

## Određivanje brzina refraktiranih longitudinalnih Pn valova na području Dinarida

*Snježana Markušić*

Geofizički zavod »Andrija Mohorovičić«, Prirodoslovno-matematički fakultet,  
Sveučilište u Zagrebu

*Primljeno 8. svibnja 1991, u konačnom obliku 12. rujna 1991.*

Razmatrane su brzine rasprostiranja refraktiranog longitudinalnog vala modificiranim postupkom vremenskog člana na području Dinarida. Pretpostavljen je model homogenog, izotropnog sloja iznad poluprostora, a refraktor je ploha Mohorovičićevog diskontinuiteta. Dobiveni rezultati zbog znatnog raspona iznosa (od 7.85 do 8.45  $\text{kms}^{-1}$ ), potvrđuju kompleksnost građe Dinarida i dijele istraživano područje na tri dijela. Srednja brzina rasprostiranja Pn vala (izračunata za cijelo područje Dinarida) iznosi 8.10  $\text{kms}^{-1}$  i usporediva je s brzinom za Dinaride od 8.14  $\text{km s}^{-1}$  koja je određena postupkom dubokog seizmičkog sondiranja.

### Velocities of refracted longitudinal Pn waves in the Dinarides area

The refracted longitudinal wave velocities in the Dinarides area have been determined on the basis of the modified time-term method for the dipping Moho discontinuity. The homogeneity of the Earth crust is assumed. The results (ranging between 7.85 and 8.45  $\text{kms}^{-1}$ ) divide the research area into three parts and confirm the complexity of the Dinarides region. The arithmetic mean of the Pn wave velocities (calculated for the entire Dinarides area) is 8.10  $\text{kms}^{-1}$ . This value is comparable to the average velocity of 8.14  $\text{kms}^{-1}$  obtained for the Dinarides region by deep seismic sounding.

#### 1. Uvod

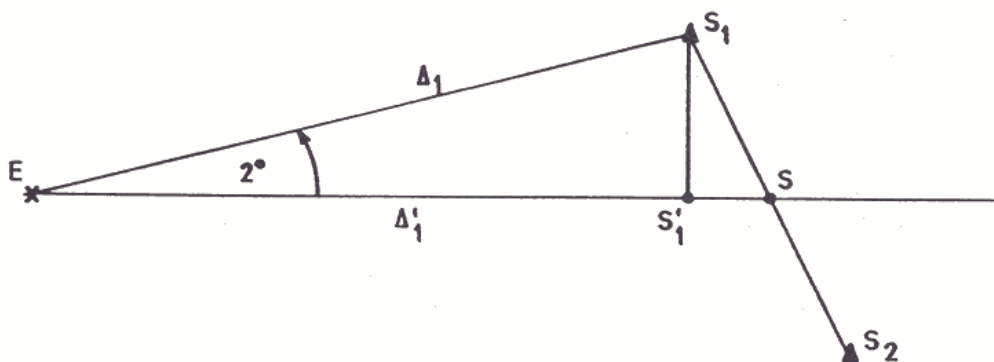
U trenutku potresa od hipocentra se na sve strane šire vibracije u obliku elastičkih, progresivnih valova. Pomoću mjerenih vremena nailazaka tih valova moguće je, inverznim metodama, odrediti fizikalne i geometrijske parametre modela Zemlje. U ovom radu razmotrit će se jedna od inverznih metoda nazvana modificirana metoda vremenskog člana (Berry i West, 1966). S obzirom na to da je brzina elastičkih valova u kori i gornjem plaštu važan podatak pri razumijeva-

nju tektonike određenog područja, u ovom se radu pokušalo, koristeći se modificiranim postupkom vremenskog člana, odrediti brzine na području Dinarida koje je seizmički vrlo aktivno.

## 2. Modificirani postupak vremenskog člana

Na osnovi klasične metode vremenskog člana («time-term« metoda), koju su 1957. godine predložili Scheidegger i Willmore, razvijen je modificirani postupak vremenskog člana. Klasičnom metodom moguće je odrediti brzinu duž cijele staze putovanja vala od izvora do detektora, dok se modificirana metoda temelji na razlikama vremena putovanja iste faze vala do pojedinih detektora. Drugom metodom tako je izbjegnuta ovisnost rezultata o vremenu nastanka potresa ili eksplozije.

Modificirani postupak vremenskog člana koristi se refraktiranim longitudinalnim valovima plitkih potresa (dubina izvora manja je od dubine plohe diskontinuiteta) zabilježenim na parovima detektora koji leže na približno istom azimutu (uobičajeno dozvoljeno odstupanje je  $\pm 2^\circ$  – vidi npr. Beghoul i Barazangi, 1989; Berry i West, 1966; Greenhalgh et al., 1989; James et al., 1968; Kayal i De, 1987. i drugi) u odnosu na pripadajući izvor. Azimutalno odstupanje od  $2^\circ$  ne unosi zamjetnu pogrešku pri određivanju brzina  $v_{Pn}$  (vidi sliku 1).



**Slika 1.** Prikaz azimutalnog odstupanja. Sa  $\Delta_1$  označena je epicentralna udaljenost stanice  $S_1$ , a sa  $\Delta_1'$  njezina projekcija na pravac koji spaja epicentar E s točkom S (polovište spojnice stanica  $S_1$  i  $S_2$ ). Azimutalno odstupanje  $\pm 2^\circ$  dovodi do odstupanja pri određivanju epicentralne udaljenosti koje iznosi:  $\Delta_1 - \Delta_1' = \Delta_1 [1 - \cos(2^\circ)] = 6 \times 10^{-4} \Delta_1$ . Veličina  $(\Delta_1 - \Delta_1')$  zanemarivo je mala i utječe na promjenu brzine tek u petoj decimali.

**Figure 1.** The influence of the azimuthal deviation.  $\Delta_1$  is the epicentral distance of the station  $S_1$  and  $\Delta_1'$  is the projection of  $\Delta_1$  on the line that goes through the epicentre E and the point S, which halves the distance between the stations  $S_1$  and  $S_2$ . The azimuthal deviation of  $\pm 2^\circ$  results in the error in determining the epicentral distance which amounts to:  $\Delta_1 - \Delta_1' = \Delta_1 [1 - \cos(2^\circ)] = 6 \times 10^{-4} \Delta_1$ . The magnitude of  $(\Delta_1 - \Delta_1')$  is insignificantly small and modifies the velocity in the fifth decimal.

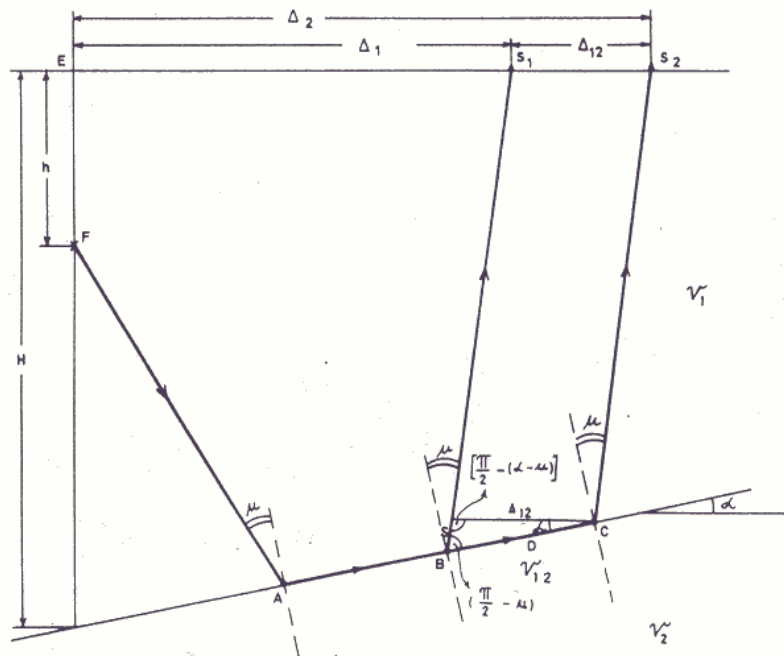
Vrijeme nailaska Pn faze vala ( $t_i$ ) na  $i$ -ti detektor može se pisati kao:

$$t_i = t_o + a_o + a_i + \frac{\Delta_i}{v_{ri}}, \quad (1)$$

gdje je:  $t_o$  – vrijeme nastanka potresa ili eksplozije,  
 $a_o$  – vremenski član izvora,  
 $a_i$  – vremenski član detektora,  
 $\Delta_i$  – udaljenost između izvora i detektora,  
 $v_{ri}$  – brzina u sloju ispod refraktora.

Pod pojmom vremenskog člana izvora ili detektora razumijeva se vrijeme potrebno valu da prevali put od izvora do refraktora, odnosno od refraktora do detektora. Svaki vremenski član ovisi o debljini sloja ispod izvora (detektora) te o brzinama rasprostiranja seizmičkog vala u sloju i poluprostoru.

Ako indeksom 1 označimo detektor koji je bliže izvoru, a indeksom 2 onaj koji je dalje (slika 2), tada se oduzimanjem izraza (1) za vrijeme nailaska vala istog potresa na prvi detektor od onog na drugi dobiva relacija:



Slika 2. Prikaz staze refraktiranog vala.

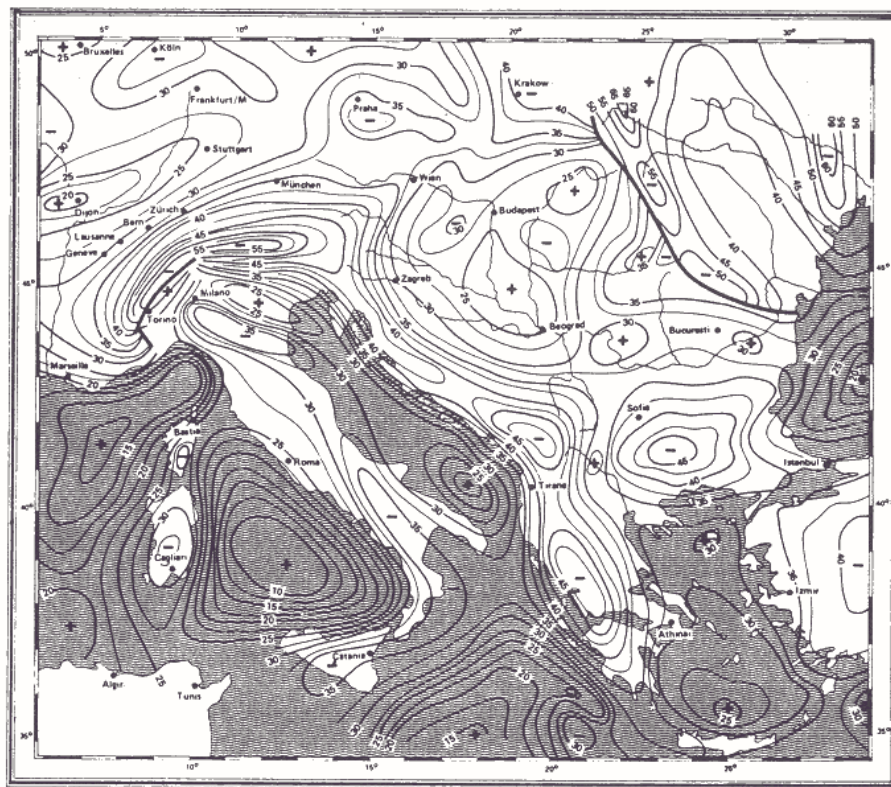
Figure 2. The refracted wave path.

$$t_2 - t_1 = \frac{(\Delta_2 - \Delta_1)}{v_{12}} + (a_2 - a_1) , \quad (2)$$

gdje je:  $v_{12}$  – brzina Pn vala između detektora 1 i 2,  
 $\Delta_1, \Delta_2$  – udaljenosti detektora od izvora,  
 $a_1, a_2$  – vremenski članovi detektora.

Za horizontalni refraktor brzina  $v_{12}$  može se odrediti dijeljenjem  $(\Delta_2 - \Delta_1)$  sa  $(t_2 - t_1)$ , s obzirom na to da za svaki par detektora vrijedi:  $a_1 = a_2$ .

Kod složenijeg slučaja određivanja izraza za brzinu refraktiranog longitudinalnog vala između para stanica, kad ploha diskontinuiteta nije horizontalna, pretpostavljena je homogenost kore, a kut nagiba plohe diskontinuiteta  $\alpha$  definiran je tako da je njegov iznos pozitivan ako gledano od epicentra E sloj postaje



**Slika 3.** Preliminarna karta dubina Mohorovičićevog diskontinuiteta (u km) (Skoko et al., 1987; Aljinović et al., 1987).

**Figure 3.** Preliminary map of depths of the Mohorovičić discontinuity (in km) (Skoko et al., 1987; Aljinović et al., 1987).

tanji, a negativan ako postaje deblji. U skladu s navedenom definicijom, za slučaj prikazan na slici 2 vrijedi da je  $\alpha > 0$ . Udaljenosti od epicentra E do stanica  $S_1$  i  $S_2$  zovu se epicentralne udaljenosti i označene su sa  $\Delta_1$  i  $\Delta_2$ . Sa F označen je hipocentar,  $h$  je dubina žarišta, a  $H$  debljina sloja ispod epicentra E. Brzina u sloju je konstantna i označena sa  $v_1$ , a brzina ispod refraktora između par stanica  $S_1$  i  $S_2$  sa  $v_{12}$ . Za područje Dinarida postoji karta topografije Mohorovičićevog diskontinuiteta prikazana na slici 3 (Skoko et al., 1987; Aljinović et al., 1987), dok za Conradov diskontinuitet takva karta ne postoji, a nema ni dovoljno pouzdanih podataka. Iz toga proizlazi da je nemoguće odrediti kutove nagiba Conradovog diskontinuiteta u pojedinim smjerovima, pa je stoga uzet u razmatranje jednoslojni, homogeni i izotropni model kore. Brzina u kori određena je kao ponderirani srednjak brzina u »granitnom« i »bazaltnom« sloju iz »Balkanskog modela« (B.C.I.S., 1972). Tako je za P val dobivena brzina u sloju  $v = 6.01 \text{ kms}^{-1}$ . Pri određivanju kuta nagiba plohe Mohorovičićevog diskontinuiteta ( $\alpha$ ) koriste se podaci o dubinama na kojima se ona nalazi. Duž pravaca koji spajaju parove stanica s određenim epicentrima očitavane su pripadne dubine ( $H$ ) plohe Mohorovičićevog diskontinuiteta (slika 3) za niz epicentralnih udaljenosti ( $\Delta$ ) uz korak od 50 km. Za pojedine smjerove tako su određeni parovi ( $H_i, \Delta_i$ ). Metodom najmanje sume kvadrata odstupanja dobiven je pravac regresije  $H = k\Delta + l$ , čiji kut nagiba određuje kut  $\alpha$ :

$$\alpha = -\arctg(k). \quad (3)$$

Negativan predznak u (3) proizlazi iz definicije kuta  $\alpha$ , jer kad sloj postaje deblji, kao na slici 2,  $\alpha$  je negativan i obrnuto.

Nastupna vremena reducirana su na nadmorsku visinu 0 m uz pretpostavku brzine širenja P vala u najgornjem dijelu kore od  $5.5 \text{ kms}^{-1}$ . Razlika vremena nailazaka refraktiranog vala za par stanica dana je relacijom:

$$t_{12} = a_2 - a_1 + D \frac{1}{v_{12}}, \quad (4)$$

gdje je  $D$  udaljenost između točaka B i C, a  $a_1$  i  $a_2$  su vremenski članovi pojedinih stanica. S obzirom na to da vremenski član označava vrijeme potrebno valu da prijeđe put od diskontinuiteta do stanice, tako je, za isti potres, razlika ( $a_2 - a_1$ ) vremenska veličina koja pokazuje za koliko se razlikuje vrijeme putovanja vala od plohe diskontinuiteta do različitih stanica. Stoga se može uvesti veličina  $T$ , tako da vrijedi:

$$a_2 - a_1 = \begin{cases} -T, & \alpha > 0 \\ T, & \alpha < 0 \end{cases} \quad (5)$$

Za veličinu  $D$  pomoću slike 2 i na osnovi laganog računa dobiva se ovaj izraz:

$$D = \Delta_{12} \frac{\cos(\alpha - u)}{\cos u}, \quad (6)$$

gdje je:

$$u = \arcsin(v_1/v_2) \quad (7)$$

Sa slike 2 lako je uočiti da vrijedi relacija:

$$S = (\Delta_{12}^2 + D^2 - 2\Delta_{12}D \cos \alpha)^{1/2} \quad (8)$$

Veličina  $T$  upravo je vrijeme potrebno da val prijeđe put  $S$  (8) brzinom u kori  $v_1$ , pa odatle slijedi:

$$T = \frac{(\Delta_{12}^2 + D^2 - 2\Delta_{12}D \cos \alpha)^{1/2}}{v_1} \quad (9)$$

Iz (4) proizlazi da se jednadžba za određivanje brzine rasprostiranja refraktiranog vala, neposredno ispod plohe Mohorovičićevog diskontinuiteta, između para stanica može pisati u sljedećem obliku:

$$v_{12} = \begin{cases} \frac{D}{t_{12} + T}, & \alpha > 0 \\ \frac{D}{t_{12} - T}, & \alpha < 0 \end{cases} \quad (10)$$

Iznos prividne brzine rasprostiranja vala jednak je iznosu brzine  $v_{12}$  za horizontalni refraktor:

$$(v_{12})_{pr} = \frac{\Delta_{12}}{t_{12}}. \quad (11)$$

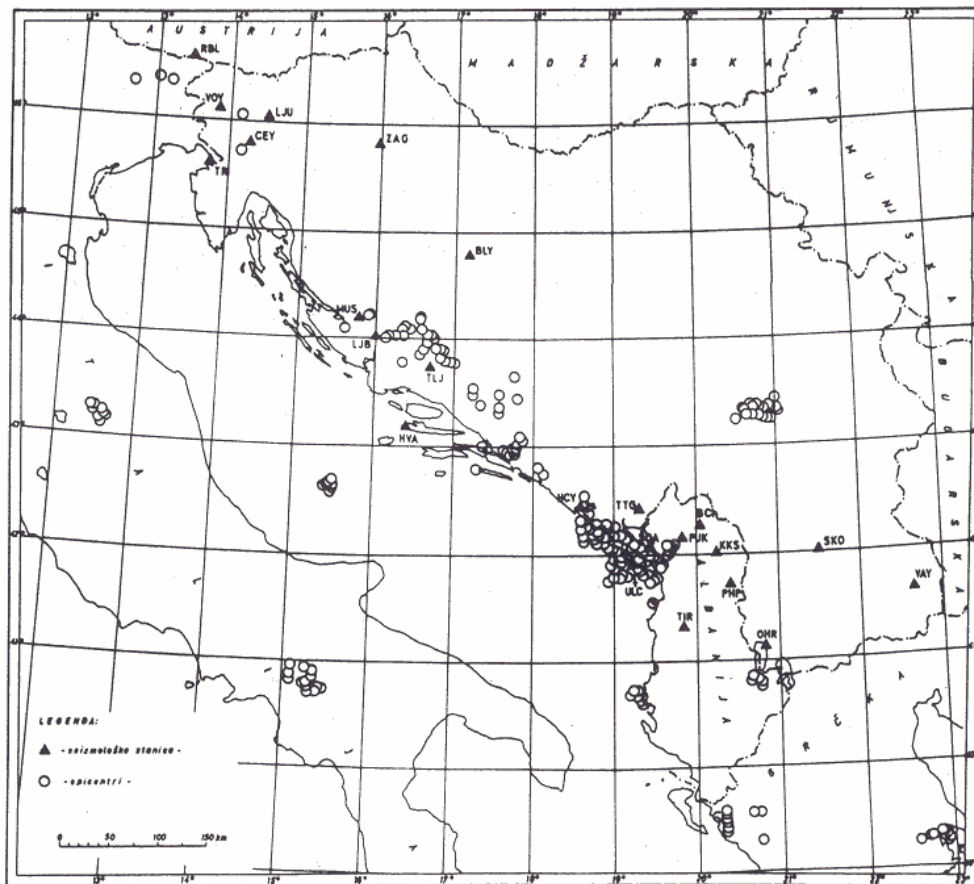
Kako veličina  $D$  u (10) ovisi o  $v_2$  [vidi (6) i (7)], brzina  $v_{12}$  određuje se iterativnim postupkom uz pretpostavku  $v_2 = 8.00 \text{ kms}^{-1}$  u prvoj iteraciji. U svakoj sljedećoj iteraciji brzina se korigira tako da se postavi  $v_2 = v_{12}$ .

Pri određivanju brzine neposredno ispod plohe Mohorovičićevog diskontinuiteta između para stanica obrađuje se niz od  $N$  potresa iz određenog epicentralnog područja za koje traženi par stanica leži na približno istom azimutu ( $\pm 2^\circ$ ). Pomoću tih podataka te jednadžbe (10) dobivene su brzine  $(v_{12})_i$ , gdje se indeks  $i$  mijenja od 1 do  $N$ . Srednja brzina refraktiranog vala za pojedini je par stanica tada.

$$v_{12} = \frac{\sum (v_{12})_i}{N}. \quad (12)$$

### 3. Podaci

Pri odabiru podataka ograničila sam se na parove stanica koje leže unutar azimutalne razlike od  $2^\circ$  u odnosu na određeni epicentar. Obradeno je 390 potresa, iz 14 epicentralnih područja, koji su se dogodili u razdoblju od 1973. do 1987. godine, zabilježenih mrežom 23 stanice (slika 4). Pri odabiru podataka bilo je nužno da je ispitivano područje (Dinaridi) ispresijecano i okruženo plitkim potresima čije su magnitude  $\geq 3.0$ , a epicentralne udaljenosti odgovarajuće, što znači da su udaljenosti takve da prva nailazi na stanicu Pn faza vala ( $\Delta \geq 160$  km). Lokacije hipocentara te nastupna vremena na pojedine stanice preuzeti su iz međunarodnih i domaćih biltena, a korišteni su i podaci privremenih seizmoloških postaja Geofizičkog zavoda »Andrija Mohorovičić« Prirodoslovno-matematičkog fakulteta u Zagrebu.



Slika 4. Raspored epicentralnih područja i seizmoloških postaja.

Figure 4. Epicentral areas and seismic stations.

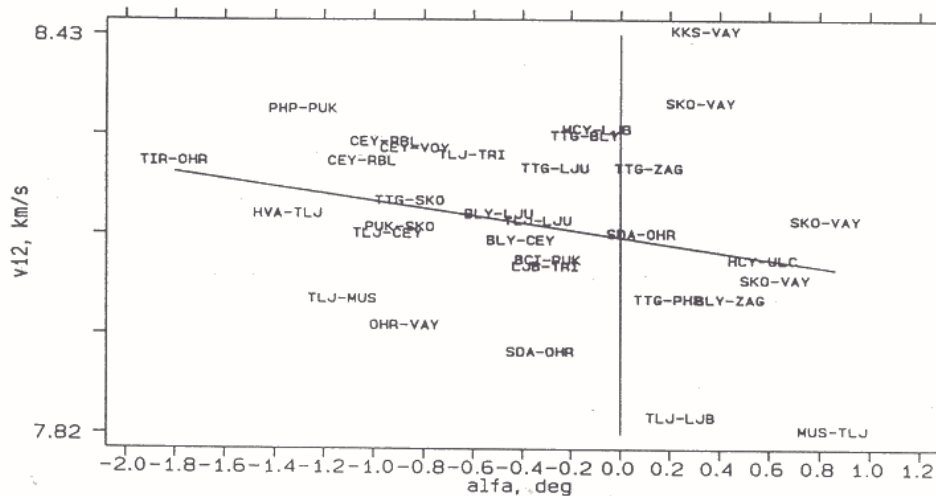
Brzine su računane između 28 parova stanica koji su zajedno s pripadnim epicentrima zadovoljavali gornje uvjete. Uzete su za valjane samo one brzine koje su dobivene na osnovi najmanje 5 potresa.

#### 4. Rezultati i diskusija

Brzine  $v_{12}$  refraktiranog longitudinalnog vala izračunate pomoću modificiranog postupka vremenskog člana prikazane su slikom 5 u ovisnosti o kutu  $\alpha$  nagiba plohe Mohorovičićevog diskontinuiteta. Metodom najmanje sume kvadrata odstupanja dobiven je pravac s jednadžbom:

$$v_{12} = -0.05\alpha + 8.12, \quad (13)$$

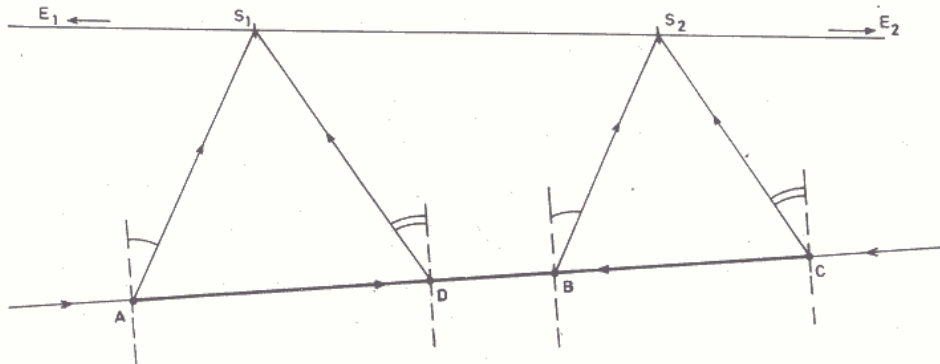
gdje je  $\alpha$  izražen u stupnjevima, a koeficijent korelacije iznosi  $r = -0.4$ . Na osnovi slike 5 možemo zaključiti da brzina raste kada kora postaje deblja odnosno da pada kada kora postaje tanja. To znači da bi brzine  $v_{12}$  duž istog puta, u slučaju kad je kut  $\alpha$  istog apsolutnog iznosa, ali suprotnog predznaka, bile različite, što nema fizikalnog smisla. Takvo opažanje moguće je interpretirati uz realnu pretpostavku porasta brzine u kori s dubinom. Tada će, u slučaju prikazanom na slici 6, prosječna brzina na putu  $AS_1$  biti veća nego na putu  $BS_2$  (isto vrijedi i za putove  $DS_1$  i  $CS_2$ ), pa u tom smislu valja korigirati i iznose vremenskih članova  $a_1$  i  $a_2$ . Da bi se ocijenio red veličine ovog efekta, proveden je sljedeći numerički eksperiment: pretpostavimo li da se kora sastoji od dva sloja (kao u modelu B.C.I.S., 1972), od kojih je gornji stalne debljine, a debljina donjeg raste s



Slika 5. Razdioba brzine  $v_{12}$  u ovisnosti o kutu nagiba plohe diskontinuiteta.

Figure 5.  $v_{12}$  velocities versus the angle of the discontinuity slope.





**Slika 6.** Staze vala u slučaju kad su epicentri  $E_1$  i  $E_2$  raspoređeni duž azimuta s objiju strana para stanica  $S_1$  i  $S_2$ . Kada val putuje u smjeru od epicentra  $E_1$  prema stanicama  $S_1$  i  $S_2$ , tada se određuje brzina  $v_{Pn}$  između točaka A i B, a u suprotnom smjeru, od  $E_2$  prema  $S_2$  i  $S_1$  brzina  $v_{Pn}$  između točaka C i D.

**Figure 6.** Wave paths (for the case) when the epicentres  $E_1$  and  $E_2$  differ by  $180^\circ$  with respect to the pair of stations  $S_1$  and  $S_2$ . When the wave travels from epicentre  $E_1$  towards the stations  $S_1$  and  $S_2$ , the  $v_{Pn}$  velocity is determined between the points A and B; in the opposite direction (from  $E_2$  towards  $S_2$  and  $S_1$ ) the  $v_{Pn}$  velocity is obtained between the points C and D.

nagibom plohe Mohorovičićevog diskontinuiteta, tada će srednja brzina u kori rasti s njenim produbljivanjem. Uzevši ovu činjenicu u obzir pri računanju teorijskih vremena nailazaka Pn vala izračunate su naprijed opisanim postupkom brzine  $v_{12}$  za udaljenosti  $\Delta_{12} = 100$  i  $\Delta_{12} = 200$  km uz variranje nagiba refraktora od  $\alpha = -1.2^\circ$  do  $+1.2^\circ$ . Pravac regresije  $v_{12}$  u ovisnosti o  $\alpha$  imao je nagib  $-0.05$  – identičan onome za realne podatke iz izraza (13). Zato je zaključeno da treba dobivene brzine (slika 5) korigirati za  $-0.05 \alpha$ , čime se u obzir uzima porast srednje brzine u kori s njenim podebljanjem te se uklanja ovisnost brzina  $v_{12}$  o kutu nagiba  $\alpha$ .

Tako dobivene, korigirane brzine  $v_{Pn}$  refraktiranog longitudinalnog vala između parova stanica prikazane su grafički (slika 7), gdje strelice označuju smjer rasprostiranja vala, te tabelarno (tablica 1). U tablici 1 za parove stanica CEY-RBL, SDA-OHR i SKO-VAY navedeno je nekoliko brzina koje su dobivene na osnovi podataka o potresima iz različitih epicentralnih područja. Stoga su na sliku 7 ucrtani iznosi ponderiranih srednjaka tih brzina za svaki od navedenih parova stanica. Prosječna brzina (ponderirani srednjak) brzina prikazanih u tablici 1 za istraživano područje Dinarida iznosi  $8.099 \pm 0.098 \text{ kms}^{-1}$ .

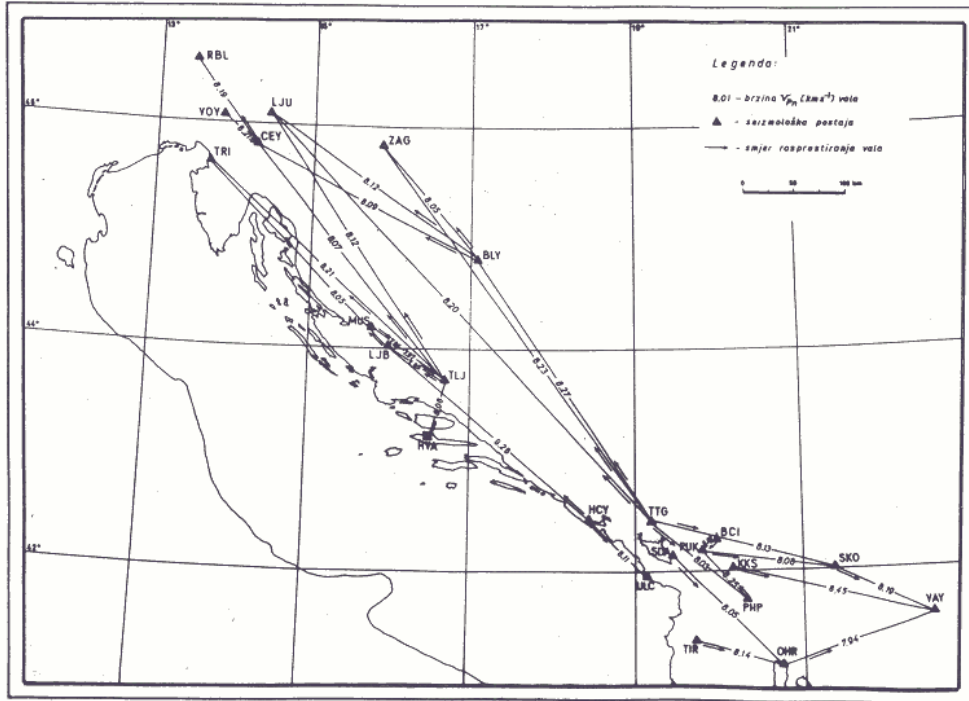
Dobivena prosječna brzina rasprostiranja refraktiranog longitudinalnog vala za područje Dinarida je  $8.10 \text{ kms}^{-1}$ , što se približno podudara s iznosom prosječne brzine refraktiranog vala ( $8.14 \text{ kms}^{-1}$ ), određene istraživanjem metodom dubokog seizmičkog sondiranja za isto područje (Andrić i Zeljko, 1971; Zeljko, 1974; Joksović i Andrić, 1982; Joksović i Andrić, 1983). To istraživanje u Jugoslaviji zajednički provode »GEOFIZIKA« iz Zagreba i »GEOZAVOD« iz Beograda.

Tablica 1. Prikaz brzina  $P_n$  valova na području Dinarida između parova stanica.  
Table 1.  $P_n$  wave velocities in the Dinarides area between pairs of stations

Par stanica	Epicentralno područje	Broj podataka	Nagib plohe diskontinuiteta (stupnjevi)	Prividna $v_{P_n}$ brzina ( $\text{kms}^{-1}$ )	Brzina $v_{P_n}$ ( $\text{kms}^{-1}$ )
BCI-PUK	Kopaonik	9	$-0.290 \pm 0.015$	$8.048 \pm 0.090$	$8.070 \pm 0.673$
BLY-CEY	Kopaonik	34	$-0.403 \pm 0.004$	$8.062 \pm 0.025$	$8.093 \pm 0.048$
BLY-LJU	Kopaonik	32	$-0.486 \pm 0.005$	$8.083 \pm 0.027$	$8.122 \pm 0.050$
BLY-ZAG	Pelješac	7	$0.454 \pm 0.009$	$8.045 \pm 0.050$	$8.047 \pm 0.159$
CEY-RBL	Crna Gora	19	$-1.039 \pm 0.002$	$8.095 \pm 0.065$	$8.179 \pm 0.168$
CEY-RBL	Knin	6	$-0.954 \pm 0.002$	$8.133 \pm 0.111$	$8.212 \pm 0.298$
CEY-VOY	Knin	7	$-0.833 \pm 0.002$	$8.138 \pm 0.113$	$8.207 \pm 0.539$
HCY-LJB	Grčka-Albanija 2	5	$-0.089 \pm 0.005$	$8.272 \pm 0.079$	$8.280 \pm 0.135$
HCY-ULC	Knin	7	$0.584 \pm 0.004$	$8.153 \pm 0.106$	$8.106 \pm 0.327$
HVA-TLJ	Južna Italija	14	$-1.335 \pm 0.005$	$7.978 \pm 0.068$	$8.080 \pm 0.410$
KKS-VAY	Pelješac	5	$0.352 \pm 0.007$	$8.481 \pm 0.034$	$8.448 \pm 0.160$
LJB-TRI	Pelješac	12	$-0.301 \pm 0.004$	$8.030 \pm 0.075$	$8.053 \pm 0.080$
MUS-TLJ	Furlanija	5	$0.863 \pm 0.004$	$7.919 \pm 0.119$	$7.862 \pm 0.303$
OHR-VAY	Albanija	6	$-0.872 \pm 0.008$	$7.877 \pm 0.101$	$7.938 \pm 0.183$
PHP-PUK	Grčka	6	$-1.276 \pm 0.002$	$8.142 \pm 0.051$	$8.250 \pm 0.527$
PUK-SKO	Jadran	5	$-0.886 \pm 0.007$	$8.014 \pm 0.075$	$8.082 \pm 0.221$
SDA-OHR	Knin	14	$0.086 \pm 0.003$	$8.134 \pm 0.069$	$8.127 \pm 0.127$
SDA-OHR	Pelješac	9	$-0.316 \pm 0.005$	$7.899 \pm 0.054$	$7.920 \pm 0.155$
SKO-VAY	Knin	6	$0.634 \pm 0.006$	$8.129 \pm 0.120$	$8.080 \pm 0.225$
SKO-VAY	Mostar	8	$0.828 \pm 0.008$	$8.252 \pm 0.088$	$8.183 \pm 0.201$
SKO-VAY	Pelješac	5	$0.327 \pm 0.008$	$8.368 \pm 0.083$	$8.338 \pm 0.259$
TIR-OHR	Jadran	6	$-1.802 \pm 0.008$	$7.996 \pm 0.090$	$8.138 \pm 0.322$
TLJ-CEY	Crna Gora	179	$-0.937 \pm 0.002$	$7.998 \pm 0.013$	$8.069 \pm 0.018$
TLJ-LJB	Skadar	9	$0.248 \pm 0.004$	$7.868 \pm 0.059$	$7.851 \pm 0.331$
TLJ-LJU	Grčka-Albanija 1	10	$-0.325 \pm 0.005$	$8.095 \pm 0.042$	$8.120 \pm 0.081$
TLJ-MUS	Crna Gora	96	$-1.124 \pm 0.003$	$7.888 \pm 0.018$	$7.967 \pm 0.069$
TLJ-TRI	Crna Gora	116	$-0.597 \pm 0.003$	$8.156 \pm 0.016$	$8.236 \pm 0.021$
TTG-BLY	Grčka	10	$-0.135 \pm 0.005$	$8.256 \pm 0.062$	$8.267 \pm 0.085$
TTG-LJU	Grčka	13	$-0.260 \pm 0.002$	$8.183 \pm 0.063$	$8.204 \pm 0.039$
TTG-PHP	Knin	11	$0.198 \pm 0.004$	$8.045 \pm 0.159$	$8.031 \pm 0.159$
TTG-SKO	Italija	11	$-0.851 \pm 0.005$	$8.062 \pm 0.053$	$8.129 \pm 0.101$
TTG-ZAG	Grčka	7	$0.117 \pm 0.004$	$8.222 \pm 0.062$	$8.227 \pm 0.073$

Za jedan par stanica (MUS, TLJ) izračunate su brzine  $v_{P_n}$  u oba smjera. U smjeru od MUS prema TLJ dobivena je brzina  $7.862 \text{ kms}^{-1}$ , a od TLJ prema MUS  $7.967 \text{ kms}^{-1}$ . Ova mala razlika u brzinama vjerojatno je uzrokovana ovim činjenicama:

- 1) – rezultati nisu jednako pouzdani – brzina  $v_{P_n}$  između stanica MUS i TLJ određena je na osnovi samo 5 podataka i njena standardna pogreška stoga je znatna ( $\pm 0.303 \text{ kms}^{-1}$ ), dok je brzina  $v_{P_n}$  u suprotnom smjeru određena pomoću 96 podataka i ima standardnu pogrešku  $\pm 0.069 \text{ kms}^{-1}$ ,
- 2) – staze duž kojih su određene brzine  $v_{P_n}$  su različite (vidi sliku 6).



Slika 7. Brzine rasprostiranja refraktiranog longitudinalnog vala između parova stanica.

Figure 7. Velocities of the longitudinal wave refracted on the Mohorovičić discontinuity between pairs of stations, as obtained in this study.

Na osnovi podataka o potresima iz različitih epicentralnih područja dobiveno je nekoliko brzina  $v_{Pn}$  za svaki od ovih parova stanica: CEY–RBL, SDA–OHR i SKO–VAY. Te se brzine međusobno razlikuju dijelom stoga što kutovi nagiba plohe Mohorovičićevog diskontinuiteta nisu isti, a dijelom zato što sve brzine nisu jednako pouzdane (broj podataka na osnovi kojih su određene nije isti). Međutim, unatoč tome, iznosi brzina  $v_{Pn}$  za navedene parove stanica nalaze se unutar pripadnih standardnih devijacija.

#### 4.1. Analiza mogućih izvora pogrešaka

U tablici 1 navedene su i standardne devijacije brzine  $v_{Pn}$  koje se računaju rabeći varijance sljedećih veličina: geografske širine ( $\phi_0$ ) i dužine ( $\lambda_0$ ) epicentra, kuta nagiba plohe diskontinuiteta ( $\alpha$ ) te kuta incidencije ( $u$ ). Na osnovi podataka o lokacijama epicentara i njihovim nepouzdanostima procijenjene su srednje standardne devijacije  $\sigma_{\phi_0} = \sigma_{\lambda_0} = 5$  km.

S obzirom na to da je kut nagiba  $\alpha$  određen relacijom (3), gdje je  $k$  koeficijent smjera pravca regresije  $H = k\Delta + 1$ , nepouzdanost kuta  $\alpha$  ovisi o nepouzdanosti

iznosa  $H$  i  $\Delta$  duž profila na kojem se određuje  $\alpha$ . Njezin iznos možemo procijeniti (za tipične iznose:  $\sigma_H = 3$  km,  $\sigma_\Delta = 5$  km,  $\Delta = 450$  km) na  $\sigma_\alpha = \pm 0.35^\circ$ , što na iznose brzina značajno utječe na drugoj decimali. Taj je utjecaj to veći što je manja epicentralna udaljenost. Može ga se smanjiti jedino detaljnim istraživanjima kako bi se što preciznije odredila dubina Mohorovičićevog diskontinuiteta.

Kut incidencije  $u$  ovisi o brzinama u sloju ( $v_1$ ) i poluprostoru ( $v_2$ ). Uz pretpostavku da je  $v_1$  konstantan, standardna devijacija  $\sigma_u$  ovisi o varijanci brzine  $v_2$ .

Osim navedenih postoje i drugi mogući izvori nepouzdanosti brzine  $v_{Pn}$ . Neki su od njih: 1) netočnosti čitanja vremena na stanicama te 2) utjecaj nehomogenosti i anizotropnosti kore (varijabilna brzina  $v_1$ ).

Jedan od razloga nepouzdanosti podataka o vremenima nailazaka vala na pojedine stanice može biti loš hod ure. U tom slučaju dolazi do pogreške koju je nemoguće predvidjeti i ukloniti. Ako nepouzdanost uzrokuje gruba greška u čitanju nastupnih vremena, moguće ju je otkloniti samo novim očitavanjem vremena, što je komplicirano primijeniti ako su vremena preuzeta iz biltena. Analizom utjecaja pogreške u čitanju od  $\pm 0.1$ s na određivanje brzine  $v_{Pn}$  dolazi se do nepouzdanosti od  $\pm 4.3\%$  za stanice koje su udaljene 40 km te  $\pm 0.3\%$  za one udaljene 500 km.

Nehomogenost i anizotropnost kore, odnosno fluktuacija brzine  $v_1$ , utjecat će na nepouzdanost iznosa razlika  $T$  vremenskih članova stanica. U slučaju da je stvarni  $T$  veći od vrijednosti koju bi imao uz pretpostavku  $v_1 = 6.01$  kms<sup>-1</sup>, izračunata brzina bit će manja od stvarne, i obrnuto [vidi izraze (10)]. Izračunate brzine  $v_{Pn}$  odstupat će od onih određenih na osnovi konstantne brzine  $v_1 = 6.01$  kms<sup>-1</sup> to više što će biti manje udaljenost među stanicama ( $\Delta_{12}$ ). Na sreću, vjerojatnost da se srednje brzine u kori ( $a$  time i vremenski članovi  $a_1$  i  $a_2$ ) znatno razlikuju za bliske je stanice vrlo mala, a raste s porastom  $\Delta_{12}$ . Ovu nepouzdanost moguće je umanjiti samo detaljnim poznavanjem geologije istraživanog područja. S obzirom na to da, trenutno, ne postoje dovoljno precizni podaci o položaju geoloških struktura, njihovim dimenzijama i fizikalnim karakteristikama, bilo je nužno, pri izradi ovog rada, pretpostaviti homogenost i izotropnost sloja iznad plohe diskontinuiteta.

## 5. Zaključak

Pomoću dobivenih relacija modificiranim postupkom vremenskog člana te podataka za 390 potresa iz 14 epicentralnih područja izračunate su brzine rasprostiranja refraktiranog longitudinalnog vala između 28 parova stanica na području Dinarida. Dobivene brzine  $v_{Pn}$  u rasponu su od 7.851 do 8.448 kms<sup>-1</sup>, s prosječnom brzinom  $(v_{Pn})_{sr}$  8.099 kms<sup>-1</sup>, koja je usporediva s prosječnom brzinom za Dinaride dobivene metodom dubokog seizmičkog sondiranja (8.14 kms<sup>-1</sup>). Pojedina područja Dinarida razlikuju se po geološkoj građi, a struktura plohe Mohorovičićevog diskontinuiteta je prilično komplicirana, pa je i raspon dobive-

nih brzina velik. S obzirom na dobivene rezultate, cijelo istraživano područje može se podijeliti na tri dijela:

1. jugoistočni dio Dinarida s kompleksnom strukturom plohe Mohorovičićevog diskontinuiteta, a samim tim i s velikim rasponom iznosa brzina (od 7.92 do 8.45  $\text{kms}^{-1}$ ),
2. središnji dio oko postaja MUS i TLJ s relativno niskim brzinama (od 7.85 do 7.97  $\text{kms}^{-1}$ ),
3. ostali dio Dinarida s brzinama koje su približne srednjoj brzini ( $v_{Pn}$ )<sub>sr</sub>.

*Zahvala* – Zahvaljujem anonimnim recenzentima čije su konstruktivne primjedbe značajno doprinijele poboljšanju prvotnog rukopisa i dr. Marijanu Heraku na vrijednim prijedlozima i dopunama.

### Literatura

- Aljinović, B., Prelogović, E. i D. Skoko (1987): Novi podaci o dubinskoj geološkoj građi i seizmotektonski aktivnim zonama u Jugoslaviji. *Geološki vjesnik*, **40**, 255-263.
- Andrić, B. i B. Zeljko (1971): Ispitivanje građe Zemljine kore dubokim seizmičkim sondiranjem na profilu o. Palagruža – Sl. Brod – Valpovo. *Geofizika – Zagreb, Geozavod – Beograd*.
- B.C.I.S. (1972): Tables des temps de propagation des ondes sismiques (Hodochrones) pour la region des Balkans. Manuel d'utilisation. Strasbourg.
- Beghoul, N. and M. Barazangi (1989): Mapping high Pn velocity beneath the Colorado Plateau constrains uplift models. *Journal of Geophysical Research*, **94 B6**, 7083-7104.
- Berry, M. J. and G. F. West (1966): An interpretation of the first arrival data of the Lake Superior experiment by the time term method. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **56**, 141-171.
- Greenhalgh, S.A., D. Tapley and R. Singh (1989): Crustal heterogeneity in South Australia, earthquake evidence. *Geophysical Journal*, **96**, 85-99.
- James, D. E., Smith, T. J. and J. S. Steinhart (1968): Crustal structure of the middle Atlantic states. *Journal of Geophysical Research*, **73**, 1983-2007.
- Joksović, P. i B. Andrić (1982): Ispitivanje građe Zemljine kore metodom dubokog seizmičkog sondiranja na profilu Dugi otok – Virovitica, »Geofizika« – Odjel za terensku seizmiku, Zagreb, 28pp.
- Joksović, P. i B. Andrić (1983): Ispitivanje građe Zemljine kore metodom dubokog seizmičkog sondiranja na profilu Pula – Maribor. »Geofizika« – Odjel za terensku seizmiku, Zagreb, 36pp.
- Kayal, J.R. and R. De (1987): Pn velocity study using temporary seismographic network in the Shillong plateau, northeast India. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **77**, 1718-1727.
- Scheidegger, A. E. and P. L. Willmore (1957): The use of least-squares method for the interpretation of data from seismic surveys. *Geophysics*, **22**, 9-22.
- Skoko, D., E. Prelogović and B. Aljinović (1987): Geological structure of the Earth's crust above the Moho discontinuity in Yugoslavia. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, **89**, 379-382.
- Zeljko, B. (1974): Duboko seizmičko sondiranje. Magistarski rad. Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko naftni fakultet, Zagreb, 74pp.

Adresa autora: S. Markušić, Geofizički zavod »Andrija Mohorovičić«, Prirodoslovno-matematički fakultet, Sveučilište u Zagrebu, 41000 Zagreb, Horvatovac bb.