

AZ ARCHEOMETRIÁBAN LEGGYAKRABBAN HASZNÁLTATOS ANALITIKAI MÓDSZEREK ÁTTEKINTÉSE

AN OVERVIEW OF THE MOST FREQUENTLY APPLIED ANALYTICAL METHODS IN ARCHAEOMETRY •

KASZTOVSZKY Zsolt 

HUN-REN Energiatudományi Kutatóközpont, Energia- és Környezetbiztonsági Intézet,
Budapest Neutron Centrum

E-mail: kasztovszky.zsolt@ek.hun-ren.hu

Abstract

As the various analytical techniques evolve, they are naturally applied to heritage (archaeometric) research. In the field of elemental analysis, structural analysis and imaging techniques, the trend is towards ever lower detection limits and ever better spatial resolution and elemental mapping. At the same time, in addition to high accuracy, expensive and difficult to access techniques, there is an increasing role for easy to use, portable equipment, which often provides less accurate results. In this paper, without claiming to be exhaustive, I would like to review the most common measurement methods currently used in archaeometry.

Kivonat

A különböző analitikai technikák fejlődésük során magától értetődően alkalmazásra kerülnek az örökségtudományi, szűkebb értelemben archeometriai kutatásokban is. Az elemanalitikai, szerkezetvizsgálati, valamint képalkotási technikák körében a fejlődési irány az egyre alacsonyabb kimutatási határok, valamint az egyre jobb térbeli felbontóképesség, illetve az elemtérképezés irányába mutat. Ugyanakkor, a nagypontosságú, drága és nehezen hozzáférhető technikák mellett egyre nagyobb a szerepe a könnyen kezelhető, hordozható, viszont sokszor kevésbé pontos eredményt szolgáltatató berendezéseknek is. Jelen írásban a teljesség igénye nélkül szeretném áttekinteni az archeometriában jelenleg használatos leggyakoribb mérési módszereket.

KEYWORDS: COMPOSITIONAL STUDY, STRUCTURAL STUDY, IMAGING, ATOMIC SPECTROSCOPY, NUCLEAR SPECTROSCOPY, VIBRATIONAL SPECTROSCOPY

KULCSSZAVAK: ÖSSZETÉTEL-VIZSGÁLAT, SZERKEZETVIZSGÁLAT, KÉPALKOTÁS, ATOMSPEKTROSKÓPIA, MAGSPEKTROSKÓPIA, REZGÉSI SPEKTROSKÓPIA

Bevezetés

Az archeometriában, vagy tágabb értelemben az örökségtudományban különböző, természettudományos (fizikai-kémiai-biológiai) analitikai eljárásokat alkalmazunk a műtárgyak, régészeti leletek anyagi tulajdonságainak a vizsgálatára. A mérések eredményei részben a tárgyak, vagy azokból vett minták összetételéről (ásványok, vegyületek, kémiai elemek, izotópok), részben a tárgyak atomi, mikroszkopikus,

vagy makroszkopikus skálán vizsgált szerkezetéről tájékoztatnak.

Így a vizsgálati módszereket – némileg önkényesen – három nagy csoportba sorolhatjuk: összetétel meghatározása, szerkezetvizsgálat, és képalkotás (**1. táblázat**), amely utóbbi magába foglalja a 2D és 3D képalkotást. Külön tárgyalást igényel a régészeti leletek egy speciális vizsgálata, a kormeghatározás, a különböző kormeghatározási módszerek összehasonlítása, ami azonban kívül esik ezen cikk tárgykörén.

1. táblázat: Az archeometriában leggyakrabban alkalmazott összetétel- és szerkezetvizsgáló, valamint képalkotó technikák (ld. következő oldalon)

Table 1.: The most commonly used compositional, structural and imaging techniques in archaeometry (see on the next page)

• How to cite this paper: KASZTOVSZKY, Zs. (2025): Az archeometriában leggyakrabban használatos analitikai módszerek áttekintése / An overview of the most frequently applied analytical methods in archaeometry (In Hungarian with English abstract), *Archeometriai Műhely* XXII/4 333–346.
doi: [10.55023/issn.1786-271X.2025-024](https://doi.org/10.55023/issn.1786-271X.2025-024)

Név (magyar)	Rövidítés	Név (angol)	Név (német)
ÖSSZETÉTEL MEGHATÁROZÁSA			
UV-látható fény spektroszkópia	UV-Vis	Ultraviolet-visible spectroscopy	UV/VIS-Spektroskopie
Optikai emissziós spektroszkópia	OES	(Optical) Emission Spectroscopy	Emissionsspektroskopie
Induktív csatolású plazma atomemissziós spektrometria	ICP-AES	Inductively coupled plasma atomic emission spectroscopy	Induktiv gekoppelte Plasma-Atom-Emissions-Spektroskopie
Lézerindukált plazmaemissziós spektrometria	LIBS	Laser-induced breakdown spectroscopy	Laserinduzierte Plasmaspektroskopie
Energiadiszperzív röntgenspektroszkópia	EDS, EDX, EDXS, XEDS, EDXA, EDXMA	Energy-dispersive X-ray spectroscopy	Energiedispersive Röntgenspektroskopie
Röntgenfluoreszcens spektroszkópia	XRF (RFA, RFS)	X-ray Fluorescence Spectroscopy	Röntgenfluoreszenzanalyse / Röntgenfluoreszenzspektroskopie
Elektron-mikroszkop	EPMA / EMPA / WDS	Electron probe microanalysis	Elektronenstrahlmikroanalyse
Infravörös spektroszkópia	(FT-) IR	(Fourier-transform) Infrared Spectroscopy	(Fourier-Transformation) Infrarotspektroskopie
Raman-spektroszkópia	RS	Raman spectroscopy	Raman-Spektroskopie
Részecske/Proton-indukált röntgenemissziós spektrometria	PIXE	Particle/Proton-induced X-ray emission	Partikel-induzierte Röntgenemission / Proton-induzierte Röntgenemission
Részecske/Proton-indukált gammaemissziós spektrometria	PIGE	Particle/Proton-induced gamma emission	
Mössbauer-spektroszkópia	MS	Mössbauer spectroscopy	Mößbauerspektroskopie
Neutronaktivációs analízis	(I)NAA	(Instrumental) Neutron Activation Analysis	(Instrumentelle) Neutronenaktivierungsanalyse
Prompt-gamma aktivációs analízis	PGAA, PGNAA	Prompt-gamma (Neutron) Activation Analysis	Prompte-Gamma-Aktivierungsanalyse
(Lézerablációs) Induktív csatolású plazma-tömegspektrometria	(LA-) ICP-MS	Inductively coupled plasma mass spectrometry	Massenspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma
KÉPALKOTÁS			
Optikai (Fény-) mikroszkópia	OM	Optical (Light) microscopy	Lichtmikroskopie
Transzmissziós elektronmikroszkópia	TEM	Transmission electron microscopy	Transmissionselektronenmikroskopie
Páztázó elektronmikroszkópia	SEM	Scanning electron microscopy	Rasterelektronenmikroskopie
Páztázó alagútmikroszkópia	STM	Scanning tunneling microscopy	Rastertunnelmikroskopie
Térrő ionmikroszkópia	FIM	Field ion microscopy	Feldionenmikroskopie
Atomerő-mikroszkóp	AFM / SFM	Atomic force microscopy / Scanning force microscopy	Atomkraftmikroskopie
Magmágneses rezonancia-spektroszkópia	NMR	Nuclear Magnetic Resonance Spectrometry	Kernspinresonanz
Computer tomográfia	CT	Computed tomography	Computertomographie
Röntgen-, Neutron-, Müon-, stb. Tomográfia	XT, NT	Tomography (X-ray-, Neutron-, Muon- etc.)	Tomografie
SZERKEZETVIZSGÁLAT			
Nagyszögű röntgenszórás	WAX / WAXD	Wide-angle X-ray scattering	Weitwinkel-Röntgenstreuung
Kisszögű röntgenszórás	(U)SAXS	(Ultra-) Small-angle X-ray scattering	Kleinwinkel Röntgenstreuung
Kisszögű neutronszerzés	SANS	Small-angle neutron scattering	Kleinwinkel-Neutronenstreuung
Röntgendiffrakció	XRD (XRC)	X-ray diffraction (X-ray crystallography)	Kristallstrukturanalyse
Elektrondiffrakció	ED	Electron crystallography	Elektronenbeugung
(Repülési idő) Neutrontdiffrakció	(TOF-) ND	(Time of flight) Neutron diffraction	(Flugzeit-) Neutronenbeugung

A mérési eredményeket komplex módon értelmezve, az örökségtudományi szakember a tárgyak állapotáról, nyersanyagának eredetéről, a készítés helyéről és idejéről, esetenként a tárgy eredeti voltáról tesz megállapításokat. Mivel a vizsgálandó tárgyak, vagy azok töredékei – még töredékes állapotban is – a legtöbbször pótolhatatlanok, lehetőség szerint törekszünk roncsolásmentes, vagy minimális mintavétellel járó vizsgálatot választani.

A rendelkezésre álló módszerek, eszközök kínálattából az örökségtudomány igyekszik minél többet, lehetőleg a legmodernebbeket is saját hasznára felhasználni. Természetesen minden egyes esetben mérlegelni kell az adott vizsgálatból eredő tudományos „haszon” és a vizsgálat „ráfordításának”, esetleges „káros mellékhatásának” a viszonyát.

Általánosságban elmondhatjuk, hogy minden új kísérleti módszertani felfedezés előbb-utóbb alkalmazásra talál az örökségtudományban. A fordított út, bár ritka, de nem elképzelhetetlen: egy-egy konkrét archeometriai probléma inspirálhat kísérleti módszertani fejlesztést.

Az archeometriai kutatások kezdetén az alkalmazott analitikai módszerek magukba foglalták a hagyományos kémiai-biológiai módszereket (pl. titrálás, voltametria, kolorimetria, kromatográfia), amelyek többsége azonban a minták roncsolását igényli (Caley 1951). A hagyományos kémiai analitikai módszereket nem tárgyalom részletesen a cikkben. Az analitikai technika fejlődésével a legmodernebb, nagypontosságú módszerek is (pl. tömegspektrometria, szinkrotron alapú röntgensugárzás alkalmazása) bekerültek az archeometria eszköztárába,

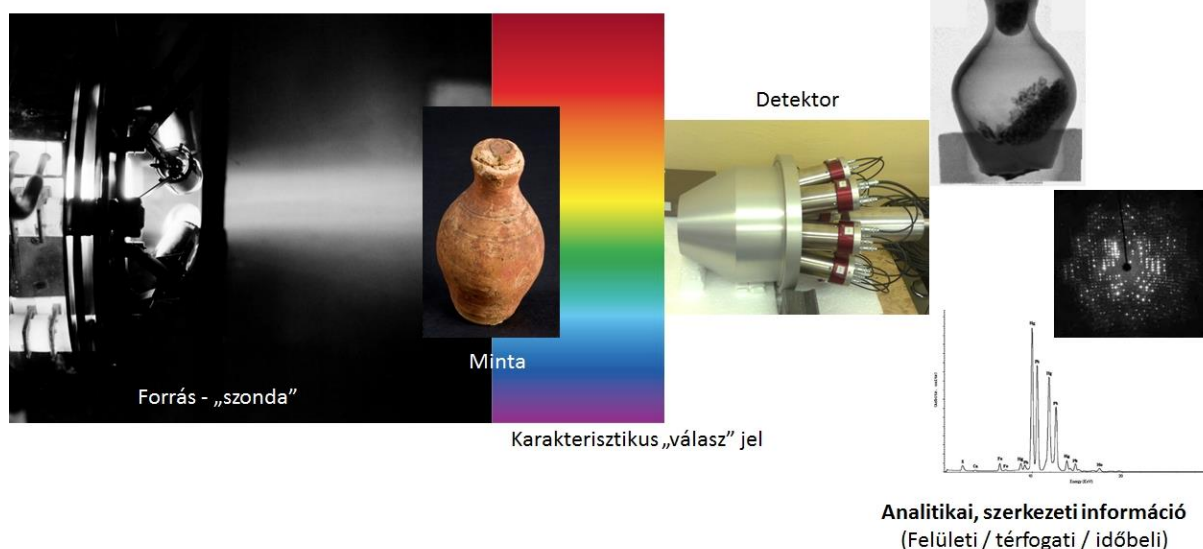
írásban a jelenleg használatos módszerekre helyezem a hangsúlyt.

A különböző régi és új technikák, azok változatai, főbb tulajdonságaik, teljesítőképességük, de még a szabatos elnevezésük is sokszor nehezen követhető a szakemberek számára. Először csupán táblázatos formában kívántam összegyűjteni a főbb analitikai módszereket. Jelen írásban igyekeztem összegyűjteni és áttekinteni a napjainkban, az örökségtudományban (archeometriában) alkalmazott legfontosabb fizikai-kémiai módszerek főbb jellemzőit. A vizsgálati módszerek elnevezését és a nevek rövidítéseit az **1. táblázatban** foglaltam össze. A pusztá felsoroláson túlmenően azonban a cikkben megkísérlem a hasonló feladatot megvalósító módszerek teljesítőképességét egymáshoz hasonlítani, felvázolni egyfajta fejlődési vonalat.

Mint minden „leltár”, várhatóan ez az áttekintés sem lesz teljes, minden igyekezet ellenére kimaradhattak belőle kevésbé ismert módszerek, illetve egy-egy módszer kismértékben eltérő változatai többször említésre kerülhetnek.

A kísérleti technikák leírása

A legtöbb anyagvizsgálati módszert úgy modellezhetjük, hogy a mintát (esetünkben régészeti tárgyat vagy abból vett kisebb mintát) valamilyen „szonda” nyalábbal (elektron, proton, neutron- UV-, röntgensugárzás) besugározunk, és a minta anyagából kilépő „válasz” sugárzást észleljük (**1. ábra**). A kapott információból a vizsgált objektum kémiai, ásványi összetételére, makroszkopikus vagy mikroszkopikus, atomi szerkezetére következtethetünk.



1. ábra: A különböző, örökségtudományban alkalmazott elemzési módszerek általános modellje

Fig. 1.: A general model of the different analytical methods used in heritage studies

I. Kémiai összetétel meghatározása

I.a. Atomspektroszkópiai módszerek

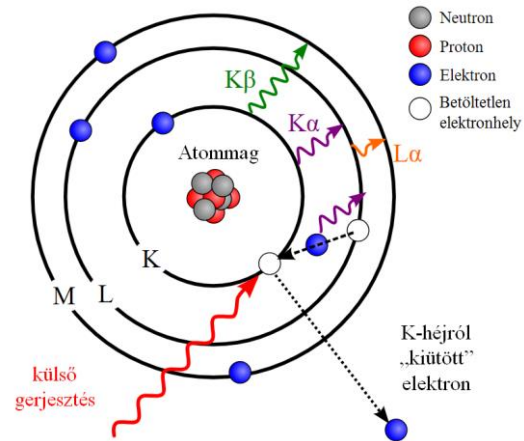
A minták kémiai összetételének meghatározására alkalmazott módszerek egyik típusánál a minta atomjait, az atomok elektronjait gerjesztjük valamilyen külső gerjesztőforrás (pl. elektron-, lézer-UV-, fény, röntgen- vagy akár protonnaláb), és az atomok által „válaszként” kibocsátott karakterisztikus sugárzást detektáljuk. A karakterisztikus spektrumból általában a minta elemösszetételét vagy molekuláris összetételét mennyiségileg meg tudjuk határozni. A kísérletek különböző megvalósításának közös fizikai elve a **2. ábrán** látható. Az adott módszer legjellemzőbb, a felhasználók számára leglényegesebb tulajdonságai a sonda behatolási mélysége (vagyis mekkora anyagmennyiségről kapunk információt), illetve az egyes kémiai elemekre vonatkozó érzékenysége.

Az egyes módszerek „teljesítőképességének” egymáshoz való viszonyát a **3. ábrán** mutatom be. Egy ilyen összehasonlítást végeztek Braidy és munkatársai (Braidy et al. 2020).

A klasszikus atomemissziós spektroszkópia (AES) során az elporlasztott mintát lángban vagy indukcián csatolt plazma kisülésben (ICP-AES) hevítve gerjesztik az atomokat, és felveszik a karakterisztikus emissziós spektrumokat (Klemenc et al. 1999).

Az elektron-mikroszkopos (EPMA / EMPA) tulajdonképpen egy elektronmikroszkóphoz kapcsolt hullámhosszdiszperzív (WD) röntgenspektrométer. A minta atomjainak a gerjesztése elektronnyalábbal történik. Az elektronnyaláb mérete 5 nm és 10 μm között változhat, behatolási mélysége néhány száz 10 μm . Az atomok által kibocsátott karakterisztikus röntgenspektrumot hullámhossz szerint félvezető detektorral érzékelik. A kimutatható elemek a $Z > 5$ (bórnál nagyobb) rendszámúak. A módszer jól alkalmazható pl. kőszeközök, üvegek, kerámiák vizsgálatára (Kasztovszky & Kunicki-Goldfinger 2008, Péterdi et al. 2009, Purowski et al. 2019, Muros et al. 2023).

Az energiadiszperzív röntgenspektroszkópiai módszerek (EDS / EDX / EDXS / EDXA) során a minta atomjait egy röntgenforrás vagy elektronnyaláb segítségével gerjesztik, és a karakterisztikus röntgensugárzást detektálják Si(Li), újabban „szilícium drift” detektor (SDD) segítségével. Az elektronnyalábbal történő gerjesztést gyakran egy pásztázó elektronmikroszkóppal (SEM) egybeépített ún. SEM-EDX készülékkel valósítják meg. A módszer a kémiai elemek relatív mennyiségének a meghatározására alkalmas. A módszer pontossága és kimutatási határa nagyban függ a minta anyagától (mátrixhatás) (Bendő et al. 2013, Kürthy et al. 2018, Amirhajloo et al. 2020).

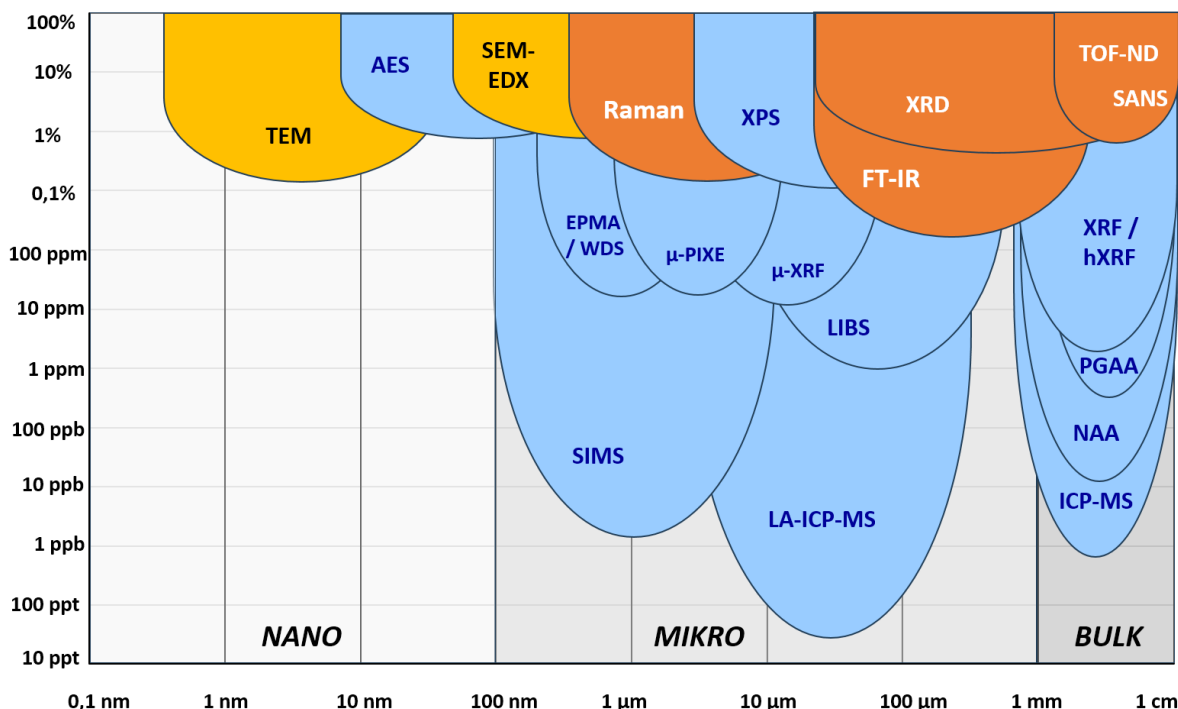


2. ábra: Az atomspektroszkópiai technikák fizikai alapja. Amikor a minta atomjait rövid hullámhosszú (nagyenergiájú) röntgensugárzás éri, az atomok ionizációja léphet fel. Az atom belső (K) elektronhéján lévő elektron a külső gerjesztés hatására „kilökődhet” a pályájáról, így a külső (L, M) pályákon lévő elektronok betölthetik a kilökött elektron helyét. A két elektronpálya közötti energiakülönbség karakterisztikus, azaz a kibocsátó atomra jellemző röntgensugárzás formájában felszabadul. A kibocsátott karakterisztikus sugárzás detektálása alkalmas kvantitatív elemanalízis elvégzésére.

Fig. 2.: The physical basis of atomic spectroscopy techniques. When the atoms of the sample are exposed to short wavelength (high energy) X-rays, ionization of the atoms may occur. The electron in the inner (K) electron shell of the atom can be "ejected" from its orbit due to external excitation, allowing electrons in the outer (L, M) orbits to fill the place of the ejected electron. The energy difference between the two electron orbits is released in the form of characteristic X-rays, which is specific to the emitting atom. The detection of the emitted characteristic radiation is suitable for performing quantitative elemental analysis. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Atom_model_for_EDX_DE.svg

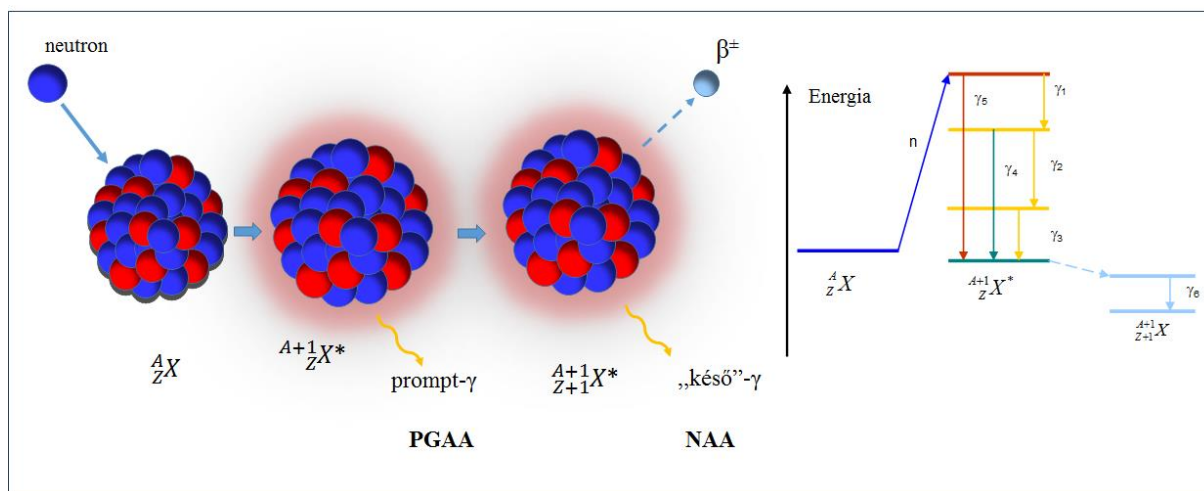
Az EDX technikák speciális változatai az ún. Auger-elektron spektroszkópia (AES), amely során a gerjesztési energia átadódik egy belső elektronhéjon található ún. Auger-elektronnak, amely kilökődik az atomból, és a helyére lépő újabb elektron energiafeleslege sugárzódik ki karakterisztikus röntgensugárzás formájában. Hasonlóan a gerjesztés során kilökődött héjelektron kinetikus energiáját méri az ún. röntgen-fotoelektron spektroszkópia (XPS) (Daccà et al. 2000).

Amikor a minta atomi elektronjainak gerjesztésére töltött részecskét, pl. protont alkalmaznak, a módszert részecskeindukált röntgenemissziós spektrometriának (PIXE) hívják (Butalag et al. 2008, Csedreki & Dani 2011).



3. ábra: A különböző analitikai módszerek összehasonlítása az érzékenység és az elemzett mintaméret szempontjából. Rövidítések: SIMS - másodlagos ion tömegspektrometria, illetve lásd a szövegben és az 1. táblázatot. 1 ppm („parts-per-million”) = $10^{-4}\%$, 1 ppb („parts-per-billion”) = $10^{-7}\%$, 1 ppt („parts-per-trillion”) = $10^{-10}\%$.

Fig. 3.: Comparison of different analytical methods in terms of sensitivity and sample size analysed. Abbreviations: SIMS - Secondary Ion Mass Spectrometry, and see in the text and in Table 1. 1 ppm („parts-per-million”) = $10^{-4}\%$, 1 ppb („parts-per-billion”) = $10^{-7}\%$, 1 ppt („parts per-trillion”) = $10^{-10}\%$.



4. ábra: Az aktivációs analitikai módszerek fizikai alapjául szolgáló fizikai jelenség, a neutronok sugárzásos befogódása az atommagba. A termikus vagy hideg neutronok atommagba történő befogódását követően az atommag gerjesztett állapotba kerül. A gerjesztési energiától az atommag karakterisztikus (az egyes izotópokra jellemző energiájú) gammafotonok kibocsátásával szabadul meg. Ez teremt lehetőséget a tömbi, roncsolásmentes elemanalízisre.

Fig. 4.: The physical phenomenon underlying the physics of activation analysis methods, the radiative capture of neutrons into the atomic nucleus. Following the capture of thermal or cold neutrons by the atomic nucleus, the nucleus enters an excited state. It releases the excitation energy by emitting gamma photons with characteristics specific to each isotope. This makes it possible to perform bulk, non-destructive elemental analysis.

Mivel a gerjesztő protonnyaláb részecskéi nagy-tömegűek, és pozitív az elektromos töltésük, a protonnyaláb behatolási mélysége a mintába csekély, néhányszor 10 μm . Ugyanakkor, a modern PIXE berendezések nyalábját 1 μm átmérőjű foltra is lehet fókuszálni, ami lehetővé teszi a minták felületének mikrométerű pásztázását. A különböző töltött részecskenyalábokkal végzett analitikai módszereket általánosan ionnyaláb-analitikai (IBA) módszereknek nevezzük (Dran et al. 2004, Smit 2015).

A röntgenfluoreszcencia-analízis (XRF / RFA / RFS) során az atomok belső elektronpályáin lévő elektronjait egy külső röntgen- vagy gamma-sugárforrás segítségével gerjesztik. A külső pályáról a megüresedett helyre ugró elektron fluoreszcencia-jelenség során karakterisztikus röntgensugárzást bocsát ki, ami az adott atomra jellemző. A karakterisztikus röntgenspektrum felvételével a minta elemösszetételére ad minőségi és mennyiségi információt. Az XRF-készülékeknek ismert a helyhez kötött laborváltozata, és a hordozható változata is. A hordozható (pXRF / hXRF) készülékek népszerűsége egyre növekszik (Maróti et al. 2020). Nagy előnyük, hogy könnyen kezelhetők, használhatók terepen vagy múzeumban. Hátrányuk, hogy a mért értékek sokszor pontatlanok, illetve a mérési eredményeket nagymértékben befolyásolja a vizsgált felület egyenetlensége. A készülék által kijelzett eredményeket mindig kritikus szemmel kell kezelni, előzetes anyagismeret ajánlott az értelmezésükhöz.

A kis területre fókuszáló, és azt elemző μXRF technikának nagy jelentősége van a régészeti tárgyak apró részleteinek (pl. berakások, üveg ékszerek, kéziratok tintája) vizsgálatában (Fitzgerald 2008).

Az eddig ismertetett elemanalitikai módszerek érzékenysége az egyes kémiai elemekre általánosan az elemek rendszámával egyenesen arányos. Tehát a legtöbb esetben a Mg-nál nehezebb elemek mérhetőek, és a nehezebb elemek (jellemzően fémek) nagyobb érzékenységgel mutathatók ki. Néhány speciális kialakítású készülék, pl. a He-öblítéses hordozható XRF alkalmas Na mérésére is.

Egy korszerű atomspektroszkópiai módszer a lézerindukált plazmaspektroszkópia (LIBS vagy LIPS), amely a lézerabláció során keltett mikroplazma optikai emissziós mérésén alapul (Tóth & Márton 2008). A lézerablációs technikának köszönhetően a módszer mikroroncsolásos. A LIBS vizsgálatához nincs szükség mintavételre, néhány μm -tól néhány mm-ig terjedő felületen, 1–100 μm mélységben elemzik a mintát. A LIBS a kémiai elemeket – mintától függően – minimálisan 1–100 ppm koncentrációban képes kimutatni, de viszonylag nagy, 5–20%-os relatív bizonytalansággal. Kvantitatív eredményeket kalibrációs mérések segítségével lehet nyerni.

I.b. Magspektroszkópiai módszerek

Az összetétel-vizsgáló módszerek másik csoportját alkotják az ún. aktivációs analitikai módszerek. Ezeknél a módszereknél a mintákat valamilyen külső részecskenyalábbal (leggyakrabban neutronnyalábbal) sugározzuk be. A neutronok befogódnak a minta atommagjába, gerjesztik azt, majd az atommagok által válaszként kibocsátott γ -, ritkábban a β - vagy α -sugárzást detektáljuk, a felvett spektrumból határozzuk meg a minta összetételét. A mérések alapjául szolgáló neutronbefogódás fizikai jelensége a **4. ábrán** látható.

Amikor egy vizsgálandó tárgyból vett, néhányszor 10 mg tömegű mintát egy kutatóreaktor aktív zónájában sugározzuk be, majd utólag vesszük fel a minta gammaspektrumát, (instrumentális) neutronaktivációról – (I)NAA-ról – beszélünk (Prudencio 2015). Amikor a besugárzás egy kivezetett neutronnyalábbal történik, és a gammaspektrumot a besugárással egyidőben vesszük fel, ún. prompt-gamma aktivációs analízisről (PGAA vagy PGNA) beszélünk. A neutronok nagy áthatóképessége miatt az aktivációs módszerek a minta egészére jellemző, ún. „bulk” információt adnak (Kasztovszky et al. 2009, Kasztovszky et al. 2022). Az egyes elemekre vonatkozó érzékenység az atommagok neutronbefogási hatáskeresztmetszetétől függ, és a periódusos rendszer elemei esetében (pl. H, B, Cl, Cd, Sm, Eu, Gd) kiugróan nagy lehet, más elemeknél (C, O, N, Sn, Pb) kicsi az érzékenység. A neutronos módszerek hátránya, hogy bizonyos besugárási körülmények között a vizsgált minta hosszú ideig radioaktív maradhat, és nem adható ki a laborból az indukált radioaktivitás lebomlásáig.

Az ún. neutronrezonancia-befogásos analízis (NRCA) az epitermikus, azaz a termikusnál nagyobb energiájú neutronok atommagba történő rezonanciaszerű befogásán, illetve a befogást követő elnyelési spektrum felvételén alapszik. A módszert kevés helyen alkalmazzák, Európában az IRMM-ben dolgozta ki Hans Postma és munkatársai a 2000-es évek elején. A kísérlethez az epitermikus neutronokat az IRMM ún. spallációs neutronforrása szolgáltatta. A módszer, hasonlóan a PGAA-hoz, nem igényel mintavételt, nagyobb tárgyak, pl. szobrok is behelyezhetők a kivezetett neutronnyalábbá. Az NRCA érzékenyebb a nagyobb rendszámú elemek kimutatására, így pl. kiválóan alkalmas fémek, rézötvetek vizsgálatára (Postma et al. 2004).

Egy speciális magspektroszkópiai módszer a Mössbauer-spektroszkópia (MS), amely vastartalmú mintákban a Fe kémiai környezetének, azaz vegyértékeinek, kötéseinek feltérképezésére alkalmas. Archeometriában elvétve alkalmazzák (Dzinavatonga et al. 2015, Ricciardi et al. 2018, Caterino et al. 2023).

I.c. Tömegspektrometriai módszerek

Az összetétel-meghatározás harmadik módja az ún. tömegspektrometria, amikor a vizsgált mintából egy kis mennyiséget (általában lézersugárral) elpárologtatunk, és a keletkező elektromos töltéssel rendelkező ionokat tömegszámuk alapján mágneses térben szétválogatjuk. A tömegspektrometria általában a minta kismértékű – legtöbbször szemmel nem látható – roncsolásával jár. A tömegspektrométerek jelenleg a legérzékenyebb (legkisebb kimutatási határú) elemanalitikai berendezések, amelyek izotópösszetétel meghatározására is alkalmasak (Márton & Csóka 2015).

I.d. Molekulaspektroszkópiái vagy rezgési spektroszkópiái módszerek

Az eddig ismertett analitikai módszerek mellett az archeometriai kutatásokban nagy szerepük van az ún. molekulaspektroszkópiái, más néven rezgési spektroszkópiái módszereknek. Ilyenek az infravörös (IR / FT-IR) spektroszkópia (Mihály et al. 2006, Boticelli et al. 2023, Wang et al. 2024) és a Raman-spektroszkópia (RS) (Mihály et al. 2006, Tóth et al. 2013, Jehlička & Culka 2022, Koochakzaei et al. 2023).

Az infravörös spektroszkópia ún. elnyelési módszer, ahol a gerjesztő infravörös fény a molekulák különböző rezgési és forgási állapotait gerjesztik, és a mintán áthaladó fény spektrumából a gerjesztési szinteknek megfelelő sávok hiányoznak. A módszer kvantitatívnak tekinthető, kalibráló mintasorozat mérésével ún. funkciós csoportok kimutatására alkalmas.

A Raman-spektroszkópia az ún. Raman-szórás jelenségén alapul. A gerjesztő lézertény a minta molekuláin részben rugalmasan, részben rugalmatlanul szóródik, a rugalmatlan szórásnak megfelelő energiakülönbséget a minta molekulái karakterisztikus sugárzás formájában kibocsátják, ez adja a Raman-spektrumot. A módszer csak kvalitatívnak, illetve félkvantitatívnak tekinthető, pontos mennyiségi meghatározásra nem alkalmas. Mindkét módszer alkalmas összetétel-vizsgálatra (molekulák, funkcionális csoportok azonosítására), valamint szerkezetvizsgálatra (pl. ásványok azonosítására).

Összetétel-vizsgálat megvalósítható a Raman-spektroszkópiához hasonló elven, neutronok rugalmatlan szórásával (INS) is (Festa et al. 2019).

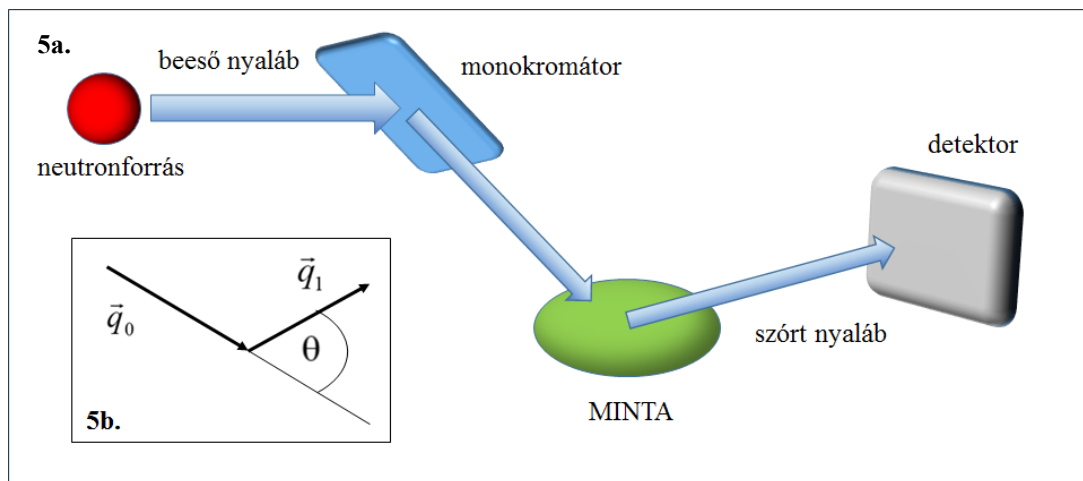
A fentebb tárgyalt atomi- és molekula-spektroszkópiái módszerek többsége megvalósítható szinkrotron alkalmazásával, ahol a gerjesztő sugárzás a szinkrotronokban gyorsított elektronok által kibo-

csátott szinkrotronsugárzás, amely az infravörös, látható, UV és röntgen-tartományba is eshet (Melelli et al. 2024). Ily módon megvalósított néhány fontos szinkrotronos technika: szinkrotronos infravörös spektroszkópia (SR-IR) (Cotte et al. 2009), szinkrotronos μ XRF (SR- μ XRF) (Bertrand et al. 2013), élközeli röntgenabszorpciós spektroszkópia (XANES) (Gianoncelli et al. 2020). A szinkrotronos módszerek előnye, hogy a szinkrotronsugárzás nagy intenzitású, és kisméretre leszküthető, ezáltal a minták kisebb mennyisége nagyobb érzékenységgel elemezhető. Ugyanakkor, hátránya, hogy a nagy intenzitású röntgensugárzás könnyebben tönkre teheti a mintát, ezért értékes minta vizsgálata különleges figyelmet igényel. A vizsgálatokat lehetővé szinkrotronok különleges technikai és biztonsági előírásokat igénylő nagyberendezések, amelyek a világon csak kevés helyen hozzáférhetők az alkalmazott kutatások számára (Quartieri 2015).

II. Szerkezetvizsgálati módszerek

A különböző szerkezetvizsgáló módszerek közös jellemzője, hogy valamilyen periodikus, atomi vagy molekuláris rácsszerkezettel rendelkező mintára beeső hullám (röntgen- vagy neutronsugárzás), a rács egyes pontjain, az ún. szórócentrumokon rugalmas vagy rugalmatlan szórást szenved, azaz a terjedés iránya, esetenként a hullámhossza is megváltozik. Ha a szórócentrumok mérete összemérhető a beeső hullámhosszal, az elhajlást (diffrakciót) szenvedő hullámok a szóródást követően bizonyos irányokban erősítést, illetve gyengítést mutatnak. Az így kialakult diffrakciós spektrumot felvéve, vagy a szórási képet rögzítve a vizsgált minta atomi vagy molekuláris méretű rendezettségére következtethetünk. A neutronszórásos kísérletek elvi elrendezése az **5a.** és **5b. ábrán** látható. A kisszögű neutronszórással (SANS) jellemzően a 0,5–200 nm mérettartományú periodicitást vizsgálhatjuk (Len 2006; Barbera et al. 2013). Az ún. repülési idő-neutrodiffrakcióval (TOF-ND) egy nagyságrenddel kisebb, 0,07–0,35 nm méretű szerkezeti tulajdonságokat vizsgálhatunk (Sánta 2006). Kockelmann és munkatársai a neutron-diffrakciót továbbfejlesztve egy új képalkotó eljárást fejlesztettek ki az 2000-es évek elején felében (Kockelmann & Kirfel 2006).

Szerkezetvizsgálatra nem csak neutronnalábot, hanem röntgennyalábot is használhatunk. Valójában a röntgendiffrakciót (XRD) jóval több laboratóriumban használják, mint a neutrodiffrakciót (Bajnóczi et al. 2009, Kristály & Kovács 2011).



5a ábra: A neutronszórásos vizsgálatok kísérleti megvalósításának elvi elrendezése. A szórási kísérlet során a neutronok hullámtulajdonságát használjuk ki. A beeső nyaláb különböző hullámhosszú (energiájú) neutronok keveréke, amelyet először monokromatizálunk, azaz kiválasztunk a nyalábból egy adott hullámhosszt. A továbbított monokromatikus nyaláb neutronjai a minta nanoméretű inhomogenitásain szóródnak, így a kétdimenziós (2D) detektorfelületen egy, az anyagra jellemző szórási intenzitás eloszlást kapunk. Izotróp esetben (azonos szöghöz minden irányban azonos intenzitás tartozik), az azonos szögben szóródott intenzitásokat összegezzük és a szórásvektor függvényében ábrázoljuk, így a minta szerkezetéről kapunk információt. Lásd még: Len A. (2006).

5b ábra: A hullámszám-vektor megváltozása a szóráson. A hullámokat általánosan jellemezhetjük egy hullámszám vektorral (q), amelynek nagysága a hullámhossz reciproka ($1/\lambda$), iránya megegyezik a hullám terjedési irányával.

Fig. 5a: Principal design of the neutron scattering experiments. During the scattering experiment, we exploit the wave properties of neutrons. The incident beam is a mixture of neutrons of different wavelengths (energies), which we first monochromatize, i.e., select a specific wavelength from the beam. The neutrons in the transmitted monochromatic beam scatter on the nanoscale inhomogeneities of the sample, thus providing a scattering intensity distribution path on a two-dimensional (2D) detector surface, which is characteristic of the nanoscale structure. In the isotropic case (the same intensity corresponds to the same angle in all directions), we sum the intensities scattered at the same angle and plot them as a function of the scattering vector, thus obtaining information about the sample. See also: Len A. (2006).

Fig. 5b: Change of the wavenumber vector during scattering. Waves can generally be characterized by a wave number vector (q), whose magnitude is the reciprocal of the wavelength ($1/\lambda$) and whose direction is the same as the direction of wave propagation.

Az XRD által vizsgált mérettartomány jellemzően 0,1–1 nm (10^{-10} – 10^{-9} m). Ismert az ún. kisszögű röntgenszórásos (SAXS) technika is, jellemzően 1–400 nm mérettartományok vizsgálatára, amely technika analóg a SANS technikával.

Fontos különbség a neutronos és röntgenes vizsgálati módszerek között a neutronok és a röntgensugárzás eltérő behatolási mélysége a mintába, amelynek mértékét általánosan a minta anyaga és az eltérő tulajdonságú sugárzástípusok közötti kölcsönhatások határozzák meg. Így a neutron-sugárzás jellemzően akár néhány cm mélységben is behatolhat a mintába, a röntgensugárzás csupán néhányszor 10–100 μm (10^{-5} – 10^{-4} m) mélységig képes behatolni. Ebből következik, hogy a „neutronos” módszerek inkább alkalmasak a tárgy egészét jellemző „bulk” tulajdonságok mérésére, míg a

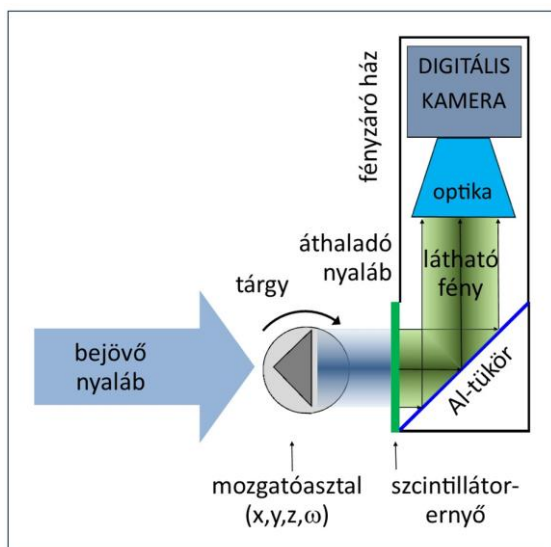
röntgenes módszerek csupán a felszín közeli részek, vagy vékony mintának a vizsgálatára alkalmasak.

III. Képkötés

A minták mikroszkopikus megjelenését, szerkezetét különböző mikroszkopiai technikákkal lehet vizsgálni, amelyek felbontóképessége jelentősen eltérhet. Egy optikai rendszer felbontóképességét a vizsgáló sugár hullámhossza határozza meg, az Abbe-féle törvény szerint:

$$d = 0,61 \cdot \frac{\lambda}{n \cdot \sin\theta}$$

Ahol d a feloldási vagy felbontási határ, λ a vizsgáló fény (elektronsugár) hullámhossza, n a közeg adott hullámhosszra vonatkozó törésmutatója, θ a lencse félnyílásszöge (apertúra).



6. ábra: A neutrontomográfia megvalósítására alkalmas kísérleti berendezés elvi felépítése. A bejövő neutronnyaláb egy része áthalad a vizsgálandó tárgyon, más része elnyelődik benne. Az áthaladó neutronokat egy szcintillátor ernyő látható fényre konvertálja, amit egy alumínium tükör segítségével az érzékelő digitális kamerába továbbítunk. A tárgy mozgásával meg tudjuk alkotni annak háromdimenziós képét. Lásd még: Szentmiklósi et al. (2017).

Fig. 6.: Principal design of the experimental apparatus for neutron tomography. Part of the incoming neutron beam passes through the object being examined, while the rest is absorbed by it. The passing neutrons are converted into visible light by a scintillator screen, which is then transmitted to the sensor's digital camera via an aluminium mirror. By moving the object, we can create a three-dimensional image of it. See also: Szentmiklósi et al. 2017.

Az optikai mikroszkópok (OM) látható fényrel működnek, a legjobb elérhető felbontásuk 200 nm. A transzmissziós elektronmikroszkóp (TEM) egy, a vékonyított mintán áthaladó elektronnyalábbal alkotja meg a képet. Jellemző felbontása 0,1–0,2 nm.

A pásztázó elektronmikroszkóp (SEM) a mintáról szekunderelektron-nyalábbal (SE) alkot képet, segítségével a minta felületét lehet letapogatni. Jellemző felbontása 1–20 nm. Amint az korábban szerepelt, a pásztázó elektronmikroszkópot energiadiszperzív elemanalitikai feltétellel lehet kiegészíteni (SEM-EDX), ekkor a visszaszórtelektron-kép (BSE) segítségével a kémiai különbségek is megjelölhetők.

A makroszkopikus képalkotási vizsgálati technikák alapelve, hogy az átvilágító sugárzás az átvilágított tárgy méretétől (vastagságától) és anyagi minőségétől függően különböző mértékben gyengül a tárgyon való áthaladást követően. Ha a tárgy

mögött valamilyen, az adott sugárzásra érzékeny ernyővel, detektorral érzékeljük az átmenő sugárzást, megkapjuk a tárgy szürkeárnyalatos képét, ahol az eltérő árnyalatok a különböző elnyelőképeségű részeket reprezentálják. Egy jellemző, neutronos képalkotást megvalósító kísérleti elrendezés látható a **6. ábrán**.

Az átvilágító sugárzás általában röntgen- vagy neutronsugárzás. A kettő közötti lényeges különbség, hogy az elnyelő közeggel létrejövő eltérő jellegű kölcsönhatásuk miatt a kétféle átvilágítás a tárgy más-más részleteit mutatja meg. Az atomi elektronhéjjal kölcsönható röntgensugárzás jobban gyengül a sok elektront tartalmazó, nagyrendszámú atomok (tipikusan fémek) esetén, míg az atommaggal kölcsönható neutronsugárzás gyengülése nem mutat ilyen tendenciát, akár egy elem izotópjaira is lehet nagyon eltérő mértékű. Továbbá a kisrendszámú, pl. hidrogén- vagy bórtartalmú anyagok is hatékonyan gyengítik. Ezáltal a neutronos képalkotás jól alkalmazható hidrogén/víz kimutatására (Kis et al. 2017).

A kétdimenziós képalkotást radiográfiának, a háromdimenzióst tomográfiának hívjuk. A számítógép által vezérelt röntgenes képalkotás a CT, a magmágneses rezonancia elvén működő képalkotás az MRI. Bár utóbbi két technika inkább az orvosi diagnosztikában használatos, alkalmazhatók örökségtudományi vizsgálatokban is (Longo et al. 2022, Moricca et al. 2023).

A képalkotást elemanalízissel kombinálva 2D-s vagy 3D-s elemterképeket tudunk felvenni. Jelenleg kevés ilyen gyakorlati megvalósítás (pl. PGAI) érhető el, továbbá egy-egy minta részletes elemterképének az elkészítése általában időigényes feladat (Kasztovszky & Belgya 2006; Kis et al. 2008).

A képalkotási technikák legfontosabb, a felhasználókat érintő, jellemzője az elérhető felbontás, azaz két egymástól megkülönböztethető képpont legkisebb távolsága. Egy képalkotó berendezés, módszer (mikroszkóp, radiográfiás vagy tomográfiás berendezés) felbontása több tényezőtől, a sugárzás fajtájától, valamint a technikai megvalósítástól is függ. Általában a röntgenes módszerekkel jobb felbontás érhető el, mint a neutronos módszerekkel (Mannes et al, 2017; Szentmiklósi et al. 2017).

Összefoglalás

Az archeometriában – tágabb értelemben, az örökségtudományban – már a kezdetektől állandó törekvés volt a minél korszerűbb analitikai és képalkotási módszerek felhasználására. Hasonló fejlődés figyelhető meg az orvosi diagnosztikai módszerek tekintetében. Míg az orvosi diagnosztikában az elsődlegesen megőrzendő érték a páciensek egészsége, az örökségtudomány egyedi-

sége a társadalmi szempontból értékes műtárgyak vizsgálatában rejlik.

A cikkben tárgyalt technikákat három fő csoportra osztottam: összetétel mérésére, szerkezetvizsgálatra és képalkotásra alkalmas módszerek. Ugyanakkor, pl. az összetételvizsgáló módszereket képalkotással társítva, inhomogén tárgyak 2D és 3D elemtérképeit lehet megalkotni.

A különböző összetétel-vizsgáló módszerek körében a fejlődés iránya a nagyobb érzékenység, egyre több kimutatható elem és izotóp irányába mutat. Lényeges az egyre kisebb anyagmennyiségek felszíni vagy térfogati elemzése, de nagyobb anyagtömbök átlagos összetétel-adataira is szükség van. A szerkezetvizsgálati, illetve a képalkotó technikák körében is a legfontosabb paraméter az adott módszer minél jobb térbeli felbontása.

A különböző vizsgálati módszerek fontos tulajdonsága a vizsgáló „szonda” behatolási mélysége a mintába. Ha a vizsgáló „szonda” pl. egy töltött részecskéből álló proton- vagy elektronnaláb, a minta atomjainak Coulomb-taszítása miatt a nyaláb behatolási mélysége 1–10 µm nagyságrendű. Hasonlóan, a kisenergiás elektromágneses sugárzást alkalmazó módszerek is csak 1 mm-nél kisebb mintavastagságon képesek áthatolni. Ténylegesen nagy behatolási mélységet, azaz „tömbi”, más szóval „bulk” elemzést csupán a elektromos töltés nélküli neutronokkal lehet megvalósítani. A neutronok valóban eljutnak a vizsgált minta néhány centiméter mély rétegeibe is. Hasonlóan, a tárgyak „átvilágítására”, azaz 2D, 3D képalkotásra használt nagyenergiás röntgensugárzás képes áthatolni több cm vastag anyagmennyiségen.

Az archeometriával foglalkozó „műszeres” szakemberek a legtöbbször magabiztosan állítják, hogy az általuk alkalmazott technika abszolút roncsolásmentes. A roncsolásmentesség azonban sosem magától értetődő. Bizonyos esetekben kísérletileg kell ellenőrizni, hogy a különböző típusú (elektromágneses, elektron-, proton- vagy neutron-) és különböző ideig tartó besugárzás valóban nem okoz-e szemmel látható vagy mikroszkopikus változást a vizsgált mintákban (pl. pigmentekben, Kasztovszky et al. 2025).

A neutronos vizsgálatok esetén külön nagy figyelmet kell fordítani a vizsgált minták esetleges felaktiválódására. A neutronos besugárzások következtében a tárgy anyagának indukált radioaktivitása elérhet olyan mértéket, aminél nem biztonságos a tárggyal való közvetlen érintkezés. Ilyen esetben a vizsgálatot végző sugárvédelmi szakember köteles a tárgyat biztonságosan tárolni, mindaddig, amíg az indukált radioaktivitás mértéke biztonságossá – gyakorlatilag nullává – válik. Más fajta (proton-, elektron-, röntgen-) besugárzás hatására a vizsgált tárgyakban egyáltalán nem keletkezik indukált radioaktivitás.

A felhasználók számára nem elhanyagolható szempont egy-egy vizsgálati módszer költségessége, hozzáférhetősége. A nagyberendezésekkel (kutatóreaktor, gyorsító, szinkrotron) megvalósítható vizsgálatok, bár nagy pontosságú, részletes eredményeket szolgáltatnak, fajlagosan drágák, és a mindennapos régész gyakorlatban nehezen hozzáférhetőek, pl. Európában és a tengeren túl is csak néhányszor tíz ilyen kutatóközpont létezik, és ezek közül sem mindenhol foglalkoznak örökségtudománnyal.

Ezzel szemben egyre népszerűbbek a hordozható műszerek (hXRF, hordozható IR-, Raman-spektrométer, LIBS), amelyek könnyen felállíthatók és működtethetők ásatáson, terepen vagy múzeumban. Gyorsan adnak esetleg kisebb pontosságú, de gyakorlati kérdések eldöntéséhez megfelelő eredményt, ugyanakkor használatuk kevesebb műszaki ismeretet és biztonsági előírást igényel.

Az archeometriában a sikeres kutatómunka mindig a megfelelő kísérleti vizsgálati módszerek észszerű megválasztásán és alkalmazásán múlik. Nagyszámú minta elemzésénél az adatok helyes értelmezéséhez elengedhetetlen statisztikai módszerek, illetve gépi tanulás (machine learning) alkalmazása (Towarek et al. 2024).

Szerző tudományos közreműködése

Kasztovszky Zsolt Eredeti kézirat.

Köszönetnyilvánítás

Köszönöm Len Adélnak az **5a-b. ábra** elkészítésében nyújtott segítséget, valamint Kis Zoltánnak a **6. ábra** rendelkezésre bocsátását.

Irodalomjegyzék

AMIRHAJLOO, S., EMAMI, M., AGHALIGOL, D. & GOHORTI, R.R. (2020): Preliminary studies on polychrome luster tiles excavated from Qal'eh Dokhtar in Kerman by X-ray, SEM-EDX and micro-PIXE spectroscopy; Insight into a new production center of lusterware in Southeast of Iran. *Journal of Archaeological Science: Reports* **33** 102456. <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2020.102456>

BAJNÓCZI, B., TÓTH, M., DOBOSI, G., BALLA, G. & CSONTOS, K. (2009): Ónmázas kerámiák technológiai jellegzetességeinek kimutatása Giovanni di Nicola Manzoni majolika tintatartójának példáján. *Archeometriai Műhely* **6/1** 81–94.

BARBERAA, G., BARONE, G., CRUPI, V., LONGO, F., MAISANO, G., MAJOLINO, D., MAZZOLENI, P., TEIXEIRA, J. & VENUTI, V. (2013): Small angle neutron scattering study of ancient pottery from Syracuse (Sicily, Southern Italy). *Journal of Archaeological Science* **40** 983–991. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2012.09.021>

- BENDŐ, Zs., OLÁH, I., PÉTERDI, B., SZAKMÁNY, Gy. & HORVÁTH, E. (2013): Csizolt kőszkzök és ékkövek roncsolásmentes SEM-EDX vizsgálata: lehetőségek és korlátok. *Archeometriai Műhely* **10/1** 51–66.
- BERTRAND, L., THOURY, M. & ANHEIM, E. (2013): Ancient materials specificities for their synchrotron examination and insights into their epistemological implications. *Journal of Cultural Heritage* **14** 277–289. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2012.09.003>
- BOTTICELLI, M., RISDONNE, V. & YOUNG, C. (2023): Enhancement of protein detection on cultural heritage samples after SYPRO™ Ruby staining by optical microscopy and micro-FTIR spectroscopy. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy* **302** 123067. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2023.123067>
- BRAIDY, N., BÉCHU, A., DE SOUZATERRA, J. C. & PATIENCE, G.S. (2020): Experimental methods in chemical engineering: Transmission electron microscopy – TEM. *Canadian Journal of Chemical Engineering* **98** 628–641. <https://doi.org/10.1002/cjce.23692>
- BUTALAG, K., CALCAGNILE, L., QUARTA, G., MARUCCIO, L. & D'ELIA, M. (2008): PIXE analysis of obsidian tools from radiocarbon dated archaeological contexts. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B* **266** 2353–2357.
- CALEY, C.R. (1951) Early history and literature of archaeological chemistry. *Journal of Chemical Education* **44** 120–123.
- CATERINO, S., PAJER, N. & CRESTINI, C. (2023): Iron-galls inks: preparation, structure and characterisation. *Microchemical Journal* **185** 108258. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2022.108258>
- COTTE, M., DUMAS, P., TANIGUCHI, Y., CHECROUN, E., WALTER, P. & SUSINI, J. (2009): Recent applications and current trends in Cultural Heritage Science using synchrotron-based Fourier transform infrared micro-spectroscopy. *Comptes Rendus Physique* **10** 590–600. <https://doi.org/10.1016/j.crhy.2009.03.016>
- CSEDREKI, L. & DANI, J. (2011): A Hencidai rézkori aranykincsen végzett PIXE vizsgálatok tanúságai. *Archeometriai Műhely* **8/4** 285–292.
- DACCÀ, A., PRATI, P., ZUCCHIATTI, A., LUCARELLI, F., MANDO, P. A., GEMME, G., PARODI, R. & PERA, R. (2000): Combined PIXE and XPS analysis on republican and imperial Roman coins. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B* **161–163** 743–747. [https://doi.org/10.1016/S0168-583X\(99\)00965-9](https://doi.org/10.1016/S0168-583X(99)00965-9)
- DRAN, J-C., SALOMON, J., CALLIGARO, T. & WALTER, P. (2004): Ion beam analysis of art works: 14 years of use in the Louvre, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B* **219–220** (2004) 7–15. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2004.01.019>
- DZINAVATONGA, K., BHARUTH-RAM, K. & MEDUPE, T. R. (2015): Mössbauer spectroscopy analysis of valence state of iron in historical documents obtained from the National Library of South Africa. *Journal of Cultural Heritage* **16** 377–380. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2014.06.004>
- FESTA, G., ANDREANI, C., BALDONI, M., CIPOLLARI, V., MARTÍNEZ-LABARGA, C., MARTINI, F., RICKARDS, O., ROLFO, M. F., SARTI, L., VOLANTE, N., SENESI, R., STASOLLA F.R., PARKER, S.F., VASSALO A.R., MAMEDE, A.P., BATISTA DE CARVALHO, L. A.E. & MARQUES, M.P.M. (2019): First analysis of ancient burned human skeletal remains probed by neutron and optical vibrational spectroscopy. *Science Advances* **5** eaaw1292. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aaw1292>
- FITZGERALD, S. (2008): Non-destructive micro-analysis of historical artefacts using micro-XRF. *Archeometriai Műhely* **5/3** 75–80.
- GIANONCELLI, A., RANERI, S., SCHOEDER, S., OKBINOGLU, T., BARONE, G., SANTO-STEFANO, A. & MAZZOLENI, P. (2020): Synchrotron μ -XRF imaging and μ -XANES of black-glazed wares at the PUMA beamline: Insights on technological markers for colonial productions. *Microchemical Journal* **154** 104629. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2020.104629>
- JEHLIČKA, J. & CULKA, A. (2022): Critical evaluation of portable Raman spectrometers: From rock outcrops and planetary analogs to cultural heritage – A review. *Analytica Chimica Acta* **1209** 339027. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2021.339027>
- KASZTOVSZKY, Zs. & BELGYA, T. (2006): From PGAA to PGAI: from bulk analysis to elemental mapping. *Archeometriai Műhely* **3/2** 16–21.
- KASZTOVSZKY, Zs. & KUNICKI-GOLDFINGER, J. (2008): Újabb eredmények az üvegek archeometriai vizsgálatában prompt gamma aktivációs analízis segítségével. *Archeometriai Műhely* **5/3** 51–58.
- KASZTOVSZKY, Zs., T. BIRÓ, K., MARKÓ, A. & DOBOSI, V. (2009): Pattintott kőszkzök nyersanyagainak roncsolásmentes vizsgálata Prompt Gamma Aktivációs Analízissel. *Archeometriai Műhely* **6/1** 31–38.
- KASZTOVSZKY, Zs., MARÓTI, B., SZENTMIKLÓSI, L. & GMÉLING, K. (2022): Applicability of prompt-gamma activation analysis

to determine elemental compositions of silicate-based cultural heritage objects and their raw materials. *Journal of Cultural Heritage* **55** 356–368.

<https://doi.org/10.1016/j.culher.2022.04.011>

KASZTOVSZKY, Zs., BUCZKÓ, N.A., DÚZS, K., KOVÁCS, A., TAKÁCS, E., TÓTH, T., VÖLGYESI, P., WOJNÁROVITS, L. & MIHÁLY, J. (2025): Advantages and risks of using neutron and gamma irradiation for the diagnosis and preservation of heritage objects: Case studies at the Budapest Neutron Centre. *Radiation Physics and Chemistry* **241** 113552.

<https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2025.113552>

KIS, Z., SZENTMIKLÓSI, L., BELGYA, T., KASZTOVSZKY, Zs., KOCKELMANN, W., FESTA, G., KIRFEL, A., KUDEJOVA, P., SCHULZE, R., T. BIRÓ, K., DÚZS, K., HAJNAL, Zs., VISSER, D. & AZ ANCIENT CHARM EGYÜTTMŰKÖDÉS (2008): Radiográfia által irányított Prompt-Gamma Aktivációs Analízis és Neutron Diffrakciós mérések az Ancient Charm projekt számára tervezett Fekete Dobozokon. *Archeometriai Műhely* **5/3** 59–64.

KIS, Z., SCIARRETTA, F. & SZENTMIKLÓSI, L. (2017): Water uptake experiments of historic construction materials from Venice by neutron imaging and PGAI methods. *Materials and Structures* **50** 159. <https://doi.org/10.1617/s11527-017-1004-z>

KLEMENC, S., BUDIČ, B. & ZUPAN, J. (1999): Statistical evaluation of data obtained by inductively coupled plasma atomic emission spectrometry (ICP-AES) for archaeological copper ingots. *Analytica Chimica Acta* **389** 141–150. [https://doi.org/10.1016/S0003-2670\(98\)00841-1](https://doi.org/10.1016/S0003-2670(98)00841-1)

KOCKELMANN, W., & KIRFEL, A. (2006): Neutron Diffraction Imaging of Cultural Heritage Objects. *Archeometriai Műhely* **3/2** 1–15.

KOCHAKZAEI, A., MAGHSOUD, E.M. & BIDGOLI, B.J. (2023): Non-invasive imaging and spectroscopy techniques for identifying historical pigments: a case study of Iranian manuscripts from the Qajar era. *Heritage Science* **11** 157. <https://doi.org/10.1186/s40494-023-01011-5>

KRISTÁLY, F. & KOVÁCS, P. (2011): Régészeti és előzetes archeometriai vizsgálatok a 2008-as ásatásban Hejőpáiban feltárt kelta temető 3. lelőhelyének kerámia anyagán. *Archeometriai Műhely* **8/3** 251–268.

LEN, A. (2006): A kisszögű neutronszórás archeometriai alkalmazási lehetőségei. *Archeometriai Műhely* **3/2** 27–31.

LONGO, S., CORSARO, C., GRANATA, F. & FAZIO, E. (2022): Clinical CT densitometry for wooden cultural heritage analysis validated by

FTIR and Raman spectroscopies. *Radiation Physics and Chemistry* **199** 110376.

<https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2022.110376>

MANNES, D., SCHMID, F., FREY, J., SCHMIDT-OTT, K. & LEHMANN, E. (2015): Combined Neutron and X-ray imaging for non-invasive investigations of cultural heritage objects. *Physics Procedia* **69** 653–660.

<https://doi.org/10.1016/j.phpro.2015.07.092>

MARÓTI, B., SZILÁGYI, V., HARSÁNYI, I., KASZTOVSZKY, Zs. & SZENTMIKLÓSI, L. (2020): Régészeti köeszközök és bronztárgyak vizsgálata hordozható készülékekkel. *Archeometriai Műhely* **17/3** 243–252.

MÁRTON, Zs. & CSÓKA, Á. (2015): Lézerindukált Plazmaspektroszkópia: az archeometriai és restaurátori elemanalitika gyors és hatékony eszköze. *Archeometriai Műhely* **12/1** 1–6.

MELELLI, A., MORGILLO, L., GOUDENHOOFT, C., MAGUERESSE, A., DURAND, S., QUILES, A., BEAUGRAND, J., CORTOPASSI, R., JAMME, F. & BOURMAUD, A. (2024): Revealing degradation mechanisms of archaeological flax textiles through the evolution of fibres' parietal polymers by synchrotron deep-UV fluorescence. *Polymer Degradation and Stability* **226** 110826.

<https://doi.org/10.1016/j.polyimdegradstab.2024.110826>

MIHÁLY, J., MINK, J. & HAJBA, L. (2006): Vértesszőlősi, alsó paleolitik korból származó állatcsontok vizsgálata FTIR és FT-Raman spektroszkópiai módszerekkel. *Archeometriai Műhely* **3/3** 15–18.

MORICCA, C., STAGNO, V., HAMZA, N. M., FAVERO, G. & CAPUAN, S. (2023): The High Potential of Micro-Magnetic Resonance Imaging for the Identification of Archaeological Reeds: The Case Study of Tutankhamun. *Heritage* **6** 7170–7180. <https://doi.org/10.3390/heritage6110375>

MUROS, V., ZACHARIAS, N. & HENDERSON, J. (2023): The composition and provenance of Late Bronze Age vitreous materials from Kefalonia, Greece. *Journal of Archaeological Science: Reports* **51** 104218.

<https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2023.104218>

PÉTERDI, B., SZAKMÁNY, Gy., JUDIK, K. & DOBOSI, G. (2009): Bazaltos andezit nyersanyagú szarmata szerszámkövek közettani és geokémiai vizsgálata (Üllő 5. lelőhely). *Archeometriai Műhely* **6/2** 43–60.

POSTMA, H., SCHILLEBEECKX, P. & HALBERTSMA, R.B. (2004): Neutron Resonance Capture Analysis of some genuine and fake Etruscan copper alloy statuettes. *Archaeometry* **46/4** 635–646.

<https://doi.org/10.1111/j.1475-4754.2004.00179.x>

PRUDÊNCIO, M.I. (2015): NAA applied to heterogeneous lithic archaeological artefacts - difficulties and advantages for provenance establishment. *Archeometriai Műhely* 12/4 243–248.

PUROWSKI, T., SYTA, O. & WAGNER, B. (2019): Mycenaean and Egyptian faience beads discovered in southern Poland. *Journal of Archaeological Science: Reports* 28 102023.

<https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2019.102023>

QUARTIERI, S. (2015): Synchrotron Radiation in Art, Archaeology and Cultural Heritage. In: MOBILIO, S., BOSCHERINI, F. & MENEGHINI, C. (eds.), *Synchrotron Radiation*. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-55315-8_26

RICCIARDI, P., NODARI, L., GUALTIERI, S., DE SIMONE, D., FABBRI, B. & RUSSO, U. (2008): Firing techniques of black slipped pottery from Nepal (12th-3rd century B.C.): The role of Mössbauer spectroscopy. *Journal of Cultural Heritage* 9 261–268.

<https://doi.org/10.1016/j.culher.2007.12.003>

SÁNTA, Zs. (2006): Nagyfelbontású repülési idő diffraktométer a Budapesti Neutron Kutatóközpontban. *Archeometriai Műhely* 3/2 22–26.

ŠMIT, Ž. (2015): Metal analysis with ion-beam methods. *Archeometriai Műhely* 12/4 255–262.

SZENTMIKLÓSI, L., KIS, Z., BELGYA, T., MARÓTI, B., HORVÁTH, L.Z., & PAPP, M. (2017): Roncsolásmentes képalkotás neutronokkal és röntgensugárással a Budapesti Neutron Centrumban. *Fizikai Szemle* 67/7–8 240–244. http://real-j.mtak.hu/8724/36/FizSzem-2017_07-08.pdf#page=26

TÓTH, T.F. & MÁRTON, Zs. (2010): Műtárgyak vizsgálata LIBS spektroszkópiával. *Archeometriai Műhely* 7/2 141–148.

TÓTH, Zs., MIHÁLY, J., TÓTH, A.L. & ILON, G. (2013): Vibrational spectroscopic and scanning electron microscopic study of pigment raw materials and painted ceramics excavated at Szombathely-Oladi plató, Hungary. *Archeometriai Műhely* 10/2 103–110.

TOWAREK, A. HALICZ, L., MATWIN, S. & WAGNER, B. (2024): Machine learning in analytical chemistry for cultural heritage: A comprehensive review. *Journal of Cultural Heritage* 70 64–70.

<https://doi.org/10.1016/j.culher.2024.08.014>

WANG, F., HUANG, J. & ZHOU, Q. (2024): Water-salt transport modeling and sulfate erosion mechanisms in cultural heritage under microclimate. *Journal of Building Engineering* 98 111393. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.111393>

