

مدل سازی تغییرات دامنه و فاز امواج تبدیل یافته نسبت به دورافت و تغییرات نسبت V_p/V_s

حسین جدیری اکبری فام^۱، و نوید شادمانمان^{۲*}

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران
^۲ استادیار، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۲/۱۴، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۹/۲۰)

چکیده

اطلاعات امواج برشی در تفسیر لرزه‌ای، نقش ارزشمندی را ایفا می‌کنند. به دلیل هزینه بالا و سختی عملیات ثبت داده‌های S-S از طریق برداشت لرزه‌ای ۹- مؤلفه‌ای (3D-9C)، از اطلاعات امواج برشی نهفته در امواج تبدیل یافته استفاده شد. در راستای شناسایی هرچه بهتر بازتاب‌های ناشی از امواج تبدیل یافته می‌بایست خصوصیات آنها از لحاظ تغییرات دامنه و تغییرات فاز نسبت به دورافت بررسی شود. در این راستا، با استفاده از روش‌های مدل سازی پیشرو و ردیابی پرتو، نحوه انتشار انرژی امواج تبدیل یافته در محیط‌های همسانگرد و ناهمسانگرد و نیز نسبت‌های V_p/V_s متفاوت در مقاطع لرزه‌ای بررسی شده است.

امواج تبدیل یافته که توسط چشمه قائم و گیرنده‌های افقی و یا چشمه افقی و گیرنده‌های قائم ثبت شده‌اند، پلاریته وارونی در طرفین چشمه خواهند داشت، درحالی که پلاریته امواج تبدیل یافته ثبت شده توسط چشمه و گیرنده‌های قائم و یا چشمه و گیرنده‌های افقی در طرفین چشمه یکسان خواهد بود. برداشت امواج تبدیلی P-Sv نیازمند زوایای تابش بزرگ‌تر از زاویه بحرانی و بنابراین، نیازمند طول برداشت نسبتاً بزرگ‌تری است، ولی بازتاب دامنه بالای امواج تبدیلی Sv-P قبل از زاویه بحرانی اتفاق می‌افتد. با این حال باید توجه داشت، چون در بازتابنده‌های افقی زاویه تابش امواج Sv-P با زاویه بازتابش امواج P-Sv برابر است و برعکس، لذا امواج Sv-P و P-Sv در دورافت‌های یکسانی ثبت خواهند شد. مدل سازی‌های انجام شده نشان می‌دهند برای بازتابنده افقی با نسبت سرعت متداول ۱.۷۳۲۱، حداکثر تبدیل انرژی از موج P به Sv در حدود زاویه تابش ۶۴ درجه و زاویه بازتابش ۳۱ درجه و حداکثر تبدیل امواج Sv-P در حول زاویه تابش ۳۱ درجه و زاویه بازتابش ۶۴ درجه رخ می‌دهد که بسته به عمق بازتابنده متناسب با دورافت‌های متوسط تا بزرگ است. از این رو، برای ثبت بهتر این امواج می‌بایست با توجه به عمق سازند مدنظر، از دورافت‌های متوسط تا بیشتر استفاده کرد.

واژه‌های کلیدی: امواج تبدیل یافته، تغییرات دامنه، تغییرات فاز، تغییرات نسبت سرعت V_p/V_s ، امواج Sv-P، امواج P-Sv

۱ مقدمه

استفاده از امواج تبدیل یافته برای دستیابی به اطلاعات امواج برشی از چالش‌های نوظهور در صنعت نفت به‌شمار می‌آید (استیورات و همکاران، ۲۰۰۳؛ بارکود و همکاران، ۲۰۰۴؛ هاردیج، ۲۰۱۴؛ هاردیج و همکاران، ۲۰۱۴؛ دی آنجلو و هاردیج، ۲۰۱۶). امواج تبدیل یافته حاوی هر دو اطلاعات موج طولی P و موج برشی S هستند؛ بنابراین، با داشتن اطلاعات موج P از داده‌های معمول لرزه‌ای و تلفیق آن با داده‌های ناشی از امواج تبدیل یافته می‌توان به اطلاعات پرارزش امواج برشی دست یافت. با این حال، پردازش داده‌های ناشی از امواج تبدیل یافته کاری بس دشوار و دقیق است. در این میان، شناخت تغییرات دامنه و فاز امواج تبدیل یافته می‌تواند برای اهداف عملیاتی، پردازشی و تفسیری خیلی مؤثر باشد. از لحاظ عملیات لرزه‌ای می‌توان با آگاهی از عمق هدف، در تعیین محدوده دورافتی که داده‌های امواج تبدیل یافته دارای فاز تقریباً ثابتی بوده و قابل استفاده است، بهره جست. از سوی دیگر، با شناسایی تغییرات دامنه و فاز امواج تبدیل یافته می‌توان الگوریتم‌های پردازشی مناسبی در مراحل تحلیل سرعت و تصحیح پرونراند نرمال طراحی کرد. در تفسیر کمی مخزن می‌توان به مطالعات AVO، AVA و تعیین خصوصیات مخزن (Reservoir characterization) اشاره کرد که در این موارد این سؤال پیش می‌آید که تغییرات موجود در دامنه و فاز موج مربوط به تئوری انتشار خود موج است یا تغییرات فیزیکی محیط لرزه‌ای؟! پاسخ به این سؤالات در گرو درک صحیح از چگونگی انتشار امواج تبدیل یافته و نحوه تغییرات دامنه و فاز این امواج در هنگام انتشار است.

تغییرات دامنه و فاز بیانگر نحوه توزیع انرژی تابشی به‌ازای دورافت‌ها و یا زوایای تابش متفاوت است. گاهی اوقات، امواج P تغییرات دامنه شدیدی را در راستای افق‌های لرزه‌ای خاص نشان می‌دهند که می‌تواند ناشی از

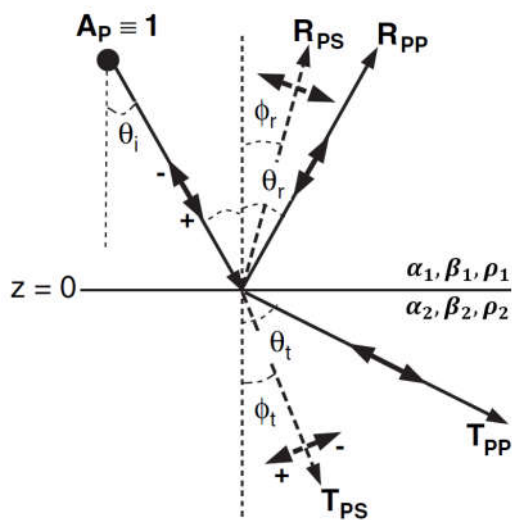
پدیده‌هایی همچون هم‌کوکی لرزه‌ای (seismic tuning)، تغییر محتوای سیال و میزان تخلخل باشد. تفسیر چنین پدیده‌های لرزه‌ای باید با دقت بیشتری صورت گیرد، زیرا دامنه امواج لرزه‌ای ثبت شده، علاوه بر عوامل محیطی، می‌تواند تحت تأثیر عوامل گوناگونی، همچون پارامترهای پردازشی قرار گیرد. در چنین مواردی، داشتن اطلاعات اضافی حاصل از بررسی امواج تبدیل یافته می‌تواند کمک شایانی در تفسیر درست لرزه‌ای داشته باشد. استفاده از دامنه‌های هر دو مد امواج اصلی و تبدیل یافته می‌تواند ما را در شناسایی سطوح تماس سیالات کمک کنند.

زمانی که سرعت هر دو موج P و S در دسترس باشد، نسبت سرعت V_p/V_s می‌تواند در امتداد لایه مورد مطالعه، تعیین شود. این نسبت سرعت یکی از بهترین نشانگرهای لرزه‌ای برای دستیابی به تغییرات نوع سنگ بوده و برای به نقشه درآوردن تغییرات سنگ‌شناسی مرتبط با سیستم مخزنی، خیلی ارزشمند است. از سوی دیگر می‌توان در ردیابی سیالات تزریقی در عملیات ازدیاد برداشت استفاده شوند (هاردیج، ۲۰۱۴). از این رو مطالعه تأثیرات تغییرات این نسبت بر امواج تبدیل یافته، در شناسایی این امواج کمک شایانی را ایفا می‌کند.

۲ تئوری

دامنه بازتابی می‌تواند به عواملی همچون فاصله فرستنده تا گیرنده، عمق بازتابنده، زاویه تابشی موج در مرز بین دو محیط و تفاوت در پارامترهای کشسان لایه‌های بالا و پایین مرز جداکننده، بستگی داشته باشد (نظری، ۱۳۹۴). از سوی دیگر عوامل متعددی از قبیل گسترش هندسی (Geometrical spreading)، پدیده جذب (Absorption)، افراز انرژی (Energy partitioning) و تبدیل مد (Conversion mode) باعث کاهش دامنه و انرژی امواج لرزه‌ای می‌شود. تبدیل مد امواج لرزه‌ای به معنای تبدیل بخشی از انرژی نوعی از موج لرزه‌ای به نوع

در پیمایش ژئوفیزیکی درون خشکی به دست می آید. سوم، معادله‌های زوپریتز برای یک بازتابنده است و به اثر تداخل میان امواج ناشی از لایه بندی نمی پردازد. چهارم، آن که دامنه تنها مقیاسی از اندازه ضرایب بازتاب است که در غیاب اثرهای خارجی چون واگرایی، تضعیف، جهت گیری ژئوفون‌ها و سایر عوامل است. بنابراین، دامنه‌های به دست آمده از حل معادله زوپریتز نمی تواند به عنوان پاسخ دقیق دلخواه از پاسخ لرزه‌ای در نظر گرفته شود (نظری، ۱۳۹۴).



شکل ۱. تبدیل موج و تقسیم انرژی در فصل مشترک دو لایه به چهار پرتو موج SV و P بازتابی و انکساری زمانی که موج تابشی P باشد (ایکله و آموندسن، ۲۰۰۵).

معادلات زوپریتز تقسیم بندی انرژی مؤلفه‌های بازتابی و عبوری امواج P و S را تعیین می کند. روابط زوپریتز برای تعیین ضرایب بازتاب امواج P-SV و SV-P به شکل زیر است (آکی و ریچاردز، ۱۹۸۰):

$$R_{PS} = \left[\frac{2 \frac{\cos q_t}{a_1} \times \left[(a \times b) + (c \times d) \frac{\cos q_t \cos f_t}{a_2 b_2} \right] \times p \times \frac{a_1}{b_1} \right] \times \frac{1}{D}, \quad (1)$$

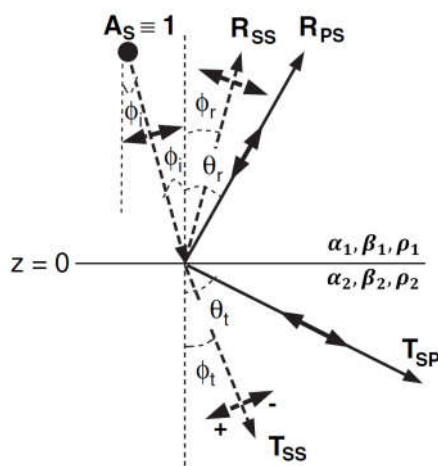
دیگر، برای نمونه تبدیل موج S_v به P در مرز مشترک لایه‌هاست. تبدیل امواج زمانی رخ می دهد که موج لرزه‌ای در مرز مشترک بین دو لایه با مقاومت صوتی متفاوت به صورت غیر عمود برخورد کند. در اکتشافات لرزه‌ای دو نوع از تبدیل موج مورد توجه قرار می گیرد: P-SV و SV-P. لازم به ذکر است که موج S_H تبدیل مد ندارد. در ادامه این بخش، به تقسیم انرژی امواج لرزه‌ای در مرز بین دو لایه پرداخته شده است.

۳ تقسیم بندی انرژی در مرز لایه‌ها

روابط ریاضی بین ضرایب بازتاب و عبور، با زاویه تابش و خواص الاستیک محیط (سرعت و چگالی دولایه)، هنگام تابش مایل موج (زاویه تابش غیر عمود بر مرز) به فصل مشترک دو لایه در محیط لرزه‌ای با خواص فیزیکی متفاوت، توسط زوپریتز (۱۹۱۹) به دست آمد. این روابط بیانگر چگونگی توزیع انرژی لرزه‌ای به چهار شکل مختلف موج (P بازتابی، S بازتابی، P عبوری و S عبوری) است. مطالعه روابط زوپریتز به صورت معادلات ریاضی پیچیده است چون از یک طرف تبدیل مد بین امواج P و S رخ داده و از سوی دیگر برای محاسبه ضرایب بازتاب می بایست علاوه بر چگالی و سرعت، زاویه تابش را هم مد نظر قرار داد. برای درک آسان تر این روابط مطلوب است که به صورت نمودار نمایش داده شوند.

معادله‌های زوپریتز می تواند برای هر ترکیبی از پارامترهای سنگ، تغییرات ایجاد شده دامنه را پیش بینی کند. البته باید عنوان کرد که ضریب بازتاب‌های محاسبه شده از معادله‌های زوپریتز، از چند جنبه، با دامنه‌های اندازه گیری شده، طی آزمایش لرزه‌ای متفاوت است.

نخست، قوانین زوپریتز ضریب بازتاب را برای موج تخت بیان می کند، در حالی که امواج واقعی لرزه‌ای کروی است. دوم، معادله‌های زوپریتز بازتاب را در جهت انتشار موج بیان می کند، نه در جهت عمودی که به طور معمول



شکل ۲. تبدیل موج و تقسیم انرژی در فصل مشترک دو لایه به چهار پرتو موج SV و P بازتابی و انکساری زمانی که موج تابشی SV باشد (ایکله و آموندسن، ۲۰۰۵).

$$\cos \theta_i = \alpha_1 * \sqrt{\left(\frac{1}{\alpha_1^2}\right) - p^2}, \quad (2)$$

$$\cos \theta_r = \alpha_2 * \sqrt{\left(\frac{1}{\alpha_2^2}\right) - p^2}, \quad (3)$$

$$\cos \phi_r = \beta_1 * \sqrt{\left(\frac{1}{\beta_1^2}\right) - p^2}, \quad (4)$$

$$\cos \phi_t = \beta_2 * \sqrt{\left(\frac{1}{\beta_2^2}\right) - p^2}, \quad (5)$$

$$p = \frac{\sin \theta_i}{\alpha_1} = \frac{\sin \theta_r}{\alpha_1}, \quad (6)$$

$$E = b \frac{\cos \theta_i}{\alpha_1} + c \frac{\cos \theta_t}{\alpha_2}, \quad (7)$$

$$F = b \frac{\cos \phi_r}{\beta_1} + c \frac{\cos \phi_t}{\beta_2}, \quad (8)$$

$$G = (a-d) \frac{\cos \theta_i}{\alpha_1} \frac{\cos \phi_t}{\beta_2}, \quad (9)$$

$$H = (a-d) \frac{\cos \theta_t}{\alpha_2} \frac{\cos \phi_r}{\beta_1}, \quad (10)$$

$$D = (E * F) + (G * H * p^2), \quad (11)$$

$$a = \rho_2 (1 - 2\beta_2^2 p^2) - \rho_1 (1 - 2\beta_1^2 p^2), \quad (12)$$

$$b = \rho_2 (1 - 2\beta_2^2 p^2) + 2\rho_1 (\beta_1^2 p^2), \quad (13)$$

$$c = \rho_1 (1 - 2\beta_1^2 p^2) + 2\rho_2 (\beta_2^2 p^2), \quad (14)$$

$$d = 2(\rho_2 \beta_2^2 - \rho_1 \beta_1^2), \quad (15)$$

$$R_{SP} = - \left[\begin{array}{c} 2 \frac{\cos \phi_i}{\beta_1} \\ \left[aa * bb + cc * dd \frac{\cos \theta_i}{\alpha_2} \frac{\cos \phi_t}{\beta_2} \right] * \frac{1}{DD} \\ pp * \frac{\beta_1}{\alpha_1} \end{array} \right] \quad (16)$$

$$\cos \phi_i = \beta_1 * \sqrt{\left(\frac{1}{\beta_1^2}\right) - pp^2}, \quad (17)$$

$$\cos \phi_t = \beta_2 * \sqrt{\left(\frac{1}{\beta_2^2}\right) - pp^2}, \quad (18)$$

$$\cos \theta_r = \alpha_1 * \sqrt{\left(\frac{1}{\alpha_1^2}\right) - pp^2}, \quad (19)$$

$$\cos \theta_t = \alpha_2 * \sqrt{\left(\frac{1}{\alpha_2^2}\right) - pp^2}, \quad (20)$$

$$pp = \frac{\sin \phi_t}{\beta_1}, \quad (21)$$

$$EE = bb \frac{\cos \theta_r}{\alpha_1} + cc \frac{\cos \theta_t}{\alpha_2}, \quad (22)$$

$$FF = bb \frac{\cos \phi_i}{\beta_1} + cc \frac{\cos \phi_t}{\beta_2}, \quad (23)$$

که زوایای θ_i ، ϕ_i ، θ_r و ϕ_r به ترتیب بیانگر زاویه تابش موج P، زاویه بازتابش موج PS، زاویه شکست موج PP و زاویه شکست موج PS هستند. R و T به ترتیب نماد ضرایب بازتاب و عبور هستند. p کندی افقی است.

که ρ ، ν و Z به ترتیب چگالی، سرعت و امپدانس لایه‌های اول و دوم هستند.

در ادامه برای به دست آوردن انرژی هر یک از مدهای لرزه‌ای، روابط انرژی امواج ارائه شده است. این روابط برای موج تابشی P به قرار زیر است:

$$E_{RPP} = |R_{PP}|, \quad (۳۳)$$

$$E_{RPS} = |R_{PS}| \frac{\beta_1 \cos \phi_r}{\alpha_1 \cos \theta_i}, \quad (۳۴)$$

$$E_{TPP} = |T_{PP}| \frac{\rho_2 \alpha_2 \cos \theta_i}{\rho_1 \alpha_1 \cos \theta_i}, \quad (۳۵)$$

$$E_{TPS} = |T_{PS}| \frac{\rho_2 \beta_2 \cos \phi_i}{\rho_1 \alpha_1 \cos \theta_i}, \quad (۳۶)$$

که E_{RPP} و E_{TPP} به ترتیب ضریب انرژی موج P-P بازتابی و عبوری، E_{RPS} و E_{TPS} به ترتیب ضریب انرژی موج P-S بازتابی و عبوری است که به ضرایب نات معروفند (نات، ۱۸۹۹). به همین ترتیب برای موج تابشی SV خواهیم داشت (تولی و همکاران، ۱۹۶۵):

$$E_{RSS} = |R_{SS}|, \quad (۳۷)$$

$$E_{RSP} = |R_{SP}| \frac{\alpha_1 \cos \theta_r}{\beta_1 \cos \phi_i}, \quad (۳۸)$$

$$E_{TSS} = |T_{SS}| \frac{\rho_2 \beta_2 \cos \phi_i}{\rho_1 \beta_1 \cos \phi_i}, \quad (۳۹)$$

$$E_{TSP} = |T_{SP}| \frac{\rho_2 \alpha_2 \cos \theta_i}{\rho_1 \beta_1 \cos \phi_i}, \quad (۴۰)$$

که E_{RPP} و E_{TPP} به ترتیب ضریب انرژی موج S-S بازتابی و عبوری، E_{RPS} و E_{TPS} به ترتیب ضریب انرژی موج S-P بازتابی و عبوری است. لازم به ذکر است که مقادیر

$$GG = (aa - dd) \frac{\cos \theta_r \cos \phi_i}{\alpha_1 \beta_2}, \quad (۲۴)$$

$$HH = (aa - dd) \frac{\cos \theta_i \cos \phi_i}{\alpha_2 \beta_1}, \quad (۲۵)$$

$$DD = (EE * FF) + (GG * HH * pp^2), \quad (۲۶)$$

$$aa = \rho_2 (1 - 2\beta_2^2 pp^2) - \rho_1 (1 - 2\beta_1^2 pp^2), \quad (۲۷)$$

$$bb = \rho_2 (1 - 2\beta_2^2 pp^2) + 2\rho_1 (\beta_1^2 pp^2), \quad (۲۸)$$

$$cc = \rho_1 (1 - 2\beta_1^2 pp^2) + 2\rho_2 (\beta_2^2 pp^2), \quad (۲۹)$$

$$dd = 2(\rho_2 \beta_2^2 - \rho_1 \beta_1^2), \quad (۳۰)$$

که زوایای θ_r ، ϕ_i ، θ_i و ϕ_r به ترتیب بیانگر زاویه بازتابش موج SP، زاویه تابش موج S، زاویه شکست موج SP و زاویه شکست موج SS هستند. R و T به ترتیب نماد ضرایب بازتاب و عبور هستند، و pp کندی افقی است.

در حالت تابش عمود بر مرز مشترک دو لایه، دامنه امواج تنها به سرعت و چگالی (امپدانس صوتی) لایه بستگی دارد. اگر دامنه یک موج تراکمی با پرتو نرمال را A_0 ، دامنه پرتو انکساری در فصل مشترک دو لایه را پس از انکسار A_2 و دامنه پرتو بازتاب شده به سطح زمین را با A_1 نشان داده شود، با استناد به نظریه اصل بقای انرژی، مجموع انرژی‌های انکساری و بازتابی برابر با انرژی تولید شده از چشمه است (قاسم‌العسگری، ۱۳۸۳).

ضریب بازتاب (R)، عبارت است از نسبت دامنه پرتو بازتابی A_1 به دامنه پرتو منتشره A_0 است ($R=A_1/A_0$).

$$R = \frac{\rho_2 \nu_2 - \rho_1 \nu_1}{\rho_2 \nu_2 + \rho_1 \nu_1} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}, \quad (۳۱)$$

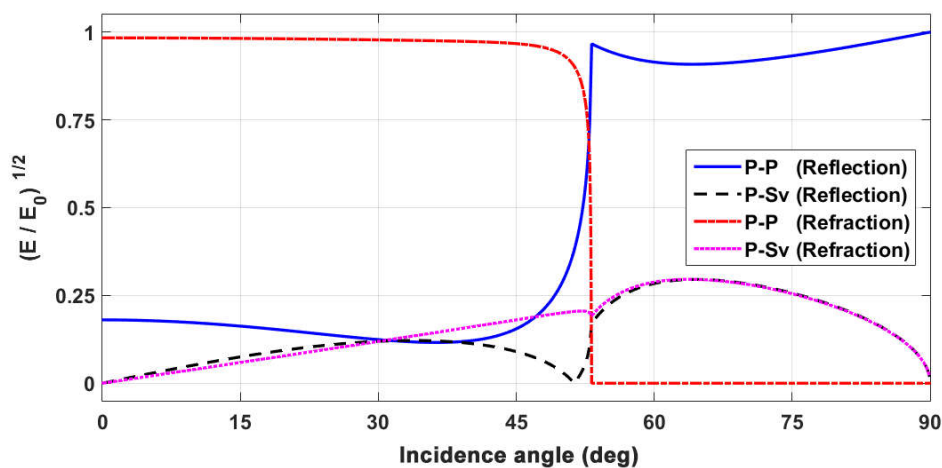
ضریب انکسار (T)، نسبت دامنه A_2 به دامنه A_0 است ($T=A_2/A_0$).

$$T = \frac{2\rho_1 \nu_1}{\rho_2 \nu_2 + \rho_1 \nu_1} = \frac{2Z_1}{Z_2 + Z_1}, \quad (۳۲)$$

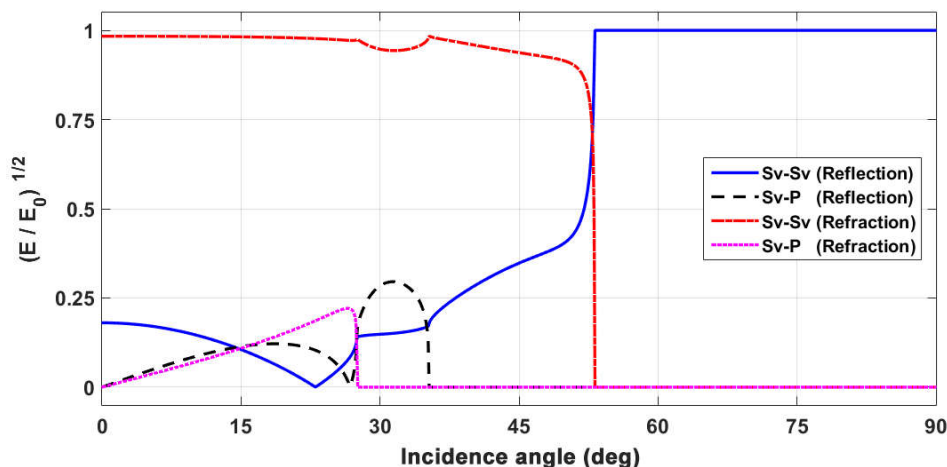
امپدانس حد واسط و دیگری دارای اختلاف امپدانس زیاد است، بهره جست تا ابتدا تغییرات انرژی این امواج را نسبت به زاویه تابش بر اساس معادلات زوپریتز بررسی کرد و سپس به بررسی تغییرات دامنه و فاز این امواج نسبت به دورافت پرداخت. البته این نکته لازم به ذکر است که زاویه تابش امواج تبدیل یافته بازتابی برابر زاویه بازتابش نیست. مشخصات مدل‌های مورد مطالعه به شرح جدول ۱ است.

ضرایب بازتاب و عبوری (R و T) از حل معادلات زوپریتز به دست می‌آیند.

۴ ساخت مدل مصنوعی و بررسی نحوه توزیع انرژی در مرز مشترک لایه‌ها بر اساس زاویه تابش
تغییرات ضرایب بازتاب امواج نسبت به زاویه تابش و یا دورافت، به‌عنوان یک ابزار کلیدی در تفسیر لرزه‌ای به‌حساب می‌آید. از این‌رو برای دستیابی به یک دید کلی از نحوه تغییرات انرژی امواج تبدیل یافته می‌توان از دو مدل زمین‌شناسی مصنوعی که یکی دارای اختلاف



(الف)

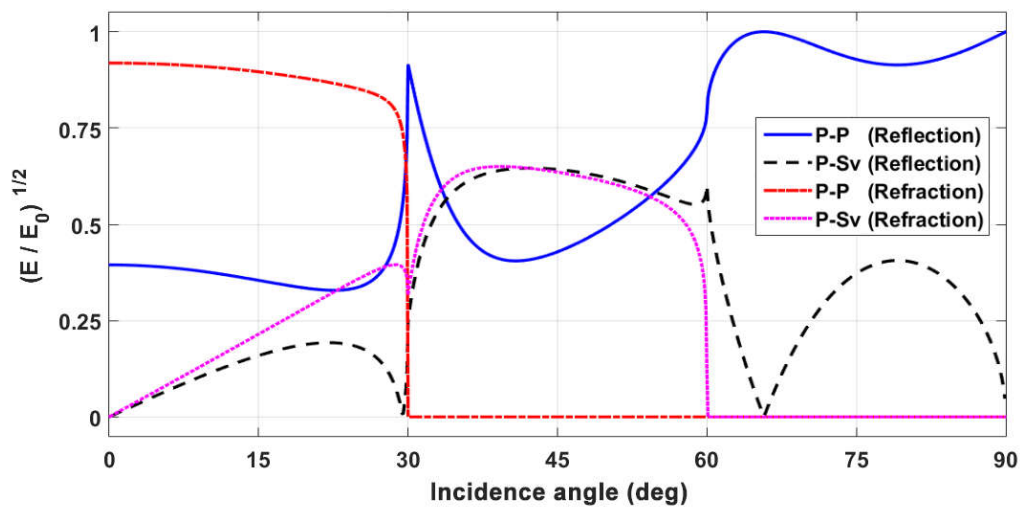


(ب)

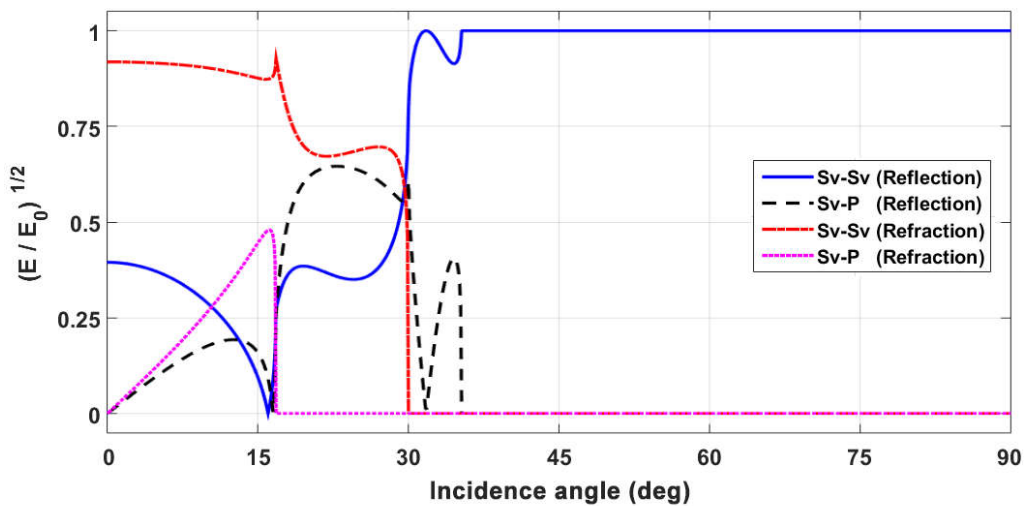
شکل ۳. ضرایب مجذور نسبت انرژی امواج در حین تقسیم انرژی در مرز لایه‌ها برحسب زاویه تابش برای (الف) موج تابشی فشارشی (P) مدل اول، (ب) موج تابشی برشی (S) مدل اول.

بحرانی اتفاق می افتد. البته این نکته قابل ذکر است که این نمودارها به ازای شرایط مختلف محیطی تغییر می کنند. حالت دوم: زمانی که موج تابشی، از نوع برشی (S) باشد. با توجه به مشخصات فیزیکی هر یک از مدل ها و منحنی های شکل های ۳ و ۴ نتایج زیر حاصل می شود:

نمودارهای شکل های ۳ و ۴ که با استفاده از نرم افزار MATLAB تولید شده است، توزیع انرژی امواج در فصل مشترک دو لایه با مشخصات فوق را نشان می دهند. در این بخش، انرژی چهار مد P و S بازتابیده، S و P عبوری، قابل بررسی است. حالت اول: زمانی که موج تابشی، از نوع فشارشی (P) باشد. مشاهده می شود که تغییرات قابل ملاحظه در زاویه



(الف)



(ب)

شکل ۴. ضرایب مجذور نسبت انرژی امواج در حین تقسیم انرژی در مرز لایه ها برحسب زاویه تابش برای (الف) موج تابشی فشارشی (P) مدل دوم، (ب) موج تابشی برشی (S) مدل دوم.

جدول ۱. مشخصات مدل مصنوعی زمین‌شناسی.

لایه دوم			لایه اول			نوع
α_2 (m/s)	β_2 (m/s)	ρ_2 (kg/m ³)	α_1 (m/s)	β_1 (m/s)	ρ_1 (kg/m ³)	
۲۵۰۰	۱۴۴۳	۲۶۰۰	۲۰۰۰	۱۱۵۴	۲۱۰۰	مدل اول
۴۰۰۰	۲۳۰۹	۳۰۰۰	۲۰۰۰	۱۱۵۴	۲۱۰۰	مدل دوم

جدول ۲. زوایای بحرانی برای امواج حاصل از موج P تابشی.

$\theta_2 = \sin^{-1}(\alpha_1/\beta_2)$	$\theta_1 = \sin^{-1}(\alpha_1/\alpha_2)$	زوایای بحرانی
-	۵۳.۱۳	مدل اول
۶۰	۳۰	مدل دوم

جدول ۳. زوایای بحرانی برای امواج حاصل از موج Sv تابشی.

$\theta_5 = \sin^{-1}(\beta_1/\beta_2)$	$\theta_4 = \sin^{-1}(\beta_1/\alpha_1)$	$\theta_3 = \sin^{-1}(\beta_1/\alpha_2)$	زوایای بحرانی
۵۳.۱۰	۳۵.۲۴	۲۷.۴۹	مدل اول
۲۹.۹۸	۳۵.۲۴	۱۶.۷۷	مدل دوم

گلدارت، ۱۹۹۵). البته می‌توان به این مورد هم اشاره کرد که در اختلاف امپدانس‌های خیلی شدید، در زاویه تابش زیاد هم امکان بیشتر بودن انرژی امواج P-Sv از P-P وجود دارد.

۵- با توجه به شکل‌های ۳-ب و ۴-ب، مشاهده می‌شود که در حالت تبدیل مد Sv به P، موج P عبوری تبدیل یافته در لایه‌هایی با اختلاف امپدانس حد متوسط به بالا، دامنه قابل ملاحظه‌ای ندارند و بیشتر انرژی به صورت P بازتابی است. بنابراین برای بررسی امواج Sv-P، تبدیل مد فقط در حالت بازتابی بررسی می‌شود؛ یا به عبارت دیگر انرژی موج تبدیل یافته P در حالت بازتابی به مراتب بیشتر از عبوری است. منظور این است که کل موج تابشی به صورت Sv بوده و موج بازتابی کلاً به صورت موج P باشد (گای، ۲۰۰۴). هرچند این موضوع در زوایای تابش کمتر برای P-Sv صادق نیست ولی اکثر مطالعات برای مد P-Sv، بر اساس P تابشی و Sv بازتابی صورت گرفته است. چون زمانی که موج تابشی به صورت طولی باشد، در لایه‌هایی با اختلاف امپدانس زیاد، امواج برشی عبوری

۱- امواج تبدیل یافته در حالت تابش عمود فاقد انرژی است (شریف و گلدارت، ۱۹۹۵).

۲- دامنه امواج بازتابی، علاوه بر عمق بازتابنده، تابعی از زاویه تابش است که خود تابعی از فواصل بین چشمه و گیرنده است.

۳- با توجه به شکل ۳، در مدلی که اختلاف امپدانس بین لایه‌ها به صورت حد واسط باشد، بسته به موج تابشی (P یا Sv)، حداکثر انرژی بازتابی، پس از زاویه بحرانی (θ_1 برای امواج P-Sv و θ_5 برای امواج Sv-P) مربوط به همان مد تابشی است. به عنوان مثال، برای موج تابشی از نوع P، بیشترین انرژی بازتابی مربوط موج P بازتابی خواهد بود نه Sv بازتابی.

۴- با توجه به شکل ۴، در لایه‌هایی با اختلاف امپدانس شدید در زوایای میانی انرژی امواج P-Sv بیشتر از P-P و از زاویه صفر تا زاویه بحرانی به ازای زوایای بیشتری، انرژی امواج Sv-P بیشتر از Sv-Sv است (مثلاً در مدل دوم به ازای زوایای ۳۵-۵۰ درجه برای امواج P-Sv و در زوایای ۱۵-۳۰ درجه برای امواج Sv-P) (شریف و

به نسبت‌های سرعت دو محیط لرزه‌ای وابسته است و عمدتاً مابین زوایای تابش $\theta_3 = \sin^{-1}(\beta_1/\alpha_2)$ و $\theta_4 = \sin^{-1}(\beta_1/\alpha_1)$ رخ می‌دهد.

۸- در شکل ۳ مشاهده می‌شود که در زوایای کمتر، با افزایش زاویه تابش، دامنه موج P بازتابی کاهش می‌یابد درحالی‌که در همان بازه، دامنه امواج P-Sv افزایش می‌یابد تا اینکه به نقطه‌ای می‌رسد که به‌طور آشکار دامنه امواج P بازتابی شروع به افزایش می‌کند که این نقطه همان زاویه بحرانی است و از رابطه $\theta_1 = \sin^{-1}(\alpha_1/\alpha_2)$ قابل محاسبه است از سوی دیگر از این زاویه به بعد امواج طولی عبوری به لایه دوم در حول نقطه بحرانی اول فاقد انرژی هستند (شریف و گلدارت، ۱۹۹۵).

در ادامه برای داشتن دید کلی از توزیع انرژی در شرایط محیطی مختلف، ضرایب مجذور نسبت انرژی امواج بازتابی P-Sv و Sv-P برحسب زاویه تابش بر اساس حل معادلات زوپریتر در نرم‌افزار متلب و تئوری انتشار امواج ارائه شده است. شرایط حاکم در هر مورد به شرح زیر است:

الف) به‌ازای نسبت‌های سرعت V_{p2}/V_{p1} متفاوت با $V_p/V_s = 1.7321$ و $\rho_1 = \rho_2$

ب) به‌ازای نسبت‌های چگالی ρ_2/ρ_1 متفاوت با $V_p/V_s = 1.7321$ و $V_{p2}/V_{p1} = 1.5$

ج) به‌ازای نسبت‌های سرعت V_p/V_s متفاوت با $V_{p2}/V_{p1} = 1.5$ و $\rho_2/\rho_1 = 1.25$

این شرایط را برای امواج P-Sv، شکل ۵ و برای امواج Sv-P، شکل ۶ نشان می‌دهد.

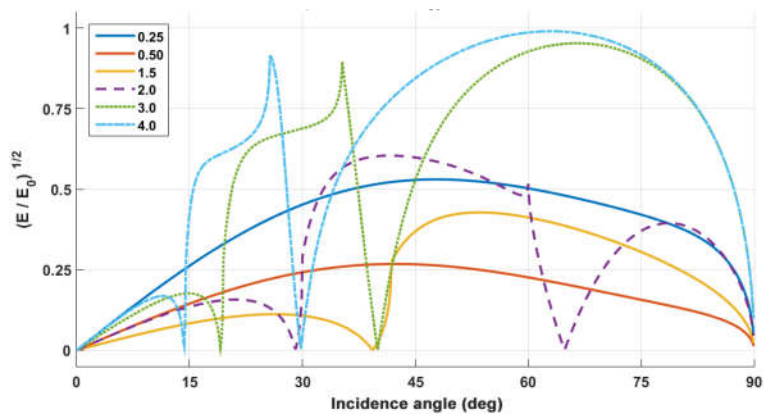
اختلاف امپدانس شدید تأثیر زیادی در داده‌های حول زاویه بحرانی می‌گذارد که خود تابعی از سرعت لایه‌ها و زاویه تابش است. تعداد زوایای بحرانی با افزایش اختلاف سرعت دو لایه، افزایش می‌یابد (بوچالا و گوئو، ۲۰۱۴)؛ از سوی دیگر باعث می‌شود در زوایای تابش بیشتری، امواج تبدیل یافته، انرژی بیشتری نسبت به امواج اصلی

به لایه دوم در حول زاویه بحرانی دوم $(\theta_2 = \sin^{-1}(\alpha_1/\beta_2))$ فاقد انرژی است (شریف و گلدارت، ۱۹۹۵).

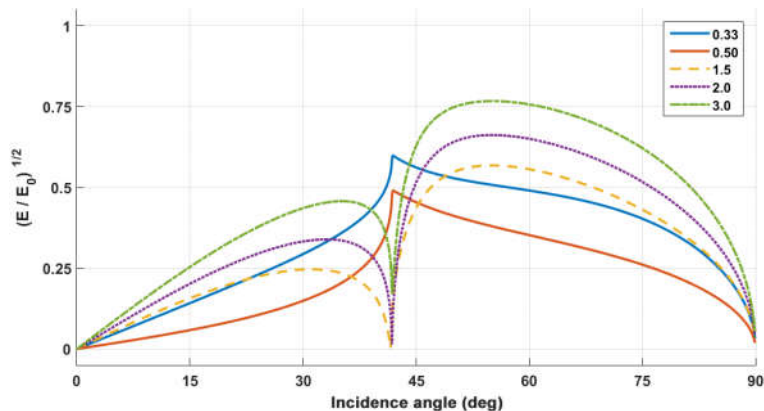
۶- با توجه به شکل ۳، برای برداشت امواج P-Sv زوایای بزرگ‌تر از زاویه بحرانی نیاز است که منجر به طول برداشت نسبتاً بزرگ‌تری می‌شود (ییلماز، ۲۰۰۱ و هاردیج، ۲۰۱۲) ولی بازتاب امواج Sv-P قبل از زاویه بحرانی اتفاق می‌افتد. پس به‌عنوان مثال، برای بازتابنده افقی در مدل شماره ۱ با نسبت سرعت ۱.۷۳۲۱، حداکثر تبدیل انرژی از موج P به Sv در حدود زاویه تابش ۶۴ درجه و زاویه بازتابش ۳۱ درجه و حداکثر تبدیل امواج Sv-P در حول زاویه تابش ۳۱ درجه و زاویه بازتابش ۶۴ درجه رخ می‌دهد. برای یک بازتابنده افقی، به دلیل تقارن مسیر این دو موج برای یک گیرنده، تقریباً در دورافت یکسانی ثبت می‌شوند. حال اگر بخواهیم محل ثبت حداکثر دامنه امواج تبدیل یافته را بر اساس دورافت بیان کنیم، نیازمند پارامترهای سرعت و عمق بازتابنده هستیم.

۷- با توجه به شکل ۳-الف و قانون اسنل، به دلیل کوچک‌تر بودن زاویه بازتابش موج Sv نسبت به موج P، امواج P-Sv، همواره در تمامی زوایای دارای انرژی خواهند بود و هیچ محدودیتی وجود ندارد. ولی به دلیل بزرگ‌تر بودن زاویه بازتابش موج P نسبت به موج Sv، انرژی امواج Sv-P محدود به زاویه θ_4 می‌شود که از رابطه $\theta_4 = \sin^{-1}(\beta_1/\alpha_1)$ محاسبه می‌شود. به‌عبارت‌دیگر، برای زوایای بزرگ‌تر از θ_4 ، انرژی موج بازتابی Sv-P همواره صفر خواهد بود. از سوی دیگر با توجه به قانون اسنل، شکست موج Sv به P همواره کمتر از زاویه $\theta_3 = \sin^{-1}(\beta_1/\alpha_2) = 27.5$ البته لازم به ذکر است که زوایای فوق به نسبت‌های سرعت لایه‌ها وابسته‌اند و مقادیر عددی به‌دست‌آمده صرفاً برای بررسی مدل فوق است. بنابراین، زاویه‌ای که در آن حداکثر تبدیل انرژی موج P تابشی به موج Sv بازتابی رخ می‌دهد،

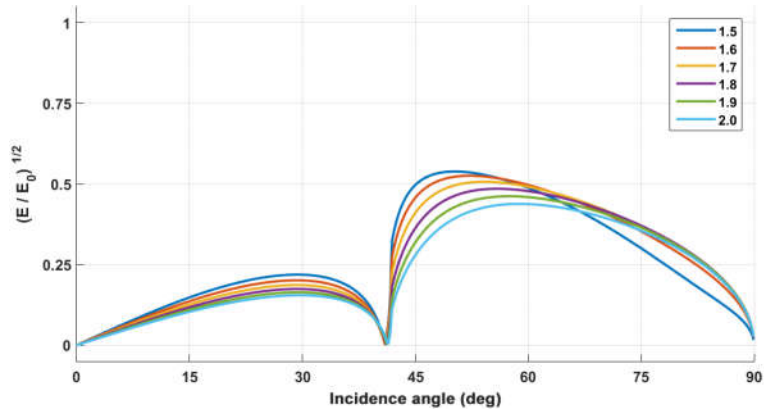
داشته باشند. در حالت کلی با توجه به شکل های ۵-الف و ۶-ب و هر چه نسبت های سرعت V_{P2}/V_{P1} و V_P/V_S و نسبت های چگالی ρ_2/ρ_1 افزایش یابد، انرژی امواج بازتابی تبدیل یافته افزایش می یابد.



(الف)

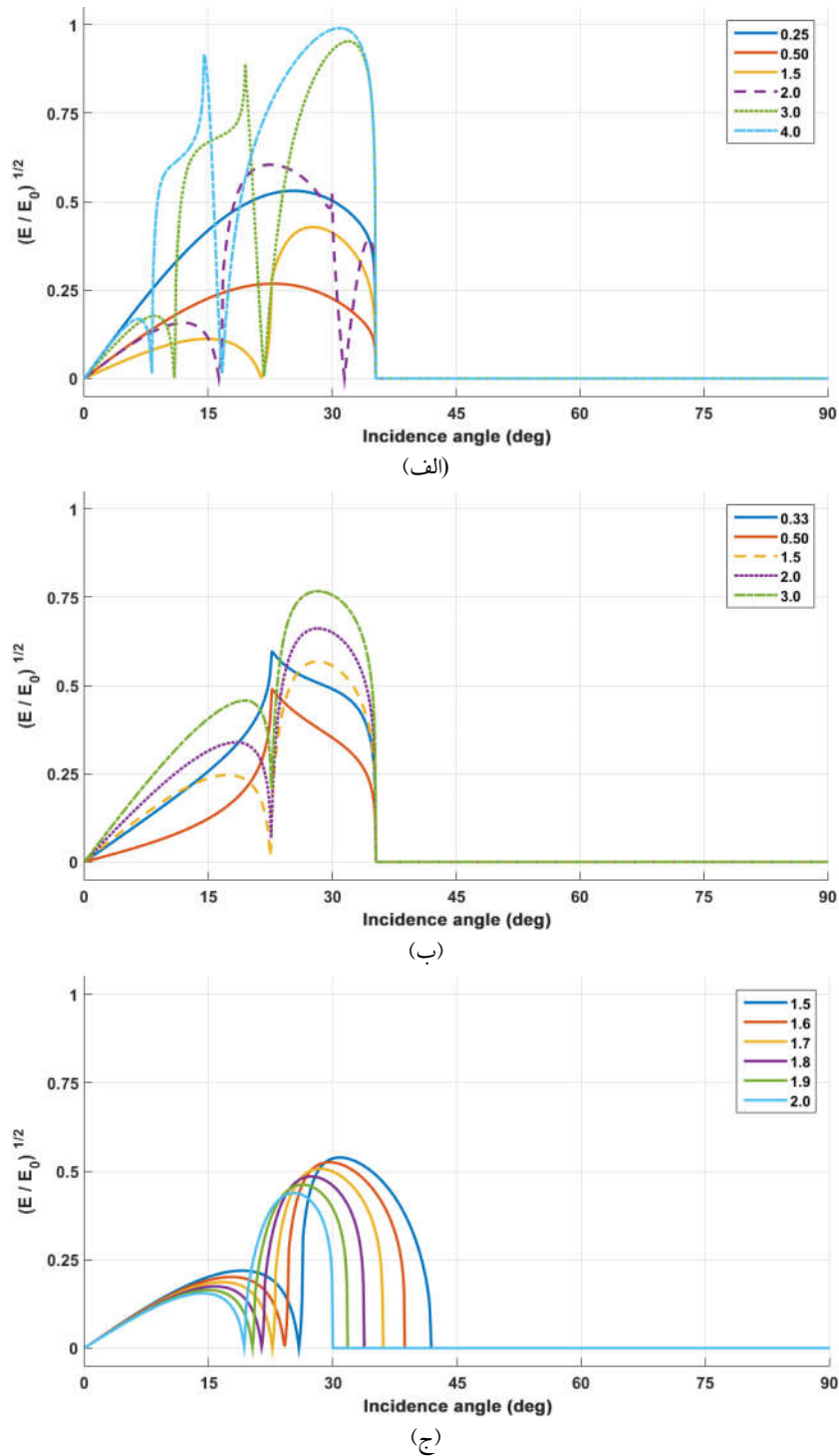


(ب)



(ج)

شکل ۵. ضرایب مجذور نسبت انرژی امواج در حین تقسیم انرژی در مرز لایه ها برحسب زاویه تابش برای موج P-Sv: (الف) به ازای نسبت های سرعت $V_P/V_S = 1.7321$ و $\rho_1 = \rho_2$ متفاوت با $V_{P2}/V_{P1} = 1.5$ و $V_P/V_S = 1.7321$ ، (ب) به ازای نسبت های چگالی ρ_2/ρ_1 متفاوت با $V_{P2}/V_{P1} = 1.5$ و $V_P/V_S = 1.7321$ ، (ج) به ازای نسبت های سرعت V_P/V_S متفاوت با $V_{P2}/V_{P1} = 1.5$ و $\rho_2/\rho_1 = 1.25$.



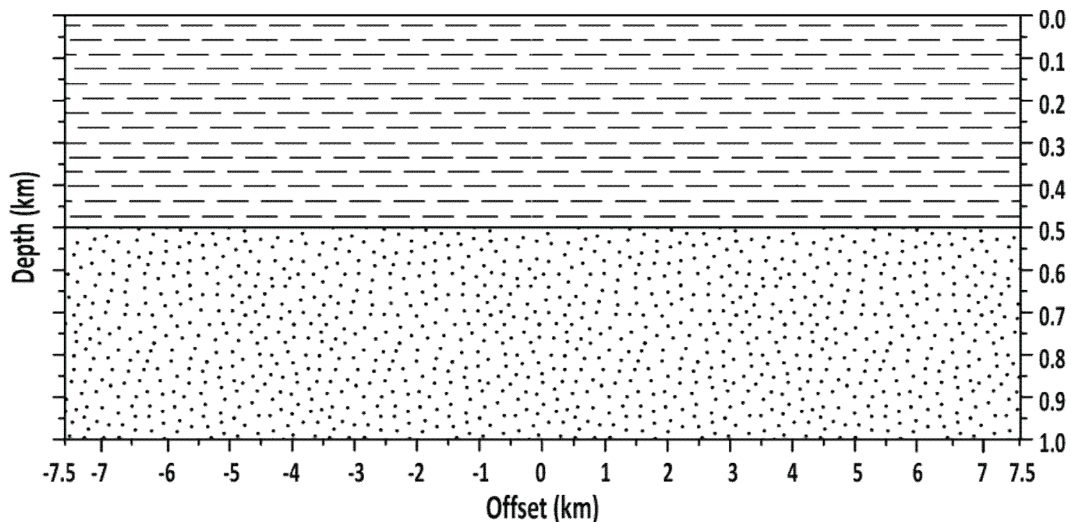
شکل ۶. ضرایب مجذور نسبت انرژی امواج در حین تقسیم انرژی در مرز لایه‌ها بر حسب زاویه تابش برای موج SV-P؛ (الف) به‌ازای نسبت‌های سرعت V_p/V_s متفاوت با $\rho_1 = \rho_2$ و $V_p/V_s = 1.7321$ ، (ب) به‌ازای نسبت‌های چگالی ρ_2/ρ_1 متفاوت با $V_p/V_s = 1.7321$ و $\rho_1 = \rho_2$ ، و (ج) به‌ازای نسبت‌های سرعت V_p/V_s متفاوت با $V_p/V_s = 1.5$ و $\rho_2/\rho_1 = 1.25$.

۵ مدل‌سازی امواج تبدیل یافته در مدل زمین-شناسی با لایه‌های افقی

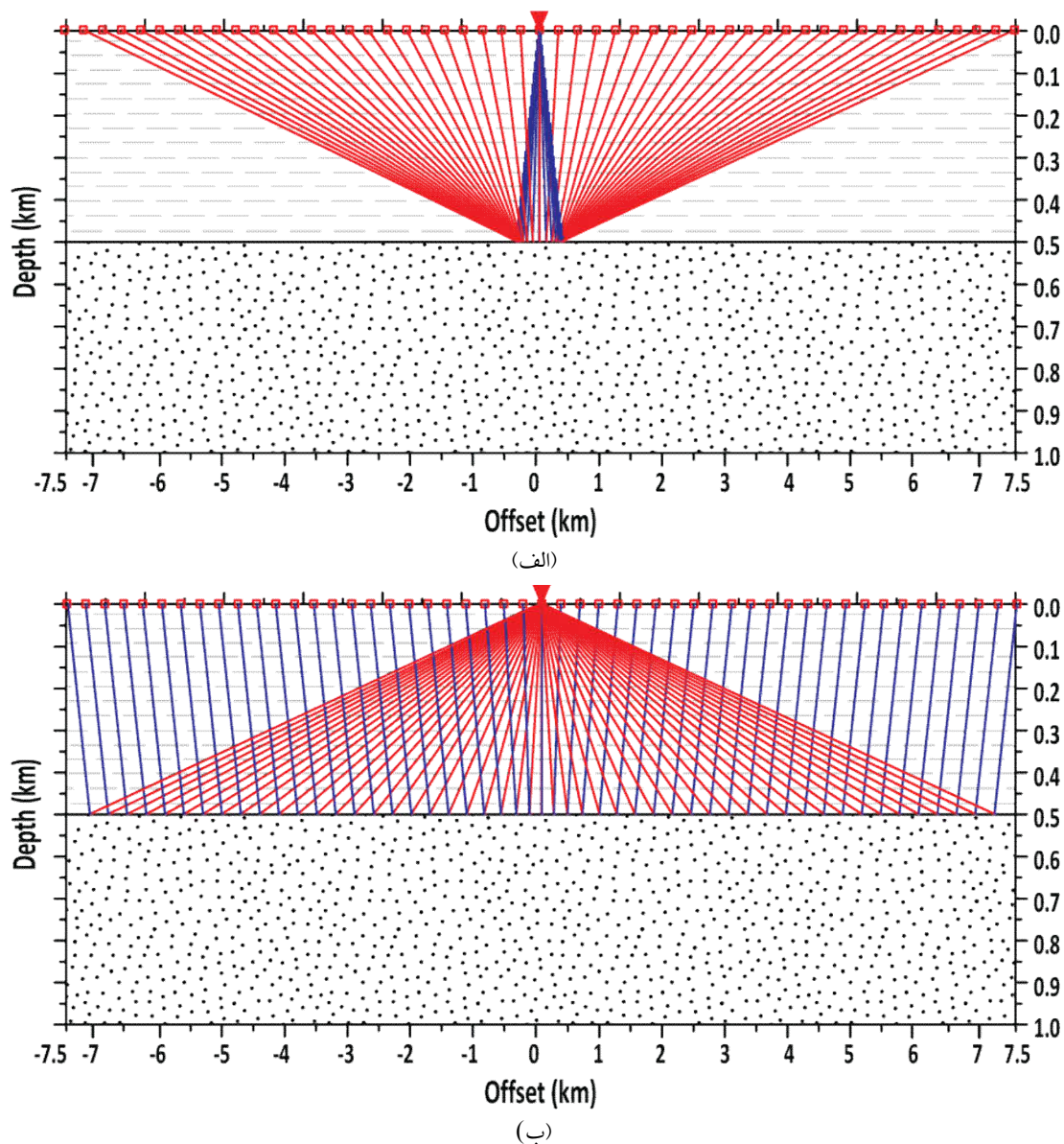
با داشتن مدل‌های زمین‌شناسی مختلف، ردیابی امواج تبدیل یافته و امواج اصلی با استفاده از روش ردیابی پرتو امکان‌پذیر است که می‌توان هم از مدل پیچیده و هم از مدل ساده استفاده کرد که در این بخش برای ارائه هرچه بهتر مطالب از مدل ساده استفاده شده است. جهت انجام مطالعات مدل‌سازی پیش رو برای بررسی امواج تبدیل یافته در بازتاب‌کننده افقی از نرم‌افزار NORSAR استفاده شده است که ابتدا یک مدل مصنوعی زمین‌شناسی طراحی شده که مشخصات لایه‌ها و پارامترهای عملیاتی در جدول ۴ ارائه شده است. شکل ۷ مدل مصنوعی زمین‌شناسی طراحی شده است.

شکل‌های ۸ و ۹، مسیر انتشار هر دو مدل امواج تبدیل یافته، توسط چشمه تا گیرنده‌ها را نشان می‌دهد که از مطالعات ردیابی پرتو حاصل شده است (البته لازم به ذکر است که جهت نمایش خطوط مسیر پرتوها، تعداد گیرنده‌ها به ۵۱ عدد کاهش داده شده است).

در این بخش به بررسی مسیر طی شده مابین چشمه و گیرنده توسط امواج تبدیل یافته پرداخته شده است. در بازتابنده‌های افقی، طول مسیر طی شده توسط هر دو موج بازتابی P-Sv و Sv-P یکسان است ولی نسبت به طول مسیر امواج اصلی P-P و S-S، طولانی‌تر هستند. پس انتظار می‌رود که با توجه به اینکه چه مقدار از مسیر را با کدام سرعت طی کرده باشد، پاسخ‌های مربوط به امواج تبدیل یافته در نگاشت لرزه‌ای با زمان‌های متفاوتی نسبت به امواج اصلی P-P و S-S ثبت شوند. از سوی دیگر چون این مدل به صورت همسانگرد است، خطوط مسیر انتشار امواج، به صورت خط راست است. در شکل‌های ۸-الف و ۹ خطوط آبی نشان‌دهنده‌ی موج S و خطوط قرمز نشان‌دهنده‌ی موج P است. با توجه به برابری طول مسیر هر دو مدل P-Sv و Sv-P در بازتابنده افقی و از سوی دیگر طول مسیری که با سرعت موج S و طول مسیری که با سرعت موج P می‌پیماید، در دو حالت و برای هر دو سمت چشمه برابری (شکل ۹). پس نتیجه‌گیری می‌شود که هذلولوی ثبت شده (به صورت دو بعدی) برای هر دو



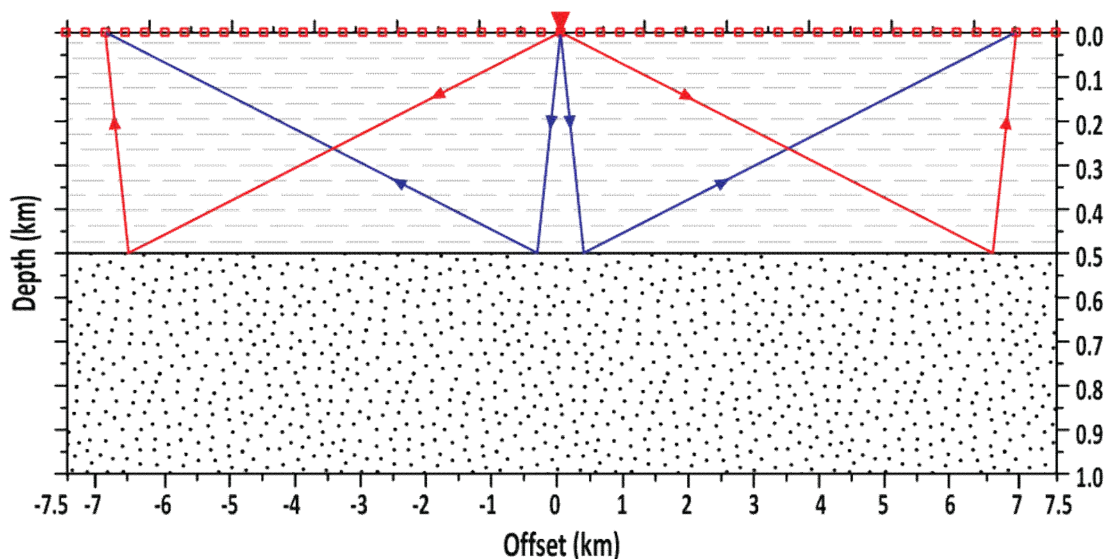
شکل ۷. مدل همسانگرد مصنوعی زمین‌شناسی طراحی شده با بازتابنده‌های افقی.



شکل ۸. مسیر پرتوهای امواج (الف) SV-P، و (ب) P-Sv. مسیر پرتوهای موج S به رنگ آبی و موج P به رنگ قرمز است.

باید توجه داشت که برای گیرنده‌های قائم، با توجه به نوع ارتعاش ذرات، امواج SV-P دامنه بیشتری نسبت به امواج P-Sv خواهند داشت.

مد برهم منطبق بوده ولی متناسب با جهت گیری گیرنده و بردار جابه‌جایی موج در محل گیرنده تنها بخشی از انرژی این امواج ثبت می‌شوند. معمولاً برای یک مرز، اول موج PP، سپس امواج تبدیل یافته SP و PS و در نهایت موج SS ثبت می‌شود.



شکل ۹. پرتوهای امواج P-Sv و Sv-P برای بازتابنده‌های افقی مرتبط با دورترین گیرنده. مسیر پرتوهای موج Sv-P به رنگ آبی و موج P-Sv به رنگ قرمز است.

جدول ۴. مشخصات مدل مصنوعی زمین‌شناسی.

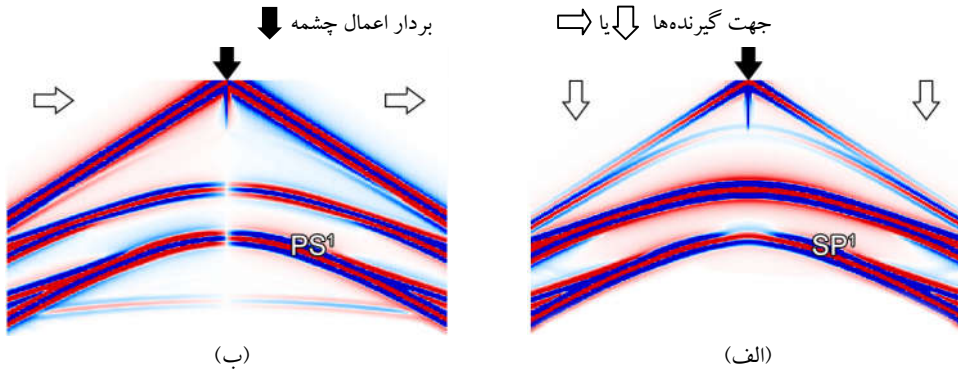
H (m)	D (kg/m ³)	V _S (m/s)	V _P (m/s)	جنس تقریبی لایه
۵۰۰	۲۱۰۰	۱۱۵۴	۲۰۰۰	شیل و رس اشباع
۵۰۰	۲۶۰۰	۱۴۴۳	۲۵۰۰	ماسه سنگ اشباع

مشخصات عملیاتی				
محل چشمه	تعداد چشمه	فواصل ژئوفون‌ها	تعداد ژئوفون‌ها	طول پروفیل
در وسط پروفیل	یک عدد	۱.۵ متر	۱۰۰۰۰ عدد	۱۵۰۰۰ متر

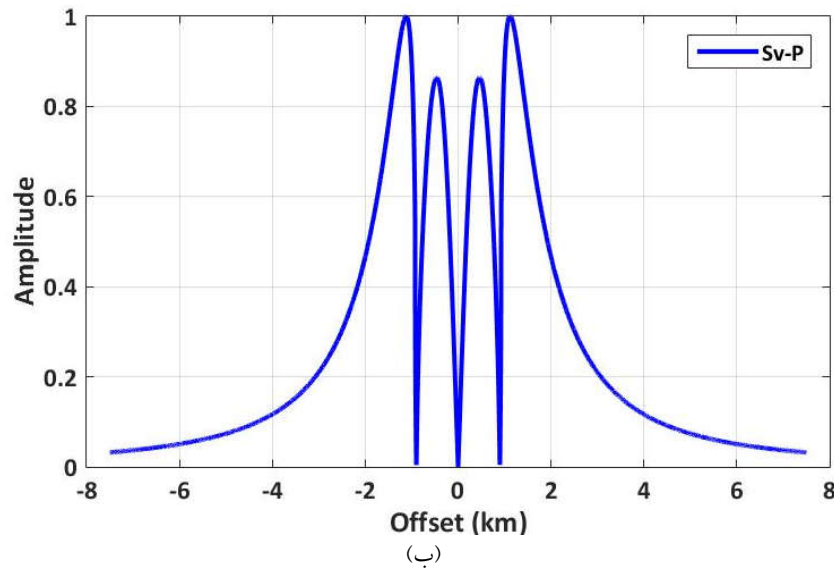
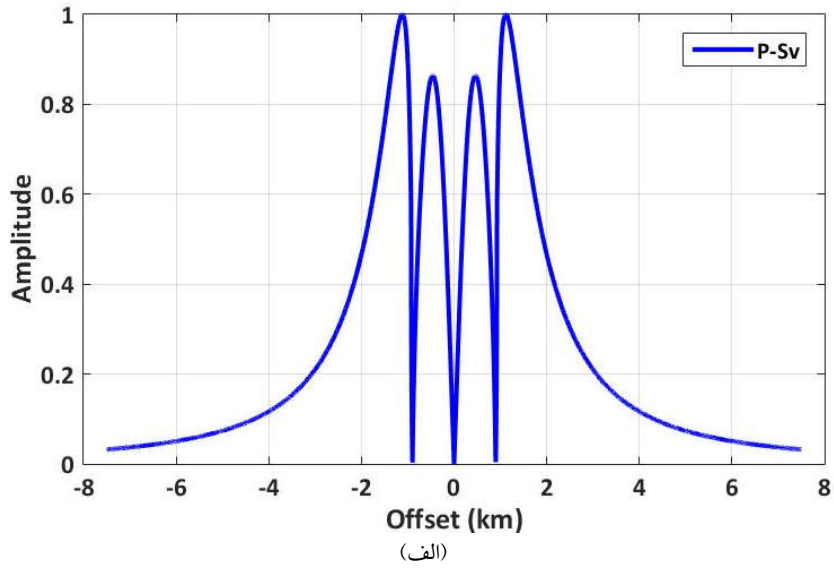
ژئوفون‌های قائم که امکان تداخل بین بازتابی‌های Sv-P و P-P وجود دارد و یا استخراج اطلاعات امواج P-Sv از داده‌های گیرنده‌های افقی که در آن هم امکان تداخل مابین مدهای P-Sv و Sv-Sv وجود دارد، مطالعه فاز و دامنه این امواج می‌تواند در راستای شناسایی انرژی این امواج خیلی کارآمد باشد.

۶ بررسی تغییرات دامنه و فاز امواج تبدیل یافته

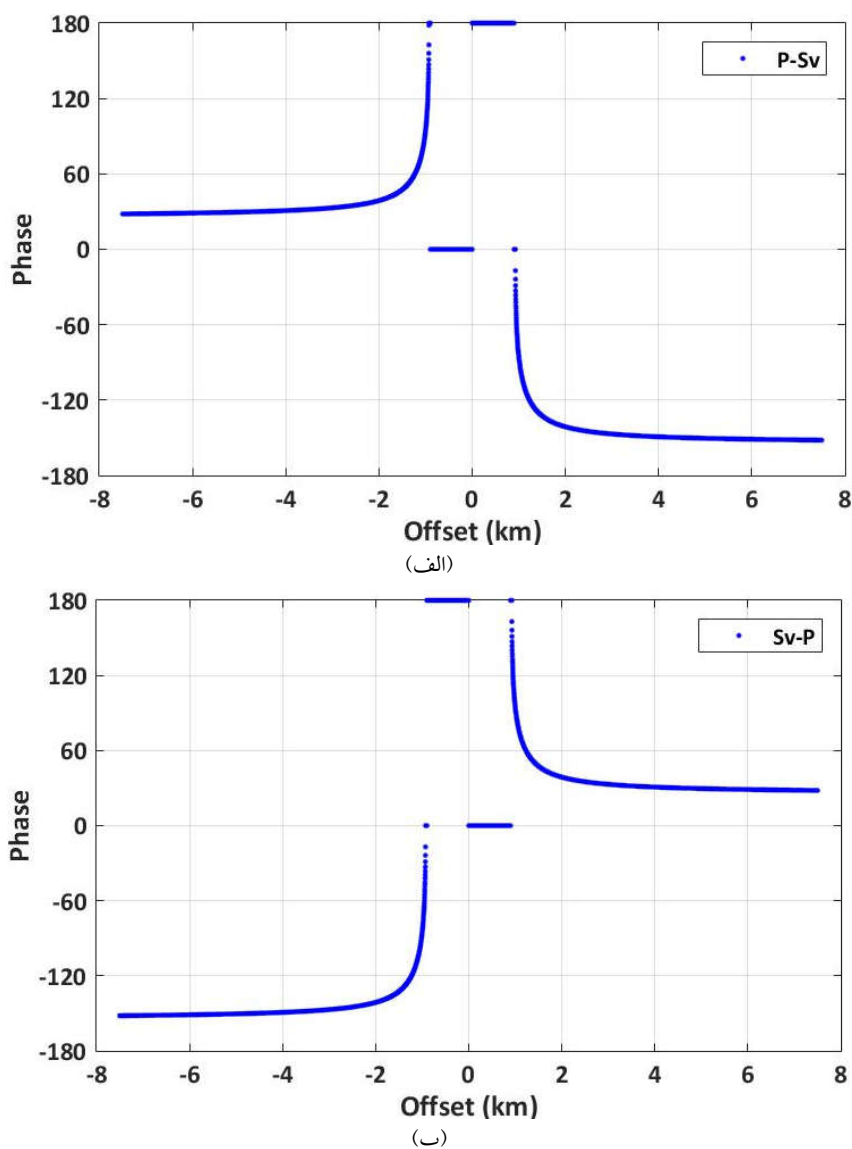
ساخت مدل، اطلاعات و راهنمایی‌های خیلی ارزشمندی برای پردازش کننده داده‌های لرزه‌ای که می‌خواهد اطلاعات امواج تبدیل یافته را استخراج کند، فراهم می‌آورد. برای استخراج اطلاعات امواج Sv-P از داده‌های



شکل ۱۰. مقطع لرزه‌ای حاصل از مدلسازی پیشرو؛ (الف) چشمه قائم - گیرنده قائم (ب) چشمه قائم - گیرنده افقی.



شکل ۱۱. تغییرات دامنه امواج (الف) P-Sv و (ب) Sv-P برحسب دورافت.



شکل ۱۲. تغییرات فاز (الف) امواج P-Sv و (ب) امواج Sv-P برحسب دورافت در حالتی که جهت‌های چشمه و گیرنده برهم عمود باشند.

- ۱- در صورت عدم هم‌جهت بودن چشمه و گیرنده، فاز امواج تبدیل یافته دو سمت چشمه معکوس یکدیگرند (هاردیچ و واگنر، ۲۰۱۴) (شکل ۱۰-ب، ۱۲).
- ۲- در صورت هم‌جهت بودن چشمه و گیرنده، فاز امواج تبدیل یافته دو سمت چشمه یکسان هستند (هاردیچ و واگنر، ۲۰۱۴) (شکل ۱۰-الف).
- ۳- چشمه‌های قائم تولیدکننده دو مد از امواج تبدیل یافته هستند، ۱- امواج تبدیل یافته به (S-P) P شکل ۱۰-

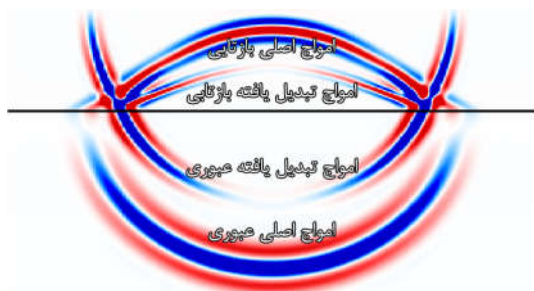
مقطع لرزه‌ای نمایش داده شده در شکل ۱۰، مربوط به مدل مصنوعی زمین‌شناسی ساخته شده در بخش قبل هستند. موجک مورد استفاده در این بخش، موجک Ricker فاز صفر با فرکانس مرکزی ۳۰ هرتز است. در اینجا تغییرات دامنه و فاز امواج تبدیل یافته مربوط به بازتابنده اول مدل سرعت مصنوعی ساخته شده که افقی است، بررسی شده است. نتایج زیر از بررسی نمودارهای فوق حاصل شده‌اند:

روند افزایش و کاهش و برای اختلاف امپدانس شدید حداکثر سه روند افزایش و کاهش خواهیم داشت.

۶- بازتابی‌های امواج SV-SV قدرتمند و دارای انرژی بالا، توسط چشمه‌های قائم ایجاد شده‌اند. این امواج در گیرنده‌های افقی با دامنه خوبی ثبت می‌شوند (شکل ۱۰-۱-ب) درحالی که در گیرنده‌های قائم یا ثبت نمی‌شود یا در صورت ثبت از دامنه پایینی برخوردارند (شکل ۱۰-الف) (هاردیچ و واگنر، ۲۰۱۴).

۷- با توجه به شکل ۱۲ فقط تا دورافت خاصی امواج تبدیل یافته دارای فاز ثابت است و از آن دورافت به بعد تغییرات شدید و غیرخطی فاز شروع می‌شود و باعث می‌شود که از داده‌های مربوط به آن بخش نتوانیم به درستی استفاده کنیم. البته نکته مهم و قابل ذکر این است که با افزایش عمق بازتابنده، دورافتی که فاز در آن ثابت است، افزایش می‌یابد.

شکل ۱۳، جبهه امواج منتشره در محیط لرزه‌ای مدل مصنوعی طراحی شده را نشان می‌دهد که این شکل دوباره تأیید کننده نتایج ۴ و ۵ و نمودارهای فوق است.



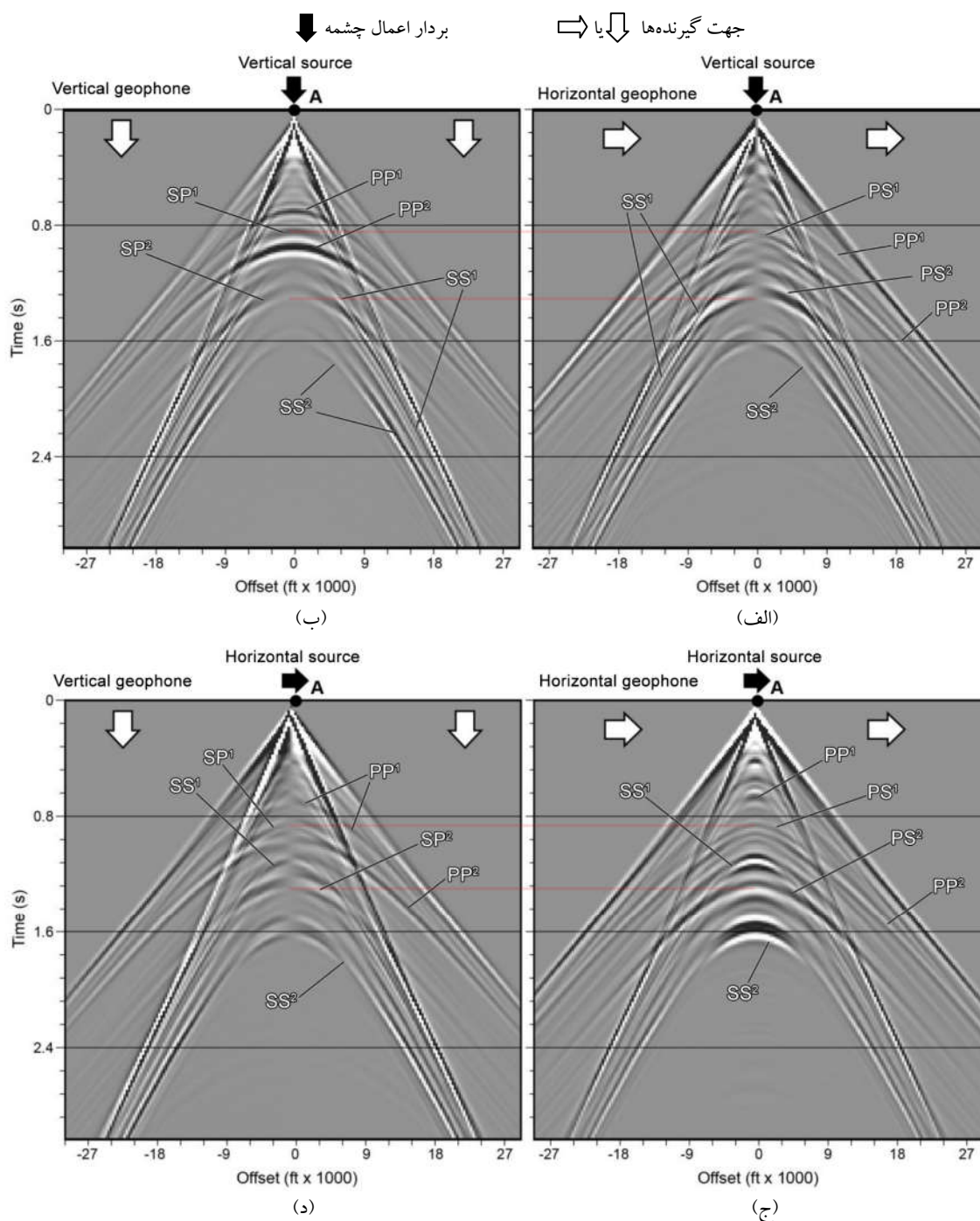
شکل ۱۳. جبهه موج امواج عبوری و بازتابی.

در نهایت می‌توان به این نکته اشاره کرد که نتایج حاصل از بررسی تغییرات دامنه و فاز در مقاطع لرزه‌ای با مدل‌سازی پیشرو، با نتایج حاصل از حل معادلات زوپریتز برای به دست آوردن توزیع انرژی، کاملاً هم‌خوانی داشته و تأیید کننده یکدیگرند.

الف، ۲- امواج تبدیل یافته به SV (P-S) شکل ۱۰-ب. امواج تبدیل یافته به S به‌طور گسترده توسط مفسران استفاده می‌شوند درحالی که امواج تبدیل یافته P، گزینه دیگری برای دستیابی به اطلاعات امواج برشی و تصویر لرزه‌ای S به وجود می‌آورند (هاردیچ و واگنر، ۲۰۱۴). مقایسه دو شکل ۱۰-الف و ب نشان می‌دهد که امواج SV-P ثبت شده توسط گیرنده‌های قائم از لحاظ دورافت و زمان سیر در مختصات مشابه امواج P-SV که توسط گیرنده‌های افقی ثبت شده‌اند، اتفاق می‌افتند. با توجه به منحنی‌های مجذور ضرایب نسبت انرژی امواج تبدیل یافته در شکل ۳، مشاهده می‌شود که زوایای تابشی که امواج P-SV و امواج SV-P از آن حداکثر بازتاب را دارند، متفاوت است. حال این سؤال پیش می‌آید که با توجه به شکل ۱۱ چرا از لحاظ فاصله، ثبت حداکثر این امواج در دورافت یکسانی اتفاق می‌افتد؟! پاسخ به این سؤال در این است که در بازتابنده‌های افقی زاویه تابش امواج SV-P با زاویه بازتابش امواج P-SV برابر است و برعکس و این باعث می‌شود که حداکثر این امواج در دورافت یکسانی ثبت شوند.

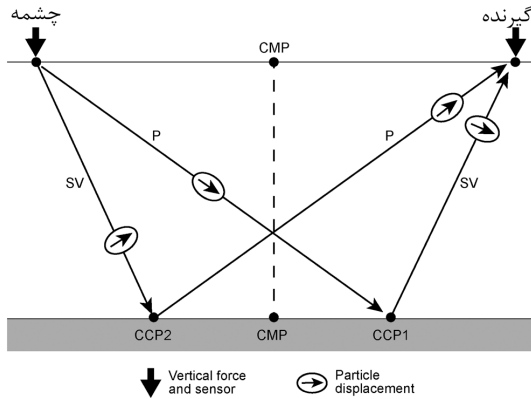
۴- امواج تبدیل یافته در دورافت صفر فاقد دامنه است، چون قبلاً هم اشاره شد که زمانی که موج تابشی به‌صورت عمود بر سطح تابش کند، تبدیل مد نداریم (هاردیچ و واگنر، ۲۰۱۴) (شکل‌های ۱۰، ۱۱).

۵- در مدلی با اختلاف امپدانس حد واسط به‌عنوان مثال در مدلی با نسبت V_p/V_s و چگالی ثابت، V_{p2}/V_{p1} بین ۱ تا نسبت (V_p/V_s) ، دامنه امواج تبدیل یافته با افزایش دورافت، افزایش می‌یابد و سپس پس از گذشت از فاصله‌ای دوباره شروع به کاهش و سپس افزایش می‌نماید که از روی نمودار توزیع انرژی و الگوی تابش هم می‌توان این اصل را اثبات کرد (شکل‌های ۱۰ و ۱۱). البته در حالت کلی، برای اختلاف امپدانس کم فقط یک روند افزایش و کاهش، برای اختلاف امپدانس حد واسط دو



شکل ۱۴. مقاطع لرزه‌ای حاصل از فرآیند مدل‌سازی پیشرو، داده‌های حاصل از (الف) چشمه قائم-گیرنده افقی، (ب) چشمه قائم-گیرنده قائم، (ج) چشمه افقی-گیرنده افقی، (د) چشمه افقی-گیرنده قائم (هاردیچ و واگنر، ۲۰۱۴).

پلاریته تعریف شده توسط آکی و ریچاردز در سال ۱۹۸۰ است.



شکل ۱۵. مسیر انتشار و ارتعاش امواج P و SV حاصل از چشمه قائم (هاردیچ و همکاران، ۲۰۱۴).

۸ بررسی تأثیر ناهمسانگردی محیط بر روی دامنه امواج تبدیل یافته

در این بخش، به بررسی تأثیر دو سیستم ناهمسانگرد VTI و HTI (Horizontal transverse isotropy) محیط، بر روی دامنه و فاز امواج تبدیل یافته پرداخته شده است. شکل ۱۶، نشان-دهنده‌ی مدل سرعت مصنوعی ناهمسانگرد HTI و VTI طراحی شده برای مطالعات این پژوهش است.

شکل ۱۷، تغییرات دامنه امواج P-Sv و Sv-P را برحسب دورافت در محیط‌های ناهمسانگرد نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که تغییرات جانبی سرعت (HTI)، منجر به تغییر غیرمتقارن دامنه به‌ازای دورافت‌های مثبت و منفی شده است. ولی تغییرات قائم سرعت به‌صورت گرادیان (VTI)، باعث شده که دامنه امواج تبدیل یافته به مقدار زیادی کاهش یابد.

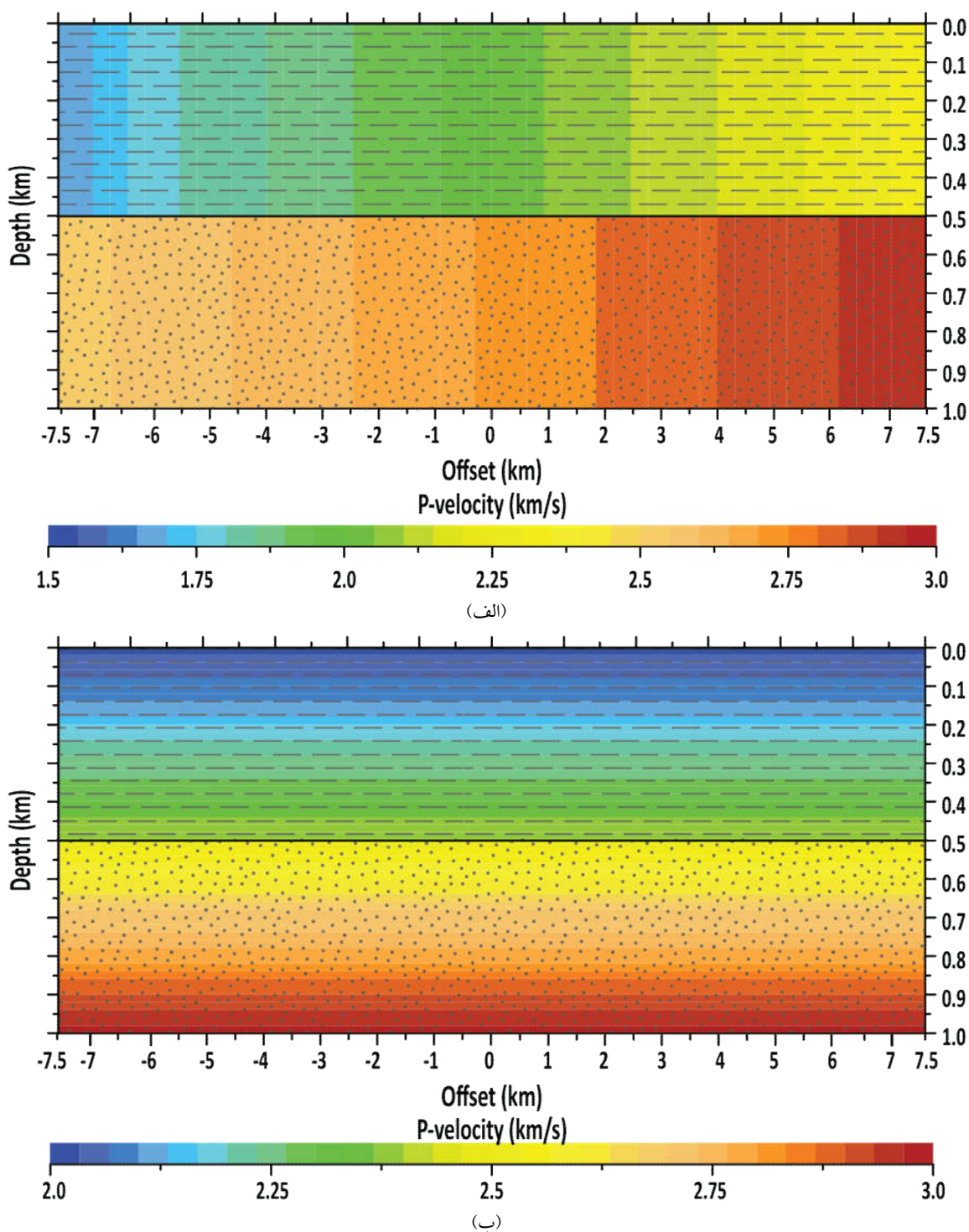
شکل ۱۸، تغییرات فاز امواج P-Sv و Sv-P را برحسب دورافت در محیط‌های ناهمسانگرد نشان می‌دهد.

۷ نمونه‌ای از بررسی تغییرات فاز امواج تبدیل یافته در مقاطع لرزهای

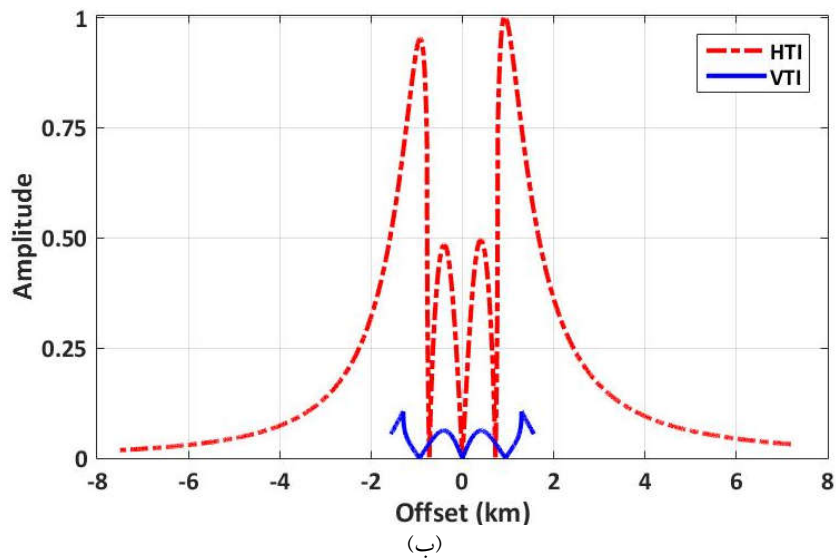
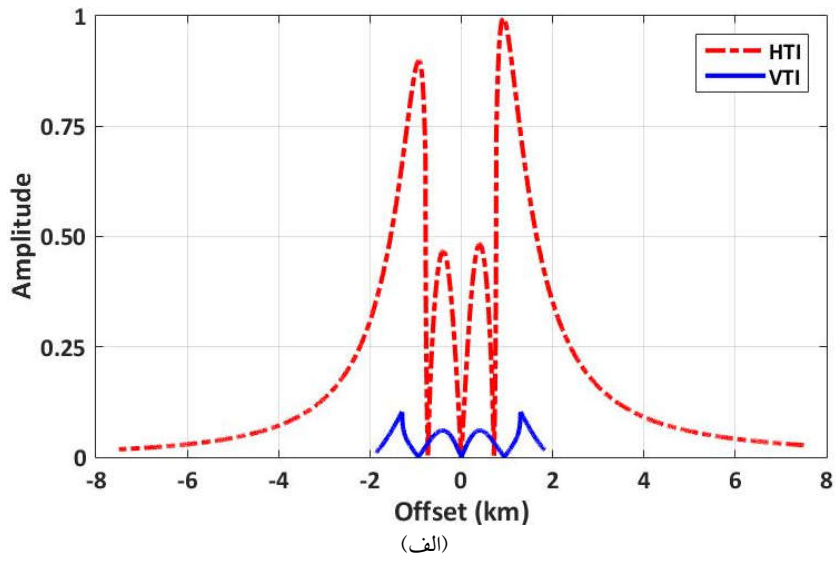
این مقاطع حاصل از دو بازتابنده زمین‌شناسی هستند. شکل ۱۴-الف و ج، نشان‌دهنده‌ی داده‌های ثبت شده توسط گیرنده‌های قائم هستند که به ترتیب توسط چشمه‌های قائم و افقی تولید شده‌اند. در داده‌های ژئوفون‌های قائم بازتابی‌ها یا از امواج P تابشی یا از امواج S تابشی حاصل شده‌اند. نقطه مشترک این دو مقطع (۱۴-الف و ج)، ثبت داده‌ها توسط گیرنده‌های قائم است که علاوه بر امواج اصلی، امواج تبدیل یافته Sv-P را به‌خوبی ثبت کرده‌اند. به همین ترتیب داده‌های شکل ۱۴-ب و د، نشان‌دهنده‌ی داده‌های ثبت شده توسط گیرنده‌های افقی هستند که به ترتیب توسط چشمه‌های قائم و افقی تولید شده‌اند. در این داده‌ها هم بازتابی‌ها، یا حاصل امواج P تابشی و یا حاصل امواج S تابشی هستند. نقطه مشترک این دو مقطع (۱۴-ب و د)، ثبت داده‌ها توسط گیرنده‌های افقی است که علاوه بر امواج اصلی، امواج تبدیل یافته P-Sv را به‌خوبی ثبت کرده‌اند.

بررسی مقاطع فوق، تمامی نتایج حاصل بخش‌های قبلی را تأیید می‌کنند، به‌گونه‌ای که در مقاطع ۱۴-الف و د با توجه به هم‌جهت بودن چشمه و گیرنده، فاز دورافت‌های مثبت و منفی با هم برابرند، درحالی‌که در مقاطع ۱۴-ب و ج به دلیل متعامد بودن راستای اعمال چشمه و جهت قرار-گیری گیرنده، فاز دورافت‌های مثبت و منفی معکوس یکدیگرند.

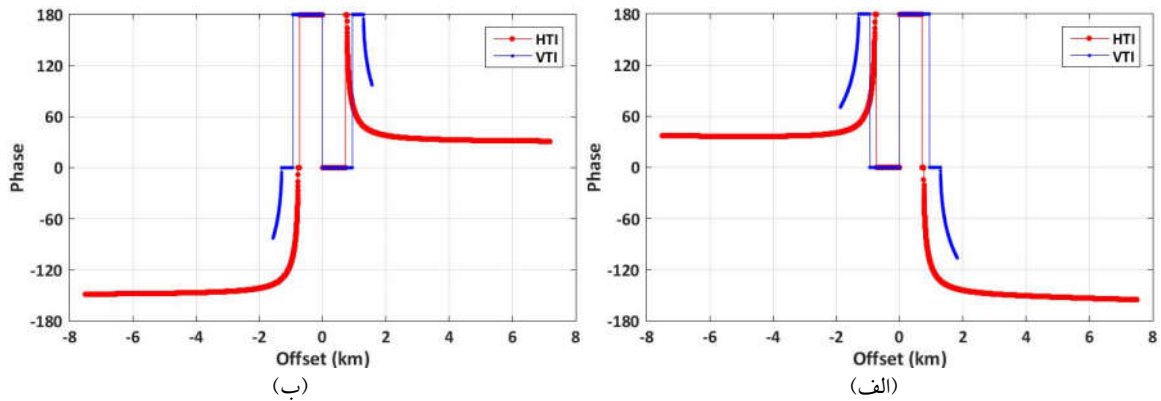
شکل ۱۵، نشان‌دهنده‌ی مسیر انتشار و ارتعاش امواج P و SV حاصل از چشمه قائم است. بردارهای نشان داده شده در داخل دایره‌ها، جابه‌جایی ذرات زمین را که امواج به آن نقطه رسیده را نشان می‌دهد. با توجه به این بردارهای جابه‌جایی، پلاریته ثبت شده برای هر کدام منطبق بر



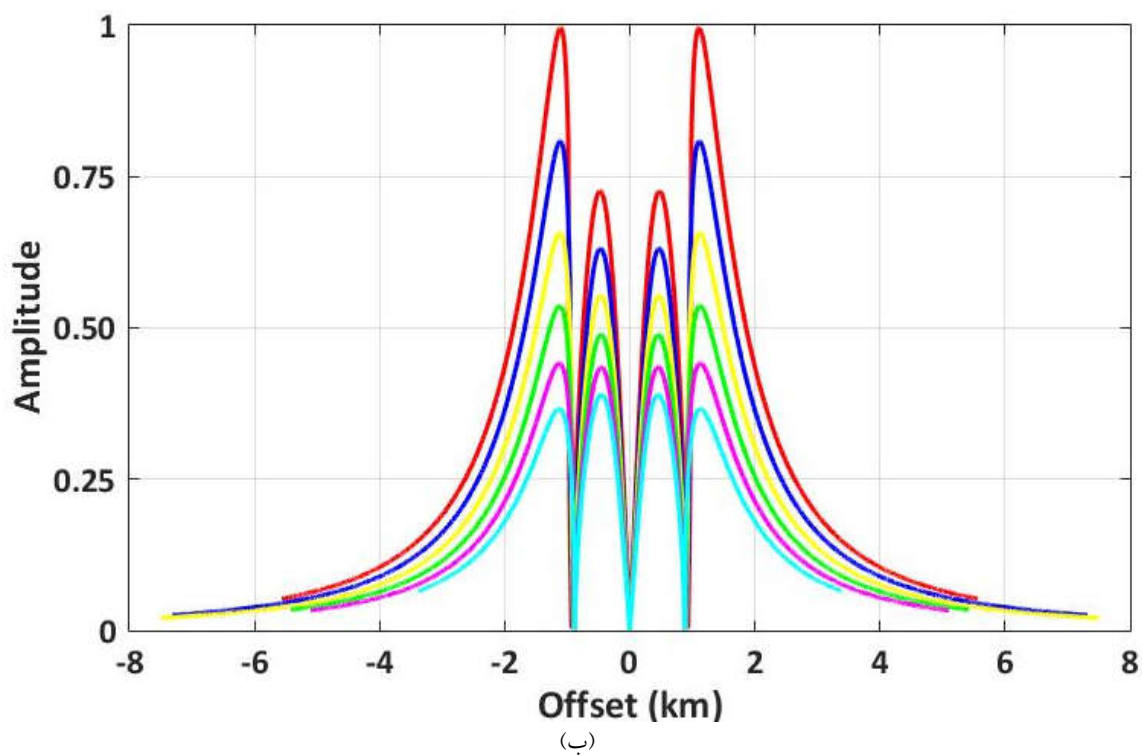
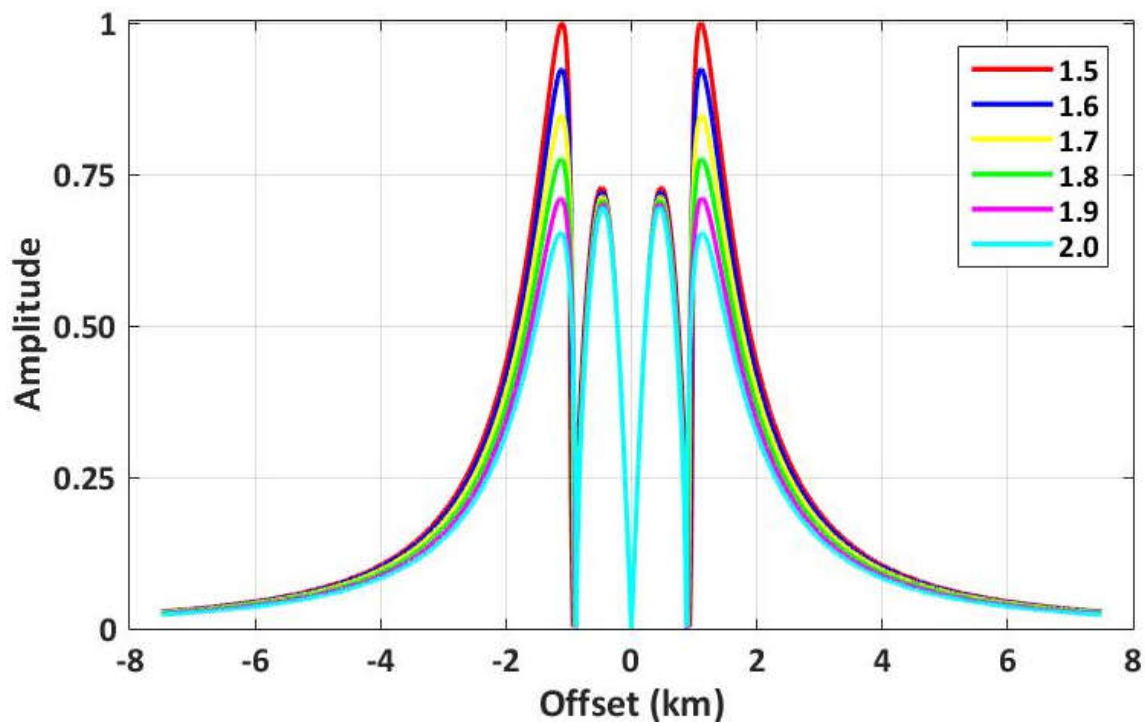
شکل ۱۶. مدل ناهمسانگرد مصنوعی (الف) HTI، (ب) VTI زمین‌شناسی طراحی شده با بازتابنده‌های افقی.



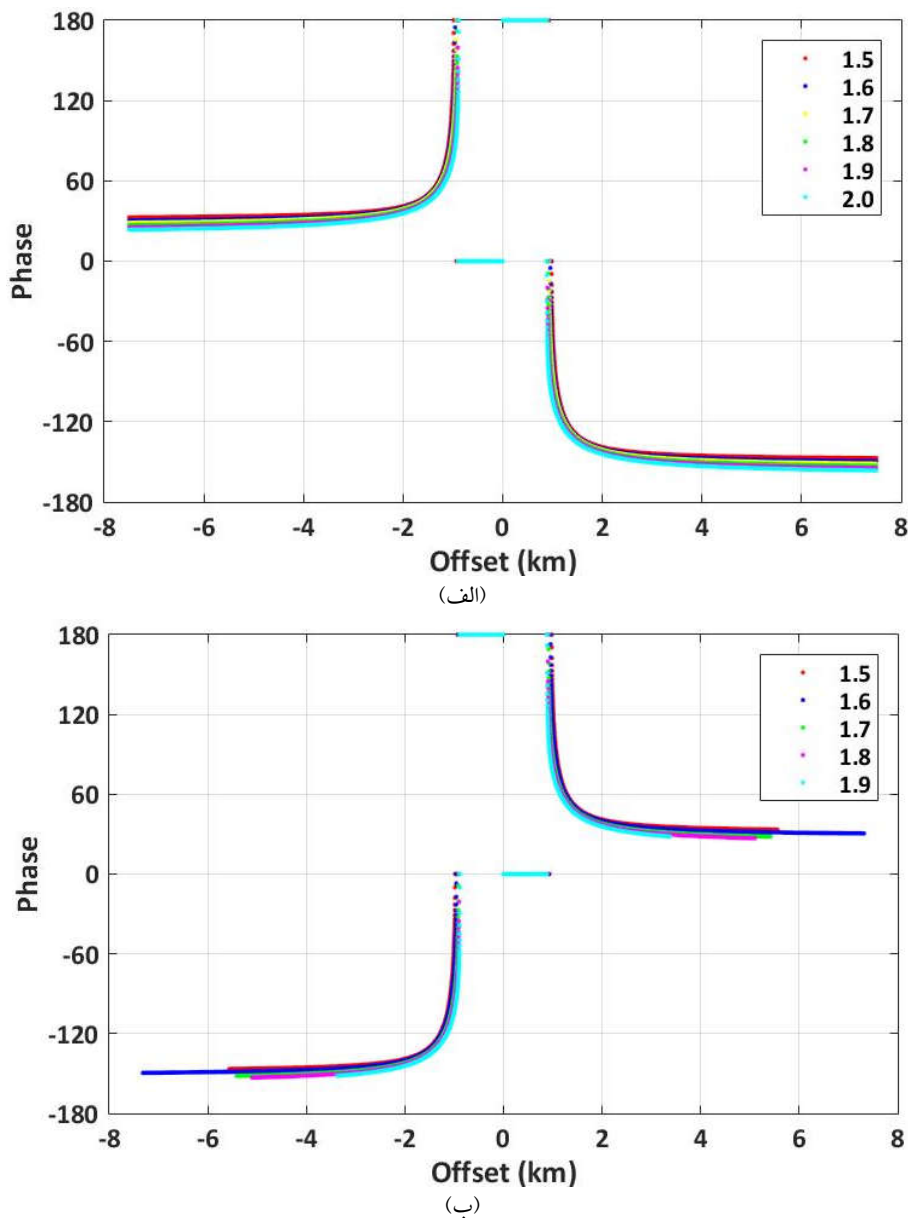
شکل ۱۷. تغییرات دامنه امواج (الف) P-Sv، (ب) Sv-P برحسب دورافت در محیطهای HTI و VTI.



شکل ۱۸. تغییرات فاز امواج (الف) P-Sv، (ب) Sv-P برحسب دورافت در محیطهای HTI و VTI در حالتی که جهت‌های چشمه و گیرنده برهم عمود باشند.



شکل ۱۹. تغییرات دامنه امواج (الف) P-Sv، (ب) Sv-P نسبت به دورافت، به ازای نسبت مقادیر V_p/V_s متفاوت.



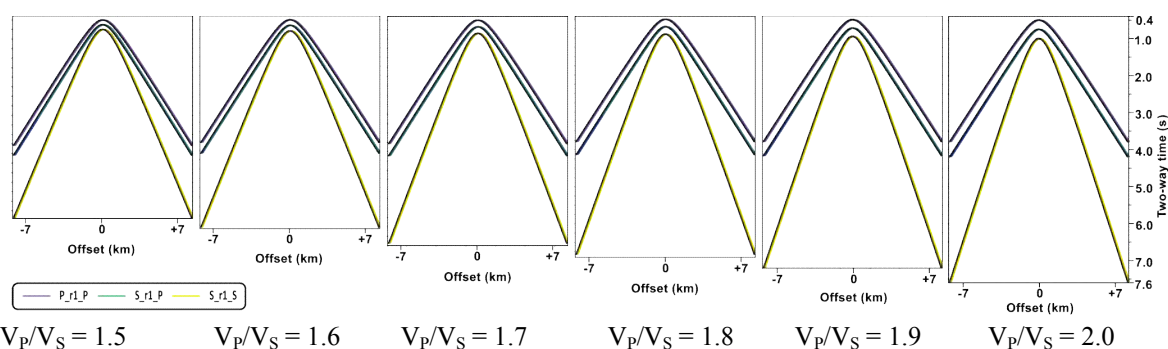
شکل ۲۰. تغییرات فاز امواج (الف) P-Sv، (ب) Sv-P نسبت به دورافت، به‌ازای نسبت مقادیر V_p/V_s متفاوت در حالتی که جهت‌های چشمه و گیرنده بر هم عمود باشند.

لرزه‌ای، این اختلاف سرعت به جدایش امواج P و S کمک می‌کند. در این بخش تغییرات امواج بازتابی تبدیل یافته نسبت به تغییرات V_p/V_s بررسی می‌شود. لازم به ذکر است در این مطالعه، با ثابت گرفتن سرعت موج فشارشی (V_p)، و تغییر سرعت موج برشی (V_s)، نسبت V_p/V_s تغییر می‌یابد.

۹ بررسی امواج بازتابی تبدیل یافته بر اساس

تغییرات نسبت سرعت V_p/V_s

نسبت سرعت V_p/V_s یکی از متغیرهای مهم، در تفسیر داده‌های لرزه‌ای و مطالعات کمی مخزن است و از سوی دیگر هرگونه تغییر در خواص محیطی، منجر به ایجاد تغییر در این نسبت می‌شود. در طول پردازش‌های داده‌های



شکل ۲۱. مقاطع Spikeogram مدل مصنوعی زمین‌شناسی طراحی شده، به‌ازای نسبت مقادیر V_p/V_s متفاوت که از مدل‌سازی پیشرو حاصل شده‌اند. هذلولی‌ها از بالا به پایین به‌ترتیب مربوط به مدهای لرزه‌ای P-P، Sv-P و S-S هستند.

شکل ۲۱، جابه‌جایی هذلولی‌های امواج اصلی و بازتابی را به دلیل تغییر نسبت V_p/V_s نشان می‌دهد. در حالت کلی اگر نسبت V_p/V_s افزایش یابد، باعث افزایش فاصله زمانی بین رسیدهای تبدیل یافته نسبت به رسید اصلی PP می‌شود. بنابراین، برای نسبت‌های کوچک V_p/V_s ، تشخیص و شناسایی امواج تبدیل یافته برای یک بازتابنده مشخص مشکل می‌شود. البته باید امکان تداخل امواج تبدیل یافته با امواج بازتابی اصلی لایه‌های بعدی را در نظر گرفت که در این صورت مشکل تمیز بازتابی‌های اصلی یک مرز نسبت به بازتابی‌های تبدیل یافته‌ی مرز قبلی به وجود می‌آید که خود وابسته به ضخامت لایه‌ها و خواص کشسان آنهاست.

از سوی دیگر افزایش زمانی موجک هم‌میخت شده ناشی از کاهش فرکانس موج با عبور از زمین باعث می‌شود که امواج P-P، با توجه به بالا بودن سرعتشان به هم نزدیک بوده و امکان تداخل با یکدیگر برای بازتابنده‌های نزدیک به هم به وجود آید. ولی در امواج تبدیل یافته، با توجه به اینکه بخشی از مسیر را با سرعت S طی می‌کنند، پس بازتابش آنها دارای فاصله زمانی از هم بوده و می‌توان از هم تمیز داد. پس می‌توان از امواج

شکل ۱۹، تغییرات دامنه امواج P-Sv و Sv-P نسبت به دورافت، به‌ازای نسبت مقادیر V_p/V_s متفاوت را نشان می‌دهد. با توجه به این نمودارها، هرچه نسبت V_p/V_s بیشتر می‌شود، دامنه ثبت شده برای امواج تبدیل یافته کاهش می‌یابد. از سوی دیگر با افزایش این نسبت، زوایایی که در آنها، حداکثر بازتابش وجود دارد، برای امواج Sv-P به مقدار قابل توجهی محدودتر شده است که می‌توان به‌وضوح در شکل ۶-ج مشاهده کرد و می‌توان اثر آن را در شکل ۱۹-ب هم دید، یعنی دورافتی که امواج Sv-P ثبت می‌شوند، محدودتر شده‌اند (توسط دایره‌های خاکستری مشخص شده‌اند). شکل ۲۰، تغییرات فاز امواج P-Sv و Sv-P نسبت به دورافت، به‌ازای نسبت مقادیر V_p/V_s متفاوت را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که تغییرات نسبت سرعت، بر تغییرات فاز امواج P-Sv و Sv-P تأثیر چندانی نگذاشته است، ولی می‌توان به این مورد اشاره کرد که با افزایش نسبت سرعت، دورافتی که می‌توان امواج Sv-P را ثبت کرد محدودتر می‌شود البته آن بخش داده‌های امواج تبدیل یافته محدود شده است که دارای تغییر فاز غیرخطی است (توسط دایره‌های خاکستری مشخص شده‌اند).

بازتابی اصلی لایه‌های بعدی را در نظر گرفت که در این صورت مشکل تمیز بازتابی‌های اصلی یک مرز نسبت به بازتابی‌های تبدیل یافته مرز قبلی به وجود می‌آید. این خود وابسته به ضخامت لایه‌ها و خواص الاستیکی آنهاست. از سوی دیگر افزایش با افزایش نسبت سرعت، دورافتی که می‌توان امواج Sv-P را ثبت کرد، محدودتر می‌شود

منابع

قاسم‌العسگری، م. ک.، ۱۳۸۳، اصول ژئوفیزیک اکتشافی: روش‌های سنجش و چاه‌پیمایی ژئوفیزیکی، آبیژ، تهران.

نظری، ب.، ۱۳۹۴، اکتشاف هیدروکربن با استفاده از تکنیک AVO در داده‌های لرزه‌نگاری، محمد طیبی، ستایش، تهران، ۳۴-۳۳ و ۳۶.

Aki, K., and Richards, P. G., 1980, Quantitative seismology: Theory and methods. New York, 700.

Barkved, O., Bartman, B., Compani, B., Gaiser, J., Van Dok, R., Johns, T., Kristiansen, P., Probert, T., and Thompson, M., 2004, The many facets of multicomponent seismic data: Oilfield Review, published by Schlumberger, 16, 42-56.

Bouchaala, F., and C., Guennou, 2014, Analytical and Numerical Study of the Reflection/Transmission Coefficients in Slight Viscoelastic Medium: International Journal of Geosciences, 5(09), 908.

De Angelo, M. V., and Hardage, B. A., 2016, Comparing PP, P-SV, and SV-P mode waves in the Midland Basin: West Texas. Interpretation, 4(2), T183-T190.

Guy, E. D., 2004, Evaluation of near-surface converted-mode seismic reflection imaging potential: Electronic Journal of Geotechnical Engineering, 9, 1-35.

Hardage, B. A., 2012, Extracting SV shear data from P-wave seismic data, Google Patents.

Hardage, B. A., 2014, Shear-wave data enhance reservoir characterization: Oil and Gas Journal. 112(7), 65-69.

Hardage, B. A., Sava, D., and Wagner, D., 2014, SV-P: An ignored seismic mode that has

تبدیل یافته برای بازتابی‌های نزدیک به هم، در صورت عدم حضور نوفه‌های بزرگ استفاده کرد.

۱۰ نتیجه و جمع‌بندی

امواج تبدیل یافته دارای اطلاعات با ارزش امواج برشی در تفاسیر لرزه‌ای هستند که می‌توان انرژی و پاسخ آنها را در داده‌های معمول لرزه‌ای شناسایی کرد. به‌طور خلاصه، در راستای شناسایی امواج تبدیل یافته نتایج زیر حاصل شده است:

- در بازتابنده‌های افقی زاویه تابش امواج Sv-P با زاویه بازتابش امواج P-Sv برابر است و برعکس. این باعث می‌شود که امواج Sv-P ثبت شده توسط گیرنده‌های قائم از لحاظ دورافت و زمان سیر در مختصات مشابه امواج P-Sv (توسط گیرنده‌های افقی) ثبت شوند.

- اگر داده‌ها توسط ژئوفونی که هم‌جهت با چشمه اعمالی هست، ثبت شود، در نگاشت لرزه‌ای، پلاریته ردهای ثبت شده دارای علامت جبری یکسانی برای دورافت‌های مثبت و منفی است؛ یعنی امواج تبدیل یافته که توسط چشمه و گیرنده قائم یا چشمه و گیرنده افقی ثبت شده است، دارای پلاریته یکسانی است.

- اگر داده‌ها توسط ژئوفونی که عمود بر چشمه اعمالی هست، ثبت شود، در نگاشت لرزه‌ای، پلاریته ردهای ثبت شده دارای علامت جبری مخالف برای دورافت‌های مثبت و منفی است؛ یعنی امواج تبدیل یافته که توسط چشمه قائم و گیرنده افقی یا چشمه افقی و گیرنده قائم ثبت شده است، دارای پلاریته مخالفی است.

اگر نسبت V_p/V_s افزایش یابد باعث افزایش فاصله زمانی بین رسیدن امواج تبدیل یافته نسبت به رسیدن اصلی PP و کاهش دامنه این امواج می‌شود. بنابراین، برای نسبت‌های کوچک V_p/V_s ، تشخیص و شناسایی امواج تبدیل یافته برای یک بازتابنده مشخص مشکل می‌شود. البته می‌بایست امکان تداخل امواج تبدیل یافته با امواج

- seismic exploration: *Geophysics*, **68**(1), 40-57.
- Tooley, R., Spencer, T., and Sagoci, H., 1965, Reflection and transmission of plane compressional waves: *Geophysics*, **30**(4), 552-570.
- Yilmaz, Ö., 2001, *Seismic data analysis: Processing, inversion, and interpretation of seismic data*: Society of Exploration Geophysicists, p. 1813.
- Zoeppritz, K., 1919, Über reflexion und durchgang seismischer Wellen durch Unstetigkeitsflächen: Über Erdbebenwellen VII B. *Nachrichten der Königlichen Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen: Mathematisch-physikalische Klasse*, **K1**, 57-84 (in German).
- great value for interpreters: *Interpretation*, **2**(2), SE17-SE27.
- Hardage, B., and Wagner, D., 2014, 2D Modeling of Direct-S and Direct-P Wave field - Part 3: Reflectivity Modeling Using Real Log Data (USA).
- Ikelle, L., and Amundsen, L., 2005, *Introduction to Petroleum Seismology*. Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, Oklahoma.
- Knott, C. G., 1899, III. Reflection and refraction of elastic waves, with seismological applications: *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, **48**(290), 64-97.
- Sheriff, R., and Geldart L., 1995, *Exploration Seismology*: Cambridge University Press.
- Stewart, R. R., Gaiser, J. E., Brown, R. J., and Lawton, D. C., 2003, *Converted-wave*

Modeling of amplitude and phase variations of converted waves versus offset and V_p/V_s ratio

Hossein Jodeiri Akbari Fam¹, and Navid Shad Manaman^{2*}

¹M. Sc. Student, Faculty of Mining Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran

²Assistant Professor of Seismology, Faculty of Mining Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran

(Received: 04 May 2017, Accepted: 11 December 2017)

Summary

Shear wave information plays a valuable role in the interpretation of seismic data and reservoir characterization studies. Due to the high cost and technical difficulties in data recording of full elastic seismic data (3D-9C), using converted waves can be helpful to extract valuable S-wave information. Analysis of the amplitude and phase variations of converted waves with offset would be useful in better identification of converted reflections in the seismic sections and uncertainty reduction in the processing and interpretation of these data.

In this regard, by using Zoeppritz equations, the energy distribution of different seismic modes (P-P, S-S, P-Sv, and Sv-P) on the interface of the layers with different acoustic impedances at various incidence angles has been studied. Then, by using forward modeling and ray tracing methods, it should be obtained that how converted waves propagate in isotropic and anisotropic media. Besides, the effect of the V_p/V_s variations in the travel time and amplitude of the converted modes are inspected.

For data recorded by receivers oriented in the same direction as the seismic source (both vertical or both horizontal), the polarity of converted waves is the same in the positive and negative offsets. However, if the direction of receivers is perpendicular to the seismic source, the converted waves will have opposite polarities on different sides of the source.

Moreover, for primary P-Sv reflections, the largest P-to-S conversion occurs beyond the critical angle that is related to large source-receiver offsets. In contrast, S-to-P conversion significantly appears before the critical angle. However, it should be noted that for the same takeoff angle, the Sv-P and P-Sv waves will be recorded in the same offset, because the P-Sv incidence angle equals the Sv-P reflection angle and vice versa.

For example, the synthetic models show that in seismic layers with $V_p/V_s = \sqrt{3}$ and horizontal reflector, maximum P-Sv conversion occurs at an incidence angle of about 64° and reflection angle of about 31° , while maximum Sv-P conversion occurs around 31° angle of incidence and around 64° angle of reflection. This means that from the viewpoint of source-receiver distance, depending on the intended depth, mid and far offsets data are necessary for good recording of the conversion mode reflections. Moreover, according to Snell law and Zoeppritz equations, in the case of converting Sv to P, the transmitting converted P-wave would have a small amplitude. Hence, in Sv-P studies, only the converted waves with purely Sv incoming and purely P reflection are considered.

Keywords: converted waves, amplitude variation, phase variation, velocity ratio V_p/V_s , Sv-P waves, P-Sv waves

*Corresponding author:

shadmanaman@sut.ac.ir