Tomografija prvih nailazaka

Lakušić, Martin

Undergraduate thesis / Završni rad

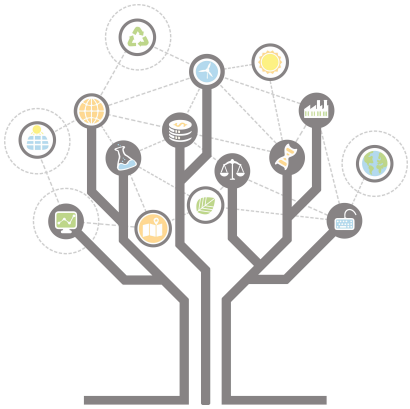
2019

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://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:130:872482

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-29**



Repository / Repozitorij:

Repository of Faculty of Geotechnical Engineering - Theses and Dissertations

zir.nsk.hr

dabar
DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

GEOTEHNIČKI FAKULTET

MARTIN LAKUŠIĆ

TOMOGRAFIJA PRVIH NAILAZAKA

ZAVRŠNI RAD

VARAŽDIN, 2019

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

GEOTEHNIČKI FAKULTET

ZAVRŠNI RAD

TOMOGRAFIJA PRVIH NAILAZAKA

KANDIDAT:

MARTIN LAKUŠIĆ

MENTOR:

doc. dr. sc. MARIO GAZDEK

NEPOSREDNI VODITELJ:

dr.sc. DAVOR STANKO

VARAŽDIN, 2019

Sveučilište u Zagrebu
Geotehnički fakultet

ZADATAK ZA ZAVRŠNI RAD

Pristupnik: MARTIN LAKUŠIĆ

Matični broj: 2618 - 2015./2016.

NASLOV ZAVRŠNOG RADA:

TOMOGRAFIJA PRVIH NAILAZAKA

Rad treba sadržati:
1. Uvod
2. Seizmičke metode
3. Detekcija seizmičkih valova i procedura snimanja
4. Refrakcijska tomografija
5. Primjena u inženjerstvu okoliša
6. Zaključak
7. Popis literature
8. Popis slika
9. Popis tablica
10. Prilozi

Pristupnik je dužan predati mentoru jedan uvezen primjerak završnog rada sa sažetkom. Vrijeme izrade završnog rada je od 45 do 90 dana.

Zadatak zadan: 17.06.2019. Rok predaje: 05.09.2019.

Mentor:	Neposredni voditelj:	Predsjednik Odbora za nastavu:
Doc.dr.sc. Mario Gazdek	Dr.sc. Davor Stanko	Izv.prof.dr.sc. Igor Petrović
MGazdek	Stanko Davor	

REPUBLIKA HRVATSKA
GEOTEHNIČKI FAKULTET
SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem da je završni rad pod naslovom

TOMOGRAFIJA PRVIH NAILAZAKA

rezultat mog vlastitog rada koji se temelji na istraživanjima te objavljenoj i citiranoj literaturi te je izrađen pod mentorstvom doc. dr. sc. Maria Gazdeka.

Izjavljujem da nijedan dio rada nije napisan na nedozvoljen način, odnosno da je prepisan iz necitiranog rada te da nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava. Izjavljujem također, da nijedan dio rada nije iskorišten za bilo koji drugi rad u bilo kojoj drugoj visokoškolskoj, znanstvenoj ili obrazovnoj ustanovi.

U Varaždinu, 4.9.2019.

MARTIN LAKUŠIĆ

Martin Lakušić

Sadržaj

1. Uvod 1
2. Seizmičke metode 3
2.1 Koncept seizmičkih metoda 4
2.2 Seizmički valovi 5
2.3 Širenje seizmičkih valova 7
3. Detekcija seizmičkih valova i procedura snimanja 8
3.1 Geofon 9
3.2 Šum 10
3.3 Seizmički kabeli 10
3.4 Snimanje i seizmografi 10
3.5 Procedura i principi seizmičkih snimanja 13
3.6 Metoda plitke seizmičke refrakcije 15
4. Refrakcijska tomografija 17
4.1 Dijkstra algoritam 25
4.2 Tijek rada i interpretacija 26
5. Primjena u inženjerstvu okoliša 28
6. Zaključak 32
7. Popis literature 33
8. Popis slika 35
9. Popis tablica 36
10. Prilozi 37

Sažetak

Seizmičke metode istraživanja koriste se skoro jedno stoljeće u naftnoj industriji, geoinženjerstvu okoliša, graditeljstvu, hidrološkim ispitivanjima i brojnim drugim područjima u kojima je potrebno dobiti prikaz tla ispod površine Zemlje. Ove metode temelje se na obradi umjetno proizvedenih seizmičkih valova koji nastaju udarcem čekića o metalnu ploču, korištenjem eksploziva ili utega velike mase koji se pušta s određene visina na tlo. Amplituda i vremena njihovih nailazaka na geofone mjere se na seizmografu i pomoću njih određujemo brzine valova. Za širenje valova u geomediju moramo poznavati zakone koji se odnose na širenje istih. Potrebno je poznavati seizmičku refrakciju i refleksiju jer su one fundamentalne metode pomoću kojih se dobivaju rezultati. P valovi se lome na granicama geomedija zbog promjena u njihovoj gustoći i deformacijskim svojstvima. Seizmička refrakcija mjeri vrijeme koje je potrebno valu da od izvora dođe do granice između dva sloja, putuje po njoj i vrati se natrag na površinu gdje ju registrira geofon, a refleksija podrazumijeva mjerenje vremena koje je potrebno vali da iz izvora dođe do granice dvaju slojeva i vrati se na površinu do geofona.

Tomografija je tehnika interpretacije rezultata mjerenih seizmičkom refrakcijom ili refleksijom. Vrijeme prijeđenog puta koristi se za računanje brzina valova u pojedinom sloju, a prva vremena koja geofon registrira nazivaju se vremena prvih nailazaka. Kada su nam poznate brzine u slojevima gradimo model brzina za naš geomedij i dodatno ga uređujemo i usklađujemo dok ne dobijemo sliku koja zadovoljava naše potrebe.

Ključne riječi: tomografija, prvi nailasci, seizmičke metode, seizmička refrakcija

1. Uvod

Geofizika je prirodna znanost koja proučava fizikalna svojstva Zemlje i procese na njoj, a katkad i na drugim planetima [18]. Ova prirodna znanost obuhvaća niz disciplina koje se mogu podijeliti prema tome bave li se kopnom, vodama ili zrakom koji okružuje Zemlju. Prvu skupinu geofizičkih disciplina čine discipline koje su usmjerene na istraživanje polja sile teže i oblika Zemlje (gravimetrija), magnetskog polja Zemlje (magnetizam), potresa i strukture Zemlje (seizmologija) te erupcija vulkana (vulkanologija). Drugu skupinu čine discipline koje proučavaju tekuće vode na tlu, jezera, mora i oceane te ledenjake, a u treću skupinu geofizičkih disciplina spadaju istraživanja kratkoročnih i dugoročnih vremenskih promjena u nižim slojevima atmosfere te procesi u višim slojevima atmosfere.

Danas se geofizika uobičajeno dijeli na geofiziku čvrste Zemlje (*engl. Solid Earth Geophysics – SEG*) koja uključuje opću, čistu i primijenjenu geofiziku, inženjersku geofiziku (*engl. Engineering Geophysics – EeG*) i geofiziku okoliša (*engl. Environmental Geophysics – EnG*) [18]. Dok se geofizika čvrste Zemlje bavi proučavanjem unutrašnjosti i građe planete Zemlje, inženjerska geofizika proučava vrste i strukture geomedija od kojeg je izgrađena Zemlja, a geofizika okoliša uključuje istraživanja promjena fizikalno-kemijskih svojstava geomedija, posebno onih koja su uzrokovana zagađenjima.

Prilikom geotehničkih zahvata ili izrade geotehničkih elaborata, potrebno je poznavati parametre tla ili stijene na mjestu izvođenja radova ili u neposrednoj okolini izvođenja zahvata. Klasičan način prikupljanja parametara je bušenje sondažnih bušotina i laboratorijske analize izvađenih uzoraka. Osim laboratorijskih analiza, mehanička svojstva tla određuju se i terenskim penetracijskim pokusima (SPT, CPT, krilna sonda i dr.). Bušenje sondažnih bušotina zahtjeva teretna vozila na kojima se nalaze bušaće garniture i zasebne strojeve velikih dimenzija kojima je potrebno osigurati pristup terenu koji se želi istražiti. Geotehnički laboratorij treba biti opremljen svim potrebnim instrumentima (edometri i aparati za direktno smicanje) u kojem rade iskusni stručnjaci.

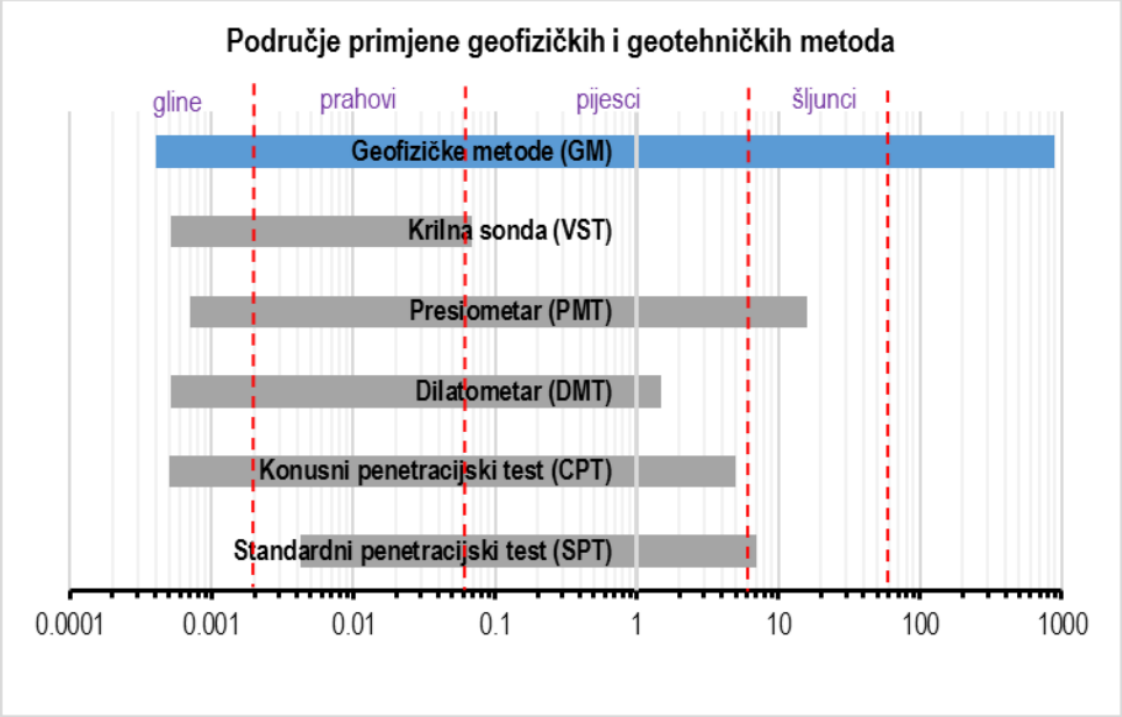
Geofizičkim metodama se određuju različita svojstva tla (magnetska, elastična, električna i druga) uz puno manje opreme, cijenu izvođenja radova i vremena u kojem se radovi obave. Seizmičke metode primjenjive su na velikom broju problema u geoinženjerstvu i inženjerstvu okoliša, a zasnivaju se na zakonima refrakcije i refleksije te o metodama interpretacije rezultata mjerenja.

Valovi proizvedeni umjetnim ili prirodnim putem šire se kroz geomedij, a oni prvi zabilježeni na geofonima nazivaju se prvi nailasci. Oni se koriste u seizmičkim geofizičkim metodama pri izgradnji modela brzina i interpretaciji rezultata. Tomografija je metoda prikazivanja podpovršinske strukture tla ili stijena na osnovi prikupljenih podataka o brzinama *P* valova koji se iz izvora šire kroz tlo i bilježe na geofonima. Ova metoda se koristi za izgradnju modela brzina *P* valova iz vremena prvih nailazaka. [4]

2. Seizmičke metode

Seizmičke metode istraživanja često se koriste kao dodatne metode u rješavanju standardnih geotehničkih problema. Neizostavna su u preliminarnim istraživanjima, a također se koriste u donošenju odluka o daljnjem planu istražnih radova. Ova vrsta istraživanja se koristi skoro 100 godina u naftnom rudarstvu [7], a danas postoje težnje da se znanja i iskustva s ovog područja istraživanja prenesu i na ostala inženjerska polja kao što su: geoinženjerstvo, inženjerstvo okoliša i potresno inženjerstvo.

Primjena seizmičkih metoda (Slika 1) u geoinženjerstvu i inženjerstvu okoliša je od vrlo velikog značaja, jer ove metode omogućuju parametrizaciju inženjerskih svojstava različitih litoloških formacija tj. geomedija. Zbog toga su one veoma važne u istraživanju pripovršinskih formacija koje zbog svoje heterogenosti iziskuju specifične načine istraživanja, analize i interpretacije. Mjerenja se uglavnom izvode s površine terena ili iz bušotina. [7]

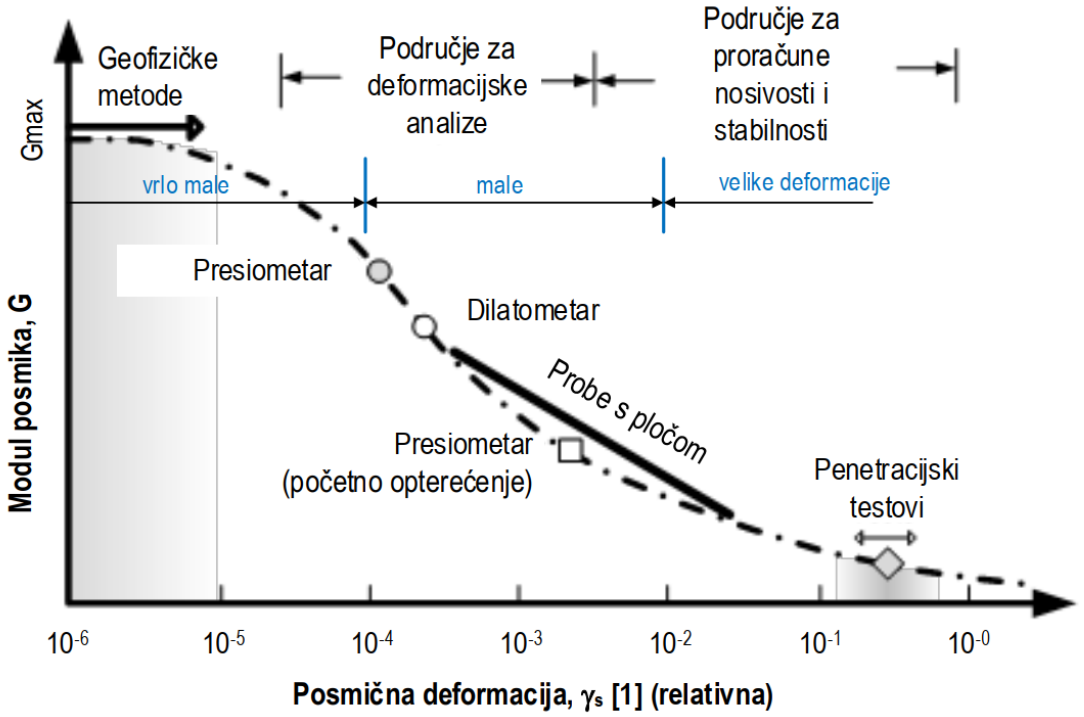


Slika 1 Područje primjene geofizičkih metoda obzirom na veličinu čestica zla. [6]

2.1 Koncept seizmičkih metoda

Seizmičke metode temelje se na analizi širenja umjetno proizvedenih seizmičkih valova kroz geomedij (stijene ili tlo). Valovi se generiraju u tzv. točkama paljenja na površini, blizu površine ili u bušotinama. Često se za generiranje valova koriste udarci čekićem o metalnu ploču, zračna puška ili eksploziv u bušotini (do 1 metar dubine).

Seizmički valovi koji nastaju nakon udarca čekića o metalnu ploču šire se kroz tlo u obliku elastičnih deformacija (Slika 2, područje vrlo malih posmičnih deformacija). Amplituda i vrijeme njihovih dolazaka se registriraju pomoću senzora (geofon ili hidrofon) smještenih na površini terena ili u bušotini. Analizom vremena putovanja valova od izvora do geofona i podataka o međusobnoj udaljenosti izvora i geofona određuje se brzina širenja valova. Brzine naravno ovise o strukturi, litologiji i stanju na granicama geomedija. Promjene brzina u većini slučajeva se podudaraju s geološkim kontaktima pa se na temelju granica brzina može izgraditi inženjersko-geološki ili geotehnički model tla. [6]

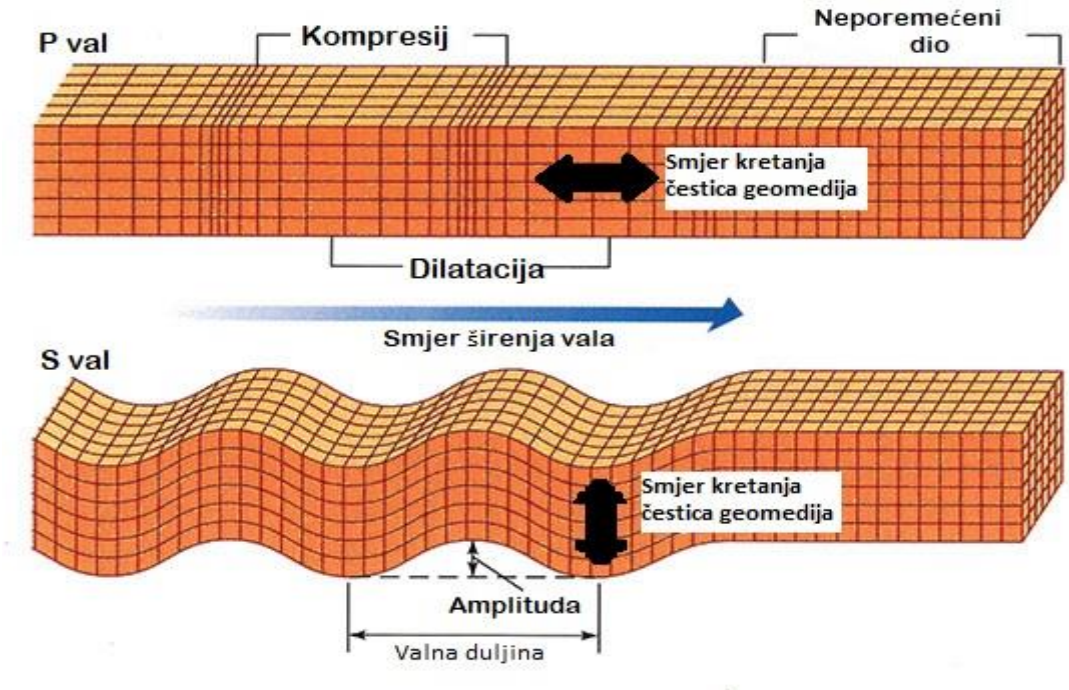


Slika 2 Područje primjene geofizičkih metoda obzirom na veličinu posmične deformacija. [6]

2.2 Seizmički valovi

Izvor seizmičkog vala je dinamičko opterećenje na površini ili u unutrašnjosti geomedija (npr. potres ili pad utega). Seizmički valovi su po svojoj prirodi tranzijentni i sadrže široki spektar frekvencija, ali u praksi seizmički valovi se smatraju harmonijskim. Važna zadaća u oblikovanju geotehničkog modela je poznavanje osnovnih principa koji opisuju, širenje, prigušenje i interakciju seizmičkih valova s geomedijem.

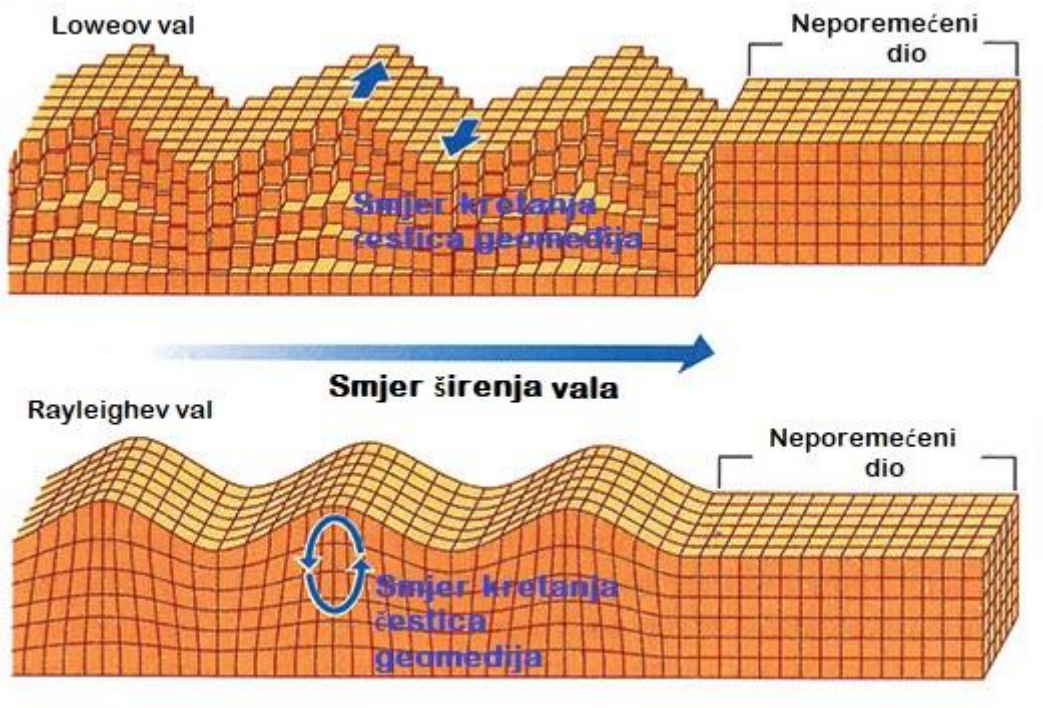
Seizmički valovi u neograničenoj elastičnoj sredini mogu se podijeliti na: *P* val – uzdužni ili kompresijski i *S* val – poprečni ili posmični. *P* valovi su longitudinalni baš kao i valovi zvuka, a *S* valovi su transverzalni i polarizirani kao npr. elektromagnetski val. Uzdužni *P* valovi opisuju 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. Također, ovi valovi imaju najveću brzinu širenja i imaju vrlo važnu ulogu u seizmičkim istraživanjima.



Slika 3 Seizmički valovi u neograničenoj elastičnoj sredini. [10]

Na granici između dva medija, *P* val se reflektira i lomi kao *P* val i vertikalno polarizirani posmični S_V val (čestice se gibaju vertikalno na smjer širenja u ravnini okomitoj na granicu medija). Horizontalno polarizirani S_H val se na granici dvaju medija reflektira i lomi samo kao horizontalno polarizirani, pa je analiza takvih valova značajna za određivanje elastičnih konstanti tla i stijena (Slika 3). Svi posmični *S* valovi (S_V i S_H) nastoje promijeniti oblik medija kroz koji se šire djelujući posmično. Ovi valovi svojstveni su samo za čvrste medije, jer jedino oni imaju posmičnu čvrstoću, pa su važni za istraživanja u geoinženjerstvu.

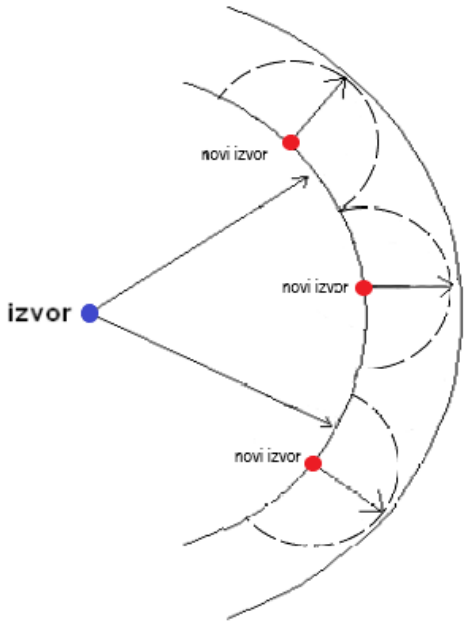
Površinski se valovi mogu eliptički i retrogradno prostirati okomito na smjer širenja u horizontalnoj ravnini (L – Loveovi valovi) ili u smjeru širenja u horizontalnoj i vertikalnoj ravnini istodobno (R – Rayleighevi valovi) (Slika 4). [10]



Slika 4 Površinski seizmički valovi uz granicu elastične sredine. [10]

2.3 Širenje seizmičkih valova

Pretpostavlja se da se seizmički valovi šire na isti način kao i svjetlost, pa se onda također ponašaju prema istom zakonu – Huygensovom zakonu [12]. Zakon koji opisuje širenje valova kao koncentrične kružnice (Slika 5). Svaka točka u kontaktu s valnom frontom postaje (novi) izvor valova za daljnje točke kao što i svaka čestica koja oscilira prenosi svoju energiju na okolne čestice. Ovim je zakonom Huygens postavio temelj valnoj teoriji svjetlosti koja se koristi i za opisivanje ponašanja seizmičkih (elastičnih) valova. Osim širenja valova, ovaj zakon objašnjava i niz drugih pojava u optici, akustici i seizmologiji kao što su refleksija (odbijanje valova) i refrakcija (lom na granici sredstava različite gustoće).



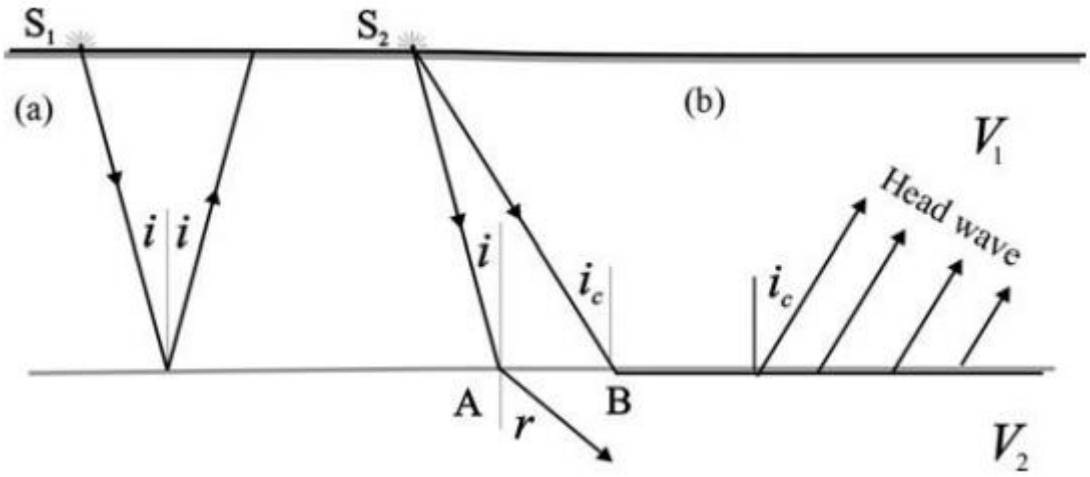
Slika 5 Širenje seizmičkog vala.

Drugi zakon bitan za razumijevanje širenja seizmičkih valove je Fermatov princip [13] koji govori da je vrijeme potrebno seizmičkom valu da prijeđe neku udaljenost u mediju jest minimalno (energija ili deformacija se širi maksimalnom brzinom). Iz ovog zakona odmah slijedi da je širenje valova u homogenom mediju, gdje je indeks loma konstantan, linearno, jer je najmanja udaljenost između dvije točke pravac omeđen tim točkama (geometrijski: dužina).

Treći važan zakon je Snellov zakon [1] koji objašnjava vezu između omjera kutova upada (*i*) i loma (*r*) te omjera brzina širenja valova iznad (v_1) i ispod (v_2) granice dvaju medija (Slika 6):

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{v_1}{v_2}$$

Ako je v_2 veći od v_1, refrakcija na granici medija je moguća. Kada je ispunjen uvjet da vrijedi jednakost $\sin i = \frac{v_1}{v_2}$, onda zraka koja se lomi „klizi“ paralelno s granicom medija s donje, brže strane. Dio njene energije vratit će se na površinu kao valna fronta nazvana „glavni val“ (vučeni ili refraktirani val). Zrake te fronte s okomicom na granicu između dva medija čine kut jednak kutu upada. Taj se kut naziva kritični kut (i_c) ili kut kritične refrakcije i zapravo je identičan kutu totalne refleksije. Ako su kutovi upada veći od te vrijednosti, onda ne može doći do loma vala, već se on reflektira nazad na površinu.



Slika 6. Prikaz refleksije (a) i refrakcije (b). Refrakcija nastaje u točki A dok se kritična refrakcija pojavljuje u točki B. Kut upada označen je s i, a kut kritične refrakcije s ic (pri tome je kut r = 90°). [1]

3. Detekcija seizmičkih valova i procedura snimanja

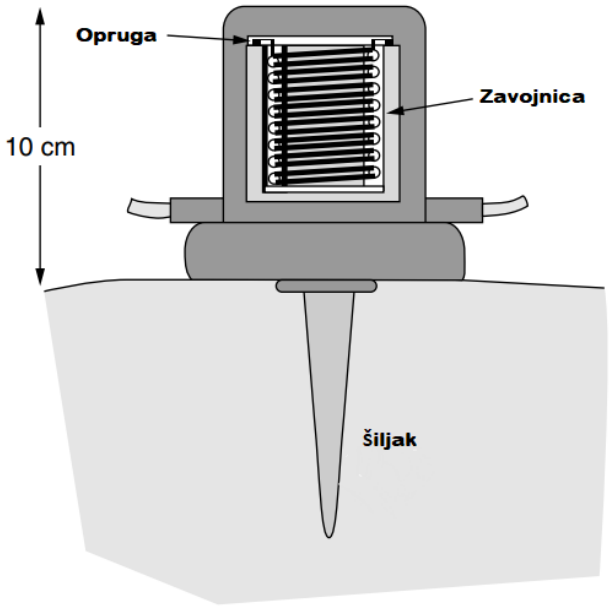
Kopneni seizmički detektori poznati su kao geofoni, a vodeni kao hidrofoni. Oba senzora pretvaraju mehaničku energiju u električne signale. Geofoni se postavljaju zabijanjem šiljaka pričvršćenih na donju stranu kućišta u zemlju ili

postavljanjem na betonske kocke. Ponekad se šiljak mora maknuti, a geofon se postavlja na gips.

3.1 Geofon

Geofon se sastoji od zavojnice postavljene oko magnetske jezgre visoke propusnosti i ovješena oprugom u stalnom magnetskom polju (Slika 7). Ako se zavojnica pomiče u odnosu na magnet, inducira se napon i struja krene teći u bilo kojem vanjskom krugu. Struja je proporcionalna brzini zavojnice kroz magnetsko polje, tako da se bilježe vibracije površine geomedija, a ne sami pomaci. Većinom je zavojnica postavljena tako da slobodno vibrira okomito, jer joj takav položaj daje maksimalnu osjetljivost na P valove koji se gibaju od površine do određene dubine gdje se na granicama refraktiraju ili reflektiraju. [1]

Zavojnice geofona obično imaju otpor veličine oko 400Ω i prigušenje koje je u velikoj mjeri određeno izlaznom snagom krugova kojima su povezani [1]. Geofoni se postavljaju u grupama od 12, 24 ili više, a geofonskim kabelima se prenosi signal (električni napon) do seizmografa koji registrira tragove i prikazuje ih na seizmičkoj snimci ili seizmogramu.



Slika 7 Shematski prikaz dijelova i konstrukcije geofona. [1]

3.2 Šum

Svaka vibracija koja nije dio signala je buka ili šum. Ona je neizbježna i nastaje pri stvaranju valova. S valovi, Loveovi i Rayleighovi valovi te refleksija od površine su svi oblici nepravilnosti koji se ubrajaju u buku pri mjerenjima P valova. Buka koja se stvara udarcem nazive se slučajna. Kretanja ljudi, prometa, životinja također stvara slučajnu buku, a ovisno o njenom intenzitetu, ona može biti kontrolirana. Slučajna buka također nastaje vegetacijom koja se njiše na vjetru i na taj način uznemiruje tlo. Intenzitet ovakve buke može se umanjiti pozicioniranjem geofona dalje od drveća i grmlja, a ponekad uklanjanjem manjih biljaka. [1]

3.3 Seizmički kabeli

Seizmički signali se prenose od geofona do prijamnika kao električni signali stoga kabeli moraju sadržavati dvostruko više žica nego što geofona. Snaga prenošenja signala se smanjuje s godinama zbog korištenja i ljudskog faktora, ali i zbog gubitka premaza unutar samog kabla odnosno izolacije. Na kraju kabela se nalazi glava s konekcijama za seizmograf. Većina kabela ima glave na oba kraja. [1]

3.4 Snimanje i seizmografi

Instrumenti koji snimaju seizmičke signale nazivaju se seizmografi. Oni imaju mogućnost bilježenja vremena pojedinačnih i složenih događaja koje istovremeno digitaliziraju, filtriraju i pohranjuju iz više detektora. [1]

Zastarjeli seizmički „tajmeri“ koji su jednostavno prikazivali vrijeme širenja prvih energetski značajnijih seizmičkih pulsova su bili popularni u prošlosti. Oni napredniji jednokanalni seizmografi imali su zaslone na čijem se lijevom kraju definirala točka paljenja (pucanja) i vremenski raspon pomoću prekidača ili tipkovnice. Vrijeme putovanja prikazivalo se direktno na zaslonu. Razina buke se mogla patiti promatranjem odstupanja signala od izvornog impulsa.

Uređaji koji su omogućavali prikazivanje i sumiranje signala očito su bili bolji od običnih „tajmera“ i mogli su se koristiti za druga istraživanja, a ne samo za detekciju prvih slojeva. Međutim, koristili su se samo u plitkoj refrakciji jer je bilo gotovo nemoguće razlikovati izravne valove, refrakciju i refleksiju na jednom tragu. Za generiranje valova koristio se malj kao impulsni izvor, jer je bilo neisplativo koristiti eksploziv za dobivanje tako male količine podataka.

Oprema koja dolazi u paketu za jednokanalni seizmografi sastoji se od bazne stanice, jednog geofona, radio okidača, potrebnih kablova i softvera kojeg je potrebno instalirati na prijenosno računalo (Slika 8). [1]

Seizmografi s 12 ili 24 kanala obično se koriste u plitkom istraživanju dok oni s 96 ili više kanala tipični su u dubokim refleksijskim istraživanjima (Slika 9). Kod ovog seizmografa, pojave refleksije i refrakcije se mogu registrirati istovremeno, a korištenje eksploziva je puno efikasnije s obzirom na njegovu cijenu i količinu tragova koji nastanu jednim pucanjem. Digitalno snimanje je neizostavno, a ukupan prikaz i pojedini prikazi nailazaka mogu se poboljšati, zamijeniti i sačuvati. Osjetljivost kanala (senzora) se može pojačati nakon ili prije paljenja i pohraniti u memoriju. Digitalno spremanje podataka omogućuje daljnju obradu tragova na osobnom računalu. Nedostatak analognog snimanja je bio raspon amplituda preko kojih se podaci mogu snimati s prihvatljivom točnošću (dinamički raspon) na male amplitude uzrokovane šumovima i velike amplitude uzrokovane magnetskom saturacijom.

Snimanja amplituda signala su održavana na približno konstantnim razinama primjenom funkcije automatske kontrole pojačanja (engl. *automatic gain control – AGC*) prije snimanja, ali to bi često iskrivilo signal. Dolaskom digitalnog snimanja, nestala je potreba za AGC-om zbog vrlo velikog dinamičkog raspona i načina pohrane podataka. [1]



Slika 8 Jednokanalni seizmograf i oprema. [8]

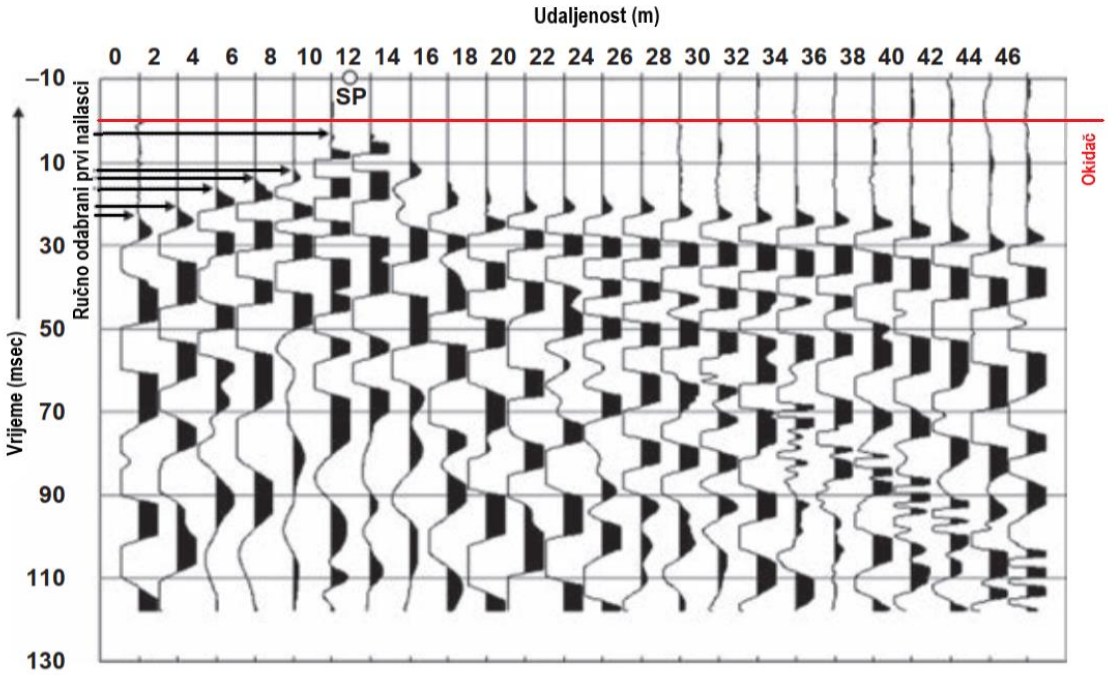


Slika 9 24-kanalni seizmograf. [9]

3.5 Procedura i principi seizmičkih snimanja

Većina seizmografa nudi prikaz na ekranu instrumenta, odnosno prijenosnog računala. Seizmički tragovi koji nastaju primjenom metode seizmičke refrakcije prikazuje Slika 10. Signale su zabilježila 24 geofona u točkama međusobno jednako udaljenima. Razmak između geofona je 2 metra, a točka paljenja (*engl. shot point – SP*) je postavljena između 6. i 7. geofona.

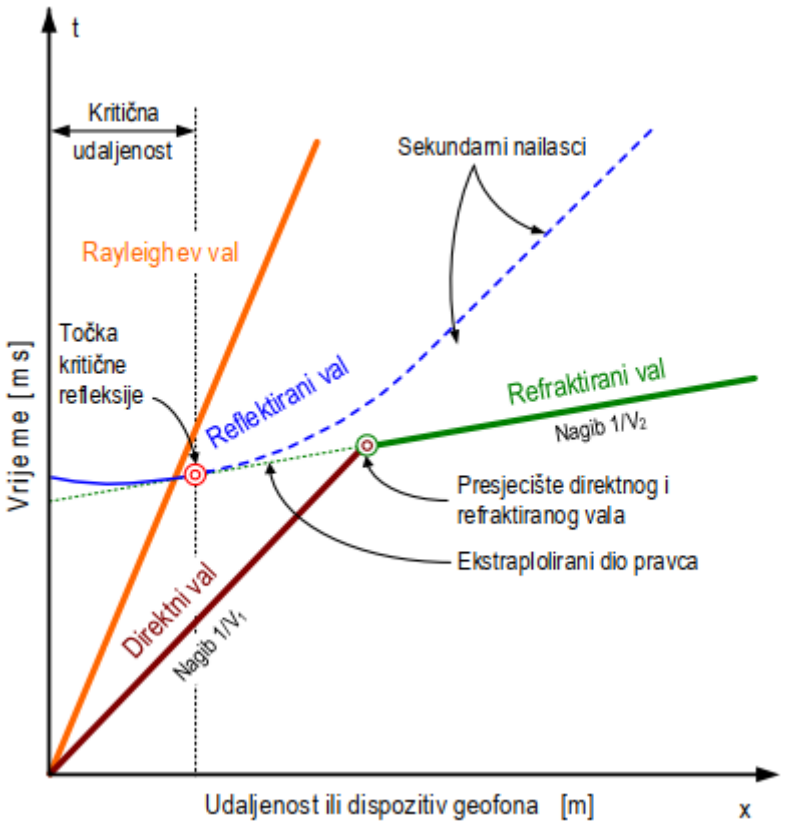
Ručni odabir (pikiranje) prvih nailazaka (*engl. first pick*) označen je strelicama na prvih 6 geofona (lijevo od točke paljenja SP). Također, tragovi udaljenih geofona su pojačani kako bi se kompenziralo prigušenje. Pojačanjem signala se također pojačavaju i smetnje. Na terenu, vremena nailazaka mogu se procijeniti na zaslonu, ali za to je potrebno iskustvo operatera.



Slika 10 Seizmički tragovi u metodi refrakcije. [1]

Još jedan oblik prezentacije seizmičkih mjerenja je dijagram udaljenost-vrijeme (x-t dijagram). Na osnovnom dvoslojnom primjeru homogenog geomedija, prikazana je priroda seizmičkih događanja (Slika 11). Rayleighev val i direktan P val su prikazani pravcima koji kreću iz ishodišta koordinatnog sustava (šire se samo kroz površinski sloj), a vrijeme nailaska do nekog geofona je

proporcionalno njihovoj udaljenosti od izvora. Nailasci vala reflektiranog od granice dvaju slojeva leže na hiperboli. Do točke kritične refleksije nema pojave lomova, a ona se događa kada kut upada na granici dosegne kritičnu vrijednost (u toj točki pravac refraktiranog vala zapravo tangira refleksijsku hiperbolu). Nakon te točke, vrijeme nailaska refraktiranog vala je uvijek manje od vremena nailaska reflektiranog vala. Na određenoj udaljenosti će refraktirani val prestići direktan val (sjecište pravaca tih dvaju pravaca).



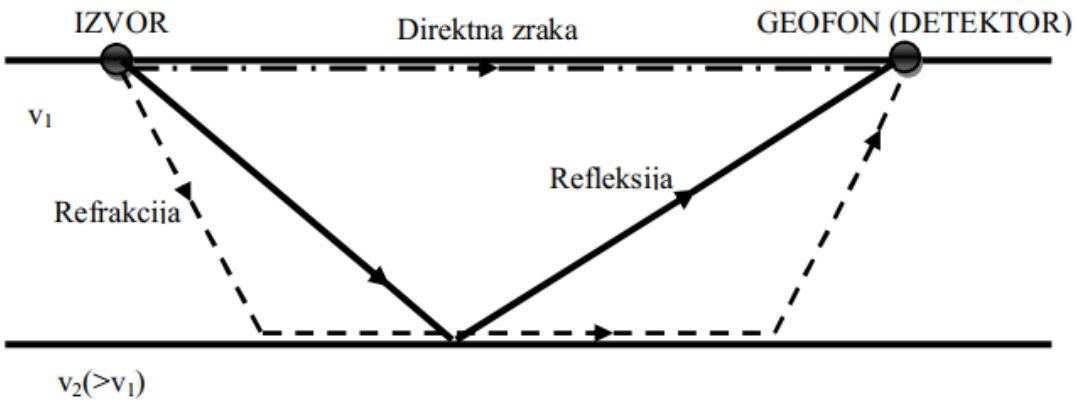
Slika 11 Dijagram udaljenost – vrijeme. [6]

Seizmičke metode većinom podrazumijevaju mjerenje vremena potrebnog da seizmički val prijeđe put od izvora do detektora signala (geofona). Tijekom širenja kroz geomedij, seizmička energija vala se reflektira i/ili refraktira. Refleksija i refrakcija seizmičke energije, pri prolasku kroz medije različite gustoće zadovoljavaju iste zakone kao i refleksija i refrakcija svjetla kroz prizmu. Stoga je važan Snellov zakon, koji govori o jednakosti omjera brzina širenja

valova u mediju iznad (v_1) i ispod granice (v_2) te omjera sinusa kutova upada (i) i refleksije (r). Matematički zapis tog zakona je:

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{v_1}{v_2}$$

Ove dvije metode se koriste u terenskim istraživanjima dinamičkog ponašanja geomedija, jer se određuju brzine elastičnih valova u uslojenom tlu ili stijeni u funkciji dubine. Seizmičkom refrakcijom se mjeri vrijeme u kojem se seizmička energija (val) iz izvora širi do sloja različite seizmičke impedancije (granica slojeva je granica različite impedancije, Slika 12). Val se zatim dalje širi kroz sloj veće brzine, a na graničnoj plohi stvara nove (dubinske) izvore od kojih će najkraće vrijeme širenja natrag do površine (geofona) biti baš pod kritičnim kutom. U refleksiji se prema veličini amplitude nastoji procijeniti energija reflektiranu od kontaktne plohe drugog sloja natrag do geofona.



Slika 12 Prikaz događaja seizmičke refrakcije i refleksije.

3.6 Metoda plitke seizmičke refrakcije

Ova metoda je površinska i ne-invazivna geofizička, a koristi se za istraživanje geomedija do dubina od nekoliko metara do više desetaka metara ispod površine terena. Temelji se na mjerenju vremena širenja elastičnih seizmičkih valova, od izvora do geofona, kroz geološke strukture pod površinom. Valovi se reflektiraju i lome na granicama geo-materijala, čija je razlika određena promjenama u njihovoj gustoći i elastičnim svojstvima. Pažljivo odabran raspored geofona i duljina profila omogućuju dobru rezoluciju po dubini i širini istražnog

prostora. Na taj se način jasno mogu odrediti konture geoloških formacija i dubina do kontakata materijala različitih mehaničkih svojstava. Pouzdanost interpretacije rezultata mjerenja ovisi i o mogućnosti pojave slojeva veće brzine iznad slojeva manje seizmičke brzine. [7]

Osnova seizmičkih metoda je konstrukcija putanje širenja seizmičkog poremećaja kroz geomedij za svaki primljeni signal koji stigne do geofona. Vremena širenja kroz pojedine slojeve, kao i brzine u tim slojevima se optimiziraju prema snimljenom signalu, a konstruirana pretpostavljena putanja se prilagođava prema mjerenim vrijednostima. Postupak se ponavlja dok se ne postigne zadovoljavajuća aproksimacija, pa se potom odnos vremena i brzine konvertira u vrijednosti dubine.

Tijekom terenskog rada primjenom plitke refrakcije, geomedij se najčešće promatra kao uslojena masu čija se mehanička i inženjerska svojstva s dubinom poboljšavaju. Tako je brzina P vala u pripovršinskim slojevima oko 350ms^{-1}, a raste s povećanjem dubine. Ako se pojavi podzemna voda, brzina P vala uvelike raste na 1500-1800ms^{-1}. Brzine P valova ovise o zasićenosti geomedija, jer voda u tlu pridonosi povećanju brzine P vala (Tablica 1).

Tablica 1 Brzina P vala u nekim geomedijima.

GEOMEDIJ	Brzine P valova [ms^{-1}]
Pijesak	200-1000
Pijesak (saturiran vodom)	1500-2000
Šljunak	300-2000
Šljunak (saturiran vodom)	1500-2000
Glina i prah	1000-2500
Glina (saturirana vodom)	1500-2500
Vapnenac	3500-6500
Dolomit	3500-6500

4. Refrakcijska tomografija

Riječ tomografija dolazi od grčke riječi *τομή*, što znači rezanje i grafija, što znači pisati. U tome leži cijela ideja njenog imena: po teoriji centralnog presjeka, ako se načini veliki broj 2D presjeka, moći ćemo konstruirati 3D sliku nekog objekta, također vrijedi da od više 1D presjeka možemo izgraditi 2D presjek. [11]

Seizmička tomografija u današnjem obliku nastaje 1974. godine. [11] Isprva su seizmolozi bili skeptični ovom metodom i njezinim rezultatima. Uvođenjem novih metoda koje olakšavaju računanje velikih i slabo popunjenih matrica koje je javljaju u seizmološkim podacima, ova metoda napreduje i dobiva ime „3D inverzija“, a to danas poznajemo pod imenom seizmička tomografija.

Tomografiju vremena prvih nailazaka seizmičkog vala i prijeđenog puta kroz neki profil, definiramo kao rekonstrukciju modela brzine valova u geomediju. Pri tome se analizira odstupanje (razlika) vremena prvih nailazaka seizmičkog vala od vremena širenja seizmičkog vala referentnog (pretpostavljenog) modela brzina. Vremena prvih nailazaka su uz geometriju profila (raspored geofona i točaka paljenja) osnovni podaci mjerenja, a referentni model je inicijalni sintetički model. U početnom modelu se funkcionalno pretpostavljaju brzine u pojedinim ćelijama matrice kojom se prekriva presjek kroz geomedij u seizmičkom profilu. Taj je model je prvi korak u izgradnji modela brzina. [11]

Seizmičku tomografiju možemo podijeliti u dvije kategorije: tomografiju vremena prvih nailazaka i tomografiju amplitude. U ovom se radu opisuje osnovna ideja i principi tomografije vremena prvih nailazaka.

Očekivani događaji na putu širenja seizmičkog vala od izvora do geofona su: refleksija, refrakcija i difrakcija (događaji analogni pojavama pri širenju svjetlosti). Zbog toga se, u užem smislu, tomografija može razvrstati u tomografiju reflektiranih zraka te refraktiranih i difraktiranih zraka. Tomografija prvih nailazaka u seizmici se uvijek odnosi na metodu refrakcije.

Seizmička tomografija je tehnika stvaranja (generiranja) slike presjeka kroz geomedij pri čemu se koriste sintetička vremena kako bi stvorila računalno generirana 3D ili 2D slika geomedija (prostorna raspodjela ili raspodjela u presjeku). [3]. Vrijeme koje je potrebno da val prijeđe od mjesta nastanka do

geofona se koristi pri izračunavanju brzine duž sintetičkih putanja seizmičkih valova. U inženjerskoj praksi se najčešće koristi 2D oblik (koji daje presjeke), jer je manje zahtjevan za mjerenje na terenu i ne zahtijeva velike resurse za interpretaciju, dok se 3D tomografija uglavnom koristi u istraživanjima za naftu i plin.

Najjednostavniji modus seizmičke tomografije proizlazi iz refrakcijske seizmike P valova (određivanje brzine P valova u seizmičkom presjeku).

Složeniji oblici, kao što je tomografija na temelju valnog oblika ili na temelju dominantne frekvencije, se koriste za naprednije analize anomalija u vremenu. [11] Tada se pretpostavlja da one ovise i o amplitudi i o frekvenciji, a ne samo o brzini širenja vala kroz geomedij. Te se vrste tomografije koriste za identificiranje, detekciju i „oslikavanje“ objekata (anomalija) malih dimenzija, odnosno za povećanje rezolucije slike.

U teoriji, seizmička tomografija prvih nailazaka, kojom se određuje brzina seizmičkih valova, se sastoji se od sljedećih faza:

1. Parametrizacija modela, definiranje seizmičke strukture u smislu skupa nepoznatih parametara modela.
2. Fitanje (*engl. forward modeling*) i simulacije prvog nailaska seizmičkih valova iz rješavanja valne jednadžbe
3. Inverzno modeliranje (*engl. inverse modeling*), prilagođavanjem vrijednosti parametara modela brzina s ciljem smanjenja odstupanja između izračunatih i stvarnih prvih nailazaka. Pri tome se u svakom sljedećem ciklusu koriste relacije izvedene („naučene“) iz prethodnog proračuna.
4. Analiza dobivenih rezultata.

Odnos između nepoznate brzine modela i zabilježenih vremena na jednom geofonu dan je sljedećim izrazom [11]:

$$t = \int_{l\{s(r)\}} s(r)dl \tag{1}$$

gdje je $s(r)$ sporost (inverzna vrijednost brzine), dl je infinitezimalni dio puta, a $l(s)$ predstavlja ukupni put koji je u funkciji vrijednosti sporosti *s(r)*. Tijekom

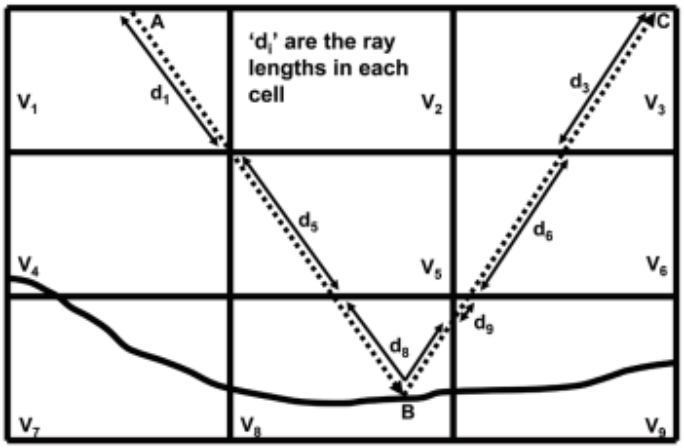
parametrizacije, 2D model se podijeli na ćelije matrice radi određivanja brzine u njima. Svaka ćelija će imati svoju konstantu sporosti. Računanje vremena puta izvodi se na jediničnoj mreži ćelija rješavanjem eikonalne jednadžbe (*grč. eikón: slika*). Eikonalna jednadžba je valna teorijska aproksimacija jednadžbe skalarnog vala [5], koja predstavlja valne fronte konstantne faze, a zapisuje se na sljedeći način:

$$\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial z}\right)^2 = \frac{1}{v^2(x,y,z)} \qquad (2)$$

Ova jednadžba pokazuje vrijeme *T(x,y,z)* za zraku/trag vala koji prolazi položajem *(x,y,z)* u mediju s brzinom *v(x,y,z)*. Kada su poznata vremena putovanja do svih geofona iz nekog seizmičkog izvora (točke paljenja) te njihove koordinate na površini (geometrija seizmičkog profila), onda se zraka rekonstruira praćenjem njenog „traga“ unatrag, od geofona do izvora, tako da su uvijek okomite na valnu frontu [5].

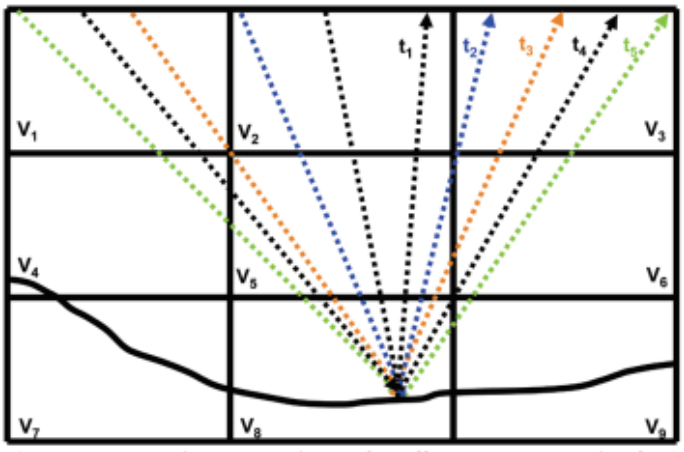
Da bi se odredila raspodjela brzina u matrici (koja predstavlja seizmički presjek kroz geomedij postavljen duž geofonskog niza na površini terena), ovom metodom se rješava skup svih jednadžbi istodobno. Ako se zamisli jednostavan 2D model, kakvog prikazuje Slika 13, onda je seizmički presjek (područje mjerenja), razdijeljen na konačan broj pravokutni ćelija u kojima je brzina širenja vala konstantna. Vrijeme nailaska vala ABC je vrijeme t_{ABC}, za refleksiju (u ovom slučaju) koja se događa u točki B između izvora A i geofona C. [3] Tada je vrijeme koje je potrebno valu da od točke A dođe do točke C jednako:

$$t_{ABC} = \frac{d_1}{v_1} + \frac{d_5}{v_5} + \frac{d_8}{v_8} + \frac{d_9}{v_9} + \frac{d_6}{v_6} + \frac{d_3}{d_3} \qquad (3)$$



Slika 13 Podjela modela na ćelije u kojima svaka ćelija ima svoju vlastitu brzinu širenja vala. [3]

Oznaka d_i predstavlja duljinu puta kojeg val pređe u *i*-toj ćeliji, a v_i brzinu u istoj. Slične jednadžbe po obliku vrijede za sve putanje/zrake koje će se reflektirati u točki B ili bilo kojoj drugoj točki na granici /reflektoru koja dijeli dva geomedija, (Slika 14).



Slika 14 Pet valnih zraka s izvorima u pet točaka i zajedničkom točkom refleksije u geomediju podijeljenom na 9 ćelija. [3]

Da bi se odredila raspodjela brzina po putanjama kao što prikazuje na Slika 14, pokušavaju se odrediti brzine kroz ćelije za što je moguće više zraka. Na taj način se povećava broj zraka koje prolaze kroz neku ćeliju (povećava se gustoća zraka u ćelijama ili pokrivenost presjeka zrakama). S većim brojem

zraka koje mogu prolaziti kroz neku ćeliju raste i točnost određivanja njenog iznosa. To se može napisati u obliku:

$$t_i = \sum_{j=1}^{N} \frac{d_{ij}}{v_j} = \sum_{j=1}^{N} d_{ij} s_j \qquad (4)$$

gdje t_i predstavlja ukupno vrijeme uzduž *i*-te putanje, d_{ij} dužinu *i*-te putanje u *j*-toj ćeliji, v_j brzinu u *j*-toj ćeliji, s_j sporost u istoj, a *N* je broj ćelija.

Jednadžba (4) se može zapisati i u matričnom obliku :

$$\mathbf{T} = \mathbf{D}\,\mathbf{S} \qquad (5)$$

Kada se modelira seizmička refrakcija u geomediju koji se sastoji od dva sloja između kojih je horizontalna granica (najjednostavniji slučaj), tada se iz vremena prvih nailazaka seizmičkog vala na sve geofone može konstruirati x-t dijagram. Na horizontalnu os se nanose x koordinate pozicije geofona u profilu, a na vertikalnu os vremena t prvi nailasci seizmičkih valova na svaki geofon. Nakon toga započinje interpretacija mjernih podataka određivanjem regresijskih pravaca, Slika 15. Iz njihovih nagiba se mogu odrediti brzine u ta dva sloja , a iz odsječaka na osi vremena i brzina, dubina od površine do horizontalne granice među slojevima.

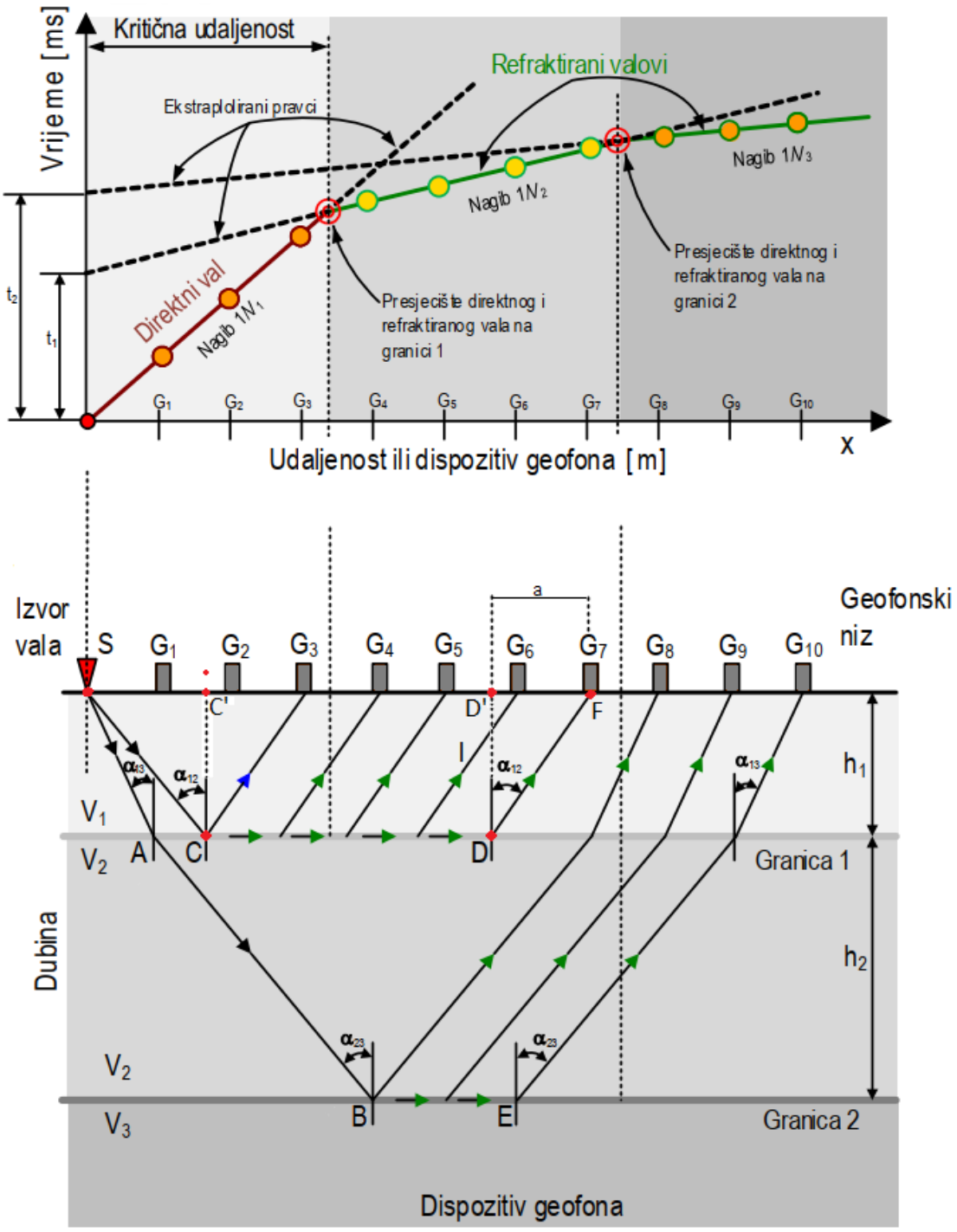
Početni model predstavlja pojednostavljeni slučaj s paralelnim slojnim granicama geomedija. Iz mjerenja, odnosno iz konstruiranog x-t dijagrama poznate su nam vrijednosti brzina i intercepta vremena dolazaka za pojedini sloj: sloj 1: (v_1, t_{i1}), sloj 2: (v_2, t_{i2}). Poznato je vrijeme nailaska na bilo koji geofon, udaljenost od izvora vala do pojedinog geofona, a nepoznat je kut α_{12} pod kojim se val lomi i nastavlja dalje po prvoj granici kao i dubina prvog sloja h_1.

Nepoznanice se rješavaju iz jednadžbi vremena. Ukupno vrijeme biti će jednako zbroju vremena između pojedinih točki na putanji vala od izvora I do svakog geofona G_j = F:

$$t_{SF} = t_{SC} + t_{CD} + t_{DF} \qquad (6)$$

Zbog simetrije kutova u trokutima ΔSCC´ i ΔFDD´ vremena su jednaka:

$$t_{SC} = t_{DF} \tag{6.1}$$



Slika 15 Dijagram (x-t) udaljenost – vrijeme i refrakcija na paralelnim granicama. [15]

Iz geometrije sustava postavljenih geofona dobiju se izrazi za izračun veličine kuta α_{12}:

$$\cos \alpha_{12} = \frac{h_1}{l} \tag{7}$$

$$\tan \alpha_{12} = \frac{a}{h_1} \tag{8}$$

Daljnjim raspisivanjem izraza 6.1 dobivamo sljedeće:

$$t_{SC} = \frac{l}{v_1} = \frac{h_1}{cos\alpha \cdot v_1} \tag{9}$$

$$t_{CD} = \frac{\left(\mathrm{x} - \overline{\mathrm{SC}'} - \overline{\mathrm{D}'\mathrm{G}}\right)}{v_2} \tag{10}$$

Gdje su udaljenosti $\overline{\mathrm{SC}'}$ i $\overline{\mathrm{D}'\mathrm{F}}$ jednake:

$$\overline{\mathrm{SC}'} = \overline{\mathrm{D}'\mathrm{F}} = a = \ h_1 \cdot tg\alpha_{12} \tag{11}$$

Uvrštavanjem 11. u 10. dobije se:

$$t_{CD} = \frac{x}{v_2} - \frac{2 \cdot h_1}{v_2} \cdot tg\alpha_{12} \tag{10.1}$$

Primjenom Snellovog zakona na granici 1 postavljaju se omjeri funkcije sinusa kutova i brzina u slojevima:

$$\frac{sin\alpha_{12}}{sin\sphericalangle r} = \frac{v_1}{v_2}\,, \qquad \sphericalangle r = 90° \tag{12}$$

$$sin\alpha_{12} = \frac{v_1}{v_2} \tag{12.1}$$

Izrazi za funkciju kosinusa (7) i tangensa (8) se mogu raspisati uvrštavanjem Snellovog zakona izraženog omjerom brzina:

$$cos\alpha_{12} = (1 - sin^2\alpha)^{\frac{1}{2}} = \left(1 - \frac{v_1^2}{v_2^2}\right)^{\frac{1}{2}} = (\frac{v_2^2 - v_1^2}{v_2^2})^{\frac{1}{2}} \tag{13.1}$$

$$tg\alpha_{12} = \frac{sin\alpha_{12}}{cos\alpha_{12}} = \frac{v_1}{v_2} \cdot \frac{v_2}{(v_2^2 - v_1^2)^{\frac{1}{2}}} = \frac{v_1}{(v_2^2 - v_1^2)^{\frac{1}{2}}} = v_1 \cdot (v_2^2 - v_1^2)^{-\frac{1}{2}} \qquad (13.2)$$

Nakon uvrštavanja izraza (13.2) u (10.1.), a (13.1.) u (9.) (Prilog 1) ukupno vrijeme t_{SF} glasi:

$$t_{SF} = \frac{1}{v_2} \cdot x + 2 \cdot h_1 \cdot \frac{1}{v_1 \cdot v_2} \cdot (v_2^2 - v_1^2)^{\frac{1}{2}} \qquad (14)$$

Izraz (14) predstavlja segmentni oblik jednadžbe pravca u kojem $\left[\frac{1}{v_2}\right]$ predstavlja nagib pravca na x-t dijagramu, a $\left[2 \cdot h_1 \cdot \frac{1}{v_1 \cdot v_2} \cdot (v_2^2 - v_1^2)^{\frac{1}{2}}\right]$ intercept vremena t_{i1}. Iz izraza za intercept vremena t_{i1} može se odrediti debljina prvog sloja:

$$h_1 = \frac{1}{2} \cdot t_{i1} \cdot v_1 \cdot v_2 \cdot (v_2^2 - v_1^2)^{-\frac{1}{2}} \qquad (15)$$

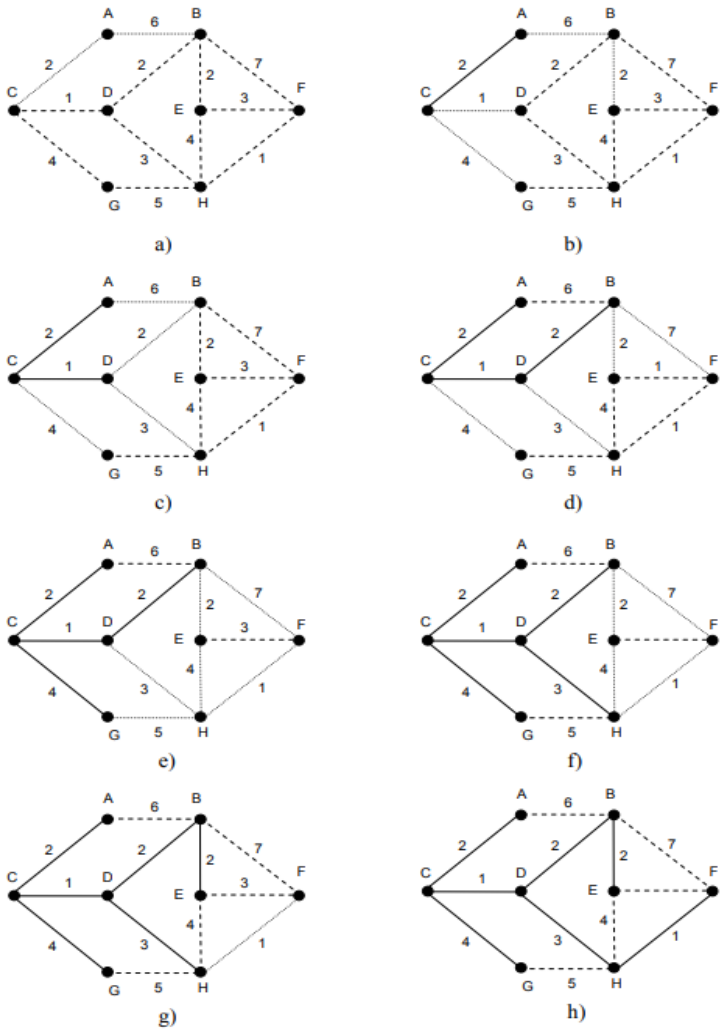
Općenito, za bilo koju granicu *k* između slojeva *k* i (*k+1*) može se izračunati vrijeme prijeđenog puta:

$$t_k = \frac{1}{v_{k+1}} \cdot x + 2 \cdot \sum_{j=1}^{k} h_j \cdot \left(v_j \cdot v_k\right)^{-1} \cdot \left(v_k^2 - v_j^2\right)^{\frac{1}{2}} \qquad (16)$$

Refrakcijskom metodom mogu se dobiti dubine do granice s preciznošću ±10%. No postoje primjeri u kojima x-t dijagram ne pruža potpune informacije o granicama, pa u tim slučajevima nastaju puno veće pogreške. 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 sedimentnom mediju brzine valova postepeno rastu s porastom dubine zbog različitog stupnja zbijenosti tla ili kompaktnosti stijenske mase. Tijekom interpretacije treba uzeti u obzir da se brzine mogu mijenjati i uzdužno, odnosno lateralno, a ne samo po dubini.

4.1 Dijkstra algoritam

Osnovna ideja Dijkstra algoritma je stvaranje mreže putanja od početne točke, a postavljena je po cijelom geomediju koji se istražuje [17]. Tako formirana mreža se sastoji od skupa minimalnih udaljenosti (dužina), od početne točke do svih ostalih točaka. Na jednom kraku se bira brid koji spaja onaj vrh koji nije u mreži te tako postaje dio mreže. Pri tome se za svaki vrh računa udaljenost od početnog vrha. Od svih bridova koji se u jednom koraku mogu izabrati, uzima se onaj za koji je pripadni vrh, koji nije u mreži, najmanje udaljen od početnog vrha. Sljedeći primjer pokazuje kako se izgrađuju putovi minimalne udaljenosti. Na taj se način mogu određivati i tragovi zraka u ćelijama seizmičke tomografije (Slika 16).

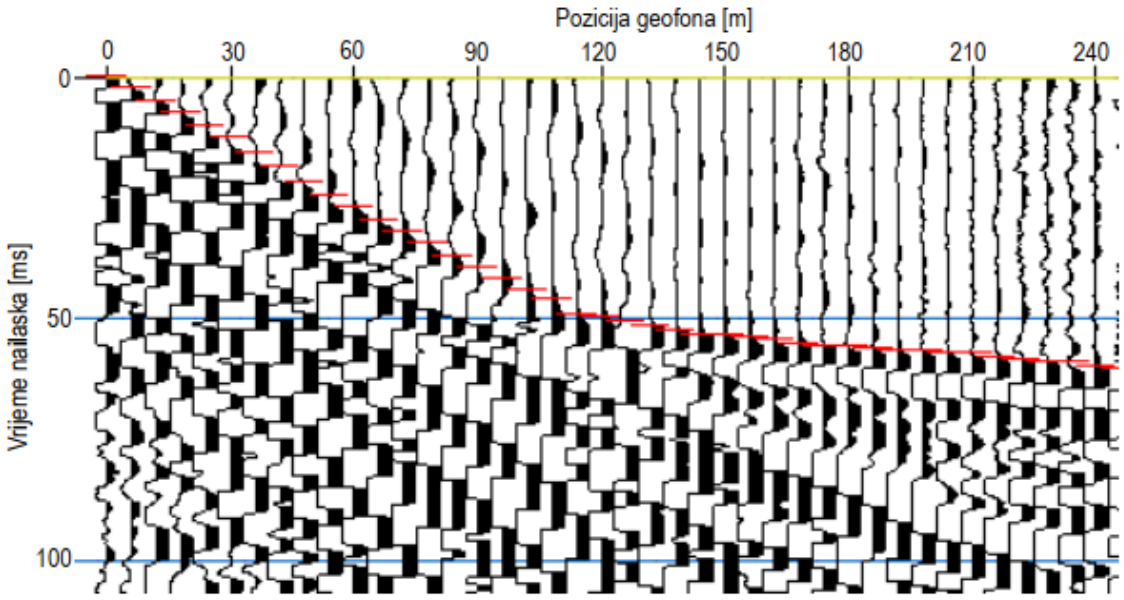


Slika 16 Primjer Dijkstra algoritma. [16]

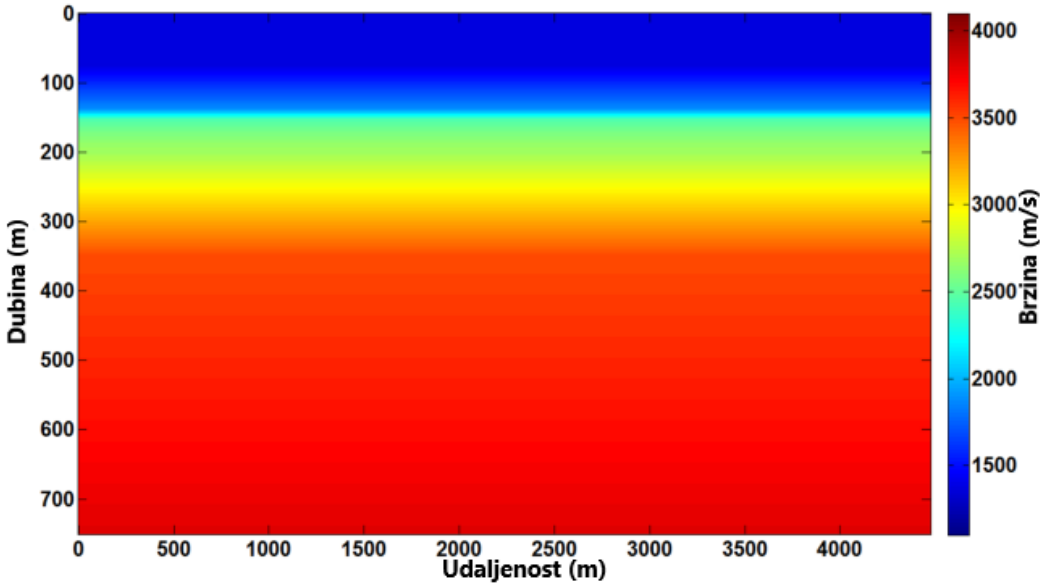
U prvom koraku a) - b) bira se između dvaju bridova AB i AC u vrhu A. Izabere se brid AC, jer je udaljenost do C (2) manja nego do B (6). U drugom koraku c) bira se između triju bridova AC, CD i CG u vrhu C te se uzima CD, jer je najkraći (1). U trećem koraku d) izabere se DB, jer je s obzirom na vrh D, vrh B najbliži (2). U četvrtom koraku e) iz vrha C se izabire brid CG jer je kraći (4), a zatim se u petom f) iz vrha D odabire DH (3). U posljednja dva koraka g) - h) odabiru se bridovi BE duljine (2) i HF duljine (1). [16]

4.2 Tijek rada i interpretacija

Nakon očitanih vrijednosti vremena prvih nailazaka iz seizmograma, Slika 17, te se vrijednosti unose u x-t dijagram i konstruiraju pravci (dva pravca je vidljiv samo jedan „lom“) koji najbolje aproksimiraju izmjerene vrijednosti, Slika 15 [6]. Zatim se gradi početni model brzina u programu za izračunavanje najkraće putanje zrake, Slika 18. Ovdje se koristi pretpostavku da će brzine P valova rasti s dubinom. Prvi nailasci se koriste za postavljanje modela brzina koji najbolje aproksimira izmjerene podatke i to tako da se uspoređuju iterativno sintetički nailasci s onim stvarno izmjerenim.



Slika 17 Vremena prvih nailazaka seizmičkih valova na geofone (crveno označeno). [6]

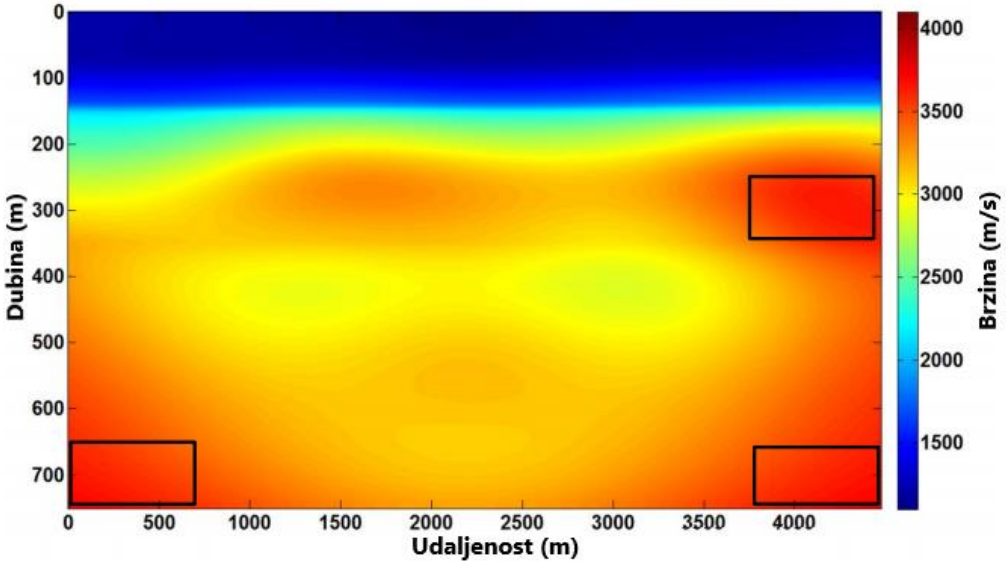


Slika 18 Početni model brzina. [5]

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 [6]. Idealno poklapanje sintetičkih i izmjerenih podataka teško je postići. Za razliku od konvencionalnih metoda koje traže neku razinu poznavanja geoloških uvjeta kao i seizmičkih principa, automatsko modeliranje polja brzina bez vanjske intervencije treba uzeti s velikim oprezom. Tehnika inverzije (iz x-t dijagrama se dobije V-H konturni dijagram brzina-dubina) se smatra pogodnom za istraživanje plitkog geomedija gdje se ne očekuje veliki broj slojeva (uglavnom do pet značajnijih refraktora na kojima je „skok“ seizmičke impedancije zamjetan). Inverzija modela distribucije brzina u presjeku se temelji na inverziji vremena širenja seizmičkog poremećaja kroz geomedij izmjerenog duž postavljenog profila na površini. Ponovnim mjerenjima i mijenjanjem lokacije izvora seizmičkih valova (točka paljenja SP s premješta ne druge koordinate) dobiva se jasniji model brzina. Mapiranje je moguće ako su zadovoljene dvije pretpostavke:

1. elastična svojstva formacija pod površinom su dovoljno različita
2. brzina propagacije vala raste s dubinom (preduvjet refrakcije).

Rezultat ponovnih mjerenja, usklađivanja brzina za svaku ćeliju i inverzije treba dati najvjerojatniju sliku distribucije seizmičke brzine po dubini u presjeku, Slika 19.

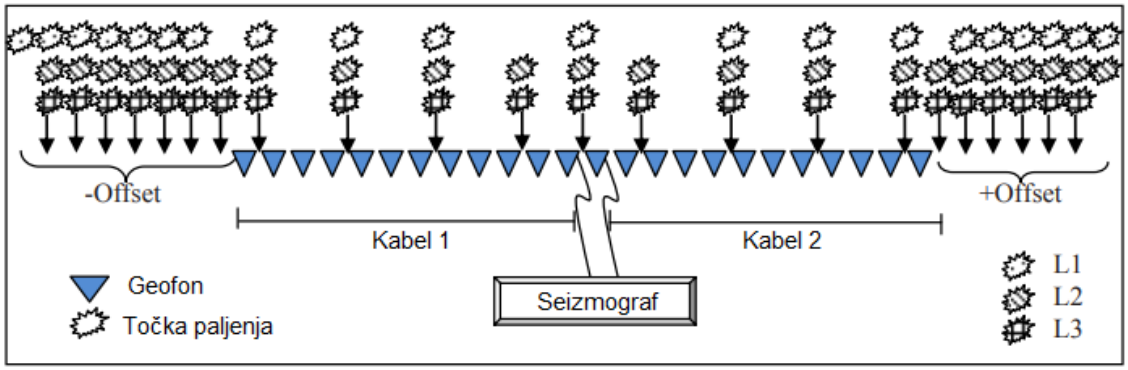


Slika 19 Konačni model brzina (crni pravokutnici označavaju mjesta slabije pokrivenosti valovima). [5]

5. Primjena u inženjerstvu okoliša

Metode seizmičke refrakcije i tomografija te njihova kombinacija koriste se u rudarskim, geološkim i inženjerskim istraživanjima. U novije vrijeme koriste se i u hidro-geološkim istraživanjima. Također, ove metode koriste se za određivanje razine podzemne vode na područjima koja su teško dostupna strojevima za bušenje, identifikaciju tla ili stijena u graditeljstvu. U inženjerstvu okoliša ova metoda može poslužiti za određivanje povoljne lokacije odlagališta otpada, procjene dubine temeljne stijene prilikom izgradnje, stratigrafskom mapiranju i lociranju diskontinuiteta u stijenskim masama.

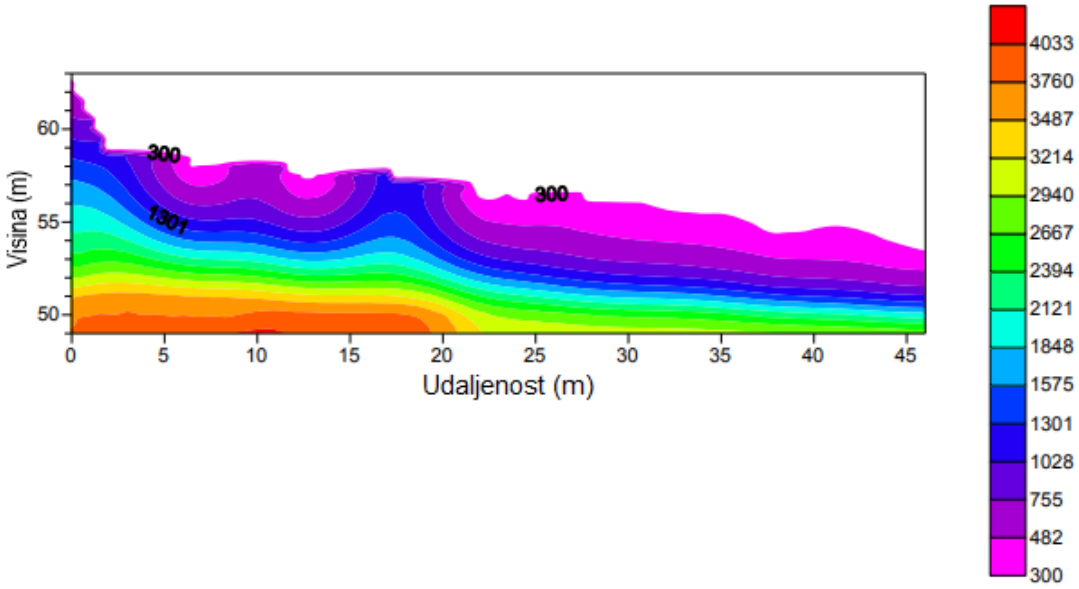
Dobar primjer seizmičke refrakcijske tomografije u geotehnici [2] uključuje prikupljanje podataka prilikom izvođenja seizmičke refrakcije, obradu podataka i tomografsku interpretaciju. Za prikupljanje podataka se koristio 24-kanalni *ABEM Terraloc MK8* seizmograf i 28Hz-ni geofoni. Mjerenja su izvedena duž tri paralelna profila između kojih je 20m razmaka. Geofoni su postavljeni na dva metra međurazmaka, što u konačnici daje duljinu ispitivanja od 46m. Koristio se pad utega od 20kg za generiranje seizmičkih valova. Shematski prikaz postavljene opreme i točaka paljenja prikazuje Slika 20.



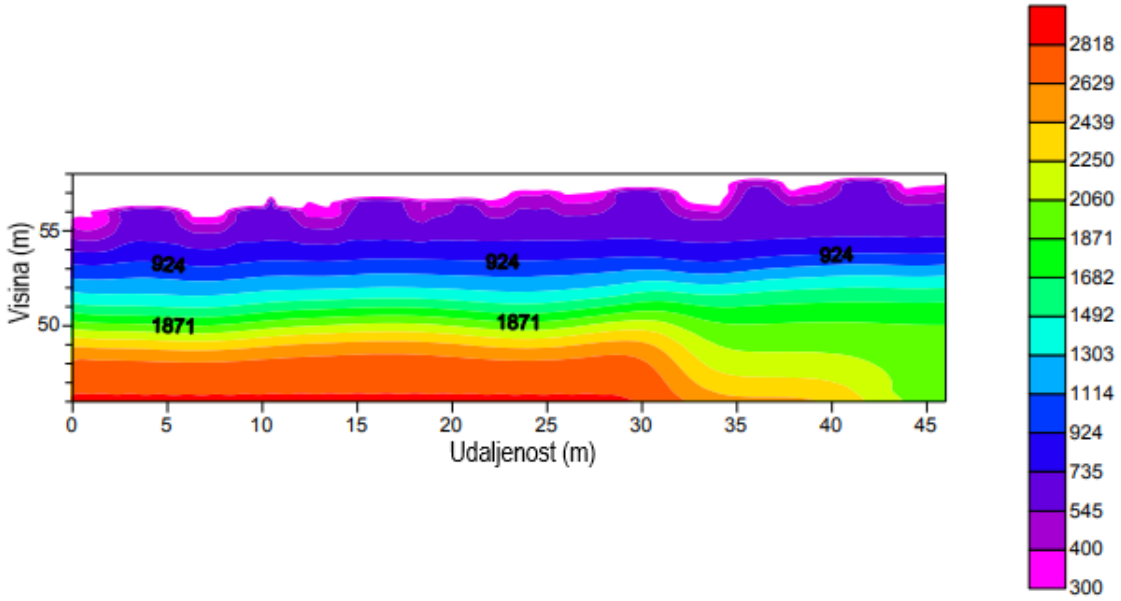
Slika 20 Shematski prikaz postavljenih geofona i točaka paljenja na profilima L1, L2 i L3. [2]

Da bi dobili što je moguće kvalitetniji rezultate prilikom izvođenja seizmičke refrakcije, potrebno je osigurati dovoljan broj točaka paljenja. Tako da je na prvom profilu postavljeno 20 točki paljenja, na drugome 23 točke, a na trećem 22.

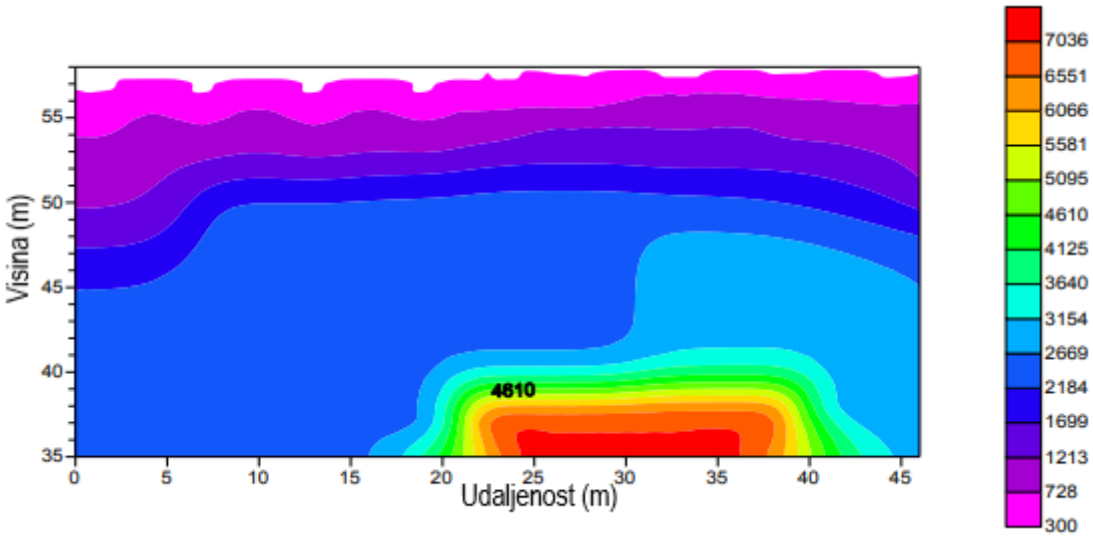
Općenito, rezultati seizmičke tomografije (Slika 21 - Slika 23), upućuju na 4 glavna sloja. Prvi sloj u kojemu su brzine širenja 300-500ms^{-1} upućuju da je to pokrovni sloj dubine <1m koji formira opterećenje ostalim slojevima. Brzina se lagano povećava na prijelazu u drugi sloj, koji bi mogao biti sloj vapnenca s brzinama 500-800ms^{-1} na dubinama od 1m do 4m. Brzine u sloju 3 upućuju na jako ispucalu vapnenačku stijenu u kojoj su brzine 800-2000ms^{-1} na dubini od 4m do 10m. Temeljna vapnenačka stijena predstavlja 4.-ti sloj u kojemu su brzine veće od 2000ms^{-1}. Kompetentna vapnenačka temeljna stijena je nađena na trećem profilu s brzinama >3000ms^{-1}.



Slika 21 Model brzina za prvi profil (L1). [2]



Slika 22 Model brzina za drugi profil (L2). [2]



Slika 23 Model brzina za treći profil (L3). [2]

Metoda seizmičke refrakcijske tomografije je troškovno isplativa za dobivanje informacija i geotehničkih karakterizacija slojeva u geomediju. Korištenjem ove metode dobiju se detaljne informacije o strukturi geomedija, raspodjeli brzina i dubini slojeva. [2]

6. Zaključak

U ovom radu opisana je metoda seizmičke refrakcije i tomografija kao alat za interpretaciju rezultata mjerenja. Temelj ovog rada je opisivanje seizmičke refrakcije kao osnove za razumijevanje seizmičkih metoda i njihove široke primjene. Općenito, geofizičke metode koriste se za određivanje fizikalno-mehaničkih parametara tla kao što su parametri elastičnih deformacija - Youngov modul i Poissonov koeficijent. Matematički modeli koji se koriste u tomografiji su složeni i potrebno je razumjeti načine na koje parametri utječu na model brzina. Pomoću ove metode mogu se uočiti promjene u brzinama P valova koje ukazuju na različita mehanička i inženjerska svojstva geomedija. Zbog svoje jednostavnosti, niske cijene izvođenja mjerenja i kvaliteti rezultata, ova metoda može se primjenjivati kod rješavanja problema u zaštiti okoliša, inženjerstvu okoliša, geotehnici, građevini, arheologiji i sličnim područjima u kojima je potrebna dubinska slika stanja stijene ili tla.

7. Popis literature

1. John Milsom: Field Geophysics; 4 Edition; Wiley; 2011.
2. I.N. Azwina, Rosli Saadb and M. Nordiana, Applying the Seismic Refraction Tomography for Site Characterization, ICESD 2013: January 19-20, Dubai, UAE
3. Ian F. Jones, Tutorial: Velocity estimation via ray-based tomography, First break volume 28, February 2010
4. Sawasdee Yordkayhun, Detecting near-surface objects with seismic traveltime tomography: Experimentation at a test site, Songklanakarin J. Sci. Technol. 33 (4), 477-485, Jul. - Aug. 2011
5. Babatunde Arenrin, Gary Margrave, and John Bancroft, Turning-ray tomography and tomostatics, CREWES Research Report - Volume 25 (2013)
6. Težak T. Geostatička interpretacija rezultata mjerenja refrakcijskih brzina. Diplomski rad. Varaždin: Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet. 2016.
7. Jeđud B. Višekanalna analiza površinskih valova (MASW), Diplomski rad. Varaždin: Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet. 2010.
8. Jednokanalni seizmograf dostupan na: http://seistronix.com/rs_g.htm
9. Višekanalni seizmograf dostupan na: http://seistronix.com/ras_g.htm
10. Seizmički valovi, dostupno na: http://constructionanddesign.blogspot.com/2016/02/earthquake-body-waves-surface-waves.html
11. M. Arvanitis and B. D. Al-Anazi, Mathematical representation models and applications on seismic tomography, NAFTA 60 (4) 232-239 (2009)
12. Huygensov princip. Dostupno na: http://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=26766#top 28.08.2019.
13. Milivoj Uroić. Optika iz Fermatove perspektive. Matematičko-fizički list, LVI 2 2005. – 2006.
14. Radon, J., Über die Bestimmung von Fonktionnen durch ihre Integralwerte langs gewisser Mannigfaltigkeiten, Ber.Verh. Saechs. Akad. Wiss, Liepzig. Math. Phys. Kl., 69, 262-277, 1917.

15. Mario Gazdek. Interna skripta s Geotehničkog fakulteta iz kolegija Geofizika, 2017.
16. Mladen Marinović. Teorija grafova. Seminarski rad. Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Fakultet elektrotehnike i računarstva.
17. Matej Maglić. Algoritmi za pronalaženje majkraćih puteva u mreži I njihovia programska implementacija. Diplomski rad. Osijek: Sveučilište Josipa Juraja Strossmayera,. Fakultet ekektrotehnike, računarstva I informacijskih tehnologija. 2017.
18. Geofizika. Dostupno na: http://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?id=21682 . Datum pristupa: 19.08.2019.

8. Popis slika

Slika 1	Područje primjene geofizičkih metoda obzirom na veličinu čestica zla. [6]	3
Slika 2	Područje primjene geofizičkih metoda obzirom na veličinu posmične deformacija. [6]	4
Slika 3	Seizmički valovi u neograničenoj elastičnoj sredini. [10]	5
Slika 4	Površinski seizmički valovi uz granicu elastične sredine. [10]	6
Slika 5	Širenje seizmičkog vala. [15]	7
Slika 6	Prikaz refleksije i refrakcije. [1]	8
Slika 7	Shematski prikaz dijelova i konstrukcije geofona. [1]	10
Slika 8	Jednokanalni seizmograf i oprema. [8]	12
Slika 9	24-kanalni seizmograf. [9]	12
Slika 10	Seizmički tragovi u metodi refrakcije. [1]	13
Slika 11	Dijagram udaljenost – vrijeme. [6]	14
Slika 12	Prikaz događaja seizmičke refrakcije i refleksije.	15
Slika 13	Podjela modela na ćelije u kojima svaka ćelija ima svoju vlastitu brzinu širenja vala. [3]	20
Slika 14	Pet valnih zraka s izvorima u pet točaka i zajedničkom točkom refleksije u geomediju podijeljenom na 9 ćelija. [3]	20
Slika 15	Dijagram (x-t) udaljenost – vrijeme i refrakcija na paralelnim granicama. [15]	22
Slika 16	Primjer Dijkstra algoritma [16]	25
Slika 17	Vremena prvih nailazaka seizmičkih valova na geofone [6]	26
Slika 18	Početni model brzina. [5]	27
Slika 19	Konačni model brzina [5]	28
Slika 20	Shematski prikaz postavljenih geofona i točaka paljenja na profilima L1, L2 i L3. [2]	29
Slika 21	Model brzina za prvi profil (L1) [2]	30
Slika 22	Model brzina za drugi profil (L2) [2]	30
Slika 23	Model brzina za treći profil (L3) [2]	31

9. Popis tablica

Tablica 1 Brzina P vala u nekim geomedijima. 16

10. Prilozi

Prilog 1

$$t_{SC} = \frac{h_1}{v_1} \cdot \frac{v_2}{(v_2^2 - v_1^2)^{\frac{1}{2}}} \tag{9}$$

$$t_{CD} = \frac{x}{v_2} - 2 \cdot h_1 \cdot \frac{v_1}{v_2 \cdot (v_2^2 - v_1^2)^{\frac{1}{2}}} \tag{10}$$

$$t_{SF} = \frac{x}{v_2} + \frac{2 \cdot h_1}{v_1} \cdot \frac{v_2}{(v_2^2 - v_1^2)^{\frac{1}{2}}} - \frac{2 \cdot h_1}{v_1} \cdot \frac{v_1^2}{v_2 \cdot (v_2^2 - v_1^2)^{\frac{1}{2}}}, \quad (v_2^2 - v_1^2)^{\frac{1}{2}} = A \tag{6}$$

$$t_{SF} = \frac{x}{v_2} + \frac{2 \cdot h_1}{v_1} \cdot \left(\frac{v_2}{A} - \frac{v_1^2}{A \cdot v_2}\right)$$

$$\left(\frac{v_2}{A} - \frac{v_1^2}{A \cdot v_2}\right) = \frac{v_2^2 - v_1^2}{A \cdot v_2} = \frac{v_2^2 - v_1^2}{v_2 \cdot (v_2^2 - v_1^2)^{\frac{1}{2}}} = \frac{1}{v_2} \cdot (v_2^2 - v_1^2)^{\frac{1}{2}}$$

$$t_{SF} = \frac{1}{v_2} \cdot x + 2 \cdot h_1 \cdot \frac{1}{v_1 \cdot v_2} \cdot (v_2^2 - v_1^2)^{\frac{1}{2}}$$