

برای هر دو نوع مسیر مذکور، زمان انتشار امواج به خصوصیات فیزیکی سنگ‌ها و وضعیت لایه‌ها بستگی دارد. هدف از مطالعات لرزه‌نگاری نیز کسب اطلاعات در رابطه با سنگ‌ها و به‌ویژه وضعیت لایه‌ها بر اساس زمان‌های مشاهده شده و (به میزان کمتر) تغییرات دامنه، فرکانس، فاز و شکل موج می‌باشد.

### ۴-۳ مسائل

۱. کدام یک از عبارات زیر صحیح نمی‌باشد؟

الف) سرعت انتشار امواج  $S$  کمتر از امواج  $P$  است.

ب) امواج  $S$  انرژی بیشتری را نسبت به امواج  $P$  انتقال می‌دهند.

ج) در مقایسه با امواج  $P$ ، امواج  $S$  آسیب کمتری را به ساختمان‌ها وارد می‌کنند.

د) هیچ کدام

پاسخ: سرعت انتشار امواج  $P$  همیشه بیشتر از امواج  $S$  می‌باشد و به همین دلیل، امواج  $P$ ، امواج اولیه و امواج  $S$ ، امواج ثانویه نامیده می‌شوند. انرژی انتقالی موج برشی از انرژی انتقالی موج فشاری بیشتر است و بنابراین، بعد از عبور امواج از درون سنگ‌ها، امواج  $S$  نسبت به امواج  $P$  خود را به‌طور مشخص‌تری روی گیرنده نشان می‌دهند. همچنین، امواج  $S$  آسیب بیشتری به ساختمان‌ها وارد می‌کنند. بنابراین، پاسخ سوال، گزینه (ج) است.

۲. امپدانس صوتی را تعریف کنید.

پاسخ: حاصل ضرب چگالی هر لایه در سرعت انتشار امواج لرزه‌ای در آن، امپدانس صوتی ( $Z$ ) نامیده می‌شود. به‌طور کلی، هرچه یک سنگ متراکم‌تر باشد، امپدانس صوتی آن نیز بزرگ‌تر است.

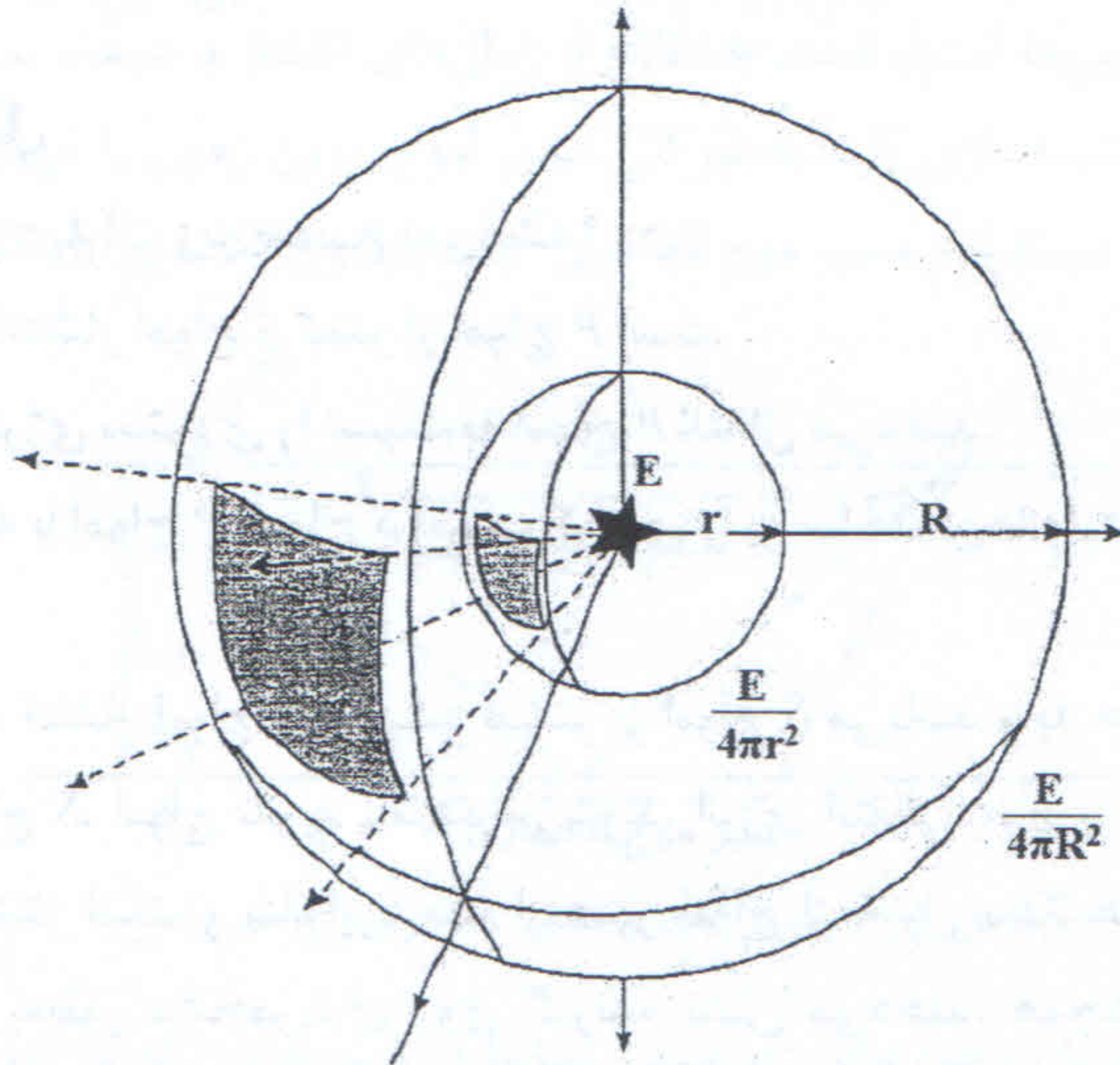
در صورتی که هیچ تباین امپدانس صوتی در یک فصل مشترک وجود نداشته باشد، تمام انرژی برخوردی به فصل مشترک، منتقل شده و هیچ بخشی از آن منعکس نمی‌شود. البته در چنین حالتی، همچنان احتمال وجود تباین در سرعت و چگالی دو محیط وجود دارد. به‌عنوان مثال، اگر سرعت انتشار امواج لرزه‌ای و چگالی دو محیط به‌ترتیب  $1800 \text{ m/s}$ ،  $1/6 \text{ Mg/m}^3$ ،  $1600 \text{ m/s}$  و  $1/8 \text{ Mg/m}^3$  باشند، هیچ تباینی در امپدانس صوتی دو محیط وجود ندارد:  $Z_1 =$   
 $Z_2 = 2880 \text{ Mg/m}^2\text{s}$

با افزایش تباین امپدانس صوتی، انرژی انعکاسی افزایش می‌یابد.

۳. علت کاهش دامنه امواج لرزه‌ای با افزایش فاصله از منبع مولد موج چیست؟

پاسخ: کاهش دامنه امواج لرزه‌ای به سه دلیل رخ می‌دهد:

- واگرایی کروی<sup>۱</sup> یا گسترش هندسی<sup>۲</sup>. انرژی کل تولید شده در منبع ( $E$ ) بر روی یک پوسته کروی با شعاعی که نسبت به زمان افزایش می‌یابد، منتشر می‌شود (شکل ۳-۴). تراکم انرژی (انرژی واحد سطح) در پوسته‌ای با شعاع  $r$ ،  $E/4\pi r^2$  می‌باشد. با توجه به افزایش شعاع کره نسبت به فاصله از منبع موج، تراکم انرژی و در نتیجه دامنه موج با گذشت زمان کاهش می‌یابد.



شکل ۳-۴: گسترش انرژی در واحد سطح در اثر انتشار کروی از منبع انرژی در نقطه  $E$ .

- تضعیف ذاتی<sup>۳</sup>. این نوع اتلاف انرژی به دلیل اصطکاک ذرات محیط در انتقال موج لرزه‌ای، توسط محیط جذب و به گرما تبدیل می‌شود. میرایی موج به نوع مواد تشکیل دهنده محیط انتشار موج نیز بستگی دارد و مشخصه آن ضریب تضعیف<sup>۴</sup> می‌باشد. ضریب تضعیف با افزایش فرکانس افزایش می‌یابد. بنابراین، امواج با فرکانس کم نسبت به امواج با فرکانس زیاد، با سرعت کمتری میرا می‌شوند.

- پراکندگی<sup>۵</sup>. این نوع تضعیف موج، در هنگام انعکاس، انکسار و پراش<sup>۶</sup> امواج لرزه‌ای رخ می‌دهد.

- 1- Spherical divergence
- 2- Geometrical spreading
- 3- Intrinsic attenuation
- 4- Attenuation coefficient
- 5- Scattering
- 6- Diffraction

۴. یک پرتو موج  $P$  وقتی به فصل مشترک دو لایه با سرعت امواج لرزه‌ای  $V_1$  و  $V_2$  ( $V_1 < V_2$ ) برخورد می‌کند چند پرتو انعکاسی و انکساری ایجاد می‌شود؟ (کارشناسی ارشد مهندسی معدن، سال ۱۳۸۶)

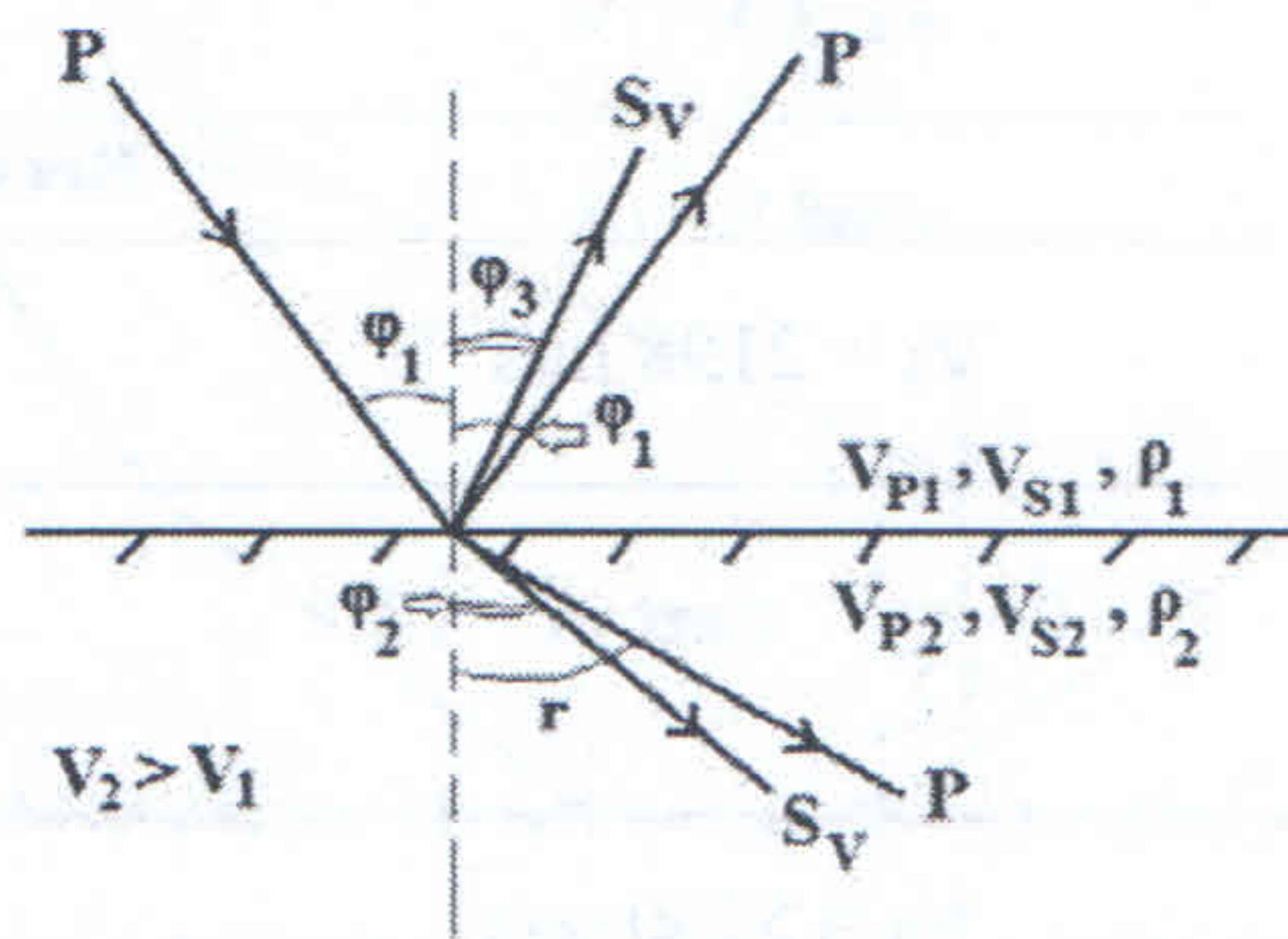
الف) یک پرتو انعکاسی  $P$  و یک پرتو انکساری  $P$

ب) یک پرتو انعکاسی  $P$ ، یک پرتو انکساری  $P$  و یک پرتو انکسار بحرانی  $P$

ج) یک پرتو انعکاسی  $P$ ، یک پرتو انعکاسی  $S$ ، یک پرتو انکساری  $P$  و یک پرتو انکساری  $S$

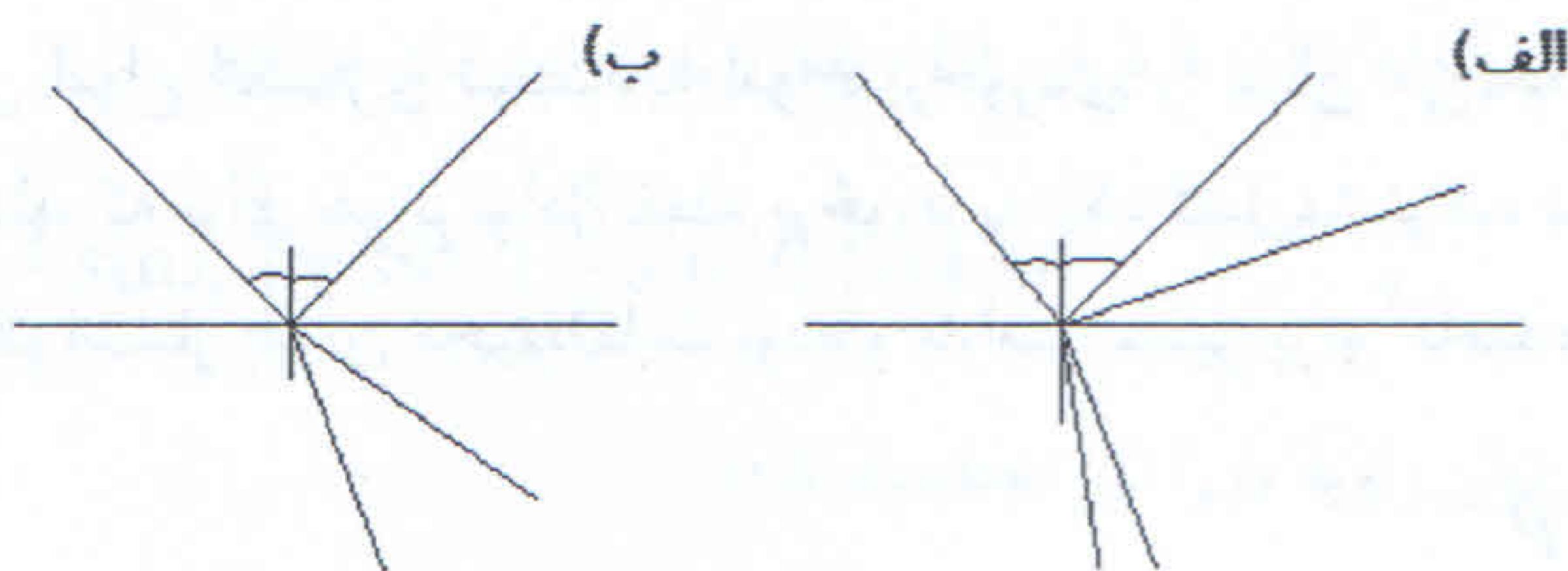
د) یک پرتو انعکاسی  $P$ ، یک پرتو انعکاسی  $S$  و یک پرتو انکساری  $P$

پاسخ: گزینه (ج) صحیح است. به‌طور کلی هرگاه یک موج طولی یا عرضی به یک فصل مشترک برخورد کند، چهار نوع موج تولید می‌شود: امواج انعکاسی و انتقالی  $P$  و امواج انعکاسی و انتقالی  $S$  (شکل ۴-۴). جهت انتشار امواج انتقالی در ورود به محیط جدید تغییر می‌کند و این تغییر تحت عنوان انکسار شناخته می‌شود.



شکل ۴-۴: هندسه امواج در برخورد مایل موج  $P$  به یک فصل مشترک.

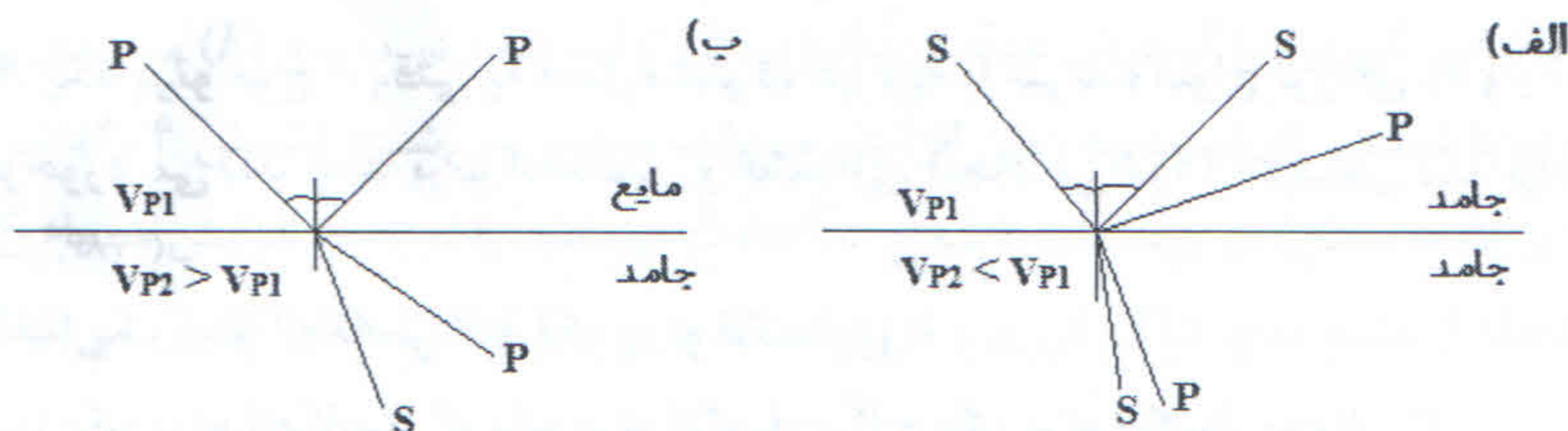
۵. برای پرتوهای موج نشان داده شده در شکل (۴-۵)، امواج  $P$  و  $S$  و همچنین محیط مایع را مشخص کنید.



شکل ۴-۵: برخورد یک پرتو موج به فصل مشترک دو لایه که منجر به ایجاد الف) دو پرتو انعکاسی و دو پرتو انکساری، ب) یک پرتو انعکاسی و دو پرتو انکساری شده است.

پاسخ: با توجه به مطالب بیان شده در سوال ۴ و شکل (۴-۴)، پاسخ به صورت شکل (۴-۶)

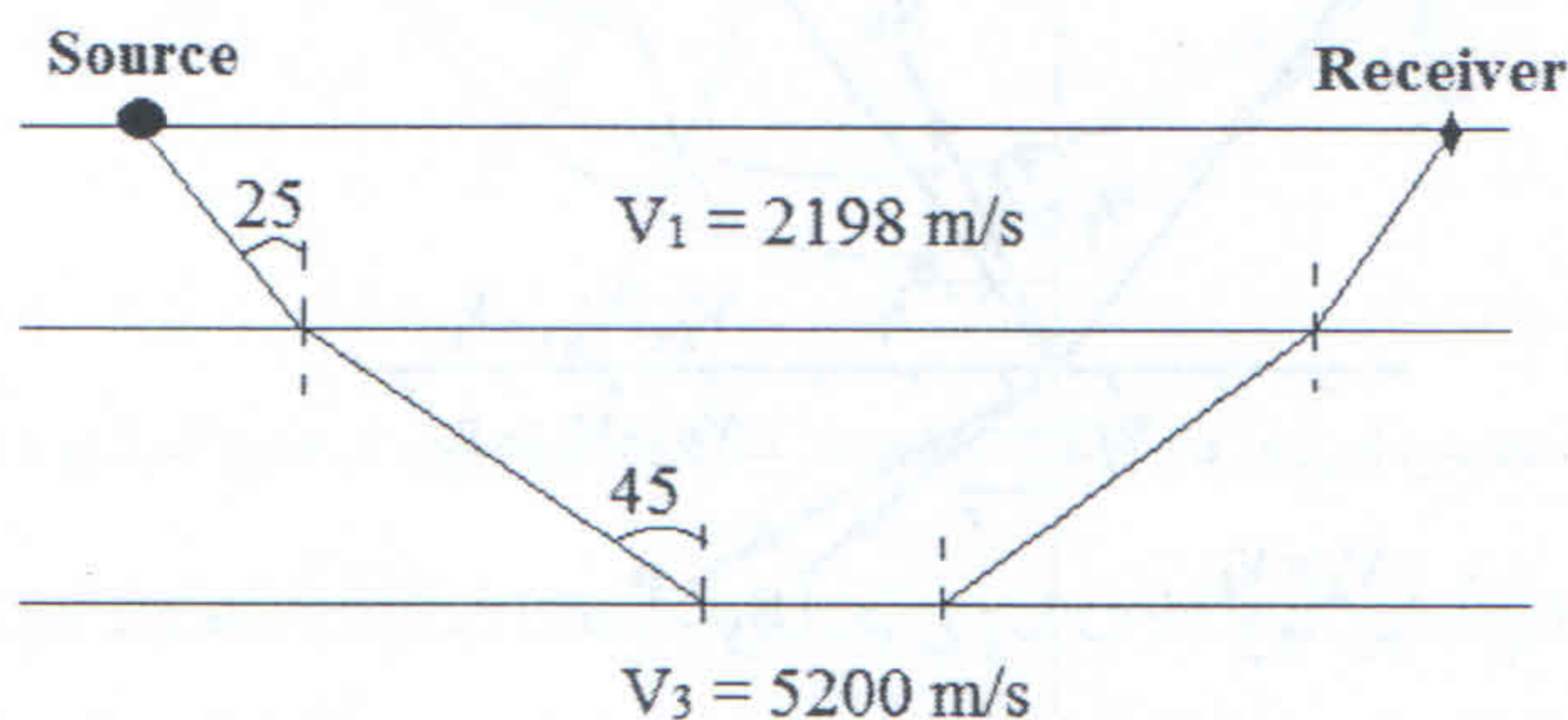
می‌باشد.



شکل ۴-۶: الف) برخورد موج  $S$  به فصل مشترک دو محیط جامد که سرعت در لایه دوم کمتر از لایه اول می باشد. ب) برخورد موج  $P$  به فصل مشترک مایع - جامد.

با توجه به اینکه موج برشی در مایعات منتشر نمی شود، محیط اول در شکل (۴-۶-ب)، مایع است که موج طولی از آن عبور کرده و به فصل مشترک رسیده است، اما موج بازتاب عرضی وجود ندارد.

۶. در شکل (۴-۷)، مقدار سرعت در لایه دوم را محاسبه کنید.



شکل ۴-۷: انکسار موج لرزه‌ای در فصل مشترک‌های موجود در یک زمین سه لایه.

پاسخ: برای یک فصل مشترک جداکننده دو محیط، نسبت سینوس زاویه برخورد به سینوس زاویه انکسار ثابت است. قانون انکسار<sup>۱</sup> (که به نام قانون اسنل<sup>۲</sup> نیز شناخته می شود) وضعیت هندسی امواج انکساری نسبت به امواج برخوردی را نشان می دهد. قانون تعمیم یافته اسنل بیان می کند که برای هر پرتو در نقطه برخورد به یک فصل مشترک، نسبت سینوس زاویه برخورد به سرعت انتشار در آن محیط ثابت بوده و پارامتر مسیر پرتو<sup>۳</sup> نامیده می شود:

$$\frac{\sin i}{V_1} = \frac{\sin r}{V_2} = p$$

که در آن،  $i$  زاویه برخورد،  $r$  زاویه انکسار،  $V_1$  سرعت انتشار موج در لایه اول،  $V_2$  سرعت انتشار موج در لایه دوم و  $p$  پارامتر مسیر پرتو می باشند. به طور دیگر می توان نوشت:

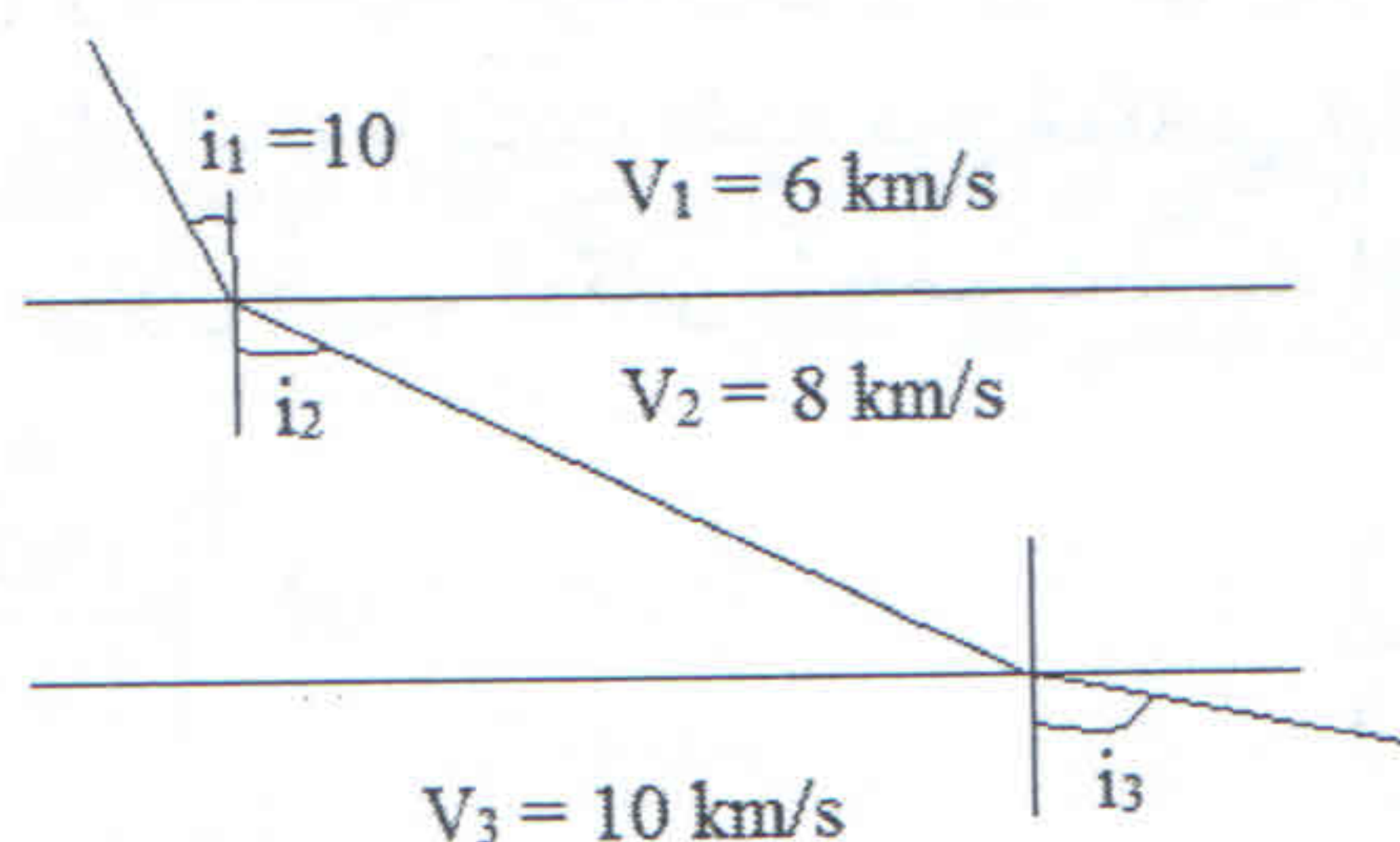
- 1- Law of refraction
- 2- Snell's law
- 3- Raypath parameter

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{V_1}{V_2}$$

با استفاده از رابطه بالا می‌توان سرعت انتشار موج در لایه دوم در شکل (۷-۴) را محاسبه کرد:

$$\frac{\sin(25)}{\sin(45)} = \frac{2198}{V_2} \Rightarrow V_2 = 3677.6 \text{ m/s}$$

۷. در شکل (۸-۴)، الف) در صورتی که زاویه برخورد پرتو موج در لایه اول، ۱۰ درجه باشد، زاویه برخورد و انکسار این پرتو در مرز لایه دوم با سوم چند درجه است؟ ب) زاویه برخورد یک پرتو موج در لایه اول به نحوی که در مرز لایه دوم و سوم انکسار بحرانی رخ دهد، چقدر است؟



شکل ۸-۴: انکسار موج لرزه‌ای در یک زمین سه لایه که سرعت انتشار موج در لایه‌های اول، دوم و سوم به ترتیب ۶، ۸ و ۱۰ کیلومتر در ثانیه می‌باشد.

پاسخ: همان‌طور که در سوال ۶ بیان شد، پارامتر مسیر پرتو، ثابت و برابر است با:

$$p = \frac{\sin i_1}{V_1} = \frac{\sin i_2}{V_2} = \frac{\sin i_3}{V_3}$$

الف) با استفاده از رابطه بالا و با فرض  $i_1 = 10$ ، زاویه  $i_2$  به دست می‌آید:

$$i_2 = \sin^{-1} \left( \frac{V_2}{V_1} \sin i_1 \right) = \sin^{-1} \left( \frac{8}{6} \sin 10 \right) = 13.4^\circ$$

به‌طور مشابه می‌توان زاویه  $i_3$  را نیز محاسبه کرد:

$$i_3 = \sin^{-1} \left( \frac{V_3}{V_1} \sin i_1 \right) = \sin^{-1} \left( \frac{10}{6} \sin 10 \right) = 16.8^\circ$$

یا:

$$i_3 = \sin^{-1} \left( \frac{V_3}{V_2} \sin i_2 \right) = \sin^{-1} \left( \frac{10}{8} \sin 13.4 \right) = 16.8^\circ$$

ب) انکسار بحرانی در مرز لایه دوم و سوم به این معنی است که  $i_3=90$  باشد. بنابراین، زاویه برخورد یک پرتو موج در لایه اول به نحوی که در مرز لایه دوم و سوم انکسار بحرانی رخ دهد برابر است با:

$$i_1 = \sin^{-1} \left( \frac{V_1}{V_3} \sin i_3 \right) = \sin^{-1} \left( \frac{6}{10} \sin 90 \right) = 36.9^\circ$$

۸. در یک محیط دو لایه‌ای، سرعت و چگالی لایه اول به ترتیب برابر با  $1500 \text{ m/s}$  و  $2 \text{ g/cm}^3$  می‌باشد. اگر سرعت لایه دوم  $3000 \text{ m/s}$  و ضریب بازتاب برابر با  $50\%$  باشد، چگالی لایه دوم چند  $\text{g/cm}^3$  است؟ (کارشناسی ارشد مهندسی نفت، سال ۱۳۸۹)

الف) ۲/۵      ب) ۳      ج) ۳/۵      د) ۴

پاسخ: میزان انعکاس از یک فصل مشترک برای برخوردهای عمودی و کم زاویه با استفاده از ضریب انعکاس ( $R$ ) که برابر است با نسبت دامنه موج انعکاسی ( $A_1$ ) به موج برخوردی ( $A_0$ ) بیان می‌شود. همچنین می‌توان ضریب انعکاس را به صورت نسبت اختلاف امپدانس‌های صوتی به مجموع آن‌ها بیان کرد:

$$R = \frac{A_1}{A_0} = \frac{(Z_2 - Z_1)}{(Z_2 + Z_1)}$$

با استفاده از تعریف امپدانس صوتی و با قرار دادن داده‌های مسئله در رابطه بالا، چگالی لایه دوم به دست می‌آید:

$$0.5 = \frac{(3000 \times \rho_2 - 1500 \times 2)}{(3000 \times \rho_2 + 1500 \times 2)} \Rightarrow \rho_2 = 3$$

بنابراین، گزینه (ب) صحیح است.

۹. آیا ضریب انعکاس می‌تواند منفی باشد؟

پاسخ: علامت ضریب انعکاس، به اختلاف امپدانس صوتی دو لایه موجود در طرفین فصل مشترک بستگی دارد. بنابراین، اگر  $Z_2 < Z_1$  باشد (به عبارت دیگر، هنگام ورود یک موج از محیطی با سرعت بالای انتشار امواج به محیطی با سرعت کم انتشار امواج)، آن‌گاه ضریب انعکاس منفی می‌شود. در چنین شرایطی، موج آشکار شده بر روی لرزه‌نگاشت، معکوس می‌شود.

۱۰. اگر سرعت انتشار موج طولی در محیطی  $1/7$  برابر موج عرضی باشد، با نصف شدن

انرژی منبع مولد این امواج، نسبت مذکور چه تغییری می‌کند؟

پاسخ: سرعت انتشار امواج لرزه‌ای در یک محیط الاستیک، به مدول‌های الاستیک و چگالی سنگ‌هایی که موج از آن‌ها می‌گذرد بستگی دارد. سرعت انتشار موج طولی ( $V_P$ ) و موج عرضی ( $V_S$ ) را می‌توان از روابط زیر به دست آورد:

$$V_S = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad V_P = \sqrt{\frac{k + 4\mu/3}{\rho}}$$

که در آن،  $k$  مدول تراکم‌ناپذیری،  $\mu$  مدول برشی و  $\rho$  چگالی محیط می‌باشند. روابط بالا نشان می‌دهند که سرعت انتشار امواج لرزه‌ای فقط تابعی از ویژگی‌های محیط انتشار می‌باشد و به مشخصات منبع مولد موج ارتباطی ندارد. نوع و مقدار انرژی به کار برده شده در منبع مولد موج، تعیین کننده دامنه نوسان و فرکانس موج ارسال شده از منبع می‌باشد ولی در مقدار سرعت انتشار امواج تاثیری ندارد.

۱۱. نسبت سرعت موج تراکمی ( $V_P$ ) و موج برشی ( $V_S$ ) توسط کدامیک از رابطه‌های زیر

بیان می‌شود؟ (کارشناسی ارشد مهندسی نفت، ۱۳۹۰)

$$\left[ \frac{2(1-\sigma)}{(1-2\sigma)} \right]^{\frac{1}{2}} \text{ (الف)} \quad \left[ \frac{(1-2\sigma)}{2(1-\sigma)} \right]^{\frac{1}{2}} \text{ (ب)}$$

$$\left[ \frac{2(1-\sigma)}{(1+2\sigma)} \right]^{\frac{1}{2}} \text{ (ج)} \quad \left[ \frac{(1+2\sigma)}{2(1-\sigma)} \right]^{\frac{1}{2}} \text{ (د)}$$

پاسخ: به طور کلی سرعت امواج  $P$  بیشتر از امواج  $S$  می‌باشد. نسبت این دو سرعت بر حسب ضریب پواسون به صورت زیر است:

$$\frac{V_S}{V_P} = \sqrt{\frac{0.5 - \sigma}{1 - \sigma}}$$

با معکوس کردن رابطه بالا، نسبت سرعت موج تراکمی به موج برشی به دست می‌آید:

$$\frac{V_P}{V_S} = \sqrt{\frac{1 - \sigma}{0.5 - \sigma}} = \sqrt{\frac{2(1 - \sigma)}{2(0.5 - \sigma)}} = \sqrt{\frac{2(1 - \sigma)}{(1 - 2\sigma)}}$$

بنابراین، گزینه (الف) صحیح است.

۱۲. در یک عملیات لرزه‌نگاری در حوزه رسوبی، سرعت انتشار موج تراکمی دو کیلومتر بر ثانیه و سرعت موج برشی یک کیلومتر بر ثانیه به دست آمده است. نسبت پواسون به-

دست آمده برابر است با: (کارشناسی ارشد مهندسی نفت، سال ۱۳۸۷)

$$\text{الف) } 0/18 \quad \text{ب) } 0/24 \quad \text{ج) } 0/33 \quad \text{د) } 0/36$$

پاسخ: با استفاده از رابطه ارائه شده در سوال ۱۱، نسبت پواسون به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\frac{2}{1} = \sqrt{\frac{1-\sigma}{0.5-\sigma}} \Rightarrow 4 = \frac{1-\sigma}{0.5-\sigma} \Rightarrow \sigma = \frac{1}{3} = 0.33$$

بنابراین، گزینه (ج) صحیح است.

۱۳. در لرزه‌نگاری انکساری، فاصله فراگذر یا فاصله تقاطع  $(X_{cross})^1$  عبارت است از:

(کارشناسی ارشد مهندسی معدن، سال ۱۳۸۵)

- الف) حداکثر فاصله از نقطه انفجار که در آن امواج انکساری قابل دریافت و ثبت باشند.  
 ب) حداقل فاصله از نقطه انفجار که در آن امواج انکساری قابل دریافت و ثبت باشند.  
 ج) حداقل فاصله از نقطه انفجار که در آن امواج انکساری از امواج مستقیم سبقت می‌گیرند.  
 د) حداقل فاصله از نقطه انفجار که در آن امواج مستقیم از امواج انکساری سبقت می‌گیرند.  
 پاسخ: فاصله فراگذر فاصله‌ای است که در آن، موج انکساری از موج مستقیم پیشی می‌گیرد و بعد از این فاصله، همیشه اولین موج لرزه‌ای که به یک ژئوفون می‌رسد، موج انکساری می‌باشد. امواج انکساری به این دلیل که بخشی از مسیر خود را در لایه با سرعت بیشتر طی می‌کنند، در نقطه تقاطع از امواج مستقیم سبقت می‌گیرند. امواج اولیه دریافتی توسط کلیه ژئوفون‌های واقع در بعد از این فاصله، از نوع انکساری می‌باشد. بنابراین، گزینه (ج) صحیح است.

**نکته:** با توجه به ویژگی منحنی‌های زمان-فاصله، فاصله ژئوفون‌ها تا منبع مولد موج در برداشت‌های انکساری معمولاً زیاد انتخاب می‌شود تا اطمینان حاصل شود که فواصل انتخابی از فاصله تقاطع بیشتر بوده و امواج انکساری اولین امواج دریافتی می‌باشند. هرچه عمق لایه منکسرکننده بیشتر باشد، فاصله منبع تا ژئوفون‌ها نیز باید بیشتر باشد. محل منبع لرزه‌ای نسبت به گسترش ژئوفون‌ها باید به‌گونه‌ای باشد که پوشش کافی از سطح منکسرکننده را فراهم آورد.

۱۴. در لرزه‌نگاری انکساری، فاصله بحرانی  $(X_{critical})^2$  عبارت است از: (کارشناسی ارشد مهندسی

معدن، سال ۱۳۸۴ و کارشناسی ارشد مهندسی نفت، سال ۱۳۸۷)

- الف) حداقل فاصله از نقطه انفجار که در آن امواج انکساری قابل دریافت و ثبت هستند.  
 ب) حداقل فاصله از نقطه انفجار که در آن امواج انکساری از امواج مستقیم سبقت می‌گیرند.  
 ج) حداکثر فاصله از نقطه انفجار که در آن امواج مستقیم قابل دریافت و ثبت هستند.  
 د) فاصله‌ای که در آن، امواج مستقیم و انکساری با هم به گیرنده سطح زمین می‌رسند.

1- Crossover distance

2- Critical distance



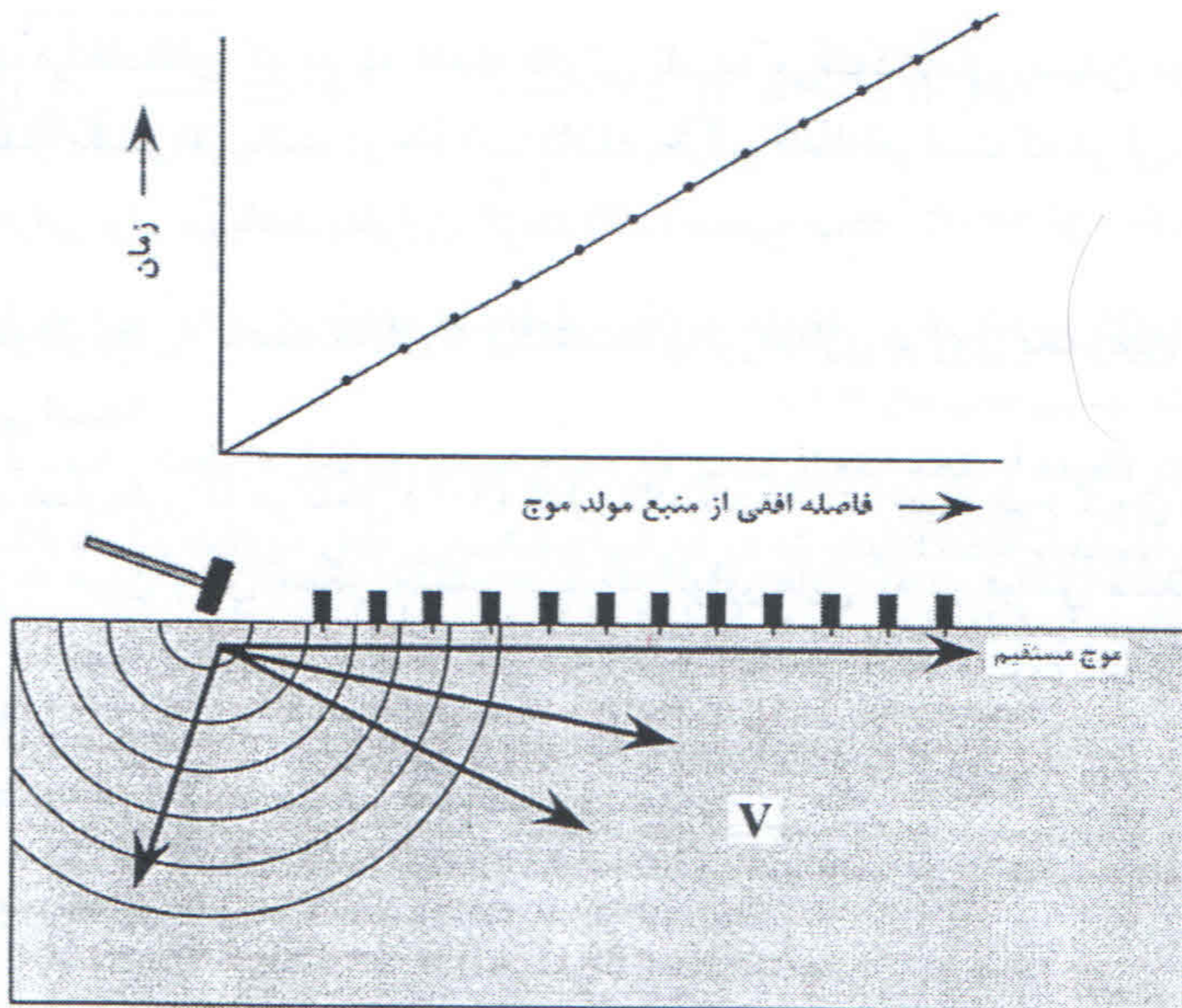
پاسخ: در فاصله‌ای که به نام فاصله بحرانی نامیده می‌شود، زمان رسیدن موج انعکاسی و اولین انکسار یکسان می‌باشد. در حقیقت، فاصله بحرانی فاصله‌ای است که در آن، زاویه انعکاس با زاویه بحرانی برابر می‌باشد. بنابراین، گزینه (الف) صحیح است.

۱۵. نمودار زمان - فاصله حاصل از برداشت‌های لرزه‌نگاری بر روی یک زمین همگن به چه صورتی است؟

پاسخ: همان‌طور که در شکل (۴-۹) نشان داده شده است، جبهه موج کروی شکل از منبع مولد موج به درون زمین همگن منتشر می‌شود. ژئوفون‌هایی که در فواصل مشخص نسبت به منبع قرار دارند، ارتعاش زمین را در اثر عبور موج ثبت می‌کنند. بر روی لرزه‌نگاشت حاصل می‌توان زمان عبور موج از منبع تا هر ژئوفون را تعیین کرد. با توجه به مشخص بودن فاصله هر ژئوفون تا منبع، می‌توان نمودار زمان - فاصله عبور موج را رسم کرد. معادله مربوط به این نمودار به صورت زیر است:

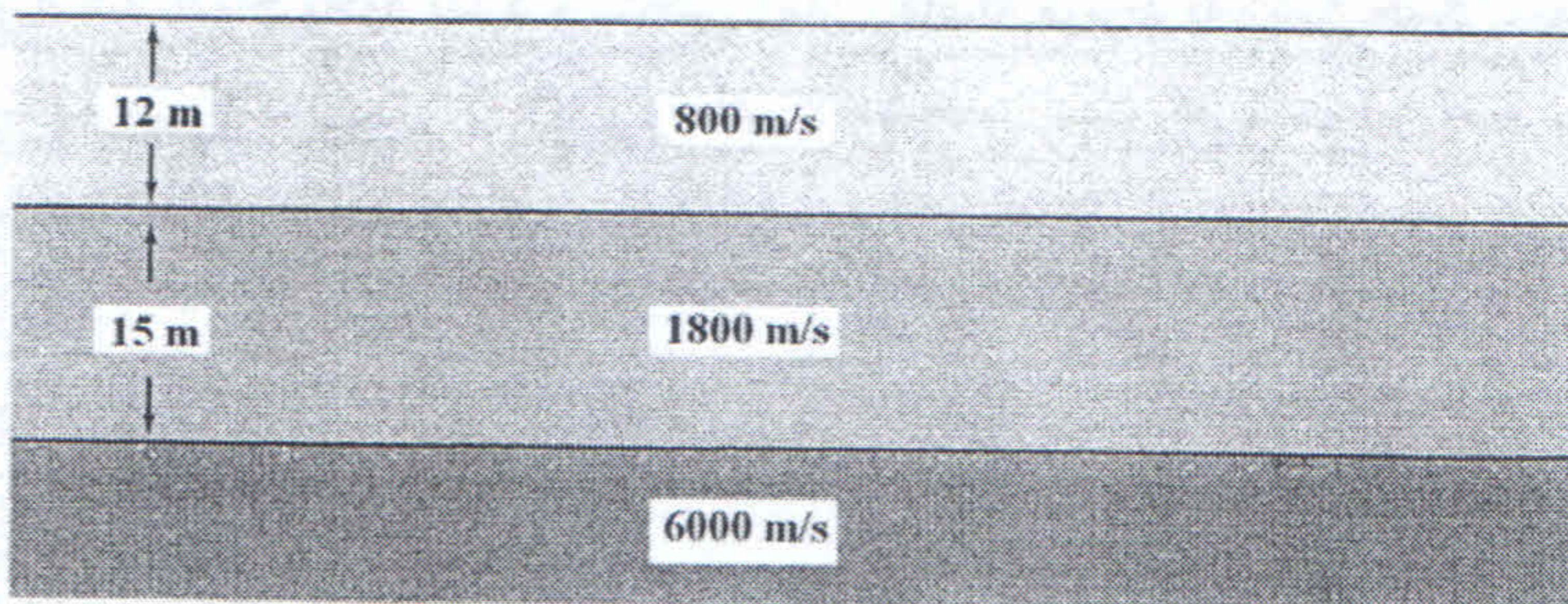
$$time = \frac{path}{velocity} \Rightarrow t = \frac{x}{V}$$

از رابطه بالا به سادگی مشخص است که می‌توان سرعت عبور موج را محاسبه کرد، زیرا فاصله و زمان معین هستند. با توجه به اینکه زمین همگن در نظر گرفته شده است، هیچ مرزی در مسیر انتشار امواج وجود ندارد و منحنی زمان - فاصله مربوط به زمین همگن، به صورت یک خط مستقیم می‌باشد (شکل ۴-۹). از رابطه بالا مشخص است که شیب این خط برابر است با عکس سرعت انتشار موج در زمین.



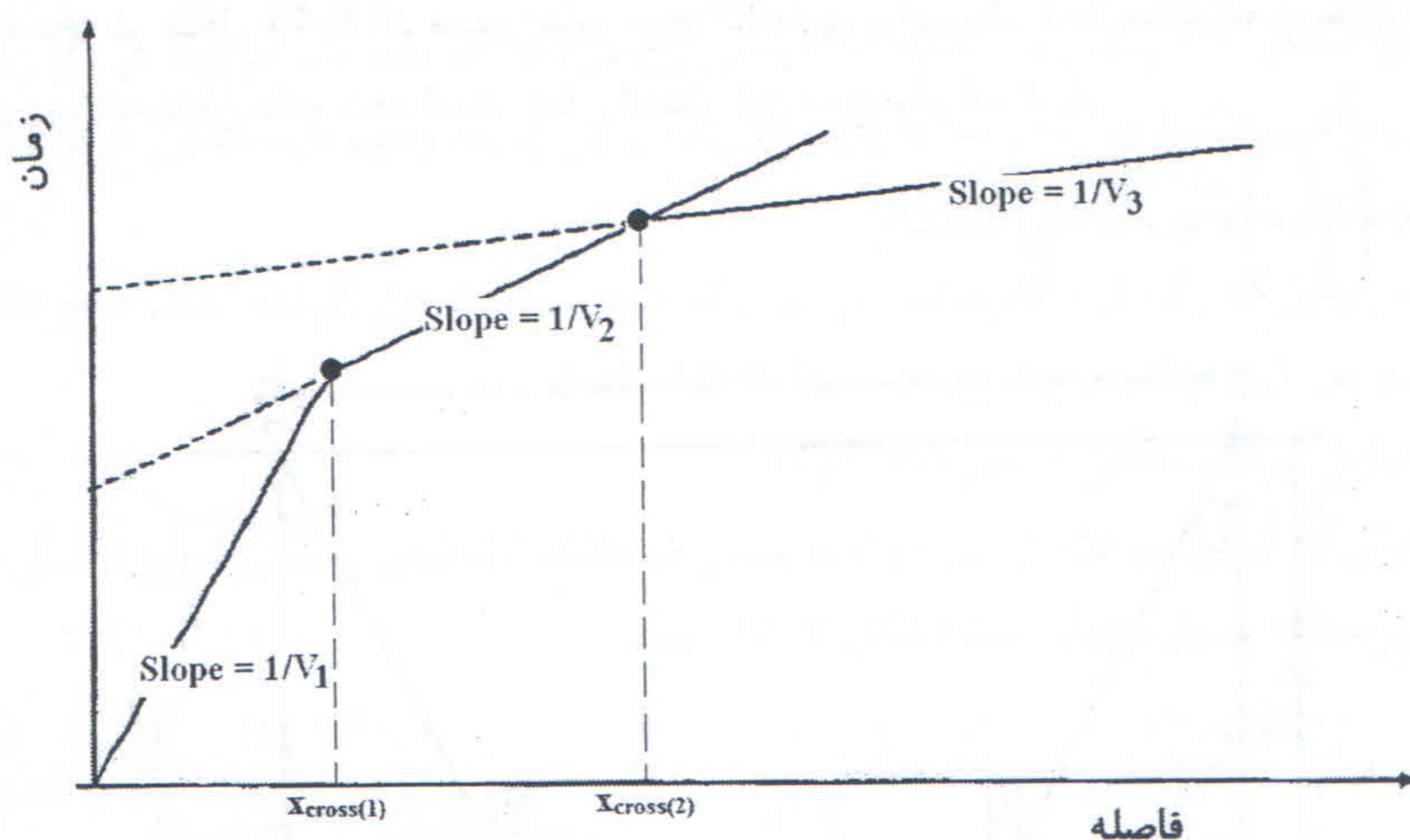
شکل ۴-۹: عبور امواج در یک زمین همگن و نمودار زمان-فاصله به دست آمده بر روی این زمین.

۱۶. فواصل تقاطع (فراگذر) را برای اولین و دومین فصل مشترک در شکل (۴-۱۰) محاسبه کنید.



شکل ۴-۱۰: مدل زمین سه لایه با مقادیر مشخص سرعت و ضخامت برای هر لایه.

پاسخ: همان طور که در شکل (۴-۱۱) مشاهده می شود، در نمودار زمان-فاصله مربوط به یک زمین سه لایه، در فاصله تقاطع اول ( $x_{cross(1)}$ )، زمان رسیدن موج مستقیم با زمان رسیدن موج انکساری عبوری در لایه دوم برابر است. به طور مشابه، در فاصله تقاطع دوم ( $x_{cross(2)}$ )، زمان رسیدن موج انکساری عبوری در لایه دوم با زمان رسیدن موج انکساری عبوری در لایه سوم برابر است.



شکل ۴-۱۱: نمودار زمان-فاصله برای یک زمین سه لایه.

بنابراین، با مساوی قرار دادن رابطه‌های مربوط به زمان رسیدن موج مستقیم و زمان رسیدن موج انکساری عبوری در لایه دوم، اولین فاصله تقاطع به دست می‌آید:

$$\frac{x_{cross(1)}}{V_1} = \frac{x_{cross(1)}}{V_2} + 2z \frac{(V_2^2 - V_1^2)^{1/2}}{V_1 V_2}$$

$$\Rightarrow \frac{x_{cross(1)}}{800} = \frac{x_{cross(1)}}{1800} + 2 \times 12 \frac{(1800^2 - 800^2)^{1/2}}{800 \times 1800}$$

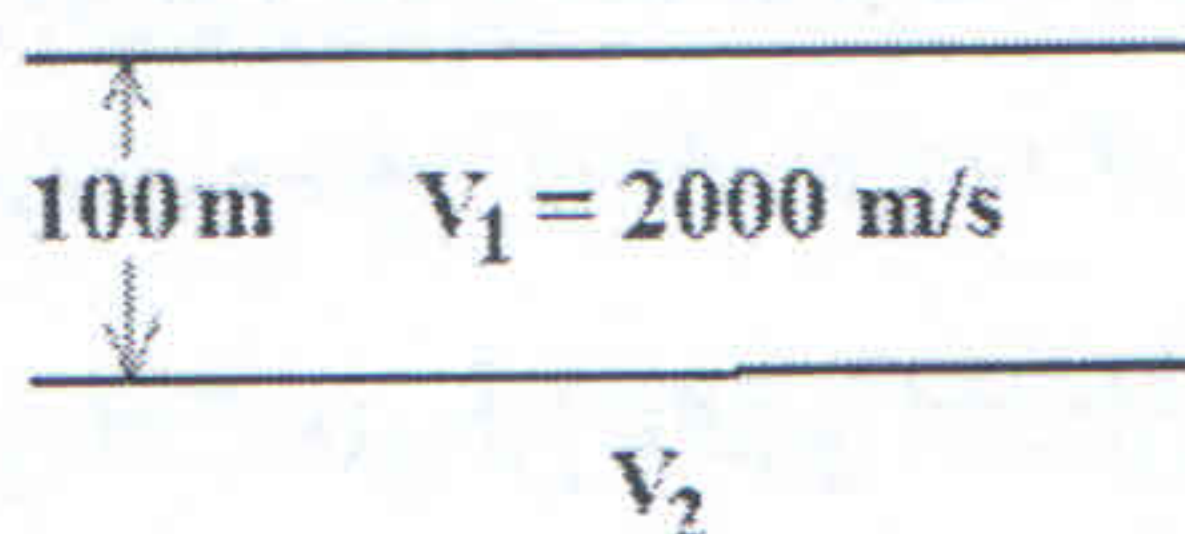
$$\Rightarrow x_{cross(1)} = 38.69 \text{ m}$$

و به‌طور مشابه، با مساوی قرار دادن زمان رسیدن موج انکساری عبوری در لایه دوم و زمان رسیدن موج انکساری عبوری در لایه سوم، دومین فاصله تقاطع به دست می‌آید:

$$\frac{x_{cross(2)}}{V_2} + 2z_1 \frac{(V_2^2 - V_1^2)^{1/2}}{V_1 V_2} = \frac{x_{cross(2)}}{V_3} + 2z_1 \frac{(V_3^2 - V_1^2)^{1/2}}{V_1 V_3} + 2z_2 \frac{(V_3^2 - V_2^2)^{1/2}}{V_2 V_3}$$

$$\Rightarrow x_{cross(2)} = 48.227 \text{ m}$$

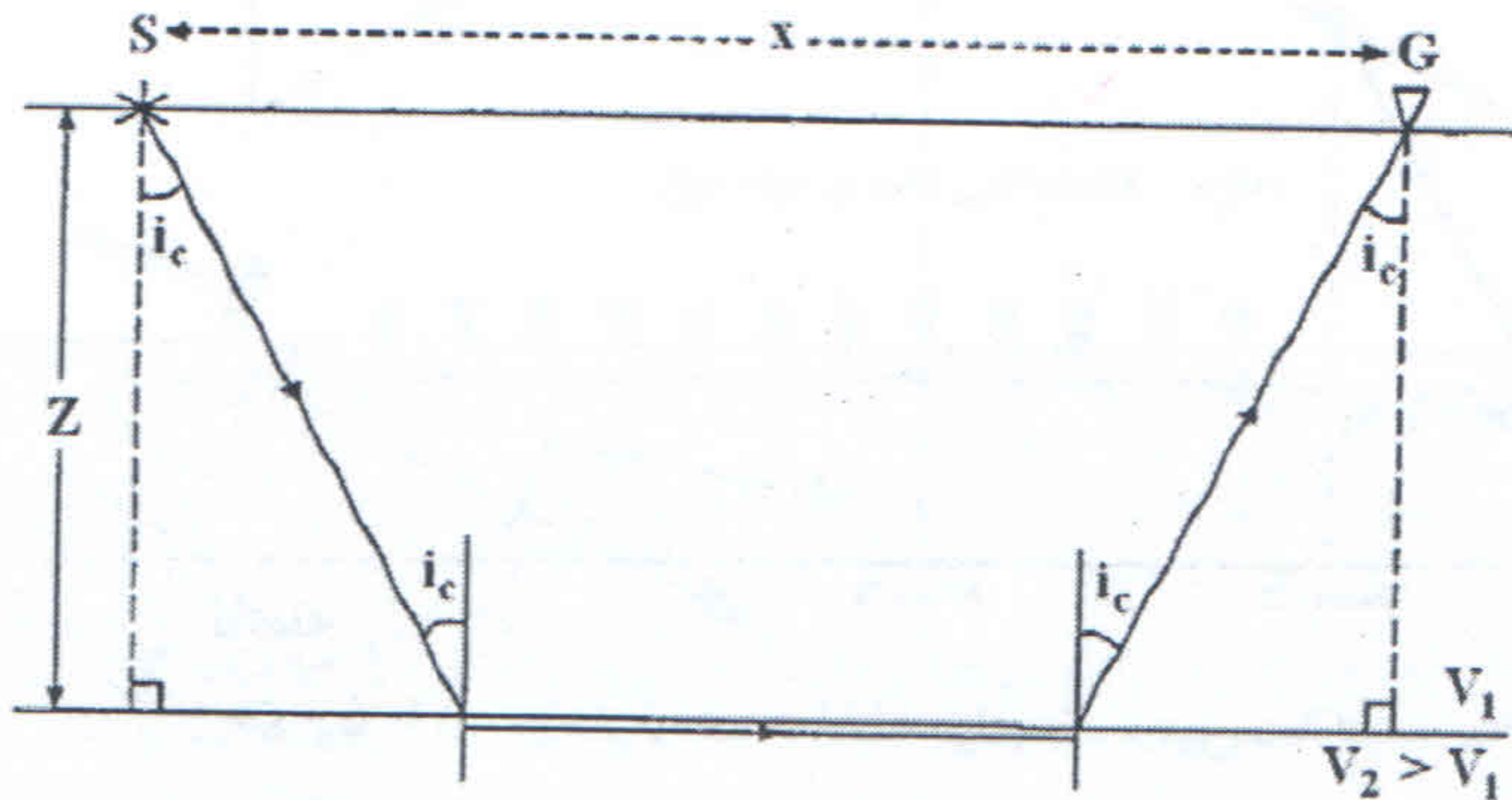
۱۷. زمین دو لایه در شکل (۴-۱۲) را در نظر بگیرید. اگر مقادیر  $V_2$  برابر با ۴۰۰۰، ۸۰۰۰ و ۱۶۰۰۰ متر بر ثانیه باشد، نمودار برداشت لرزه‌ای انکساری به چه صورتی می‌باشد؟



شکل ۴-۱۲: زمین دو لایه با عمق ثابت و سرعت متغیر برای لایه دوم.

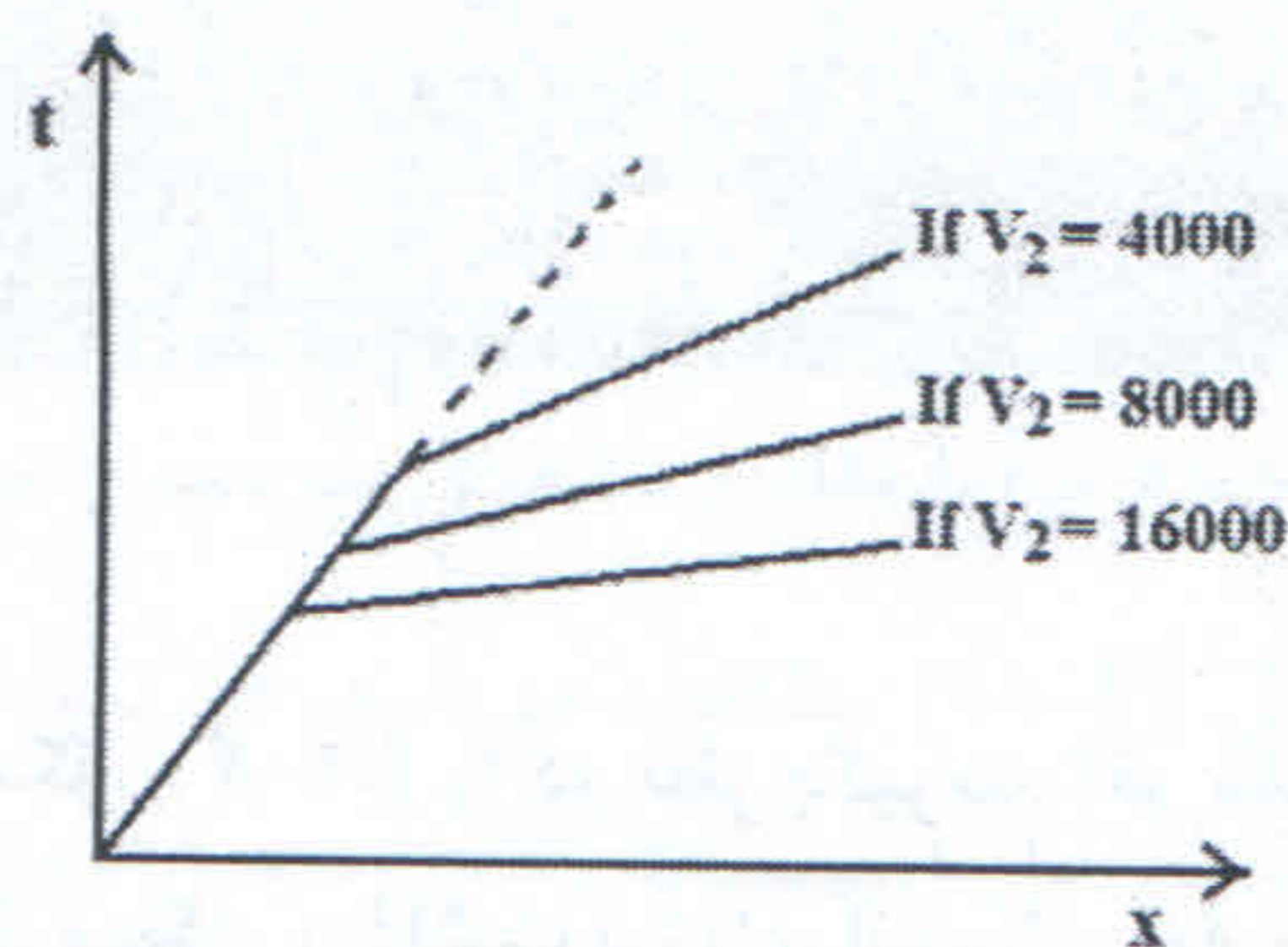
پاسخ: در شکل (۴-۱۳)، مسیر عبور موج انکساری برای یک فصل مشترک مسطح در یک زمین دو لایه نشان داده شده است. زمان انتشار این موج برابر است با:

$$T_{SG} = \left( \frac{1}{V_2} \right) x + \frac{2z(\cos i_c)}{V_1}$$



شکل ۴-۱۳: مسیر عبور موج انکساری برای یک فصل مشترک مسطح در یک زمین دو لایه.

همان طور که مشاهده می شود، این رابطه به صورت معادله یک خط مستقیم است که در آن، شیب خط برابر است با  $1/V_2$ . بنابراین، با افزایش سرعت انتشار موج در لایه دوم، شیب خط مربوط به موج انکساری عبوری از این لایه کاهش می یابد. از طرف دیگر، با افزایش سرعت در لایه دوم، موج انکساری عبوری از این لایه می تواند در فاصله کوتاه تری از موج مستقیم پیشی گیرد. با توجه به دو دلیل ذکر شده و با در نظر گرفتن این نکته که سرعت در لایه اول و عمق فصل مشترک انکساری ثابت است، جواب به صورت شکل (۴-۱۴) می باشد.



شکل ۴-۱۴: کاهش فاصله تقاطع و شیب خط مربوط به موج انکساری عبوری از لایه دوم با افزایش سرعت انتشار موج در این لایه.

۱۸. مشکل لایه پنهان<sup>۱</sup> در برداشت های لرزه نگاری انکساری در چه شرایطی رخ می دهد؟

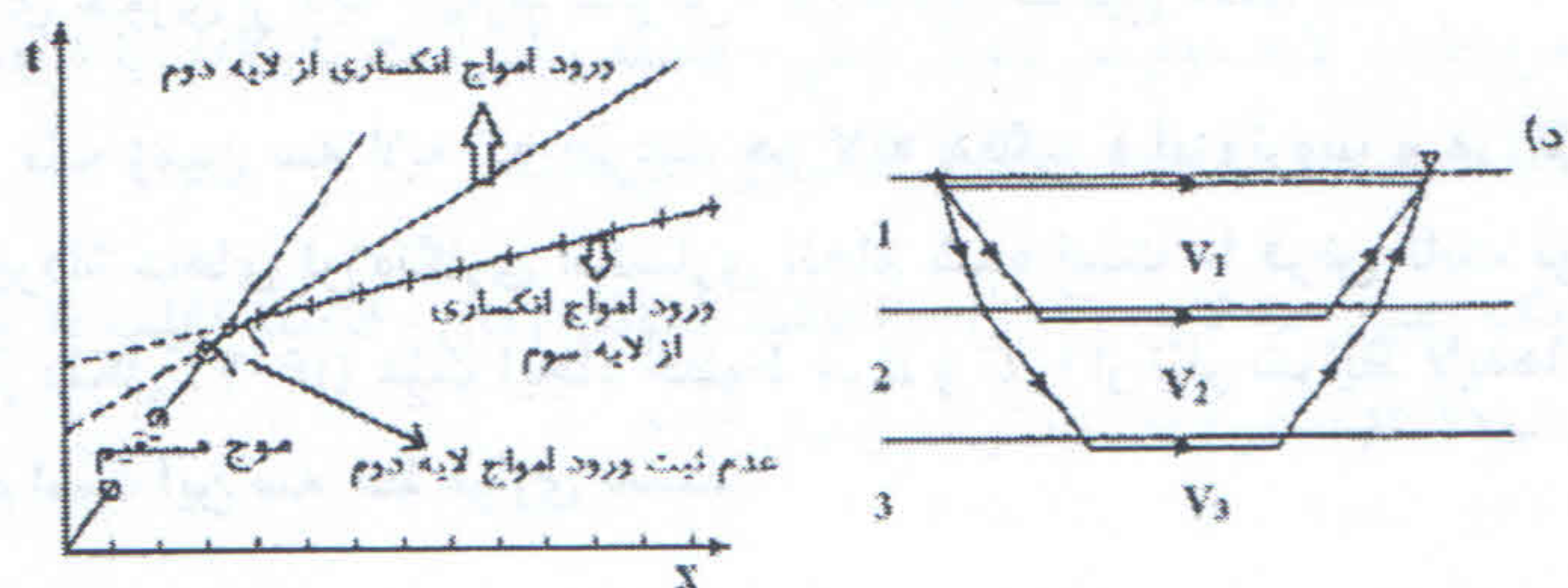
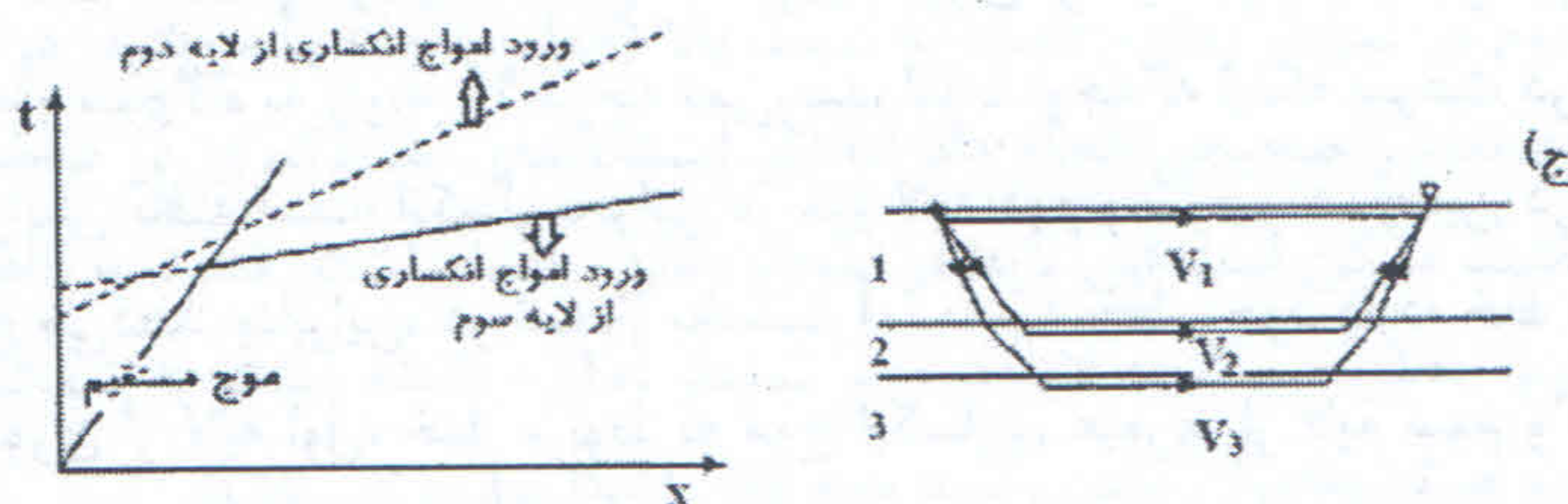
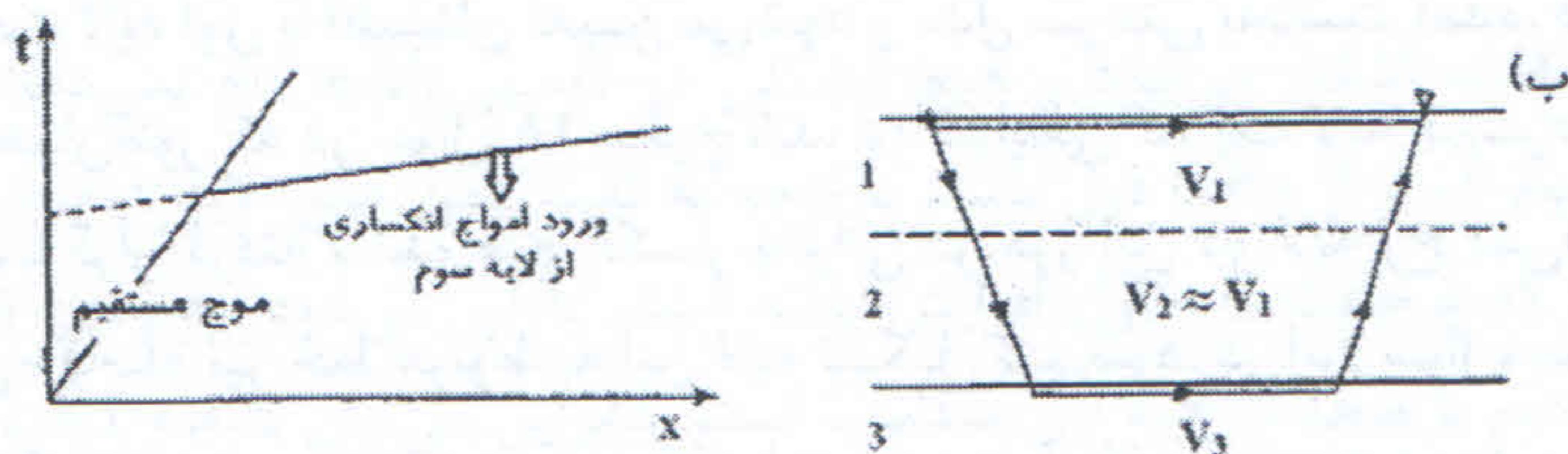
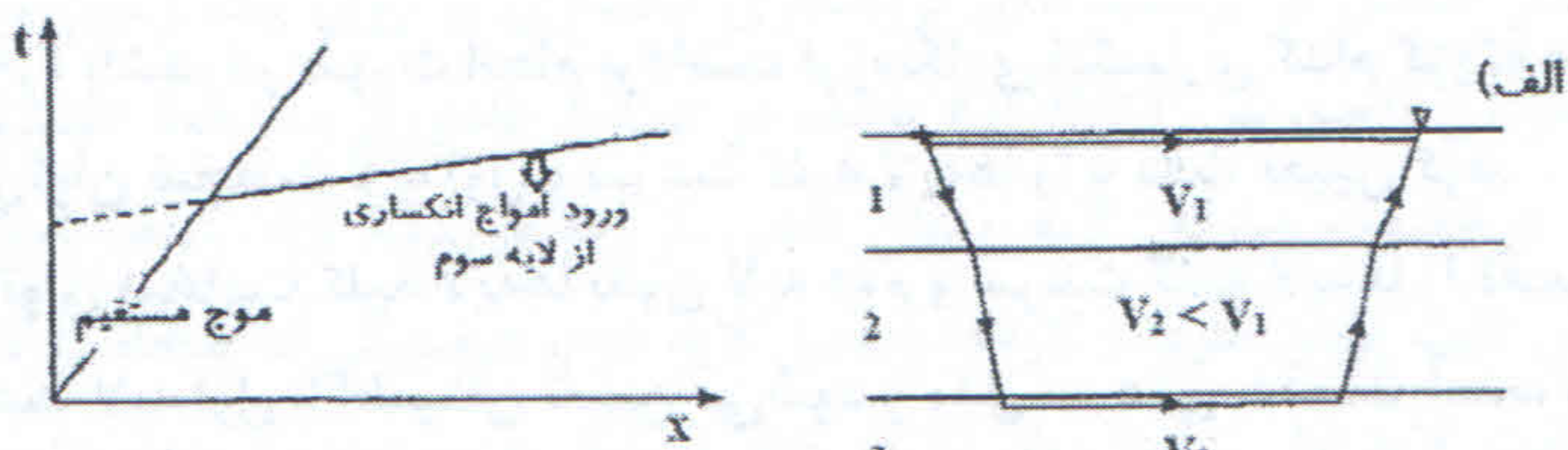
پاسخ: مشکل لایه پنهان یا منطقه کور<sup>۱</sup> زمانی رخ می‌دهد که یک لایه موجود در زیر زمین، توسط لرزه‌نگاری انکساری آشکار نشود. چهار دلیل برای این پدیده وجود دارد (شکل ۴-۱۵).

۱- معکوس‌شدگی سرعت ( $V_2 < V_1$ )

در شرایطی که یک لایه کم‌سرعت در زیر یک لایه پرسرعت قرار گرفته باشد، هیچ انکسار بحرانی در مرز این دو لایه رخ نمی‌دهد (شکل ۴-۱۵-الف).

۲- تباین سرعت ناکافی در مرز ( $V_2 \approx V_1$ )

در صورتی که تباین سرعت در مرز دو لایه بسیار کم باشد، تشخیص رسیدن امواج انکساری از بالای این منطقه بسیار دشوار است (شکل ۴-۱۵-ب).



شکل ۴-۱۵: لایه پنهان ناشی از الف) معکوس‌شدگی سرعت. ب) تباین سرعت غیر کافی. ج)

حضور یک لایه نازک. د) فاصله‌بندی نامناسب ژئوفون‌ها.

## ۳- حضور یک لایه کم ضخامت

در مواردی که سرعت با عمق افزایش می‌یابد، اما ضخامت یک لایه از طول موج امواج برخوردی کمتر باشد، آن‌گاه این لایه کم ضخامت بر روی نمودار زمان-فاصله مشخص نشده و پنهان می‌ماند (شکل ۴-۱۵-ج).

## ۴- فاصله‌بندی نامناسب ژئوفون‌ها

در چهارمین حالت، در صورتی که فاصله ژئوفون‌ها خیلی زیاد باشد، بخشی از نمودار زمان-فاصله که به یک لایه نازک مربوط می‌شود، ممکن است نمونه‌برداری نشود (شکل ۴-۱۵-د).

۱۹. یک مدل چهار لایه افقی با لایه‌های نسبتاً ضخیم را در نظر بگیرید. اگر  $V_1 > V_2$  و

$V_1 < V_3 < V_4$  باشد، در صورت انجام برداشت لرزه‌نگاری انکساری کدام گزینه صحیح است؟

الف) می‌توان ضخامت لایه اول و سرعت کلیه لایه‌ها را با دقت تعیین کرد.

ب) می‌توان ضخامت کلیه لایه‌ها بدون لایه دوم و سرعت کلیه لایه‌ها را تخمین زد.

ج) سرعت لایه اول با اطمینان تعیین می‌شود و مدل سرعتی به دست آمده، سه لایه است.

د) سرعت لایه اول با اطمینان تعیین می‌شود و مدل سرعتی به دست آمده، دو لایه است.

پاسخ: همان‌طور که در سوال ۱۸ مطرح شد، در شرایطی که یک لایه کم‌سرعت در زیر یک

لایه پرسرعت قرار گرفته باشد، هیچ انکسار بحرانی در مرز این دو لایه رخ نمی‌دهد و بر روی

نمودار زمان-فاصله نیز خط مربوط به این لایه تشکیل نمی‌شود. در این سوال، سرعت لایه دوم

از لایه اول کمتر است و در نتیجه، موج انکساری عبوری از لایه دوم، به عمود بر فصل مشترک

نزدیک شده و هیچ‌گاه به زاویه  $90^\circ$  درجه نمی‌رسد. اما با توجه به اینکه سرعت در لایه‌های سوم

و چهارم افزایش یافته است، انکسار بحرانی در مرز لایه دوم و سوم و همچنین در مرز لایه سوم

و چهارم رخ می‌دهد. بنابراین، در نمودار به دست آمده، سه خط وجود دارد: خط مربوط به موج

مستقیم عبوری از لایه اول، خط مربوط به موج انکساری عبوری از لایه سوم و خط مربوط به

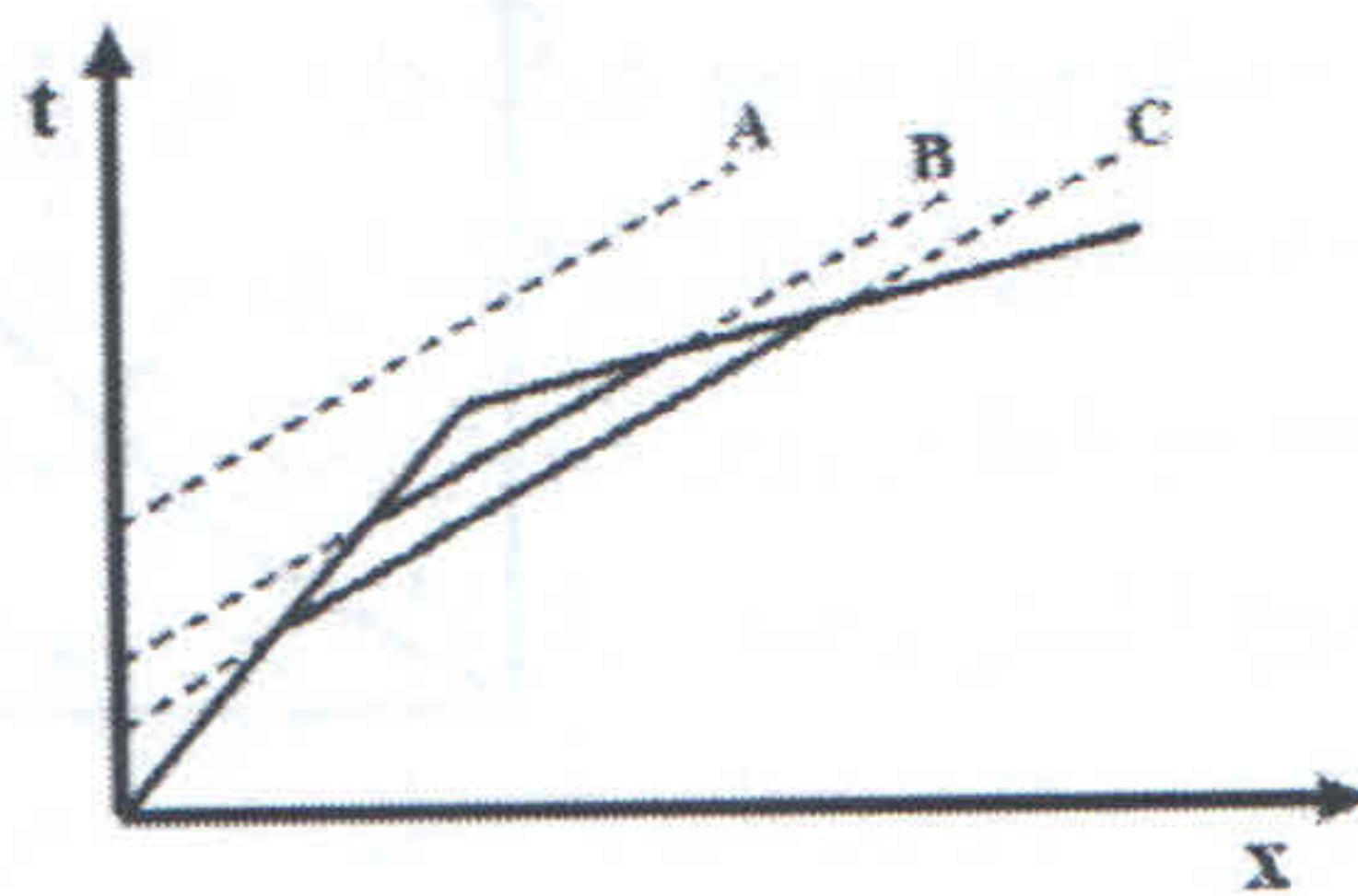
موج انکساری عبوری از لایه چهارم. بنابراین، گزینه (ج) صحیح است.

۲۰. در یک زمین سه لایه که سرعت هر لایه همگن و ایزوتروپ و در کل منطقه ثابت

است، برداشت‌های لرزه‌نگاری انکساری انجام شده است. با فرض ثابت بودن عمق لایه

دوم، در شکل (۴-۱۶) علت ایجاد خطوط A، B و C را از نظر شرایط لایه‌ها مقایسه کنید.

آیا لازم است این سه خط موازی باشند؟



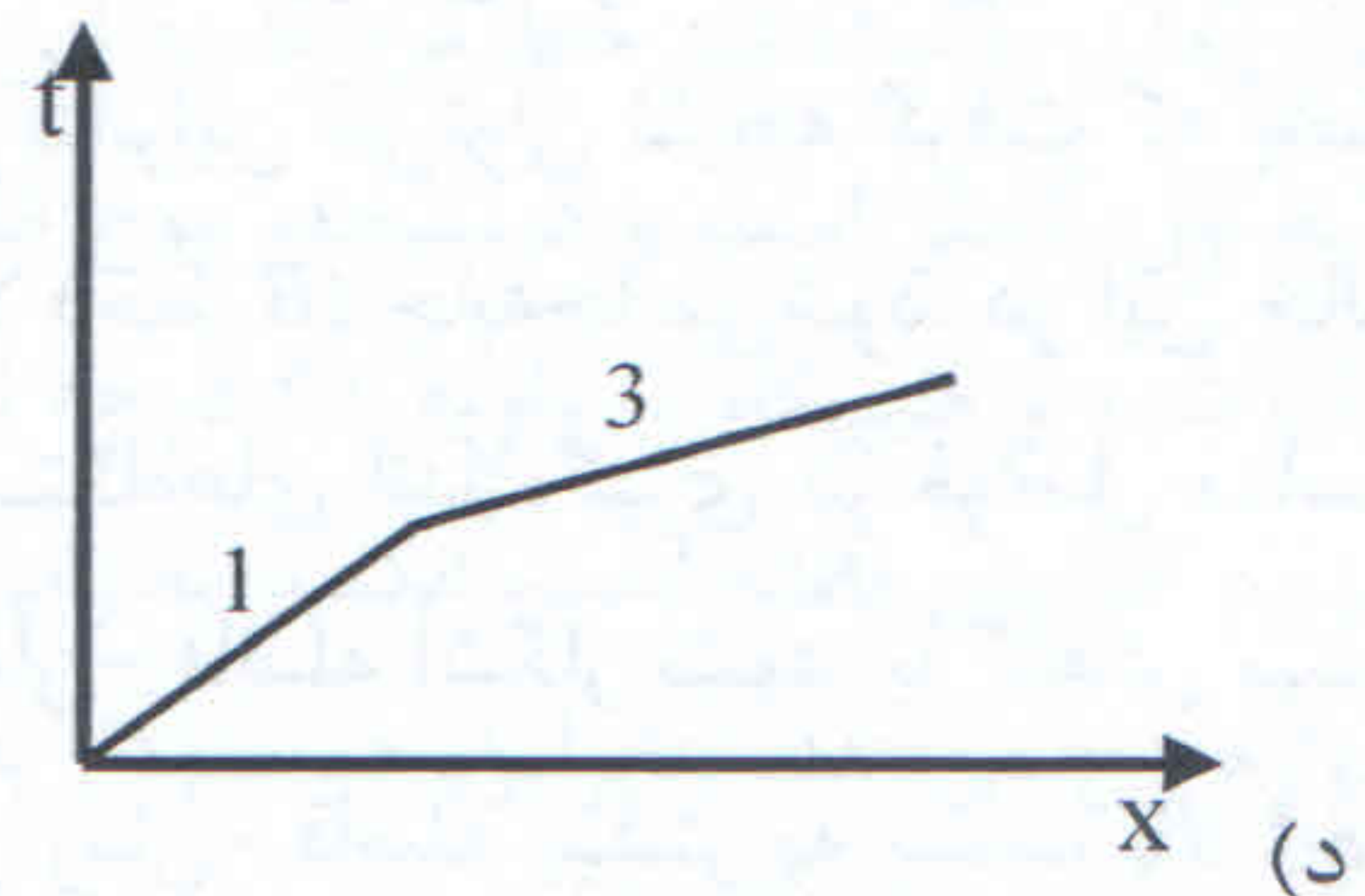
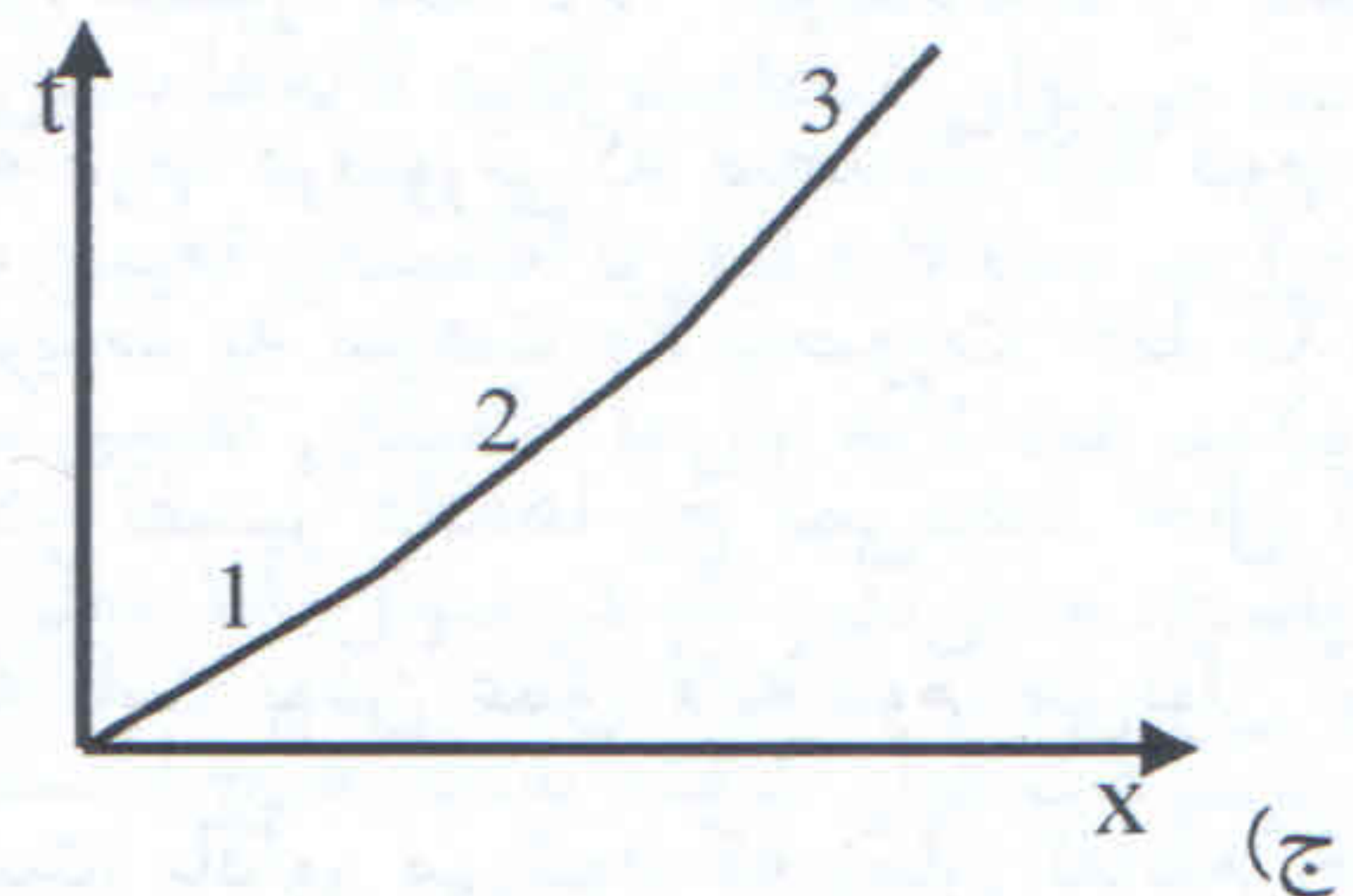
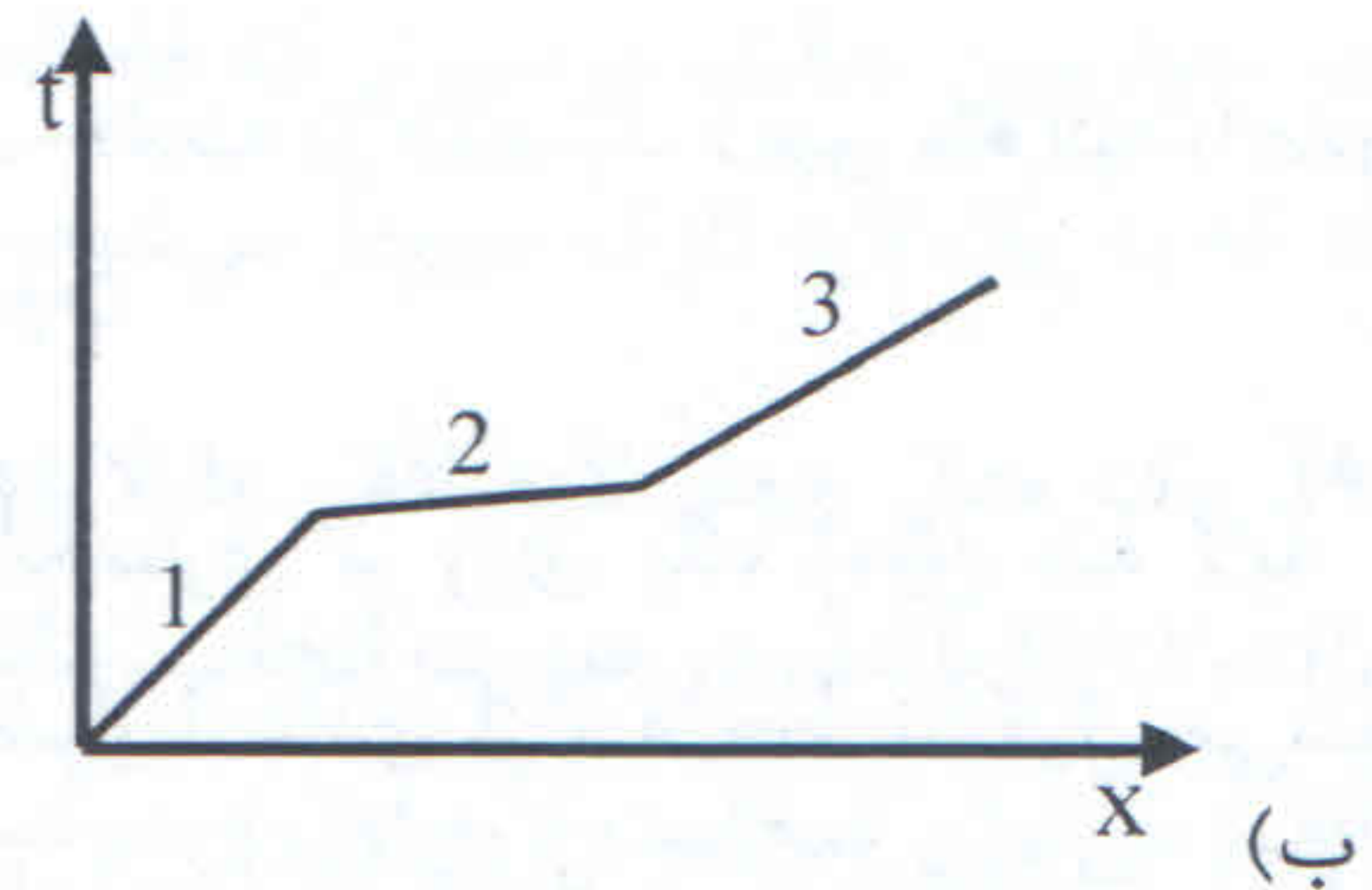
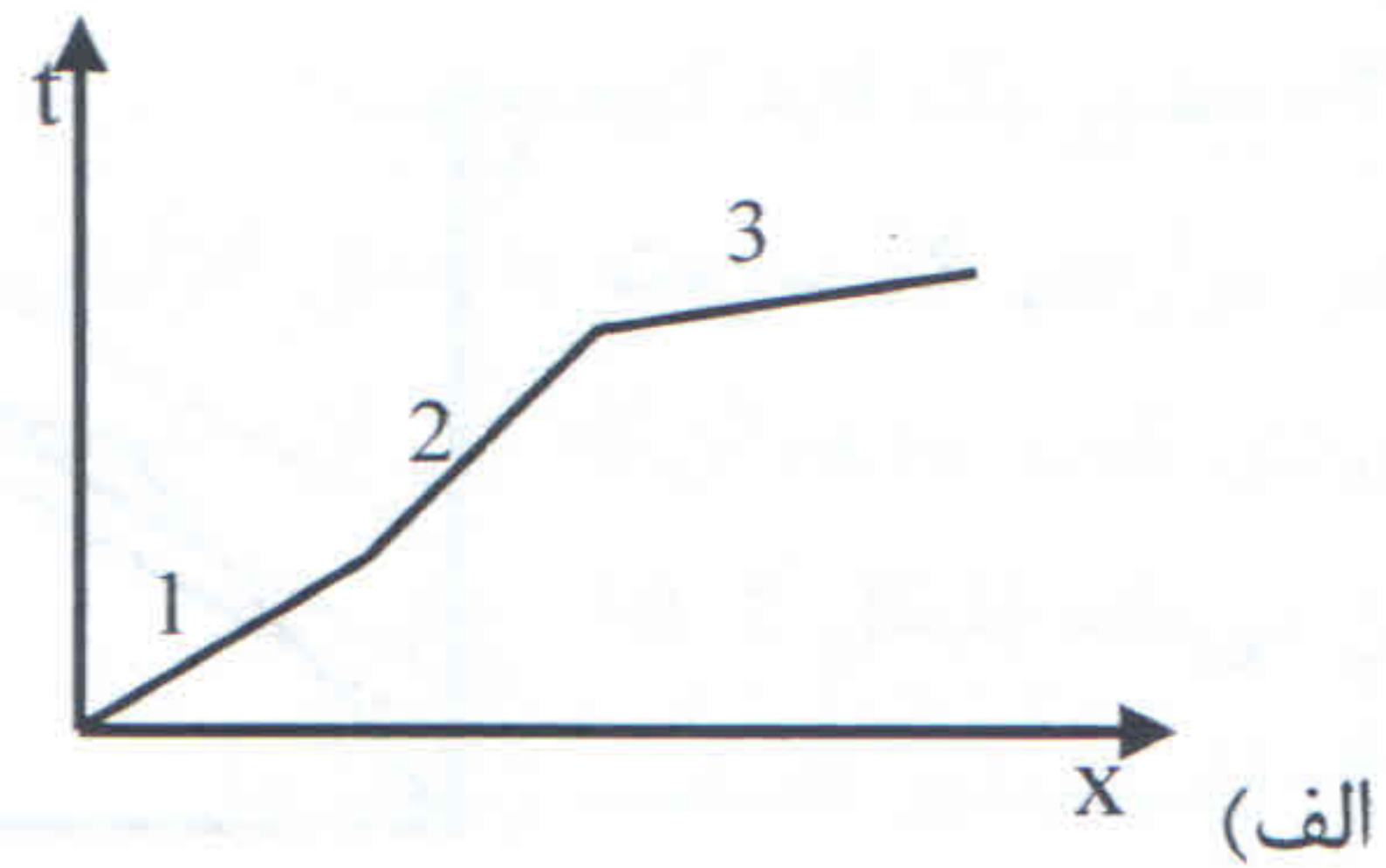
شکل ۴-۱۶: بررسی حالت‌های مختلف نمودار زمان-فاصله بر روی یک زمین سه لایه با عمق ثابت برای لایه دوم.

پاسخ: نمودار حاصل از برداشت‌های لرزه‌نگاری انکساری بر روی یک زمین سه لایه که سرعت لایه‌ها در آن به صورت  $V_1 < V_2 < V_3$  باشد، در شرایط عادی از سه خط تشکیل می‌شود. شکل (۴-۱۶) در حقیقت مشکل لایه پنهان ناشی از حضور یک لایه کم‌ضخامت را نشان می‌دهد. با فرض ثابت بودن سرعت لایه‌ها و عمق لایه دوم، در صورتی که ضخامت لایه دوم در مقایسه با ضخامت لایه اول نسبتاً زیاد باشد، خط مربوط به سرعت  $V_2$  به صورت خط  $C$  در نمودار زمان-فاصله آشکار می‌شود و هیچ مشکلی در تفسیر داده‌ها رخ نمی‌دهد. حال اگر ضخامت لایه دوم کمتر از حالت قبل باشد، با توجه به ثابت بودن عمق لایه دوم، می‌توان این گونه بیان کرد که ضخامت لایه اول افزایش یافته است. یادآور می‌شود که زمان تقاطع خط مربوط به لایه دوم با ضخامت لایه اول متناسب است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که بخش مربوط به لایه دوم در نمودار زمان-فاصله به سمت بالا (خط  $B$ ) جابه‌جا می‌شود. در این حالت همچنان می‌توان تفسیر صحیحی انجام داد اما اگر ایستگاه‌های اندازه‌گیری در فواصل مناسب طراحی نشده باشند ممکن است این لایه در نمودار زمان-فاصله آشکار نشود. با کاهش بیشتر ضخامت لایه دوم، بخش مربوط به لایه دوم در نمودار زمان-فاصله بیشتر به سمت بالا (خط  $A$ ) جابه‌جا شده و هرگز به عنوان اولین رسید موج قابل آشکارسازی نمی‌باشد.

شیب خط مربوط به لایه دوم در نمودار زمان-فاصله برابر است با  $1/V_2$ . با توجه به اینکه سرعت لایه دوم ثابت است، سه خط  $A$ ،  $B$  و  $C$  موازی می‌باشند.

۲۱. اگر در یک زمین سه لایه،  $V_2 < V_1 < V_3$  باشد، نمودار زمان-فاصله اغلب به چه صورت

تشکیل می‌شود؟ (کارشناسی ارشد مهندسی معدن، سال ۱۳۸۳)



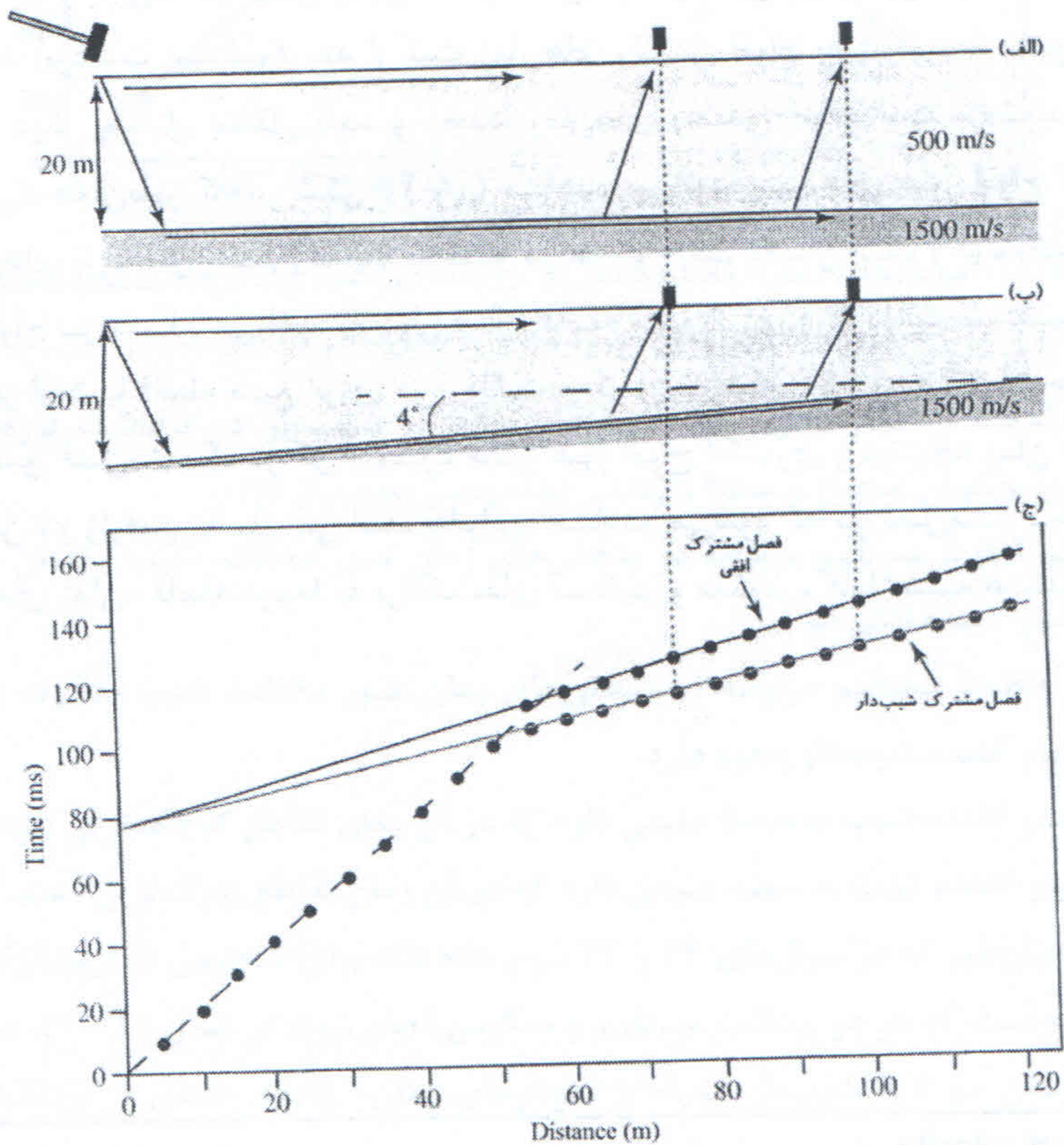
پاسخ: در این سوال، مجدداً با مسئله لایه پنهان مواجه هستیم. با توجه به اینکه سرعت در لایه دوم کمتر از لایه اول است، در نتیجه در مرز لایه اول و دوم انکسار بحرانی رخ نداده و هیچ خطی برای لایه دوم در نمودار زمان-فاصله وجود ندارد. اما در مرز لایه دوم و سوم انکسار بحرانی رخ می‌دهد و بنابراین، گزینه (د) صحیح است.

۲۲. دو مدل زمین دو لایه‌ای با فصل‌مشترک‌های افقی و شیب‌دار را در نظر بگیرید. در صورتی که برداشت‌های لرزه‌نگاری انکساری بر روی این دو زمین انجام شود، نمودارهای زمان-فاصله حاصل، به چه صورتی می‌باشد؟

پاسخ: در شکل (۴-۱۷)، دو مدل زمین لایه‌ای با پارامترهای کاملاً یکسان است در نظر گرفته شده است. تنها تفاوت مدل‌ها این است که فصل‌مشترک دو لایه در شکل (۴-۱۷-الف)



افقی است ولی در شکل (۴-۱۷-ب)، چهار درجه شیب دارد. در شکل (۴-۱۷-ج)، نمودارهای زمان-فاصله حاصل از انجام برداشت‌های لرزه‌نگاری انکساری بر روی این دو زمین نشان داده شده است. هر دو مدل باعث ایجاد دو خط بر روی نمودار زمان-فاصله می‌شوند: خط مربوط به موج مستقیم و خط مربوط به موج انکساری عبوری از لایه دوم. موج انکساری مربوط به فصل مشترک شیب‌دار در زمان کوتاه‌تری به ژئوفون‌های با محل مشابه در حالت فصل مشترک افقی می‌رسد. علت این است که کلیه پرتوهای برگشتی از فصل مشترک افقی به سطح (شکل ۴-۱۷-الف)، مسیر یکسانی دارند که در تمام نقاط از مسیر پرتوهای برگشتی از فصل مشترک شیب‌دار (شکل ۴-۱۷-ب) بیشتر است. با توجه به اینکه در شکل (۴-۱۷-ب)، عمق لایه به سمت راست کاهش می‌یابد، هر موج برگشتی به سطح (با سرعت  $V_1$ ) مسیر کوتاه‌تری را در مقایسه با امواج واقع در سمت چپ خود طی می‌کند. بنابراین، در نمودار زمان-فاصله، فاصله بین خطوط مربوط به موج انکساری از فصل مشترک افقی و شیب‌دار به طرف قسمت کم‌عمق لایه افزایش می‌یابد (شکل ۴-۱۷-ج).



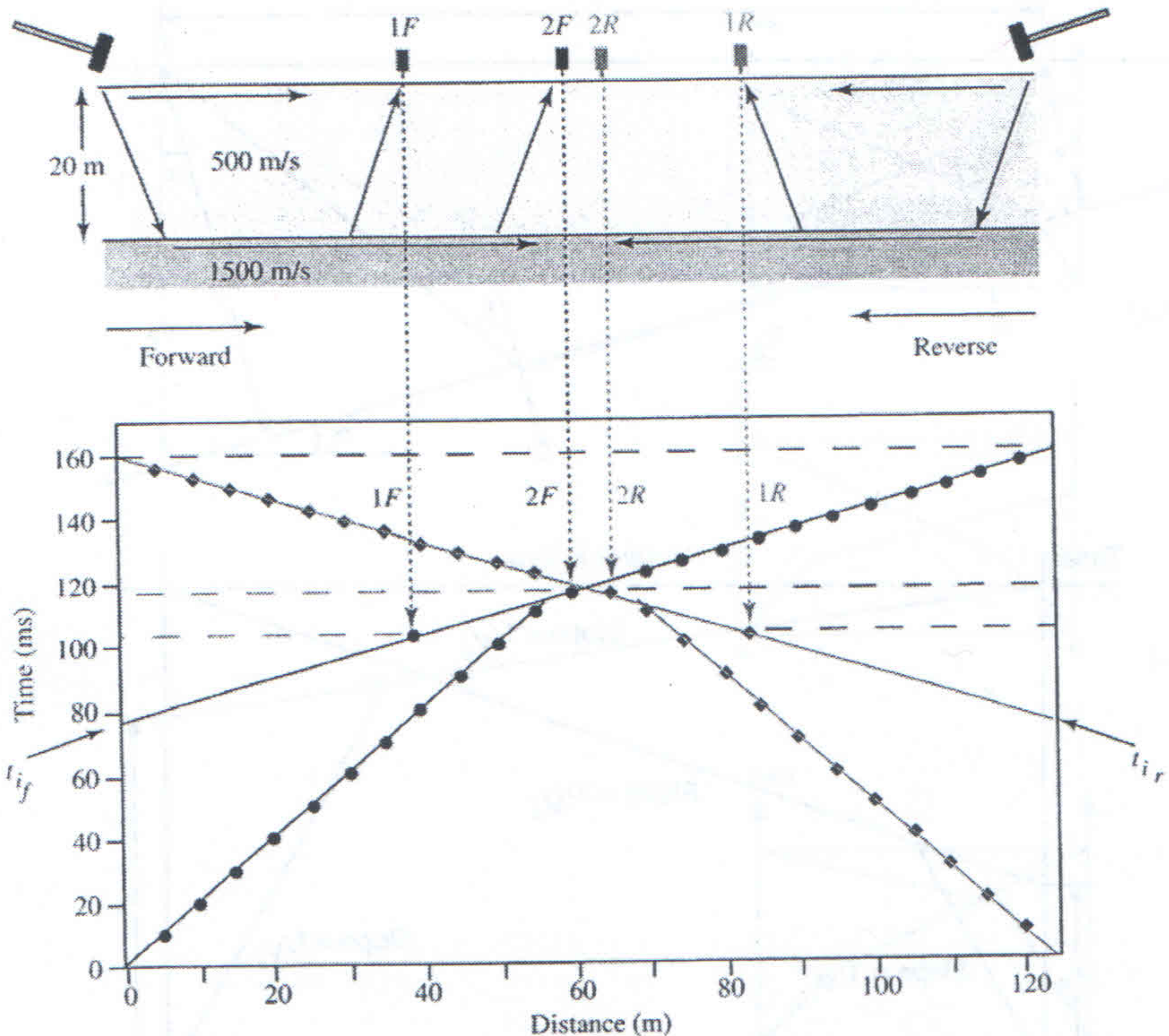
شکل ۴-۱۷: (الف) زمین دو لایه با فصل مشترک افقی. (ب) زمین دو لایه با فصل مشترک شیب‌دار. (ج) نمودار زمان-فاصله حاصل از برداشت‌های لرزه‌نگاری انکساری بر روی این دو زمین.

**نکته:** در این سوال، مدل زیرسطحی معین بود، اما صرفاً با استفاده از این قبیل نمودارهای زمان-فاصله، هیچ راهی برای تشخیص وجود فصل مشترک‌های افقی یا شیب‌دار وجود ندارد. البته در شکل (۴-۱۷)، یک نکته بسیار مهم قابل درک است. همان‌طور که در سوال ۱۷ ثابت شد، شیب خط مربوط به فصل مشترک افقی، برابر است با  $I/V_2$ . با توجه به اینکه شیب خط مربوط به فصل مشترک شیب‌دار کمتر است، بنابراین، با استفاده از آن، مقدار سرعت بیشتری برای لایه دوم به دست می‌آید. این سرعت، سرعت ظاهری<sup>۱</sup> نامیده می‌شود. در اینجا این سوال پیش می‌آید که "اگر محل منبع مولد موج به سمت راست منتقل شود، شکل نمودار زمان-فاصله به چه صورتی درمی‌آید؟" این موضوع در سوال‌های بعدی به تفصیل مورد بررسی قرار گرفته است.

۲۳. نمودارهای زمان-فاصله حاصل از لرزه‌نگاری انکساری با برداشت‌های مستقیم<sup>۲</sup> و معکوس<sup>۳</sup> بر روی یک زمین دو لایه با فصل مشترک افقی به چه صورتی می‌باشد؟

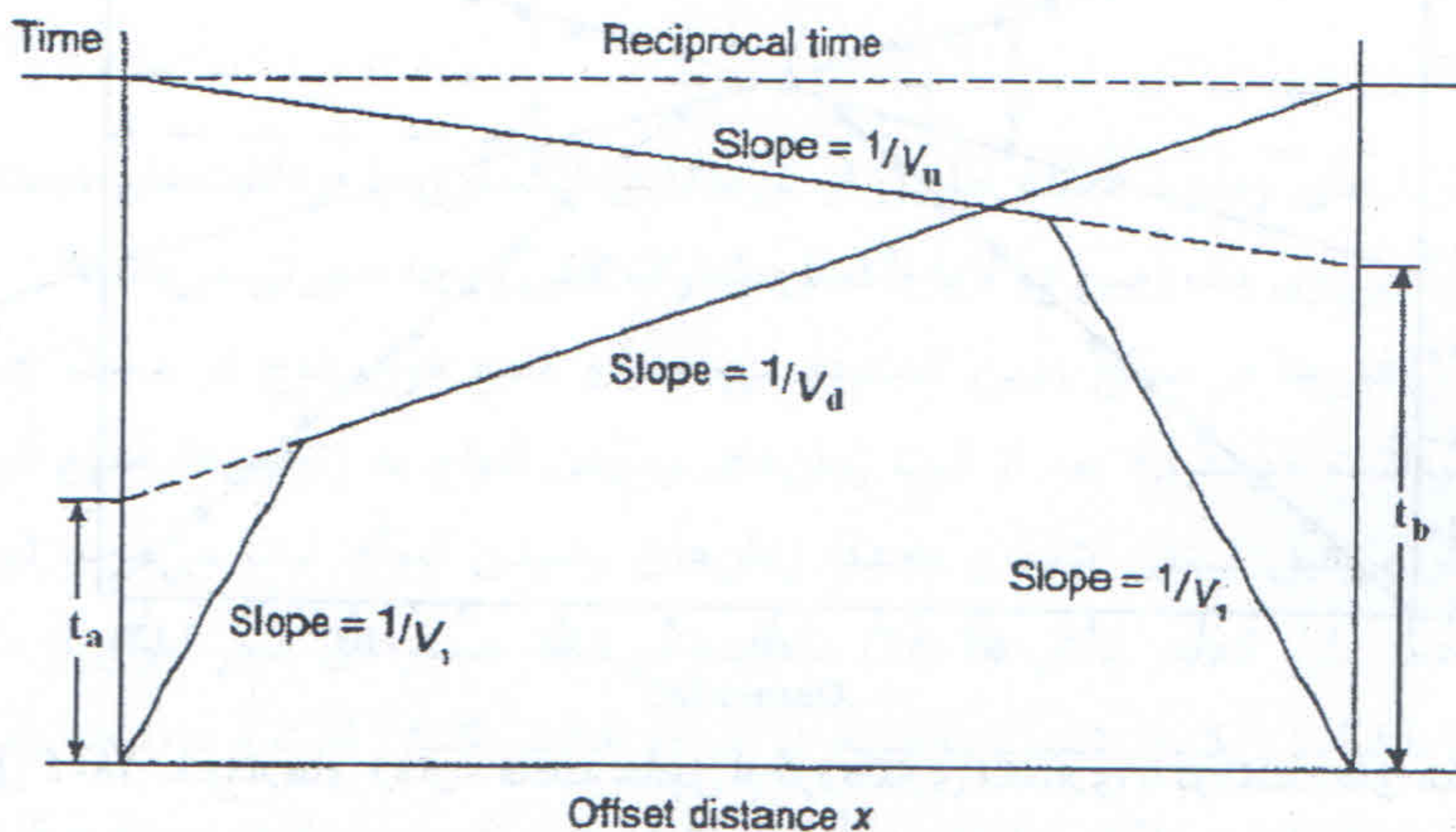
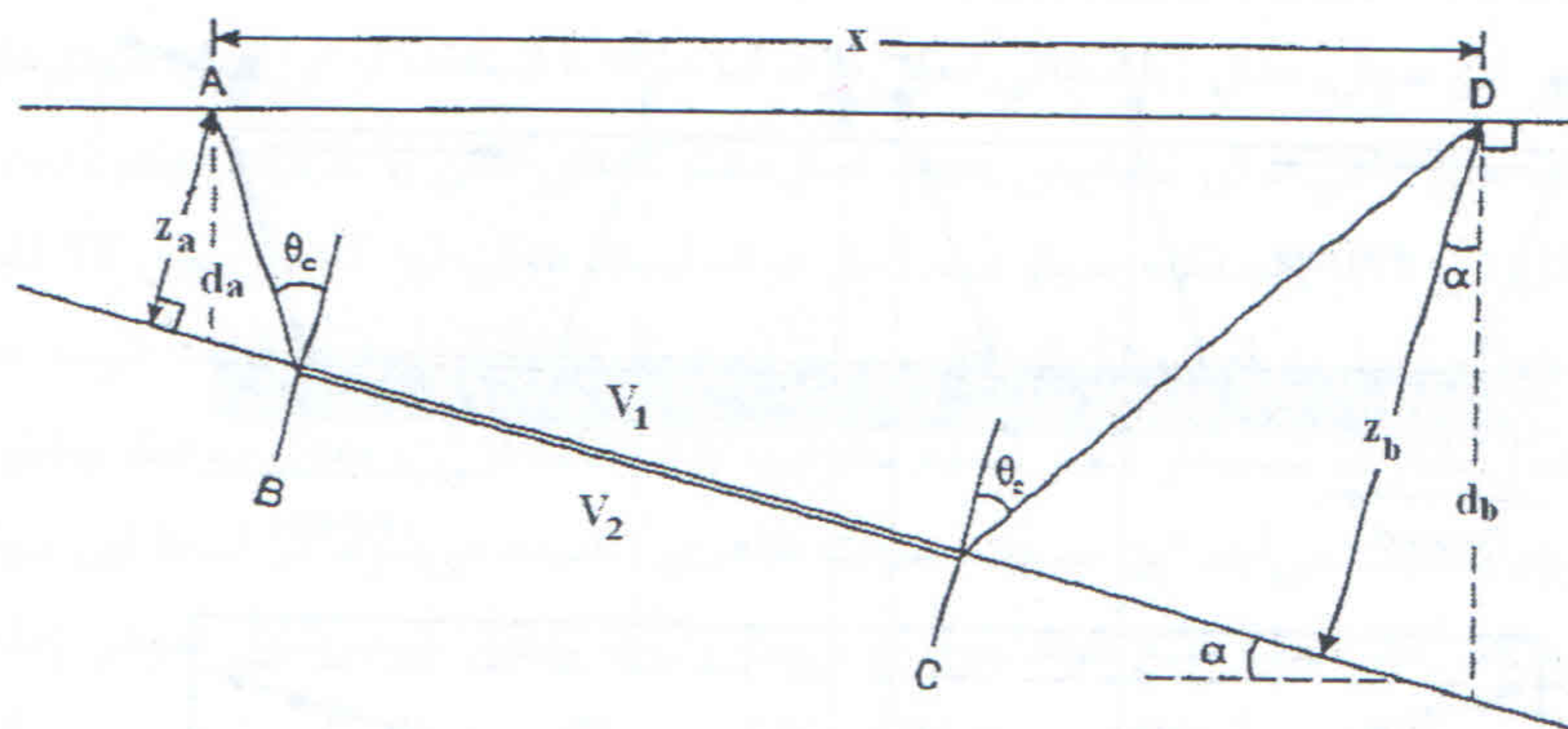
پاسخ: ژئوفون‌ها در سطح زمین گسترده می‌شوند و منبع مولد موج در سمت چپ قرار می‌گیرد (برداشت مستقیم). بعد از ثبت زمان‌های رسیدن امواج به ژئوفون‌ها، منبع انرژی به انتهای دیگر پروفیل منتقل شده و مجدداً زمان‌های رسیدن امواج ثبت می‌شوند (برداشت معکوس). همان‌طور که در شکل (۴-۱۸) مشاهده می‌شود، مسیرهای عبور امواج از منبع به ژئوفون‌های با فواصل یکسان نسبت به منبع در هر دو حالت یکسان است و در نتیجه زمان‌های سیر امواج نیز یکسان می‌باشد. به‌عنوان مثال، فاصله منبع انرژی در برداشت مستقیم تا ژئوفون  $IF$  برابر است با فاصله منبع انرژی در برداشت معکوس تا ژئوفون  $IR$  ( $40m$ ). با توجه به ثابت بودن عمق فصل مشترک در کل پروفیل، مسیر عبور امواج انکساری و در نتیجه زمان عبور آن‌ها برای این دو ژئوفون یکسان می‌باشد. بنابراین، مشاهده می‌شود که در فصل مشترک‌های افقی، نمودارهای زمان-فاصله مربوط به برداشت‌های مستقیم و معکوس، کاملاً شبیه هستند.

1- Apparent velocity  
2- Forward traverse  
3- Reverse traverse



شکل ۴-۱۸: نمودارهای زمان-فاصله حاصل از لرزه‌نگاری انکساری با برداشت‌های مستقیم و معکوس بر روی یک زمین دو لایه با فصل مشترک افقی.

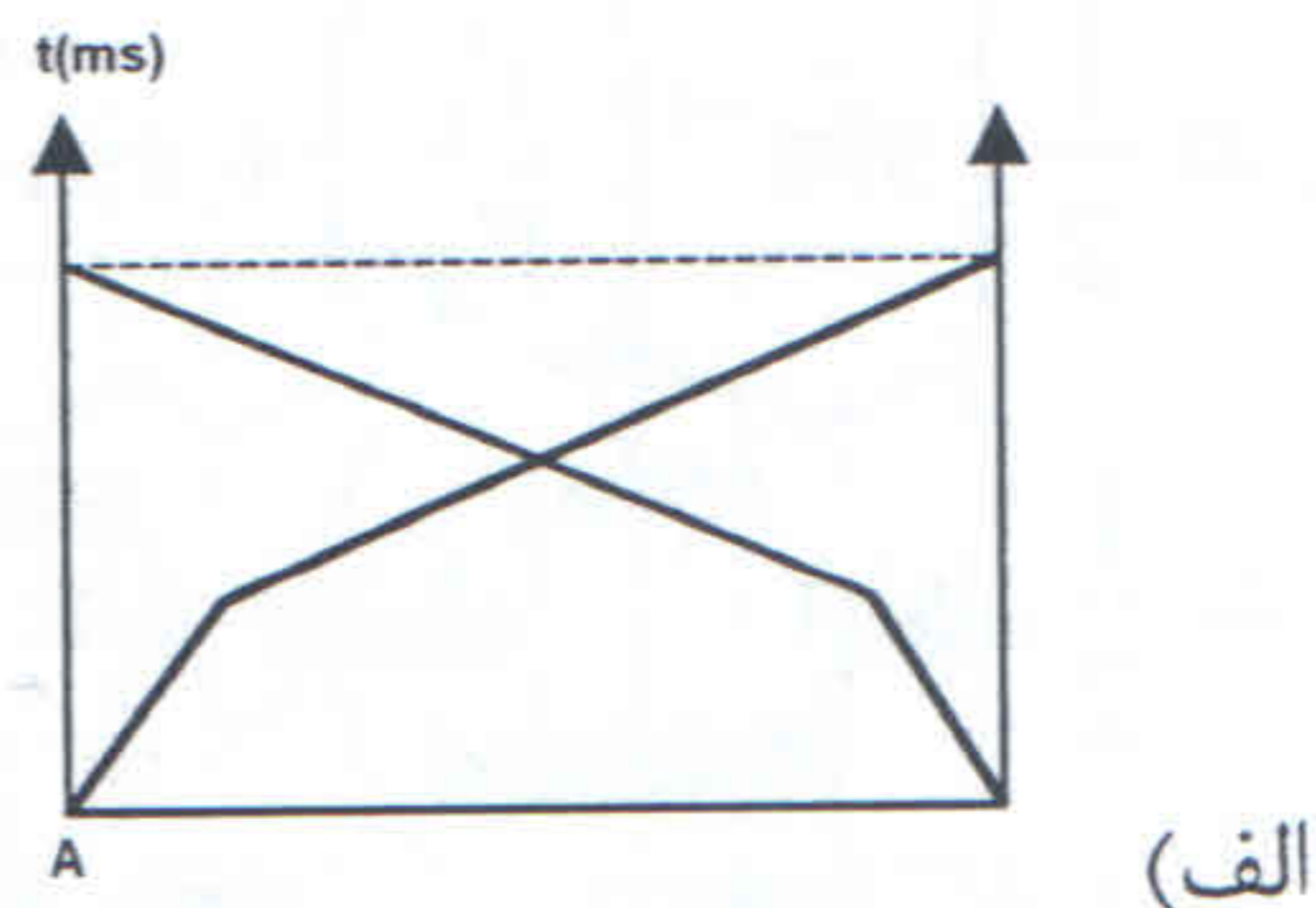
۲۴. کدامیک از عبارات زیر در مورد فصل مشترک شیب‌دار در برداشت لرزه‌نگاری انکساری معکوس صحیح نیست؟ (کارشناسی ارشد مهندسی معدن، سال ۱۳۸۶)
- الف) اگر خطوط مستقیم مربوطه در منحنی‌های زمان عبور مخالف، شیب یکسان داشته باشند، منکسر کننده افقی است.
- ب) اگر خطوط مستقیم مربوطه در منحنی‌های زمان عبور مخالف، شیب متفاوت داشته باشند، منکسر کننده شیب‌دار وجود دارد.
- ج) منکسر کننده شیب به سمت منبعی دارد که در آن زمان تقاطع کوچک‌ترین است.
- د) منکسر کننده شیب به سمت منبعی دارد که در آن زمان تقاطع بزرگ‌ترین است.
- پاسخ: همان‌طور که در سوال‌های ۲۲ و ۲۳ شرح داده شد، برای تشخیص فصل مشترک‌های شیب‌دار لازم است که هر دو برداشت مستقیم و معکوس انجام شود. در شکل (۴-۱۹)، هندسه مربوط به زمین دو لایه شیب‌دار همراه با نمودارهای زمان-فاصله حاصل از برداشت‌های مستقیم و معکوس نشان داده شده است.



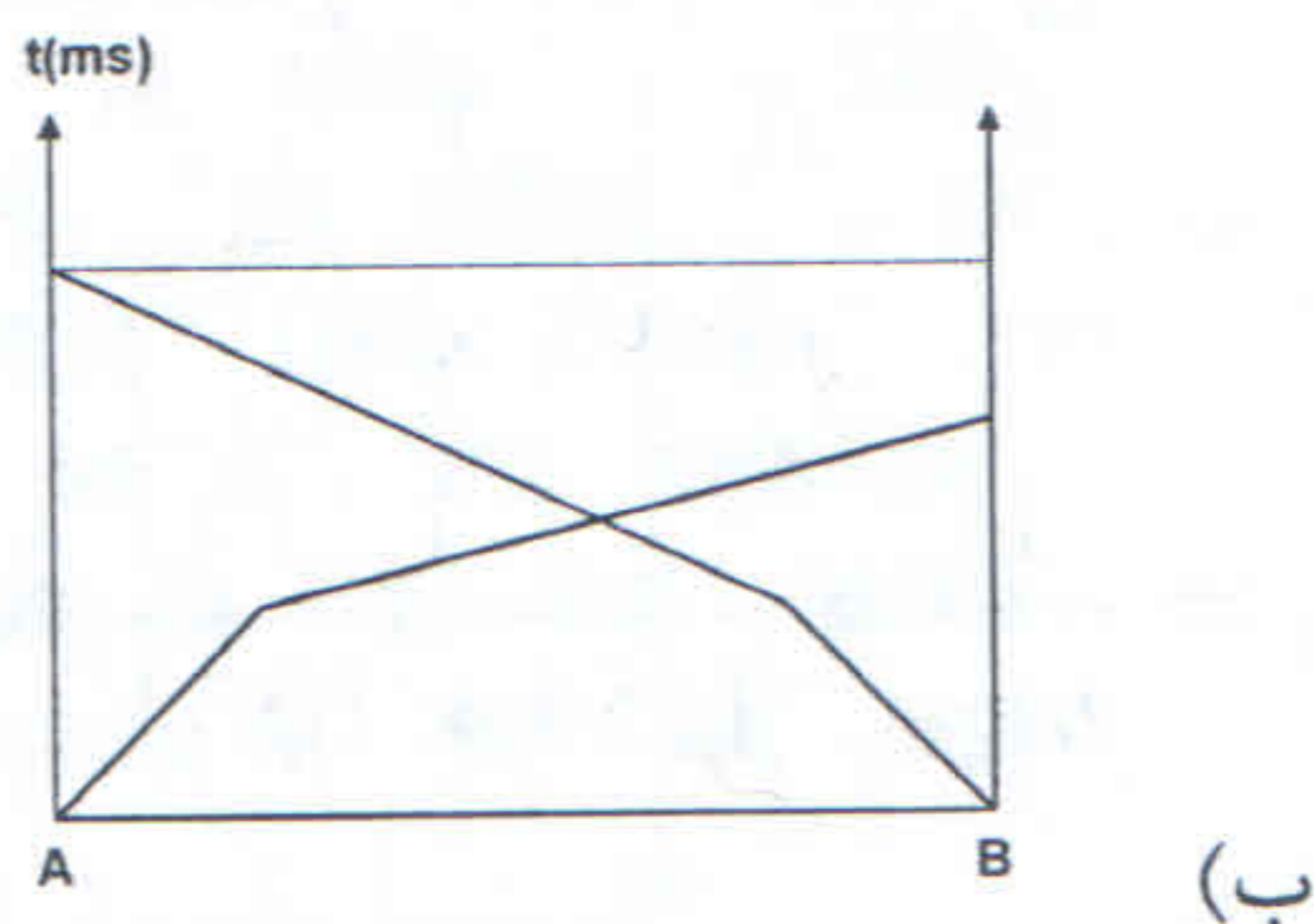
شکل ۴-۱۹: هندسه مربوط به زمین دو لایه شیبدار همراه با نمودار زمان-فاصله آن.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، در صورتی که فصل مشترک شیبدار باشد، در نمودارهای زمان-فاصله حاصل از برداشت‌های مستقیم و معکوس، خطوط مربوط به موج انکساری عبوری از لایه دوم، شیب متفاوتی دارند. همچنین، در فصل مشترک‌های شیبدار، زمان‌های تقاطع خطوط مربوطه در برداشت مستقیم و معکوس متفاوت است. در این حالت، قسمت کم‌عمق‌تر لایه در سمتی قرار دارد که زمان تقاطع کوچک‌تری به دست آمده و فصل مشترک انکساری به سمتی شیب دارد که زمان تقاطع بزرگ‌تر است. بنابراین، گزینه (ج) پاسخ این سوال است.

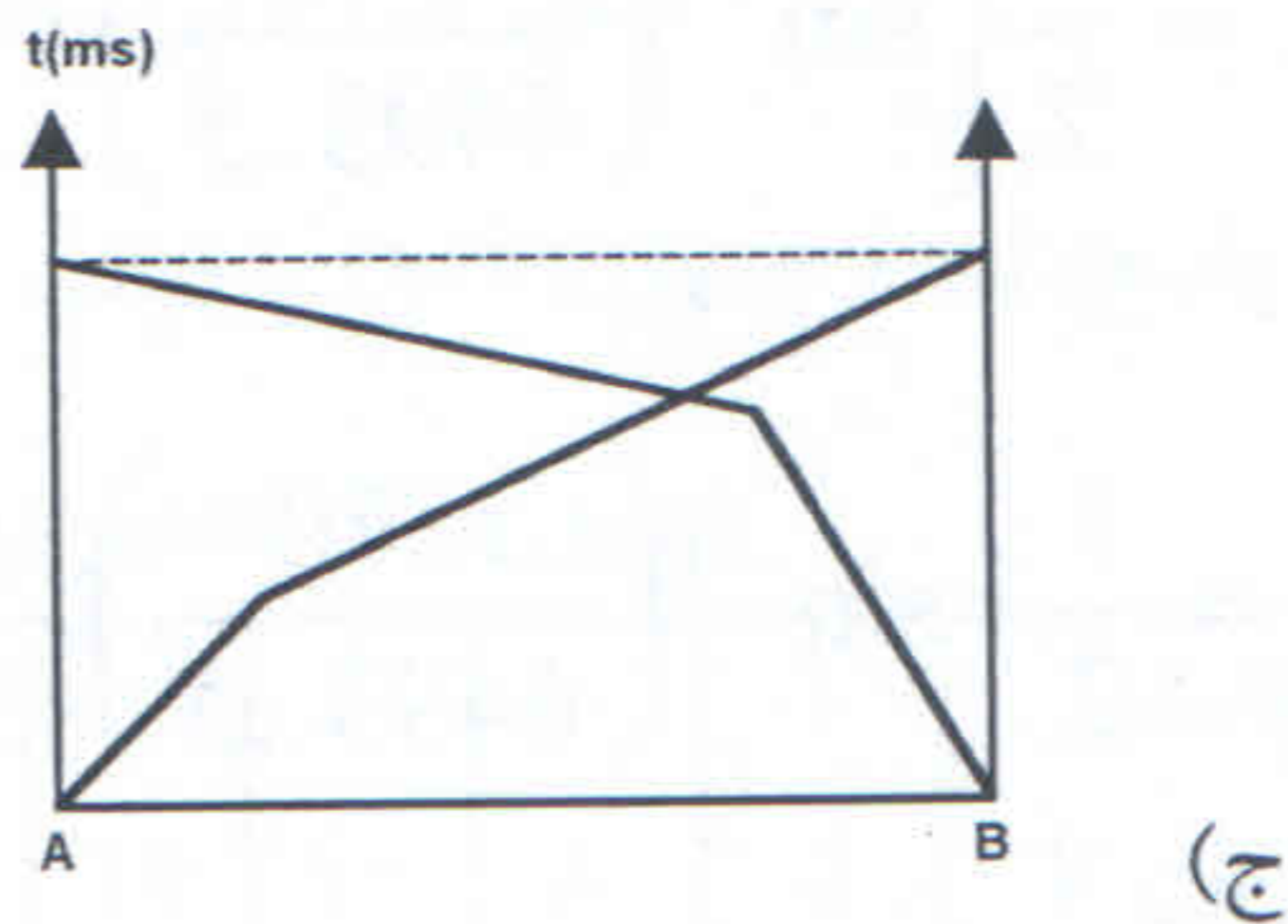
۲۵. شکل‌های زیر، نمودارهای زمان-فاصله مربوط به برداشت‌های انکساری مستقیم و معکوس در شرایط مختلف زمین‌شناسی است. کدام نمودار نمی‌تواند صحیح باشد؟



(الف)



(ب)



(ج)

پاسخ: در برداشت‌های مستقیم و معکوس توجه به این نکته مهم است که کل زمان سیر موج در دو حالت باید برابر باشد. در این سوال به راحتی می‌توان تشخیص داد که برابری زمان‌های کل سیر موج در گزینه‌های (الف) و (ج) صدق می‌کند، در حالی که این نکته در شکل مربوط به گزینه (ب) مشاهده نمی‌شود و بنابراین نمودار (ب) نمودار صحیحی نیست.

۲۶. در یک برداشت لرزه‌ای انکساری برای یک زمین دو لایه‌ای شیب‌دار داده‌های زیر به دست آمده است. زاویه برخورد بحرانی موج به فصل مشترک  $(\theta_c)$  و شیب فصل مشترک  $(\alpha)$  چقدر است؟ (کارشناسی ارشد مهندسی معدن، سال ۱۳۸۳)

$$V_1 = 1570 \text{ m/s}; m_u = 1.67 \times 10^{-4} \text{ s/m}; m_d = 1.54 \times 10^{-4} \text{ s/m};$$

$$T_{iu} = 0.05 \text{ s}; T_{id} = 0.046 \text{ s}$$

$$\text{(ب) } \alpha = 6 \text{ و } i_c = 14.6$$

$$\text{(الف) } \alpha = 14.6 \text{ و } i_c = 0.6$$

$$\text{(د) } \alpha = 1.2 \text{ و } i_c = 29.2$$

$$\text{(ج) } \alpha = 0.6 \text{ و } i_c = 14.6$$

پاسخ: برای یک فصل مشترک شیب‌دار در زمین دو لایه، مقادیر زاویه برخورد بحرانی موج به فصل مشترک  $(\theta_c)$  و شیب فصل مشترک  $(\alpha)$  با استفاده از روابط زیر محاسبه می‌شوند:

$$\theta_c = \frac{1}{2} \left\{ \sin^{-1} \left( \frac{V_1}{V_d} \right) + \sin^{-1} \left( \frac{V_1}{V_u} \right) \right\}$$

$$\alpha = \frac{1}{2} \left\{ \sin^{-1} \left( \frac{V_1}{V_d} \right) - \sin^{-1} \left( \frac{V_1}{V_u} \right) \right\}$$

ابتدا با استفاده از شیب خطوط که در مسئله داده شده، مقادیر سرعت به دست می‌آید:

$$V_u = \frac{1}{m_u} = \frac{1}{1.67 \times 10^{-4}} = 5988 \text{ m/s}$$

$$V_d = \frac{1}{m_d} = \frac{1}{1.54 \times 10^{-4}} = 6493.5 \text{ m/s}$$

بنابراین، مقدار زاویه برخورد بحرانی موج به فصل مشترک برابر است با:

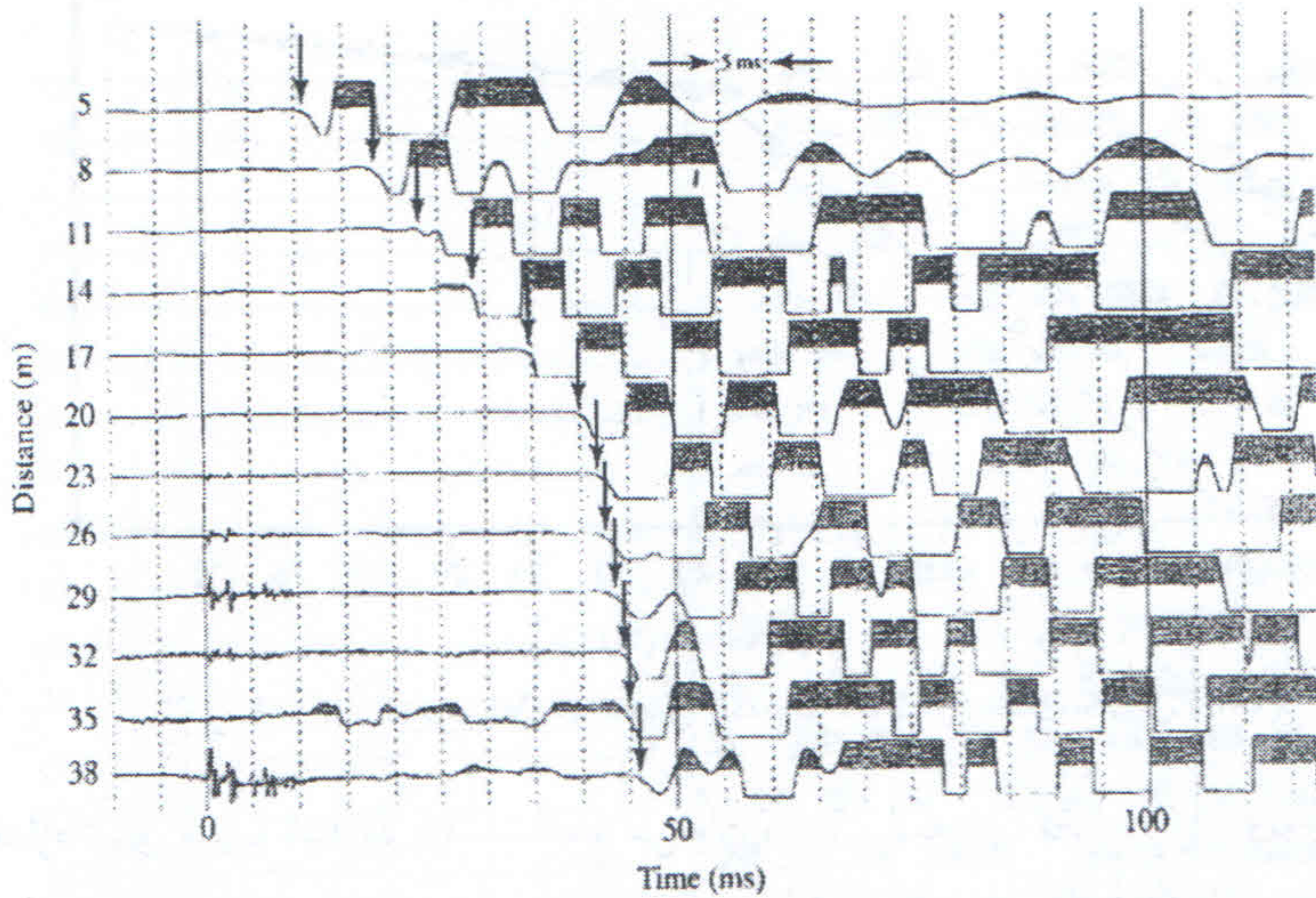
$$\theta_c = \frac{1}{2} \left\{ \sin^{-1} \left( \frac{1570}{6493.5} \right) + \sin^{-1} \left( \frac{1570}{5988} \right) \right\} = 14.6^\circ$$

و شیب فصل مشترک برابر است با:

$$\alpha = \frac{1}{2} \left\{ \sin^{-1} \left( \frac{1570}{6493.5} \right) - \sin^{-1} \left( \frac{1570}{5988} \right) \right\} = 0.6^\circ$$

بنابراین، گزینه (ج) صحیح است.

۲۷. یک لرزه‌نگاشت صحرایی مربوط به یک محیط دو لایه به صورت شکل (۴-۲۰) به دست آمده است. با تفسیر زمان‌های ورود اولین موج به هر ژئوفون (که توسط فلش‌هایی در شکل نشان داده شده است)، پارامترهای مدل زیرزمینی را به دست آورید.



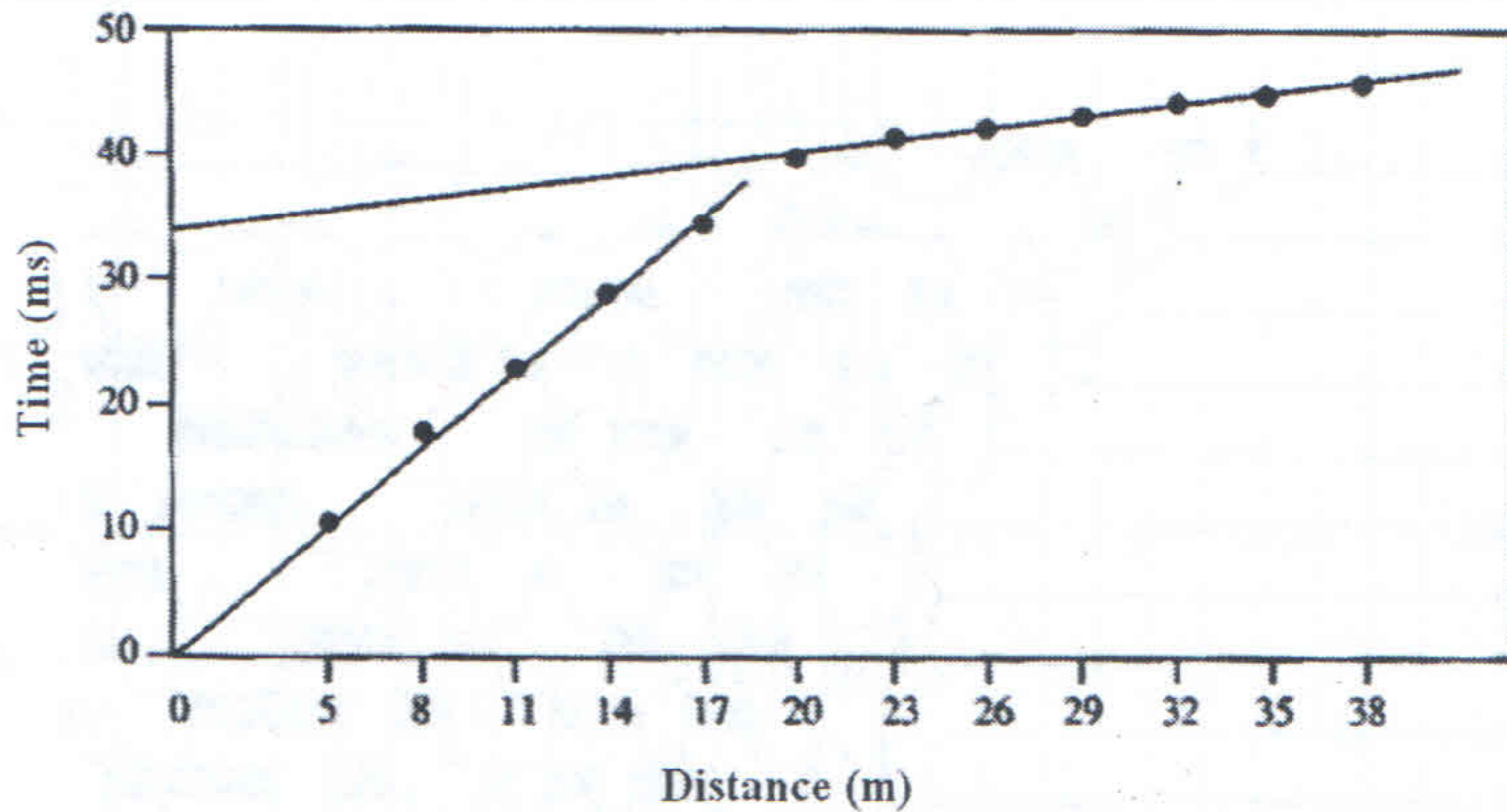
شکل ۴-۲۰: لرزه‌نگاشت صحرائی مربوط به یک محیط دو لایه.

پاسخ: ابتدا جدول (۴-۱) با قرائت اولین زمان ورود امواج به هر ژئوفون تهیه می‌شود.

جدول ۴-۱: مقادیر زمان - فاصله قرائت شده از روی لرزه‌نگاشت.

فاصله ژئوفون تا منبع (متر)	۵	۸	۱۱	۱۴	۱۷	۲۰	۲۳	۲۶	۲۹	۳۲	۳۵	۳۸
زمان (میلی- ثانیه)	۱۱	۱۸	۲۳	۲۹	۳۴/۵	۴۰	۴۲	۴۲/۵	۴۳/۵	۴۴/۵	۴۵	۴۶

سپس، نمودار زمان - فاصله داده‌ها رسم می‌شود. برای قرائت دقیق شیب و محل تقاطع نمودار باید از کاغذ مناسب و بزرگ استفاده شود. در مرحله بعد باید نقاط داده را تفسیر کرد. در شکل (۴-۲۱) که نمودار زمان - فاصله داده‌ها را نشان می‌دهد، پنج نقطه اول با تقریب بسیار خوب بر روی یک خط مستقیم قرار دارند. در صورتی که منبع انرژی در سطح قرار داشته باشد، خط مربوط به موج مستقیم از مبدا می‌گذرد که در این شکل نیز صادق است. هفت نقطه آخر نیز بر روی خط مستقیم دیگری قرار می‌گیرند.



شکل ۴-۲۱: بهترین خطوط تطبیق یافته بر نقاط داده‌های جدول (۴-۱).

با اندازه‌گیری شیب خطوط به دست آمده می‌توان سرعت لایه‌ها را تخمین زد. با توجه به اینکه محور زمان بر حسب  $ms$  مدرج شده است، برای به دست آوردن مقدار سرعت هر لایه، عکس شیب خط مربوط به آن لایه در  $1000$  ضرب شده است تا سرعت بر حسب  $m/s$  محاسبه شود:

$$V_1 = \frac{1}{m_1} \times 10^3 = 480 \text{ m/s}$$

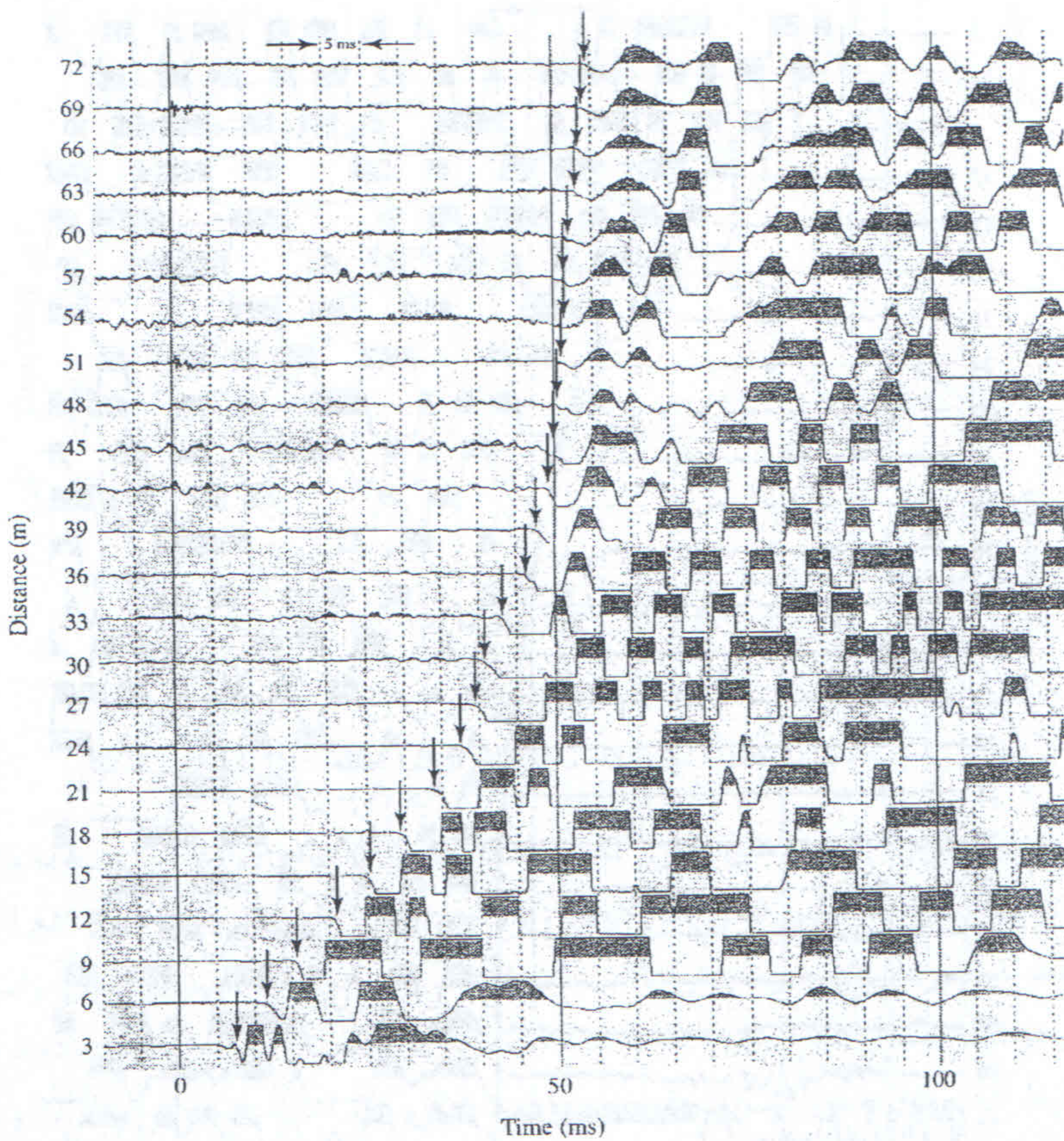
$$V_2 = \frac{1}{m_2} \times 10^3 = 3380 \text{ m/s}$$

با قرائت زمان تقاطع از روی محور عمودی ( $34.5ms$ ) می‌توان عمق لایه انکساری را نیز تخمین زد:

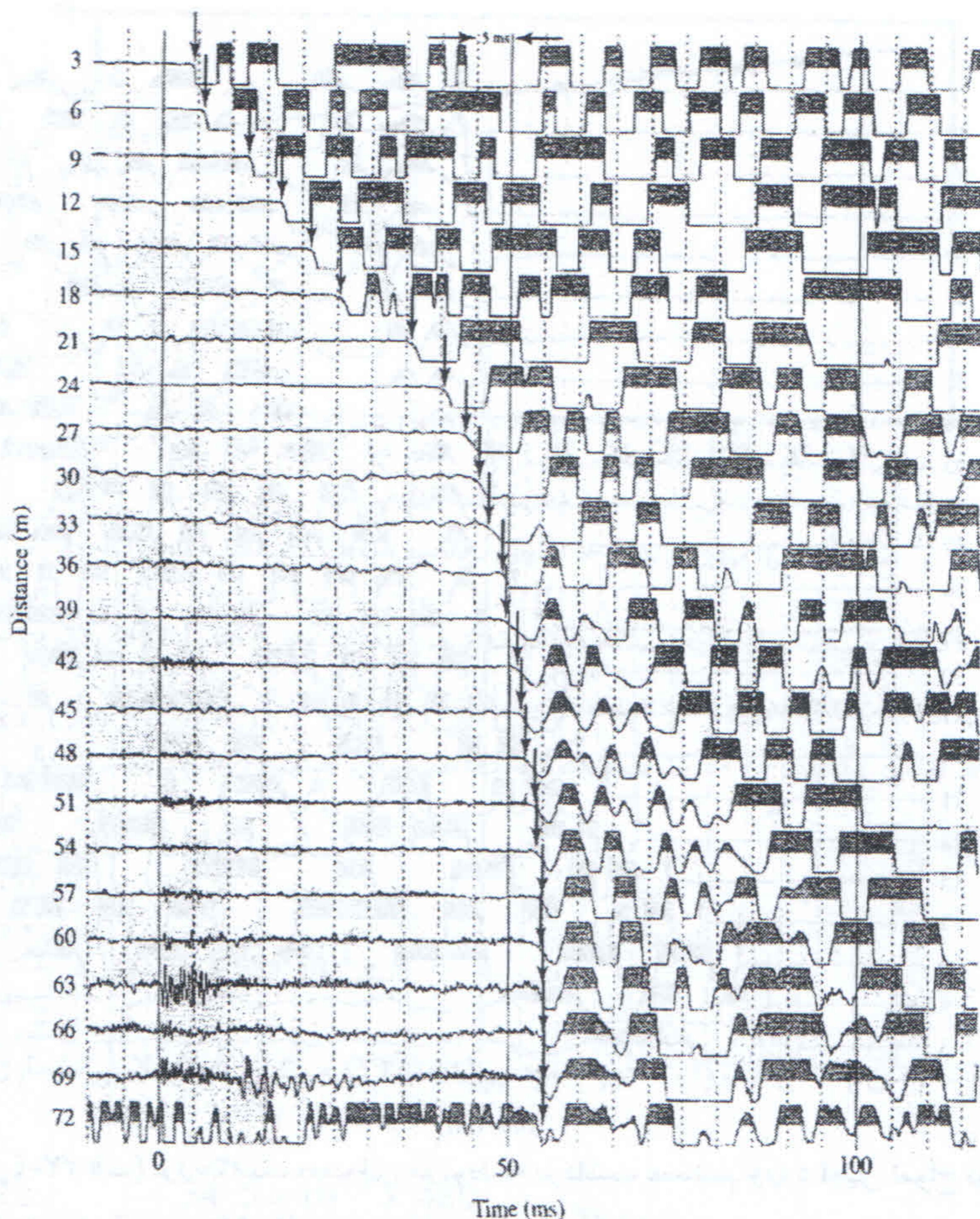
$$t_0 = \frac{2z}{V_1} \Rightarrow z = \frac{34.5 \times 10^{-3} \times 480}{2} = 8.28 \text{ m}$$

۲۸. در شکل (۴-۲۲)، دو لرزه‌نگاشت صحرائی مربوط به برداشت‌های مستقیم و معکوس بر روی یک منطقه نشان داده شده است. پارامترهای مدل زیرزمینی را به دست آورید.



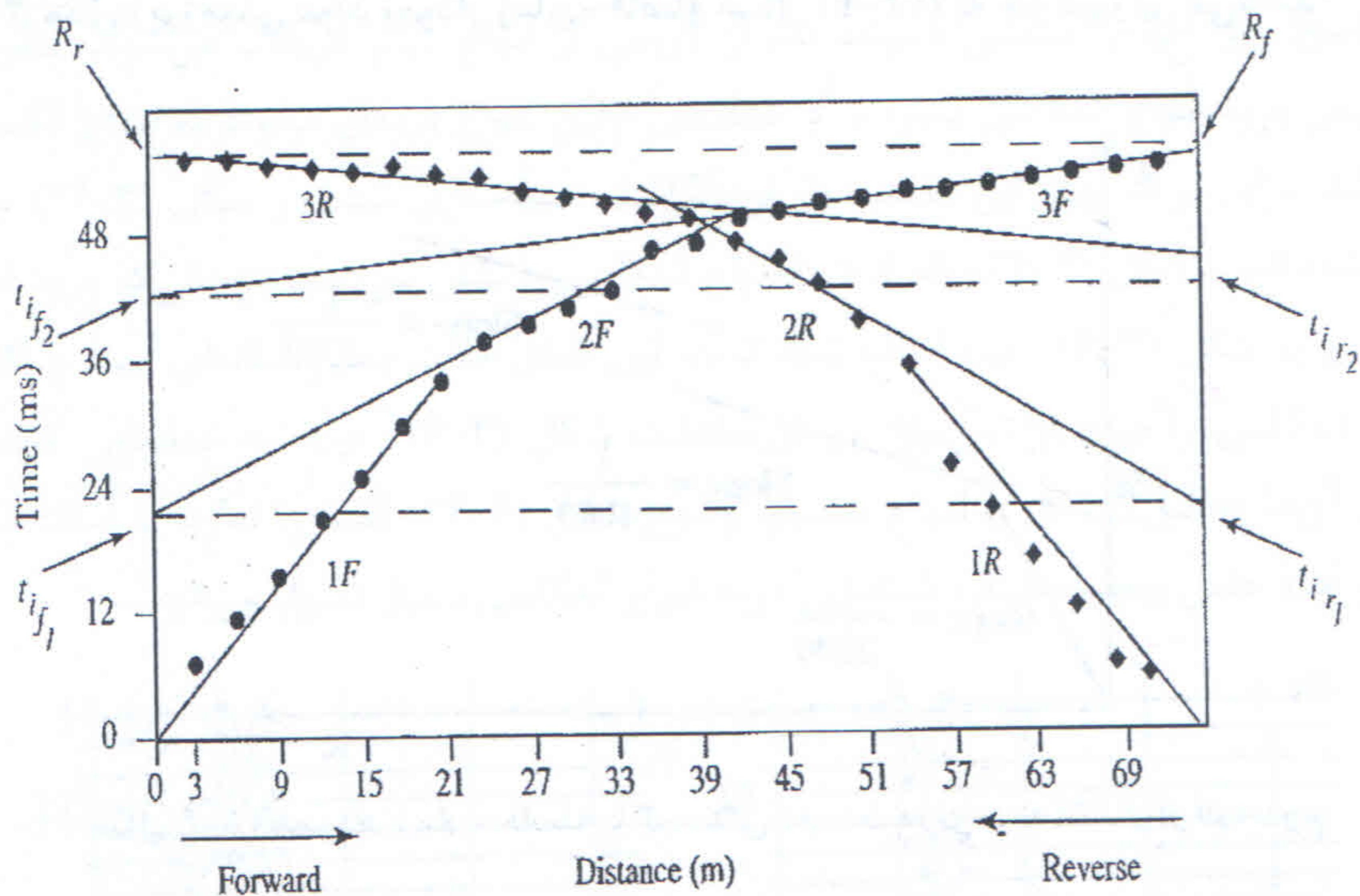


شکل ۴-۲۲: الف) لرزه‌نگاشت صحرایی مربوط به برداشت مستقیم. ورود اولین امواج توسط فلش‌های رو به پایین نشان داده شده است.



شکل ۴-۲۲: ب) لرزه‌نگاشت صحرایی مربوط به برداشت معکوس. ورود اولین امواج توسط فلش‌های رو به پایین نشان داده شده است.

پاسخ: در شکل (۴-۲۳)، نمودار زمان-فاصله برای اولین زمان‌های ورود امواج، تهیه شده است. در صورتی که لایه اول همگن باشد، شیب خطوط  $IR$  و  $IF$  برابر می‌باشد. در این شکل، شیب دو خط مذکور کمی اختلاف دارد که منجر به تفاوت بسیار ناچیز در مقادیر سرعت محاسبه شده، می‌شود. با این حال اگر در یک پروژه، تاثیر این عدم قطعیت در تفسیر ضخامت لایه حائز اهمیت باشد، یک راه حل گستردن تعدادی ژئوفون به فاصله کم در ابتدا و انتهای خط برداشت و ثبت تعداد بیشتری امواج مستقیم می‌باشد و در نتیجه می‌توان مقادیر سرعت را با دقت بیشتری تخمین زد.

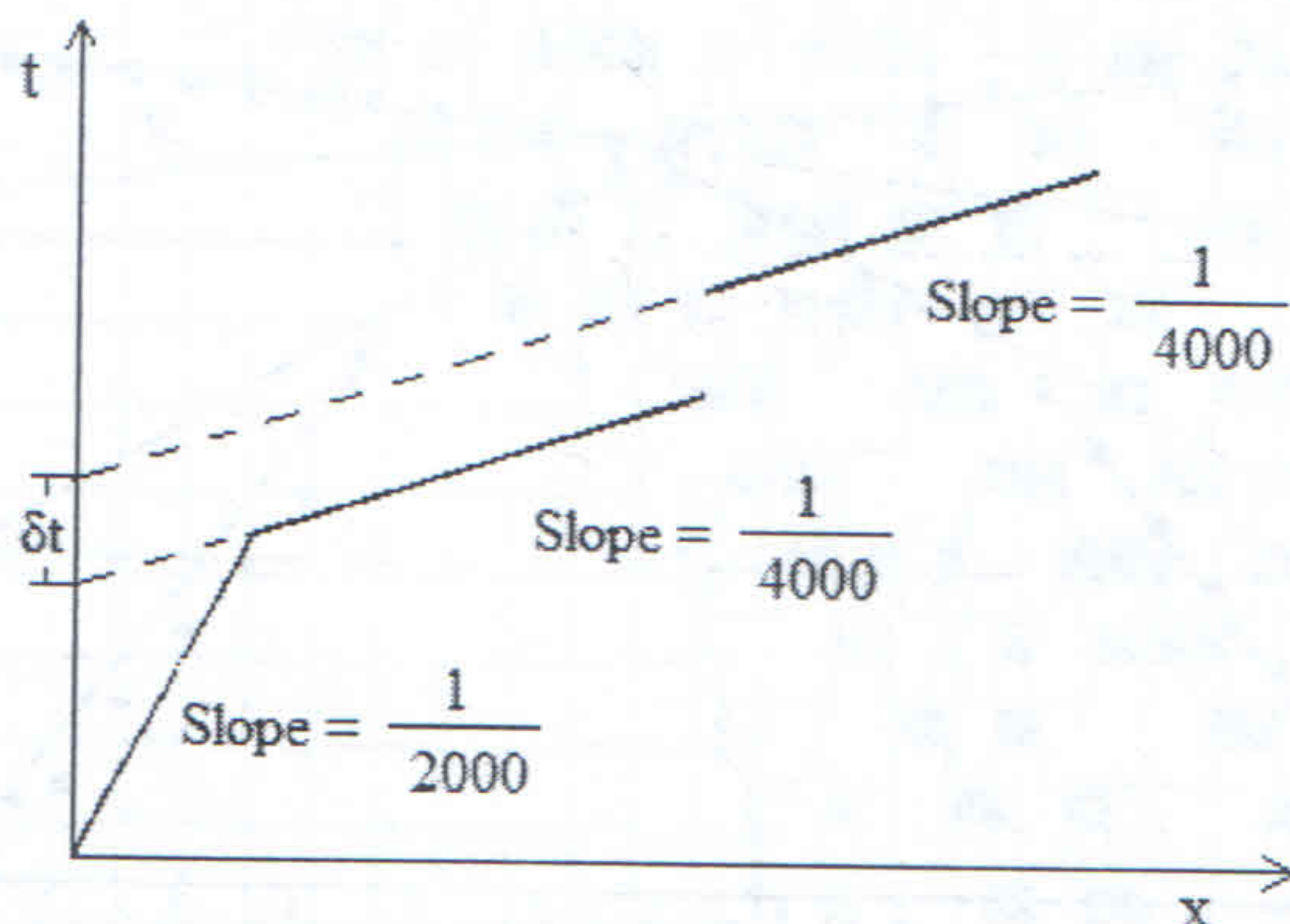


شکل ۴-۲۳: نمودارهای زمان-فاصله حاصل از لرزه‌نگاشت‌های شکل (۴-۲۲).

برای خطوط دوم در نمودارهای زمان-فاصله شکل (۴-۲۳)،  $t_{if1}$  و  $t_{ir1}$  تقریباً با هم برابر هستند که نشان می‌دهد اولین فصل مشترک در زیر زمین، افقی است. اگرچه محل تقاطع ادامه این دو خط با محورهای عمودی نشان داده نشده است، این دو خط باید در اصل برابری زمان‌های دوطرفه صدق کنند. برای خطوط سوم نمودارها در شکل (۴-۲۳)، زمان‌های دوطرفه برای خطوط  $3R$  و  $3F$  به‌طور قابل‌قبولی برابر است ( $R_f$  و  $R_r$ ). اما شیب دو خط  $3R$  و  $3F$  متفاوت بوده و  $t_{if2}$  نیز از  $t_{ir2}$  کمتر است که نشان‌دهنده شیب‌دار بودن دومین فصل مشترک می‌باشد. همچنین نشان می‌دهد که کم‌عمق‌ترین قسمت لایه در سمت منبع انرژی در برداشت مستقیم قرار دارد.

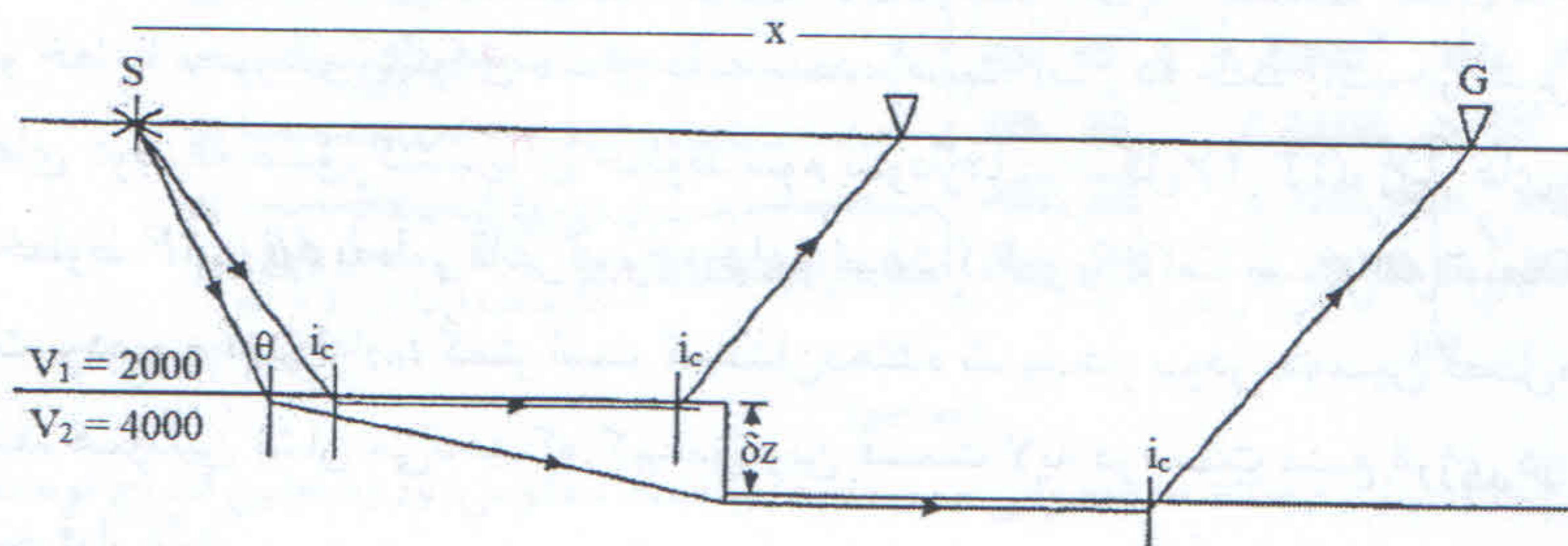
لازم به ذکر است که در صورت وجود یک فصل مشترک سوم (به‌خصوص اگر شیب‌دار باشد)، تعیین شیب و جهت آن به سادگی امکان‌پذیر نمی‌باشد زیرا شیب فصل مشترک دوم، زمان‌های تقاطع مربوط به فصل مشترک سوم را نیز تحت تاثیر قرار می‌دهد.

۲۹. مدل زیرزمینی مولد نمودار زمان - فاصله شکل (۴-۲۴) به چه صورتی می باشد؟



شکل ۴-۲۴: نمودار زمان - فاصله با گسستگی در خط مربوط به انکسار از لایه دوم.

پاسخ: همان طور که در شکل (۴-۲۵) نشان داده شده است، علت ایجاد گسستگی در خط مربوط به انکسار از لایه دوم در نمودار زمان - فاصله شکل (۴-۲۴) این است که فصل مشترک دو لایه به صورت پله‌ای دچار ناپیوستگی شده است.



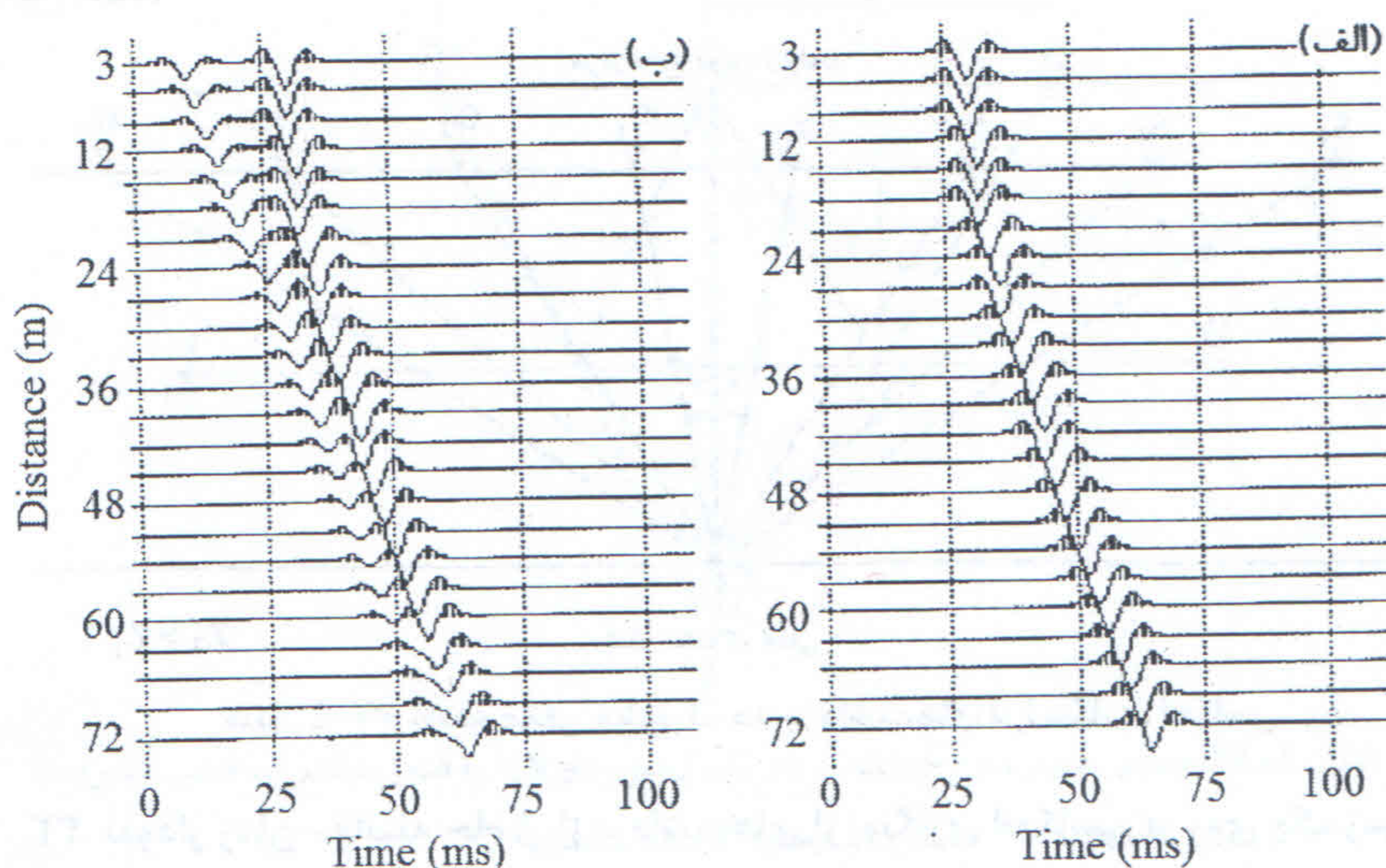
شکل ۴-۲۵: انتشار امواج انکساری در یک مدل ناپیوسته بدون تغییرات جانبی سرعت.

در مواردی که اندازه ناپیوستگی در مقایسه با عمق مرز انکساری کوچک باشد، با استفاده از فرمول ساده زیر می توان مقدار جابه‌جایی مرز انکساری را تخمین زد:

$$\delta z = \frac{\delta t V_1 V_2}{(V_2^2 - V_1^2)^{1/2}}$$

۳۰. روش لرزه‌نگاری انکساری در مقایسه با روش لرزه‌نگاری انعکاسی دارای معایبی چون مشکل لایه پنهان، طول زیاد کابل‌های ارتباطی ژئوفون‌ها و منبع انرژی لازم برای تولید امواج قابل شناسایی در ژئوفون‌های دور می باشد. با این وجود، چرا روش انکساری متداول‌ترین روش در بررسی‌های اعماق کم می باشد؟

پاسخ: زیرا امواج انعکاسی همیشه بعد از گروهی از امواج دیگر دریافت می‌شوند. بنابراین، تشخیص ورود امواج انعکاسی دشوارتر از شناسایی اولین امواج ورودی مربوط به امواج انکساری می‌باشد. برای درک بهتر این مطلب، دو لرزه‌نگاشت شبیه‌سازی شده در شکل (۴-۲۶) نشان داده شده است. شکل (۴-۲۶-الف)، تنها امواج انعکاسی را نشان می‌دهد، در حالی که ورود امواج مستقیم به شکل (۴-۲۶-ب) اضافه شده است. این شکل حالت بسیار ساده‌ای است و اگرچه امواج انعکاسی را همچنان می‌توان در لرزه‌نگاشت شکل (۴-۲۶-ب) نیز شناسایی کرد، اما الگوی آن‌ها به دلیل تداخل با امواج مستقیم، وضوح شکل (۴-۲۶-الف) را ندارد. با اضافه شدن نوفه و چند عامل پیچیده دیگر، شناسایی ورود امواج انعکاسی بسیار دشوار می‌شود.



شکل ۴-۲۶: دو لرزه‌نگاشت شبیه‌سازی شده برای الف) فقط امواج انعکاسی. ب) اضافه شدن ورود امواج مستقیم.

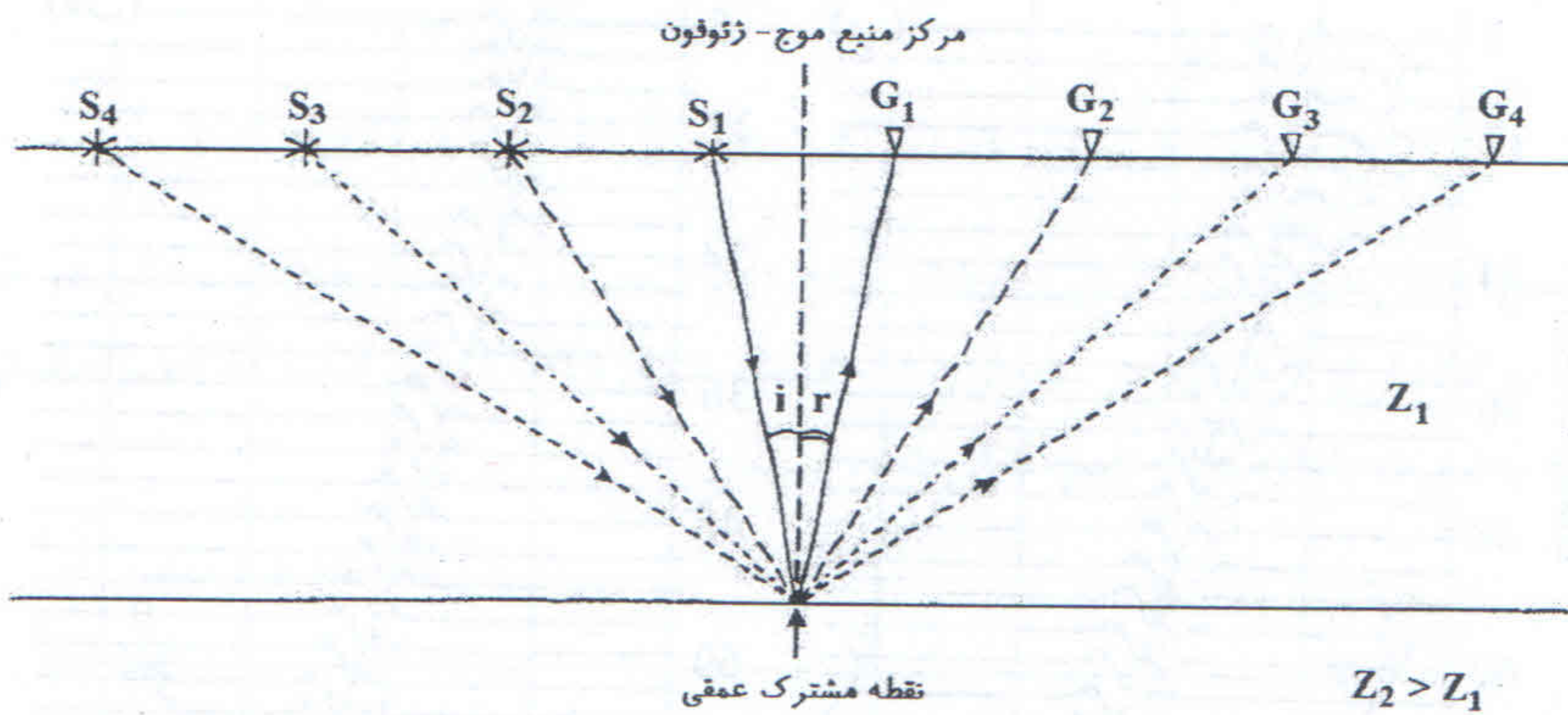
۳۱. در یک عملیات لرزه‌ای انعکاسی، اولین رسید موج مربوط به کدام یک از امواج است؟  
پاسخ: جدا از روش مورد مطالعه، همیشه اولین موج لرزه‌ای که به یک ژئوفون می‌رسد، موج مستقیم یا موج انکساری می‌باشد (سوال ۱۳).  
با توجه به اینکه مسیر موج انعکاسی همیشه از مسیر موج مستقیم بیشتر است، موج مستقیم همیشه قبل از موج انعکاسی به ژئوفون‌ها می‌رسد. برای درک بهتر این مطلب می‌توان به سوال ۳۳ مراجعه کرد.

۳۲. نقطه مشترک عمقی (CDP) در لرزه‌نگاری انعکاسی چیست؟

(کارشناسی ارشد مهندسی معدن، سال ۱۳۸۵)

الف) نقاطی در برداشت هستند که هم‌پوشانی مشترک با نقاط مجاور دارند.  
 ب) نقطه‌ای است روی یک سطح بازتاب کننده که چندین بازتاب از آن دریافت می‌شود.  
 ج) نقطه‌ای است در روی زمین که بازتاب‌های مختلف از سطح بازتاب کننده به آن می‌رسد.  
 د) نقطه‌ای است روی یک سطح بازتاب کننده که بازتاب‌های مکرر از بازتاب کننده‌های زیرین به آن می‌رسد.

پاسخ: در صورت استفاده از بیش از یک منبع موج، ژئوفون‌های مختلف می‌توانند انعکاس‌های مربوط به یک نقطه را آشکار کنند (شکل ۴-۲۷). این نقطه مشترک تحت عنوان نقطه عمقی مشترک (CMP) و گاهی نیز CDP یا CRP شناخته می‌شود. بنابراین، گزینه (ب) صحیح است.



شکل ۴-۲۷: نقطه عمقی مشترک در برداشت‌های لرزه‌نگاری انعکاسی.

۳۳. نمودار زمان - فاصله حاصل از برداشت‌های لرزه‌نگاری انعکاسی بر روی یک زمین دو

لایه با فصل مشترک افقی به چه صورتی می‌باشد؟

پاسخ: در شکل (۴-۲۸)، مرز انعکاسی  $AB$  در عمق  $h$  زیر منبع  $S$  قرار دارد. انرژی موج به گونه‌ای منعکس می‌شود که زاویه انعکاس با زاویه برخورد برابر است. با توجه به این نکته و برای سادگی محاسبات، نقطه فرضی  $I$  معادل تصویر منبع  $S$  در امتداد خط عمودی در نظر گرفته می‌شود. اگر  $V$  سرعت در لایه اول باشد، زمان سیر موج انعکاسی ( $t$ ) برابر است با:

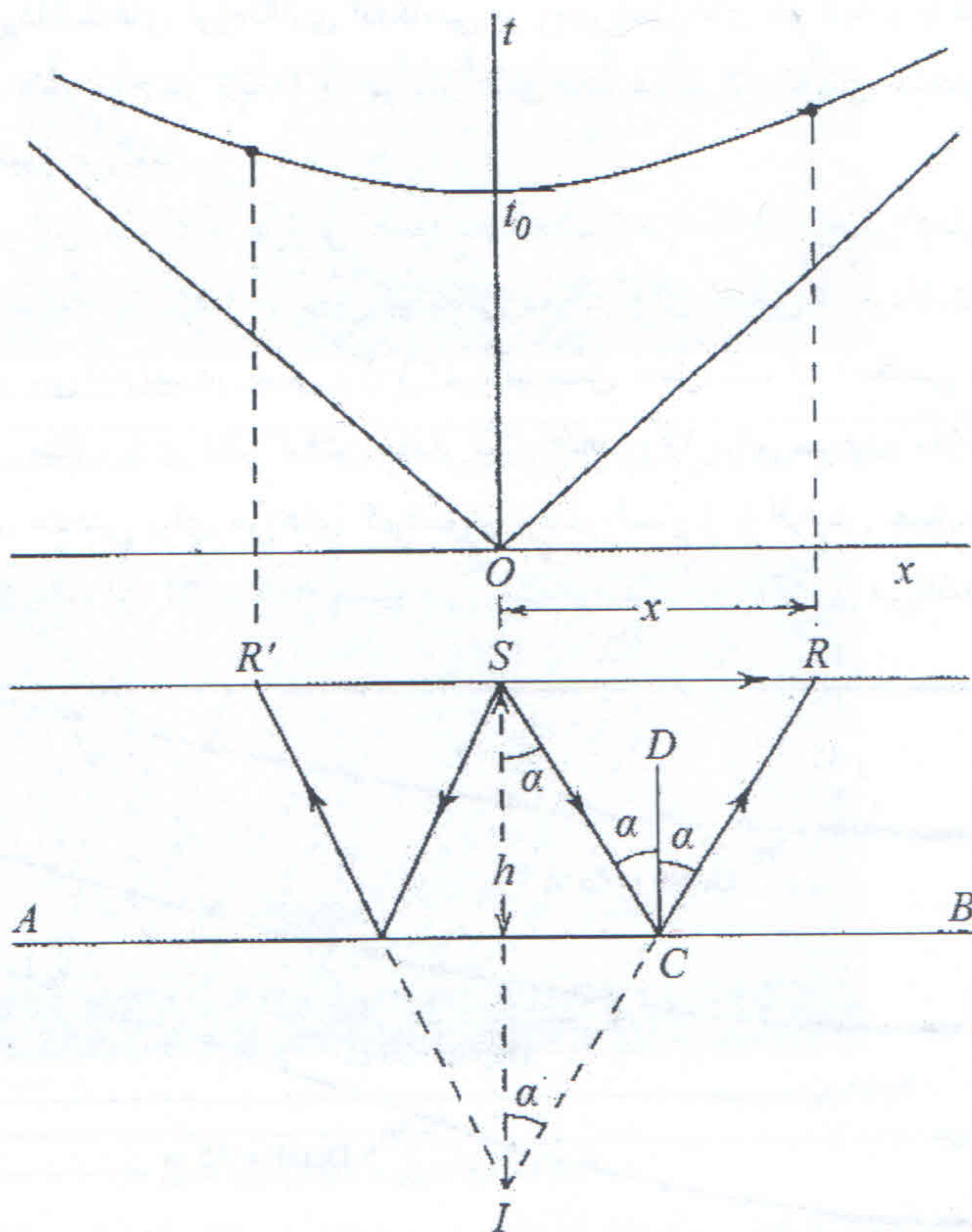
$$t = (SC + CR) / V$$

از آنجا که  $SC = CI$ ، بنابراین  $IR$  برابر است با مجموع مسیر  $SCR$ . می‌توان نوشت:

$$\frac{V^2 t^2}{4h^2} - \frac{x^2}{4h^2} = 1 \quad \rightarrow \quad V^2 t^2 = x^2 + 4h^2$$

با کمی دقت در رابطه بالا مشاهده می‌شود که نمودار مربوط به زمان سیر امواج انعکاسی،

به صورت هذلولی می‌باشد (شکل ۴-۲۸).



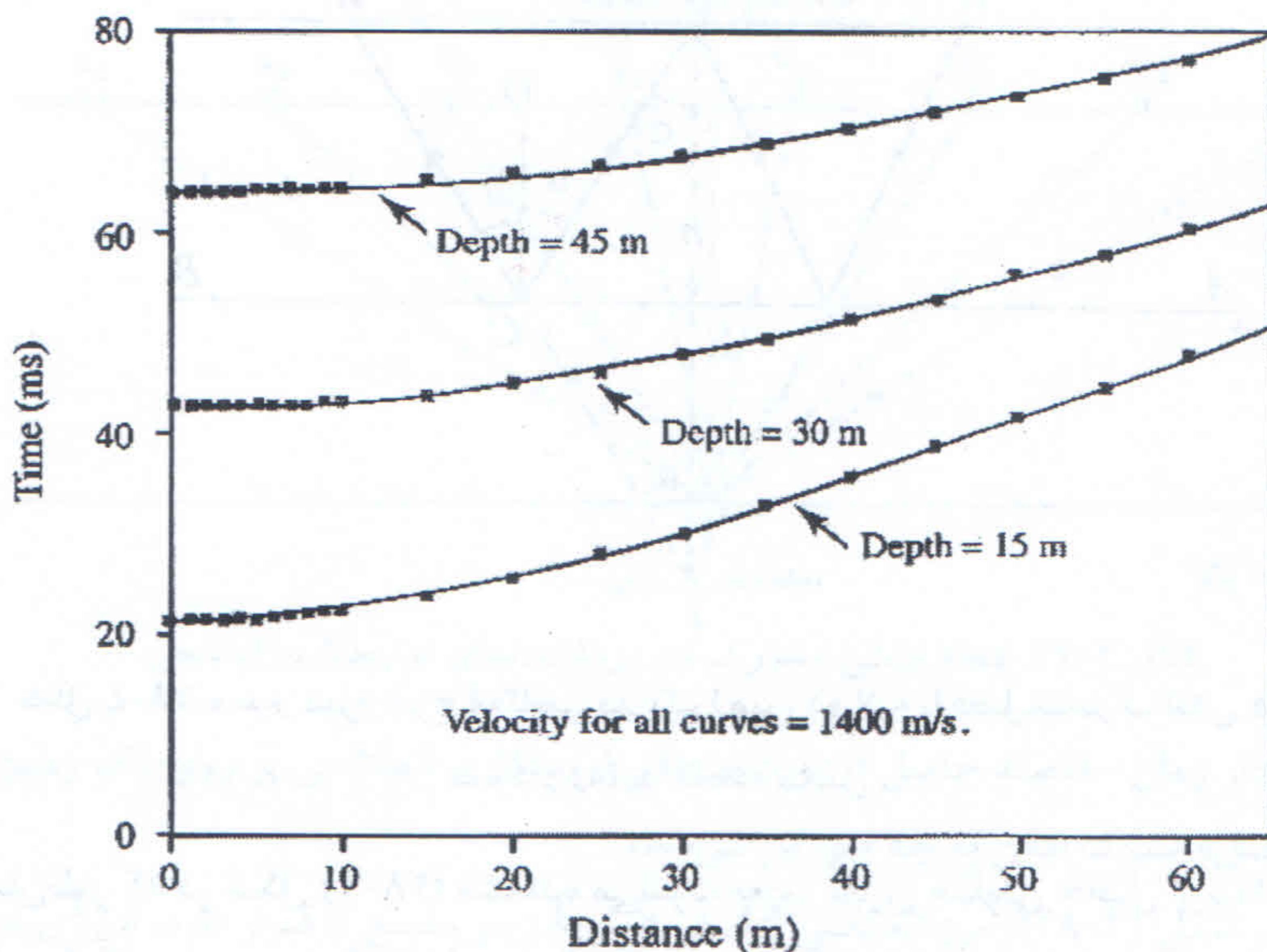
شکل ۴-۲۸: مسیر عبور موج انعکاسی در یک زمین دو لایه با فصل مشترک افقی همراه با نمودار زمان-فاصله حاصل.

همان طور که در شکل (۴-۲۸) مشاهده می شود، محور تقارن هذلولی حاصل از برداشت های لرزه نگاری انعکاسی بر روی یک فصل مشترک افقی، محور  $x=0$  است. در شرایطی که مرز انعکاسی شیب دار باشد، محور تقارن منحنی به طرف قسمت کم عمق فصل مشترک جابه جا می شود.

**نکته:** هر ژئوفون علاوه بر موج انعکاسی، موج مستقیم را نیز دریافت می کند. به عنوان مثال، ژئوفون واقع در فاصله  $R$  موج مستقیم  $SR$  را نیز دریافت می کند و با توجه به اینکه مسیر  $SR$  همیشه از  $(SC + CR)$  کمتر است، موج مستقیم قبل از موج انعکاسی به ژئوفون می رسد. با افزایش فاصله  $x$  اختلاف بین  $SR$  و  $(SC + CR)$  کمتر شده و منحنی مربوط به موج انعکاسی به خط موج مستقیم مجانب می شود.

۳۴. در برداشت‌های لرزه‌نگاری انعکاسی بر روی زمین‌های دو لایه و با فرض ثابت بودن سرعت انتشار موج در لایه‌ها، با افزایش عمق فصل مشترک، انحناى منحنى زمان-فاصله چگونه تغییر می‌کند؟

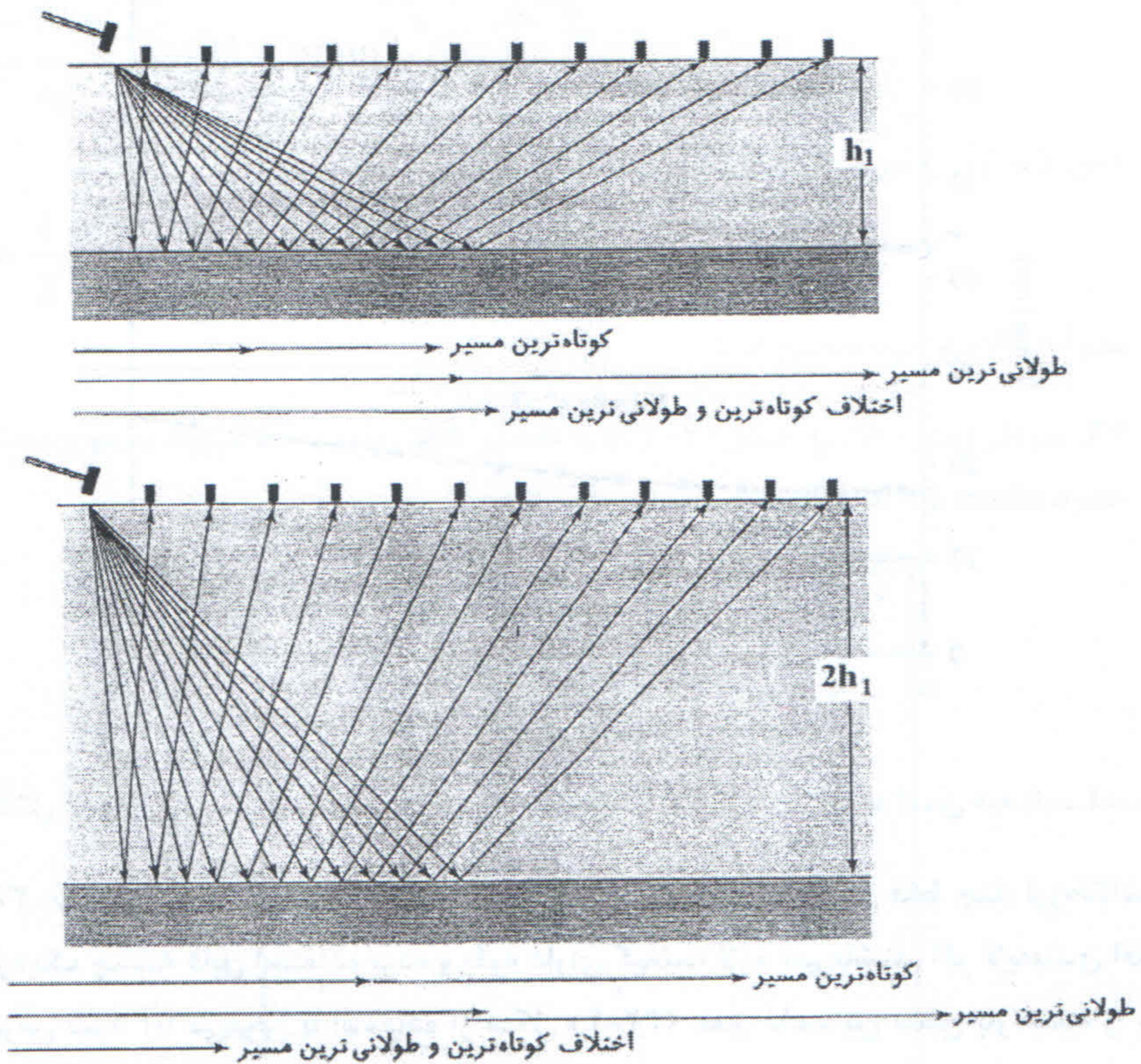
پاسخ: در این حالت، با افزایش عمق فصل مشترک، انحناى منحنى زمان-فاصله کمتر می‌شود. هر دو عامل سرعت و عمق بر شکل منحنی‌های حاصل از برداشت‌های لرزه‌نگاری انعکاسی تاثیر می‌گذارند. در شکل (۴-۲۹)، تاثیر عمق فصل مشترک انعکاسی نشان داده شده است. به‌عنوان مثال، با در نظر گرفتن مقدار ثابت  $1400 \text{ m/s}$  برای سرعت، ملاحظه می‌شود که میزان انحناى منحنى برای مرزهای کم‌عمق‌تر بیشتر است و با افزایش عمق، انحناى منحنى کمتر می‌شود. علت آن، تغییر طول مسیر طی شده توسط موج انعکاسی می‌باشد.



شکل ۴-۲۹: تاثیر عمق مرز انعکاسی بر انحناى منحنى زمان-فاصله.

در شکل (۴-۳۰)، طول مسیر عبور امواج برای دو مرز انعکاسی با عمق مختلف (عمق مدل پایینی دو برابر عمق مدل بالایی) نشان داده شده است. با فرض ثابت بودن سرعت، میزان انحناى منحنى زمان-فاصله، به اختلاف طول مسیر بستگی دارد. اگرچه مسیرهای انعکاسی برای لایه عمیق‌تر تقریباً دو برابر این مسیرها در لایه کم‌عمق‌تر هستند، اختلاف بین طولانی‌ترین و کوتاه‌ترین مسیرهای انعکاسی برای لایه کم‌عمق‌تر دو برابر لایه عمیق‌تر می‌باشد. بنابراین، علت تغییر انحناى منحنى زمان-فاصله در اثر تغییر عمق لایه انعکاسی، به‌خوبی مشاهده می‌شود.





شکل ۴-۳۰: مسیرهای انعکاسی و اختلاف کوتاه‌ترین و طولانی‌ترین آن‌ها برای دو لایه با عمق مختلف.

۳۵. در برداشت‌های لرزه‌نگاری انعکاسی بر روی زمین‌های دو لایه و با فرض ثابت بودن سرعت انتشار موج در لایه‌ها، کدام گزینه صحیح است؟ (کارشناسی ارشد مهندسی معدن، سال ۱۳۹۰)

(الف) با افزایش عمق فصل مشترک، انحنای منحنی زمان - فاصله کمتر می‌شود.

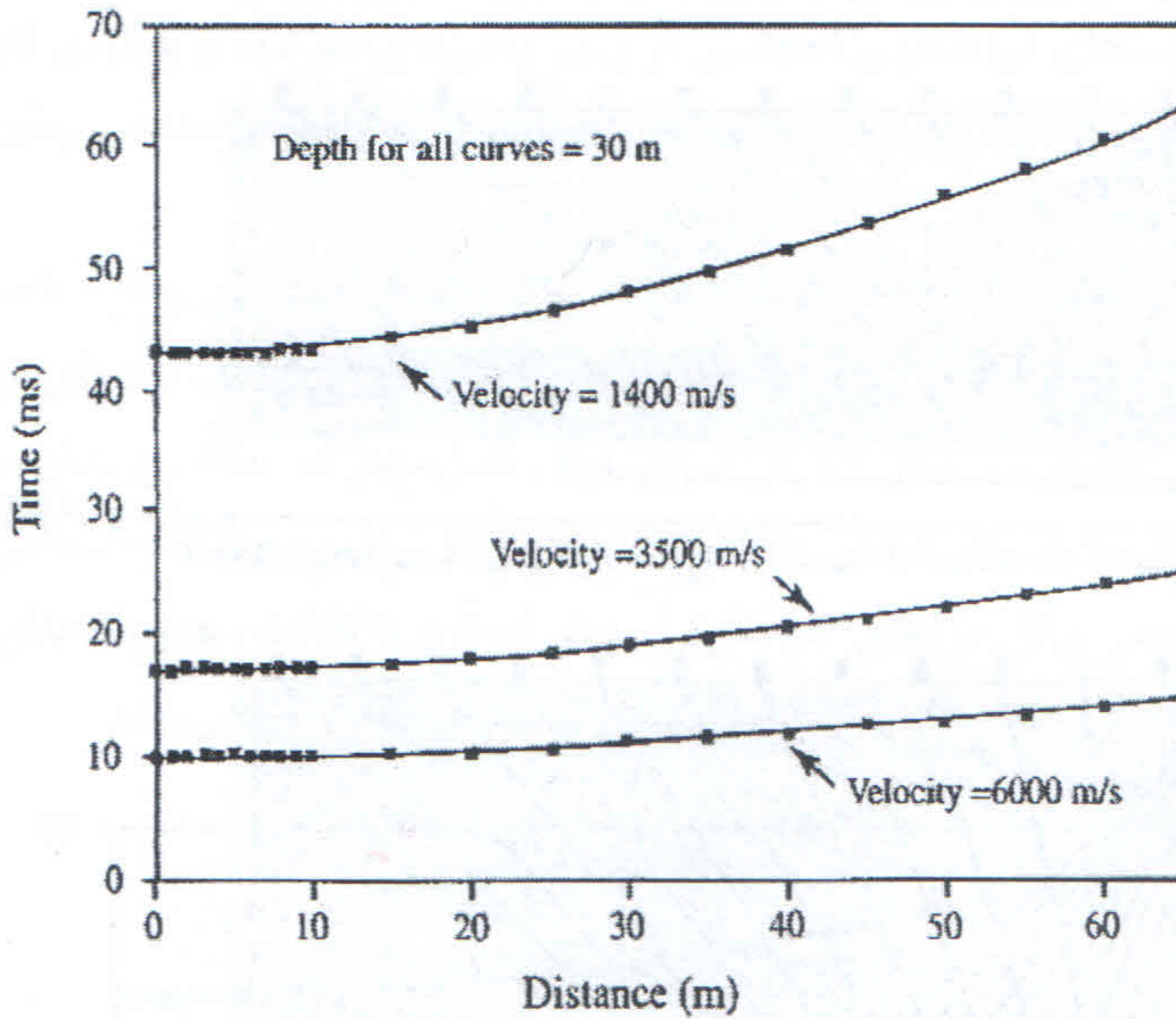
(ب) با افزایش عمق فصل مشترک، انحنای منحنی زمان - فاصله افزایش می‌یابد.

(ج) با افزایش عمق فصل مشترک، انحنای منحنی زمان - فاصله تغییری نمی‌کند.

(د) با افزایش عمق فصل مشترک، انحنای منحنی زمان - فاصله منفی می‌شود.

پاسخ: با توجه به مطالب شرح داده شده در سوال ۳۴، گزینه (الف) صحیح است.

**نکته:** در بررسی تاثیر سرعت باید گفت که با ثابت بودن عمق مرز انعکاسی، افزایش سرعت باعث کاهش انحنای منحنی زمان - فاصله می‌شود (شکل ۴-۳۱).



شکل ۴-۳۱: تاثیر سرعت انتشار موج بر انحنای منحنی‌های زمان-فاصله (عمق لایه ثابت است).

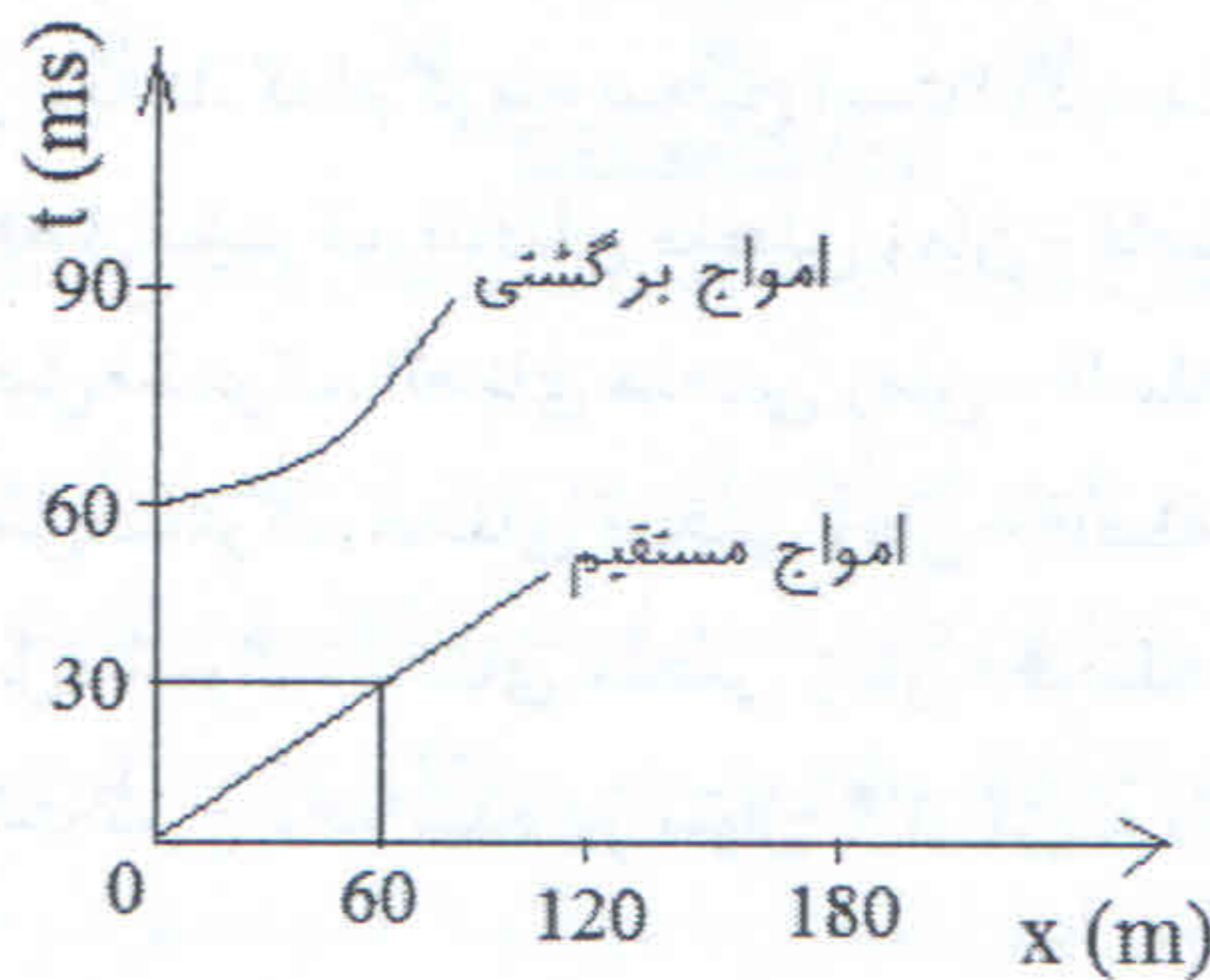
۳۶. یک پروفیل لرزه‌نگاری در یک زمین هموار برداشت شده ولی فقط چند لرزه‌نگاشت نزدیک چشمه قابل استفاده بوده و بقیه دارای کیفیت لازم نمی‌باشند. اگر لایه‌بندی افقی فرض شود آیا می‌توان با استفاده از شکل (۴-۳۲) عمق نخستین سطح بازتابنده را به دست آورد؟ (کارشناسی ارشد مهندسی معدن، سال ۱۳۸۲)

ج) ۱۲۰

ب) ۶۰

الف) ۳۰

د) با توجه به اطلاعات ارائه شده نمی‌توان ژرفای مورد نظر را به دست آورد.



شکل ۴-۳۲: نمودار زمان-فاصله حاصل از یک پروفیل لرزه‌نگاری بر روی یک زمین با لایه‌بندی افقی.

پاسخ: با استفاده از شیب خط مربوط به موج مستقیم (و با تبدیل واحد  $ms$  به  $s$ ) می‌توان سرعت لایه اول را تخمین زد:

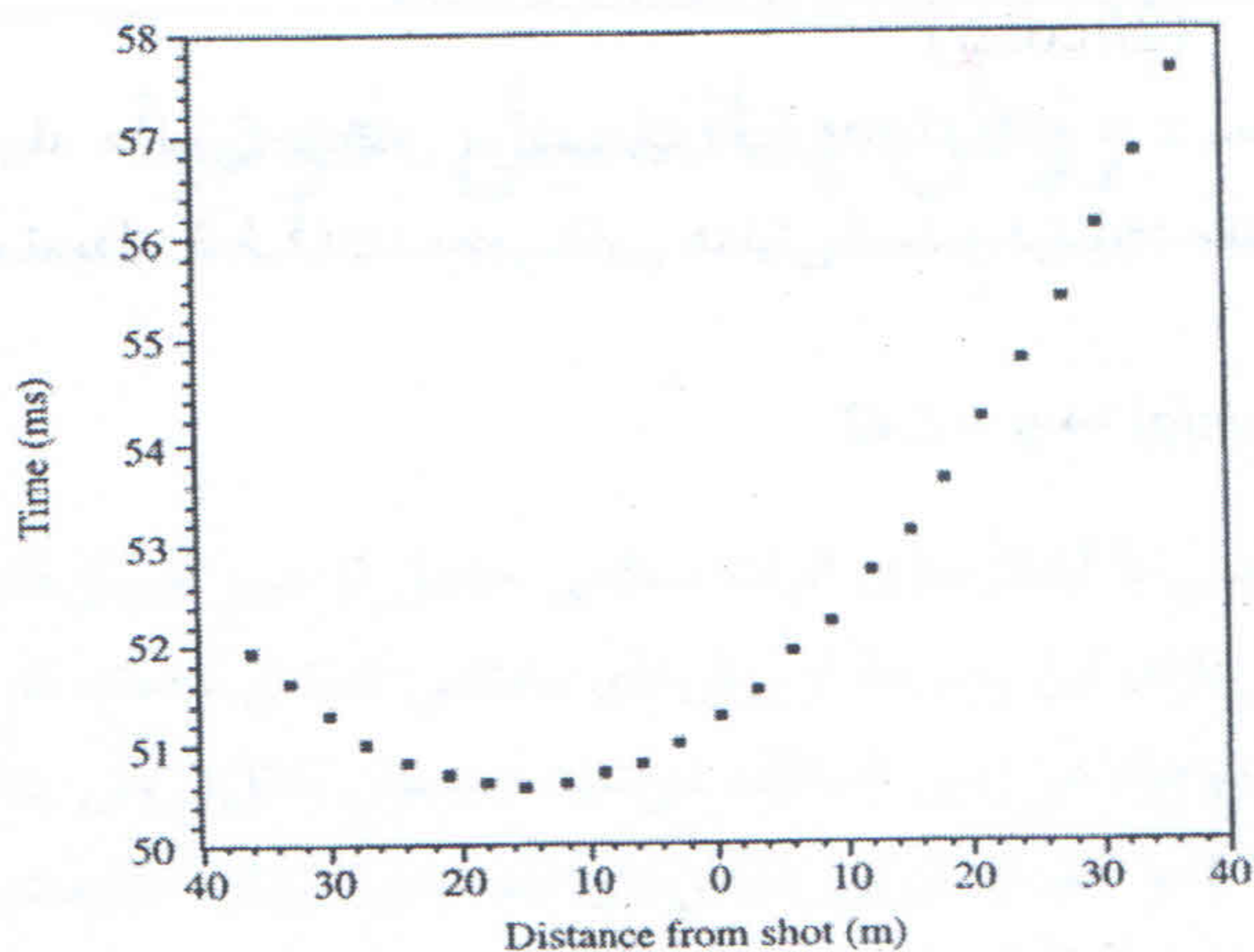
$$V_1 = \frac{1}{m_{direct}} \times 10^3 = 2000 \text{ m/s}$$

عمق لایه اول را نیز می‌توان با استفاده از زمان تقاطع به‌دست آورد:

$$h = \frac{1}{2} V t_0 = \frac{1}{2} \times 2000 \times 60 \times 10^{-3} = 60 \text{ m}$$

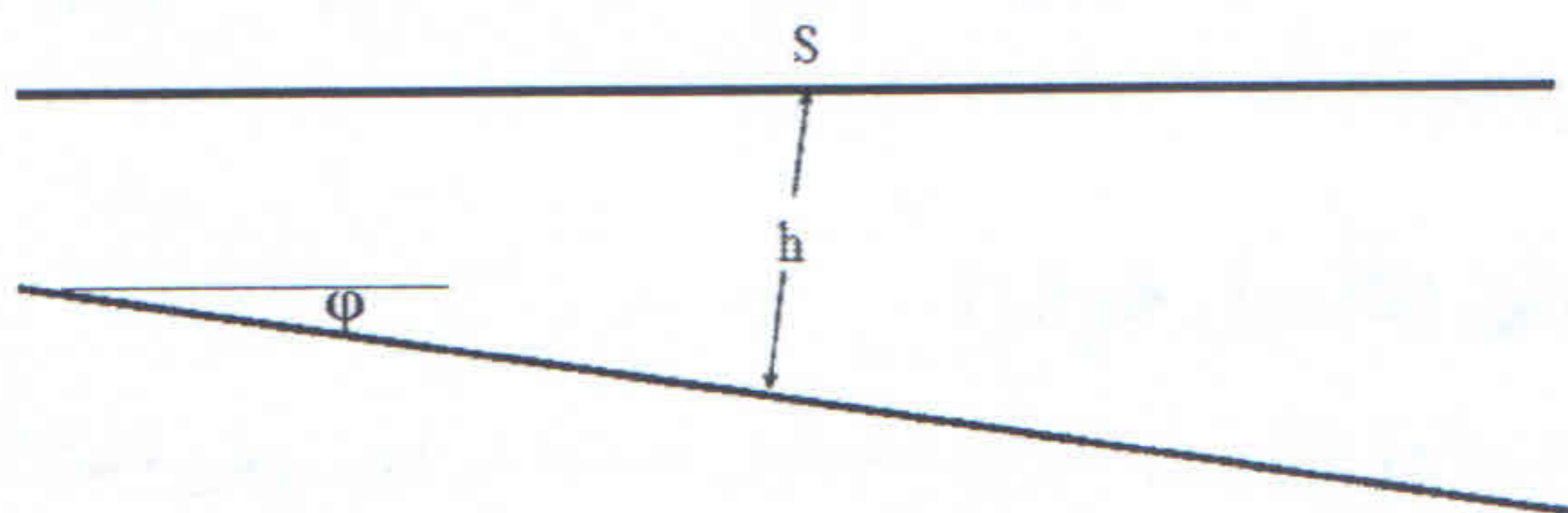
بنابراین، گزینه (ب) صحیح است.

۳۷. نمودار زمان - فاصله شکل (۴-۳۳) را تفسیر کنید. شیب خط مربوط به موج مستقیم حدود  $0.5 \text{ ms/m}$  است.



شکل ۴-۳۳: نمودار زمان - فاصله حاصل از یک برداشت لرزه‌نگاری انعکاسی.

پاسخ: شکل (۴-۳۳) مربوط به یک برداشت لرزه‌نگاری انعکاسی است که محور تقارن هذلولی در آن به سمت چپ منبع مولد موج جابه‌جا شده است. این بدان معنی است که زمان دریافت موج توسط ژئوفون‌هایی که به‌طور متقارن در طرفین منبع گسترده شده‌اند، متفاوت است و در نتیجه، مرز انعکاسی شیب‌دار می‌باشد (شکل ۴-۳۴).



شکل ۴-۳۴: مدل زمین با فصل مشترک شیب‌دار مربوط به نمودار زمان - فاصله شکل (۴-۳۳).

نمودار زمان-فاصله موج مستقیم یک خط راست با شیب  $1/V$  می‌باشد. بنابراین سرعت موج در لایه اول را می‌توان با استفاده از شیب خط مربوط به موج مستقیم به دست آورد:

$$1/V = 0.5 \rightarrow V = 2 \text{ m/ms}$$

رابطه هذلولی انعکاسی برای فصل مشترک‌های شیب‌دار به صورت زیر است:

$$\frac{V^2 t^2}{(2h \cos \varphi)^2} - \frac{(x + 2h \sin \varphi)^2}{(2h \cos \varphi)^2} = 1$$

از روی نمودار و با قرائت مقدار  $t_0 = 51.2 \text{ ms}$  برای  $x = 0$  و قرار دادن این مقادیر در رابطه بالا، می‌توان مقدار  $h$  را به دست آورد:

$$\frac{(2)^2 (51.2)^2}{(2h \cos \varphi)^2} - \frac{(0 + 2h \sin \varphi)^2}{(2h \cos \varphi)^2} = 1 \Rightarrow h = 51.2 \text{ m}$$

با بررسی رابطه هذلولی مشخص می‌شود که خط  $x = -2h \sin(\varphi)$  محور تقارن هذلولی است. با توجه به نمودار، خط  $x = 15$  محور تقارن هذلولی است و در نتیجه مقدار شیب لایه برابر است با:

$$15 = (-2)(51.2) \sin(\varphi) \rightarrow \varphi = 8.42^\circ$$