

تحلیل حساسیت ویژگی ناپیوستگی‌ها در انتشار موج الاستیک در توده‌سنگ با استفاده از روش المان گسسته

محمد رضا همتی نورانی^۱؛ علیرضا یاراحمدی بافقی^{۲*}؛ احمد قربانی^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مکانیک سنگ، دانشگاه یزد، دانشکده معدن و متالورژی، Mr.Hemmati@outlook.com
۲- عضو هیئت علمی و دانشیار گروه استخراج معدن، دانشکده معدن و متالورژی، دانشگاه یزد، ayarahmadi@yazd.ac.ir
۳- عضو هیئت علمی و دانشیار گروه اکتشاف معدن، دانشکده معدن و متالورژی، دانشگاه یزد، aghorbani@yazd.ac.ir
(دریافت ۳ دی ۱۳۹۴، پذیرش ۸ اسفند ۱۳۹۵)

چکیده

سرعت و میرایی موج الاستیک در هنگام عبور از سنگ‌های درزه‌دار، یک مسأله‌ی مهم برای تعیین پایداری سازه‌های سنگی تحت بارهای دینامیکی در مهندسی سنگ است. آزمایش‌های لرزه‌ای خیلی مفید و کارآمدتر از هر آزمایش ژئوفیزیکی دیگری هستند که در توده‌سنگ انجام می‌شوند، این امر به این دلیل است که پارامترهای موج، نظیر سرعت موج فشاری، برشی و ضرایب میرایی، همگی به‌طور مستقیم با مقاومت و مدول الاستیسیته و به‌طور غیرمستقیم با چگالی، تخلخل و دیگر ویژگی‌های توده و ماده سنگ در ارتباط هستند. در این مطالعه، با استفاده از روش المان گسسته تأثیر ویژگی‌های توده‌سنگ، نظیر تعداد، سختی نرمال و برشی، جهت‌داری و فاصله‌داری درزه‌ها و همچنین ابعاد متوسط بلوک‌ها که به واسطه‌ی درزه‌ها ایجاد شده‌اند، روی سرعت انتشار موج الاستیک، ضرایب عبور و بازتاب بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد که کوچک‌ترین تغییرات در ویژگی‌های ناپیوستگی‌ها در سرعت و ضرایب عبور و بازتاب قابل مشاهده است، همچنین استفاده از مشخصه‌های میرایی در کنار مشخصه‌ی سرعت موج، می‌تواند بیان‌کننده‌ی تغییرات پارامترهایی باشد که روی سرعت موج تأثیرگذار نیستند، بنابراین این امکان وجود دارد که روش‌های ژئوفیزیکی لرزه‌ای در توده‌سنگ به‌عنوان یک ابزار کارآمد در ارزیابی کیفیت توده‌سنگ استفاده شود.

کلمات کلیدی

سرعت موج الاستیک، توده‌سنگ، المان گسسته، آنالیز حساسیت

۱- مقدمه

اغلب توده‌های سنگی شامل تعداد زیادی ناپیوستگی از قبیل درزه‌ها، گسل‌ها، ترک‌ها و میکروتِرک‌ها هستند. در اغلب موارد یک توده سنگ به قدری پیچیده است که توصیف آن با روش‌های معمول امکان‌پذیر نیست، در این موارد استفاده از روش‌های ژئوفیزیکی نظیر لرزه‌نگاری می‌تواند موجب افزایش اطلاعات ژئومکانیکی از توده سنگ شود. در این مطالعه، تأثیر ناپیوستگی‌ها در انتشار موج فشاری، با استفاده از کدهای المان گسسته‌ی دوبعدی (UDEEC) و سه‌بعدی (3DEC) بررسی شده‌اند. هدف از این مطالعه، تخمین میرایی و سرعت موج فشاری طی عبور از توده سنگ درزه‌دار با تمرکز بر تأثیر پارامترهای درزه‌داری است. سرعت امواج لرزه‌ای در سنگ‌های درزه‌دار، ضعیف و یا گسل‌ها در مقایسه با سنگ سالم کمتر است، بنابراین سرعت امواج لرزه‌ای می‌تواند به‌عنوان یکی از شاخص‌های طبقه‌بندی مورد استفاده قرار گیرد. همچنین، سنگ‌های هوازده و خردشده نسبت به سنگ‌های سالم موجب میرایی قابل توجهی در امواج لرزه‌ای می‌شوند. میرایی خیلی بیشتر از سرعت انتشار امواج لرزه‌ای در برابر خواص فیزیکی توده سنگ حساس است [۱]. علاوه بر این، معیارهای شکست برای توده‌سنگ‌های تحت بار دینامیکی، بر اساس دامنه‌های موج، نظیر حداکثر جابجایی، حداکثر سرعت ذرات^۱ (PPV) و حداکثر شتاب ذرات^۲ (PPA)، عمل می‌کنند [۲]، بنابراین آگاهی از نحوه‌ی انتشار امواج الاستیک در توده سنگ کمک شایانی در شناخت رفتار دینامیکی توده سنگ خواهد داشت.

مطالعات تئوری و عددی زیادی در ارتباط با تأثیر تعداد درزه، در انتشار موج فشاری انجام شده است، در اکثر این مطالعات، درزه‌ها در جهت عمود بر انتشار موج قرار گرفته‌اند، از جمله مطالعاتی که در این زمینه انجام شده است، عبارت‌اند از مطالعه‌ی لی^۳ و همکاران (۲۰۰۷) که تأثیر یک دسته‌درزه، شامل درزه‌های موازی در جهت عمود بر انتشار موج را با استفاده از روش المان گسسته بررسی کرده‌اند، مطالعات پرینو^۴ و همکاران (۲۰۱۰)، ژائو^۵ و همکاران (۲۰۰۶) و لی و همکاران (۲۰۱۰)، که

به‌صورت تئوری، تأثیر تعداد درزه بر روی سرعت انتشار موج را بررسی کرده‌اند، در تمامی مطالعات فوق با افزایش تعداد ناپیوستگی‌ها، از سرعت موج کاسته شده است [۶-۳]. مطالعاتی نیز در ارتباط با بررسی تأثیر سختی ناپیوستگی در انتشار موج فشاری انجام شده است، از جمله مطالعاتی که در این زمینه می‌توان به آن‌ها اشاره کرد، عبارت‌اند از: مطالعه‌ی ونگ^۶ و همکاران (۲۰۰۶) و پرینو و همکاران (۲۰۱۰) که به ترتیب با استفاده از روش المان گسسته و روش‌های تئوری به بررسی تأثیر سختی ناپیوستگی در ضرایب عبور و بازتاب پرداخته‌اند، نتایج این مطالعات حاکی از آن است که با افزایش سختی قائم ناپیوستگی، ضریب T افزایش و ضریب R کاهش می‌یابد [۷،۸]. یکی از پارامترهای تأثیرگذار در انتشار موج الاستیک، جهت‌داری ناپیوستگی‌ها است. از مطالعاتی که می‌توان در این زمینه به آن‌ها اشاره کرد، مطالعه‌ی تئوری کوفی^۷ و تیموثی^۸ (۱۹۹۶) در ارتباط با تأثیر ناپیوستگی در انتشار موج فشاری است که به دو صورت تجربی و عددی انجام شده است. مورد دیگر، مطالعه‌ی اظهاری و همکاران (۲۰۱۳) در ارتباط با بررسی آزمایشگاهی تأثیر زاویه‌ی برخورد موج نسبت به سطح ناپیوستگی بر روی سرعت موج فشاری است، نتایج هر دو مطالعه‌ی فوق، حاکی از آن است که با کاهش زاویه‌ی برخورد موج نسبت به سطح ناپیوستگی، سرعت موج فشاری افزایش می‌یابد [۹،۱۰].

در ادامه میزان تأثیر هر یک از پارامترهای مهم توده‌سنگ نظیر تعداد، سختی، جهت‌داری و فاصله‌داری درزه‌ها و همچنین ابعاد متوسط بلوک‌هایی که به واسطه‌ی درزه‌ها ایجاد شده‌اند، روی سرعت انتشار موج فشاری، ضرایب عبور و بازتاب بررسی شده است، نتایج نشان می‌دهد که سرعت موج و ضرایب عبور و بازتاب همگام با تغییرات پارامترهای ذکر شده تغییر می‌کنند و در مورد پارامترهایی که تغییرات آن‌ها در سرعت موج بی تأثیر است، ضرایب R و T در برابر این تغییرات واکنش نشان می‌دهند، بنابراین استفاده از مشخصه‌های میرایی در کنار سرعت موج، موجب می‌شود تا ارزیابی کامل‌تری از توده‌سنگ انجام شود.

$$Z = \rho \cdot V_p \quad (5)$$

۳- تأثیر تعداد درزه در انتشار موج فشاری

در این بخش، تأثیر چگالی یا تعداد درزه روی سرعت و ضرایب گذر (T) و بازتاب (R) با استفاده از نرم‌افزار 3DEC بررسی شده است، هندسه‌ی مدل مطابق شکل ۱ یک تیر سنگی به ابعاد ۳۰۰ متر طول، ۲۰ متر عرض و ۲۰ متر ارتفاع است، که مرزها در هر دو انتهای مدل، برای جلوگیری از بازتاب موج، ویسکوز و مرزهای جانبی برای شبیه‌سازی بی‌نهایت بودن زمین، در جهت انتشار موج، آزاد و در جهت بردار نرمال صفحه‌ی مرز، ثابت در نظر گرفته شد. یک درزه در نقطه‌ی (۰,۰,۰) واقع در مرکز مدل ایجاد شده و سپس، تا ۲۱ درزه به صورت متقارن نسبت به درزه‌ی اول با فاصله‌داری یکسان و برابر با ۳ متر، در جهت عمود بر انتشار موج تولید شد. خواص مکانیکی مدل نیز به شرح جدول ۱ است.

یک پالس تنش (Syy) با دامنه‌ی یک مگا پاسکال به صورت نیمه سینوسی در راستای محور Y به صفحه‌ی $Y = -150$ وارد می‌شود، دو نقطه نیز جهت نمایش تنش و سرعت در نقاط $A(-10, 120, 10)$ و $B(10, 120, 10)$ در نظر گرفته شده است تا تغییرات سرعت و تنش موج ورودی و خروجی را نسبت به زمان ثبت کنند، علاوه بر این، نقاطی بین هر دو ناپیوستگی جهت اندازه‌گیری تنش و سرعت ذرات (PPV) تعبیه شد.

مطابق با تئوری انتشار امواج الاستیک، سرعت انتشار موج فشاری در محیط الاستیک، قبل و بعد از عبور از ناپیوستگی با استفاده از رابطه‌ی ۶ قابل محاسبه است [۱۲].

$$V_{pi} = \frac{\sigma_i}{\rho v_i}; i = I, T, R \quad (6)$$

در اینجا، V_{pi} سرعت موج فشاری برحسب متر بر ثانیه، ρ دانسیته‌ی محیط برحسب کیلوگرم بر مترمکعب، σ_i تنش موج برحسب پاسکال و v_i سرعت ذرات محیط در

۲- انتشار موج الاستیک

هنگامی که یک موج تنش در توده‌سنگ منتشر می‌شود، علاوه بر میرایی هندسی و جرمی، بخش اعظم دامنه‌ی موج بر اثر حضور ناپیوستگی‌ها میرا شده و از سرعت ذرات کاسته می‌شود. هنگامی که یک تکانه به مرز یک توده‌سنگ وارد می‌شود، هر یک از امواج فشاری و برشی به ترتیب با سرعت V_P و V_S در ماده سنگ منتشر می‌شوند که به ترتیب از روابط ۱ و ۲ قابل محاسبه هستند [۱۱].

$$V_p = \sqrt{\frac{K + \frac{4}{3}G}{\rho}} \quad (1)$$

$$V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (2)$$

در اینجا، K و G به ترتیب مدول بالک و برشی برحسب پاسکال و ρ دانسیته‌ی ماده سنگ برحسب کیلوگرم بر مترمکعب است.

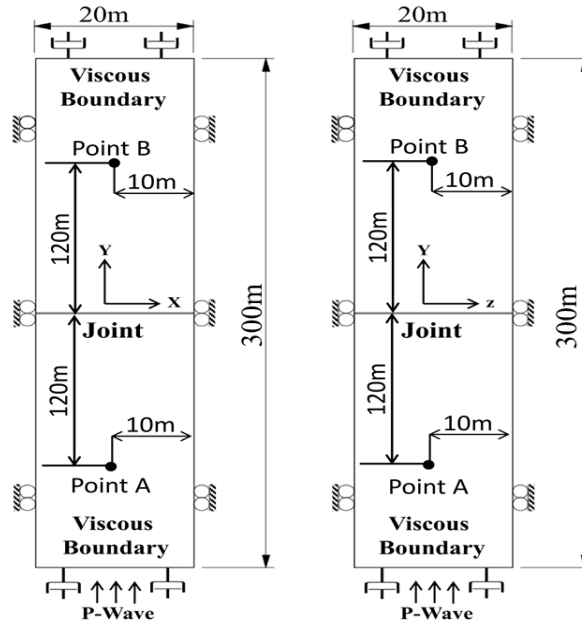
هنگامی که موج به مرز ناپیوستگی می‌رسد بخشی از دامنه‌ی موج از ناپیوستگی عبور کرده و بخشی از آن بازتاب می‌کند، بنابراین ضرایبی تحت عنوان ضرایب گذر^۹ و بازتاب^{۱۰} برای این مسئله مطرح می‌شود، برای حالتی که موج عمود بر صفحه‌ی درزه باشد و مدل رفتاری درزه الاستیک خطی باشد ضرایب گذر (T) و بازتاب (R) برای موج فشاری، به صورت زیر تعریف می‌شوند [۱۱]:

$$|T| = \left[\frac{4 \left(\frac{k_n}{z\omega} \right)^2}{4 \left(\frac{k_n}{z\omega} \right)^2 + 1} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

$$|R| = \left[\frac{1}{4 \left(\frac{k_n}{z\omega} \right)^2 + 1} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

در اینجا، k_n سختی نرمال درزه برحسب پاسکال بر متر و Z امپدانس مواد است که از رابطه‌ی ۵ حاصل می‌شود.

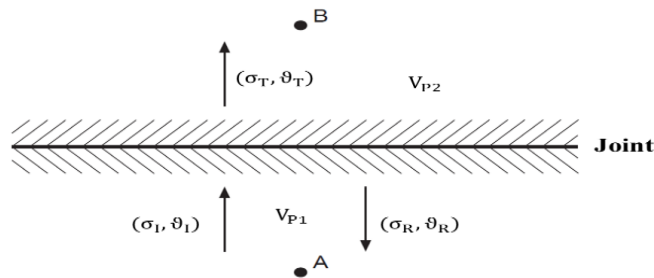
راستای محور Y برحسب متر بر ثانیه است، که مطابق با شکل ۲ برای سه حالت موج برخورد (I)، موج عبوری (T) و موج بازتابی (R) قابل محاسبه است.



شکل ۱: مشخصات هندسی و مرزهای مدل تعریف شده در 3DEC

جدول ۱: خواص مکانیکی مدل المان گسسته در 3DEC

مقدار	نماد و واحد	خواص مکانیکی
۲۶۵۰	ρ (kg.m^{-3})	دانسیته
۱۶/۷	K (GPa)	مدول بالک
۱۰/۲	G (GPa)	مدول برشی
۳۳۷۹	V_P (m.s^{-1})	سرعت موج فشاری
۱۹۳۹	V_S (m.s^{-1})	سرعت موج برشی
۱۲	k_n (GPa.m^{-1})	سختی نرمال ناپیوستگی
۱۰	k_s (GPa.m^{-1})	سختی برشی ناپیوستگی
۲	C_j (MPa)	چسبندگی ناپیوستگی
۲۰	ϕ_j (Degrees)	زاویه اصطکاک ناپیوستگی
۲	σ_t (MPa)	مقاومت کششی ناپیوستگی



شکل ۲: عبور و بازتاب موج فشاری از ناپیوستگی

درزه، با فاصله‌داری ۳ متر، در جدول ۲ آورده شده است.

نمودار شکل‌های ۳ الی ۵ بیانگر این است که با افزایش تعداد درزه‌ها، سرعت انتشار موج فشاری به‌طورکلی کاهش می‌یابد ولی کاهش سرعت، هنگامی که تعداد درزه‌ها بیش از ۵ عدد باشد، به‌صورت خطی است؛ ضریب T نیز با افزایش تعداد درزه‌ها ابتدا کاهش یافته و سپس، تقریباً به مقدار ثابتی می‌رسد و در مقابل، ضریب R نیز ابتدا افزایش یافته و سپس، تقریباً به مقدار ثابتی می‌رسد.

۴- تأثیر ضرایب سختی ناپیوستگی در انتشار موج فشاری

ضرایب سختی قائم و برشی از پارامترهایی هستند که به‌شدت در انتقال موج تنش در توده‌سنگ‌های درزه‌دار مؤثرند [۱۴]، با این حال، تعیین این ضرایب در حالت بزرگ‌مقیاس امکان‌پذیر نیست و اغلب سختی قائم و برشی را مساوی و در محدوده‌ی ۱ تا ۱۰۰ گیگا پاسکال در نظر می‌گیرند [۱۵]. در حالتی که صفحه‌ی ناپیوستگی عمود بر جهت انتشار موج فشاری باشد، فقط سختی قائم، و در غیر این صورت هر دو پارامتر سختی قائم و برشی در عبور موج تنش، مؤثر خواهند بود. سختی قائم و برشی وابسته به نوع ماده‌ی پرکننده، هوازدگی، زاویه‌ی اصطکاک و حتی زبری سطح درزه هست، بدین ترتیب، آگاهی از سختی قائم و برشی تا حد زیادی وضعیت سطح درزه را آشکار خواهد کرد.

در این بخش با تغییرات سختی قائم ناپیوستگی بین مقادیر صفر الی ۱۲ گیگا پاسکال، تغییرات سرعت انتشار موج فشاری و ضرایب T و R به دو روش تحلیلی (روابط ۳ و ۴) و عددی (روابط ۹ الی ۱۱) بررسی شد که نتایج آن در جدول ۳ آورده شده است،

با استفاده از رابطه‌ی ۶ می‌توان سرعت متوسط عبوری از توده‌سنگ را به‌صورت رابطه‌ی ۷ تعریف کرد.

$$V_p = \frac{\sum_{i=1}^n L_i}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{L_i}{V_{pi}}\right)} \quad (7)$$

در اینجا، L فاصله‌ی بین مرز تا ناپیوستگی یا فاصله‌ی بین هر دو ناپیوستگی و V_p نیز، سرعت موج فشاری بین مرز تا ناپیوستگی یا بین هر دو ناپیوستگی است. اگر معادله‌ی سرعت ذرات موج فشاری به‌صورت زیر باشد:

$$\theta_n(t) = \begin{cases} I \sin(\omega t), & 0 \leq t \leq \pi/\omega \\ 0, & \text{others} \end{cases} \quad (8)$$

مطابق با نظر میلر^{۱۱} (۱۹۷۸) ضرایب T و R به‌صورت زیر قابل محاسبه خواهند بود [۱۳]:

$$|T| = \sqrt{\frac{E_T}{E_I}} \cong \frac{PPV_T}{PPV_I} \quad (9)$$

$$|R| = \sqrt{\frac{E_R}{E_I}} \cong \frac{PPV_R}{PPV_I} \quad (10)$$

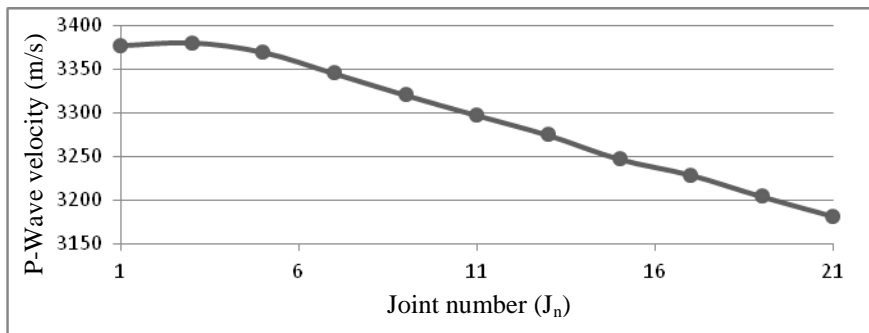
در اینجا I ، ماکزیمم سرعت ذرات^{۱۲} (PPV) ، ω ، فرکانس زاویه‌ای و t ، زمان است. E_I ، E_T و E_R به ترتیب انرژی موج برخورد، انرژی موج عبوری و انرژی موج بازتابی هستند که از رابطه‌ی ۱۱ قابل محاسبه هستند.

$$E_i = \int_{t_1}^{t_1 + \left(\frac{\delta}{2}\right)} Z \theta_n^2 dt; i = I, T, R \quad (11)$$

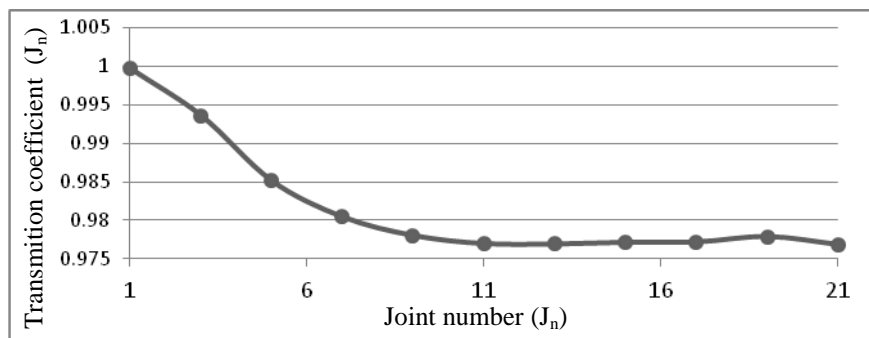
در اینجا δ ، دوره‌ی تناوب موج، θ_n ، سرعت ذرات محیط در راستای y ، و Z امپدانس مواد است، که از رابطه ۵ حاصل می‌شود. نتایج مطالعه با روش المان گسسته روی سرعت و ضرایب T و R نسبت به تعداد

جدول ۲: تغییرات سرعت و ضرایب R و T در مقابل تغییرات تعداد درزه

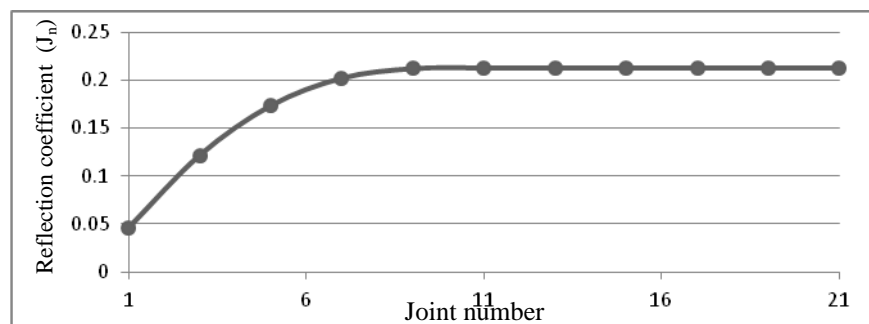
تعداد درزه	سرعت (m/s)	T	R
۱	۳۳۷۷/۱۴۶۸۲۴	۰/۹۹۹۶۶۶۹۶۴	۰/۰۴۵۳۶۹۹۰۲
۳	۳۳۸۰/۳۵۶۳۹۷	۰/۹۹۳۵۸۴۲۶۱	۰/۱۲۱۲۹۵۷۷
۵	۳۳۶۹/۵۷۴۲۰۵	۰/۹۸۵۱۱۲۰۸	۰/۱۷۳۲۲۹۱۵۳
۷	۳۳۴۵/۱۹۴۹۷۴	۰/۹۸۰۴۲۸۹۹۸	۰/۲۰۲۰۷۶۵۷۹
۹	۳۳۲۰/۳۸۴۶۷۹	۰/۹۷۸۰۱۲۳۱۹	۰/۲۱۲۱۳۳۳۰۲
۱۱	۳۲۹۷/۲۳۳۱۳	۰/۹۷۶۹۶۵۹۷۳	۰/۲۱۲۷۷۹۹۹۹
۱۳	۳۲۷۴/۶۸۷۴۰۷	۰/۹۷۶۹۱۰۰۰۳	۰/۲۱۲۶۹۸۰۳۳
۱۵	۳۲۴۷/۲۲۴۱۴۵	۰/۹۷۷۱۳۰۶۶۹	۰/۲۱۲۶۲۸۵۱۹
۱۷	۳۲۲۹/۰۶۲۹۵۳	۰/۹۷۷۱۷۹۹۳۶	۰/۲۱۲۶۱۳۵۲۵
۱۹	۳۲۰۴/۴۵۱۲۳۷	۰/۹۷۷۸۸۵۱۳	۰/۲۱۲۶۲۲۰۲۳
۲۱	۳۱۸۱/۸۰۱۴۱۶	۰/۹۷۶۸۴۵۱۵۳	۰/۲۱۲۵۸۳۳۸۵



شکل ۳: تغییرات سرعت انتشار موج فشاری در برابر تغییرات تعداد درزه



شکل ۴: تغییرات ضریب عبور در برابر تغییرات تعداد درزه



شکل ۵: تغییرات ضریب بازتاب در برابر تغییرات تعداد درزه

در نمودار شکل‌های ۶ و ۷ تغییرات سرعت و ضرایب R و T در مقابل تغییرات سختی قائم نرمالیزه شده ناپیوستگی‌ها ($K_n = \frac{k_n}{\omega z}$) مشاهده می‌شود.

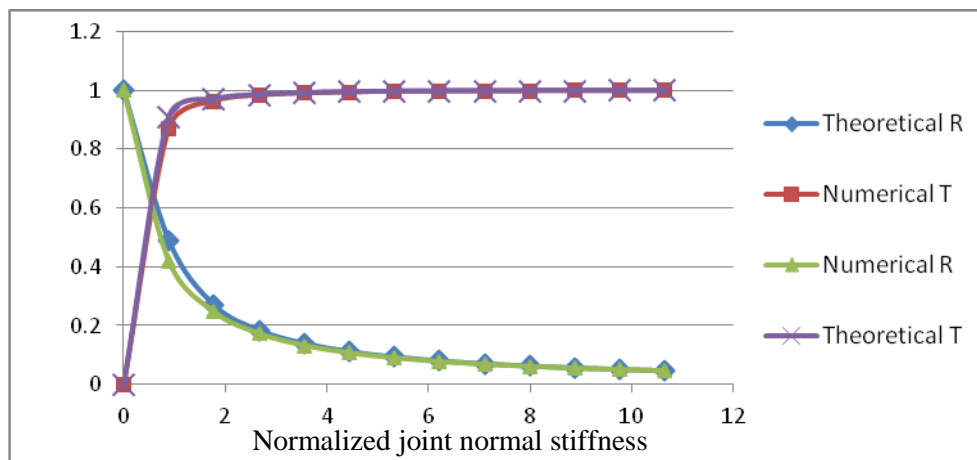
جدول ۳: نتایج تحلیلی و عددی تغییرات سرعت و ضرایب R و T در مقابل

k_n (GPa)	R (تحلیلی)	T (تحلیلی)	R (عددی)	T (عددی)	V_p
۰	۱	۰	۱	۰	۰
۱	۰/۴۹۰۶۰۵	۰/۸۷۱۳۸۲	۰/۴۱۹۰۶۴	۰/۹۰۸۵۳	۳۳۷۵/۴۸۱
۲	۰/۲۷۰۹۷۷	۰/۹۶۲۵۸۶	۰/۲۴۶۹۹۸	۰/۹۶۹۱۵۹	۳۳۷۵/۹۶۸
۳	۰/۱۸۴۴۵۳	۰/۹۸۲۸۴۱	۰/۱۷۲۳۴۴	۰/۹۸۴۹۶۵	۳۳۷۶/۳۹۷
۴	۰/۱۳۹۳۸۱	۰/۹۹۰۲۳۹	۰/۱۳۱۶۶	۰/۹۹۱۰۹	۳۳۷۶/۴۷۷
۵	۰/۱۱۱۸۹۷	۰/۹۹۳۷۲۰	۰/۱۰۶۲۹۱	۰/۹۹۴۰۵۶	۳۳۷۶/۲۲۲
۶	۰/۰۹۳۴۲۶	۰/۹۹۵۶۲۶	۰/۰۸۹۰۳۰	۰/۹۹۵۷۱۵	۳۳۷۶/۰۹۵
۷	۰/۰۸۰۱۷۲	۰/۹۹۶۷۸۱	۰/۰۷۶۵۵۰	۰/۹۹۶۷۲۵	۳۳۷۶/۵۰۷
۸	۰/۰۷۰۲۰۴	۰/۹۹۷۵۳۳	۰/۰۶۷۱۲۲	۰/۹۹۷۳۸۴	۳۳۷۶/۲۳۸
۹	۰/۰۶۲۴۳۶	۰/۹۹۸۰۴۹	۰/۰۶۰۲۰۸	۰/۹۹۷۸۴۶	۳۳۷۶/۲۷۳
۱۰	۰/۰۵۶۲۱۳	۰/۹۹۸۴۱۹	۰/۰۵۳۸۱۷	۰/۹۹۸۱۷۱	۳۳۷۶/۲۷۳
۱۱	۰/۰۵۱۱۱۷	۰/۹۹۸۶۹۳	۰/۰۴۹۱۱۹	۰/۹۹۸۴۵۲	۳۳۷۶/۶۱۳
۱۲	۰/۰۴۶۸۶۷	۰/۹۹۸۹۰۱	۰/۰۴۵۱۱۸	۰/۹۹۸۷۱۴	۳۳۷۶/۳۰۹

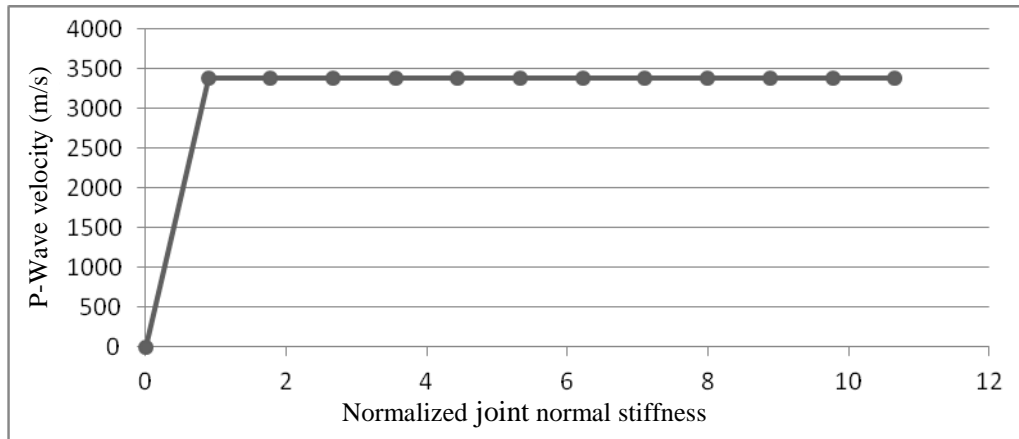
قائم ناپیوستگی بسیار کم بوده و تنها در حالتی که سختی قائم صفر باشد، به دلیل عدم عبور موج تنش از ناپیوستگی سرعت به صفر می‌رسد، ولی در حالت کلی سرعت انتشار موج نسبت به افزایش سختی قائم، سیر صعودی داشته است.

نمودار اشکال ۶ و ۷ نشان می‌دهند که با افزایش سختی نرمال، ضریب T افزایش یافته و تقریباً به مقدار ثابتی می‌رسد، همچنین، ضریب R نیز با افزایش سختی نرمال کاهش یافته و با میل سختی نرمال به بی‌نهایت، ضریب R به صفر و ضریب T به یک نزدیک می‌شود.

همان‌طور که در جدول ۳ مشاهده می‌شود، تغییرات سرعت انتشار موج فشاری نسبت به تغییرات سختی



شکل ۶: تغییرات ضرایب R و T نسبت به سختی قائم نرمالیزه شده ناپیوستگی‌ها



شکل ۷: تغییرات سرعت انتشار موج فشاری در برابر تغییرات سختی قائم نرمالیزه شده ناپیوستگی‌ها

فاصله‌ی ۵۰ متری از پایین مدل قرار دارد، مرزهای مدل در پایین و بالای مدل در دو راستای X و Y ویسکوز در نظر گرفته شد، مرزها در دو طرف چپ و راست مدل نیز برای شبیه‌سازی منطقه‌ی نامحدود، به دو منطقه‌ی آزاد با رفتار الاستیک خطی و همسانگرد متصل شد. هیچ‌گونه تنش و جاذبه‌ای به مدل اعمال نشده و میرایی مواد روی صفر تنظیم شد تا فقط میرایی حاصل از جهت‌داری اندازه‌گیری شود.

موج تنش به‌صورت نیم سیکل سینوسی در راستای محور Y (S_{yy})، با دامنه‌ی یک مگا پاسکال و فرکانس ۲۰ هرتز به مرز پایین مدل اعمال می‌شود. یک نقطه در فاصله‌ی ۱۰ متری از مرز پایین مدل (Point A)، یک نقطه در مرکز زون درزه‌دار (Point C) و یک نقطه هم در فاصله‌ی ۱۰ متری از بالای زون درزه‌دار (Point B) جهت مانیتورینگ تاریخچه‌ی تنش و سرعت ذرات در نظر گرفته شد. مشخصات فیزیکی و مکانیکی مدل نیز به شرح جدول ۱ است.

مطابق با تحقیقات لیسمر^{۱۴} و کوهلمیر^{۱۵} (۱۹۶۹)، سائز المان‌ها در تحلیل عددی انتشار موج باید کوچک‌تر از $\frac{v_p}{8f}$ باشد [۱۷]، که در اینجا سائز المان‌ها برابر با ۲۱ متر به دست می‌آید، ولی برای اطمینان و دقت بیشتر، سائز المان‌ها ۲ متر در نظر گرفته شد.

۵- تأثیر جهت‌داری ناپیوستگی‌ها در انتشار موج فشاری

همان‌گونه که شرح داده شد، هنگامی که یک موج فشاری به سطح ناپیوستگی برخورد می‌کند، بخشی از دامنه‌ی آن بازتاب کرده و بخشی هم عبور می‌کند، پارامترهایی که در این مورد تأثیرگذارند، ضرایب سختی نرمال و برشی ناپیوستگی هستند، چون در آزمایش‌های صحرایی فاصله‌ی ژئوفون‌ها از منبع موج زیاد بوده و یا منبع موج دامنه‌ی کوچکی تولید می‌کند (چکش)، موج تنش به‌قدری نیست که باعث شود مدل رفتاری ناپیوستگی‌ها به آستانه‌ی غیرخطی برسد، به همین دلیل، در اینجا مدل رفتاری درزه‌ها الاستیک خطی در نظر گرفته شد.

برای بررسی تأثیر جهت‌داری ناپیوستگی‌ها در انتشار موج فشاری، شرایط محیط ناپیوسته با استفاده از نرم‌افزار UDEC^{۱۳} مدل شد. این نرم‌افزار برای محاسبات عددی دوبعدی به روش المان گسسته که قابلیت شبیه‌سازی محیط‌های ناپیوسته تحت بارهای دینامیکی و استاتیکی را دارد [۱۶].

مدل مورد استفاده مطابق با شکل ۸ دارای ۵۰۰ متر عرض و ۲۵۰ متر ارتفاع است. یک زون ناپیوسته‌ی درزه‌دار به‌صورت نواری به ضخامت ۹۰ متر در

کرده‌اند، آن‌ها به این نتیجه رسیدند که زمانی که نسبت فاصله‌داری ناپیوستگی‌ها به طول موج بزرگ باشد، هر ناپیوستگی، منحصرأ در میرایی موج تأثیرگذار است، و زمانی که طول موج به فاصله‌داری ناپیوستگی‌ها نزدیک باشد، امواج دچار تشدید شده و این امر باعث افزایش ضریب T می‌شود [۵].

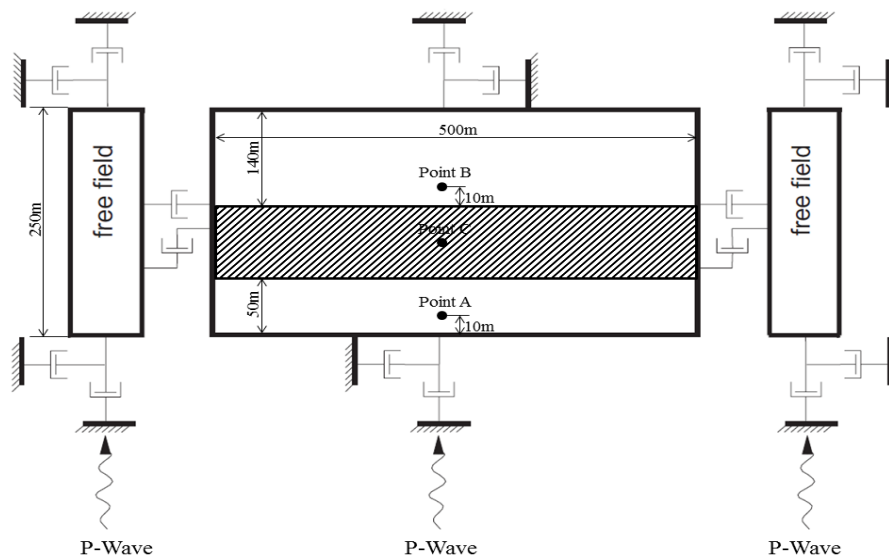
مشخصات مدل مورد استفاده، مشابه مدل معرفی‌شده در بخش قبل بوده با این تفاوت که در اینجا درزه‌ها در جهت عمود بر انتشار موج فشاری بوده و تعداد آن‌ها محدود و برابر ۳ عدد است، فاصله‌ی بین درزه‌ها نیز از ۱ متر الی ۵۰ متر متغیر بوده است. نتایج تغییرات سرعت انتشار موج فشاری و ضرایب T و R در برابر تغییرات فاصله‌داری در جدول ۵ آمده است، از آنجایی که تأثیر فاصله‌داری و طول موج، در انتشار موج به یکدیگر وابسته است، نمودار شکل‌های ۱۲ تا ۱۴ برحسب تغییرات نسبت فاصله‌داری به طول موج (۵) رسم شده‌اند. در اینجا برای فرکانس ۲۰ هرتز و سرعت انتشار ۳۳۷۹ متر بر ثانیه، طول موجی معادل با ۱۶۸/۹۵ متر خواهیم داشت.

درزه‌ها با فاصله‌داری ۵ متر در ۷ مرحله بین صفر تا ۹۰ درجه نسبت به خط افق تغییر زاویه داده‌اند و در هر مرحله ۱۵ درجه به شیب آن‌ها اضافه شد. نتایج تغییرات سرعت و ضرایب T و R در برابر تغییرات شیب درزه‌ها، در جدول ۴ و نمودار شکل‌های ۹ و ۱۰ آمده است.

با توجه به نمودار شکل ۹ شیب نمودار سرعت تا قبل از زاویه‌ی ۱۵ درجه، بسیار کم بوده است و از زاویه‌ی ۱۵ الی ۶۰ درجه شیب افزایش پیدا کرده و بعد از زاویه‌ی ۶۰ درجه، شاهد کاهش اندک شیب نمودار هستیم. با توجه به نمودار شکل ۱۰، تغییرات ضریب T تا قبل از زاویه‌ی ۴۵ درجه سیر نزولی داشته و سپس تا ۷۵ درجه سیر صعودی داشته و سپس به مقدار ثابتی می‌رسد. با توجه به نمودار شکل ۱۱، تغییرات ضریب R تا قبل از زاویه‌ی ۶۰ درجه سیر نزولی داشته است و از زاویه‌ی ۶۰ درجه به بعد تقریباً به مقدار ثابتی رسیده است.

۶- تأثیر فاصله‌داری ناپیوستگی‌ها در انتشار موج فشاری

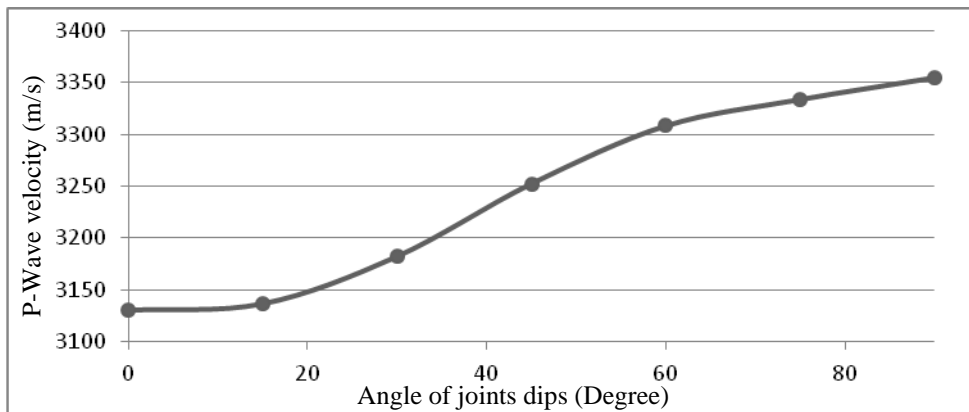
ژائو و همکاران (۲۰۰۶) عبور موج از ناپیوستگی‌های موازی در جهت عمود بر جهت انتشار موج را بررسی



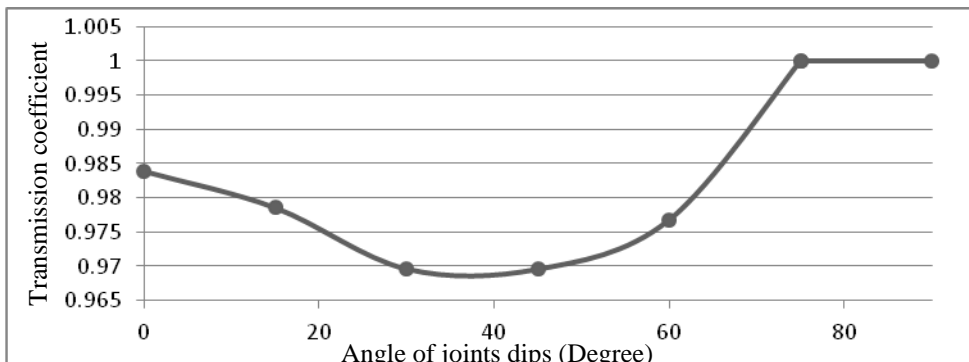
شکل ۸: هندسه‌ی مدل المان گسته در UDEC برای زون درزه‌دار

جدول ۴: تغییرات سرعت و ضرایب T و R در مقابل تغییرات شیب درزه‌ها

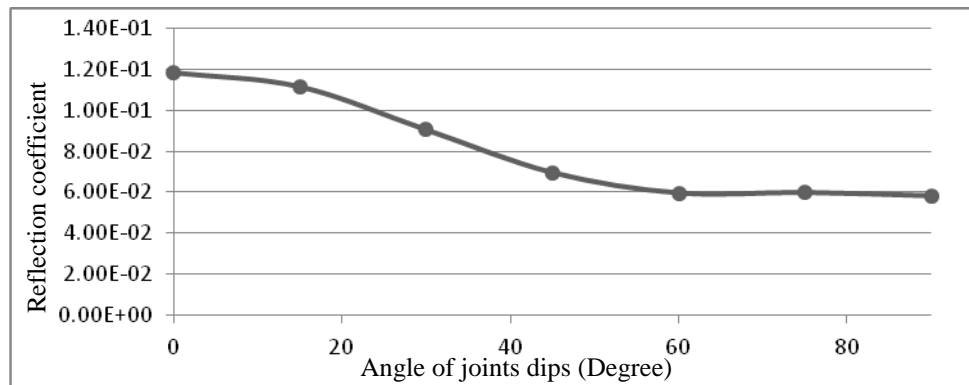
V_p	R	T	زاویه شیب درزه (درجه)
۳۱۲۹/۸۷۱	۰/۱۱۸	۰/۹۸۴	۰
۳۱۳۶/۱۷۹	۰/۱۱۲	۰/۹۷۹	۱۵
۳۱۸۱/۹۴۳	۰/۹۰۵	۰/۹۷۰	۳۰
۳۲۵۲/۳۳۸	۰/۶۹۵	۰/۹۷۰	۴۵
۳۳۰۸/۳۹۴	۰/۵۹۵	۰/۹۷۷	۶۰
۳۳۳۳/۸۳۸	۰/۵۹۷	۱/۰۰۰	۷۵
۳۳۵۴/۹۵۸	۰/۵۸۱	۱/۰۰۰	۹۰



شکل ۹: تغییرات سرعت انتشار موج فشاری نسبت به شیب درزه‌ها



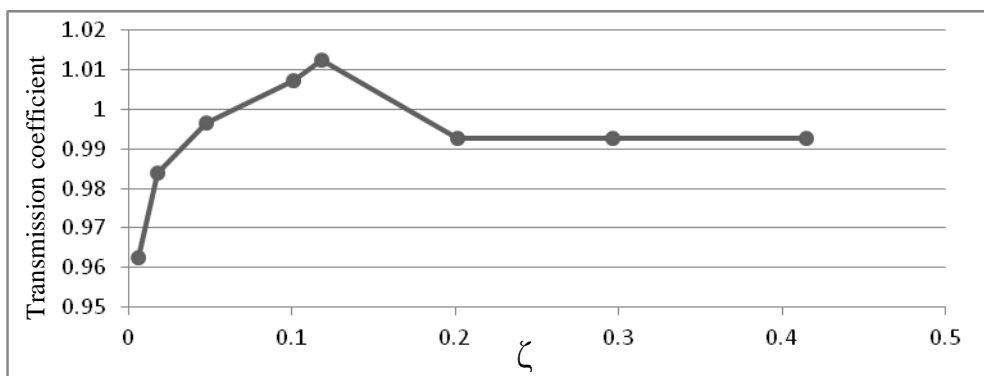
شکل ۱۰: تغییرات ضریب T نسبت به شیب درزه‌ها



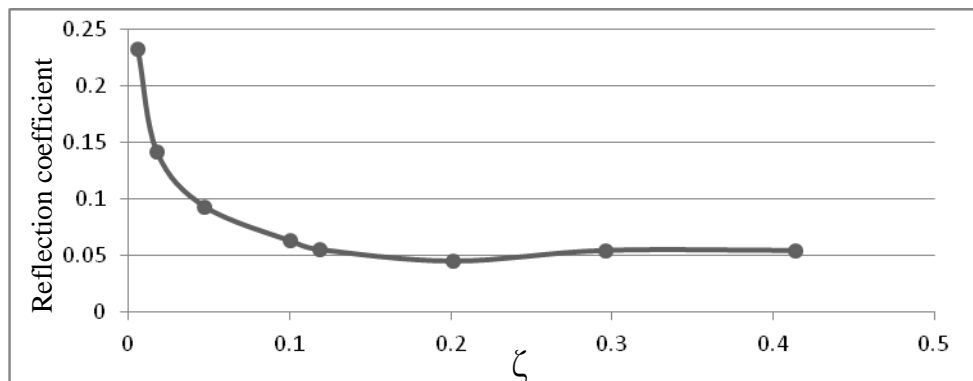
شکل ۱۱: تغییرات ضریب R نسبت به شیب درزه‌ها

جدول ۵: تغییرات سرعت انتشار موج فشاری و ضرایب T و R در برابر تغییرات فاصله‌داری درزه‌ها

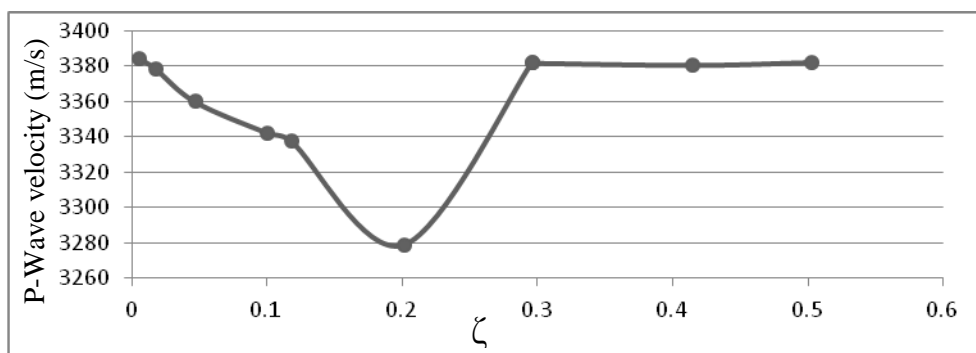
فاصله‌داری (m)	ζ	T	R	V_p
۱	۰/۰۰۵۹۲	۰/۹۶۲۴۳۳	۰/۲۳۲۵۵۸	۳۳۸۴/۳۰۴
۳	۰/۰۱۷۷۶	۰/۹۸۳۹	۰/۱۴۱۶۸۲	۳۳۷۸/۵۷۵
۵	۰/۰۲۹۵۹	۰/۹۹۶۴۲۲	۰/۰۹۳۲۰۲	۳۳۵۹/۷۴۰
۱۷	۰/۱۰۰۶۲	۱/۰۰۷۱۵۶	۰/۰۶۲۷۹۱	۳۳۴۲/۲۲۱
۲۰	۰/۱۱۸۲۸	۱/۰۱۲۵۲۲	۰/۰۵۵۲۷۷	۳۳۲۷/۶۳۸
۳۴	۰/۲۰۱۲۴	۰/۹۹۲۸۴۴	۰/۰۴۴۹۰۲	۳۲۷۹/۰۹۰
۵۰	۰/۲۹۵۹۴	۰/۹۹۲۸۴۴	۰/۰۵۴۳۸۳	۳۳۸۰/۵۱۶
۷۰	۰/۴۱۴۳۲	۰/۹۹۲۸۴۴	۰/۰۵۴۳۸۳	۳۳۸۲/۰۸۸



شکل ۱۲: تغییرات ضریب T در برابر تغییرات نسبت فاصله‌داری درزه‌ها به طول موج



شکل ۱۳: تغییرات ضریب R در برابر تغییرات نسبت فاصله‌داری درزه‌ها به طول موج



شکل ۱۴: تغییرات سرعت انتشار موج فشاری در برابر تغییرات نسبت فاصله‌داری درزه‌ها به طول موج

سیمانی به یکدیگر متصل شده‌اند؛ در این بخش تأثیر ابعاد این‌گونه بلوک‌ها بر روی انتشار موج فشاری بررسی شده است.

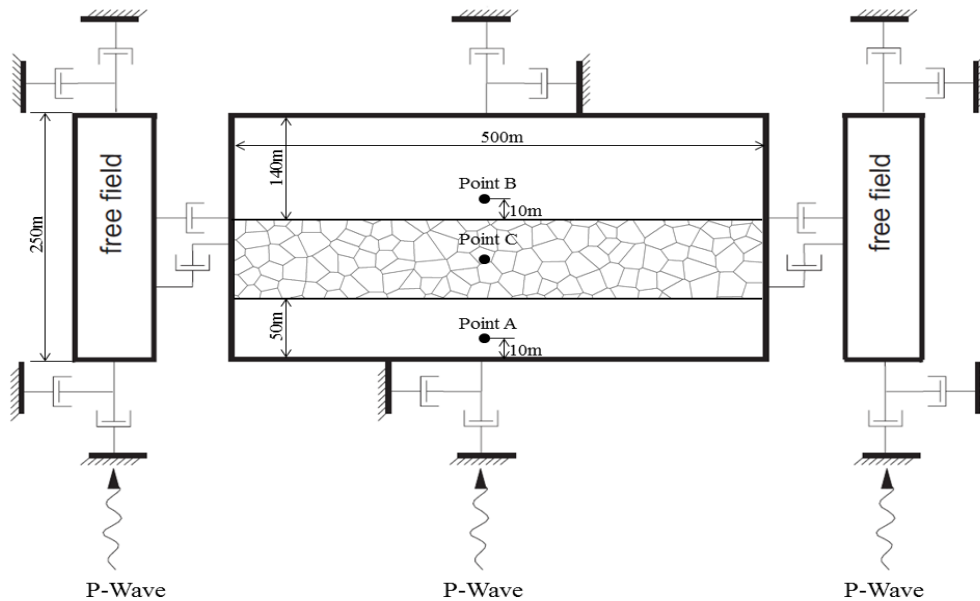
مدل مورد بررسی، مشابه بخش قبل بوده، با این تفاوت که به جای زون درزه‌دار، از زون خردشده استفاده شده است. هندسه‌ی مدل در شکل ۱۵ مشاهده می‌شود. به دلیل طولانی بودن مدت‌زمان پاسخ نرم‌افزار ابعاد متوسط بلوک‌ها بین ۱۰ متر تا ۵۰ متر متغیر بوده و تنها، تغییرات سرعت انتشار موج نسبت به کاهش ابعاد بلوک‌ها بررسی شد، شایان ذکر است که بلوک‌ها به‌طور تصادفی توزیع شده‌اند. در این‌گونه مناطق به دلیل مشخص نبودن حدود فاصله‌داری و دیگر پارامترهای درزه‌داری، ضرایب T و R اندازه‌گیری نشد و با توجه به تصادفی بودن توزیع ابعاد بلوک‌ها نمی‌توان به نتایج این ضرایب اعتماد کرد، در این حالت سرعت متوسط موج عبوری از توده سنگ اطلاعات بهتر و واقعی‌تری از وضعیت توده سنگ به دست می‌دهد. به دلیل تصادفی بودن توزیع ابعاد بلوک‌ها، از تغییرات سرعت انتشار موج فشاری نسبت به متوسط ابعاد بلوک‌ها رگرسیون خطی گرفته شد و نتایج آن در نمودار شکل ۱۶ آورده شده است.

همان‌طور که در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود در فاصله‌داری ۱۷ و ۲۰ متر ضریب T بزرگ‌تر از یک به‌دست‌آمده است، در برخی شرایط، دامنه‌ی سرعت عبوری از ناپیوستگی‌ها بزرگ‌تر از دامنه‌ی موج ورودی است این حالت به دلیل انطباق موج‌های بازتاب شده بین ناپیوستگی‌ها و پدیده‌ی تشدید اتفاق می‌افتد که وابسته به طول موج و فاصله‌داری ناپیوستگی‌ها است. شایان ذکر است، این پدیده به این معنا نیست که انرژی عبوری افزایش پیدا کرده است. مشاهده می‌شود که با افزایش فاصله‌داری، این ضریب به مقدار ثابتی می‌رسد که این مقدار وابسته به تعداد ناپیوستگی‌ها و ضریب سختی درزه است. با توجه به شکل ۱۳، ضریب R نیز با افزایش نسبت فاصله‌داری به طول موج، کاهش یافته و در نهایت به مقدار ثابتی می‌رسد. سرعت انتشار موج فشاری نیز با افزایش نسبت فاصله‌داری به طول موج، ابتدا کاهش یافته و سپس افزایش یافته و تقریباً به مقدار ثابتی می‌رسد.

۷- تأثیر ابعاد متوسط بلوک‌ها در سرعت انتشار

موج فشاری

در برخی موارد به دلیل خرد بودن بیش از حد بلوک‌ها، امکان درزه نگاری منطقه وجود ندارد، این مناطق به‌صورت بلوک‌هایی هستند که به‌وسیله‌ی مواد

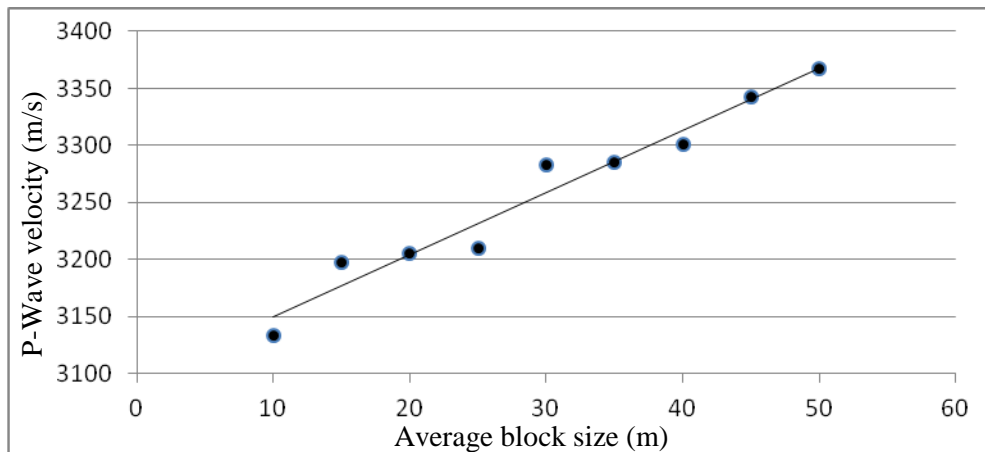


شکل ۱۵: هندسه‌ی مدل المان گسسته در UDEC برای زون خردشده

انتشار موج با افزایش ابعاد متوسط بلوک‌ها است، که رابطه‌ی آن در زیر مشاهده می‌شود.

$$V_p = 5.4495 D + 3095 \quad ; R^2 = 0.9594 \quad (12)$$

که D متوسط ابعاد بلوک‌ها برحسب متر است.



شکل ۱۶: تغییرات سرعت انتشار موج فشاری نسبت به ابعاد متوسط بلوک‌ها

ضرایب R و T نیز به ترتیب افزایش و کاهش یافته و

سپس هر دو به مقدار ثابتی می‌رسند.

✓ با افزایش سختی نرمال، سرعت به مقدار خیلی کم افزایش می‌یابد و تقریباً نسبت به این پارامتر حساس نیست، ولی ضرایب R و T هر دو تغییر کرده اند، بطوری که در نهایت به ترتیب به مقادیر ثابت صفر و یک رسیده اند، که این نشان می‌دهد، استفاده از مشخصه‌های میرایی به همراه سرعت موج فشاری به منظور ارزیابی کیفیت توده‌سنگ، طیف کامل‌تری از پارامترهای توده‌سنگ را پوشش می‌دهد.

✓ با افزایش زاویه‌ی شیب درزه از صفر تا ۹۰ درجه، سرعت همواره افزایش می‌یابد، ضریب T ابتدا کاهش می‌یابد و در شیب ۴۵ درجه به حداقل می‌رسد و دوباره تا شیب ۷۰ درجه افزایش یافته و سپس به مقدار ثابت یک می‌رسد. ضریب R نیز با افزایش زاویه‌ی شیب همواره کاهش می‌یابد.

۸- نتیجه گیری

در این مطالعه امکان سنجی ارزیابی کیفیت توده‌سنگ به وسیله‌ی مشخصه‌های انتشار موج فشاری مطالعه شد، بدین منظور، تغییرات این مشخصه‌ها نسبت به تغییرات پارامترهای مهم توده‌سنگ نظیر تعداد، سختی، جهت‌داری و فاصله‌داری درزه‌ها و همچنین ابعاد متوسط بلوک‌ها که به واسطه‌ی درزه‌ها ایجاد شده اند که اکثراً در طبقه‌بندی‌های مهمی همچون RMR استفاده می‌شوند، بررسی شد، لازم به ذکر است پارامترهای موثر دیگری از درزه مثل مقاومت برشی درزه (چسبندگی، زاویه اصطکاک و یا زبری و موجداری و...) در این مطالعه مورد توجه قرار نگرفتند. نتایج حائز اهمیت این مطالعه در زیر به تفکیک آمده است:

✓ با افزایش تعداد درزه‌های عمود بر جهت انتشار موج، سرعت موج فشاری کاهش می‌یابد،

- [4]. Perino, A., Zhu, J. B., Li, J. C., Barla, G. & Zhao, J. Theoretical Methods for Wave Propagation across Jointed Rock Masses. *Jornal of Rock Mech Rock Eng* 43, PP: 799–809, 2010.
- [5]. Zhao, J., Zhao, X.B. & Cai, J.G. A further study of P-wave attenuation across parallel fractures with linear deformational behavior. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 43, PP: 776–788, 2006.
- [6]. Li, j., Ma, G., & Zhao, J. An equivalent viscoelastic model for rock mass with parallel joints. *Jornal of geophysical research*, 115: B03305, 2010.
- [7]. Wang, Wei-hua., & LI, Xi-bing. 3DEC modeling on effect of joints and interlayer on wave propagation. *Science press Journal*, 16, PP: 728-734, 2006.
- [8]. Perino, A., Zhu, J. C., Li, C., Barla, G. & Zhao, J. Theoretical Methods for Wave Propagation across Jointed Rock Masses. *Journal of Rock Mech Rock Eng*, 43, PP: 799–809, 2010.
- [9]. Boadu, F. K. & Long, L. T. Effects of fractures on seismic-wave velocity and attenuation. *Geophys. J. Int.* (1996) 127, PP: 86-110.
- [10]. Azhari, H. E. & Amrani, I. E. Effect of the Number and Orientation of Fractures on the P-Wave Velocity Diminution: Application on the Building Stones of the Rabat Area (Morocco). *Journal of Geomaterials*, 3, PP: 71-81, 2013.
- [11]. Pyrak-Nolte, L. J. The seismic response of fractures and the interrelations among fractures. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 33(8), PP: 787-802, 1996.
- [12]. Meyers, M. A. *Dynamic behavior of materials*. University of California, San Diego, 1994.
- [13]. Miller, R. K. The Effects of Boundary Friction on the Propagation of Elastic Waves. *Bull. Seis. Soc. America*, 68, PP: 987-998, 1978.
- [14]. Pyrak-Nolte, L.J., Myer, L.R. & Cook, N.G.W. Transmission of seismic waves across single natural fractures. *Journal of Geophysical Research*, 95(B6), PP: 8617-8638, 1990.

- ✓ با افزایش فاصله‌داری درزه‌ها، از سرعت موج کاسته شده و ضریب T ابتدا افزایش یافته و حتی از یک بیشتر می‌شود که این امر به خاطر پدیده‌ی تشدید رخ می‌دهد، سپس از مقدار آن کاسته شده و به مقدار ثابتی می‌رسد. با افزایش فاصله‌داری ضریب R کاهش یافته و درنهایت به مقدار ثابتی می‌رسد.
- ✓ با افزایش ابعاد متوسط بلوک‌ها سرعت انتشار موج افزایش می‌یابد، که این بیان‌کننده‌ی کاهش ناپیوستگی‌های توده‌سنگ است.
- ✓ مطابق با نتایج تحلیل حساسیت، پارامترهایی که بیشترین تأثیر را روی سرعت و هر دو ضرایب T و R دارند به ترتیب عبارت‌اند از ابعاد متوسط بلوک و سختی نرمال.
- ✓ مطابق با نتایج تحلیل حساسیت، پارامترهایی که کمترین تأثیر را روی سرعت موج و ضرایب T و R دارند به ترتیب عبارت‌اند از سختی نرمال، تعداد درزه و شیب درزه.
- ✓ با افزایش تنش برجا، سرعت انتشار موج فشاری در ماده سنگ تقریباً افزایش می‌یابد.

مراجع

- [1]. Kaneko, K., Inoue, I., & Sassa, K. Monitoring the stability of rock structures by means of acoustic wave attenuation. *Proc. 4th Congress of ISRM*, 1979. 2, PP: 287–292.
- [2]. Ma, G. W., Fan, L. F. & Li J. C. Evaluation of equivalent medium methods for stress wave propagation in jointed rock mass. *Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech.*, DOI: 10.1002/nag.1118 (Published online), 2012.
- [3]. Lei, W.D., Hefny, A.M., Yan, S. & Teng, J. A numerical study on 2-D compressive wave propagation in rock masses with a set of joints along the radial direction normal to the joints. *Jornal of Computers and Geotechnics* 34, PP: 508–523, 2007.

[15]. Eitzenberger, A. Wave Propagation in Rock and the Influence of Discontinuities. Ph.D Thesis, Luleå University of Technology, Sweden, 2012.

[16]. Itasca, UDEC. Version 4.0. Manual. Itasca, 2004.

[17]. Lysmer, J. & Kuhlemeyer, R. L. Finite dynamic model for infinite media. J. Engrg. Mech. Div. 95(4), PP: 859-877, 1969.

پی‌نوشت

-
1. Peak Particle Velocity
 2. Peak Particle Acceleration
 3. Lei
 4. Perino
 5. Zhao
 6. Wang
 7. Kofi
 8. Timothy
 9. Transmission coefficient
 10. Reflection coefficient
 11. Miller
 12. Peak Particle Velocity
 13. Universal Distinct Element Code
 14. Lysmer
 15. Kuhlemeyer