

تأثیر توپوگرافی نزدیک به سطح روی انتشار موج ریلی با فرکانس بالا

چکیده:

موج‌های ریلی که به علت تداخل P-موج‌ها و SV-موج‌ها نزدیک سطح آزاد تشکیل می‌شوند، در طول سطح آزاد انتشار می‌یابند و به طور بالقوه در جهت عمودی ناپدید می‌شوند. انتشار آن‌ها شدیداً تحت تأثیر توپوگرافی سطح است. به علت وضوح بالا و نیازمندی‌های دقت بررسی‌های نزدیک به سطح، موج‌های ریلی با فرکانس بالا معمول برای کشف ساختاری نزدیک به سطح استفاده می‌شوند. اگرچه برخی مطالعات عددی در مورد انتشار موج‌های ریلی با فرکانس بالا روی سطح آزاد توپوگرافیک وجود دارند، تجزیه و تحلیل مفصل ویژگی‌های انتشار موج‌های ریلی با فرکانس بالا روی سطح آزاد توپوگرافیک، دست نخورده باقی می‌ماند. از این‌رو، پژوهش انتشار موج‌های ریلی روی سطح توپوگرافیک پیچیده، برای روش‌های موج ریلی در کاربردهای نزدیک به سطح، حیاتی می‌شود. به منظور مطالعه‌ی انتشار موج‌های ریلی با فرکانس بالا، روی سطح آزاد توپوگرافیک، دو مدل توپوگرافیک اصلی در این مطالعه طراحی می‌شوند. یکی از مدل‌ها شامل یک سطح توپوگرافیک فرو رفته، است و دیگری شامل یک سطح توپوگرافیک بالارفته (یا برآمده) است. ما انتشار موج‌های ریلی با فرکانس بالا روی این دو سطح توپوگرافیک را با استفاده از روش تفاضل متناهی، به طور عددی شبیه‌سازی می‌کنیم. پس از آن، به تجزیه و تحلیل ویژگی انتشار موج‌های ریلی با فرکانس بالا روی چنین مدل‌های توپوگرافیک می‌پردازیم و تغییرات روی انرژی و فرکانس آن‌ها را قبل و بعد از عبور از ناحیه‌ی توپوگرافیک مقایسه می‌کنیم. در نهایت، به بحث رابطه‌ی بین تغییرات و شیب توپوگرافی هر مدل می‌پردازیم. نتایج عددی ما نشان می‌دهند که توپوگرافی فرورفته برای موج‌های ریلی با فرکانس بالا متمایزتر از تأثیر توپوگرافی برآمده است. موج‌های ریلی، موج‌های بدنی انتشاری جدیدی را در طول عبور از توپوگرافی فرورفته با کاهش فراوانی و از دست دادن مولفه‌های با فرکانس بالا تولید می‌کنند. علاوه‌براین، هرچه توپوگرافی فرورفته دارای شیب بیشتری باشد انرژی بیشتری از موج‌های ریلی از

دست می‌رود. توپوگرافی برآمده با شیب ملایم، تاثیری مشابه با تاثیر توپوگرافی برآمده فرورفته روی انتشار موج‌های ریلی بافرکانس بالا، تولید می‌کند. اگرچه هنگامی که شیب‌های بیشتر می‌شوند تاثیر مانع توپولوگرافی برآمده ضعیف‌تر می‌شود. علاوه‌براین، در توپوگرافی برآمده، بخشی از انرژی موج‌های ریلی توسط زمین برآمده جذب می‌شود که شامل انرژی به دام افتاده بین مرزهای برآمده و تولید موج‌های انتشاری است. در ضمن، توپوگرافی موضعی به شدت بر ویژگی پراکندگی موج‌های ریلی تاثیر می‌گذارد. هنگام برداشت موج‌های فازی ریلی روی تصاویر پراکنده‌ی انرژی برای یک بررسی MASW، اگر از توپوگرافی موضعی سطح آزاد صرف‌نظر شود، ممکن است خطای فاحشی معرفی شود.

کلمات کلیدی. تاثیر توپوگرافیک، موج‌های ریلی با فرکانس بالا، توپوگرافی فرورفته، توپوگرافی برآمده.

پیشگفتار

برش(های) زیرین- سرعت موج به محبوبیت در مطالعات زیست محیطی و مهندسی دست یافته است. از آن‌جایی که مستقیماً متناسب با مدول برشی مواد زیرین است، تبدیل به شاخصی اساسی برای سفتی مواد زمینی می‌شود.^۱ ارزیابی نمایه‌ی سرعت S-موج، یکی از وظایف حیاتی در مهندسی ژئوتکنیک بوده است.^۲ در حال حاضر، یک نمایه‌ی سرعت S-موج اغلب با استفاده از روش موج-سطحی به دست می‌آید. برای مثال، تجزیه و تحلیل چندکانالی روش موج‌های سطحی (MASW)^۳، یکی از روش‌های موفق موج سطحی است. آن بر اساس ماهیت طبیعت پراکنده‌ی موج‌های ریلی در رسانه‌های به طور عمودی ناهمگن و فرض لایه‌ی افقی مدل زمینی است. اگرچه زمین متشکل از رسانه‌ی به طور کامل مسطح لایه‌بندی شده نیست. آشکارسازی ویژگی‌های انتشار موج ریلی در ساختار پیچیده (یا مختلط)، نقشی حیاتی را در شناخت ساختارهای زمینی ایفا می‌کند.^۴

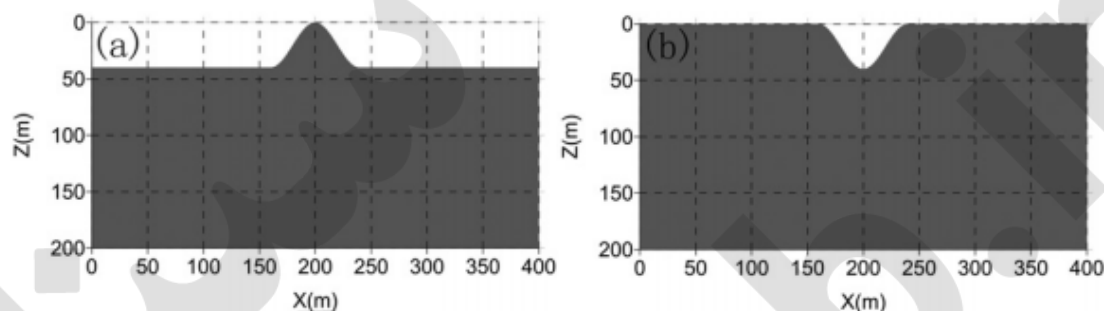
¹ Imai and Tonouchi, 1982

² e.g., Craig, 1992; Xia et al., 1999, 2002

³ e.g., Xia et al., 1999, 2002

⁴ e.g., Zhao, 1991

تا جایی که ما می‌دانیم، انتقال موج‌های-سطحی شدیداً تحت تاثیر سطح نامنظم است. اولین گزارش‌های انتشار موج-سطحی روی سطح توپوگرافیک در سال ۱۹۵۸ آغاز شد. این مطالعات شامل انتقال و بازتاب موج‌های ریلی در گوشه‌ها^۵، مشخصات ضریب انتقال و انعکاس توپوگرافی زاویه به وسیله مطالعات تجربی^۶، و فرمول‌های نظری انعکاس و انتقال در یک گوشه^۷ هستند. اشنايدر (۱۹۸۶) به مطالعه‌ی تاثیرات توپوگرافی روی تبدیلات و انتشار سه بعدی موج-سطحی توسط روش تقریب بورن پرداخت. در مطالعه‌ی او، انتشار موج سطحی توسط توپوگرافی، با انتشار موج سطحی توسط یک مدل ریشه‌ی کوه مقایسه شد. او همچنین به تجزیه و تحلیل تاثیر مداخله بین موج‌های سطحی پراکنده شده توسط بخش‌های مختلف ناهمگنی پرداخت.



شکل 1

این نتایج نظری پیشین، ما را به سمت بهبود قابل توجهی در توضیح آزمایشات و داده‌های جهان واقعی هدایت می‌کند. اگرچه تجزیه و تحلیل مشخصات انتشار موج‌های ریلی روی سطح توپوگرافی بسیار پیچیده است. این مطالعات، در روش تحلیلی یا شبیه‌سازی عددی، کمتر عمومی هستند. با توسعه‌ی نظریه‌ی انتشار موج‌های لرزه‌ای و پیشرفت تکنیک‌های شبیه‌سازی عددی، مطالعات بیشتری از تاثیر توپوگرافیک روی انتشار موج‌های ریلی انجام شده است. تکنیک‌های شبیه‌سازی عددی، ابزارهای مهمی برای جبران ضعف روش‌های تحلیلی هستند. آن‌ها به طور گسترده‌ای در مطالعه‌ی مساله‌ی انتشار موج-سطحی روی ساختارهای پیچیده‌ی

⁵ deBremaecker, 1958

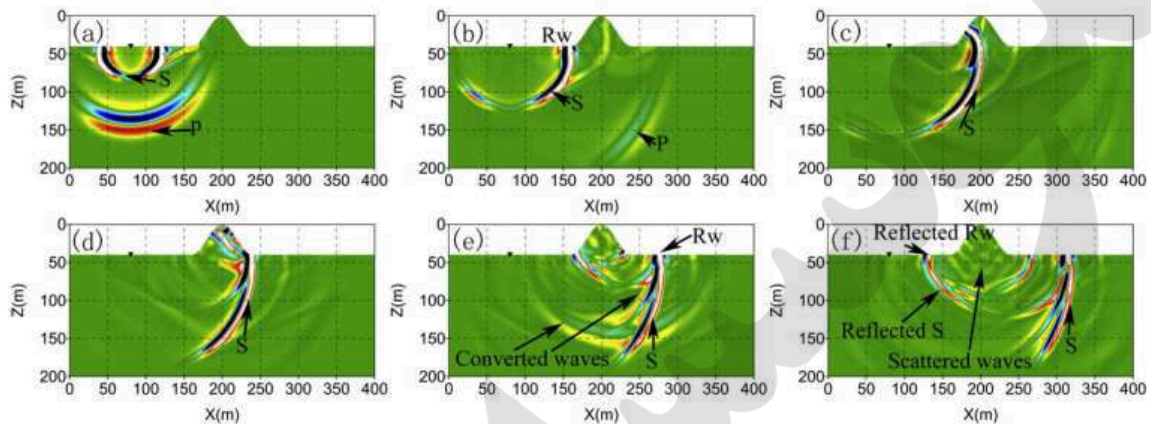
⁶ Knopoff and Gangi, 1960

⁷ e.g., Hudson and Knopoff, 1964; Mal and Knopoff, 1965, 1966; Fujii, 1984

زمین‌شناسی استفاده شده‌اند. فایوکی (۱۹۸۰)، انتشار موج‌های ریلی روی سطح آزاد توپوگرافیک را با استفاده از روش تفاضل متناهی شبیه‌سازی کرد. وانگ (۱۹۸۲)، فرکانس واکنش یک تنگه به موج‌های ریلی را مطالعه کرد. کاواس (۱۹۸۸)، واکنش دامنه‌ی زمانی موج‌های ریلی را به وسیله‌ی روش عنصر مرزی مطالعه کرد. پس از آن، سانچز-سزما و همکاران (۱۹۹۱) به بحث چنین واکنشی از توپوگرافی عمومی‌تر پرداختند.

بر اساس روش عنصر (یا المان) مرزی، هوین و همکاران (۱۹۹۸)، انتشار موج‌های ریلی در طی شکاف‌های سطحی مختلف را به طور عددی شبیه‌سازی کردند. از سیگنال‌های شبیه‌سازی، تغییرات نسبت‌های طیفی بین موج‌های انتقال یافته و فرودی به عنوان تابعی از عمق شکاف مطالعه می‌شوند. مطالعه‌ی آن‌ها را می‌توان برای طراحی روند کارآمدی برای تعیین عمق شکاف‌ها مورد استفاده قرار داد. ژانگ و لیو (۲۰۰۰) به مطالعه‌ی مساله‌ی انکسار موج‌های کشسانی روی یک سطح توپوگرافی گودالی^۸ نیمه-استوانه‌ای پرداختند. آن‌ها ثابت کردند که انکسار موج‌های ریلی هنگامی قوی‌تر از P-موج‌ها است که طول موج موج‌های ریلی کوچکتر از P-موج‌ها باشد. کائو و همکاران (۲۰۰۷)، انتظار موج‌های ریلی در طی شکاف سطح را به وسیله‌ی روش عنصر متناهی به طور عددی شبیه‌سازی کردند. در همان سال، ناصری-مقدم و همکاران (۲۰۰۷)، انتشار موج‌های ریلی روی فضای جامد با حفره را به طور عددی مورد بررسی قرار دادند. تست‌های عددی آن‌ها نشان دادند که عمق دفن شده و اندازه‌ی حفره‌ی کشف شده توسط روش موج سطح، تابعی از طیف انعکاس موج‌های ریلی بود. ژو و چن (۲۰۰۷)، تاثیر توپوگرافی فرورفته روی موج‌های ریلی کم فرکانس (کوچکتر از ۲ هرتز) شبیه‌سازی شده توسط یک منبع انفجاری نزدیک به سطح را مطالعه کردند. آن‌ها اشاره کردند که واکنش فرکانس و انرژی موج‌های ریلی هنگامی که موج‌های ریلی از توپوگرافی فرورفته عبور کردند تغییر یافت.

^۸ pit-case



شکل 2

در مدل‌بندی عددی انتشار موج‌های ریلی با فرکانس بالا روی سطح آزاد توپوگرافیک، زنگ و همکاران (۲۰۱۲)، فرمول خلاء بهبود یافته‌ای را برای ادغام توپوگرافی سطح و ناپیوستگی داخلی برای مدل‌بندی تفاضل متناهی (DF) موج‌های ریلی در سطح نزدیک، ارائه دادند. آن‌ها با طرح خود، انتشار موج‌های ریلی روی سطح آزاد توپوگرافیک^۹، و کاربرد روش MASW در حضور توپوگرافی سطح آزاد^{۱۰} را به طور عددی مورد بررسی قرار دادند. وانگ و همکاران (۲۰۱۲)، طرح FD موثری را برای شبیه‌سازی انتشار موج ریلی در مدل توپوگرافی توسعه دادند که روش «ستاره‌ای» رابرتسون^{۱۱} و رویکرد تداخل کشسانی/صوتی (رویکرد AEA)^{۱۲} را ادغام می‌کرد. تاثیر قوی سطح آزاد توپوگرافیک روی انتشار موج‌های ریلی توسط مثال‌های عددی از سه مدل ساده‌ی توپوگرافیک ثابت شد.

مطالعات عددی پیشین همگی تحت فرض منبع موج ریلی^{۱۳} یا تحت فرض موج‌های ریلی کم فرکانس شبیه‌سازی شده توسط منبع انفجاری^{۱۴} انجام می‌شوند. اگرچه به علت نیازمندی‌های دقت و وضوح بالای بررسی‌های نزدیک سطح، موج‌های ریلی با فرکانس بالا معمولاً برای کشف ساختاری نزدیک سطح انتخاب

⁹ Zeng et al., 2012a

¹⁰ Zeng et al., 2012b

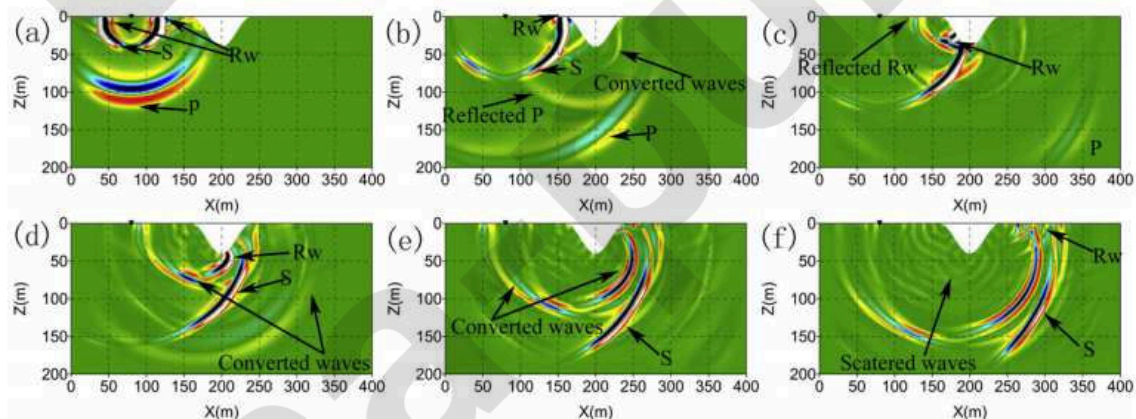
¹¹ Robertsson, 1996

¹² Xu et al., 2007

¹³ Fuyuki, 1980; Wong, 1982; Kawase, 1988; Sánchez-Sesma et al., 1991

¹⁴ Zhou and Chen, 2007

می‌شوند. آن‌ها معمولاً توسط یک منبع تاثیر سطح تولید می‌شوند مانند یک چکش سنگین به یک سطح فولادی ضربه می‌زند. پژوهش انتشار موج‌های ریلی با فرکانس بالا روی سطح توپوگرافیک، نقشی اساسی را برای روش‌های موج-سطحی در کاربردهای نزدیک به سطح ایفا می‌کند. اگرچه برخی مطالعات عددی در زمینه‌ی انتظار موج‌های ریلی با فرکانس بالا روی سطح آزاد توپوگرافیک وجود دارند^{۱۵}، تجزیه و تحلیل مفصل ویژگی‌های انتشار موج‌های ریلی با فرکانس بالا روی سطح آزاد توپوگرافیک، دست نخورده باقی می‌ماند. ما یک مدل توپوگرافیک فرورفته و یک مدل توپوگرافیک برآمده را برای مطالعه‌ی بیشتر انتشار موج‌های ریلی با فرکانس بالا روی سطح آزاد توپوگرافیک، پیکربندی می‌کنیم. انتشار موج‌های ریلی با فرکانس بالا روی این دو سطح توپوگرافیک توسط طرح FD وانگ^{۱۶} به طور عددی شبیه‌سازی می‌شود. ما بر اساس شبیه‌سازی‌های عددی، به تجزیه و تحلیل ویژگی انتشار موج‌های ریلی با فرکانس بالا در چنین دو سطح آزاد توپوگرافیک معمول می‌پردازیم و تغییرات موج‌های ریلی با فرکانس بالا در انرژی، طیف فرکانس و واکنش فراوانی را بحث می‌کنیم. سپس به بحث روابط بین تغییرات و شیب توپوگرافی هر مدل می‌پردازیم. در نهایت، تاثیر توپوگرافی موضعی روی مشخصات انتشار موج‌های ریلی را تجزیه و تحلیل می‌کنیم.



شکل 3

¹⁵ e.g., Nasseri-Moghaddam et al., 2007; Zeng et al., 2012a, 2012b; Wang et al., 2012

¹⁶ Wang et al, 2012

تغییر مشخصه‌ی انتشار موج‌های ریلی با فرکانس بالا روی توپوگرافی

در این جا ما دو مدل همگن با به ترتیب، یک سطح آزاد توپوگرافیک تنگه-مانند^{۱۷} و یک سطح آزاد توپوگرافیک هورست-مانند^{۱۸} را طراحی می‌کنیم (شکل ۱). عرض تنگه و هورست، هر دو ۸۰ متر هستند. ماکسیمم عمق تنگه و ماکسیمم عمق هورست، هر دو ۴۰ متر هستند. ما انتشار موج‌های ریلی با فرکانس بالا را به وسیله‌ی طرح FD وانگ^{۱۹} به طور عددی شبیه‌سازی می‌کنیم. مدل‌ها در اندازه‌ی 40m×200m و به صورت نقاط شبکه‌ی 2000×1000 هستند. سرعت‌های P-موج و S-موج هر مدل به ترتیب 1000 m/s و 400 m/s هستند و چگالی 2000kg/m³ است. هیچ توجهی در رسانه (واسطه) در نظر گرفته نمی‌شود. گام راهپیمایی زمان، 0.1ms است. مشتق اول گاوسی با فرکانس اوج ۲۰ هرتز و زمان تاخیر 50ms به صورت تابع منبع از منبع نقطه‌ی عمودی استفاده می‌شود.^{۲۰} منبع در سطح آزاد افقی، با ۱۰۰ متر فاصله از مرکز توپوگرافی واقع است.

شکل ۲، تصاویر لحظه‌ای میدان‌های موج کشسانی مدل توپوگرافی برآمده (شکل ۱) را به ترتیب در ۱/۰، ۲/۰، ۳/۰، ۴/۰، ۵/۰ و ۶/۰ ثانیه نشان می‌دهد. این تصاویر لحظه‌ای، تولید و انتقال موج‌های بدن (یا بدنه) و موج‌های ریلی با فرکانس بالا روی سطح آزاد توپوگرافی برآمده را نشان می‌دهند. از آنجایی که منبع نقطه‌ی عمودی روی سطح آزاد مسطح واقع است، هم یک P-موج و هم یک S-موج تحریک می‌شوند. نزدیک به سطح آزاد، موج‌های ریلی از تداخل سازنده‌ی P-موج‌ها و S-موج‌ها تولید می‌شوند (شکل ۲). P-موج ابتدا از هورست عبور می‌کند. هنگامی که آن به گوشه‌های چپ، بالا و راست هورست می‌رسد، پراکندگی^{۲۱} و تبدیل ضعیف موج رخ می‌دهند. سپس، S-موج و موج ریلی، روی انتهای P-موج قرار می‌گیرند و از هورست عبور می‌کنند. این نشان می‌دهد که در گوشه‌ی سمت منبع (سمت چپ هورست)، انعکاس ضعیف موج‌های ریلی وجود دارد و در جهات

¹⁷ canyon-case

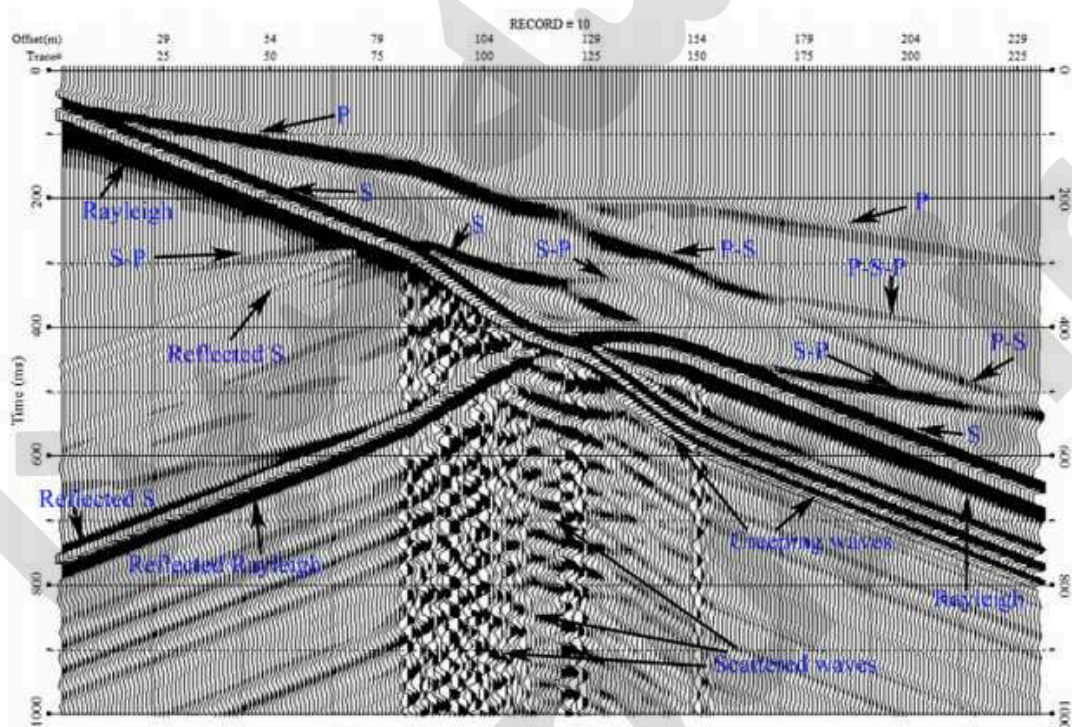
¹⁸ horst-case

¹⁹ Wang et al., 2012

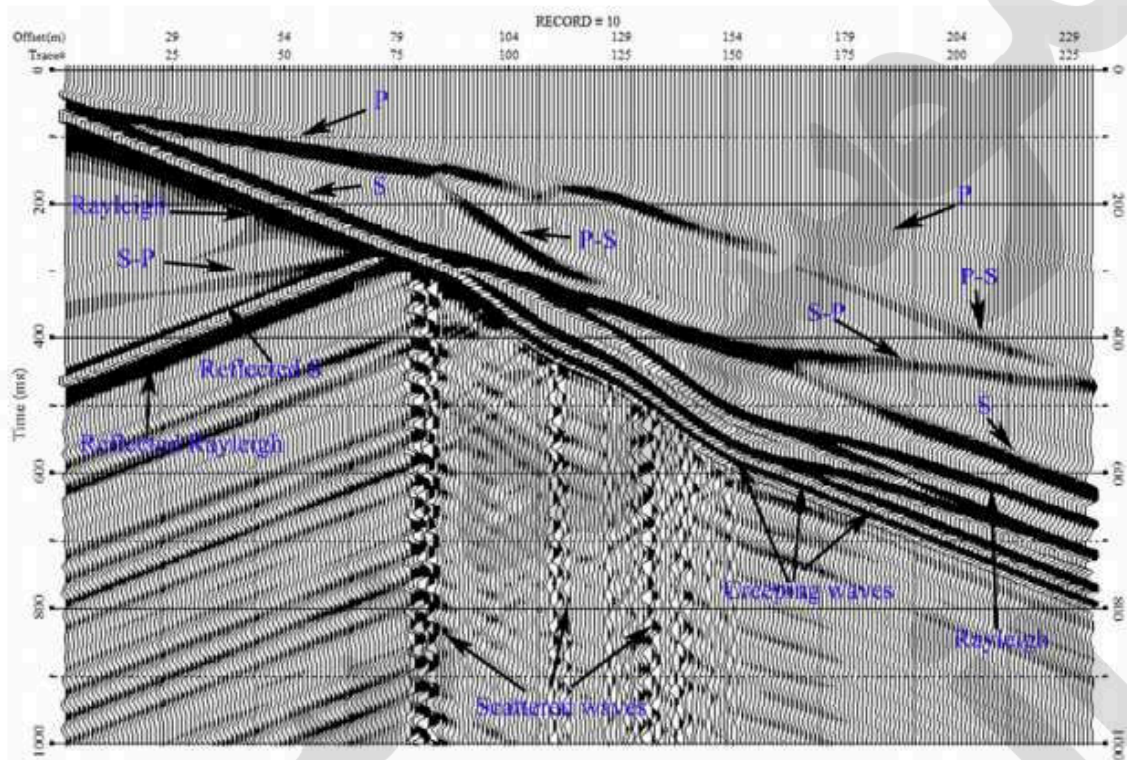
²⁰ e.g., Mittet and Arntsen, 2000; Xu et al., 2007

²¹ conversion

مخالف موج‌های ریلی ورودی منتشر می‌شوند (شکل ۲ا). هنگامی که S-موج و موج‌های ریلی به نوک هورست می‌رسند، موج‌های فراوان پراکنده شده به سمت جلو و عقب، تولید می‌شوند (شکل‌های ۲سی و ۲دی). در این اثنا، تبدیل جدید P-موج و تبدیل یا انعکاس جدید موج‌های ریلی تولید می‌شود (شکل ۲ای). علاوه بر این، بخشی از انرژی موج‌های ریلی توسط زمین برآمده جذب می‌شود (شکل‌های ۲ای و ۲دی) که شامل انرژی به دام افتاده بین مرزهای برآمده و تولید موج‌های پراکنده است (شکل ۲اف).



شکل 4

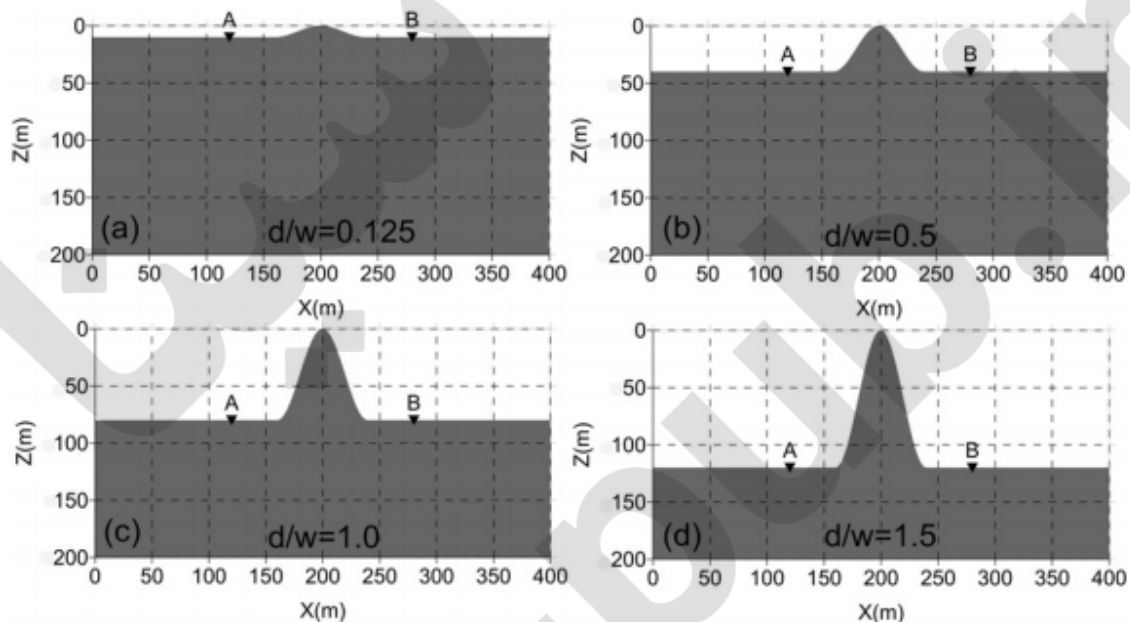


شکل 5

برای انتشار موج‌های ریلی روی سطح آزاد توپوگرافیک فرورفته، ویژگی‌های پیچیده‌تری روی تصاویر لحظه‌ای نشان داده می‌شوند (شکل ۳). یک P-موج، یک S-موج و یک موج ریلی تولید می‌شوند (شکل ۳). در سراسر کل فرایند انتشار موج‌های لرزه‌ای، P-موج همچنان ابتدا از دره عبور می‌کند. در گوشه‌ی چپ (گوشه‌ی نزدیک سمت منبع) دره، P-موج انعکاس می‌یابد و تبدیل به S-موج و موج ریلی می‌شود. اگرچه انرژی تبدیل موج ریلی نسبتاً ضعیف است آن همچنان در تصویر لحظه‌ای ظاهر می‌شود (شکل ۳ سی). این انعکاس و تبدیل همچنین در گوشه‌ی راست (گوشه‌ی دور سمت منبع) دره ظاهر می‌شوند (شکل ۳ ای و ۳ اف). S-موج و موج ریلی انتهای P-موج قرار می‌گیرند و از میان دره عبور می‌کنند. در این اثنا، تبدیل S-موج به P-موج در گوشه‌ی چپ رخ می‌دهد (گوشه‌ی سمت نزدیک منبع) (شکل ۳ سی و ۳ دی). تبدیلات نسبتاً ضعیف در گوشه‌ی راست (گوشه‌ی سمت دور از منبع) دره ظاهر می‌شوند (شکل ۳ اف). پس از عبور از دره، موج‌های بدنی فراوان به سمت

جلو و عقب و موج‌های ریلی توسط دره تولید می‌شوند. از آنجایی که جبهه‌های موج آن‌ها متقاطع می‌شوند، میدان موج کل نزدیک دره بسیار پیچیده می‌شود.

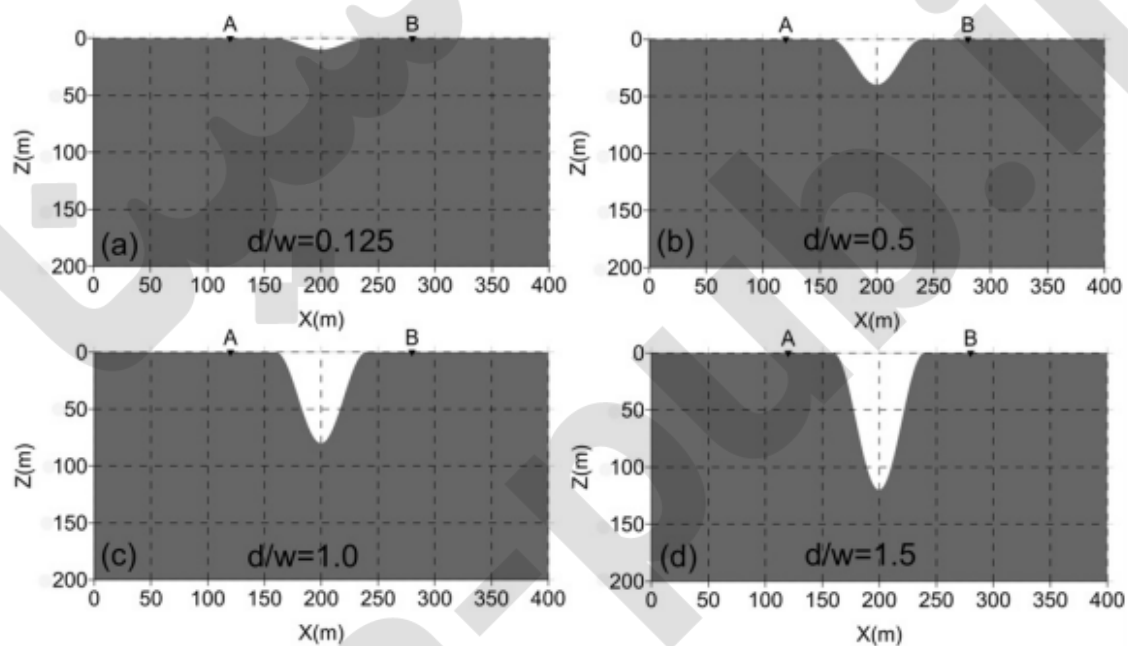
در همین حال، تبدیلات و انعکاس‌های پیچیده‌ی موج‌های لرزه‌ای روی سطح توپوگرافیک، روی لرزه‌نگاشت‌های مصنوعی متناظر نشان داده شده‌اند (شکل‌های ۴ و ۵). از آنجایی که انرژی موج‌های ریلی، بر میدان‌های موج کل غالب است، موج‌های بدنی برای نمایش واضح در لرزه‌نگاشت‌ها بسیار ضعیف هستند. از این‌رو، به منظور نمایش واضح تبدیل و انعکاس پیچیده، ما روند برابری مسیر را انجام می‌دهیم و دستاورد نمایش داده در رسم لرزه‌نگارهای مصنوعی، افزایش می‌یابد.



شکل 6

تبدیل واضح P به S در نوک هورست رخ می‌دهد (P-S در شکل ۴). اگرچه در گوشه‌ی راست (سمت دور از منبع)، این S-موج تبدیل شده (P-S)، موج عقب را به P-موج تبدیل می‌کند (P-S-P در شکل ۴). تبدیل ضعیف موج S به موج P در گوشه‌ی چپ هورست رخ می‌دهد (گوشه‌ی سمت نزدیک منبع). سپس بخشی از موج S و موج ریلی مستقیماً در میان هورست نفوذ می‌کند و به سمت دیگر هورست می‌رسد. اگرچه، بخش‌هایی

از موج S و موج‌های ریلی، در میان هورست از سطح آزاد توپوگرافی، می‌خزند (موج‌های خزنده در شکل ۴). موج‌های ریلی با انعکاس قوی در نوک هورست تولید می‌شوند. از این رو می‌توان توجه کرد که موج ریلی ورودی و انعکاس آن، به طور مشترک وجود دارند و در جهات مخالف روی سمت منبع (سمت چپ اوج هورست) نفوذ می‌کنند. هنگامی که S-موج به گوشه‌ی راست هورست می‌رسد، دوباره تبدیل ظاهر می‌شود. تبدیل جدید موج S به P ظاهر می‌شود. همانطور که قبلاً توصیف شد بخش‌هایی از انرژی موج‌های ریلی بین مرزهای هورست به دام می‌افتد و توسط مرزها به صورت چندگانه انعکاس می‌یابد. از این رو، در زمین برآمده، موج‌های پراکنده‌ی فراوانی در زمین برآمده تولید می‌شوند. این انتشار (یا انکسار) مولفه‌های موج‌ها اغلب متشکل از موج‌های ریلی در فاصله‌ای دور از هورست است.^{۲۲}



شکل 7

لرزه‌نگاشت مصنوعی مدل توپوگرافی فرورفته (شکل ۱ب) در شکل ۵ نشان داده شده است. تبدیل قوی P-موج به S-موج، متفاوت از لرزه‌نگاشت مدل توپوگرافی برآمده، در گوشه‌ی چپ دره (گوشه‌ی سمت نزدیک منبع)

²² Bouchon et al., 1996

ظاهر می‌شود. این S-موج تبدیل شده (موج P-S در شکل ۵)، متصل به S-موج ورودی در انتهای دره است. در گوشه‌ی راست (سمت دور از منبع) دره، تبدیل واضح S-موج به P-موج (S-P در شکل ۵) رخ می‌دهد. در همین حال، تبدیل ضعیف P-موج به S-موج در این گوشه رخ می‌دهد. S-موج و موج ریلی به شدت روی گوشه‌ی چپ دره منعکس می‌شوند. این انعکاس قوی منجر به یک منطقه‌ی سایه در سمت راست (سمت دور از منبع) دره می‌شود. تنها چند بخش از انرژی موج‌های بدنی و موج‌های ریلی می‌توانند در میان دره بخزند. علاوه‌براین، انتشار موج در گوشه‌ی چپ، راست و انتهای دره ظاهر می‌شود. در میان این انتشار موج‌ها، قوی‌ترین انتشار موج‌ها روی گوشه‌ی چپ تولید می‌شوند.

به طور خلاصه، موج‌های لرزه‌ای ورودی در تعامل با توپوگرافی نامنظم هستند و انتشار و تبدیل جدید موج‌ها را تولید می‌کنند. نتایج مقایسه‌ی عددی نشان می‌دهند که تاثیر توپوگرافی فرورفته برای موج‌های ریلی با فرکانس بالا متمایزتر از تاثیر توپوگرافی برآمده است. برای یک مدل توپوگرافیک برآمده، بخش‌های انرژی موج‌های ریلی، بین مرزهای هورست به دام می‌افتند. در همین حال، موج‌های ریلی به دام افتاده، به طور چندگانه توسط مرزها انعکاس می‌یابند. این پدیده، حقیقتی از یک زمینه‌ی خاص را آشکار می‌سازد. در زلزله، ساختمان‌های روی نوک یک کوه اغلب بدتر از ساختمان‌های روی نواحی دست آسیب می‌بینند. این برای مهندسی زلزله، ارزشمند است اگرچه خارج از پژوهش ما است.

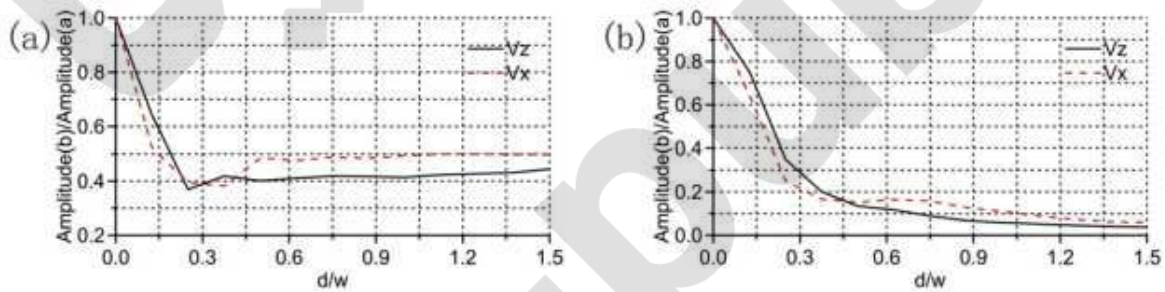
تاثیر شیب توپوگرافی روی انتشار موج‌های ریلی با فرکانس بالا

معمولاً، یک منبع تاثیر سطح برای تولید موج‌های ریلی با فرکانس بالا در کاربردهای روش‌های موج‌های ریلی در نزدیک سطح انتخاب می‌شود، برای مثال، روش MASW.^{۲۳} از آنجایی که انرژی موج‌های ریلی بر کل میدان موج غالب است لازم است که موج‌های قبل از تولید منحنی انتشار، خاموش شوند. علاوه‌براین، موج‌های ریلی، در میدان موج شبیه‌سازی ما غالب هستند. از این رو می‌توان تغییرات میدان موج کل را برای مطالعه‌ی تاثیر توپوگرافی سطح روی انتشار موج‌های ریلی با فرانس بالا تجزیه و تحلیل کرد. به علت توپوگرافی تشکیل شده‌ی

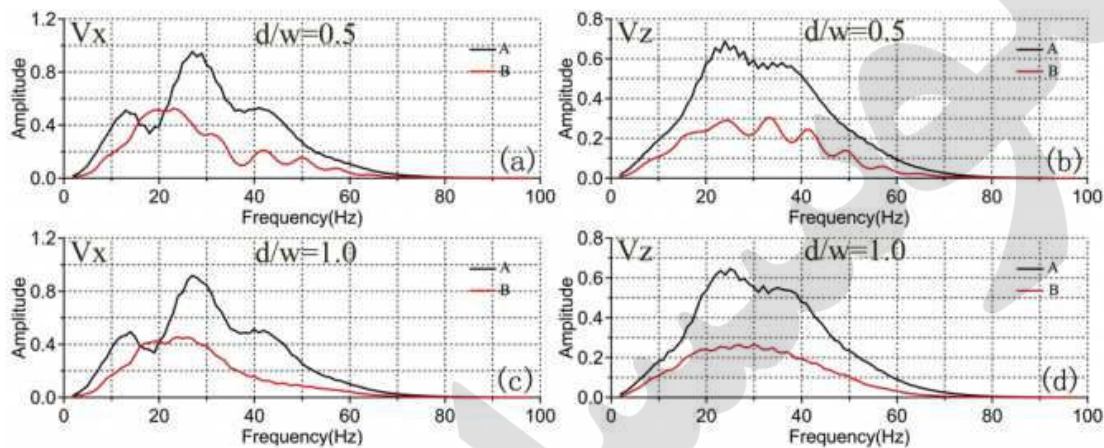
²³ e.g., Xia et al., 2002

سطح زمین توسط فرسایش در اثر هوا، دگردیسی، و غیره، دریافت کنندگان معمولاً در تست‌های MASW در ارتفاع یکسانی قرار ندارند. به عنوان یک نتیجه، تمرکز انرژی روی تصاویر انرژی انتشار معمولاً تحریف (یا برگردانده) می‌شود. در این حالت، برداشتن یک منحنی انتشار درست توسط روش متعارف مسیریابی انرژی، مشکل است. خطاهای کلانی را می‌توان برای فرایندهای وارون متعاقب تست MASW معرفی کرد. از این‌رو، نتایج تجزیه و تحلیل، در هدایت کاربردهای روش MASW در سطح نزدیک، مفید خواهد بود.

به منظور بحث تاثیر شیب توپوگرافی روی انتشار موج‌های ریلی، ما مدل‌های برآمده و فرورفته با عرض ثابت $w=80m$ را مطالعه می‌کنیم. ماکسیمم ارتفاع‌های (یا عمق‌های) (d) آن‌ها از ۱۰ متر به ۱۲۰ متر با افزایش‌های ۱۰ متر افزایش می‌یابد. بنابراین، شیب توپوگرافی توسط نسبت d/w توصیف می‌شود. پارامترهای کشسانی، یکسان با مدل‌های قبلی هستند. شکل توپوگرافی برآمده (یا فرورفته) توسط یک تابع سینوسی (یا کسینوسی) کنترل می‌شود. ما در این جا تنها، مدل‌های توپوگرافی با شیب به ترتیب $d/w=0.125$ ، $d/w=0.5$ ، $d/w=1$ و $d/w=1.5$ را برای مثال انتخاب می‌کنیم (شکل‌های ۶ و ۷).



شکل 8



شکل 9

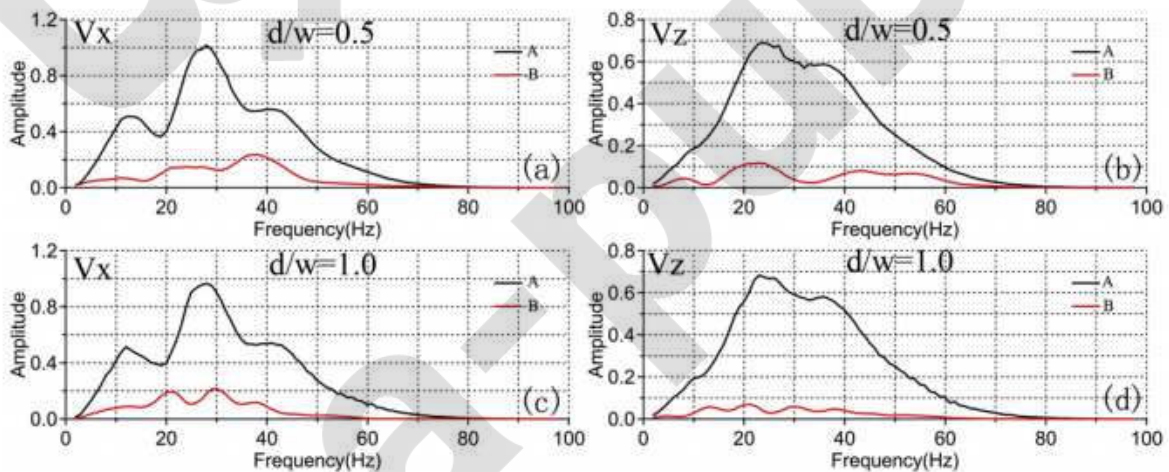
۱. تغییرات انرژی

در بحث تاثیر شیب توپوگرافی روی انتشار موجهای ریلی، ابتدا تغییر انرژی موجهای ریلی در نظر گرفته می‌شود. لرزه‌نگاشت‌های دو نقطه (مثلاً وارون مشخص ده با A و B در شکل‌های ۶ و ۷) از مدل‌های توپوگرافیک انتخاب می‌شوند. نقطه‌ی A در سمت چپ (سمت نزدیک منبع) هورست (یا تنگه)، ۸۰ متر دور از مرکز هورست (یا تنگه) واقعی است. در این دو مکان، موجهای ریلی و موجهای پراکنده پایا هستند. به طور نظری، ما می‌توانیم از نسبت فراوانی لرزه‌نگاشت‌ها در نقطه‌ی A و B استفاده کنیم (شکل ۸). در این تصاویر، محور افقی، شیب شیب توپوگرافی است (d/w) که دارای دامنه‌ی از ۰ تا ۵/۱ است. محور عمودی، نسبت انرژی است. خطوط توپوگرافیک، نسبت انرژی لرزه‌نگاشت سرعت ذره‌ای عمودی را نشان می‌دهند و خطوط خط‌چین قرمز، نسبت انرژی لرزه‌نگاشت سرعت ذره‌ای افقی را نشان می‌دهند.

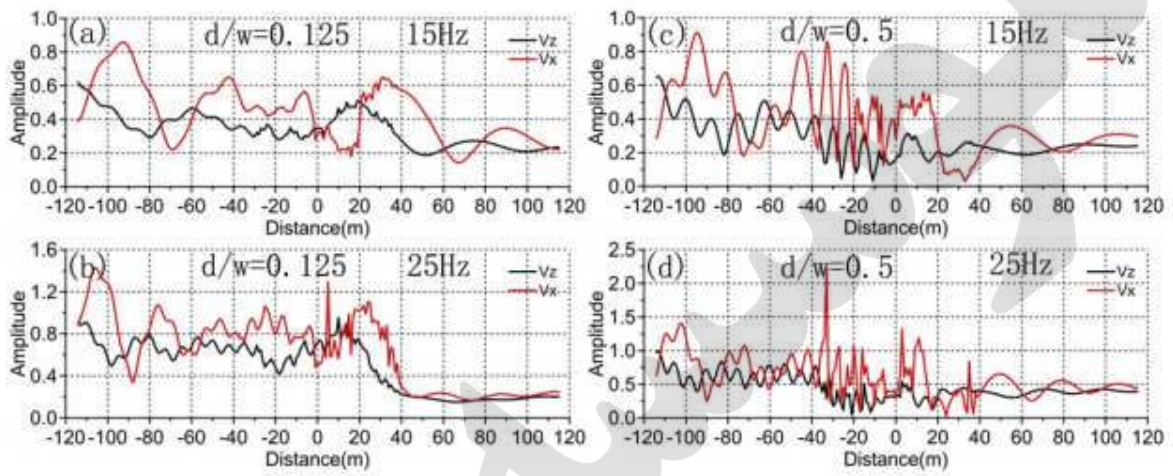
با افزایش شیب d/w ، انرژی کمتر و کمتری از موجهای ریلی در سمت دور از منبع توپوگرافی برآمده رها می‌شود (شکل ۸). این پدیده، تاثیر مانع توپوگرافی هورست روی انتشار موجهای ریلی با فرکانس بالا را آشکار می‌کند. اگرچه هنگامی که شیب‌های توپوگرافیک عمیق می‌شوند (برای مثال، $d/w > 0.5$) تغییر کمتری در نسبت انرژی لرزه‌نگاشت‌ها در نقاط A و B وجود دارد. این نشان می‌دهد که هنگامی که شیب هورست به یک مقدار خاص افزایش می‌یابد بخش‌های انرژی موجهای ریلی به طور مستقیم از یک سمت به سمت دیگر نفوذ

می‌کند. سپس، نسبت انرژی نقاط A و B در یک مقدار تقریبی ۴۰ درصد برای سرعت ذره‌ای عمودی و ۵۰ درصد برای سرعت ذره‌ای افقی حفظ می‌شود. این نسبت‌های بستگی به عرض ثابت توپوگرافی، پارامترهای منبع و پارامترهای کشسانی دارند که ما در شبیه‌سازی عددی تنظیم می‌کنیم. این مطالعه همچنین نشان می‌دهد که توپوگرافی هنگامی که طول موج لرزه‌ای قابل مقایسه با اندازه‌ی افقی ویژگی‌های توپوگرافیک است بر انتشار موج‌های لرزه‌ای اثر می‌گذارد.

مشابه با توپوگرافی برآمده، با افزایش d/w ، موج‌های ریلی پس از عبور از میان تنگه‌ها انرژی کمتری را رها می‌کنند. مدل با شیب $d/w=1.5$ که عمیق‌ترین تنگه است کمتر از ۱۰ درصد انرژی پس از عبور چنین توپوگرافی فرورفته‌ای برای هر دو مولفه‌ی افقی و عمودی، رها می‌شود. این بدین معنی است که هر چه توپوگرافی فرورفته دارای شیب بیشتری باشد انرژی بیشتری از موج‌های ریلی از دست می‌رود. در مقایسه، در حالت توپوگرافی فرورفته، انرژی ریلی بیشتری از دست می‌رود. در سمت دور از منبع تنگه، یک ناحیه‌ی سایه وجود دارد. در همین حال، شیب بیشتر تنگه موجب افزایش دامنه‌ی وسیع‌تر ناحیه‌ی سایه می‌شود.



شکل 10



شکل 11