

Usporedba interpretacije seizmičkih refrakcijskih podataka pomoću softvera otvorenog koda i komercijalnog softvera

Ovničević, Lovro

Undergraduate thesis / Završni rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:169:643890>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-23**



Repository / Repozitorij:

[Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering Repository, University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET
Prije diplomski studij geološkog inženjerstva

**USPOREDBA INTERPRETACIJE SEIZMIČKIH REFRAKCIJSKIH PODATAKA
POMOĆU SOFTVERA OTVORENOG KODA I KOMERCIJALNOG SOFTVERA**

Završni rad

Lovro Ovničević

G-4653

Zagreb, 2024.



KLASA: 602-01/24-01/74
URBROJ: 251-70-14-24-2
U Zagrebu, 09.09.2024.

Lovro Ovničević, student

RJEŠENJE O ODOBRENJU TEME

Na temelju vašeg zahtjeva primljenog pod KLASOM 602-01/24-01/74, URBROJ: 251-70-14-24-1 od 17.05.2024. priopćujemo vam temu završnog rada koja glasi:

USPOREDBA INTERPRETACIJE SEIZMIČKIH REFRAKCIJSKIH PODATAKA POMOĆU SOFTVERA OTVORENOG KODA I KOMERCIJALNOG SOFTVERA

Za mentoricu ovog završnog rada imenuje se u smislu Pravilnika o izradi i ocjeni završnog rada Doc.dr.sc. Josipa Kapuralić nastavnik Rudarsko-geološko-naftnog-fakulteta Sveučilišta u Zagrebu.

Mentorica:


(potpis)

Doc.dr.sc. Josipa Kapuralić

(titula, ime i prezime)

Predsjednica povjerenstva za
završne i diplomske ispite:


(potpis)

Izv.prof.dr.sc. Ana Maričić

(titula, ime i prezime)

Prodekan za nastavu i studente:


(potpis)

Izv.prof.dr.sc. Borivoje
Pašić

(titula, ime i prezime)

USPOREDBA INTERPRETACIJE SEIZMIČKIH REFRAKCIJSKIH PODATAKA POMOĆU SOFTVERA OTVORENOG KODA I KOMERCIJALNOG SOFTVERA

Lovro Ovničević

Rad izrađen: Sveučilište u Zagrebu
Rudarsko-geološko-naftni fakultet
Zavod za geofizička istraživanja i rudarska mjerenja
Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

Sažetak

U ovom završnom radu cilj je analizirati razlike u korištenju i rezultatima komercijalnog softvera i softvera otvorenog koda za obradu podataka dobivene metodom refrakcijske seizmike. Nakon uvoda opisana je metoda refrakcijske seizmike gdje je generalno opisano na čemu se ona temelji, za što se koristi te metode inverzije koje se koriste pri obradi.

Za primjer principa rada korišteni su podaci duž dva profila koji su uneseni u oba softvera. Nadalje, u koracima je opisan princip rada u Refrapy-u pa u Rayfract-u, na koji način se aktivira softver, učitavaju podaci, spremaju datoteke i provodi inverzija.

U oba softvera se provela inverzija i dobiveni su modeli koji su interpretirani i uspoređeni kako bi se vidjele razlike i u njima.

Za kraj je napisana diskusija u kojoj se govori o prednostima i nedostacima u korištenju pojedinog softvera.

Ključne riječi: Interpretacija seizmičkih refrakcijskih podataka, Refrapy, Rayfract
Završni rad sadrži: 34 stranice, 31 slika, i 11 reference.
Jezik izvornika: Hrvatski
Pohrana rada: Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta, Pierottijeva 6, Zagreb
Mentori: Dr. sc. Josipa Kapuralić, docentica, RGNF

Ocjenjivači: Dr. sc. Josipa Kapuralić, docentica, RGNF
Dr. sc. Jasna Orešković, redovita profesorica, RGNF
Dr. sc. Marko Cvetković, izvanredni profesor, RGNF

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. METODA REFRAKCIJSKE SEIZMIKE	2
2.1. Mjerenje, obrada i interpretacija podataka.....	2
2.2. GRM metoda.....	4
2.3. Delta t-V metoda	4
2.4. Seizmička refrakcijska tomografija	5
3. OPIS RADA U REFRAPY-U	6
3.1. Refrapy - softver otvorenog koda za obradu i interpretaciju refrakcijskih seizmičkih podataka	6
3.2. Aktiviranje Refrapy-a	6
3.3. Isticanje prvih nailazaka u Refrapy-u	7
3.4. Inverzija podataka u Refrapy-u	14
4. OPIS RADA U RAYFRACT-U.....	17
4.1. Rayfract-komercijalni softver za obradu i interpretaciju refrakcijskih seizmičkih podataka	17
4.2. Isticanje prvih nailzaka	17
4.3. Inverzija.....	22
5. USPOREDBA REZULTATA INVERZIJE NA DVAMA PROFILIMA.....	23
5.1. Rezultati i diskusija	23
6. ZAKLJUČAK.....	27
LITERATURA	28

POPIS SLIKA

Slika 2-1 – Refrakcijske geometrije snimanja s 11 točaka paljenja po geofonskom rasporedu. Žute zvjezdice su točke paljenja, a trokuti su geofoni.....	3
Slika 3-1 – Naredba za otvaranje refrapick grafičkog sučelja.....	7
Slika 3-2 – Refrapick grafičko sučelje.....	8
Slika 3-3 – Kreiranje novog projekta.....	8
Slika 3-4 – Imenovanje projekta.....	9
Slika 3-5 – Automatski stvorene mape za spremanje podataka.....	9
Slika 3-6 – Učitavanje putanje projekta.....	10
Slika 3-7 – Učitavanje datoteka seizmograma.....	10
Slika 3-8 – Datoteke za učitavanje.....	11
Slika 3-9 – Primjer jednog seizmograma.....	12
Slika 3-10 – Prikaz alatne trake.....	12
Slika 3-11 – Prikaz nastavka alatne trake.....	13
Slika 3-12 – "Pikiran" prvi nailasci.....	13
Slika 3-13 – Mapa s pikiranim datotekama.....	14
Slika 3-14 – Komanda za inverziju.....	14
Slika 3-15 – Grafičko sučelje Refrainv-a.....	14
Slika 3-16 – Mapa s podacima o nailascima.....	15
Slika 3-17 – Interpretacija slojeva.....	15
Slika 3-18 – Alatna traka za inverziju.....	16
Slika 4-1 – Definiranje novog profila.....	18
Slika 4-2 – Automatski stvorene mape za spremanje podataka.....	18
Slika 4-3 – Datoteke u valnim formatima.....	19
Slika 4-4 – Unošenje točaka paljenja.....	19
Slika 4-5 – Odabiranje pozicije točke paljenja i geofona za prvu točku paljenja.....	20
Slika 4-6 – Odabiranje pozicija točke paljenja i geofona za drugu točku paljenja.....	21
Slika 4-7 – Seizmogram i graf vrijeme-udaljenost.....	22
Slika 4-8 – Tipovi inverzije u Rayfractu.....	22
Slika 5-1 – Model brzina prvog profila u Refrapy-u. Zvjezdice na površini predstavljaju točke paljenja, obrnuti trokuti geofone, a linije valne zrake.....	24
Slika 5-2 – Model brzina prvog profila u Rayfractu. Sive točkice predstavljaju geofone, a crveni obrnuti trokuti točke paljenja.....	24

Slika 5-3 – Model podzemlja drugog profila u Refrapy-u. Zvezdice na površini predstavljaju točke paljenja, obrnuti trokuti geofone, a linije valne zrake.	25
Slika 5-4 – Model podzemlja drugog profila u Rayfractu. Sive točkice predstavljaju geofone, a crveni obrnuti trokutići točke paljenja.	25

1. UVOD

U ovom radu analizirana je primjena dvaju softvera za obradu podataka refrakcijske seizmike koja spada u jednu od najčešće korištenih geofizičkih metoda u plitkim inženjersko-geološkim istraživanjima. Refrakcijska seizmika temelji se na registriranju refraktiranih valova, pri čemu su podaci prikupljeni pomoću geofona koji bilježe prve nailaske valova. Zbog jednostavnosti primjene, ova metoda se često koristi u istraživanjima kao što su hidrogeološke studije, istraživanja ležišta građevinskog materijala i kamenoloma, te u određivanju dubina kompaktnih slojeva i rasjednih zona. Međutim, s obzirom na to da geofizička istraživanja nisu primarna za velik broj stručnjaka u geološkoj struci, plaćanje skupih licenci za komercijalni softver često se ne isplati.

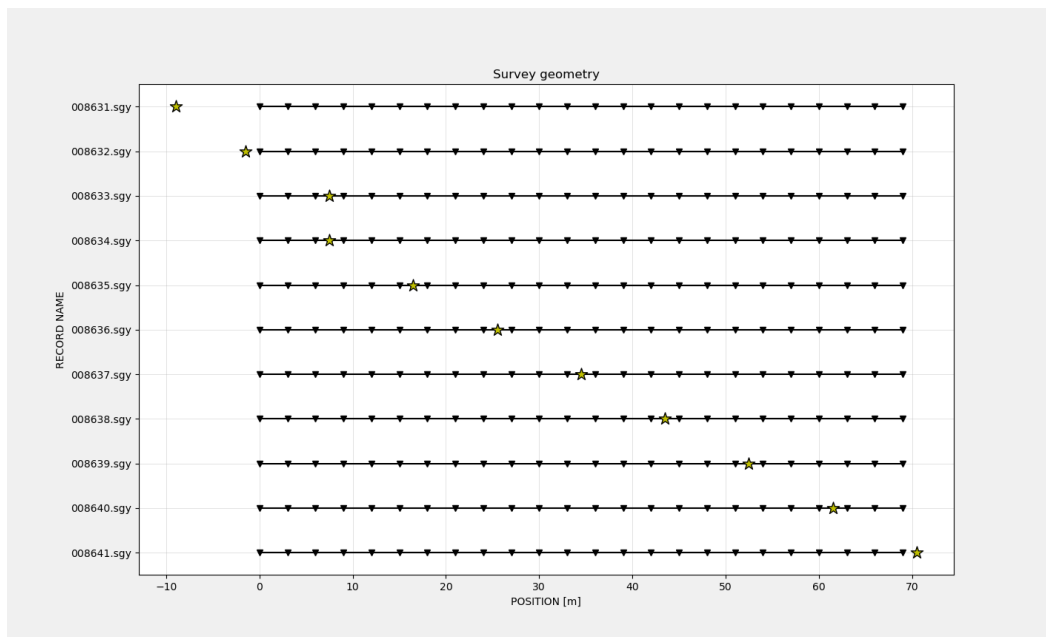
Danas su dostupne mnoge opcije za pregled i obradu geofizičkih podataka putem besplatnih softverskih paketa. Ovaj rad fokusiran je na procjenu primjenjivosti jednog od tih softvera, konkretno Refrapy, te koliko je prilagođen korisnicima koji se bave inženjersko-geološkim istraživanjima. Također je napravljena usporedba s komercijalnim softverom Rayfract, analizirajući njihove prednosti i nedostatke, posebice u kontekstu analize seizmičkih podataka prikupljenih na dva profila u blizini Splita.

2. METODA REFRAKCIJSKE SEIZMIKE

Refrakcijska seizmika se temelji na registriranju refraktiranih valova pomoću prvih nailazaka na geofone, zbog čega se mogu koristiti jednostavniji seizmografi s fiksnim pojačanjem. Primjena refrakcijske metode može se, ovisno o dubini, podijeliti na plitka, duboka i vrlo duboka istraživanja. Za hidrogeološka, inženjerska i istraživanja mineralnih sirovina primjenjuju se plitka istraživanja od nekoliko metara do nekoliko stotina metara. Pri tom je moguće odrediti debljine površinskih trošnih zona, dubine kompaktnih slojeva ili zdrave stijene te pukotinske i rasjedne zone koje pokazuju manje brzine od okolne stijene. Prilikom istraživanja ležišta građevnih materijala, kamenoloma moguće je ograničiti zone s kompaktnim stijenama koje daju veće brzine u usporedbi sa zdrobljenim zonama manjih seizmičkih brzina. U hidrogeologiji, refrakcijska seizmička istraživanja su usmjerena na određivanje zona većih šupljikavosti koje smanjuju brzine, kao i pukotinske i rasjedne zone za koje je vezana voda. Duboka refrakcijska istraživanja do nekoliko kilometara nekada su rabljena za istraživanje naftnih struktura, ali danas su nadopuna drugim metodama. Vrlo duboka refrakcijska istraživanja do nekoliko desetaka kilometara zahvaćaju Zemljinu koru i nisu predmet primijenjenih geoloških istraživanja.

2.1.Mjerenje, obrada i interpretacija podataka

Mjerenja se izvode duž profila ili s rasporedom geofona u lepezi, trokutu, luku ovisno o zadatku. Geofonski raspored se duž zadanog profila pomiče kako bi se pokrio cijeli profil. Snimaju se paralelno P i S valovi koji mogu dati podatke o elastičnim konstantama tj. stanju stijena (kompaktnosti, raspucalosti i šupljikavosti). Uobičajena geometrija snimanja sastoji se od pet točaka izvora valova za svaki geofonski raspored: dvije na krajevima, dvije na nekoj udaljenosti od krajnjih geofona te jedna u sredini, a radi boljeg pokrivanja se dodaju još dvije unutar rasporeda geofona pa se mjerenja izvode s 9 točaka na profilu radi boljeg zahvata većih promjena debljina i brzina u trošnoj zoni iznad temeljnog refraktora.



Slika 2-1 – Refrakcijske geometrije snimanja s 11 točaka paljenja po geofonskom rasporedu. Žute zvjezdice su točke paljenja, a trokuti su geofoni.

U slučaju usporednih granica slojeva u podzemlju, paljenje se može izvesti samo s jedne strane rasporeda geofona, no u većini slučajeva, granice su nagnute i ne zna im se oblik pa je potrebno paljenje s obje strane rasporeda, tj. izvesti povratno pokrivanje.

Prvi nailasci moraju biti oštri i moramo biti sasvim sigurni da su to prvi nailasci. Jasni prvi nailasci se dobivaju dostatnom energijom u točki paljenja. Na bližim geofonima, prvi se nailasci jasno uočavaju dok se udaljavanjem teže precizno određuju zbog manje energije vala i prisutnosti šuma u podacima. Nakon očitavanja prvih nailazaka sa seizmograma, vrijednosti se unose na graf vrijeme-udaljenost ($t-x$) te se povlače pravci koji najbolje zadovoljavaju točkaste vrijednosti. Na terenima s izrazitim reljefom potrebno je izvesti statičke popravke tj. svesti na referentnu ravninu pa se vremena nailazaka popravljaju za visinu geofona iznad te razine i za dubinu izvora vala ili točke paljenja. Interpretiranjem se određuju dubine granica i seizmičke brzine u stijenama koje daju informacije od geološkoj građi.

„Delay time“ metoda (Hagedoorn, 1954) interpretacije omogućuje računanje dubine samo ispod točaka izvora valova. U novije vrijeme koriste se GRM (eng. „*Generalized reciprocal method*“, Palmer, 1981 i 1991) metoda, seizmička tomografija i Delta $t-V$ metoda (Gebrande i Miller, 1985) koja s tomografijom daje inverzni model brzina.

2.2. GRM metoda

GRM-metoda je obrada i interpretacija seizmičkih refrakcijskih podataka dobivenih mjerenjem uzduž profila paljenjem s obje strana geofonskog rasporeda kojom je moguće odrediti dubinu do nepravilne plohe refraktora ispod svakog geofona, brzine u pojedinom refraktoru i uzdužne promjene brzina unutar refraktora. Za uspješnu primjenu metode potreban je mali razmak između geofona i veći broj točaka paljenja čime se dobiva dovoljno podataka za preciznu interpretaciju. Brzina i nagib refraktora se mogu mijenjati duž profila, a metoda se ne smatra osjetljivom na nagibe do 20° . Greške oko 5% i postojanje alata za otkrivanje skrivenih slojeva prednosti su ove metode u odnosu na ostale analitičke metode interpretacije. (Šumanovac, 2012)

2.3. Delta t-V metoda

Metoda Delta t-V inverzije daje model brzina u stijenama na temelju trasiranja puta zraka i kontinuirane podatke o promjeni brzina s dubinom za sva stajališta na refrakcijskom profilu. Interpolacijom izolinija brzina dobije se pseudo dvodimenzionalni presjek seizmičkih brzina kroz podzemlje. Postupnim povećanjem stupnja kompaktacije kroz podzemlje dolazi do postupnog povećanja brzina jer svaki dublji sloj ima malo veću brzinu od sloja iznad njega. Ako pretpostavimo neizmjeran broj neizmjerano tankih slojeva put zrake i graf vrijeme-udaljenost bit će izglađena konveksna krivulja. Trajektorija zrake i oblik grafa ovisi o funkciji promjene brzine s dubinom.

2.4. Seizmička refrakcijska tomografija

Seizmička refrakcijska tomografija (SRT), također poznata kao "tomografija gradijenta brzine" je tehnika snimanja koja proizvodi presječnu sliku (tomogram/ inverzni model brzine) podzemlja. Postupak inverzije uključuje trasiranje zraka kroz početni model brzine i usporedbu modeliranih vremena putovanja s terenskim podacima te prilagodbu modela ćeliju po ćeliju kako bi se uskladila izračunata vremena putovanja s terenskim podacima za generiranje konačnog modela brzine podzemlja, tomograma ili inverznog model brzine. Taj je postupak iterativan i ponavlja se sve dok se ne postigne zadovoljavajuće slaganje izračunatih i mjerenih podataka tj. dok se RMS greška (korijen srednjeg kvadrata odstupanja) ne smanji ispod neke zadane vrijednosti.

SRT tehnika se uglavnom koristi za kartiranje trošnog sloja, dubine do razine podzemne vode, struktura temelja u inženjerske svrhe te primjenu korekcija na refleksijske podatke. Osim toga, može se koristiti za predviđanje prostornih varijacija u litologiji, pornih fluida ili frakturiranja stijena, kao i za određivanje gradijenata lateralnih promjena brzine u podzemlju i za modeliranje lokaliziranih anomalija brzine.

U kršu, u područjima kompaktnih naslaga i u zonama rasjeda, kao i u područjima s ekstremnom topografijom ili složenim pripovršinskim strukturama gdje korisnik ima malo ili nimalo prethodnog znanja o podzemnim strukturama SRT metoda je od velike koristi.

3. OPIS RADA U REFRAPY-U

3.1.Refrapy - softver otvorenog koda za obradu i interpretaciju refrakcijskih seizmičkih podataka

S obzirom da nabava i održavanje komercijalnih programa zahtijevaju značajna ulaganja, za istraživačke institucije je dobra alternativa open-source softver (OSS) koji ne podrazumijeva velika ulaganja. Faktor koji utječe na korištenje open-source softvera među zajednicom je teškoća povezana s njegovim radom. Alati koji koriste komandnu liniju ili pisanje koda mogu zahtijevati značajne razine iskustva i vještina za učinkovito korištenje. Zbog svoje besplatne, fleksibilne i multiplatformske prirode, Python je bio popularan izbor za razvoj mnogih računalnih projekata u geoznanstvenoj zajednici.

Refrapy, open-source paket za analizu seizmičkih refrakcijskih podataka s programskim jezikom Python oslanja se na jednostavno grafičko korisničko sučelje (eng. graphical user interface (GUI)) za izvođenje osnovne obrade i prikaza valnog oblika seizmičkog vala, odabir prvih nailazaka i inverziju podataka. Dostupne su dvije različite metode inverzije: tomografija vremena putovanja vala i time-term metoda.

Sav kod napisan je u Pythonu (verzija 3.7) i testiran je samo na sustavima Windows 10. Refrapy je podijeljen na dva glavna modula: Refrapick, za odabir prvih nailazaka i Refrainv, za inverziju podataka. Softver ovisi o nekim open-source Python paketima. Oba modula iz Refrapy-a oslanjaju se na funkcije iz NumPy-a i Matplotlib-a (Guedes i dr., 2022).

3.2.Aktiviranje Refrapy-a

Za početak rada u Refrapy-u, prvo je bilo potrebno u Anacondi koja je distribucija programskog jezika Python, instalirati glavne programske biblioteke (eng. libraries):

obspy=1.3.0

pygimli=1.2.4

numpy=1.19.5

scipy=1.8.0

matplotlib=3.5.1

Instaliranje se može izvesti provođenjem komandi u Anaconda Prompt komandnom prozoru na način:

```
conda create -n refrapy python=3.8
conda activate refrapy
conda install obspy
conda install -c gimli -c conda-forge pygimli
pip install pmv
```

Nakon instaliranja treba izdvojiti datoteke Refrapick.py, Refrainv.py i mapu images u mapi na računalu pod imenom Refrapy-master, koji su preuzeti od autora softvera (Guedes i dr., 2022).

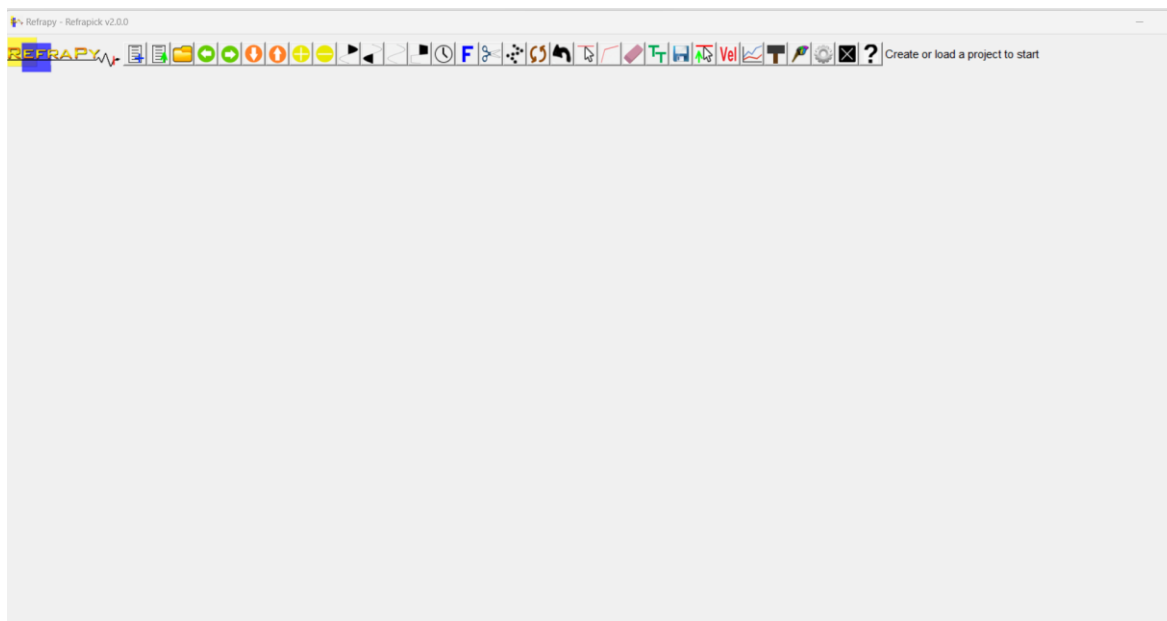
3.3. Isticanje prvih nailazaka u Refrapy-u

Za najbitniji dio refrakcijske metode, označavanje prvih nailazaka, potrebno je prvo u Anaconda Promptu ispisati naredbu *python Refrapick.py* (Slika 3-1).

```
(refrapy) C:\Users\Lovro> cd C:\Users\Lovro\OneDrive - RGNf\Refrapy-master
(refrapy) C:\Users\Lovro\OneDrive - RGNf\Refrapy-master> python refrapick.py
```

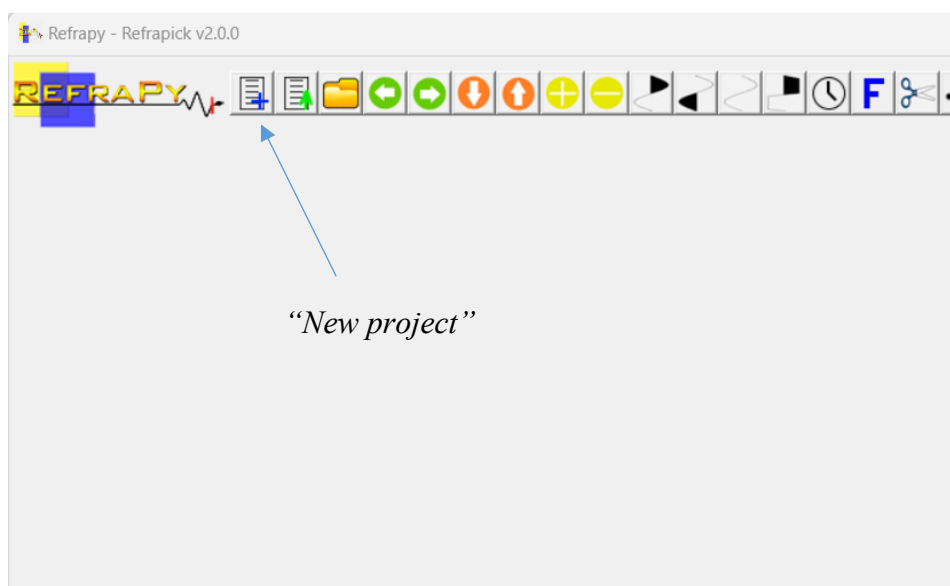
Slika 3-1 – Naredba za otvaranje refrapick grafičkog sučelja.

Nakon čega se otvara refrapick grafičko sučelje (Slika 3-2).

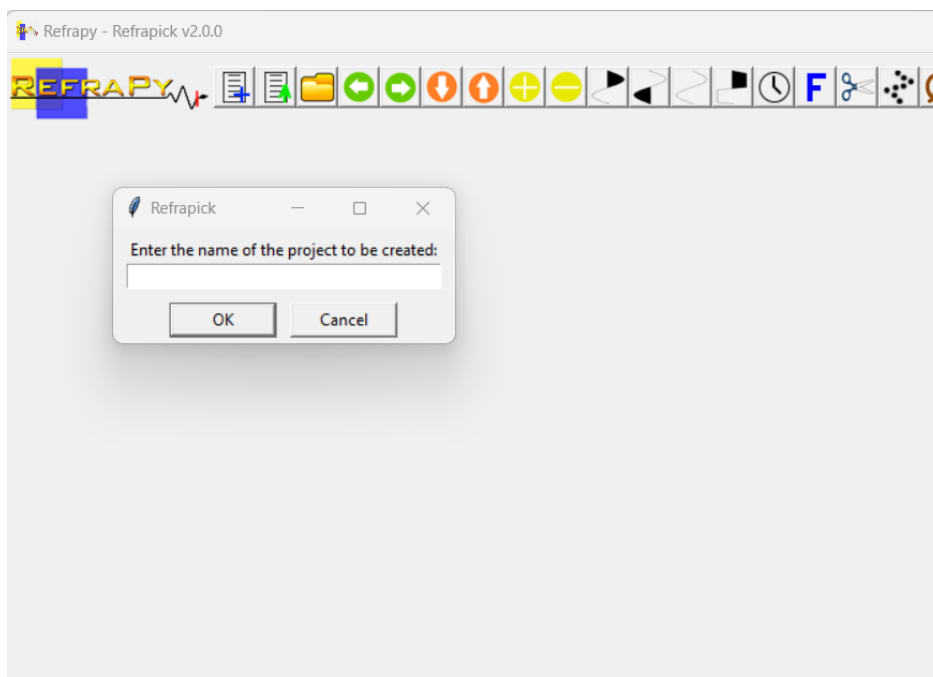


Slika 3-2 – Refrapick grafičko sučelje.

Nadalje, kako bi se rad mogao nastaviti potrebno je napraviti „Novi projekt“ (Slika 3-3) te izabrati mapu u kojemu će se on sačuvati u mapi „Refrapy-master“.



Slika 3-3 – Kreiranje novog projekta.



Slika 3-4 – Imenovanje projekta.

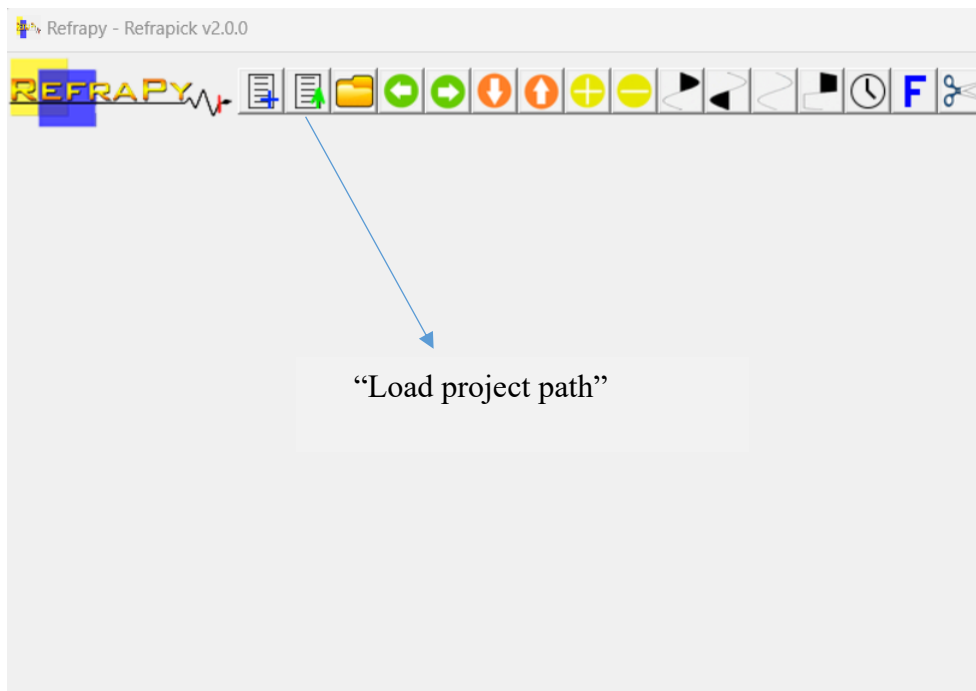
Nakon imenovanja i spremanja projekta u navedenu mapu, projekt će također imati svoje podmape (Slika 3-5).

Name	Status	Date modified	Type	Size
data	✓	5/6/2024 11:06 PM	File folder	
gps	✓	5/6/2024 10:44 PM	File folder	
models	✓	7/12/2024 1:04 PM	File folder	
picks	✓	6/15/2024 5:27 PM	File folder	
image	✓	7/12/2024 12:01 PM	PNG File	193 KB

Slika 3-5 – Automatski stvorene mape za spremanje podataka.

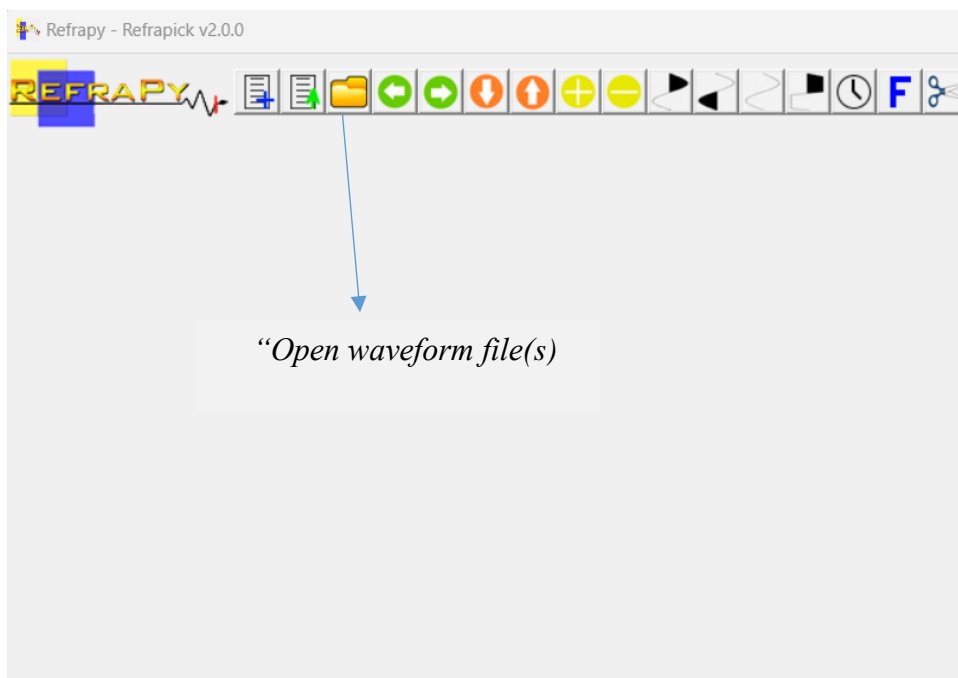
U mapu „*data*“ umeću se podaci s terena u SGY formatu koji predstavljaju seizmografe za svaku točku paljenja.

Zatim u Refrapick-u potrebno je na „*Load project files*“ ikoni izabrati svoj spremljeni projekt.

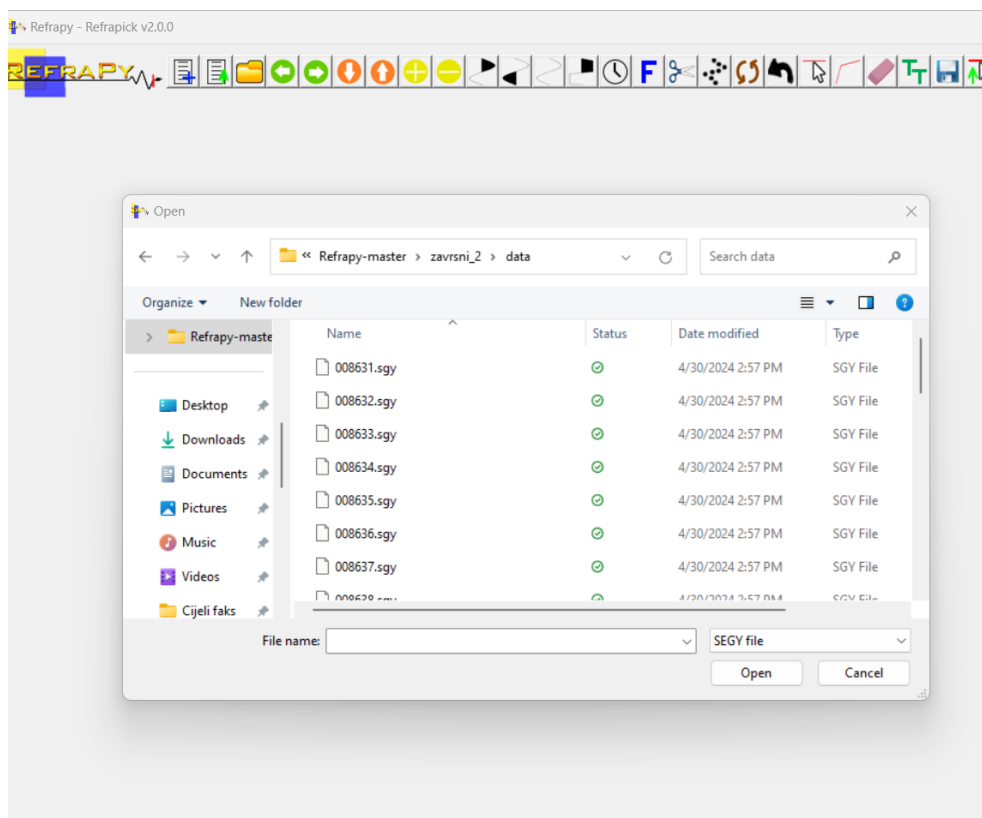


Slika 3-6 – Učitavanje putanje projekta.

Nakon toga, ikona „*Open waveform file(s)*“ (Slika 3-7) omogućuje učitavanje spremljenih podataka projekta iz mape „*data*“ (Slika 3-8).

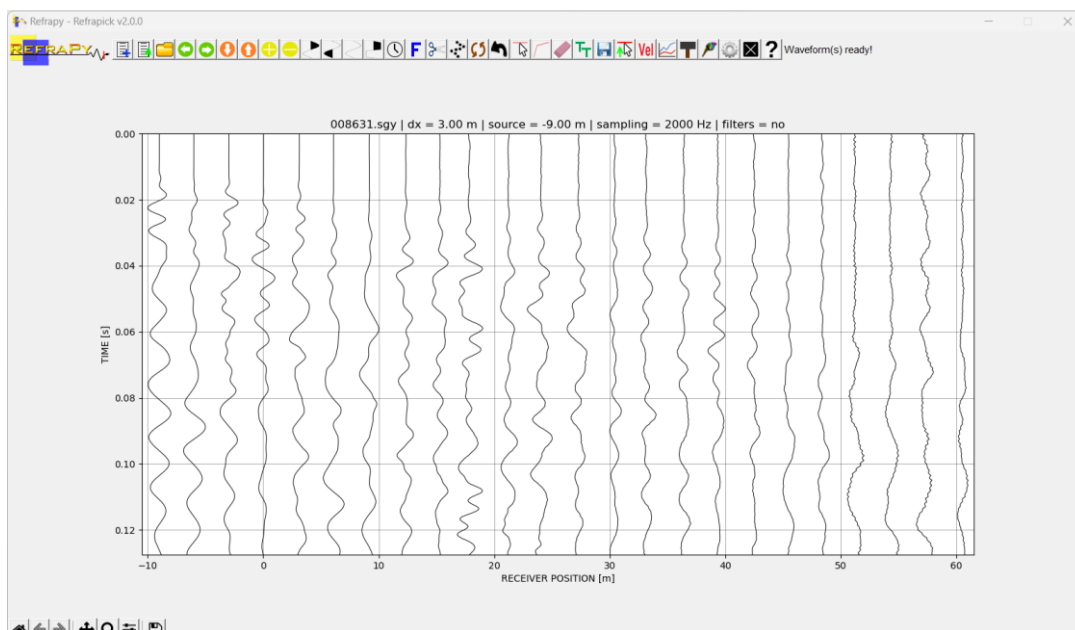


Slika 3-7 – Učitavanje datoteka seizmograma.



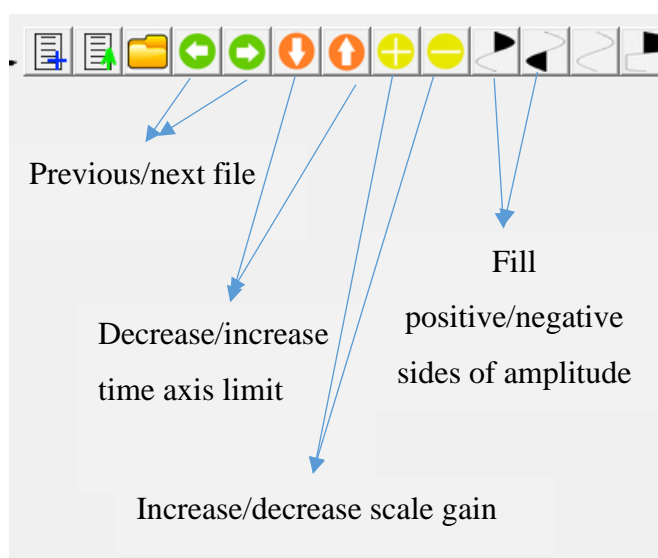
Slika 3-8 – Datoteke za učitavanje.

Biranjem željenih datoteka i klikom na „*Open*“ nude se prozori koji redom traže: razmak između geofona (u metrima), poziciju prvog geofona, poziciju pojedine točke paljenja, te kašnjenje za korekciju vremena paljenja. Ispunjavanjem svakog prozora za svaku datoteku na kraju dobivamo redom seizmograme sa željenim podacima (Slika 3-9).

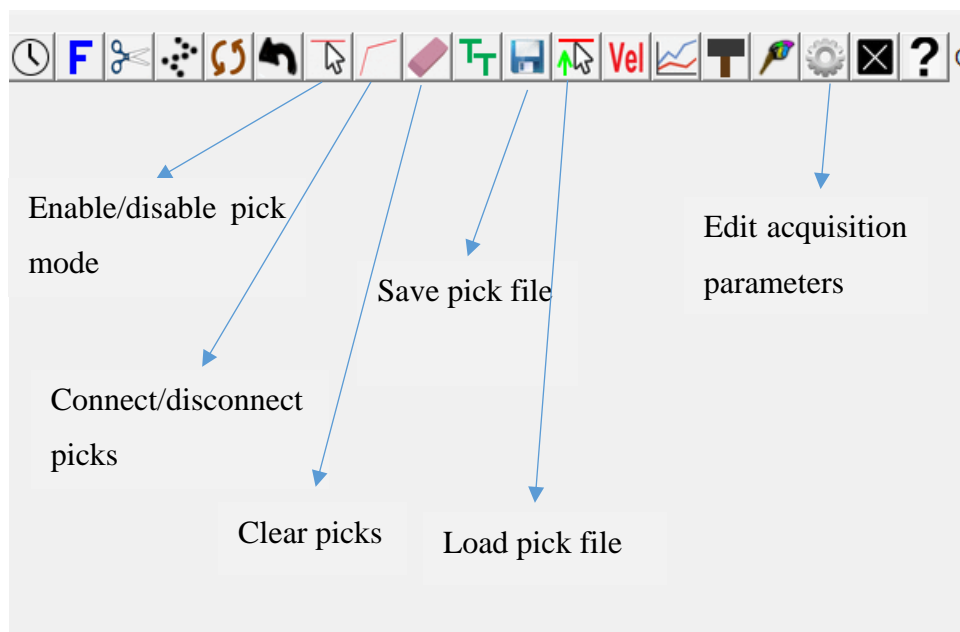


Slika 3-9 – Primjer jednog seizmograma.

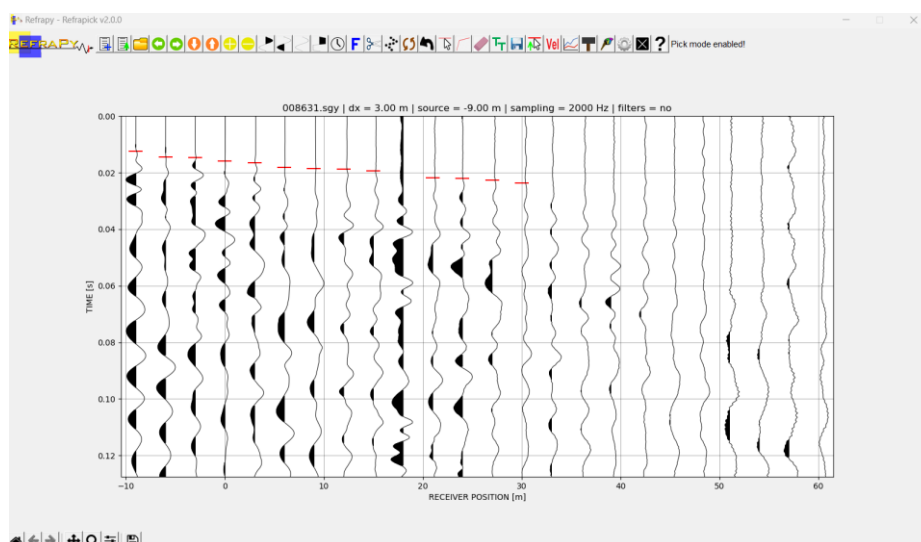
Iznad samog seizmograma nalazi se alatna traka za njegovo uređivanje (Slika 3-10), na kojem je nabitnija opcija „*Eneble/disable pick mode*“ koja omogućuje „pikiranje“ prvih nailazaka, a ostale opcije lakšu vizualizaciju amplituda. Ukoliko se tijekom unošenja podataka pogriješilo i krivo upisao neki podataka, moguće ga je ispraviti ikonom „*Edit acquisition parametars*“ (Slika 3-11).



Slika 3-10 – Prikaz alatne trake.



Slika 3-11 – Prikaz nastavka alatne trake.



Slika 3-12 – "Pikirani" prvi nailasci.

Nakon „pikiranja“ svih prvih nailazaka potrebno je spremiti završne datoteke klikom na ikonu „*Save pick file*“ koja će spremiti podatke o vremenima prvih nailazaka u mapu „*picks*“ (Slika 3-13). Pikiranane seizmograme moguće je učitati odabirom ikone „*Load pick file*“ i biranjem SGT datoteke iz mape „*picks*“ tek nakon ponovnog učitavanja svih podataka za svaku datoteku.

Name	Status	Date modified	Type	Size
data	🟢	5/6/2024 11:06 PM	File folder	
gps	🟢	5/6/2024 10:44 PM	File folder	
models	🟢	7/12/2024 1:04 PM	File folder	
picks	🟢	6/15/2024 5:27 PM	File folder	
image	🟢	7/12/2024 12:01 PM	PNG File	193 KB

Slika 3-13 – Mapa s pikiranim datotekama.

3.4. Inverzija podataka u Refrapy-u

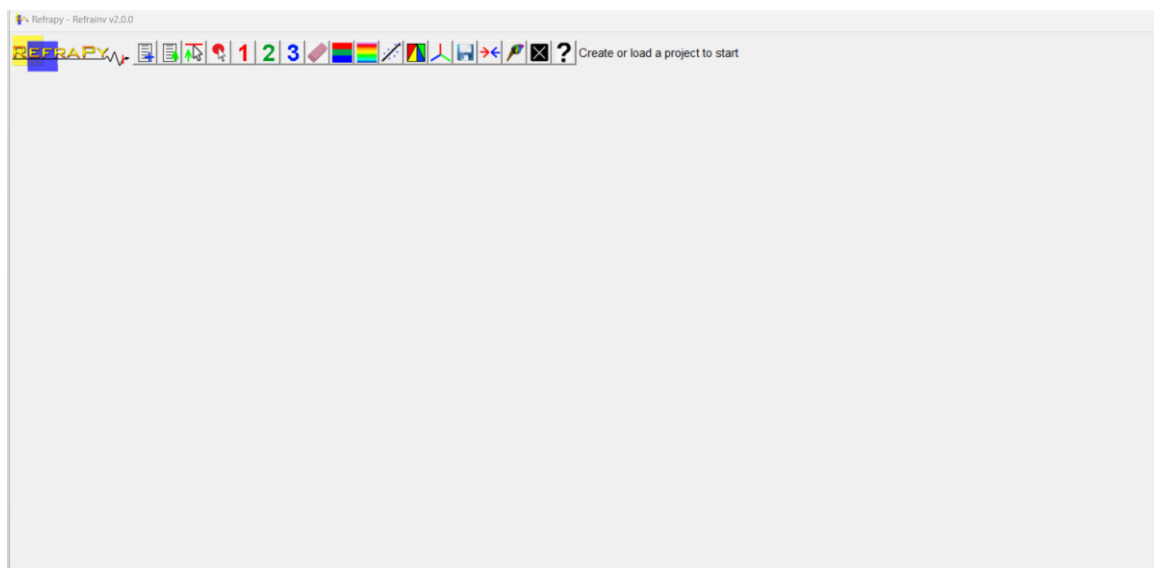
Za inverziju podataka potrebno je u Anaconda Promptu upisati naredbu *Python refrainv.py* (Slika 3-14) koja će aktivirati grafičko sučelje Refrainv (Slika 3-15).

```

C:\Windows\system32\cmd.e: x + v
(refrapy) C:\Users\Lovro> cd C:\Users\Lovro\OneDrive - RGNf\Refrapy-master
(refrapy) C:\Users\Lovro\OneDrive - RGNf\Refrapy-master> python refrainv.py

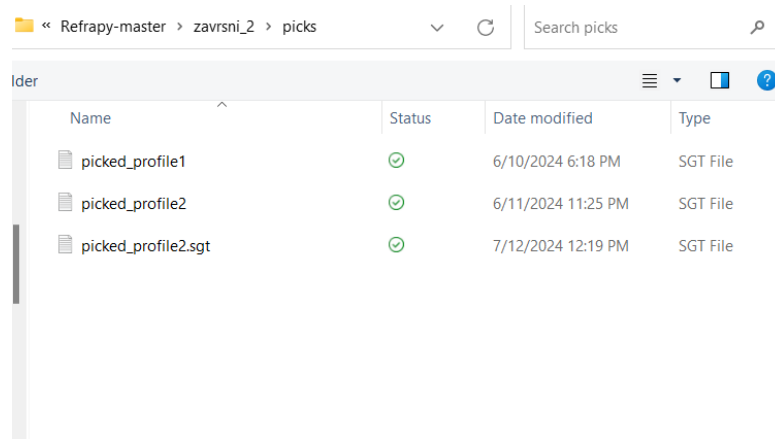
```

Slika 3-14 – Komanda za inverziju.



Slika 3-15 – Grafičko sučelje Refrainv-a.

Kako bismo učitali pikirane seizmograme potrebno je za početak odabrati ikonu „*Load project path*“ na alatnoj traci te kao i za slučaj kod prvih nailazaka izabrati mapa željenog projekta. Nadalje, klikom na ikonu „*Load pick file*“, program otvara prozor mapa sa spremljenim podacima o prvim nailascima u obliku SGT datoteke (Slika 3-16).

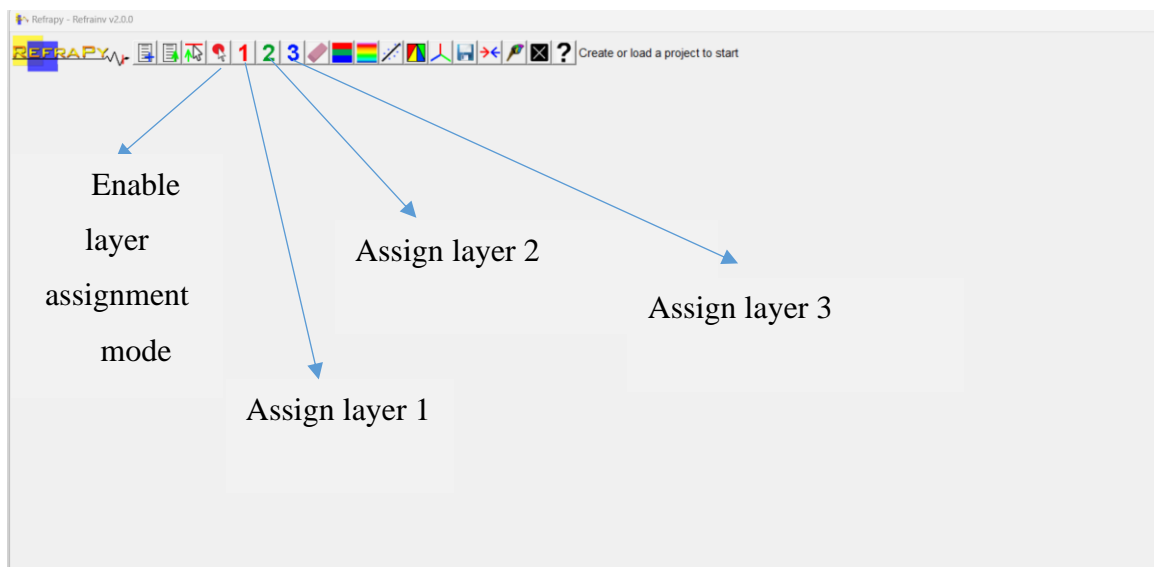


The screenshot shows a file explorer window with the path « Refrapy-master » > zavrzni_2 » picks. It contains a table with the following data:

Name	Status	Date modified	Type
picked_profile1	✓	6/10/2024 6:18 PM	SGT File
picked_profile2	✓	6/11/2024 11:25 PM	SGT File
picked_profile2.sgt	✓	7/12/2024 12:19 PM	SGT File

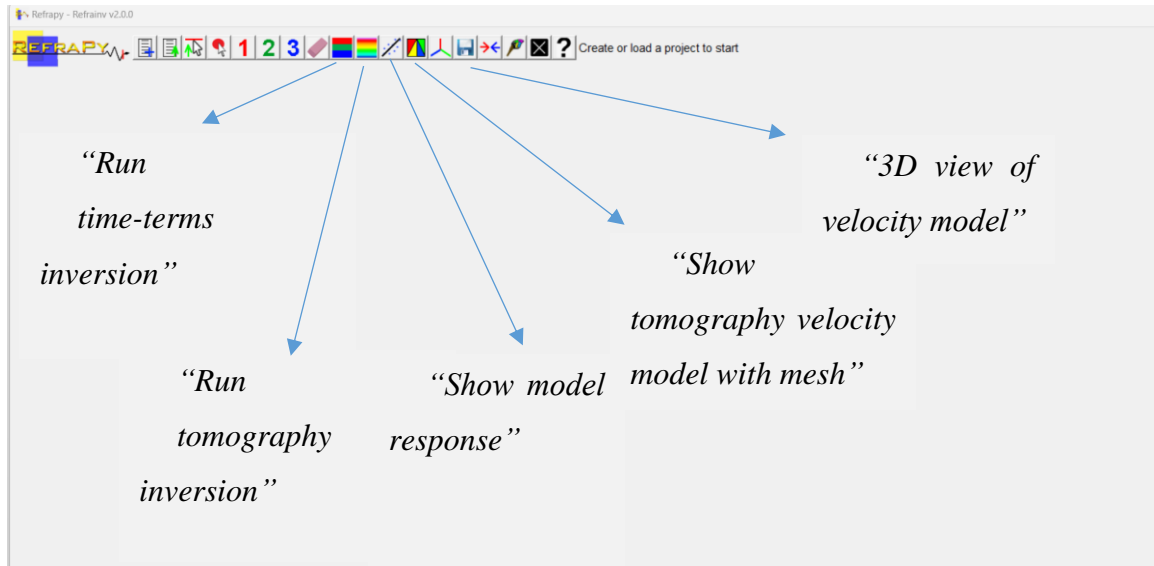
Slika 3-16 – Mapa s podacima o nailascima.

Biranjem željene datoteke, program prikazuje graf vrijeme-udaljenost. Alatna traka iznad daje mogućnost interpretacije slojeva s obzirom na graf vrijeme-udaljenost na način da se točke na grafu pridružuju pretpostavljenim slojevima (Slika 3-17).



Slika 3-17 – Interpretacija slojeva.

Za inverziju podataka moguće je izvesti samo „time-terms“ inverziju i tomografsku inverziju. Softver nudi i opciju prikaza inverznog modela brzine s prikazom prekrivanja zrakama, graf vrijeme-udaljenost za inverzni model brzine u odnosu na podatke s terena te 3D model brzina.



Slika 3-18 – Alatna traka za inverziju.

4. OPIS RADA U RAYFRACT-U

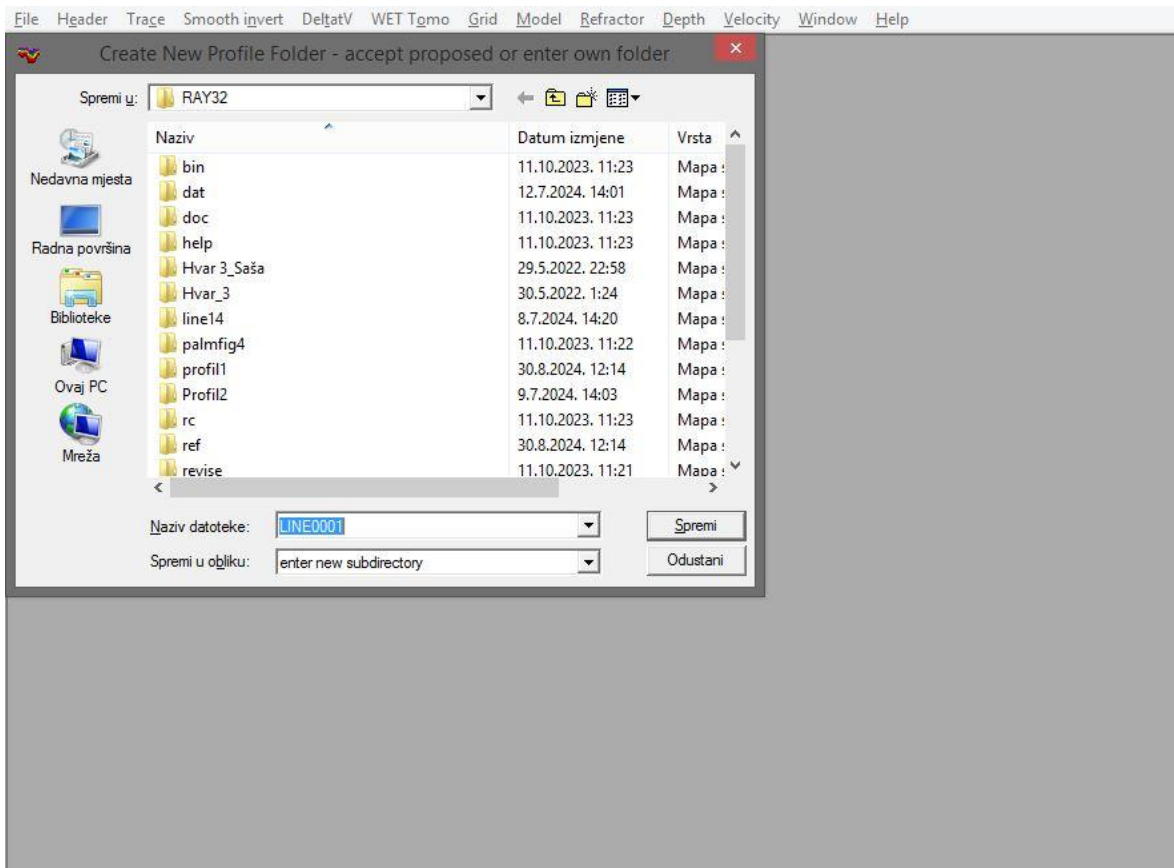
4.1. Rayfract-komercijalni softver za obradu i interpretaciju refrakcijskih seizmičkih podataka

Softver za tomografiju seizmičke refrakcije omogućava pouzdano prikazivanje modela brzine podzemlja. Tomografska interpretacija podataka temelji se na modeliranju širenja valova s putanjama valova umjesto konvencionalnih seizmičkih zraka. To povećava numeričku robusnost inverzije, posebno u situacijama s niskom pokrivenošću.

Početni 1D gradijentni model automatski se određuje izravno iz podataka vremena putovanja refrakcije lateralnim uprosječivanjem 1D profila brzina-dubina dobivenih metodom Delta tV. Ovo osigurava pouzdane početne modele čak i u slučaju inverzija brzine. Početni model se potom preciznije određuje s 2D WET (eng. Wavepath Eikonal Traveltime) inverzijom (Schuster and Quintus-Bosz, 1993). Softver također omogućuje interpretaciju vremena putovanja s konvencionalnim metodama refrakcijske seizmike, Plus-Minus metoda (Hagedoorn 1959) i metoda valnih fronti (Ali Ak, 1990), koristeći slojevite refrakcijske početne modele za WET inverziju. Također omogućava tomografiju s prijemnicima u bušotinama.

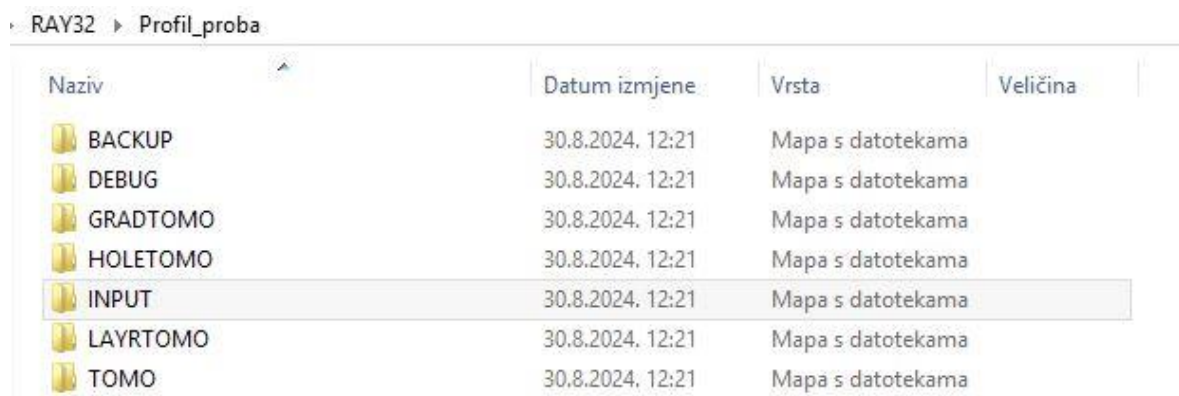
4.2. Isticanje prvih nailzaka

Najprije potrebno je na „*File*“ i „*New profile*“ kreirati svoj projekt koji će se spremirati u automatski kreiranu mapu Ray32 (Slika 4-1).



Slika 4-1– Defininiranje novog profila.

Unutar našeg projekta bit će stvorena mapa u kojima će se spremati mjereni podaci tijekom izvedbe (Slika 4-2).



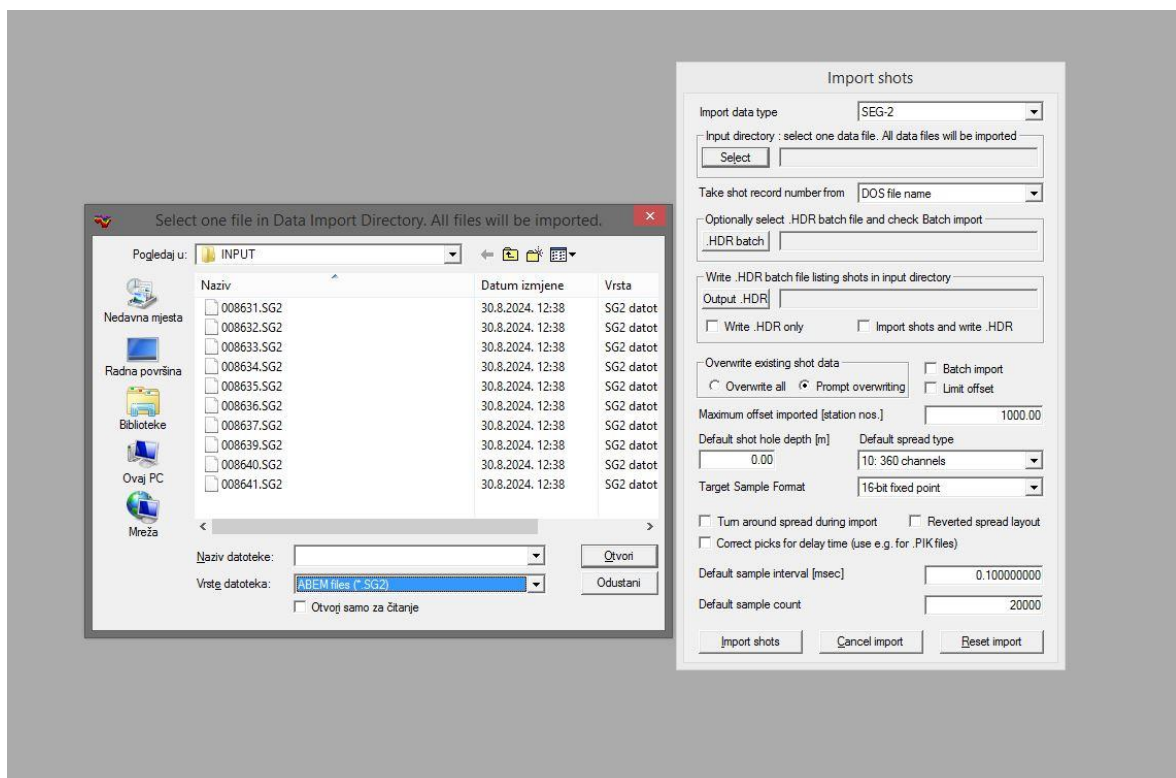
Slika 4-2 – Automatski stvorene mape za spremanje podataka.

U mapu “INPUT” potrebno je kopirati podatke s terena u SEG2 formatu (Slika 4-3).

Naziv	Datum izmjene	Vrsta	Veličina
008631.SG2	30.8.2024. 12:38	SG2 datoteka	33 KB
008632.SG2	30.8.2024. 12:38	SG2 datoteka	33 KB
008633.SG2	30.8.2024. 12:38	SG2 datoteka	33 KB
008634.SG2	30.8.2024. 12:38	SG2 datoteka	33 KB
008635.SG2	30.8.2024. 12:38	SG2 datoteka	33 KB
008636.SG2	30.8.2024. 12:38	SG2 datoteka	33 KB
008637.SG2	30.8.2024. 12:38	SG2 datoteka	33 KB
008639.SG2	30.8.2024. 12:38	SG2 datoteka	33 KB
008640.SG2	30.8.2024. 12:38	SG2 datoteka	33 KB
008641.SG2	30.8.2024. 12:38	SG2 datoteka	33 KB

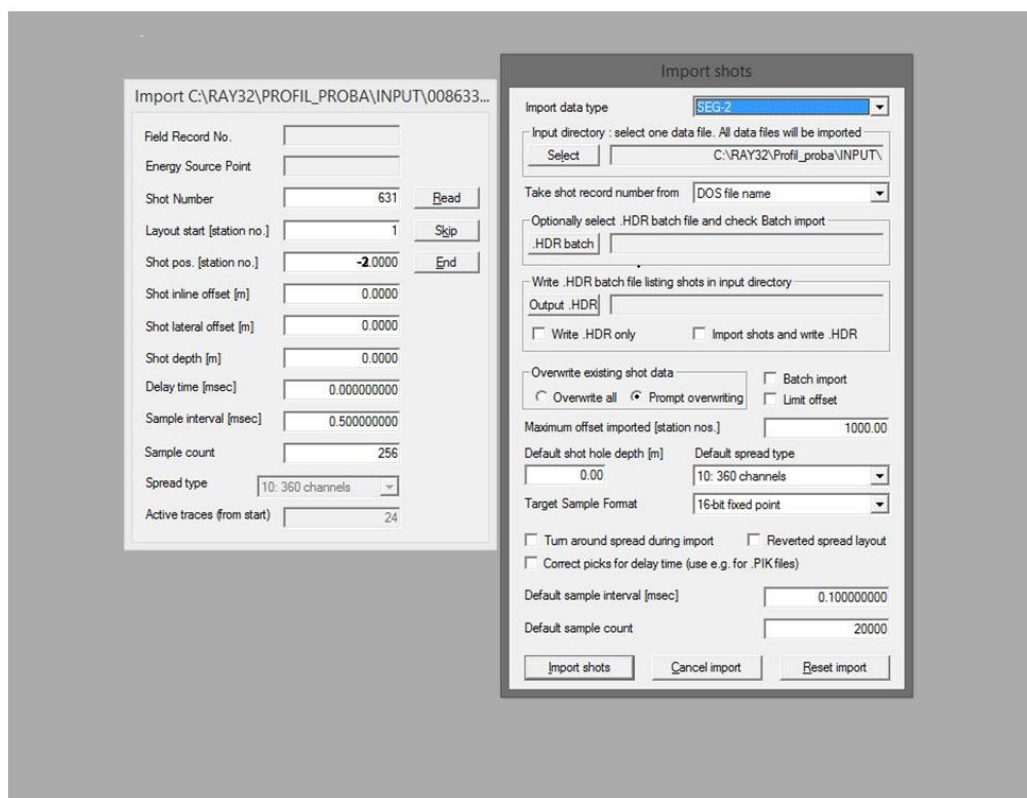
Slika 4-3 – Datoteke u valnim formatima.

Nadalje, kako bismo učitali podatke za obradu na “File” → “Import data” → „Import shots” otvara nam se prozor u kojemu je potrebno odabrati jednu datoteku u formatu SEG-2 nakon čega nam se otvara prozor za unošenje podataka o točkama paljenja, a ostale se otvaraju unošenjem prethodne (Slika 4-4).



Slika 4-4 – Unošenje točaka paljenja.

Što je bitno iz lijevog prozora jest položaj prvog geofona „*Layout start*“ i prve točke paljenja „*Shot position*“. Shot position se računa pomoću udaljenosti od prvog geofona na profilu i jediničnog razmaka geofona (Slika 4-5).



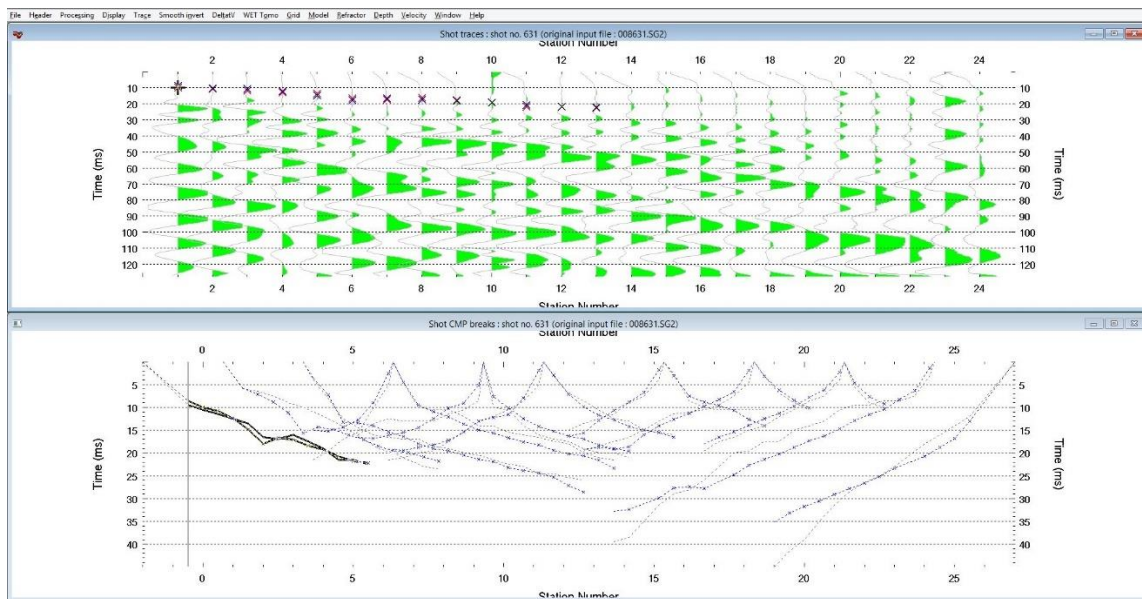
Slika 4-5 – Odabiranje pozicije točke paljenja i geofona za prvu točku paljenja.

Klikom na „*Import data*“ automatski se otvara prozor za sljedeću datoteku odnosno sljedeću točku paljenja. U ovom slučaju je točka paljenja na 0.5 jer je ta točka paljenja na -1.5 m što je pola od razmaka geofona od 3 metra. Na isti način se dalje izvodi za svaku točku paljenja (Slika 4-6).

Field	Value	Action
Field Record No.		
Energy Source Point		
Shot Number	632	Read
Layout start [station no.]	1	Skip
Shot pos. [station no.]	-0.5.0000	End
Shot inline offset [m]	0.0000	
Shot lateral offset [m]	0.0000	
Shot depth [m]	0.0000	
Delay time [msec]	0.00000000	
Sample interval [msec]	0.50000000	
Sample count	256	
Spread type	10: 360 channels	
Active traces (from start)	24	

Slika 4-6 – Odabiranje pozicija točke paljenja i geofona za drugu točku paljenja.

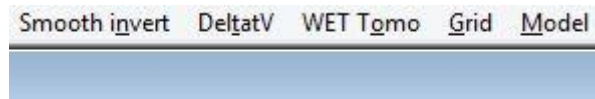
Tek kad smo proveli unos tih podataka možemo otvoriti seizmogram na „*Trace*“ → „*Shot gather*“. Dobivamo seizmičke tragove i grafove vrijeme-brzina na koje ističemo prve nailaske (Slika 4-7).



Slika 4-7 – Seizmogram i graf vrijeme-udaljenost.

4.3. Inverzija

Inverzija u Rayfractu je poprilično jednostavna. Potrebno je odabrati koja vrsta inverzije se želi primijeniti. Metode inverzije su predložene na alatnoj traci. Moguće inverzije su Delta t-V metoda, Smooth invert i WET Tomo.



Slika 4-8 – Tipovi inverzije u Rayfractu.

Kako bismo prikazali željeni model potrebno je posjedovati licencu za Surfer, softver u kojemu je moguće prikazati i grafički uređivati dobiveni model. Rayfract u inverziji automatski prikaže područje zahvaćeno zrakama. U ovom radu korištena je DeltatV metoda koja se aktivira odlaskom na „DeltatV“ → „Automatic DeltatV and WET inversion“.

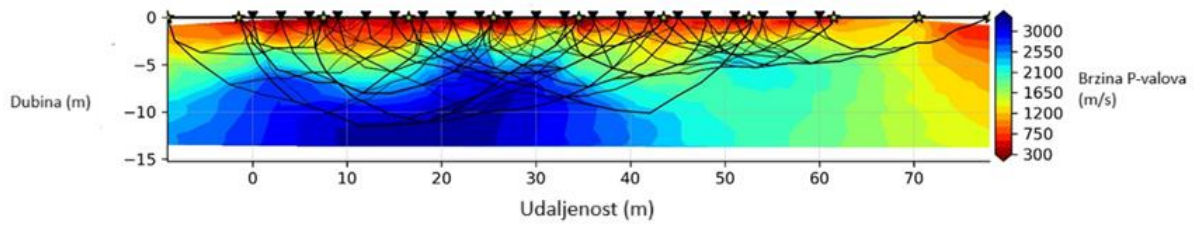
5. USPOREDBA REZULTATA INVERZIJE NA DVAMA PROFILIMA

Dva profila kod trafostanice u Splitu koja su bila dio projekta Rudarsko-geološko naftnog fakulteta predstavljaju primjer na kojemu je moguće predstaviti i prikazati razliku u radu i konačnoj interpretaciji refrakcijske metode u dva spomenuta softvera. Na profilima udaljenost između geofona bila je 3 metra, a točke paljenja postavljene su na 9 i 1,5 m od prvog i zadnjeg geofona te na polovini razmaka između svakog trećeg geofona. S obzirom da je mjerenje rađeno sa 24 geofona bilo je potrebno za drugi profil premjestiti geofonski raspored s djelomičnim preklapanjem kako bi se pokrila željena duljina profila.

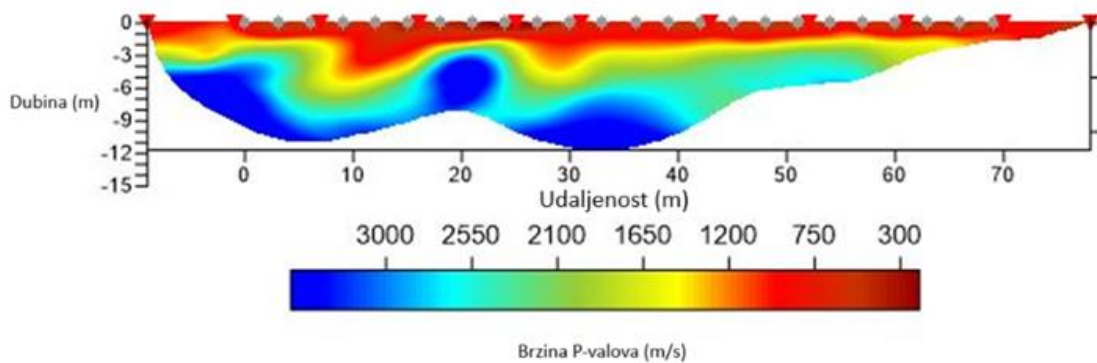
5.1. Rezultati i diskusija

Provođenjem inverzije podataka za oba profila u oba softvera dobiveni su vrlo slični rezultati i geofizički modeli. Delta t-V metoda iz Rayfracta odmah prikazuje samo dijelove podzemlja zahvaćene zrakama i položaje točaka paljenja i geofona, dok je u Refrapy-u bilo to potrebno namjestiti. Sličnost u modelima brzina P-valova je velika. Zahvaćenost zrakama je do 12 m dubine.

Uspoređujući modele najprije prvog profila (Slike 5-1 i 5-2) može se uočiti poprilična sličnost u povećanju brzine neposredno nakon 20 m duž profila na dubini od 5 m gdje je brzina nešto manja od 3000 m/s. Pri površini na dubini od oko 2 m brzine se većinom kreću 300 – 750 m/s. Na desetom metru oba profila uočljive su manje brzine na dubini oko 4 – 5 m. Na udaljenosti oko 65 m vidljiva je brzina od 1200 m/s u modelu dobivenom u Refrapy-u dok u drugom modelu brzina ostaje oko 750 m/s kao i svugdje blizu površine. Na rubovima donjih dijelova modela u oba modela je vidljivo povećanje brzine na oko 3000 m/s, s time da je u modelu dobivenom u Refrapy-u zona velike brzine puno šira što je vjerojatno rezultat drugačijeg isticanja prvih nailazaka u dva softvera. Sve u svemu, dijelovi koji imaju jednaku zahvaćenost zrakama pokazuju popriličnu sličnost u brzinama.

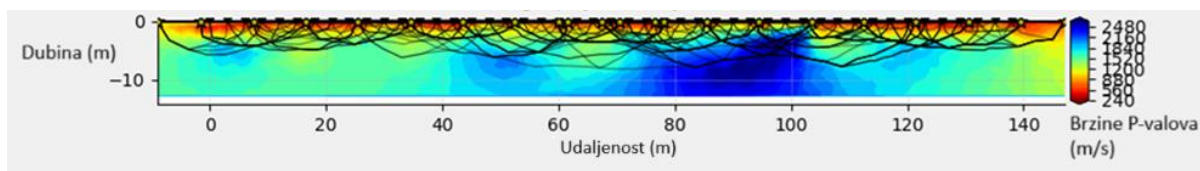


Slika 5-1 – Model brzina prvog profila u Refrapy-u. Zvezdice na površini predstavljaju točke paljenja, obrnuti trokuti geofone, a linije valne zrake

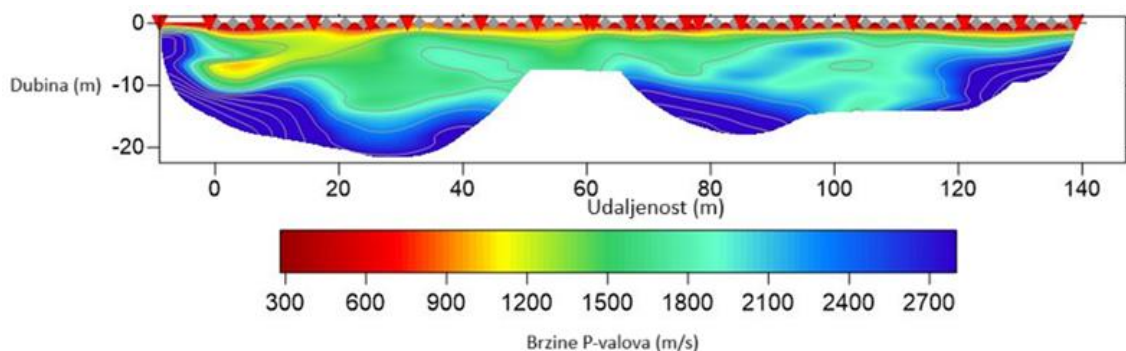


Slika 5-2 – Model brzina prvog profila u Rayfractu. Sive točkice predstavljaju geofone, a crveni obrnuti trokuti točke paljenja.

Nadalje, najveća razlika između geofizičkih modela drugog profila (Slike 5-3 i 5-4) ponajprije je u zahvaćenosti valnim zrakama. U Refrapy-u najgušće zrake su na dubini do 7 m, a u nezahvaćenom dijelu modela je interpolirana brzina, dok je u Delta t-V metodi iz Rayfract-a zahvaćenost zrakama do 20 m što je opet razlika zbog ovisnosti o početnom modelu brzine. Na površini do dubine 2-3 metra su brzine također od 300 m/s do 1000 m/s, a do izražaja dolazi zona između 60 i 120 m gdje se brzine valova povećavaju na 2400 m/s. Ovo povećanje je nešto izraženije u modelu dobivenom u Refrapy-u (Slika 5-3). S druge strane, u modelu dobivenom u Rayfractu brzina se povećava na više od 2500 m/s u udaljenosti 120 – 140 m dok je u modelu iz Refrapy-a povećanje na oko 1800 m/s. Općenito, na drugom profilu lateralne promjene brzina na dubini većoj od 4 m imaju vrlo slične odnose ali su iznosi brzina nešto drugačiji u ova dva modela. Ostale zanimljive strukture u modelu brzine iz Rayfract-a teško je povezati i usporediti s prvim modelom jer su na većim dubinama koje prvi model na zahvaća.



Slika 5-3 – Model podzemlja drugog profila u Refrapy-u. Zvezdice na površini predstavljaju točke paljenja, obrnuti trokuti geofone, a linije valne zrake.



Slika 5-4 – Model podzemlja drugog profila u Rayfractu. Sive točkice predstavljaju geofone, a crveni obrnuti trokutići točke paljenja.

Pri analizi softverskih alata Refrapy i Rayfract, za obradu i interpretaciju geofizičkih seizmičkih podataka, uočavaju se specifične prednosti i nedostaci svakog od njih, što ih čini pogodnim za različite korisnike ovisno o njihovim potrebama i tehničkom znanju.

Nedostaci Refrapy-a uključuju nekoliko značajnih aspekata koji mogu otežati rad korisnicima. Prije svega, rad u Refrapy-u zahtijeva početno poznavanje Pythona i platforme Anaconda, što može predstavljati problem za one koji nisu vješti u korištenju okruženja Anaconde, no autor softvera je objavio postupak instalacije i pokretanja sustava (*viictorjs/Refrapy*). Osim toga, proces unosa podataka često je monoton i zamoran. Za svaku datoteku potrebno je upisati: razmak između geofona, položaj prvog geofona, položaj točke paljenja i odgođeno vrijeme za korekciju iniciranja vala. Ukoliko se ubacila pogrešna datoteka, nije moguće tako lako vratiti se na početak biranja datoteka, već je potrebno ili do kraja ispuniti potrebne podatke ili u potpunosti izaći iz aplikacije. Dodatno, Refrapy podržava dvije metode inverzije što može biti ograničavajuće za korisnike koji preferiraju druge metode jer različite metode mogu dati različite modele brzina. Konačno, ispravljanje grešaka u Refrapy-u može biti izazovno, što može usporiti rad i smanjiti učinkovitost. U početku je sve to zahtjevno, no s vremenom se uvježba i postaje lakše. Osim toga, kada se shvati princip rada u jednom takavom softveru, jednostavnije je savladati i druge.

S druge strane, prednosti Refrapy-a su također značajne. Softver omogućuje integrirani prikaz rezultata inverzije unutar istog programa, čime eliminira potrebu za dodatnim alatima, što pojednostavljuje cijeli proces analize. Osim toga, Refrapy za unos podataka koristi udaljenost u metrima, a ne mjeru udaljenosti između geofona, što ga čini intuitivnijim za korisnike koji su navikli na taj sustav mjera.

Kada je riječ o Rayfract-u, nedostaci ovog alata uključuju složenost unosa podataka, posebno u pogledu prikaza geometrije u brojevima stanica, što zahtijeva veću koncentraciju i moguće su greške. Dodatno, za prikaz i uređivanje geofizičkog modela korisnici moraju koristiti dodatni softver poput Surfera, što može povećati troškove i složenost rada.

Ipak, prednosti Rayfract-a čine ga vrlo konkurentnim alatom. Softver automatski prepoznaje i prijavljuje greške, što omogućuje brže ispravljanje problema. Sučelje Rayfracta-a je intuitivno i lako za navigaciju, što smanjuje krivulju učenja. Pomoć korisnicima dostupna je putem detaljnog manuala što dodatno ubrzava savladavanje rada u softveru. Rayfract omogućava i fleksibilnost u prilagodbi nailazaka u usporedbi s grafom udaljenost-vrijeme. Promjenom nagiba na grafu se automatski računa drugo vrijeme nailazaka i obrnuto. Nudi širi izbor metoda inverzije, što ga čini prikladnim za složenije analize.

6. ZAKLJUČAK

U ovom završnom radu uspoređivala su se dva softvera za refrakcijsku seizmiku od kojih je jedan komercijalan, a drugi otvorenog koda. Besplatni softverski paket s grafičkim sučeljem Refrapy je razvijen u programskom jeziku Python što znači da je bilo potrebno znati upravljati virtualnim okruženjima za odvajanje različitih verzija Python paketa i instalirati glavne programske biblioteke. Nakon čega je bilo moguće u python programskim paketima Refrapick i Refrainv početi s obradom geofizičkih podataka. Za komercijalni softver Rayfract moguće je odmah započeti s obradom podataka. Unos podataka je drugačiji i jednostavniji u komercijalnom softveru. Isticanje prvih nailazaka je poprilično slično, osim što je unos geometrije drugačiji. Refrapy omogućuje unos podataka u metrima dok Rayfract u brojevima stanica koje ovise o jediničnom razmaku geofona. Nadalje, inverzija podataka u Refrapy-u prikazana je unutar samog softvera, no nije moguće grafičko uređivanje, dok je za Rayfract potreban dodatni softver za prikaz i grafičko uređivanje. Obrađivali su se podaci dva profila blizu trafostanice kod Splita i uspoređivali konačni modeli. Došlo se do zaključka da su modeli seizmičkih brzina vrlo slični, razlika se pojavljuje zbog različitog isticanja prvih nailazaka. Kada bi se svaki nailazak istaknuo isto u sekundu na oba softvera, modeli bi vjerojatno bili puno sličniji.

S obzirom da je sličnost u konačnim modelima vrlo velika u oba softvera može se zaključiti da osoba ili tvrtka koja nije u mogućnosti izdvojiti određeni iznos novca za komercijalni softver neće pogriješiti sa softverom otvorenog koda. Jedino je potrebno izdvojiti malo više vremena za savladavanje rada u softveru.

LITERATURA

- Ak, M. A. 1990. An Analytical Raypath Approach to the Refraction Wavefront METHOD1. *Geophysical Prospecting*, 38(8), 971-982.
- Akingboye, A. S., & Ogunyele, A. C. 2019. Insight into seismic refraction and electrical resistivity tomography techniques in subsurface investigations. *Rudarsko-geološko-naftni Zbornik*, 34(1) 93-111
- Gebrande H, Miller H 1985 Refraktionsseismik. In: Bender F (ed) *Angewandte Geowissenschaften Band II*. Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart, 226–260
- Guedes, V. J. C. B., Maciel, S. T. R., & Rocha, M. P. 2022. Refrapy: A Python program for seismic refraction data analysis. *Computers & Geosciences*, 159, 105020. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2021.105020> (27.7.2024.)
- Hagedoorn, J. G. 1959. The plus-minus method of interpreting seismic refraction sections. *Geophysical prospecting*, 7(2), 158-182.
- Hagedoorn, J. G. 1954. A process of seismic reflection interpretation. *Geophysical prospecting*, 2(2), 85-127.
- Intelligent Resources Software Inc., *Rayfract Seismic Refraction & Borehole Tomography - Subsurface Seismic Velocity Models for Geotechnical Engineering and Exploration*, URL: <https://rayfract.com/> (5.8.2024.)
- Palmer, D. 1981. An introduction to the generalized reciprocal method of seismic refraction interpretation. *Geophysics*, 46(11), 1508-1518.
- Schuster, G. T., Quintus-Bosz, A. 1993. Wavepath eikonal travelttime inversion: Theory. *Geophysics*, 59(9), 1314-1323.
- Šumanovac F., 2012, *Osnove geofizičkih istraživanja*, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Zagreb
- Viictorjs/Refrapy [URL:https://github.com/viictorjs/Refrapy?tab=readme-ov-file#citation](https://github.com/viictorjs/Refrapy?tab=readme-ov-file#citation)