

Zrínyi-Újvár ostromának műszeres kutatása

A tudomány világában zajló fejlődési folyamatok hatására napjainkban egy érdekes jelenség figyelhető meg, aminek eredményeként egyszerre érzékelhetjük az egyes tudományágakon belüli specializálódást és annak következtében kialakuló szeparációt, ugyanakkor az interdiszciplináris jelleg (tudományágak összefonódása) erősödése is megfigyelhető, ami általában különböző tudományos eredmények más-más tudományterületen történő alkalmazásában érhető tetten. A számítógépes adatfeldolgozás és vizualizáció, a távközléstechnika nyújtotta kommunikációs lehetőségek, valamint a kifinomult távérzékelési és jelfeldolgozási technológiák új szemléletet követeltek és követelnek meg az élet csaknem minden területén. Ennek hatására az olyan évszázados hagyományokkal és jól bevált kutatási módszerekkel rendelkező társadalomtudományi területek is megújultak, mint a régészet vagy a lényegesen rövidebb múltra visszatekintő interdiszciplináris jellegű hadszíntérkutatás, amely ma már szemmel láthatóan törekszik korunk technikai vívmányainak minél magasabb szintű hasznosítására.

A tanulmány egyik kiemelt célja olyan különböző mérési elveken alapuló technikák, módszerek bemutatása és azok potenciális felhasználási területeinek ismertetése, amelyek alkalmasak a talajfelszín bolygatása nélkül információkat szolgáltatni a talajban található, régészeti szempontból érdekes anomáliák felderítése, vizsgálata, értékelése és értelmezése céljából. Ezen vezérfonal mentén a gyakorlatban alkalmazott fémkereső használatán, illetve a magnetométeres, talajradaros vagy talajellenállás-mérésen alapuló eljárásokat, azok alkalmazási korlátait, valamint a felmerülő problémák egyes megoldási alternatíváit mutatjuk be.

A fentiek gyakorlatban történő szemléltetésére a kutatócsoportunk által az elmúlt években végzett vizsgálatok, valamint azok tapasztalatainak, eredményeinek ismertetésekor kerül sor, amelyekhez a Zrínyi-Újvár ostromának helyszínén végzett munkálatok mérnöki-műszaki támogatása során jutottunk. A felmerült anomáliák célirányos kezelésével sikerült növelni a régészeti munkálatok hatékonyságát, azonban a kutatások során számos olyan egyéb területet is sikerült azonosítani, amelyen az eredmények szintén hasznosíthatók lehetnek, mint például a műszaki földmunkálatokat megelőző talajfelmérési feladatok, közutak, közműnyomvonalak ellenőrzése során, vagy esetlegesen az árvízi védekezési munkálatok kapcsán a töltések és gátak állapotának felmérésekor.

Az elvégzett mérések háttéréről és körülményeiről az alábbi információkat érdemes megjegyezni, mielőtt rátérnénk az egyes módszerek vizsgálatára. Kutatócsoportunk – amelynek tagjai alapvetően a Nemzeti Közszolgálati Egyetem Hadtudományi és Honvédtisztképző Karának, illetve a jogelőd Zrínyi Miklós Nemzetvédelmi Egyetem egykori és jelenlegi oktatói – 2005 óta végez hadszíntérkutatási munkálatokat a jelenlegi horvát-magyar határ közvetlen közelében fekvő területen, ahol egykoron a költő és hadvezér Zrínyi Miklós

épített várat muraközi birtokai védelmében. A környék kedvező domborzati és egyéb természeti adottságait is hatékonyan kihasználva felépített, stratégiai jelentőségű döng-öltagyag-erődítmény, Zrínyi-Újvár maradványainak, valamint az 1664-es török ostrom nyomainak feltárása évek óta szakaszosan zajlik. A kutatómunka keretein belül mostanáig számos roncsolásmentes módszert volt lehetőségünk kipróbálni, amelyek során elegendő tapasztalatot sikerült szerezni azok alkalmazhatóságának és hatékonyságának vizsgálatához. A környék földrajzi adottságaiból kifolyólag elsősorban domboldalon, sűrű aljnövényzettel benőtt területen kellett a szükséges felderítő munkát és a méréseket elvégezni. A kutatás sajátossága volt, hogy történelmi ismereteink alapján harci cselekmények kizárólag a vár török ostroma idején voltak a területen, így az előkerült leletek kora nagy biztonsággal volt beazonosítható. A felszint ugyanakkor az 1950-es években katonai műszaki munkálatokkal több helyen megbolygatták (határvédelmi erődítés), míg a csatatéren évtizedek óta mezőgazdasági művelés (szőlőművelés) is zajlik, ezért ezekből az időszakokból származó tárgyakat, eszközöket is találtunk.

Vizsgálati módszerek

A hadviselés története során használt szűrő-, vágó- és lőfegyverek, tüzérségi és egyéb harci eszközök, lövedékek, védőfelszerelések folyamatosan fejlődtek az adott kor technológiai színvonalának megfelelően annak érdekében, hogy támadó és védelmi funkciójuk hatékonysága növekedjen. Az egyik legfontosabb közös tulajdonságukat alapanyaguk jelenti, hiszen előállításuk során a szakemberek mindig arra törekedtek, hogy fizikailag ellenálló, kemény és viszonylag könnyen alakítható anyagokat használjanak, amely követelménynek alapvetően a fémek feleltek meg leginkább. Ebből is következik, hogy a hadszíntérkutatás egyik legfontosabb kellékének tekintjük a különböző típusú fémkereső eszközöket, amelyek természetesen a korabeli fegyverzeti anyagokon kívül minden más fémtárgy kimutatására is alkalmasak lehetnek megfelelő beállítások esetén, így ékszerek, dísz tárgyak, pénzérmék, szerszámok és egyéb használati tárgyak helyzetének meghatározására egyaránt használhatók.

Ugyanakkor a talajban elhelyezkedő tárgyak, kőzetek vagy más „rendelleneségek” felderítésének számos egyéb módja is létezik. Az alkalmazható módszerek és eszközök csoportosíthatók többek között a keresett objektum anyagi jellemzői (például vezetőképesség), fizikai méretei vagy az elhelyezkedés mélysége alapján egyaránt. Anyagszerkezet szerinti csoportokat képezve beszélhetünk kimutatható fémtartalommal rendelkező leletekről vagy geológiai képződményekről, amelyek lokalizálására használhatunk fémkeresőket, mágnesezhető célobjektumok esetében ezenfelül végezhetünk magnetométeres vizsgálatokat, míg nem mágnesezhető fémtárgyak kimutatására talajjellenállás-méréseket. Nem fémes objektumok, illetve jelenségek esetén a talajjellenállás-mérés mellett lehetőségünk van talajradarral végzett mérések végrehajtására is, de segítségünkre lehetnek akár a szeizmikus, LIDAR¹-os felmérések vagy levegőből készített ortofotók, amelyek többek

¹ Light Detection and Ranging – lézeralapú távérzékelés (lézerradar).

között alkalmasak fotogrammetriai alapú 3D modellalkotásra, vegetációelemzésre vagy hőtérfkép² létrehozására.

További értékelési szempont lehet a felmérés sebessége, azaz az egy nap alatt átvizsgálható terepszakaszmérete, az egyes mérések során átvizsgálható terepszakaszmérete vagy talajmélysége, a mérés pontossága, felbontása (horizontális, vertikális). Fontos lehet ugyanakkor a mérésekhez szükséges szaktudás mértéke (a műszer használatához, eredmények kiértékeléséhez), a kiértékelés sebessége (in-situ vagy hosszadalmas utómunkát igényel), a használatot befolyásoló/korlátozó tényezők,³ a szenzorintegráció lehetősége (több szenzor eredményeinek együttes elemzése), a szoftveres utómunkák lehetőségei (például szűrés, statisztikai értékelés), illetve az egyes mérések során, az alkalmazott technológia platform- és gyártófüggetlensége is.

A különböző geofizikai méréseket már hazánkban is el lehet végezteni szolgáltatásként, így nem kell beszerezni az ahhoz szükséges és legtöbbször igen költséges speciális eszközöket, illetve szoftvereket. A régészeti célú felhasználás azonban sokkal többet jelent, mint a műszerek szakszerű használatát. Nagyon fontos a különböző szakterületeken jártas szakemberek közötti hatékony együttműködés, mivel egy konkrét régészeti probléma eredményes megoldásához feltétlenül szükséges műszeres vizsgálatok körének meghatározása komplex feladat. A tézisalkotást követően pontosan kell definiálni a felmérés célját, majd azonosítani a felhasználható technológiákat. Fontos tudatában lenni annak, hogy ezek a mérési módszerek önmagukban nem határolják be egyértelműen a földben található tárgyat, az anomáliát kiváltó objektumot, azaz leegyszerűsítve nem „láthatunk” segítségükkel a föld alá, a műszerek jellemzően egy vagy több fizikai tulajdonságot képesek csak mérni. Egy vizsgálati folyamat során több ízben megismételt mérések eredményeit felhasználva lehet statisztikai elemzést végezni, amely alapján valószínűsíthető egy-egy anomália kiváltó oka. A mérések kiértékelése hatékonyságának javítása, illetve a hibás mérések elkerülése érdekében célszerű előzetesen referenciaméréseket végezni ismert paraméterekkel rendelkező területen, illetve céltárgyakkal. Ezek során érdemes a vizsgált terepszakaszméreteit és a keresett leleteket (például tárgyak, építmények, maradványok) jellemzőit ismert objektumok segítségével, kontrollált körülmények között végzett mérésekkel azonosítani. A referenciamérések elvégezhetők korábban már vizsgált vagy feltárt lelőhelyeken, illetve általunk kialakított „gyakorló pályán”. Ezek során célszerű lehet szimulálni a különböző lehetséges zavaró hatásokat (például rádiófrekvenciás zavarok, közművezetékek), illetve a felszíni szemét, eltérő összetételű talajszerkezetek, különböző mélységekben elhelyezett tárgyak, objektumok mérési eredményeire gyakorolt hatását. A mérési elveket jellemzően adott vizsgálatokhoz érdemes igazítani, és a tesztek során mérni a „fals pozitív”, „fals negatív” eredmények és a tárgy/objektum helyes detekciójának valószínűségi paramétereit. Előzetes vizsgálatokat lehet végezni továbbá a detektálási mélység, tárgyméret, alapanyag és szelektivitás (föld alatti objektumok megkülönböztethetősége egymástól), valamint ezek kapcsolatának megállapítására, amelyek eredményeit később felhasználhatjuk a műszerek optimális kalibrációjához.

² Az eltérő összetételű, illetve bolygatott földszavak azonosíthatók segítségével, mivel az eltérő anyagi jellemzők miatt a felmelegedés vagy lehűlés gyorsabban vagy lassabban mehet végbe, így azonosítható az idegen anyag, illetve a földbolygatás ténye.

³ Időjárás, terepviszonyok, vegetáció stb.

A továbbiakban a Zrínyi-Újvár környékén végzett kutatómunka során általunk is alkalmazott eszközöket, technológiákat, illetve módszereket mutatunk be.

Fémkeresővel végrehajtott mérések

A fémkeresőket, a kezdeti pionírokat (Alexander Graham Bell, Gerhard Fischar) követően elsősorban a katonai alkalmazás lehetőségei miatt kezdték el fejleszteni még a második világháború idején, majd később – számtalan más technológiához hasonlóan – kezdtek el csak foglalkozni a polgári hasznosítás lehetőségeivel. A régészetben az első időkben a katonai célú műszereket alkalmazták, és csak később, a bővülő kereslet (igények) miatt specializálódott egyre több cég ilyen eszközök fejlesztésére.

A fémkeresők alkalmazására napjainkban már az élet számos területén találunk példákat, így az építőiparban az előzetes felmérések során többek között fémvezetékek, közművek és alépítmények keresésére, a fémbányászatban ércfelderítésre használják, de a biztonságtechnikában, illetve bűnüldözésben is számos területen hasznosítják a technológiában rejlő lehetőségeket. Fémkeresésre, illetve -detekcióra professzionális és háziilag készített eszközöket egyaránt alkalmazhatunk a rendelkezésre álló anyagi erőforrások függvényében. Kialakításukban és funkcionalitásukban ezek a műszerek sokszor egy adott célfeladathoz optimalizálva férhetők hozzá, de léteznek nagyobb szabadságfokkal rendelkező univerzális eszközök is szakértők általi felhasználásra.

A működési elv alapján a fémkeresők lehetnek⁴ másodlagos indukció elvén (VLF-alapú⁵) működő, illetve impulzusindukción (PI⁶) vagy interferenciamérésen alapuló (BFO⁷) berendezések, amelyek működési elvét a mélyreható műszaki elemzés mellőzésével az alábbiakban foglaljuk össze.

A *VLF technológiát*⁸ használó eszközök esetében a műszer keresőfejében található két tekercs, illetve az azokhoz kapcsolódó áramkörök biztosítják a működés fizikai hátterét. Az adóoldali hurok⁹ nem más, mint egy gerjesztett tekercs, amelyben váltakozó elektromos áram folyik. Ez Biot–Savart törvénye értelmében váltakozó mágneses teret hoz létre a tekercs körül, amelynek térerősség-, illetve indukcióvonalai önmagukba záródva veszik körbe a tekercset, és a földfelszínnel párhuzamos fejjállás esetén merőlegesen hatolnak be a talajba. Amennyiben ennek a primer mágneses mezőnek az erővonalai útját valamilyen villamos vezetőképességgel rendelkező fémtárgy keresztezi a fej földfelszínnel közel párhuzamos irányú mozgatása közben, abban a váltakozó mágneses tér hatására, Faraday–Lenz törvénye értelmében feszültség indukálódik, amelynek hatására olyan áram¹⁰ indul meg a céltárgyban, amely akadályozni igyekszik az őt létrehozó indukciós folyamatot. Ennek a váltakozó áramnak a hatására a céltárgy környezetében másodlagos mágneses tér ébred,

⁴ *Gee*: How a metal.

⁵ Very Low Frequency – igen alacsony frekvencia, 3–30 kHz.

⁶ Pulse Induction.

⁷ Beat-Frequency Oscillation.

⁸ *Neice* 2016.

⁹ Transmitter Coil.

¹⁰ Eddy Current.

amelynek erővonalait a fej mozgatása közben keresztezi a vevőoldali (szekunder) hurok,¹¹ amelyben az ennek következtében indukálódó feszültség hatására áram indul meg. Ezzel megtörténik a fémtárgy detekciója. Amennyiben mérés előtt elvégeztük a kereső kalibrálását, a szekunderkörü áram jellemzőinek vizsgálatával, azaz különböző feldolgozó áramkörök segítségével végzett analízisével további információkat is nyerhetünk a céltárgy anyagi jellemzőivel, fizikai méreteivel vagy a földfelszínhez képesti függőleges pozíciójával kapcsolatban. Mivel a céltárgy alapanyaga határozza meg annak villamos tulajdonságait, vezetőképességét, ami pedig hatással van a felgerjedő másodlagos mágneses mező, illetve indukció nagyságára, a szekunder tekercsben kialakuló áram mértéke alapján meg lehet határozni (diszkriminálni) a fémek típusát még azelőtt, hogy kiásnánk azokat a földből.¹²

A *pulzusindukció*¹³ elvén működő keresők esetében két vagy több tekercs felhasználásával hozunk létre akár másodpercenként több száz áramimpulzust az adókörben. Az impulzusok által a céltárgyban létrehozott másodlagos gerjesztést a vevőkörrrel vagyunk képesek detektálni. Mivel a különböző fémek mágneses tulajdonságai, és ezáltal a körülöttük kialakuló másodlagos gerjesztés fennállásának időtartama eltér (például jól mágnesezhető anyagok esetén tovább fennmarad), az összeomló tér időbeni eloszlásából tudunk következtetni a céltárgy alapanyagára, míg a „válaszimpulzusok” késleltetési idejéből annak mélységére. Gyakorlatilag az anyagok „visszhangját” detektálva érzékeljük, illetve azonosíthatjuk a különböző céltárgyakat.

Az *interferenciamérésen alapuló keresők*¹⁴ jelentik a legolcsóbban előállítható, ugyanakkor a legkevésbé megbízhatónak, illetve hatékonynak tekintett megoldást. Ebben az esetben két különálló, eltérő hosszúságú antennát használunk a keresőfejben, amelyek közül a kisebbik csatlakozik az analízátor bemenetére, míg a nagyobbik funkcionál adóként. Mindkét antenna tekercseit azonos frekvencián gerjesztjük egy közös oszcillátorról, aminek eredményeként másodpercenként több száz áramimpulzust sugárzunk ki az adótekercsen keresztül, hasonlóan a pulzusindukció elvén működő keresőkhöz. Azonban ebben az esetben az azonos frekvenciájú gerjesztésnek köszönhetően az adó és az analízátor tekercsei által előállított mágneses tér interferálni fog egymással, amelynek mértéke megváltozik a talajban elhelyezkedő fémes céltárgy közelében. A vevőegység ezt az interferenciaváltozást képes detektálni, és jelezni azt kezelője részére akár hangjelzés, akár egy indikátor segítségével. Komolyabb digitális feldolgozóegységet használva, az a megváltozás mértékéből és jellegéből próbál következtetni a céltárgy anyagi jellemzőire, vagy akár méretére.

A másodlagos mágneses indukció detektálásának elvén működő eszközök hatósugarát, azaz hogy milyen mélységben képesek érzékelni a céltárgyat, a váltakozó mágneses tér gerjesztésének és összeomlásának frekvenciája,¹⁵ a mérőszonda fizikai méretei (az adó/vevőegység antennájának mérete), illetve a gerjesztett mágneses mező térerőssége (nagysága) határozza meg.

Méret és adóteljesítmény alapján megkülönböztetünk kis, közepes és nagy hatótávolságú, mélykereső szondákat. Ezen eszközök egy komplex terepkutatási feladat során

¹¹ Receiver Coil.

¹² Ennek a képességnek a segítségével célirányos kutatás esetén akár korlátozhatjuk a keresett fémek körét, vagy megfelelő kalibrációval kizárhatjuk méréseinkből a földfelszín közelében található fémszemetet.

¹³ Neice 2016.

¹⁴ Neice 2016.

¹⁵ A talajcsillapítás mértéke fokozódik a frekvencia növekedésével, így a behatolási mélység csökken.

működési sajátosságaik, tulajdonságaik miatt nem felcserélhetők, a keresési folyamat különböző fázisaiban alkalmazzuk őket annak függvényében, hogy a talajnak éppen melyik rétegében vizsgálódunk. Az adóteljesítmény fokozása itt sem feltétlenül jár együtt a hatékonyság növekedésével, mivel egy nagyobb adóteljesítmény hatására akár a talaj fémtartalma, inhomogén eloszlású sótartalma vagy a talaj felső rétegeiben, felszínén található különböző méretű fémhulladékok, szennyeződések is okozhatnak olyan mértékű szekunder indukciót, amely hamis detekciót vagy a vevőegység telítésbe vezérlése esetén gerjedést, hibás működést eredményezhet. A nagyobb méretű mérőszonda sem feltétlenül eredményez hatékonyságjavulást, mivel a vevőantenna nyereségének növekedésével arányosan egyre nagyobb valószínűséggel csatolódik a vevőkörbe zavarjel, illetve a detektált céltárgyak pontos pozíciójának meghatározása (irányának és távolságának meghatározása) nehezebbé válik, vagy az egymáshoz közeli céltárgyak megkülönböztethetősége (az indukált mágneses mező szeparációja) csökken.



1. kép

*Fémkeresővel végzett felmérések**Forrás: a szerzők saját fotói*

Gyakorlati tapasztalataink azt bizonyítják, hogy a komplex vizsgálatokhoz, egy terepszakaszk lehető legalaposabb felderítéséhez célszerű különböző méretű keresőket alkalmazni. Nagy keresőfejjel vagy keretantennával rendelkező műszerekkel lehet elvégezni egy adott terület átfogó felderítését, és fél-egy méteres pontossággal azonosítani nagyobb méretű anomáliák pozícióját. A földben mélyebben elhelyezkedő, nagyobb méretű fémtárgyak (például

ágyúgolyók, szálfegyverek) keresése során különösen hatékony eszköz lehet. A kisebb keresőfejjel rendelkező eszközök segítséget nyújthatnak az adott céltárgy irányának és mélységének meghatározásában akár 5–30 cm-es pontossággal is. Ezek a műszerek hatékonyan alkalmazhatók a földfelszín közelében elhelyezkedő apróbb leletek (például muskétagolyók, nyílhegyek, pénzérmék) felkutatásában. A kézi detektorok, pointerek alkalmazásával lehetőségünk nyílik a kisebb méretű tárgyak pontos helyzetének meghatározására egy már megásott „kutatógödörben” néhány centiméteres távolságból.

Egy céltárgy esetében a detektálás hatásos mélységét, annak tulajdonságai, illetve állapota mellett számos környezeti paraméter, körülmény is befolyásolja. Ilyen lehet a talaj pillanatnyi vezetőképessége (például összetétel, nedvesség, sótartalom), a környezetből becsatlódó elektromágneses zavarjelek (például mobil sugárzó eszközök, rádióadók, magasfeszültségű vezetékek, gépjárművek) vagy a talajban található magas vezetőképességű anyagok (fém szemét) jelenléte. A keresett tárgyra vonatkozóan annak alapanyaga, fizikai méretei, geometriája, homogenitása, korróziójának mértéke (oxidréteg), a fémkereső által gerjesztett mágneses tér erővonalaihoz képesti orientációja egyaránt befolyásoló tényezőt jelent.

A Zrínyi-Újvár ostroma helyszínének vizsgálata során alkalmazott fémkeresők közül elsősorban a Lorenz cég által gyártott *Deepmax*¹⁶ eszközcsalád különböző mérőberendezéseit használtuk nagyobb területek feltérképezésére, illetve nagy méretű, mélyebben elhelyezkedő tárgyak, eszközök felkutatására. A *Deepmax* X6 detektor egy fejlett, digitális jelfeldolgozási eljárásokkal (PGBS¹⁷) támogatott, pulzus üzemű mélykereső, amely kevésbé érzékeny a talaj összetételének, hőmérsékletének, valamint ásványianyag-tartalmának hely szerinti változásaira. Az azonos frekvencián üzemelő vagy ott felharmonikusakat generáló berendezések által keltett zavarjelek ellen védelmet nyújt az adófrekvencia megváltoztatásának lehetősége, amivel így képesek vagyunk adott vizsgálati környezetben a káros interferenciák minimalizálására mérés közben. Az impulzusüzem lehetővé teszi különböző mélységekben történő mérések végrehajtását azáltal, hogy a kisugárzást követően csak bizonyos idő elteltével aktiváljuk a vevőkört, így a felszínközeli tárgyak által keltett másodlagos indukciót nem, csak a mélyebbről, nagyobb késleltetéssel érkező jeleket érzékeli a műszer. Ez a funkció különösen hasznosnak bizonyult a hadszíntérkutatási munkálatok során olyan területeken, ahol például a későbbi mezőgazdasági művelés vagy más emberi tevékenység következtében a felszín közelében fémhulladék jelenlétével is számolni kellett, ezért a talaj felső rétegét kizártuk a mérésből.¹⁸ Az eszköz ugyanakkor képes arra is, hogy a céltárgyakat összetételük alapján osztályozza, megkülönböztesse (diszkrimináció) egymástól fajlagos vezetőképességük meghatározásával. A gyakorlatban végrehajtott mérések során arra a következtetésre jutottunk, hogy az eszköz az A/D konverzió során a kvantálási lépcsőket automatikusan illeszti a jelmaximum és jelminimum közti értéktartományra, ezzel növelve a céltárgy-diszkrimináció képességét.

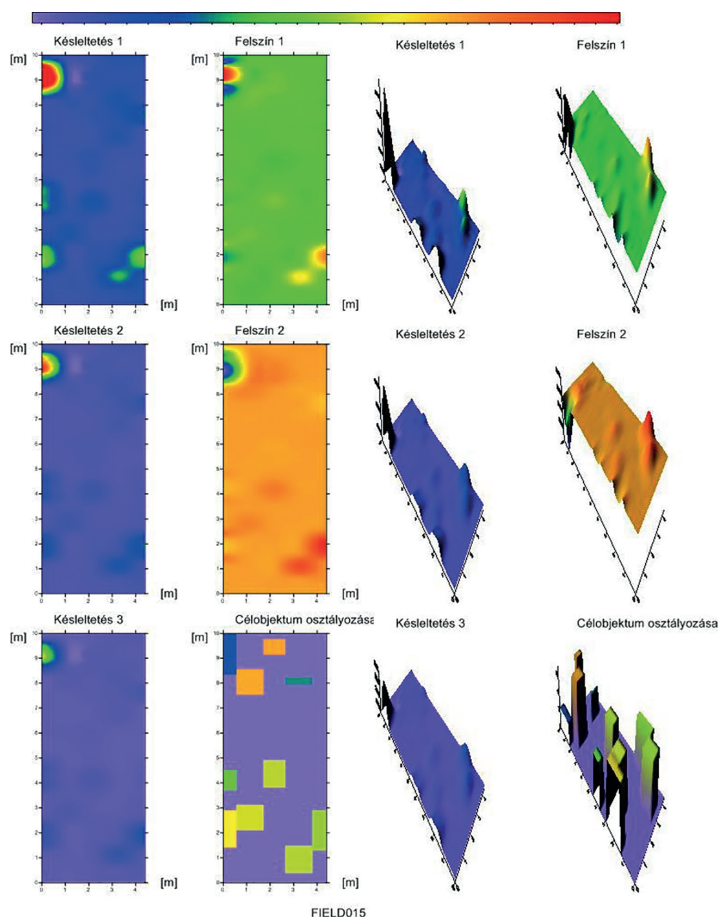
A 2. képen látható eredményekre egy 6 × 8 méteres sáv nagy méretű keretes detektorral történő átvizsgálása során jutottunk. A bal oldalon látható hatos diagramcsoport esetében

¹⁶ www.metalldetectors.de/download/deepmax_x5_x6_manual_uk.pdf (A letöltés dátuma: 2018. 07. 25.)

¹⁷ Pulse Ground Balancing System – talajkiegyenlítési technológia.

¹⁸ A korábbi kutatások során (2006-ban készült kutatóvágat) végzett talajszerkezet-vizsgálatok alapján megállapították, hogy 20–30 cm-es humuszréteg alatt található a vár dögölt agyagfala, így a felső réteg régészeti szempontból érdektelennek tekinthető.

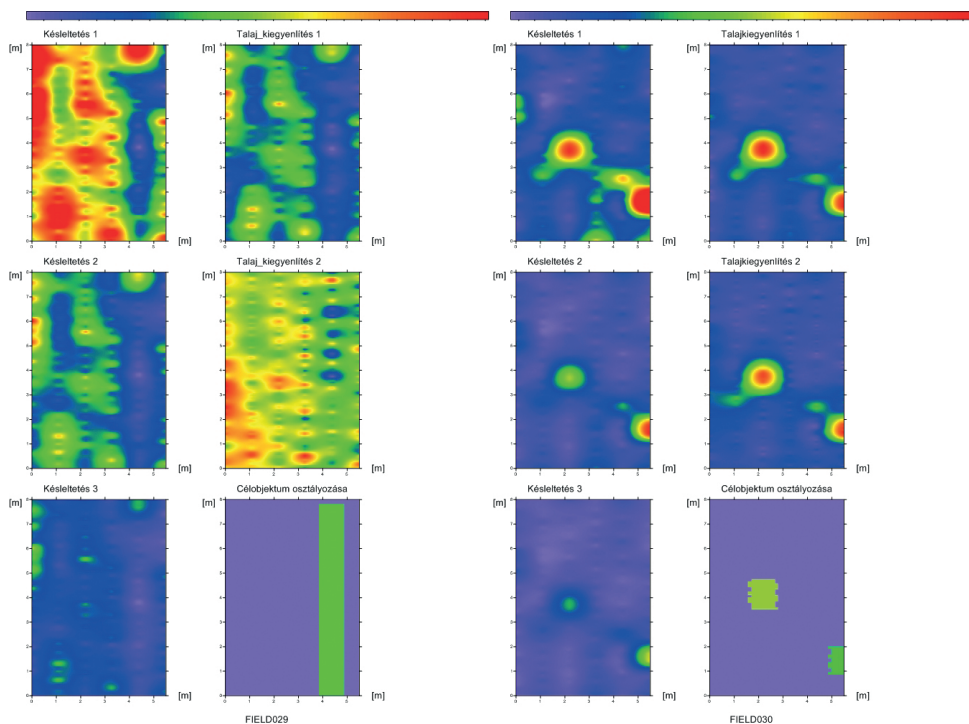
a talajban nem volt céltárgy, így a legnagyobb és legkisebb jelszint között csak minimális eltérés volt tapasztalható, ezért a műszer a legkisebb egyenetlenséget is jelentős mértékű megfestéssel (piros területek) jelenítette meg, de a kiértékelés során már azt is jelezte, hogy a vizsgált területen az eredmények alapján céltárgy nagy valószínűséggel nincsen a talajban. A jobb oldali diagramcsoport esetén már valós céltárgyak voltak a felszín alatt, amelyek vezetőképessége lényegesen meghaladta környezetükét, így a műszer a kismértékű vezetőképesség-ingadozásokat kiegyenlítette, és dominánsan kiemelte a háttérből a keresett tárgyakat, majd annak valószínűsíthető alapanyagát is meghatározta, és egy színkód alapján ábrázolta a területen.



2. kép

Céltárgy nélkül (bal oldal), illetve céltárggyal (jobb oldal) végrehajtott mérés eredménye

Forrás: a szerzők saját szerkesztése



3. kép

A mérési eredmények 2D és 3D ábrázolása

Forrás: a szerzők saját szerkesztése

A műszerre a keret mellett különböző méretű és típusú keresőszondákat is csatlakoztathatunk, így a keresési feladat jellegének megfelelő mérőfejjel végezhetjük el a terület átvizsgálását. A fej méretétől függ a gerjesztett mágneses mező nagysága, ezáltal pedig az átvizsgálási mélység elméleti határa. A mérőfejben elhelyezkedő antennák lehetnek kevésbé vagy jobban irányítottak a kutatás jellegének függvényében, azaz hogy nagy terület átfésülése vagy egy kijelölt területen a pontos lokalizáció az elsődleges cél.

Az eszköz felderítő és „feltérképező” üzemmódban is használható, ez utóbbi esetben viszont kizárólag a mérőkeret csatlakoztatására van lehetőség, hiszen ilyenkor a felmérés során annak pozíciója és orientációja ismeretére is szükség van a „térkép” felrajzolásához. *Felderítő üzemmódban* a hagyományos, kettős D alakú szondával (double „D” search coil) és a mélykereső kerettel egyaránt használhatjuk a műszert, ebben az esetben a leletek vízszintes pozíciójának, valamint becsült mélységének és anyagának megállapítására van lehetőség. *Feltérképező üzemmódban* ehhez képest egy előre kijelölt terület szisztematikus vizsgálatának lehetőségét biztosítja a műszer. A mérési eredményeket (mért értékeket), valamint a mérés helyszínének koordinátáit (GPS-egység csatlakoztatása esetén) rögzíti, azokat számítógépes adatfeldolgozó alkalmazás segítségével kiértékeli, majd vizuálisan jól áttekinthető formában megjeleníti színes 2D vagy 3D ábrákon (3. kép). Ebben az üzemmódban

a műszer automatikusan állítja paramétereit (vevőszenzitivitás, talajkiegyenlítés, késleltetés) egy mérési szekvencia szerint.

Az eszköz használata során olyan, a kezeléssel és az eredmények kiértékelésével kapcsolatos területeken kerestünk hatékony válaszokat, mint a mérési eljárások és eszközök hatékonyságának növelése, a mérés tervezése, előkészítése, a különböző fémkeresők zavarmentes párhuzamos üzemeltetése, a céltárgyfelismerés pontosságának javítása vagy a mérési eredmények feldolgozásának, illetve a feldolgozott adatok megjelenítésének módszerei.

A mérések pontossága szempontjából fontos a vizsgált *terepszakasz helyes kijelölése*, valamint a mérés során minél pontosabb irány- és sebességtartás biztosítása. Ezen feltételek teljesülése esetén, akár kézi keresőfejjel, akár hordhevederrel ellátott mélykereső kerettel hajtjuk végre a vizsgálatot, a kezelésből eredő hiba mértéke jelentősen csökkenthető. A Zrínyi-Újvár környezetében végzett méréseink során az alábbi módszerek alkalmazhatóságát vizsgáltuk meg: lézeres kijelölés, kézi, konvencionális GPS-készülék használata, a műszerbe épített megoldás alkalmazása (GPS-modul), a terület sarokpont-koordinátáinak GPS-alapú kijelölése és a sávok jelzőbbójás vagy szalagos kitűzése.

A lézeres sávhatár-kijelölés hátránya volt, hogy nappali fény melletti munkavégzés során a fényforrás láthatósága sokszor kevésnek bizonyult. A GPS-vevő segítségével pontos és megbízható navigáció volt biztosítható, azonban mivel maga a vevő elektronikus alkatrészeket és áramköröket, valamint egyéb fémkomponenseket is tartalmaz, a mérés szempontjából külső zavarforrásnak tekinthető. A műszer rendelkezik ugyanakkor saját, erre a célra kifejlesztett, opcionálisan csatlakoztatható GPS-egységgel, amelynek precizitása a gyakorlatban sokszor kevésnek bizonyult, mivel vízszintes pontossága nem haladta meg a 3 métert még az égbolt csaknem teljes láthatósága mellett sem, miközben nem is a keret, hanem a kezelő tényleges pozícióját kellett volna mérnie, hiszen a modul a kereső hordhevederére volt csak csatlakoztatható.

Ugyan a vizsgált terület „hagyományos” módszerrel történő kijelölése volt a leginkább idő- és munkaigényes eljárás, pontossága miatt végül ez a szalagos/jelzőbbójás megoldás bizonyult a leghatékonyabbnak.

A gyakorlati tapasztalatok azt bizonyították, hogy a mérőeszközök vevőegységének a használat előtti kalibrációja, a zavarjelek és a talaj fémtartalmának kihangolása ugyancsak fontos mozzanat (a mérés hitelessége szempontjából is). A hangolását olyan sík terület fölött kell elvégezni, amely nem tartalmaz céltárgyat és fémes szennyeződést, amelynek előzetes ellenőrzését egy kézi műszer segítségével célszerű elvégezni. Mérés előtt érdemes továbbá a beállításokat is leellenőrizni, amelyek az akusztikus és a vizuális visszajelzésekre (hanghatás, kijelzett értékek) vonatkoznak ismert jelalakú céltárgyak esetén (például kulcs, zsebke, muskétagyó vagy korábban fellelt egyéb lelet), ezzel megelőzhető a helytelen konfiguráció alkalmazása következtében később szükségessé váló ismételt végrehajtás. A mérés pontosságát nagyban növeli, ha a terület bejárása során végig gondoskodunk a mérőkeret felszínnel párhuzamos orientációjáról és távolságának állandóan tartásáról.

A *mérések tervezése* során az alábbi szempontokat érdemes figyelembe venni annak érdekében, hogy a kezelői gondatlanságból eredő hiba lehetőségét minimálisra csökkentsük még akkor is, ha ugyanazon területen egy időben több műszerrel is dolgozunk. Az egyik legfontosabb ilyen esetben, hogy megfelelő védőtávolságot alakítsunk ki az egyes műszerek között annak érdekében, hogy detekciós folyamatukat ne befolyásolják a közelben üzemelő más fémkeresők primer mágneses terei (minimális zavarvédelmi távolság). Fontos

átgondolni előzetesen azt is, hogy a keresett céltárgytípus, illetve vizsgált terepfelszín ismeretében melyik keresőfej alkalmazása lehet a leginkább célravezető, és amennyiben a helyszín ezt megkívánja, érdemes előtte a terepszakaszt „kitakarítani”, azaz az aljnövényzettől, avartól, felszíni szennyezésektől, törmeléktől előzetesen megtisztítani. Ez azért fontos, hogy a műszer felszínnel párhuzamos lengetése során ne legyen olyan fizikai akadályozó vagy korlátozó tényező, amely miatt esetleg egy kisebb terület átvizsgálása kimarad, ezzel kockáztatva, hogy egy-egy földben lévő céltárgy felderítetlen marad. Egyenetlen felszín esetén érdemes mérés közben a fej orientációját akár többször is megváltoztatni, ezáltal egy-egy területet több irányból is megvizsgálni, hiszen különböző irányú indukcióvektorokra adott válaszok a céltárgy elhelyezkedésének függvényében eltérőek lehetnek, így előfordulhat akár az is, hogy bizonyos esetekben nem minden irányból képes a vevőegység a detekciót végrehajtani.

Annak érdekében, hogy *méréseink, illetve a céltárgyak érzékelésének megbízhatóságát és pontosságát javítsuk*, tovább léptünk az eszköz kezelési utasításában leírt pontok végrehajtásának automatizmusán, és a műszer válaszreakcióinak lehető legpontosabb értelmezése igényével, a működési elv maximális figyelembevételével mellett előzetes kontrollméréseket végeztünk ellenőrzött körülmények között. Ennek keretében különböző méretű és geometriájú, ismert összetételű (fajlagos vezetőképességű) kontrolltárgyakat helyeztünk el egy előre kijelölt és megtisztított „pályán” eltérő mélységben és egymáshoz képesti távolságokkal (eloszlással), majd azon különböző haladási sebességekkel és fejállásokkal sokszor egymás után végimentünk, és az így kapott eredményeket rögzítettük. Ilyen vizsgálatokat más-más terepen, különböző talajtípusok esetére is végeztünk annak érdekében, hogy a lehető legtöbb információ álljon rendelkezésünkre az eszköz tényleges működéséről. Egy ilyen validációs mérés helyszínéül például a Velencei-tó gárdonyi zagyülepítőjét választottuk. Itt tapasztaltuk az első mérések során a műszernek azt az automatikus skálázási eljárását, amelyet korábban már ábrával szemléltetve is bemutatunk. A következőkben ismertetett vizsgálat-típusok más műszerek megismerésére is hatékonyan alkalmazhatók. A korszerű fémkeresőkben az *üzemi frekvencia* megváltoztatható annak érdekében, hogy elkerüljük a több eszköz párhuzamos működtetéséből, illetve más forrásokból származó zavarokat, illetve csökkentjük azok hatását. A tapasztalatok azt igazolták, hogy a különböző vezetőképességű fémtárgyak detekciójának valószínűsége, illetve a másodlagos indukció mértéke jelentősen függhet az alkalmazott frekvencia hullámhosszának és a céltárgy fizikai méretének viszonyától, ami többek között befolyásolja a felderítési mélységet is. A *haladási sebesség* vizsgálata során logikus következtetéssel is megfogalmazható tapasztalatot szereztünk, miszerint a keresőfej vízszintes irányú sebességével arányosan csökken a felbontás, és nő a mérési hiba valószínűsége. Lassabb haladás esetén pontosabb és megbízhatóbb mérés végezhető, ugyanakkor ez nagyban korlátozza az időegység alatt átvizsgálható terepszakasz méretét. Kézi műszerek esetén a *lengetési sebesség*, azaz a haladási irányra merőleges kitérő mozgás sebessége is jelentős hatást gyakorol a céltárgydetekcióra. Ha a céltárgy környezetében kialakuló másodlagos mágneses tér gerjesztése és összeomlása túl gyors vagy túl lassú, a céltárgy detektálása esetlegessé válik, vagy teljesen megghiúsul. A *keresőfej síkja és a talaj által bezárt szög* a céltárgy térbeli orientációjának, valamint a primer mágneses indukció vektorának egymáshoz képesti viszonyának függvényében befolyásolja a talajban ébredő másodlagos mágneses tér nagyságát, ezáltal a detektálás valószínűségét. Hegyes-dombos terepen, illetve ahol a sűrű aljnövényzet nehezíti a haladást, ez is okozhat mérési hibákat.

Szintén kézi műszerek esetén a *lengetések közti átlapolás* mértéke a mérés felbontását határozza meg alapvetően. Minél kisebb a haladási sebesség a lengetési sebességhez képest, annál nagyobb az átlapolás, azaz annál többször halad át a keresőfej a céltárgy fölött, így a kisebb méretű fémtárgyak (például érmék) detekciójának valószínűsége megnő. A kezelőnek tehát törekednie kell arra, hogy a lengetési sebesség nagyobb legyen a haladási sebességnél, így elérve, hogy a mágneses tér útját többször is keresztesse a céltárgy. Ez természetesen szintén az időegység alatt átvizsgálható terület nagyságát fogja korlátozni. *Letapogatási mélység* alatt azt a mélységet értjük, amelyben a céltárgy még megbízhatóan és egyértelműen detektálható. Ez a céltárgy orientációján és az alkalmazott frekvencián túl nagyban függ még annak fizikai méretétől és alapanyagától. A jó mágneses vezetőképes-séggel rendelkező anyagok vagy a nagy méretű fémes tárgyak azonos gerjesztés mellett nagyobb másodlagos mágneses teret hoznak létre maguk körül, így azok detekciójára nagyobb mélységekben is sor kerülhet. A korszerű digitális műszerek szinte kivétel nélkül rendelkeznek kisebb-nagyobb szabadságfokú *szűrés funkciókkal*, amelyeket aktiválva lehetőség van az általunk nemkívánatosnak tartott fémek detekciójának korlátozására. Ilyen funkció alkalmazása esetén ugyanakkor figyelembe kell venni, hogy ez a korlátozás minden esetben csökkenti a keresett fémtípusra vonatkozó vevőérzékenységet is, így ezek észlelési valószínűsége is csökken. A *diszkrimináció* jelenthet a korábban már említett módon anyagtípus szerinti megkülönböztethetőséget, de ez a kifejezés használható a térbeli elkülöníthetőségre is. Ez utóbbi esetben a térben egymáshoz közeli céltárgyak megkülönböztethetőségét vizsgáltuk különböző mélységekben és távolságokkal. Ez azért lehet fontos, hogy felismerjük például adott esetben a „leletárnyékolás” jelenségét, amikor egy felszínközeli, kis méretű fémtárgy erősebb jelet ad vissza, és így mélyben rejlő felderítetlen marad. Ezt a vizsgálatot célszerű azonos típusú, illetve eltérő fémleletekkel (és „fémszeméttel”) is elvégezni. Egyetlen műszer, egyetlen üzemmódban használva nagy valószínűséggel ezt a problémát nem tudja megoldani, de több, eltérő karakterisztikájú és érzékenységgű műszert használva már erre vonatkozó következtetéseket is le lehet vonni.

A mérések végrehajtásának körülményei mellett fontos szempont lehet az is, hogy hogyan tudjuk a rendelkezésünkre álló *eredményeket feldolgozni*, illetve *láthatóvá tenni*. Az általunk használt mélykereső képes egy összefüggő mérési folyamat során rögzíteni az eredményeket és georeferálni azokat, ami lehetővé teszi nagyobb területek bolygatásmentes átvizsgálását és a mérési eredmények utólagos, szisztematikus elemzését. A fémkereső segítségével végzett feltárások bár önmagukban is hordozhatnak releváns információkat lokálisan, ugyanakkor nagyszámú, pontos koordinátákkal megjelölt és a leletek jellemzőit dokumentáló (méret, épség, talajösszetétel, mélység) adatbázis felhasználásával képzett statisztikai adatok sokkal komplexebb következtetésre biztosítanak lehetőséget akár magára az ostromra vagy a várfal elhelyezkedésére vonatkozóan. Mivel az esetleges mérési hibákra csak egy-egy mérési ciklus lezárását követően, az adatfeldolgozás során derülhet fény, ezért nem érdemes százméteres nagyságrendű dimenziókkal rendelkező területeket egyetlen mérés keretében átvizsgálni. A teljes vizsgálati területet célszerű inkább 20×20 vagy 25×25 méteres parcellákra bontani, és az azokból nyert mérési eredményeket később összeilleszteni. Ugyancsak ezt a megoldást célszerű alkalmazni, amennyiben a feldolgozó számítógép (laptop) erőforrásai korlátozottak. A mélykeresős méréseket követő kéziműszeres átvizsgálás ütemezése is egyszerűbb, ha előre felparcellázott terepszakaszokat kell átvizsgálni. A Deepmax mélykereső egyetlen diszkrét mérés során átlagosan 80–100 byte

méretű adatot generál, és mivel másodpercenként 16-szor vesz mintát, egy 10 perces mérés¹⁹ adatrekordjait tartalmazó fájl mérete a 3-4 MB-ot is elérheti, amelyet lényegesen meghaladó fájlok esetében a szoftveres feldolgozás és megjelenítés már jelentős erőforrásokat köthet le (processzorhasználati idő, memóriaallokáció). A mérést követő közvetlen feldolgozás a terepen ellenőrzési célzattal nélkülözhetetlen, mivel csak így tudjuk megállapítani, hogy a felmérés során helyesen jártunk-e el, és az eredmények feldolgozásához szükséges minden adatot rögzítettünk-e,²⁰ valamint szükséges-e a terepszakaszon megismételni a mérést más konfigurációs beállítások mellett.

Amikor nagyobb kiterjedésű területen végzett kutatási eredmények integrálása (összefűzése) válik szükségessé, azzal szembesülünk, hogy arra a műszerhez kapott *Surfer 9* adatfeldolgozó szoftver nem képes. Ilyenkor a feladat megoldásának két általunk kidolgozott útja létezik. Az első esetben a feldolgozás előtt a nyers mérési adatokat szemantikailag helyes formában kell összeilleszteni, aminek eredményeként egy nagy méretű bemeneti fájlt kapunk, aminek feldolgozása időigényes lesz, de ha helyesen végeztük el a műveletet, az eredmény pontos lesz. A másik megoldás, ha a feldolgozást követően kapott diagramokat illesztjük össze a térképszelvényekhez hasonló módon, és ha kellő gondossággal járunk el, a végeredményben legfeljebb alig érzékelhető, minimális pontatlansággal kell számolnunk az illesztési vonalaknál.

Az első megoldás ugyan nincs a gyártó által dokumentálva, azonban a nyers mérési információk elemzése során felismertük, hogy a műszer a diszkrét mérési adatok (X, Y, Z koordináták, mágneses térerősség, céltárgy fajlagos vezetőképessége) mellett rögzíti a helyszín GPS-koordinátáit, valamint jelöli az adott sáv (track) sorszámát is, mint ahogy az a 4. képen is látható.

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
0	0	8389234	8398645	2098756	8377461	8399268		0.4729.5601	N	1906.7491	E

4. kép

A rögzített mérési adatok struktúrája

Forrás: a szerzők saját szerkesztése

Nagy kiterjedésű terepszakaszokról készített mérések vizuális ábrázolása során igény merülhet fel az eredmények térképre (korabeli térképmetszetek, ortofotók, műholdas felvételek, digitális térképek) történő illesztésére is. Ez nem jelenthet problémát, hiszen a fentiek alapján az adatrekordok tartalmazzák a GPS által rögzített hosszúsági és szélességi koordinátákat. A szoftver fejlesztése során ugyanakkor sajnos nem készítették fel az alkalmazást ezen adatok felhasználására.

A rekordok struktúrájának és formátumának vizsgálata során sikerült megállapítani a koordináták formátumát, így azok konvertálás után már felhasználhatók más térinformatikai alkalmazásokban is. Az 5. képen látható egy mérési rekordban tárolt céltárgy

¹⁹ Ennyi idő alatt a terepviszonyok, valamint a kezelők képzettségének függvényében átlagosan egy 16 × 12 méteres földterület járható be.

²⁰ Amennyiben a mérés során a terepkövetés pontatlansága következtében 0,5–1 méternél nagyobb „lyukak” keletkeztek a mérési sávok között, a szoftver nem tudja a mérést feldolgozni. Az adatbázisban inkonzisztencia lép fel, nem képes a térrész hiányos területeire az adatrekordoknak megfelelő színeképet illeszteni, és így a szoftver futása megszakad.

koordinátájának transzformációja, amelyet aztán a 6. képen megfigyelhető módon helyeztünk fel egy online térinformatikai felületre. (A felvételen a validációs tesztek egyik helyszíne, a Zrínyi Miklós Laktanya és Egyetemi Campus sportpályájának egy részlete látható.) Demonstrációra az ingyenesen elérhető online Google Maps alkalmazást használtuk, de a formátum ismeretében egyszerű feladat bármely más platform segítségével történő ábrázolás is.

Latitude N47°29.5601'
Longitude E19°06.7491'

Calculated Values - based on Degrees Lat Long to seven decimal places.

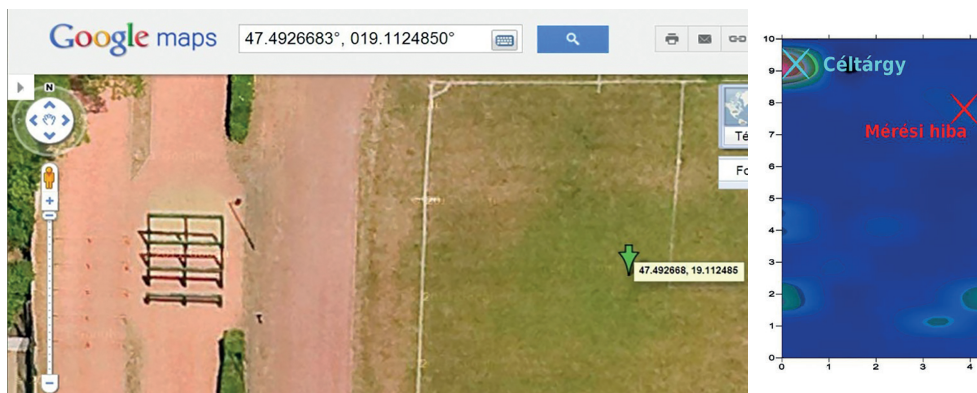
Position Type	Lat Lon
Degrees Lat Long	47.4926683°, 019.1124850°
Degrees Minutes	47°29.56010', 019°06.74910'
Degrees Minutes Seconds	47°29'33.6059", 019°06'44.9460"
UTM	34T 357827mE 5261642mN
MGRS	34TCT5782761642
Grid North	-1.4°
GEOREF	PKEC06742956

5. kép

A mérési eredményben tárolt koordináták konvertálása

Megjegyzés: A konvertáláshoz az Earthpoint online alkalmazását használtuk: www.earthpoint.us/Convert.aspx (A letöltés dátuma: 2018. 07. 25.)

Forrás: a szerzők saját szerkesztése



6. kép

A mérési eredményekből kinyert koordináta ábrázolása (bal oldal), illetve az egyes képi információs rétegek (késleltetés, céltárgy-klasszifikáció) egymásra illesztésének eredménye (jobb oldal)

Forrás: <http://maps.google.hu> (A letöltés dátuma: 2018. 07. 30.) és a szerzők saját szerkesztése

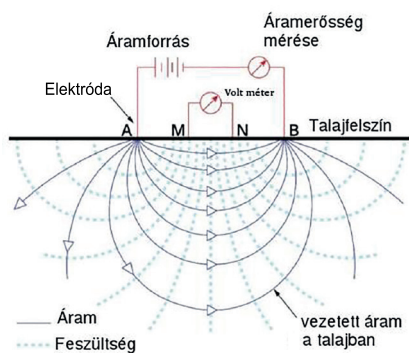
Az utólagos képi feldolgozás további előnye, hogy az azonos területről különböző beállítások (késleltetés, talajkiegyenlítés) mellett detektált céltárgyak a képek interpolációjával

értékelhetők, és a mérési hiba folytán hibásan detektált objektumok statisztikai úton szűrhetővé válnak (6. kép).

A Zrínyi-Újvár területén és várfalán végzett feltárási munkálatok speciális igénybevételt jelentettek az általunk használt műszerek számára, mivel a terepviszonyok és az aljnövényzet sokszor jelentősen megnehezítette, sőt kifejezetten akadályozta a velük való munkát. A nehéz körülmények miatt sok mérést meg is kellett ismételni a hibás vagy hiányos eredmények miatt. Bár bizonyosak vagyunk benne, hogy rengeteg, az ostromra emlékeztető, fémről készült tárgyi emlék nyugszik még a földben, amelyekre eddigi tudásunk alapján nem sikerült rátalálni, az elmúlt közel másfél évtizedben végzett szisztematikus kutatómunkának, az ezek során használt fémkeresőknek és a segítségükkel megtalált sok száz muskétagolyónak, repesznek és ágyúgolyónak, valamint más fémről készült tárgyaknak köszönhetően rengeteg értékes információhoz juthattunk az 1664-es eseményekről. Nem is beszélve arról, hogy alapvetően ezeknek az eszközöknek köszönhetjük az erősség létének egyértelmű bizonyítását is Belezna és Őrtilos települések határában.

Talajellenállás-mérés

Amennyiben több információra van szükségünk a földfelszín alatti talajszerkezetről – annak érdekében például, hogy egykori árkok, kutak, illetve más mesterséges létesítmények vagy akár természetes képződmények helyét meg tudjuk határozni anélkül, hogy nehéz fizikai munkával, hosszú és mély kutatóárkokat ásnánk, vagy kutatófúrásokat végeznénk – a talajellenállás-mérés bizonyulhat az egyik leghatékonyabb eljárásnak. Zrínyi-Újvár esetében annak a feltételezésnek az igazolására vetettük be ezt a módszert, miszerint a 2017-ben feltárt kút mellett lehetett még egy vízvételési lehetőség a váruddvarban.



7. kép

A geoelektromos mérés elve (balra) és gyakorlati végrehajtása a helyszínen (jobbra)

Forrás: www.researchgate.net/publication/322367522_Using_Electrical_Resistance_Tomography_to_Detect_Leaks_in_Landfills (A letöltés dátuma: 2018. 07. 30.) és a szerzők saját fotója

A talajellenállás vagy más néven geoelektromos mérési módszer alkalmazása során a földfelszíni és a felszín alatti földtani képződmények és objektumok azonosítására nyílik lehetőség azok elektromos vezetőképességének mérése alapján. Jellemzően egymással párhuzamos, esetenként egymásra merőleges szelvények mentén kijelölt pontokon elhelyezett elektródák segítségével történik a mérés, míg gerjesztésre egyen- vagy váltakozó áramot használhatunk. A mérés elve és elrendezése a 7. képen látható.

A különböző összetételű talajok ellenállása eltérő, amely kiszámítható a gerjesztőáram, valamint az annak hatására a talajban kialakuló potenciálkülönbség ismeretében Ohm törvényének felhasználásával. A talaj villamos ellenállásának²¹ mértéke függ az alkotórészek (kőzetek, humusz) fajlagos ellenállásától, a talajszemcsék, kőzetek alaki tulajdonságaitól, a talaj és a kőzetek szerkezeti sajátosságaitól, a talaj porozitásától, a talaj nedvességtartalmától, az oldott sók és ásványok minőségétől és koncentrációjától, valamint a talaj és a kőzetek hőmérsékletétől. Néhány talajtípus jellemző ellenállásértékét,²² a méréshez használt elektródák elrendezését, valamint a Zrínyi-Újvár udvarán 2018 tavaszán végzett mérések eredményeit egy mérősoron a 8. kép tartalmazza.

1. táblázat

A különböző anyagok talajellenállása

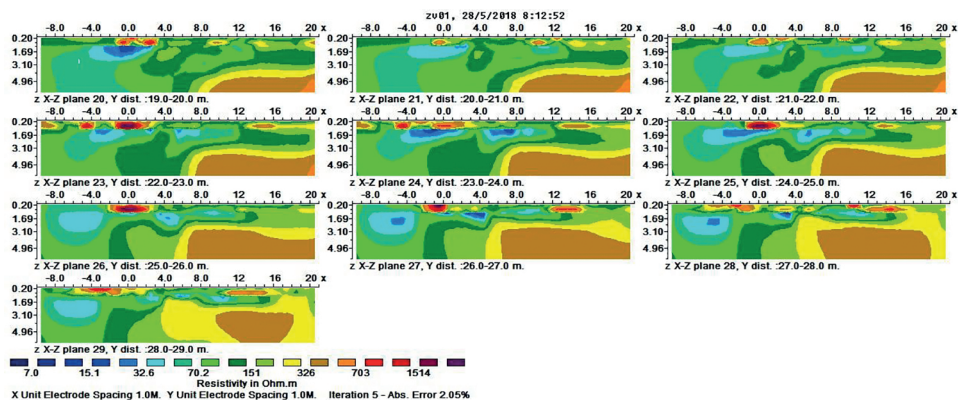
Anyag	Talajellenállás (Ohmm)
gránit	200–10000
mészkö, dolomit	100–5000
bazalt, andezit	200–10000
harmadkorú mészkö	100–1000
homokkö	100–2000
száraz/vizes kavics	100–10000 / 50–1000
száraz/vizes homok	50–1000 / 15–100
agyagmárga, márga	5–50
agyag	5–30
bentonit, kaolin	1–10

Megjegyzés: Ohmm = Ohmméter

Forrás: a szerzők saját szerkesztése

²¹ A talaj fajlagos ellenállása a vizsgált terepszakaszh talajösszetételéből készült, egy méter élhosszúságú kocka két szemben fekvő lapja között mérhető ellenállás. (www.kbfi-triasz.hu/Meresi-modszer/8/ [A letöltés dátuma: 2018. 08. 03.]

²² www.kbfi-triasz.hu/Meresi-modszer/8/ (A letöltés dátuma: 2018. 08. 03.)

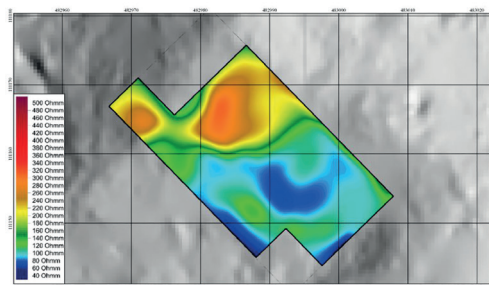


8. kép

A talajellenállás jellemző értékei (balra fent), a mérőelektrodák elrendezése (lent)

Forrás: a szerzők saját szerkesztése és fotója

A 8. képen jól kirajzolódik egy jellegzetes, függőleges orientációjú, alacsony ellenállású anomália (kék szín), amely jelezhetette volna akár a feltételezett másik kút helyét is, ugyanakkor a visszaellenőrzés során végzett kutatófúrások eredménye alapján egy természetes geológiai képződmény és nem egy betöltődött kút maradványaira bukkantunk, így egyelőre nem sikerült igazolni feltételezésünket. A 9. képen az egymással párhuzamos mérősorok eredményét láthatjuk összeillesztés után egy LIDAR-felvétellel vetítve.



9. kép

Egymással párhuzamos geoelektromos mérősorok összeillesztésének eredménye

Forrás: a szerzők saját szerkesztése

Mérés talajradarral

Szintén fontos geofizikai kutatási módszer, a föld alatti tájékozódás hatékony eszközei lehetnek a talaj-, föld- vagy más néven geológiai radarok (GPR²³), amelyek az elektromágneses spektrum rádiófrekvenciás tartományából általában a 25 MHz és 2 GHz közötti sávokat használják fel működésük során. A rendszer egy adó- és egy vevőegységet, valamint a hozzájuk csatlakozó antennákat tartalmaz, amelyek geometriai paraméterei határozzák meg a domináns működési frekvenciát. Az adó által előállított, általában impulzusszerű jel mélyen a talajba hatol, ahonnan a különböző törésmutatójú rétegek határáról visszaverődik, és jelentősen csillapodva a vevőantennára jut (10. kép). A rádióhullámok terjedését és reflexióját a mérések folyamán a közegek fajlagos vezetőképessége, dielektromos állandója, valamint mágneses permeabilitása együttesen befolyásolja. A vevőhöz csatlakoztatott feldolgozó és képalkotó modul a kisugárzott és visszavert jel viszonyának kiértékelésével képes megjeleníteni felszín alatti objektumokat, üregeket, repedéseket, korábbi mesterséges beavatkozások, talajbolygatások nyomait vagy különböző geológiai anomáliákat.²⁴ A hatásos kutatási mélységet, illetve a detektálható anomáliák fizikai méretét, kiterjedését a kiválasztott működési frekvencia határozza meg. Régészeti és földtani mérések esetén a talaj mint közvetítő közeg csillapítási tulajdonságai miatt a sáv alsó 20–25%-át, azaz a 25–400 MHz közötti tartományt használjuk, amivel általában 10–25 méteres mélységig tudunk vizsgálatokat végezni. A talajfelszínhez közeli 1–2 m-es réteg vagy különböző betonlétesítmények, műtárgyak, tartószerkezetek vizsgálatához (építőipari alkalmazások) az 500 MHz – 2 GHz közötti sávokat tudjuk hatékonyan igénybe venni. A mérési eredmények kiértékelése, illetve megjelenítése történhet egyetlen vízszintes mérési sáv felhasználásával 2 vagy több mérési sáv összeillesztésével 3 dimenzióban.



10. kép

A talajradar működési elve²⁵ (balra) és használata a gyakorlatban (jobbra)

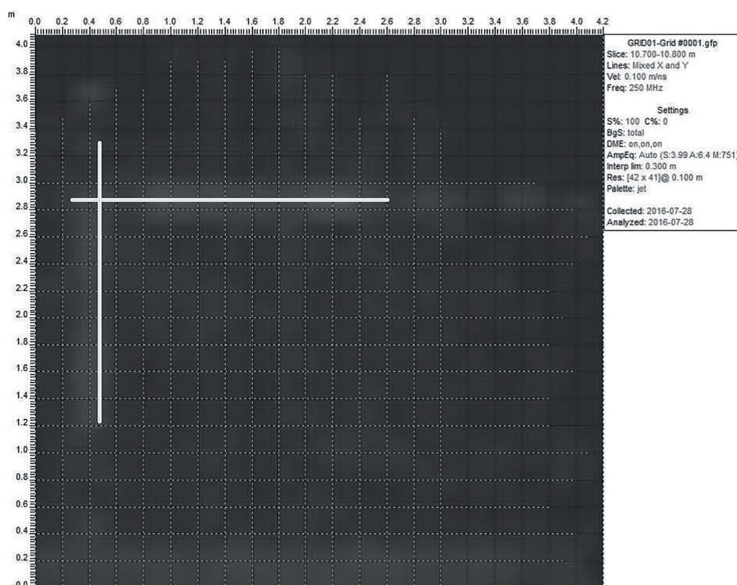
Forrás: a szerzők saját szerkesztése és fotója

²³ Ground Penetrating Radar.

²⁴ Ground Penetrating Radar Theory 2009.

²⁵ www.geomega.hu/mergeo/?page_id=29&lang=en (A letöltés dátuma: 2018. 08. 17.)

Talajradaros méréseket Zrínyi-Újvár területén több alkalommal is végeztünk a várfal égett maradványainak kimutatása vagy a „sötét kapu”, illetve a vár kútjának felkutatása céljából. A módszer mind a várfal egyes szakaszainak kimutatásában, mind pedig a kút helyének beazonosításában (11. kép) eredményesnek bizonyult, míg az általunk feltételezett „sötét kapu” létezésének igazolása és helyének meghatározása még várat magára.²⁶



11. kép

A talajradar által a kútról készített felvétel 10,7 méter mélységben

Forrás: Padányi 2016. 103.

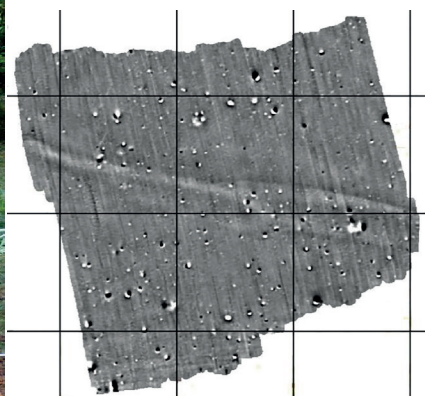
Mérés magnetométerrel

A korábbiakkal ellentétben a magnetométeres vizsgálat passzív érzékelési módszer. Alkalmazásával a Föld mágneses terében keletkező természetes vagy mesterséges eredetű lokális anomáliákat térképezhetjük fel, amit az tesz lehetővé, hogy minden anyag rendelkezik mágneses tulajdonságokkal. Beszélhetünk induktív mágnesezettségről, ami külső tér jelenlétében alakul csak ki, és annak megszűnésével összeomlik, valamint remanens mágnesezettségről, amelyet az anyagban található mágneses momentum okoz. A termoremanens mágnesezettség (TRM) a természetes remanens mágnesezettség (NRM) leggyakrabban előforduló formája, aminek lényege abban áll, hogy a mágneses ásványok mágnesezettsége hőmérsékletfüggő. A Curie-hőmérséklet felett elveszítik mágnesezettségüket, majd ez alá hűlve a külső mágneses tér irányába rendeződnek dipólusai. A blokkolási hőmérséklet alá hűlve a mágneses tér „befagy” a kőzetekbe. Atomi szinten az anyagok mágneses

²⁶ Padányi 2016. 94–104.

momentumának forrása lehet az elektronok spinje, az elektronok atommag körüli keringése vagy az elektronok száma a betöltetlen héjakon.²⁷

A különböző anyagokat tartalmazó talajrétegek, geológiai anomáliák vagy a fémekből készült eszközök, tárgyak kimutatása, illetve megkülönböztetése mágneses tulajdonságaik alapján lehetséges. Diamágnesek esetén nem beszélhetünk spontán mágnesezettségről, mert nincs bennük kompenzálatlan spin (például kvarc), míg paramágnesekben található ilyen, de orientációja rendezetlen (például olivin). Ferromágnesekben a kompenzálatlan spinek hatására az atomokban keletkező mágneses momentumok a doménekben belül csatolódnak (például vas, nikkel, kobalt).²⁸ Ezeken felül találkozhatunk még antiferromágnesekkel (például hematit) vagy ferrimágnesekkel (például magnetit, ilmenit).



12. kép

A mérés folyamata (balra), valamint több mérési sor összeillesztésével nyert eredmény (jobbra)

Forrás: a szerzők saját fotója és szerkesztése

Az anyagok mágneses tulajdonságai által a Föld mágneses terében okozott anomáliák kimutatására alkalmas műszereknek működési elv alapján több típusa is létezik, mint a flux-gate (pontosság 1 nT ²⁹), a protonprecessziós, overhauser ($0,1 \text{ nT}$) vagy alkáli-gőz ($0,01 \text{ nT}$) magnetométer.³⁰ Gradiens mérés során a vizsgált terepszakasz összetételét vagy annak a környezettől való eltérését mérjük a mágneses térben fellépő lokális változások révén. A módszerrel indukált mágnesezettséggel (például lágyvas, egyes vulkáni és metamorf kőzetek, téglák) és remanens mágnesezettséggel rendelkező anyagok (például acél, egyes vulkáni kőzetek, téglák, paticok), valamint a mágnesezettség csökkenése révén különböző talajösszetétel-változások (például földmunkák, feltöltések) detektálhatók.³¹ Két egymás fölé helyezett szondával térértékkülönbség is mérhető, amely elosztva a szondák távolságával, a mágneses tér vertikális gradienseinek nagyságát adja. Ez a módszer olcsó, és a többinél

²⁷ <http://geophysics.elte.hu/magneses1.pdf> (A letöltés dátuma: 2018. 08. 26.)

²⁸ www.fke.bme.hu/oktatasi/Hudson_Nelson/Fizika33_Anyag_magneses_tulajdonsagai.pdf (A letöltés dátuma: 2018. 08. 30.)

²⁹ Nanotesla.

³⁰ <http://geophysics.elte.hu/magneses1.pdf> (A letöltés dátuma: 2018. 08. 30.)

³¹ Lenkey: Földmágneses mérések.

lényegesen gyorsabb vizsgálatokat tesz lehetővé. A módszert előszeretettel alkalmazzák különböző földfelszín alatti terepobjektumok (például gödrök, árkok, sáncok, földbe mélyített épületek, kemencék, tűzhelyek) behatárolására.

Ilyen vizsgálatokat is több alkalommal végeztünk Zrínyi-Újvár ostromának helyszínén és a várfalon egyaránt, a török ostromárkok, valamint a „sötét kapu” keresése során. A mérés folyamatát és egy magnetométeres mérés feldolgozott eredményét a 12. képen láthatjuk. Ezen jól kivehető egy betemetett árok, illetve a területen pontszerű zajként megjelenő különböző fémhulladékok.

Összegzés

Zrínyi-Újvár kutatása során az elmúlt több mint másfél évtizedben számos korszerű technikai megoldást, műszert és vizsgálati módszert vetettünk be annak érdekében, hogy minél átfogóbb és pontosabb képet kapjunk az erődítményről, annak környékéről, valamint az 1664-es ostromról. Jelen tanulmányunkban alapvetően azokat a bolygatásmentes vizsgálati módszereket mutattuk be, amelyek felhasználásával hosszú és fáradtságos fizikai munka nélkül lehet előzetesen felmérni a földfelszín alatti „világot” annak érdekében, hogy választ kapjunk a kutatások során (irodalmi és terepi) felmerülő kérdésekre, valamint hatékonyan tudjuk előkészíteni és megtervezni a szükséges föld-, illetve régészeti munkálatokat. Ennek egyik leglátványosabb példája a várkút (13. kép) helyének pontos azonosítása talajradar segítségével, amelynek köszönhetően 2017-ben sikerült teljes mélységében feltárni³² a stratégiai fontosságú, különleges kialakítású vízvételezési helyet. Bár az objektumhoz köthető történetekben szereplő várvédő katonák földi maradványaira és fegyvereire nem sikerült nagy számban bukkanni, az előkerült számos lelet így is fontos, új információkkal járult hozzá a „Zrínyi-örökség” bővüléséhez.



13. kép

Zrínyi-Újvár kútja feltárás közben felső perspektívából (balra), illetve alsó perspektívából (jobbra)

Forrás: a szerzők saját fotói

³² Költő–Vándor–Varga 2018.

A legnagyobb segítséget ugyanakkor a fémkeresők használata jelentette, amelyek régészeti és hadszíntérkutatási célú felhasználása során számos olyan ismeretre, fontos gyakorlati tapasztalatra tehattünk szert, amelyek feltárási munkálatokba való beépítésével fokozatosan tudtuk növelni tevékenységünk hatékonyságát. Ennek is köszönhetjük azt a fegyvertényt, hogy sikerült bizonyítani Zrínyi-Újvár létezését, lokalizálni pontos elhelyezkedését és a csatátér jellegzetes objektumait (ágyúállások, ostromárkok), valamint elegendő információt szerezni a terület makettjének, majd komplex 3D modelljének elkészítéséhez. A kutatások eredményeként jelenleg rendelkezésünkre álló óriási ismeretanyaghoz, a várról, valamint az ostromról kialakult képhez ugyanakkor számos technikai alapú kutatási módszer által szolgáltatott eredmény komplex, kollektív tudáson alapuló értékelésével sikerült hozzájutni. A kutatási folyamat alatt szerzett tapasztalatok a jövőben más, hasonló jellegű projektek során is felhasználhatók válnak, valamint az alkalmazott módszerek hatékonysága a technológia és a technikai eszközpark fejlődésével tovább nőhet.