

Modelarea statistică a geostructurilor este dedicată analizei și schematizării struc-

MODELAREA STATISTICĂ A GEOSTRUCTURILOR

MIHAELA SCRĂDEANU

seismică, electrometrie, magnetism, geofizică de sondă etc.), vizează: • caracteristici geologice calitative: textura, structura și litologia formațiunilor geologice, unitățile structurale și

directe (cartare geologică, foraje de prospecțiune și explorare

etc.) sau indirecte (investigare geofizică prin gravimetrie,

stratigrafice etc. • caracteristici geologice cantitative: grosimea formațiunilor geologice, cota suprafețelor structurale, conținutul în metale al minereurilor, proprietățile mecanice ale rocilor, parametrii hidrogeologici ai formațiunilor acvifere etc.

Analiza variabilității spațio-temporale a caracteristicilor geologice calitative și cantitative parcurge, pentru realizarea *modelelor 2D* si *3D* ale geostructurilor investigate, patru etape distincte:

- ANALIZA VARIABILITĂŢII GLOBALE;
- ANALIZA VARIABILITĂŢII SPAŢIALE;
- EVALUAREA DISTRIBUŢIEI SPAŢIALE;
- EVALUAREA ERORILOR DE ESTIMARE.

Modelele 2D și 3D rezultate prin modelare statistică sunt modelele preliminare ale geostructurilor, suport pentru interpretări complexe realizate prin integrarea și altor categorii de informații.

MODELAREA STATISTICĂ A GEOSTRUCTURILOR





MIHAELA SCRĂDEANU

MODELAREA STATISTICĂ A GEOSTRUCTURILOR

Editura Printech 2015

Dedic această carte studenților facultății de Geologie și Geofizică.

PREFAŢĂ

"MODELAREA STATISTICĂ A GEOSTRUCTURILOR" completează seria de lucrări dedicate prelucrării statistice a datelor geologice publicate de profesori din Facultatea de Geologie și Geofizică:

- Petre BOMBOE, 1979, Geologie matematică, Vol. I, Analiza statistică a datelor geologice, Editura Universității din București;
- Daniel SCRĂDEANU, 1995, Informatică geologică, Vol. I, Analiza variabilității globale a caracteristicilor geologice, Editura Universității din București;
- Daniel SCRĂDEANU, 1996, Modele geostatistice în hidrogeologie, Editura Didactică și Pedagogică;
- Daniel SCRĂDEANU, Roxana POPA, 2001, 2003, Geostatistică aplicată, Editura Universității din București.

"MODELAREA STATISTICĂ A GEOSTRUCTURILOR" este o lucrarea aplicativă consacrată elaborării **modelului conceptual** fundamental al structurilor geologice, model conceptual utilizat ca premiză în toate tentativele de estimare a rezervelor de substanțe minerale utile și energetice. Cele **18 aplicații** sunt dedicate prelucrării caracteristicilor geologice *calitative* și *cantitative* și prezintă în detaliu etapele obligatorii de prelucrare.

"MODELAREA STATISTICĂ A GEOSTRUCTURILOR" are un repertoriu de aplicații utile în activitatea de *inginerie geologică*, apelează la un minim de instrumente statistice și de softuri specializate, insistând pe interpretarea corectă a rezultatelor obținute.

Octombrie 2015

Mihaela SCRĂDEANU

MODELAREA STATISTICĂ A GEOSTRUCTURILOR CUPRINS

INTRODUCERE	11
I. ANALIZA VARIABILITĂŢII CARACTERISTICILOR GEOLOGICE CALITATIVE	13
1. BAZA DE DATE	15
1.1. Reteaua de investigare	17
1.2. Tabelul 1.1. cu datele din forajele de investigare	18
1.3. Coloanele litologice ale forajelor de investigare	19
2. ANALIZA VARIABILITĂȚII GLOBALE	20
2.1 Aplicatia 1	20
2 1 1 Tabelul 2 2 cu prelucrări pentru Aplicația 1	20
2.2 Anlicatia 2	25
2.2.1. Tabelul 2.3. cu calculele pentru Aplicatia 2	27
2.2.2. Categoriile litologice la cota Z = 200.00 m	
2.3. Aplicatia 3	29
2.3.1. Tabelul 2.4. cu calculele pentru Aplicația 3	
3. ANALIZA VARIABILITĂŢII SPAŢIALE	31
3.1 Codificarea binară a caracteristicilor geologice calitative	32
3.1. Codificarea binară a caracteristicilor geologice calitative	32
 3.1. Codificarea binară a caracteristicilor geologice calitative 3.1.1. Aplicația 4 3.2. Reprezentarea grafică a rezultatelor codificării 	32 32 34
 3.1. Codificarea binară a caracteristicilor geologice calitative 3.1.1. Aplicația 4 3.2. Reprezentarea grafică a rezultatelor codificării 3.2.1. Aplicația 5 	32 32 34 34
 3.1. Codificarea binară a caracteristicilor geologice calitative 3.1.1. Aplicația 4 3.2. Reprezentarea grafică a rezultatelor codificării 3.2.1. Aplicația 5 3.2.1.1. Reprezentarea codificării binare M2D 	32 32 34 34 35
 3.1. Codificarea binară a caracteristicilor geologice calitative 3.1.1. Aplicația 4 3.2. Reprezentarea grafică a rezultatelor codificării 3.2.1. Aplicația 5 3.2.1.1. Reprezentarea codificării binare M2D 3.2.1.2. Reprezentarea codificării binare M3D 	32 32 34 34 35 36
 3.1. Codificarea binară a caracteristicilor geologice calitative	32 34 34 35 36 37
 3.1. Codificarea binară a caracteristicilor geologice calitative	32 34 34 35 36 37 37
 3.1. Codificarea binară a caracteristicilor geologice calitative	32 34 34 35 36 37 37 40
 3.1. Codificarea binară a caracteristicilor geologice calitative	32 34 34 35 36 37 40 46
 3.1. Codificarea binară a caracteristicilor geologice calitative	32 34 34 35 36 37 40 46 47
 3.1. Codificarea binară a caracteristicilor geologice calitative	32 34 34 35 36 37 40 40 47 47
 3.1. Codificarea binară a caracteristicilor geologice calitative	32 34 34 35 36 37 40 40 46 47 49
 3.1. Codificarea binară a caracteristicilor geologice calitative	32 34 34 35 36 37 40 40 47 47 47 49 50
 3.1. Codificarea binară a caracteristicilor geologice calitative	32 34 34 35 36 37 40 40 46 47 49 50 54

II. ANALIZA VARIABILITĂŢII CARACTERISTICILOR GEOLOGICE CANTITATIVE	56
1. BAZA DE DATE	58
1.1 Baza de date pentru structura locală	58
1.2 Baza de date pentru zona de nord-vest a municipiului Bucuresti	61
2 MODELAREA STATISTICĂ A STRUCTURILOR SPATIALE	64
2.1. Analiza variabilității globale	64
2.1.1. Aplicația 1	65
2.1.1.1. Identificarea valorilor extreme	65
2.1.1.2. Evaluarea tipului de repartiție a frecvenței valorilor	68
2.1.1.3. Calculul valorii medii și a erorii de estimare	72
2.1.2. Aplicația 2	74
2.1.2.1. Identificarea valorilor extreme	75
2.1.2.2. Evaluarea tipului de repartiție a frecvenței valorilor	76
2.1.2.3. Calculul valorii medii și a erorii de estimare	78
2.2. Analiza variabilității spațiale	79
2.2.1. Aplicația 3	79
2.2.1.1. Reprezentarea grafică a datelor disponibile	81
2.2.1.2. Calculul variogramei experimentale	82
2.2.1.3. Studiul anizotropiei structurii spațiale	84
2.2.1.4. Modelarea variogramei experimentale	87
2.2.2. Aplicația 4	88
2.2.2.1. Reprezentarea grafică a datelor disponibile	89
2.2.2.2. Calculul variogramei experimentale	90
2.3. Evaluarea distribuției spațiale	93
2.3.1. Aplicația 5	94
2.3.1.1. Dimensionarea rețelei de discretizare	94
2.3.1.2. Calculul valorilor cotelor	95
2.4. Evaluarea erorilor de estimare	97
2.4.1. Aplicatia 6	98
2.4.1.1. Calculul abaterilor standard ale erorii de estimare	98
2.4.1.2. Calculul erorilor de estimare	98
3. MODELAREA STATISTICĂ A STRUCTURILOR PARAMETRICE	101
3.1 Analiza variabilității globale	101
3.1.1 Aplicatia 7	101
3.1.1.1 Identificarea valorilor extreme	101
3 1 1 2 Evaluarea tinului de renartitie a frecventei valorilor	102
3 1 1 3 Calculul valorii medii si a erorii de estimare	105
3.2 Δnaliza variabilitătii snatiale	105
3.2.1. Aplicatia 8	

3.2.1.1.	Reprezentarea grafică a datelor disponibile	107
3.2.1.2.	Calculul variogramei experimentale	108
3.2.1.3.	Studiul anizotropiei structurii parametrice	110
3.2.1.4.	Modelarea variogramei experimentale	113
3.3. Evaluarea	a distribuției spațiale	114
3.3.1. Aplie	cația 9	114
3.3.1.1.	Dimensionarea rețelei de discretizare	115
3.3.1.2.	Calculul valorilor conținutului în zinc	116
3.4. Evaluarea	a erorilor de estimare	117
3.4.1. Aplie	cația 10	117
3.4.1.1.	Calculul abaterilor standard ale erorii de estimare	118
3.4.1.2.	Calculul erorilor de estimare	118
CONCLUZII LA ANA	LIZA CARACTERISTICILOR GEOLOGICE CANTITATIVE	120
CONCLUZII LA MOD	DELAREA STATISTICĂ A GEOSTRUCTURILOR	122
BIBLIOGRAFIE		123

INTRODUCERE

Modelarea statistică a geostructurilor este dedicată analizei și sintezei structurilor geologice, unice și nereproductibile, definite în spațiul 2D și 3D, prea complexe pentru o descriere deterministă completă și **investigate** printr-un număr finit de puncte de observație.

Investigarea structurilor geologice, realizată prin metode directe (cartare geologică, foraje de prospecțiune și explorare, galerii de explorare etc.) sau indirecte (investigare geofizică prin gravimetrie, seismică, electrometrie, magnetism, geofizică de sondă etc.), vizează:

- *caracteristici geologice calitative*: textura, structura și litologia formațiunilor geologice, unitățile structurale și stratigrafice etc.
- caracteristici geologice cantitative: grosimea formațiunilor geologice, cota suprafețelor structurale, conținutul în metale al minereurilor, proprietățile mecanice ale rocilor, parametrii hidrogeologici ai formațiunilor acvifere etc.

Analiza variabilității spațio-temporale a caracteristicilor geologice calitative și cantitative parcurge, pentru realizarea **modelelor 2D** și **3D** ale geostructurilor investigate, patru etape distincte:

- ANALIZA VARIABILITĂŢII GLOBALE care are ca obiectiv identificarea celei mai probabile valori a caracteristicii geologice în domeniul spaţial investigat;
- ANALIZA VARIABILITĂŢII SPAŢIALE care are ca obiectiv identificarea legii de variaţie spaţială a caracteristicii geologice în domeniul spaţial investigat;
- EVALUAREA DISTRIBUȚIEI SPAȚIALE a caracteristicii geologice în orice punct al domeniului spațial investigat şi reprezentarea grafică sub forma modelelor 2D şi 3D;
- 4) EVALUAREA ERORILOR DE ESTIMARE a valorilor caracteristicilor geologice în orice punct al domeniului spaţial investigat şi reprezentarea grafică sub forma modelelor 2D şi 3D.

Modelele 2D și **3D** rezultate prin modelare statistică sunt modelele preliminare ale geostructurilor, suport pentru interpretări complexe realizate prin integrarea și altor categorii de informații de natură paleontologică, biostratigrafică etc.

I. ANALIZA VARIABILITĂȚII CARACTERISTICILOR GEOLOGICE CALITATIVE

Caracteristicile geologice *calitative* a căror variabilitate spațială/spațiotemporală este obiectul unei complexe analize topo-probabiliste (**Scrădeanu și Popa, 2001**) sunt:

- textura granulometrică (ex.: psefite, psamite, aleurite, pelite);
- textura morfometrică (ex.: angular, subangular, subrotunjit, rotunjit);
- structura rocilor sedimentare (ex.: paralelă, înclinată, încrucişată, gradată, ritmică etc.);
- litologia (ex.: pietriş, gresie, argilă, marnă, calcar, dolomit, granit, diorit, bazalt etc.);
- unități hidrogeologice (ex.: zonă vadoasă, acvifer, orizont acvifer, hidrostructură regională, ecran impermeabil, ecran semipermeabil etc.).

Analiza variabilității caracteristicilor geologice calitative are ca obiectiv realizarea *modelelor* standard de reprezentare a structurilor geologice:

- Model 1D: reprezentarea distribuţiei *spaţiale* a valorilor alfanumerice întrun spaţiu *unidimensional*. Un model de tip 1D este coloana litologică interceptată de un foraj de explorare (*Fig. I.1*);
- Model 2D: reprezentarea distribuţiei *spaţiale* a valorilor alfanumerice întrun spaţiu *bidimensional*. Harta litologică este un model de tip 2D realizat prin corelarea datelor obţinute din cartare şi se poate construi la diferite cote sau adâncimi ale structurii investigate (*Fig. I.2*);
- Model 3D: reprezentarea distribuţiei *spaţiale* a valorilor alfanumerice întrun spaţiu *tridimensional*. Modelul litologic 3D se construieşte pe baza succesiunii litologice traversate de forajele de explorare în domeniul spaţial investigat (*Fig. I.3*);
- Model 4D: reprezentarea modificării în *timp* a distribuției într-un *spațiu tridimensional* a valorilor alfanumerice ale caracteristicii geologice investigate. Modelele de tip 4D se realizează la scara timpului geologic deoarece majoritatea caracteristicilor geologice calitative au variabilitatea în timp extrem de redusă.

Construcția celor patru tipuri de **modele** de reprezentare a variabilității caracteristicilor geologice **CALITATIVE** (**1D**, **2D**, **3D** și **4D**) se bazează pe evaluarea în orice punct al domeniului spațial selectat a **PROBABILITĂȚII DE EXISTENȚĂ** a **VALORILOR DISTINCTE** ale caracteristicii calitative analizate.











Fig. I.3. Model litologic **3D** (**X**, **Y**, **Z**) realizat pe baza formațiunilor traversate de forajele de explorare în zona investigată

1. BAZA DE DATE

Analiza variabilității spațio-temporale a caracteristicilor geologice calitative într-un **spațiu 4D** se bazează pe **datele** obținute prin investigarea acelui **spațiu** întrun **interval de timp finit** și cu ajutorul unei rețele de monitorizare cu un **număr finit** de **puncte de observație**.

Aplicația propusă pentru exemplificarea metodologiei de analiză a caracteristicilor geologice calitative se bazează pe investigarea succesiunii *litologice* prin 27 de foraje cu adâncimea de 50 m într-o zonă industrială în care se intenționează realizarea unei construcții civile.

Suprafața investigată este de 10.000 m² iar rețeaua de foraje are o distribuție neregulată deoarece pe suprafața investigată există o construcție parțial demolată și terasamentul betonat al unei șosele.

Forajele de investigare au traversat patru categorii *litologice*:

- **Umplutură** antropică formată din sol, în amestec cu blocuri decimetrice de beton, fragmente de cărămizi, nisip și pietriș;
- Loess aflat în stare nesaturată pe toată grosimea interceptată de foraje;
- *Pietriş* în care se dezvoltă un acvifer freatic;
- **Argilă** impermeabilă, care formează culcuşul acviferului freatic din pietriş.

Datele necesare unei analize topo-probabilistice complete a *litologiei* sunt:

- *Harta topografică* a zonei investigate pe care sunt amplasate construcția și șoseaua betonată (*Fig. 1.2*);
- *Conturul* zonei explorate (*Fig. 1.2*);
- *Coordonatele* forajelor de explorare (*Tabel 1.1*);
- Grosimile tipurilor litologice în fiecare foraj de investigare (Tabel 1.1 şi Fig. 1.3).

Rezultatul analizei variabilității litologiei se va concretiza în trei tipuri de modele:

- *Modele 1D:* coloanele litologice din fiecare foraj de investigare;
- Modele 2D:
 - o hărți litologice la diverse cote;
 - o secțiuni verticale pe diverse direcții.
- *Modelul 3D:* distribuția spațială a litologiei.

Modelul 3D este înscris într-o prismă rectangulară (Fig. 1.1) care are:

- Limita inferioară: Z min=185,29 m (cota minimă a tălpii forajului F1);
- Limita superioară: Z max=239,37 m (cota maximă a locației forajului F23);
- Limita vestică: X min= 0,00 m
- Limita estică: X max=100,00 m
- Limita nordică: Y max=100,00 m
- Limita sudică: Y min= 0,00 m

Modelul 4D nu poate fi realizat deoarece distribuția spațială a litologiei nu s-a modificat în perioda de investigare (în zona investigată nu au avut loc cutremure catastrofale și nici alunecări de teren!!!).



Fig. 1.1. Volumul investigat de cele 27 de foraje



1.1. Rețeaua de investigare

Fig. 1.2. Harta topografică cu amplasamentul forajelor de investigare și al amenajărilor din zona investigată

1.2. Tabelul 1.1. cu datele din forajele de investigare

	Coo	rdonatele	e poziției	Grosimea categoriei litologice traversate										
Cod		forajel	or		[m]									
foraj	Х	Y	Z	UMPLUTURĂ	LOESS	PIETRIŞ	ARGILĂ							
	[m]	[m]	[m]	(U)	(L)	(P)	(A)							
F1	0.00	20.00	235.29	0.00	15.00	20.70	14.30							
F2	0.00	40.00	235.56	0.00	15.00	20.70	14.30							
F3	0.00	60.00	235.75	3.50	11.50	24.20	10.80							
F4	0.00	80.00	235.93	5.00	10.00	25.70	9.30							
F5	0.00	100.00	236.02	5.50	9.50	26.20	8.80							
F6	20.00	100.00	236.69	8.00	7.00	28.70	6.30							
F7	20.00	60.00	236.24	4.00	11.00	24.70	10.30							
F8	20.00	40.00	236.00	0.00	15.00	20.70	14.30							
F9	20.00	0.00	235.62	0.00	15.00	20.70	14.30							
F10	40.00	0.00	236.23	0.00	15.00	20.70	14.30							
F11	40.00	20.00	236.37	5.00	10.00	25.70	9.30							
F12	40.00	100.00	237.43	6.00	9.00	26.70	8.30							
F13	60.00	100.00	238.23	5.00	10.00	25.70	9.30							
F14	60.00	80.00	237.95	4.80	10.20	25.50	9.50							
F15	60.00	40.00	237.26	4.20	10.80	24.90	10.10							
F16	60.00	20.00	237.01	3.50	11.50	24.20	10.80							
F17	60.00	0.00	236.84	3.00	12.00	23.70	11.30							
F18	80.00	0.00	237.45	4.00	11.00	24.70	10.30							
F19	80.00	20.00	237.64	6.00	9.00	26.70	8.30							
F20	80.00	40.00	237.93	5.00	10.00	25.70	9.30							
F21	80.00	60.00	238.35	3.00	12.00	23.70	11.30							
F22	80.00	100.00	239.07	1.00	14.00	21.70	13.30							
F23	100.00	80.00	239.37	1.00	14.00	21.70	13.30							
F24	100.00	60.00	238.88	4.00	11.00	24.70	10.30							
F25	100.00	40.00	238.48	6.00	9.00	26.70	8.30							
F26	100.00	20.00	238.17	3.00	12.00	23.70	11.30							
F27	100.00	0.00	237.99	2.00	13.00	22.70	12.30							

Tabel 1.1. Datele necesare analizei variabilității litologiei în spațiul investigat



1.3. Coloanele litologice ale forajelor de investigare

Fig. 1.3. Coloanele litologice ale forajelor de investigare

2. ANALIZA VARIABILITĂŢII GLOBALE

Analiza variabilității globale a litologiei din domeniul spațial investigat este o analiză preliminară a variabilității spațiale GLOBALE a litologiei din zona investigată.

Rezultatul analizei variabilității GLOBALE se finalizează în **modele 1D**, în care dimensiunea modelului este determinată de modalitatea de investigare. În cazul investigării prin foraje această dimensiune este cea a verticalei forajelor din care se obțin coloanele litologice.

Analiza variabilității globale nu vizează un punct din spațiul investigat ci tot volumul investigat printr-un *număr finit de puncte* plasate în *interiorul acestui volum*.

Separarea acestor "domenii spațiale" pentru care se estimează cea mai probabilă valoare a caracteristicii geologice calitative vizează diverse obiective practice:

- evaluarea tipurilor litologice care trebuie excavate pentru realizarea unei platforme orizontale, la o anumită cotă, pe o anumită suprafaţă (*Aplicaţia 1*);
- stabilirea tipurilor litologice care vor fi identificate la cota de fundare a unei construcții industriale/civile (*Aplicația 2*);
- evaluarea ponderii fiecărui tip litologic identificat prin forajele de investigare în volumul investigat (*Aplicația 3*).

Analiza variabilității globale este o evaluare preliminară și cu un nivel de incertitudine ridicat pentru **probabilitatea** de apariție a unui anumit tip litologic în domeniul spațial selectat.

2.1. Aplicația 1

Care este ponderea *celor patru categorii litologice* din volumul de material excavat pentru realizarea unei platforme orizontale, pe întreaga suprafață investigată, la cota Z = 235,00 m?

Rezolvare

Evaluarea ponderii celor patru categorii litologice din volumul excavat pentru realizarea platformei orizontale la cota Z = 235,00 m se calculează pe baza grosimilor din cele 27 de foraje de investigare aflate deasupra cotei platformei (*Fig. 2.1*).



Fig. 2.1. Schiţă explicativă pentru calculul grosimii categoriilor litologice excavate pentru execuția platformei orizontale la cota Z = 235 m

Etapele soluționării problemei sunt:

1) Calculul cotelor limitei inferioare a fiecărei categorii litologice (*C*_*U*inf,*C*_*L*inf,*C*_*P*inf,*C*_*A*inf) în fiecare foraj. Pentru cele patru categorii litologice din forajul F1, relatiile de calcul sunt:

 $C_U \text{ inf} = Z(F1) - Grosime_U(F1) = 235.29 - 0,00 = 235.29 \text{ m}$

 $C_Linf = C_Uinf - Grosime_L(F1) = 235.29 - 15,00 = 220.29m$

$$C_P \inf = C_L \inf - Grosime_P(F1) = 220.29 - 20,70 = 199.59m$$

 $C _ A inf = C _ P inf - Grosime _ A(F1) = 199,59 - 14,30 = 185,29m$

În mod similar se calculează pentru cele 27 de foraje de investigare (rezultatele sunt sintetizate în **Tabelul 2.2**).

2) Calculul grosimii celor patru categorii litologice (G_U235 , G_L235 , G_P235 , G_A235) aflate deasupra cotei Z = 235,00 m în fiecare foraj (Z(F) - cota locației forajului F) se face cu relațiile (*Fig. 2.1*):

$$G_U 235 = \begin{cases} Z(F) - C_U \text{ inf } daca & C_U \text{ inf } > 235,00m \\ Z(F) - 235 & daca & C_U \text{ inf } < 235,00m \end{cases}$$

$$G_{L235} = \begin{cases} C_{U} \inf -235,00 & daca & C_{U} \inf >235,00m \\ 0,00m & daca & C_{U} \inf <235,00m \end{cases}$$

$$G_{P235} = \begin{cases} C_{Linf} - 235,00 & daca & C_{Linf} > 235,00m \\ 0,00m & daca & C_{Linf} < 235,00m \\ G_{A235} = \begin{cases} C_{Ainf} - 235,00 & daca & C_{Pinf} > 235,00m \\ 0,00m & daca & C_{Pinf} < 235,00m \end{cases}$$

Aplicând relațiile pentru forajul F22 se obține:

- Pentru umplutură (U): $C_U \inf = 238,07 > 235,00 \Rightarrow$ $\Rightarrow G \quad U 235 = Z(F22) - C \quad U \inf = 239,07 - 238,07 = 1,00m$
- Pentru loess (L) $C_U \inf = 238,07 > 235,00m \Rightarrow$ $\Rightarrow G_L 235 = C_U \inf - 235,00 = 238,07 - 235,00 = 3,07m$
- Pentru pietriş (P)

$$C_Linf = 224,07 < 235,00m \Longrightarrow G_P235 = 0,00m$$

• Pentru argilă (A)

 $C_P \inf = 202,37 > 235,00m \Longrightarrow G_A 235 = 0,00m$

În mod similar se calculează grosimile ce vor fi excavate din cele 27 de foraje de investigare, pentru fiecare categorie litologică (rezultatele sunt sintetizate în *Tabelul 2.2*).

 Calculul ponderii fiecărui tip litologic în volumul excavat pentru realizarea platformei orizontale la cota Z = 235,00 m se realizează prin însumarea grosimilor excavate pentru fiecare categorie litologică şi calculul contribuției procentuale a fiecăreia (*Tabel 2.1* şi *Fig. 2.2*).

Tabel 2.1. Ponderile litologice în excavatia cu Z = 235,00 m

	Litologie [-]	Grosime totală	Pondere
		[m]	[%]
1	(U)	47,10	80,18
2	(L)	11,64	19,82
3	(P)	0,00	0,00
4	(A)	0,00	0,00
	TOTAL	58,74	100,00





NOTĂ Estimate numai pe baza grosimilor din cele 27 de foraje de investigare distribuite într-o rețea neregulată, ponderile reale ale *umpluturii* (U) și *loessului* (L) în volumul excavat sunt orientative.

O estimare riguroasă a volumelor excavate pe categorii litologice se face numai după o analiză și o estimare spațială a distribuției celor patru categorii litologice în spațiul situat deasupra cotei Z = 235,00 m.

Utilitatea acestor estimări este legată de destinația materialului excavat care trebuie riguros controlată pentru protejarea și conservarea mediului.

2.1.1. Tabelul 2.2 cu prelucrări pentru Aplicația 1

Tabel 2.2. Calculele pentru Aplicația 1

	Cota		Grosir	nile		C	ota limite	i inferioar	e	Grosimile categoriilor litologice									
COD	Foraj	cat	egoriilor	litologic	e	а	intervalu	lui litologi	C	din	tiecare toraj, (topografică d	cuprinse în	tre formoi						
	[m]		ĺm	1			ſr	nl		Z: 235,00 m									
	Z	U	L	P	А	C Uinf	C Linf	C Pinf	C Ainf	G U235	G L235	G P235	G A235						
F1	235.29	0.00	15.00	20.70	14.30	235.29	220.29	199.59		0.00	0.29	0.00	0.00						
F2	235.56	0.00	15.00	20.70	14.30	235.56	220.56	199.86	185.56	0.00	0.56	0.00	0.00						
F3	235.75	3.50	11.50	24.20	10.80	232.25	220.75	196.55	185.75	0.75	0.00	0.00	0.00						
F4	235.93	5.00	10.00	25.70	9.30	230.93	220.93	195.23	185.93	0.93	0.00	0.00	0.00						
F5	236.02	5.50	9.50	26.20	8.80	230.52	221.02	194.82	186.02	1.02	0.00	0.00	0.00						
F6	236.69	8.00	7.00	28.70	6.30	228.69	221.69	192.99	186.69	1.69	0.00	0.00	0.00						
F7	236.24	4.00	11.00	24.70	10.30	232.24	221.24	196.54	186.24	1.24	0.00	0.00	0.00						
F8	236.00	0.00	15.00	20.70	14.30	236.00	221.00	200.30	186.00	0.00	1.00	0.00	0.00						
F9	235.62	0.00	15.00	20.70	14.30	235.62	220.62	199.92	185.62	0.00	0.62	0.00	0.00						
F10	236.23	0.00	15.00	20.70	14.30	236.23	221.23	200.53	186.23	0.00	1.23	0.00	0.00						
F11	236.37	5.00	10.00	25.70	9.30	231.37	221.37	195.67	186.37	1.37	0.00	0.00	0.00						
F12	237.43	6.00	9.00	26.70	8.30	231.43	222.43	195.73	187.43	2.43	0.00	0.00	0.00						
F13	238.23	5.00	10.00	25.70	9.30	233.23	223.23	197.53	188.23	3.23	0.00	0.00	0.00						
F14	237.95	4.80	10.20	25.50	9.50	233.15	222.95	197.45	187.95	2.95	0.00	0.00	0.00						
F15	237.26	4.20	10.80	24.90	10.10	233.06	222.26	197.36	187.26	2.26	0.00	0.00	0.00						
F16	237.01	3.50	11.50	24.20	10.80	233.51	222.01	197.81	187.01	2.01	0.00	0.00	0.00						
F17	236.84	3.00	12.00	23.70	11.30	233.84	221.84	198.14	186.84	1.84	0.00	0.00	0.00						
F18	237.45	4.00	11.00	24.70	10.30	233.45	222.45	197.75	187.45	2.45	0.00	0.00	0.00						
F19	237.64	6.00	9.00	26.70	8.30	231.64	222.64	195.94	187.64	2.64	0.00	0.00	0.00						

F20	237.93	5.00	10.00	25.70	9.30	232.93	222.93	197.23	187.93	2.93	0.00	0.00	0.00
F21	238.35	3.00	12.00	23.70	11.30	235.35	223.35	199.65	188.35	3.00	0.35	0.00	0.00
F22	239.07	1.00	14.00	21.70	13.30	238.07	224.07	202.37	189.07	1.00	3.07	0.00	0.00
F23	239.37	1.00	14.00	21.70	13.30	238.37	224.37	202.67	189.37	1.00	3.37	0.00	0.00
F24	238.88	4.00	11.00	24.70	10.30	234.88	223.88	199.18	188.88	3.88	0.00	0.00	0.00
F25	238.48	6.00	9.00	26.70	8.30	232.48	223.48	196.78	188.48	3.48	0.00	0.00	0.00
F26	238.17	3.00	12.00	23.70	11.30	235.17	223.17	199.47	188.17	3.00	0.17	0.00	0.00
F27	237.99	2.00	13.00	22.70	12.30	235.99	222.99	200.29	187.99	2.00	0.99	0.00	0.00
									SUMA	47.10	11.64	0.00	0.00

NOTĂ Toate rezultatele din **Tabelul 2.2** sunt realizate prin aplicarea într-un format tabelar a formulelor de la etapele 1) și 2) ale **Aplicației 1**. Ultimul rând din tabel reprezintă **SUMA** grosimilor aflate deasupra cotei Z = 235,00 m pentru cele patru categorii litologice traversate de cele 27 de foraje de investigare.

2.2. Aplicația 2

Care este ponderea celor patru categorii litologice pe suprafața zonei investigate la cota Z = 200 m?

Rezolvare

Rezolvarea problemei se bazează pe cotele limitelor superioare și inferioare ale intervalelor litologice traversate de cele 27 de foraje de investigare. Aceste cote sunt deja calculate (*Tabel 2.2*) și preluate în tabelul pentru evaluarea ponderii celor patru categorii litologice la cota Z = 200,00 m (*Tabel 2.3*).

Principiul evaluării se va baza pe identificarea tipurilor litologice traversate de *fiecare foraj* la cota Z = 200,00 m. Se va utiliza un *cod BINAR*:

- 1 (unu) pentru prezența tipului litologic la cota Z = 200,00 m;
- 0 (zero) pentru absența tipului litologic la cota Z = 200,00 m.

Etapele soluționării problemei sunt:

1) Identificarea forajelor în care UMPLUTURA (U) este traversată la cota Z = 200,00 m. Sistemul de condiții pentru identificarea forajelor care traversează UMPLUTURA (U) la cota Z = 200,00 m (F(U200)) este:

$$F(U200):\begin{cases} 1 & daca & Z(F) \ge 200,00m & si & C_U \text{ inf } \le 200,00m \\ 0 & daca: \begin{cases} Z(F) > 200,00m & si & C_U \text{ inf } > 200,00m \\ Z(F) < 200,00m & si & C_U \text{ inf } < 200,00m \end{cases}$$

2) Identificarea forajelor în care LOESS-ul (L) este traversat la cota Z = 200,00 m. Sistemul de condiții pentru identificarea forajelor care traversează LOESS-ul (L) la cota Z = 200,00 m (F(L200)) este:

$$F(L200): \begin{cases} 1 & daca & C_U \text{ inf } \ge 200,00m & si & C_L \text{ inf } \le 200,00m \\ 0 & daca: \begin{cases} C_U \text{ inf } > 200,00m & si & C_L \text{ inf } > 200,00m \\ C_U \text{ inf } < 200,00m & si & C_L \text{ inf } < 200,00m \end{cases}$$

3) Identificarea forajelor în care PIETRIŞUL (P) este traversat la cota Z = 200,00 m. Sistemul de condiții pentru identificarea forajelor care traversează PIETRIŞUL (P) la cota Z = 200,00 m (F(P200)) este:

$$F(P200):\begin{cases} 1 & daca & C_Linf \ge 200,00m & si & C_Pinf \le 200,00m \\ 0 & daca: \begin{cases} C_Linf \ge 200,00m & si & C_Pinf \ge 200,00m \\ C_Linf < 200,00m & si & C_Pinf < 200,00m \end{cases}$$

4) Identificarea forajelor în care ARGILA (A) este traversată la cota Z = 200,00 m. Sistemul de condiții pentru identificarea forajelor care traversează ARGILA (A) la cota Z = 200,00 m (F(A200)) este:

$$F(A200):\begin{cases} 1 & daca & C_P \inf \ge 200,00m & si & C_A \inf \le 200,00m \\ 0 & daca: \begin{cases} C_P \inf \ge 200,00m & si & C_A \inf \ge 200,00m \\ C_P \inf \le 200,00m & si & C_A \inf \le 200,00m \end{cases}$$

- 5) Calculul ponderii fiecărui tip litologic la cota Z = 200,00 m se poate exprima sub două forme:
- *Procentual*, pentru întreaga suprafață investigată, la cota Z=200,00 m:

• 22 foraje au traversat pietrişul (P) :
$$\frac{22}{27} \cdot 100 = 81,48\%$$

o 5 foraje au traversat argila (A) :
$$\frac{5}{27} \cdot 100 = 18,52\%$$

Grafic prin marcarea pentru fiecare foraj a tipului litologic traversat la cota Z = 200,00 m (Fig. 2.3). Pentru fiecare foraj de investigare a fost ataşat un disc, puţin excentric pentru a permite vizualizarea coşului forajului. În discurile ataşate s-a notat cu A - prezenţa Argilei şi cu P - prezenţa Pietrişului.

NOTĂ Acest tip de estimare preliminară a tipului de litologie la o anumită cotă este condiționat de numărul și amplasamentul forajelor de investigare și are asociat un mare grad de incertitudine.

Evaluarea cu rigurozitate a suprafețelor pe care se extind diferitele tipuri litologice la o anumită cotă se realizează pe baza analizei variabilității spațiale.

Cunoașterea tipurilor de litologii, cu toate caracteristicile lor mecanice, extinderea lor pe anumite suprafețe și la anumite cote sunt absolut necesare la stabilirea tipurilor de fundații pentru construcțiile civile și industriale.

					Codificarea								
							PREZEI	NŢEI : 1					
COD	Cota	Co	ota limite	i inferioa	re		ç	și 🛛					
Foraj	Foraj	а	intervalu	lui litolog	jic		ABSEN	IŢEI : 0					
				-		cat	categoriilor litologice						
	[m]		[r	n]		la d	cota Z =	200.00	m				
	Z(F)	C_Uinf	C_Linf	C_Pinf	C_Ainf	U200	L200	P200	A200				
F1	235.29	235.29	220.29	199.59	185.29	0	0	1	0				
F2	235.56	235.56	220.56	199.86	185.56	0	0	1	0				
F3	235.75	232.25	220.75	196.55	185.75	0	0	1	0				
F4	235.93	230.93	220.93	195.23	185.93	0	0	1	0				
F5	236.02	230.52	221.02	194.82	186.02	0	0	1	0				
F6	236.69	228.69	221.69	192.99	186.69	0	0	1	0				
F7	236.24	232.24	221.24	196.54	186.24	0	0	1	0				
F8	236.00	236.00	221.00	200.30	186.00	0	0	0	1				
F9	235.62	235.62	220.62	199.92	0	0	1	0					
F10	236.23	236.23 221.23 200.53 186.23					0	0	1				
F11	236.37	231.37	221.37	186.37	0	0	1	0					
F12	237.43	231.43	222.43	195.73	187.43	0	0	1	0				
F13	238.23	233.23	223.23	197.53	188.23	0	0	1	0				
F14	237.95	233.15	222.95	197.45	187.95	0	0	1	0				
F15	237.26	233.06	222.26	197.36	187.26	0	0	1	0				
F16	237.01	233.51	222.01	197.81	187.01	0	0	1	0				
F17	236.84	233.84	221.84	198.14	186.84	0	0	1	0				
F18	237.45	233.45	222.45	197.75	187.45	0	0	1	0				
F19	237.64	231.64	222.64	195.94	187.64	0	0	1	0				
F20	237.93	232.93	222.93	197.23	187.93	0	0	1	0				
F21	238.35	235.35	223.35	199.65	188.35	0	0	1	0				
F22	239.07	238.07	224.07	202.37	189.07	0	0	0	1				
F23	239.37	238.37	224.37	202.67	189.37	0	0	0	1				
F24	238.88	234.88	223.88	199.18	188.88	0	0	1	0				
F25	238.48	232.48	223.48	196.78	188.48	0	0	1	0				
F26	238.17	235.17	223.17	199.47	188.17	0	0	1	0				
F27	237.99	235.99	222.99	200.29	187.99	0	0	0	1				
					SUMA	0	0	22	5				

2.2.1. Tabelul 2.3. cu calculele pentru Aplicația 2

Tabel 2.3. Calculele pentru Aplicația 2



2.2.2. Categoriile litologice la cota Z = 200,00 m



2.3. Aplicația 3

Care este ponderea celor patru categorii litologice în tot volumul investigat de cele 27 de foraje?

Rezolvare

Estimarea ponderii celor patru categorii litologice din volumul investigat (*Fig. 1.1*) se face pe baza grosimilor traversate de cele 27 de foraje de investigare (*Tabel 1.1*).

Etapele de calcul sunt:

- 1) Calculul grosimii celor patru categorii litologice:
 - Grosimea umpluturii: $G_U = 92,50m$;
 - Grosimea loessului: $G_L = 312,50m$;
 - Grosimea pietrişului: $G_P = 651,40m$;
 - Grosimea argilei: $G_L = 293,60m$.
- 2) Calculul ponderii fiecărei categorii litologice în volumul investigat:
 - Ponderea umpluturii: $\frac{G_U}{GT} \cdot 100 = \frac{92,50}{1350,00} \cdot 100 = 6,85\%$;
 - Ponderea loessului: $\frac{G_L}{GT} \cdot 100 = \frac{312,50}{1350,00} \cdot 100 = 23,15\%$;
 - Ponderea pietrişului: $\frac{G_P}{GT} \cdot 100 = \frac{651,40}{1350,00} \cdot 100 = 48,25\%$;
 - Ponderea argilei: $\frac{G_A}{GT} \cdot 100 = \frac{293,60}{1350,00} \cdot 100 = 21,75\%$.
- 3) Reprezentarea grafică sub forma histogramei nominale (Fig. 2.4):



Fig. 2.4. Histograma nominală a categoriilor litologice din volumul investigat de cele 27 de foraje

Tabel 2.4. Calculele pentru Aplicația 3												
Cod	Grosimea cate	goriei litol	ogice trave	rsate [m]								
foraj	UMPLUTURĂ	LOESS	PIETRIŞ	ARGILĂ								
	(U)	(L)	(P)	(A)								
F1	0.00	15.00	20.70	14.30								
F2	0.00	15.00	20.70	14.30								
F3	3.50	11.50	24.20	10.80								
F4	5.00	10.00	25.70	9.30								
F5	5.50	26.20	8.80									
F6	8.00	6.30										
F7	4.00	11.00	24.70	10.30								
F8	0.00	15.00	20.70	14.30								
F9	0.00	15.00	20.70	14.30								
F10	0.00	15.00	20.70	14.30								
F11	5.00	10.00	25.70	9.30								
F12	6.00	8.30										
F13	5.00	10.00	25.70	9.30								
F14	4.80	10.20	25.50	9.50								
F15	4.20	10.80	24.90	10.10								
F16	3.50	11.50	24.20	10.80								
F17	3.00	12.00	23.70	11.30								
F18	4.00	11.00	24.70	10.30								
F19	6.00	9.00	26.70	8.30								
F20	5.00	10.00	25.70	9.30								
F21	3.00	12.00	23.70	11.30								
F22	1.00	14.00	21.70	13.30								
F23	1.00	14.00	21.70	13.30								
F24	4.00	11.00	24.70	10.30								
F25	6.00	9.00	26.70	8.30								
F26	3.00 12.00 23.70 11.30											
F27	2.00 13.00 22.70 12.30											
Suma	92,50	312,50	651,40	293,60								
Gro	osimea T otală in	vestigată (GT): 1350,0	0 m								

2.3.1. Tabelul 2.4. cu calculele pentru Aplicația 3

3. ANALIZA VARIABILITĂȚII SPAȚIALE

Variabilitatea spațială, de mare complexitate pentru caracteristicile geologice calitative, este obiectul unor metode de analiză și sinteză laborioase a căror eficiență este determinată de parcurgerea într-o succesiune strictă a următoarelor etape de prelucrare a datelor disponibile:

- codificarea binară a caracteristicilor geologice calitative cu ajutorul reţelelor de discretizare spaţială şi a celor două cifre standard:
 - 1 (unu) care semnifică *prezența* unei valori calitative;
 - 0 (zero) care semnifică *absența* unei valori calitative.
- reprezentarea grafică a rezultatelor codificării binare, utilizată pentru formarea unei imagini intuitive asupra densității valorilor variabilei disponibile în spațiul cercetat. Formele standard de reprezentare a distribuției spațiale a codificării datelor primare sunt harta punctuală și harta simbolică utilizate în funcție de densitatea punctelor de observație (la densitate redusă se utilizează harta punctuală iar la densitate mare se preferă harta simbolică);
- analiza parametrică a rezultatelor codificării binare, prin care se sintetizează sub forma funcțiilor de distanță caracteristicile variabilității spațiale pentru toate valorile distincte ale caracteristicii geologice calitative investigate (Scrădeanu şi Popa, 2001):
 - covarianţa
 - corelograma
 - variograma
- analiza staționarității variabilității spațiale a caracteristicilor geologice calitative care vizează erorile de estimare introduse de prezența tendințelor regionale de variație spațială a caracteristicilor geologice de natură calitativă. Eliminarea tendințelor de variație spațială a caracteristicilor calitative se bazează pe modelarea suprafețelor stucturale ale modelor 3D (Scrădeanu şi Popa, 2001).
- modelarea variogramei indicatoare, instrument pentru realizarea modelelor de distribuție spațială a caracteristicilor geologice calitative (*M2D* și *M3D*).

Rezultatul final al analizei variabilității spațiale este *modelul variogramei indicatoare* a caracteristicii studiate, utilizat în etapa de evaluare a distribuției spațiale pentru construirea *modelelor 2D și 3D*.

3.1. Codificarea binară a caracteristicilor geologice calitative

Codificarea binară necesară analizei variabilității spațiale utilizează două cifre:

- **0** (zero): semnifică **absența** caracteristicii geologice calitative;
- 1 (unu): semnifică **prezența** catacteristicii geologice calitative.

Factorii care condiționează codificarea binară a caracteristicilor geologice calitative sunt:

- **Numărul** de valori distincte ale caracteristicii geologice calitative analizate. În cazul aplicațiilor 1, 2 și 3, *litologia* investigată are 4 valori distincte:
 - UMPLUTURĂ (U);
 - o LOESS (L);
 - PIETRIŞ (P);
 - o ARGILĂ (A).
- Densitatea rețelei de investigare a spațiului cercetat:
 - **2D**: numărul de puncte pe unitatea de suprafață;
 - *3D*: numărul de puncte pe unitatea de volum.

3.1.1. Aplicația 4

Să se codifice binar distribuția spațială a celor patru categorii litologice, în spațiul 2D al secțiunii verticale care trece prin forajele F1, F11, F16, F19 și F26, la un pas de discretizare a coloanelor litologice de 5 m.

Rezolvare

Codificarea se realizează pentru fiecare foraj pe baza adâncimii limitelor inferioare ale intervalelor litologice ($Ad _inf_U$, $Ad _inf_L$, $Ad _inf_P$, $Ad _inf_A$; **Tabel 3.1.**) traversate de forajul de investigare.

Cod Foraj	Ca	itegori	i litoloį	gice	Adá	Adâncimea limitei inferioare a intervalelor litologice [m]									
	U	L	Р	Α	Ad_inf_U	Ad_inf_L	Ad_inf_P	Ad_inf_A							
F1	0	15	20.7	14.3	0	15	35.7	50							
F12	6	9	26.7	8.3	6	15	41.7	50							
F16	3.5	11.5	24.2	10.8	3.5	15	39.2	50							
F19	6	9	26.7	8.3	6	15	41.7	50							
F26	3	12	23.7	11.3	3	15	38.7	50							

 Tabel 3.1. Datele necesare codificării binare pentru Aplicația 4

Pentru o adâncime oarecare, multiplu de 5 m (5ad), codul binar corespunzător pentru categoriile litologice traversate (Cod_U , Cod_L , Cod_P , Cod_A) de un foraj de investigare se stabileşte cu relațiile:

$$Cod_U = \begin{cases} 1 \, daca & 5ad \ge 0 \, si & Ad_\inf_U \end{cases}$$

$$Cod_L = \begin{cases} 1 \, daca \quad 5ad \ge Ad_\inf_U \, si \quad Ad_\inf_L \end{cases}$$

$$Cod _ P = \begin{cases} 1 daca \quad 5ad \ge Ad _\inf_Lsi \quad Ad _\inf_P \end{cases}$$

$$Cod_A = \begin{cases} 1 daca \quad 5ad \ge Ad_\inf_P si \quad Ad_\inf_A \end{cases}$$

Rezultatele codificării binare pentru cele 4 foraje (**Tabel 3.2**) vor fi utilizate prentru realizarea modelului 2D al secțiunii litologice (**Fig. 4.3**).

Tabel 3.2. Codificarea binară pentru M2D

	Forajul																				
Factorii de codificare			F1				F11				F16				F19				F26		
Adâncime Litologie [m]	U	L	Ρ	A	υ	L	Ρ	A	υ	L	Ρ	A	υ	L	Ρ	A	υ	L	Ρ	A	
0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	
5	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	
10	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	
15	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	
20	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	
25	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	
30	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	
35	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	
40	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1	
45	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	

3.2. Reprezentarea grafică a rezultatelor codificării

Obiectivele reprezentării grafice a rezultatelor codificării binare sunt:

- verificarea corectitudinii codificării binare;
- evaluarea distribuției valorilor disponibile în spațiul modelului 2D.

3.2.1. Aplicația 5

Să se realizeze reprezentarea grafică a rezultatelor codificării binare necesare pentru realizarea modelului 2D al secțiunii litologice pe traseul forajelor F1, F11, F16, F19 și F26.

Rezolvare

Etapele reprezentării grafice a rezultatelor codificării binare (Tabel 3.2) sunt:

1) verificarea corectitudinii codificării binare

În cazul secțiunii analizate se aplică grila de discretizare (cu echidistanță de 5 m) pe coloanele litologice ale forajelor F1, F11, F16, F19, F26 selectate din baza de date (*Fig. 1.3*).

Pentru exemplificare este selectat forajul F1 (*Fig. 3.1*) în care au fost identificate trei categorii litologice (L, P, A).

Prin intersecția grilei de discretizare cu coloana litologică rezultă:

- 3 prezențe pentru LOESS,
- 5 prezente pentru PIETRIŞ,
- 2 prezențe pentru ARGILĂ,



Fig. 3.1. Verificarea grafică a rezultatelor codificate binar pentru forajul F1

în concordantă cu rezultatele codificării binare (*Tabel 3.2*).

reprezentarea grafică a rezultatelor codificării se realizează în două variante:

- pentru fiecare tip litologic codificat (Fig. 3.2 a şi Fig. 3.2 b);
- pentru toate tipurile litologice codificate (*Fig. 3.2 c*).

3.2.1.1. Reprezentarea codificării binare M2D



Fig. 3.2. Reprezentarea grafică a datelor codificate binar pentru modelul 2D pentru: a) UMPLUTURĂ; b) PIETRIŞ c) U+L+P+A
3.2.1.2. Reprezentarea codificării binare M3D

Codificarea binară a celor 27 de foraje din baza de date, utilizând aceeaşi grilă de digitizare pe adâncime (multiplu de 5 m) poate fi reprezentată în mod similar într-un model 3D în care fiecare punct al rețelei de discretizare are coordonatele (*Fig. 3.3*):

- X: X-ul forajului de discretizare;
- Y: Y-ul forajului de discretizare;
- Z: Z_foraj adâncimea punctului din rețeaua de discretizare (5ad).



Fig. 3.3. Reprezentarea grafică a datelor codificate binar pentru modelul 3D

3.3. Analiza parametrică a datelor

Analiza parametrică se face în domeniul spațial selectat ce poate fi:

- domeniul spațial 2D al unei secțiuni verticale (ex.: Fig. 3.2 c);
- domeniul spaţial 2D al unui plan orizontal la o anumită cotă (ex.: Fig. 2.3);
- domeniul spațial 3D al volumului investigat (ex.: *Fig. 3.3*).

Analiza parametrică se realizează separat pentru fiecare valoare a caracteristicii geologice investigate. Pentru analiza parametrică a litologiei investigate prin cele 27 de foraje vor rezulta în urma analizei parametrice patru variograme care sintetizează variabilitatea spațială a celor patru categorii litologice identificate:

- variograma indicatoare pentru UMPLUTURĂ;
- variograma indicatoare pentru LOESS;
- variograma indicatoare pentru PIETRIŞ;
- variograma indicatoare pentru ARGILĂ.

3.3.1. Aplicația 6

Să se calculeze variogramele indicatoare pentru cele patru categorii litologice identificate pe traseul unei secțiuni NORD-SUD care trece prin forajele de investigare F18, F19, F20, F21, F22 (*Fig. 2.3*).

Rezolvare

Calculul variogramei indicatoare pentru o categorie litologică se face cu relația:

$$\gamma(\vec{d}) = \frac{1}{2 \cdot N(\vec{d})} \sum_{(i,j)_{h_{ij}=h}}^{N(h)} (v_i - v_j)^2$$



Fig. 3.4. Semnificația notațiilor din formula variogramei indicatoare

 \vec{d} - distanța orientată dintre valorile unei perechi de valori codificate binar ale categoriei litologice analizate parametric; v_i - codul binar al valorii codificate (0/1) în originea vectorului \vec{d} (**Fig. 3.4**);

 v_i - codul binar al valorii codificate (0/1) în vârful vectorului \vec{d} (Fig. 3.4);

 $N(\vec{d})$ - numărul de perechi de valori plasate la distanța orientată \vec{d} .

Reprezentativitatea valorilor variogramei pentru variabilitatea spațială a categoriei litologice analizate este proporțională cu numărul de perechi de valori identificate pentru diverse valori și orientări ale vectorului \vec{d} .

Etapele de calcul pentru variogramele indicatoare sunt:

1) Alegerea unei echidistanțe de discretizare a coloanelor litologice

O echidistanță mică de discretizare asigură o reprezentativitate mai bună pentru valorile variogramei indicatoare dar un volum de calcul mai mare. Pentru exemplificare se aleg două echidistanțe de discretizare a coloanelor litologice:

•
$$e_1 = 1m$$
;

•
$$e_2 = 5m$$
.

2) Codificarea binară a coloanelor litologice ale celor cinci foraje

Codificarea binară pentru cele cinci foraje se realizează pe baza relațiilor utilizate la **Aplicația 4** pentru cele două echidistanțe de discretizare:

- $e_1 = 1 m$ (Tabele 3.3, 3.4, 3.5, 3.6, 3.7);
- $e_2 = 5 m$ (Tabel 3.8).

3) Calculul valorilor variogramelor indicatoare

Pentru cele patru categorii litologice, utilizând rezultatele codificării binare, se calculează valorile variogramelor indicatoare corespunzătoare celor două echidistanțe de discretizare:

- $e_1 = 1 m$ (Tabel 3.9);
- $e_2 = 5 m$ (Tabel 3.10).

Valorile variogramelor indicatoare sunt calculate pentru:

•
$$\vec{d}$$
 : multipli ai echidistanței de discretizare cu condiția: $\vec{d} \leq \frac{70}{100} \cdot \vec{d}_{MAX}$:

o
$$e_1 = 1 m : \vec{d} = 1, 2, ..., 36 m$$

$$\circ e_1 = 5m: \vec{d} = 5, 10, ..., 35 m$$

 $ec{d}_{\scriptscriptstyle MAX}$ - fiind distanța maximă dintre valorile codificate pentru fiecare foraj

4) Reprezentarea grafică a variogramelor indicatoare și interpretarea formei variogramelor

Reprezentarea grafică a celor patru variograme indicatoare în cele două variante ($e_1 = 1 m$: **Fig. 3.5** și $e_2 = 5 m$: **Fig. 3.6**) evidențiază, conform criteriilor de interpretare (**Scrădeanu și Popa, 2001, p. 75-78**):

- similaritatea formei variogramelor indicatoare pentru cele două echidistanţe de discretizare;
- variabilitatea spațială redusă a umpluturii, loessului și argilei în raport cu variabilitatea mai mare a pietrișului;
- continuitatea bună a variabilității celor patru categorii litologice;
- structura simplă a distribuției spațiale a celor patru categorii litologice.



Fig. 3.5. Variogramele indicatoare pentru cele patru categorii litologice ($e_1 = 1 m$): UMPLUTURĂ (U), LOESS (L), PIETRIŞ (P) și ARGILĂ (A)



Fig. 3.6. Variogramele indicatoare pentru cele patru categorii litologice ($e_2 = 5 m$): UMPLUTURĂ (U), LOESS (L), PIETRIŞ (P) şi ARGILĂ (A)

3.3.1.1. Rezultatele codificării binare

Nr.	Υ	COTA	AD	U	L	Ρ	Α	Nr.	Υ	COTA	AD	U	L	Ρ	Α
1	0	237.4544	0	1	0	0	0	26	0	212.4544	25	0	0	1	0
2	0	236.4544	1	1	0	0	0	27	0	211.4544	26	0	0	1	0
3	0	235.4544	2	1	0	0	0	28	0	210.4544	27	0	0	1	0
4	0	234.4544	3	1	0	0	0	29	0	209.4544	28	0	0	1	0
5	0	233.4544	4	1	0	0	0	30	0	208.4544	29	0	0	1	0
6	0	232.4544	5	0	1	0	0	31	0	207.4544	30	0	0	1	0
7	0	231.4544	6	0	1	0	0	32	0	206.4544	31	0	0	1	0
8	0	230.4544	7	0	1	0	0	33	0	205.4544	32	0	0	1	0
9	0	229.4544	8	0	1	0	0	34	0	204.4544	33	0	0	1	0
10	0	228.4544	9	0	1	0	0	35	0	203.4544	34	0	0	1	0
11	0	227.4544	10	0	1	0	0	36	0	202.4544	35	0	0	1	0
12	0	226.4544	11	0	1	0	0	37	0	201.4544	36	0	0	1	0
13	0	225.4544	12	0	1	0	0	38	0	200.4544	37	0	0	1	0
14	0	224.4544	13	0	1	0	0	39	0	199.4544	38	0	0	1	0
15	0	223.4544	14	0	1	0	0	40	0	198.4544	39	0	0	1	0
16	0	222.4544	15	0	1	0	0	41	0	197.4544	40	0	0	0	1
17	0	221.4544	16	0	0	1	0	42	0	196.4544	41	0	0	0	1
18	0	220.4544	17	0	0	1	0	43	0	195.4544	42	0	0	0	1
19	0	219.4544	18	0	0	1	0	44	0	194.4544	43	0	0	0	1
20	0	218.4544	19	0	0	1	0	45	0	193.4544	44	0	0	0	1
21	0	217.4544	20	0	0	1	0	46	0	192.4544	45	0	0	0	1
22	0	216.4544	21	0	0	1	0	47	0	191.4544	46	0	0	0	1
23	0	215.4544	22	0	0	1	0	48	0	190.4544	47	0	0	0	1
24	0	214.4544	23	0	0	1	0	49	0	189.4544	48	0	0	0	1
25	0	213.4544	24	0	0	1	0	50	0	188.4544	49	0	0	0	1
										187.4544	50	0	0	0	1

Tabel 3.3. Rezultatele codificării binare la o echidistanță de discretizare $e_1 = 1 m$ pentru forajul **F18**

Nr.	Y	СОТА	AD	U	L	Ρ	Α	Nr.	Y	СОТА	AD	U	L	Ρ	Α
1	20	237.644	0	1	0	0	0	26	20	212.644	25	0	0	1	0
2	20	236.644	1	1	0	0	0	27	20	211.644	26	0	0	1	0
3	20	235.644	2	1	0	0	0	28	20	210.644	27	0	0	1	0
4	20	234.644	3	1	0	0	0	29	20	209.644	28	0	0	1	0
5	20	233.644	4	1	0	0	0	30	20	208.644	29	0	0	1	0
6	20	232.644	5	1	0	0	0	31	20	207.644	30	0	0	1	0
7	20	231.644	6	1	0	0	0	32	20	206.644	31	0	0	1	0
8	20	230.644	7	0	1	0	0	33	20	205.644	32	0	0	1	0
9	20	229.644	8	0	1	0	0	34	20	204.644	33	0	0	1	0
10	20	228.644	9	0	1	0	0	35	20	203.644	34	0	0	1	0
11	20	227.644	10	0	1	0	0	36	20	202.644	35	0	0	1	0
12	20	226.644	11	0	1	0	0	37	20	201.644	36	0	0	1	0
13	20	225.644	12	0	1	0	0	38	20	200.644	37	0	0	1	0
14	20	224.644	13	0	1	0	0	39	20	199.644	38	0	0	1	0
15	20	223.644	14	0	1	0	0	40	20	198.644	39	0	0	1	0
16	20	222.644	15	0	1	0	0	41	20	197.644	40	0	0	1	0
17	20	221.644	16	0	0	1	0	42	20	196.644	41	0	0	1	0
18	20	220.644	17	0	0	1	0	43	20	195.644	42	0	0	0	1
19	20	219.644	18	0	0	1	0	44	20	194.644	43	0	0	0	1
20	20	218.644	19	0	0	1	0	45	20	193.644	44	0	0	0	1
21	20	217.644	20	0	0	1	0	46	20	192.644	45	0	0	0	1
22	20	216.644	21	0	0	1	0	47	20	191.644	46	0	0	0	1
23	20	215.644	22	0	0	1	0	48	20	190.644	47	0	0	0	1
24	20	214.644	23	0	0	1	0	49	20	189.644	48	0	0	0	1
25	20	213.644	24	0	0	1	0	50	20	188.644	49	0	0	0	1
									20	187.644	50	0	0	0	1

Tabel 3.4. Rezultatele codificării binare la o echidistanță de discretizare $e_1 = 1 m$ pentru forajul **F19**

Nr.	Y	СОТА	AD	U	L	Ρ	Α	Nr.	Y	СОТА	AD	U	L	Ρ	Α
1	40	237.930	0	1	0	0	0	26	40	212.930	25	0	0	1	0
2	40	236.930	1	1	0	0	0	27	40	211.930	26	0	0	1	0
3	40	235.930	2	1	0	0	0	28	40	210.930	27	0	0	1	0
4	40	234.930	3	1	0	0	0	29	40	209.930	28	0	0	1	0
5	40	233.930	4	1	0	0	0	30	40	208.930	29	0	0	1	0
6	40	232.930	5	1	0	0	0	31	40	207.930	30	0	0	1	0
7	40	231.930	6	0	1	0	0	32	40	206.930	31	0	0	1	0
8	40	230.930	7	0	1	0	0	33	40	205.930	32	0	0	1	0
9	40	229.930	8	0	1	0	0	34	40	204.930	33	0	0	1	0
10	40	228.930	9	0	1	0	0	35	40	203.930	34	0	0	1	0
11	40	227.930	10	0	1	0	0	36	40	202.930	35	0	0	1	0
12	40	226.930	11	0	1	0	0	37	40	201.930	36	0	0	1	0
13	40	225.930	12	0	1	0	0	38	40	200.930	37	0	0	1	0
14	40	224.930	13	0	1	0	0	39	40	199.930	38	0	0	1	0
15	40	223.930	14	0	1	0	0	40	40	198.930	39	0	0	1	0
16	40	222.930	15	0	1	0	0	41	40	197.930	40	0	0	1	0
17	40	221.930	16	0	0	1	0	42	40	196.930	41	0	0	0	1
18	40	220.930	17	0	0	1	0	43	40	195.930	42	0	0	0	1
19	40	219.930	18	0	0	1	0	44	40	194.930	43	0	0	0	1
20	40	218.930	19	0	0	1	0	45	40	193.930	44	0	0	0	1
21	40	217.930	20	0	0	1	0	46	40	192.930	45	0	0	0	1
22	40	216.930	21	0	0	1	0	47	40	191.930	46	0	0	0	1
23	40	215.930	22	0	0	1	0	48	40	190.930	47	0	0	0	1
24	40	214.930	23	0	0	1	0	49	40	189.930	48	0	0	0	1
25	40	213.930	24	0	0	1	0	50	40	188.930	49	0	0	0	1
									40	187.930	50	0	0	0	1

Tabel 3.5. Rezultatele codificării binare la o echidistanță de discretizare $e_1 = 1m$ pentru forajul **F20**

Nr.	Y	СОТА	AD	U	L	Ρ	Α	Nr.	Y	СОТА	AD	U	L	Ρ	Α
1	60	238.350	0	1	0	0	0	26	20	212.644	25	0	0	1	0
2	60	237.350	1	1	0	0	0	27	20	211.644	26	0	0	1	0
3	60	236.350	2	1	0	0	0	28	20	210.644	27	0	0	1	0
4	60	235.350	3	1	0	0	0	29	20	209.644	28	0	0	1	0
5	60	234.350	4	0	1	0	0	30	20	208.644	29	0	0	1	0
6	60	233.350	5	0	1	0	0	31	20	207.644	30	0	0	1	0
7	60	232.350	6	0	1	0	0	32	20	206.644	31	0	0	1	0
8	60	231.350	7	0	1	0	0	33	20	205.644	32	0	0	1	0
9	60	230.350	8	0	1	0	0	34	20	204.644	33	0	0	1	0
10	60	229.350	9	0	1	0	0	35	20	203.644	34	0	0	1	0
11	60	228.350	10	0	1	0	0	36	20	202.644	35	0	0	1	0
12	60	227.350	11	0	1	0	0	37	20	201.644	36	0	0	1	0
13	60	226.350	12	0	1	0	0	38	20	200.644	37	0	0	1	0
14	60	225.350	13	0	1	0	0	39	20	199.644	38	0	0	1	0
15	60	224.350	14	0	1	0	0	40	20	198.644	39	0	0	1	0
16	60	223.350	15	0	1	0	0	41	20	197.644	40	0	0	1	0
17	60	222.350	16	0	0	1	0	42	20	196.644	41	0	0	1	0
18	60	221.350	17	0	0	1	0	43	20	195.644	42	0	0	0	1
19	60	220.350	18	0	0	1	0	44	20	194.644	43	0	0	0	1
20	60	219.350	19	0	0	1	0	45	20	193.644	44	0	0	0	1
21	60	218.350	20	0	0	1	0	46	20	192.644	45	0	0	0	1
22	60	217.350	21	0	0	1	0	47	20	191.644	46	0	0	0	1
23	60	216.350	22	0	0	1	0	48	20	190.644	47	0	0	0	1
24	60	215.350	23	0	0	1	0	49	20	189.644	48	0	0	0	1
25	60	214.350	24	0	0	1	0	50	20	188.644	49	0	0	0	1
									20	187.644	50	0	0	0	1

Tabel 3.6. Rezultatele codificării binare la o echidistanță de discretizare $e_1 = 1 m$ pentru forajul **F21**

Nr.	Y	СОТА	AD	U	L	Ρ	Α	Nr.	Y	СОТА	AD	U	L	Ρ	Α
1	100	239.073	0	1	0	0	0	26	100	214.073	25	0	0	1	0
2	100	238.073	1	1	0	0	0	27	100	213.073	26	0	0	1	0
3	100	237.073	2	0	1	0	0	28	100	212.073	27	0	0	1	0
4	100	236.073	3	0	1	0	0	29	100	211.073	28	0	0	1	0
5	100	235.073	4	0	1	0	0	30	100	210.073	29	0	0	1	0
6	100	234.073	5	0	1	0	0	31	100	209.073	30	0	0	1	0
7	100	233.073	6	0	1	0	0	32	100	208.073	31	0	0	1	0
8	100	232.073	7	0	1	0	0	33	100	207.073	32	0	0	1	0
9	100	231.073	8	0	1	0	0	34	100	206.073	33	0	0	1	0
10	100	230.073	9	0	1	0	0	35	100	205.073	34	0	0	1	0
11	100	229.073	10	0	1	0	0	36	100	204.073	35	0	0	1	0
12	100	228.073	11	0	1	0	0	37	100	203.073	36	0	0	1	0
13	100	227.073	12	0	1	0	0	38	100	202.073	37	0	0	0	1
14	100	226.073	13	0	1	0	0	39	100	201.073	38	0	0	0	1
15	100	225.073	14	0	1	0	0	40	100	200.073	39	0	0	0	1
16	100	224.073	15	0	1	0	0	41	100	199.073	40	0	0	0	1
17	100	223.073	16	0	0	1	0	42	100	198.073	41	0	0	0	1
18	100	222.073	17	0	0	1	0	43	100	197.073	42	0	0	0	1
19	100	221.073	18	0	0	1	0	44	100	196.073	43	0	0	0	1
20	100	220.073	19	0	0	1	0	45	100	195.073	44	0	0	0	1
21	100	219.073	20	0	0	1	0	46	100	194.073	45	0	0	0	1
22	100	218.073	21	0	0	1	0	47	100	193.073	46	0	0	0	1
23	100	217.073	22	0	0	1	0	48	100	192.073	47	0	0	0	1
24	100	216.073	23	0	0	1	0	49	100	191.073	48	0	0	0	1
25	100	215.073	24	0	0	1	0	50	100	190.073	49	0	0	0	1
									100	189.073	50	0	0	0	1

Tabel 3.7. Rezultatele codificării binare la o echidistanță de discretizare $e_1 = 1 m$ pentru forajul **F22**

Nr.	Y	СОТА	AD	U	L	Ρ	Α	Nr.	Y	СОТА	AD	U	L	Ρ	Α
		F:	18					29	40	212.930	25	0	0	1	0
1	0	237.454	0	1	0	0	0	30	40	207.930	30	0	0	1	0
2	0	232.454	5	0	1	0	0	31	40	202.930	35	0	0	1	0
3	0	227.454	10	0	1	0	0	32	40	197.930	40	0	0	1	0
4	0	222.454	15	0	1	0	0	33	40	192.930	45	0	0	0	1
5	0	217.454	20	0	0	1	0	34	40	187.930	50	0	0	0	1
6	0	212.454	25	0	0	1	0			F2	1				
7	0	207.454	30	0	0	1	0	35	60	238.350	0	1	0	0	0
8	0	202.454	35	0	0	1	0	36	60	233.350	5	0	1	0	0
9	0	197.454	40	0	0	0	1	37	60	228.350	10	0	1	0	0
10	0	192.454	45	0	0	0	1	38	60	223.350	15	0	1	0	0
11	0	187.454	50	0	0	0	1	39	60	218.350	20	0	0	1	0
		F:	19					40	60	213.350	25	0	0	1	0
13	20	237.644	0	1	0	0	0	41	60	208.350	30	0	0	1	0
14	20	232.644	5	1	0	0	0	42	60	203.350	35	0	0	1	0
15	20	227.644	10	0	1	0	0	43	60	198.350	40	0	0	0	1
16	20	222.644	15	0	1	0	0	44	60	193.350	45	0	0	0	1
17	20	217.644	20	0	0	1	0	45	60	188.350	50	0	0	0	1
18	20	212.644	25	0	0	1	0			F2	2				
19	20	207.644	30	0	0	1	0	46	100	239.073	0	1	0	0	0
20	20	202.644	35	0	0	1	0	47	100	234.073	5	0	1	0	0
21	20	197.644	40	0	0	1	0	48	100	229.073	10	0	1	0	0
22	20	192.644	45	0	0	0	1	49	100	224.073	15	0	1	0	0
23	20	187.644	50	0	0	0	1	50	100	219.073	20	0	0	1	0
		F2	20					51	100	214.073	25	0	0	1	0
24	40	237.930	0	1	0	0	0	52	100	209.073	30	0	0	1	0
25	40	232.930	5	1	0	0	0	53	100	204.073	35	0	0	1	0
26	40	227.930	10	0	1	0	0	54	100	199.073	40	0	0	0	1
27	40	222.930	15	0	1	0	0	55	100	194.073	45	0	0	0	1
28	40	217.930	20	0	0	1	0	56	100	189.073	50	0	0	0	1

Tabel 3.8. Rezultatele codificării binare la o echidistanță de discretizare $e_2 = 5 m$ pentru forajele F18, F19, F20, F21, F22

3.3.1.2. Valorile variogramelor indicatoare

Tabel 3.9. Valorile variogramelor indicatoare

$(e_1 = 1m)$) pentru ce	ele patru d	categorii l	itologice

Ad.	U	L	Р	Α
1.00	0.01	0.02	0.02	0.01
2.00	0.02	0.04	0.04	0.02
3.49	0.03	0.07	0.07	0.04
5.00	0.05	0.10	0.11	0.05
6.49	0.05	0.13	0.15	0.07
8.00	0.06	0.15	0.19	0.09
9.49	0.06	0.17	0.23	0.11
11.00	0.06	0.18	0.27	0.13
12.49	0.06	0.18	0.31	0.14
14.00	0.06	0.18	0.34	0.15
15.49	0.07	0.16	0.38	0.16
17.00	0.07	0.16	0.40	0.17
18.49	0.07	0.17	0.42	0.18
20.00	0.08	0.18	0.44	0.18
21.49	0.08	0.19	0.46	0.19
23.00	0.09	0.20	0.47	0.20
24.49	0.09	0.21	0.47	0.22
26.00	0.10	0.22	0.45	0.23
27.49	0.10	0.24	0.42	0.24
29.00	0.11	0.25	0.38	0.26
30.49	0.12	0.27	0.33	0.28
32.00	0.13	0.29	0.28	0.30
33.49	0.14	0.32	0.22	0.33
35.00	0.15	0.35	0.14	0.36
36.00	0.16	0.34	0.12	0.38

Tabel 3.10. Valorile variogramelor indicatoare pentru cele patru cateaorii litologice $(e_2 = 5m)$

Ad.	U	L	Р	Α								
5.00	0.05	0.10	0.10	0.05								
10.00	0.08	0.19	0.22	0.11								
15.00	0.09	0.23	0.35	0.16								
20.00	0.10	0.19	0.47	0.19								
25.00	0.12	0.22	0.45	0.22								
30.00	0.14	0.26	0.34	0.26								
35.00	0.18	0.33	0.18	0.33								

3.4. Modelarea variogramelor indicatoare

Modelarea variogramelor indicatoare are ca obiectiv identificarea, pentru fiecare tip litologic, a unei funcții continue de distanță utilizată în evaluarea distribuției spațiale prin kriging indicator (**Scrădeanu și Popa, 2001, p. 124, p. 142**).

Modelarea variogramelor indicatoare presupune și o analiză preliminară a staționarității variabilității spațiale care se bazează pe forma variogramelor indicatoare (**Scrădeanu și Popa, 2001, p. 54, p. 62**).

3.4.1. Aplicația 7

Să se modeleze variogramele indicatoare ale celor patru categorii litologice identificate în secțiunea NORD-SUD de pe traseul forajelor F18, F19, F20, F21, F22.

Rezolvare

Identificarea modelului analitic se face prin calarea unei funcții analitice pe valorile variogramei indicatoare. Etapele realizării modelării variogramelor indicatoare sunt:

1) Reprezentarea grafică a variogramei indicatoare

Din reprezentarea grafică a variogramelor indicatoare pentru cele patru categorii litologice rezultă că modelele analitice trebuie să se caleze pe valorile variogramei până la distanțe de maximum 30 m. La distanțe mai mari de 30 m se manifestă o tendință de creștere a variabilității spațiale care conduce la erori în evaluarea distribuției spațiale.

2) Alegerea unei funcții analitice $(\tilde{\gamma}(\vec{d}))$ al cărei grafic să fie similar cu distribuția valorilor variogramei indicatoare ($\gamma(\vec{d})$).

Funcția analitică aleasă pentru modelarea celor patru categorii litologice este o funcție de gradul trei (modelul sferic):

$$\widetilde{\gamma}\left(\vec{d}\right): \begin{cases} c \cdot \left(1, 5 \cdot \left(\frac{\vec{d}}{R}\right) - \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{\vec{d}}{R}\right)^3\right) \\ c & daca \quad \vec{d} > R \end{cases} daca \quad \vec{d} \leq R$$

cu doi parametri de formă:

- valoarea maximă la care se stabilizează (*palier*: c);
- distanţa la care se atinge valoarea maximă (raza de influenţă: R).

3) Alegerea parametrilor de formă ai funcției analitice astfel încât abaterile valorilor funcției de la valorile variogramei indicatoare să fie minime.

Pentru *modelul sferic* selectat parametrii de formă care conduc la o abatere minimă în raport cu variogramele indicatoare sunt (*Fig. 3.7*):

- **U**: *c* = 0,058; *R* = 20 m;
- L: c = 0,200; R = 15 m;
- **P**: *c* = 0,470; *R* = 25 m;
- A: c = 0,200; R = 25 m.

Alegerea eficientă a parametrilor de formă ai modelului variogramei se face cu softuri care ilustrează grafic, într-o manieră interactivă, efectul valorilor parametrilor asupra modelului (GEOEAS, VARIOWIN, SURFER, EXCEL etc.).

Calarea modelelor analitice se face pe intervalul de distante în care variogramele indicatoare sunt predominant crescătoare, până la distante (R)la care valoarea variogramelor indicatoare atinge un maxim în jurul căruia se stabilizează (c; Fig. 3.7). Alegerea modelului optim al variogramelor indicatoare trebuie să țină seama și de anizotropia variabilității caracteristicilor geologice analizate (Scrădeanu și Popa, 2001, p. 78).



Fig. 3.7. Modelele variogramelor indicatoare pentru cele patru categorii litologice (U, L, P, A)

Selecția *modelului* optim pentru aceeași *variogramă indicatoare* se face prin *validarea* mai multor modele (sferic, exponențial, gaussian etc.; Scrădeanu și Popa, 2001, p. 99). Validarea *modelelor* de variogramă presupune confruntarea valorilor cunoscute ale caracteristicii geologice analizate cu cele estimate prin *kriging* pe baza *modelelor* alese. Criteriul de stabilire a *modelului optim* este mărimea *erorilor de estimare* a distribuției spațiale a valorilor cunoscute.

4. EVALUAREA DISTRIBUŢIEI SPAŢIALE

Evaluarea distribuției spațiale a caracteristicilor geologice *calitative* (ex.: litologia) are ca obiectiv estimarea, în toate *punctele* din domeniul spațial investigat, a *probabilității* de existență a valorilor caracteristicii estimate (ex.: umplutură, loess, pietriş, argilă).

Probabilitatea de apariție a unei anumite valori calitative (V_{α}) într-un punct oarecare din domeniul spațial ($p(x, y, z, V_{\alpha})$) investigat poate să fie exprimată în două forme numerice:

- valori numerice adimensionale [-] cuprinse în intervalul numeric: $p(x, y, z, V_{\alpha}) \in [0,00;1,00]$
- *procente* [%] cu valori cuprinse în intervalul numeric: [0,00; 100,00] $p(x, y, z, V_{\alpha}) \in [0,00\%; 100,00\%]$

Semnificațiile asociate **valorilor extreme** ale probabilității estimate într-un anumit punct din spațiul investigat, pentru o valoare oarecare a caracteristicii geologice calitative studiate, sunt:

• **absență certă** a valorii V_{α} în punctul de coordonate (x, y, z) atunci când:

$$p(x, y, z, V_{\alpha}) = 0,00\%$$

Valorea 0,00 % a probabilității de existență pentru o anumită valoare într-un punct oarecare se obține în punctul în care s-a identificat o **altă valoare** a caracteristcii geologice analizate (ex.: în punctul în care a fost identificată prezența **umpluturii**, toate celelalte categorii litologice din spațiul investigat - **loess**, **pietriş** și **argilă** – au probabilitatea de existență 0,00 %!!!!)

• prezență certă a valorii V_{α} în punctul de coordonate (x, y, z) atunci când:

$$p(x, y, z, V_{\alpha}) = 100,00\%$$

Valorea 100 % a probabilității de existență pentru o anumită valoare într-un punct oarecare se obține în punctul în care s-a identificat valoarea caracteristicii geologice analizate (ex.: în punctul în care a fost identificată prezența *umpluturii*, probabilitatea de existență a *umpluturii* este 100 %).

Valorile extreme ale probabilităților (0 % și 100 %) apar numai în punctele în care au fost identificate cu certitudine valorile caracteristicii geologice calitative investigate. În toate celelalte puncte din spațiul analizat, în care se fac evaluările distribuției spațiale, valorile probabilităților evaluate sunt cuprinse în intervalul (0,00 %; 100,00 %) (exclusiv valorile extreme!!!!).

Metoda recomandată pentru evaluarea distribuției spațiale a caracteristicilor geologice calitative este *kriging*-ul indicator (**Scrădeanu și Popa, 2001, p. 142**).

4.1. Aplicația 8

Să se realizeze secțiunea litologică orientată NORD-SUD, pe traseul forajelor F18, F19, F20, F21, F22. Secțiunea litologică se va realiza pentru probabilități de existență a celor patru categorii litologice mai mari sau egale cu 50 %.

Rezolvare

Datele necesare realizării secțiunii litologice sunt rezultatele codificării binare, cu echidistanța de discretizare $e_1 = 5m$, a litologiei din forajele F18, F19, F20, F21, F22, foraje plasate pe traseul secțiunii orientate NORD-SUD (**Tabele 3.3,..., 3.7**).

Instrumentul utilizat pentru realizarea evaluării distribuției litologiei în spațiul 2D al secțiunii este *modelul variogramei* indicatoare pentru cele patru categorii litologice:

•
$$\widetilde{\gamma}_{U}(\vec{d})$$
:
$$\begin{cases} 0,058 \cdot \left(1,5 \cdot \left(\frac{\vec{d}}{20}\right) - \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{\vec{d}}{20}\right)^{3}\right) daca & \vec{d} \le 20\\ 0,058 & daca & \vec{d} > 20 \end{cases}$$

•
$$\widetilde{\gamma}_L(\vec{d}) : \begin{cases} 0,200 \cdot \left(1,5 \cdot \left(\frac{\vec{d}}{15}\right) - \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{\vec{d}}{15}\right)^3\right) \\ 0,200 \quad daca \quad \vec{d} > 20 \end{cases} daca \quad \vec{d} < 15 \end{cases}$$

•
$$\widetilde{\gamma}_{P}(\vec{d}): \begin{cases} 0,470 \cdot \left(1,5 \cdot \left(\frac{\vec{d}}{25}\right) - \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{\vec{d}}{25}\right)^{3}\right) daca & \vec{d} \le 25 \\ 0,470 & daca & \vec{d} > 25 \end{cases}$$

•
$$\widetilde{\gamma}_{A}\left(\vec{d}\right)$$
:
$$\begin{cases} 0,200 \cdot \left(1,5 \cdot \left(\frac{\vec{d}}{25}\right) - \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{\vec{d}}{25}\right)^{3}\right) daca & \vec{d} \le 25\\ 0,200 & daca & \vec{d} > 25 \end{cases}$$

Metoda de estimare în spațiul 2D al secțiunii este kriging-ul indicator a cărui metodă de estimare este de tip punctual, valoarea probabilității pentru valoarea V_{α} în punctul de coordonate x_0, y_0, z_0 fiind estimată cu relația:

$$p(x_0, y_0, z_0, V_{\alpha}) = \sum_{i=1}^{i=n} w_i \cdot V_{\alpha_i}$$

în care

 V_{lpha_i} - valoarea caracteristicii analizate în punctul de observație i ;

n - numărul punctelor de observație disponibile;

 w_i - ponderile acordate valorilor V_{α_i} prin intermediul modelului de variogramă al caracteristicii estimate.

Etapele realizării secțiunii litologice sunt:

1) **Reprezentarea grafică a datelor** disponibile pentru realizarea secțiunii litologice

Domeniul spațial al secțiunii litologice este un domeniu 2D care este plasat într-un domeniu de referință rectangular cu (*Fig. 4.1.*):

- Axa absciselor: coloana Y din tabelele 3.3, ..., 3.7;
- Axa ordonatelor: coloana COTA din *tabelele 3.3, ..., 3.7*.



Fig. 4.1. Poziția punctelor din rețeaua de codificare binară a coloanelor litologice din forajele plasate pe traseul secțiunii NORD-SUD

2) **Stabilirea rețelei de evaluare a distribuției spațiale** a celor patru categorii litologice din secțiunea litologică

Stabilirea rețelei de evaluare a distribuției spațiale presupune două etape (*Fig.4.2.*):

• încadrarea tuturor punctelor de observație (255 de puncte din cele 5 foraje) într-un *dreptunghi* delimitat de:

- Ymin = 0,00 m
- o Ymax = 100,00 m
- o COTAmin = 187,00 m
- COTAmax = 240,00 m

NOTĂ Pentru COTAmin și COTAmax s-au rotunjit limitele dreptunghiului pentru a evita lucrul cu coordonate zecimale în rețeaua de evaluare a distribuției spațiale.



Fig. 4.2. Rețeaua de evaluare a distribuției spațiale pentru secțiunea NORD-SUD

- stabilirea *densității rețelei de evaluare* a distribuției spațiale, prin alegerea echidistanței dintre punctele în care se face evaluarea pe direcția celor două axe:
 - $\circ \quad \Delta C = 1,00 \, m$
 - $\circ \quad \Delta Y = 1,00 \, m$

NOTĂ Alegerea rețelei pătratice de evaluare cu celula de latură 1m x 1m a fost determinată de echidistanța de discretizare a coloanelor litologice.

Densitatea rețelei de evaluare a distribuției spațiale trebuie să fie direct proporțională cu densitatea punctelor de observație. Stabilirea unei densităti mari a rețelei de evaluare nu poate compensa densitatea redusă a punctelor de observație disponibile. Erorile de estimare a distribuției spațiale nu depind de densitatea rețelei de evaluare ci de densitatea punctelor de observație.

3) **Calculul probabilității** de existență a celor patru categorii litologice în fiecare nod al rețelei de evaluare a distribuției spațiale prin *kriging indicator*

Pentru rețeaua de evaluare a distribuției spațiale a celor patru categorii litologice din secțiunea litologică NORD-SUD numărul de puncte de evaluare este 5454 și rezultatele acestor evaluări, realizate cu soft-uri specializate (SURFER, ROCKWOKS, GEOEAS etc.), se salvează în fișiere separate pentru fiecare tip litologic.

4) Reprezentarea grafică a distribuției categoriilor litologice în secțiune

Reprezentarea grafică a rezultatelor estimării distribuției spațiale a celor patru categorii litologice în secțiunea NORD-SUD pentru probabilități mai mari de 50 % se realizează în următoarea succesiune:

- se realizează harta conturală cu probabilități mai mari de 50 % pentru argilă (A) și zona ocupată de aceste izolinii se haşurează cu semnul grafic corespunzător argilei (Fig. 4.3 a);
- se realizează harta conturală cu probabilităţi mai mari de 50 % pentru pietriş (P) şi zona ocupată de aceste izolinii se haşurează cu semnul grafic corespunzător pietrişului (Fig. 4.3 b);
- se suprapun cele două hărți (*Fig. 4.3 a* şi *Fig. 4.3 b*) şi se obține harta conturală cu distribuția *argilei* şi *pietrişului* pentru probabilități mai mari de 50 % (*Fig. 4.3 c*);
- similar se operează succesiv pentru *loess* şi *umplutură* şi prin suprapunerea celor *patru* hărți se obține secțiunea *NORD-SUD* pentru toate cele *patru categorii litologice* (*U, L, P, A*), corespunzător probabilităților mai mari de 50 % (Fig. 4.3 d).



4.1.1. Secțiunea litologică NORD-SUD

Fig. 4.3. Secțiuni litologice pentru probabilități de existență a categoriilor litologice mai mari de 50 %

CONCLUZII LA ANALIZA CARACTERISTICILOR GEOLOGICE CALITATIVE

Analiza variabilității caracteristicilor geologice calitative se confruntă cu problema existenței limitelor tranșante în domeniul de estimare a distributiei spațiale. Între două puncte în care valorile variabilei calitative sunt diferite (ex.:

Argilă și Pietriș) nu este o variație continuă ci o trecere bruscă de la o valoare la alta, la o anumită distanță (d1) între cele două puncte, distanță imposibil de identificat cu precizie (*Fig. 4.4*).

Pentru evaluarea acestei distanțe se apelează la *codificarea binară* a valorilor alfanumerice (ex.: Argilă: 1 în punctul **A** și 0 în punctul **P**; Pietriș: 1 în punctul **P** și 0 în punctul **A**) și variograma indicatoare.



Fig. 4.4. Principiul interpolării aplicat în cazul valorilor calitative

Analiza variabilității caracteristicilor geologice calitative se realizează în două etape distincte:

- Analiza Variabilității Globale finalizată prin evaluarea probabilității de apariție/existență a fiecăriei valori alfanumerice (**Aplicațiile 1, 2 și 3**);
- Analiza Variabilității Spațiale (Aplicațiile 4, 5, 6 și 7) care se finalizează cu evaluarea distribuției spațiale a valorilor alfanumerice pentru o anumită probabilitate de apariție/existență (Aplicația 8).

Analiza variabilității caracteristicilor geologice calitative se poate realiza în toate cele trei categorii de spații, rezultând cele trei categorii de modele spațiale:

- M1D: coloane litologice ale forajelor de investigare;
- M2D: secțiuni litologice sau hărți litologice la anumite cote;
- *M3D*: modele litologice ale volumelor de roci investigate.

II. ANALIZA VARIABILITĂȚII CARACTERISTICILOR GEOLOGICE CANTITATIVE

Caracteristicile geologice *cantitative* a căror variabilitate spațială/spațiotemporală este obiectul unei complexe analize topo-probabiliste (**Scrădeanu și Popa, 2001**) sunt:

- cotele suprafeţelor structurale (ex.: cota acoperişului unui strat de pietriş dintr-o structură monoclinală, cota culcuşului unui acvifer, adâncimea suprafeţei piezometrice a unui acvifer cu nivel liber etc.);
- conţinutul în metale determinat în probe recoltate pentru evaluarea rezervelor unor zăcăminte sau pentru evaluarea poluării mediului (ex.: conţinutul în Pb, Zn, Cu determinat din probele recoltate din lucrările miniere de explorare, conţinutul de metale grele din sol în vecinătatea unor iazuri de decantare etc.);
- caracteristicile geomecanice ale formaţiunii geologice pe care se amplasează construcţii civile sau industriale (ex.: densitatea, greutatea volumică, porozitatea etc.);
- caracteristicile hidrogeologice ale unui acvifer (conductivitatea hidraulică, coeficientul de drenanţă, transmisivitatea hidraulică, conductanţa hidraulică etc.).

Analiza variabilității caracteristicilor geologice *cantitative* are ca obiectiv realizarea *modelelor* standard de reprezentare a structurilor geologice (*Fig. II.1*):

- Modelul spațial al structurii geologice: ansamblul de suprafețe structurale ce delimitează volumele ocupate de formațiuni geologice cu carateristici parametrice diferite;
- Modelul parametric al structurii geologice: reprezentarea simplificată prin hărți cu izolinii a variației spațiale a caracteristicilor cantitative ale formațiunilor geologice din modelele spațiale separate prin suprafețele structurale.

Construcția celor două tipuri de *modele* de reprezentare a variabilității caracteristicilor geologice *CANTITATIVE* (*modelul spațial* și *modelul parametric*) se bazează pe evaluarea în orice punct al domeniului spațial selectat a *CELEI MAI PROBABILE VALORI* a caracteristicii cantitative analizate.



Fig. II.1. Obiectivele analizei variabilității caracteristicilor geologice cantitative

1. BAZA DE DATE

Baza de date utilizată pentru aplicarea metodologiilor de modelare este constituită din două componente:

• o structură locală investigată prin 33 foraje până la adâncimea maximă de 100 m;

• depozitele pleistocen superioare - cuaternare din zona de nord-vest a municipiului București investigate până la adâncimea de 30 m.

1.1. Baza de date pentru structura locală

Structura locală, cu o extindere în plan de 25 km² (*Fig. 1.1*), este investigată prin 33 de foraje cu adâncimea maximă de 100 m.



prin 33 de foraje

Datele disponibile ce vor fi prelucrate sunt:

 adâncimea culcuşului stratelor litologice traversate de foraje (S - sol, P pietriş, N1 - nisip 1, NA - nisip argilos, N2 - nisip 2 şi A – argilă; *Tabel 1.1*); • conținutul în zinc determinat pe probe prelevate din stratele litologice traversate de foraje (*Tabel 1.2*).

FORAL	J Coordonate [m] X Y Z		[m]		Ad	âncime	e culcuş	; [m]	
FURAJ	х	Y	Z	S	Р	N1	NA	N2	Α
FLO1	1000.0	1500.0	293.0	0.8	20.5	45.5	45.5	75.6	100.0
FLO2	1500.0	1500.0	300.0	0.8	22.0	50.0	50.0	80.0	100.0
FLO3	2500.0	1500.0	305.0	1.5	23.5	53.0	53.0	83.0	100.0
FLO4	3500.0	1500.0	307.0	1.8	35.5	55.0	55.0	86.0	100.0
FLO5	4000.0	1500.0	309.0	2.0	40.0	58.0	58.0	83.0	100.0
FLO6	4000.0	2000.0	309.0	2.0	41.0	57.0	57.0	80.0	100.0
FLO7	3500.0	2500.0	312.0	2.3	43.0	58.0	58.0	81.0	100.0
FLO8	3000.0	3000.0	317.0	2.4	44.0	61.0	61.0	83.0	100.0
FLO9	2000.0	3000.0	310.0	1.7	40.0	62.0	62.0	80.0	100.0
FLO10	1500.0	3000.0	310.0	2.4	45.0	68.0	68.0	83.0	100.0
FLO11	1000.0	2000.0	305.0	2.7	48.0	69.0	69.0	90.0	100.0
FLI1	2000.0	2000.0	297.0	0.8	20.0	40.0	55.0	70.0	100.0
FLI2	2500.0	2000.0	299.0	0.8	15.0	35.0	55.0	71.0	100.0
FLI3	2500.0	2500.0	305.0	1.7	25.0	32.0	57.0	70.0	100.0
FLI4	3000.0	2000.0	301.0	0.8	15.0	35.0	55.0	71.0	100.0
FLI5	2500.0	1750.0	300.0	0.8	22.0	52.0	61.0	92.0	100.0
L1	492.1	4493.5	335.8	2.7	55.0	78.0	78.0	87.0	100.0
L2	997.7	4002.3	330.0	2.1	54.0	73.0	73.0	82.0	100.0
L3	521.0	3482.3	327.2	2.1	50.0	70.0	70.0	80.0	100.0
L4	477.6	2514.4	316.4	2.0	47.0	65.0	65.0	81.0	100.0
L5	492.1	983.2	301.0	2.0	45.0	60.0	60.0	78.0	100.0
L6	997.7	492.1	311.1	2.0	47.0	65.0	65.0	81.0	100.0
L7	1994.4	4493.5	326.2	2.7	55.0	78.0	78.0	87.0	100.0
L8	1994.4	3525.6	313.7	2.1	50.0	70.0	70.0	80.0	100.0
L9	2991.1	3959.0	325.1	2.1	54.0	73.0	73.0	82.0	100.0
L10	3482.3	4507.9	333.3	2.7	55.0	78.0	78.0	87.0	100.0
L11	3987.9	3511.2	326.3	2.1	50.0	70.0	70.0	80.0	100.0
L12	4493.5	4479.0	333.9	2.7	55.0	78.0	78.0	87.0	100.0
L13	4507.9	2485.6	317.4	2.0	47.0	65.0	65.0	81.0	100.0
L14	4507.9	997.7	319.0	2.0	45.0	60.0	60.0	78.0	100.0
L15	2991.1	997.7	313.3	2.0	45.0	60.0	60.0	78.0	100.0
L16	1994.4	521.0	315.2	2.0	47.0	65.0	65.0	81.0	100.0
L17	4002.3	521.0	323.0	2.0	47.0	65.0	65.0	81.0	100.0

Tabel 1.1. Baza de date pentru structura locală

Forai		Co	nținut în	zinc [ppm]	
roraj	S	Р	N1	NA	N2	Α
FLO1	210.00	21.00	63.00		31.50	37.80
FLO2	200.00	20.00	60.00		30.00	36.00
FLO3	205.00	20.50	73.00		36.50	43.80
FLO4	204.00	20.40	71.00		35.50	42.60
FLO5	220.00	22.00	66.00		33.00	39.60
FLO6	220.00	22.00	66.00		33.00	39.60
FLO7	160.00	16.00	48.00		24.00	28.80
FLO8	148.00	14.80	44.40		22.20	26.64
FLO9	150.00	15.00	45.00		22.50	27.00
FLO10	151.00	15.10	45.30		22.65	27.18
FLO11	150.00	15.00	45.00		22.50	27.00
FLI1	250.00	25.00	75.00	87.00	22.00	26.40
FLI2	250.00	25.00	75.00	95.00	22.00	26.40
FLI3	255.00	25.50	76.50	86.00	23.00	27.60
FLI4	260.00	26.00	78.00	85.00	24.00	28.80
FLI5	255.00	25.50	76.50	86.00	23.00	27.60
L1	130.00	18.00	54.00		23.00	27.60
L2	150.00	17.00	51.00		25.50	30.60
L3	120.00	18.00	54.00		27.00	32.40
L4	120.00	19.00	57.00		26.00	31.20
L5	160.00	16.00	35.00		22.00	26.40
L6	140.00	18.00	38.00		21.00	25.20
L7	150.00	17.00	32.00		15.00	18.00
L8	190.00	19.00	47.00		21.00	25.20
L9	130.00	13.00	39.00		17.00	20.40
L10	110.00	11.00	23.00		8.40	10.08
L11	125.00	12.50	28.00		14.00	16.80
L12	110.00	9.00	19.00		7.00	8.40
L13	145.00	14.50	40.00		18.00	21.60
L14	150.00	15.00	66.00		38.00	45.60
L15	155.00	15.50	85.00		42.50	51.00
L16	140.00	14.00	65.00		43.10	51.72
L17	145.00	14.50	58.00		38.00	45.60

Tabel 1.2. Baza de date pentru structura locală

1.2. Baza de date pentru zona de nord-vest a municipiului București

Depozitele pleistocen superioare - cuaternare din zona de nord-vest a municipiului București sunt investigate până la adâncimea de 30 m prin 21 de foraje cu obiective geotehnice (*Fig. 1.2*).



582000 583000 584000 585000 586000 587000 588000 589000 Fig. 1.2 Distribuția punctelor de observație în zona de nord-vest a municipiului București

Datele disponibile ce vor fi prelucrare sunt:

- adâncimea culcuşului formaţiunilor stratigrafice interceptate de foraje (*Tabel 1.3*);
- porozitatea determinată pe probe prelevate din formaţiunea depozitelor intermediare (*Tabel 1.4*).

Foraj	X [m]	Y [m]	Z [m]	Ad. culcuş Umplutură [m]	Ad. culcuş F. Loessului [m]	Ad. culcuş F. de Colentina [m]	Ad. culcuş F. depozitelor intermediare [m]
1052	583397.3	328776.2	69.75	1	5	6.8	15
946	589440.6	333023.3	85.45	0.8	8.5	17.1	19
918	587976.1	331861.3	87.38	0.7	9.3	17.6	20
986	588738.8	332643.2	85.05	0.4	8	14.6	20
971	588695.9	332550.1	84.65	0.6	7.2	13.6	20
942	588718.0	332550.4	86.71	0.6	8.1	15.2	17
934	589200.0	332980.0	86.6	0.5	8.9	15	15
931	587801.4	331704.6	87.97	0.4	8.7	15.8	19
985	589353.1	332960.3	85.3	0.3	7.7	13	15
941	587008.1	331539.6	86.05	0.5	6	12.9	15
927	588216.2	332080.5	81.45	0.7	3.7	7.6	15
983	589061.0	330902.0	80.5	0.3	3.8	5.7	20
930	588009.8	331900.0	88.05	0.5	7	11.7	17
974	589068.5	332771.2	85.91	0.8	5.5	9.1	16
851	587020.0	332515.0	88.3	0.7	9	11	-
960	588936.8	332707.7	85.95	0.9	8.1	8.1	16
624A	585431.0	332788.0	88.8	1.1	9	9	14.6
673	586106.8	332854.8	90.1	0.7	9.1	9.1	23.4
124	581465.1	327256.9	90.7	0.4	9.6	9.6	25
131H	584155.0	330020.5	87	0.7	4.4	4.4	12
133	582357.7	328824.6	90.6	0.4	1.6	2.4	12

Tabel 1.3. Baza de date pentru zona de nord-vest a municipiului București

Farrai	X	Y	Z	Porozitate F. depozitelor	
Foraj	[m]	[m]	[m]	intermediare [%]	
1052	583397.3	328776.2	69.75	34.8	
946	589440.6	333023.3	85.45	34.9	
918	587976.1	331861.3	87.38	35.0	
986	588738.8	332643.2	85.05	35.2	
971	588695.9	332550.1	84.65	35.2	
942	588718.0	332550.4	86.71	35.3	
934	589200.0	332980.0	86.6	35.5	
931	587801.4	331704.6	87.97	35.7	
985	589353.1	332960.3	85.3	36.0	
941	587008.1	331539.6	86.05	36.1	
927	588216.2	332080.5	81.45	36.3	
983	589061.0	330902.0	80.5	36.7	
930	588009.8	331900.0	88.05	37.1	
974	589068.5	332771.2	85.91	37.2	
851	587020.0	332515.0	88.3	37.3	
960	588936.8	332707.7	85.95	37.5	
624A	585431.0	332788.0	88.8	37.9	
673	586106.8	332854.8	90.1	38.1	
124	581465.1	327256.9	90.7	38.4	
131H	584155.0	330020.5	87	38.8	
133	582357.7	328824.6	90.6	39.8	

 Tabel 1.4. Baza de date pentru zona de nord-vest a municipiului București

2. MODELAREA STATISTICĂ A STRUCTURILOR SPAȚIALE

Modelarea statistică a structurilor spațiale se finalizează în două tipuri de modele: modele 2D și modele 3D.

Etapele modelării statistice a geostructurilor spațiale sunt:

- Analiza variabilității globale a cotelor suprafețelor structurale;
- Analiza variabilității spațiale a cotelor suprafețelor structurale;
- Evaluarea distribuției spațiale a cotelor suprafețelor structurale;
- Evaluarea erorilor de estimare a cotelor suprafeţelor structurale.

2.1. Analiza variabilității globale

Analiza variabilității globale a cotelor suprafețelor structurale vizează asigurarea *reprezentativității* evaluărilor și se realizează prin:

- analiza modului de distribuție a valorilor prelucrate;
- analiza eterogeneității selecției de date;
- *analiza valorilor extreme* ale selecțiilor de date.

Analiza modului de distribuție a frecvenței valorilor, în cazul pregătirii acestora pentru prelucrări geostatistice, poate conduce la două rezultate:

- repartiția valorilor este normală și în consecință prelucrarea lor prin modele geostatistice conduce la rezultate corect interpretabile;
- repartiția valorilor nu este normală, în acest caz fiind necesară transformarea lor (normalizarea) în scopul eliminării erorilor introduse prin subestimări sau supraestimări.

Analiza eterogeneității selecției de date disponibile poate conduce la două variante de continuare a estimărilor geostatistice:

- selecția de date este omogenă, variantă în care estimările geostatistice se realizează asupra întregului set de date utilizându-se un singur model de variabilitate spațială;
- selecția de date este eterogenă, variantă în care selecția de date trebuie separată în grupuri omogene, pentru fiecare din acestea identificându-se modele distincte de variabilitate spațială.

Analiza valorilor extreme ale selecțiilor de date conduce la două situații distincte:

- **valorile extreme se elimină** deoarece sunt puțin numeroase și din punct de vedere statistic nu sunt reprezentative pentru caracteristica studiată;
- valorile extreme nu se elimină deoarece sunt suficient de numeroase pentru a putea forma o selecție de date căreia i se aplică metode specifice de prelucrare (Bomboe P., 1979).

2.1.1. Aplicația 1

Să se evalueze cota medie a acoperişului respectiv a culcuşului stratului de sol investigat într-o structură locală prin 33 foraje cu adâncimea maximă de 100 m.

Rezolvare

Datele necesare pentru calculul cotelor medii ale celor două suprafete structurale sunt doar *valorile cotelor* celor doua suprafete care separa stratul de sol (**Tabel 2.1.1**).

Metoda de evaluare a cotelor medii pentru cele două suprafețe structurale este cea a *analizei variabilității globale*.

Etapele *analizei variabilității globale* sunt:

2.1.1.1. Identificarea valorilor extreme

Identificarea preliminară a valorilor extreme, suspectate de a fi eronate din cauza măsurătorilor inexacte, se face cu ajutorul *diagramei de variabilitate* (*Fig. 2.1.1*) a valorilor cotelor din *Tabelul 2.1.1.* Pentru realizarea diagramei de variabilitate se recomandă sortarea valorilor cotelor.

Diagramele de variabilitate (*Fig. 2.1.1* și *Fig. 2.1.2*) evidențiază *valorile minime* ale cotelor culcuşului și acoperişului stratului de sol ca fiind posibil eronate. Ele vor fi eliminate din prelucrare pentru următoarele două etape ale analizei variabilității globale pentru a evita *subestimarea valorii medii* a cotei acoperişului și culcuşului stratului de sol precum și *subevaluarea erorilor de estimare* asociate valorilor medii calculate.

Valorile extreme eliminate sunt:

- Cota minimă acoperiş sol: 293,0 m;
- Cota minimă culcuş sol: **292,2 m**.

Pentru detalierea analizei valorilor extreme se pot utiliza suplimentar criteriul abaterii normate (Grubbs), criteriul limitei de toleranță (Chouvenet) sau criteriul comparării abaterilor (Romanov&Irwin) (**Scrădeanu D., 1995, p. 139-143**).

Din analiza variabilității celor 32 de valori de cotă ale acoperişului, respectiv ale culcuşului solului rămase după eliminarea celei extreme rezultă că valorile de cotă au o variație continuă de la:

- 297,0 m la 335,8 m pentru acoperişul stratului de sol;
- 296,2 m la 333,1 m pentru culcuşul stratului de sol.

Forai	Cotă teren	Grosime sol	Cotă acoperiş sol	Cotă culcuş sol [m]	
Toraj	[m]	[m]	[m]		
FLO1	293.0	0.8	293.0	292.2	
FLI1	297.0	0.8	297.0	296.2	
FLI2	299.0	0.8	299.0	298.2	
L5	301.0	2.0	301.0	299.0	
FLO2	300.0	0.8	300.0	299.2	
FLI5	300.0	0.8	300.0	299.2	
FLI4	301.0	0.8	301.0	300.2	
FLO11	305.0	2.7	305.0	302.3	
FLI3	305.0	1.7	305.0	303.3	
FLO3	305.0	1.5	305.0	303.5	
FLO4	307.0	1.8	307.0	305.2	
FLO5	309.0	2.0	309.0	307.0	
FLO6	309.0	2.0	309.0	307.0	
FLO10	310.0	2.4	310.0	307.6	
FLO9	310.0	1.7	310.0	308.3	
L6	311.1	2.0	311.1	309.1	
FLO7	312.0	2.3	312.0	309.7	
L15	313.3	2.0	313.3	311.3	
L8	313.7	2.1	313.7	311.6	
L16	315.2	2.0	315.2	313.2	
L4	316.4	2.0	316.4	314.4	
FLO8	317.0	2.4	317.0	314.6	
L13	317.4	2.0	317.4	315.4	
L14	319.0	2.0	319.0	317.0	
L17	323.0	2.0	323.0	321.0	
L9	325.1	2.1	325.1	323.0	
L7	326.2	2.7	326.2	323.5	
L11	326.3	2.1	326.3	324.2	
L3	327.2	2.1	327.2	325.1	
L2	330.0	2.1	330.0	327.9	
L10	333.3	2.7	333.3	330.6	
L12	333.9	2.7	333.9	331.2	
L1	335.8	2.7	335.8	333.1	

Tabel 2.1.1. Datele pentru analiza variabilității globale a cotei acoperișului și culcușului stratului de sol din zona investigată



Fig. 2.1.1. Diagrama de variabilitate a cotelor acoperişului solului



Fig. 2.1.2. Diagrama de variabilitate a cotelor culcuşului solului

2.1.1.2. Evaluarea tipului de repartiție a frecvenței valorilor

Evaluarea tipului de repartiție a frecvenței presupune testarea caracterului normal al distribuției frecvenței valorilor ramase după eliminarea valorilor extreme.

Testarea normalității se face cu ajutorul *testului Hi-pătrat* (Scrădeanu și Popa, 2001, p. 10-12).



cotelor acoperişului stratului de sol					
Cotă [m]					
Media	314.18				
Eroarea standard	1.97				
Mediana	312.66				
Modulul	305.00				
Abaterea standard	11.15				
Dispersia	124.39				
Coef. de boltire	-0.88				
Coef de asimetrie	0.36				
Amplitudinea	38.80				
Valoarea minimă	297.00				
Valoarea maximă	335.80				
Suma	10053.82				
Nr. de valori	32.00				
Intervalul de încredere					
(95.0%)	4.02				

Tabel 2.1.2. Parametrii statistici ai cotelor acoperișului stratului de sol

Fig. 2.1.3. Histograma cotelor acoperişului stratului de sol

Distribuția frecvențelor valorilor de cotă a acoperişului/culcuşului stratului de sol se reprezintă grafic cu ajutorul **histogramei**.

Distribuția frecvențelor valorilor de cotă a *acoperișului* stratului de sol (*Fig. 2.1.3*) este cvasinormală, coeficientul de asimetrie fiind +0,36 (*Tabel 2.1.2*).

Valoarea pozitivă a coeficientului de asimetrie indică o uşoară asimetrie pozitivă.

Distribuția frecvențelor valorilor de cotă a *culcușului* stratului de sol (*Fig. 2.1.4*) este cvasinormală, coeficientul de asimetrie fiind +0,40 (*Tabel 2.1.3*).

Valoarea pozitivă a coeficientului de asimetrie indică o uşoară asimetrie pozitivă.



culcuşului stratului de sol

Testul χ^2 presupune testarea concordantei între *repartiția frecvențelor experimentale* (calculate cu ajutorul histogramei experimentale; **Fig. 2.1.3** și **Fig. 2.1.4**) ale valorilor de cotă și *repartiția frecvențelor teoretice* (calculate pe baza ecuației modelului repartiției normale) ale acelorași valori de cotă pentru un risc

asumat lpha = 5% .

Calculul *frecvențelor teoretice* ale valorilor de cotă (n_N) se realizează utilizând ecuația modelului repartiției normale:

$$n_N = \frac{n \cdot \Delta}{s \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot EXP \left[-\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{v_c - \overline{v}}{s} \right)^2 \right]$$

în care

n - numărul total al valorilor de cotă a acoperişului/culcuşului;

 Δ - mărimea intervalului de grupare a valorilor de cotă;

 v_c - valoarea centrală a fiecărui interval de grupare;

 $\overline{v}\,$ - valoarea medie a cotelor acoperişului/culcuşului;

s - abaterea standard a valorilor de cotă.

Abaterile frecvențelor experimentale de la repartiția normală se evidențiază:

- calitativ, prin reprezentarea pe acelaşi grafic a celor două tipuri de frecvenţe (*Fig. 2.1.5* şi *Fig. 2.1.6*);
- cantitativ, prin compararea valorilor celor doua statistici: $\chi^2_{exp\,erimental}$ şi $\chi^2_{teoretic}$ (*Tabel 2.1.4* şi *Tabel 2.1.5*).

După aplicarea testului de concordanță, se constată că *distribuția frecvențelor valorilor de cotă a acoperişului stratului de sol este normală* ($\chi^2_{exp} < \chi^2_{teor}$) pentru riscul asumat $\alpha = 5\%$ (*Fig. 2.1.5* și *Tabel 2.1.4*).



Fig. 2.1.5. Reprezentarea grafică a frecvențelor experimentale și teoretice ale cotelor acoperișului stratului de sol

			Frecvența	Valoarea	Frecvența
Nr. intervale	Limita	Limita	absolută	centrală a	absolută
de grupare	inferioară	superioară	experimentală	interv	teoretică
1	296	300	4	298	1.598
2	300	304	2	302	2.522
3	304	308	4	306	3.498
4	308	312	6	310	4.268
5	312	316	3	314	4.578
6	316	320	4	318	4.318
7	320	324	1	322	3.581
8	324	328	4	326	2.612
9	328	332	1	330	1.675
10	332	336	3	334	0.944
χ² expe	rimental =	12,41	χ² teo	retic = 14,0)7

Tabel 2.1.4. Aplicarea testului χ^2 pentru cotele acoperişului solului

Normalitatea distribuției frecvențelor cotelor acoperişului stratului de sol asigură reprezentativitatea valorii medii ce urmează a fi calculată.

După aplicarea testului de concordanță, se constată că *distribuția frecvențelor* cotelor culcușului stratului de sol este normală ($\chi^2_{exp} < \chi^2_{teor}$) pentru riscul asumat $\alpha = 5\%$ (Fig. 2.1.6 și Tabel 2.1.5).



Fig. 2.1.6. Reprezentarea grafică a frecvențelor experimentale și teoretice ale cotelor culcuşului stratului de sol
			Frecvența	Valoarea	Frecvența
Nr. intervale	Limita	Limita	absolută	centrală a	absolută
de grupare	inferioară	superioară	experimentală	interv	teoretică
1	296	300	5	298	1.971
2	300	304	4	302	3.015
3	304	308	4	306	4.015
4	308	312	5	310	4.653
5	312	316	4	314	4.694
6	316	320	1	318	4.121
7	320	324	3	322	3.149
8	324	328	3	326	2.095
9	328	332	2	330	1.213
10	332	336	1	334	0.611
χ^2 experimental = 8,63			χ² teo	retic = 14,0)7

Tabel 2.1.5. Aplicarea testului χ^2 pentru cotele culcuşului solului

Normalitatea distribuției frecvențelor cotelor acoperişului stratului de sol asigură reprezentativitatea valorii medii ce urmează a fi calculată.

2.1.1.3. Calculul valorii medii și a erorii de estimare

Analiza variabilității globale se încheie cu calculul valorii medii a cotei acoperişului/culcuşului stratului de sol precum şi a erorii cu care această valoare medie este estimată.

Valoarea medie se calculează ca medie aritmetică a valorilor cotelor rămase după eliminarea celei extreme:

$$\overline{v} = \frac{\sum_{i=1}^{n} v_i}{n}$$

în care

 v_i ; i = 1, 2, ..., n - valorile cotelor acoperişului/culcuşului;

n - numărul total al valorilor de cotă a acoperişului/culcuşului;

Eroarea de estimare depinde de riscul asumat, de abaterea standard şi de numărul de valori:

$$\varepsilon(\alpha) = t\left(1 - \frac{\alpha}{2}; \nu\right) \cdot \frac{s}{\sqrt{n}}$$

în care

t - variabila Student (calculată în funcție de riscul asumat și de numărul de grade de libertate);

 $lpha\,$ - riscul asumat;

v - numărul gradelor de libertate; v = k - (m+1)

k - numărul intervalelor de grupare a valorilor variabilei;

m - numărul de variabile independente care intervin în calculul frecvenței teoretice;

s - abaterea standard a valorilor de cotă;

n - numărul total al valorilor de cotă a acoperişului/culcuşului.

Intervalul de încredere a valorii medii se definește:

$$[\overline{v} - \varepsilon(\alpha); \overline{v} + \varepsilon(\alpha)]$$

Valoarea medie a cotelor acoperişului stratului de sol (Tabel 2.1.2) este:

$$\bar{v} = 314,\!18m$$

Eroarea de estimare a valorii medii calculată pentru un risc asumat de 5 % (*Tabel 2.1.2*) este:

$$\varepsilon(\alpha) = 4,02m$$

Rezultă intervalul de încredere a valorii medii a cotelor acoperişului stratului de sol pentru riscul asumat de 5 %:

Valoarea medie a cotelor culcuşului stratului de sol (Tabel 2.1.3) este:

$$\bar{v} = 312,25m$$

Eroarea de estimare a valorii medii calculată pentru un risc asumat de 5 % (*Tabel 2.1.3*) este:

$$\varepsilon(\alpha) = 3,87m$$

Rezultă intervalul de încredere a valorii medii a cotelor culcuşului stratului de sol pentru riscul asumat de 5 %:

Astfel, daca s-ar executa un nou foraj, acesta ar intercepta, cu o probabilitate de 95 %, culcuşul stratului de sol la o cotă cuprinsă în intervalul de mai sus.

NOTĂ În mod similar se analizează variabilitatea globală a cotelor acoperişului respectiv culcuşului celorlalte strate litologice traversate de foraje (*Tabel 1.1*): pietriş, nisip1, nisip argilos, nisip2 şi argilă.

2.1.2. Aplicația 2

Să se evalueze cota medie a acoperişului şi culcuşului pentru tipurile stratigrafice traversate de cele 21 de foraje executate în zona de nord-vest a municipiului Bucureşti (*Tabel 1.3*).

Rezolvare

Datele necesare pentru calculul cotelor medii sunt doar valorile cotelor celor două suprafețe care separă nivelul stratigrafic respectiv. Pentru exemplificarea metodologiei am ales cota culcuşului formațiunii de Colentina (**Tabel 2.1.6**).

_	Cotă teren	Ad. culcus F.	Cotă culcuş F. de
Foraj	[m]	de Colentina	Colentina
		[m]	[m]
1052	69.75	6.8	62.95
946	85.45	17.1	68.35
918	87.38	17.6	69.78
986	85.05	14.6	70.45
971	84.65	13.6	71.05
942	86.71	15.2	71.51
934	86.60	15	71.60
931	87.97	15.8	72.17
985	85.30	13	72.30
941	86.05	12.9	73.15
927	81.45	7.6	73.85
983	80.50	5.7	74.80
930	88.05	11.7	76.35
974	85.91	9.1	76.81
851	88.30	11	77.30
960	85.95	8.1	77.85
624A	88.80	9	79.80
673	90.10	9.1	81.00
124	90.70	9.6	81.10
131H	87.00	4.4	82.60
133	90.60	2.4	88.20

Tabel 2.1.6. Datele pentru analiza variabilității globale a cotei culcușului formațiunii de Colentina în zona investigată

Metoda de evaluare a cotei medii pentru suprafața structurală este cea a *analizei variabilității globale*. Etapele *analizei variabilității globale* sunt:

2.1.2.1. Identificarea valorilor extreme

Identificarea preliminară a valorilor extreme, suspectate de a fi eronate din cauza măsurătorilor inexacte, se face cu ajutorul *diagramei de variabilitate* (*Fig. 2.1.7*) a valorilor cotelor din *Tabelul 2.1.6*.



Fig. 2.1.7. Diagrama de variabilitate a valorilor cotelor culcuşului formaţiunii de Colentina

Diagrama de variabilitate evidențiază *valorile minimă* respectiv *maximă* ale cotelor culcuşului formațiunii de Colentina ca fiind posibil eronate. Ele vor fi eliminate din prelucrare pentru următoarele două etape ale analizei variabilității globale pentru a evita *subestimarea/supraestimarea valorii medii* a cotei culcuşului formațiunii de Colentina precum şi *subevaluarea/supraevaluarea erorilor de estimare* asociate valorii medii calculate.

Valorile extreme eliminate sunt:

- Cota minimă culcuş Formațiunea de Colentina: 62,95 m;
- Cota maximă culcuş Formațiunea de Colentina: 88,20 m.

Din analiza variabilității celor 19 valori de cotă ale culcuşului formațiunii de Colentina rămase după eliminarea celor extreme rezultă că valorile de cotă au o variație continuă de la *68,35 m* la *82,60 m*.

2.1.2.2. Evaluarea tipului de repartiție a frecvenței valorilor

Evaluarea tipului de repartiție a frecvenței presupune testarea caracterului normal al distribuției frecvenței valorilor ramase după eliminarea valorilor extreme.

Testarea normalității se face cu ajutorul *testului Hi-pătrat* (Scrădeanu și Popa, 2001, pag. 10-12).



Tabel 2.1.7. Parametrii statistici ai cotelor culcuşului formaţiunii de Colentina

Cotă [m]	
Media	74.83
Eroarea standard	0.97
Mediana	73.85
Modulul	#N/A
Abaterea standard	4.24
Dispersia	17.98
Coef. de boltire	-1.00
Coef de asimetrie	0.39
Amplitudinea	14.25
Valoarea minimă	68.35
Valoarea maximă	82.60
Suma	1421.82
Nr. de valori	19.00
Intervalul de încredere	
(90.0%)	1.69

Distribuția frecvențelor cotelor culcușului stratului de sol se reprezintă grafic cu ajutorul *histogramei*.

Distribuția frecvențelor cotelor culcușului formațiunii de Colentina (*Fig. 2.1.8*) este cvasinormală, coeficientul de asimetrie fiind +0,39 (*Tabel 2.1.7*).

Valoarea pozitivă a coeficientului de asimetrie indică o uşoară asimetrie pozitivă.

Testul χ^2 presupune testarea concordanței între *repartiția frecvențelor experimentale* (calculate cu ajutorul histogramei experimentale; **Fig. 2.1.8**) ale cotelor și *repartiția frecvențelor teoretice* (calculate pe baza ecuației modelului repartiției normale) ale acelorași cote pentru un risc asumat $\alpha = 10\%$.

Abaterile frecvențelor experimentale de la repartiția normală se evidențiază:

- calitativ, prin reprezentarea pe acelaşi grafic a celor două tipuri de frecvenţe (*Fig. 2.1.9*);
- cantitativ, prin compararea valorilor celor doua statistici: $\chi^2_{exp\,erimental}$ şi $\chi^2_{teoretic}$ (*Tabel 2.1.8*).

După aplicarea testului de concordanță, se constată că *distribuția frecvențelor valorilor de cotă a culcușului formațiunii de Colentina este normală* ($\chi^2_{exp} < \chi^2_{teor}$) pentru riscul asumat $\alpha = 10\%$ (*Fig. 2.1.9* și *Tabel 2.1.8*).



Fig. 2.1.9. Reprezentarea grafică a frecvențelor experimentale și teoretice ale cotelor culcușului formațiunii de Colentina

			Frecvența	Valoarea	Frecvența
Nr. intervale	Limita	Limita	absolută	centrală a	absolută
de grupare	inferioară	superioară	experimentală	interv	teoretică
1	68	70	2	69	1.388
2	70	72	4	71	2.376
3	72	74	4	73	3.257
4	74	76	1	75	3.573
5	76	78	4	77	3.138
6	78	80	1	79	2.206
7	80	82	2	81	1.241
8	82	84	1	83	0.559
χ^2 experimental = 5,11			χ² teo	oretic = 9,2	4

Tabel 2.1.8. Aplicarea testului χ^2 pentru cotele culcușului formațiunii de Colentina

Normalitatea distribuției frecvențelor cotelor culcuşului formațiunii de Colentina asigură reprezentativitatea valorii medii ce urmează a fi calculată.

2.1.2.3. Calculul valorii medii și a erorii de estimare

Analiza variabilității globale se încheie cu calculul valorii medii a cotei culcuşului formațiunii de Colentina precum și a erorii cu care această valoare medie este estimată.

Valoarea medie a cotelor culcuşului formaţiunii de Colentina (Tabel 2.1.7) este:

$$\bar{v} = 74,83m$$

Eroarea de estimare a valorii medii calculată pentru un risc asumat de 10 % (*Tabel 2.1.7*) este:

$$\varepsilon(\alpha) = 1,69m$$

Rezultă intervalul de încredere a valorii medii a cotelor culcuşului formaţiunii de Colentina pentru riscul asumat de 10 %:

[73,14;76,52] metri

Astfel, daca s-ar executa un nou foraj, acesta ar intercepta, cu o probabilitate de 90 %, culcuşul formaţiunii de Colentina la o cotă cuprinsă în intervalul de mai sus.

NOTĂ În mod similar se analizează variabilitatea globală a cotelor acoperişului respectiv culcuşului celorlalte niveluri stratigrafice traversate de foraje (*Tabel 1.3*).

2.2. Analiza variabilității spațiale

Analiza variabilității spațiale, a doua etapă de prelucrare geostatistică a datelor, integrează în prelucrare, pe lângă valorile variabilei investigate (v_i) care au constituit obiectul prelucrării în cadrul analizei variabilității globale, o a doua categorie de date: *coordonatele spațiale* (x_i , y_i , z_i) ale punctelor în care au fost determinate valorile acelor caracteristici.

Cele n valori v_i (i = 1...n) pe care le-am prelucrat fără a ține seama de spațiul din care provin sunt acum împrăștiate pe suprafața de pe care au fost colectate pentru a obține elementele necesare realizării hărților/secțiunilor cu distribuția lor spațială.

Analiza variabilității spațiale are ca **obiectiv** identificarea legilor de variație spațială pentru:

• valoarea variabilei - în cazul variabilității reduse;

$$v = f(x, y, z)$$

• eroarea de estimare a valorii variabilei - în cazul variabilității complexe.

$$\varepsilon = f(\alpha, \vec{d}) = f(\alpha, x, y, z)$$

În cazul variabilelor geologice cantitative cu o variabilitate semnificativă se utilizează ca lege de variație spațială *variograma*, expresie analitică a legii de variație spațială a erorilor de estimare.

2.2.1. Aplicația 3

Să se stabilească *modelul de variogramă* a suprafeței structurale determinate de cotele culcuşului pentru stratul de sol identificat prin forajele executate în structura monoclinală (*Tabel 2.1.1*).

Rezolvare

Datele necesare identificării modelului de variogramă sunt *coordonatele spațiale* ale punctelor de observație și *valorile cotelor* culcușului stratului de sol rămase după eliminarea celor extreme (*Tabel 2.2.1*).

F	X	Y	Z	Cotă culcuş sol
Foraj	[m]	[m]	[m]	[m]
FLO1	1000.0	1500.0	293.0	292.2
FLI1	2000.0	2000.0	297.0	296.2
FLI2	2500.0	2000.0	299.0	298.2
L5	492.1	983.2	301.0	299.0
FLO2	1500.0	1500.0	300.0	299.2
FLI5	2500.0	1750.0	300.0	299.2
FLI4	3000.0	2000.0	301.0	300.2
FLO11	1000.0	2000.0	305.0	302.3
FLI3	2500.0	2500.0	305.0	303.3
FLO3	2500.0	1500.0	305.0	303.5
FLO4	3500.0	1500.0	307.0	305.2
FLO5	4000.0	1500.0	309.0	307.0
FLO6	4000.0	2000.0	309.0	307.0
FLO10	1500.0	3000.0	310.0	307.6
FLO9	2000.0	3000.0	310.0	308.3
L6	997.7	492.1	311.1	309.1
FLO7	3500.0	2500.0	312.0	309.7
L15	2991.1	997.7	313.3	311.3
L8	1994.4	3525.6	313.7	311.6
L16	1994.4	521.0	315.2	313.2
L4	477.6	2514.4	316.4	314.4
FLO8	3000.0	3000.0	317.0	314.6
L13	4507.9	2485.6	317.4	315.4
L14	4507.9	997.7	319.0	317.0
L17	4002.3	521.0	323.0	321.0
L9	2991.1	3959.0	325.1	323.0
L7	1994.4	4493.5	326.2	323.5
L11	3987.9	3511.2	326.3	324.2
L3	521.0	3482.3	327.2	325.1
L2	997.7	4002.3	330.0	327.9
L10	3482.3	4507.9	333.3	330.6
L12	4493.5	4479.0	333.9	331.2
L1	492.1	4493.5	335.8	333.1

Tabel 2.2.1. Datele pentru analiza variabilității spațiale a cotelor culcușului stratului de sol din zona investigată

Etapele metodologiei de identificare a modelului variogramei sunt:

2.2.1.1. Reprezentarea grafică a datelor disponibile

Datele disponibile se pot reprezenta grafic prin: hărți punctuale, hărți simbolice și indicatoare, diagrame de continuitate și variabilitate.

Harta punctuală se realizează prin dispunerea într-un sistem de coordonate a punctelor de observație lângă care se înscriu, în funcție de densitatea acestora, valorile variabilei studiate (**Scrădeanu și Popa, 2001, p. 29-33**).

Harta punctuală a cotelor culcuşului stratului de sol (Fig. 2.2.1):

- permite localizarea valorii extreme eliminate în etapa analizei variabilităţii globale;
- evidențiază lipsa erorilor în amplasarea punctelor de observație;
- indică o distribuție relativ uniformă a punctelor de observație în zona investigată; densitatea punctelor de observație este puțin mai mare în zonele centrală și sud-estică a domeniului studiat ceea ce va conduce la obținerea unor erori mai mici în aceste zone.



Fig. 2.2.1. Harta punctuală a cotelor culcușului stratului de sol cu etichete atașate

Întrucât numărul de puncte de observație este redus, nu este necesară construirea hărții simbolice (Scrădeanu și Popa, 2001, p. 29-33).

2.2.1.2. Calculul variogramei experimentale

Estimarea legii de variabilitate spațială a erorilor de estimare se realizează cu ajutorul *variogramei experimentale* (Scrădeanu și Popa, 2001, p. 42-45).

Funcția de variogramă ($\gamma(\vec{d})$) este o funcție de distanță ce exprimă variația varianței erorii de estimare în raport cu distanța dintre punctul în care se cunoaște valoarea variabilei și cel în care se dorește estimarea ei:

$$\gamma\left(\vec{d}\right) = \frac{1}{2 \cdot N\left(\vec{d}\right)} \sum_{(i,j)} |\vec{d}_{ij} = \vec{d} \left(v_i - v_j\right)^2$$

în care

 $\gamma(ec{d})$ - valoarea variogramei calculată pentru distanța d și orientarea heta;

 \vec{d} - distanța orientată între punctul în care se cunoaște valoarea variabilei și cel în care se dorește estimarea ei;

 $N(\vec{d})$ - numărul perechilor de puncte aflate la distanța d și având orientarea θ utilizate la calculul unei valori a variogramei;

 $(i, j)_{|\vec{d}_j|=\vec{d}}$ - perechea de puncte $P_i P_j$ aflate la distanța d și având orientarea θ ; v_i , v_j - valorile variabilei măsurate în

punctele P_i , respectiv P_i .



Un exemplu de calcul al unei valori a variogramei cotelor culcuşului stratului de sol poate fi făcut în lungul râului ce traversează zona cercetată de la vest la est pentru o distanță de 1000 metri. Astfel:

$$\gamma(1000_{VE}) = \frac{1}{2 \cdot 10} \left[(309, 1 - 313, 2)^2 + ... + (330, 6 - 331, 2)^2 \right] = 12,56 \, m^2$$

În mod similar se pot calcula valorile variogramelor pe direcții și pentru distanțe diferite.

Variograma experimentală se poate calcula în mod automat utilizând programe de calcul specializate.

Variograma experimentală omnidirecțională (calculată pentru diferite distanțe și pentru o toleranță de direcție $\Delta \theta = 90^{\circ}$) reprezintă o medie a variogramelor direcționale (calculate pentru $\Delta \theta < 90^{\circ}$) și se calculează pentru a vedea dacă există sau nu o lege de variabilitate spațială care să permită estimarea valorii variabilei în orice punct al domeniului spațial cercetat.

Variograma experimentală omnidirecțională a cotelor culcuşului stratului de sol (*Fig. 2.2.2*) se construiește pe baza valorilor calculate ale variogramei (*Tabel 2.2.2*).

Existența unei corelații între valorile variogramei experimentale omnidirecționale și vectorii (\vec{d}_i) pentru care sunt calculate aceste valori indică **existența** cel puțin a unei legi de variație spațială pentru cotele culcușului stratului de sol.



Fig. 2.2.2. Variograma omnidirecțională a cotelor culcușului stratului de sol

Tabel 2.2.2. Datele ce stau la baza realizării graficului variogramei omnidirecționale

			-
Nr.	d	γ(d)	N(d)
valori	[m]	[m²]	[-]
1	250.00	4.87	2
2	500.00	12.05	9
3	547.90	3.48	3
4	706.53	20.64	21
5	733.19	28.32	5
6	898.45	73.21	1
7	993.45	42.33	18
8	1018.55	13.29	5
9	1117.55	53.34	40
10	1250.00	55.13	1
11	1340.51	86.00	3
12	1410.52	72.75	14
13	1491.45	61.57	16
14	1563.43	65.83	33
15	1595.78	57.50	8
16	1787.54	129.52	10

2.2.1.3. Studiul anizotropiei structurii spațiale

Studiul anizotropiei structurii spațiale este impus de necesitatea de a ști dacă legea de variabilitate spațială identificată cu ajutorul variogramei omnidirecționale este aceeași pentru orice direcție. Cu alte cuvinte, studiul anizotropiei este necesar pentru a ști dacă structura este izotropă sau anizotropă.

În cazul structurilor anizotrope, identificarea direcțiilor de anizotropie se face prin calculul **variogramelor experimentale direcționale** (toleranță unghiulară $\Delta \theta < 90^{\circ}$) cu ajutorul cărora se construieste **variograma de suprafată**.

Variograma de suprafață reprezintă harta conturală a variogramelor experimentale direcționale; ea permite calculul *parametrilor de anizotropie*:

• raportul de anizotropie: $\eta = -\frac{r}{2}$

$$=\frac{\Lambda}{r}$$

• orientarea direcției de continuitate maximă: heta .

în care

R, r - razele elipsei de anizotropie.

Calculul variogramelor experimentale direcționale pentru cotele culcuşului stratului de sol (*Tabel 2.2.3*) s-a făcut pe patru direcții: N-S, V-E, NNV-SSE şi VSV-ENE cu o toleranță de direcție aleasă $\Lambda \theta = 30^{\circ}$.

Constatăm că valorile variogramei pe cele patru direcții variază în mod diferit (*Fig. 2.2.3*) ceea ce ne permite să afirmăm că structura spațială investigată este *anizotropă*; cotele culcuşului stratului de sol variază mai mult (mai rapid) pe direcția NNV-SSE și mai puțin (mai lent) pe direcția V-E.



Fig. 2.2.3. Variogramele direcționale ale cotelor culcușului stratului de sol

Direcția	d	γ(d)	N(d)	Direcția	d	γ(d)	N(d)
de calcul	[m]	[m ²]	[-]	de calcul	[m]	[m ²]	[-]
	250.00	4.87	2		500.00	6.07	5
	500.00	19.51	4		559.02	2.50	2
	525.66	5.45	1		999.64	13.64	8
	750.00	8.41	1	VE	1020.29	8.61	4
	988.50	65.28	10	V-C	1115.68	34.72	20
N-S	1011.59	32.00	1		1495.54	38.00	8
	1119.42	71.96	20		1561.77	34.75	18
	1340.51	86.00	3		1594.41	66.74	5
	1494.08	80.80	7		250.00	4.87	2
	1565.41	103.13	15		500.00	19.51	4
	1596.69	45.53	2		525.66	5.45	1
	559.02	0.50	1		706.94	20.17	11
	706.07	21.15	10		741.58	40.81	2
	727.59	20.00	3		898.45	73.21	1
	997.16	8.40	1		986.56	55.87	7
	1116.08	22.96	10	NNV-SSE	1011.59	32.00	1
VSV-ENE	1250.00	55.13	1		1122.03	85.36	12
	1409.69	54.89	7		1346.29	41.41	1
	1481.01	58.17	2		1411.35	90.61	7
	1563.87	24.45	7		1485.31	85.59	6
	1590.63	55.92	3		1557.53	96.18	7
	1787.70	105.88	6		1604.00	62.53	2
					1787.30	164.99	4

Tabel 2.2.3. Valorile variogramelor experimentale calculate pe cele patru direcții

Cu ajutorul celor patru variograme experimentale direcționale am construit variograma de suprafață a cotelor culcuşului stratului de sol (*Fig. 2.2.4*).

Calculul parametrilor de anizotropie se face urmând succesiunea de paşi:

- se identifică izovariograma care îndeplinește trei condiții:
 - o este un contur închis;
 - are centrul de simetrie în originea sistemului de coordonate în care este reprezentată variograma de suprafaţă;
 - o are extinderea cea mai mare.
- peste izovariograma cu caracteristicile de mai sus se suprapune o elipsă (elipsa de anizotropie); axa mare a elipsei indică direcţia de continuitate maximă iar axa mică indică direcţia de continuitate minimă;
- se calculează semiaxele mare și mică ale elipsei (*Tabel 2.2.4*), semiaxe care corespund razelor mare (*R*), respectiv mică (*r*);
- se calculează orientarea direcției de continuitate maximă (θ).



Fig. 2.2.4. Variograma de suprafață a cotelor culcușului stratului de sol

În final se obțin *parametrii de anizotropie*:

• raportul de anizotropie:

$$\eta = \frac{R}{r} = \frac{2200,75}{774,48} = 2,84$$

• orientarea direcției de continuitate maximă:

$$\theta = \arctan\left(\frac{y_A}{x_B}\right) = 5,33^\circ$$

 Tabel 2.2.4.
 Datele necesare calculului

 parametrilor de anizotropie

Punct	X [m]	Y [m]
0	0	0
А	2191.21	204.67
В	2191.21	0.00
С	-156.52	758.50

Direcția de continuitate maximă (variabilitate minimă) a cotelor culcușului stratului de sol în domeniul cercetat este aproximativ V - E; $\theta \cong 5^0$. Constatăm că direcția de continuitate maximă coincide cu direcția de curgere a râului din sudul zonei cercetate.

2.2.1.4. Modelarea variogramei experimentale

Modelarea variogramei experimentale implică identificarea unui model analitic care să interpoleze cât mai bine valorile variogramei experimentale (Scrădeanu și Popa, 2001, p. 78-86).

Într-o primă etapă se *alege* un model elementar (sferic, exponențial, gaussian, putere, logaritmic etc.) și se modifică succesiv parametrii acestuia până când se reuşeşte cea mai bună interpolare a valorilor variogramei experimentale omnidirecționale.

ATENȚIE! La modelarea variogramei experimentale vom ține cont de anizotropia structurii prin introducerea, în etapa de calare a modelului, a parametrilor de anizotropie.



Fig. 2.2.5. Modelul de variogramă a cotelor culcușului stratului de sol

Dacă se consideră că sunt multe modele potrivite mai pentru variograma experimentală omnidirectională, se modelează variograma cu acele n modele si, într-o a doua etapă, ele se validează urmând a se alege modelul optim. modelului Validarea de variogramă reprezintă verificarea acestuia pe baza valorilor măsurate în punctele de observatie disponibile. Modelul este acela optim care minimizează diferenta dintre valoarea calculată cu ajutorul modelului și valoarea măsurată în punctul de observație.

În cazul cotelor culcuşului stratului de sol, modelul optim de variogramă identificat (*Fig. 2.2.5*) este *modelul exponențial* cu parametrii:

- palier: 80 m²;
- rază de influență: R = 1200 m.

Modelul exponențial este un model cu palier ceea ce indică prezența unei structuri simple staționare. Ecuația modelului exponențial este:

$$\widetilde{\gamma}\left(\vec{d}\right) = 1 - EXP\left(-\frac{d}{R}\right)$$

Legea de variabilitate spațială a erorii de estimare (modelul de variogramă) va sta la baza estimării valorilor de cotă a culcuşului stratului de sol în orice punct al domeniului analizat precum și a estimării erorilor cu care vor fi calculate aceste valori de cotă.

NOTĂ În mod similar se analizează variabilitatea spațială a cotelor acoperişului respectiv culcuşului celorlalte strate traversate de forajele de investigare (*Tabel* **1.1.**).

2.2.2. Aplicația 4

Să se stabilească *modelul variogramei* cotelor culcuşului formațiunii de Colentina din zona de nord-vest a municipiului Bucureşti investigată prin 21 de foraje (*Tabel 2.2.5*).

Rezolvare

Datele necesare identificării modelului de variogramă sunt *coordonatele spațiale* ale punctelor de observație și *valorile cotelor* culcușului formațiunii de Colentina după eliminarea celor extreme (**Tabelul 2.2.5**).

Tabelul 2.2.5. Datele pentru analiza variabilității spațiale a cotelor culcușului formațiunii de Colentina din zona investigată

	x	v	7	Cotă culcuş F. de
Foraj	[m]	[m]	[m]	Colentina
	[]	[]	[]	[m]
1052	583397.3	328776.2	69.75	62.95
946	589440.6	333023.3	85.45	68.35
918	587976.1	331861.3	87.38	69.78
986	588738.8	332643.2	85.05	70.45
971	588695.9	332550.1	84.65	71.05
942	588718.0	332550.4	86.71	71.51
934	589200.0	332980.0	86.60	71.60
931	587801.4	331704.6	87.97	72.17
985	589353.1	332960.3	85.30	72.30
941	587008.1	331539.6	86.05	73.15
927	588216.2	332080.5	81.45	73.85
983	589061.0	330902.0	80.50	74.80
930	588009.8	331900.0	88.05	76.35
974	589068.5	332771.2	85.91	76.81
851	587020.0	332515.0	88.30	77.30
960	588936.8	332707.7	85.95	77.85
624A	585431.0	332788.0	88.80	79.80
673	586106.8	332854.8	90.10	81.00
124	581465.1	327256.9	90.70	81.10
131H	584155.0	330020.5	87.00	82.60
133	582357.7	328824.6	90.60	88.20

Etapele stabilirii modelului de variogramă sunt:

2.2.2.1. Reprezentarea grafică a datelor disponibile

Datele disponibile se pot reprezenta grafic prin: hărți punctuale, hărți simbolice și indicatoare, diagrame de continuitate și variabilitate.

Harta punctuală a cotelor culcuşului formațiunii de Colentina (Fig. 2.2.6):

- permite localizarea valorilor extreme eliminate în etapa analizei variabilităţii globale;
- evidențiază lipsa erorilor în amplasarea punctelor de observație;
- indică o distribuţie neuniformă a punctelor de observaţie în zona investigată; punctele de observaţie, puţine la număr, sunt grupate aproape exclusiv în nord-estul zonei investigate. În zonele în care punctele de investigaţie lipsesc, erorile de estimare asociate distribuţiei cotelor culcuşului formaţiunii de Colentina vor fi maxime. Numărul mic şi distribuţia neuniformă a punctelor de observaţie pe suprafaţa investigată poate conduce chiar la imposibilitatea identificării unei legi de variabilitate spaţială care să permită estimarea cotelor culcuşului formaţiunii de Colentina în orice punct din domeniului spaţial investigat.



X [m]

Fig. 2.2.6. Harta punctuală a cotelor culcuşului formațiunii de Colentina cu etichete atașate

2.2.2.2. Calculul variogramei experimentale

Estimarea legii de variabilitate spațială a erorilor de estimare se realizează cu ajutorul *variogramei experimentale* (Scrădeanu și Popa, 2001, p. 42-45).

Variograma experimentală omnidirecțională a cotelor culcuşului formațiunii de Colentina (*Fig. 2.2.7*) se construiește pe baza valorilor calculate ale variogramei (*Tabel 2.2.6*).

Variograma experimentală omnidirecțională indică inexistența unei corelații între valorile variogramei și vectorii (\vec{d}_i) pentru care sunt calculate aceste valori. Implicit, ea indică **inexistența** unei legi de variație spațială pentru cotele culcușului formațiunii de Colentina.



Fig. 2.2.7. Variograma omnidirecțională a cotelor culcușului formațiunii de Colentina

Tabel 2.2.6. Datele ce stau la baza realizării graficului variogramei omnidirecționale

Nr.	d	γ(d)	N(d)
valori	[m]	[m²]	[-]
1	75.78	6.05	5
2	205.79	8.31	6
3	314.56	14.16	8
4	445.99	20.46	4
5	575.14	15.73	3
6	695.14	1.92	8
7	825.82	2.42	5
8	980.12	7.15	8
9	1084.15	8.06	5
10	1217.30	6.11	6
11	1326.95	7.38	5
12	1459.37	8.54	7
13	1612.28	12.13	6
14	1714.26	11.63	8
15	1852.13	7.97	5
16	1977.52	5.16	5
17	2098.14	15.42	10
18	2243.65	17.62	3
19	2387.85	9.60	2
20	2473.42	40.05	1
21	2617.85	30.60	6
22	2725.92	18.84	3
23	2852.27	11.39	3
24	3005.20	6.35	2
25	3095.76	44.18	1

Există, totuși, posibilitatea ca pe o anumită direcție să existe o lege de variație spațială. Această posibilitate impune calculul variogramelor experimentale direcționale pe diferite direcții. Valorile calculate ale variogramelor experimentale

direcționale pe cele patru direcții principale (V-E, N-S, NE-SV, NV-SE) cu o toleranță de direcție $\Delta \theta = 30^{\circ}$ (*Tabel 2.2.7*) sunt reprezentate grafic în *Fig. 2.2.8*.

Direcția	d	γ(d)	N(d)	Direcția	d	γ(d)	N(d)
de calcul	[m]	[m ²]	[-]	de calcul	[m]	[m ²]	[-]
	974.41	6.85	1		98.83	0.37	2
	1125.80	13.16	1		975.51	8.61	1
	1198.72	11.56	3	NS	1714.17	7.30	З
	1460.32	4.43	4	N-3	1839.59	3.34	2
	1594.48	30.81	1		2105.53	9.68	3
INV-3L	2011.44	22.11	1		3047.47	3.92	1
	2110.96	28.53	4		87.23	9.85	3
	2247.07	25.56	1		208.96	11.09	4
	2603.86	16.12	2		314.56	14.16	8
	2717.97	28.08	2		445.99	20.46	4
	22.11	0.11	1		575.14	15.73	3
	188.33	8.36	4		697.43	2.09	7
	353.66	20.22	1		829.70	2.91	4
	685.20	1.22	2		981.84	6.96	6
	804.22	1.34	2		1073.74	6.78	4
	997.22	6.26	2		1235.87	0.66	3
	1064.54	5.12	1		1326.95	7.38	5
	1272.68	5.95	1	NE-SV	1458.11	14.01	3
	1323.70	0.25	1		1616.73	9.71	4
	1612.28	3.13	1		1736.63	5.69	2
V-E	1699.43	19.92	3		1860.49	11.06	3
	1926.43	0.15	1		1983.24	1.19	3
	2115.04	18.81	4		2078.24	5.47	2
	2238.06	20.90	2		2254.84	11.05	1
	2375.25	12.50	1		2400.45	6.70	1
	2473.42	40.05	1		2622.83	1.20	1
	2620.70	44.82	4		2741.84	0.36	1
	2717.97	28.08	2		2849.33	11.52	1
	2853.74	11.33	2		3047.47	3.92	1
	2962.92	8.78	1				
	3095.76	44.18	1				

Tabel 2.2.7. Valorile variogramelor experimentale calculate pe cele patru direcții

Constatăm că variația valorilor variogramei pe cele patru direcții este aleatoare, neexistând nici o corelație între valori și vectorii ($\vec{d_i}$) pentru care ele sunt calculate.



de Colentina

În această situație, prelucrările geostatistice nu mai pot continua. Concluzia etapei de analiză a variabilității spațiale este aceea că datele disponibile nu ne permit înțelegerea modului în care variază cotele culcuşului formațiunii de Colentina; pe baza datelor disponibile, această variabilitate pare să fie aleatoare. Se recomandă creșterea gradului de cunoaștere a zonei prin completarea bazei de date cu informații suplimentare cât mai uniform distribuite și reluarea metodologiei de prelucrare.

Variabilitatea cotelor formațiunii de Colentina în zona de nord-vest a municipiului București poate fi caracterizată (doar) la nivel global, singurele rezultate obținute fiind cele rezultate la finalul etapei de analiză a variabilității globale:

- valoarea medie a cotelor culcuşului este $\overline{v} = 74,83m$;
- eroarea de estimare a valorii medii calculată pentru un risc asumat de 10 % este $\varepsilon(\alpha) = 1.69m$.

NOTĂ În mod similar se analizează variabilitatea spațială a cotelor acoperișului respectiv culcușului celorlalte niveluri stratigrafice traversate de foraje (*Tabel 1.3*).

2.3. Evaluarea distribuției spațiale

Estimarea distribuției spațiale a variabilei investigate are ca *obiectiv* calculul valorilor variabilei în orice punct din domeniul investigat.

Datele necesare pentru atingerea obiectivului sunt:

- valorile variabilei;
- coordonatele spaţiale ale punctelor în care au fost determinate valorile variabilei;
- legea de variație spațială (modelul de variogramă);
- parametrii de anizotropie.

Estimarea punctuală a distribuției spațiale a valorilor variabilei se face prin kriging punctual ordinar.

Kriging-ul este metoda topo-probabilistă care constă în găsirea celei mai bune estimări lineare posibile a valorii medii într-un punct pe baza valorilor disponibile din vecinătatea acestuia (**Scrădeanu şi Popa, 2001, p. 121-134**). Kriging-ul realizează o *ponderare* a valorilor măsurate în așa fel încât varianța de estimare rezultată să fie minimă, ținând seama de geometria punctelor de investigare și de variabilitatea spațială. Kriging-ul atribuie *ponderi mari* valorilor *apropiate* de punctul în care se dorește estimarea valorii variabilei și *ponderi mici* valorilor *îndepărtate*. La calculul ponderilor este utilizat modelul matematic al variogramei.

$$v_0^* = \sum_{i=1}^n w_i v_i$$
 (2.3.1.)

în care

 v_0^* – valoarea estimată a variabilei într-un punct oarecare P_0 ;

 v_i – valorile cunoscute ale variabilei în punctele $P_i(i = 1, 2, ..., n)$;

 w_i – ponderile acordate fiecărei valori măsurate.

Estimarea valorilor variabilei se poate realiza pentru *orice punct* din domeniul investigat însă, din considerente practice, se obișnuiește ca valorile variabilei să fie calculate în *nodurile unei rețele regulate* plasată pe domeniul cercetat. *Geometria rețelei de calcul* se stabilește în funcție de *densitatea punctelor de investigare* și de gradul de detaliere dorit.

Estimarea distribuției spațiale se concretizează în *hărți* la diferite niveluri de cotă și *secțiuni* pe diferite direcții.

2.3.1. Aplicația 5

Să se evalueze distribuția spațială a cotelor culcuşului stratului de sol în structura monoclinală investigată și să se reprezinte grafic.

Rezolvare

Datele necesare pentru estimarea distribuției spațiale a cotelor culcușului stratului de sol sunt:

- cotele culcuşului stratului de sol măsurate în punctele de observaţie (*Tabel* 2.2.1);
- coordonatele spațiale ale celor 32 de foraje în care au fost măsurate cotele culcuşului stratului de sol (*Tabel 2.2.1*);
- legea de variație spațială (modelul exponențial cu parametrii: palier: 80 m^2 și rază de influență: R = 1200 m; *Fig. 2.2.5*).
- parametrii de anizotropie: raportul de anizotropie $\eta = 2,84$ și orientarea directiei de continuitate maximă $\theta = 5.33^{\circ}$.

Estimarea distribuției spațiale a cotelor culcușului stratului de sol se realizează prin kriging punctual ordinar (deoarece structura este staționară, modelul de variogramă fiind cu palier).

Etapele ce trebuie parcurse pentru atingerea obiectivului sunt:

2.3.1.1. Dimensionarea rețelei de discretizare

Pe suprafața de 25 km² a domeniului investigat (*Fig. 1.1*) se suprapune o *rețea regulată de discretizare*. Geometria acestei rețele depinde de:

- densitatea punctelor de observație Dacă dispunem de multe puncte de observație distribuite uniform pe suprafața investigată putem alege o rețea deasă. Va rezulta un număr mare de noduri ale rețelei în care vor fi calculate valorile de cotă. Erorile cu care vor fi estimate valorile cotelor vor fi mici.
- gradul de detaliere Dacă dorim un grad mare de detaliere (dorim să estimăm valori ale cotelor culcuşului stratului de sol în cât mai multe puncte din zona investigată) şi densitatea punctelor de observaţie este mare, putem opta pentru o reţea deasă de calcul. Deşi ne-am putea dori un grad mare de detaliere, este inutilă alegerea unei reţele fine de calcul dacă dispunem de puţine valori măsurate. Această alegere ar conduce pe de o parte la creşterea erorilor de estimare a valorilor cotelor şi pe de alta la suprasolicitarea resurselor computerului cu care se fac prelucrările.

Pentru zona investigată utilizăm o rețea de discretizare regulată pătratică (**Fig. 2.3.1**) cu dimensiunea celulei de 100 x 100 metri ($\Delta x = \Delta y = 100m$). Vor rezulta 2601 puncte de calcul (nodurile rețelei) distribuite pe 51 de linii și 51 de coloane.



2.3.1.2. Calculul valorilor cotelor

Calculul valorilor cotelor culcuşului stratului de sol are la bază *ecuația (2.3.1)* și se va face în fiecare dintre cele 2601 noduri ale rețelei de discretizare.

Prin interpolarea lineară a valorilor calculate în nodurile rețelei de discretizare va rezulta harta cu distribuția cotelor culcușului stratului de sol în zona investigată.

Reprezentarea grafică a distribuției cotelor culcuşului stratului de sol se realizează sub forma unei **hărți conturale** (hartă cu izolinii) a valorilor (**Fig. 2.3.2**).

Valorile calculate ale cotelor culcuşului stratului de sol variază între 292 m şi 334 m. Valorile minime se regăsesc în zona central-vestică a domeniului cercetat iar cele maxime în nordul acestui domeniu.



Suprafața cu cotele estimate ale culcușului stratului de sol poate fi reprezentată și tridimensional (*Fig. 2.3.3*).



Fig. 2.3.3. Reprezentarea 3D a suprafeței calculate a culcușului stratului de sol

NOTĂ În mod similar se analizează distribuția spațială a cotelor acoperişului respectiv culcuşului celorlalte strate traversate de forajele de investigare (*Tabel* **1.1**).

2.4. Evaluarea erorilor de estimare

Evaluarea distribuției spațiale a erorilor are ca *obiectiv* calculul în orice punct din domeniul cercetat al erorilor de estimare asociate valorilor calculate ale variabilei.

Estimarea distribuției spațiale a unei variabile este afectată în mod evident de erori, dată fiind variabilitatea spațială foarte mare a caracteristicilor geologice. Această estimare nu ar fi afectată de erori doar în cazul, ideal, în care am dispune de măsurători în toate punctele domeniului spațial în care se realizează studiul.

Mărimea erorii de estimare este influenţată de mai mulţi factori (**Scrădeanu şi Popa, 2001, p. 176-178**): numărul valorilor utilizate pentru estimare, dispunerea spaţială a punctelor de observaţie din vecinătatea zonei de investigare, natura variabilităţii caracteristicii studiate (tipul modelului de variogramă) şi dimensiunea suportului estimării.

Eroarea de estimare este definită de relația:

$$\mathcal{E}_i = v_i^* - v_i$$

în care

 v_i^* - valoarea estimată a variabilei într-un punct oarecare $P_i(i=1,2,...,n)$;

 v_i - valoarea reală a variabilei în punctul de estimare P_i .

Astfel definită, eroarea reală nu poate fi calculată pentru că nu se cunoaște valoarea reală v_i în punctul de estimare. De aceea eroarea de estimare se calculează (prin kriging) cu ajutorul *abaterii standard a erorii de estimare (Kriging Standard Deviation*):

$$\varepsilon_i(\alpha) = 2 \cdot KSD \tag{2.4.1.}$$

în care

 α - riscul asumat;

KSD - abaterea standard a valorii evaluate prin kriging.

Kriging-ul este singura metodă care permite calculul abaterii standard a erorii de estimare și, implicit, a erorii de estimare asociată valorii calculate a variabilei.

2.4.1. Aplicația 6

Să se evalueze distribuția spațială a erorilor de estimare asociate valorilor cotelor culcuşului stratului de sol din structura monoclinală investigată și să se reprezinte grafic.

Rezolvare

Estimarea distribuției spațiale a erorilor are ca *obiectiv* calculul în orice punct din domeniul cercetat al erorilor de estimare asociate valorilor calculate ale cotelor culcuşului stratului de sol din structura monoclinală.

Datele necesare pentru estimarea distribuției spațiale a erorilor de estimare asociate valorilor calculate ale cotelor culcuşului stratului de sol sunt:

- cotele culcuşului stratului de sol măsurate în punctele de observaţie (*Tabel* 2.2.1);
- coordonatele spațiale ale celor 32 de foraje în care au fost măsurate cotele culcuşului stratului de sol (*Tabel 2.2.1*);
- legea de variație spațială (modelul exponențial cu parametrii: palier: 80 m^2 și rază de influență: R = 1200 m; *Fig. 2.2.5*).
- parametrii de anizotropie: raportul de anizotropie $\eta = 2,84$ și orientarea direcției de continuitate maximă $\theta = 5.33^{\circ}$.

Etapele ce trebuie parcurse pentru atingerea obiectivului sunt:

2.4.1.1. Calculul abaterilor standard ale erorii de estimare

Calculul *abaterilor standard ale erorii de estimare (KSD*) se face în aceleași noduri (cele 2601) ale rețelei de discretizare alese la estimarea valorilor de cotă a culcușului stratului de sol. Metoda utilizată pentru calcul este *kriging-ul punctual ordinar*.

Calculul valorilor KSD se face automat cu ajutorul unor programe specializate prin rezolvarea sistemelor de kriging (**Scrădeanu și Popa, 2001, p. 127-128**).

2.4.1.2. Calculul erorilor de estimare

Calculul *erorilor de estimare* asociate valorilor calculate ale cotelor culcuşului stratului de sol se face utilizând *ecuația (2.4.1)*. Prin interpolarea lineară a erorilor de estimare obținute va rezulta harta cu distribuția erorilor de estimare asociate valorilor calculate ale cotelor culcuşului stratului de sol în zona investigată.

Reprezentarea grafică a distribuției erorilor de estimare a cotelor culcuşului stratului de sol se realizează sub forma unei **hărți conturale** (hartă cu izolinii) a erorilor (*Fig. 2.4.1*).

Valorile calculate ale erorilor variază între 0 m și 20 m. Valorile sunt minime și mici pe poziția, respectiv în apropierea forajelor de investigare (acolo unde dispunem de valori măsurate). Pe măsură ce ne îndepărtăm de punctele de observație erorile cresc ajungând să fie maxime în zonele în care nu dispunem de informații (zonele albe din hartă).



Fig. 2.4.1. Harta cu izolinii a erorilor de estimare asociate valorilor calculate ale cotelor culcuşului stratului de sol

Suprapunerea hărților cu **distribuția valorilor de cotă** a culcuşului stratului de sol și **distribuția erorilor** cu care aceste valori au fost estimate (**Fig. 2.4.2**) permite extragerea rapidă, în orice punct din domeniul investigat, a valorii **cotei** culcuşului stratului de sol și a **erorii** cu care ea a fost estimată. **Exemplu**: în punctul **A** (600; 2600) valoarea estimată a cotei culcuşului stratului de sol, pentru un risc asumat $\alpha = 5\%$ este:

$$v_A = 312m \pm \varepsilon(\alpha) = 312m \pm 10m$$



sol și a erorilor de estimare a acestora

NOTĂ În mod similar se analizează distribuția spațială a erorilor de estimare asociate cotelor calculate ale acoperișului respectiv culcușului celorlalte strate traversate de forajele de investigare (*Tabel 1.1*).

3. MODELAREA STATISTICĂ A STRUCTURILOR PARAMETRICE

Modelarea statistică a structurilor parametrice se finalizează în două tipuri de modele: modele 2D și modele 3D.

Etapele modelării statistice a structurilor parametrice în cadrul structurilor modelelor 2d și 3d ale structurii geologice sunt:

- Analiza variabilității globale;
- Analiza variabilității spațiale;
- Evaluarea distribuției spațiale;
- Evaluarea erorilor de estimare.

3.1. Analiza variabilității globale

Analiza variabilității globale a caracteristicilor geologice cantitative vizează asigurarea *reprezentativității* evaluărilor și se realizează prin:

- analiza modului de distribuție a valorilor prelucrate;
- analiza eterogeneității selecției de date;
- analiza valorilor extreme ale selecțiilor de date.

3.1.1. Aplicația 7

Să se evalueze conținutul mediu în zinc din stratul de nisip 1 investigat într-o structură locală prin 33 foraje cu adâncimea maximă de 100 m.

Rezolvare

Datele necesare pentru calculul conținutului mediu în zinc sunt doar valorile conținutului în zinc din stratul de nisip 1 (Zn N1) (**Tabel 3.1.1**).

Metoda de evaluare a conținutului mediu în zinc din stratul de nisip 1 este cea a *analizei variabilității globale*.

Etapele *analizei variabilității globale* sunt:

3.1.1.1. Identificarea valorilor extreme

Identificarea preliminară a valorilor extreme, suspectate de a fi eronate din cauza măsurătorilor inexacte, se face cu ajutorul *diagramei de variabilitate* (*Fig.*

3.1.1) a valorilor conținutului în zinc din **Tabelul 3.1.1**. Pentru realizarea diagramei de variabilitate se recomandă sortarea valorilor conținutului în zinc.

Tabel 3.1.1. Datele pentru
analiza variabilității
alabala a 7n N1

	Zn N1			
Foraj	[ppm]			
L12	19.0			
L10	23.0			
L11	28.0			
L7	32.0			
L5	35.0			
L6	38.0			
L9	39.0			
L13	40.0			
FLO8	44.4			
FLO11	45.0			
FLO9	45.0			
FLO10	45.3			
L8	47.0			
FLO7	48.0			
L2	51.0			
L1	54.0			
L3	54.0			
L4	57.0			
L17	58.0			
FLO2	60.0			
FLO1	63.0			
L16	65.0			
FLO5	66.0			
FLO6	66.0			
L14	66.0			
FLO4	71.0			
FLO3	73.0			
FLI1	75.0			
FLI2	75.0			
FLI3	76.5			
FLI5	76.5			
FLI4	78.0			
L15	85.0			

Diagrama de variabilitate (Fig. 3.1.1) evidențiază valoarea maximă a conținutului în zinc din stratul de nisip 1 ca fiind posibil eronată. Ea va fi eliminată din prelucrare pentru următoarele două etape ale analizei variabilității globale pentru a evita supraestimarea valorii medii a conținutului în zinc precum și supraevaluarea erorilor de estimare asociate valorii medii calculate.

Valoarea extremă eliminată este: 85,0 ppm.

Din analiza variabilității celor 32 de valori ale conținutului în zinc rămase după eliminarea celei extreme rezultă că valorile conținutului în zinc din stratul de nisip 1 au o variație continuă de la 19,0 ppm la 78,0 ppm.



Fig. 3.1.1. Diagrama de variabilitate a conținutului în zinc din stratul de nisip 1

3.1.1.2. Evaluarea tipului de repartiție a frecvenței valorilor

Evaluarea tipului de repartitie a frecvenței presupune testarea caracterului normal al distributiei frecventei valorilor rămase după eliminarea valorilor extreme.

Testarea normalității se face cu ajutorul testului Hi-pătrat (Scrădeanu și Popa, 2001, p. 10-12).

53.55

2.95

54.00

66.00

16.67

277.97

-0.84

-0.26

59.00

19.00

78.00

32.00

5.00

1713.70



Fig. 3.1.2. Histograma valorilor continutului în zinc din stratul de nisip 1

Distribuția frecvențelor valorilor conținutului în zinc din stratul de nisip 1 se reprezintă grafic cu ajutorul *histogramei*.

Distribuția frecvențelor conținutului în zinc (Fig. 3.1.2) este cvasinormală, coeficientul de asimetrie fiind -0,26 (Tabel 3.1.2).

Valoarea negativă a coeficientului de asimetrie indică o ușoară asimetrie negativă.

Testul χ^2 presupune testarea concordanței între *repartiția frecvențelor* experimentale (calculate cu ajutorul histogramei experimentale; Fig. 3.1.2) ale valorilor conținutului în zinc și repartiția frecvențelor teoretice (calculate pe baza ecuației modelului repartiției normale) ale acelorași valori ale conținutului în zinc pentru un risc asumat $\alpha = 10\%$.

Abaterile frecvențelor experimentale de la repartiția normală se evidențiază:

- calitativ, prin reprezentarea pe același grafic a celor două tipuri de frecvențe (*Fig. 3.1.3*);
- cantitativ, prin compararea valorilor statisticilor: $\chi^2_{exp\,erimental}$ şi $\chi^2_{teoretic}$ (**Tabel 3.1.3**).

După aplicarea testului de concordanță, se constată că **distribuția frecvențelor conținutului în zinc din stratul de nisip 1 este normală** ($\chi^2_{exp} < \chi^2_{teor}$) pentru riscul asumat $\alpha = 10\%$ (**Fig. 3.1.3** și **Tabel 3.1.3**).



Fig. 3.1.3. Reprezentarea grafică a frecvențelor experimentale și teoretice ale conținutului în zinc din stratul de nisip 1

Tabel 3.1.3. Aplicarea testului	χ^2	pentru conținut	tul în ziı	nc din st	tratul de r	nisip 1
---------------------------------	----------	-----------------	------------	-----------	-------------	---------

				Valoarea	Frecvența
Nr. intervale	Limita	Limita	Frecvența absolută	centrală a	absolută
de grupare	inferioară	superioară	experimentală	interv	teoretică
1	18	28	3	23	1.428
2	28	38	3	33	3.581
3	38	48	8	43	6.267
4	48	58	5	53	7.653
5	58	68	6	63	6.521
6	68	78	7	73	3.878
χ² expe	erimental =	5,78	χ² teo	retic = 6,25	

Normalitatea distribuției frecvențelor conținutului în zinc din stratul de nisip 1 asigură reprezentativitatea valorii medii ce urmează a fi calculată.

3.1.1.3. Calculul valorii medii și a erorii de estimare

Analiza variabilității globale se încheie cu calculul valorii medii a conținutului în zinc din stratul de nisip 1 precum și a erorii cu care această valoare medie este estimată.

Valoarea medie se calculează ca medie aritmetică a valorilor conținutului în zinc rămase după eliminarea celei extreme.

Eroarea de estimare depinde de riscul asumat, de abaterea standard şi de numărul de valori.

Valoarea medie a conținutului în zinc din stratul de nisip 1 (Tabel 3.1.2) este:

$$\bar{v} = 53,55 \, ppm$$

Eroarea de estimare a valorii medii calculată pentru un risc asumat de 10 % (*Tabel 3.1.2*) este:

$$\varepsilon(\alpha) = 5,00 \, ppm$$

Rezultă intervalul de încredere a valorii medii a conținutului în zinc pentru riscul asumat de 10 %:

NOTĂ În mod similar se analizează variabilitatea globală a conținutului în zinc din celelalte strate litologice traversate de foraje (*Tabel 1.2*): sol, pietriş, nisip argilos, nisip2 şi argilă.

3.2. Analiza variabilității spațiale

Analiza variabilității spațiale integrează în prelucrare, pe lângă valorile variabilei investigate (v_i), coordonatele spațiale (x_i , y_i , z_i) ale punctelor în care au fost determinate valorile acelor caracteristici.

Analiza variabilității spațiale are ca obiectiv identificarea legilor de variație spațială pentru valoarea variabilei (în cazul variabilității reduse) sau pentru eroarea de estimare a valorii variabilei (în cazul variabilității complexe).

În cazul variabilelor geologice cantitative cu o variabilitate semnificativă se utilizează ca lege de variație spațială *variograma*, expresie analitică a legii de variație spațială a erorilor de estimare.

3.2.1. Aplicația 8

Să se stabilească *modelul de variogramă* a conținutului în zinc din stratul de nisip 1 interceptat de forajele executate în structura monoclinală (*Tabel 3.1.1*).

Rezolvare

Datele necesare identificării modelului de variogramă sunt *coordonatele spațiale* ale punctelor de observație și *valorile conținutului în zinc* din stratul de nisip 1 rămase după eliminarea celei extreme (*Tabelul 3.2.1*).

conținutului în zinc din stratul de hisip 1 din zond investigată						
Foraj	X [m]	Y [m]	Z [m]	Zn N1 [ppm]		
L12	4493.5	4479.0	333.9	19.00		
L10	3482.3	4507.9	333.3	23.00		
L11	3987.9	3511.2	326.3	28.00		
L7	1994.4	4493.5	326.2	32.00		
L5	492.1	983.2	301.0	35.00		
L6	997.7	492.1	311.1	38.00		
L9	2991.1	3959.0	325.1	39.00		
L13	4507.9	2485.6	317.4	40.00		
FLO8	3000.0	3000.0	317.0	44.40		
FLO11	1000.0	2000.0	305.0	45.00		
FLO9	2000.0	3000.0	310.0	45.00		
FLO10	1500.0	3000.0	310.0	45.30		
L8	1994.4	3525.6	313.7	47.00		
FLO7	3500.0	2500.0	312.0	48.00		
L2	997.7	4002.3	330.0	51.00		
L1	492.1	4493.5	335.8	54.00		
L3	521.0	3482.3	327.2	54.00		
L4	477.6	2514.4	316.4	57.00		
L17	4002.3	521.0	323.0	58.00		
FLO2	1500.0	1500.0	300.0	60.00		
FLO1	1000.0	1500.0	293.0	63.00		
L16	1994.4	521.0	315.2	65.00		
FLO5	4000.0	1500.0	309.0	66.00		
FLO6	4000.0	2000.0	309.0	66.00		
L14	4507.9	997.7	319.0	66.00		
FLO4	3500.0	1500.0	307.0	71.00		
FLO3	2500.0	1500.0	305.0	73.00		
FLI1	2000.0	2000.0	297.0	75.00		
FLI2	2500.0	2000.0	299.0	75.00		
FLI3	2500.0	2500.0	305.0	76.50		
FLI5	2500.0	1750.0	300.0	76.50		
FLI4	3000.0	2000.0	301.0	78.00		
L15	2991.1	997.7	313.3	85.00		

Tabelul 3.2.1. Datele pentru analiza variabilității spațiale a conținutului în zinc din stratul de nisip 1 din zona investigată

Etapele metodologiei de identificare a modelului variogramei sunt:

3.2.1.1. Reprezentarea grafică a datelor disponibile

Datele disponibile se pot reprezenta grafic prin: hărți punctuale, hărți simbolice și indicatoare, diagrame de continuitate și variabilitate.

Harta punctuală se realizează prin dispunerea într-un sistem de coordonate a punctelor de observație lângă care se înscriu, în funcție de densitatea acestora, valorile variabilei studiate (**Scrădeanu și Popa, 2001, p. 29-33**).

Harta punctuală a conținutului în zinc din stratul de nisip 1 (Fig. 3.2.1):

- permite localizarea valorii extreme eliminate în etapa analizei variabilităţii globale;
- evidenţiază lipsa erorilor în amplasarea punctelor de observaţie;
- indică o distribuţie relativ uniformă a punctelor de observaţie în zona investigată; densitatea punctelor de observaţie este puţin mai mare în zonele centrală şi sud-estică a domeniului studiat ceea ce va conduce la obţinerea unor erori mai mici în aceste zone.



Fig. 3.2.1. Harta punctuală a conținutului în zinc din stratul de nisip 1 cu etichete atașate

Întrucât numărul de puncte de observație este redus, nu este necesară construirea hărții simbolice (Scrădeanu și Popa, 2001, p. 29-33).
3.2.1.2. Calculul variogramei experimentale

Estimarea legii de variabilitate spațială a erorilor de estimare se realizează cu ajutorul *variogramei experimentale* (Scrădeanu și Popa, 2001, p. 42-45).

Funcția de variogramă ($\gamma(\vec{d})$) este o funcție de distanță ce exprimă variația varianței erorii de estimare în raport cu distanța dintre punctul în care se cunoaște valoarea variabilei și cel în care se dorește estimarea ei.

$$\gamma\left(\vec{d}\right) = \frac{1}{2 \cdot N\left(\vec{d}\right)} \sum_{(i,j)} |\vec{a}_{ij} = \vec{d} \left(v_i - v_j\right)^2$$

în care

 $\gamma(ec{d})$ - valoarea variogramei calculată pentru distanța d și orientarea heta;

 \vec{d} - distanța orientată între punctul în care se cunoaște valoarea variabilei și cel în care se dorește estimarea ei;

 $N(\vec{d})$ - numărul perechilor de puncte aflate la distanța d și având orientarea θ utilizate la calculul unei valori a variogramei;

 $(i, j)_{|\vec{d}_{ij}=\vec{d}}$ - perechea de puncte $P_i P_j$ aflate la distanța d și având orientarea θ ;

 v_i , v_j - valorile variabilei măsurate în punctele P_i , respectiv P_j .



Un exemplu de calcul al unei valori a variogramei conţinutului în zinc din stratul de nisip 1 poate fi făcut în lungul râului ce traversează zona cercetată de la vest la est pentru o distanță de 1000 metri. Astfel:

$$\gamma(1000_{VE}) = \frac{1}{2 \cdot 10} \left[(38 - 65)^2 + ... + (23 - 19)^2 \right] = 142,38 \, ppm^2$$

În mod similar se pot calcula valorile variogramelor pe direcții și pentru distanțe diferite.

Variograma experimentală se poate calcula în mod automat utilizând programe de calcul specializate.

Variograma experimentală omnidirecțională (calculată pentru diferite distanțe și pentru o toleranță de direcție $\Delta \theta = 90^{\circ}$) reprezintă o medie a variogramelor direcționale (calculate pentru $\Delta \theta < 90^{\circ}$) și se calculează pentru a vedea dacă există sau nu o lege de variabilitate spațială care să permită estimarea valorii variabilei în orice punct al domeniului spațial cercetat.

Variograma experimentală omnidirecțională a conținutului în zinc din stratul de nisip 1 (*Fig. 3.2.2*) se construiește pe baza valorilor calculate ale variogramei (*Tabel 3.2.2*).

Existența unei corelații între valorile variogramei experimentale omnidirecționale și vectorii (\vec{d}_i) pentru care sunt calculate aceste valori indică **existența** cel puțin a unei legi de variație spațială pentru conținutul în zinc din stratul de nisip 1.



Fig. 3.2.2. Variograma omnidirecțională a conținutului în zinc din stratul de nisip 1

Tabel 3.2.2. Datele ce stau la baza realizării graficului variogramei omnidirecționale

Nr.	d	γ(d)	N(d)	
valori	[m]	[ppm ²]	[-]	
1	250.00	3.63	2	
2	500.00	20.74	9	
3	547.90	1.42	3	
4	706.29	120.63	19	
5	733.19	118.69	5	
6	992.93	185.00	17	
7	1018.55	38.25	5	
8	1117.67	140.69	36	
9	1250.00	406.13	1	
10	1340.51	359.15	3	
11	1409.63	222.44	12	
12	1491.45	139.75	16	
13	1564.07	201.16	30	
14	1597.15	292.06	7	
15	1787.54	236.55	10	

3.2.1.3. Studiul anizotropiei structurii parametrice

Studiul anizotropiei structurii parametrice este impus de necesitatea de a şti dacă legea de variabilitate spațială identificată cu ajutorul variogramei omnidirecționale este aceeași pentru orice direcție. Cu alte cuvinte, studiul anizotropiei este necesar pentru a şti dacă structura este izotropă sau anizotropă.

În cazul structurilor anizotrope, identificarea direcțiilor de anizotropie se face prin calculul **variogramelor experimentale direcționale** (toleranță unghiulară $\Delta \theta < 90^{\circ}$) cu ajutorul cărora se construieste **variograma de suprafată**.

Variograma de suprafață este reprezentarea grafică ce permite calculul **parametrilor de anizotropie** (η și θ).

Calculul variogramelor experimentale direcționale pentru conținutul în zinc din stratul de nisip 1 (*Tabel 3.2.3*) s-a făcut pe patru direcții: N-S, V-E, NV-SE și NE-SV cu o toleranță de direcție aleasă $\Delta \theta = 30^{\circ}$.

Constatăm că valorile variogramei pe cele patru direcții variază în mod diferit (*Fig. 3.2.3*) ceea ce ne permite să afirmăm că structura parametrică investigată este *anizotropă*; conținutul în zinc din stratul de nisip 1 variază mai mult (mai rapid) pe direcția NE-SV și mai puțin (mai lent) pe direcția V-E.



Fig. 3.2.3. Variogramele direcționale ale conținutului în zinc din stratul de nisip 1

Direcția	d	γ(d)	N(d)	Direcția	d	γ(d)	N(d)
de calcul	[m]	[ppm ²]	[-]	de calcul	[m]	[ppm ²]	[-]
N-S NE-SV	250.00	3.63	2	V-E	500.00	4.31	5
	500.00	41.28	4		559.02	1.13	2
	525.66	2.00	1		999.64	172.98	8
	986.96	195.69	9		1020.29	47.81	4
	1119.59	161.82	19		1115.52	117.08	17
	1340.51	359.15	3		1495.54	109.05	8
	1494.08	194.15	7		1563.85	175.45	16
	1564.33	230.53	14		1594.41	233.14	5
	1607.22	392.00	1	NV-SE	559.02	1.13	1
	559.02	1.13	1		707.39	81.37	10
	705.07	164.26	9		733.16	72.00	1
	727.59	173.82	3		1119.15	120.87	20
	1115.81	165.48	16		1346.29	496.13	1
	1250.00	406.13	1		1411.64	208.99	6
	1337.63	290.67	2		1440.25	4.50	1
	1407.61	235.88	6		1572.59	165.22	11
	1575.70	221.98	13		1602.05	262.60	4
	1590.63	331.33	3		1787.30	134.25	4
	1787.70	304.75	6				

Tabel 3.2.3. Valorile variogramelor experimentale calculate pe cele patru direcții

Cu ajutorul celor patru variograme experimentale direcționale am construit variograma de suprafață a conținutul în zinc din stratul de nisip 1 (*Fig. 3.2.4*).

Calculul parametrilor de anizotropie se face urmând succesiunea de paşi:

- se identifică izovariograma care îndeplinește trei condiții:
 - o este un contur închis;
 - are centrul de simetrie în originea sistemului de coordonate în care este reprezentată variograma de suprafaţă;
 - o are extinderea cea mai mare.
- peste izovariograma cu caracteristicile de mai sus se suprapune o elipsă (elipsa de anizotropie); axa mare a elipsei indică direcţia de continuitate maximă iar axa mică indică direcţia de continuitate minimă;
- se calculează semiaxele mare și mică ale elipsei (*Tabel 3.2.4*), semiaxe care corespund razelor mare (*R*), respectiv mică (*r*);
- se calculează orientarea direcției de continuitate maximă (θ).



Fig. 3.2.4. Variograma de suprafață a conținutului în zinc din stratul de nisip 1

În final se obțin *parametrii de anizotropie*:

• raportul de anizotropie:

$$\eta = \frac{R}{r} = \frac{1740,70}{831,24} = 2,09$$

• orientarea direcției de continuitate maximă:

$$\theta = \arctan\left(\frac{y_A}{x_B}\right) = -16,61^{\circ}$$

Tabel 3.2.4. Datele necesare calculului
parametrilor de anizotropie

Punct	X [m]	Y [m]			
0	0.00	0.00			
А	1668.04	-497.66			
В	1668.04	0.00			
С	223.44	800.65			

Direcția de continuitate maximă (variabilitate minimă) a conținutului în zinc din stratul de nisip 1 în domeniul cercetat este $VNV - ESE; \theta \cong -17^{0}$.

3.2.1.4. Modelarea variogramei experimentale

Modelarea variogramei experimentale implică identificarea unui model analitic care să interpoleze cât mai bine valorile variogramei experimentale (Scrădeanu și Popa, 2001, p. 78-86).

Într-o primă etapă se *alege* un model elementar (sferic, exponențial, gaussian, putere, logaritmic etc.) și se modifică succesiv parametrii acestuia până când se reuşeşte cea mai bună interpolare a valorilor variogramei experimentale omnidirecționale.

ATENȚIE! La modelarea variogramei experimentale vom ține cont de anizotropia structurii prin introducerea, în etapa de calare a modelului, a parametrilor de anizotropie.



Fig. 3.2.5. Modelul de variogramă a conținutului în zinc din stratul de nisip 1

Dacă se consideră că sunt mai multe modele potrivite pentru variograma experimentală

omnidirectională, se modelează variograma cu acele *n* modele și, într-o a doua etapă, ele se validează urmând a se alege modelul optim. Validarea modelului de variogramă reprezintă verificarea acestuia pe baza valorilor măsurate în punctele de observație disponibile. Modelul optim este acela care minimizează diferența dintre valoarea calculată cu ajutorul modelului şi valoarea măsurată în punctul de observatie.

În cazul conținutului în zinc din stratul de nisip 1, modelul optim de variogramă identificat (*Fig. 3.2.5*) este *modelul exponențial* cu parametrii:

- palier: 250 ppm²;
- rază de influență: R = 1100 m.

Modelul exponențial este un model cu palier ceea ce indică prezența unei structuri simple staționare. Ecuația modelului exponențial este:

$$\widetilde{\gamma}\left(\vec{d}\right) = 1 - EXP\left(-\frac{d}{R}\right)$$

Legea de variabilitate spațială a erorii de estimare (modelul de variogramă) va sta la baza estimării valorilor conținutului în zinc din stratul de nisip 1 în orice punct al domeniului analizat precum și a estimării erorilor cu care vor fi calculate aceste valori de conținut în zinc.

NOTĂ În mod similar se analizează variabilitatea spațială a conținutului în zinc din celelalte strate traversate de forajele de investigare (*Tabel 1.2*).

3.3. Evaluarea distribuției spațiale

Estimarea distribuției spațiale a variabilei investigate are ca *obiectiv* calculul valorilor variabilei în orice punct din domeniul investigat.

Datele necesare pentru atingerea obiectivului sunt:

- valorile variabilei;
- coordonatele spaţiale ale punctelor în care au fost determinate valorile variabilei;
- legea de variație spațială (modelul de variogramă);
- parametrii de anizotropie.

Estimarea punctuală a distribuției spațiale a valorilor variabilei se face prin kriging punctual ordinar.

Estimarea valorilor variabilei se poate realiza pentru *orice punct* din domeniul investigat însă, din considerente practice, se obișnuiește ca valorile variabilei să fie calculate în *nodurile unei rețele regulate* plasată pe domeniul cercetat. *Geometria rețelei de calcul* se stabilește în funcție de *densitatea punctelor de investigare* și de gradul de detaliere dorit.

Estimarea distribuției spațiale se concretizează în *hărți* la diferite niveluri de cotă și *secțiuni* pe diferite direcții.

3.3.1. Aplicația 9

Să se evalueze distribuția spațială a conținutului în zinc din stratul de nisip 1 din structura monoclinală investigată și să se reprezinte grafic.

Rezolvare

Datele necesare pentru estimarea distribuției spațiale a conținutului în zinc din stratul de nisip 1 sunt:

- conținuturile în zinc determinate în punctele de observație (*Tabel 3.2.1*);
- coordonatele spațiale ale celor 32 de foraje în care au fost măsurate cotele culcuşului stratului de sol (*Tabel 3.2.1*);
- legea de variație spațială (modelul exponențial cu parametrii: palier: 250 ppm² și rază de influență: R = 1100 m; *Fig. 3.2.5*).
- parametrii de anizotropie: raportul de anizotropie $\eta = 2,09$ și orientarea direcției de continuitate maximă $\theta = -16,61^{\circ}$.

Estimarea distribuției spațiale a conținutului în zinc din stratul de nisip 1 se realizează prin kriging punctual ordinar (deoarece structura este staționară, modelul de variogramă fiind cu palier).

Etapele ce trebuie parcurse pentru atingerea obiectivului sunt:

3.3.1.1. Dimensionarea rețelei de discretizare

Pe suprafața de 25 km² a domeniului investigat (**Fig. 1.1**) se suprapune o *rețea de discretizare regulată* pătratică (**Fig. 3.3.1**) cu dimensiunea celulei de 100 x 100 metri ($\Delta x = \Delta y = 100m$). Vor rezulta *2601 puncte de calcul* (nodurile rețelei) distribuite pe *51 de linii* și *51 de coloane*.



Fig. 3.3.1. Geometria rețelei de discretizare

3.3.1.2. Calculul valorilor conținutului în zinc

Calculul valorilor conținutului în zinc din stratul de nisip 1 se va face în fiecare dintre cele 2601 noduri ale rețelei de discretizare.

Prin interpolarea lineară a valorilor calculate în nodurile rețelei de discretizare va rezulta harta cu distribuția conținutului în zinc din stratul de nisip 1 din zona investigată.

Reprezentarea grafică a distribuției conținutului în zinc din stratul de nisip 1 se realizează sub forma unei **hărți conturale** (hartă cu izolinii) a valorilor (*Fig. 3.3.2*).

Valorile calculate ale conținutului în zinc variază între 18 ppm și 80 ppm. Valorile minime se regăsesc în nordul și nord-estul domeniului cercetat iar cele maxime în zona centrală a acestui domeniu.



NOTĂ În mod similar se evaluează distribuția spațială a conținutului în zinc din celelalte strate traversate de forajele de investigare (*Tabel 1.2*).

3.4. Evaluarea erorilor de estimare

Evaluarea distribuției spațiale a erorilor are ca *obiectiv* calculul în orice punct din domeniul cercetat al erorilor de estimare asociate valorilor calculate ale variabilei.

Estimarea distribuției spațiale a unei variabile este afectată în mod evident de erori, dată fiind variabilitatea spațială foarte mare a caracteristicilor geologice. Această estimare nu ar fi afectată de erori doar în cazul, ideal, în care am dispune de măsurători în toate punctele domeniului spațial în care se realizează studiul.

Mărimea erorii de estimare este influenţată de mai mulţi factori (**Scrădeanu şi Popa, 2001, p. 176-178**): numărul valorilor utilizate pentru estimare, dispunerea spaţială a punctelor de observaţie din vecinătatea zonei de investigare, natura variabilităţii caracteristicii studiate (tipul modelului de variogramă) şi dimensiunea suportului estimării.

Eroarea de estimare se calculează (prin kriging) cu ajutorul *abaterii standard a erorii de estimare (Kriging Standard Deviation*):

$$\varepsilon_i(\alpha) = 2 \cdot KSD \tag{3.4.1.}$$

în care

lpha - riscul asumat;

KSD - abaterea standard a valorii evaluate prin kriging

Kriging-ul este singura metodă care permite calculul abaterii standard a erorii de estimare și, implicit, a erorii de estimare asociată valorii calculate a variabilei.

3.4.1. Aplicația 10

Să se evalueze distribuția spațială a erorilor de estimare asociate conținuturilor în zinc din stratul de nisip 1 din structura monoclinală investigată și să se reprezinte grafic.

Rezolvare

Estimarea distribuției spațiale a erorilor are ca *obiectiv* calculul în orice punct din domeniul cercetat al erorilor de estimare asociate valorilor calculate ale conținutului în zinc din stratul de nisip 1 din structura monoclinală.

Datele necesare pentru estimarea distribuției spațiale a erorilor de estimare asociate valorilor calculate ale conținutului în zinc sunt:

 cotele conţinutului în zinc determinate în punctele de observaţie (*Tabel* 3.2.1);

- coordonatele spaţiale ale celor 32 de foraje în care au fost determinate conţinuturile în zinc (*Tabel 3.2.1*);
- legea de variație spațială (modelul exponențial cu parametrii: palier: 250 ppm² și rază de influență: R = 1100 m; *Fig. 3.2.5*).
- parametrii de anizotropie: raportul de anizotropie $\eta = 2,09$ și orientarea direcției de continuitate maximă $\theta = -16,61^{\circ}$.

Etapele ce trebuie parcurse pentru atingerea obiectivului sunt:

3.4.1.1. Calculul abaterilor standard ale erorii de estimare

Calculul *abaterilor standard ale erorii de estimare (KSD*) se face în aceleași noduri (cele 2601) ale rețelei de discretizare alese la estimarea conținutului în zinc din stratul de nisip 1. Metoda utilizată pentru calcul este *kriging-ul punctual ordinar*.

Calculul valorilor KSD se face automat cu ajutorul unor programe specializate prin rezolvarea sistemelor de kriging (**Scrădeanu și Popa, 2001, p. 127-128**).

3.4.1.2. Calculul erorilor de estimare

Calculul *erorilor de estimare* asociate valorilor calculate ale conţinutului în zinc din stratul de nisip 1 se face utilizând *ecuaţia (3.4.1)*. Prin interpolarea lineară a erorilor de estimare obţinute va rezulta harta cu distribuţia erorilor de estimare asociate valorilor calculate ale conţinutului în zinc din stratul de nisip 1 din zona investigată.

Reprezentarea grafică a distribuției erorilor de estimare a conținutului în zinc din stratul de nisip 1 se realizează sub forma unei **hărți conturale** (hartă cu izolinii) a erorilor (**Fig. 3.4.1.**).

Valorile calculate ale erorilor variază între 0 ppm și 18 ppm. Valorile sunt minime și mici pe poziția, respectiv în apropierea forajelor de investigare (acolo unde dispunem de valori determinate). Pe măsură ce ne îndepărtăm de punctele de observație erorile cresc ajungând să fie maxime în zonele în care nu dispunem de informații (zonele albe din hartă).







Fig. 3.4.2. Harta cu distribuția spațială a conținuturilor în zinc din stratul de nisip 1 și a erorilor de estimare a acestora

Suprapunerea hărților cu **distribuția conținuturilor în zinc** din stratul de nisip 1 și **distribuția erorilor** cu care aceste conținuturi au fost estimate (**Fig. 3.4.2**) permite extragerea rapidă, în orice punct din domeniul investigat, a conținutului în zinc și a erorii cu care el a fost estimat. **Exemplu**: în punctul **A (826; 2650)** valoarea estimată a conținutului în zinc din stratul de nisip 1, pentru un risc asumat $\alpha = 10\%$ este:

$$v_A = 56 \, ppm \pm \varepsilon(\alpha) = 56 \, ppm \pm 11 \, ppm$$

NOTĂ În mod similar se prelucrează valorile porozității determinate pe probe prelevate din formațiunea depozitelor intermediare din zona de nord-vest a municipiului București (*Tabel 1.4*).

CONCLUZII LA ANALIZA CARACTERISTICILOR GEOLOGICE CANTITATIVE

Analiza variabilității caracteristicilor geologice cantitative este fundamentată din punct de vedere statistic pe *modelul repartiției normale* care asigură suportul metodologic pentru evaluarea erorilor de estimare atât pentru Analiza Variabilității Globale cât și pentru Analiza Variabilității Spațiale.

Spre deosebire de caracteristicile geologice calitative care au **număr finit de** valori, caracteristicile geologice cantitative au un **număr infinit de valori** posibile între valorile minime și valoarile maxime determinate în etapa de investigare. Această particularitate permite acceptarea ipotezei **continuității** spațiale a caracteristicilor geologice cantitative și dă posibilitatea de a determina, în **orice punct** al domeniului spațial investigat, **cea mai probabilă valoare** a caracteristicii investigate.

Metoda cea mai performantă pentru evaluarea valorii celei mai probabile pentru caracteristicile geologice cantitative ($v^*(x_0, y_0, z_0)$; $P(x_0, y_0, z_0) \in$ spațiului investigat) este **kriging**-ul, metodă care permite și evaluarea erorii de estimare ($\varepsilon(\alpha, x_0, y_0, z_0)$) pentru fiecare valoare estimată. ANALIZA VARIABILITĂŢII CARACTERISTICILOR GEOLOGICE CANTITATIVE se realizează în două etape distincte:

- MODELAREA STATISTICĂ A STRUCTURILOR SPAŢIALE care se finalizează prin modele 2D şi 3D ale suprafeţelor structurale, realizate în patru etape de prelucrare:
 - Analiza Variabilității Globale a cotelor suprafeţelor structurale (Aplicația 1 şi Aplicația 2);
 - Analiza Variabilității Spațiale a cotelor suprafețelor structurale (Aplicația 3 și Aplicația 4);
 - Evaluarea Distribuţiei Spaţiale a cotelor suprafeţelor structurale (Aplicaţia 5);
 - Evaluarea Erorilor de Estimare a cotelor suprafeţelor structurale (Aplicaţia 6).
- MODELAREA STATISTICĂ A STRUCTURILOR PARAMETRICE care se finalizează prin modele 2D şi 3D ale distribuției caracteristicilor geologice cantitative (în interiorul volumelor delimitate de suprafețele structurale), modele realizate în patru etape de prelucrare:
 - Analiza Variabilității Globale a caracteristicilor geologice cantitative (Aplicația 7);
 - Analiza Variabilității Spațiale a caracteristicilor geologice cantitative (Aplicația 8);
 - *Evaluarea Distribuției Spațiale* a caracteristicilor geologice cantitative (*Aplicația 9*);
 - *Evaluarea Erorilor de Estimare* a caracteristicilor geologice cantitative (*Aplicația 10*).

Modelele 2D și 3D ale geostructurilor constituie suportul modelelor matematice (analitice și numerice) pentru modelarea proceselor geologice de formare a zăcămintelor de substanțe minerale utile și substanțe energetice.

Modele 2D și 3D ale geostructurilor sunt baza modelelor conceptuale utilizate pentru evaluarea dinamicii apei subterane, fluidelor asociate și contaminanților, modele utilizate pentru conservarea și protecția mediului.

CONCLUZII LA MODELAREA STATISTICĂ A GEOSTRUCTURILOR

Modelarea statistică a geostructurilor este prelucrarea preliminară obligatorie a datelor obținute din investigarea mediului geologic pentru realizarea modelelor conceptuale necesare pentru:

- Evaluarea resurselor minerale metalifere și nemetalifere;
- Evaluarea resurselor energetice: cărbuni, petrol și gaze;
- Evaluarea, protecția și conservarea resurselor de apa subterană: ape potabile, ape minerale, ape geotermale;
- Proiectarea sistemelor de asecare şi detensionare a acviferelor pentru exploatarea zăcămintelor aflate în condiții hidrogeologice dificile;
- Proiectarea construcțiilor hidrotehnice, civile și industriale în condiții de stabilitate adecvate: baraje, diguri, lacuri de acumulare, iazuri de decantare etc.

Modelarea statistică a geostructurilor conduce la realizarea celor trei componente ale modelului conceptual:

- *Modelul spațial* realizat în două etape:
 - *Modelul litologic/stratigrafic* rezultat din prelucrarea datelor alfanumerice (litologie/stratigrafie);
 - *Modelul structurii spațiale* rezultat din prelucrarea datelor numerice (cotele suprafețelor structurale).
- Modelul parametric care "umple" volumele delimitate de suprafeţele structurale cu valorile caracteristicilor geologice cantitative (porozitate, greutate volumică, conductivitate hidraulică, conţinut de aur, plumb, zinc etc).
- Modelul energetic finalizat sub forma 2D sau 3D a distribuţiei pentru valorile câmpurilor energetice (gravitaţional, magnetic, radioactiv, termic etc.) care susţin desfăşurarea proceselor studiate: formarea zăcămintelor de minerale, declanşarea cutremurelor, curgerea fluidelor etc.

BIBLIOGRAFIE

BOMBOE P., *Geologie matematică, Vol. I, Analiza statistică a datelor geologice*, Editura Universității din București, 1979.

CHEENEY R.F., Statistical methods in geology, George Allen & Unwin Ltd., 1983.

HOULDING S. W., *Practical Geostatistics, Modeling and Spatial Analysis*, Springer, 2000.

ISAAKS E.H., SRIVASTAVA M.R., *Un introduction to Applied Geostatistics*, Oxford University Press, 1989.

MATHERON G., Le choix des modeles en geostatistique in Advanced Geostatistics for mining industry, Guaracio et al., 1976.

SCRĂDEANU D., POPA R., *Geostatistică aplicată*, Editura Universității din București, 2001, 2003.

SCRĂDEANU D., *Modele geostatistice în hidrogeologie*, Editura Didactică și Pedagogică, 1996.

SCRĂDEANU D., Informatică geologică, Vol. I, Analiza variabilității globale a caracteristicilor geologice, Editura Universității din București, 1995.

ZORILESCU D., *Introducere în geostatistica informațională*, Editura Academiei, 1990.