 243–256.
- HUGYECSEK, B. & MAY, Z. (2010): Herendi díszkancsók restaurálása. *Műtárgyvédelem*, (Magyar Nemzeti Múzeum) **35** 141–155.
- HUGYECSEK, B., MAY, Z. (2017): Víz és Levegő: herendi porcelán díszkancsók készítechnikai sokszínűsége. In: RIDOVICS, A.; BAJNÓCZI, B.; DÁGI, M. & LÓVEI, P. szerk., *Interdiszciplinaritás – Archeometriai, régészeti és művészettörténeti tanulmányok*. Magyar Nemzeti Múzeum – Szépművészeti Múzeum, Budapest, 333–345.
- LAKATOS, Sz.; MAY, Z. & TÓTH, M. (2012): Egy bronz Venus szobor vizsgálata régészeti és természettudományos módszerek együttes alkalmazásával. In: KREITER, A.; PETŐ, Á. & TUGYA, B. szerk. *Környezet-Ember-Kultúra. Az alkalmazott természettudományok és a régészet párbeszéde* (Magyar Nemzeti Múzeum Nemzeti Örökség-védelmi Központ 2010. október 6 – 8-án megrendezett konferenciájának tanulmánykötete). Magyar Nemzeti Múzeum Nemzeti Örökség-védelmi Központ, Budapest, 335–343.
- MASEK, Zs. (2017): A fresh look at hunnic cauldrons in the light of a new find from Hungary, *Acta Archaeologica Academiae Scientiarum Hungaricae* **68** 75–136
- MAY, Z.; TÓTH, M. & SZÉPVÖLGYI, J. (2011): Application of a portable and handheld Niton XRF analyzer in studying of ceramics and historical bricks in Hungary *EMAC 2011 - 11th European Meeting on Ancient Ceramics, 29 September – 1 October 2011*, Vienna, Austria, Conference program and Abstracts, 27–26.
- MAY, Z. & SZENTHE, G. (2015): Archaeometrical studies on some bronze buckles with portable (handheld) XRF spectroscopy. *Acta Archaeologica Academiae Scientiarum Hungaricae* **66** 379–386.
- MOZGAI, V.; BAJNÓCZI, B.; FÓRIZS, I.; MAY, Z.; HATVANI, I.G.; DÁGI, M.; MRÁV, ZS. & TÓTH, M. (2017): Handheld XRF mapping of elemental composition of Roman silver artefacts: preliminary results In: MONTERO-RUIZ I. & PEREA, A. eds., *Archaeometallurgy in Europe IV, Bibliotheca Praehistorica Hispana XXXIII* Editorial CSIC, Madrid, 237–247.
- MOZGAI, V.; BAJNÓCZI, B.; MAY, Z.; PERNICKA, E.; FÓRIZS I.; MRÁV Zs.; DÁGI M. & TÓTH M. (2018a): The use of handheld XRF supplemented with LA-QICP-MS in the analysis of composite silver artefacts – the case study of the late Roman Seuso Treasure. European Conference on X-ray Spectrometry (EXRS 2018), 24–29 June 2018, Ljubljana, Slovenia, In: KAVČIČ, M.; ŽITNIK, M.; HRAST, M. & BUČAR, K. eds., *Book of Abstracts*, Jožef Stefan Institute, Ljubljana, p. 200.
- MOZGAI, V.; SZABÓ, M.; MAY, Z. & BAJNÓCZI, B. (2018b): A Dunakeszi-Székesdűlőn feltárt korai szarmata sír aranyleleteinek kézi röntgenfluoreszcens és elektron-mikroszkopos vizsgálata. In: KOROM, A.; BALOG, Cs.; MAJOR B. & TÜRK, A. (szerk.): *Relationes rerum – Régészeti tanulmányok Nagy Margit tiszteletére. Studia ad Archaeologiam Pazmaniensia 10* Pázmány Péter Katolikus Egyetem Régészettudományi Intézet – Budapesti Történeti Múzeum, Budapest, 209–223.
- MOZGAI, V.; BAJNÓCZI, B.; MAY, Z. & MRÁV, Zs. (2020): A hordozható XRF alkalmazási lehetőségei és korlátai római ezüsttálak archeometriai vizsgálatában / Possibilities and limitations of the use of handheld XRF in the archaeometric study of Roman silver platters (In *Hungarian with English abstract*), *Archeometriai Műhely XVII/3* 253–270.
- MÜLLER, T.; GREGORY, D. P.; DÁVID, B.; NYERGES, A.; KESJÁR, D.; RAUCSIK, B.; VARGA, A.; JUDIK, K.; FEKETE, J.; MAY, Z. & PÁLFY, J. (2017): New multiproxy record of the Jenkyns Event (also known as the Toarcian Oceanic Anoxic Event) from the Mecsek Mountains (Hungary): Differences, duration and drivers. *Sedimentology* **64/1** 66–86.
- NAGY, Zs. D.; MAY, Z. & FINTOR, K. (2016): Archaeometric investigation of the hoard from Bodrogolaszi, Hungary. *STAR: Science & Technology of Archaeological Research* **1/2** 89–98.
- NAGY, Zs. D.; ZAJAC, B. & MAY, Z. (2019): *Lengyel pénzek Magyarországon I.* A Kunmadaras-repülőter lelőhelyen előkerült éremlelet előzetes eredményei. Damjanich János Múzeum, Szolnok, 89 p.

RÁCZ, Zs. & MAY, Z. (2018): Öntőminta pajzsos testű csat készítéséhez. In: BÍRÓ, Gy.; KATONAKISS, A. & RÓZSA, Z. eds., *Mozaikok Orosháza és vidéke múltjából* 19 Fémek a földből I. Orosháza Város Önkormányzat Nagy Gyula Területi Múzeuma, Orosháza, Magyarország, 50–51.

RIDOVICS, A.; MAY, Z.; BAJNÓCZI, B. & TÓTH, M. (2015): Examination of Haban vessels with uranium-bearing blue glaze. *Acta Ethnographica Hungarica* 60/2 485–515.

RIDOVICS, A.; MAY, Z. & BAJNÓCZI, B. (2017): Virágok, sellők, bányászkalapács. Kékmázás hutterita, habán edények és kályhacsempék a bányavárosi műhely munkáinak tükrében In: RIDOVICS A.; BAJNÓCZI B.; DÁGI M. & LŐVEI P. szerk., *Interdiszciplinaritás –*

Archeometriai, régészeti és művészettörténeti tanulmányok. Magyar Nemzeti Múzeum – Szépművészeti Múzeum, Budapest, 195–222.

RÓZSA, Z.; TÓTH Sz. & MAY Z. (2019): Preliminary archaeometric studies and results of fake denars from Friesach found in the inheritance of a community in the Árpád-era dealing with money exchange, *Archeometriai Műhely* XVI/1 57–62.

SZŐCS, M.; KÁLDI, R.; MAY, Z.; BAJNÓCZI, B. & TÓTH, M. (2018): Material analysis of the marble reliefs attributed to Benedetto da Maiano representing King Matthias Corvinus and Beatrice of Aragon and aspects of their technical execution. *Bulletin du Musée Hongrois des Beaux-arts – A Szépművészeti Múzeum Közleményei* 123 51–65.

