

# Geostatistička interpretacija rezultata mjerenja refrakcijskih brzina

---

Težak, Tajana

Master's thesis / Diplomski rad

2016

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Geotechnical Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:130:217204>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-13**



Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Geotechnical Engineering - Theses and Dissertations](#)



# Geostatistička interpretacija rezultata mjerenja refrakcijskih brzina

---

**Težak, Tajana**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2016**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Geotechnical Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:130:217204>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2020-11-09**

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Faculty of Geotechnical Engineering](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
GEOTEHNIČKI FAKULTET

Tajana Težak

**GEOSTATISTIČKA INTERPRETACIJA  
REZULTATA MJERENJA REFRAKCIJSKIH BRZINA**

DIPLOMSKI RAD

VARAŽDIN, 2016

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
GEOTEHNIČKI FAKULTET

DIPLOMSKI RAD

**GEOSTATISTIČKA INTERPRETACIJA  
REZULTATA MJERENJA REFRAKCIJSKIH BRZINA**

KANDIDATKINJA

Tajana Težak

MENTOR:

Doc. dr. sc. Ivan Kovač

NEPOSREDNI VODITELJ:

Doc. dr. sc. Mario Gazdek

VARAŽDIN, 2016

## IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI

## **ZAHVALA**

*Veliku zahvalnost dugujem mentoru Doc. dr. sc. Ivanu Kovaču na pomoći, podršci, ukazanom povjerenju, te brojim koristim savjetima tijekom izrade diplomskog rada.*

*Također hvala i neposrednom voditelju Doc. dr. sc. Mariju Gazdeku na savjetima i uputama prilikom izrade rada.*

*Željela bi zahvaliti i svim članovima povjerenstva za ocjenu rada, Izv. prof. Stjepanu Strelecu i Doc. dr. sc. Ivanu Hipu na ukazanom trudu i korisnim primjedbama koji su doprinijeli boljem sadržaju diplomskog rada.*

*Na kraju zahvaljujem svojoj obitelji i kolegama na potpori i razumijevanju.*

Sažetak:

Ime i prezime autora: Tajana Težak

Naslov teme: Geostatistička interpretacija rezultata mjerenja refrakcijskih brzina

Princip primjene geostatističke interpretacije koja se u literaturi često naziva i tehnika geostatističkog filtriranja, se temelji na dekompoziciji promatrane varijable na njene nezavisne elemente. U refrakcijskoj tomografiji osnovna je varijabla seizmička brzina, a nezavisni članovi od kojih je sastavljena se pripisuju fizikalnim svojstvima geomedija, odnosno geološkim značajkama sredine i artefaktima izazvanim primijenjenim seizmičkim metodama mjerenja, obrade i interpretacije. Dosadašnji rezultati istraživanja su pokazali da se interpolacija nekom od metoda krigiranja odnosi upravo na geološku komponentu. Kada se uspoređuju dva seizmička presjeka duž istog profila, onda se opravdano očekuje da geološka komponenta ima ista svojstva. Artefakti se naravno ne mogu izbjeći i uvijek se pojavljuju, međutim njihove su pojave različite i nisu korelirane.

U ovom se radu analizira variogramsko modeliranje i prikazuje se proces nastajanja tomografskog profila regionalizirane refrakcijske brzine kompresijskog  $P$  vala na nekoliko primjera.

Ključne riječi: geostatistika, krigiranje, refrakcijska brzina, seizmička tomografija.

## SADRŽAJ

1. Uvod	1
2. Geostatistika	2
2.1. Regionalizirana varijabla	2
2.2. Osnovne statističke raspodjele	5
2.2.1. Varijanca	5
2.2.2. Raspodjela	6
2.2.3. Kovarijanca i korelacija	9
3. Variogram	11
3.1. Osnovni parametri variograma	11
3.2. Variogramski modeli	13
3.3. Teorija geostatističke procjene (kriging/kokriging/simulacije)	15
3.3.1. Glavna svojstva te matrične jednadžbe kriginga	15
3.3.2. Kokriging	18
4. Geološke značajke istražnih lokacija	19
5. Seizmičke metode istraživanja	22
5.1. Koncept seizmičkih metoda	23
5.1.1. Vrste seizmičkih valova	24
5.2. Vrste i primjena seizmičkih metoda u geoinženjerstvu	25
5.2.1. Seizmičke in situ metode	27
5.3. Seizmička refrakcija	29
5.4. Plitka refrakcijska tomografija (Near Surface Seismic Refraction Imaging, NSSRI)	34
5.5. Geostatistička interpolacija seizmičkih brzina	38
5.5.1. Primjer 1: Špilja Vindija, Donja Voća	41
5.5.2. Primjer 2: Šibenik, naselje Meterize	42
5.5.3. Primjer 3: Glinište Cukavec, Turčin	44



Zaključak	46
Literatura	47

## 1. Uvod

Geostatističke metode se danas uobičajeno koriste za izradu konzistentnih inženjersko-geoloških modela. Ulazni podaci za modele su najčešće podaci neposrednih metoda istraživanja, kao što su sondažni profili istražnih bušotina ili izmjereni inženjerski parametri izravno u iskopima, otkopima i raskopima, odnosno u podzemnim prostorijama. U inženjerskoj praksi, geofizičke metode po svojoj prirodi posredne metode, iznimno doprinose dimenzioniranju i mapiranju istražnog prostora, integriranju diskretnih rezultata neposrednih metoda u smislenu inženjersko-geološku cjelinu, kontroli izvedbe različitih inženjerskih zahvata i konstrukcija te ocjeni njihovog utjecaja na okoliš. [1]

Seizmičke, odnosno refrakcijske brzine su posebno vrijedan geofizički parametar iz kojeg se mogu izravno izračunati inženjerski parametri za projektiranje (moduli elastičnosti i Poissonov koeficijent). Refrakcijska tomografija u kojoj se pomoću matematičko-fizikalnog modela vrijeme konvertira u dubinu i brzinu, se danas smatra kritičnim elementom za oblikovanje inženjersko-geološkog ili geotehničkog modela. Kvantificiranje nepouzdanosti koja je inherentna toj konverziji u prostor ima posebnu težinu pri izradi modela.

U tradicionalne modele brzina nekog seizmičkog presjeka se nastoje ugraditi različite tehnike geostatističke interpretacije radi integracije svih izmjerenih i procijenjenih vrijednosti pri oblikovanju najvjerojatnijeg tomografskog modela brzina. Prednost geostatističke interpretacije je mogućnost fitanja podataka u samo jednom (istom) koraku uz istovremeno kvantificiranje nepouzdanosti generiranjem vjerojatnih i inženjerski opravdanih modela. Osim toga one omogućuju i kontrolu podataka mjerenja što je posebno važno za odvajanje artefakata od stvarnih seizmičkih anomalija.

## 2. Geostatistika

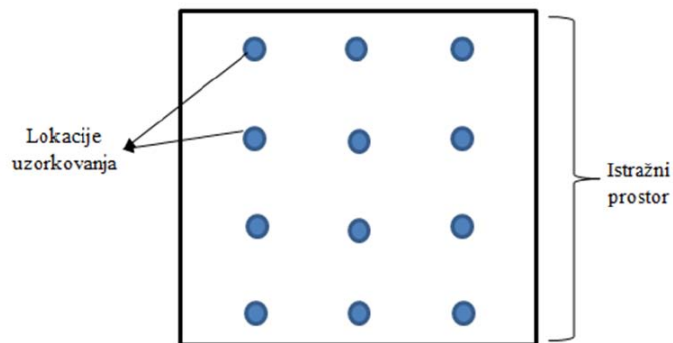
Geostatistika je grana Primijenjene statistike koja se tradicionalno koristi u geoznanostima. Metode geostatistike koriste se u naftnoj geologiji, hidrogeologiji, hidrologiji, meteorologiji, oceanografiji, geokemiji, geografiji, rudarstvu, šumarstvu, ekologiji, poljoprivredi i slično. [15][16][17]

Izraz geostatistika potječe od prof. Georges Mathérona i njegovih kolega iz Centra za morfološku matematiku (franc. Centre de Morphologie Mathématique), iz grada Fontainebleau u Francuskoj. Tim pojmom opisali su metode razvijene za rješavanje problema procjene koncentracije ruda - prvo zlata, a zatim i drugih vrsta sirovina. Geostatistička ideja razvijena je uglavnom neovisno o tada dominantnim radovima u području prostorne statistike (engl. Spatialstatistics). Prve rezultate geostatističkih istraživanja Mathéron je objavio u svojoj doktorskoj disertaciji, te nekoliko radova u 60 - im godinama prošloga stoljeća. Ta djela još se i danas smatraju kapitalnim radovima toga područja i nerijetko se citiraju. Tada je prvi put matematički opisana metoda kriginga, danas još uvijek najbolja tehnika za determinističku procjenu vrijednosti varijable u prostoru.

### 2.1. Regionalizirana varijabla

Da bi se utvrdile značajke određenog prostora, neophodno je provesti istražne radove, (Slika 1). Značajke koje se istražuju mogu biti vrlo različite, od sadržaja minerala u rudi do koncentracije nekog onečišćivala u tlu ili vodi. Međutim, istražnim radovima nije moguće, ili bi bilo preskupo i trajalo predugo, obuhvatiti svaku točku prostora koji se istražuje. Rezultati mjerenja često puta su poznati samo u određenim točkama-lokacijama uzorkovanja ili mjerenja, unutar istražnog prostora. [15]

Na osnovi rezultata istražnih radova potrebno je izraditi model prostorne razdiobe vrijednosti promatrane značajke istražnog prostora. Takvi modeli izrađuju se nekom od metoda prostorne interpolacije. Na osnovi rezultata interpolacije moguće je procijeniti vrijednost promatrane značajke u svakoj točki unutar istražnog prostora. (Modeliranje prostorne razdiobe i procjenjivanje vrijednosti promatrane značajke izvan istražnog prostora je ekstrapolacija).

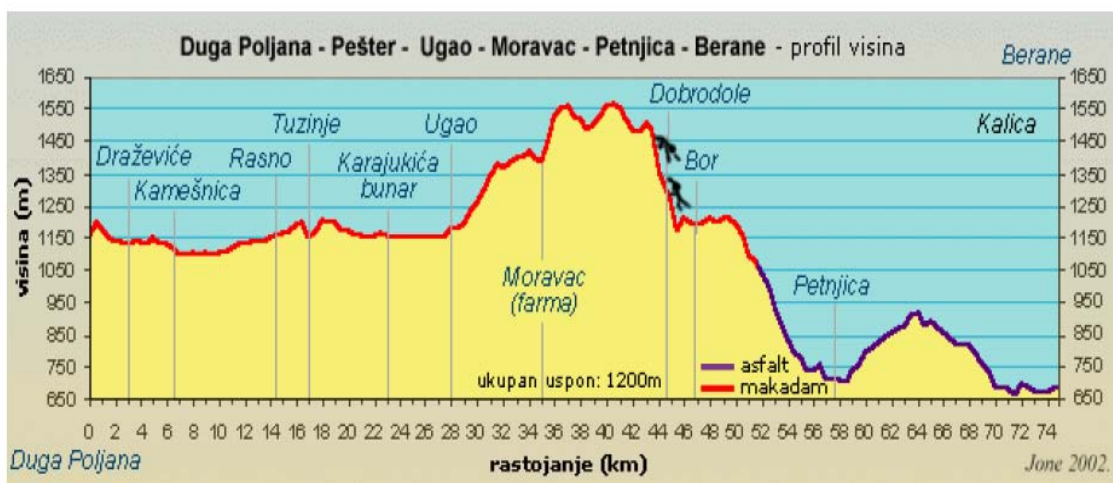


Slika 1 Istražni prostor i lokacije uzorkovanja

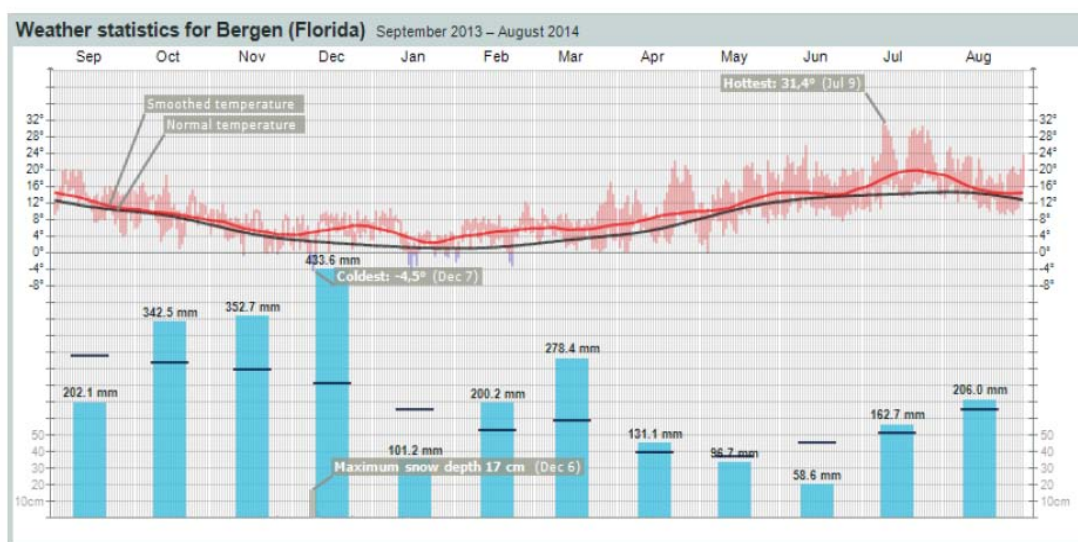
S razvojem tehnologije prikupljanja podataka, razvijale su se i interpolacijske metode. Te se metode međusobno razlikuju po algoritmima pomoću kojih se, na osnovi rezultata istražnih radova, procjenjuju vrijednosti u svim točkama istražnog prostora. Početkom 50-tih godina 20. stoljeća južnoafrički rudarski inženjer D. J. Krige primijetio je da između susjednih uzoraka rude postoji određena sličnost i povezanost: uzorci koji su bliži u prosjeku se međusobno manje razlikuju od uzoraka između kojih je veći razmak. S povećanjem udaljenosti između lokacija uzorkovanja sličnost između uzoraka se smanjuje i nakon neke kritične udaljenosti prestaje. Tu je sličnost između susjednih uzoraka moguće upotrijebiti i povećati točnost u procjeni mineralnih rezervi. Nakon toga je G. Matheron primijenio teoriju vjerojatnosti na Krigeove zaključke iz čega je proizašla nova metoda procjene mineralnih rezervi. U čast dr. Krigeu ta je metoda nazvana *kriging*. Kriging je dio šireg procesa izrade prostornih modela. U početku su to bili modeli isključivo rudnih ležišta i izrađivali su ih rudarski i geološki inženjeri. Zbog toga je čitava metoda nazvana geostatistika. Međutim, s vremenom je geostatistika našla svoju primjenu i u drugim područjima tako da se danas koristi svugdje gdje je potrebno provesti prostornu analizu i izraditi prostorni model razdiobe određenog parametra.

Ključni pojam u geostatistici je regionalizirana varijabla. Ta se varijabla može uočiti u mnogobrojnim prirodnim pojavama. Naime, promjene određene pojave u prostoru i vremenu su postupne. Primjerice, nadmorska visina uzduž određenog pravca, (Slika 2) neće se mijenjati nasumice, poput slučajnih brojeva, već će promjena biti postupna i rezultati susjednih mjerenja biti će međusobno slični.

Kao drugi primjer može poslužiti temperatura, (Slika 3): ako se odredi prosječna dnevna temperatura tijekom ljetnog dana i neka ona iznosi 21 °C, tada idućeg dana temperatura sasvim sigurno neće biti 0 °C, već će biti slična temperaturi prethodnog dana.



Slika 2 Promjena nadmorske visine uzduž određenog pravca



Slika 3 Dnevne temperature izmjerene na meteorološkoj postaji Bergen, Florida, SAD (za razdoblje od rujna 2013. do kolovoza 2014)

Iz ovih je primjera vidljivo da između susjednih rezultat mjerenja postoji ne samo sličnost, već i određena povezanost. Na osnovi opisane povezanosti moguće je, s određenom točnošću i pouzdanosti, pomoću rezultata mjerenja na jednoj lokaciji ili danu, procijeniti (predvidjeti, prognozirati) vrijednost promatrane pojave na susjednim lokacijama ili idućim danima. Primjerice, na osnovi nadmorske visine na jednoj lokaciji moguće je procijeniti nadmorsku visinu na susjednoj lokaciji. Isto tako, na osnovi današnje temperature moguće je procijeniti sutrašnju temperaturu. Razumljivo je da će se stvarne (izmjerene) i procijenjene vrijednosti međusobno razlikovati. Međutim, te razlike, u pravilu, neće biti velike. [15]

Iz ovih primjera vidljive se osnovne značajke regionalizirane varijable:

*Regionalizirana varijabla ima, za razliku od slučajne varijable, kontinuitet od točke do točke unutar istražnog prostora. Međutim, uzroci promjena vrijednosti regionalizirane varijable u prostoru su toliko komplicirani da ne mogu biti opisani nekom determinističkom funkcijom. [15]*

Klasična statistika obrađuje slučajne i nezavisne varijable, kao što su osobine ljudi (visina, tjelesna masa, veličina stopala itd.), greške u proizvodnji, broj vozila u jedinici vremena na nekoj prometnici i sl. Geostatistika, međutim, ne razmatra samo vrijednost rezultata mjerenja neke varijable već i poziciju tog rezultat u prostoru-regiji, odakle i naziv "regionalizirana varijabla". Primjerice, u inženjerstvu okoliša nije važan samo iznos koncentracije onečišćivala već i lokacija gdje je taj rezultat mjerenja zabilježen.

## 2.2. Osnovne statističke raspodjele

Geostatistika je primijenjena grana matematičke statistike te kao takva uključuje u svoju terminologiju nekoliko osnovnih statističkih pojmova-varijancu, raspodjelu (distribuciju), kovarijancu i korelaciju.

### 2.2.1. Varijanca

Varijanca (disperzija, moment drugoga reda) jest mjera raspršenosti podataka, odnosno ona opisuje širinu intervala u kojemu su ti podatci raspodijeljeni. Njezina objektivna procjena izražava se odnosom:

$$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}$$

gdje je:  $x_i$  - vrijednost podataka "i"                       $\bar{x}$  - aritmetička sredina podataka  
 $n$  - broj podataka

### 2.2.2. Raspodjela

Uniformna raspodjela jedna je od najjednostavnijih distribucija kontinuirane slučajne varijable. Za njezino definiranje potrebno je poznavati minimalnu i maksimalnu vrijednost, a sve vrijednosti između tih granica imaju jednaku vjerojatnost događaja. Vjerojatnosna funkcija definirana je kao:

$$f(x) = \frac{1}{b-a} \text{ za } a \leq x \leq b$$

$f(x) = 0$  u svim ostalim slučajevima

Kumulativna funkcija jest:

$$F(x) = \frac{x-a}{b-a} \text{ za } a \leq x \leq b$$

inače  $F(x)=1$ .

Srednja vrijednost računa se prema:  $\bar{x} = \frac{a+b}{2}$ , a varijanca iz  $s^2 = \frac{(b-a)^2}{12}$  (drugi korijen iz varijance "s" naziva se standardna devijacija).

Glavna primjena uniformne distribucije jest u stvaranju slučajnoga broja realizacija. Standardni generator stvara niz slučajnih brojeva uzorkovanih iz uniformne distribucije (obično iz intervala 0-1). Ako takav generator treba dati vrijednosti iz drugoga intervala, takav se generator može jednostavno prenamijeniti izrazom:

$$N_{\text{izmijenjen}} = a + N_{\text{standardni}} (b - a)$$

Normalna (Gaussova) raspodjela najpoznatija je, i u prirodi najčešće zastupljena, funkcija raspodjele u statistici. Zvonasta je oblika, a opisana je funkcijom:

$$f(x) = \frac{1}{s\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\bar{x}}{s}\right)^2\right] \text{ za } -\infty \leq x \leq \infty$$

Maksimumima  $\frac{0,4}{s}$  koji je dosegnut kada je  $x = \bar{x}$ . Ako se načini zamjena  $z = \frac{x-\bar{x}}{s}$  tada se Gaussova funkcija vrijednosti može napisati kraće:

$$f(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{z^2}{2}\right)$$

Za prirodne pojave koje ne slijede Gaussov zakon raspodjele možemo primijeniti centralni granični teorem (ustvari je riječ o skupini međusobno povezanih teorema), koji dokazuju da distribucija velikoga broja nezavisnih uzoraka iste veličine slijedi normalan zakon raspodjele vjerojatnosti, bez obzira na distribuciju iz koje potječu uzorci.

Gaussova funkcija simetrična je oko ordinate i stoga se često naziva i funkcijom zvonastoga oblika (engl. bell-shaped). Varijabla  $z$  naziva se standardiziranom normalnom varijablom.

Veliki broj drugih eksperimentalnih podataka slučajnih uzoraka pokazuje svojstva normalne distribucije (ponekad nakon odgovarajuće transformacije), no glavni razlog popularnosti upotrebe takve distribucije proizlazi iz postojanja teorema središnjega limita. Prema njemu zbroj velikoga broja nezavisnih mjerenja teži biti normalno raspodijeljen. Najčešća je primjena toga teorema u definiranju pogreške mjerenja u nekome eksperimentu. Takva pogreška rezultat je nekoliko mogućih neovisnih izvora, pa stoga ona teži tome da bude normalno raspodijeljena. Varijabla za koju se često pretpostavlja da je normalno raspodijeljena jest poroznost.

Kao posljedica središnjega graničnoga teorema često proizlazi zaključak o populacijskoj sredini aproksimiranoj sredinom vrijednosti postojećih mjerenja. No, postoji i opasnost da kod malobrojnoga ulaznoga skupa zaključivanje raspodjele prema središnjemu graničnome teoremu može voditi do pogreške, a tada su preporučene neparametarske metode.

Zaključivanje o podacima na temelju teorije normalne distribucije (raspodjele) često je neprikladno u studijama pri kojima je jedna varijabla raspodijeljena na vremenskoj skali i podatci teže velikoj izduženosti, pa nastaje asimetričnost distribucije (engl. skewness). Primjena normalne raspodjele neprimjerena je i kod skupine podataka koji se mogu objasniti Poissonovom distribucijom, koja je obilježena poznatom srednjom vrijednošću i varijancom:

$$\Pr(x = r) = \frac{1}{r!} e^{-\lambda} \lambda^r$$

Log -normalna raspodjela vrlo je bliska normalnoj. Posjeduje ju varijabla čiji je logaritam normalno distribuiran, odnosno pozitivna slučajna varijabla  $x$  koja je transformirana



izrazom  $y = \ln(x)$ . Ako  $y$  ima normalnu distribuciju (ili je njome dobro aproksimiran),  $x$  ima log-normalnu razdiobu, a njezina se funkcija izražava kao:

$$f(x) = \frac{1}{xs\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln(x) - \bar{x}}{s}\right)^2\right] \text{ za } x > 0$$

Također postoji veza između slučajne varijable  $x$  te srednje vrijednosti i varijance varijable  $y$ , koja je opisana odnosima:

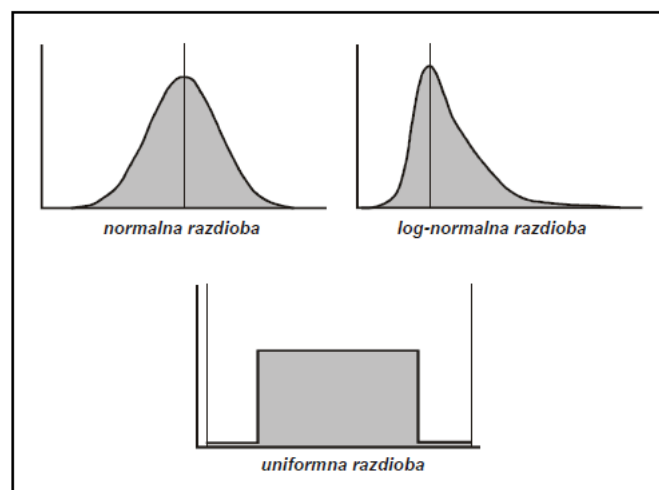
$$\bar{y} = \exp\left[\bar{x} + \frac{s^2}{2}\right]$$

$$s_y^2 = \bar{y}^2 [e^{s^2} - 1]$$

Odabir najbolje funkcije za opis analizirane varijable važan je zbog predviđanja ponašanja te varijable. Takav zadatak često može biti opterećen relativno malim brojem podataka, odnosno poteškoćama u prepoznavanju stvarne raspodjele.

Svaka od navedenih raspodjela, (Slika 4) zahtijeva po dva parametra za svoje definiranje.

Uniformna raspodjela određena je minimalnom i maksimalnom raspodjelom, a normalna i log-normalna srednjom vrijednošću i varijancom



Slika 4 Shematski primjeri normalne, log-normalne i uniformne raspodjele

### 2.2.3. Kovarijanca i korelacija

Kada se primjenjuju tehnike kokriginga, ponašanje primarne varijable (npr. poroznosti) dodatno se opisuje i sekundarnom (najčešće seizmičkom) varijablom. Tada je potrebno odrediti vezu, odnosno linearnu povezanost, tj. korelaciju između tih dviju vrijednosti. To se izražava korelogramom, kovarijancom ili koeficijentom korelacije. Jednadžba korelograma glasi:

$$p(h) = \frac{\sum x \cdot x_h - n_h \cdot \bar{x} \cdot \bar{x}_h}{n_h \cdot s \cdot s_h}$$

gdje je:  $x$  - vrijednost za čiju se lokaciju korelogram računa

$x_h$  - vrijednost s kojom se uspoređuje na udaljenosti 'h'

$n_h$  - broj parova podataka na udaljenosti 'h'

$\bar{x}$  - srednja vrijednost na lokaciji 'z' (ako se jednim uzorkom smatra više mjerenja)

$\bar{x}_h$  - srednja vrijednost uzoraka na udaljenosti 'h'

$s$  - standardna devijacija uzoraka na lokaciji 'z' (ako ih je više)

$s_h$  - standardna devijacija uzoraka na udaljenosti 'h'

Ako su ulazni podaci obilježeni bilo kakvim oblikom trenda, računa se funkcija nazvana neergodičkim korelogramom (engl. non-ergodic correlogram). Kovarijanca se računa u jedinicama u kojima su i varijable  $x$  i  $x_h$ :

$$c(x, x_h) = \frac{\sum x \cdot x_h - n_h \cdot \bar{x} \cdot \bar{x}_h}{n_h}$$

Iz kovarijanca se izvodi koeficijent korelacije (Pearsonov koeficijent korelacije) koji je bezdimenzionalan:

$$r(x, y) = \frac{c(x, x_h)}{s_x s_y}$$

Često se upotrebljava koeficijent determinacije, tj. kvadrat koeficijenta korelacije  $r^2(x, y)$  koji pomnožen s konstantom 100 daje postotak zajedničke varijance između dviju linearno povezanih slučajnih varijabli. No, koeficijent korelacije može se izraziti i rangovima, čime se dobiva rangirajući korelacijski koeficijent (Spearmanov koeficijent korelacije ranga), kao još jedan izraz mjere ovisnosti između dviju varijabli:

$$r(R_x, R_y) = \frac{c(R_x, R_y)}{S_{R_x} S_{R_y}}$$

Rang koeficijenta korelacije uglavnom se primjenjuje na ljestvicama koje nemaju obilježja intervalne (ekvidistantne) ljestvice. Rangirajući korelacijski koeficijent manje je podložan ekstremnim vrijednostima unutar ulaznoga skupa. Zato je on snažan alat koji može upozoriti na pogreške u mjerenju, posebno ako postoji velika razlika u vrijednostima tih dvaju koeficijenata. Visoka vrijednost  $r(R_x, R_y)$ , a niska  $r(x, y)$  pokazuje da vjerojatno postoji nekoliko nepravilnih parova podataka koji se moraju provjeriti s obzirom na moguću pogrešku mjerenja. Druga mogućnost jest ta da veza između dviju varijabli nije linearna.

Korelogram ( $\rho$ ), kovarijanca ( $C$ ) i semivariogram ( $\gamma$ ) međusobno su usporedive funkcije, čiji se odnos može prikazati kao:

$$\gamma(h) = C(0) - C(z - z_h) \text{ odnosno } \rho(h) = \frac{c(h)}{c(0)}$$

Da bi te funkcije koristile, uvjet je da su poznate srednja vrijednost i varijanca ulaznoga skupa.

### 3. Variogram

#### 3.1. Osnovni parametri variograma

Međusobna povezanost podataka iz istog istražnog prostora može se odrediti i na osnovi razlika između podataka. Podaci koji su najbliži, u prosjeku se najmanje razlikuju. S povećanjem udaljenosti između rezultata mjerenja, razlike se u prosjeku povećavaju.

U analizi razlika između podataka, slično kao i u autokorelacijskoj analizi, potrebno je kvantitativno izraziti međusobnu povezanost podataka za svaku udaljenost unutar istraživanog prostora, te utvrditi oblik i domet te povezanosti. [15]

Variogram ( $2\gamma$ ) je jedan od osnovnih geostatističkih alata. Koristi se za određivanje ponašanja odabrane varijable u prostoru, odnosno definiranje prostorne zavisnosti. Često se naziva i semivariogramom ( $\gamma$ ) koji ima potpuno jednaka svojstva, osim što su obje strane variogramске jednađbe podijeljene s vrijednošću 2. [16][17]

Variogram je definiran izrazom:

$$2\gamma(h) = \frac{1}{n} \cdot \sum [z(x_i) - z(x_i + h)]^2$$

gdje je:  $2\gamma(h)$  - variogram

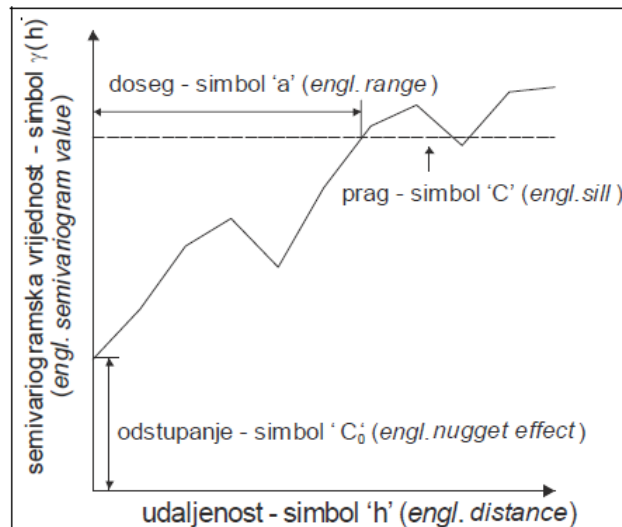
$n$  - broj podataka uspoređenih na udaljenosti  $h$

$z(x_i)$  - vrijednost varijable na lokaciji  $x_i$

$z(x_i - h)$  - vrijednost varijable na udaljenosti za  $h$  od početne lokacije  $x_i$

Skup svih parova podataka na istoj udaljenosti ( $h$ ) naziva se klasa. Spajanjem vrijednosti za svaku klasu dobiva se krivulja eksperimentalnog variograma, na kojoj se može očitati pet parametara: odstupanje (engl. nugget), prag (engl. sill), doseg (engl. range), udaljenost (engl. distance) te odmak.

Odmak predstavlja veličinu koja se slobodno određuje, a najčešće predstavlja polovicu širine variogramskog razreda, odnosno polovicu vrijednosti koraka. Nije prikazan, (Slika 5) jer ovisi o konkretnim računskim parametrima. [17]



Slika 5 Parametri semivariograma

Odstupanje ( $C_0$ ) predstavlja slučajnu komponentu regionalizirane varijable, odnosno pojavu kada krivulja siječe os  $Y$  u nekoj pozitivnoj vrijednosti ( $C_0$ ). To je obilježje gotovo svih variograma, a upućuje na razliku u vrijednostima vrlo bliskih uzoraka koji se u praksi smatraju uzorcima s jedinstvene lokacije. Uklanja se smanjenjem površine ili povećanjem broja uzoraka, no u praksi se ono vrlo često ne može eliminirati.

Prag ( $C$ ) je razlika pojedinačnih vrijednosti i srednje vrijednosti skupova podataka, što je ujedno definicija varijance. Nakon doseganja praga (ako ga posjeduje) krivulja semivariograma često će prestati pravilno rasti te će nastaviti oscilirati oko njega.

Doseg ( $a$ ) je vrijednost na kojoj semivariogram prvi put presijeca prag, a nakon toga ne postoji prostorna korelacija ili ovisnost podataka.

Udaljenost ( $h$ ) je vrijednost na kojoj se međusobno uspoređuju podaci. Svaka udaljenost čini jednu klasu. Toj se vrijednosti može dodijeliti tolerancija nazvana odmak (engl. lag). To znači da granicama klase dodajemo vrijednost odmaka šireći tako klasu. Time se povećava broj parova i dobiva se bolji rezultat.

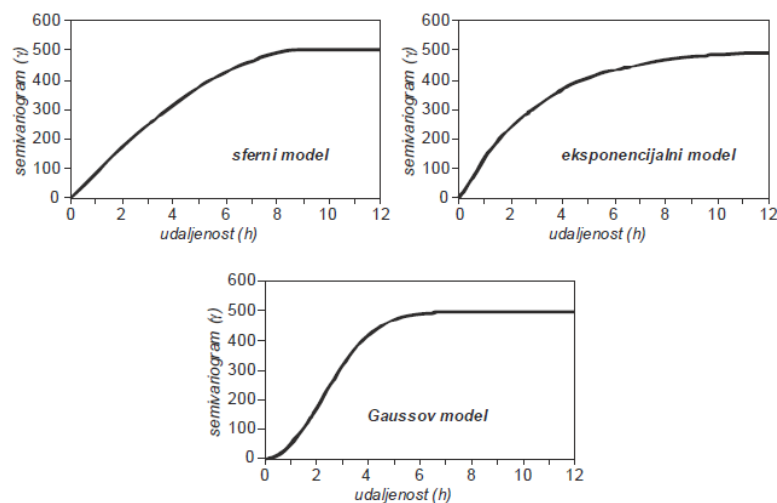
Svaki variogram opisan je i s nekoliko svojstava, od kojih je najvažnije svojstvo anizotropija koja opisuje promjenu vrijednosti variograma ovisno o smjeru u kojemu je računat. To je vrlo česta pojava u geologiji, najčešće zbog različitoga oblika struktura u kojima se analiziraju različita svojstva. Na temelju rezultata semivariogramske analize može se odrediti smjer najvećega (glavna os) i najmanjega kontinuiteta (sporedna os). Njihov je omjer faktor anizotropije. Kada semivariogrami u različitim smjerovima imaju

isti prag i različit doseg, radi se o geometrijskoj anizotropiji. Najčešće se obje veličine mijenjaju sa smjerom pa se tada radi o zonalnoj anizotropiji.

Sljedeće često uočljivo svojstvo na brojnim variogramskim krivuljama jest osciliranje odnosno pojava približno pravilne promjene vrijednosti, najčešće oko praga, čemu je uzrok pseudoperiodičnost, a ne međuzavisnost analizirane varijable. Pojava osciliranja kazuje da više ne postoji prostorna ovisnost podataka. Ekstremi su vrlo visoke i niske vrijednosti na krivulji. Mogu se pojaviti kao posljedica premaloga broja ulaznih podataka (kada su razlike između podataka često relativno velike). Češće čine manji dio podataka koji vrijednostima izrazito odskakuju od glavnoga skupa. Treba ih izdvojiti i odbaciti na histogramu analizirane varijable jer bitno utječu na (semi) variogramski račun zbog upotrebe izraza kvadrata razlike vrijednosti. [17]

### 3.2. Variogramski modeli

Gotovo svi eksperimentalni (semi) variogrami mogu se matematički aproksimirati s pet teorijskih modela: sfernim, eksponencijalnim, Gausovim, linearnim i logaritamskim (de Wysovim) (HOHN,1988). Razlikuju se prema tome sadržavaju li prag te po načinu ponašanja krivulje u blizini ishodišta. Prva tri modela (sferni, eksponencijalni, Gaussov) najčešće se upotrebljavaju u interpretaciji geoloških varijabli, (Slika 6). Modeli bez praga rijetki su u naftno-geološkoj praksi. [17]



Slika 6 Teorijski model-sferni (gore lijevo), eksponencijalni (gore lijevo), Gaussov (dolje)

Formule po kojima se definira ponašanje varijable određene odabranim teorijskim modelom jesu sljedeće:

$$\gamma(h) = C \left[ \left( \frac{3h}{2a} \right) - \left( \frac{h^3}{2a^3} \right) \right] \quad h \leq a$$

$$\gamma(h) = C \quad \text{sferni}$$

$$\gamma(h) = C \left[ 1 - \exp\left(\frac{-h}{a}\right) \right] \quad \text{eksponencijalni model}$$

$$\gamma(h) = C \left[ 1 - \exp\left(\frac{-h^2}{a^2}\right) \right] \quad \text{Gaussov model}$$

gdje je:  $\gamma(h)$  - vrijednost variograma na udaljenosti "h"

C - konstanta

h - udaljenost

a - doseg

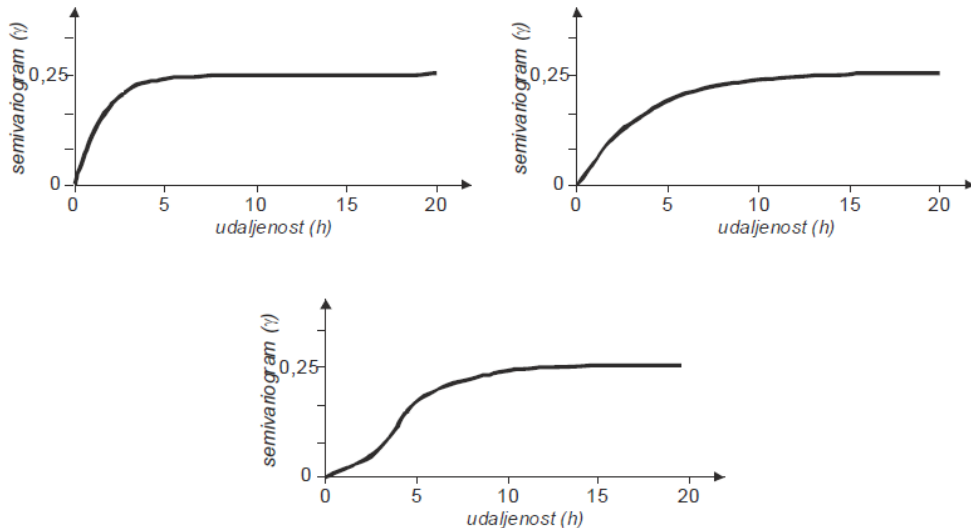
Aproksimaciju eksperimentalne krivulje moguće je načiniti stvaranjem složenoga modela koji tvori zbroj dvaju ili više osnovnih teorijskih modela različitih dosega i pragova. Takav složeni model naziva se ugniježđenim modelom i iskazuje se kao zbroj više osnovnih modela:

$$\gamma(h) = \gamma_1 + \gamma_2 + \gamma_3 + \dots$$

Interpretacija semivariograma ovisi o obliku dobivene krivulje. Na Slici 7 prikazana su tri primjera sfernoga, eksponencijalnoga i Gaussova modela te uopćene interpretacije povezane sa svakim od njih.

Na Slici 7, gore lijevo, variogramaska krivulja prema pragu raste vrlo brzo, što opisuje velike razlike u vrijednostima podataka na malim udaljenostima i velike vrijednosti ekstremnih podataka. Na takvu skupu ulaznih podataka najbolje je primijeniti sferni model. [17]

Eksponencijalni model (Slika 7, gore desno) primjenjuje se na skupu gdje vrijednosti postupno rastu i padaju, a iznosi su ekstrema mali u odnosu na iznose u preostalom dijelu skupa. Tada krivulja postupno raste prema pragu uz veći doseg. Gaussov model (Slika 7, dolje) upućuje na vrlo ujednačen skup podataka s obzirom na razlike između njihovih vrijednosti, a njihova raspodjela najbliža je krivulji normalne distribucije.



Slika 7 Interpretacija semivariogramskih krivulja

### 3.3. Teorija geostatističke procjene (kriging/kokriging/simulacije)

Kriging (i sve njegove izvedenice-kokriging i stohastičke simulacije) ubraja se u statističke metode procjene. Zajednički su određene kao najbolji "linearni nepristrani procjenitelji" (engl. best linear unbiased estimators-BLUE). "Najbolji" (engl. best) znači da su izračunati koeficijenti, na temelju kojih se kasnije računa procjena, određeni postupkom minimiziranja varijance kriginga; "linearni" (engl. linear) podrazumijeva da je procjena načinjena linearnom kombinacijom mjerenih vrijednosti (engl. Hard data); "nepristrani" (engl. unbiased) osigurava da je očekivanje procjene jednako stvarnome očekivanju cijele (moguće) populacije vrijednosti; "procjenitelj" (engl. estimator) označuje metodologiju. [17]

#### 3.3.1. Glavna svojstva te matrične jednadžbe kriginga

Kriging pruža brojne prednosti pred ostalim interpolacijskim metodama, a upotrebom računala izračun pripadajućih matričnih jednadžbi uvijek je brz, bez obzira na njihove dimenzije. Geostatističke interpolacijske metode gotovo uvijek uspješnije rješavaju procjenu skupova podataka u kojima su kontrolne točke izrazito grupirane. [17]



Također, poznato je kako određene geološke varijable mogu biti u vrlo naglašenoj međusobnoj zavisnosti. Variogramsko modeliranje dopušta nam da neke takve zakonitosti uočimo i uključimo kao povoljne elemente u modeliranje i interpolaciju, na primjer: [17]

1. Pronalaženje osi dominantnoga taložnoga smjera/kanala (smjerova/kanala) te utvrđivanje moguće veze/korelacije rasporeda primarne poroznosti i pružanja kanala.
2. Pronalaženje veze između razdiobe sekundarne poroznosti te osi strukture, tj. smjerova stresa.

Naravno, variogramskom analizom ne mora se utvrditi ni jedna od gornjih pretpostavki, već se može samo odrediti prostorna zavisnost na analiziranome polju, vezana uz puno složenije ili kombinirane geološke međuodnose.

Proračun težinskih koeficijenata ovisi jedino o udaljenosti kontrolnih točaka koje se nalaze unutar variogramskoga elipsoida prostorne zavisnosti. Posebnost načina kojim se definira ta udaljenost dovodi do pojma koji su neki autori nazvali "statističkom udaljenošću", upravo zbog metode kojim se ta udaljenost određuje (variogram, kovarijanca ili korelogram).

Variogram služi da utvrdimo važnost ili utjecaj susjednih točaka na procjenu u odabranoj lokaciji. Njime se računa stupanj autokorelacije mjerenih podataka promatrane varijable.

Naravno, i geostatističke metode imaju svoje nedostatke te je potrebno definirati granične uvjete kada te metode ne predstavljaju poboljšanje, pa čak daju i lošiju ("netočniju") procjenu od drugih, jednostavnijih interpolacijskih metoda. Ta je granica približno određena na 10 ulaznih vrijednosti, jer svaki skup manji od toga čini izotropno variogramsko modeliranje praktično nemogućim, a time i kasniji postupak nevaljanim. Kod jako anizotropnih skupova podataka minimalan broj točaka za primjenu geostatistike penje se na približno 15. Poželjno je kod skupova s malim brojem podataka izbor između geostatističkih i ostalih metoda (npr. inverzne udaljenosti) načiniti na temelju rezultata krosvalidacije. [19]

Postupak kriginga moguće je napisati u obliku umnoška matričnih jednadžbi. Unutar dviju od tih matrica vrijednosti su izražene vrijednošću variograma ili kovarijanca, odnosno ovise o udaljenosti uspoređenih lokacija. Treća matrica sadržava težinske

koeficijente koji se računaju iz prvih dviju spomenutih matrica. Matrična jednadžba simbolično se piše u obliku: [17]

$$[W] \cdot [\lambda] = [B]$$

Metoda kriginga obuhvaća brojne tehnike koje se razlikuju po obliku matričnih jednadžbi, odnosno prema području i vrsti podataka na koje se primjenjuju. To su: [17]

- jednostavni kriging (engl. Simple Kriging): Varijanta kriginga koja podrazumijeva da su lokalne srednje vrijednosti razmjerno konstantne i jednake srednjoj vrijednosti cijele populacije koja je poznata. Populacijska srednja vrijednost upotrijebljena je u svakoj lokalnoj procjeni, načinjenoj iz pripadajućih uzoraka.
- obični kriging (engl. Ordinary Kriging): Tehnika kriginga u kojoj je pretpostavljeno da lokalna srednja vrijednost nije nužno bliska srednjoj vrijednosti ukupnoga broja podataka (kontrolnih točaka). Posljedica je da se pri procjeni upotrebljavaju samo "susjedni" uzorci odnosno oni unutar elipsoida pretraživanja.
- indikatorski kriging (engl. Indicator Kriging)
- univerzalni kriging (engl. Universal Kriging) i
- disjunktivni kriging (engl. Disjunctive Kriging).

Kod jednostavnog kriginga, kao osnovne tehnike, matrična jednadžba napisana u punome obliku, te glasi:

$$\begin{bmatrix} \gamma(Z_1 - Z_1) & \gamma(Z_1 - Z_2) & \dots & \gamma(Z_1 - Z_n) \\ \gamma(Z_2 - Z_1) & \gamma(Z_2 - Z_2) & \dots & \gamma(Z_2 - Z_n) \\ \gamma(Z_n - Z_1) & \gamma(Z_n - Z_2) & \dots & \gamma(Z_n - Z_n) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \lambda_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \gamma(X_1 - X) \\ \gamma(X_2 - X) \\ \gamma(X_n - X) \end{bmatrix}$$

Gdje su:  $\gamma$  - vrijednost semivariograma na udaljenosti dviju točaka;

$\lambda$  - težinski koeficijent za lokaciju 'i';

$Z_1 \dots Z_n$  - mjerene vrijednosti u točkama.

Sve ostale tehnike kriginga imaju dodane neke "faktore ograničenja" (engl. constraint). Time je u potpunosti zadovoljen uvjet da ih se može nazvati najboljim linearnim nepristranim procjeniteljima (engl. Best Linear Unbiased Estimator, skr. BLUE). Međutim, kod jednostavnog kriginga nije ispunjen uvjet da je procjena nepristrana (engl. "unbiased").

### ***3.3.2. Kokriging***

Kokriging, poput kriginga, također obuhvaća nekoliko tehnika procjene u pravilu identičnih tehnikama kriginga (jednostavni kokriging, obični kokriging...). Uvjet za primjenu kokriginga jest uvođenje sekundarne varijable koja je: [17]

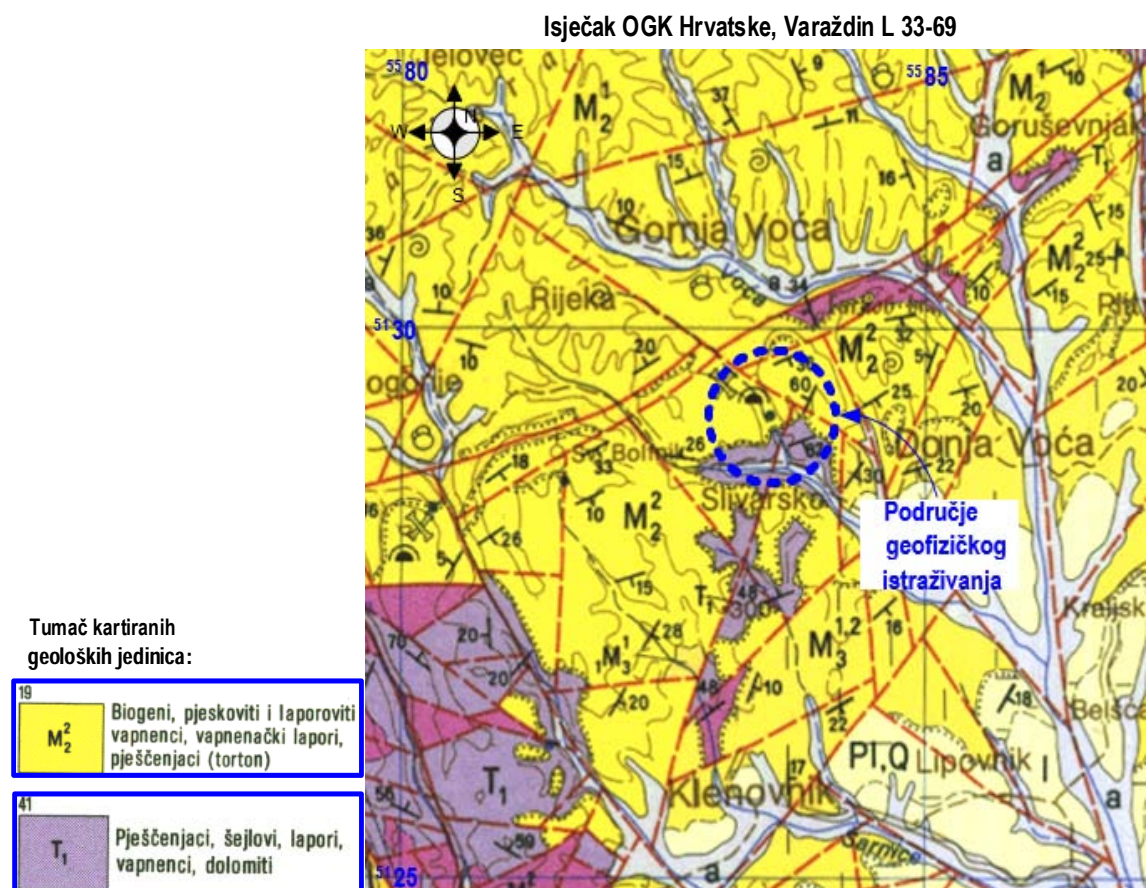
- u smislenoj fizikalnoj vezi s primarnom varijablom,
- puno brojnija,
- snažno korelirana s primarnom varijablom.

Specifičnost metode kokriginga jest postojanje tzv. kolokacijskoga kokriginga, odnosno formiranje dviju skupina istovrsnih matričnih jednadžbi po njihovim veličinama, po jedna skupina za primarnu i sekundarnu varijablu.

## 4. Geološke značajke istražnih lokacija

Špilja Vindija, Slivarsko, Donja Voća (projekt postavljanja zatega i zaštitnih mreža)

Špilja Vindija, (Slika 8) se nalazi u istočnim rubovima Ravne gore. Ta se gora smatra posljednjim ogrankom Alpi, a izgrađena je od karbonata, vapnenaca i dolomita mezozojske starosti i litotamnijskim vapnencima miocenske starosti. Istočni dio pretežito čine gornjo badenski litotamnijski vapnenci podložni značajnijem okršavanju. Samo tijelo gore u manjem dijelu okružuju naslage paleogena, odnosno eocenskih vapnenaca, a u većem dijelu goru okružuju oligocenske naslage pjeskovitih i glinovitih lapora, izmiješane s donjobadenskim pijescima, pješčenjacima, šljuncima, konglomeratima, laporima i glinom. Kvartarne naslage tvore les, fluviojezerski sedimenti, aluvijalni, deluvijalni i proluvijalni sedimenti istaloženi u dolinama rijeka Bednje i Plitvice. Uz samu špilju se nalaze izrazito duboki špiljski sedimenti. [2]

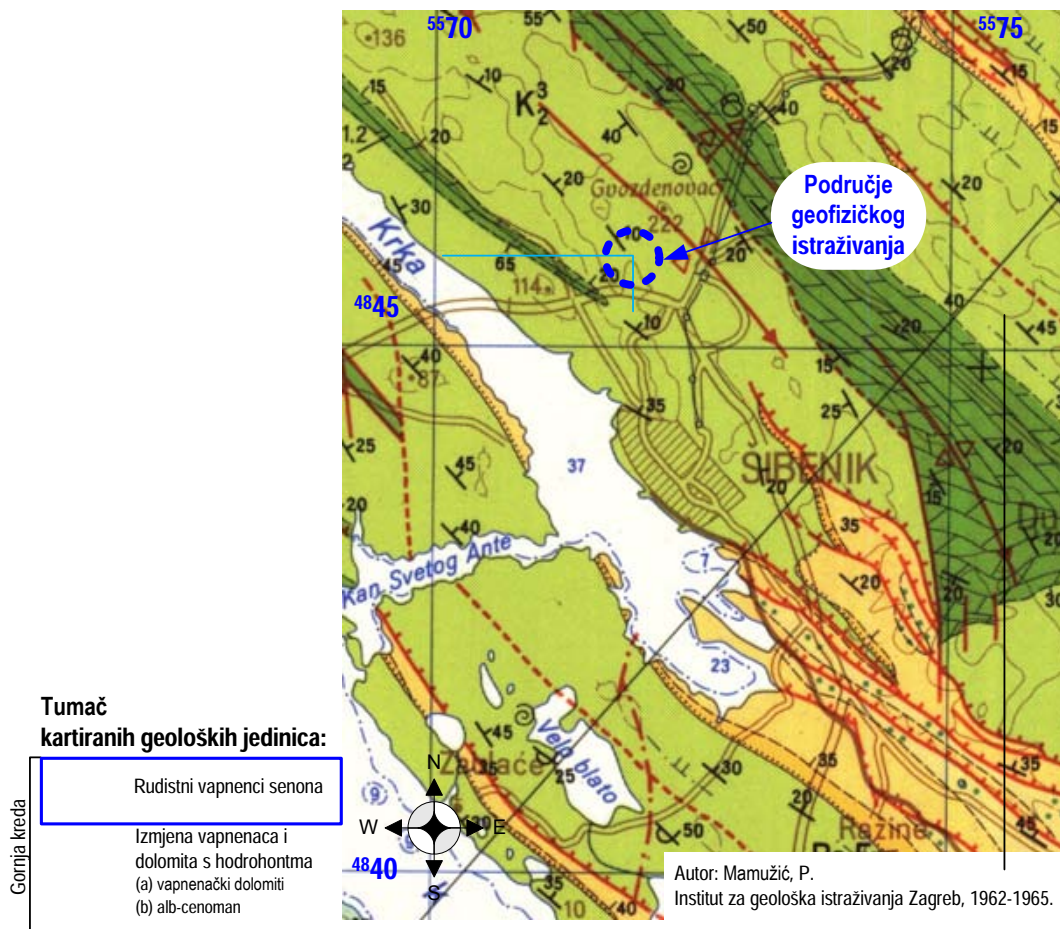


Slika 8 Špilja Vindija: geološke značajke istražne lokacije i okolnog područja

## Naselje Meterize, Šibenik (projekt izgradnje stambenog niza)

Padina naselja Materize, (Slika 9) je izgrađena od karbonatnih naslaga gornje krede. Među njima prevladavaju rudistni vapnenci senona nad vapnencima i dolomitima s hondodontamacenoman-turonske starosti. Dobro uslojeni vapnenci senona s bogatim sadržajem fosila leže kontinuirano na naslagama svijetlosivih do svijetlosmeđih također dobro uslojenih vapnenaca koji se izmjenjuju s ulošcima srednje zrnatog dolomita. U vapnencima senona se pojavljuje mikrofauna, najčešće su to miliolide i tekstularide, ali je puno značajniji udio makrofosilne zajednice pahiodontnih školjkaša-rudista, po kojoj ta gornjo kredna serija naslaga nosi ime. Te se naslage nalaze na južnom krilu sinklinale, a debljina pojedinih slojeva iznosi 20-50 cm. Ukupna debljina cijele serije ovdje se procjenjuje na oko 300 m. Karbonatna građa uvjetuje znatnu propusnost i okršenost terena.

### Isječak iz OGK Hrvatske, K 33-8 Šibenik

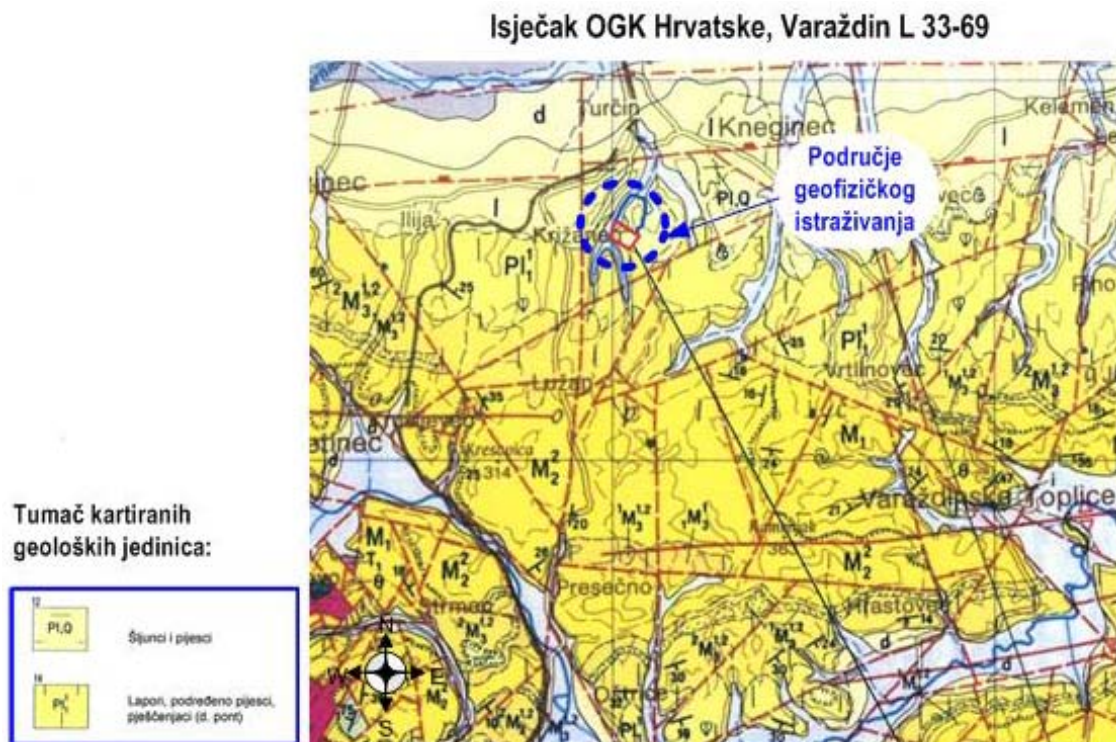


Slika 9 Naselje Meterize: geološke značajke istražne lokacije i okolnog područja

## Glinište Cukavec, Turčin (eksploatacijsko polje ciglarske gline)

Geološka građa ležišta Cukavec, (Slika 10) je uvjetovana geološkim zbivanjima tijekom neogena i kvartara. Istraživano područje je izgrađeno od glinovitih i siltoznih serija unutar kojih se mijenja odnos i raspored pojedinih čestica. One predstavljaju dio lesnih naslaga ovog područja. Naslage lesa su uglavnom gornjopleistocenske starosti. Pretpostavlja se da je ukupna debljina pleistocenskih naslaga do 150,0 m. Debljina lesa od oko 30,0 m u površinskom dijelu.

Ležište Cukavec je tipično ležište sedimentnog porijekla, nastalo tijekom gornjeg pleistocena taloženjem vjetrom transportiranih čestica gline i silta preko različitih članova pleistocenske i neogenske podloge. Les potječe iz praha fluvio-glacijalnih taloga, odnosno muljeva zaostalih nakon poplavlivanja prostranih riječnih dolina, te sušenja tih muljeva nakon povlačenja poplavnih voda. Naslage lesa imaju ujednačen mineralni sastav. Glavni sastojak lake mineralne frakcije je kvarc koji čini prosječno 60 %, a zatim čestice stijena od 25 %.



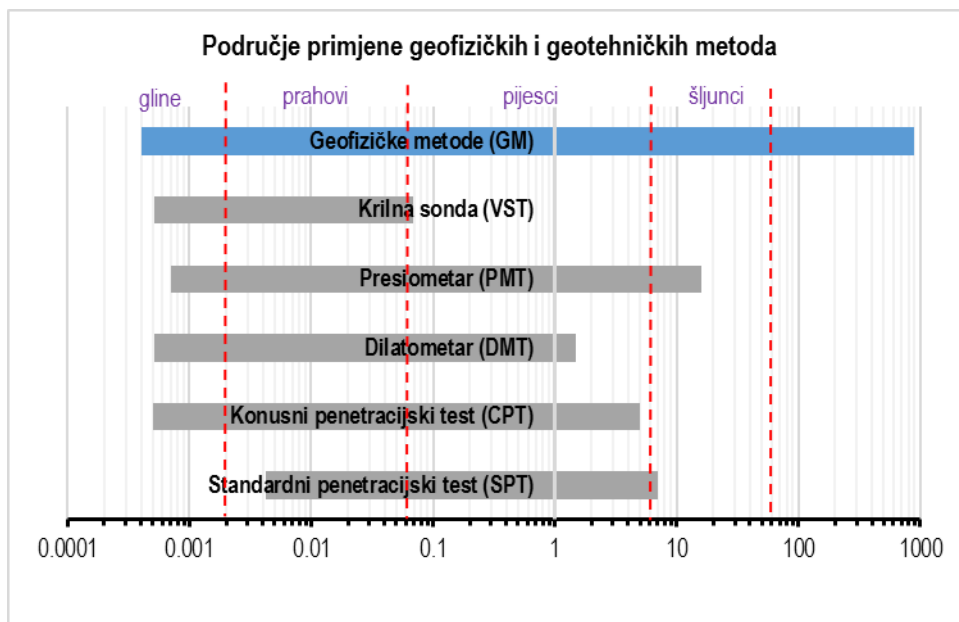
Slika 10 Glinište Cukavec: geološke značajke istražne lokacije i okolnog područja

## 5. Seizmičke metode istraživanja

Geofizičke metode, (Slika 11) istraživanja se sve češće koriste kao komplementarne metode standardnim geotehničkim probama. One su nerijetko jedina alternativa u fazi preliminarnih istraživanja, a koriste se za donošenje odluka o daljnjem programu istražnih radova (zbog dobrog odnosa kvalitete rezultata, trajanja i cijene radova).

Seizmička istraživanja se primjenjuju već gotovo cijelo stoljeće u naftnom rudarstvu, a danas postoji jaka tendencija da se znanja i iskustva istraživanja dubokih horizonata prenesu i primjene u različitim inženjerskim područjima (geoinženjerstvo, potresno inženjerstvo, inženjerstvo okoliša), za istraživanje plitkih površinskih formacija [3]

Primjena seizmičkih metoda u geoinženjerstvu je vrlo značajna, jer jedino te metode omogućavaju parametriziranje inženjerskih svojstava različitih litoloških formacija, odnosno geomedija općenito. Zbog toga su one veoma važne i zanimljive u istraživanju pripovršinskih formacija koje zbog svoje heterogenosti iziskuju specifične koncepte terenskih mjerenja, analiza i interpretacija. Mjerenja se uglavnom izvode s površine terena ili iz bušotina (seizmička karotaža). [4]

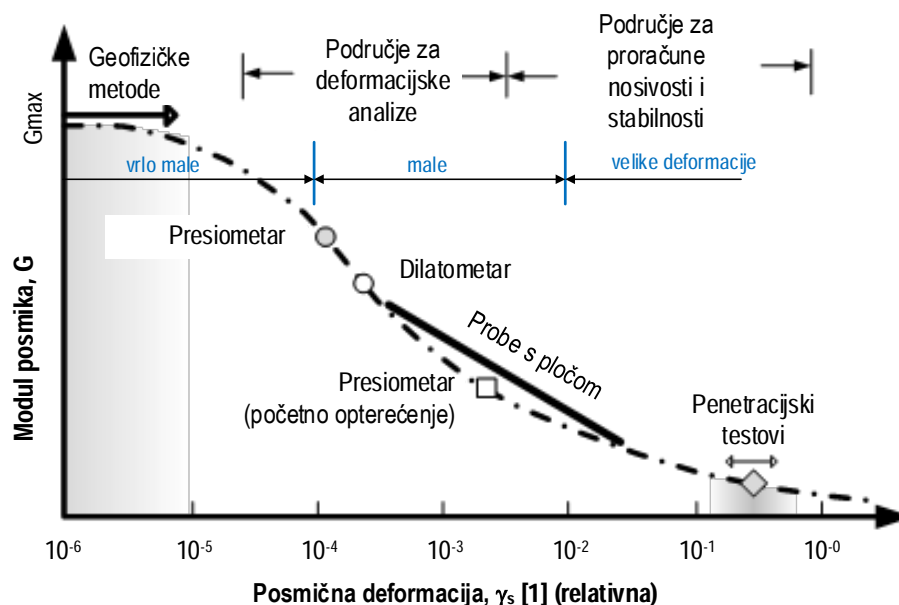


Slika 11 Područje primjene geofizičkih metoda i geotehničkih proba obzirom na veličinu zrna tla (geotehnička klasifikacija tla) [5]

## 5.1. Koncept seizmičkih metoda

Koncept svih seizmičkih metoda se temelji na analizi širenja umjetno izazvanih seizmičkih valova kroz geomedij (tlo i stijene). Valovi se generiraju u takozvanim točkama paljenja na površini ili blizu površine. U plitkoj seizmici se kao izvori koriste udarci čekićem o metalnu ploču, zračna puška ili eksploziv u bušotinama (do 1 m dubine). Već relativno blizu izvora energija seizmičkih valova nije dostatna za nastanak trajnih deformacija. Zapravo su deformacije vrlo male pa se ti valovi smatraju elastičnim valovima. U primjeni seizmičkih istraživanja inicijalno se pretpostavlja da je geomedij homogen i izotropan.

Seizmički valovi se šire kroz tlo u obliku elastičnih deformacija, (Slika 12). Amplituda i vrijeme njihovog dolaska se registrira pomoću senzora (geofona ili hidrofona) smještenih na površini ili u bušotini. Analizom vremena putovanja valova od izvora do geofona (seizmički trag) i podataka o udaljenosti geofona i izvora (geometrija mjerenja) određuje se brzina širenja valova (seizmička brzina). Te brzine ovise o građi, litologiji i stanju na granicama različitih geomedija. Promjene brzina obično se podudaraju s geološkim kontaktima pa se na temelju granica brzina može konstruirati inženjersko-geološki ili geotehnički model.



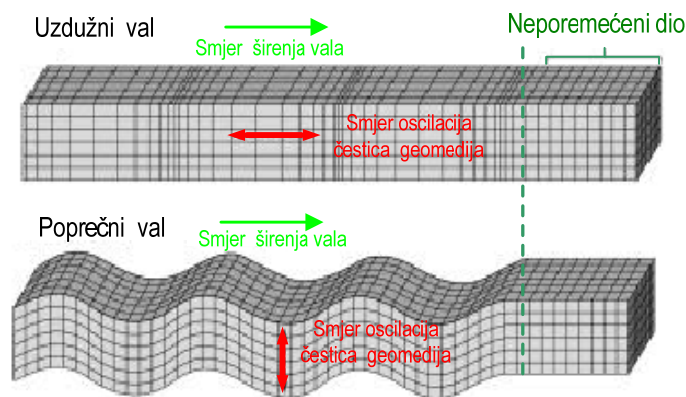
Slika 12 Područje primjene geofizičkih metoda i geotehničkih proba obzirom na veličinu relativne posmične deformacije [6]



### 5.1.1. Vrste seizmičkih valova

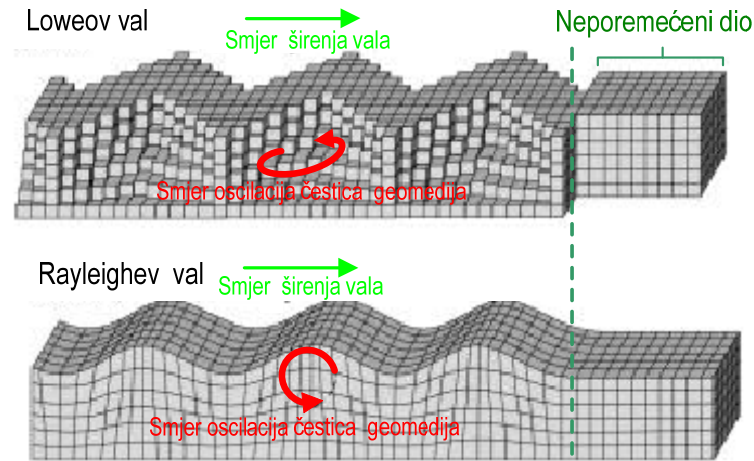
Izvor seizmičkog vala je dinamičko opterećenje na površini ili u unutrašnjosti geomedija (primjerice potres ili pad utega). Seizmički valovi su po svojoj prirodi tranzijentni i sadrže široki spektar frekvencija, no u praksi je opravdano seizmičke valove smatrati harmonijskim. Poznavanje osnovnih principa koji opisuju iniciranje, širenje, prigušenje i interakciju seizmičkih valova s geološkim medijem je važna zadaća u oblikovanju geotehničkih modela.

Seizmički valovi u neograničenoj elastičnoj sredini mogu biti dvojaki:  $P$  uzdužni ili kompresijski i  $S$  poprečni ili posmični.  $P$  valovi su longitudinalni kao valovi zvuka, dok su  $S$  valovi transverzalni i polarizirani kao elektromagnetski valovi. Uzdužni  $P$  valovi opisuju promjenu volumena medija. Budući da volumen može mijenjati svako tijelo, uzdužni se valovi šire kroz sve medije u bilo kojem agregatnom stanju.  $P$  valovi izazivaju progresivna i regresivna gibanja čestica na pravcu širenja. Imaju najveću brzinu širenja i značajni su za seizmička istraživanja. Na granici dvaju sredina,  $P$  val se reflektira i lomi kao  $P$  val i vertikalno polarizirani posmični  $SV$  val (čestice se gibaju vertikalno na smjer širenja u ravnini okomitoj na granicu medija). Horizontalno polarizirani  $SH$  val se na granici dvaju medija reflektira i lomi samo kao horizontalno polarizirani, pa je analiza takvih valova značajna za određivanje elastičnih konstanti materijala, (Slika 13). Svi posmični  $S$  valovi ( $SV$  i  $SH$ ) nastoje promijeniti oblik medija kroz koji se šire djelujući posmično. Svojtveni su samo za čvrste medije (jedino oni imaju posmičnu čvrstoću) pa su važni za istraživanja u geoinženjerstvu.  $P$  i  $S$  valove generira gotovo svaka seizmička pojava.



Slika 13 Seizmički valovi u neograničenoj elastičnoj sredini.

Površinski, (Slika 14) se valovi mogu eliptički i retrogradno prostirati okomito na smjer širenja u horizontalnoj ravnini (L-Loweovi valovi) ili u smjeru širenja u horizontalnoj i vertikalnoj ravnini istodobno (R-Rayleighevi valovi).



Slika 14 Površinski seizmički valovi uz granicu elastične sredine.

## 5.2. Vrste i primjena seizmičkih metoda u geoinženjerstvu

Seizmičke metode u osnovi znače mjerenje, registriranje amplitude seizmičkog vala u vremenu za različite geometrije izvor-senzor. Iz tih se tragova izdvajaju vremena prvih nailazaka ili se promatra razlika u fazi pri dolasku vala na različite senzore. Širenjem kroz geomedij seizmička energija se prigušuje, transmitira, reflektira i/ili refraktira. Pri tome se pretpostavlja da valne zrake na granicama geomedija različitih fizičko-mehaničkih svojstava (gustoća i moduli elastičnosti) zadovoljavaju osnovne zakone optike (naročito Snellov zakon o jednakosti omjera brzina na granicama i omjera sinusa upadnog i kuta refleksije). [13]

Unatoč svim uvedenim pojednostavljenjima i ograničenjima, seizmičke metode se vrlo često koriste za terenska istraživanja vrsta i stanja geomedija, jer osim stratigrafije omogućavaju korektne procjene inženjerskih parametara, (Tablica 1), koji su potrebni za projektiranje geotehničkih konstrukcija. Određivanje dinamičkih konstanti i elastičnih svojstava seizmičkim metodama je danas u praksi vrlo ustaljeno, jer in situ istraživanja obuhvaćaju prirodno stanje naprezanja i deformacija u geomediju.

Tablica 1 Inženjerske konstante elastičnosti

Naziv	Oznaka	Definicija	Dimenzija
Modul elastičnosti (Youngov modul)	E	$\frac{\text{Normalno naprežanje}}{\text{Normalna deformacija}}$	[Pa]
Modul posmika (Posmični modul)	G	$\frac{\text{Posmično naprežanje}}{\text{Posmična deformacija}}$	[Pa]
Modul kompresije (Obujamski modul)	K	$\frac{\text{Hidrostatsko naprežanje}}{\text{Volumna deformacija}}$	[Pa]
Poissonov koeficijent	$\nu$	$\frac{\text{Normalna deformacija}}{\text{Posmična deformacija}}$	[1]

Tablica 2 daje pregled seizmičkih in situ i laboratorijskih metoda koje se koriste u geoinženjerstvu. Prednosti in situ metoda su u činjenici da se mjerenja provode pri prirodnom i neporemećenom stanju efektivnih naprežanja. Primjena seizmičkih metoda se najčešće odnosi na: istraživanje i određivanje svojstava geomedija, predviđanje mehaničkog ponašanja u određenim uvjetima i kontrolu izvedbe inženjerskog zahvata.

Tablica 2 Vrste seizmičkih metoda prema mjernom parametru i primjeni.

Metode	Mjereni parametar i primjena metode
Neinvazivne površinske in situ metode	
Refrakcija	Brzine P i S valova. Dubina osnovne stijene. Stratigrafija. Moduli elastičnosti.
Refleksija	Brzina P i S valova. Stratigrafija.
Spektralna i višekanalna analiza površinskim valovima	Brzina površinskih valova. Stratigrafija. Disipacija seizmičke energije.
Neinvazivne in situ metode na vodama	
Refleksijsko profiliranje	Brzina P valova. Profiliranje dna i dubine do geoloških formacija.
Sonarno skeniranje	Brzina P valova. Profiliranje dna i formacija ispod dna.
Minimalno invazivne in situ metode s površine i iz bušotine	

"Up-Hole", "Down-Hole"	Prostorne promjene brzina valova. Detekcija anomalija. Moduli elastičnosti.
Istraživanja u jednoj bušotini	
Zvučna karotaža	Brzina P i S valova. Porozitet. Moduli elastičnosti.
Mjerenja brzina P i S valova u suspenziji	Brzina P i S valova. Vertikalno seizmičko profiliranje. Detekcija anomalija. Moduli elastičnosti.
Seizmički penetrometar	Brzine seizmičkih valova. Stratigrafija. Kontaktna područja.
Međubušotinske metode	
"Cross-Hole"	Prostorne promjene brzina valova. Detekcija anomalija. Moduli elastičnosti.
Seizmička tomografija	Prostorne promjene brzina valova. Detekcija anomalija. Moduli elastičnosti.
Laboratorijska ispitivanja	
Seizmička metoda	Brzina P i S valova. Moduli elastičnosti. Detekcija mikropukotina.
Rezonantna metoda	Brzina P i S valova. Moduli elastičnosti. Detekcija mikropukotina.
Akustična emisija	Brzina P vala. Strukturni pomaci.

### 5.2.1. Seizmičke in situ metode

Za izvođenje seizmičkih mjerenja treba raspolagati s izvorima i sensorima seizmičkih valova te instrumentom za primanje, obradu i spremanje signala. Tehnika seizmičkih mjerenja se temelji na generiranju seizmičkog vala (impulsno ili kontinuirano) u točki izvora na površini terena ili u bušotini, te na analizi tragova seizmičkih poremećaja koje registriraju geofoni (ili neki drugi seizmički senzori) postavljeni na površini ili u bušotini. Općenito, za bilo koju seizmičku metodu izbor položaja izvora i detektora treba biti takav da omogućava dovoljan vremenski interval za korektnu registraciju svih potrebnih parametara seizmičkih tragova (vrijeme prvog nailaska, maksimalna amplituda, trajanje i frekvencija poremećaja). Seizmičke metode koje se najčešće primjenjuju su uglavnom površinske i bušotinske. [14]

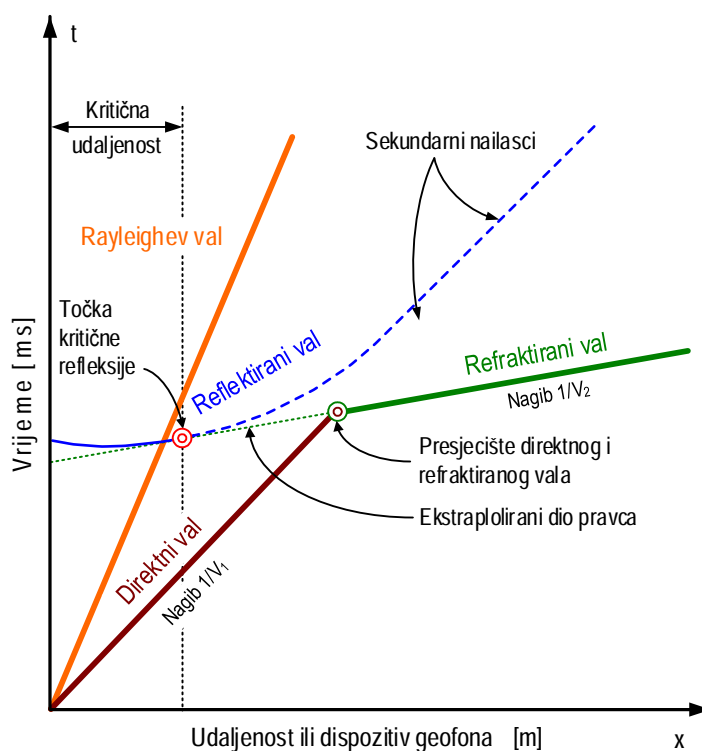
U površinske metode se ubrajaju:

- Seizmička refrakcija
- Seizmička refleksija
- Spektralna analiza površinskih valova
- Višekanalna analiza površinskih valova

Bušotinske metode (eng. Hole) jesu:

- Niz bušotinu / Uz bušotinu
- Između bušotina
- PS mjerenje u suspenziji
- Seizmički penetracijski pokus
- Zvučna karotaža

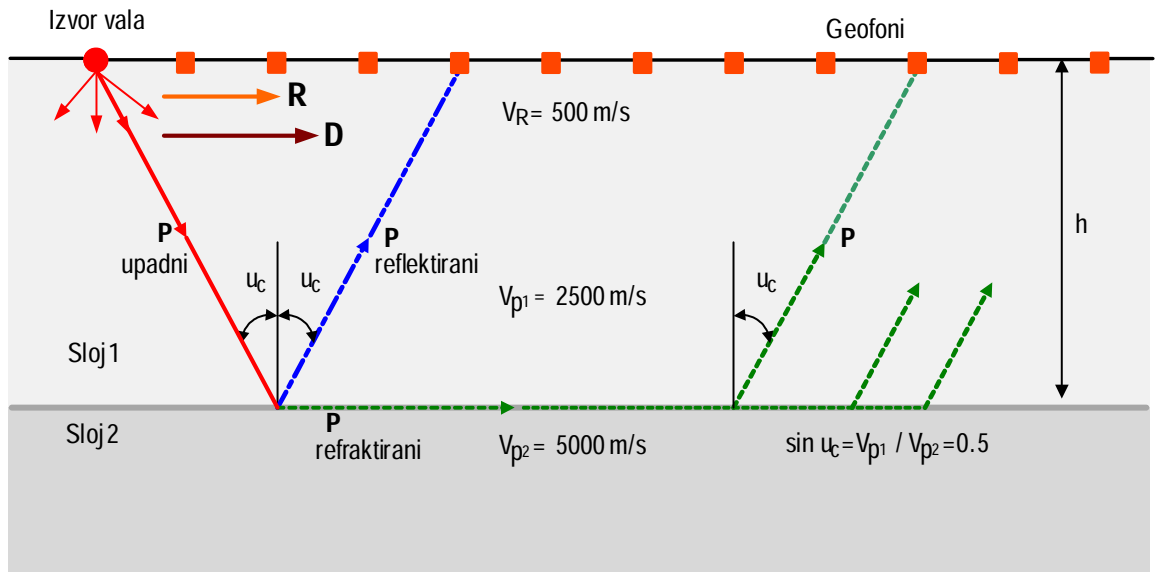
Osnovni oblik prezentacije seizmičkih mjerenja je dijagram udaljenost-vrijeme ( $x-t$  dijagram). Na jednostavnom dvoslojnom primjeru homogenih sredina, (Slika 15), prikazana je pojednostavljena priroda seizmičkih događaja. Rayleighov val (eng. ground roll) i direktan  $P$  val su prikazani pravcima koji izvire iz ishodišta koordinatnog sustava, šire se samo kroz gornji površinski sloj, a vrijeme nailaska do nekog geofona je proporcionalno njihovoj udaljenosti od izvora (ishodišta). Nailasci vala reflektiranog od granice dvaju slojeva leže na hiperboli. Do točke kritične refleksije nema pojave loma vala koja se događa kada kut upada na granicu dosegne određenu (kritičnu) vrijednost (u toj točki pravac refraktiranog vala zapravo tangira refleksijsku hiperbolu). Nakon te točke je vrijeme nailaska refraktiranog vala uvijek manje od vremena nailaska reflektiranog vala. Promjena događaja ponovo slijedi na nekoj udaljenosti kada refraktirani val prestiže direktni val (presjecište pravaca tih dvaju valova).



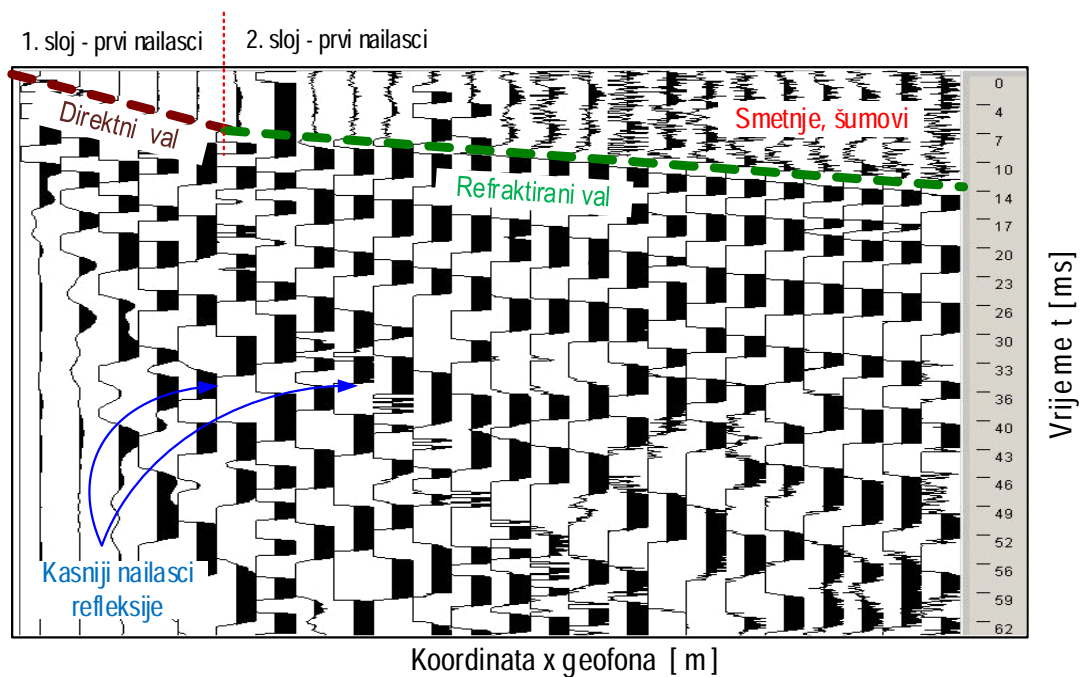
Slika 15 Dijagram udaljenost - vrijeme.

### 5.3. Seizmička refrakcija

Metoda seizmičke refrakcije se često koristi za terenska istraživanja dinamičkog ponašanja geomedija i određivanje projektnih modula elastičnosti (jer omogućava određivanje seizmičkih brzina kao funkcije dubine). Brzina vala i debljina svakog sloja se može odrediti uz uvjet konstantne progresije seizmičke impedancije s dubinom. U provedbi metode se nastoji precizno mjeriti vrijeme nailaska  $P$  ili  $S$  (H) vala generiranih iz izvora u neposrednoj blizini površine terena. Generirani valovi se šire kroz geomedij do niza geofona raspoređenih na određenim razmacima duž orijentiranog pravca (refrakcijskog profila, Slika 16).  $P$  valovi imaju veću brzinu i stižu ranije do geofona, a uglavnom prekrivaju i zasjenjuju nailazak kasnijih poprečnih  $S$  valova. U praksi je vrlo teško istovremeno determinirati nailaske  $P$  i  $S$  valova. Preciznije, vrlo je teško točno razlučiti vrijeme nailaska  $S$  vala, na istom zapisu seizmičkog poremećaja, ako je izvor po obliku bio kompresijski. Detekcija nailazaka prvih poremećaja na nizu postavljenih geofona se uvijek odnosi na direktni val ili na refraktirani val (Slika 17).



Slika 16 Princip istraživanja geomedija seizmičkim valovima.



Slika 17 Registracija nailaska seizmičkog vala.

Pažnja pri mjerenju je usmjerena samo na pojavu prvih nailazaka seizmičke energije, pa se odnos udaljenosti izvor-geofon ( $x$ ) i vremena nailazaka ( $t$ ) koristi za interpretaciju debljine i brzine refraktorskih slojeva. Takav princip se uspješno može primijeniti samo za relativno jednostavne podpovršinske uvjete. Za interpretaciju i model odnosa seizmičkih brzina i dubina geomedija se najčešće koristi poopćena recipročna metoda (GRM), kojom se mogu odrediti slojevi varijabilnih debljina i brzina. Prednosti metode

izviru iz recipročnog mjerenja vremena kada se seizmički valovi iniciraju s obje strane profila, te korektnog modela proračuna dubine i za veće upadne kutove, (do 20°; [7]).

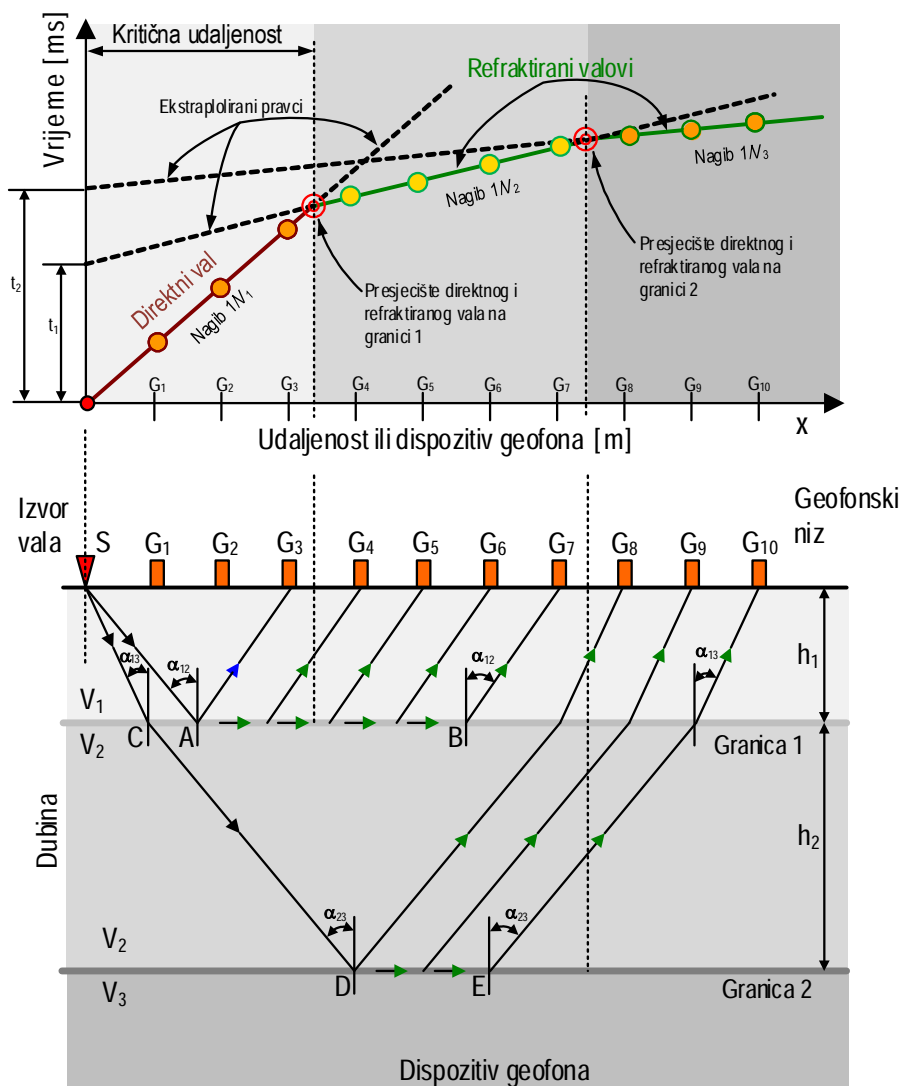
Primjena refrakcije, ovisno o dubini istraživanja, može se podijeliti u tri grupe: plitka, duboka i vrlo duboka istraživanja. Plitka istraživanja od nekoliko metara do više desetaka metara primjenjuju se u geoinženjerstvu, geotehnici, hidrogeologiji, inženjerskoj geologiji i istraživanju mineralnih sirovina. U inženjerskoj geologiji istražuju se debljine površinskih obično trošnih zona, dubine do kompaktnih slojeva, pukotinske i rasjedne zone u kojima su brzine manje nego u stijenskoj masi. Dubina i paleoreljef svježe stijene (eng. bedrock) se vrlo uspješno određuje refrakcijskom seizmikom.

U istraživanju ležišta građevinskih materijala, kamenoloma i šljunčara, refrakcijska istraživanja mogu biti vrlo učinkovita. Mogu se razlučiti različite vrste stijena i razgraničiti zone s kompaktnim stijenama i zdrobljene zone. Na taj se način usmjerava proširenje kamenoloma i određuje količina jalovine. U hidrogeologiji su istraživanja usmjerena na određivanje zona većih poroznosti u kojima dolazi do smanjivanja seizmičkih brzina, osobito u krškim terenima gdje je voda vezana uz pukotinske i rasjedne zone.

Najveće ograničenje primjene seizmičke refrakcije je nemogućnost detektiranja tankih slojeva male brzine između slojeva većih brzina. Pri detekciji razine vodnog lica treba obratiti pažnju na činjenicu da brzina  $P$  vala iznad i ispod razine podzemne vode ovisi o stupnju saturacije tla, dok je brzina  $S$  vala o tome neovisna.

Refrakcijska metoda ne zahtijeva nikakve dodatne popravke pri obradi podataka. Međutim, na terenima s izrazitim reljefom potrebno je korigirati vremena nailazaka za razliku visine pojedinog geofona od odabrane referentne razine. Dubina zahvata ovisi o namjeni i cilju istraživanja, dubini i debljini slojeva i geološkoj građi terena. Okvirno se može smatrati da je za dubinu zahvaćanja od 10 m potrebno postaviti profil duljine 50 do 100 m, s izborom odgovarajućeg izvora. Nakon formiranja  $x-t$  dijagrama s regresijskim pravcima, (Slika 18), počinje interpretacija: određivanje dubine i oblika granica pojedinih slojeva i njihove seizmičke brzine. Početni model uvijek predstavlja slučaj s paralelnim granicama geomedija.





Slika 18 Dijagram udaljenost – vrijeme i refrakcija na paralelnim granicama.

Refrakcijskom metodom mogu se dobiti dubine do granice s preciznošću  $\pm 10\%$ . No postoje primjeri u kojima *x-t dijagram* ne pruža potpune informacije o granicama, pa su u tom slučaju i pogreške mnogo veće. Ako jedan od slojeva ima brzinu manju od sloja iznad njega, val se lomi prema okomici, zbog čega nema pojave refraktiranog vala. Takav se sloj naziva slijepi sloj. Utjecaj slijepog sloja se može korigirati samo ako se raspolože podacima o njegovu postojanju iz neke bušotine ili iz drugih izvora, odnosno ako se dispozitivom zahvati glavni refraktor (svježa stijena koja sigurno ima veće brzine od trošnjih nadslojeva).

Ako se u seriji slojeva nalazi jedan tanak sloj u usporedbi s njegovom dubinom, može se dogoditi da ga se prvim nailascima uopće ne može otkriti. Zbog toga se pristupnost takvog sloja može utvrditi tek na kasnijim nailascima, pa ga se naziva skrivenim slojem.

U sedimentnim stijenama brzina uglavnom postupno raste s dubinom zbog različitog stupnja kompakcije. Može se pretpostaviti neizmjeran broj neizmjerano tankih slojeva, drugim riječima kontinuirani porast brzine s dubinom. Pri interpretaciji treba uzeti u obzir da se brzine mogu mijenjati i uzdužno i lateralno, a ne samo po dubini. Tablica 3 sadrži vrijednosti brzina  $P$  valova u različitim geološkim sredinama prema različitim autorima. Prema konvenciji geofizičara, upravo se brzine određene seizmičkom refrakcijom podrazumijevaju kao seizmičke brzine.

Oprema za plitka refrakcijska istraživanja je relativno jednostavna. Koriste se geofoni s nižom rezonantnom frekvencijom, obično oko 10 Hz. Osnovni cilj je snimanje seizmičkog vala s jasnim prvim nailascima na geofone. Ti nailasci moraju biti oštri i jasni. Pri radu s čekićem udarci se zbrajaju, sve dok se nedvosmisleno ne ustanovi vrijeme prvih nailazaka. Nakon očitavanja tih vremena iz seizmograma, vrijednosti se unose na  $x-t$  dijagram. Povlače se pravci koji najbolje aproksimiraju izmjerene vrijednosti (postupak linearne regresije).

Tablica 3 Brzine  $P$  valova u nekim geomedijima.

<b>Autor</b>	<b>Koloski, 1987</b>	<b>Anon, 1995</b>	<b>Parasnis, 1997</b>	<b>Ostali</b>
Geomedij	Brzine kompresijskih $P$ valova [m/s]			
Površinski materijali	-	-	-	100 ÷ 600
Pijesak	300 ÷ 1200	400 ÷ 1000	200 ÷ 1000	300 ÷ 800
Pijesak, saturiran vodom	1100 ÷ 1800	-	1500 ÷ 2000	1500 ÷ 2700
Šljunak	500 ÷ 1500	-	300 ÷ 2000	300 ÷ 800
Šljunak, saturiran vodom	1500 ÷ 2200	-	1500 ÷ 2000	1500 ÷ 2700
Glina i prah	-	300 ÷ 1800	1000 ÷ 2500	1100 ÷ 2500
Glina, saturirana vodom	-	-	1500 ÷ 2500	-
Lapor	-	-	-	1800 ÷ 2500
Vapnenac	-	500 ÷ 6700	3500 ÷ 6500	2000 ÷ 6100
Dolomit	-	-	3500 ÷ 6500	-
Rastrošena stijena	-	300 ÷ 3000	-	-

Kao izvor seizmičke energije uglavnom se koristi udar čekića (od 5 do 10 kg) po metalnoj ploči postavljenoj na tlo, eksploziv u plitkim bušotinama i pad utega određene mase. Mjerenja se obavljaju uglavnom duž profila. Moguća su i mjerenja s rasporedom geofona u lepezi, trokutu, luku i dr. koja se primjenjuju za posebne zadatke. Za svaki raspored geofona, iniciranje seizmičkog vala se izvodi neposredno uz postavljeni geofonski raspored s obje strane, te s udaljenih točaka paljenja (eng. offset), ovisno o dubini istraživanja.

#### **5.4. Plitka refrakcijska tomografija (Near Surface Seismic Refraction Imaging, NSSRI)**

GRM je bila najbolja konvencionalna interpretacijska metoda prije ere tomografskog modeliranja; a omogućavala je uvid u proceduru obrade koja se teško vidi u zatvorenim programskim paketima za refrakcijsku tomografiju. Konvencionalne metode interpretacije pretpostavljaju uslojeni model tla (4-5 slojeva) u kojem su slojevi sub-horizontalni (nagib  $<10^\circ$ ), a struktura brzina je relativno jednostavna (nema naglih skokova brzine). U složenijim geološkim uvjetima postoje veći nagibi i diskontinuiteti refraktora te velike lateralne promjene brzina, modeliranje koje pretpostavlja kontinuirani gradijent brzina daje realnije rezultate. [10]

Danas postoje programski paketi koji koriste metode konačnih elemenata ili konačnih razlika (MKE ili MKR, eng. FEM, FDM) da bi se prostor automatski modelirao obzirom na varijacije gradijenata brzine. Na taj se način izbjegavaju inicijalne pretpostavke o fizičkoj strukturi geomedija. Prvi nailasci se koriste za postavljanje modela brzina koji najbolje aproksimira (eng. best-fit) izmjerene podatke i to tako da se uspoređuju iterativno sintetički nailasci s onim stvarno izmjerenim. U modelu se biraju na određeni način različite distribucije brzina s ciljem konvergencije modela u najbolje aproksimativno stanje koje se mjeri razlikama prvih nailazaka. Takav pristup interpretaciji se naziva refrakcijska tomografija. Potpuna usklađenost sintetičkih i izmjerenih nailazaka "nikada" nije moguća. Štoviše, za razliku od konvencionalnih metoda koje traže neku razinu poznavanja geoloških uvjeta kao i seizmičkih principa, automatsko modeliranje polja brzina bez naše intervencije svakako treba uzimati s maksimalnim oprezom. Razlika

stvarnih i sintetičkih pikova je realna za svaki programski paket, ali joj stvarno značenje treba prepisati interpretator.

Bez obzira na sofisticiranost tomografskih programa, uvijek je isplativa usporedba rezultata jedne metode interpretacije u odnosu na drugu. Ipak, trebaju se međusobno uspoređivati interpretacije iste klase: konvencionalne ↔ konvencionalne, tomografske ↔ tomografske. U svakom slučaju, diskrepancije trebaju imati realna objašnjenja pa je konačna interpretacija uvijek presjek interpretacija po dijelovima u kojima su one realističnije. Posebno u uvjetima složenih geoloških formacija i struktura. Postoje različite metode interpretacije, ali su tek malobrojne našle odgovarajuću primjenu i svrhu u inženjerskoj praksi, (Tablica 4).

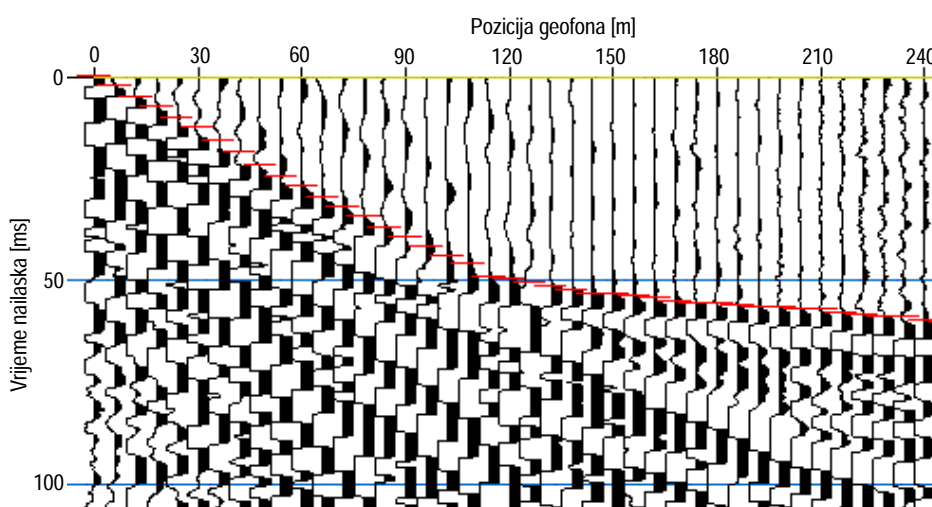
Metode Wavepath Eikonal Traveltime Inversion (WET) i Eikonal Solver (ES) su donijele potpuni zaokret u pristupu rješavanja inherentnih ograničenja metode seizmičke refrakcije (posebno pojave inverzije brzina). Temelje se na Two-Way-Travel-Time (TWTT) kalkulacijama (Ray-tracing methods, [8]) unutar regularne mreže brzina, pa nema poznatih restrikcija obzirom na kontraste seizmičkih brzina. Model TWTT se gradi sloj po sloj brzina kako bi se formirao niz refraktora, a mapiranje se potom provodi obzirom na svaki prepoznat i određen refraktor posebno. Takvim je načinom moguće u interpretaciju integrirati utjecaj topografije i moguće lateralne varijacije brzina.

Metoda ili tehnika inverzije (iz x-t dijagrama se dobije konturni V-H dijagram brzina-dubina; Inversionrefraction problem, [9]) se smatra pogodnom za istraživanje plitkih geoloških formacija gdje se ne očekuje veliki broj slojeva. Inverzija se temelji na inverziji vremena širenja seizmičkog poremećaja kroz geomedij izmjerenog duž postavljenog profila na površini, (Slika 19).

Tablica 4 Poznatije metode za interpretaciju seizmičke refrakcije.

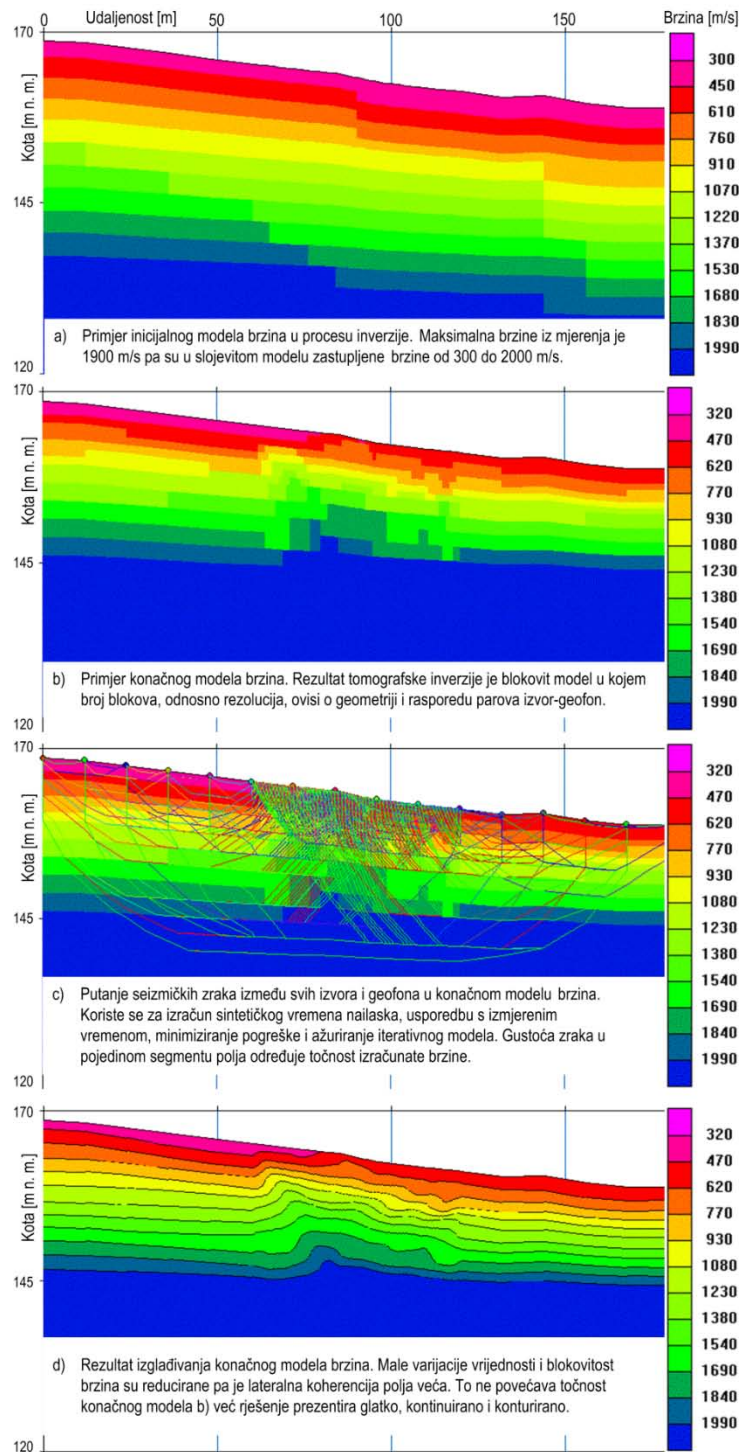
Naziv metode	Oznaka	Autor(i)	Godina
GeneralizedReciprocalMethod	GRM	Palmer	1981.
TraveltimeEquation T-P Mapping InversionofCommonMidpoint Data	TTE TPM CMPI	Diebold&Stoffa	1981.
Ray InversionMethod WavefrontMethod	RIM WFM	Jones &Jovanovic	1985.

Delta-t-V Method	tV	Gebrande& Miller	1985.
TraveltimeFieldInterpretation	TTFI	Brueckl	1987.
WavepathEikonalTraveltimeInversion EikonalSolver	WET ES	Schuster&Quintus- Bosz Watanabe	1993. 1999.
AmplitudesinSeismicRefractionInversion	ASRI	Palmer	2003.
T-P Transformation for VelocityImaging	TPT	Barton&Barker	2003.
SmoothInversionMethod	SIM	Sheen at all	2005.



Slika 19 Nailasci ili vremena prvih nailazaka refraktiranih valova do pojedinog geofona u seizmičkom profilu.

Primjenom teorije širenja seizmičkog vala, iz tih se podataka može generirati model ili profil brzina. Mapiranje moguće ako su zadovoljene dvije pretpostavke: 1. elastična svojstva formacija pod površinom su dovoljno različita i 2. brzina propagacije vala raste s dubinom (preduvjet refrakcije). Rezultat inverzije treba biti optimalna slika distribucije seizmičke brzine  $V$  s dubinom  $H$ , (Slika 20). Naravno, distribucija zahtijeva i geološku interpretaciju da bi se ustanovilo stvarno značenje brzina, (Slika 21). Slikanje (tomografija) seizmičke sredine je slojevita procedura. Započinje s najvećim brzinama i odozdo, a potom se na svaku prethodnu boju/brzinu seizmičkog sloja nanosi boja/brzina novog sloja sve do površine.

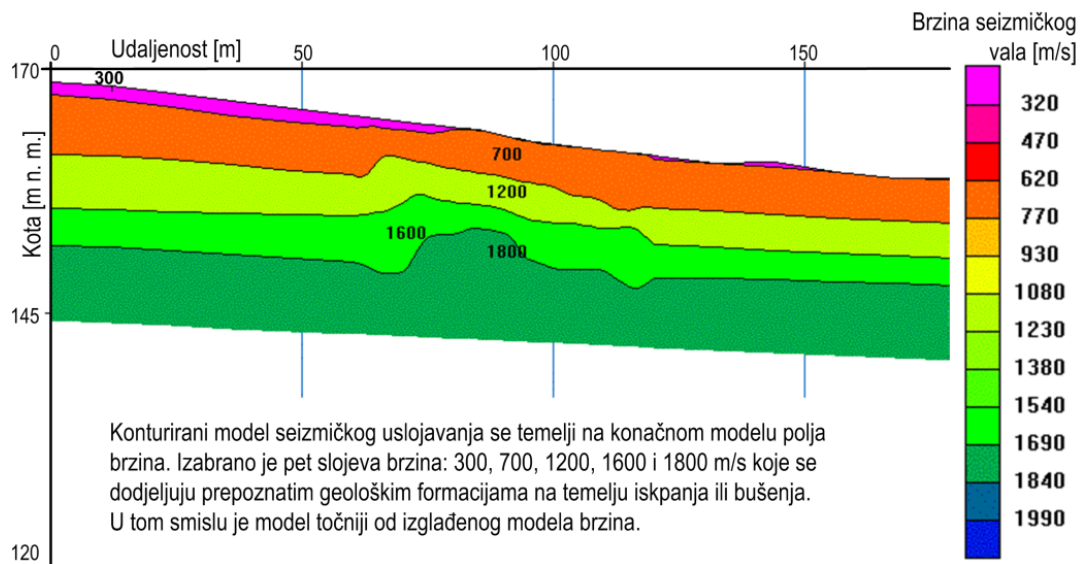


Slika 20 Postupak interpretacije tomografskom inverzijom [10]

Svaka slika predstavlja određenu fazu nakon inverzije  $x-t$  prostora u  $V-H$  prostor.

Tako su zadovoljena oba preduvjeta za primjenu tomografije, ali je moguće zamijetiti i locirati anomalije i inverzije brzine, koje mogu biti posljedica postojanja stvarnih geoloških struktura (izdvojena tijela, međuslojevi, leće). Tomografiju se najprimjerenije može definirati kao proces izrade slike na temelju najbolje aproksimacije izmjerenih

podataka minimiziranjem pogreške. Presentacija rezultata tog procesa donosi mnogo više informacija o geomediju u odnosu na rezultate konvencionalnih metoda. Ipak, važno je biti svjestan da je ta slika vrlo, vrlo pojednostavljena. Osim toga, prednost tomografije je mogućnost da se rezultati istražnih radova (iskop, sondiranje ili bušenje) uvedu u proces inverzije. Stvarne vrijednosti dubine, debljine i položaj granica slojeva smanjuju pogreške, a ubrzavaju i korigiraju model seizmičkih brzina.



Slika 21 Seizmička slika nakon geofizičke i geološke interpretacije [10]

Temelji se na prethodnom poznavanju litoloških elemenata pod površinom.

### 5.5. Geostatistička interpolacija seizmičkih brzina

Krigiranje je zapravo geostatistička metoda interpolacije, koja se međutim pokazala realnom u formiranju slike seizmičkih brzina. Ovdje ta metoda omogućava postavljanje pravilne mreže ćelija iz nepravilno raspoređenih putanja seizmičkih zraka. Primjenjiva je jer ne mijenja njihove parametre tijekom kalkulacije (ulazni podaci su fiksirani), a može se koristiti na širokom skupu vrijednosti. Danas je gotovo nezaobilazna u programima za interpretaciju mjerenja refrakcijskih brzina bilo  $P$  bilo  $S$  valova.

Iz polazne pretpostavke porasta brzina s dubinom te činjenice da se u okoline neke točke brzine ne mijenjaju skokovito (osim na geološkim granicama ili na diskontinuitetima), primjenom variograma i krigiranja se poboljšava kvaliteta interpretacije, povećava se rezolucija i detektiraju se anomalije inverznih i skrivenih slojeva. Naravno, pretpostavlja

se također da je dubina zahvata pri konfiguraciji profila bila takva da se lokano dosegnuo glavni refraktor (litološka formacija iznad čije gornje konture svi nad-slojevi imaju manje brzine). Refrakcijska tomografija se tako temelji na variogramu i krigiranju pri čemu slika nastaje odozdo prema gore (od glavnog refraktora prema površini). Ograničenja fenomena seizmičke refrakcije su zadovoljena, a k tome se mogu detektirati i različite seizmičke anomalije iznad glavnog refraktora.

Wavepath Eikonal Traveltime Inversion (WET) i *Delta-t-V* su (matematičke) metode inverzije koje se koriste u različitim programima za refrakcijsku tomografiju (npr. Rayfract, Intelligent Resources Inc.). Inverzija vremena iz *x-t dijagrama* u *V-H* seizmičku sliku brzina (*V*) po dubini (*H*) međutim ne pokriva cijeli istražni prostor (primjerice 2D seizmički presjek), već samo u pojedinim točkama koje formiraju putanje. Putanje seizmičkih valova iz svih izvora do svih geofona se konstruiraju izabranom inverzijom (WET, ES ili gradijentnom), da bi se izračunata vremena usporedila s izmjerenim nailascima. Nakon toga se konstruiraju konture glavnog refraktora i granice pojedinih seizmičkih sredina. Te se metode shvaćaju kao "čisto geofizičke", jer se temelje na matematičkim izrazima koji opisuju širenje seizmičkog poremećaja. Rezultati te primarne interpretacije daju vrijednosti brzina samo u određenom broju točaka (slika seizmičkih putanja ili pokrivenost prostora). Takva slika se uzima kao korektna u fizikalnom smislu, ali izuzetno gruba i slabo senzibilna s obzirom na moguće seizmičke anomalije.

Sljedeći korak je procjena (ili razmazivanje) sintetičkih brzina izvan konstruiranih putanja u takozvane prazne ćelije slike. Točnost izračunatih brzina u ćelijama (poznate su dimenzije ćelija koje predstavljaju piksele seizmičke slike, a procjenjuje se vrijeme prolaska seizmičkog vala) ovisi o broju ili gustoći zraka/putanja u pojedinom dijelu slike, ali značajno ovisi i o izabranoj metodi interpolacije. Primjenom variograma i krigiranja proglašuje se polje brzina određeno izravno fizikalnim modelima vremena širenja vala kroz prostor.

Treba napomenuti da ni danas nema dovoljno radova u geofizičkoj literaturi koji bi dostatno opisivali upotrebu i problematiku metode krigiranja u *V-H prostoru*, odnosno primjenu u refrakcijskoj tomografiji. Ipak, se istraživači se i dalje slažu oko dvije bitne stvari: 1. podaci o vremenu putovanja seizmičkog poremećaja nose kvalitetne informacije o geomediju i 2. univerzalno krigiranje se pokazalo kao najuspješnija metoda, jer je



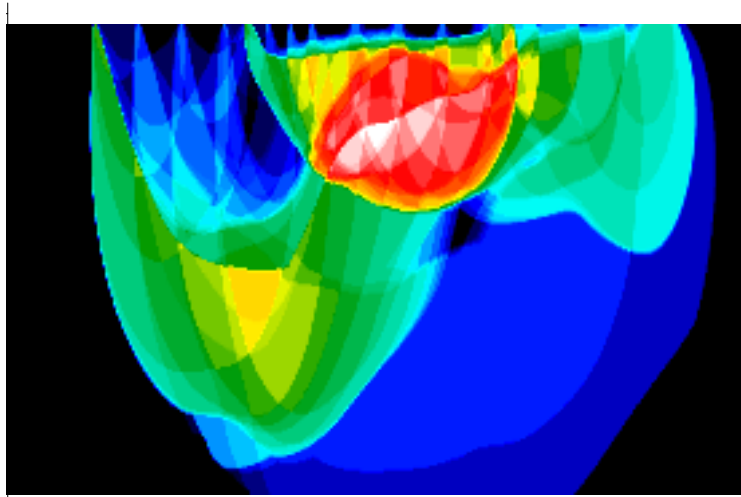
dovoljno fleksibilna za modeliranje intervalnih brzina, odnosno brzina između pojedinih granica geomedija, [11].

U ovom se radu prikazuju primjeri seizmičke interpretacije, odnosno primjeri refrakcijske tomografije  $P$  valovima i uloga geostatističke interpolacije. Tom se aproksimacijskom metodom generira optimalni interpolator minimiziranjem varijance greške procjene. Interpolacija podrazumijeva procjenu vrijednosti seizmičke brzine u točki u kojoj nisu izračunate brzine izravno primjenom WET inverzije, a s obzirom na izračunate vrijednosti u njenoj okolini. Krigiranje se dakle primjenjuje kao optimalna interpolacija koja se temelji na regresiji izračunatih vrijednosti  $V_P$  (regionalna varijabla), u nekoj okolini promatrane točke prostora, pri čemu se kao težine koriste prostorne kovarijance [18].

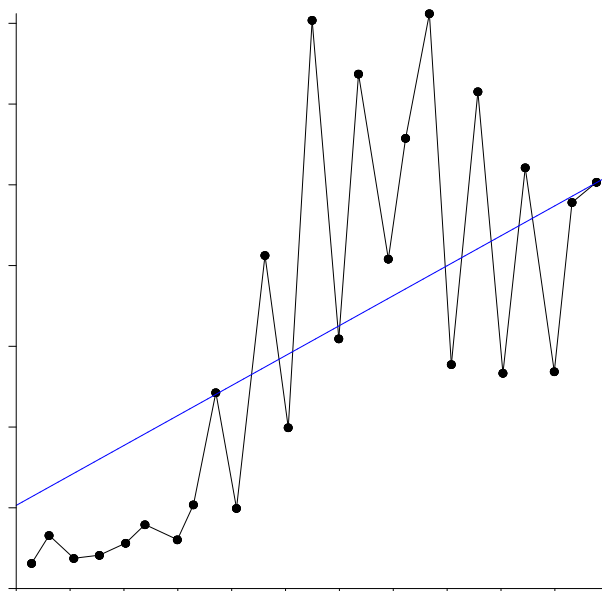
Za seizmičku interpretaciju refrakcijskih profila se koristio program RAYFRACT® 3.33 (1996-2016 Intelligent Resources Inc., Canada and Switzerland). Program predstavlja tomografsku metodu kojom se modeliraju prvi nailasci  $P$  ili  $S$  valova. Nakon određivanja seizmičkih putanja nekom od metoda inverzije (WET, Delta-t-V, konjugirana gradijentna), program poziva skriptu za prikaz konturnih dijagrama u programu Surfer 8 (ili u bilo kojoj drugoj instaliranoj verziji). Surfer (Golden Software, LLC, Colorado, USA) je programski paket za konturiranje i modeliranje različitih ploha, a temelji se na interpolacijskim metodama kojima se tro-parametrski podaci transformiraju u plohu (mapu). U refrakcijskoj tomografiji ti su parametri (udaljenost  $x$ , dubina  $H$ , brzina  $V$ ), a kao interpolacijska metoda se koristi univerzalno krigiranje kojim se nastoji "uhvatiti" nepoznati trend lateralnih promjena brzina u seizmičkom profilu (inicijalno se pretpostavlja da je dosegnut/dohvaćen glavni refraktor). U pravilu će interpretacija s većim brojem točaka poznatih vrijednosti brzina, s većim brojem identificiranih seizmičkih putanja, s većim dosegom, s manjim odstupanjem i bez anizotropije imati puno veću pouzdanost kod procjene težinskih koeficijenata. Kada u eksperimentalnom variogramu skup podataka pokazuje mogućnost pojave ne-nula intercepta interpolacijske krivulje na vertikalnoj osi, onda se razmatra i prag (eng. nugget) kao dio modela. Taj efekt se (u Surferu) dijeli na dvije pozitivne komponente: greška varijance kao mjera ponovljivosti vrijednosti brzina (uključuje greške mjerenja i analitičke greške) i mikro varijanca koja predstavlja zamjenu za nedefinirani variogram u kojem su udaljenosti među podacima manje od onih u definiranoj mreži za interpretaciju. Maksimalna udaljenost podataka (eng. maxlag distance) je dimenzija "praznine" između podataka koji

se analiziraju u variogramu. Ona se najčešće postavlja kao 1/3 dijagonale stvarnih dimenzija polja, odnosno seizmičkog presjeka.

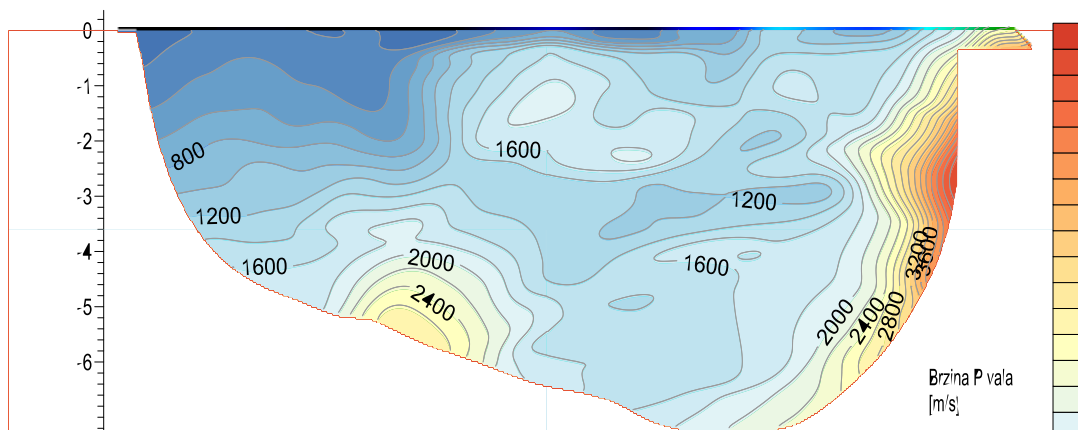
### 5.5.1. Primjer 1: Špilja Vindija, Donja Voća



Slika 22 Broj seizmičkih putanja refrakcijskog profila špilje Vindija.

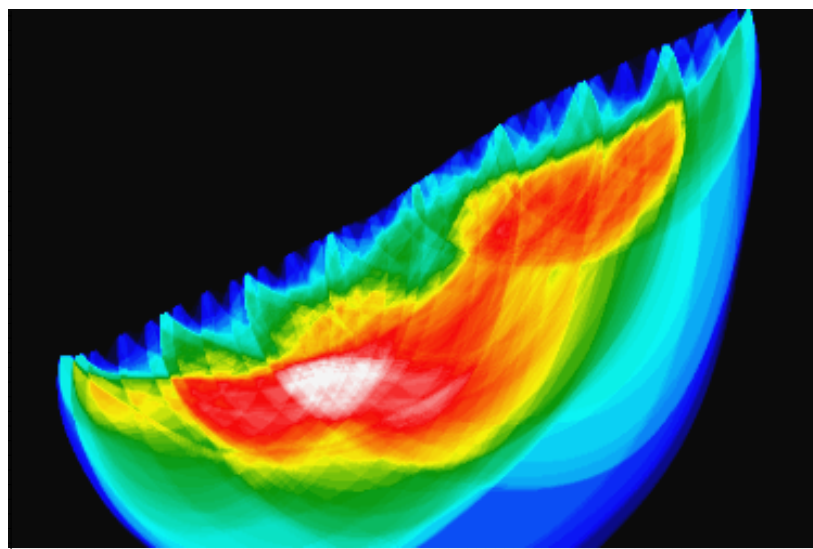


Slika 23 Variogram inicijalnog polja brzina seizmičkog presjeka za maksimalnu udaljenost podataka (špilja Vindija).

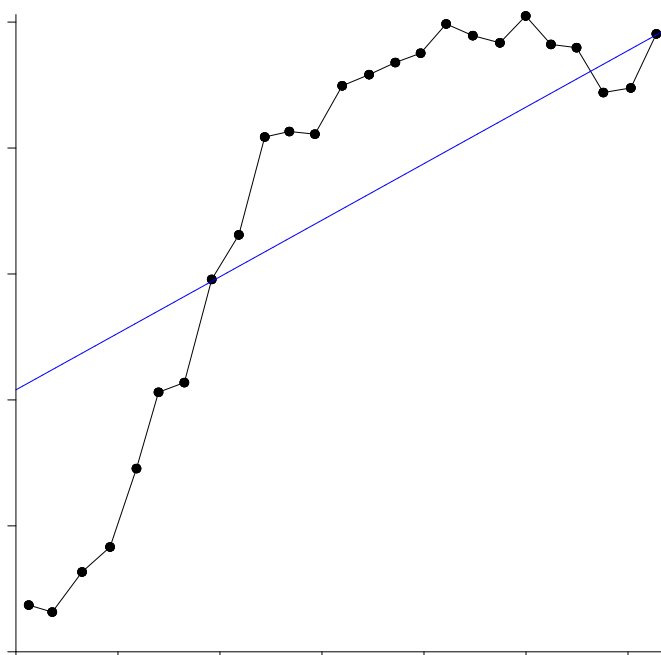


Slika 24 Profil refrakcijske tomografije brzina P valova u špilji Vindija.

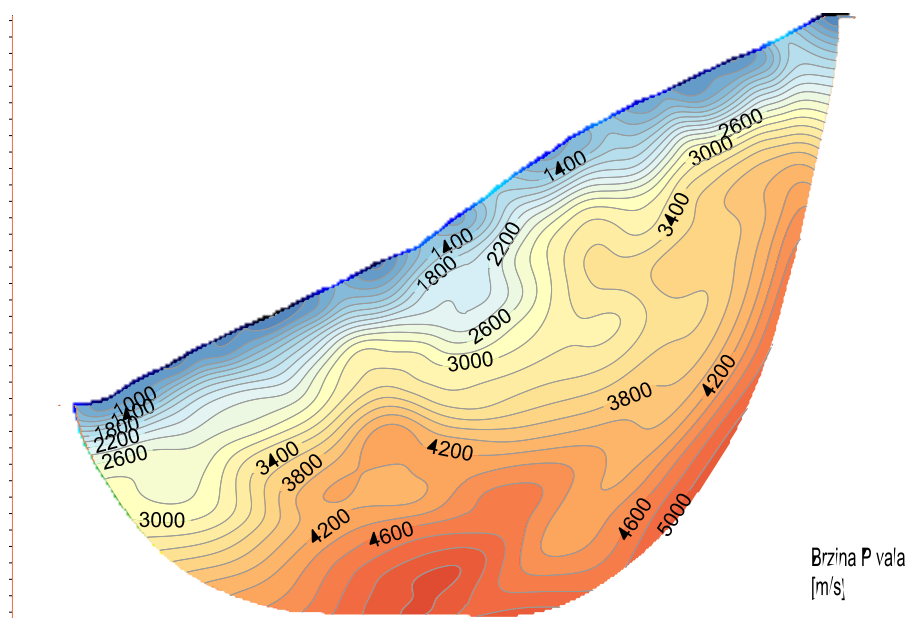
### 5.5.2. *Primjer 2: Šibenik, naselje Meterize*



Slika 25 Broj seizmičkih putanja refrakcijskog profila Meterize, Šibenik .

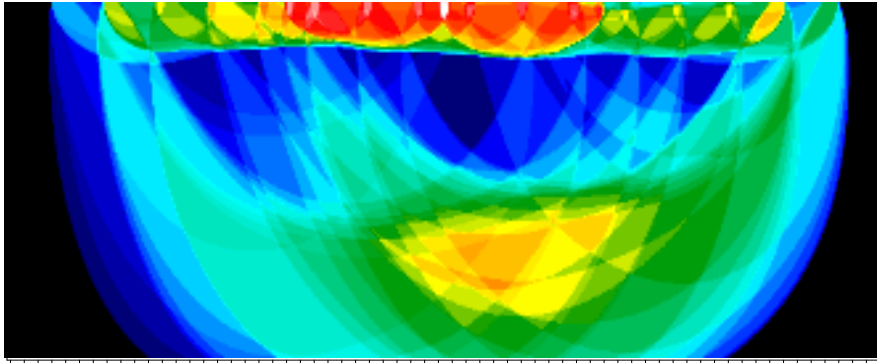


Slika 26 Variogram inicijalnog polja brzina seizmičkog presjeka za maksimalnu udaljenost podataka (naselje Materize).

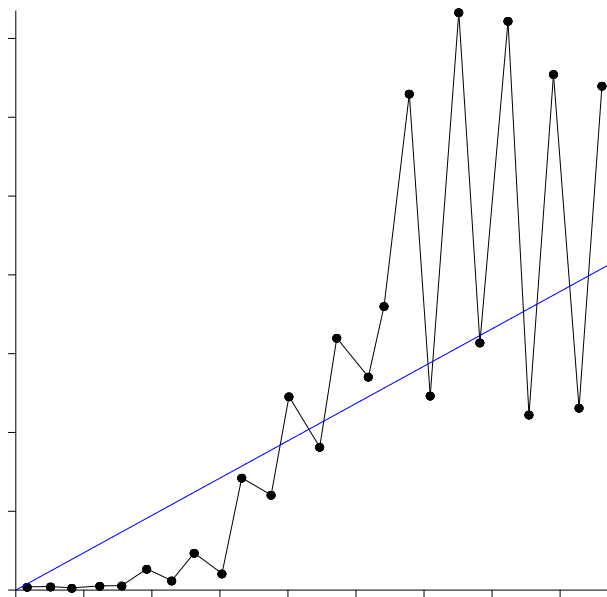


Slika 27 Profil refrakcijske tomografije brzina P valova u naselju Meterize, Šibenik.

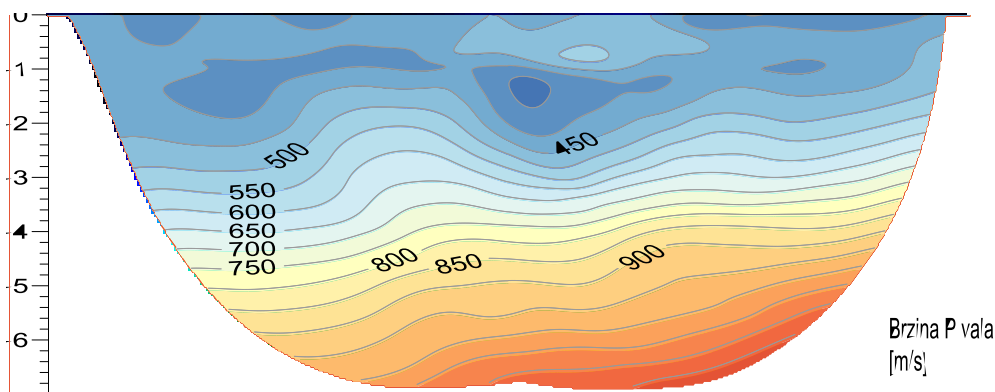
### 5.5.3. Primjer 3: Glinište Cukavec, Turčin



Slika 28 Broj seizmičkih putanja refrakcijskog profila na gliništu Cukavec.



Slika 29 Variogram inicijalnog polja brzina seizmičkog presjeka za maksimalnu udaljenost podataka (glinište Cukavec).



Slika 30 Profil refrakcijske tomografije brzina P valova na gliništu Cukavec, Turčin.

## Zaključak

U ovom se radu prikazuju primjeri seizmičke interpretacije u obliku refrakcijske tomografije  $P$  valovima i uloga geostatističke interpolacije. Tom se aproksimacijskom metodom generira optimalni interpolator minimiziranjem varijance greške procjene. Interpolacija daje procjenu vrijednosti seizmičke brzine u točki u kojoj nisu izračunate brzine izravno primjenom neke metode inverzije, s obzirom na izračunate vrijednosti u njenoj okolini.

Kao optimalna metoda interpolacije primjenjuje se krigiranje, a temelji se na regresiji izračunatih vrijednosti  $V_P$  brzine kompresijskog  $P$  vala. Brzine tog vala u geomediju se tretiraju kao regionalizirane varijable u okolini neke točke seizmičkog profila, a kao težine se koriste prostorne kovarijance.

U refrakcijskoj tomografiji su parametri transformacije seizmičke putanje u seizmičku sliku: udaljenost  $x$ , dubina  $H$ , brzina  $V$ . Kao interpolacijska metoda najčešće se koristi univerzalno krigiranje kojim se nastoji "uhvatiti" nepoznati trend lateralnih promjena brzina.

U pravilu će interpretacija s većim brojem točaka poznatih vrijednosti brzina i identificiranih seizmičkih putanja, s većim dosegom, s manjim odstupanjem i bez anizotropije imati puno veću pouzdanost kod procjene težinskih koeficijenata. Kada u eksperimentalnom variogramu skup podataka pokazuje mogućnost pojave ne-nula intercepta interpolacijske krivulje na vertikalnoj osi, onda se razmatra i prag (eng. nugget) kao dio modela.

Treba napomenuti da ni danas nema dovoljno radova u literaturi koji bi dostatno opisivali upotrebu i problematiku metode krigiranja u refrakcijskoj tomografiji.

## Literatura

1. Slobodan Šestanović: Osnove geologije i petrografije; Građevinski fakultet; 2001.
2. An. Šimunić, Al. Šimunić, M. Milanović: Geološka građa Ivanščice i Ravne gore, Geološki vjesnik 31, 157-174, Zagreb, 1979.
3. John M. Reynolds: An Introduction to Applied and Environmental Geophysics; 1 Edition. Wiley; 1997.
4. John Milsom: Field Geophysics; 4 Edition; Wiley; 2011.
5. P. W. Mayne, B. R. Christopher, J. DeJong: Manual on Subsurface Investigations - Geotechnical Site Characterization; National Highway Institute, Publication No. FHWA/NHI-01-031, Federal Highway Administration, Washington, DC; 2001.
6. P. W. Mayne, J. A. Schneider: Small and largest rain soil properties from seismic flat dilatometer tests; Proc. Pre-failure Deformation Characteristics of Geomaterials; Jamiolkowski et al. editors, Torino, pp. 419 – 426; 1999.
7. Dereck Palmer: The generalize dreciprocal method of seismic refraction interpretation; SEG, 1980.
8. M. Arvanitis, B. D. Al-Anazi: Mathematical representation models and applications on seismic tomography; Nafta 60 (9), pp 495-498, 2009.
9. Guust Nolet: Seismic wave propagation and seismic tomography, in G. Nolet, ed., Seismic tomography; D Reidel Publishing Company, 1987.
10. G. S. Baker: Near-surface imaging using coincident seismic and GPR data; Geophysical Research Letters, 2001.
11. Petter Abrahamsen: Geostatistics for Seismic Depth Conversion; Norwegian Computing Center, 1996. <https://www.nr.no/sites/default/files/files/Geostatistics-DC-Abrahamsen-1996.pdf>, 1.5.2015.
12. G. Bohling: Introduction to geostatistics and variogram analysis, C & PE 940, Kansas Geological Survey. 2005.



13. W. M. Telford: Applied Geophysics. 2 Edition; Cambridge University Press; 1990.
14. Boris Jeđud: Primjena spektralne analize površinskih valova u geotehnici; Diplomski rad. Sveučilište u Zagreb; Geotehniki fakultet Varaždin, 2010.
15. Kovač I., Geostatistika, Interna skripta Geotehničkog fakulteta s kolegija Geostatistika, 2013
16. Medak D., Geostatistika; skripta Geodetskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu za kolegij Analiza prostornih podataka (<http://www2.geof.unizg.hr/~dmedak/hr/geostatistika.pdf>)
17. Malvić T., Primjena geostatistike u analizi geoloških podataka; INA, SD Istraživanje i proizvodnja nafte i plina, Grupa za tiskarske i grafičke poslove, Zagreb, 2008.
18. Aš, V. (2008.): Vplivi metod interpolacije in glajenja na geometrično natančnost ploskev iz lidarskih podatkov (05. lipanj, 2012.), preuzeto na: [http://eprints.fgg.uni-lj.si/675/1/GEU\\_0771\\_As.pdf](http://eprints.fgg.uni-lj.si/675/1/GEU_0771_As.pdf)
19. Yang, C. S.; Kao, S. P.; Lee, F. B.; Hung, P. S.: Twelve different interpolation methods: A case of study of surfer 8.0 (10. lipanj, 2012.) preuzeto na: <http://www.isprs.org/proceedings/xxxv/congress/comm2/papers/231.pdf>

## POPIS SLIKA

Slika 1 Istražni prostor i lokacije uzorkovanja	3
Slika 2 Promjena nadmorske visine uzduž određenog pravca	4
Slika 3 Dnevne temperature izmjerene na meteorološkoj postaji Bergen, Florida, SAD (za razdoblje od rujna 2013. do kolovoza 2014)	4
Slika 4 Shematski primjeri normalne, log-normalne i uniformne razdiobe	8
Slika 5 Parametri semivariograma	12
Slika 6 Teorijski model-sferni (gore lijevo), eksponencijalni (gore lijevo), Gaussov (dolje)	13
Slika 7 Interpretacija semivariogramskih krivulja	15
Slika 8 Špilja Vindija: geološke značajke istražne lokacije i okolnog područja	19
Slika 9 Naselje Meterize: geološke značajke istražne lokacije i okolnog područja	20
Slika 10 Glinište Cukavec: geološke značajke istražne lokacije i okolnog područja	21
Slika 11 Područje primjene geofizičkih metoda i geotehničkih proba obzirom na veličinu zrna tla (geotehnička klasifikacija tla) [5]	22
Slika 12 Područje primjene geofizičkih metoda i geotehničkih proba obzirom na veličinu relativne posmične deformacije [6]	23
Slika 13 Seizmički valovi u neograničenoj elastičnoj sredini.	24
Slika 14 Površinski seizmički valovi uz granicu elastične sredine.	25
Slika 15 Dijagram udaljenost - vrijeme.	29
Slika 16 Princip istraživanja geomedija seizmičkim valovima.	30
Slika 17 Registracija nailaska seizmičkog vala.	30
Slika 18 Dijagram udaljenost – vrijeme i refrakcija na paralelnim granicama.	32
Slika 19 Nailasci ili vremena prvih nailazaka refraktiranih valova do pojedinog geofona u seizmičkom profilu.	36
Slika 20 Postupak interpretacije tomografskom inverzijom [10]	37
Slika 21 Seizmička slika nakon geofizičke i geološke interpretacije [10]	38
Slika 22 Broj seizmičkih putanja refrakcijskog profila špilje Vindija.	41
Slika 23 Variogram inicijalnog polja brzina seizmičkog presjeka za maksimalnu udaljenost podataka (špilja Vindija).	41
Slika 24 Profil refrakcijske tomografije brzina P valova u špilji Vindija.	42
Slika 25 Broj seizmičkih putanja refrakcijskog profila Meterize, Šibenik .	42

Slika 26 Variogram inicijalnog polja brzina seizmičkog presjeka za maksimalnu udaljenost podataka (naselje Materize).	43
Slika 27 Profil refrakcijske tomografije brzina P valova u naselju Meterize, Šibenik.	43
Slika 28 Broj seizmičkih putanja refrakcijskog profila na gliništu Cukavec.	44
Slika 29 Variogram inicijalnog polja brzina seizmičkog presjeka za maksimalnu udaljenost podataka (glinište Cukavec).	44
Slika 30 Profil refrakcijske tomografije brzina P valova na gliništu Cukavec, Turčin.	45

## POPIS TABLICA

Tablica 1 Inženjerske konstante elastičnosti	26
Tablica 2 Vrste seizmičkih metoda prema mjernom parametru i primjeni.	26
Tablica 3 Brzine P valova u nekim geomedijima.	33
Tablica 4 Poznatije metode za interpretaciju seizmičke refrakcije.	35