

رسالة محمد





دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک  
رشته مهندسی معدن گرایش مکانیک سنگ

پایان نامه کارشناسی ارشد

مدل سازی عددی انتشار موج در توده سنگ درزه دار و مقایسه با روش‌های

تحلیلی

نگارنده: امیر صالح نژاد

استاد راهنما

دکتر مجید نیکخواه

استاد مشاور

دکتر امین روشندل کاهو

شهریور ۱۳۹۶

تقدیم بہ پدر و مادر م

آنان کہ خمیدنتا راست قامت بانم

آنان کہ موی سپید کردنتا روی سپید بانم

و خواهر م

آن مہربان ہمیشگی

## تقدیر و تشکر

حمد و سپاس بی پایان خداوند بلند مرتبه را که به من توفیق تحصیل و کسب علم عنایت نمود. اینک، که به مدد الطاف بی کران الهی،

مقطعی از دوران تحصیل به پایان می رسد بر خود لازم می دانم از تمامی کسانی که مراد این امریاری دادند تشکر و قدردانی نمایم. از استاد

راهبهای عزیز جناب آقای دکتر مجید مکیخواه و استاد مشاور دکتر امین روشندل کاہو و همچنین اساتید داوران محترم جناب آقایان دکتر

مرتضی جوادی و دکتر محمدرضا کمال تشکر و امتنان را دارم و همچنین برای دوستانی که مرا مورد لطف خود قرار داده اند، آرزوی

موفقیت، سعادت و بهروزی دارم.

## تعهد نامه

اینجانب **امیر صالح نژاد** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی معدن گرایش مکانیک سنگ از دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه شاهرود نویسنده پایان نامه کارشناسی ارشد تحت عنوان: **مدل سازی عددی انتشار موج در توده سنگ درزه دار و مقایسه با روش های تحلیلی تحت راهنمایی آقای دکتر مجید نیکخواه** و مشاوره **دکتر امین روشندل کاهو** متعهد می شوم:

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تا کنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام «دانشگاه شاهرود» و یا «Shahrood University» به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند، در مقالات مستخرج از این پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت های آنها) استفاده شده است، ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است، اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاقی انسانی رعایت شده است.

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده) مربوط به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

## چکیده

انتشار موج در توده سنگ‌ها یکی از مهم‌ترین مباحث در دینامیک سنگ بوده است که در صنایع مختلف نفتی، معدنی، عمرانی و نظامی کاربرد دارد. از آنجاییکه توده سنگ شامل ماده سنگ و اشکال مختلفی از ناپیوستگی‌ها است. ماهیت ناپیوستگی توده سنگ به‌طور قابل‌توجهی بر روی خصوصیات مکانیکی و رفتار مهندسی که شامل انتشار موج می‌شود نیز تأثیر می‌گذارد. زمانی که موجی در توده سنگ درزه‌دار سیر می‌کند، به دلیل وجود درزه‌ها و ناپیوستگی‌ها میرا می‌شود؛ بنابراین پیش‌بینی میرایی موج در حل مسایل ژئوفیزیک، تحقیقات لرزه‌نگاری، دینامیک سنگ و مهندسی زلزله ضروری هست. هدف این پایان‌نامه بررسی مطالعه عددی و تحلیلی انتشار موج در توده سنگ درزه‌دار است. برای روش تحلیلی، بر اساس روش ماتریس انتشار، روش ناپیوستگی جابجایی (DDM)، تحلیل موج صفحه‌ای و استفاده از تبدیل فوریه انتشار موج در تک درزه و چند درزه موازی مطالعه شد. در مطالعه عددی به‌منظور مدل‌سازی محیط ناپیوسته و انتشار موج دینامیکی از نرم‌افزار تجاری المان مجزای UDEC که قابلیت تحلیل دینامیکی مدل ناپیوسته را دارد، استفاده شده است. بعد از مطالعه پارامتریک، پارامترهایی شامل سختی درزه نرمال شده، زاویه‌داری درزه‌ها، فاصله‌داری درزه نرمال شده و تعداد درزه‌ها بر انتشار موج در تک درزه و چند درزه موازی تأثیر دارد. نتایج نشان‌دهنده آن است که همبستگی مطلوبی بین مطالعه تحلیلی، شبیه‌سازی عددی و مطالعه پژوهشگران قبلی وجود دارد.

**کلمات کلیدی:** انتشار موج، توده سنگ، شبیه‌سازی عددی، مطالعه تحلیلی، نرم‌افزار UDEC

## لیست مقالات مستخرج از پایان نامه

- ۱- صالح نژاد، امیر و مجید نیکخواه، ۱۳۹۵، بررسی تحلیلی و مدل سازی عددی انتشار موج در توده سنگ درزه دار تک درزه، دومین کنفرانس ملی ژئومکانیک نفت، تهران، انجمن ژئومکانیک نفت ایران- مدیریت اکتشاف شرکت ملی نفت ایران، دانشگاه صنعتی شاهرود،  
[https://www.civilica.com/Paper-NPGC02-NPGC02\\_181.html](https://www.civilica.com/Paper-NPGC02-NPGC02_181.html)



# فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۱	۱- فصل اول: کلیات تحقیق
۲	۱-۱- مقدمه
۳	۱-۲- ضرورت انجام تحقیق
۳	۱-۳- روش تحقیق
۵	۱-۴- ساختار فصل‌ها
۷	۲- فصل دوم: تعاریف و مروری بر مطالعات قبلی
۸	۲-۱- مقدمه
۹	۲-۲- روش‌های تحلیلی انتشار موج در توده سنگ درزه‌دار
۱۰	۲-۲-۱- روش محیط معادل (EMM)
۱۲	۲-۲-۲- روش ناپیوستگی جابجایی (DDM)
۱۷	۲-۲-۳- روش مشخصه (MC)
۲۴	۲-۲-۴- روش منبع موج مجازی (VWS)
۲۴	۲-۲-۴-۱- روش منبع موج مجازی و ترکیب با روش DDM
	۲-۲-۴-۲- روش منبع موج مجازی و ترکیب با روش مدل محیط معادل
۲۶	ویسکوالاستیک

- ۲۹ ..... روش بازگشتی (RM) ..... ۵-۲-۲
- ۳۰ ..... روش ماتریس پراکنده (SMM) ..... ۶-۲-۲
- ۳۱ ..... مقایسه روش های مختلف تحلیلی انتشار موج توده سنگ ..... ۳-۲
- ۳۲ ..... مدل سازی عددی انتشار موج از میان توده سنگ ..... ۴-۲
- ۳۴ ..... روش المان مجزا (DEM) ..... ۱-۴-۲
- ۳۹ ..... روش DDA ..... ۲-۴-۲
- ۴۰ ..... فرمول بندی DDA ..... ۱-۲-۴-۲
- ۴۲ ..... بررسی انتشار موج در توده سنگ با استفاده از روش DDA ..... ۲-۲-۴-۲
- ۴۵ ..... فصل سوم: مطالعه تحلیلی انتشار موج در توده سنگ درزه دار ..... ۳-۲
- ۴۶ ..... ۱-۳ - مقدمه ..... ۳-۲
- ۴۷ ..... ۲-۳ - مطالعه تحلیلی انتشار موج در توده سنگ درزه دار ..... ۳-۲
- ۶۰ ..... ۳-۳ - مطالعه پارامتریک انتشار موج در تک درزه ..... ۳-۲
- ۶۰ ..... ۱-۳-۳ - تأثیر سختی درزه نرمال شده بر انتشار موج ..... ۳-۲
- ۶۶ ..... ۲-۳-۳ - تأثیر زاویه ورودی بر انتشار موج ..... ۳-۲
- ۶۹ ..... ۴-۳ - مطالعه پارامتریک انتشار موج در چند درزه موازی ..... ۳-۲
- ۶۹ ..... ۱-۴-۳ - تأثیر فاصله داری نرمال شده درزه ها بر انتشار موج ..... ۳-۲
- ۷۱ ..... ۲-۴-۳ - تأثیر تعداد درزه ها بر موج عبوری ..... ۳-۲
- ۷۳ ..... ۵-۳ - جمع بندی ..... ۳-۲

- ۴- فصل چهارم: بررسی عددی انتشار موج در توده سنگ درزه دار ..... ۷۵
- ۴-۱- مقدمه ..... ۷۶
- ۴-۲- روش اجزا مجزا و نرم افزار عددی UDEC ..... ۷۷
- ۴-۳- ارزیابی انتشار موج در محیط سنگی دارای تک درزه ..... ۷۸
- ۴-۳-۱- بررسی انتشار موج p قائم ورودی به درزه ..... ۸۰
- ۴-۳-۲- بررسی انتشار موج P مایل ورودی به درزه ..... ۸۶
- ۴-۳-۳- تأثیر زاویه‌داری درزه‌ها بر انتشار موج ..... ۹۰
- ۴-۴- بررسی انتشار موج p از چند درزه موازی ..... ۹۳
- ۴-۴-۱- مدل‌سازی عددی انتشار موج از چند درزه موازی ..... ۹۳
- ۴-۴-۱-۱- تأثیر فاصله‌داری درزه نرمال شده بر انتشار موج ..... ۹۵
- ۴-۴-۲- تأثیر تعداد درزه‌ها بر انتشار موج ..... ۹۶
- ۴-۵- جمع‌بندی ..... ۹۹
- ۵- فصل پنجم: نتیجه‌گیری و پیشنهادها ..... ۱۰۱
- ۵-۱- نتیجه‌گیری کلی ..... ۱۰۲
- ۵-۲- پیشنهادها ..... ۱۰۴
- منابع ..... ۱۰۵
- واژه نامه ..... ۱۱۰

## فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۲: مفهوم محیط معادل (EMM) (Fan et al., 2012) ..... ۱۱
- شکل ۲-۲: مفهوم روش ناپیوستگی جابجایی (DDM) (Pyrak-Notle, 1990) ..... ۱۳
- شکل ۳-۲: ضرایب بازگشت و عبوری از موج ورودی P با زاویه های مختلف در سختی درزه نرمال شده مختلف (Gu et al., 1996) ..... ۱۵
- شکل ۴-۲: ضرایب بازگشت و عبوری از موج ورودی S با زاویه های مختلف در سختی درزه نرمال شده مختلف (Gu et al., 1996) ..... ۱۶
- شکل ۵-۲: مشخصات درزه در صفحه بی بعد x-t (Zhao et al., 2006) ..... ۲۰
- شکل ۶-۲: مفهوم منبع موج مجازی (VWS) (Zhu, 2011) ..... ۲۶
- شکل ۷-۲: توده سنگ دارای چند درزه موازی (Li et al., 2010) ..... ۲۸
- شکل ۸-۲: محیط معادل بدون VWS (Li et al., 2010) ..... ۲۸
- شکل ۹-۲: محیط معادل با VWS (Li et al., 2010) ..... ۲۸
- شکل ۱۰-۲: انتشار موج از یک درزه توسط روش SMM (Perino et al., 2010) ..... ۳۰
- شکل ۱۱-۲: انواع روش‌های عددی رایج در مکانیک سنگ (خانی زاده بهابادی و همکاران ۱۳۹۵) ..... ۳۳
- شکل ۱۲-۲: مقایسه بین نتایج عددی و روش تحلیلی در سختی درزه نرمال شده در موج عبوری (Zhao et al., 2008) ..... ۳۶
- شکل ۱۳-۲: تأثیر تعداد درزه‌ها بر موج عبوری (Zhao et al., 2008) ..... ۳۶
- شکل ۱۴-۲: تأثیر سختی نرمال درزه بر موج عبوری با استفاده از روش عددی و روش تحلیلی (Zhu)

- ۳۷ ..... (et al., 2013)
- شکل ۲-۱۵: تأثیر سختی برشی درزه بر موج عبوری با استفاده از روش عددی و روش تحلیلی (Zhu
- ۳۸ ..... (et al., 2013)
- شکل ۲-۱۶: تأثیر فاصله‌داری نرمال شده بر موج عبوری با استفاده از روش عددی و روش تحلیلی
- ۳۸ ..... (Zhu et al., 2013)
- شکل ۲-۱۷: تغییر شکل کلی بلوک با استفاده از روش DDA (Shi.,1993) ..... ۴۱
- شکل ۲-۱۸: تأثیر فاصله‌داری درزه بر موج عبوری در سختی درزه مختلف با استفاده از روش
- ۴۴ ..... (W. GONG et al., 2017) DDA
- شکل ۳-۱: شکل نمادین انتشار موج ورودی  $p$  از محیط توده سنگ درزه‌دار موازی ..... ۴۸
- شکل ۳-۲: تغییرات سختی الاستیک نرمال شده درزه بر موج عبوری برای موج عمودی تابشی  $P$  ..... ۶۲
- شکل ۳-۳: تغییرات سختی الاستیک نرمال شده درزه بر موج بازگشتی برای موج عمودی تابشی  $P$  ..... ۶۲
- شکل ۳-۴: تغییرات سختی الاستیک نرمال شده درزه بر  $R_{pp}$  برای موج تابشی ورودی  $P$  ..... ۶۴
- شکل ۳-۵: تأثیر سختی الاستیک نرمال شده درزه بر  $T_{pp}$  برای موج تابشی ورودی  $P$  ..... ۶۴
- شکل ۳-۶: تغییرات سختی الاستیک نرمال شده درزه بر  $R_{ps}$  برای موج تابشی ورودی  $P$  ..... ۶۵
- شکل ۳-۷: تغییرات سختی الاستیک نرمال شده درزه بر  $T_{ps}$  برای موج تابشی ورودی  $P$  ..... ۶۵
- شکل ۳-۸: تغییرات زاویه موج تابشی ورودی بر  $R_{pp}$  برای حالت تک درزه ..... ۶۷
- شکل ۳-۹: تغییرات زاویه موج تابشی ورودی بر  $T_{pp}$  برای حالت تک درزه ..... ۶۷
- شکل ۳-۱۰: تغییرات زاویه موج تابشی ورودی بر  $R_{ps}$  برای حالت تک درزه ..... ۶۸

- شکل ۳-۱۱: تغییرات زاویه تابش موج ورودی بر  $T_{ps}$  برای حالت تک درزه ..... ۶۸
- شکل ۳-۱۲: تأثیر نسبت فاصله‌داری نرمال شده درزه‌ها بر مقدار موج عبوری در K مختلف ..... ۷۱
- شکل ۳-۱۳: تأثیر فاصله‌داری نرمال شده درزه‌ها بر موج عبوری- $T_{pp}$  ..... ۷۲
- شکل ۴-۱: هندسه و شرایط مرزی مدل UDEC برای انتشار موج P در محیط سنگی تک درزه ..... ۸۱
- شکل ۴-۲: بررسی عددی تأثیر سختی الاستیک نرمال شده بر موج عبوری عمودی P در محیط سنگی تک درزه ..... ۸۲
- شکل ۴-۳: بررسی عددی تأثیر سختی الاستیک نرمال شده بر موج بازگشتی عمودی P در محیط سنگی تک درزه ..... ۸۳
- شکل ۴-۴: شکل موج عبوری برای سختی درزه نرمال شده برابر ۱ ..... ۸۴
- شکل ۴-۵: شکل موج ورودی و بازگشتی برای سختی درزه نرمال شده ۱ ..... ۸۴
- شکل ۴-۶: شکل موج عبوری برای سختی درزه نرمال شده ۲ ..... ۸۵
- شکل ۴-۷: شکل موج ورودی و بازگشتی برای سختی درزه نرمال شده ۲ ..... ۸۵
- شکل ۴-۸: هندسه مدل عددی برای انتشار موج ورودی مایل P با زاویه ورودی ۲۴,۴۸ ..... ۸۷
- شکل ۴-۹: بررسی عددی تأثیر سختی الاستیک نرمال شده بر موج عبوری و مقایسه با روش‌های دیگر ..... ۸۸
- شکل ۴-۱۰: بررسی عددی تأثیر سختی الاستیک نرمال شده بر موج بازگشتی و مقایسه با روش‌های دیگر ..... ۸۹
- شکل ۴-۱۱: بررسی عددی تأثیر سختی الاستیک نرمال شده بر موج بازگشتی تبدیلی و مقایسه با روش‌های دیگر ..... ۸۹

- شکل ۴-۱۲: بررسی عددی تأثیر سختی الاستیک نرمال شده بر موج عبوری تبدیلی و مقایسه با روش‌های دیگر ..... ۹۰
- شکل ۴-۱۳: تأثیر زاویه‌داری درزه‌ها بر موج عبوری با استفاده از مدل‌سازی عددی ..... ۹۱
- شکل ۴-۱۴: تأثیر زاویه‌داری درزه‌ها بر موج بازگشتی تبدیلی با استفاده از مدل‌سازی عددی ..... ۹۲
- شکل ۴-۱۵: تأثیر زاویه‌داری درزه‌ها بر موج عبوری تبدیلی با استفاده از مدل‌سازی عددی ..... ۹۲
- شکل ۴-۱۶: تأثیر زاویه‌داری درزه‌ها بر موج بازگشتی با استفاده از مدل‌سازی عددی ..... ۹۳
- شکل ۴-۱۷: هندسه و شرایط مرزی مدل UDEC برای انتشار موج p در محیط سنگی دو درزه ..... ۹۴
- شکل ۴-۱۸: بررسی تأثیر نسبت فاصله‌داری به طول موج بر مقدار موج عبوری در K مختلف با استفاده از روش عددی و تحلیلی ..... ۹۶
- شکل ۴-۱۹: هندسه مختصاتی UDEC با دو درزه برای بررسی تأثیر تعداد درزه‌ها بر انتشار موج P ..... ۹۸
- شکل ۴-۲۰: بررسی عددی تعداد درزه‌ها بر موج عبوری و مقایسه با روش تحلیلی ..... ۹۸

## فهرست جداول

جدول ۴-۱: خصوصیات مکانیکی محیط دربرگیرنده (Perino et al., 2010) ..... ۸۰



# فصل اول

## کلیات تحقیق

امروزه مطالعه انتشار موج از میان شکستگی‌های توده سنگ<sup>۱</sup> در کاربردهای مختلف مهندسی و علمی اهمیت زیادی پیدا نموده است. به‌طور کلی زمینه‌های مشترک زیادی بین پدیده انتشار موج و خواص بنیادی توده سنگ وجود دارد. مبحث انتشار موج یکی از مهم‌ترین مسایل مطرح‌شده در صنایع نفت، معدن، عمران، نظامی، پدافند غیرعامل، مطالعات دینامیک خاک و سنگ است. بررسی پدیده انتشار موج در تونل‌های شهری و تأثیرهای آن بر روی سازه‌های مجاور، مسأله انفجار در صنایع نظامی، انتشار موج در بررسی‌های ژئومکانیک نفت، بررسی شدت میرایی موج انفجار در بحث معادن و پروژه‌های عمرانی، بررسی امواج زلزله در محیط‌های پیوسته و ناپیوسته و تأثیرهای مخرب آن، همگی کاربردهای مختلف پدیده انتشار موج در محیط‌های گوناگون است (سبحانی، ۱۳۹۰). از نظر طراحی ژئومکانیکی، توده سنگ شامل ماده سنگ و اشکال مختلفی از ناپیوستگی‌ها (مانند درزه‌ها، گسل و صفحات لایه‌بندی) است (Zhu, 2011). وجود ناپیوستگی در توده سنگ به‌طور قابل‌توجهی بر روی خصوصیات مکانیکی و رفتار مهندسی آن‌ها و همچنین انتشار موج تأثیر می‌گذارد. عموماً زمانی که یک موج در ناپیوستگی‌های توده سنگ عبور می‌کند، به علت اتلاف و تضعیف آن در درزه‌ها، سرعت موج و دامنه موج کاهش می‌یابد. به‌علاوه میرایی دامنه موج به دلیل وجود درزه‌ها در مقایسه با کاهش سرعت حساسیت بیشتری داشته است؛ بنابراین، پیش‌بینی میرایی موج در سراسر درزه‌های سنگی در حل مسایل ژئوفیزیکی، تحقیقات لرزه‌نگاری، دینامیک سنگ و مهندسی زلزله ضروری است.

---

<sup>۱</sup> Rock mass

## ۱-۲- ضرورت انجام تحقیق

طبیعت و توزیع عوارض ساختاری مانند درزه‌ها در داخل توده سنگ، رفتار توده سنگ را در مقابل بارگذاری‌های استاتیکی و دینامیکی تحت تأثیر قرار می‌دهد. به علت تأثیر مستقیم مسأله دینامیکی در پایداری سازه‌های ساخته دست بشر، تحلیل دینامیکی و بررسی تأثیر انتشار موج در پروژه‌های معدنی، عمرانی، نفتی و دفاعی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. حرکت قطارهای شهری و تأثیر آن بر سازه‌های مجاور، مسأله انفجار در صنایع نظامی و بررسی میرایی موج انفجار، مطالعه بررسی‌های لرزه‌ای در مخازن نفتی و گازی، بررسی امواج زلزله در توده سنگ و اثرهای آن روی خواص مختلف توده سنگ، همگی از کاربردهای پدیده انتشار موج می‌باشند که آگاهی و شناخت کافی از چگونگی انتشار موج در محیط‌های سنگی به‌ویژه برای پروژه‌هایی که از اهمیت و حساسیت بالاتری برخوردارند، ضروری هست. در بحث انتشار موج حاصل از انفجار در توده سنگ به دلیل عبور و بازگشت موج با تضعیف انرژی موج همراه است از این‌رو در طراحی و حفاظت سازه‌های سطحی و زیرزمینی، چگونگی و میزان عبور انتشار موج در محیط توده سنگ از منبع موج تا رسیدن به سازه‌های موردنظر، رفتار ساختارهای مختلف توده سنگ و میرایی موج در محیط اهمیت می‌یابد. بنابراین بررسی اثرها و نقش ناپیوستگی‌های توده سنگ بر انتشار موج اهمیت می‌یابد.

## ۱-۳- روش تحقیق

مطالعات و تحقیقات انجام‌شده در زمینه انتشار موج را می‌توان به سه بخش شامل روش‌های تحلیلی، روش‌های اندازه‌گیری و آزمایشگاهی و روش‌های عددی تقسیم نمود (سبحانی، ۱۳۹۰). هدف این پژوهش بررسی و ارزیابی قابلیت روش‌های تحلیلی و عددی انتشار موج در توده سنگ درزه‌دار هست. در این تحقیق قابلیت مدل‌های تحلیلی و عددی برای در نظر گرفتن تأثیر درزه‌ها بر روی انتشار موج مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

در توده سنگ، هر شکستگی خصوصیات متفاوتی نسبت به دیگر شکستگی‌ها دارد و بنابراین تأثیر آن‌ها بر انتشار موج متفاوت خواهد بود. به همین دلیل مطالعه انتشار موج در درزه باید در دو قالب، درزه منفرد و چند درزه موازی مورد بررسی قرار گیرد و پارامترهای تأثیرگذار از هم تفکیک شوند (Cai and Zhao, 2000). در ابتدا با توجه به روش‌های تحلیلی به مطالعه انتشار موج در توده سنگ درزه‌دار پرداخته می‌شود. این مطالعه در به دست آوردن رابطه بین انتشار موج (زاویه تابش موج)، خواص مکانیکی درزه (سختی) و خصوصیات هندسی درزه (فاصله‌داری و تعداد درزه‌ها) تمرکز دارد. بر همین اساس برای تک درزه به مطالعه سختی درزه نرمال شده و زاویه تابش موج  $P$  بر موج عبوری، بازگشتی و تبدیل موج بررسی می‌شود. برای تأثیر زاویه تابش موج  $P$  بر انتشار موج وارد بر درزه، ضریب عبور، بازگشت و ضریب تبدیل موج برای زوایای بین  $0^\circ$  تا  $90^\circ$  درجه مورد بررسی واقع شده است. برای چند درزه موازی نیز عبور موج با سختی درزه متفاوت و در سراسر درزه‌های متعدد با فاصله‌داری‌های متفاوت انجام شده است.

یکی از مهم‌ترین پیشرفت‌ها در تحلیل و طراحی مسایل ژئومکانیکی در سال‌های گذشته پایه‌گذاری و توسعه نرم‌افزارهای متعدد بر پایه روش‌های عددی مختلف بوده است که قابلیت شبیه‌سازی جنبه‌های مختلف تغییر شکل و شکست در پروژه‌های اجرا شده در محیط‌های مختلف را دارند. نکته مهم در نظر گرفتن معیارهایی برای انتخاب مناسب آن‌ها در مسایل ژئومکانیکی معدن است. در این پژوهش به منظور مدل‌سازی محیط ناپیوسته و انتشار موج دینامیکی در این محیط از نرم‌افزار تجاری المان مجزای UDEC<sup>1</sup> که قابلیت تحلیل دینامیکی مدل ناپیوسته زمین را دارا است، استفاده خواهد شود. برای مدل‌سازی نیز همانند مطالعه تحلیلی به بررسی انتشار موج در تک درزه و چند درزه موازی پرداخته خواهد شد. برای تک درزه سختی درزه نرمال شده و زاویه تابش موج بر

---

<sup>1</sup>Universal Distinct Element method

انتشار موج بررسی شده و با مطالعه تحلیلی و مطالعات پژوهشگران قبلی مقایسه خواهد شد. در چند درزه موازی نیز فاصله‌داری نرمال شده و تعداد درزه‌ها بر موج عبوری ارزیابی شده است و تأثیر هر کدام از پارامترها بررسی شده است.

#### ۱-۴- ساختار فصل‌ها

این پایان‌نامه در ۵ فصل تهیه و تدوین شده است. پس از فصل اول که در مورد کلیات موضوع بیان شد، در فصل دوم به تعاریفی از انتشار موج و مروری بر مطالعات قبلی در انتشار موج در زمینه عددی و تحلیلی پرداخته می‌شود. در فصل سوم به بررسی روش تحلیلی انتشار موج در توده سنگ درزه‌دار و تأثیر پارامترهای سختی درزه نرمال شده و زاویه تابش موج  $P$  بر موج عبوری، بازگشتی و تبدیل موج و فاصله‌داری درزه نرمال شده و تعداد درزه‌ها بر موج عبوری بررسی خواهد شد و با مطالعات پژوهشگران قبلی نیز مقایسه می‌شود. در فصل چهارم به بیان روش عددی انتشار موج در توده سنگ درزه‌دار و نحوه مدل‌سازی انتشار موج در محیط ناپیوسته به کمک نرم‌افزار UDEC و همچنین نتایج حاصل از نتایج عددی در محیط ناپیوسته بیان می‌گردد و تأثیر پارامترهای ذکر شده در مطالعات تحلیلی نیز در مطالعات عددی بررسی می‌شود و با مطالعه تحلیلی ذکر شده در فصل سوم نیز مقایسه خواهد شد و در نهایت در فصل پنجم جمع‌بندی کلی از نتایج به‌دست آمده و همچنین پیشنهادهایی جهت کارهای آتی ارائه می‌گردد.



## فصل دوم

### تعاريف و مروری بر مطالعات قبلی

## ۲-۱- مقدمه

انتشار موج در توده سنگ‌ها یکی از مهم‌ترین مباحث در دینامیک سنگ بوده که در صنایع مختلف نفتی، معدنی، عمرانی و نظامی کاربرد دارد. از آنجائیکه توده سنگ شامل ماده سنگ<sup>۱</sup> و اشکال مختلفی از ناپیوستگی‌ها بوده، ماهیت ناپیوستگی‌های توده سنگ به‌طور قابل‌توجهی بر روی خصوصیات مکانیکی و رفتار مهندسی که شامل انتشار موج می‌شود، تأثیرگذار است، بنابراین آگاهی و شناخت کافی از چگونگی انتشار موج در توده سنگ‌ها به‌ویژه برای پروژه‌هایی که از اهمیت و حساسیت بالایی برخوردارند، ضروری است.

هنگامی که یک جسم تحت نیروی بیرونی قرار می‌گیرد، تغییر شکل می‌دهد و تنش‌های درونی در داخل جسم ایجاد می‌شود. رابطه میان تنش و کرنش به طبیعت تغییر شکل و عوامل بیرونی دیگر مانند دما وابسته است (Achenbach, 2012). اگر تغییر شکل ایجاد شده، بعد از حذف نیروی مولد آن به حالت اولیه بازگردد، تغییر شکل ایجادشده را الاستیک یا کشسان می‌نامند. اگر بخشی از تغییر شکل باقی بماند، تغییر شکل پلاستیک نامیده می‌شود. حرکات، تکان‌ها و ضربه‌های زیرزمینی، حرکات ارتعاشی در قشر زمین به وجود می‌آورند که به صورت امواج از محل این حرکات به تمام جهات منتشر می‌گردند و در رسیدن به سطح زمین اثراتی را به صورت لرزش ظاهر می‌سازند.

چهار نوع اصلی امواج الاستیک وجود دارند. دو نوع از این امواج از درون زمین عبور می‌نمایند؛ بدین ترتیب که از مبدا به تمام جهات انتشار می‌یابند و به آن‌ها اصطلاحاً امواج حجمی می‌گویند. دو نوع دیگر از این امواج پس از برخورد امواج حجمی به سطح انفصالی ایجاد و سپس در امتداد سطح زمین یا سطوح ناپیوستگی منتشر می‌شوند و از این‌رو به امواج سطحی معروف‌اند (بالیده، ۱۳۸۳).

---

<sup>۱</sup> Intact rock



از دو نوع امواج حجمی آنکه سرعت بیشتری دارد و توسط گیرنده‌های زلزله، ابتدا ثبت می‌شود، موج اولیه<sup>۱</sup> یا موج P نامیده می‌شود. علت سرعت بالای این موج این است که امتداد ارتعاش ذرات در امتداد انتشار آن است. موج طولی از تمام محیط‌های جامد، مایع و گاز می‌گذرد و باعث تغییر حجم اجسام می‌گردد. موج دیگری که در داخل حجم ماده انتشار می‌یابد و سرعت آن از موج P کمتر است به نام موج برشی<sup>۲</sup> یا S معروف است. در این نوع امواج امتداد ارتعاش ذرات، عمود بر امتداد انتشار موج است. این موج تنها از محیط‌های جامد می‌گذرد زیرا این موج سبب تغییر شکل برشی اجسام می‌گردد. عملکرد این موج به هنگام زلزله تکان دادن سازه‌ها است (بالیده، ۱۳۸۳). در این تحقیق به مطالعه انتشار موج P در توده سنگ درزه‌دار در محیط الاستیک پرداخته خواهد شد. در این فصل به بررسی مطالعه‌های پیشین در زمینه مطالعه‌های تحلیلی و مدل‌سازی عددی انتشار موج پرداخته می‌شود. در زمینه مطالعات تحلیلی و عددی به بیان روش‌های مختلف انتشار موج در تک درزه و درزه‌های موازی پرداخته و مقایسه میان روش‌های موجود و مزایا و معایب آن‌ها نیز بررسی شده است.

## ۲-۲- روش‌های تحلیلی انتشار موج در توده سنگ درزه‌دار

مطالعه تحلیلی انتشار موج توده سنگ درزه‌دار توسط محققان زیادی صورت پذیرفته است. برای مطالعه ضرایب بازگشت و عبوری از طریق انتشار موج در توده سنگ درزه‌دار، عمدتاً دو مدل وجود دارد. اولین روش، روش محیط معادل<sup>۳</sup> (EMM) و دیگری روش ناپیوستگی جابجایی<sup>۴</sup> (DDM) است (Zhu et al(a), 2011). روش‌های تحلیلی دیگر نظیر روش مشخصه<sup>۵</sup> (MC) (Cai et al., 2000)،

---

<sup>۱</sup> Primary wave

<sup>۲</sup> Shear wave

<sup>۳</sup> Equivalent Medium Method

<sup>۴</sup> Displacement Discontinuity Method

<sup>۵</sup> Method of Characteristics

روش منبع موج مجازی<sup>۱</sup> (VWS) (Zhu et al., 2012)، روش بازگشتی<sup>۲</sup> (RM) (Zhu et al., 2012) و روش ماتریس پراکنده<sup>۳</sup> (SMM) (Perino et al., 2010) نیز بدین منظور توسعه داده شده‌اند که در ادامه مورد بررسی قرار می‌گیرد.

## ۲-۲-۱- روش محیط معادل (EMM)

روش محیط معادل (EMM) برای بررسی ضرایب بازگشت و عبوری به‌طور وسیع به منظور تحلیل تأثیر خلل و فرج‌ها، میکروتَرَک‌ها و درزه‌ها بر انتشار موج به کار برده می‌شود (Li et al., 2010). همچنان که در شکل ۱-۲ نشان داده شده است و از نام روش نیز مشخص است، در روش EMM مواد و ناپیوستگی‌ها با هم تشکیل یک محیط پیوسته، همگن و همسان گرد معادل که با خواص مؤثر تقریب زده می‌شود، می‌دهند؛ بنابراین موج همانند اینکه در یک محیط همگن و همسان گرد سیر می‌کند، انتشار می‌یابد. در این روش از مدول مؤثر محیط معادل، برای تأثیر ناپیوستگی‌ها بر انتشار موج استفاده می‌شود. روش EMM برای تحلیل انتشار موج در سراسر درزه‌ها استفاده شده است. وجود درزه‌ها منجر به کاهش مدول الاستیک مواد سنگی می‌شوند. روش‌های محاسبه مدول مؤثر<sup>۴</sup> عمدتاً بر اساس هندسه ساختار، توزیع درزه‌ها و پرشدگی درزه‌ها است. بایوت<sup>۵</sup> (۱۹۵۶) برای اولین بار از روش EMM برای تأثیر درزه‌های اشباع‌شده موازی در انتشار موج P استفاده کردند. شونبرگ<sup>۶</sup> و دوما<sup>۷</sup> (۱۹۸۸) تأثیر یک دسته از ساختار موازی را با استفاده از مدول معادل توده سنگ بر انتشار موج تنش

---

<sup>۱</sup> Virtual Wave Source

<sup>۲</sup> Recursive Method

<sup>۳</sup> Scattering Matrix Method

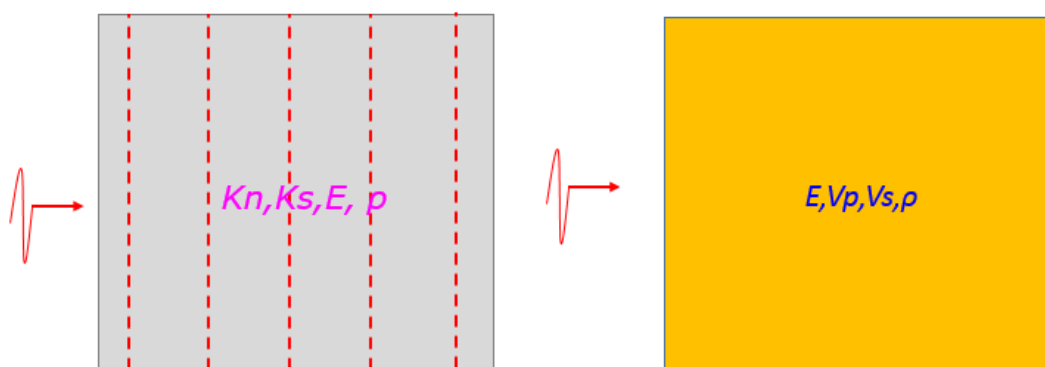
<sup>۴</sup> Effective modulus

<sup>۵</sup> Biot

<sup>۶</sup> Shoenberg

<sup>۷</sup> Douma

بررسی کرده‌اند. شونبرگ و مور<sup>۱</sup> (۱۹۸۹) با استفاده از یک استنباط از مدول الاستیک مؤثر برای نشان دادن خصوصیات محیط ناهمسانگرد بررسی کردند. بر اساس این مدل، خواص توده سنگ با شکستگی‌های متعدد را می‌توان در یک دستگاه مختصاتی توصیف کرد. شونبرگ و سایرس<sup>۲</sup> (۱۹۹۵) تأثیر درزه‌ها را بر انتشار موج لرزه‌ای از طریق توده سنگ درزه‌دار از طریق نوشتن تانسور نرمی<sup>۳</sup> توده سنگ درزه‌دار به صورت جمع تانسور نرمی از ماده سنگ و نوشتن تانسور نرمی برای هر دسته درزه بررسی کردند. ما<sup>۴</sup> و همکاران (۲۰۱۳) روش EMM را برای توده سنگ درزه‌دار اتخاذ کرده‌اند و با استفاده از محیط ویسکوالاستیک معادل و تحلیل تبدیل فوریه به بررسی انتشار موج در توده سنگ درزه‌دار پرداختند. با این حال یکی از محدودیت‌های روش EMM، بازتاب‌های متعدد هر موج است که در این روش در نظر گرفته نمی‌شود. در شکل زیر  $K_n, K_s, E, \rho, V_p, V_s$  به ترتیب سختی نرمال، سختی برشی، مدول الاستیسیته، سرعت انتشار موج P و سرعت انتشار موج S است.



شکل ۱-۲: مفهوم محیط معادل (EMM) (Fan et al., 2012)

<sup>۱</sup> Muir

<sup>۲</sup> Sayers

<sup>۳</sup> Compliance

<sup>۴</sup> Ma

## ۲-۲-۲- روش ناپیوستگی جابجایی (DDM)

محققان زیادی از روش ناپیوستگی جابجایی (DDM)، برای مطالعه انتشار موج در توده سنگ درزه‌دار استفاده کرده‌اند. DDM در اصل به‌وسیله میندلین<sup>۱</sup> (۱۹۶۰) پیشنهاد شده است و پس از آن برای تحلیل انتشار موج لرزه‌ای توسط شونبرگ (۱۹۸۰) به کار گرفته شده است (Zhou et al., 2016). همان‌طور که در شکل ۲-۲ نشان داده شده است، روش DDM اثر درزه‌ها در انتشار موج را بر اساس تحلیل صریح<sup>۲</sup> از عبور و بازگشت درزه‌ها قرار دارد. فرض اساسی این روش این است که موج از یک درزه منتشر شده، تنش‌ها پیوسته هستند، در حالی که جابجایی نیستند و درزه به‌عنوان یک رابط غیر جوش داده شده رفتار می‌کند (Zhao and Cai, 2001). اگرچه درزه ضخامت صفر دارد، تأثیر درزه‌ها بر روی انتشار موج به خواص مکانیکی درزه بستگی دارد. معادلات کلی شرایط مرزی برای توصیف ریاضی درزه‌ها در انتشار موج به صورت روابط (۱-۲) و (۲-۲) هست.

$$\Delta u_i = \frac{1}{f(M_j)} \sigma_i \quad (1-2)$$

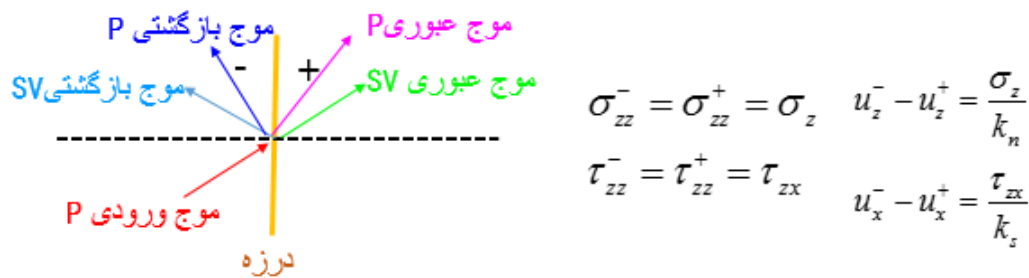
$$\Delta \sigma_i = 0 \quad \text{و} \quad (2-2)$$

که در روابط بالا  $\Delta u_i$  مقدار تغییرات جابجایی،  $\Delta \sigma_i$  مقدار تغییرات تنش و  $f$  تابعی از خصوصیات مکانیکی درزه  $M_j$  می باشد.

---

<sup>۱</sup> Mindlin

<sup>۲</sup> Explicit



شکل ۲-۲: مفهوم روش ناپیوستگی جابجایی (DDM) (Pyrak-Notle et al., 1990)

در شکل بالا  $\tau_{zx}$  بیانگر تنش برشی است. پیراک نولت و همکاران (۱۹۹۰) با استفاده از DDM همچنین به مطالعه انتشار موج در تک درزه با رفتار الاستیک خطی پرداخته اند. ضرایب بازگشت (R) و عبوری (T) برای تک درزه برای موج ورودی P و S از رابطه های (۲-۳) تا (۲-۶) قابل محاسبه است.

$$R_p = \frac{i}{-i + \frac{2K}{Z_p \omega}} \quad (۲-۳)$$

$$T_p = \frac{\frac{2K}{Z \omega}}{-i + \frac{2K}{Z \omega}} \quad (۲-۴)$$

$$T_s = \frac{2(K - i \omega \eta)}{2K - i \omega (2\eta + Z_s)} \quad (۲-۵)$$

$$R_s = \frac{(i \omega Z_s)}{2K - i \omega (2\eta + Z_s)} \quad (۲-۶)$$

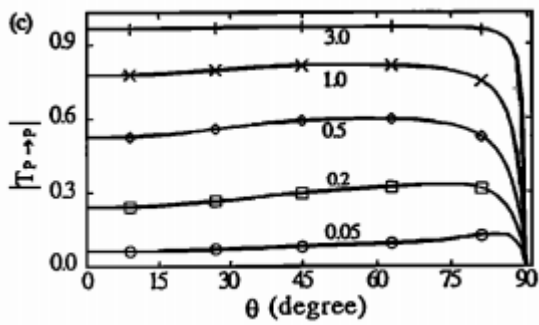
که در روابط بالا  $K$  سختی عمودی یا برشی درزه،  $Z$  امپدانس موج که برابر است با حاصلضرب چگالی ماده در سرعت انتشار موج P یا S،  $\omega$  فرکانس زاویه‌ای،  $i$  عدد موهومی و  $\eta$  ویسکوزیته مخصوص هست. روابط بالا نشان می‌دهد که ضرایب بازگشت و عبوری به ترکیبی از پارامترها بستگی

دارد.

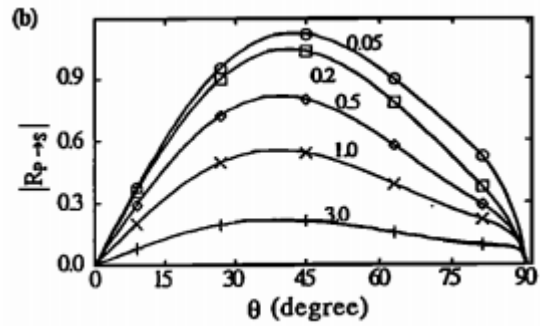
جیو<sup>۱</sup> و همکاران (۱۹۹۶) روش DDM را برای مطالعه انتشار موج در محیط دارای تک درزه مایل، برای ضرایب بازگشت و عبوری به صورت تحلیلی برای هر دو موج S و P به کار بردند. در این روش ارتباط بین زاویه های مختلف با ضریب بازگشتی و عبوری موج برای سختی های برشی و نرمال مختلف مطالعه نمودند. در شکل های ۲-۳ و ۲-۴ نتایج حاصل از مطالعات جیو و همکاران (۱۹۹۶) برای ضرایب بازگشت و عبوری موج ورودی P و S در سختی های درزه نرمال شده مختلف نشان داده شده است.

---

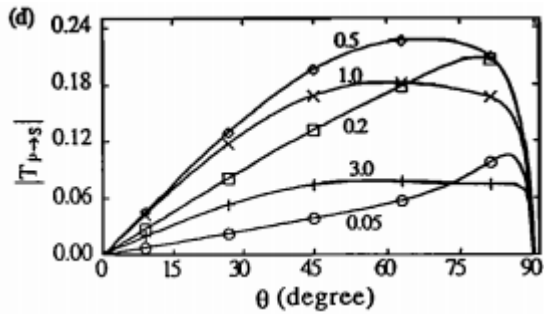
<sup>۱</sup> Gu



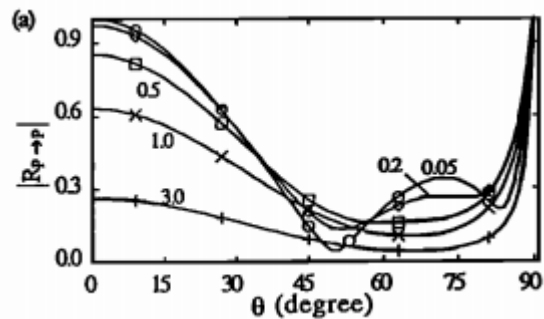
(ب)



(الف)

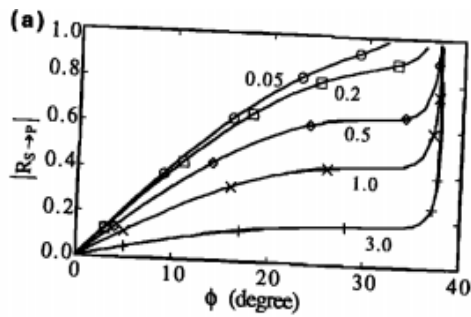


(د)

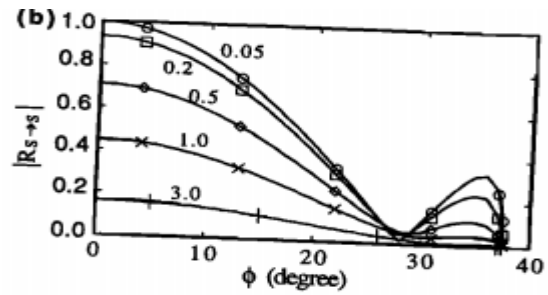


(ج)

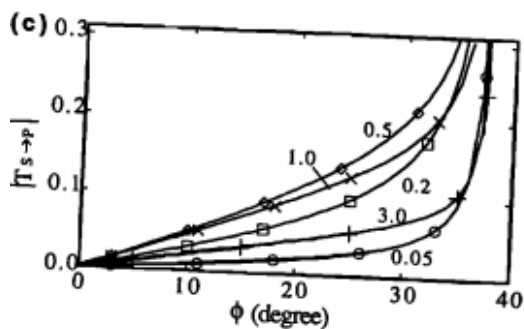
شکل ۲-۳: ضرایب بازگشت و عبوری از موج ورودی P با زاویه های مختلف در سختی درزه نرمال شده مختلف (Gu et al., 1996) الف) تأثیر زاویه داری درزه بر موج بازگشتی تبدیلی، ب) تأثیر زاویه داری درزه بر موج عبوری، ج) تأثیر زاویه داری درزه بر موج بازگشتی و د) تأثیر زاویه داری درزه بر موج عبوری تبدیلی



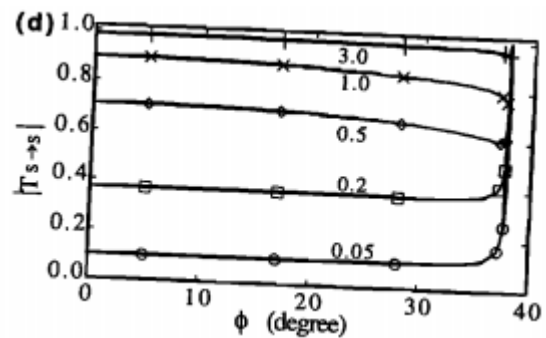
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل ۲-۴: ضرایب بازگشت و عبوری از موج ورودی S با زاویه های مختلف در سختی درزه نرمال شده مختلف (Gu et al., 1996) (الف) تأثیر زاویه داری درزه بر موج بازگشتی ، (ب) تأثیر زاویه داری درزه بر موج بازگشتی تبدیلی ، (ج) تأثیر زاویه داری درزه بر موج عبوری و (د) تأثیر زاویه داری درزه بر موج عبوری تبدیلی

در شکل های بالا  $\theta$  و  $\phi$  به ترتیب زاویه موج ورودی P و S با درزه است.

پیراک نولت و همکاران (۱۹۹۰) همچنین از روش DDM به روز شده با مدل کلونین<sup>۱</sup> و ماکسول<sup>۲</sup> برای مطالعه انتشار موج از درزه های اشباع شده استفاده کردند. در گذشته، یک روش ساده برای تحلیل میرایی موج در سراسر درزه های چندگانه با نادیده گرفتن بازتاب موج متعدد میان درزه ها

<sup>۱</sup> Kelvin

<sup>۲</sup> Maxwell



استفاده شده است. پیراک نولت و همکاران (۱۹۹۰) با نادیده گرفتن از بازتاب موج متعدد یک فرمول ساده برای محاسبه ضریب عبوری برای یک موج نرمال در میان درزه‌های موازی متعدد معرفی کردند که براساس رابطه (۷-۲) می باشد:

$$|T_N| = |T_1|^N \quad (7-2)$$

که در رابطه بالا،  $T_1$  مقدار ضریب عبوری برای اولین موج ورودی عمودی تک درزه بوده ،  $N$  تعداد درزه موازی و  $T_N$  مقدار ضریب عبوری بعد از  $N$  درزه هست. فن و همکاران (۲۰۱۱) روش DDM را بهبود داده و انتشار موج در محیط ویسکوالاستیک را بررسی کرده اند.

در سال های اخیر، پژوهشگران از روش های تحلیلی جدید براساس روش DDM برای مطالعه انتشار موج در توده سنگ درزه دار، که در آن بازتاب موج متعدد در میان درزه‌ها را در نظر می گیرد، استفاده کرده اند (Zhu et al., 2012 و Perino et al., 2010). روش های تحلیلی جدید شامل روش مشخصه (MC)، روش منبع موج مجازی (VWS)، روش ماتریس پراکنده (SMM) و روش بازگشتی (RM) است.

### ۲-۲-۳ روش مشخصه (MC)

روش مشخصه (MC) برای اولین بار برای حل مسایل انتشار موج تنشی یک بعدی، در محیط‌های پیوسته به کار گرفته شد (Cai and Zhao, 2000). بر اساس معادله موج یک بعدی، ارتباط بین سرعت ذرات و تنش عمودی را می توان بر روی خطوط مشخصه چپ و راست پایه گذاری کرد. کای<sup>۱</sup> و ژائو (۲۰۰۰) برای حالتی که موج تنشی در توده سنگ انتشار می یابد، برای اولین بار ارتباط بین سرعت و تنش را روی خطوط مشخصه استنباط کردند. چهار خط مشخصه برای توصیف فرایند انتشار موج

---

<sup>۱</sup> Cai

تنش معرفی شدند. ژائو و همکاران (۲۰۰۶) پس از آن، روش کای و ژائو (۲۰۰۰) را بهبود داده و چهار خط مشخصه را به دو مدل ساده‌تر کاهش دادند. برای دسترسی و روش حل معادلات، معادله موج یک‌بعدی الاستیک به صورت رابطه (۸-۲) می‌باشد:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \alpha^2 p \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (۸-۲)$$

که با توجه به رابطه بالا، رابطه (۹-۲) حاصل می‌شود:

$$\frac{\partial v}{\partial t} = \alpha^2 p \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \quad (۹-۲)$$

که در دو رابطه بالا  $u$  جابجایی،  $v$  سرعت ذرات،  $\varepsilon$  کرنش،  $\alpha p$  سرعت انتشار موج،  $t$  زمان و  $x$  فاصله هست. همچنین با توجه به رابطه‌های (۸-۲) و (۹-۲) می‌توان به رابطه (۱۰-۲) دست‌یافت:

$$\frac{\partial v}{\partial x} = \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} \quad (۱۰-۲)$$

همچنین با مشتق گرفتن  $v - \alpha \varepsilon$  از نقطه  $(x, t)$  تا نقطه  $(x + dx, t + dt)$  در صفحه  $x - t$  می‌توان رابطه (۱۱-۲) نوشته شود یعنی:

$$d(v - \alpha \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial t}(v - \alpha \varepsilon)dt + \frac{\partial}{\partial x}(v - \alpha \varepsilon)dx =$$

$$\left(\frac{\partial v}{\partial t} - \alpha \frac{\partial \varepsilon}{\partial t}\right)dt + \left(\frac{\partial v}{\partial x} - \alpha \frac{\partial \varepsilon}{\partial x}\right)dx \quad (۱۱-۲)$$

براساس رابطه (۱۱-۲)، رابطه (۱۲-۲) به دست می‌آید.

$$d(v - \alpha \varepsilon) = \left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{1}{\alpha} \frac{\partial v}{\partial t}\right)(dx - \alpha dt) \quad (۱۲-۲)$$

بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که  $(v - \alpha \varepsilon)$  برای هر خط با شیب  $(\alpha)$  ثابت است. با توجه به روابط مشابه نیز می‌توان به این نتیجه رسید که مقدار  $(v + \alpha \varepsilon)$  برای هر خط با شیب  $(-\alpha)$  ثابت می‌باشد. همچنین با ضرب رابطه بالا در امپدانس موج رابطه (۲-۱۳) به دست می‌آید:

$$z \alpha \varepsilon = \rho \alpha^2 \frac{\partial u}{\partial x} = (\lambda + 2\mu) \frac{\partial u}{\partial x} = -\sigma \quad (2-13)$$

بنابراین می‌توان به این نتیجه رسید که مقدار  $(z v + \sigma)$  و  $(z v - \sigma)$  در جهت راست و چپ مقدار ثابتی هست که در آن  $\sigma$  تنش نرمال (برشی)،  $v$  سرعت ذرات و  $z$  امپدانس مواد است.

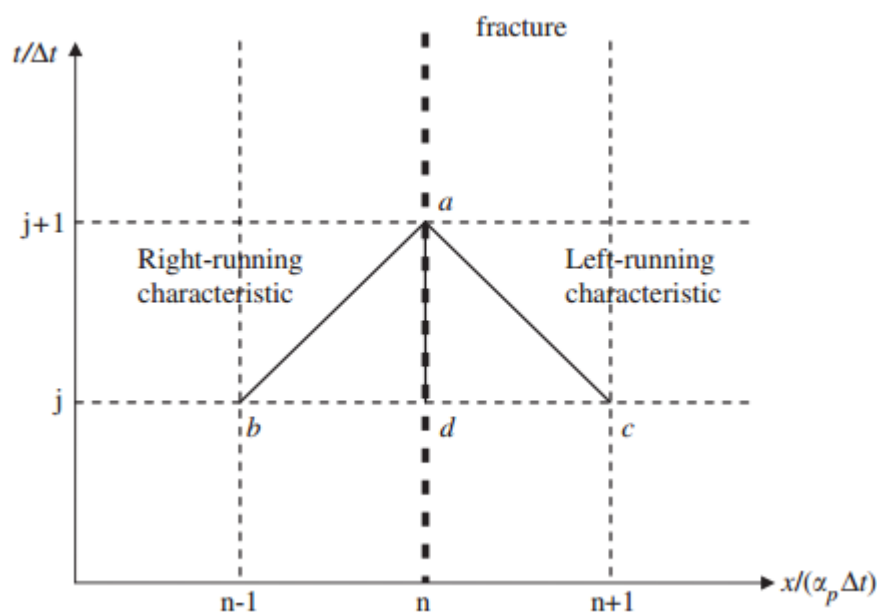
ارتباط بین سرعت ذرات و تنش را می‌توان در دو طرف چپ و راست آن بیان کرد که طرف راست یعنی هر خط راست با شیب  $\frac{1}{\alpha}$  است، در حالی که طرف چپ یعنی هر خط راست با شیب  $-\frac{1}{\alpha}$  هست. از طریق یک الگوریتم مشخص، واکنش لرزه‌ای شامل  $\sigma$  و  $v$  در یک زمان خاص را به شرطی که شرایط مرزی و اولیه معلوم باشند، با توجه به زمان‌های قبلی به دست آورد (Cai and Zhao, 2000 و Zhao et al., 2006). در مقایسه با تأثیر تک درزه، بررسی تأثیر درزه‌های موازی چندگانه به دلیل خاصیت بازگشت متعدد بین درزه‌ها انتشار موج پیچیده‌تر خواهد شد. یک مدل عمومی برای حل این‌گونه مسایل معرفی شده است. در شکل ۲-۵، نقاط خصوصیات چپ و راست در فاصله‌داری بی‌بعد و زمانی بی‌بعد نشان داده شده است. در صفحه  $x - t$  متغیرهای جدید، فاصله‌داری بی‌بعد ( $n$ )، زمان بی‌بعد ( $j$ ) به صورت زیر تعریف شده است:

$$j = \frac{t}{\Delta t} \quad (2-14)$$

$$n = \frac{x}{\alpha \Delta t} \quad (2-15)$$

که  $\Delta t$  فاصله زمانی است. در این روش فرض شده است که درزه‌ها در صفحه فاصله‌داری بی‌بعد

قرار دارند، به طوری که اولین درزه در  $n=1$ ، دومین درزه در  $n=2$  و آخرین درزه در  $n=L$  قرار دارد.



شکل ۲-۵: مشخصات درزه در صفحه بی بعد  $x-t$  (Zhao et al., 2006)

همانند رابطه های بالا سرعت ذرات و تنش نرمال در این نقاط ارزیابی می شوند.

$$ZV^-(n, j+1) + \sigma^-(n, j+1) = ZV^+(n-1, j) + \sigma^+(n-1, j) \quad (۱۶-۲)$$

$$ZV^+(n, j+1) - \sigma^+(n, j+1) = ZV^-(n+1, j) - \sigma^-(n+1, j) \quad (۱۷-۲)$$

که در رابطه های (۱۶-۲) و (۱۷-۲)،  $V^+(n, j+1)$  و  $V^-(n, j+1)$  نشان دهنده سرعت ذرات در زمان  $j+1$  قبل و بعد از درزه در فاصله داری  $n$  است. همچنین به طور مشابه  $\sigma^-(n, j+1)$  و  $\sigma^+(n, j+1)$  به ترتیب نشان دهنده تنش های عمودی در زمان  $j+1$  قبل و بعد از درزه، در فاصله داری  $n$  است. همچنین با توجه به قانون DDM، برای درزه هایی با رفتار الاستیک خطی رابطه های (۱۸-۲) و (۱۹-۲) حاصل می شود:

$$\sigma^-(n, j+1) = \sigma^+(n, j+1) = \sigma(n, j+1) \quad (18-2)$$

$$u^-(n, j+1) - u^+(n, j+1) = \frac{\sigma(n, j+1)}{k} \quad (19-2)$$

که در رابطه‌های بالا  $k$  سختی درزه،  $u^-(n, j+1)$  و  $u^+(n, j+1)$  نشان‌دهنده جابجایی‌ها در زمان  $j+1$  قبل و بعد از درزه در فاصله  $n$  هست. با در نظر گرفتن روابط بالا و ترکیب این روابط می‌توان به رابطه (20-2) رسید.

$$\begin{aligned} ZV^-(n, j+1) + ZV^+(n, j+1) &= ZV^+(n-1, j) + \sigma^+(n-1, j) \\ + ZV^-(n+1, j) - \sigma^-(n+1, j) \end{aligned} \quad (20-2)$$

و با مشتق‌گیری از رابطه (20-2) می‌توان رابطه (21-2) را نوشت:

$$v^-(n, j+1) - v^+(n, j+1) = \frac{1}{k} \frac{\partial \sigma(n, j+1)}{\partial t} = \frac{\sigma(n, j+1) - \sigma(n, j)}{k \Delta t} \quad (21-2)$$

بنابراین خواهیم داشت:

$$\sigma(n, j+1) = \sigma(n, j) + k \Delta t [v^-(n, j+1) - v^+(n, j+1)] \quad (22-2)$$

با ترکیب رابطه‌های بالا می‌توان رابطه (23-2) را نتیجه گرفت:

$$\begin{aligned} (K \Delta t + Z)V^-(n, j+1) - K \Delta t V^+(n, j+1) + \sigma(n, j) &= \\ Zv^+(n-1, j) + \sigma(n-1, j) \end{aligned} \quad (23-2)$$

با توجه به رابطه‌های بالا و رفتار الاستیک خطی و سرعت ذرات می‌توان سرعت ذره را در نقطه  $a$

محاسبه نمود.

$$v^-(n, j+1) = (Zv^+(n-1, j) + \sigma(n-1, j) - \sigma(n, j) + \frac{K \Delta t}{Z} (Zv^-(n+1, j) + Zv^+(n-1, j) + \sigma(n-1, j) - \sigma(n+1, j))) / (2K \Delta t + Z) \quad (24-2)$$

$$v^+(n, j+1) = ((Zv^+(n-1, j) - \sigma(n+1, j) + \sigma(n-1, j) + Zv^-(n+1, j)) \frac{K \Delta t + Z}{Z} + \sigma(n, j) - \sigma(n-1, j) - Zv^+(n-1, j)) / (2K \Delta t + Z) \quad (25-2)$$

همچنین با جایگذاری رابطه‌ها مقدار تنش را می‌توان از رابطه (۲۶-۲) به دست آورد:

$$\sigma(n, j+1) = \sigma(n, j) + \frac{K \Delta t}{2K \Delta t + Z} (Zv^+(n-1, j) + \sigma(n-1, j) - Zv^-(n+1, j) + \sigma(n+1, j) - 2\sigma(n, j)) \quad (26-2)$$

رابطه‌های مذکور رابطه بین  $v$  و  $\sigma$  در پیش‌بینی انتشار موج یک‌بعدی در محیط توده سنگ درزه‌دار موازی را نشان می‌دهد. اگرچه بازتاب موج‌های متعدد بین درزه‌ها وجود دارد، معادله موج در بحث موج قابلیت کاربرد داشته و DDM می‌تواند به‌طور مستقیم میرایی موج را در هر ساختار محاسبه کند. این رابطه‌ها نشان می‌دهند که با توجه به شرایط مرزی و سرعت ورودی می‌توان سرعت ذرات و تنش‌ها را با توجه به محاسبات پیشرفته محاسبه کرد. کلیه معادلات بالا در روش تحلیلی MC براساس مطالعات کای و ژائو (۲۰۰۰)، ژائو و همکاران (۲۰۰۶) و ژو و همکاران (۲۰۱۱) است.

روش‌های ترکیبی MC و DDM نه‌تنها می‌تواند تأثیر بازتاب بین ساختارها را محاسبه کند، بلکه می‌تواند از انطباق موج بازگشتی و عبوری در هر ساختار مانع شده و محاسبه فرایند پیچیده را

امکان‌پذیر کند. کاربرد این روش برای بازگشت و عبور موج یک‌بعدی در سراسر شکستگی‌ها در توده سنگ مورد بررسی قرار گرفته است. بر اساس مطالعات بالا، پژوهشگران زیادی با استفاده از روش MC برای انتشار موج تک‌بعدی موج تنشی از دسته درزه‌های موازی را بررسی کرده‌اند و در این ارتباط تأثیر پارامترهایی همانند سختی درزه، فاصله‌داری درزه و تعداد درزه‌ها را بر موج عبوری را مطالعه نموده‌اند. کای و ژائو (۲۰۰۰) و ژائو و همکاران (۲۰۰۶) با استفاده از روش MC انتشار موج تنشی یک‌بعدی را از طریق رفتار تغییر شکل خطی درزه‌ها بررسی نمودند. ژائو و کای (۲۰۰۱) و ژائو و همکاران (۲۰۰۶) از روش MC به مطالعه انتشار موج تنشی یک بعدی از طریق رفتار تغییر شکل غیرخطی درزه‌ها و مدل بارتون-بندیس<sup>۱</sup> استفاده کرده‌اند. آن‌ها در مطالعات خود تأثیر پارامترهایی مانند دامنه موج ورودی و فرکانس موج ورودی را بر انتشار موج بررسی کردند. ژائو و همکاران (۲۰۰۶) عبور عمودی از موج S در درزه‌های موازی، با رفتار کولمب<sup>۲</sup> را مطالعه نموده‌اند. فن<sup>۳</sup> و همکاران (۲۰۱۵) با ترکیب روش DDM و MC برای تحلیل تأثیر تنش‌های برجا برای انتشار موج بررسی کردند.

---

<sup>۱</sup> Barton-Bandis

<sup>۲</sup> Coulomb

<sup>۳</sup> Fan

## ۴-۲-۲- روش منبع موج مجازی (VWS)

عموماً برای مطالعه انتشار موج در توده سنگ درزه‌دار موازی، با استفاده از روش VWS دو مدل وجود دارد، که یکی از روش‌ها در ترکیب با روش DDM به دست آمده است، در حالی که روش دیگر در ترکیب با مدل محیط معادل ویسکوالاستیک به دست می‌آید. در بخش اول به روش منبع موج مجازی و ترکیب با روش DDM پرداخته خواهد شد و در بخش بعدی روش منبع موج مجازی و ترکیب با مدل محیط معادل ویسکوالاستیک توصیف می‌شود.

## ۴-۲-۲-۱- روش منبع موج مجازی و ترکیب با روش DDM

در ابتدا با استفاده از مفهوم منبع موج مجازی (VWS) به مطالعه انتشار موج در یک دسته‌درزه موازی که بازگشت موج متعدد در میان درزه‌ها را در نظر می‌گیرد که با روش DDM ترکیب شده است، معرفی شده است. ایده اصلی این روش این است که زمانی که موج تنشی از توده سنگ عبور می‌کند، به جای هر درزه یک VWS قرار می‌گیرد که در آن یک موج عبوری و یک موج بازگشتی تولید می‌شود. همچنان که در شکل ۶-۲ نشان داده شده است، به منظور ارزیابی راه‌حل تحلیلی از موج گذرای عبوری ( $v_I$ ) در سراسر یک دسته‌درزه، موج ورودی ابتدا با استفاده از تبدیل سریع فوریه<sup>۱</sup> به حوزه فرکانس برده می‌شود. در این صورت موج ورودی را می‌توان به صورت یک سری از امواج هارمونیک نوشت یعنی:

$$v_I = \sum_{i=-\infty}^{\infty} v_{Ii} = \sum_{i=-\infty}^{\infty} A_i e^{i\omega_i t} \quad (2-27)$$

که در آن  $v_{Ii}$  یک موج هارمونیک،  $A_i$  و  $\omega_i$  به ترتیب دامنه و فرکانس موج  $v_{Ii}$  هستند.

---

<sup>۱</sup> Fast Fourier transform



ژو<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۱۱) VWS را به عنوان یک خصوصیت درزه‌ها در نظر گرفتند. هر زمان که یک موج به یک درزه برخورد می‌کند، ۲ موج جدید برای موجی که به صورت عمود به درزه و ۴ موج جدید برای موجی که به صورت مورب به درزه برخورد می‌کند، ایجاد می‌شود. بر این اساس برای تک درزه ضرایب بازگشت و عبور محاسبه می‌شوند. بنابراین موج هارمونیک عبوری از سراسر یک دسته درزه از برهم‌کنش مجموع عبوری مختلف در زمان‌های مختلف که به وسیله VWS تولید می‌شود، از رابطه (۲۸-۲) محاسبه می‌شود:

$$v_{T i} = \sum_{j=1}^{\infty} v_{T ij} \quad (28-2)$$

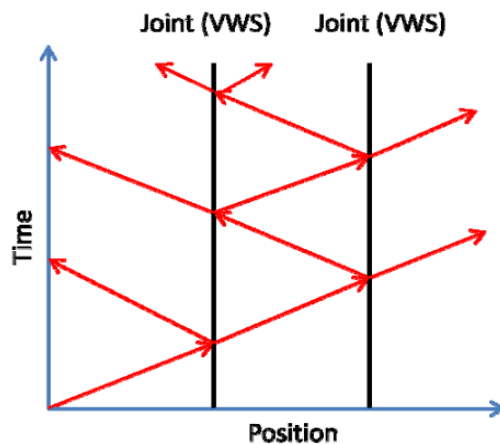
که در آن  $v_{T i}$  موج عبوری و  $v_{T ij}$  موج عبوری رسیده در زمان‌های مختلف هست. در پایان با یک تبدیل عکس سریع فوری دوباره تمام موج عبوری گذرا محاسبه می‌شود، که رابطه آن به صورت (۲۹-۲) هست.

$$v_T = \sum_{i=-\infty}^{\infty} v_{T i} \quad (29-2)$$

این معادلات از مطالعه ژو و همکاران (۲۰۱۱) و ژو و ژائو (۲۰۱۳) بررسی نمودند. ژو و همکاران (۲۰۱۱) به مطالعه انتشار موج ورودی عمود بر درزه پرداختند و سپس ژو و ژائو (۲۰۱۳) از روش VWS برای ارزیابی موج ورودی مایل از طریق درزه‌های سنگی بررسی نمودند و با روش DDM برای مطالعه انتشار موج از طریق تک درزه و با روش MC برای چند درزه موازی مقایسه کردند.

---

<sup>۱</sup> Zhu



شکل ۲-۶: مفهوم منبع موج مجازی (VWS) (Zhu, 2011(b))

۲-۴-۲-۲ - روش منبع موج مجازی و ترکیب با روش مدل محیط معادل ویسکوالاستیک  
 به منظور ارزیابی مفهوم VWS و ترکیب آن با روش مدل محیط معادل ویسکوالاستیک، همانند روش  
 توضیح داده شده، ابتدا در هر درزه یک VWS قرار می‌گیرد که قابلیت تبدیل موج جدید را دارند.  
 VWS در هر سطح درزه وجود داشته و به این ترتیب یک موج جدید (در خلاف جهت موج ورودی)  
 ایجاد می‌شود. فاصله بین دو VWS معادل با فاصله داری درزه  $S$  هست. طول معادل محیط بر اساس  
 حاصل ضرب تعداد درزه‌ها در فاصله داری به دست می‌آید. شکل‌های ۲-۷، ۲-۸ و ۲-۹ نشان‌دهنده یک  
 توده سنگ با سه درزه موازی و محیط معادل با و بدون VWS نشان داده شده است. که محیط معادل  
 برابر است با  $3S$  هست. در این روش ابتدا یک موج هارمونیک ورودی به صورت رابطه (۲-۳۰) خواهد  
 بود.

$$v_{Ik}(t,0) = A_k \exp(-i \omega_k t) \quad \text{و} \quad (۲-۳۰)$$

که در رابطه بالا،  $v_{Ik}$  سرعت اولیه ذرات،  $A_k$  دامنه موج ورودی و  $\omega_k$  فرکانس زاویه‌ای هست.  
 رابطه بالا با رابطه‌های محیط ویسکوالاستیک ترکیب می‌شوند. رابطه ویسکوالاستیک بر اساس مدل

ووجت<sup>۱</sup> می‌باشد که به صورت رابطه (۳۱-۲) هست:

$$v_k = A_k \exp(\beta_K \chi_K) \exp(i(\omega_k t - \alpha_K \chi_K)) \quad (31-2)$$

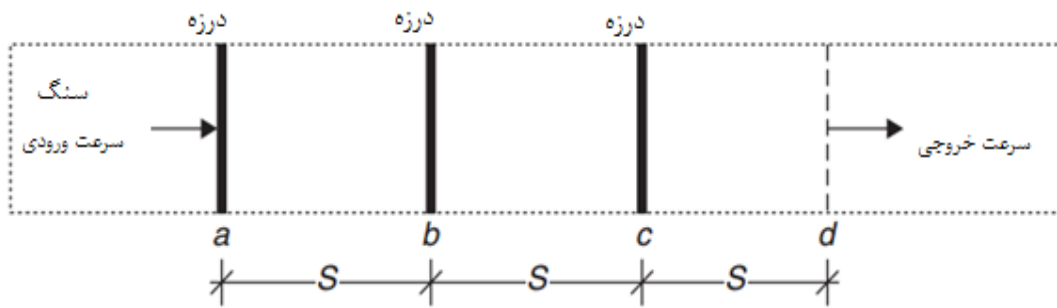
که در رابطه بالا  $\alpha_K$  و  $\beta_K$  به ترتیب ضرایب ثابت مدل ووجت می‌باشند که به ترتیب نشان‌دهنده تغییر فاز در هر واحد طول و میرایی موج می‌باشند و  $\chi_K$  نشان‌دهنده فاصله‌داری است. بر همین اساس برای موج تولیدشده از نقطه  $b$  و بر اساس روابط بالا می‌توان موج عبوری را محاسبه کرد که به صورت رابطه (۳۲-۲) هست.

$$v(t,s) = A \sqrt{1 - [\exp(\beta s)]^2} \exp[i(\omega t + \alpha s - \frac{\pi}{2})] \quad (32-2)$$

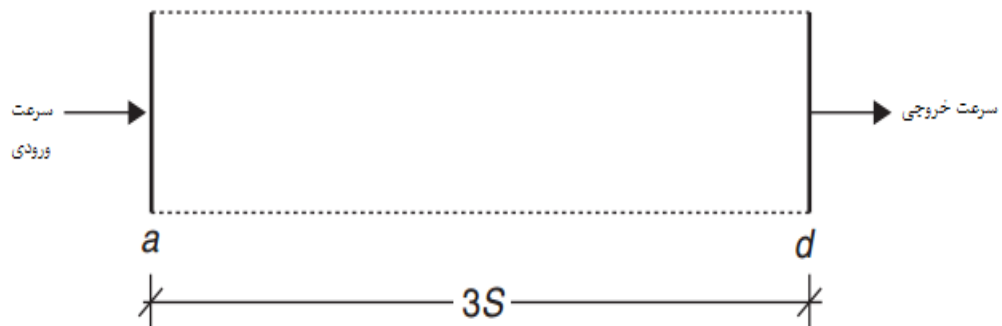
بر همین اساس برای محاسبه موج عبوری در نقطه  $d$  از محیط معادل از برهم‌کنش موج‌های متعدد ایجادشده از سه موج به وجود آمده VWS محاسبه می‌شوند. لی و همکاران (۲۰۱۰) برای اولین بار از مفهوم VWS زمانی که از روش EMM برای مطالعه انتشار موج انتشار موج در دسته درزه‌های موازی استفاده کرده‌اند، مطالعه نمودند و نتایج را با روش DDM مقایسه کرده‌اند. معادلات به دست آمده در این بخش از روش لی و همکاران (۲۰۱۰) بر گرفته شده است.

---

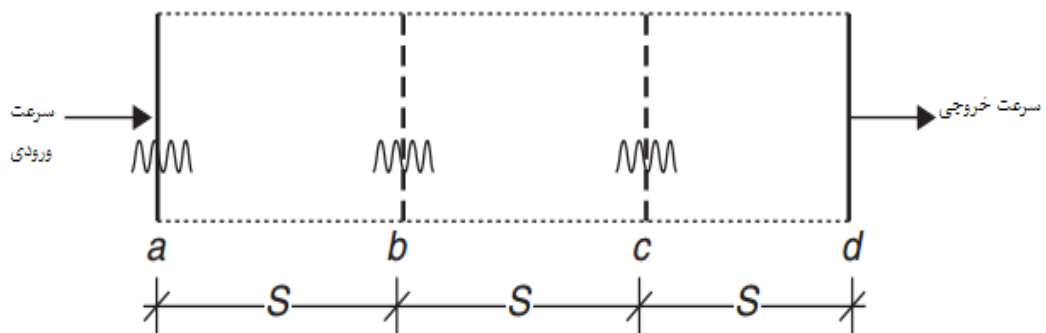
<sup>۱</sup> Voigt



شکل ۷-۲: توده سنگ دارای چند درزه موازی (Li et al., 2010)



شکل ۸-۲: محیط معادل بدون VWS (Li et al., 2010)



شکل ۹-۲: محیط معادل با VWS (Li et al., 2010)

## ۲-۲-۵- روش بازگشتی (RM)

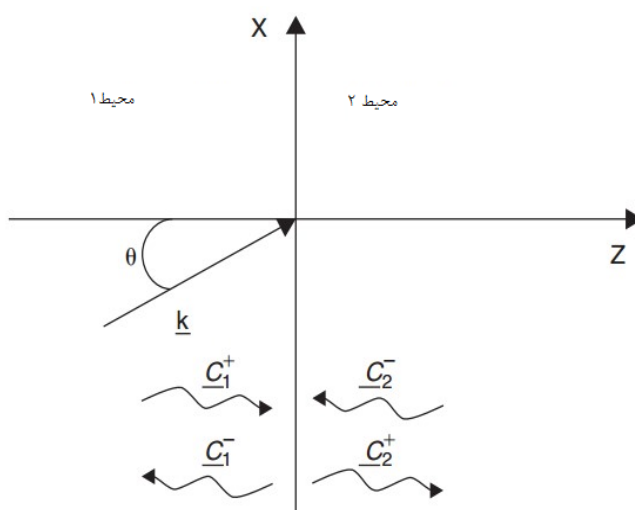
روش بازگشتی (RM) که به آن روش انتشار نیز گفته می‌شود، یک ابزار مناسب برای مطالعه انتشار موج در چند درزه موازی است. ایده روش این است که با توجه به ارتباط بین لایه یا درزه‌های مختلف و با توجه به دامنه پتانسیل مقدار تنش و جابجایی را محاسبه کرد. زمانی که تعداد درزه‌ها زیاد باشد، ارتباط بین درزه‌ها از یک الگوریتم مشخص پیروی می‌کند. الگوریتم استاندارد فرایندی است که تأثیر همه درزه‌ها بر واکنش لرزه‌ای را در نظر می‌گیرد. در این روش با ترکیب با روش ناپیوستگی جابجایی، روش تحلیل موج صفحه‌ای و ارتباط بین اولین لایه و لایه  $n$  ام و با توجه به دامنه توابع پتانسیل تنش‌ها و جابجایی‌ها در فرم ماتریس نوشته می‌شود. سپس با توجه به شرایط اولیه و دامنه پتانسیل، در هر لایه به شکل ماتریس معادلات بیان خواهد شد. لی و همکاران (۲۰۱۰) برهم‌کنش موج انفجار در توده سنگ درزه‌دار را بررسی کردند. آن‌ها در مطالعات خود تأثیر زاویه‌داری درزه‌ها و سختی درزه نرمال شده بر موج عبوری، بازگشتی و تبدیل موج را بررسی کردند. ژائو و همکاران (۲۰۱۲) از روش بازگشتی برای ارتباط بین لایه اول و لایه  $n$  ام با توجه به دامنه پتانسیل در فرم ماتریس نوشته می‌شود. ژو و همکاران (۲۰۱۲) با استفاده از روش بازگشتی بهبودیافته به مطالعه انتشار موج در محیط ویسکوالاستیک پرداختند. وو<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۱۲) با استفاده از روش بازگشتی به مطالعه واکنش لرزه‌ای از دسته درزه‌های موازی بر انتشار موج در محیط ویسکوالاستیک پرداختند. لی (۲۰۱۳) به مطالعه انتشار موج در توده سنگ درزه‌دار در محیط غیرخطی براساس روش بازگشتی حوزه زمان بررسی کردند.

---

<sup>۱</sup> Wu

## ۶-۲-۲ روش ماتریس پراکنده (SMM)

روش SMM ساختار درزه‌ها و بازتاب متعدد میان درزه‌ها را در نظر می‌گیرد. به این روش، روش ماتریس انتشار نیز گفته می‌شود که برای مطالعه انتشار موج در سراسر توده سنگ درزه‌دار به کار برده می‌شود. در شکل ۱۰-۲ یک شکل نمادین از یک درزه با روش SMM نشان داده شده است.



شکل ۱۰-۲: انتشار موج از یک درزه توسط روش SMM (Perino et al., 2010)

در این روش با توجه به محیط ساختاری و دامنه موج ورودی به صورت رابطه (۳۳-۲) نوشته

می‌شود (Perino et al., 2010):

$$\begin{bmatrix} c_1^- \\ c_2^+ \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} \\ s_{21} & s_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_1^+ \\ c_2^- \end{bmatrix} \quad (33-2)$$

که در رابطه بالا  $c_2^+$  و  $c_1^-$  دامنه‌های موج ورودی ناپیوستگی‌ها هستند، درحالی‌که  $c_1^+$  و  $c_2^-$  دامنه موج بازگشتی و عبوری است.  $s_{ii}$  هم به معنای ضرایب بازگشت دو طرف ناپیوستگی است درحالی‌که  $s_{ij}$  ضرایب عبوری را نشان می‌دهد. Perino و همکاران (۲۰۱۲) از روش SMM برای آنالیز انتشار

موج در سراسر درزه‌های الاستیک و ویسکوالاستیک استفاده کردند.

## ۳-۲- مقایسه روش های مختلف تحلیلی انتشار موج توده سنگ

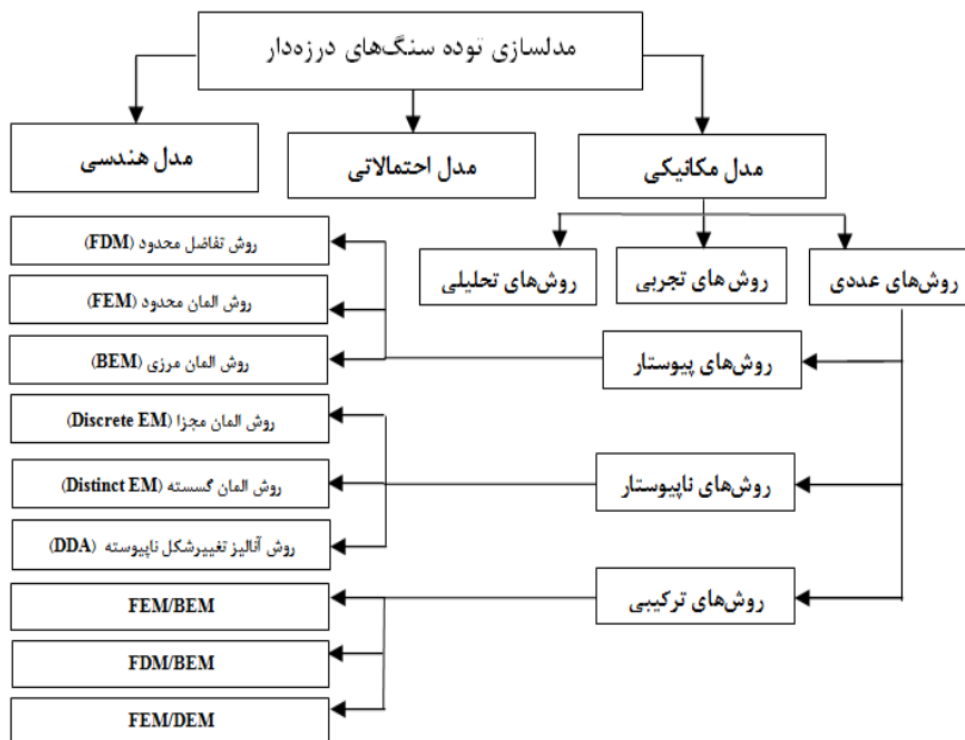
روش MC در حل مسائل انتشار موج یک بعدی که در آن بازتاب موج متعدد میان درزه‌ها را در نظر می‌گیرد، به‌طور گسترده به کار می‌رود. با استفاده از این روش برخورد موج با رفتار درزه‌های مختلف مانند درزه‌هایی با رفتار غیرخطی و درزه‌هایی با رفتار کولمب مطالعه شده است. همچنین روش MC برای مطالعه انتشار موج در سراسر درزه‌هایی با فاصله‌داری مختلف بررسی شده است. با این حال، روش MC نمی‌تواند در حوزه فرکانس استفاده شود. روش MC از معادلات مختلفی برای محاسبه واکنش دینامیکی استفاده می‌کند و دارای خطای محاسباتی زیادی است. همچنین روش MC برای مطالعه انتشار موج مایل در توده سنگ درزه‌دار خیلی دشوار بوده و عملاً قابل استفاده نیست. روش بازگشتی (RM) بازتاب موج متعدد میان درزه‌ها را در نظر می‌گیرد. این روش هم در حوزه فرکانس و هم در حوزه زمانی قابل کاربرد است. ضرایب بازگشت و عبوری هم برای تک درزه و چند درزه موازی به‌صورت تحلیلی محاسبه می‌شوند. روش RM برای مطالعه شرایط مختلف درزه مانند درزه‌های خشک و پرشده به کار می‌رود، همچنین موج ورودی مایل برای تک درزه و چند درزه موازی با فاصله‌داری مختلف را می‌توان محاسبه کرد. اما روش RM دارای فرایندهای محاسباتی پیچیده بوده و پیچیدگی آن با افزایش تعداد درزه‌ها نیز بیشتر می‌شود.

روش EMM محیط را به‌صورت پیوسته در نظر می‌گیرد و تأثیر درزه‌ها بر مدول مؤثر از محیط معادل نشان می‌دهد و این روش برای محاسبه کمی میرایی در توده سنگ درزه‌دار آسان است. درحالی‌که یکی از محدودیت‌های روش EMM این است که بازتاب موج متعدد میان درزه‌ها را در نظر نمی‌گیرد.

## ۲-۴- مدل‌سازی عددی انتشار موج از میان توده سنگ

معمولا روش‌های تحلیلی هنگامی استفاده می‌شوند که ساختار توده سنگ ساده باشد و برای انتشار موج تنشی در ساختار پیچیده، روش‌های تحلیلی بسیار پیچیده و غیرقابل استفاده است. درحالی‌که مدل‌سازی عددی یک راه مقرون به صرفه برای مطالعه انتشار موج در توده سنگ درزه‌دار است (سبحانی، ۱۳۹۰). یکی از وظایف اصلی مدل‌سازی عددی در مکانیک سنگ، توانایی توصیف ناپیوستگی‌های فیزیکی در یک مدل کامپیوتری به‌طور صریح و یا ضمنی موسوم به مدل هندسی است. تقسیم‌بندی اصلی روش‌های عددی بر اساس نوع محیط موردنظر است. این روش‌ها طی سال‌های گذشته بر مبنای تئوری مکانیک محیط‌های پیوسته و ناپیوسته ایجاد شده‌اند. انتخاب روش‌های پیوسته یا ناپیوسته به بسیاری از عوامل بستگی دارد و این وابستگی به‌طور عمده به مقیاس مسأله و هندسه سیستم ناپیوستگی‌ها دارد. روش‌های عددی متفاوتی برای تحلیل سیستم‌های پیوسته و ناپیوسته توسعه یافته‌اند، که رایج‌ترین روش‌های عددی به‌کاربرده شده برای مسایل مکانیک سنگ در شکل ۲-۱۱ نشان داده شده است.





شکل ۱۱-۲: انواع روش‌های عددی رایج در مکانیک سنگ (خانی زاده بهابادی و همکاران، ۱۳۹۵)

روش‌های ترکیبی غالباً در مهندسی سنگ برای مسایل تنش-تغییر شکل و جریان سنگ‌های درزه‌دار توسعه یافته‌اند. به‌طور مثال برای توجه ویژه به مرزها و ایجاد امکان مدل‌سازی ناپپوستگی‌ها در محیط‌های پیوسته، ترکیب روش المان مرزی و المان محدود توسط زینکوویچ<sup>۱</sup> و همکاران در سال (۱۹۷۷) پیشنهاد شد و سپس توسط بردی<sup>۲</sup> و واسینگ<sup>۳</sup> (۱۹۸۱) و بیر<sup>۴</sup> (۱۹۸۳) به‌عنوان روش کلی تحلیل تنش دنبال شد. روش المان مرزی و تفاضل محدود برای روش المان مجزا صریح، در کد UDEC و 3DEC پیاده‌سازی گردید. این روش توسط لوریگ<sup>۵</sup> و بردی (۱۹۸۲ تا ۱۹۸۶) ایجاد و توسط

<sup>1</sup> Zienkiewicz

<sup>2</sup> Brady

<sup>3</sup> Wassynig

<sup>4</sup> Beer

<sup>5</sup> Lotig

لموس<sup>۱</sup> (۱۹۸۷) بر روی UDEC پیاده‌سازی شد (خانی زاده بهابادی و همکاران، ۱۳۹۵). به دلیل اینکه هدف از این مطالعه بررسی تحلیلی و عددی انتشار موج در توده سنگ درزه‌دار هست و محیط ناپیوسته است، در دو بخش بعدی به بررسی روش‌های عددی DEM<sup>۲</sup> و DDA در انتشار موج پرداخته خواهد شد.

## ۲-۴-۱- روش المان مجزا (DEM)

DEM برای اولین بار به وسیله کاندال<sup>۳</sup> (۱۹۷۱) توسعه داده شد. این روش در ابتدا برای تحلیل دوبعدی توده سنگ در نظر گرفته شده بود، اما پس از آن برای تحقیق در مورد جریان یافتگی ذرات، مطالعه میکروسکوپی در مواد با ساختار دانه‌ای و بررسی چگونگی توسعه ترک در سنگ‌ها و بتن، بسط داده شد (Itasca, 2004). در روش المان مجزا توده سنگ به صورت مجموعه‌ای از بلوک‌های مجزا معرفی می‌شوند، درزه‌ها به عنوان سطوح تلاقی میان بلوک‌های مجزا در نظر گرفته می‌شوند. نیروها و جابجایی‌ها در محل تماس از محاسبه اثر حرکت بلوک‌ها، به دست می‌آیند. این روند یک فرایند دینامیکی است که سرعت توسعه آن تابعی از خواص فیزیکی سیستم بلوک‌های مجزا هست. پارامترهای عددی متناظر با رفتار دینامیکی، توسط الگوریتم گام زمانی توصیف می‌شوند که در آن، گام زمانی به گونه‌ای انتخاب می‌شود که بتوان در هر گام زمانی، سرعت‌ها و شتاب‌ها را ثابت در نظر گرفت. روش المان مجزا بر این فرض استوار است که گام‌های زمانی به اندازه‌ای کوچک هستند که در هر گام زمانی منفرد، اغتشاش ایجاد شده، مهلت برای حرکت از یک المان مجزا به المان مجزای مجاور آن را نداشته باشد. برای بلوک‌های صلب، جرم بلوک و سختی سطوح مشترک بین بلوک‌ها، حدود گام زمانی را تعیین می‌کند. در بلوک‌های تغییر شکل پذیر، ابعاد محدوده در نظر گرفته شده و سختی

---

<sup>۱</sup> Lemos

<sup>۲</sup> Distinct Element Code

<sup>۳</sup> Cundall

سیستم شامل ترکیبی از مدول سنگ بکر و سختی در محل تماس‌ها، میزان گام زمانی را مشخص می‌کند.

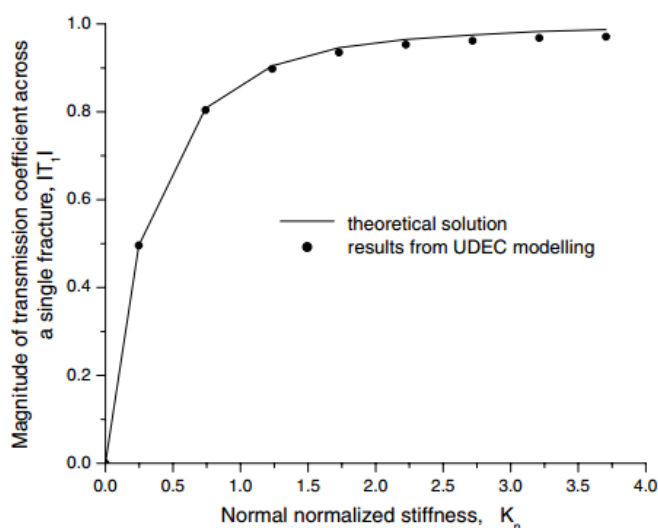
روند محاسبات در این روش به صورت ترکیبی از به کارگیری قانون نیرو-جابجایی در محل تماس‌ها و قانون دوم نیوتن در بلوک‌ها هست. با قانون نیرو-جابجایی و با در دست داشتن جابجایی‌ها، نیروها در محل تماس به دست می‌آیند. قانون دوم نیوتن نیز حرکت بلوک‌ها را که ناشی از اعمال نیرو روی آن‌ها است تعیین می‌کند. اگر بلوک‌ها تغییر شکل پذیر باشند، حرکت در شبکه‌ای از نقاط با روش تفاضل محدود در المان بندی مثلثی در داخل بلوک‌ها محاسبه می‌شود. در مرحله بعد با استفاده از روابط مشخصه مربوط به مصالح بلوک، تنش‌های جدیدی در المان‌ها به دست می‌آیند. کلیات فرمول بندی عددی، بر اساس قوانین حرکت نیوتن، قوانین بقای انرژی و اندازه حرکت هست. روش المان مجزا با توجه به منطق شکل گیری آن، روش قدرتمندی برای آنالیز مسایل در توده سنگ‌های ناپیوسته هست، استفاده از نرم‌افزارهای UDEC و 3DEC برای حالت دوبعدی و سه بعدی مدل سازی ناپیوسته می‌تواند مورد توجه قرار گیرد. برای مطالعه انتشار موج در توده سنگ درزه دار، پژوهشگران مطالعات زیادی برای انتشار موج در توده سنگ درزه دار با استفاده از نرم‌افزار UDEC و 3DEC انجام داده‌اند. چن<sup>۱</sup> و ژائو (۱۹۹۸) به مطالعه تأثیر تک درزه و تأثیر سختی درزه در دودسته درزه با استفاده از مدل سازی UDEC با بار انفجار پرداختند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که تأثیر درزه‌ها بر میرایی موج یکی از پارامترهای مهم در انتشار موج است. فن و همکاران (۲۰۰۴) تأثیر شرایط مرزی در UDEC بر عبور موج P در تک درزه مطالعه کرده و با نرم‌افزار AUTODYN-2D نیز مورد مطالعه قرار دادند. وانگ وی هوا<sup>۲</sup> (۲۰۰۶) به مطالعه انتشار موج در توده سنگ درزه دار با استفاده از نرم‌افزار

---

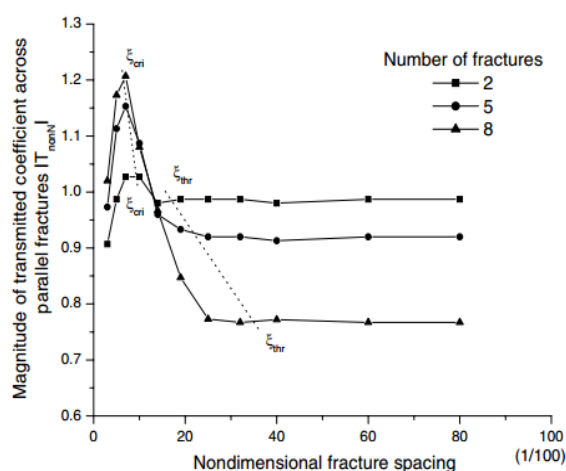
<sup>۱</sup> Chen

<sup>۲</sup> WangWei-hua

3DEC پرداختند. ژائو و همکاران (۲۰۰۸) به مطالعه انتشار موج در توده سنگ پرداختند و در مطالعات خود به قابلیت UDEC در مطالعه عددی انتشار موج پرداختند و تأثیر پارامترهایی همانند سختی درزه نرمال شده، دامنه موج ورودی، تعداد درزه‌ها و نسبت فاصله‌داری درزه بر موج عبوری را بررسی کردند. همچنان که در شکل ۲-۱۲ مشاهده می‌شود، تأثیر پارامتر سختی درزه نرمال شده بر انتشار موج با استفاده از روش عددی و تحلیلی MC نشان داده شده است، در شکل ۲-۱۳ نیز تأثیر تعداد درزه‌ها بر انتشار موج با استفاده از روش عددی مطالعه شده است.

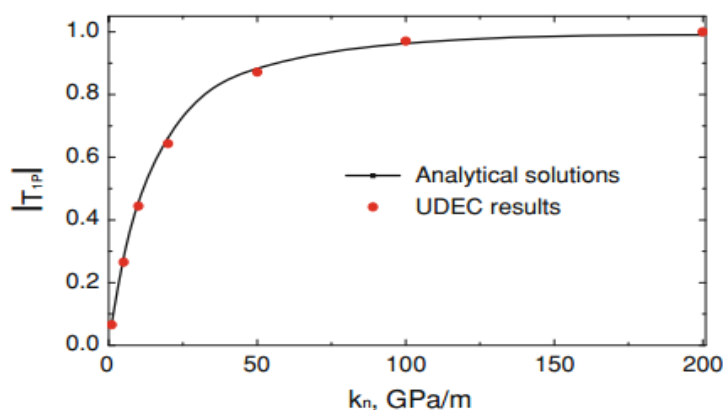


شکل ۲-۱۲: مقایسه نتایج عددی و روش تحلیلی MC در سختی درزه نرمال شده در موج عبوری (Zhao et al., 2008)



شکل ۲-۱۳: تأثیر تعداد درزه‌ها بر موج عبوری (Zhao et al, 2008)

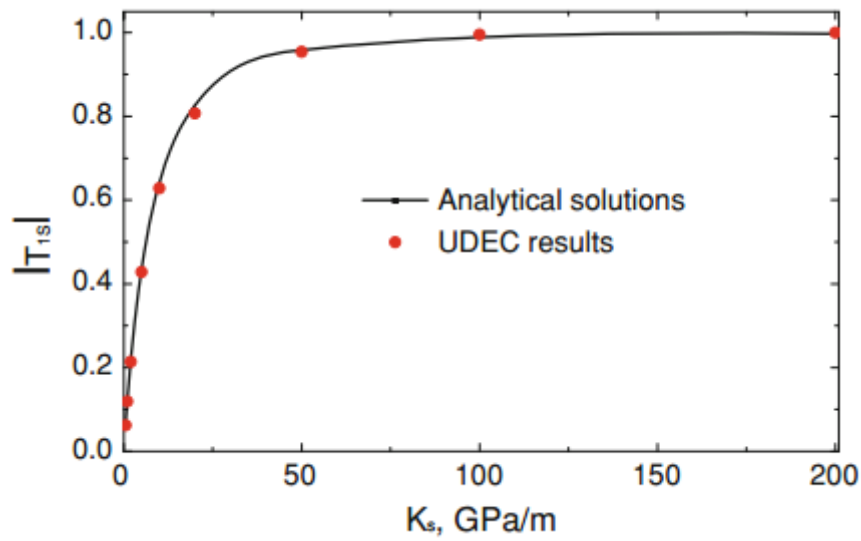
ویدونگ لی<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۱۱) به ارزیابی مدل سازی انتشار موج در توده سنگ درزه دار پرداختند و تأثیر پارامترهای فاصله داری درزه نرمال شده و تعداد درزه ها را بر موج عبوری بررسی کردند. دنگ<sup>۲</sup> و همکاران (۲۰۱۲) به مطالعه انتشار موج تنش در توده سنگ درزه دار با استفاده از نرم افزار 3DEC پرداختند. ژو و همکاران (۲۰۱۳) انتشار موج در توده سنگ درزه دار در سراسر دسته درزه های متقاطع را با UDEC بررسی نمودند. در این مطالعات تأثیر پارامترهایی همانند سختی نرمال و برشی درزه، نسبت فاصله داری نرمال شده در تک درزه و چند درزه موازی و زاویه تقاطع درزه ها نیز پرداخته شده است، که در شکل های ۱۴-۲ تا ۱۶-۲ این نتایج نشان داده شده است.



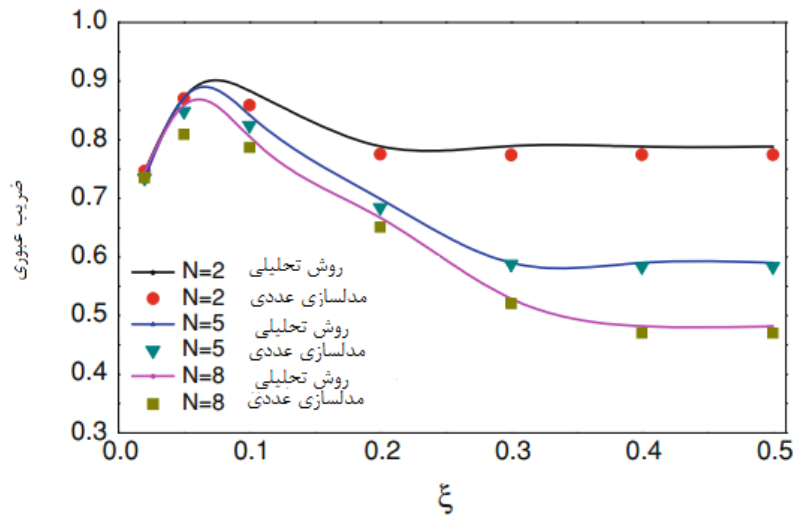
شکل ۱۴-۲: تأثیر سختی نرمال درزه بر موج عبوری P با روش عددی و روش تحلیلی VWS (Zhu et al., 2013)

<sup>۱</sup> Weidong Lei

<sup>۲</sup> Deng



شکل ۱۵-۲: تأثیر سختی برشی درزه بر موج عبوری S با روش عددی و روش تحلیلی VWS (Zhu et al., 2013)



شکل ۱۶-۲: تأثیر فاصله‌داری نرمال شده بر موج عبوری با استفاده از روش عددی و روش تحلیلی VWS (Zhu et al., 2013)

## ۲-۴-۲- روش DDA

روش تحلیل تغییر شکل‌های ناپیوسته<sup>۱</sup> (DDA) روشی است که در سال‌های اخیر توسعه یافته است. این روش برای اولین بار توسط شی<sup>۲</sup> (۱۹۹۳) برای محاسبه کرنش‌ها و جابجایی‌های سیستم‌های بلوکی ابداع شده است، که انطباق مناسبی را با مشاهدات مربوط به جابجایی‌ها و کرنش‌های واقعی حاصل از رفتار نگاری در تعداد نقاط کافی به خود اختصاص می‌دهد. در این روش جابجایی‌ها و تغییر شکل‌های بزرگ تحت بارگذاری‌های استاتیکی و دینامیکی بررسی می‌شوند. در سال‌های اخیر مطالعات زیادی در رابطه با این روش انجام گرفته است که در متون مختلف به آن اشاره شده است. این مطالعات عبارت‌اند از تعمیم روابط روش DDA برای به دست آوردن تنش و کرنش متغیر در هر بلوک که توسط جینگ<sup>۳</sup> (۱۹۹۸) انجام گرفته است. استفاده از معادلات درجات بالا در روش DDA و توسعه آن که توسط کو<sup>۴</sup> و چن<sup>۵</sup> (۱۹۹۷) انجام گرفت.

از لحاظ تئوری روش تحلیلی تغییر شکل ناپیوسته، تعمیمی از روش المان محدود است. این روش نوعی شبکه المان محدود را حل می‌کند که در آن تمام المان‌ها به صورت بلوک‌های واقعی مجزا هستند، که به وسیله ناپیوستگی‌های از قبل موجود مرزبندی شده‌اند. از این رو، این روش در مسایل توسعه ترک‌ها به ویژه کاربرد زیادی دارد، زیرا المان‌ها یا بلوک‌های بکار رفته در روش DDA می‌توانند از هر نوع شکل محدب یا مقعر یا حتی چندضلعی‌های دارای حفره باشند، این در حالی است که روش المان محدود تنها می‌تواند المان‌هایی با اشکال استاندارد و متعارف را شامل شود. علاوه بر این، در روش DDA می‌توان از قانون کولمب برای سطح مشترک محل تماس بلوک‌ها هنگام برخورد استفاده

---

<sup>۱</sup> Discontinuous Deformation Analysis

<sup>۲</sup> Shi

<sup>۳</sup> Jing

<sup>۴</sup> Koo

<sup>۵</sup> Chen

کرد و معادلات تعادلی همزمانی متناسب را بر اساس هر مرحله افزایش زمان یا بارگذاری انتخاب و حل نمود. در روش المان محدود تعداد مجهولات برابر با مجموع درجات آزادی همه گره‌ها است، اما در روش DDA تعداد مجهولات برابر با مجموع درجات آزادی همه بلوک‌ها است (خانی زاده بهابادی، ۱۳۹۵). در بخش بعدی فرمول‌بندی روش DDA توضیح داده می‌شود و در آخر به مطالعه انتشار موج با استفاده از روش DDA پرداخته خواهد شد.

## ۲-۴-۱-۲- فرمول‌بندی DDA

این روش اصولاً بر اساس مقدار جابجایی عمل کرده و بر اساس اصل حداقل انرژی پتانسیل کل فرمول‌بندی شده است. در روش DDA مانند روش اجزا محدود بایستی با استفاده از بردار نیروها و یک ماتریس سختی به ماتریس جابجایی رسید. در حقیقت این روش بر اساس حل یک مجموعه از معادلات تعادل همزمان که به صورت رابطه (۲-۳۴) استوار است:

$$[K]_{n \times n} [D]_{n \times 1} = [F]_{n \times 1} \quad (2-34)$$

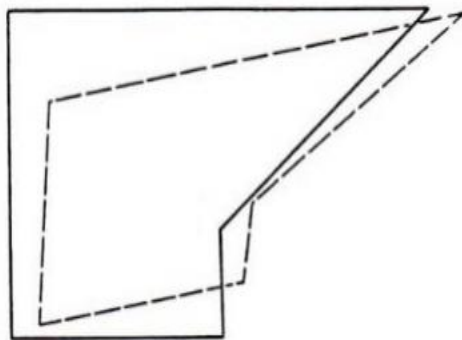
که در این معادله  $n$  تعداد بلوک‌ها،  $[K]$  ماتریس سختی،  $[D]$  ماتریس متغیر جابجایی و  $[F]$  ماتریس بردار نیروها برای سیستم بلوکی است با استفاده از تقریب خطی درجه اول برای جابجایی‌ها فرض می‌شود که در سرتاسر هر بلوک مقدار تنش‌ها و جابجایی‌ها مقدار ثابتی است. جابجایی‌های  $(u, v)$  مربوط به هر نقطه  $(x, y)$  از بلوک  $i$  ام در حالت دوبعدی را می‌توان با شش مولفه جابجایی به صورت رابطه (۲-۳۵) نشان داد:

$$D_i = (d_{1i}, d_{2i}, d_{3i}, d_{4i}, d_{5i}, d_{6i})^T = (u_0, v_0, r_0, \varepsilon_x, \varepsilon_y, \gamma_{xy})^T \quad (2-35)$$

که در معادلات بالا  $(u_0, v_0)$  مولفه‌های انتقال نقطه  $(x_0, y_0)$  از بلوک است.  $r_0$  میزان چرخش



بلوک نسبت به نقطه  $(x_0, y_0)$  هست و  $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \gamma_{xy}$  به ترتیب کرنش برشی و کرنش‌های عمودی بلوک هست. در شکل ۱۷-۲ تغییر شکل‌های کلی مربوط به بلوک را نشان می‌دهد.



شکل ۱۷-۲: تغییر شکل کلی بلوک با استفاده از روش DDA (Shi, 1993)

در دو بعد، تقریب مرتبه اول جابجایی  $(u_0, v_0)$  و در هر نقطه  $(x_0, y_0)$  بلوک  $i$  ام به صورت رابطه (۳۶-۲) می‌باشد:

$$T = \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = T_i D_i \quad (36-2)$$

که در آن ماتریس  $[T]$  به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$[T] = \begin{pmatrix} 1 & 0 & -(y-y_0) & (x-x_0) & 0 & (y-y_0) \\ 0 & 1 & -(x-x_0) & 0 & (y-y_0) & (x-x_0) \end{pmatrix} \quad (37-2)$$

این معادلات هنگامی که جابجایی نقطه مرکزی بلوک، چرخش بلوک و کرنش‌ها (که درون هر بلوک مقدار ثابتی می‌باشند) مشخص باشد، قادر به محاسبه جابجایی هر نقطه  $(x, y)$  از بلوک هست. در روش DDA هر بلوک از سیستم بلوکی، در میان بلوک‌های دیگر واقع شده و جابجایی آن‌ها محدود به خود بلوک خواهد بود. وقتی  $n$  بلوک در سیستم بلوکی تعریف شده باشد، در این صورت معادلات

تعالی همزمان را می‌توان برای این سیستم بلوکی به صورت رابطه (۳۸-۲) نوشت:

$$\begin{pmatrix} K_{11} & \dots & K_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ K_{n1} & \dots & K_{nn} \end{pmatrix} \begin{bmatrix} D_1 \\ \vdots \\ D_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_1 \\ \vdots \\ F_n \end{bmatrix} \quad (38-2)$$

که در این معادله  $K$  ضرایب سختی مربوط به هر بلوک و  $F$  یک ماتریس  $6 \times 1$  هست که نیروهای اعمالی هست. معادلات بالا برگرفته از خانی زاده بهابادی (۱۳۹۵)، گرایلی میکا (۱۳۸۳) و شی (۱۹۹۳) است.

#### ۲-۲-۴-۲- بررسی انتشار موج در توده سنگ با استفاده از روش DDA

به منظور راه حل روش DDA در انتشار موج، شرایط مرزی به صورت ویسکوز در نظر گرفته می‌شود. در این روش برای شبیه‌سازی یک مرز ویسکوز، میراگرهایی<sup>۱</sup> در جهت عمودی و برشی ایجاد می‌شوند. این میراگرها سرعت بلوک را به تنش‌های نرمال و برشی تبدیل می‌کند که به صورت رابطه (۳۹-۲) و (۴۰-۲) هست.

$$\sigma_n = -\rho c_p v_n \quad (39-2)$$

$$\tau_s = -\rho c_s v_s \quad (40-2)$$

که در رابطه بالا  $v_s$  و  $v_n$  به ترتیب سرعت نرمال و برشی هستند.  $\rho$  چگالی محیط بلوکی و  $c_p$  و  $c_s$  به ترتیب سرعت انتشار موج P و S هست. بر اساس اصل حداقل انرژی پتانسیل کل و معادله DDA ماتریس  $[K]$  و  $[F]$  آن به صورت روابط (۴۱-۲) و (۴۲-۲) درخواهند آمد:

---

<sup>۱</sup> dampers

$$[K] = \frac{2\rho l [T]^T [w] [T]}{\Delta t} \quad (41-2)$$

$$[F] = \rho l [T]^T [w] [T] \{\Delta D\} \quad (42-2)$$

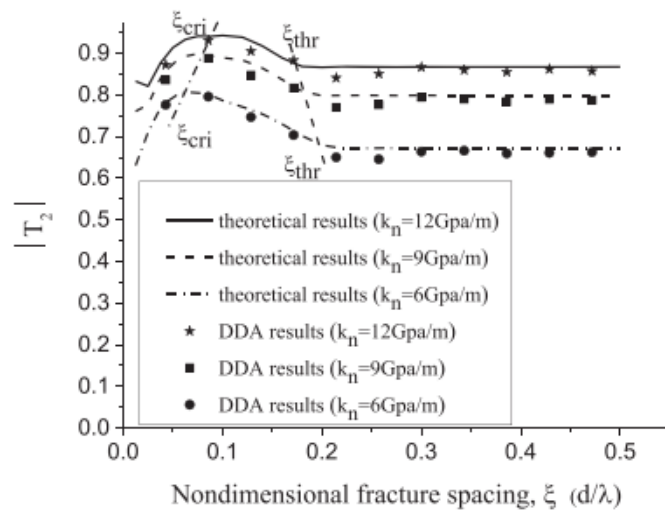
که در دو رابطه بالا  $l$  طول مرز بلوک،  $[T]$  ماتریس تابع شکل،  $\{\Delta D\}$  نشان‌دهنده بردار سرعت بلوک هست و  $[w]$  ماتریس سرعت موج که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$[w] = \begin{pmatrix} c_p \eta_x^2 + c_s \eta_y^2 & (c_s - c_p) \eta_x \eta_y \\ (c_s - c_p) \eta_x \eta_y & c_p \eta_y^2 + c_s \eta_x^2 \end{pmatrix} \quad (43-2)$$

که  $\eta_x, \eta_y$  به ترتیب کوسینوس هادی مرزهای بلوک در جهت‌های  $x$  و  $y$  هست (Fu et al., 2015). ژیادونگ فو<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۱۵) به بررسی و ارزیابی روش DDA برای مطالعه انتشار موج در توده سنگ درزه دار پرداختند. ونجون گنگ<sup>۲</sup> و همکاران (۲۰۱۷) با استفاده از DDA به مطالعه انتشار موج P در سراسر توده سنگ درزه‌دار پرداختند. آن‌ها در مطالعات خود به بررسی تأثیر سختی درزه‌ها بر موج عبوری پرداختند. همچنین تأثیر فرکانس و فاصله‌داری درزه بی‌بعد نیز در مطالعات خود با استفاده از روش DDA و مقایسه آن با روش تحلیلی نیز پرداختند. همچنان که در شکل ۲-۱۸ نشان داده شده است تأثیر فاصله‌داری درزه بی‌بعد در سختی درزه‌های مختلف بر موج عبوری نشان داده شده است.

<sup>۱</sup> Xiaodong Fu

<sup>۲</sup> Wenjun Gong



شکل ۱۸-۲: تأثیر فاصله‌داری درزه بر موج عبوری در سختی درزه مختلف با استفاده از روش (W. GONG et al., 2017) DDA

## فصل سوم

مطالعه تحلیلی انتشار موج در

توده سنگ درزه دار

زمانی که یک موج در توده سنگ درزه‌دار انتشار می‌یابد، میرایی و تضعیف موج به دلیل وجود درزه‌ها اتفاق می‌افتد؛ بنابراین مطالعه انتشار تنشی در موج در سراسر درزه‌های سنگی در ارزیابی‌های مهندسی و حل مسایل مکانیک سنگ، ژئوفیزیک و لرزه‌شناسی کاربرد دارد. چنانکه در فصل ۲ بیان گردید، انتشار موج در سراسر درزه‌های موازی به‌طور وسیع توسط روش‌های مختلف تحلیلی مورد مطالعه قرار گرفته است. زمانی که درزه‌های موازی چندگانه مورد توجه باشد، انتشار موج به دلیل بازتاب موج متعدد در میان درزه‌ها پیچیده خواهد شد. همان‌گونه که توضیح داده شده است، محدودیت‌هایی در این روش‌ها وجود دارد، به‌طوری‌که روش EMM بازتاب موج متعدد در میان درزه‌ها را در نظر نمی‌گیرد. همچنین روش MC یک روش تحلیل کامل نیست و خطاهای محاسباتی دارد و روش MC برای مطالعه انتشار موج مایل دشوار است. بنابراین لازم است که روش‌های تحلیلی جدید به کار برده شوند یا روش‌های موجود برای مطالعه انتشار موج در سراسر درزه‌های موازی بهبود یابند.

همان‌گونه که قبلاً اشاره شد، هدف از انجام این تحقیق، بررسی تحلیلی و عددی انتشار موج در توده سنگ درزه‌دار هست. در این فصل با استفاده از روش تحلیلی براساس مطالعه هوانگ و همکاران (۲۰۱۴) به بررسی انتشار موج در توده سنگ درزه‌دار پرداخته خواهد شد و با مطالعه پژوهشگران قبلی مقایسه خواهد شد.

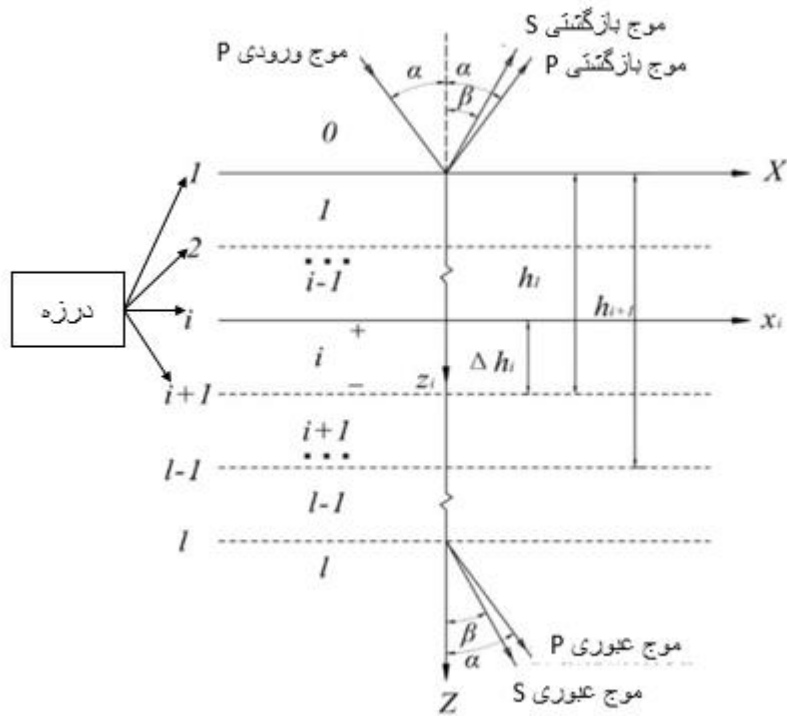
در ابتدا به بررسی روش تحلیلی موجود پرداخته خواهد شد. هنگامی که یک موج به‌صورت مایل به یک درزه برخورد می‌کند، علاوه بر عبور و بازگشت موج، تبدیل موج نیز اتفاق می‌افتد؛ به‌عبارتی دیگر اگر یک موج نوع P به‌صورت مایل به درزه برخورد کند علاوه بر آنکه موج نوع P از درزه عبور و

بازگشت می‌کند، موج S نیز ایجاد و از درزه عبور و بازگشت می‌کند. تبدیل موج باعث می‌شود که نسبت به موجی که به صورت عمود بر درزه وارد می‌شود، میرایی آن پیچیده‌تر باشد.

در این مطالعه، تحلیل موج مایل با زاویه برخورد نسبت به توده سنگ درزه‌دار، با ترکیب روش DDM و با به‌کارگیری تبدیل فوریه جهت انتقال از حوزه زمان به حوزه فرکانس و ارتباط بین لایه اول و لایه n ام بر اساس دامنه توابع پتانسیل مورد تحلیل قرار گرفته است. همچنین در بخش بعدی به مطالعه پارامتریک بر روی انتشار موج در تک درزه و چند درزه موازی پرداخته خواهد شد و تأثیر پارامترهایی مانند تأثیر سختی درزه نرمال شده، تأثیر زاویه موج ورودی، تأثیر فاصله‌داری نرمال شده درزه‌ها و تعداد درزه‌ها بر انتشار موج بررسی می‌شوند.

### ۲-۳- مطالعه تحلیلی انتشار موج در توده سنگ درزه‌دار

در مطالعه حاضر از روش بازگشتی (RM) هوانگ و همکاران (۲۰۱۴) برای تحلیل انتشار موج در توده سنگ درزه‌دار موازی اتخاذ شده است. مطالعه هوانگ و همکاران (۲۰۱۴) برای محیط ویسکوالاستیک بررسی شده و در این پایان نامه به بررسی مطالعه انتشار موج در محیط الاستیک پرداخته شده است. تحلیل زیر بر اساس آنالیز موج صفحه‌ای صورت می‌پذیرد. در این تحلیل فرض شده است که همه درزه‌ها دارای فاصله‌داری یکسان به اندازه  $\Delta h$  بوده و رفتار درزه‌ها نیز الاستیک خطی است. شکل ۱-۳ سیستم مختصاتی برای موج‌های بازگشتی و عبوری از یک دسته‌درزه موازی تحت برخورد موج ورودی P را نشان می‌دهد.



شکل ۱-۳: شکل نمادین انتشار موج ورودی p از محیط توده سنگ درزه دار موازی (Huang et al., 2014)

طبق قوانین و روابط (DDM) برای درزه i ام می توان روابط (۱-۳) تا (۴-۳) را نوشت (Huang et

al., 2014):

$$\tau_{zx}^-_{i-1} = \tau_{zx}^+_{i-1} = \tau_{zx} \quad (۱-۳)$$

$$\sigma_z^-_{i-1} = \sigma_z^+_{i-1} = \sigma_z \quad (۲-۳)$$

$$k_{si} (u_{xi}^+ - u_{xi-1}^-) = \tau_{zx} \quad (۳-۳)$$



$$k_{ni} \left( u_{zi}^+ - u_{zi-1}^- \right) = \sigma_z \quad (4-3)$$

که در روابط بالا  $\tau$ ،  $\sigma$  و  $u$  با اندیس‌های  $i$  و  $i-1$  نشان‌دهنده تنش برشی، تنش عمودی و جابجایی‌ها در لایه  $i$  و  $i-1$  می‌باشند.  $k_{ni}$  و  $k_{si}$  نشان‌دهنده سختی الاستیک برشی و نرمال درزه  $i$  است. + و - نشان دهنده بعد و قبل از درزه می باشد.  $Z$  و  $X$  مختصات صفحه هستند.

برای به دست آوردن ماتریس انتشار، ابتدا روابط مذکور با استفاده از تبدیل فوریه به حوزه فرکانس انتقال داده می‌شود. از آنجایی که معادلات مذکور شامل مشتقاتی از زمان است، بدین منظور از تبدیل فوریه استفاده شده است و برای به دست آوردن ماتریس انتشار، بهتر است که متغیر زمان حذف شود. بنابراین روابط بالا را می‌توان به صورت زیر نوشت (elastic) (Huang et al., 2014):

$$\tau_{zx}^- = \tau_{zx}^+ = \tau_{zx} \quad (5-3)$$

$$\tau_{zx}^- = \sigma_z^+ = \sigma_z \quad (6-3)$$

$$k_{si} \left( u_{xi}^+ - u_{xi-1}^- \right) = u_{zx} \quad (7-3)$$

$$k_{ni} \left( u_{zi}^+ - u_{zi-1}^- \right) = \sigma_z \quad (8-3)$$

که متغیرهایی با داشتن  $\infty$  نشان‌دهنده تبدیل فوریه آن متغیرهای مربوطه می‌باشند. روابط (5-3) تا (8-3) را می‌توان به صورت ماتریسی به صورت زیر بازنویسی کرد (elastic) (Huang et al., 2014):

$$\begin{bmatrix} \infty \\ u_x \\ \infty \\ u_z \\ \infty \\ \tau_{zx} \\ \infty \\ \sigma_z \end{bmatrix}_i^+ = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \frac{1}{k_{si}} \\ 0 & 1 & \frac{1}{k_{ni}} & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \infty \\ u_x \\ \infty \\ u_z \\ \infty \\ \tau_{zx} \\ \infty \\ \sigma_z \end{bmatrix}_{i-1}^- = [K]_i \begin{bmatrix} \infty \\ u_x \\ \infty \\ u_z \\ \infty \\ \tau_{zx} \\ \infty \\ \sigma_z \end{bmatrix}_{i-1}^- \quad (9-3)$$

در این مرحله، معادله موج دو بعدی را می توان بر اساس معادلات تنش- کرنش و تنش - جابجایی

می توان برای محیط دارای رفتار الاستیک به صورت زیر بیان کرد (Huang et al., 2014):

$$\rho \frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2} = \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \quad (10-3)$$

$$\rho \frac{\partial^2 u_z}{\partial t^2} = \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} \quad (11-3)$$

$$\frac{\partial \sigma_z}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 u_x}{\partial t \partial x} + (\lambda + 2\mu) \frac{\partial^2 u_z}{\partial t \partial z} \quad (12-3)$$

$$\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial t} = \mu \frac{\partial^2 u_x}{\partial t \partial x} + \mu \frac{\partial^2 u_z}{\partial t \partial x} \quad (13-3)$$

که در روابط فوق  $\rho$  چگالی سنگ،  $\mu$  و  $\lambda$  ضرایب لامه هستند.

همانند معادلات بالا برای حذف متغیر زمان ابتدا معادلات با استفاده از تبدیل فوریه به حوزه

فرکانس انتقال داده می شوند (Huang et al., 2014).

$$-\rho\omega^2 u_x^\infty = \frac{\partial \sigma_x^\infty}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xz}^\infty}{\partial z} \quad (14-3)$$

$$-\rho\omega^2 u_z^\infty = \frac{\partial \sigma_z^\infty}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}^\infty}{\partial x} \quad (15-3)$$

$$\sigma_z^\infty = \lambda \frac{\partial u_x^\infty}{\partial x} + (\lambda + 2\mu) \frac{\partial u_z^\infty}{\partial z} \quad (16-3)$$

$$\tau_{xz}^\infty = \mu \left( \frac{\partial u_z^\infty}{\partial x} + \frac{\partial u_x^\infty}{\partial z} \right) \quad (17-3)$$

که در روابط بالا  $\omega$  فرکانس زاویه‌ای است.

بر اساس تئوری هلمهولتز<sup>۱</sup>، معادله دینامیکی موج دوبعدی می‌تواند در حوزه فرکانس به صورت

دامنه پتانسیل بیان شود که روابط (۱۸-۳) و (۱۹-۳) بیانگر زیر است (Huang et al., 2014).

$$u_x^\infty = \frac{\partial \varphi^\infty}{\partial x} - \frac{\partial \Psi_2^\infty}{\partial z} \quad (18-3)$$

---

<sup>۱</sup> Helmholtz

(۱۹-۳)

$$u_z = \frac{\partial \varphi}{\partial z} + \frac{\partial \Psi_2}{\partial x}$$

که در روابط بالا  $\varphi$  و  $\Psi_2$  به ترتیب پتانسیل جابجایی موج P و پتانسیل جابجایی موج S هستند. در نتیجه زمانی که یک موج P در محیط لایه‌ای انتشار می‌یابد، پتانسیل جابجایی در حوزه فرکانس می‌توان به صورت رابطه (۲۰-۳) نوشته شود (Huang et al., 2014):

$$\varphi_i = e^{i(-k_x x - k_z p z)} \quad (20-3)$$

که در این رابطه  $k_x = k_p \sin \alpha$  و  $k_z p = k_p \cos \alpha$  که  $k_p = \frac{\omega}{v_p}$  و  $\alpha$  زاویه ورودی است. طبق روابط مذکور، پتانسیل جابجایی هر لایه در حوزه فرکانس از روابط (۲۱-۳) و (۲۲-۳) محاسبه می‌شود (Huang et al., 2014).

$$\varphi(x, z, \omega) = U_p e^{i(-k_x x + k_z p z)} + D_p e^{i(-k_x x - k_z p z)} \quad (21-3)$$

(۲۲-۳)

$$\Psi_2(x, z, \omega) = U_s e^{i(-k_x x + k_z s z)} + D_s e^{i(-k_x x - k_z s z)}$$

که در روابط بالا  $U_p$ ،  $D_p$ ،  $U_s$  و  $D_s$  به ترتیب دامنه پتانسیل جابجایی از مولفه های موج بازگشتی P، موج عبوری P، موج بازگشتی S و موج عبوری S هستند. طبق روابط (۱۴-۳) تا (۲۲-۳) شکل ماتریسی معادلات به صورت رابطه (۲۳-۳) خواهد شد (Huang et al., 2014):

$$\begin{bmatrix} \infty \\ u_x \\ \infty \\ u_z \\ \infty \\ \sigma_z \\ \infty \\ \tau_{zx} \end{bmatrix} = PQ \begin{bmatrix} U_p \\ D_p \\ U_s \\ D_s \end{bmatrix} e^{-i k_x x} \quad (23-3)$$

که در این رابطه ماتریس‌های  $P$  و  $Q$  به صورت زیر می‌باشند (elastic) (Huang et al., 2014):

$$[P] = \begin{bmatrix} -i k_x & -i k_x & -i k_{zs} & i k_{zs} \\ i k_{zp} & -i k_{zp} & -i k_x & -i k_x \\ \frac{-\lambda \omega^2}{\sqrt{2}} - 2\mu k_{zp}^2 & \frac{-\lambda \omega^2}{\sqrt{2}} - 2\mu k_{zp}^2 & 2\mu k_x k_{zs} & -2\mu k_x k_{zs} \\ 2\mu k_x k_{zp} & -2\mu k_x k_{zp} & -\mu(k_x^2 - k_{zs}^2) & -\mu(k_x^2 - k_{zs}^2) \end{bmatrix}$$

$$[Q] = \begin{bmatrix} e^{i k_{zp} h} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & e^{-i k_{zp} h} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & e^{i k_{zs} h} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & e^{-i k_{zs} h} \end{bmatrix}$$

معادله بالا ارتباط بین دامنه پتانسیل جابجایی و تنش‌ها در هر لایه را نشان می‌دهد. در

لایه  $i$  ام که در شکل ۳-۱ نشان داده شده است، ماتریس  $Q$  آن به صورت زیر درمی‌آید:

$$[Q]_i^- = \begin{bmatrix} e^{i k_{zp} h_i} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & e^{-i k_{zp} h_i} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & e^{i k_{zs} h_i} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & e^{-i k_{zs} h_i} \end{bmatrix} \text{ و } [Q]_i^+ = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

بر اساس روابط (۲۳-۳) و (۹-۳) می‌توان به صورت زیر روابط را تلفیق کرد. این رابطه بیانگر ترکیب

روش DDM با روش دامنه پتانسیل جابجایی در هر درزه است (elastic) (Huang et al., 2014).

$$\begin{aligned}
 \begin{bmatrix} U_p \\ D_p \\ U_s \\ D_s \end{bmatrix}_{i+1} &= [Q]_{i+1}^+ [P]_{i+1}^{-1} \begin{bmatrix} \infty \\ u_x \\ \infty \\ u_z \\ \infty \\ \sigma_z \\ \infty \\ \tau_{zx} \end{bmatrix}_{i+1}^+ e^{ik_x x} = \\
 [Q]_{i+1}^+ [P]_{i+1}^{-1} [K]_i &\begin{bmatrix} \infty \\ u_x \\ \infty \\ u_z \\ \infty \\ \sigma_z \\ \infty \\ \tau_{zx} \end{bmatrix}_i e^{ik_x x} = \\
 [Q]_{i+1}^+ [P]_{i+1}^{-1} [K]_i [P]_i [Q]_i^- &\begin{bmatrix} U_p \\ D_p \\ U_s \\ D_s \end{bmatrix}_i = [R]_i \begin{bmatrix} U_p \\ D_p \\ U_s \\ D_s \end{bmatrix}_i
 \end{aligned} \tag{۲۴-۳}$$

با توجه به روابط بالا به دلیل آن که  $[Q]_{i+1}^+$  یک ماتریس واحد می باشد، در نتیجه ماتریس

$$[R]_i \text{ به صورت زیر حاصل خواهد شد: } [R]_i = [P]_{i+1}^{-1} [K]_i [P]_i [Q]_i^-$$

با توجه به مطالعات ژائو و همکاران (۲۰۱۲) ارتباط بین لایه اول و لایه  $l$  ام را می توان به صورت زیر

نوشت:

$$\begin{bmatrix} U_p \\ D_p \\ U_s \\ D_s \end{bmatrix}_l = [R]_{l-1} \dots [R]_i \dots [R]_1 \begin{bmatrix} U_p \\ D_p \\ U_s \\ D_s \end{bmatrix}_1 \quad (25-3)$$

با توجه به رابطه (۲۳-۳) برای هر لایه می‌توان روابط زیر را بیان کرد (elastic) (Huang et al., 2014):

$$\begin{bmatrix} \infty \\ u_x \\ \infty \\ u_z \\ \infty \\ \sigma_z \\ \infty \\ \tau_{zx} \end{bmatrix}_i^+ = [P]_i [Q]_i^+ \begin{bmatrix} U_p \\ D_p \\ U_s \\ D_s \end{bmatrix}_i^+ e^{-i k_x x} \quad (26-3)$$

$$\begin{bmatrix} \infty \\ u_x \\ \infty \\ u_z \\ \infty \\ \sigma_z \\ \infty \\ \tau_{zx} \end{bmatrix}_i^- = [P]_i [Q]_i^- \begin{bmatrix} U_p \\ D_p \\ U_s \\ D_s \end{bmatrix}_i^- e^{-i k_x x} \quad (27-3)$$

برای اولین درزه از لایه اول به دلیل آنکه  $[Q]_i^+$  یک ماتریس واحد است می‌توان رابطه (۲۶-۳)

را به صورت زیر نوشت:

$$\begin{bmatrix} \infty \\ u_x \\ \infty \\ u_z \\ \infty \\ \sigma_z \\ \infty \\ \tau_{zx} \end{bmatrix}_1^+ = [P]_1 \begin{bmatrix} U_p \\ D_p \\ U_s \\ D_s \end{bmatrix}_1^+ e^{-i k_x x} \quad (28-3)$$

همچنین برای لایه صفر ام به دلیل آنکه فاصله آن صفر است، بنابراین ماتریس  $[Q]_i^-$  آن واحد

می شود و می توان رابطه (27-3) را به صورت (29-3) نوشت:

$$\begin{bmatrix} \infty \\ u_x \\ \infty \\ u_z \\ \infty \\ \sigma_z \\ \infty \\ \tau_{zx} \end{bmatrix}_0^- = [P]_0 \begin{bmatrix} U_p \\ D_p \\ U_s \\ D_s \end{bmatrix}_0^- e^{-i k_x x} \quad (29-3)$$

با توجه به روابط بالا ارتباط بین لایه اول و لایه صفر ام را می توان به صورت رابطه (30-3) نوشت:

$$\begin{bmatrix} \infty \\ u_x \\ \infty \\ u_z \\ \infty \\ \sigma_z \\ \infty \\ \tau_{zx} \end{bmatrix}_1^+ = [K]_1 \begin{bmatrix} \infty \\ u_x \\ \infty \\ u_z \\ \infty \\ \sigma_z \\ \infty \\ \tau_{zx} \end{bmatrix}_0^- \quad (30-3)$$

با توجه به روابط (28-3)، (29-3) و (30-3) می توان به این نتیجه رسید:



$$\begin{bmatrix} U_p \\ D_p \\ U_s \\ D_s \end{bmatrix}_1^+ = [P]_0^{-1} [K]_1 [P]_0 \begin{bmatrix} U_p \\ D_p \\ U_s \\ D_s \end{bmatrix}_0^- \quad (31-3)$$

بر اساس روابط (3-25) و (3-31) نیز می‌توان به رابطه (3-32) رسید (elastic) (Huang et al., 2014):

$$\begin{bmatrix} U_p \\ D_p \\ U_s \\ D_s \end{bmatrix}_l = [R]_{l-1} \dots [R]_i \dots [R]_1 \begin{bmatrix} U_p \\ D_p \\ U_s \\ D_s \end{bmatrix}_1 = \quad (32-3)$$

$$[R]_{l-1} \dots [R]_i \dots [R]_1 [P]_0^{-1} [K]_1 [P]_0 \begin{bmatrix} U_p \\ D_p \\ U_s \\ D_s \end{bmatrix}_0^-$$

که معادله بالا ارتباط بین لایه  $l$  ام و لایه صفر ام را نشان می‌دهد.

اگر موج ورودی موج P باشد، آنگاه برای لایه صفر ام  $D_s = 0$  است. برای لایه  $l$  ام به دلیل آن که تنها موج‌های عبوری P و S وجود دارند؛ بنابراین می‌توان نوشت که  $U_p = U_s = 0$  در نتیجه با توجه به اینکه ماتریس از درجه 4 است، می‌توان به صورت پارامتری روابط را به صورت رابطه (3-33) بیان کرد (elastic) (Huang et al., 2014):

$$\begin{bmatrix} 0 \\ D_p \\ 0 \\ D_s \end{bmatrix}_l = N \begin{bmatrix} U_p \\ D_p \\ U_s \\ 0 \end{bmatrix}_0 = \begin{bmatrix} n_{11} & n_{12} & n_{13} & n_{14} \\ n_{21} & n_{22} & n_{23} & n_{24} \\ n_{31} & n_{32} & n_{33} & n_{34} \\ n_{41} & n_{42} & n_{43} & n_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_p \\ D_p \\ U_s \\ 0 \end{bmatrix}_0 \quad (33-3)$$

که می‌توان آن را به صورت زیر نوشت:

$$\begin{cases} (n_{11})U_p^0 + (n_{12})D^0 + (n_{13})U_s^0 = 0 \\ (n_{21})U_p^0 + (n_{22})D^0 + (n_{23})U_s^0 = D_p^l \\ (n_{31})U_p^0 + (n_{32})D^0 + (n_{33})U_s^0 = 0 \\ (n_{41})U_p^0 + (n_{42})D^0 + (n_{43})U_s^0 = D_s^l \end{cases} \quad (34-3)$$

در پایان با حل ماتریس می توان دامنه موج عبوری و بازگشتی را بر اساس دامنه موج ورودی به دست آورد. با توجه به رابطه بالا اگر معادله را بر اساس دامنه موج ورودی مرتب شود در آن صورت می توان دامنه موج بازگشتی و عبوری را بر اساس رابطه (35-3) به دست آورد:

$$\begin{bmatrix} U_p^0 \\ D_p^l \\ U_s^0 \\ D_s^l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_{11} & 0 & n_{13} & 0 \\ n_{21} & -1 & n_{23} & 0 \\ n_{31} & 0 & n_{33} & 0 \\ n_{41} & 0 & n_{43} & -1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} -n_{12} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -n_{22} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -n_{32} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -n_{42} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} D_p^0 \\ D_p^0 \\ D_p^0 \\ D_p^0 \end{bmatrix} \quad (35-3)$$

که در مطالعات بالا  $D_p^0$  دامنه موج ورودی است.

همچنین زمانی که موج ورودی S باشد در این صورت همانند مطالعات بالا می توان دامنه موج عبوری و بازگشتی را بر اساس دامنه موج ورودی نوشت که در این صورت دامنه موج ورودی به صورت زیر خواهد شد:

$$\begin{bmatrix} U_p^0 \\ D_p^l \\ U_s^0 \\ D_s^l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_{11} & 0 & n_{13} & 0 \\ n_{21} & -1 & n_{23} & 0 \\ n_{31} & 0 & n_{33} & 0 \\ n_{41} & 0 & n_{43} & -1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} -n_{14} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -n_{24} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -n_{34} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -n_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} D_s^0 \\ D_s^0 \\ D_s^0 \\ D_s^0 \end{bmatrix} \quad (36-3)$$

که در مطالعات بالا  $D_s^0$  دامنه موج ورودی S می باشد.

در ادامه مطالعه ابتدا یک موج سینوسی با استفاده از تبدیل فوریه (FFT) از حوزه زمان به حوزه فرکانس انتقال می‌شود. سپس ضرایب بازگشتی و عبوری در حوزه فرکانس محاسبه شده و این امواج از حوزه فرکانس با عکس تبدیل فوریه (IFFT) به حوزه زمان برده می‌شوند، و در آخر ضرایب بازگشتی و عبوری بر اساس نسبت دامنه پتانسیل امواج عبوری و بازگشتی به دامنه پتانسیل موج ورودی تعریف می‌شوند؛ بنابراین ضرایب بازگشتی و عبوری برای موج ورودی P را می‌توان به صورت زیر نوشت (Huang et al., 2014)(elastic):

$$\begin{aligned}
 R_{p \rightarrow p} &= \text{Max} \left[ \text{abs} \left( U_p^0 \right) \right] \\
 R_{p \rightarrow sv} &= \text{Max} \left[ \text{abs} \left( U_s^0 \right) \right] \\
 T_{p \rightarrow p} &= \text{Max} \left[ \text{abs} \left( D_p^l \right) \right] \\
 T_{p \rightarrow sv} &= \text{Max} \left[ \text{abs} \left( D_s^l \right) \right]
 \end{aligned}
 \tag{۳۷-۳}$$

برای موج ورودی S نیز ضرایب بازگشت و عبوری نیز به صورت زیر می‌توان نوشت:

$$\begin{aligned}
 R_{s \rightarrow s} &= \text{Max} \left[ \text{abs} \left( U_s^0 \right) \right] \\
 R_{s \rightarrow p} &= \text{Max} \left[ \text{abs} \left( U_p^0 \right) \right] \\
 T_{s \rightarrow p} &= \text{Max} \left[ \text{abs} \left( D_p^l \right) \right] \\
 T_{s \rightarrow s} &= \text{Max} \left[ \text{abs} \left( D_s^l \right) \right]
 \end{aligned}
 \tag{۳۸-۳}$$

بر اساس مطالعات موجود به بررسی مطالعه پارامتریک انتشار موج از طریق تک درزه پرداخته شده و در بخش بعدی انتشار موج در توده سنگ درزه‌دار موازی بررسی می‌شود. روابط روش تحلیلی در برنامه متلب<sup>۱</sup> پیاده‌سازی شده است.

---

<sup>۱</sup> Matlab

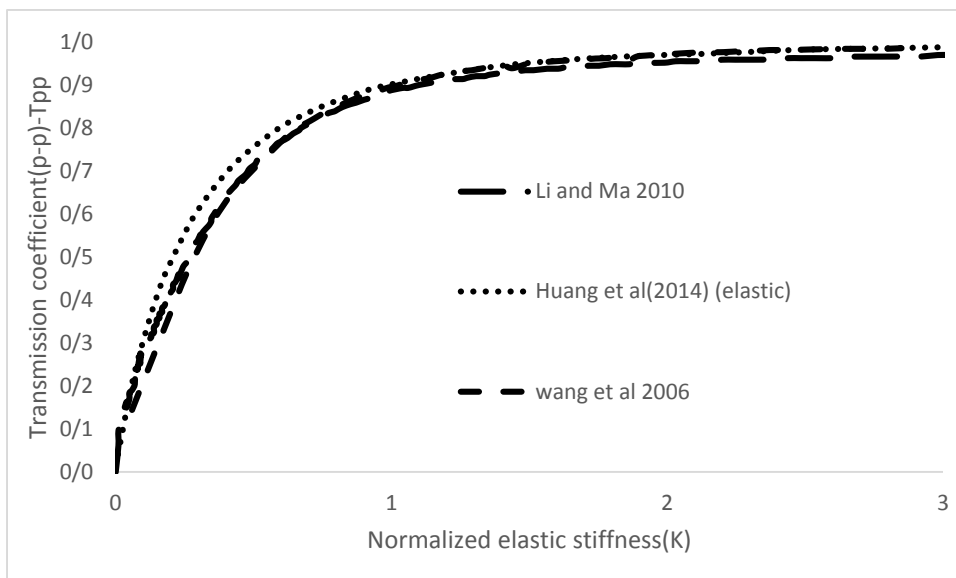
### ۳-۳- مطالعه پارامتریک انتشار موج در تک درزه

در این بخش پارامترهای مؤثر در انتشار موج در تک درزه بررسی می‌شوند. به منظور ارزیابی روش تحلیلی، ابتدا یک موج سینوسی با دامنه واحد و فرکانس ۵۰ هرتز به‌عنوان موج ورودی در نظر گرفته شده است. در ابتدا این موج با استفاده از تبدیل فوریه به حوزه فرکانس انتقال می‌یابد. خصوصیات محیط توده سنگ دربرگیرنده که در آن سرعت انتشار موج P در ماده سنگ ۵۸۳۰ متر بر ثانیه، سرعت انتشار موج S ۳۸۴۰ متر بر ثانیه، چگالی سنگ نیز ۲۶۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب و مدول بالک و برشی نیز به ترتیب ۴۴ و ۳۹ گیگا پاسکال است، در نظر گرفته است. سپس بر اساس روش تحلیلی ذکرشده تأثیر پارامتر سختی الاستیک نرمال شده درزه‌ها برای یک موج P که به‌صورت عمود وارد می‌شود، بررسی می‌شود، در ادامه تأثیر سختی درزه نرمال شده برای یک موج مایل P و زاویه ورودی بر ضرایب بازگشتی و عبوری مطالعه شده و هر پارامتر به‌صورت جداگانه مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور برای تأثیر این پارامترها، هر کدام از پارامترها متغیر می‌باشند درحالی که پارامترهای دیگر ثابت می‌باشند.

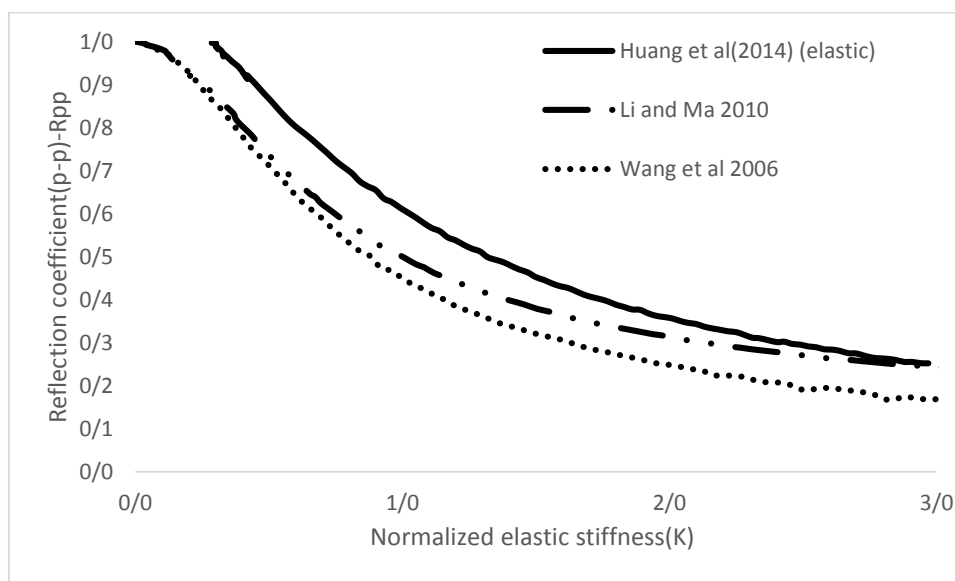
#### ۳-۳-۱- تأثیر سختی درزه نرمال شده بر انتشار موج

به‌منظور ارزیابی روش تحلیلی بحث شده، ابتدا تأثیر سختی الاستیک نرمال شده درزه‌ها، بر ضرایب بازگشت و عبوری برای یک موج P که به‌صورت عمودی بر یک سطح وارد می‌شود بررسی شده است. شکل‌های ۳-۲ و ۳-۳ نشان‌دهنده تأثیر سختی الاستیک نرمال درزه بر روی ضرایب بازگشت و عبوری حاصل از روش است که در آن زاویه ورودی صفر درجه و عمود بر درزه است. همچنان که در شکل‌ها مشاهده می‌شود با افزایش K (سختی الاستیک نرمال درزه) ضریب عبور موج ( $T_{p \rightarrow p}$ ) افزایش پیدا کرده، درحالی که ضریب بازگشت ( $R_{p \rightarrow p}$ ) کاهش پیدا می‌کند. نتایج گواه آن است که وقتی خصوصیات درزه به خصوصیات محیط دربرگیرنده نزدیک می‌شود، عبور موج بیشتر شده

درحالی که موج بازگشتی کاهش پیدا می کند. این نتایج بیانگر آن است که سختی الاستیک نرمال شده درزه‌ها به‌عنوان یکی از خصوصیات مهم درزه بر انتشار موج تأثیرگذار است و ضرایب بازگشت و عبوری از درزه‌ها با تغییر سختی الاستیک نرمال درزه‌ها تغییر خواهد کرد. در شکل ۲-۳ نیز پیداست که برای تأثیر سختی درزه نرمال شده بیشتر از حدود ۱، از افزایش موج عبوری کمتر کاسته می‌شود، درحالی که برای مقادیر کمتر از ۱ به مقدار زیادی در ضریب عبوری مؤثر است. نتایج به دست آمده از روش تحلیلی با روش‌های لی و ما (۲۰۱۰) که از روش بازگشتی برای مطالعه بر هم کنش موج انفجار در تک درزه و وانگ و همکاران (۲۰۰۶) که از مدلسازی عددی 3DEC برای بررسی تاثیر درزه‌ها بر انتشار موج استفاده نمودند، مقایسه شده که در شکل‌های ۲-۳ و ۳-۳ قابل مشاهده است. همان‌گونه که در شکل‌ها پیداست همبستگی خوبی بین روش تحلیلی و مطالعات پیشین وجود دارد.

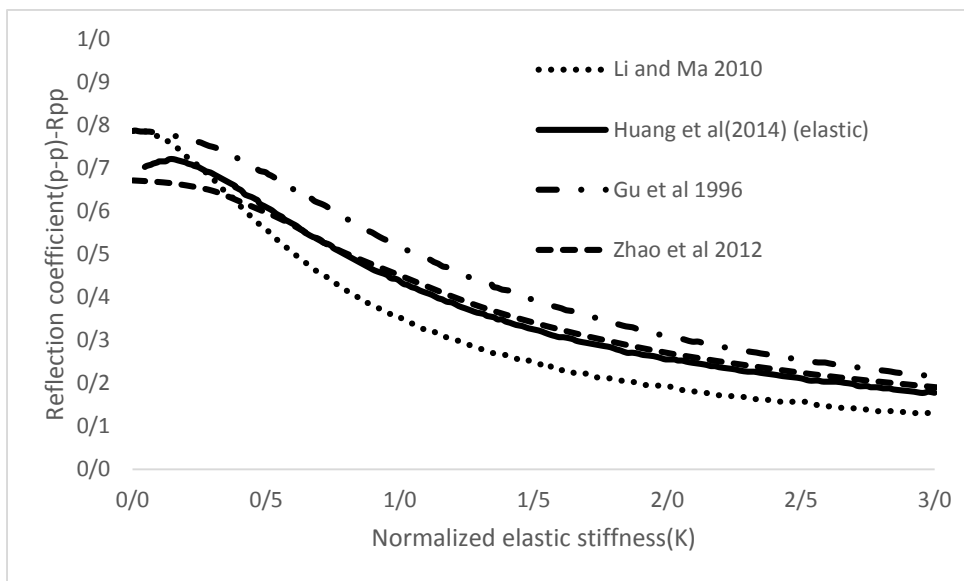


شکل ۳-۲: تغییرات سختی الاستیک نرمال شده درزه بر موج عبوری برای موج عمودی تابشی P

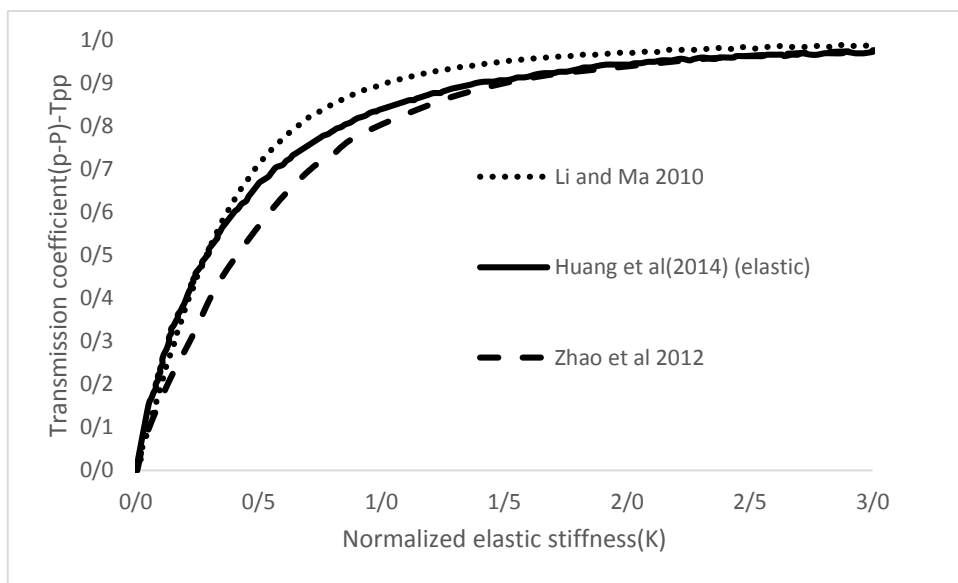


شکل ۳-۳: تغییرات سختی الاستیک نرمال شده درزه بر موج بازگشتی برای موج عمودی تابشی

از آنجاییکه هنگامی که یک موج به طور مایل به یک درزه برخورد کند، تبدیل موج نیز اتفاق می افتد، بر همین اساس زاویه ورودی ۲۴/۴۸ در نظر گرفته شده است تا تأثیر تبدیل موج نیز بررسی شود. در شکل های ۳-۴ تا ۳-۷ تغییرات سختی الاستیک نرمال شده درزه بر روی ضرایب بازگشت و عبوری موج تابشی مایل ورودی  $p$  نشان داده شده است. همچنان که در شکل ها مشاهده می شود، پارامترهای شامل  $(T_{p \rightarrow p})$ ،  $(R_{p \rightarrow p})$ ،  $(R_{p \rightarrow s})$  و  $(T_{p \rightarrow s})$  تحت تأثیر سختی الاستیک نرمال شده درزه ها قرار گرفته است، به این ترتیب که با افزایش  $K$  (سختی الاستیک نرمال درزه) ضریب عبور موج  $(T_{p \rightarrow p})$  افزایش پیدا می کند. شدت افزایش موج عبوری ابتدا با یک شیب بسیار تند خواهد بود و برای سختی نرمال شده بیشتر از ۱ از شدت آن کاسته می شود. ضریب بازگشتی  $(R_{p \rightarrow p})$  با یک شیب ملایم کاهش پیدا می کند. برای بحث تبدیل موج، ضریب بازگشتی تبدیلی  $(R_{p \rightarrow s})$  با یک شیب منفی کاهش پیدا می کند. ضریب عبوری تبدیلی  $(T_{p \rightarrow s})$  با افزایش سختی درزه نرمال شده ابتدا افزایش پیدا کرده تا به یک مقدار اوج می رسد سپس با افزایش سختی درزه نرمال شده مقدار آن کاهش پیدا می کند. این نتایج بیانگر آن است که تغییرات سختی درزه نرمال شده بر هر چهار موج تأثیر دارد اما تأثیر آن بر موج تبدیلی عبوری در مقایسه با امواج دیگر کمتر خواهد بود. تفاوت نتایج به دست آمده از شکل های ۳-۴ و ۳-۵ با شکل های ۳-۲ و ۳-۳ این است که در دو زاویه مختلف انجام گرفته شده است که تأثیر این زاویه نیز در بخش تأثیر زاویه ورودی بررسی می شود. نتایج به دست آمده از مطالعات تحلیلی با مطالعات ژو و همکاران (۱۹۹۶) که از روش DDM، لی و ما (۲۰۱۰) از روش بازگشتی موج انفجار و ژائو و همکاران (۲۰۱۲) که از روش بازگشتی برای مطالعه انتشار موج استفاده نمودند، همبستگی خوبی نشان می دهند.

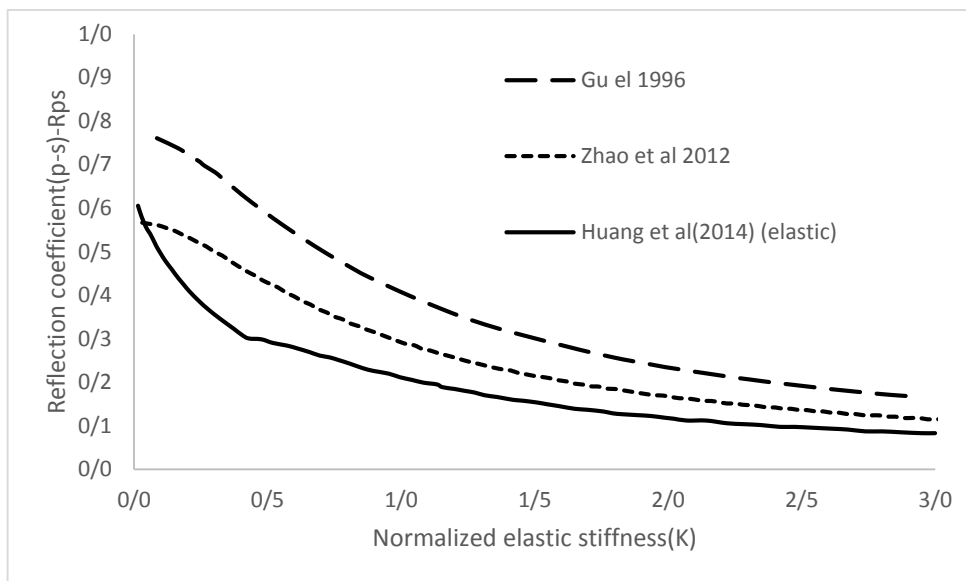


شکل ۳-۴: تغییرات سختی الاستیک نرمال شده درزه بر  $R_{pp}$  برای موج تابشی ورودی P

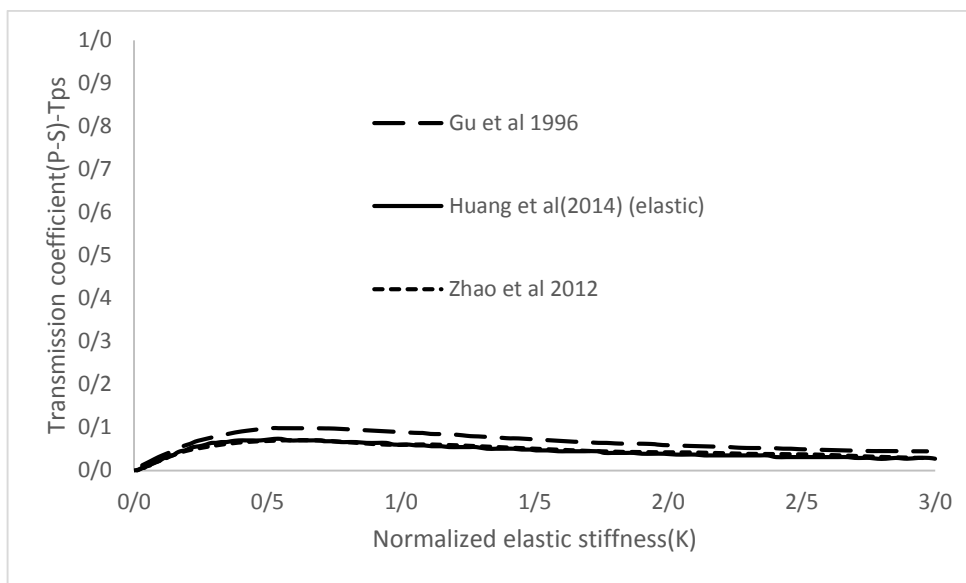


شکل ۳-۵: تأثیر سختی الاستیک نرمال شده درزه بر  $T_{pp}$  برای موج تابشی ورودی P





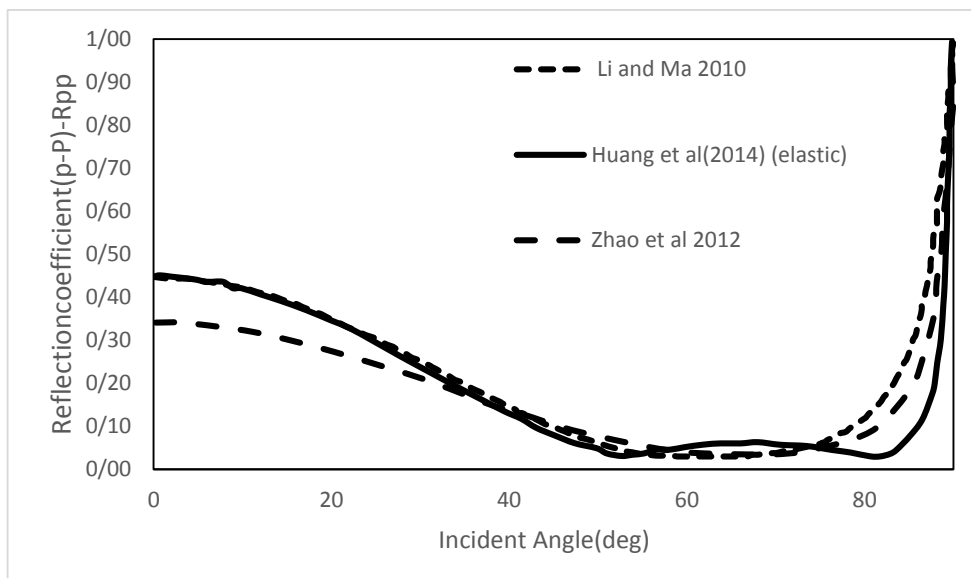
شکل ۳-۶: تغییرات سختی الاستیک نرمال شده درزه بر  $R_{ps}$  برای موج تابشی ورودی P



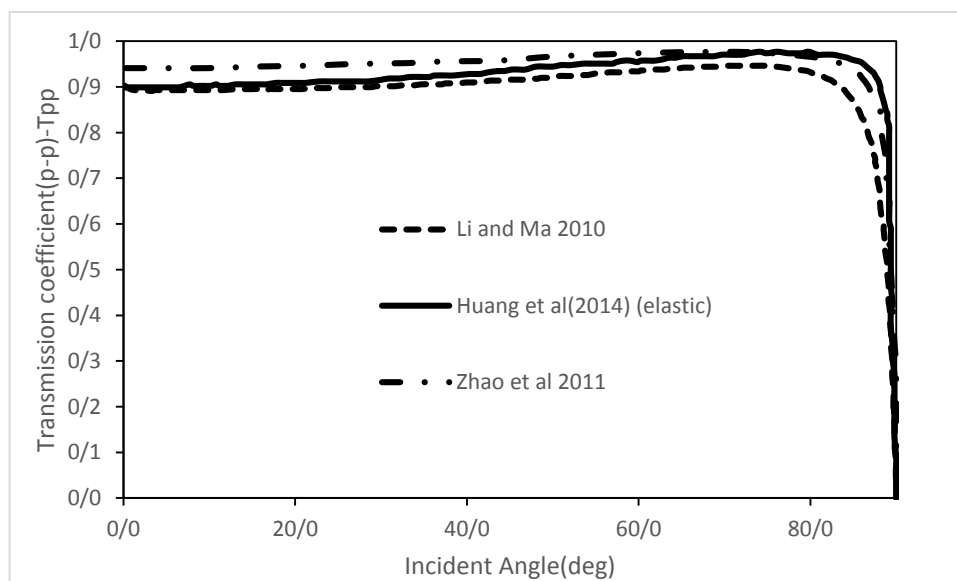
شکل ۳-۷: تغییرات سختی الاستیک نرمال شده درزه بر  $T_{ps}$  برای موج تابشی ورودی P

### ۲-۳-۳- تأثیر زاویه ورودی بر انتشار موج

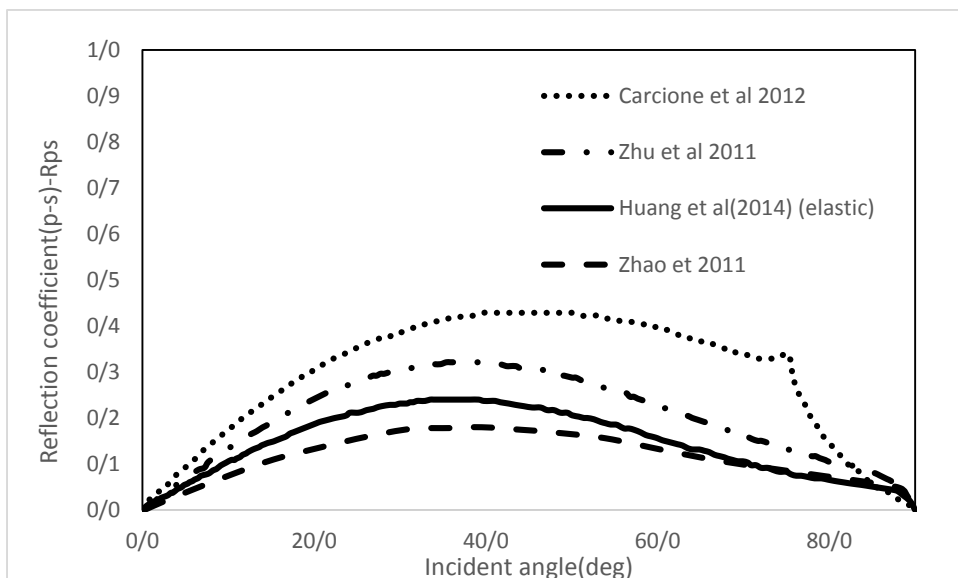
برای تأثیر زاویه تابش ورودی موج P بر انتشار موج در محیط سنگی دارای درزه، مقادیر ضرایب بازگشت و عبوری برای زاویه‌های بین ۰ تا ۹۰ درجه بر اساس رابطه تحلیلی بررسی شده و نتایج به دست آمده برای بررسی صحت نتایج با روش‌های دیگر مقایسه شده است، به این منظور مقدار سختی درزه نرمال شده برابر ۱ در نظر گرفته شده است. با توجه به آنکه در اثر برخورد یک موج مایل به یک درزه تبدیل موج رخ می‌دهد. رابطه تحلیلی تأثیر زاویه ورودی بر موج‌های مختلف تبدیل یافته بررسی شده است. شکل ۳-۸ تأثیر زاویه ورودی بر ضریب بازگشتی را نشان می‌دهد. همچنان که نشان داده شده است با افزایش زاویه ورودی ضریب بازگشتی ( $R_{p \rightarrow p}$ ) ابتدا کاهش پیدا کرده و در حدود زاویه ۵۰ تا ۸۰ درجه ثابت می‌شود و تغییرات کمتر است و سپس هرچه قدر زاویه افزایش می‌یابد، ( $R_{p \rightarrow p}$ ) نیز افزایش پیدا می‌کند. شکل ۳-۹ نشان‌دهنده تأثیر زاویه ورودی بر ضریب عبوری را نشان می‌دهد. ضریب عبوری ( $T_{p \rightarrow p}$ ) ابتدا افزایش پیدا می‌کند تا به یک مقدار ماکزیمم می‌رسد سپس با افزایش آن مقدار آن به صفر می‌رسد، این نتیجه حاکی از آن است وقتی موج به طور عمود به درزه برخورد می‌کند یعنی زاویه ۹۰ درجه می‌شود تمام موج ورودی بازگشت داده می‌شود و موج عبوری وجود ندارد. در این بخش روند تغییرات کم است و به جز در زاویه نزدیک ۹۰ درجه ضریب عبوری با یک شیب مثبت کم افزایش می‌یابد. شکل ۳-۱۰ نشان‌دهنده تأثیر زاویه ورودی به ضریب بازگشتی تبدیل موج را نشان می‌دهد که در آن ( $R_{p \rightarrow s}$ ) نیز ابتدا افزایش پیدا می‌کند تا زاویه ورودی آن به ۴۰ درجه می‌رسد سپس مقدار آن کاهش می‌یابد. شکل ۳-۱۱ نشان‌دهنده تأثیر زاویه ورودی بر ضریب عبوری تبدیل موج را نشان می‌دهد که در آن ( $T_{p \rightarrow s}$ ) نیز ابتدا افزایش پیدا می‌کند تا به یک مقدار ماکزیمم می‌رسد و بعد از آن کاهش می‌یابد. نتایج نشان‌دهنده آن است که با تغییر زاویه ورودی، موج بازگشتی و موج بازگشتی تبدیلی بیشتر دچار تغییرات خواهند شد و نسبت تغییرات در موج عبوری و موج عبوری تبدیلی کمتر است.



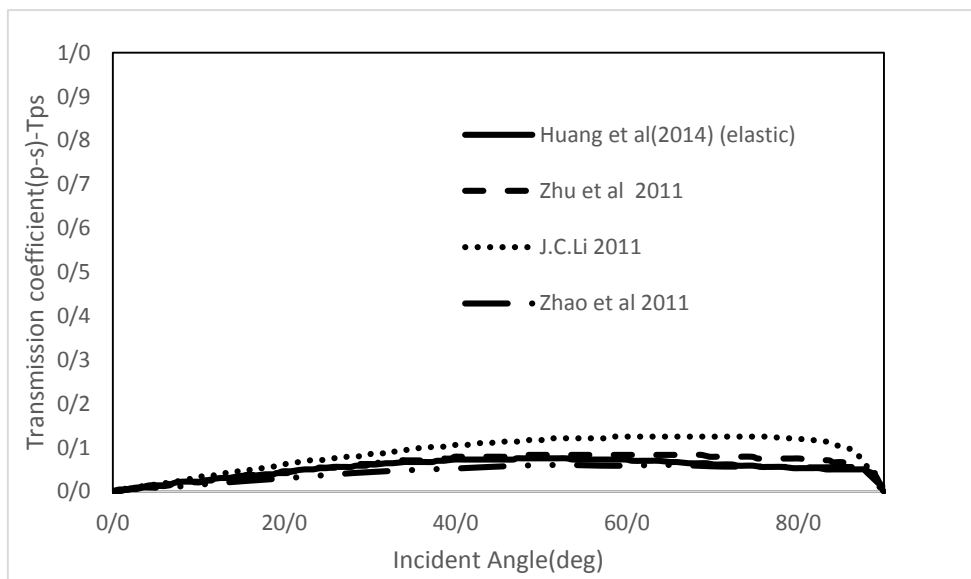
شکل ۳-۸: تغییرات زاویه موج تابشی ورودی بر  $R_{pp}$  برای حالت تک درزه



شکل ۳-۹: تغییرات زاویه موج تابشی ورودی بر  $T_{pp}$  برای حالت تک درزه



شکل ۳-۱۰: تغییرات زاویه موج تابشی ورودی بر  $R_{ps}$  برای حالت تک درزه



شکل ۳-۱۱: تغییرات زاویه تابش موج ورودی بر  $T_{ps}$  برای حالت تک درزه

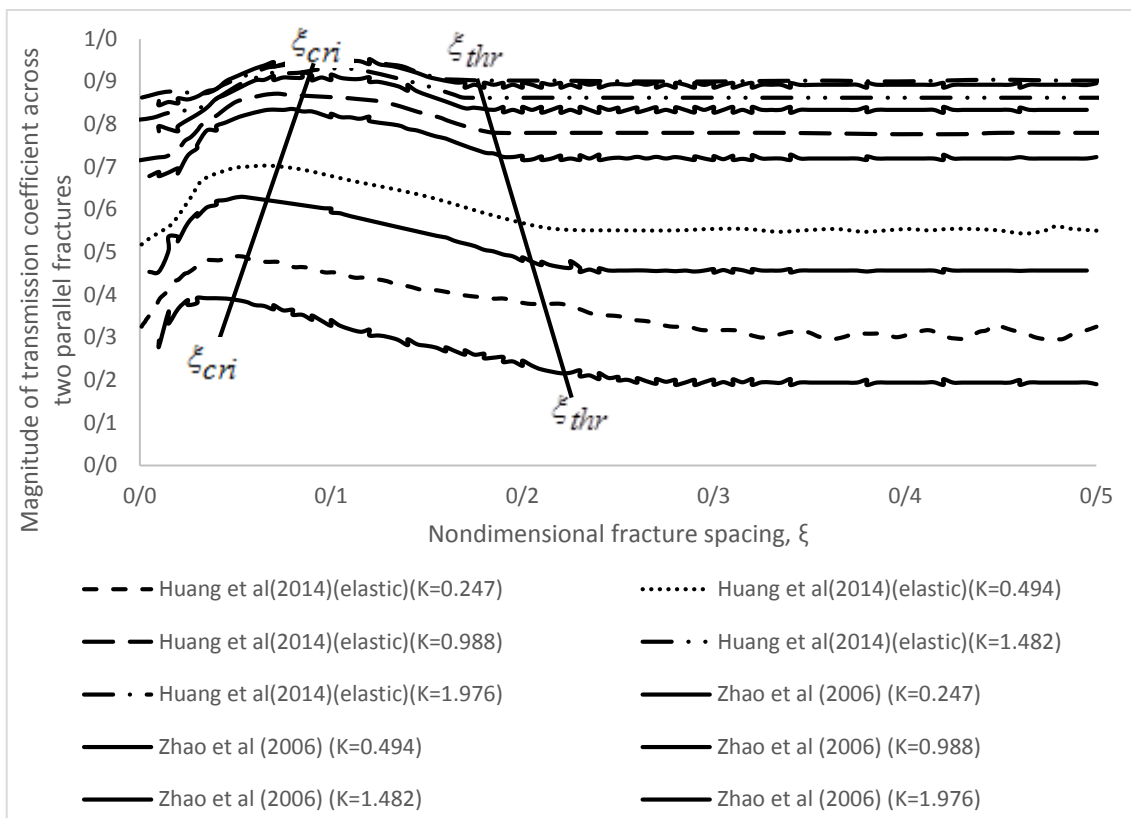
### ۳-۴- مطالعه پارامتریک انتشار موج در چند درزه موازی

در این بخش تأثیر فاصله‌داری و تعداد درزه‌ها بر روی محیط سنگی دارای چند درزه موازی مورد مطالعه قرار می‌گیرد. برای بررسی تأثیر فاصله‌داری درزه‌ها، ابتدا فاصله‌داری درزه‌ها نرمال می‌شود؛ زیرا در این مطالعه تأثیر فاصله‌داری درزه نرمال شده ( $\xi$ ) بر موج عبوری مورد بحث قرار خواهد گرفت، تا با مطالعه پژوهشگران قبلی مقایسه شود. برای به دست آوردن فاصله‌داری درزه نرمال، فاصله درزه‌ها بر طول موج تقسیم خواهد شد. نسبت فاصله‌داری درزه‌ها به طول موج را فاصله‌داری درزه نرمال شده تعریف می‌شود. در این ارتباط برای تأثیر فاصله‌داری درزه نرمال شده بر موج عبوری نتایج حاصل از روش تحلیلی با روش ژائو و همکاران (۲۰۰۶) و تأثیر تعداد درزه‌ها بر موج عبوری با نتایج مطالعه‌های روش عددی DDA مقایسه شده است.

### ۳-۴-۱- تأثیر فاصله‌داری نرمال شده درزه‌ها بر انتشار موج

برای بررسی تأثیر فاصله‌داری ناپیوستگی‌ها بر موج عبوری ابتدا دو شاخص مهم  $\xi$  تعریف می‌شوند. اولین شاخص نسبت فاصله‌داری بحرانی ( $\xi_{cri}$ ) و دیگری نسبت فاصله‌داری آستانه ( $\xi_{thr}$ ) است. نسبت فاصله‌داری آستانه ( $\xi_{thr}$ ) مقداری هست که بعد از این مقدار، ضریب عبوری تغییر چندانی نمی‌کند در حالی که نسبت فاصله‌داری بحرانی ( $\xi_{cri}$ ) نسبت فاصله‌داری است که بیشترین مقدار موج عبوری رخ می‌دهد. برای بررسی تأثیر فاصله‌داری نرمال شده ناپیوستگی‌ها تحت مقادیر مختلف سختی درزه نرمال شده ۰/۲۴۷، ۰/۴۹۴، ۰/۹۸۸، ۱/۴۸۲، ۱/۹۷۶ متغیر است و تعداد درزه‌ها نیز ۲ در نظر گرفته شده است. دلیل این مقادیر نرمال سختی درزه شده تا با مطالعه‌های ژائو و همکاران (۲۰۰۶) مقایسه شود. این دو مقدار برای هر فاصله‌داری متفاوت است. در شکل ۳-۱۲ تأثیر نسبت فاصله‌داری ناپیوستگی‌های نرمال شده بر مقدار ضریب عبوری را نشان می‌دهد. با توجه به شکل مذکور می‌توان نتایج زیر را بیان نمود:

۱. با افزایش سختی درزه نرمال شده مقدار ضریب عبوری افزایش پیدا خواهد کرد.
۲. اگر  $\xi_{thr} \geq \xi$  آنگاه مقدار ضریب عبوری مستقل از فاصله‌داری ناپیوستگی‌ها است و مقدار ضریب عبوری بر اساس رابطه  $|T_2| = |T_1|^2$  که همان رابطه پیراک نولت و همکاران است محاسبه می‌شود.
۳. اگر  $\xi_{thr} \geq \xi \geq \xi_{cri}$  باشد، آنگاه مقدار ضریب عبوری با افزایش فاصله‌داری ناپیوستگی‌ها کاهش پیدا می‌کند و به فاصله بین ناپیوستگی‌ها وابسته است و دیگر رابطه پیراک نولت و همکاران در این بخش صدق نمی‌کند.
۴. اگر  $\xi_{cri} \geq \xi$  آنگاه مقدار ضریب عبوری با کاهش فاصله‌داری ناپیوستگی‌ها کاهش می‌یابد.
۵. مقدار شاخص آستانه و بحرانی نیز با تغییر مقدار سختی درزه نرمال شده (K) تغییر می‌کند. این نتایج بیانگر آن است که بین مطالعه تحلیلی و مطالعه ژائو و همکاران (۲۰۰۶) همبستگی و تطابق خوبی وجود دارد. هنگامی که سختی درزه نرمال شده افزایش می‌یابد بین نتیجه تحلیلی و مطالعات ژائو و همکاران (۲۰۰۶) اختلاف کمتر وجود دارد.



شکل ۳-۱۲: تأثیر نسبت فاصله‌داری نرمال شده درزه‌ها بر مقدار موج عبوری در  $K$  مختلف

### ۳-۴-۲- تأثیر تعداد درزه‌ها بر موج عبوری

برای بررسی تعداد درزه‌ها بر روی انتشار موج تحت حالتی که درزه‌ها به صورت موازی باشند، مقدار ضریب عبوری ( $|T_N|$ ) برای تعداد مختلف درزه  $N$  محاسبه شده است. همچنان که در شکل ۳-۱۳ نشان داده شده، مقدار ضریب عبوری بر اساس تابعی از فاصله‌داری درزه بی‌بعد برای  $K=1$  و تعداد درزه  $N=2$  و  $N=4$  است، محاسبه شده و با روش DDA (۲۰۱۷) نیز مقایسه شده است. چنانکه در شکل ۳-۱۳ مشاهده می‌شود می‌توان فاصله‌داری درزه‌ها را به سه بخش مختلف مانند بخش قبلی تقسیم نمود و نتایج زیر را ذکر نمود:

۱- مقدار ضریب عبوری با افزایش تعداد درزه‌ها  $N$  کاهش پیدا می‌کند.

۲- اگر  $\xi \geq \xi_{thr}$  باشد، مقدار ضریب عبوری با افزایش تعداد درزه‌ها کاهش یافته و ضریب عبوری

$|T_N|$  تابعی از  $|T_1|^N$  خواهد بود که با مطالعه پیراک نولت و همکاران مطابقت دارد.

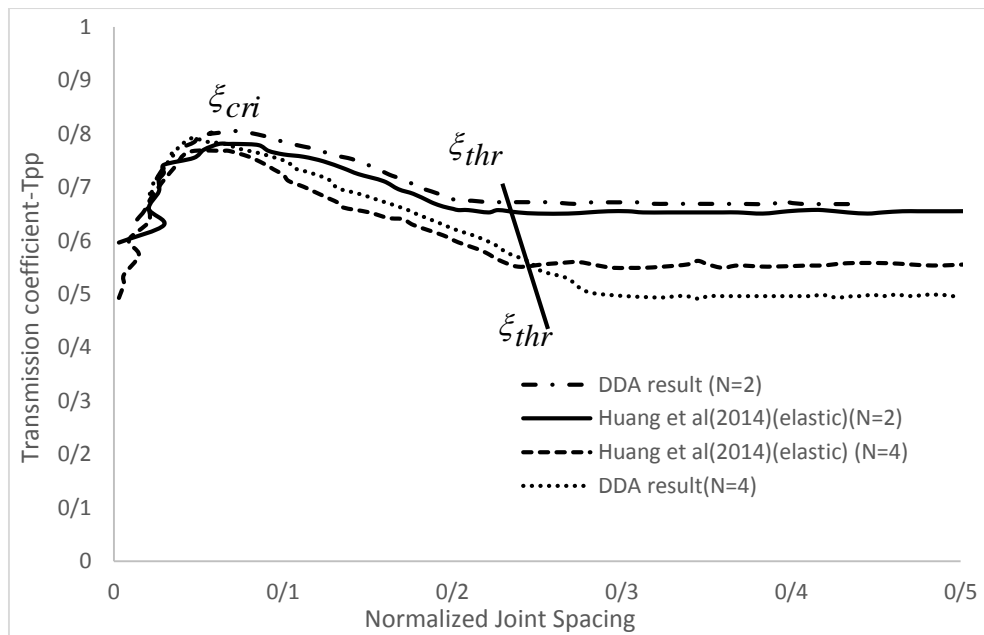
۳- اگر  $\xi_{thr} \geq \xi \geq \xi_{cri}$  باشد، کاهش مقدار ضریب عبوری با N ضعیف خواهد بود و در نتیجه

مقدار  $|T_N|$  بزرگ‌تر از  $|T_1|^N$  خواهد بود.

۴- در صورتی که  $\xi_{cri} \geq \xi$  باشد، کاهش  $|T_N|$  با N ضعیف‌تر بوده و حتی به تعداد درزه‌ها نیز

بستگی ندارد.

۵- مطابقت خوبی بین نتایج به دست آمده از روش تحلیلی و روش DDA وجود دارد.



شکل ۳-۱۳: تأثیر فاصله‌داری نرمال شده درزه‌ها بر موج عبوری - Tpp



### ۳-۵- جمع بندی

در این فصل به مطالعه تحلیلی انتشار موج در توده سنگ درزه دار پرداخته شد. به دلیل ماهیت ناپیوستگی توده سنگ به مطالعه تحلیلی انتشار موج در تک درزه و چند درزه موازی پرداخته شد. در ابتدا مطالعه به بررسی مطالعه انتشار موج در تک درزه پرداخته شد و تأثیر سختی درزه نرمال شده بر موج عبوری و بازگشتی بررسی شد. از آنجاییکه یکی از مشکلات روش MC این بود که مطالعه زیر برای انتشار موج مایل سخت هست و عملاً قابل کاربرد نیست، در بخش بعدی به تحلیل موج مایل با زاویه برخورد نسبت به توده سنگ درزه دار، با ترکیب روش DDM و با به کارگیری تبدیل فوریه جهت انتقال از حوزه زمان به حوزه فرکانس و ارتباط بین لایه اول و لایه n ام بر اساس دامنه توابع پتانسیل مورد تحلیل قرار گرفت. در این مطالعه تأثیر سختی درزه نرمال شده بر موج عبوری، بازگشتی و تبدیلی مورد بررسی قرار گرفت. همچنین به مطالعه تأثیر زاویه تابش موج ورودی بر انتشار موج بررسی شد و تأثیر این پارامتر نیز بر انتشار موج مورد بررسی قرار گرفت که این روش بر ضعف روش MC فائق آمد. برای اعتبارسنجی نتایج به دست آمده از روش با مطالعات ژائو و همکاران (۲۰۱۱)، لی و ما (۲۰۱۰)، ژو و همکاران (۲۰۱۱) و پژوهشگران دیگر انجام شد و نتایج حاکی از آن بود که همبستگی مطلوبی بین نتایج و مطالعات موجود دارد.

در بخش بعدی نیز به مطالعه انتشار موج در چند درزه موازی نیز پرداخته شد. از آنجا که یکی از مشکلات روش EMM این بود که این روش بازتاب موج متعدد میان درزه‌ها را در نظر نمی‌گیرد، در حالی که روش بازتاب موج متعدد میان درزه‌ها نیز در نظر گرفته است در همین رابطه بر ضعف این روش نیز فائق آمد و در این ارتباط به بررسی فاصله‌داری درزه نرمال شده و تعداد درزه‌ها نیز بر موج عبوری بررسی شد. برای بررسی فاصله‌داری درزه نرمال شده نتایج به دست آمده با مطالعات ژائو و همکاران (۲۰۰۶) مقایسه شد. برای تعداد درزه‌ها نیز مطالعات موجود با روش DDA نیز مقایسه شد و

نتایج به دست آمده از هر دو روش دربرگیرنده آن است که بین نتایج تحلیلی و مطالعات این پژوهشگران رابطه مطلوبی وجود دارد.

در فصل بعدی به مطالعه عددی انتشار موج در تک درزه و چند درزه موازی پرداخته می شود و نحوه مدل سازی انتشار موج در توده سنگ درزه دار و تأثیر پارامترها مورد بررسی قرار خواهد گرفت و با مطالعه نیز مقایسه خواهد شد.

## فصل چهارم

بررسی عددی انتشار موج در

توده سنگ درزه‌دار

یکی از مهم‌ترین پیشرفت‌های به وقوع پیوسته در تحلیل و طراحی مسایل ژئومکانیکی در طی سال‌های گذشته، توسعه نرم‌افزارهای مبتنی بر پایه روش‌های عددی مختلف که دارای قابلیت شبیه‌سازی جنبه‌های مختلف تغییر شکل و شکست در محیط‌های مختلف بوده است. بسیاری از برنامه‌های کامپیوتری مبتنی بر روابط مکانیک محیط‌های پیوسته می‌توانند تغییرپذیری در انواع مواد و نیز رفتار ساختاری غیرخطی را که معمولاً در توده‌های سنگی دیده می‌شود، شبیه‌سازی کنند؛ اما لحاظ کردن ناپیوستگی‌ها نیاز به روشی مبتنی بر محیط ناپیوسته دارد. در این ارتباط نرم‌افزارهای تجاری زیادی که برای مدل‌سازی محیط ناپیوسته و انتشار موج توسعه‌یافته‌اند وجود دارند. در این پژوهش به‌منظور مدل‌سازی محیط ناپیوسته و انتشار موج دینامیکی در این محیط از نرم‌افزار تجاری المان مجزای UDEC که قابلیت تحلیل دینامیکی مدل ناپیوسته را داراست، استفاده خواهد شد. هدف این فصل مدل‌سازی عددی انتشار موج در توده سنگ درزه‌دار و مقایسه با روش تحلیلی ذکرشده در فصل سوم و مقایسه با نتایج پژوهشگران قبلی است. بر همین اساس در ابتدا به کلیاتی از روش اجزا و نرم افزار عددی استفاده شده در این پژوهش پرداخته می‌شود، سپس به بررسی عددی ارزیابی انتشار موج از طریق تک درزه بررسی شده و تأثیر پارامترهای سختی درزه نرمال شده و زاویه ورودی بر انتشار موج توسط نرم‌افزار دوبعدی UDEC انجام می‌گیرد. در بخش بعدی به انتشار موج از طریق توده سنگ دارای چند درزه موازی پرداخته خواهد شد و تأثیر فاصله‌داری نرمال شده درزه‌ها و تعداد درزه‌ها بر انتشار موج بررسی شده و در نهایت با روش تحلیلی ارائه‌شده در فصل قبل و همچنین نتایج پژوهشگران مقایسه شده است.

## ۴-۲- روش اجزا مجزا و نرم افزار عددی UDEC

روش اجزا مجزا<sup>۱</sup>، یک روش عددی است که معمولاً به منظور آنالیز رفتار سیستم‌های ناپیوسته به کار می‌رود. این روش به منظور بررسی رفتار تغییرشکل‌پذیر منفصل در سنگ‌های درزه‌دار توسعه داده شده است. توانایی بی‌نظیر روش اجزا مجزا این است که توده سنگ به صورت مجموعه‌ای از بلوک‌های مجزا که به وسیله درزه‌ها تفکیک شده‌اند، در نظر گرفته می‌شود و در این روش امکان ایجاد تغییر شکل نامحدود در امتداد درزه‌ها وجود دارد.

با توجه به ماهیت ناپیوسته محیط‌های سنگی روش عددی اجزا مجزا به طور روزافزونی به منظور ارزیابی پایداری و بررسی تغییر شکل و شکست توده سنگ به کار برده می‌شود. در این روش توده سنگ به صورت یک محیط ناپیوسته در نظر گرفته می‌شود و بنابراین تأثیر عوارض ساختاری نظیر درزه‌ها<sup>۲</sup>، گسل‌ها<sup>۳</sup> و انواع ناپیوستگی‌های دیگر قابل بررسی هست. روش اجزا مجزا تفاوت چندانی نسبت به روش‌های عددی دیگر ندارد و تفاوت اساسی آن با سایر روش‌های عددی در این است که در این روش کل هندسه مدل و المان‌ها توسط فاصله و جهت ناپیوستگی تعیین می‌شود. نکته اساسی در روش اجزای مجزا این است که دامنه مدل مورد بررسی به صورت مجموعه‌ای از بلوک‌ها و دیسک‌های صلب یا شکل‌پذیر رفتار می‌کند که تماس بین آن‌ها باید در حین تغییرات در مدل و حرکت بلوک‌ها تشخیص و به صورت مداوم به روز می‌شود.

فرمول سازی و توسعه روش اجزا مجزا نخستین بار توسط کاندال<sup>۴</sup> در سال ۱۹۷۱ آغاز شد و روند تکامل آن، طی چند دهه اخیر ادامه یافته است. نرم‌افزاری که بر مبنای این روش به تحلیل مسائل

---

<sup>۱</sup> Discrete element method

<sup>۲</sup> joint

<sup>۳</sup> fault

<sup>۴</sup> Cundall

می‌پردازد، تحت عنوان UDEC شناخته شده است و در سال ۱۹۸۰ توسط کاندال به ثبت رسیده است. توسعه بیشتر UDEC توسط کاندال و هارت<sup>۱</sup> در سال ۱۹۸۵ انجام شد و لموس<sup>۲</sup> در سال ۱۹۸۷ قابلیت‌های آن را افزایش داد.

نرم‌افزار UDEC یک برنامه عددی دوبعدی است که به زبان برنامه‌نویسی فرترن<sup>۳</sup> ۷۷ نوشته شده است. بر اساس محاسبات لاگرانژین<sup>۴</sup> عمل می‌کند. این نرم‌افزار بر اساس روش حل صریح وابسته به زمان، محیط‌های ناپیوسته را تحلیل می‌نماید. این نرم‌افزار واکنش یک محیط ناپیوسته را در برابر بارهای استاتیکی و دینامیکی شبیه‌سازی می‌کند.

UDEAC محیط سنگی را به‌عنوان مجموعه‌ای از بلوک‌های مجزا تعریف می‌کند که ناپیوستگی‌ها به‌عنوان شرایط مرزی بین بلوکی در آن‌ها عمل می‌کنند و جابجایی برشی در امتداد این ناپیوستگی‌ها و نیز چرخش بلوک‌ها می‌تواند انجام گیرد. در این نرم‌افزار امکان تعریف بلوک‌ها به‌صورت صلب و تغییر شکل‌پذیر وجود دارد. بلوک‌های تغییر شکل‌پذیر به شبکه‌ای از المان‌های با تفاوت محدود تقسیم‌بندی شده و هر المان با رفتار تنش-کرنش خطی یا غیرخطی از پیش تعیین شده‌ای عمل می‌کند. UDEAC دارای چند مدل رفتاری برای مواد دست‌نخورده و ناپیوستگی‌ها است که مدل‌سازی ناپیوستگی‌ها را با شرایط موجود زمین‌شناسی وفق می‌دهد.

#### ۳-۴- ارزیابی انتشار موج در محیط سنگی دارای تک درزه

به‌منظور ارزیابی انتشار موج در محیط سنگی تک درزه، ابتدا مطالعه انتشار موج در تک درزه که

---

<sup>۱</sup> Hart

<sup>۲</sup> Lemos

<sup>۳</sup> Fortan

<sup>۴</sup> Lagrangian

موج قائم تابشی ورودی p انجام شده و در بخش بعدی به انتشار موج در تک درزه که موج به صورت مایل وارد می‌شود، به طور عددی مطالعه می‌شود. با توجه به آنکه مدل‌سازی این دو روش با هم فرق دارد، تأثیر هر پارامتر به صورت جداگانه بررسی می‌شود. در حل عددی مسائل مرتبط با عبور موج ممکن است مشکلات عددی بروز نماید. بروز این مشکلات به سرعت انتشار موج در محیط و فرکانس موج ورودی بستگی دارد. برای به دست آوردن حل صحیح عبور موج به روش عددی،  $\Delta L$  یا بعد هر المان در شبکه محاسباتی، باید کوچک‌تر از یک دوازدهم تا یک‌هشتم طول موج باشد (Itasca, 2004)، که در این مطالعه یک‌دهم طول موج در نظر گرفته شده است یعنی:

$$\Delta L \leq \frac{\lambda}{10} \quad (1-4)$$

که در آن  $\lambda$  طول موج مرتبط با بزرگ‌ترین فرکانس موج ورودی است. مقدار  $\lambda$  نیز از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\lambda = \frac{V}{f} \quad (2-4)$$

که در آن  $v$  سرعت انتشار موج p در محیط است و  $f$  نیز فرکانس موج ورودی است. این مدل‌سازی شامل مراحل مختلفی مانند تعریف هندسه، خصوصیات محیط دربرگیرنده، تعریف شرایط مرزی و شرایط اولیه و مرزهای ویسکوز و اعمال موج هارمونیک و حصول نتایج و تجزیه و تحلیل آن‌ها هست.

در هر مرحله به منظور ارزیابی برای تأثیر نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی با روش تحلیلی و نتایج پژوهشگران قبلی نیز مقایسه می‌شود.

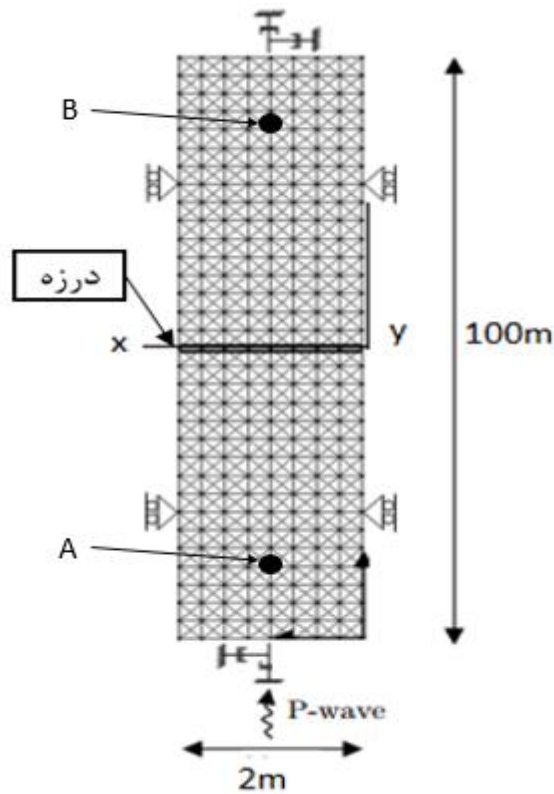
### ۱-۳-۴ - بررسی انتشار موج p قائم ورودی به درزه

به منظور مدل‌سازی انتشار موج در موج قائم تابشی ورودی P، طول هندسه ساخته شده ۲ متر و عرض آن ۱۰۰ متر بوده و نسبت طول به عرض ۲ به ۱۰۰ است. در این مدل، موج ورودی در مرز پایین اعمال شده و انتشار در راستای درزه موازی در جهت Y است. برای جلوگیری از بازتاب موج، مرزهای جاذب در مرز بالا و پایین تعریف شده است. از آنجائیکه موج ورودی، موج P است، جابجایی در جهت X از مرزهای چپ و راست محدود شده است، در حالی که در جهت Y آزاد هست. امواج بازگشتی و عبوری در دونقطه (نقطه A در  $y=-40$  و نقطه B در  $y=40$ ) قرار می‌گیرند. مختصات صفحه x-y در مرکز مدل قرار داشته و تک درزه در مختصات  $y=0$  واقع شده است. تصویری از مدل که نشان‌دهنده هندسه درزه و هم شرایط مرزی است، در شکل ۱-۴ آورده شده است. برای اعمال موج ورودی و تابشی یک موج سینوسی با دامنه واحد و دارای فرکانس موج سینوسی ۵۰ هرتز انتخاب شده است. خصوصیات محیط توده سنگ مدل عددی در جدول ۱-۴ نشان داده شده است:

جدول ۱-۴: خصوصیات مکانیکی محیط دربرگیرنده (Perino et al., 2010)

سرعت انتشار موج P	۵۸۳۰ متر بر ثانیه
سرعت انتشار موج S	۳۸۴۰ متر بر ثانیه
چگالی سنگ	۲۶۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب
مدول بالک	۴۴ گیگا پاسکال
مدول برشی	۳۹ گیگا پاسکال



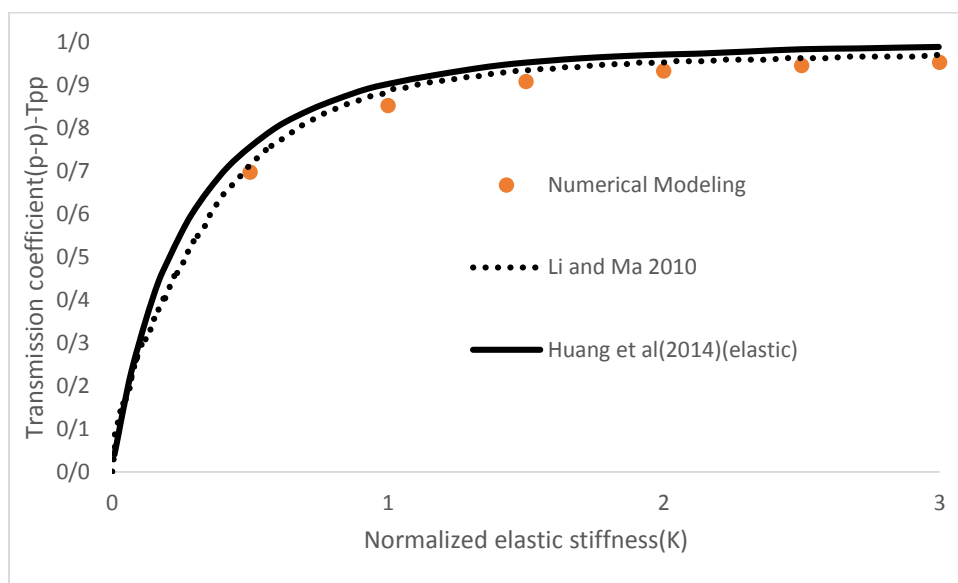


شکل ۴-۱: هندسه و شرایط مرزی مدل UDEC برای انتشار موج P در محیط سنگی تک درزه

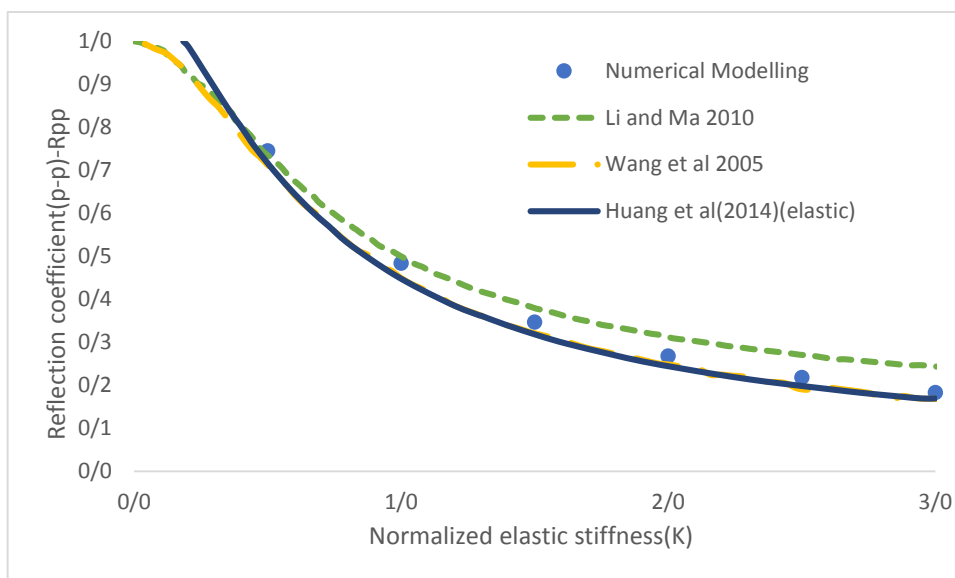
بر اساس مطالعات زیر طول موج برابر  $116/6$  متر خواهد شد. پس اندازه مش موجود باید کمتر از  $11$  متر باشد. در این مطالعه مقدار اندازه مش  $0/8$  متر در نظر گرفته شده است.

شکل ۴-۲ نشان دهنده مقدار ضریب عبوری در تک درزه برای موج ورودی P بر اساس تابعی از سختی درزه نرمال شده هست. این شکل نشان دهنده این است که با افزایش سختی درزه نرمال شده، مقدار ضریب عبوری افزایش پیدا می کند. نرخ افزایش برای مقادیر سختی درزه نرمال شده تا  $1$  قابل توجه بوده درحالی که افزایش ضریب عبوری بیشتر از سختی درزه نرمال شده  $1$ ، روند افزایش بسیار کمتر است. همچنین بین نتایج عددی و مطالعه تحلیلی و مطالعه پژوهشگران قبلی یک همبستگی کامل وجود دارد.

شکل ۳-۴ نیز نشان‌دهنده مقدار ضریب بازگشتی در تک درزه برای موج ورودی عمودی P بر اساس تابعی از سختی درزه نرمال شده است. این نتیجه بیانگر آن است که با افزایش سختی درزه نرمال شده مقدار ضریب بازگشتی کاهش می‌یابد. در این شکل هم یک همبستگی کامل بین نتیجه گرفته‌شده از مدل‌سازی عددی و مطالعه تحلیلی در فصل سوم و مطالعه پژوهشگران قبلی هست. براین اساس قابلیت UDEC برای مطالعه انتشار موج p مورد بررسی قرار گرفت.

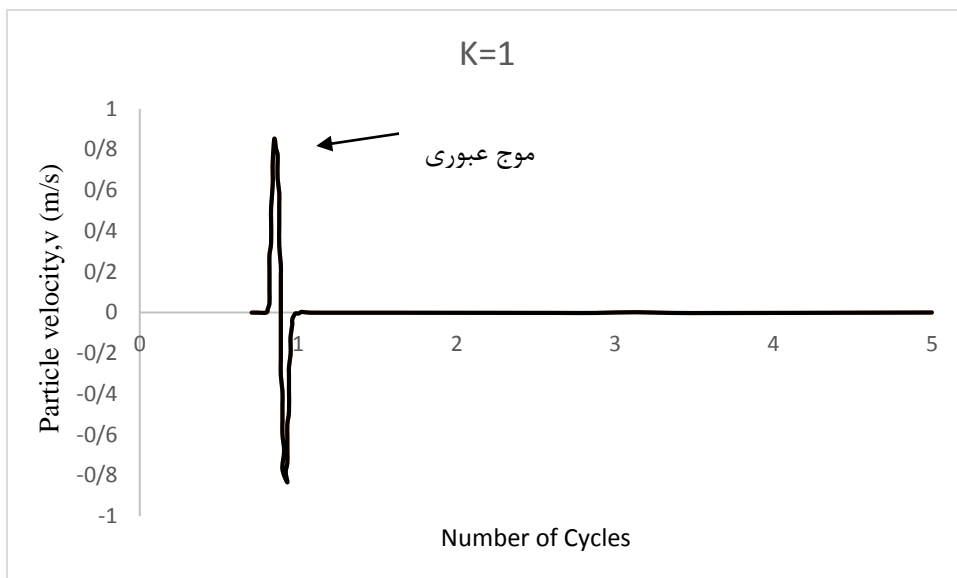


شکل ۳-۴: بررسی عددی تأثیر سختی الاستیک نرمال شده بر موج عبوری عمودی P در محیط سنگی تک درزه

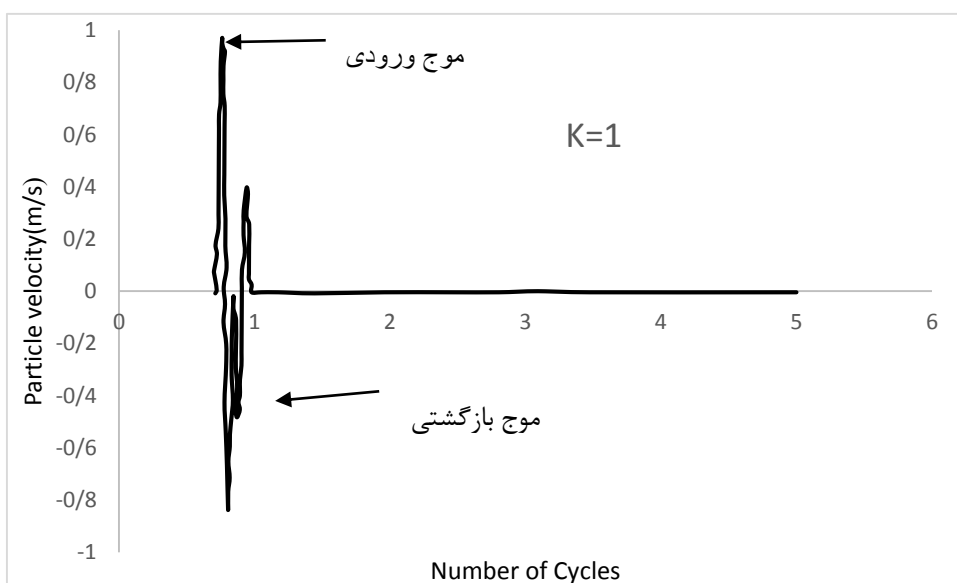


شکل ۴-۳: بررسی عددی تأثیر سختی الاستیک نرمال شده بر موج بازگشتی عمودی P در محیط سنگی تک درزه

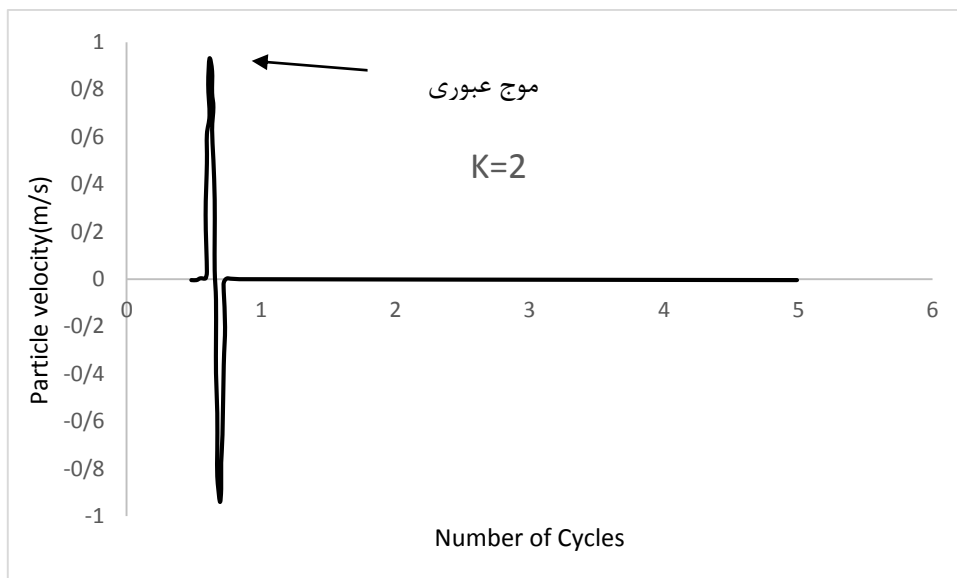
در شکل‌های ۴-۴ تا ۷-۴ شکل موج عبوری، بازگشتی و ورودی برای حالت سختی درزه نرمال شده ۱ و ۲ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۴-۴ نشان داده شده است، برای سختی درزه نرمال شده ۱، دامنه موج عبوری نسبت به دامنه موج ورودی کمتر هست. همچنین در شکل ۶-۴ نیز شکل موج عبوری برای سختی درزه نرمال شده ۲ نشان داده شده است. در این شکل نیز دامنه موج عبوری نسبت به دامنه موج ورودی کمتر است؛ اما می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش سختی درزه نرمال شده دامنه موج عبوری افزایش یافته است. در شکل‌های ۴-۵ تا ۷-۴ نیز شکل موج بازگشتی و ورودی برای سختی درزه نرمال شده ۱ و ۲ مشاهده می‌شود. بر اساس این دو نمودار می‌توان نتیجه گرفت که دامنه موج بازگشتی برای هر دو سختی درزه نرمال شده نسبت به دامنه موج ورودی کمتر است. در این شکل‌ها نیز می‌توان استنباط کرد که با افزایش سختی درزه نرمال شده دامنه موج بازگشتی کاهش خواهد یافت.



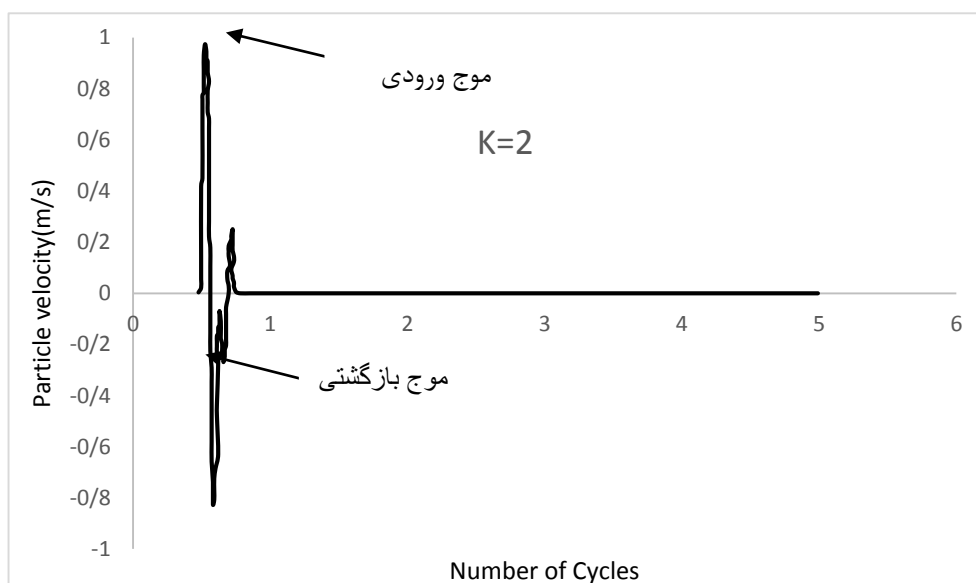
شکل ۴-۴: شکل موج عبوری برای سختی درزه نرمال شده برابر ۱



شکل ۴-۵: شکل موج ورودی و بازگشتی برای سختی درزه نرمال شده ۱



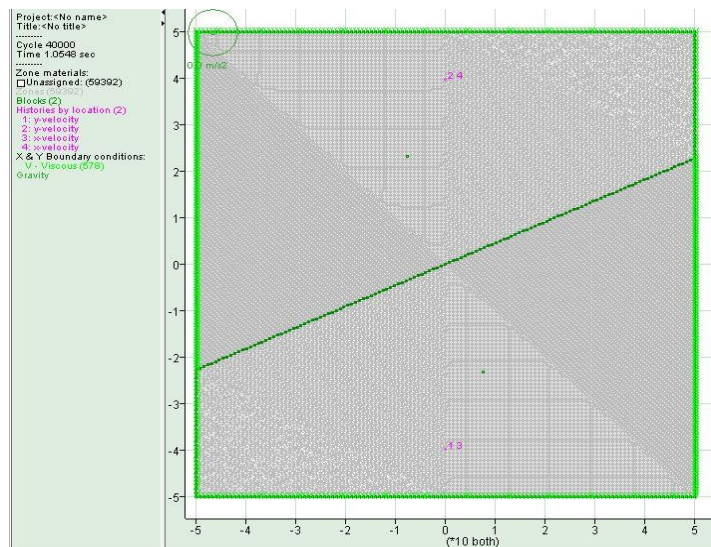
شکل ۴-۶: شکل موج عبوری برای سختی درزه نرمال شده ۲



شکل ۴-۷: شکل موج ورودی و بازگشتی برای سختی درزه نرمال شده ۲

#### ۴-۳-۲- بررسی انتشار موج P مایل ورودی به درزه

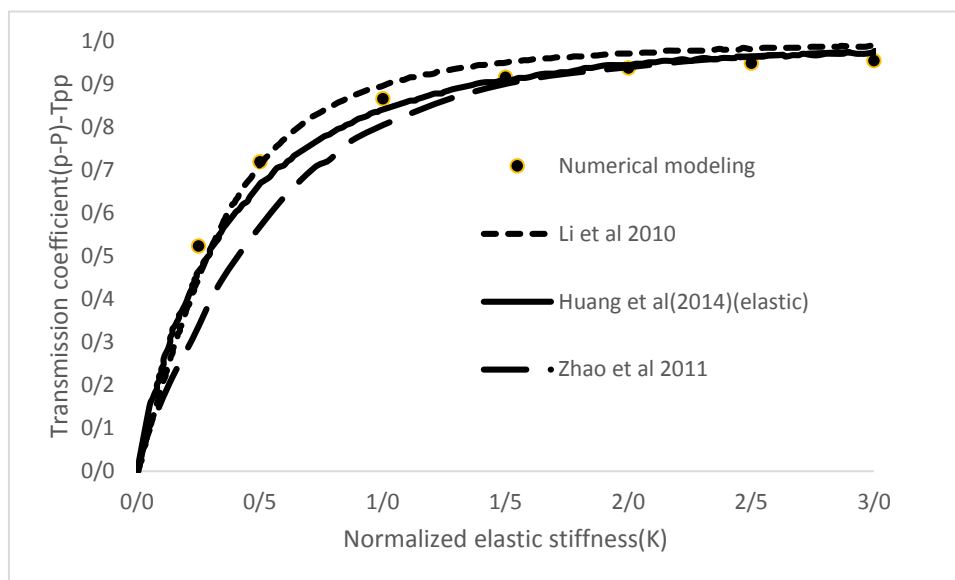
از آنجاییکه هنگامی که یک موج به طور مایل به تک درزه برخورد کند، علاوه بر عبور و بازگشت موج، تبدیل موج نیز اتفاق می افتد، بر همین اساس انتشار موج در تک درزه مایل، نسبت به موجی که به صورت عمود به تک درزه می رسد پیچیده تر است. مدل سازی این بخش به دلیل اینکه بایستی تأثیر تبدیل موج نیز در نظر گرفته شود تفاوت هایی با مدل قبلی دارد. دلیل این تفاوت این است که مدل میله ای یا آزمایشگاهی برای بررسی انتشار موج مایل مناسب نیست زیرا هنگامی که یک موج P به تک درزه مایل انتشار می یابد، موج مایل P و S ایجاد شده همپوشانی دارند. بر همین اساس انتشار موج برای شبیه سازی اثر زاویه ورودی مناسب نیست. در این مدل طول مدل ساخته شده ۱۰۰ متر و عرض آن ۱۰۰ متر بوده و نسبت طول به عرض ۱ است. در این مدل، موج ورودی در مرز پایین اعمال شده و انتشار در راستای درزه موازی در جهت Y است. برای جلوگیری از بازتاب موج مرزهای جاذب در مرز بالا و پایین و چپ و راست تعریف شده است. امواج بازگشتی و عبوری در دونقطه (نقطه A در  $y=-40$  و نقطه B  $y=40$ ) اندازه گرفته می شوند. مختصات صفحه  $x-y$  در مرکز مدل قرار داشته و تک درزه در مختصات  $y=0$  واقع شده است. زاویه ورودی نیز  $24/48$  درجه در نظر گرفته شده است. تصویری از مدل عددی که بیانگر مدل سازی تحت شرایط و توضیحات فوق هست، در شکل ۴-۸ نشان داده شده است.



شکل ۴-۸: هندسه مدل عددی برای انتشار موج ورودی مایل P با زاویه ورودی ۲۴/۴۸

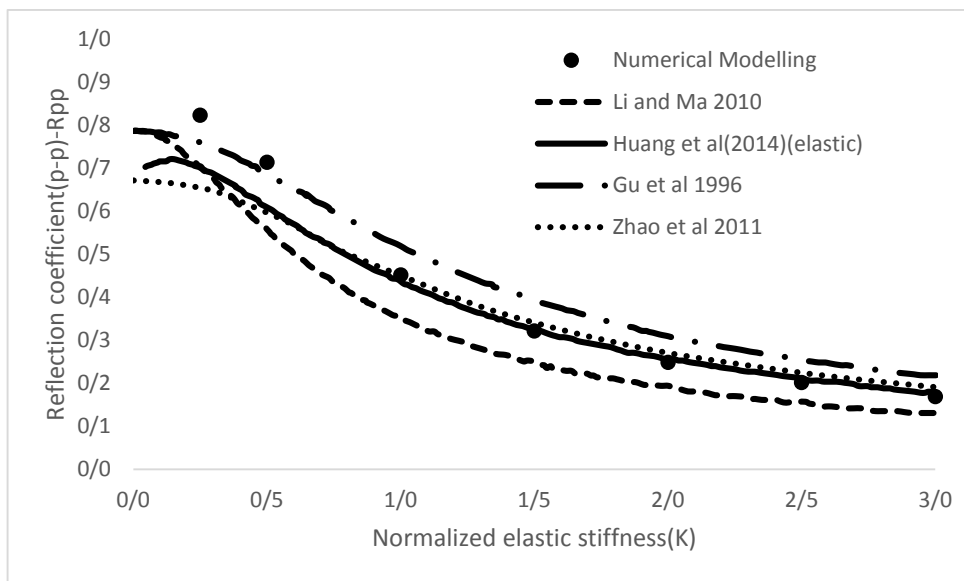
در این حالت نیز تأثیر سختی الاستیک نرمال شده بر روی ضرایب بازگشتی و عبوری حاصل از نتایج مدل محاسبه و نمودارهای مربوطه در شکل‌های ۴-۹ تا ۴-۱۲ آورده شده است. در شکل ۴-۹ تأثیر سختی الاستیک نرمال شده بر موج عبوری نشان داده شده است. همچنان که از روی نمودار مشاهده می‌شود با افزایش سختی الاستیک نرمال شده ضریب عبوری نیز افزایش پیدا کرده است. در این شکل همانند شکل بالا برای سختی نرمال شده بیشتر از ۱ روند افزایش کمتر هست. برای سختی الاستیک نرمال شده بین مطالعه عددی، مطالعه تحلیلی و مطالعه پژوهشگران قبلی همبستگی خوبی وجود دارد. در شکل ۴-۱۰ تأثیر سختی الاستیک نرمال شده بر موج بازگشتی نشان داده شده است. با توجه به این شکل می‌توان به این نتیجه رسید که با افزایش سختی درزه نرمال شده موج بازگشتی کاهش می‌یابد. در این شکل برای سختی الاستیک نرمال شده بیشتر از ۱ بین نتایج عددی و نتایج تحلیلی و نتایج ژائو و همکاران یک همبستگی کامل وجود دارد. اما برای سختی نرمال شده کمتر از ۱ نتایج عددی به مطالعات لی و ما (۲۰۱۰) نزدیک تر است، درحالی که بین نتایج عددی و نتایج تحلیلی اختلاف بسیار کم هست. در شکل ۴-۱۱ نیز تأثیر سختی الاستیک نرمال شده بر موج بازگشتی تبدیلی را نشان می‌دهد. این نتیجه بیانگر آن است که با افزایش سختی نرمال شده موج

بازگشتی تبدیلی کاهش پیدا می‌کند. همچنین برای سختی نرمال شده بیشتر از ۱ بین نتایج عددی و مطالعات و مطالعه پژوهشگران قبلی ارتباط خوبی وجود دارد. اما برای سختی نرمال شده کمتر از ۱ بین نتایج عددی و مطالعه پژوهشگران قبلی اختلاف وجود دارد اما با نتایج تحلیلی رابطه خوبی وجود دارد. در شکل ۴-۱۲ نیز تأثیر سختی الاستیک نرمال شده بر موج عبوری تبدیلی را نشان می‌دهد. این نتیجه بیانگر آن است که با افزایش سختی الاستیک نرمال شده ابتدا موج عبوری تبدیلی افزایش پیدا می‌کند تا به یک مقدار حداکثر می‌رسد و سپس کاهش پیدا می‌کند. در این نتیجه نیز بین نتایج عددی، مطالعات پژوهشگران قبلی و مطالعه تحلیلی نیز یک همبستگی مطلوبی وجود دارد.

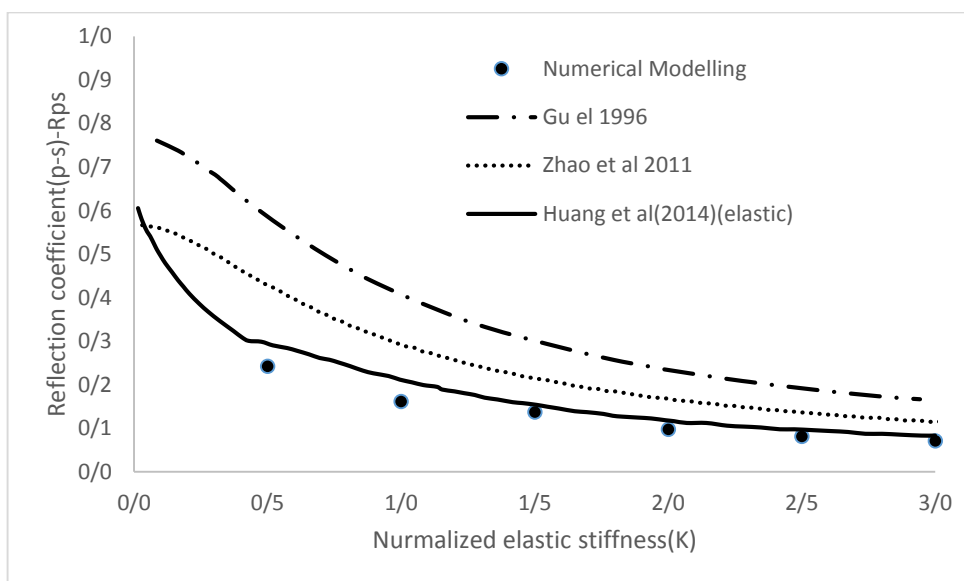


شکل ۴-۹: بررسی عددی تأثیر سختی الاستیک نرمال شده بر موج عبوری و مقایسه با روش‌های دیگر

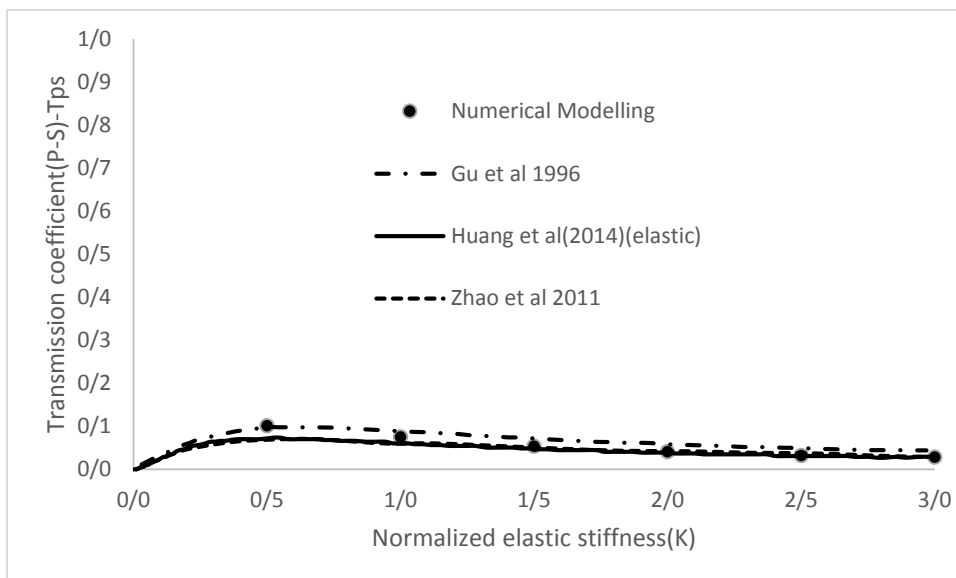




شکل ۴-۱۰: بررسی عددی تأثیر سختی الاستیک نرمال شده بر موج بازگشتی و مقایسه با روش‌های دیگر



شکل ۴-۱۱: بررسی عددی تأثیر سختی الاستیک نرمال شده بر موج بازگشتی تبدیلی و مقایسه با روش‌های دیگر

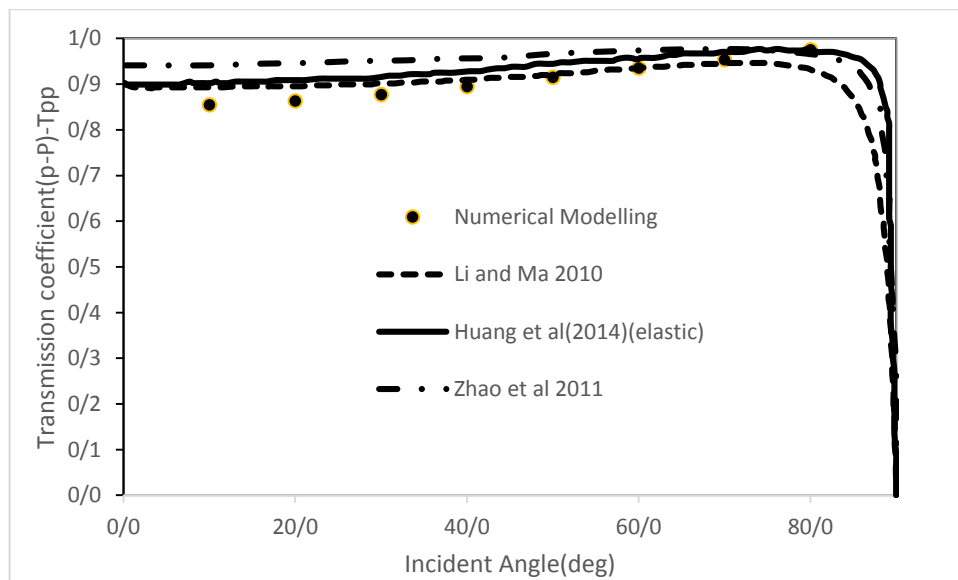


شکل ۴-۱۲: بررسی عددی تأثیر سختی الاستیک نرمال شده بر موج عبوری تبدیلی و مقایسه با روش‌های دیگر

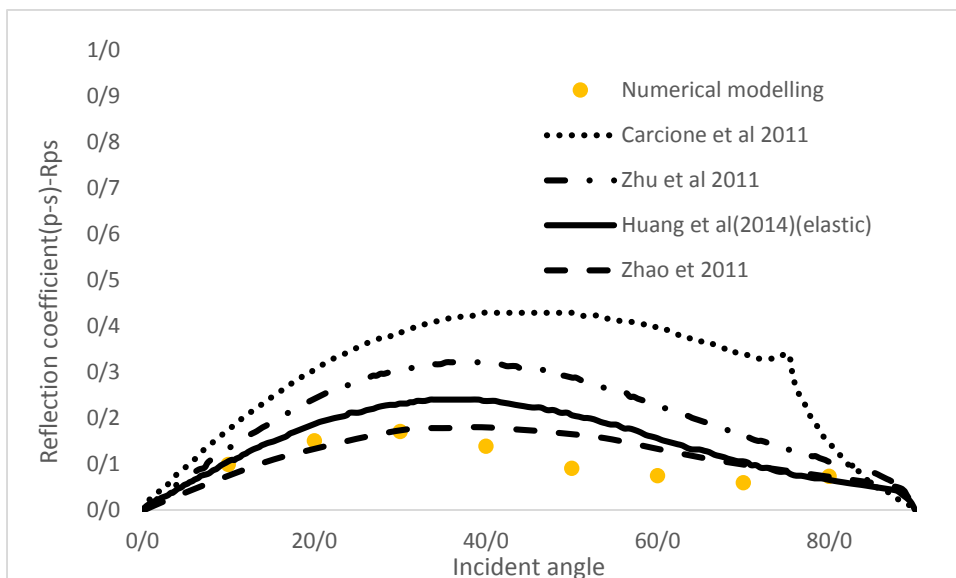
#### ۳-۳-۴- تأثیر زاویه‌داری درزه‌ها بر انتشار موج

در این بخش به ارزیابی تأثیر زاویه‌داری درزه‌ها بر انتشار موج با استفاده از مدل‌سازی عددی پرداخته خواهد شد. به منظور ارزیابی زاویه‌داری درزه‌ها بر انتشار موج، مدل‌سازی این بخش همانند مطالعه بخش قبلی است. در این ارتباط همانند بررسی روش تحلیلی، مقدار سختی الاستیک نرمال شده برابر یک در نظر گرفته شده است. در شکل‌های ۴-۱۳ تا ۴-۱۶ نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی در تأثیر زاویه‌داری درزه بر انتشار موج نشان داده شده است. در شکل ۴-۱۳ تأثیر زاویه‌داری درزه‌ها بر موج عبوری را نشان می‌دهد. این نتیجه بیانگر آن است با افزایش زاویه‌داری درزه‌ها موج عبوری افزایش پیدا خواهد کرد، تا اینکه زاویه آن به ۹۰ درجه می‌رسد. وقتی که زاویه به ۹۰ درجه می‌رسد موج عبوری دیگر وجود نخواهد داشت. همچنین از نمودار پیداست که شدت افزایش آن کم بوده و افزایش چشمگیری وجود ندارد. همچنین نتایج عددی با مطالعه و مطالعه پژوهشگران قبلی نیز تطابق خوبی وجود دارد که بیانگر تأیید صحت نتایج است. در شکل ۴-۱۴ تأثیر زاویه‌داری بر موج

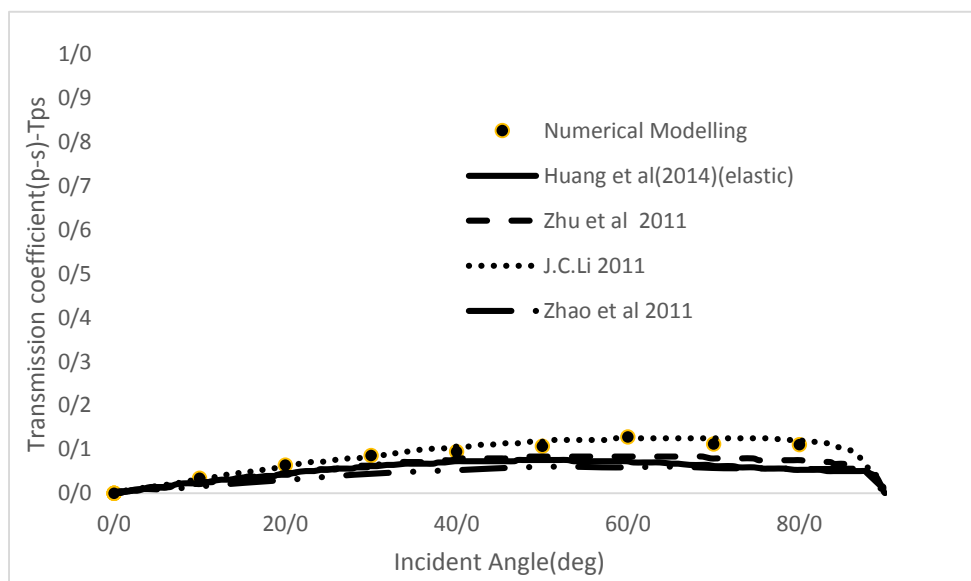
بازگشتی تبدیلی را نشان می‌دهد. همچنان که از روی شکل پیداست با افزایش زاویه‌داری درزه‌ها ابتدا موج بازگشتی تبدیلی افزایش پیدا خواهد کرد و پس از حدود ۴۰ درجه کاهش پیدا می‌کند. در این نتیجه نیز یک همبستگی مطلوبی بین نتیجه عددی و مطالعات پژوهشگران قبلی و مطالعه تحلیلی وجود دارد. در شکل ۴-۱۵ نیز تأثیر زاویه‌داری درزه‌ها بر موج عبوری تبدیلی را نشان می‌دهد. این نتیجه بیانگر آن است که ابتدا با افزایش زاویه‌داری درزه‌ها موج عبوری تبدیلی افزایش پیدا خواهد کرد و سپس کاهش می‌یابد. تأثیر زاویه‌داری درزه‌ها بر موج عبوری تبدیلی بسیار کم است و دامنه تغییرات آن بسیار کم هست. در شکل ۴-۱۶ تأثیر زاویه‌داری درزه‌ها بر موج بازگشتی را نشان می‌دهد. این بیانگر آن است که با افزایش زاویه‌داری درزه، ابتدا موج بازگشتی کاهش می‌یابد تا به یک مقدار ثابت می‌رسد و سپس افزایش می‌یابد. نتایج نشان دهنده این است که در زاویه صفر درجه تنها موج‌های بازگشتی و عبوری وجود دارد و موج‌های تبدیلی برابر صفر است و بیشتر موج ورودی عبور خواهد کرد، در حالی که در زاویه ۹۰ درجه، تمام امواج عبوری، بازگشتی تبدیلی و عبوری تبدیلی برابر صفر خواهد شد و تمام موج ورودی، بازگشت داده خواهد شد.



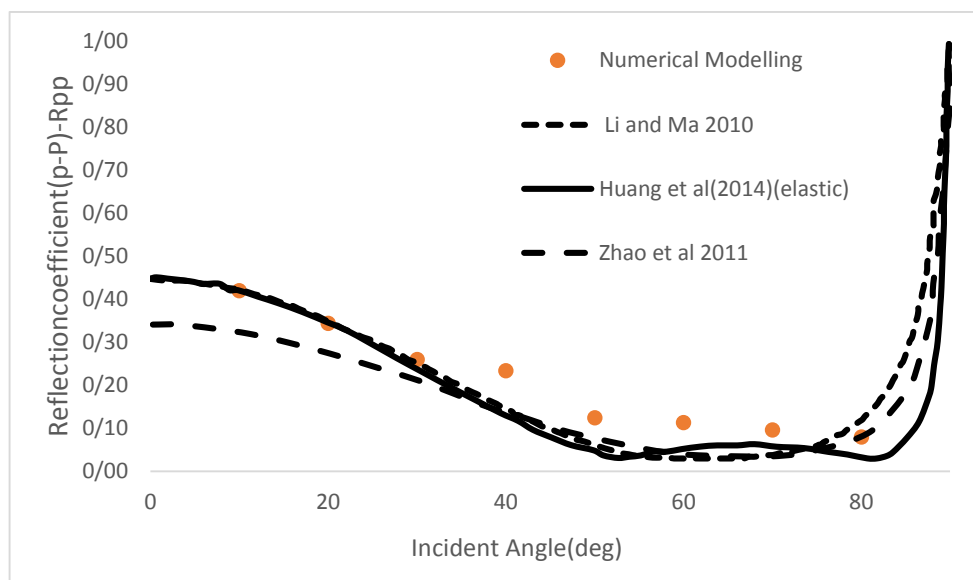
شکل ۴-۱۳: تأثیر زاویه‌داری درزه‌ها بر موج عبوری با استفاده از مدل‌سازی عددی



شکل ۴-۱۴: تأثیر زاویه‌داری درزه‌ها بر موج بازگشتی تبدیلی با استفاده از مدل‌سازی عددی



شکل ۴-۱۵: تأثیر زاویه‌داری درزه‌ها بر موج عبوری تبدیلی با استفاده از مدل‌سازی عددی



شکل ۴-۱۶: تأثیر زاویه‌داری درزه‌ها بر موج بازگشتی با استفاده از مدل‌سازی عددی

#### ۴-۴- بررسی انتشار موج p از چند درزه موازی

انتشار موج از طریق چند درزه موازی به دلیل بازگشت موج بین درزه‌ها به مراتب پیچیده‌تر از تک درزه است. در این بخش ابتدا مدل‌سازی عددی انتشار موج در چند درزه موازی بیان شده و در بخش بعدی به ارزیابی انتشار موج از چند درزه موازی پرداخته خواهد شد، و در این ارتباط تأثیر پارامترهای فاصله‌داری نرمال شده درزه‌ها و تعداد درزه‌ها بر انتشار موج بررسی می‌شوند.

#### ۴-۴-۱- مدل‌سازی عددی انتشار موج از چند درزه موازی

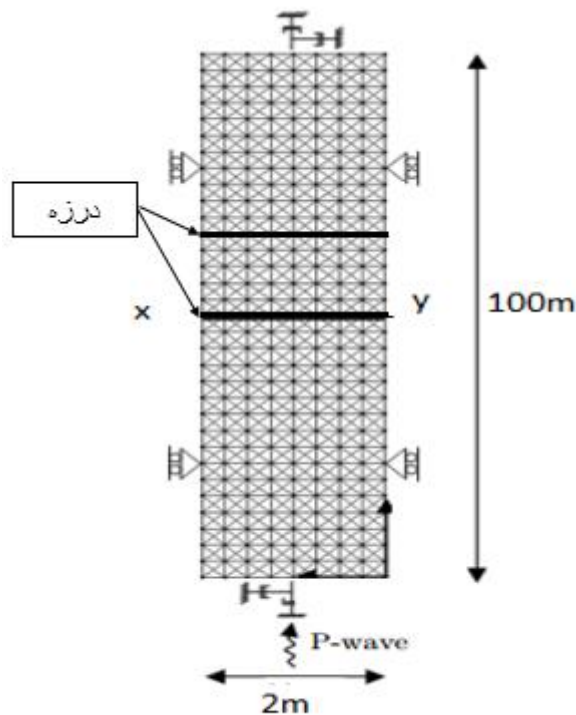
برای مدل‌سازی انتشار موج از چند درزه موازی با نرم‌افزار UDEC، طول مدل ساخته شده ۲ متر و عرض آن ۱۰۰ متر بوده و نسبت طول به عرض ۲ به ۱۰۰ است. مختصات صفحه x-y در مرکز مدل قرار داشته و اولین درزه در مختصات  $y=0$  و درزه‌های دیگر بر اساس فاصله‌داری درزه نرمال شده از مدل قرار خواهند داشت. شکل و تصویری از مدل که دارای دو درزه و هم شرایط مرزی را نشان می‌دهد در شکل ۴-۱۷ نشان داده شده است.

در این مدل نیز، موج ورودی در مرز پایین اعمال شده و انتشار در جهت عمود بر درزه‌های موازی در جهت Y است. برای جلوگیری از بازتاب موج مرزهای جاذب در مرز بالا و پایین تعریف شده است. از آنجاییکه موج ورودی، موج P است، جابجایی در جهت X از مرزهای چپ و راست محدود شده است، در حالی که در جهت Y آزاد است. امواج بازگشتی و عبوری در دو نقطه (نقطه A در  $y=-40$  و نقطه B در  $y=40$ ) اندازه گرفته می‌شوند. سپس یک موج سینوسی با دامنه واحد به عنوان موج ورودی اعمال می‌شود که فرکانس موج سینوسی ۵۰ هرتز است.

خصوصیات محیط توده سنگ دربرگیرنده همانند جدول ۴-۱ است. در این مدل فاصله‌داری درزه برابر با S بوده و برای ارزیابی انتشار موج در چند درزه موازی به تأثیر فاصله‌داری نرمال شده بر انتشار موج بررسی می‌شود. فاصله‌داری نرمال درزه‌ها ( $\xi$ ) نیز به صورت فاصله‌داری درزه‌ها بر طول موج

$$\xi = \frac{S}{\lambda}$$

تعریف می‌شود که به آن فاصله‌داری نرمال شده می‌گویند.



شکل ۴-۱۷: هندسه و شرایط مرزی مدل UDEC برای انتشار موج p در محیط سنگی دو درزه

#### ۴-۱-۱- تأثیر فاصله‌داری درزه نرمال شده بر انتشار موج

همچنان که در شکل ۴-۱۸ نشان داده شده است، شبیه‌سازی UDEC در عبور موج  $p$  از درزه‌های مجزا با فاصله‌داری‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. در این مدل‌سازی، برای سختی‌های نرمال شده مختلف، ضریب عبور برای عبور موج از دو درزه موازی به صورت تابعی از فاصله‌داری نرمال شده محاسبه شده است. مطابق سایر مدل‌های عددی، نتایج ضریب عبور موج به دست آمده از مدل‌سازی با نتایج به دست آمده از مطالعه تحلیلی در فصل سوم مقایسه شده است. نتایج عددی را می‌توان به طور خلاصه به صورت زیر بیان کرد:

۱. برای فاصله‌داری‌های بیشتر از فاصله‌داری آستانه، مقدار ضریب عبوری ثابت می‌ماند که نشان‌دهنده این است که برهم کنش موج‌های رسیده در زمان‌های مختلف بر موج عبوری تأثیر ندارد.

۲. زمانی که فاصله‌داری درزه‌ها از فاصله‌داری آستانه کمتر باشد، برهم‌کنش موج‌ها به طور واضح بر ضریب عبوری تأثیر می‌گذارد. برای فاصله‌داری‌های خیلی کم مقدار ضریب عبوری با افزایش فاصله‌داری افزایش پیدا می‌کند تا به فاصله‌داری بحرانی می‌رسد و سپس با افزایش فاصله‌داری، مقدار ضریب عبوری کاهش پیدا می‌کند.

۳. با افزایش سختی درزه نرمال شده در فاصله‌داری‌های نرمال شده مختلف موج عبوری نیز افزایش پیدا کرده که هر چقدر روند افزایش سختی درزه نرمال شده بیشتر باشد، سرعت افزایش موج عبوری کاهش می‌یابد.

زمانی که فاصله‌داری درزه‌ها خیلی کم باشد، مقدار سختی درزه نرمال شده را می‌توان به صورت سختی درزه نرمال شده مؤثر نشان داد یعنی:

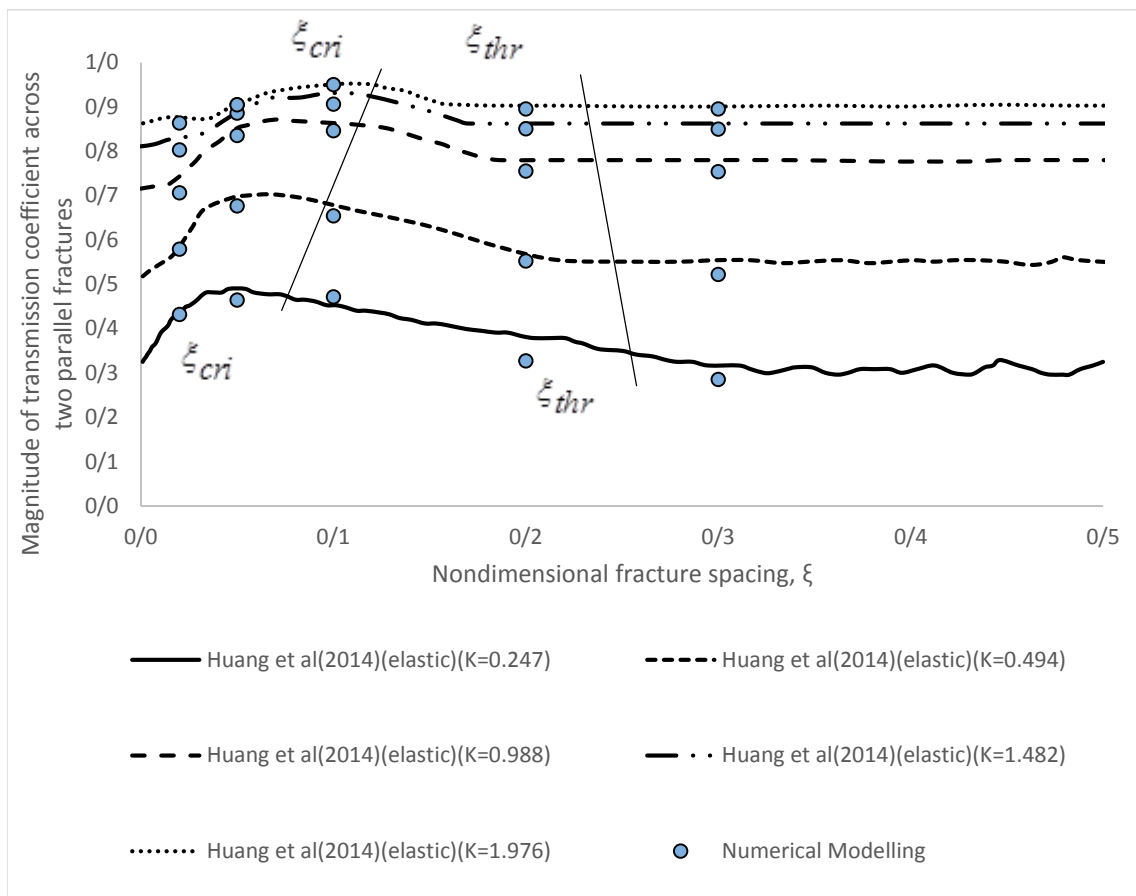
(۳-۴)

$$K_{ne} = \frac{K n}{n}$$

که در رابطه بالا  $K_{ne}$  سختی درزه نرمال شده مؤثر:

همچنین این نتایج مبین آن است که یک همبستگی مطلوبی بین نتایج عددی و مطالعه تحلیلی

وجود دارد و قابلیت UDEC در انتشار موج در توده سنگ چند درزه موازی تأیید می‌شود.



شکل ۴-۱۸: بررسی تأثیر نسبت فاصله‌داری به طول موج بر مقدار موج عبوری در  $K$  مختلف با استفاده از روش عددی و تحلیلی

#### ۴-۱-۲- تأثیر تعداد درزه‌ها بر انتشار موج

به منظور ارزیابی تعداد درزه‌ها بر انتشار موج، مدل ساخته شده به صورت زیر است. طول مدل

ساخته شده ۲ متر و عرض آن ۲۰۰ متر بوده و نسبت طول به عرض ۲ به ۲۰۰ است. دلیل این امر آن



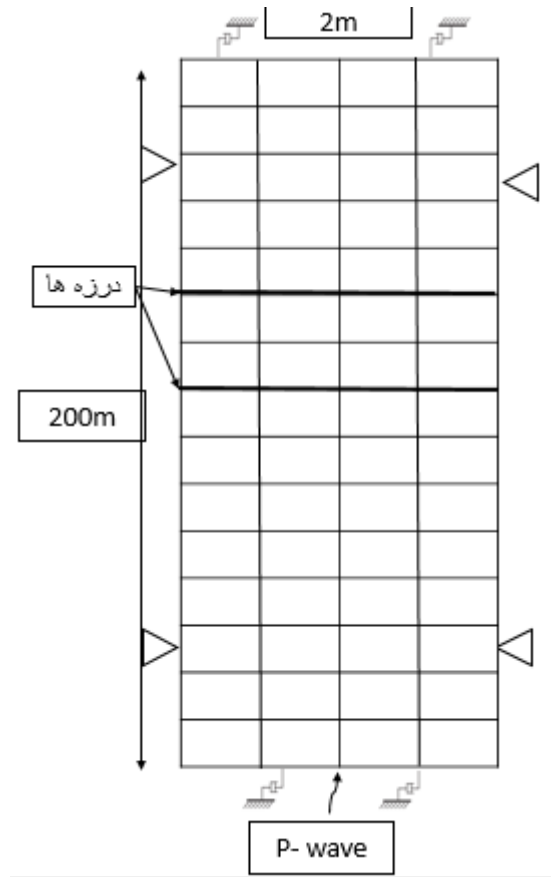
است که هر چقدر فاصله‌داری درزه نرمال شده و تعداد درزه‌ها افزایش یابد مدل ساخته‌شده برای بررسی تأثیر درزه‌ها بر انتشار موج باید بزرگ‌تر باشد. مختصات صفحه  $x-y$  در مرکز مدل قرار داشته و اولین درزه در مختصات  $y=0$  و درزه‌های دیگر بر اساس فاصله‌داری درزه نرمال شده از مدل قرار خواهند داشت. در این مدل نیز همانند مدل‌های قبل موج ورودی در مرز پایین اعمال شده است و مرزهای جاذب در مرز بالا و پایین تعریف شده است. جابجایی‌ها نیز در جهت  $X$  از مرزهای چپ و راست محدود شده است. خصوصیات محیط دربرگیرنده همانند مطالعات بخش قبلی در جدول ۴-۱ آورده شده است. در شکل ۴-۱۹ هندسه مختصاتی برای بررسی تعداد درزه‌ها بر موج عبوری نشان داده شده است. در مدل‌سازی سختی نرمال شده درزه‌ها نیز ثابت در نظر گرفته شده است که برابر  $K=1$  هست و مقدار ضریب عبور موج برای  $N=2$  و  $N=4$  بررسی شده است. در شکل ۴-۲۰ به مقایسه بین روش عددی و روش تحلیلی در فصل سوم نشان داده شده است. نتایج به دست آمده از شکل را می‌توان به صورت زیر نوشت:

۱. در حالت کلی می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش تعداد درزه‌ها مقدار موج عبوری کاهش می‌یابد.

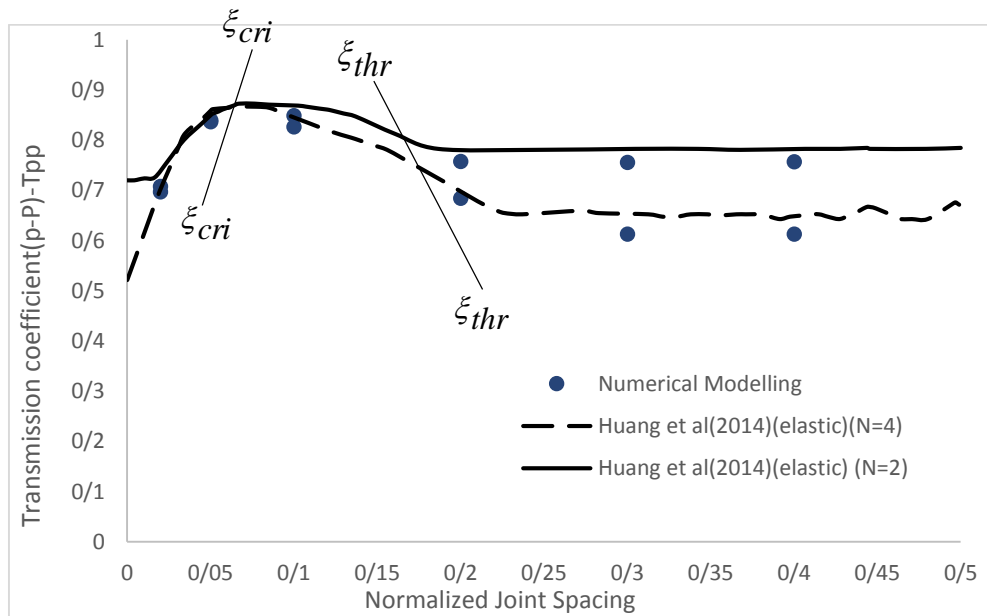
۲. در فاصله‌داری درزه‌های بیشتر از فاصله‌داری درزه آستانه، با افزایش تعداد درزه‌ها موج عبوری کاهش می‌یابد.

۳. در فاصله‌داری درزه‌های بیشتر از فاصله‌داری درزه آستانه، زمانی که تعداد درزه‌ها کم باشد، رابطه پیراک-نولت و همکاران برقرار است. ولی برای تعداد درزه‌های زیاد مقدار ضریب عبوری از رابطه پیراک-نولت و همکاران بیشتر است.

۴. این نتایج حاکی از آن است که بین نتایج عددی محاسبه‌شده و نتایج تحلیلی یک همبستگی مطلوبی قرار دارد.



شکل ۴-۱۹: هندسه مختصاتی UDEC با دو درزه برای بررسی تأثیر تعداد درزه‌ها بر انتشار موج P



شکل ۴-۲۰: بررسی عددی تعداد درزه‌ها بر موج عبوری و مقایسه با روش تحلیلی

#### ۴-۵- جمع بندی

در این فصل به مطالعه عددی انتشار موج در توده سنگ دار پرداخته شد. در این پژوهش به منظور مدل سازی محیط ناپیوسته و انتشار موج دینامیکی در این محیط از نرم افزار تجاری المان مجزای UDEC که قابلیت تحلیل دینامیکی مدل ناپیوسته است، استفاده شد. در مطالعه عددی در ابتدا به بررسی مدل سازی عددی انتشار موج در تک درزه به صورت قائم و مایل پرداخته شد و موقعیت درزه، ابعاد مدل و شرایط مرزی بررسی شد و سپس به بررسی تأثیر سختی درزه نرمال شده بر موج عبوری، موج بازگشتی، موج عبوری تبدیلی و موج بازگشتی تبدیلی ارزیابی شد. در بررسی انتشار مایل موج P نیز به بررسی تأثیر زاویه داری درزه ها بر انتشار موج بررسی گردید و نتایج به دست آمده نشان دهنده آن است که مطالعه های زیر با مطالعه تحلیلی در فصل سوم و مطالعه پژوهشگران قبلی همبستگی مطلوبی وجود دارد. سپس به بررسی عددی انتشار موج در چند درزه موازی انجام شد و نحوه مدل سازی انتشار موج در چند درزه موازی بررسی گردید. سپس به ارزیابی تأثیر فاصله داری درزه نرمال شده و تعداد درزه ها بر موج عبوری بررسی گردید. نتایج نشان دهنده در این بخش نیز با مطالعه تحلیلی در فصل سوم مقایسه شد. این نتایج نیز همبستگی مطلوبی با مطالعات قبلی دارد.



## فصل پنجم:

### نتیجه‌گیری و پیشنهادها

## ۵-۱- نتیجه گیری کلی

در این تحقیق به بررسی تحلیلی و مدل سازی عددی انتشار موج در توده سنگ درزه دار پرداخته شد. به طوری که ملاحظه گردید در ابتدا مطالعه عددی توسط نرم افزار UDEC انتشار موج در تک درزه که موج در راستای عمود بر درزه در محیط به درزه برخورد می کند انجام شد، سپس انتشار موج مایل در محیط سنگی بررسی گردید و در نهایت انتشار موج در چند درزه موازی به صورت عددی و تحلیلی مورد بررسی واقع شد. نتایج کلی حاصل از تحقیق انجام گرفته بر روی انتشار موج در توده سنگ دارای درزه شامل موارد زیر است:

۱. انتشار موج در تک درزه برای موجی که به صورت عمودی به تک درزه برخورد می کند، با استفاده از روش عددی و مطالعه تحلیلی بررسی شده است و در این ارتباط تأثیر سختی درزه نرمال شده بر موج عبوری و موج بازگشتی بررسی شده است. نتایج مبین آن است که بین نتایج تحلیلی ، نتایج عددی و نتایج پژوهشگران قبلی مطابقت مطلوبی وجود دارد. نتایج نشان دهنده این است که با افزایش سختی درزه نرمال شده، موج عبوری افزایش می یابد، در حالی که موج بازگشتی کاهش می یابد. زمانی که سختی درزه به سمت صفر میل می کند، درزه به عنوان یک سطح آزاد عمل کرده و تمام موج ورودی بازگشت می یابد، در حالی که اگر سختی درزه به سمت بی نهایت میل می کند تمام موج ورودی، عبور کرده و موج بازگشتی نخواهیم داشت.

۲. از آنجاییکه زمانی که موج مایل به تک درزه برخورد می کند، تبدیل موج نیز اتفاق می افتد، تحت این شرایط نیز بررسی انتشار موج صورت پذیرفته است. در این خصوص تأثیر زاویه موج ورودی و سختی درزه نرمال شده بر انتشار موج بررسی شد. نتایج به دست آمده نشان دهنده این است که با افزایش سختی درزه نرمال شده، عبور موج افزایش پیدا می کند در حالی که از

موج بازگشتی، کاسته می‌شود. برای بخش تبدیل موج نیز، ضریب عبوری تبدیلی ابتدا افزایش پیدا کرده و سپس کاهش می‌یابد، درحالی‌که موج بازگشتی کاهش می‌یابد.

۳. براساس مطالعات انجام‌گرفته برای بررسی تأثیر زاویه ورودی بر انتشار موج، نتایج به‌دست‌آمده نشان‌دهنده آن است که با افزایش زاویه ورودی، ضریب بازگشتی ابتدا کاهش پیدا کرده تا به یک مقدار ثابت می‌رسد و سپس هر چقدر زاویه افزایش می‌یابد، روند افزایش پیدا می‌کند. برای ضریب عبوری نیز تحت تأثیر زاویه ورودی موج تابشی ابتدا افزایش پیدا کرده تا به یک مقدار حداکثر می‌رسد و هر چقدر به سمت ۹۰ درجه و قائم میل می‌کند، موج عبوری ظاهر نخواهد شد. در خصوص تبدیل موج نیز، ضریب بازگشتی با افزایش زاویه برخورد به درزه تا زاویه ورودی حدود ۴۰ درجه افزایش نموده، سپس مقدار آن کاهش پیدا می‌کند. ضریب عبور تبدیل موج نیز با افزایش زاویه موج ورودی ابتدا روند افزایش تا رسیدن به یک مقدار حداکثر داشته و بعد از آن کاهش می‌یابد.

۴. برای تأثیر فاصله‌داری درزه‌های موازی دو شاخص مهم، نسبت فاصله‌داری بحرانی و نسبت فاصله‌داری آستانه معرفی شد. اگر نسبت فاصله‌داری از نسبت فاصله‌داری آستانه بیشتر باشد، آنگاه مقدار ضریب عبوری مستقل از فاصله‌داری ناپیوستگی‌ها است. اگر نسبت فاصله‌داری در بین نسبت فاصله‌داری بحرانی و آستانه باشد، آنگاه مقدار ضریب عبوری با افزایش فاصله بین ناپیوستگی‌ها کاهش پیدا می‌کند. اگر فاصله‌داری درزه نرمال شده از نسبت فاصله‌داری بحرانی کمتر باشد، آنگاه مقدار ضریب عبوری با کاهش فاصله‌داری ناپیوستگی‌ها کاهش پیدا می‌کند. مقدار شاخص آستانه و بحرانی نیز با تغییر مقدار سختی درزه نرمال شده تغییر می‌کند.

۵. برای بررسی تعداد درزه‌ها بر انتشار موج، عموماً مقدار ضریب عبوری با افزایش تعداد درزه‌ها کاهش پیدا می‌کند. اگر نسبت فاصله‌داری از نسبت فاصله‌داری آستانه بیشتر باشد، مقدار ضریب عبوری با افزایش تعداد درزه‌ها کاهش می‌یابد و ضریب عبوری  $(|T_N|)$  تابعی از

$|T_1|^N$  خواهد شد و بامطالعه پیراک نولت و همکاران همبستگی دارد. اگر نسبت فاصله‌داری بین نسبت فاصله‌داری آستانه و بحرانی باشد کاهش مقدار ضریب عبوری با  $N$  ضعیف خواهد بود و در نتیجه مقدار  $|T_N|$  بزرگ‌تر از  $|T_1|^N$  خواهد بود. اگر نسبت فاصله‌داری از نسبت فاصله‌داری بحرانی کمتر باشد، مقدار ضریب عبوری  $|T_N|$  با  $N$  ضعیف‌تر خواهد بود و حتی به تعداد درزه‌ها نیز بستگی ندارد.

## ۵-۲- پیشنهادها

۱. در این مطالعه انتشار موج ورودی  $P$  با استفاده از روش تحلیلی و عددی بررسی گردید که پیشنهاد می‌گردد انتشار موج  $S$  نیز با استفاده از روش تحلیلی بررسی گردد.
۲. توصیه می‌شود تأثیر پرشدگی که از خصوصیات مهم درزه‌های سنگی است در انتشار موج توده سنگ بررسی شود.
۳. مطالعه عددی انتشار موج در چند درزه متقاطع پرداخته شود و تأثیر زاویه تقاطع نیز از دیگر مواردی است که می‌تواند در تحقیقات آینده گنجانده شود.
۴. در این مطالعه توسط روش عددی و تحلیلی انتشار موج در چند درزه موازی انجام گرفت که برای مطالعه بیشتر پیشنهاد می‌شود مطالعه آزمایشگاهی انتشار موج برای موج عمودی ورودی و موج مایل و تأثیر پارامترها بررسی شده و با نتایج مطالعات عددی و تحلیلی مقایسه شوند
۵. در مطالعات بعدی پیشنهاد می‌شود مطالعه انتشار موج در توده سنگ درزه‌دار حاوی آب بررسی گردد.



## منابع

- بالیده، صالح، (۱۳۸۳)، " پاسخ دینامیکی سازه های بزرگ زیرزمینی در برابر انتشار امواج زمین لرزه"، پایان نامه کارشناسی ارشد، گروه مهندسی معدن، دانشگاه تربیت مدرس.
- خانی زاده بهابادی، محسن، یاراحمدی بافقی، علیرضا، فاتحی مرجی، محمد. (۱۳۹۵). "تلفیق روش عددی آنالیز تغییرشکل ناپیوسته (DDA) و روش جابجایی ناپیوستگی (DDM) به منظور تحلیل پایداری شیب سنگ‌های درزه‌دار (مطالعه موردی: دیواره شمالی معدن چغارت)"، روش های تحلیلی و عددی در مهندسی معدن، ۶(۱۲) pp. 91-105.
- سبحانی، ا.، (۱۳۹۰)، " تحلیل عددی انتشار امواج حاصل از انفجار در محیط های پیوسته و ناپیوسته"، پایان نامه کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان.
- گرایلی میکلا، ر.، (۱۳۸۳)، " کاربرد نرم افزار Discontinuous Deformation Analysis و تجهیز آن به ابزار مدل‌سازی سیستم‌های تقویتی تمام تزریق در محیط ناپیوسته"، پایان نامه کارشناسی ارشد، گروه مهندسی معدن، دانشگاه تهران.
- Achenbach, J., 2012. *Wave propagation in elastic solids* (Vol. 16). Elsevier.
- B Zhao, X., Zhao, J. and G Cai, J., 2006. P-wave transmission across fractures with nonlinear deformational behaviour. *International journal for numerical and analytical methods in geomechanics*, 30(11), pp.1097-1112.
- Beer, G., 1983. Finite element, boundary element and coupled analysis of unbounded problems in elastostatics. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 19(4), pp.567-580
- Biot, M.A., 1956. Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. I. Low-frequency range. *The Journal of the acoustical Society of American*, 28(2), pp.168-178.
- Brady, B.H.G. and Wassynng, A., 1981, December. A coupled finite element-boundary element method of stress analysis. In *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts* (Vol. 18, No. 6, pp. 475-485). Pergamon.
- Cai, J.G. and Zhao, J., 2000. Effects of multiple parallel fractures on apparent attenuation of stress waves in rock masses. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 37(4), pp.661-682.
- Carcione, J.M. and Picotti, S., 2012. Reflection and transmission coefficients of a fracture in

transversely isotropic media. *Studia Geophysica et Geodaetica*, 56(2), pp.307-322.

- Chen, S.G. and Zhao, J., 1998. A study of UDEC modelling for blast wave propagation in jointed rock masses. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 35(1), pp.93-99.
- Deng, X.F., Zhu, J.B., Chen, S.G. and Zhao, J., 2012. Some fundamental issues and verification of 3DEC in modeling wave propagation in jointed rock masses. *Rock mechanics and rock engineering*, 45(5), pp.943-951.
- Fan, L.F. and Sun, H.Y., 2015. Seismic wave propagation through an in-situ stressed rock mass. *Journal of Applied Geophysics*, 121, pp.13-20.
- Fan, L.F., Ma, G.W. and Li, J.C., 2012. Nonlinear viscoelastic medium equivalence for stress wave propagation in a jointed rock mass. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 50, pp.11-18.
- Fan, L.F., Ren, F. and Ma, G.W., 2011. An extended displacement discontinuity method for analysis of stress wave propagation in viscoelastic rock mass. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 3(1), pp.73-81.
- Fan, S.C., Jiao, Y.Y. and Zhao, J., 2004. On modelling of incident boundary for wave propagation in jointed rock masses using discrete element method. *Computers and Geotechnics*, 31(1), pp.57-66.
- Fu, X., Sheng, Q., Zhang, Y. and Chen, J., 2015. Application of the discontinuous deformation analysis method to stress wave propagation through a one-dimensional rock mass. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 80, pp.155-170.
- Gen-hua Shi, "Block System Modeling by Discontinuous Deformation Analysis (DDA)", Computational Mechanics Publications, 1993.
- Gong, W., Wang, Y., Ning, Y., Luo, Y. and Wang, Y., 2017. Validating the ability of the discontinuous deformation analysis method to model normal P-wave propagation across rock fractures. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 41(10), pp.1267-1282.
- Gu, B., Suárez-Rivera, R., Nihei, K.T. and Myer, L.R., 1996. Incidence of plane waves upon a fracture. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 101(B11), pp.25337-25346.
- Huang, X., Qi, S., Liu, Y. and Zhan, Z., 2014. Stress wave propagation through viscous-elastic jointed rock masses using propagator matrix method (PMM). *Geophysical Journal International*, 200(1), pp.452-470.
- *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, (77), pp.174-181.
- Itasca, U.D.E.C., 2004. Version 4.0 user's manuals. *Itasca Consulting Group. Minneapolis, NM.*
- Jing, L., 1998. Formulation of discontinuous deformation analysis (DDA)—an implicit discrete element model for block systems. *Engineering Geology*, 49(3-4), pp.371-381.
- Koo, C.Y. and Chen, S., 1997, August. Development of second order displacement function

for DDA and manifold method. In Working Forum on the Manifold Method of Material Analysis, Volume I (p. 183).

- Lei, W.D., He, X.F. and Chen, R., 2011. Verification of UDEC Modeling 1-D Wave Propagation in Rocks. In *Applied Mechanics and Materials* (Vol. 90, pp. 1998-2001). Trans Tech Publications.
- Lemos, J.A., 1987, January. A hybrid distinct element-boundary element computational model for the half-plane. In The 26th US Symposium on Rock Mechanics (USRMS). American Rock Mechanics Association
- Li, H., Liu, T., Liu, Y., Li, J., Xia, X. and Liu, B., 2016. Numerical modeling of wave transmission across rock masses with nonlinear joints. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 49(3), pp.1115-1121.
- Li, J. and Ma, G., 2010. Analysis of blast wave interaction with a rock joint. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 43(6), pp.777-787.
- Li, J., Li, H. and Ma, G., 2010. Stochastic seismic wave interaction with a rock joint having Coulomb-slip behavior. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2(4), pp.321-330.
- Li, J., Li, H. and Zhao, J., 2012, May. Blast Wave Interaction With a Parallel Jointed Rock Mass. In *ISRM International Symposium-EUROCK 2012*. International Society for Rock Mechanics.
- Li, J., Ma, G. and Zhao, J., 2010. An equivalent viscoelastic model for rock mass with parallel joints. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 115(B3).
- Li, J., Ma, G. and Zhao, J., 2011. Stress wave interaction with a nonlinear and slippery rock joint. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 48(3), pp.493-500.
- Li, J.C., 2013. Wave propagation across non-linear rock joints based on time-domain recursive method. *Geophysical Journal International*, 193(2), pp.970-985.
- Li, J.C., Li, H.B., Jiao, Y.Y., Liu, Y.Q., Xia, X. and Yu, C., 2014. Analysis for oblique wave propagation across filled joints based on thin-layer interface model. *Journal of Applied Geophysics*, 102, pp.39-46.
- Lorig, L.J. and Brady, B.G.H., 1984. 13 A hybrid computational scheme for excavation and support design in jointed rock media. In Design and Performance of Underground Excavations: ISRM Symposium—Cambridge, UK, 3–6 September 1984 (pp. 105-112). Thomas Telford Publishing
- Lorig, L.J., Brady, B.H.G. and Cundall, P.A., 1986, August. Hybrid distinct element-boundary element analysis of jointed rock. In International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts (Vol. 23, No. 4, pp. 303-312). Pergamon
- Ma, G.W., Fan, L.F. and Li, J.C., 2013. Evaluation of equivalent medium methods for stress wave propagation in jointed rock mass. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 37(7), pp.701-715.

- Mindlin, R. D. (1960), Waves and vibrations in isotropic, elastic plates, in Structural Mechanics, edited by J. N. Goodier and N. J. Hoff, pp. 199-232, Pergamon, New York.
- Perino, A., 2011. *Wave propagation through discontinuous media in rock engineering* (Doctoral dissertation, Politecnico di Torino).
- Perino, A., Barla, G. and Orta, R., 2010, June. Wave propagation in discontinuous media. In *ISRM International Symposium-EUROCK 2010*. International Society for Rock Mechanics
- Perino, A., Orta, R. and Barla, G., 2012. Wave propagation in discontinuous media by the scattering matrix method. *Rock mechanics and rock engineering*, 45(5), pp.901-918.
- Perino, A., Zhu, J.B., Li, J.C., Barla, G. and Zhao, J., 2010. Theoretical methods for wave propagation across jointed rock masses. *Rock mechanics and rock engineering*, 43(6), pp.799-809.
- Pujol, J., 2003. *Elastic wave propagation and generation in seismology*. Cambridge University Press.
- Pyrak-Nolte, L. J., N. G. W. Cook, and L. R. Myer (1987), Seismic visibility of fractures, The 28th US Symposium on Rock Mechanics, Tucson.
- Pyrak-Nolte, L.J., Myer, L.R. and Cook, N.G., 1990. Anisotropy in seismic velocities and amplitudes from multiple parallel fractures. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 95(B7), pp.11345-11358.
- Pyrak-Nolte, L.J., Myer, L.R. and Cook, N.G., 1990. Transmission of seismic waves across single natural fractures. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 95(B6), pp.8617-8638.
- Schoenberg, M. and Douma, J., 1988. Elastic wave propagation in media with parallel fractures and aligned cracks. *Geophysical Prospecting*, 36(6), pp.571-590.
- Schoenberg, M. and Muir, F., 1989. A calculus for finely layered anisotropic media. *Geophysics*, 54(5), pp.581-589.
- Schoenberg, M. and Sayers, C.M., 1995. Seismic anisotropy of fractured rock. *Geophysics*, 60(1), pp.204-211.
- Schoenberg, M., 1980. Elastic wave behavior across linear slip interfaces. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 68(5), pp.1516-1521.
- Sebastian, R. and Sitharam, T.G., 2016. Transformations of Obliquely Striking Waves at a Rock Joint: Numerical Simulations. *International Journal of Geomechanics*, 16(3), p.04015079.
- Wang, W.H., Li, X.B., Zuo, Y.J., Zhou, Z.L. and Zhang, Y.P., 2006. 3DEC modeling on effect of joints and interlayer on wave propagation. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 16(3), pp.728-734.
- Wu, W., Zhu, J.B. and Zhao, J., 2012. A further study on seismic response of a set of parallel rock fractures filled with viscoelastic materials. *Geophysical Journal International*, 192(2), pp.671-675.
- Zhao, J. and Cai, J.G., 2001. Transmission of elastic P-waves across single fractures with a

nonlinear normal deformational behavior. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 34(1), pp.3-22.

- Zhao, J., Zhao, X.B. and Cai, J.G., 2006. A further study of P-wave attenuation across parallel fractures with linear deformational behaviour. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 43(5), pp.776-788.
- Zhao, X.B., Zhao, J., Cai, J.G. and Hefny, A.M., 2008. UDEC modelling on wave propagation across fractured rock masses. *Computers and Geotechnics*, 35(1), pp.97-104.
- Zhao, X.B., Zhao, J., Hefny, A.M. and Cai, J.G., 2006. Normal transmission of S-wave across parallel fractures with Coulomb slip behavior. *Journal of engineering mechanics*, 132(6), pp.641-650.
- Zhao, X.B., Zhu, J.B., Zhao, J. and Cai, J.G., 2012. Study of wave attenuation across parallel fractures using propagator matrix method. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 36(10), pp.1264-1279.
- Zhou, J., 2016. The effects of joints on rock masses under blast-induced vibrations. Ph.D. thesis, *HKU Theses Online (HKUTO)*. University of Hong Kong, Pokfulam, Hong Kong SAR.
- Zhou, Y. and Zhao, J. eds., 2011. *Advances in rock dynamics and applications*. CRC Press.
- Zhu, J., 2011. Theoretical and numerical analyses of wave propagation in jointed rock masses. Ph.D. thesis, ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE
- Zhu, J.B. and Zhao, J., 2013. Obliquely incident wave propagation across rock joints with virtual wave source method. *Journal of Applied Geophysics*, 88, pp.23-30.
- Zhu, J.B., Deng, X.F., Zhao, X.B. and Zhao, J., 2013. A numerical study on wave transmission across multiple intersecting joint sets in rock masses with UDEC. *Rock mechanics and rock engineering*, 46(6), pp.1429-1442.
- Zhu, J.B., Wu, W. and Zhao, J., 2011, January. Different analytical models and methods to study wave propagation across rock joints. In *12th ISRM Congress*. International Society for Rock Mechanics.(a)
- Zhu, J.B., Zhao, X.B., Li, J.C., Zhao, G.F. and Zhao, J., 2011. Normally incident wave propagation across a joint set with the virtual wave source method. *Journal of Applied Geophysics*, 73(3), pp.283-288.(b)
- Zhu, J.B., Zhao, X.B., Wu, W. and Zhao, J., 2012. Wave propagation across rock joints filled with viscoelastic medium using modified recursive method. *Journal of Applied Geophysics*, 86, pp.82-8
- Zienkiewicz, O.C., Kelly, D.W. and Bettess, P., 1977. The coupling of the finite element method and boundary solution procedures. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 11(2), pp.355-375.

# واژه نامه

Equivalent Medium Method	روش محیط معادل
DISPLACEMENT DISCONTINUITY METHOD	روش ناپیوستگی جابجایی
Method of Characteristics	روش مشخصه
Virtual Wave Source	روش منبع موج مجازی
Recursive Method	روش بازگشتی
Scattering Matrix Method	روش ماتریس پراکنده
Body waves	امواج حجمی
Surface waves	امواج سطحی
Wave transmission	عبور موج
Reflected waves	موج بازگشتی
Wave propagation	انتشار موج
Jointed	درزه دار
Compliance tensor	تانسور نرمی
Incident wave	موج ورودی
Fourier transform	تبدیل فوریه

Impedance	امپدانس
Angular frequency	فرکانس زاویه ای
Viscosity	ویسکوزیته
Normal stiffness	سختی نرمال
Shear stiffness	سختی برشی
Normalized joint stiffness	سختی درزه نرمال شده
Wave attenuation	میرایی موج
Boundary conditions	شرایط مرزی
Frequency domain	حوزه فرکانس
Time domain	حوزه زمانی
Viscoelastic equivalent medium	محیط معادل ویسکوالاستیک
Blast wave	موج انفجار
Distinct Element Method	روش اجزا مجزا
Time step	گام زمانی
Discontinuous Deformation Analysis	روش تحلیل تغییر شکل‌های ناپیوسته
Shear strain	کرنش برشی
Viscose	ویسکوز
Damper	میراگر

Domain of potential functions	دامنه توابع پتانسیل
Potential of displacement	پتانسیل جابجایی
Normalized joint spacing	فاصله‌داری درزه نرمال شده
Critical spacing ratio	نسبت فاصله‌داری بحرانی
Threshold spacing ratio	نسبت فاصله‌داری آستانه
Normalized joint stiffness	سختی درزه نرمال شده
Incident angle	زاویه ورودی
Deformable behavior	رفتار تغییر شکل پذیر
Attenuation	میرایی
Plate analysis	آنالیز صفحه ای
Absorbing boundary	مرز جذب کننده



## **Abstract**

The analysis of wave propagation through jointed rock masses is one of the most important issues for solving problems in petroleum, rock dynamics, geophysics, civil engineering and military industries. Rock masses consist of intact rock material and various forms of discontinuities. The discontinuous nature of the rock masses significantly affects their mechanical properties and engineering behaviours including wave propagation. When a wave transmits across discontinuous rock masses, it is significantly attenuated due to the reflection at joints. Therefore, the prediction of wave attenuation across jointed rock masses is significant in solving problems of geophysics, rock dynamics, seismic research and earthquake engineering. The purpose of this thesis is to study numerical and analytical methods of wave propagation in jointed rock masses. For analytical method, this is done with a combination of the DDM, stress and strain equation, propagator matrix, plate wave analysis and using Fourier transform for single joint and multiple parallel joints. For numerical modelling, the commercial software of the UDEC which has the potential for dynamic analysis of discontinuous model, has been used. After parametric studies, it is found that parameters including normalized fractures stiffness, incident angle, normalized fracture spacing and number of joints have effect on wave propagation in single joint and multiple parallel joints. The results show that there is good agreement between numerical modelling, analytical method and study of previous researchers.

**Keywords:** wave propagation, rock mass, numerical modelling, analytical method, UDEC software



**Shahrood University of Technology**

**Faculty of mining, petroleum and geophysics engineering**

**Master of Science in rock mechanics engineering**

**Numerical Modelling of Wave Propagation in Jointed Rock  
Masses and Comparing with Analytical Method**

Amir Salehnejad

Supervisor:

Dr Majid Nikkhah

Advisor:

Dr Amin Roshandel Kahoo

September 2017