



## مطالعه انتشار موج $P$ در توده سنگ درزه دار دارای تک درزه و چند درزه موازی با استفاده از مدل سازی عددی

مجید نیکخواه\*؛ امیر صالح نژاد<sup>۲</sup>

۱. استادیار؛ دانشکده‌ی مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود  
۲. کارشناسی ارشد، دانشکده‌ی مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود

دریافت مقاله: ۱۳۹۷/۰۹/۲۵ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۱۱/۱۶  
DOI:10.22107/jpg.2019.161593.1078

واژگان کلیدی	چکیده
انتشار موج، سختی درزه، روش عددی، فاصله‌داری درزه، توده سنگ	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 آنجایی که توده سنگ شامل ماده سنگ و اشکال مختلفی از ناپیوستگی‌ها بوده، ماهیت ناپیوستگی‌های توده سنگ به‌طور قابل توجهی بر روی خصوصیات مکانیکی و رفتار مهندسی تأثیرگذار است. بنابراین آگاهی و شناخت کافی از چگونگی انتشار موج در توده سنگ‌ها به‌ویژه برای پروژه‌هایی که از اهمیت و حساسیت بالاتری برخوردارند، ضروری است. هدف این مقاله مدل‌سازی عددی انتشار موج $P$ در توده سنگ درزه دار تک درزه و درزه‌های موازی بوده که در این ارتباط رفتار تغییر شکل سنگ‌ها خطی فرض شده است. در تحقیق حاضر بررسی عددی ارزیابی انتشار موج و تأثیر پارامترهای سختی درزه نرمال شده و زاویه ورودی بر انتشار موج در توده سنگ تک درزه توسط نرم‌افزار دوبعدی <i>UDEC</i> انجام می‌گیرد. همچنین به انتشار موج از طریق توده سنگ دارای چند درزه موازی پرداخته شده و تأثیر فاصله‌داری نرمال شده درزه‌ها و تعداد درزه‌ها بر انتشار موج بررسی شده و در نهایت با نتایج روش‌های تحلیلی پژوهشگران مقایسه شده است.

### ۱. پیش‌گفتار

امروزه مطالعه انتشار موج از میان شکستگی‌های توده سنگ در کاربردهای مختلف مهندسی اهمیت زیادی پیدا کرده است. به‌طور کلی زمینه‌های مشترک زیادی بین پدیده انتشار موج و خواص بنیادی توده سنگ وجود دارند. مبحث انتشار موج یکی از مهم‌ترین مسائل مطرح شده در مطالعات دینامیک سنگ صنایع نفت، معدن، عمران، نظامی و پدافند غیرعامل است. از نظر طراحی ژئومکانیکی، توده سنگ شامل ماده سنگ و اشکال مختلفی از ناپیوستگی‌ها (مانند درزه‌ها، گسل و صفحات لایه‌بندی) است. وجود ناپیوستگی در توده سنگ به‌طور قابل توجهی 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 کم شده و دامنه موج کاهش می‌یابد. به علاوه میرایی دامنه موج به دلیل وجود درزه‌ها در مقایسه با کندی سرعت

حساسیت بیشتری داشته است؛ بنابراین پیش‌بینی میرایی موج در سراسر درزه‌های سنگی در حل مسائل ژئوفیزیکی، تحقیقات لرزه‌نگاری، دینامیک سنگ و مهندسی زلزله ضروری است. مطالعات و تحقیقات انجام شده در زمینه انتشار موج را می‌توان به سه بخش شامل روش‌های تحلیلی، روش‌های اندازه‌گیری و آزمایشگاهی و روش‌های عددی تقسیم نمود. در این تحقیق قابلیت روش‌های عددی برای در نظر گرفتن تأثیر درزه‌ها بر روی انتشار موج مورد بررسی قرار گرفته است. یکی از وظایف اصلی مدل‌سازی عددی در مکانیک سنگ، توانایی توصیف ناپیوستگی‌های فیزیکی در یک مدل کامپیوتری به‌طور صریح یا ضمنی موسوم به مدل هندسی است. تقسیم‌بندی اصلی روش‌های عددی بر اساس نوع محیط مورد نظر است. این روش‌ها طی سال‌های گذشته بر مبنای تئوری مکانیک محیط‌های پیوسته و ناپیوسته ایجاد شده‌اند. انتخاب روش‌های پیوسته و ناپیوسته به بسیاری از عوامل بستگی دارد. روش‌های ترکیبی غالباً در مهندسی سنگ برای مسائل تنش-

انتشار موج دینامیکی در این محیط از نرم‌افزار تجاری المان مجزای *UDEEC* که قابلیت تحلیل دینامیکی مدل ناپیوسته را داراست، استفاده شده است. در این راستا بررسی عددی ارزیابی انتشار موج *p* از طریق تک درزه انجام شده و تأثیر پارامترهای سختی درزه نرمال شده و زاویه ورودی بر انتشار موج توسط نرم‌افزار دوبعدی *UDEEC* بررسی می‌گردد. سپس به انتشار موج از طریق توده سنگ دارای چند درزه موازی پرداخته شده و تأثیر فاصله‌داری نرمال شده درزه‌ها و تعداد درزه‌ها بر انتشار موج بررسی شده و در نهایت نتایج با نتایج پژوهشگران قبلی مقایسه شده است.

## ۲. روش اجزا مجزا و نرم‌افزار عددی *UDEEC*

روش اجزا مجزا<sup>۱</sup>، یک روش عددی است که به منظور مدل‌سازی و بررسی عملکرد رفتار محیط‌های ناپیوسته به کار می‌رود. این روش به منظور بررسی رفتار تغییر شکل‌پذیر 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 به‌طور روزافزونی به‌منظور ارزیابی پایداری و بررسی تغییر شکل و شکست توده سنگ به‌کاربرده می‌شود. در این روش توده سنگ به صورت یک محیط ناپیوسته در نظر گرفته می‌شود و بنابراین تأثیر عوارض ساختاری نظیر درزه‌ها، گسل‌ها و انواع ناپیوستگی‌های دیگر قابل بررسی است. 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 در حین تغییرات

تغییر شکل و جریان سنگ‌های درزه‌دار توسعه یافته‌اند. چن<sup>۱</sup> و ژائو (۱۹۹۸) به مطالعه تأثیر تک درزه و تأثیر سختی درزه در دودسته درزه با استفاده از مدل‌سازی *UDEEC* با بار انفجار پرداختند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که تأثیر درزه‌ها بر میرایی موج یکی از پارامترهای مهم در انتشار موج است. فن<sup>۲</sup> و همکاران (۲۰۰۴) تأثیر شرایط مرزی در *UDEEC* را بر عبور موج *P* در تک درزه مطالعه کرده و با نرم‌افزار *AUTODYN-2D* نیز مورد مطالعه قرار دادند. ژائو<sup>۳</sup> و همکارانش انتشار موج را در توده سنگ و قابلیت *UDEEC* را در مطالعه عددی انتشار موج مطالعه کردند (Zhao et al., 2008). آن‌ها در تحقیق خود، تأثیر پارامترهای سختی درزه نرمال شده، دامنه موج ورودی، تعداد درزه‌ها و نسبت فاصله‌داری درزه بر موج عبوری را بررسی کردند. دنگ<sup>۴</sup> و همکارانش انتشار موج تنش را در توده سنگ درزه‌دار با استفاده از نرم‌افزار سه‌بعدی *3DEC* مورد مطالعه قرار داده و در مطالعات خود به بررسی تأثیر قابلیت نرم‌افزار *3DEC* در مدل‌سازی انتشار موج در توده سنگ درزه‌دار، بررسی سختی درزه‌ها و فاصله‌داری درزه‌ها پرداختند (Deng et al., 2012). ژو<sup>۵</sup> و همکاران نیز در سال ۲۰۱۳ انتشار موج در توده سنگ درزه‌دار در سراسر دسته درزه‌های متقاطع را با *UDEEC* بررسی نمودند (Zhu et al., 2013). پاراستاتیدیس<sup>۶</sup> و همکارانش انتشار موج *P* در محیطی با گسیختگی‌های موازی چندگانه را به صورت عددی مطالعه کرده (Parastatidis et al., 2017) و نتایج آن را با آزمایش‌های پیراک-نولت<sup>۷</sup> و همکارانش مقایسه کردند (Pyrak-Nolte et al., 1990). ژان<sup>۸</sup> و همکارانش واکنش دینامیکی شیب سنگی با ساختار لایه‌ای افقی را تحت اعمال ورود موج *S* به صورت عمودی با روش عددی بررسی کردند (Zhan., 2017).

در این پژوهش به منظور مدل‌سازی محیط ناپیوسته و

<sup>۱</sup> Chen

<sup>۲</sup> Fan

<sup>۳</sup> Zhao

<sup>۴</sup> Deng

<sup>۵</sup> Zhu

<sup>۶</sup> Parastatidis

<sup>۷</sup> Pyrak-Nolte

<sup>۸</sup> Zhan

<sup>۹</sup> Discrete Element Method

## مطالعه انتشار موج P در توده سنگ درزه‌دار دارای تک درزه و چند درزه موازی با استفاده از مدل‌سازی عددی

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 است. در هر مرحله به منظور ارزیابی، نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی با نتایج پژوهشگران قبلی نیز مقایسه می‌شود.

### ۱.۳ بررسی انتشار موج P قائم ورودی به درزه

به منظور مدل‌سازی انتشار 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 آنجائی که موج ورودی، موج P است، جابجایی در جهت X از مرزهای چپ و راست محدود شده است، درحالی‌که در جهت Y آزاد هست. امواج بازگشتی و عبوری در دو نقطه (نقطه A در  $y=40$  و نقطه B در  $y=40$ ) قرار می‌گیرند. صفحه مختصات  $x-y$  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) آورده شده است. برای اعمال موج ورودی و تابشی یک موج سینوسی با دامنه واحد و فرکانس ۵۰ هرتز انتخاب شده است. خصوصیات محیط توده سنگ مدل عددی در جدول (۱) نشان داده شده است:

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

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

در مدل و حرکت بلوک‌ها تشخیص و به‌صورت مداوم به هنگام‌سازی می‌شود. فرمول‌سازی و توسعه روش اجزا مجزا نخستین بار توسط کاندال<sup>۱۰</sup> در سال ۱۹۷۱ ابداع شده و روند تکامل آن، طی چند دهه اخیر ادامه یافته است. نرم‌افزاری که بر مبنای این روش به تحلیل مسائل 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>۱۱</sup> در سال ۱۹۸۵ انجام شده و لموس<sup>۱۲</sup> در سال ۱۹۸۷ قابلیت‌های آن را افزایش داده است (Lemos, 1987).

### ۳. ارزیابی انتشار موج در محیط سنگی دارای تک درزه

به منظور ارزیابی انتشار موج در محیط سنگی تک درزه، ابتدا انتشار موج در تک درزه به وسیله موج قائم تابشی ورودی P و در ادامه انتشار موج در تک درزه به وسیله موج مایل 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 به 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 یک هشتم طول موج باشد (Itasca, 2004)، که در این مطالعه یک دهم طول موج در نظر گرفته شده است یعنی:

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

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

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

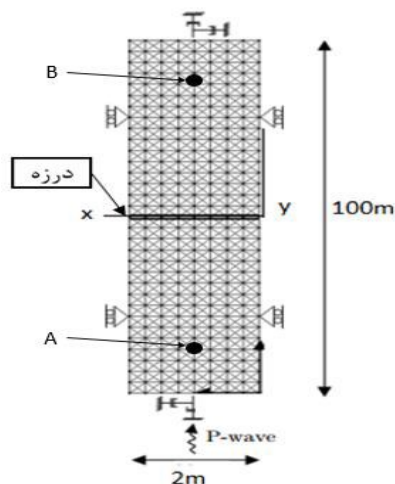
که در آن V سرعت انتشار موج P در محیط و f فرکانس موج ورودی است. این مدل‌سازی شامل مراحل مختلفی مانند

<sup>۱۰</sup> Cundall

<sup>۱۱</sup> Hart

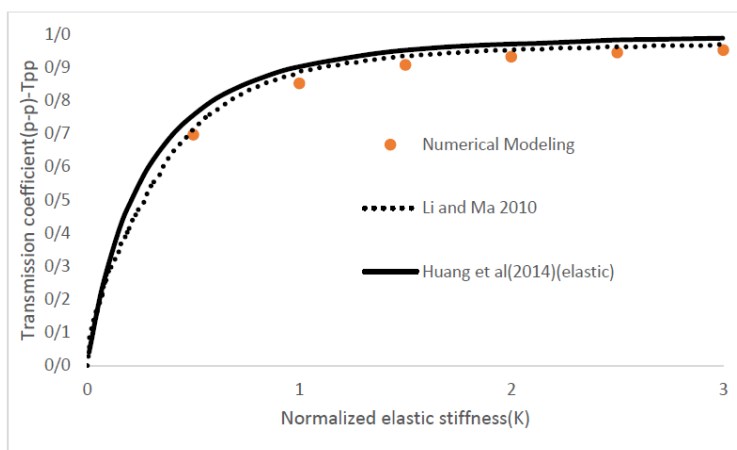
<sup>۱۲</sup> Lemos

سختی درزه نرمال شده است. این شکل نشان‌دهنده این است که با افزایش سختی درزه نرمال شده، مقدار ضریب عبوری افزایش پیدا می‌کند. سختی درزه نرمال شده در واقع همان سختی درزه‌ها است و از رابطه سختی درزه بر امپدانس در فرکانس زاویه‌ای به دست می‌آید. بر اساس روابط موجود مقدار سختی درزه‌ها بین ۱ تا ۱۴/۵ گیگاپاسکال متغیر است و مقدار سختی درزه نرمال شده تا مقدار ۳ بررسی شده است. نرخ افزایش برای مقادیر سختی درزه نرمال شده تا ۱ قابل توجه بوده درحالی‌که روند افزایش ضریب عبوری در سختی درزه نرمال شده بیشتر از ۱، بسیار کمتر است. همچنین برای بررسی صحت نتایج مدل‌سازی و مقایسه نتایج مدل‌سازی با روش‌های تحلیلی، نتایج مدل‌سازی عددی و دو روش تحلیلی لی و ما و هوانگ و همکارانش (*Li and Ma, 2010; Huang et al., 2014*) به‌طور هم‌زمان در نمودار آورده شده است. چنانچه در شکل ملاحظه می‌شود یک همبستگی قابل قبول بین نتایج به دست آمده از مدل‌سازی عددی و روش‌های تحلیلی مذکور وجود دارد.



شکل ۱. هندسه و شرایط مرزی مدل *UDEC* برای انتشار موج *P* در محیط سنگی تک درزه

بر اساس رابطه طول موج ۱۱۶/۶ متر به دست آمده است، در نتیجه اندازه مش باید کمتر از ۱۱ متر باشد. در این مقاله اندازه مش ۰/۸ اختیار شده است. شکل (۲) نشان‌دهنده مقدار ضریب عبوری در تک درزه برای موج *P* بر اساس تابعی از

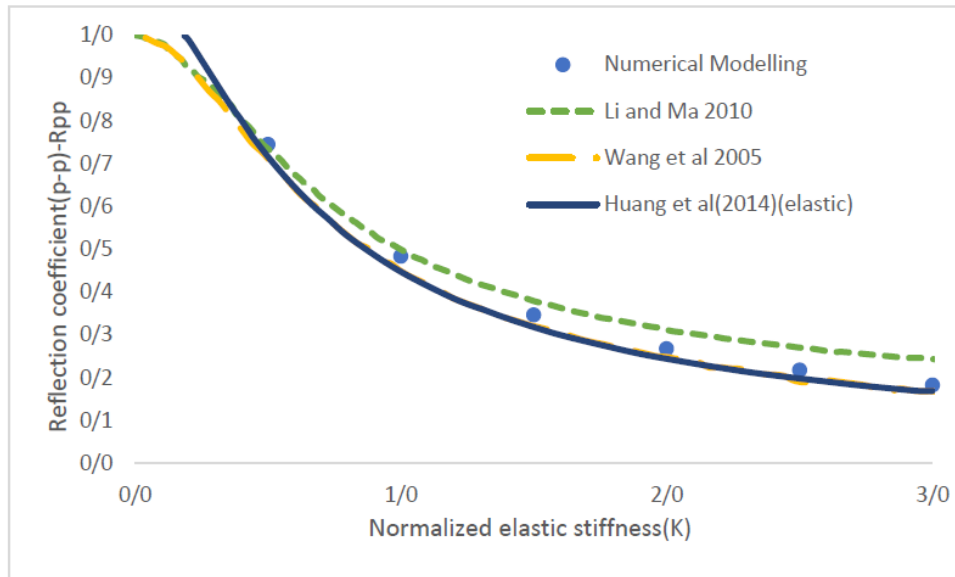


شکل ۲. بررسی عددی تأثیر سختی الاستیک نرمال شده بر موج عبوری عمودی *P* در محیط تک درزه و مقایسه با روش‌های تحلیلی

یک همبستگی مطلوب بین نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی و چندین روش تحلیلی وجود دارد. بر این اساس قابلیت *UDEC* برای مطالعه انتشار موج *p* می‌تواند مورد تأیید ارزیابی شود.

شکل (۳) مقدار ضریب بازگشتی در تک درزه برای موج ورودی عمودی *P* بر اساس تابعی از سختی درزه نرمال نشان می‌دهد. نتایج بیانگر آن است که با افزایش سختی درزه نرمال شده مقدار ضریب بازگشتی کاهش می‌یابد. در این شکل نیز

مطالعه انتشار موج  $P$  در توده سنگ درزه دار دارای تک درزه و چند درزه موازی با استفاده از مدل سازی عددی



شکل ۳. بررسی عددی تأثیر سختی الاستیک نرمال شده بر موج بازگشتی عمودی  $P$  در محیط تک درزه و مقایسه با روش های تحلیلی

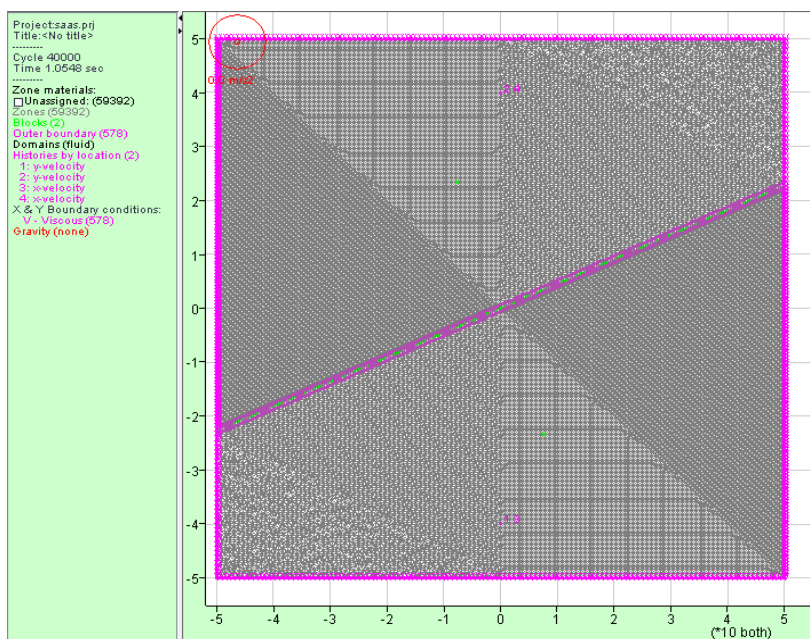
هندسه مدل ایجاد شده دارای طول ۱۰۰ متر و عرض آن ۱۰۰ متر بوده و نسبت طول به عرض ۱ است. در این مدل، موج ورودی در مرز پایین اعمال شده و انتشار در راستای درزه موازی در جهت  $Y$  است. برای جلوگیری از بازتاب موج مرزهای جاذب در مرز بالا و پایین و چپ و راست تعریف شده است. امواج بازگشتی و عبوری در دونقطه (نقطه  $A$  در  $y=-40$  و نقطه  $B$  در  $y=40$ ) اندازه گرفته می شوند.

صفحه مختصات  $x-y$  در مرکز مدل قرار داشته و تک درزه در مختصات  $y=0$  واقع شده و زاویه ورودی نیز  $24/48$  درجه در نظر گرفته شده است. تصویری از مدل عددی که بیانگر مدل سازی تحت شرایط و توضیحات فوق است، در شکل (۴) نشان داده شده است.

### ۲.۳ بررسی انتشار موج $P$ مایل ورودی به درزه

از آنجائی که در هنگام برخورد یک موج مایل به تک درزه، 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.

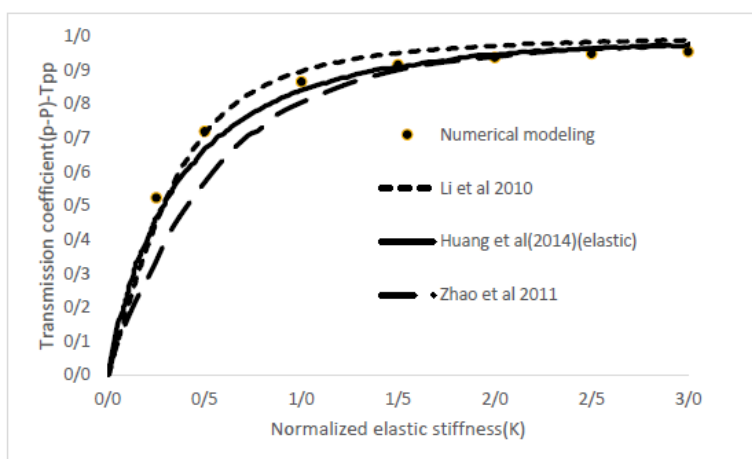
دلیل این تفاوت این است که مدل میله ای یا آزمایشگاهی برای بررسی انتشار موج مایل مناسب نیست. زیرا هنگامی که یک موج  $P$  به تک درزه مایل انتشار می یابد، موج مایل  $P$  و  $S$  ایجاد شده همپوشانی دارند. بر همین اساس انتشار موج برای شبیه سازی اثر زاویه ورودی مناسب نیست.



شکل ۴. هندسه مدل عددی برای انتشار موج ورودی مایل  $P$  با زاویه ورودی  $24/48$

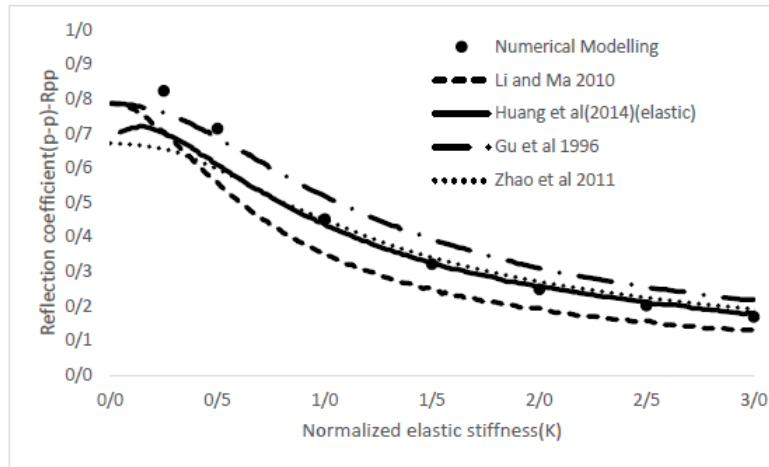
موج بازگشتی و ضریب عبوری نشان داده شده است. طبق این شکل می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش سختی درزه نرمال شده ضریب موج بازگشتی کاهش می‌یابد. در این شکل برای سختی الاستیک نرمال شده بیشتر از ۱ بین نتایج عددی و نتایج ژائو و همکاران (۲۰۱۱) یک همبستگی نزدیکی وجود دارد. اما برای سختی نرمال شده کمتر از ۱ نتایج عددی به مطالعات لی و ما (Li and Ma, 2010) نزدیک‌تر است.

در شکل (۵) تأثیر سختی الاستیک نرمال شده بر موج عبوری و مقایسه آن با چندین روش تحلیلی 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 است. برای سختی الاستیک نرمال شده بین مطالعه عددی و روش‌های تحلیلی همبستگی خوبی وجود دارد. در شکل (۶) تأثیر سختی الاستیک نرمال شده بر



شکل ۵. بررسی عددی تأثیر سختی الاستیک نرمال شده بر موج عبوری و مقایسه با روش‌های تحلیلی

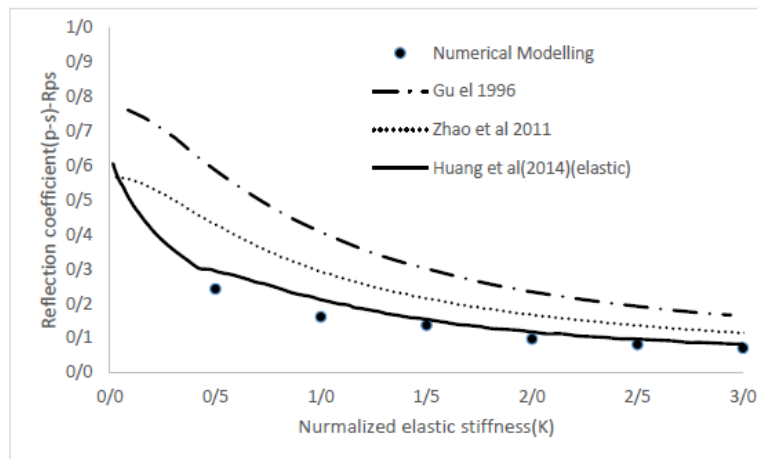
مطالعه انتشار موج P در توده سنگ درزه دار دارای تک درزه و چند درزه موازی با استفاده از مدل سازی عددی



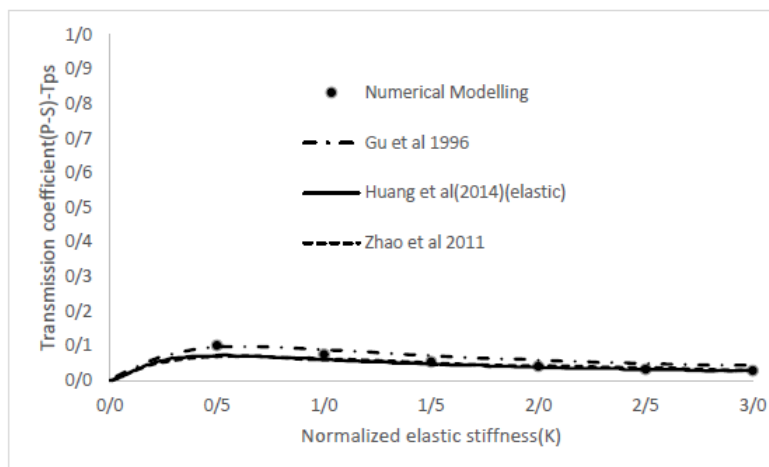
شکل ۶. بررسی عددی تأثیر سختی الاستیک نرمال شده بر موج بازگشتی و مقایسه با روش های تحلیلی

سختی الاستیک نرمال شده بر موج عبوری تبدیلی را نشان می دهد. این نتیجه بیانگر آن است که با افزایش سختی الاستیک نرمال شده ابتدا ضریب موج عبوری تبدیلی افزایش پیدا می کند تا به یک مقدار حداکثر می رسد و سپس کاهش پیدا می کند. در این نتیجه نیز بین نتایج عددی و روش های تحلیلی بررسی شده همبستگی مطلوبی وجود دارد.

در شکل (۷) نیز تأثیر سختی الاستیک نرمال شده بر موج بازگشتی تبدیلی را نشان می دهد. این نتیجه بیانگر آن است که با افزایش سختی نرمال شده موج بازگشتی تبدیلی کاهش پیدا می کند. همچنین برای سختی نرمال شده بیشتر از ۱ بین نتایج عددی و مطالعه پژوهشگران قبلی ارتباط خوبی وجود دارد. اما برای سختی نرمال شده کمتر از ۱ بین نتایج عددی و روش های عددی اختلاف وجود دارد. در شکل (۸) نیز تأثیر



شکل ۷. بررسی عددی تأثیر سختی الاستیک نرمال شده بر موج بازگشتی تبدیلی و مقایسه با روش های تحلیلی

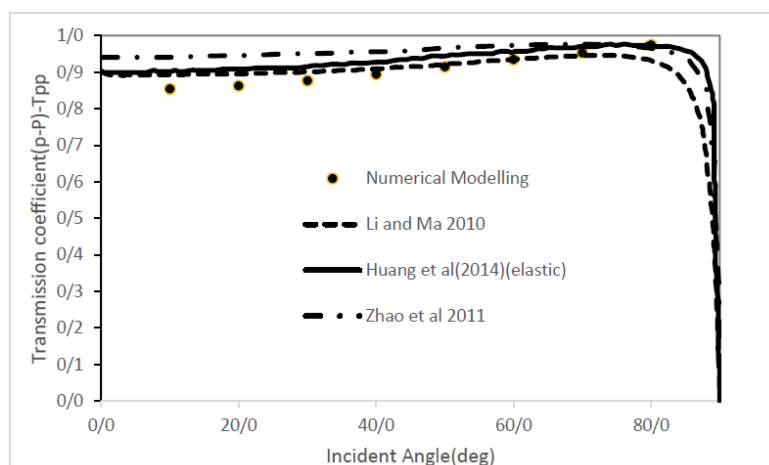


شکل ۸. بررسی عددی تأثیر سختی الاستیک نرمال شده بر موج عبوری تبدیلی و مقایسه با روش‌های تحلیلی

زاویه‌داری درزه‌ها موج عبوری افزایش پیدا کرده، و زمئی که زاویه به ۹۰ درجه می‌رسد، موج عبوری دیگر وجود نخواهد داشت. مطابق نمودار همچنین نرخ افزایش ضریب بازتاب کم بوده و افزایش چشمگیری وجود ندارد. همچنین نتایج عددی با چندین روش تحلیلی بررسی شده تطابق خوبی دارد که بیانگر تأیید صحت نتایج است.

### ۳.۳ تأثیر زاویه‌داری درزه‌ها بر انتشار موج

به‌منظور ارزیابی عددی تأثیر زاویه‌داری درزه‌ها بر انتشار موج مقدار سختی الاستیک نرمال شده برابر یک در نظر گرفته شده است. در شکل‌های (۹) تا (۱۲) تأثیر زاویه‌داری درزه‌ها بر انتشار موج نشان داده شده است. شکل (۹) تأثیر زاویه‌داری درزه بر موج عبوری را نشان می‌دهد. مطابق شکل با افزایش



شکل ۹. تأثیر زاویه‌داری درزه‌ها بر موج عبوری و مقایسه با روش‌های تحلیلی

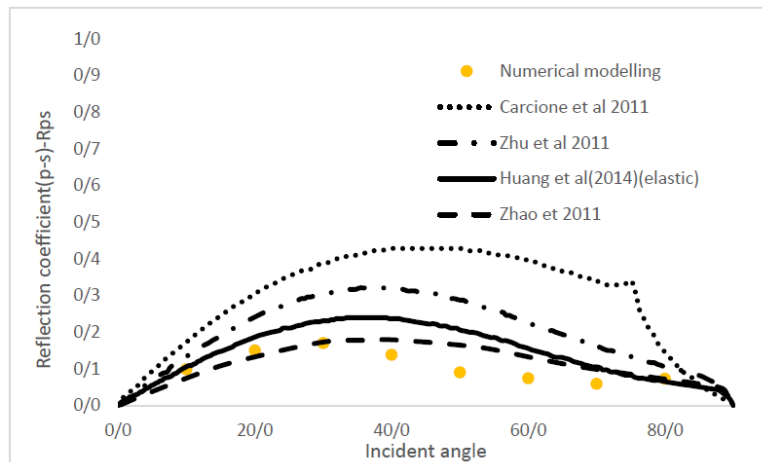
در این نتیجه نیز تطابق مطلوبی بین نتیجه عددی و روش‌های تحلیلی وجود دارد. شکل (۱۱) تأثیر زاویه‌داری درزه‌ها بر موج عبوری تبدیلی را نشان می‌دهد. این نتیجه بیانگر آن است که ابتدا با افزایش زاویه‌داری درزه‌ها موج عبوری تبدیلی افزایش

در شکل (۱۰) تأثیر زاویه‌داری بر ضریب موج بازگشتی تبدیلی نشان داده شده است. همچنان که از روی شکل پیداست با افزایش زاویه‌داری درزه‌ها ابتدا موج بازگشتی تبدیلی افزایش پیدا کرده و پس از زاویه حدود ۴۰ درجه کاهش پیدا می‌کند.

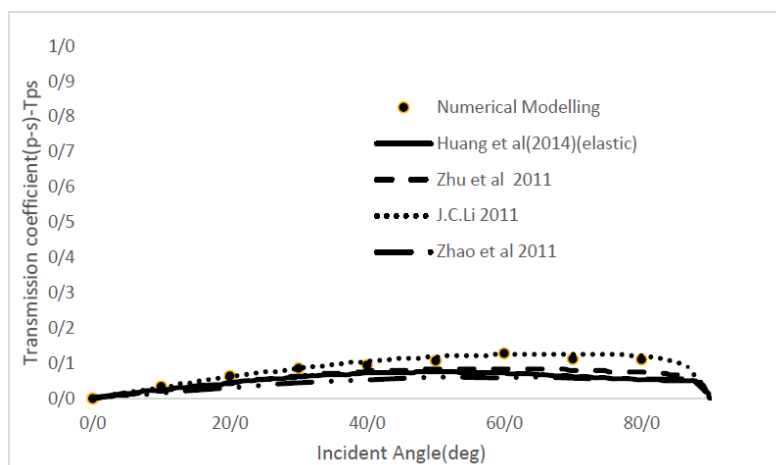


مطالعه انتشار موج  $P$  در توده سنگ درزه دار دارای تک درزه و چند درزه موازی با استفاده از مدل سازی عددی

داشته و سپس کاهش می یابد. تأثیر زاویه داری درزه ها بر موج عبوری تبدیلی و همچنین دامنه تغییرات آن بسیار کم است



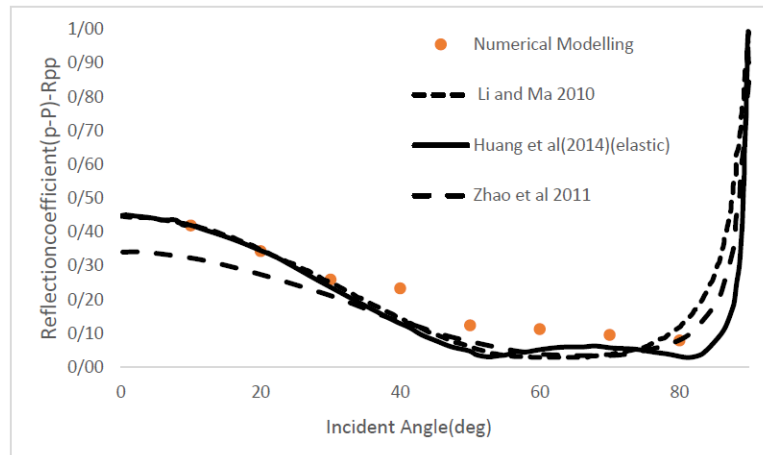
شکل ۱۰. تأثیر زاویه داری درزه ها بر موج بازگشتی تبدیلی و مقایسه با روش های تحلیلی



شکل ۱۱. تأثیر زاویه داری درزه ها بر موج عبوری تبدیلی و مقایسه با روش های تحلیلی

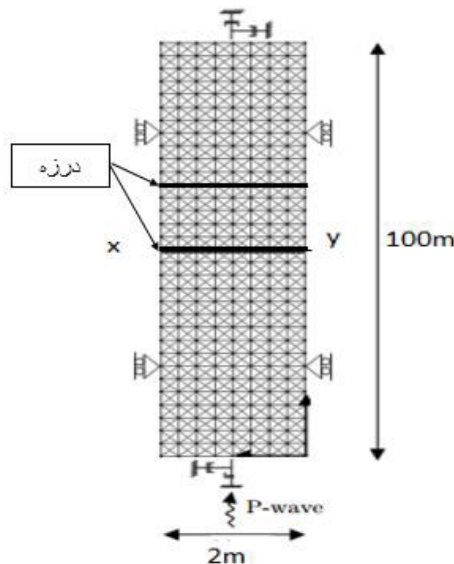
موج های تبدیلی برابر صفر است و بیشتر موج ورودی عبور خواهد کرد، در حالی که در زاویه ۹۰ درجه، تمام امواج عبوری، بازگشتی تبدیلی و عبوری تبدیلی برابر صفر خواهد شد و تمام موج ورودی، بازگشت می کند.

شکل (۱۲) تأثیر زاویه داری درزه ها بر موج عبوری بازگشتی را نشان می دهد. با توجه به شکل با افزایش زاویه داری درزه، ابتدا موج بازگشتی کاهش یافته تا به یک مقدار ثابت می رسد و سپس افزایش می یابد. نتایج نشان دهنده این است که در زاویه صفر درجه تنها موج های بازگشتی و عبوری وجود دارد و



شکل ۱۲. تأثیر زاویه‌داری درزه‌ها بر موج بازگشتی با استفاده از مدل‌سازی عددی و مقایسه با روش‌های تحلیلی

جابجایی در جهت  $X$  در مرزهای چپ و راست محدود شده است، درحالی‌که در جهت  $Y$  آزاد است. امواج بازگشتی و عبوری در دو نقطه (نقطه  $A$  در  $\gamma = -40$  و نقطه  $B$  در  $\gamma = 40$ ) اندازه گرفته می‌شوند. سپس یک موج سینوسی با دامنه واحد به عنوان موج ورودی اعمال می‌شود که فرکانس موج سینوسی ۵۰ هرتز است.



شکل ۱۳. هندسه و شرایط مرزی مدل  $UDEC$  برای انتشار موج  $P$  در محیط سنگی دو درزه

#### 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 ارزیابی انتشار موج از چند درزه موازی صورت می‌پذیرد؛ و در این ارتباط تأثیر پارامترهای فاصله‌داری نرمال شده درزه‌ها و تعداد درزه‌ها بر انتشار موج بررسی می‌شوند.

#### ۱.۴ مدل‌سازی عددی انتشار موج از چند درزه موازی

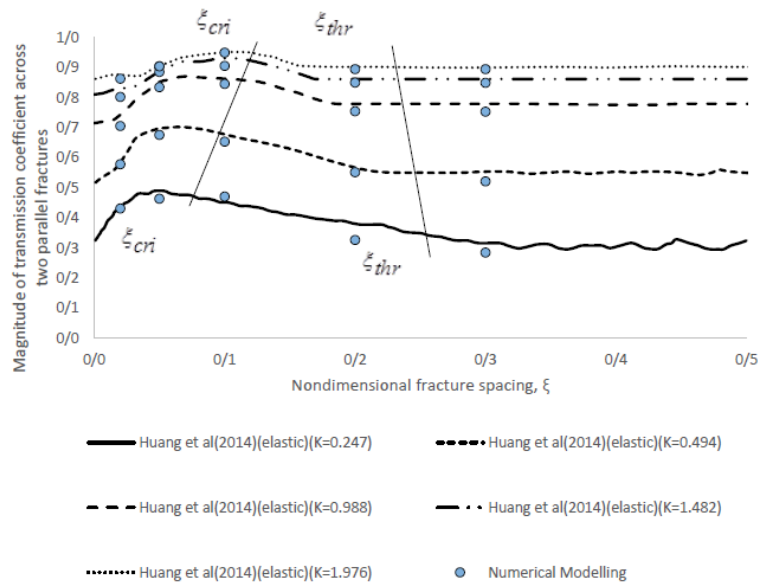
برای مدل‌سازی انتشار موج از چند درزه موازی با نرم‌افزار  $UDEC$ ، طول مدل ساخته شده ۲ متر و عرض آن ۱۰۰ متر بوده و نسبت طول به عرض ۲ به ۱۰۰ است. مختصات صفحه  $x-y$  در مرکز مدل قرار داشته و اولین درزه در مختصات  $y=0$  و درزه‌های دیگر بر اساس فاصله‌داری درزه نرمال شده از مدل قرار خواهند داشت. در شکل (۱۳) تصویری از مدل که نشان‌دهنده دو درزه و شرایط مرزی است، 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 آنجایی که موج ورودی موج  $P$  است،

مطالعه انتشار موج  $P$  در توده سنگ درزه دار دارای تک درزه و چند درزه موازی با استفاده از مدل سازی عددی

فاصله داری بحرانی  $(\xi_{cri})$  و دیگری نسبت فاصله داری آستانه  $(\xi_{thr})$  است. نسبت فاصله داری آستانه  $(\xi_{thr})$  مقداری است که بعد از این مقدار، ضریب عبوری تغییر چندانی نمی کند در حالی که نسبت فاصله داری بحرانی  $(\xi_{cri})$  نسبت فاصله داری است که بیشترین مقدار موج عبوری رخ می دهد. مطابق با شکل (۱۴) نتایج مدل سازی انجام شده در  $UDEC$  در عبور موج  $P$  از درزه های مجزا با فاصله داری های مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. در این مدل سازی برای سختی های نرمال شده مختلف، ضریب عبوری برای عبور موج از دو درزه موازی به صورت تابعی از فاصله داری نرمال شده محاسبه شده است.

خصوصیات محیط توده سنگ دربرگیرنده همانند جدول (۱) است. در این مدل فاصله داری درزه برابر با  $S$  است و برای ارزیابی انتشار موج در چند درزه موازی به تأثیر فاصله داری نرمال شده بر انتشار موج بررسی می شود. فاصله داری نرمال درزه ها  $(\xi)$  نیز به صورت فاصله داری درزه ها بر طول موج  $(\xi = \frac{S}{\lambda})$  تعریف می شود که به آن فاصله داری نرمال شده می گویند.

۱.۱.۴ تأثیر فاصله داری نرمال شده درزه بر انتشار موج برای بررسی تأثیر فاصله داری ناپیوستگی ها بر موج عبوری ابتدا دو شاخص مهم  $\xi$  تعریف می شوند. اولین شاخص نسبت



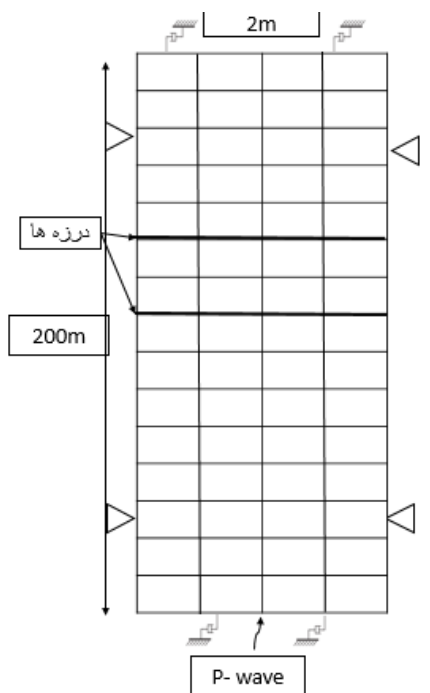
شکل ۱۴. بررسی تأثیر نسبت فاصله داری به طول موج بر مقدار موج عبوری در  $K$

این است که برهم کنش موج های رسیده در زمان های مختلف بر موج عبوری تأثیر ندارد. • زمانی که فاصله داری درزه ها از فاصله داری آستانه کمتر باشد، برهم کنش موج ها به طور واضح بر ضریب عبوری تأثیر می گذارد. برای فاصله داری های خیلی کم، مقدار ضریب عبوری با افزایش فاصله داری افزایش پیدا می کند تا به فاصله داری

مطابق سایر مدل های عددی، نتایج ضریب عبور موج به دست آمده از مدل سازی با نتایج به دست آمده از مطالعه تحلیلی هوانگ و همکارانش ( $Huang et al., 2014$ ) در شرایط الاستیک مقایسه شده است. نتایج عددی را می توان به طور خلاصه به صورت زیر بیان کرد:

• برای فاصله داری های بیشتر از فاصله داری آستانه، مقدار ضریب عبوری ثابت می ماند، که نشان دهنده

جابجایی‌ها نیز در جهت  $X$  از مرزهای چپ و راست محدود شده است. خصوصیات محیط دربرگیرنده همانند مطالعات بخش قبلی در جدول (۱) آورده شده است. در مدل‌سازی، سختی نرمال شده درزه‌ها نیز ثابت در نظر گرفته شده است که برابر  $K=1$  است و مقدار ضریب عبور موج برای  $N=2$  و  $N=4$  بررسی شده است.



شکل ۱۵. هندسه مختصات  $UDEC$  با دو درزه برای بررسی تعداد درزه‌ها بر انتشار موج  $P$

در شکل (۱۶) مقایسه بین نتایج روش عددی بررسی تأثیر تعداد درزه‌ها بر موج عبوری و روش تحلیلی هوانگ و همکاران (*Huang et al., 2014*) در شرایط الاستیک برای ضریب عبوری موج نشان داده شده است.

بحرانی می‌رسد و سپس با افزایش فاصله‌داری، مقدار ضریب عبوری کاهش پیدا می‌کند.

- 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:

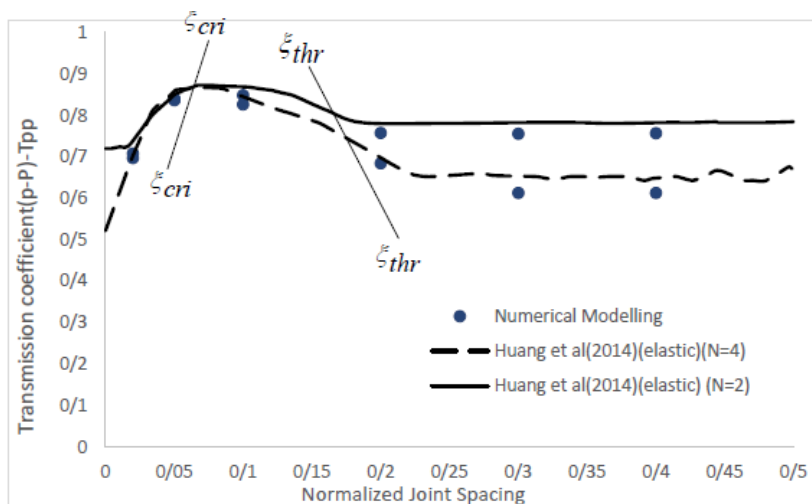
$$K_{ne} = \frac{K_n}{n} \quad (3)$$

همچنین این نتایج مبین آن است که یک همبستگی مطلوبی بین نتایج عددی و مطالعه آقای هوانگ و همکاران (*Huang et al., 2014*) وجود دارد و قابلیت  $UDEC$  در انتشار موج در توده سنگ با چند درزه موازی تأیید می‌شود.

#### ۲.۱.۴ تأثیر تعداد درزه‌ها بر انتشار موج

به منظور ارزیابی تعداد درزه‌ها بر انتشار موج، مدل ساخته شده به صورت شکل (۱۵) است. طول مدل ساخته شده ۲ متر و عرض آن ۱۰۰ متر بوده و نسبت طول به عرض، ۲ به ۱۰۰ است. دلیل این امر آن است که هر چقدر فاصله‌داری درزه نرمال شده و تعداد درزه‌ها افزایش یابد مدل ساخته شده برای بررسی تأثیر درزه‌ها بر انتشار موج باید بزرگ‌تر باشد. صفحه مختصات  $x-y$  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.

مطالعه انتشار موج P در توده سنگ درزه‌دار دارای تک درزه و چند درزه موازی با استفاده از مدل‌سازی عددی



شکل ۱۶. بررسی عددی تعداد درزه‌ها بر موج عبوری

خصوصیات درزه به خصوصیات محیط در برگیرنده نزدیک می‌شود، عبور موج بیشتر شده در حالی که موج بازگشتی کاهش پیدا می‌کند. همچنین نتایج حاصله بیانگر آن است که با افزایش سختی درزه نرمال شده، عبور موج افزایش پیدا کند، در حالی که از موج بازگشتی، کاسته می‌شود. علت این پدیده این است که شرایط درزه‌ها به شرایط محیط سنگ بکر نزدیک شده و بر همین اساس موج عبوری آن نیز افزایش پیدا می‌کند. در ارتباط با تبدیل موج نیز، ضریب عبوری تبدیلی ابتدا افزایش پیدا کرده و سپس کاهش می‌یابد، در حالی که موج بازگشتی کاهش می‌یابد. بر اساس مطالعات انجام گرفته در خصوص تأثیر زاویه ورودی بر انتشار موج، نتایج به دست آمده نشان دهنده آن است که با افزایش زاویه ورودی، ضریب بازگشتی ابتدا کاهش پیدا کرده و به یک مقدار ثابت رسیده 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 و تا یک مقدار بیشینه افزایش داشته و هر چقدر به سمت ۹۰ درجه و قائم میل کند، موج عبوری ظاهر نمی‌شود. در خصوص تبدیل موج نیز، ضریب بازگشتی با افزایش زاویه بر خورد 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 افزایشی تا رسیدن به یک مقدار حداکثر داشته و بعد از آن کاهش می‌یابد. بنابراین نتایج نشان دهنده آن است که با

نتایج به دست آمده از شکل مذکور را می‌توان به صورت زیر بیان نمود:

- در حالت کلی می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش تعداد درزه‌ها مقدار موج عبوری کاهش می‌یابد.
- در فاصله‌داری درزه‌های بیشتر از فاصله‌داری درزه آستانه، با افزایش تعداد درزه‌ها موج عبوری کاهش می‌یابد.
- در فاصله‌داری درزه‌های بیشتر از فاصله‌داری درزه آستانه، زمانی که تعداد درزه‌ها کم باشد، رابطه پیراک-نولت و همکارانش (Pyrak-Nolte et al., 1990) برقرار است. ولی برای تعداد درزه‌های زیاد مقدار ضریب عبوری از رابطه پیراک-نولت و همکاران بیشتر است.
- این نتایج حاکی از آن است که بین نتایج عددی محاسبه شده و نتایج تحلیلی یک مطابقت مطلوبی برقرار است.

##### ۵. نتیجه‌گیری

طبق نتایج به دست آمده از مدل‌سازی عددی در خصوص بررسی تأثیر سختی الاستیک نرمال شده درزه و زاویه ورودی بر انتشار می‌توان نتیجه گرفت که سختی الاستیک نرمالیزه درزه‌ها و زاویه ورودی به عنوان یکی از خصوصیات مهم درزه بر انتشار موج تأثیرگذار است و ضرایب بازگشت و عبوری از درزه‌ها تغییر خواهد کرد. نتایج گواه آن است که وقتی

مقدار شاخص آستانه و بحرانی نیز با تغییر مقدار سختی درزه نرمال شده تغییر می‌کند. 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 ( $|TN|$ ) تابعی از  $|T1|^N$  می‌شود که با مطالعه پیراک نولت و همکاران (Pyrak-Nolte, 1990) همخوانی و مطابقت دارد. اگر نسبت فاصله‌داری بین نسبت فاصله‌داری آستانه و بحرانی باشد، کاهش مقدار ضریب عبوری با  $N$  ضعیف خواهد بود و در نتیجه مقدار  $|TN|$  بزرگ‌تر از  $|T1|^N$  خواهد بود. هنگامی که نسبت فاصله‌داری از نسبت فاصله‌داری بحرانی کمتر است، مقدار ضریب عبوری  $|TN|$  با  $N$  ضعیف‌تر بوده و حتی به تعداد درزه‌ها نیز بستگی ندارد.

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. برای تأثیر فاصله‌داری درزه‌های موازی دو شاخص مهم، نسبت فاصله‌داری بحرانی و نسبت فاصله‌داری آستانه هستند. هنگامی که نسبت فاصله‌داری از نسبت فاصله‌داری آستانه بیشتر باشد، آنگاه مقدار ضریب عبوری مستقل از فاصله‌داری ناپیوستگی‌ها است. این نتیجه بیانگر آن است که امواج عبور شده در زمان‌های مختلف ناشی از بازتاب‌های موج متعدد بین درزه‌ها بر موج عبوری هیچ تأثیری ندارد. زمانی که نسبت فاصله‌داری از نسبت فاصله‌داری آستانه کمتر باشد برهمکنش موج‌ها ناشی از بازتاب موج متعدد بین درزه‌ها به طور واضح بر ضریب عبوری تأثیر می‌گذارند. اگر نسبت فاصله‌داری در بین نسبت فاصله‌داری بحرانی و آستانه باشد، آنگاه مقدار ضریب عبوری با افزایش فاصله بین ناپیوستگی‌ها کاهش پیدا می‌کند. در صورتی که فاصله‌داری درزه نرمال شده از نسبت فاصله‌داری بحرانی کمتر باشد، در این صورت مقدار ضریب عبوری با کاهش فاصله‌داری ناپیوستگی‌ها کاهش پیدا می‌کند.

## مراجع

- 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, 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.
- 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.
- Itasca, U.D.E.C., 2004. Version 4.0 user's manuals. *Itasca Consulting Group. Minneapolis, NM*.
- 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, 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., Ma, G. and Zhao, J., 2010. An equivalent viscoelastic model for rock mass with parallel joints. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 115(B3).
- Parastatidis, E., Hildyard, M.W. and Stuart, G.W., 2017, August. Modelling P-wave propagation in a medium with multiple parallel fractures and direct comparison with experimental recordings. In 51st US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium. American Rock Mechanics Association.
- 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*.
- 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.
- 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.
- 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., Zhu, J.B., Zhao, J. and Cai, J.G., 2011. 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.
- Zhan, Z. and Qi, S., 2017. Numerical Study on Dynamic Response of a Horizontal Layered-Structure Rock Slope under a Normally Incident  $S_v$  Wave. *Applied Sciences*, 7(7), p.716.
- 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.