

Monitoringtervezés és -értékelés geostatistikai módszerekkel

I.

Szakértői véleményen alapuló, „igazoló” mintázás geostatistikai támogatása

FÜST Antal¹, GEIGER János²

¹Szent István Egyetem, Informatika Tanszék, 2100 Gödöllő, Páter Károly u. 1., e-mail: antalfust@gmail.com

²Szegedi Tudományegyetem, Földtani és Őslénytani Tanszék, 6701 Szeged, Egyetem u. 2–6., e-mail: matska@ge.u-szeged.hu

Setting up monitoring networks using geostatistics

I.

Geostatistical support for a judgmental sampling strategy

Abstract

During the initial stage of any monitoring activity, knowledge about properties targeted by a monitoring network is generally not enough to form a stable sampling strategy. This question of representativeness constitutes one of the most important problems when drawing up initial monitoring plans. This is why the importance of analogy-based sampling design has been appraised recently. This paper is concerned with the geostatistical support for a judgmental sampling design. The planning consists of three steps: sampling along lines; sampling in two-dimensions; and planning of the temporary 'distance' between the consecutive measuring. In derivations the sill and range of an analog process are used. The temporary 'distance' between two measurements is determined using a multiplicative factor which depends on the theoretical variogram model of the analog process. The results are extended to processes with both linear and non-linear trend functions.

Keywords: monitoring network, geostatistics, semivariogram, analog systems sampling distance

Összefoglalás

A monitoringrendszerek mintázási reprezentativitásának egyik nagy problémája, hogy a kutatás kezdeti időszakában a tényezők ismertsége általában még nem elegendő egy stabil mintázási stratégia kialakításához. Pontosan emiatt az utóbbi időben felértékelődött az analógián alapuló igazoló mintázás jelentősége. Jelen dolgozat is egy ilyen, analógián alapuló (ún. igazoló mintázási stratégia) geostatistikai támogatásának módját mutatja be. A tervezés a következő három lépésből áll: 1. megfigyelési vonalak tervezése, 2. megfigyelési hálózat tervezése két dimenzióban, 3. az egyes megfigyelő helyeken a mérések követési idejének számítása. Az alkalmazás során az analóg rendszer térbeli folytonossági mértékének hatástávolságát és küszöbértékét használjuk. A mintázási időtávolságot egy korrekciós tényezővel vesszük figyelembe, amely az analóg félvariogram modell paramétereinek függvénye. A levezetést kiterjesztjük mind a lineáris mind a nem lineáris trendű jelenségek monitoringhálózatának tervezésére.

Tárgyszavak: monitoringhálózat, geostatistika, félvariogram, analóg rendszerek, mintázási távolság

Bevezetés

A monitoringhálózatok kialakításának és működtetésének kulcskérdése a mintavétel. A mintázási stratégia a tudományos alapú döntéshozatal alapvető része. A jól kialakított mintázási terv kritikus szerepet játszik a következtetéshez szükséges adatmennyiség biztosításában. Emiatt a mintázási terv meghatározó eleme minden matematikai statisztikai és geostatistikai feldolgozásnak. Annál is inkább, hiszen ezek az elemzési eljárások a stacionaritás bizonyos

szintjeit igénylik, ám ezeket a hipotéziseket a minták alapján általában nem lehet igazolni. Ebből természetesen következik, hogy a mintázási terv során olyan helyzet kialakítása fontos, amely ezeket a stacionaritási feltételezéseket nyilvánvaló teszik.

Az Egyesült Nemzetek Európai Gazdasági Bizottsága (ENSZ/EGB) Monitoring és Értékelés Akciócsoportjának a határokat átlépő vízfolyások és nemzetközi tavak védelmére és használatára vonatkozó 1996/1999 évi munkaprogramja szerint (ENSZ/EGB 2000) „A monitoring-

hálózatok tervezése a következők meghatározását tartalmazza:

- a hálózat sűrűsége és a mérési pontok elhelyezése,
- monitoring-paraméterek,
- monitoringpontok típusai;
- a mérési és mintavételi gyakoriság.”

Ugyanez a dokumentum a föld alatti vizek vonatkozásában kilenc pontban összegzi a sikeres monitoringprogram tulajdonságait (ENSZ/EGB 2004).

Az „EU Víz Keretirányelv Monitoring útmutatójának áttekintése és adaptálása magyar nyelvre” című (szerkesztett változat: 2004-04-22) (EU 2004) a vizekre vonatkozó monitoring vonatkozásában a következőt mondja ki: „Mintavételezés tervezése magában foglalja a mintavételi helyek kiválasztását és kialakítását, a mintavételi gyakoriság és mintavételezési időtartam, a mintavételi eljárások meghatározását, valamint a vízminták kezelésével és a vízvizsgálatokkal szembeni követelmények definiálását.”

Az előbbiekből következik, hogy a természeti jelenségek, és az emberi tevékenység hatásának megfigyelésére szolgáló monitoring a különböző szintű ajánlások, irányelvek és jogszabályok (például magyar vonatkozásban a 219/2004. (VII. 21.) Korm. rendelet a felszín alatti vizek védelméről) által megkövetelt tevékenység. A monitoring-hálózatok kiépítésének ugyanakkor csak akkor van értelme és gyakorlati haszna, ha

- azok megalapozott tervezés bázisán jöttek létre,
- az üzemeltetésük során nyert adatokat folyamatosan feldolgozzák,
- a feldolgozott adatok alapján prognózisok készíthetők és
- a monitoringhálózat lehetőséget nyújt arra is, hogy kedvezőtlen mérési eredmények esetén a megfigyelt rendszer működésébe be lehessen avatkozni.

A monitoringhálózatok alkalmazása során — nem számítva a kiépítést és a felszámolást — három, egymástól különböző, és egymást követő, fázist lehet elkülöníteni. Ezek:

- tervezés,
- kalibrálás,
- üzemeltetés.

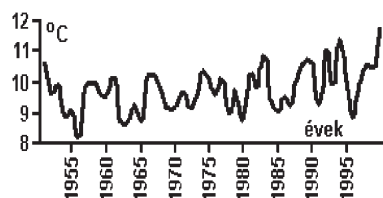
Jelen tanulmány célja a tervezési fázis részletes elemzése, amelyet a későbbiekben a másik két fázis geostatistikai szemléletű összefoglalója követ.

A megfigyelendő jelenségek csoportosítása

A monitoringhálózatok méretezése, többek között függ attól, hogy egyetlen, vagy több paraméter együttes megfigyelésére szolgálunk.

A megfigyelendő jelenségek időbeli változási tendenciáitól függően a jelenségek három fő csoportját különböztethetjük meg. Ezek:

- időben állandó intenzitással jellemezhető jelenségek, amelyek trendfüggvénye lineáris, vagyis a trend második deriváltja nulla (pl. a hőmérséklet alakulása, 1. ábra).

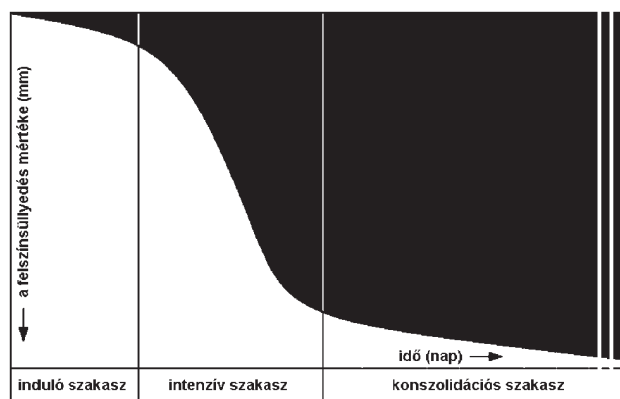


1. ábra. Közel állandó változási intenzitású (lineáris trendű) monitoring jelenség

Figure 1. Monitoring reading with almost constant intensity of change (linear trend)

- időben változó mértékű intenzitást mutató jelenségek, amelyek trendfüggvénye nem lineáris, vagyis a trend második deriváltja nem nulla (pl. bányászati tevékenység hatására bekövetkező felszínsüllyedés; 2. ábra).

- ismeretlen intenzitással rendelkező jelenségek (például egymás fölött széntelepek együttes, de időben ismeretlen ütemezésű lefejtésének hatása a felszínre).



2. ábra. Időben változó intenzitású (nem lineáris trendű) monitoring jelenség, pl. bányászati műveletek hatására keletkező felszínsüllyedés időbeli lefolyása

Figure 2. Monitoring reading with variable intensity of change (non-linear trend) E.g. temporal change of land surface shrinking caused by mining activity

a felszínsüllyedés mértéke = range of land surface shrinking; idő (nap) = time (day); induló szakasz = initial period, intenzív szakasz = intensive period, konszolidációs szakasz = period of consolidation

Más szavakkal, a megfigyelés változása intenzitásának vonatkozásban megkülönböztetünk stacionárius és kvázi stacionárius, valamint dinamikus tulajdonságú és ismeretlen tulajdonságú folyamatokat.

Az első csoportnál a megfigyelőhálózat, és az egy mérőállomáson végzett mérések sűrűsége időben állandó, míg a másodiknál változó (csökkenő, vagy növekvő mértékű). A harmadik csoport tervezése jár a legnagyobb bizonytalansággal, hiszen itt analóg vizsgálatok eredményeire sem támaszkodhatunk.

Belátható, hogy nem lineáris trendű természeti folyamatok megfigyelésénél a mérések sűrűségének a folyamat intenzitásához kell alkalmazkodnia. A legsűrűbben az intenzív szakaszban célszerű méréseket végezni, míg a konszolidációs szakaszban folyamatosan mérsékelhető az azonos időközre vonatkozó megfigyelések száma. Az olyan folyamatok megfigyelésénél, amelyeknél magáról a folyamat tulajdonságairól semmit sem tudunk, a lehető legsűrűbb

megfigyelési hálózatból kell kiindulni. A hálózat ténylegesen szükséges méretei a kalibráció során alakulnak ki.

A megfigyelőhálózatok általános problémái

A különböző céllal telepített megfigyelő (monitoring) -hálózatok tervezése számos problémát vet fel (FÜST 2009). Ezek a következőkből adódhatnak:

— A megfigyelőhálózatok telepítéskor vélhetően analóg hálózatok adatainak felhasználására kerül sor.

— Az analógia alapján megtervezett hálózatok kalibrálására (a helyi sajátosságokhoz való illesztésére) többnyire nem kerül sor.

— Milyen feltételek teljesülése esetén tekintünk analógnak egy már meglévő hálózatot (FÜST 2005)?

— A mérési eredményeket a legtöbbször késve dolgozzák fel, így a kalibrálásra legfeljebb utólag kerülhet sor.

— A megfigyelőhelyek sűrűségét, illetőleg az egy megfigyelőhelyen végzett megfigyelések időközét kevés kivételtől eltekintve, a rendelkezésre álló pénzügyi keret szabja meg.

— Nem eléggé közismert, hogy ha a monitoringhálózat túl ritka, vagy az egy megfigyelőhelyen végzett, egymást követő mérések közötti idő túl nagy, akkor az ilyen hálózatból nyert adatok meglehetősen nehezen dolgozhatók fel, és a feldolgozás révén kapott eredmények használhatósága is erősen megkérdőjelezhető.

Az előbbi problémák megoldására a tervezéskor kínálják magukat a geostatisztika adta lehetőségek, melyek alkalmazási sorrendje a következő:

1. Egyetlen megfigyelőhelyen végzett mérések optimális követési idejének számítása.

2. Megfigyelési vonalak, megfigyelőhely sűrűségének optimalizálása.

3. Területi megfigyelési hálózatok optimális sűrűségének tervezése.

A különböző szituációkban tehát arra kell törekedni, hogy az időben és térben nyert információk ne legyenek függetlenek egymástól. Függetlenség esetén a megfigyelési rendszer teljes mértékben alkalmatlan ellátni feladatát, tehát abban a formában fölösleges volt megépíteni.

Geostatisztikai alapok

Minden olyan mérés, amelyet a föld- és a környezettudományok terén végzünk, számos dologtól függ. Ezt a speciális függést legalább négy paraméter határozza meg: (1) a mérőhely földrajzi helyzete (hosszúsági és szélességi koordináták); (2) a tengerszint feletti helyzet (eleváció); (3) a mérés ideje (év, hónap, nap, óra, perc stb.); (4) a tér-időbeli térfogati hatás (az a térfogat, amelyen a mérést végeztük, a mérés időintervalluma).

Cressie a geostatisztikát a térbeli adatok elemzésére szolgáló három megközelítés (térben folytonos jelenségek, pont objektumok elemzése (pont hálózat elemzés) valamint

poligon objektumok vizsgálata (szabályos hálózatok statisztikája) egyikének tekinti (CRESSIE 1993). GOOVAERTS (1997) szerint a geostatisztika a statisztikának az a változata, amelyet földrajzi referenciájú adatok elemzésére és értelmezésére dolgoztak ki. RIPLEY (2004) megállapítása szerint a térbeli statisztika a térbeli adatok kiterjesztésének megoldása, amely során a kapott elméleti modellek összehasonlításával a térbeli mintázat kialakulására és fejlődésére keressük választ.

Az idő dimenzió egyre növekvő szerepet játszik a geostatisztikai elemzésekben. Ennek kapcsán több szerző, például HENGL (2009), felveti, hogy az újabb eredmények tükrében esetleg a térbeli statisztikát is módosítani kell. Mivel a geostatisztika a bányászattól indult el, hosszú időn keresztül a geostatisztikát a geológiában alkalmazott statisztikaként kezelték. Az utóbbi évtizedben azonban a geostatisztikai módszerek megfelelő alkalmazásra találtak a talajtanban, meteorológiában, ökológiában, az oceanográfiában stb. Ezek eredményeként napjaink geostatistikáját úgy lehetne megfogalmazni, mint a statisztikának az a területe, amely minden térbeli/időbeli referenciájú adat elemzésére és értelmezésére szolgál.

A geostatisztika lényegében a gyenge stationaritású vagy a belső hipotézisnek eleget tevő tér-időbeli sztochasztikus folyamatokkal foglalkozik. Gyenge stationaritásúnak tekintünk egy térbeli sztochasztikus folyamatot, ha a várható érték a mérési helytől független, továbbá a kovariancia csak a pontok egymás közti távolságától függ. A még gyengébb, belső hipotézis feltételezése szerint a várható érték helytől független és a félvariogram létezik.

Elméletileg bizonyított tény, hogy a gyenge stationaritású tér-időbeli referenciájú sztochasztikus folyamatok esetében a félvariogram és az autokorreláció ekvivalens eszközök a tér-időbeli változékonyság jellemzésében (DEUTSCH & JOURNAL 1998). Ezt a tényt fogjuk felhasználni az alábbiakban, amikor az időbeli monitoringtevékenység kulcskérdéseit geostatisztikai eszközökkel vizsgáljuk. Ez az állás nem jelenti az általánosság megszorítását. Valóban, hiszen az alkalmazás jogosságát a gyenge stationaritású folyamatok esetében az előbb említett ekvivalencia, a csak belső hipotézisnek eleget tevő jelenségek esetében pedig az a tény adja, hogy ekkor csak a félvariogram létezik, az autokorreláció nem.

Egy-egy mérési helyen minden vizsgált paraméterre számítani tudjuk, annak az időbeli változékonyságát kifejező tapasztalati félvariogramját $[\gamma(h)]$. Normális eloszlású paraméter diszkrét mintái esetén, ha az adatpárok száma N , az empirikus félvariogramot a következő "Matheron-féle" algoritmussal számítjuk (JOURNAL & HUIJBREGTS 1978, FÜST 1997, MOLNÁR & FÜST 2002):

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_{i+h})]^2, \quad (1)$$

ahol h = az adatpontpárok egymástól vett időtávolsága, $N(h)$ = az egymástól h -távolságra levő adatpárok száma (db),

$Z(x_i)$ = az x_i időpontban vett minta paraméterértéke (paraméteregység),
 $Z(x_{i+h}) = a Z(x_i)$ mintától h időtávolságban, a x_{i+h} időpontban vett minta paraméterértéke (paraméteregység).

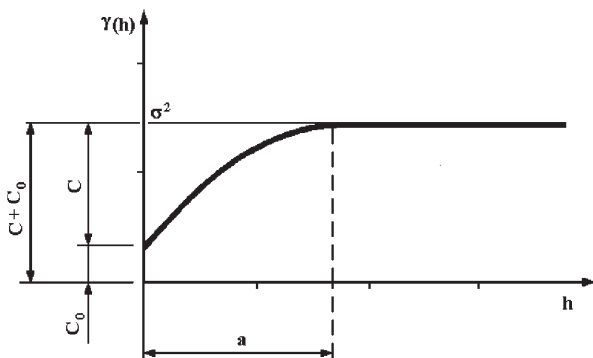
Ha a vizsgált paraméterrel egy gyenge stacionáriusú sztochasztikus folyamatot vizsgálunk akkor a tapasztalati félvariogram egy kezdeti emelkedő szakasz után egy vízszintes egyenes körül fog ingadozni. Amennyiben a félvariogram a teljes értelmezési tartományán monoton növekvő, akkor trendhatásra gyanakodhatunk. A trend léte mind a gyenge stacionaritásnak, mind a belső hipotézisnek ellentmond. Emiatt ekkor előbb a mért értékekből el kell távolítani a trendet, és a trendtől való eltérésekre kell félvariogramot számítani. A tapasztalati félvariogramot az egyszerűbb kezelhetőség érdekében bizonyos elméleti függvényekkel szokás helyettesíteni, melyeknek általános alakja — a paraméter normális eloszlását feltételezve — a következő: **képlet_2**

$$\gamma(h) = \begin{cases} 0, & ha \ h = 0 \\ f(h), & ha \ 0 < h \leq a \\ \sigma^2 [Z(x)], & ha \ a \leq h \end{cases} \quad (2)$$

Az összefüggésekben:

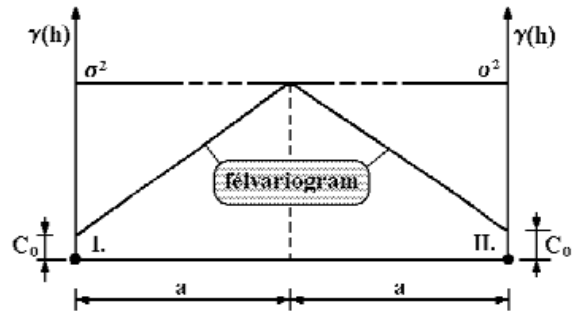
$f(h)$ = a félvariogram felszálló ágának egyenlete a $\gamma(h), h$ koordináta rendszerben,
 $\sigma^2 [Z(x)]$ = a vizsgált Z paraméter mért értékeinek szórásnégyzete,
 a = a paraméter időbeli hatástávolsága (hatás-ideje).

A félvariogram elméletileg a $0 \leq \gamma(h) \leq \sigma^2 [Z(x)]$ tartományban vehet fel értékeket (3. ábra).



3. ábra. Szférikus típusú elméleti félvariogram
 Figure 3. Theoretical semivariogram, spherical model

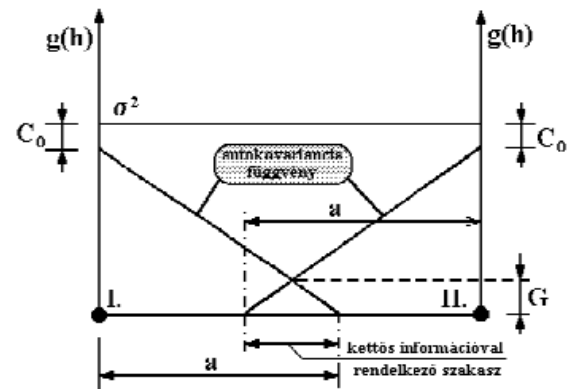
Elméletileg, ha két mintavétel egymástól kétszeres hatástávolságra (hatásidőre) van, akkor a korreláció pontosan a felezési pontban válik nullává. Egy ilyen esetet szemléltet a 4. ábra lineáris típusú elméleti félvariogramra. A paraméter stacionaritását, vagy legalább gyenge stacionaritását feltételezve a korreláció által szolgáltatott információ mennyisége az I-es időponttól a II. felé haladva az



4. ábra. Az autokorreláció változása kétszeres hatástávolság (2a) mellett
 Figure 4. Change of autocorrelation if the distance is double of the range of influence
 félvariogram = semivariogram

autokovariancia függvény, tehát a $\sigma^2 - \gamma(h)$ különbség alapján csökken, így a két mintavételi időpontot összekötő szakasz felezési pontjában válik nullává. Más szavakkal a két pont egymásra hatása itt szűnik meg. Ha a két mintavételi időpont közötti időtartamot csökkentjük, akkor a függvények metszik egymást, tehát a metszéspont környezetében mindkét minta hatása érződik. Az 5. ábrán ezt az esetet tüntettük fel, most már az autokovariancia függvénnyel szemléltetve. Az ábrán minél nagyobb G értéke, annál nagyobb kétoldali korrelációs információ jut az átfedett szakaszra.

Az átfedett szakasz értékét a $G = 0,1\sigma^2$ aránnyal célszerű kijelölni. A $G = 0,1\sigma^2$ feltétel alkalmazása a bányászatban jól bevált gyakorlat.



5. ábra. Az autokovariancia függvények egymásba metszése, ha a mintavételi időpontok távolsága $< 2a$
 Figure 5. Intersection of autocovariance functions if the distance between two points less than double of the range $< 2a$
 autokovariancia függvény = autocovariance function, kettős információval rendelkező szakasz = interval with two-fold information

Ezzel a megkötéssel az elméletileg levezetett mintavételi időtávolságot egy olyan $v < 1$ tényezővel kell megszorozni, amely egyrészt az elméleti félvariogram típusának, másrészt a félvariogram paramétereinek függvénye. A v tényező bevezetésével gyakorlatilag ellensúlyozni kívánjuk azt a bizonytalanságot, amely a tapasztalati félvariogram számí-

tására felhasznált adatokban, illetőleg ezek hatásaként az elméleti félvariogram paramétereiben jelentkeznek. A v tényező meghatározásához képeznünk kell azt a $v = h/a$ hányadost, ahol h a $\gamma(h) = 0,9\sigma^2$ egyenlet gyöke (Füst 1997).

Belátható, hogy ez a v tényező

— lineáris típusú félvariogramnál:

$$v = 1 - \frac{\sigma^2}{10(\sigma^2 - C_0)} \quad (3)$$

— $\gamma(h) = C_0 h^A$ egyenletű hatványfüggvény típusnál:

$$v = \sqrt[4]{0,9} \quad (4)$$

— $\gamma(h) = C_0 A^h$ alaknál:

$$v = 1 - \frac{0,105361}{\ln(\sigma^2/C_0)} \quad (5)$$

— négyzetes típusú elméleti félvariogramnál:

$$v = 1 + \sigma \sqrt{\frac{0,1}{C}} = 1 + 0,316228\sigma \sqrt{C^{-1}} \quad (6)$$

A szférikus típusú elméleti félvariogram esetében a h -ra megoldandó harmadfokú egyenlet gyökei:

$$h_1 = 2a \cdot \cos \left[\frac{1}{3} \arccos \left(-\frac{C - 0,1\sigma^2}{C} \right) \right] \quad (7)$$

$$h_{1,2} = -2a \cdot \cos \left[\frac{1}{3} \arccos \left(-\frac{C - 0,1\sigma^2}{C} \pm 60^\circ \right) \right] \quad (8)$$

A három gyök közül természetesen csak egy használható, amely teljesíti a $0 < h < a$ feltételt. Ha például $\sigma^2 = 10$, $C = 8$ és $a = 100$, akkor $h_1 = 127,63$; $h_2 = 69,55$; $h_3 = -199,99$. A feltételeknek tehát csak h_2 felel meg így $v = 0,6955$.

Az időben lineáris trendű (nem változó intenzitású) jelenségek megfigyelő hálózatának méretezése

Egyetlen megfigyelőhelyen végzett mérések optimális követési idejének számítása

A mintavételi időpontok közötti még megengedhető időtartamot vizsgált paraméterenként számítjuk. Például egy talajvíz megfigyelésére szolgáló fúrásból vett vízmintát számos paraméterre szokták megelemezni és minden paraméternél adódik egy még megengedhető időtartam két mérés között. Az így kapott időtartamok közül a mintavételek közötti időtartamot a legkisebbre, a mértékadóra kell beállítani. Két mintavétel közötti időtartam a

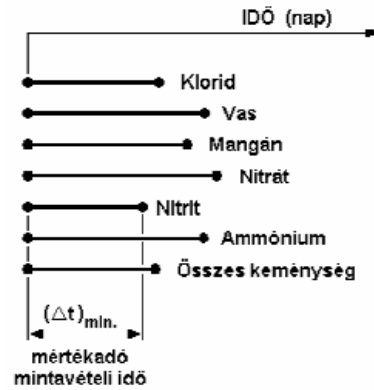
$$\Delta t = 2 \cdot v \cdot a \quad (9)$$

összefüggéssel számítható.

Az összefüggésben

a a paraméter félvariogramjának hatástávolsága, v az elméleti félvariogram típusától függő, a $G = 0,1\sigma^2$ feltétel alapján, az előzőekben levezetett tényező.

Egy ilyen esetet szemléltet a 6. ábra, egy vízmegfigyelő helyen vett vízminta néhány elemzett komponens tartalmára vonatkozóan.



6. ábra. A mértékadó mintavételi időköz meghatározásának elve vízmintavétel elemzési adataiból

Figure 6. Definition of competent sample distance in time in the case of analysis water chemistry

mértékadó mintavételi idő = competent sample distance in time, vas = iron, összes keménység = all hardness

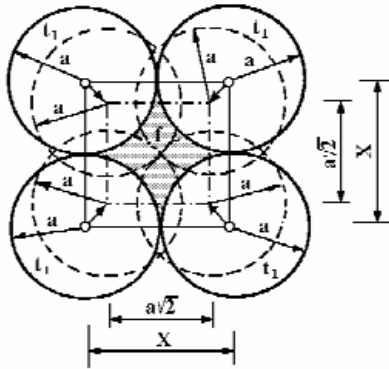
Mérési vonalban elhelyezett megfigyelőhelyek szükséges sűrűségének számítása

A mérési vonalakon kialakítandó megfigyelési helyek sűrűségét az előbbi fejezetben leírtak analógiájára határozhatjuk meg. Ez esetben arról van szó, hogy a mérési vonalon lévő mintavételi helyekről azonos időpontban (lehetőség szerint ugyanazon a napon) veszünk mintát, és ezeket megelemezük a vizsgált paraméterekre. Az elemzési eredményekből paraméterenként tapasztalati félvariogramot számítunk a vonal mentén. A tapasztalati félvariogramokat elméleti modellel közelítjük, majd meghatározzuk a paraméterek hatástávolságát. Ezt követően az eljárás menete pontosan megegyezik az előbbi alfejezetben leírtakkal.

Megfigyelési hálózatok szükséges területi sűrűségének számítása

A minták hatásterülete izotróp paraméternél körrel, míg geometriai anizotrópia esetén ellipszissel írható le. Az előbbi esetben a megfigyelő helyeket négyzet — vagy egyenlő oldalú háromszög — míg az utóbbiban téglalap hálózatban célszerű telepíteni.

Kör alakú hatásterületnél a 7. ábrán négy, egy $X = 2a$ oldalhosszúságú négyzet sarokpontjában lévő fúrást látunk. A fúrások t_1 -el jelölt hatásterületei érintik egymást, de

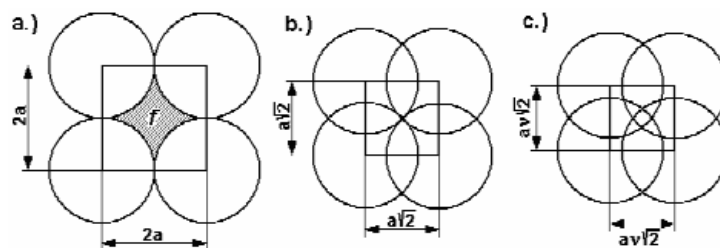


7. ábra. A hatástávolság és a megfigyelőhelyek kapcsolata négyzethálós telepítésnél

Figure 7. Relation between range and monitoring points in square shaped network

közöttük az f -fel jelölt terület információmentes. A négyzetháló méretét tehát úgy kell csökkenteni, hogy teljesüljön az $f=0$ feltétel. Ha a négyzet átlójának hossza a hatástávolság sugarának kétszeresével egyenlő, akkor $f=0$ és a hálózat keresett oldalhossza: $a\sqrt{2}$.

Egyenlő oldalú háromszög alakú hálózatba telepített megfigyelőhelyek esetén azonos megfontolásokkal mint előbb, a háromszöghálózat oldalhossza: $a\sqrt{3}$. Két egymás mellé helyezett egyenlő oldalú háromszög rombuszt, míg két egyenlő szárú háromszög együtt romboidot eredményez. Az egyenlő oldalú háromszög alakú hálóból kialakítható rombusz alakú hálózat kedvezőbb, mint a négyzethálózat. Ugyanez mondató el a romboid és a téglalap alakú hálózat viszonyáról is. Rombusz, illetve romboid alakú hálózat esetében ugyanazon terület megfigyeléséhez kevesebb, a négyzet, illetve téglalap alakú hálózatnál szükséges megfigyelő helyek $\approx 77\%$ -a szükséges. Természetesen ekkor még nem vettük figyelembe a korábban levezetett v tényezőt. A 8. ábrán a megfigyelési hálózat méretének leszámítását mutatjuk be lépésenként, izotróp jellegű paraméternél. Az ábra a) jelű képén a kiindulási helyzetet láthatjuk, amikor a hálózat oldalhossza a hatástávolság kétszeresével egyezik meg. Az ábra jól mutatja, hogy ekkor egy információmentes f terület marad minden négyzeten belül. Az ábra b) jelű képen már azt az esetet látjuk, amikor ez a terület éppen nullává válik, feltételezve természetesen, hogy a hatástávolság hibátlan. A c) jelű kép a végállapotot szemlélteti, amikor már a v tényezőt is figyelembe vettük.



8. ábra. Egyszerű, izotróp paraméterű megfigyelőhálózat méretének levezetése

Figure 8. Derivation of the sample distances in the case of a simple monitoring network with isotropic parameters

Amennyiben a hatástávolság kör, következésképpen vagy rombusz, vagy négyzet alakú megfigyelőhálózatot alkalmazunk. Ez esetben a hálózat oldalainak orientáltsága a paraméter megfigyelése szempontjából közömbös. Ellipszissel közelíthető hatástávolság esetén a fúrési hálózat vagy téglalap, vagy romboid alakú, itt azonban már ügyelni kell arra, hogy a hálózat oldalai a megfigyelt paraméter legkisebb, illetve legnagyobb változékonyságú irányaihoz igazodjanak. Ha az ellipszis alakú hatástávolság fél nagy- és fél kistengelyét b -vel és a -val jelöljük, akkor azonos megfontolásokkal, mint izotrópiánál levezethető, hogy a téglalaphálózat oldalhossza $bv\sqrt{2}$ illetve $av\sqrt{2}$, míg a romboid alakú hálózaté $bv\sqrt{3}$ illetve $av\sqrt{3}$ kell legyen.

Ismerve a v tényező értékét, egy F területű terület megfigyeléséhez telepítendő megfigyelő helyek n száma egyetlen paraméter esetében

— négyzethálós telepítésnél:

$$n = \frac{F}{2v^2a^2} ; \quad (10)$$

— egyenlő oldalú háromszög továbbá 60 és 120°-os rombusz alakú hálózatnál:

$$n = \frac{4F}{3v^2a^2} ; \quad (11)$$

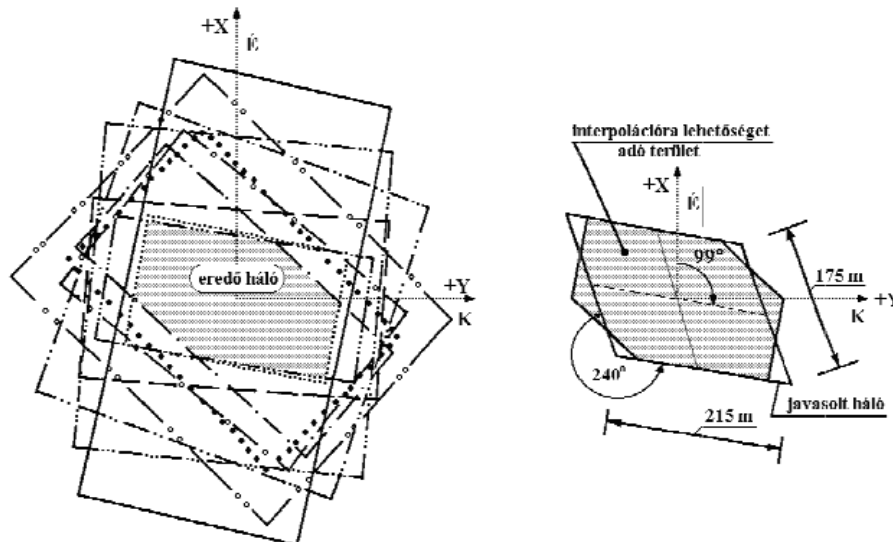
— téglalap alakú hálózatnál:

$$n = \frac{F}{2v^2ab} . \quad (12)$$

Több paraméter megfigyelésére szolgáló hálózat tervezése

A megfigyelési hálózat formáját az előzőekben leírt módszerekkel paraméterenként tudjuk meghatározni. Belátható, hogy paraméterenként más-más méretű és orientáltságú optimális megfigyelési hálózat adódik. Ezek eredőjeként adódik az a szabálytalan, majd szabályos formával helyettesíthető hálózat, amely mindegyik paraméter szempontjából megfelelő. Ezt a megállapítást példázza a 9. ábra.

A megfigyelési hálózatok telepítése feltételezett, vagy igazolt analógiákra épül. Ebből eredően a tényleges megfigyelendő területre olyan hálózatot kell kialakítani, amely a helyi sajátosságokhoz alkalmazkodik. Ennek megoldási



9. ábra. A megfigyelési hálózat meghatározása egy komplex ipari példában

Figure 9. Derivation of sample distances in the case of a complex industrial example

módjairól — miként korábban említettük — egy későbbi rész tanulmányban számolunk be.

Az időben nem lineáris trendű (változó intenzitású) jelenségek megfigyelőhálózatának méretezése

Az időben nem lineáris trendű folyamatok megfigyelésére szolgáló monitoringhálózatokat, a 2. ábrán szemléltetett intenzív szakasz adataira célszerű méretezni. Ez azt jelenti, hogy mind a megfigyelő állomások hálózatának sűrűségét, mind egy állomáson az egymást követő mérések időközönbségét a vonatkozó félvariogramok alapján kell meghatározni, a korábban levezetett elvek szerint. Az induló szakaszban, illetőleg ha a változás a konszolidációs szakaszba jut (2. ábra), akkor a mérések sűrűsége fokozatosan mérsékelhető, a következőkben tárgyalt megfontolásokkal.

Egyetlen megfigyelőhelyen végzett mérések optimális követési idejének számítása

Tételezzük fel, hogy egy mérőállomáson az intenzív szakaszban Δt időközönbséggel végzünk méréseket, és a mért értékek sorra a következők: $a_1, a_2, a_3, \dots, a_{n-2}, a_{n-1}, a_n$.

Képezzük az egymást követő mérések mért értékeinek különbségét!

$$\begin{aligned} \Delta a_1 &= a_2 - a_1 \\ \Delta a_2 &= a_3 - a_2 \\ &\vdots \\ \Delta a_{n-2} &= a_{n-1} - a_{n-2} \\ \Delta a_{n-1} &= a_n - a_{n-1} \end{aligned} \quad (13)$$

Amíg azt tapasztaljuk, hogy

$$\Delta a_1 \approx \Delta a_2 \approx \dots \approx \Delta a_{n-2} \approx \Delta a_{n-1}, \quad (14)$$

és az egymást követő mért értékek különbsége nem mutat trend jellegű változást, akkor a mérések időközönbségén nem kell változtatni. Ha viszont a megfigyelt folyamat az induló, illetőleg a konszolidációs szakaszban van, egyre növekvő, illetőleg a konszolidációs szakaszban egyre mérséklődő különbséget fogunk tapasztalni az egymást követő mérési eredmények között:

$$\Delta a_1 \neq \Delta a_2 \neq \dots \neq \Delta a_{n-2} \neq \Delta a_{n-1}. \quad (15)$$

Ez esetben a mérések időközét feltétlenül csökkenteni, vagy növelni kell, attól függően, hogy az intenzív szakasz felé közeledünk, vagy abból kifelé tartunk. Javasolható, hogy mindez a változási sebesség alapján történjen. Jelölje a mérések időtávolságát az intenzív szakaszra vonatkozóan Δt_{int} . A

$$\frac{\Delta a_1}{\Delta t_{int}} = v_1; \quad \frac{\Delta a_2}{\Delta t_{int}} = v_2; \quad \frac{\Delta a_3}{\Delta t_{int}} = v_3 \dots \quad (16)$$

hányadosok a változási sebesség értékét adják. Az intenzív szakaszban ezek a hányadosok gyakorlatilag állandók, és $n_1 \approx n_2 \approx n_3 \dots$. Ebből adódóan:

$$\frac{v_2}{v_1} \approx \frac{v_3}{v_2} \approx \dots \approx 1. \quad (17)$$

Az induló szakaszban viszont a folyamat felgyorsulása, míg a konszolidációsban lassulása tapasztalható. Ebből eredően az induló szakaszban ugyanakkora változás egyre rövidebb, míg a konszolidációsban, egyre hosszabb idő alatt következik be. Ebből következik, hogy az intenzív szakaszra számított időbeli mintavételi sűrűség csökkenthető, azaz a mérések közötti idő növelhető. A csökkentés vagy növelés mértéke elméletileg a változási sebességek hányadosainak százalékban kifejezett módosulása arányában vehető fel. Ez a növekedés vagy csökkenés a gyakorlatban előre legfeljebb

csak becsülhető, tényleges értéke a kalibrációs folyamatban állapítható meg.

Mérési vonalban elhelyezett megfigyelőhelyek szükségességének számítása

Ez a probléma az előbbi fejezetben leírtak szerint oldható meg. Tudomásul kell ugyanakkor venni, hogy az intenzív szakaszra tervezett mérőállomás-sűrűség, a konszolidációs szakaszban már túl sűrű, ezért nem minden mérőállomáson szükséges méréseket végezni. Sőt a konszolidáció mértékétől függően a szükséges mérőállomás-sűrűség egyre kisebb, így a fölöslegessé váló mérőállomásokat fel kell számolni. Arra vonatkozóan, hogy ez milyen mértékben történhet meg, a rendszer kalibrációja idején végzett mérések adnak felvilágosítást.

Megfigyelési hálózatok szükséges területi sűrűségének számítása

Az egyetlen paraméter megfigyelésére szolgáló hálózat területi sűrűségét az intenzív szakaszra vonatkozóan kell méretezni. Természetes dolog, hogy a konszolidációs szakaszban egyre több mérőállomás válik fölöslegessé, és csökken a megmaradt mérőállomások kihasználtsága is. Ennek ütemét szintén csak a rendszer kalibrációja során lehet meghatározni.

Több, időben nem lineáris trendű (változó intenzitású) paraméter együttes megfigyelésére szolgáló hálózat tervezése

Ez a feladat látszólag egyszerűen oldható meg, valójában azonban szembe kell néznünk azzal a problémával, hogy az intenzív szakasz az egyes paramétereknél időben nem esik egybe, továbbá, hogy a szakasz hosszúsága is különböző. Tekintettel arra, hogy a hálózatnak alkalmasnak kell lenni arra, hogy a vizsgált paraméterek mindegyikének megfigyelését lehetővé tegye, így célszerű az időbeliségtől eltekinteni, és a hálózatot úgy méretezni, mintha ezek a szakaszok időben egybe esnének. Más a helyzet a mérési pontok ritkításánál, illetőleg az egymást követő mérések időkülönbségének változtatásánál. A rendszer meghatározója ez esetben a leghosszabb intenzív szakasszal rendelkező paraméter. A változtatásokat ennek változási tendenciáját követően kell megtervezni. Az erre vonatkozó pontosított értékek a hálózat kalibrációja, és működtetése során határozhatók meg.

Diszkusszió

A szakirodalom a mintázási elvek igen széles skáláját biztosítja. Ugyanakkor az is tény, hogy ezek a megközelítések két dologra irányulnak: (1) Laboratóriumi vizsgálatok kísérleti elrendezésére; (2) Valamely terület szennyeződésének tér- és időbeli elemzésére. Ez a kétirányú megközelítés

igen komoly korlátozást is jelent. A kísérletek elrendezésére irányuló elemzések az egy- és többtényezős megközelítéseken át lényegében valamely jelenség (elvből) korlátlan számú mérésén alapulnak (SVÁB 1973). Ez természetesen a földtudományi projektben nem alkalmazható.

Egy terület szennyeződésének tér- és időbeli vizsgálatára a környezetvédelem sok és igen jól kidolgozott eljárást (standardot) fogadott el és használ (EPA 1998, 2000a, b, c, 2002), amelyek hazai összefoglalóját GEIGER (2007) munkája tartalmazza. Ezek a megfontolások abból a tényből indulnak ki, hogy valamely szennyező anyag elterjedésében, koncentrációjának kialakulásában ismert (vagy megismerhető) viszonylag rövid idő alatt megvalósuló jelenségek játszanak szerepet, nem beszélve arról, hogy a szennyeződés területe általában nem túl nagy, a veszélyeztetett talaj vagy kőzet vastagsága alig néhány méter, és a veszélyeztetett képződmény viszonylag jól ismert.

A mintavételi stratégiát, például földtani vonatkozásban, alapvetően a következő földtani tényezők határozzák meg (BÁRDOSSY 1998): (1) a földtani képződmény mérete és alakja, (2) a földtani képződmény térbeli helyzete, (3) a képződmény tulajdonságainak térbeli eloszlása és változékonysága, (4) a tulajdonságok hatástávolsága és anizotrópiája; (5) a főbb földtani folyamatok és szerkezetek irányai.

A szakirodalom rendszerint kilencféle alapvető mintázási stratégiát tárgyal. Ezek (1) igazoló mintázás; (2) egyszerű valószínűségi mintázás; (3) szekvenciális, véletlen mintázás; (4) szisztematikus mintázás; (5) rétegzett mintavétel; (6) grid mintázás; (7) rendezett halmoz típusú mintázás; (8) adaptív klaszteres mintázás; (9) Összetett mintázás. A mintázás reprezentativitásának egyik nagy problémája, hogy a kutatás kezdeti időszakában a fent felsorolt tényezőkre ismertsége általában még nem elegendő egy stabil mintázási stratégia kialakításához (GEIGER 2007). Pontosabban emiatt az utóbbi időben felértékelődött az analógián alapuló igazoló mintázás jelentősége. Jelen dolgozatban is egy ilyen, analógián alapuló (ún. igazoló mintázási stratégia) geostatistikai támogatásának módját mutatja be.

Az ún. igazoló és valószínűségi alapú mintázás legfontosabb jellemzőinek összehasonlítását az *I. táblázat* mutatja.

Az igazoló mintázás során a mintázási egységek (mintahelyek, a mintázás időköze, a mintaszám) kiválasztása az elemző szakmai kvalitásaitól és a választott analógia megfelelőségétől függ. FÜST (2005) dolgozata a földtani analógia számszerűsítésének problémájában már érintette, hogy a megfelelő analógia kiválasztásának szigorú matematikai, statisztikai feltételei vannak. Lényegében az e dolgozatban bemutatott numerikus megközelítés is ilyen feltételeken alapul. Az általunk bemutatott geostatistikai támogatás alapja, hogy az analóg eredményről álljon rendelkezésre variográfiai feldolgozás. Ezt az igényt a környezet-tudományok utóbbi években történt fejlődése tökéletesen biztosítani tudja (GOOVAERTS 1997, WEBSTER & OLIVIER 2007).

Az ismeretlen viselkedésű folyamatok megfigyelésre szolgáló hálózatok méretezésére matematikai összefüggések nem léteznek. Az ilyen jellegű munkánál a gyakorlati

I. táblázat. A valószínűségi és igazoló mintázás összehasonlítása (EPA 2002 és GEIGER 2007 nyomán)

Table I. Comparison of judgmental and probabilistic sample design (based on EPA 2002 and GEIGER 2007)

	Valószínűségi alapú	Igazoló
Előnyök	Lehetővé teszi az egyes eseményekhez tarozó bizonytalanság meghatározását. Statistikai következtetések levezetésére alkalmas. A döntési hiba kezelhető.	Lényegesen olcsóbb a valószínűségi mintázásoknál. A vizsgált területről rendelkezésre álló ismeretek és korábbi analógiák alapján nagyon hatékony lehet. Viszonylag könnyű végrehajtani.
Hátrányok	A véletlenszerű helyzetet igen nehéz rögzíteni. Az optimális mintázási terv a konceptuális modell pontosságától függ.	A megfelelő analógia kiválasztása sokszor nem könnyű. A vizsgáló ismeretétől függ. A becslési pontosság nem elemezhető.

tapasztalat jut döntő szerephez. Ilyenkor általában feltételezett, vagy részleges analógiából lehet kiindulni.

A javasolt eljárás a monitoring analógia oldaláról igen keveset kíván: a térbeli heterogenitás analógiáját. Ezen belül is a felhasznált információ nem a mért tényleges értékeket, hanem azok térbeli folytonosságának (a mért értékek növekményének) törvényszerűségét igényli.

Általánosságban azt mondhatjuk, hogy a lehető leg-sűrűbb hálózatot célszerű megtervezni, amely azután a kalibrációs szakaszban a tényleges igényekhez igazítható. Fel kívánjuk hívni a figyelmet arra, hogy, amíg egy sűrű mérési hálózat ritkításának mértéke konkrét mérési

eredmények felhasználásával valószínűsíthető meg, egy esetlegesen ritka hálózat utólagos sűrítésének mértéke csupán becsülhető.

Köszönetnyilvánítás

Ez úton szeretnénk köszönetet mondani azoknak a kollégáinknak, akik a téma kidolgozásánál segítségünkre voltak. Külön köszönjük PAÁL Gábor konkrét tanácsait és lektoraink (FEDOR Ferenc és MOLNÁR Sándor) tartalmas és mindvégig segítőkész megjegyzéseit.

Irodalom — References

- BÁRDOSSY Gy. 1998: Geomatematikai kérdések geológus szemmel. — *Magyar Geofizika* **38/2**, 124–141.
- CRESSIE, N. A. C. 1993: *Statistics for Spatial Data, revised edition*. — John Wiley & Sons, New York, 416 p.
- DEUTSCH, C. V. & JOURNAL, A. G. 1998: *GSLIB: Geostatistical Software and User's Guide, 2nd Edition*. — Oxford University Press, New York, 384 p.
- ENSZ/EGB 2000: ENSZ/EGB Akciócsoport: Monitoring & értékelés a határokat átlépő vízfolyások és nemzetközi tavak védelmére és használatára vonatkozó Egyezmény keretében (Helsinki, 1992) 1996/1999 évi munkaprogram A határokkal osztott felszín alatti vizek monitoringjának és értékelésének irányelvei 2000. március.
- EPA (U.S. Environmental Protection Agency), 1998: Quality Assurance. Guidance for Conducting Brownfields Site Assessments. — EPA/540/R-98/038. Office of Solid Waste and Emergency Response. Washington, DC.
- EPA (U.S. Environmental Protection Agency), 2000a: Guidance for Data Quality Assessment for Data Analysis (QA/G-9). — EPA/600/R-96/084. Office of Research and Development. Washington, DC
- EPA (U.S. Environmental Protection Agency), 2000b: Guidance for the Data Quality Objectives Process (QA/G-4). — EPA/600/R-96/055. Washington, DC.
- EPA (U.S. Environmental Protection Agency), 2000c: EPA Quality Manual for Environmental Programs. — EPA Manual 5360 A1. Washington, DC
- EPA (U.S. Environmental Protection Agency), 2002: Guidance on Choosing a Sampling Design for Environmental Data Collection — EPA/240/R-02/005. Office of Environmental Information. Washington, DC.
- EU 2004: EU Víz keretirányelv Monitoring útmutatójának áttekintése és adaptálása magyar nyelvre (Szerkesztett változat: 2004-04-22) ComEnPro Bt.
- FÜST A. 1997: *Geostatistika*. — Eötvös Kiadó, Budapest, 427 p.
- FÜST A. 2005: A földtani analógia számszerűsítése. — *Földtani Közlemények* **135/2**, 253–263.
- FÜST A. 2009: Monitoring hálózatok tervezése geostatistikai módszerekkel. — *Bányászati, Kohászati és Földtani Konferencia kiadványa. Máramarosziget, 2009. április 2–5.*
- GEIGER J. 2007: *Statistikai alapú földtani mintavétel*. — JATEPress Kiadó, Szeged, 106 p.
- GOOVAERTS, P. 1997: *Geostatistics for Natural Resources Evaluation (Applied Geostatistics)*. — Oxford University Press, New York, 496 p.
- HENGL, T. 2009: *A Practical Guide to Geostatistical Mapping*. — Extended edition of the EUR 22904 EN Scientific and Technical Research series report published by Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg. University of Amsterdam.

JOURNAL, A. G. & HUIJBREGTS, CH. I. 1978: *Mining Geostatistic*. — Academic Press Inc. London, New York, 600 p.

MOLNÁR S. & FÜST A. 2002: *Környezet-informatikai modellek* — I. Szent István Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Informatika Tanszék, Gödöllő.

RIPLEY, B. D. 2004: *Spatial statistics, 4th Edition*. — Wiley-IEEE, London, 252 p.

SVÁB J. 1973: *Biometria*. — Mezőgazdasági Kiadó, Budapest, 315 p.

WEBSTER, R. & OLIVIER, M. A. 2007: *Geostatistics for Environmental Scientists*. — John Wiley and Sons, 315 p.

Kézirat beérkezett: 2010. 01. 16.