

DOMBORZATI MODELL ALKALMAZÁSA EGY POROLISSUMBAN VÉGZETT RÉGÉSZETI CÉLÚ MÁGNESES MÉRÉS FELDOLGOZÁSÁBAN ÉS ÉRTELMEZÉSÉBEN

LIPOVICS TAMÁS¹, PETROVSZKI JUDIT¹, KUDÓ ISTVÁN¹, PÁNCZÉL SZILAMÉR²,
DOBOS ALPÁR³, VASS LÓRÁNT², LENKEY LÁSZLÓ⁴, BAJUSZ ISTVÁN^{2, 5}

¹ ELTE Geofizikai és Űrtudományi Tanszék, 1117 Budapest, Pázmány Péter sétány 1/C

² Babeş-Bolyai Tudományegyetem Ókortörténeti és Régészeti Tanszék, Kolozsvár

³ ELTE-BTK, Történelemtudományi Doktori Iskola, 1088 Budapest, Múzeum krt. 4/B

⁴ MTA-ELTE Geológiai, Geofizikai és Űrtudományi Kutatócsoport, 1117 Budapest, Pázmány Péter sétány 1/C

⁵ Szilágy Megyei Történeti és Művészeti Múzeum, Zilah

e-mail: lipo@ludens.elte.hu

Abstract

In this study with the help of a high-resolution magnetic survey carried out for archaeological purposes we show how joint application of magnetic and geodetic data can be used for topographic correction and interpretation of the measured anomaly map. The magnetic survey was carried out over the Roman-age ruins of Porolissum in NW Romania. We surveyed an area of 100 m x 120 m with grid spacing of 0.5 m, and measured the total magnetic field and its vertical gradient.

In general, the application of topographic correction is unnecessary in magnetic surveying because the magnetization of the subsoil is negligible. However, the topographic effect can be significant if the near-surface magnetic susceptibility is high. Magnetic topographic correction is defined here as the removal of the disturbing magnetic signals caused by the topography.

Besides the subsoil's enhanced magnetization in the survey area significant topographic variations explain the consideration of the magnetic terrain effect. In the applied procedure the induced magnetic field is estimated using the topography, the strength of the geomagnetic field and the magnetic susceptibility of the subsoil. The unknown remanent magnetization of the subsoil is neglected. We estimated the magnitude of the induced field considering three different susceptibility values (0.0035, 0.01 and 0.02 SI). The calculated magnetic field is subtracted from the measured data.

The corrected magnetic gradient map shows streets and foundations of houses like a present day city map. In some places two generations of houses built on top of each other's foundations can be recognised as the walls with different ages have different orientations. The magnetic maps proved to be very useful in reconstructing the structure of the ancient city.

Kivonat

Jelen dolgozatban egy Porolissumban (Mojgrád, Szilágy megye, Románia) végzett nagyfelbontású, régészeti célú mágneses felmérés példáján mutatjuk be, hogy a domborzati modell és a mágneses adatok együttes alkalmazása hogyan használható a mért adatok korrekciójában, illetve a mágneses anomáliakép pontosításában és értelmezésében. A mágneses felmérés során a mágneses tér nagyságát és annak vertikális gradiensét határoztuk meg 0,5 m-es rácsnál egy 100 m x 120 m-es területen.

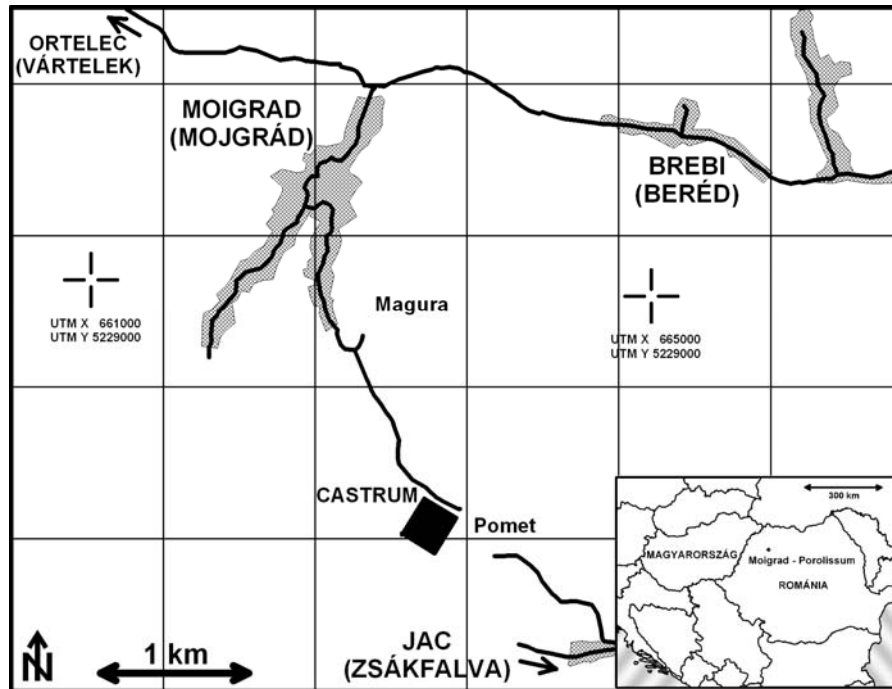
A mágneses méréseknél általában nem szükséges topográfiai korrekciót végezni, mert az altalaj mágnesezettsége elhanyagolható. Azonban, ha a mágneses szuszceptibilitás a felszín közelében nagy, akkor a topográfia hatása jelentős lehet. Mágneses topográfiai korrekció alatt a domborzati viszonyokból eredő zavaró jeleknek a mért értékekből történő eltávolítását értjük.

Mérési területünkön az altalaj nagy mágnesezettsége mellett a jelentős domborzati változások is indokolták a topográfiai hatás figyelembevételét. Az általunk alkalmazott korrekció során a külső tér és a talaj mágneses szuszceptibilitásának becslésével az altalaj indukált mágneses terét számítottuk ki, majd ezt levontuk a mért értékekből. Három különböző szuszceptibilitás érték (0,0035, 0,01 és 0,02 SI) esetében vizsgáltuk az indukált mágnesezettségből származó jel nagyságát a területen. A korrekció elvégzésekor a remanens mágnesezettségből eredő jelet elhanyagoltuk.

A korrigált mágneses gradiens térképen, mint a mai várostérképeken, utcák és házfalak azonosíthatók. Néhány helyen a különböző időszakokban egymásra épült szerkezetek is látszanak, amelyek az eltérő irányítottság alapján ismerhetők fel. Megállapítható, hogy a topográfiai korrekció felhasználásával előállított anomáliakép részletgazdagabbá, könnyebben értelmezhetővé válik, ami nagymértékben segíti az egykori városszerkezet megismerését.

KEYWORDS: ROMAN PERIOD, MAGNETIC SURVEYING, DIGITAL TERRAIN MODEL, TOPOGRAPHIC CORRECTION

KULCSSZAVAK: RÓMAI KOR, MÁGNESES MÉRÉSEK, DIGITÁLIS TEREPMODELL, TOPOGRÁFIAI KORREKCIÓ



1. ábra

A castrum és környezete
Mojgrád-Porolissumban
(Szilágy megye, Románia)

Bevezetés

A régészeti és a geológiai környezet rövid ismertetése

A kolozsvári Babeş-Bolyai Tudományegyetem Ókortörténeti és Régészeti Tanszéke, a Szilágy Megyei Történeti és Művészeti Múzeum és az ELTE Geofizikai és Űrtudományi Tanszéke közt fennálló együttműködés keretében 2005 óta végzünk régészeti célú mágneses méréseket a Mojgrádhoz (Szilágy megye, Románia) közeli *Porolissum* területén.

A *porolissumi* civil település a második dák háború után (Kr. u. 106) egy segédcsapattábor körül alakult ki. A tábor a Pomét-dombon helyezkedett el, ahonnan az Erdélyi-medencébe vezető északnyugati utat és a dáciai *limes* északnyugati szakaszát lehetett ellenőrizni. Fontos stratégiai helyzete miatt a település gyors fejlődésnek indult, és hamarosan *Dacia Porolissensis* tartomány egyik legfontosabb katonai, gazdasági, kulturális és vallási központja lett. Az itt állomásozó csapatok méretéből, valamint az amfiteátrum férőhelyeinek számából becslve, a Septimius Severus császár uralkodása alatt

municipiumi, tehát városi rangra emelt település lakossága az itt állomásozó katonákkal a III. századra kb. 20000 fő lehetett (Bărbulescu 2005). A III. század második felében a rómaiak kivonultak Daciából, és ezután a város is elnéptelenedett. Területén a későbbiekben sem jött létre új, nagyméretű település, ezért mind régészeti, mind geofizikai kutatások számára ideális terület. Az első feltárást 1908-ban végezték (Buday 1908), majd több megszakítást követően 1977 óta folynak az újakezdett tervásatások. Az egykori településen több helyen végeztek ásásokat, de a terület nagy része még feltáratlan. A *castrum* és környezetének elhelyezkedését mutatja az **1. ábra**.

A Pomét-dombon feltárt segédcsapattábor (*castrum*) északi kapuját (*porta praetoria*) újjáépítették, konzerválták a parancsnoki épület (*principia*), a sarok- és a kaputornyok megmaradt falait, és számos kutatóárokmal megpróbálták feltérképezni a *castrum*-ban található épületek elrendezését. Feltárták a *castrum* előtt elvezető római utat, és annak két oldalán pár fontosabb épületet, továbbá feltárták és rekonstruálták az amfiteátrumot.

Az egykori város területén is több helyen végeztek ásatásokat, de a terület nagy része még feltáratlan.

Porolissumban az épületeket a közeli Magura-hegy kőfejtőjéből származó dácitból építették. A helyi dácit mágneses szuszeptibilitása 0,02 SI körüli érték, ezért a dácitból készült objektumok indukált mágneszettségéből eredő jel magnetométerrel igen jól mérhető (Petrovszki et al. 2008). A város területén lévő maradványok között találkozhatunk homokkővel és mészkővel is, de ezek aránya elhanyagolható a dácithoz képest. A területen a dácit mellett jelentős még a beomlott tetőkből, vízvezetékekből, illetve a használati tárgyakból származó égetett cserép törmelék mennyisége. Az altalajban az épületmaradványok mellett az agyagos talajjal kevert, áthalmozott dácit és cseréptöredékek, illetve az ezek mállásából származó szemcsék adják a felszínközeli összletek nagy mágneszettségét.

A domborzati hatás figyelembevétele a mágneses mérésekben

Napjainkban mind a geofizikai mérések, mind a régészeti feltárások megkövetelik a helyszín koordinátáinak pontos ismeretét, esetenként a terep domborzati modelljének a meghatározását. A régészet számára a geodéziai adatok önmagukban is fontos információkat hordoznak, ugyanakkor a helykoordináták előállítása mellett a domborzati adatokból szintén levonhatók régészeti információk, következtetések. A geodéziai eredmények geofizikai adatokkal történő kombinálása pedig további ismereteket szolgáltathat egy adott mérési területről.

A régészeti célú, felszíni mágneses méréseket régóta alkalmazzák az archeológiában (Clark 1986; Gibson 1986; Tsokas et al. 1994) és a módszer hazai alkalmazása is rutinszerűnek tekinthető (Pattantyús-Á. 1986; Kis & Pusztai 2006).

A mágneses méréseknel általában nem szükséges a domborzat mágneses hatását figyelembe venni, mert a magmász és magnetit tartalmú kőzetek kivételével a kőzetek mágneszettsége elhanyagolható, és így a topográfiának nincs hatása a mágneses térre. Azonban, ha a mágneses szuszeptibilitás a felszín közelében nagy, akkor a topográfia hatása jelentős lehet. Például $\kappa=0,025$ SI esetén egy 45° -os, 10 m hosszú lejtő 700 nT anomáliát okozhat a mágneses térben (Gupta & Fitzpatrick 1971). Abban az esetben, ha a mérés helyszínén a szintkülönbségek jelentősek, akkor ez tovább növeli a domborzat mágneses hatását.

A fent említett zavaró hatás kiküszöbölésére alkalmazható a mágneses topográfiai korrekció. A korrekció alkalmazásakor megpróbáljuk eltávolítani a domborzati különbségekből eredő mágneses

jeleket az anomáliaképből. Mivel az altalaj remanens mágneszettségét nem ismerjük, ezért a módszer a homogén mágneses szuszeptibilitással rendelkező altalaj indukált mágneses terének a meghatározására, majd ennek a magnetométerek által mért térértékekből történő eltávolítására egyszerűsödik.

A számítás elvégzéséhez szükség van a domborzat részletes ismeretére, illetve az altalaj mágneses szuszeptibilitására. Ezért a nagyfelbontású mágneses méréseken kívül geodéziai felmérést kell elvégezni, aminek a segítségével elő lehet állítani a mérési terület megfelelő felbontású domborzati modelljét. A geodézián kívül mágneses szuszeptibilitás mérésekre is szükség van a felszín, illetve az altalaj minél több pontjában, hogy az altalajból származó indukált mágneses teret minél pontosabban becsülhessük.

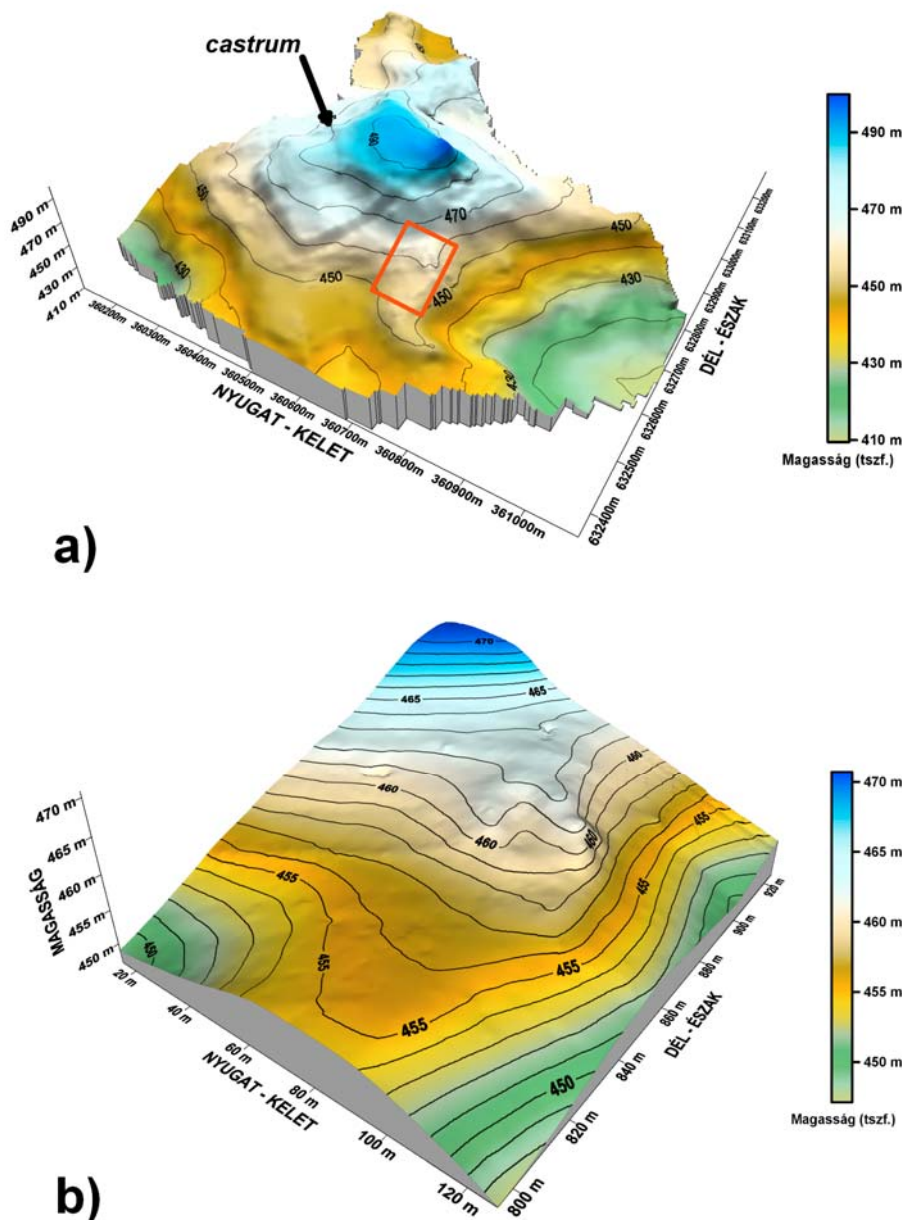
Az alábbiakban egy *Porolissumban* végzett nagyfelbontású, régészeti célú mágneses felmérés esetében teszünk kísérletet a mágneses topográfiai korrekció elvégzésére, amit az altalaj nagy mágneszettsége és a mérési terület jelentős szintkülönbségei indokolnak. Mivel a remanens mágneszettségről egyáltalán nem, a mágneses szuszeptibilitásról pedig csak a felszín közeléből álltak rendelkezésre információk, a pontosabb becslés érdekében három különböző szuszeptibilitás érték (0,0035, 0,01 és 0,02 SI) esetében vizsgáltuk az indukált mágneszettségből származó jel nagyságát a területen.

Adatok és módszerek

Geodéziai mérések

A *porolissumi* régészeti lelőhely központi részének geodéziai felmérését az 1991-1992-es években a Szilágy Megyei Történeti és Művészeti Múzeum megrendelésére I. HOROTAN geodéta irányításával készítették el. A területről előállított szintvonalas térképeket digitalizáltuk, majd elkészítettük a *castrum* környékének digitális terepmodelljét, ami a **2a ábrán** látható. Az ábrán a koordináták Sztereo-70-es vetületben, a magasság a Fekete-tenger szintje felett értendő, a túlmagasítás kétszeres. A digitális terepmodellen jól azonosítható a *castrum* téglalap alakú, a felszínből kiemelkedő tömbje, amelynek ÉK-i sarka (Bisericuța-csúcs) egyben az ábrázolt domborzat legmagasabb pontja. Az erődítmény azonosíthatósága jól példázza a topográfiai adatokból levonható információk hasznosságát. Az erődítménytől minden irányban lejt a terep, és a felszín bizonyos irányokban nyúlványokat alkot. A **2a ábrán** az egyik ilyen, a *castrum*-tól DK-i irányban elhelyezkedő nyúlványon piros keret jelöli a nagyfelbontású mágneses méréseink területét.

2. ábra



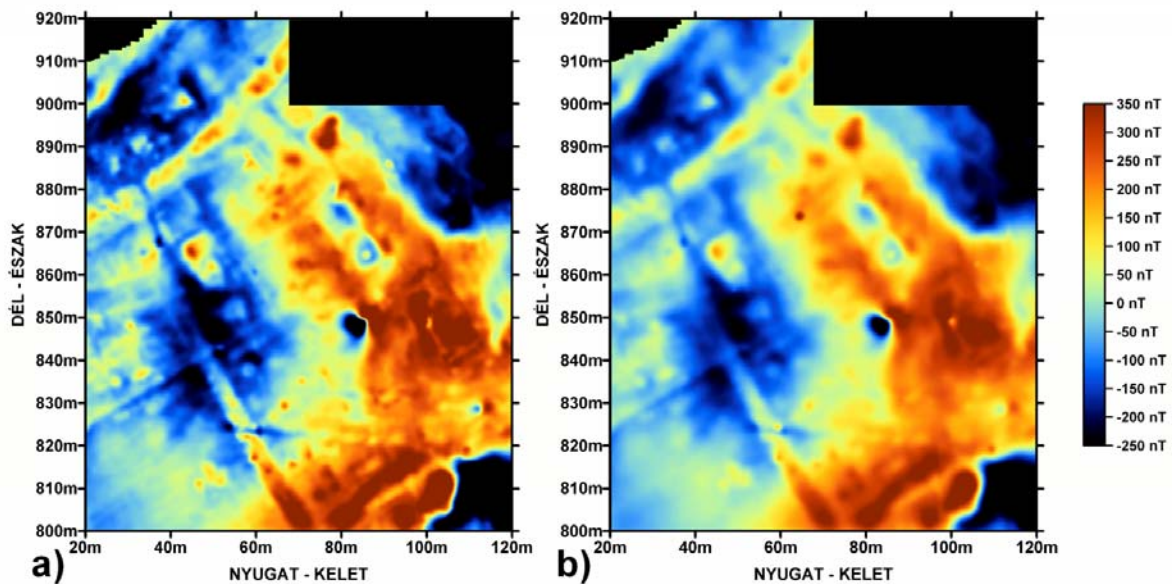
(a): A castrum környezetének digitális terepmodellje Prolissumban. A koordinátákat Sztereo-70-es vetületben ábrázoltuk. Piros keret jelöli a mágneses mérések helyét.

(b): A mágneses mérések helyszínének digitális terepmodellje a castrum-tól délkeletre. A koordinátákat lokális koordinátarendszerben adtuk meg észak-déli irányítottság mellett. A magasság mindkét ábrán a Fekete-tenger szintje felett értendő, a túlmagasítás kétszeres. Az ábrákon azonos színek mellett eltérő magasság tartományok vannak ábrázolva.

A mágneses mérések helyszínén a *Necropolis Prolissensis Project* (Alföldy-Gázdac et al. 2007) keretében 2008. augusztusában végeztünk részletes geodéziai felmérést egy Leica TPS 800-as típusú geodéziai mérőállomással. A mérési pontok átlagos sűrűsége a területen $0,16$ pont/m². A mérések alapján készített digitális terepmodell látható a **2b ábrán**. A modellben használt koordinátákat lokális koordinátarendszerben ábrázoltuk. A **2a ábrához** hasonlóan a magasságot a Fekete-tenger szintje felett adtuk meg, és a túlmagasítás is szintén kétszeres. Az ábrákon azonos színek mellett eltérő magasság tartományok vannak ábrázolva.

A mérési terület legmagasabb pontja az északnyugati sarokban, a castrum-hoz legközelebb eső pontban található. A terület közepén egy kisebb sík térség található, ahol egy gödör és körülötte - a DK-i irányt kivéve - kisebb földhányások azonosíthatók. Ez a Buday (1915) által végzett ásatás maradványa, amelynek szelvényét nem temették vissza.

A domborzaton még két kisebb mélyedés látható a (64 m; 908 m) és (35 m; 865 m) koordinátáknál, amelyek 0,8-1 méter mély régészeti kutatóárokot jelölnek.



3. ábra

A báziskorrigált és pólusra redukált anomáliák képe azonos színskálával, (a): az alsó szonda, (b): a felső szonda által mért és korrigált térértékek. A koordinátákat lokális koordinátarendszerben adtuk meg észak-déli irányítottság mellett. Az ábrákon nagyobb szerkezetek láthatók, utak és falak nyomvonalai.

Ezenek kívül még két lineáris szerkezet is azonosítható, amelyek a (20 m; 870 m) és (60 m; 890 m), illetve a (20 m; 825 m) és (70 m; 860 m) koordinátákat kötik össze. Ezek a vonalak az egykor mezőgazdasági művelés alatt álló földdarabokat elválasztó gyepek maradványai. A területen a szintkülönbségek meghaladják a 20 métert, ami a 100 m x 120 m-es kiterjedéshez képest igen jelentős érték.

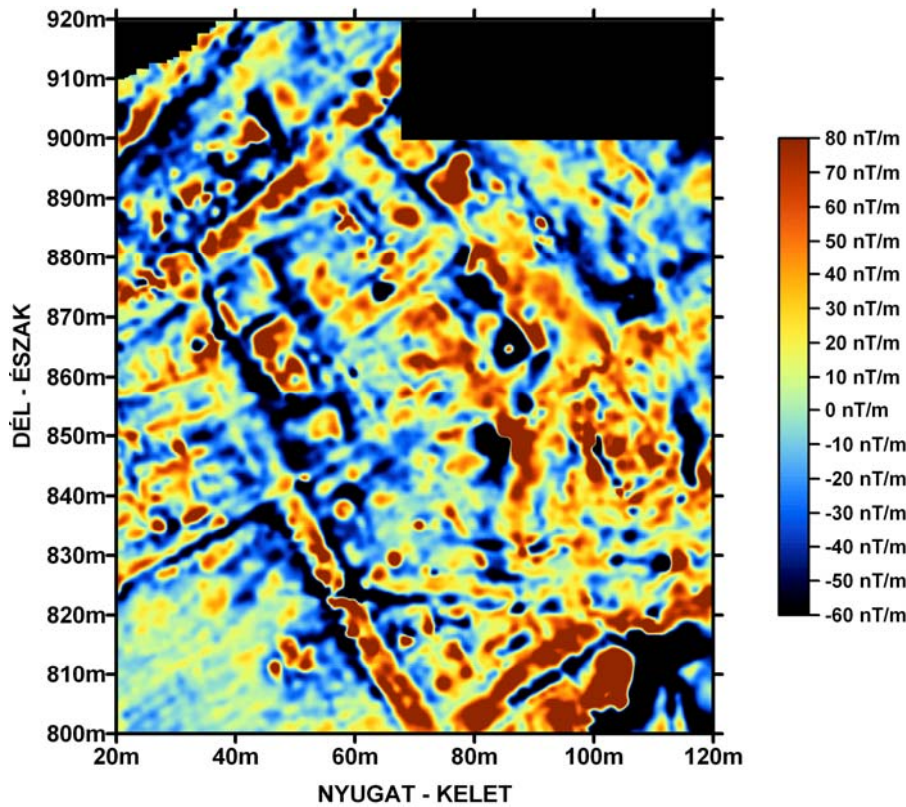
Mágneses mérések

A méréseket GSM-19 típusú Overhauser gradiométerrel végeztük, melynek felbontása 0,01 nT, abszolút pontossága 0,1 nT. A mágneses tér nagyságát és annak vertikális gradiensét mértük 0,5 x 0,5 méteres rácshálóban. A teljes területen mintegy 50000 pontban határoztuk meg a gradiens értékét. A vertikális gradiens kevésbé érzékeny a mágneses tér regionális változására és sekély hatók esetén élesebben lehatárolja az anomáliákat (Clark 1986; Kis & Pusztai 2006). Esetünkben a vertikális gradiens jel/zaj aránya is nagyobb. A korábban szerzett tapasztalatok (Petrovski et al. 2008) szintén megerősítették, hogy a területen a régészeti objektumok kijelölésére a gradiensmérés a legalkalmasabb.

Az alsó detektor felszíntől mért magassága 0,48 méter, a két detektor közti távolság 0,56 méter volt, így a felső szonda talajtól számított magassága valamivel meghaladta az 1 métert. A rácshálót a lokális koordinátarendszernek megfelelően észak-déli és kelet-nyugati irányban tájoltuk, amelynek

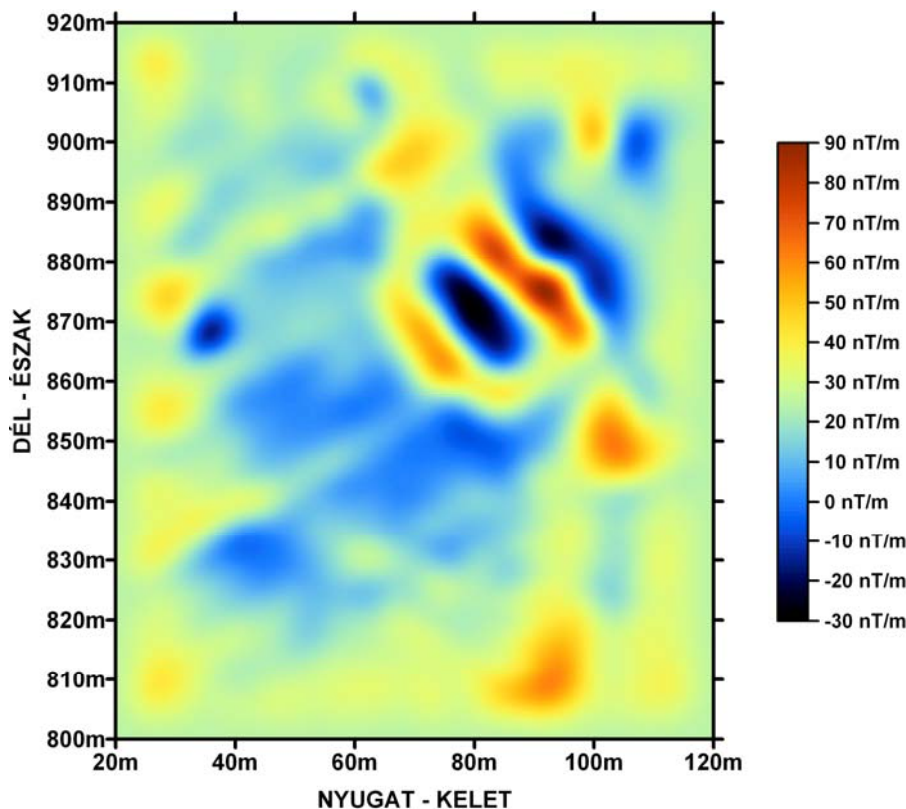
északi részén a terepi adottságok, azaz egy bozotos miatt nem mindenütt tudtunk méréseket végezni. A mért értékeket képfeldolgozó szoftverrel ábrázoltuk és dolgoztuk fel.

Az adatokból először a mágneses tér időbeli változásának eltávolítására került sor a báziskorrekció segítségével. Ezt követte a mért értékek előzetes vizsgálata, melynek során a mérésből nagyságrendekkel kiemelkedő, valószínűsíthetően felszínközeli vastárgyak zavaró jeleit távolítottuk el. A következő lépésben a két szonda által mért mágneses tér értékeket pólusra redukáltuk (Blakely 1995). A pólusra redukáláshoz szükséges külső tér adatokat a 2005.0 IGRF modellből vettük (Maus et al. 2005), amely szerint a *Porolissum* helyzetének megfelelő helykoordinátára (é. sz. 47°10'30", k. h. 23°10'0") és a 2008. 08.20-i időpontra vonatkoztatva a külső tér nagysága 48645 nT, az inklináció értéke 64,0°, a deklináció szöge 4,45°. A báziskorrigált és pólusra redukált anomáliákat mutatja a **3. ábra**. A **3a-b ábrákon** mind az alsó, mind a felső szonda által mért képen kivehetők nagyobb szerkezetek, utak és falak nyomvonalai. A két anomáliaképet összehasonlítva jól látható, hogy az alsó szonda által mért értékekből szerkesztett kép a nagyobb frekvenciák miatt élesebb. Az anomáliaképek északi részén két fekete folt jelzi a mérési adatok hiányát, amit az említett terepi adottságok indokolnak. A **4. ábrán** látható a báziskorrigált és pólusra redukált anomáliákból számított vertikális gradiens képe.



4. ábra

A 3. ábrán látható báziskorrigált és pólusra redukált anomáliákból számított vertikális gradiens képe. A vertikális gradiens mágneses képe jóval részletgazdagabb, mint az alsó vagy a felső szonda által mért anomáliáké.



5. ábra

Az altalaj indukált mágneszettségéből eredő vertikális gradiens szűrt változata 0,01 SI mágneses szuszceptibilitás érték mellett.

A vertikális gradiensből kapott mágneses kép az anomáliák élesebb lehatárolása miatt jóval részletgazdagabb, mint az alsó vagy a felső szonda által mért anomáliaképek.

Az altalaj mágneses szuszceptibilitásának meghatározásához KT-6 Kappaméterrel terepi méréseket végeztünk. Azt kaptuk, hogy a területen a szuszceptibilitás értéke átlagosan 0,0025 és 0,0035 SI között változik. Néhány kiugró mérési érték azonban meghaladta a 0,01 SI értéket. Csúpn a

felszínen, illetve a rendelkezésre álló sekély árkokban tudunk méréseket végezni, így a mélyebben lévő talajról nem állt rendelkezésre információ. Azt azonban megállapíthattuk, hogy a mért szuszceptibilitás értékek nagyságrendekkel meghaladják az átlagos mágnesezettségű talajokra jellemző értékeket.

A mért adatok korrekciója és a mérési eredmények értelmezése

Mágneses topográfiai korrekció alkalmazása

Az általaj indukált mágnesezettségéből származó jel kiszámításához a Li & Oldenburg (1996) által írt 3D mágneses inverziós szoftvercsomag direktfeladat-megoldó rutinját használtuk fel. Adott külső tér mellett a mágnesezettség (\mathbf{J}) függését a mágneses szuszceptibilitástól (κ) egy differenciál-egyenlet adja meg. Amennyiben a szuszceptibilitás értéke nem túl nagy, akkor első közelítésben a mágnesezettség arányosnak tekinthető a szuszceptibilitással. A mágnesezettség miatt keletkező indukált tér a következő integrál-egyenlet segítségével adható meg:

$$\mathbf{B}_a(\mathbf{r}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_V \nabla \nabla \frac{1}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|} \mathbf{J} dv,$$

ahol $\mathbf{B}_a(\mathbf{r})$ a felszín egy adott pontjában meghatározott mágneses indukció vektora, V a mágnesezhető anyag által kitöltött térfogat, \mathbf{r} abba a pontba mutató helyvektor, ahol a hatást számítjuk, \mathbf{r}' egy tetszőleges, másik pontba mutató helyvektor, annak az elemi térfogatnak a helyét jelöli, amelyiknek a mágneses hatását számítjuk.

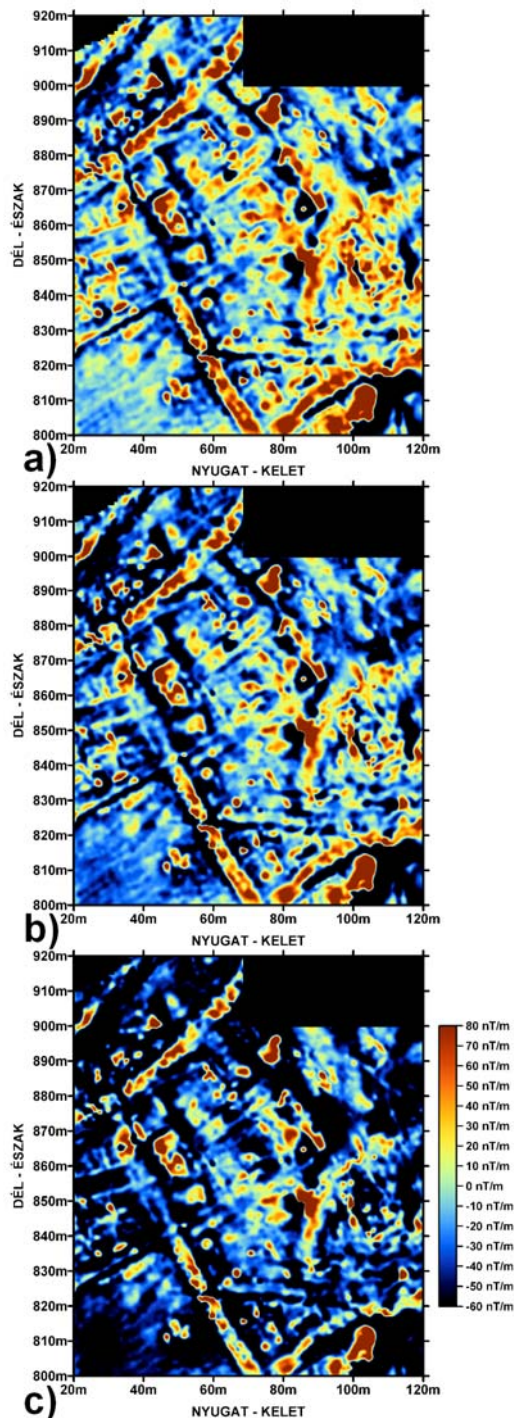
A számítás első lépéseként a mágneses mérési pontok alatti térrészt téglatestekből álló elemi cellákra osztjuk fel egy ortogonális térrács segítségével. A cellák a vizsgált elemi térfogatokot reprezentálják, és belsejükben a mágneses szuszceptibilitás értéke állandónak feltételezett. Az aktuális anomália, ami a fenti összefüggés alapján a domborzat felett adott magasságban, egy adott pontban meghatározható, a nem-zérus szuszceptibilitású elemi cellák által keltett mágneses terek összege. Esetünkben mind az alsó szonda, mind a felső szonda helyzetének megfelelő minden egyes rácspontban meg kellett határozni a mágneses tér értékét a teljes mérési területen. A számításhoz bemeneti paraméterként szükség van a mérési pontok koordinátáira, illetve a külső tér jellemzőire. A külső tér jellemzőit (térérték, inklináció, deklináció) a korábbiakhoz hasonlóan a 2005.0 IGRF modellből határoztuk meg (Maus et al. 2005).

A számításban a mérési területet egy 112 x 130 x 65 m élhosszúságú téglatestbe foglalt, homogén mágneses szuszceptibilitással jellemzett domborzati modell reprezentálja. A téglatest horizontális kiterjedése minden irányban 5 méterrel meghaladja a mérési terület nagyságát, hogy a szélek mágneses hatása ne jelentkezzen a korrigált mérési adatokban. A modellt különböző magasságú, de azonos horizontális élhosszúságú elemi cellák építik fel. A horizontális élhosszúság a mágneses mérés rácsának megfelelően 0,5 m, míg a cellák magassága változik a mélységgel. A modellben a felszíntől lefelé 100 darab 0,25 m magas, majd 20 darab 0,5 m-es, majd 10 darab 1 m-es, végül 4 darab 5 m magas cella következik. Így a modell összesen 134 szintből áll. A mélységgel növekvő cellamagasság beállítása a távolsággal köbösen csökkenő mágneses intenzitás miatt indokolt. A fenti felosztás mellett a téglatest mintegy 7,8 millió cellát tartalmaz.

Megvizsgáltuk, hogy a különböző lehetséges cella felosztások közül kiválasztható-e olyan, ami a számítások idejének csökkentése mellett elégséges felbontást ad a korrekció optimális elvégzéséhez. Azt tapasztaltuk, hogy az optimális horizontális felosztásnak legalább el kell érnie a mágneses mérési rács felbontását, azaz a 0,5 x 0,5 métert, míg vertikális irányban a felszínközeli 0,25 méteres felbontás is minimális követelmény a modellel szemben. Sajnos a rácsfelbontás további növelése a számítások idejének drasztikus növekedésével jár, ezért ennek alkalmazása nem célravezető.

A felszíni mágneses szuszceptibilitás mérések alapján a modell minden egyes cellájára a 0,0035 SI szuszceptibilitás értéket tételeztük fel. Ugyanakkor lehetségesnek látszott, hogy ez az érték alulbecsüli a valódi, a helyi viszonyokra jellemző szuszceptibilitás értéket. Ezért további két lehetséges értékre, 0,01 és 0,02 SI-re is elvégeztük a számításokat. Ez utóbbi érték azt a feltételezést jelenti, mintha a teljes általaj dációból állna. Mivel mindhárom mágneses szuszceptibilitás érték esetében mind az alsó szonda, mind a felső szonda magasságában meg kellett határozni az indukált mágneses jel nagyságát a teljes területre, ezért összesen hat számítás elvégzésére volt szükség.

A modellcellák éleiből származó mágneses hatás a felszín közelében torzítja az indukált mágnesezettségből kapott jel eloszlását. Ez a torzító, nagyfrekvenciás jel szűrés segítségével eltávolítható az eredményekből. A művelethez kétdimenziós, Gauss-típusú aluláteresztő szűrőt használtunk, amelynek levágási hullámhossza 8,8 méter volt. A szűrés az amplitúdók simításával járt együtt, amit a szűrés előtti értékekre egyenlítettünk ki lineáris közelítéssel.



6. ábra

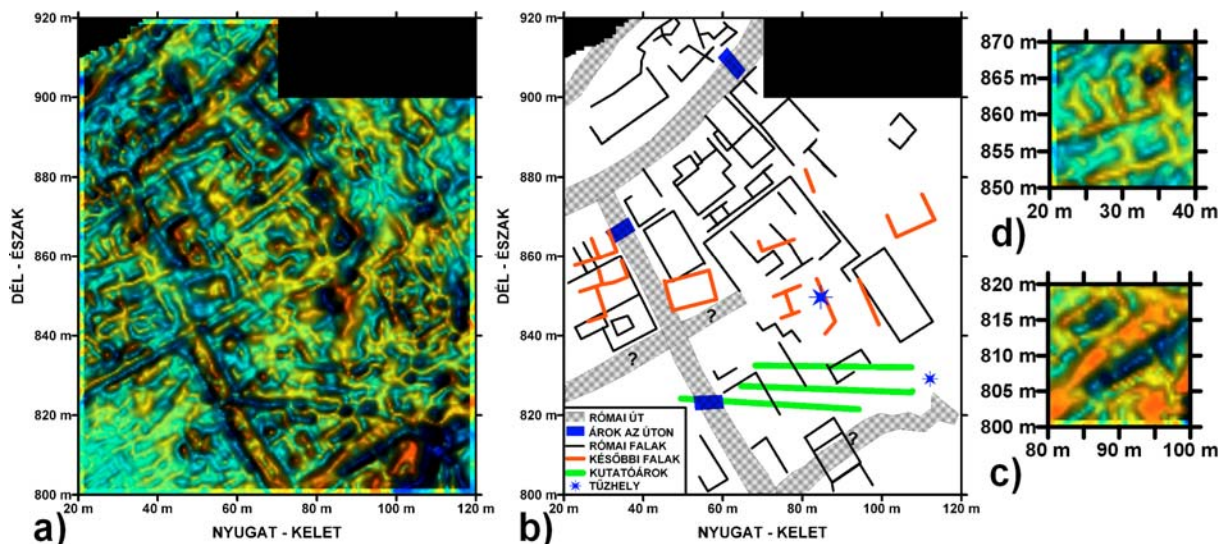
Vertikális gradiens anomáliák topográfiai korrekció után (a): 0,0035 SI, (b): 0,01 SI, (c): 0,02 SI mágneses szuszeptibilitás értékek mellett. A topográfiai korrekciót a mért, báziskorrigált és pólusra redukált anomáliákból számított vertikális gradiensre végeztük el.

Az **5. ábra** mutatja az altalaj indukált mágnesezettségéből eredő mágneses tér vertikális gradiensének szűrt változatát a 0,01 SI mágneses szuszeptibilitás értékre vonatkozóan a mágneses mérés területére redukálva. Az indukált mágneses jel nagysága és a szuszeptibilitás közötti lineáris összefüggés miatt a 0,0035 és 0,01 SI értékre számított anomáliák amplitúdó tartománya arányosan kisebb a 0,02 SI-re számítottnál.

A számított értékek ismeretében már eldönthető, hogy a mért mágneses jelekhez hogyan aránylik a domborzatból eredő, indukált mágneses jel nagysága. A számított vertikális gradiens nagysága $\kappa=0,0035$ SI esetén a $-10,5 - 31,2$ nT/m, $\kappa=0,01$ SI esetén a $-30,0 - 89,1$ nT/m, míg $\kappa=0,02$ SI esetén a $-60,0 - 178,1$ nT/m értéktartományba esik. Az adatok változásában jól látható a szuszeptibilitás és a számított indukált tér közti lineáris összefüggés. A fenti adatokat összevetve a **4. ábra** értékeivel megállapítható, hogy a domborzatból eredő indukált mágneses jel egy nagyságrendbe esik a mért mágneses értékekkel. Tehát esetünkben a topográfiai korrekciót érdemes elvégezni, mivel számottevően javíthatja az eredmények minőségét.

A **6. ábra** mutatja a topográfiai korrekció után a vertikális gradiens anomáliákat a 0,0035 SI, 0,01 SI és 0,02 SI mágneses szuszeptibilitás értékek mellett. Az összehasonlíthatóság miatt a **6. ábra** színskálája megegyezik a **4. ábra** színskálájával. A topográfiai korrekciót az alsó és felső sonda által mért, báziskorrigált és pólusra redukált anomáliákból számított vertikális gradiensre végeztük el, azaz ebből vontuk le a különböző szuszeptibilitás értékekre kiszámított, indukált vertikális gradiens anomáliákat. A művelet során az altalajból eredő indukált mágneses tér értékeit a mért adatokhoz hasonlóan először pólusra kellett redukálni, majd az ezekből képzett vertikális gradienseket használtuk fel a korrekcióban.

A topográfiai korrekció után eltűnnek az anomáliákról a domborzati hatásból eredő zavarok, az anomáliák háttere kiegyenlítettebbé válik, ami az egyenletes háttérszínben nyilvánul meg. A **6a**, **6b** és **6c** ábrákon a **4. ábra** anomáliaképehez viszonyítva a vonalas szerkezetek letisztultabb képet mutatnak. Ugyanakkor a 0,0035 SI mellett végzett korrekció (**6a ábra**) nem ad sokkal eltérőbb anomáliaképet a korrekció előttihez képest, így ez a felszíni mérésekből kapott érték alulbecsüli a domborzat mágneses hatását. A 0,01 SI mellett végzett korrekció (**6b ábra**) biztosítja a legjobb kiegyenlítést a három számítás közül, ezért megállapíthatjuk, hogy az altalaj átlagos szuszeptibilitása valahol a 0,01 SI érték körül van. A domborzati hatás eltűnése a Buday (1915) által végzett ásatás maradványának közelében a legszembetűnőbb.



7. ábra

(a): Vertikális gradiens anomália topográfiai korrekció után 0,01 SI mágneses szuszeptibilitás értékkel számítva térhatású színezéssel; (b): a mérési terület régészeti objektumainak egy lehetséges értelmezése; (c)-(d): kinagyított részletek az (a) ábráról.

Ezzel szemben a **6c ábrán** látható, 0,02 SI mellett végzett korrekció túlbecsüli a topográfia mágneses hatását. Így a mérési területen nem feltételezhető 0,01 SI-t jelentősen meghaladó érték az általaj átlagos mágneses szuszeptibilitására.

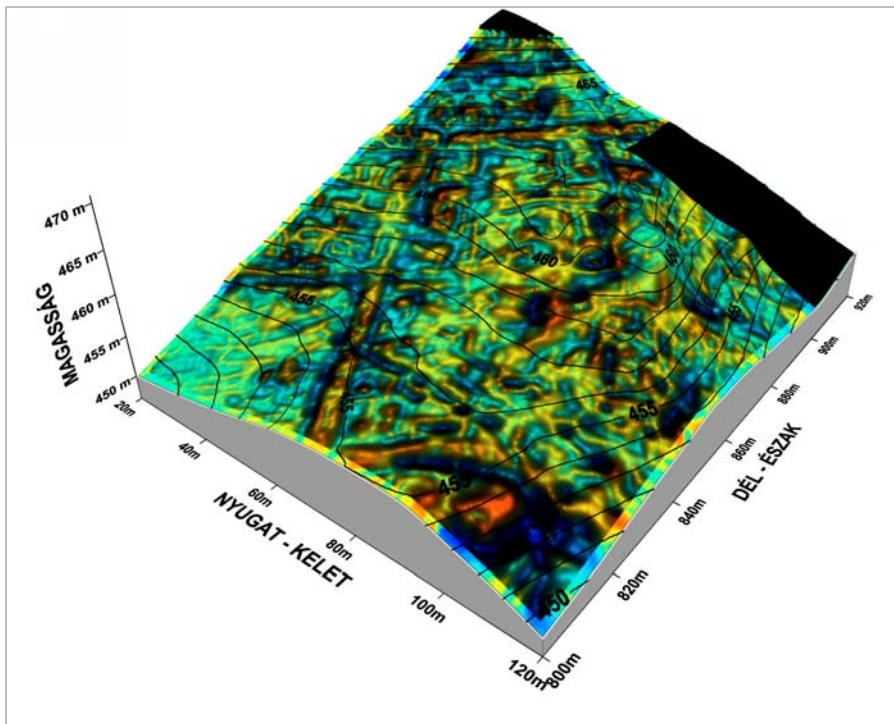
A mérési eredmények értelmezése

A **7a ábra** mutatja a vertikális gradiens anomáliát topográfiai korrekció után térhatású színezéssel, melyet 0,01 SI mágneses szuszeptibilitás érték mellett számítottunk. Az ábrán számos szerkezet előtűnik, amelyek közül a legszembetűnőbbek a hosszan elnyúló, 5-7 méter széles, nagy intenzitású vonalas szerkezetek. A terület ÉNy-i részén két, enyhén egymáshoz tartó, ÉK-DNy-i irányított vonalas szerkezet látható. Mindkettő római útként azonosítható, amelyeket korábbi feltárásokból ismerünk. Az északi útnak a mérési területen kívüli folytatását egy a *castrum*-hoz közeli feltárás vissza nem temetett árkából ismerjük. Míg a délebbi úton egy már korábban említett régészeti kutatóárok települt, amelynek alján egyértelműen azonosíthatók az utat képező dáciitömbök. Ebből az útszakaszból ágazik le a (30 m; 875 m) koordináta környékén egy ÉNy-DK-i irányított útszakasz, amelyet szintén biztosan be lehet azonosítani a nyomvonal mentén telepített két árok alján feltárt dáciitömbök segítségével.

A fenti, egyértelműen útként azonosított lineáris szerkezeteken túl még megfigyelhető két lineáris struktúra is az anomáliaképen, amelyek jelintenzitása igen hasonló az utakéhoz. A keskenyebb a (20 m; 825 m), a másik a (80 m; 800 m) koordinátából indul, és mindkettő ÉK-nek tart.

Az előbbi intenzitása kevésbé erőteljes, szélességében közelebb áll a falak anomáliaképehez, mégis jól illeszkedik az eddig azonosított úthálózatba. A második szerkezet mind intenzitásában, mind 5-7 méteres szélességében nagyon hasonlít az utak képehez, ugyanakkor 30 méter után keleti irányba kanyarodik. Ez utóbbi objektum látható a **7c ábrán** is, ahol megfigyelhető, hogy az úthoz hasonló lineáris szerkezet keresztülmegy egy olyan épületen, ami irányítottágával szervesen illeszkedik a többi épülethez. Ez azért szokatlan, mert kevésbé valószínű, hogy a város központjában a római kori épületen még a római időkben utat vezettek volna keresztül, vagy egy út fölé épületet húztak volna. Ezek azok az okok, amelyek miatt ez utóbbi két vonalas szerkezet nem sorolható egyértelműen a római kori utak közé.

Az anomáliakép DK-i része tűnik a legzavartabbnak, ami a területén közel KNy-i irányban végighúzódó három darab 50-60 méter hosszú régészeti kutatóároknak köszönhető. A talajba mélyített és a terepen is azonosítható árok számos objektumot kereszteztek, készítésük során számos építőkövet, falszakaszt távolítottak el, ezért lett a mágneses kép ezen a részen erősen zavart. Ugyanezen a területen a (85 m; 848 m) és a (114 m; 829 m) koordinátákban két ÉK-DNy-i tengelyű dipóliszerű anomália azonosítható, amelyek erőteljes remanens jeleket hordoznak. Az intenzitásuk és tengelyirányuk alapján valószínűsíthetően tűzhelyek, a nagyobb átmérőjű esetleg kemence okozta anomália.



8. ábra

Vertikális gradiens anomália topográfiai korrekció után 0,01 SI mágneses szuszeptibilitás érték mellett a mérési terület digitális terepmodelljén.

Az anomáliaképen számos egyéb kisebb intenzitású, pozitív vagy negatív, de az utakhoz képest keskenyebb és rövidebb lineáris anomália is látható, amelyek többnyire egykori falak, falmaradványok jeleként azonosíthatók. E falak néhol teljesen körülhatárolható épületeket alkotnak, másutt csupán töredékesen jelennek meg. A falmaradványok irányítottsága általában követi az utak irányát, a falak többnyire az utakra párhuzamosan vagy merőlegesen helyezkednek el. A **7d ábrán** egy szintén a **7a ábráról** nagyított kép található. Ezen olyan falakra jellemző anomáliák láthatók, amelyek intenzitásában és irányítottságában különbség van. A kisebb intenzitású, és ezért vélhetőleg mélyebben fekvő falak az egyik útra párhuzamosan, illetve merőlegesen, ÉNy-DK-i csapásiránnyal helyezkednek el. Felettük erősebb intenzitással láthatók falmaradványok, melyek az előzőekkel 15-20°-os szöget bezárva inkább ÉÉNy-DDK-i irányítottságúak. Ebből az a következtetés vonható le, hogy egy korábbi, mindenképpen a város idejéből származó építési fázisra egy későbbi fázis települt, ami az épületeket kismértékben elforgatta. E későbbi építési fázisról nem áll rendelkezésre részletes információ, csupán az ekkor készített falak, falmaradványok irányítottsága, illetve intenzitásának erőssége. Ugyanakkor fontos megemlíteni, hogy az 1914-ben Buday (1915) által itt feltárt épületben számos középkori érem és faragvány került elő, melyek kapcsán az ásatási jelentésben a szerző felvetette annak a lehetőségét,

hogy itt feküdt az oklevelekből jól ismert Meszesimonostor.

Az eltérő falak intenzitása többnyire 30-60 nT/m-rel jellemzett a vertikális gradiens képen, és kiemelkedik környezetéből. Szisztematikusan megvizsgálva a teljes anomáliaképet számos hasonló irányítottságú és intenzitású falmaradványra bukkanhatunk, amelyek főként a mért terület középső harmadára, a középső sík területre koncentrálnak.

A **7a ábra** mellett látható a **7b ábra** a mágneses anomáliaképen azonosítható objektumokkal (római utak, árkok az úton, római falak, falak a későbbi fázisból, kutatóárkok nyomvonalai, tűzhelyek). A falak esetében minden olyan szerkezetet jelöltünk, ami véleményünk szerint egyértelműen azonosítható, függetlenül attól, hogy a gradiens képen pozitív vagy negatív anomáliával jellemzett. A negatív vonalas szerkezetek valószínűsíthetően a korábban kiszedett falmaradványok nyomát ábrázolják. Fontos hangsúlyozni, hogy a **7b ábrán** látható értelmezés számos szubjektív elemet tartalmaz, és csupán egy lehetséges értelmezés a sok közül.

A domborzati modellen ábrázolt geofizikai adatok is adhatnak újabb információkat a területről, ezért a **8. ábrán** adtuk meg a 0,01 SI mágneses szuszeptibilitás érték mellett topográfiai hatással korrigált vertikális gradiens anomáliát a mérési terület digitális terepmodelljén ábrázolva.

Összefoglalás

Mágneses méréseink során egy 100 m x 120 m kiterjedésű területen végeztünk nagyfelbontású felmérést. A mágneses adatok feldolgozásakor a rutinszerűnek tekinthető feldolgozási és korrekciós lépéseken kívül lehetőségünk adódott a mágneses topográfiai korrekció alkalmazására. Ehhez szükségünk volt a terep domborzati modelljének a meghatározására és mágneses szuszceptibilitás mérések kivitelezésére. A topográfiai korrekció alkalmazása azért bizonyult igen hasznosnak, mert a vizsgált területen jelentős volt a szintkülönbség és a talaj indukált mágnesezettségéből eredő mágneses hatás. A topográfiai korrekció során a külső tér és a talaj mágneses paramétereinek ismeretében az általa indukált mágneses terének becslését végeztük el, majd a kapott jeleket eltávolítottuk a mért értékekből. A számítások során több lehetséges szuszceptibilitás érték mellett (0,0035, 0,01 és 0,02 SI) becslültük a keletkező indukált jel nagyságát, ami a mért értékekkel azonos nagyságrendűnek adódott. A számításokban a remanens mágnesezettségéből eredő jelet elhanyagoltuk. A szuszceptibilitás értékek közül a 0,01 SI bizonyult optimálisnak, tehát a felmért területen az általa átlagos szuszceptibilitás értéke valahol ebben a tartományban található.

A korrigált adatokból előállított vertikális gradiens rendkívül részletgazdag anomáliaképet eredményezett. A kapott képen számos régészeti objektumot sikerült azonosítani, így utakat, árkokat, falakat, kutatóárkok nyomvonalait és tüzhely/kemence nyomokat. Alkalmunk volt legalább két különböző korú építési fázisra utaló mágneses jeleket megkülönböztetni. Ezek közül az első fázis a római város idejére esik, míg a második ezt követte, de pontos idejének megállapításához nincs elegendő információ.

Az eredmények jelentőségét egyrészt az adja, hogy jelen mérés során lehetőségünk nyílt egy egyszerű, hasznos, de a régészeti célú mágneses mérésekben ritkán alkalmazható adatkorrekció elvégzésére; másrészt az eredmények rávilágítanak arra, hogy a geodéziai és a geofizikai adatok együttes kezelése igen fontos a régészeti alkalmazásokban.

Köszönetnyilvánítás

Köszönettel tartozunk Márton Péter akadémikus úrnak, aki 2004 folyamán archeomágneses méréseket végzett a területen, és felhívta figyelmünket a *porolissumi* mérési lehetőségre. Az OTKA TS 044765 számú Tudományos Iskola projekt és a GVOP-3.2.1-2004-04-0390/3.0 számú pályázat tették lehetővé azon magnetométerek beszerzését, amelyekkel a méréseket végeztük. A fenti támogatókon kívül még a Necropolis Porolissensis Project-nek (UEFISCSU, Idei 516) tartozunk köszönettel az anyagi támogatásért.

Irodalom

ALFÖLDY-GÁZDAC, Á., PÁNCZÉL, SZ., VASS, L., GÁZDAC, C., BAJUSZ, I. & GUDEA, N. (2007): Project "Necropolis Porolissensis" Methods and Perspectives. *Acta Terrae Septemcastrensis* **VI/1**:9-17.

BĂRBULESCU, M. (2005): *Atlas - dicționar al Daciei Romane*. Editura Tribuna, Cluj-Napoca, 337 pp.

BLAKELY, R. J. (1995): *Potential theory in gravity and magnetic applications*. Cambridge University Press, Cambridge, 441 pp.

BUDAY, Á. (1908): Porolissumból. *Erdélyi Múzeum* **III/25**:337-348.

BUDAY, Á. (1915): Porolissumból. Jelentés az 1914. évi munkálatokról. *Dolgozatok az Erdélyi Nemzeti Múzeum Érem- és Régiséggyűjtéséről* **VI**:51-95.

CLARK, A. J. (1986): Archeological geophysics in Britain. *Geophysics* **51**:1404-1413.

GIBSON, T. H. (1986): Magnetic prospection on prehistoric sites in Western Canada. *Geophysics* **51**:553-560.

GUPTA, V. K. & FITZPATRICK, M. M. (1971): Evaluation of terrain effects in ground magnetic surveys. *Geophysics* **36**:582-589.

KIS, K. I. & PUSZTA, S. (2006): Application of magnetic field derivatives for locating Sarmatian graves. *J. Appl. Geophysics* **60**:13-26.

LI, Y. & OLDENBURG, D. W. (1996): 3D inversion of magnetic data. *Geophysics* **61**:394-408.

MAUS, S., MACMILLAN, S., CHERNOVA, T., CHOI, S., DATER, D., GOLOVKOV, V., LESUR, V., LOWES, F., LÜHR, H., MAI, W., MCLEAN, S., OLSEN, N., ROTHER, M., SABAKA, T., THOMSON, A. & ZVEREVA, T. (2005): The 10th generation international geomagnetic reference field. *Physics of the Earth and Planetary Interiors* **151**:320-322.

PATTANTYÚS-Á., M. (1986): Geophysical results in archeology in Hungary. *Geophysics* **51**:561-567.

PETROVSZKI, J., LIPOVICS, T., LENKEY, L., PETHE, M., FERENCZ, E. & HEREIN, M. (2008): Régészeti kutatás céljából végzett mágneses mérések Porolissumon. *Magyar Geofizika* **49/2**:88-95.

TSOKAS, G. N., GIANNOPOULOS, A., TSOURLOS, P., VARGEMEZIS, G., TEALBY, J. M., SARRIS, A., PAPAZACHOS, C. B. & SAVOPOULOU, T. (1994): A large scale geophysical survey in the archeological site of Europas (northern Greece). *J. Appl. Geophys.* **32**:85-98.

