

Original Research Paper

Experimental studies to investigate the effects of joints on peak particle velocity in limestone blocks

Abbas Zolfaghari¹, Mashallah Khamsehchiyan^{*1}, Mohammad Reza Nikoodel¹, and Abdollah Sohrabi-Bidar²

¹ Department of Engineering Geology, Faculty of Basic Science, University of Tarbiat Modares, Tehran, Iran

² School of Geology, College of Science, University of Tehran, Tehran, Iran

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 2022 July 29

Accepted: 2022 October 22

Available online: 2023 March 21

Keywords:

Joint filling

Joint index

Seismic waves

Peak Particle Velocity

Joint set

ABSTRACT

The combined effect of the number of joints, opening, type and thickness of filling on the amount of vibration caused by the propagation of waves in four identical dry limestone blocks with dimensions of 10*10*50 cm was studied. The maximum vibration of particles in intact and jointed rock blocks in three perpendicular directions was recorded by a three-component geophone. In block number 1 with a joint in the middle of the block, the amount of joint opening was changed from 3-6-9-12-15-18-21 mm and the measurements were made for each amount of opening in two series. In the first series, the joint filled with clay was tested, and in the second series, the joint filled with sandy soil was tested. The series of tests were also performed on blocks No. 2 with two joints, Block No. 3 with three joints, and Block No. 4 with four joints. The results of the tests showed that the presence of joints in rock blocks reduced the maximum vibration of particles in all three directions with different proportions. The relationship between the increase in the joint index and the decrease in the maximum vibration of the particles is nonlinear.

1. Introduction

It is necessary to study the effects of different characteristics of joints on the seismic wave's velocity and amplitude. Researchers have studied this issue by experimental methods. Yang et al. (2019) investigated the effects of joint thickness and anisotropy on wave propagation and attenuation with laboratory tests. The results of these experiments showed that the presence of joints reduces the velocity and amplitude of compressive and shear waves. Liu et al. (2019) studied the effects of joint and bedding in rocks on the propagation and damping of seismic waves under triaxial loads. Kahraman (2002) investigated the effects of joint roughness on P-wave velocity in samples with dimensions of 10 × 10 × 10 cm and represented the polynomial relationship between the roughness

coefficient and the p-wave velocity. Leucci and Giorgi (2006) studied the effects of joints on the P and S wave velocity propagation in rock blocks with dimensions of 60 × 40 × 40 cm and stated that the amplitude of the waves decreases with increasing the number of joints. El-Azhari et al. (2013) used a laboratory model to investigate the effects of the number and orientation of joints on the P-Wave diminution. Studies of Wu and Zhao (2015) showed that the propagation of waves is influenced by factors such as properties and the thickness of joint filling, the saturation degree and properties of intact rock. Results of the studies done by Han et al. (2020) showed that the wave transmission coefficient decreases with increasing the joint thickness. Kim et al. (2021) stated that

* Corresponding author: Mashallah Khamsehchiyan; E-mail: khamechm@modares.ac.ir

Citation:

Zolfaghari, A., Khamsehchiyan, M., Nikoodel, M.R., and Sohrabi-Bidar, A., 2023. Experimental studies to investigate the effects of joints on peak particle velocity in limestone blocks. Scientific Quarterly Journal, GEOSCIENCES, 33(1), 127, 43-54. <https://doi.org/10.22071/gsj.2022.352619.2021>.

E-ISSN: 2645-4963; Copyright©2021 G.S. Journal & the authors. All rights reserved.

doi: 10.22071/gsj.2022.352619.2021

 dor: 20.1001.1.10237429.1402.33.1.9.6



This is an open access article under the by-nc/4.0/ License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

the gouge fill resulted in decreased longitudinal and shear wave velocities and that is depended on the applied axial stress and stiffness of the gouge fill material. Yang et al. (2018, 2019, 2020) investigated the effects of joint properties on wave propagation by ultrasonic experiments. The results of these experiments showed that the existence of joints in rock mass disrupts the waveform and attenuates greatly the wave amplitude, velocity and frequency.

Often in previous experimental studies, by changing one parameter and keeping other joint parameters constant, a separate effect of the variable parameter on wave propagation has been investigated. However, in nature, there is always a set of variable joint parameters that affect each other and consequently the wave propagation. Therefore, it is necessary to perform more experiments to investigate the simultaneous effects of variable parameters on the wave propagation and particle vibration. The aim of this study is to investigate the combined effects of joint number, joint aperture and type and the thickness of joint filling on the vibration induced by wave propagation in limestone. The innovative aspect of this research is that by introduce a relation for quantifying the joint parameter, the effects of joints on peak particle velocity was studied.

2. Experimental Materials

Particle vibration measurements were performed on four limestone blocks. Rocks consist of fine-grained, white limestone. After collecting the rocks and transferring them to the laboratory, some physical and mechanical properties of the intact rock were measured according to the standard proposed by ISRM. A summary of the results is presented in Table 1. Joint filling materials in these experiments include two types of clay and sandy soil with the properties presented in Table 2 and the grain size diagram in Fig. 2.

3. Sample Preparation

Four blocks with dimensions of 10*10*50 cm were prepared. These blocks have no joints or cracks and are all made of intact rock (Fig. 3a). In order to investigate the effects of joints on particle vibration, joint properties including joint number, joint aperture and type and thickness of joint filling were considered. The number of joints varies from one joint in block number 1 to four joints in block number 4. These joints were artificially created by sawing with a vertical angle in a direction perpendicular to the longitudinal axis of the blocks. The spacing between the joints in all four blocks is constant and equal to 8cm (Fig. 3b).

4. Test method

The source of seismic waves in all experiments is the impact of simple pendulum. In order to create impacts with equal energy, a weight of 125 grams was released at an angle of 5 degrees to the vertical and an impact was played on the rock block. Seismic waves

created by the collision of the pendulum after passing through the rock block cause particles to vibrate in the rock. Particle vibration was recorded and measured in rock blocks by a 30 Hz three-component geophone and a SPSEISw-3 seismograph (Fig. 4).

Before the test, the rock blocks were dried in oven. Firstly, before creating any joints in each block by inflicts a blow to one side of the block, the vibration of particles in the intact rock was recorded in three directions by a three-component geophone on the other side of the block. Thereafter, in order to investigate the effects of joint on particle vibration, experiments were performed on jointed blocks. In block number 1, with a joint in the middle of the block, joint aperture was changed in 3-6-9-12-15-18-21 mm and measurements were made for each joint aperture in two series. In the first series, joint with clay filling and, in the second series, joint with sandy soil filling was tested. These experiments were also performed on block number 2 with two joints, block number 3 with three joints and block number 4 with four joints.

5. Discussion

To analyze the vibration variation due to joint properties, an index called "Peak Particle Velocity Reduction" (PPVR) was defined, which indicates the reduction of PPV in each state of jointed rock compared to intact rock without joint. In Equation 1, PPV0 and PPV are the peak particle velocity in intact rock and jointed rock, respectively.

$$PPVR = \frac{PPV_0 - PPV}{PPV_0} \quad (1)$$

To investigate the effects of joint properties and provide an empirical relationship, it is necessary to introduce an index indicating the joint conditions by quantifying the joint properties. Joint properties quantification was done in three steps. In the first step, the impedance index was used to quantify the type of joint filling. Filling in these tests include the clay and sandy soils. The impedance index of these materials and rock blocks are presented in table 3.

The impedance ratio of intact rock to filling was introduced as a rock heterogeneity factor, which is an effective parameter on the seismic wave propagation and reflection characteristics (Boadu and Long, 1996).

$$\text{impedance ratio} = \frac{\text{impedance of intact rock}}{\text{impedance of joint filling}} \quad (2)$$

The impedance ratio factor was used to introduce the type of filling quantitatively. The impedance ratio of the fillings in each rock block is presented in Table 4.

In the second step, the fracture density equation presented by Hudson was used to quantify the combine effects of the joint number and joint aperture. The fracture density in a rock sample is equal to (Hudson, 1981):

$$\epsilon_c = \frac{N V_c}{V} \quad (3)$$

Where N is the number of fractures; V_c is the volume of a single fracture; and V is the volume of model or sample. The amount of fracture density for each block with different joint apertures is calculated and presented in Table 5.

In the last step, the product of impedance ratio multiplied by fracture density was introduced as the joint index (Eq. 4). This index can indicate the joint conditions in each block.

$$\text{Joint Index (JI)} = \epsilon_c \times IR \quad (4)$$

The value of the joint index for each block with different joint conditions is calculated and presented in Table 6. The first and second series of experiments were performed on jointed blocks with clay and sand filling, respectively. Considering that the effect of the type of filling was quantified by the impedance ratio and was placed in joint index equation, Therefore, by using this index, it is possible to use all the data obtained from both series of experiments in a single statistical population with the aim of achieving the relationship between the joint index and PPVR. So, the statistical population of PPV in all blocks, including the blocks with clay filling and sand filling was evaluated. All results of these tests are presented in Fig. 5. In jointed blocks with clay or sand filling, the PPVR has increased in all three directions with increasing the joint index.

The correlation of joint index data and the PPVR was studied. The best fit statistical relationships are:

$$\text{PPVR in Y direction} \quad \text{PPVR} = 12.319 \ln(\text{JI}) + 70.506 \quad R^2 = 0.94 \quad (5)$$

$$\text{PPVR in X direction} \quad \text{PPVR} = 8.577 \ln(\text{JI}) + 45.495 \quad R^2 = 0.95 \quad (6)$$

$$\text{PPVR in Z direction} \quad \text{PPVR} = 3.9183 \ln(\text{JI}) + 20.264 \quad R^2 = 0.94 \quad (7)$$

According to Fig. 5 and the above equations, the contribution of different joint index in PPVR increasing is not the same. The PPVR

increasing rate in the range of 0 to 0.6 of the joint index is higher than other joint indices. In general, the study of test results on filled joints shows that although the amount of PPVR increases with increasing the joint index, but this increasing trend is nonlinear, and with increasing the number and amount of aperture, PPV reduce at a lower rate.

The amount of PPVR due to the presence of joints in rock blocks are not equal in three directions Y, X and Z. Figure 6 shows the PPVR ratios in different directions. PPVR in the Y direction is about 3.4 to 4.5 times PPVR in the Z direction and 1.5 to 2 times PPVR in the X direction. Therefore, the presence of filled joints in rock blocks has reduced the PPV in the direction of wave propagation (Y direction) more than other directions. The ratio of PPVR in the X direction to PPVR in the Z direction varies between 2 and 2.7. PPV have reduced in the Y direction more than the X direction and in the X direction more than the Z direction in jointed blocks with fillings.

6. Conclusion

The most important achievements of the article are as follows:

- Quantifying the type of joint filling based on the material impedance coefficient as well as quantifying the number and aperture of the joints based on the fracture density and finally introducing the joint index is an efficient way to achieve experimental relationships between joint characteristics and PPV.
- Based on the above paragraph, the joint index defined in this study can be used in numerical modeling in order to introduce the characteristics of the joints in the rock mass.
- In jointed rock blocks, the PPVR increases with increasing the joint index but this increasing trend is nonlinear and with increasing the number and amount of aperture, PPV reduce at a lower rate.
- The amount of PPVR due to the presence of joints in rock blocks are not equal in three directions Y, X, and Z as the PPV is reduced in the direction of wave propagation (Y direction) more than other directions.

مطالعات آزمایشگاهی بررسی اثر درزه بر ارتعاش ذرات در بلوک‌های سنگ آهک

عباس ذوالفقاری^۱، ماشاله خامه چیان^{۱*}، محمدرضا نیکودل^۱ و عبدالله سهرابی بیدار^۲

^۱ گروه زمین‌شناسی مهندسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

^۲ دانشکده علوم زمین، دانشکده علوم، دانشگاه تهران، تهران، ایران

چکیده

اثر همزمان تعداد درزه، بازشدگی، نوع و سبترای پرشدگی بر میزان ارتعاش ناشی از انتشار امواج در چهار بلوک‌سنگ آهک خشک و همسان به ابعاد $50 \times 10 \times 10$ سانتی‌متر مطالعه شد. بیشینه ارتعاش ذرات در بلوک‌های سنگ بکر و درزه‌دار در سه جهت عمود برهم توسط ژئوفون سه مؤلفه‌ای ثبت شد. در بلوک شماره ۱ با یک درزه در وسط بلوک، میزان بازشدگی درزه از ۳-۹-۱۲-۱۵-۱۸-۲۱ میلی‌متر تغییر یافت و اندازه‌گیری‌ها برای هر مقدار بازشدگی در دو سری انجام شد. در سری اول، درزه پرشده با خاک رس و در سری دوم درزه پرشده با خاک ماسه‌ای مورد آزمایش قرار گرفت. این سری آزمایش‌ها بر روی بلوک‌های شماره ۲ با دو درزه، بلوک شماره ۳ با سه درزه و بلوک شماره ۴ با چهار درزه نیز انجام شد. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که وجود درزه در بلوک‌های سنگی، بیشینه ارتعاش ذرات در هر سه جهت را با نسبت‌های مختلف کاهش داد. کاهش مقدار بیشینه ارتعاش ذرات در جهت انتشار امواج بیش از سایر جهات است. رابطه بین افزایش شاخص درزه‌داری و کاهش بیشینه ارتعاش ذرات به صورت غیرخطی است. با افزایش شاخص درزه‌داری در نمونه‌های درزه‌دار، بیشینه ارتعاش ذرات با نرخ کمتری کاهش می‌یابد.

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۵/۰۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۷/۲۳

تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۰۱/۰۱

کلیدواژه‌ها:

پرشدگی درزه

شاخص درزه‌داری

امواج لرزه‌ای

بیشینه ارتعاش ذرات

دسته درزه

۱- پیش‌نوشتار

ویژگی‌های سنگ بکر و وجود درزه و شکاف در سنگ از جمله موارد مهم و مؤثر بر انتشار امواج لرزه‌ای و میزان ارتعاش ایجاد شده در زمین می‌باشند. وجود درزه در سنگ، تعیین‌کننده ویژگی‌های مهندسی توده سنگ است و بر انتشار و میرایی امواج لرزه‌ای مؤثر است (Barton, 2006; Jug et al., 2020; Resende, 2010). ویژگی‌های مکانیکی محیط درزه‌دار که پارامترهای لرزه‌ای را کنترل می‌نمایند، تحت تأثیر هندسه درزه‌ها، نوع مواد پرکننده و میزان تماس بین سطوح درزه‌ها است (Boadu, 1997). بنابراین، بررسی تأثیر ویژگی‌های مختلف ناپوستگی‌ها بر سرعت و دامنه انتشار امواج لرزه‌ای ضروری و مهم به نظر می‌رسد. پژوهشگران مختلف با انجام آزمایش‌های آزمایشگاهی و استفاده از روش‌های عددی و تحلیلی به بررسی این موضوع پرداخته‌اند.

آزمایش‌های آزمایشگاهی روشی اصولی و قابل اعتماد برای مطالعه انتشار امواج در سنگ‌های درزه‌دار است (Yang et al., 2018). از این‌رو، در سال‌های گذشته آزمایش‌های مختلفی انجام شده است. یانگ و همکاران (Yang et al., 2019) با انجام آزمایش‌های آزمایشگاهی اثر بازشدگی درزه و ناهمسانگردی (انیزوتروپی) بر انتشار و میرایی امواج را بررسی کردند. نتایج این آزمایش‌ها نشان داد که حضور درزه‌ها سبب کاهش سرعت و دامنه امواج فشاری و برشی می‌شود. لیو و همکاران

(Liu et al., 2019) اثر درزه و لایه‌بندی بر انتشار و میرایی امواج لرزه‌ای تحت اعمال بارهای سه محوره را بررسی کردند. کهرمان (Kahraman, 2002) اثر زیری سطح درزه بر سرعت صوت در نمونه‌هایی به ابعاد $10 \times 10 \times 20$ سانتی‌متر را بررسی و رابطه تجربی بین ضریب زیری و سرعت موج P را ارائه کرد. لوسی و جیورجی (Leucci and Giorgi, 2006) اثر درزه بر سرعت انتشار امواج لرزه‌ای در بلوک‌های سنگی با ابعاد $40 \times 40 \times 60$ سانتی‌متر را بررسی نمودند و بیان کردند که با افزایش تعداد درزه‌ها، دامنه امواج کاهش می‌یابد. الازهاری و همکاران (El Azhari et al., 2013) با استفاده از مدل آزمایشگاهی، اثر تعداد و جهت درزه‌ها بر تضعیف انتشار امواج لرزه‌ای را بررسی کردند. مطالعات وئو و ژائو (Wu and Zhao, 2015) نشان داد که انتشار امواج از فاکتورهایی چون ویژگی‌ها و سبترای مواد پرکننده، درجه اشباع و ویژگی‌های سنگ بکر تأثیر می‌پذیرد. نتایج مطالعات هان و همکاران (Han et al., 2020) نشان داد که ضریب گذر امواج با افزایش سبترای پرشدگی درزه‌ها کاهش می‌یابد. کیم و همکاران (Kim et al., 2021) بیان داشتند که درزه سبب کاهش سرعت امواج برشی و طولی و افزایش تنش باعث افزایش سرعت انتشار امواج می‌شود. یانگ و همکاران (Yang et al., 2018, 2019, 2020) اثر ویژگی‌های مرتبط با درزه بر انتشار امواج را با انجام آزمایش‌های اولتراسونیک بررسی نمودند.

* نویسنده مسئول: ماشاله خامه چیان؛ E-mail: khamechm@modares.ac.ir

ماخذنگاری:

ذوالفقاری، ع.، خامه چیان، م.، نیکودل، م.ر.، و سهرابی بیدار، ع. ۱۴۰۲، مطالعات آزمایشگاهی بررسی اثر درزه بر ارتعاش ذرات در بلوک‌های سنگ آهک. فصلنامه علمی علوم زمین، ۳۳(۱)، ۴۳-۵۴. <https://doi.org/10.22071/gsj.2022.352619.2021>

doi: 10.22071/gsj.2022.352619.2021

doi: 20.1001.1.10237429.1402.33.1.9.6

حقوق معنوی مقاله برای فصلنامه علوم زمین و نویسندگان مقاله محفوظ است.



This is an open access article under the by-nc/4.0/ License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

طبیعت، همواره مجموعه‌ای از پارامترهای متغیر مرتبط با درزه‌داری وجود دارد که بر روی یکدیگر و در نتیجه بر انتشار امواج لرزه‌ای مؤثر می‌باشند. از این رو، لازم است تا با انجام آزمایش‌های بیشتر، اثر همزمان پارامترهای متغیر بر انتشار امواج لرزه‌ای و ارتعاش ذرات بررسی شود. هدف از این مطالعه، بررسی اثر همزمان تعداد درزه، بازشدگی، نوع و سبزی پرشدگی بر دامنه و میزان ارتعاش ناشی از انتشار امواج در سنگ‌های آهکی است. از این رو، آزمایش‌های آزمایشگاهی انتشار امواج لرزه‌ای و اندازه‌گیری ارتعاش ذرات در سه راستای عمود بر هم (یک راستا در جهت انتشار امواج و دو راستای عمود بر جهت انتشار امواج) با هدف دستیابی به روابط تجربی بین پارامترهای درزه‌داری و تغییرات ارتعاش ذرات انجام شده است.

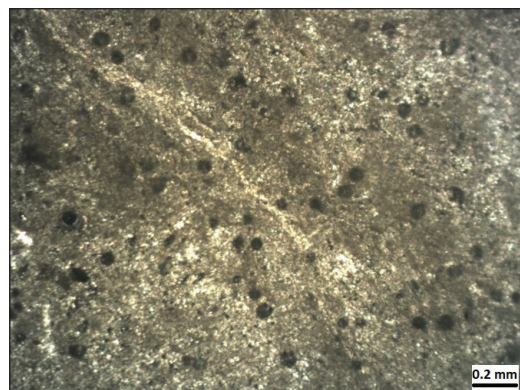
۲- مواد و روش‌ها

اندازه‌گیری ارتعاش ذرات در چهار بلوک سنگ آهک انجام شد. همه نمونه‌ها از سازند آسماری و از یک معدن در استان خوزستان تهیه گردید. نمونه‌ها متشکل از سنگ آهک ریزدانه هستند. نتایج مطالعات انجام شده بر روی مقاطع نازک (شکل ۱) گویای آن است که نمونه‌های سنگی براساس تقسیم‌بندی دانه‌ها از نوع بایوکلست پکستون می‌باشند. پس از جمع‌آوری نمونه‌ها و انتقال به آزمایشگاه زمین‌شناسی مهندسی دانشگاه تربیت مدرس، برخی ویژگی‌های فیزیکی و مقاومتی سنگ بکر بر اساس استاندارد پیشنهاد شده توسط ISRM اندازه‌گیری شد. خلاصه نتایج این اندازه‌گیری‌ها در جدول ۱ ارائه شده است. ویژگی‌های فیزیکی و مقاومتی در این نمونه‌ها تقریباً یکسان است، از این رو، همه نمونه‌های انتقال یافته به آزمایشگاه متشکل از یک نوع سنگ و دارای خواص فیزیکی و مقاومتی یکسان و همانند می‌باشند.

جدول ۱- ویژگی‌های فیزیکی و مقاومتی سنگ بکر.

Table 1. Physical and strength characteristics of intact rock.

Blocks	Density(gr/cm ³)		Porosity(%)	UCS(MPa)	E(GPa)	Vp(m/s)
	Dry	Saturated		Dry	Dry	Dry
Block 1	2.56	2.59	2.99	87	36.58	3589
Block 2	2.53	2.57	3.89	84	35.72	3538
Block 3	2.55	2.58	3.08	87	37.10	3552
Block 4	2.58	2.61	2.83	90	37.51	3595



شکل ۱- تصویر میکروسکوپی از نمونه‌های سنگ آهکی بایوکلست پکستون.

Figure 1. Microscopic images of Bioclastic Packstone samples.

نظر در آزمایشگاه تهیه و سپس برای اندازه‌گیری سرعت موج تراکمی از دستگاه Pundit استفاده شد، به گونه‌ای که سنسور فرستنده در یک طرف نمونه و سنسور گیرنده در طرف دیگر آن قرار گرفت. در نهایت، با اندازه‌گیری سرعت انتشار موج و طول نمونه، سرعت موج طولی در نمونه خاکی محاسبه شد.

۲-۱- آماده‌سازی نمونه‌ها

نمونه‌های سنگ آهک پس از انتقال به آزمایشگاه توسط اهر برش داده شد و چهار بلوک سنگی هر کدام به ابعاد ۱۰×۱۰×۵ سانتی‌متر تهیه گردید. این بلوک‌ها

نتایج این آزمایش‌ها نشان داد که وجود درزه‌ها افزون بر تغییر شکل موج، سرعت و دامنه موج را نیز کاهش می‌دهند.

روش‌های عددی دیگر روش برای مطالعه انتشار امواج لرزه‌ای و دینامیک سنگ است. اخیراً مطالعات زیادی با استفاده از روش المان مرزی (Gu et al., 1997)، روش اجزای محدود (Gao et al., 2015; Wang et al., 2006; Cai and Zaho, 2000) و روش اجزای گسسته (Zhao et al., 2008; Liu et al., 2015; Chong et al., 2020) انجام شده است. روش‌های عددی می‌توانند مسائل پیچیده دارای چندین درزه و با زوایای برخورد متفاوت را حل نمایند. با این حال، قابل اعتماد بودن مدل‌سازی عددی به صحت مدل عددی، شرایط مرزی و نسبت‌های ساختاری وابسته است (Yang et al., 2018).

افزون بر روش‌های عددی و آزمایشگاهی، پژوهشگران مختلف، مدل‌های تئوریک و تحلیلی گوناگونی برای بررسی پاسخ دینامیکی درزه ارائه کرده‌اند (Zhu et al., 2011; Zheng et al., 2020). این مطالعات فهم پایه برای اثر درزه بر انتشار امواج لرزه‌ای را ارائه می‌کنند. مدل‌های تحلیلی رایج تنها راجع به مسائل نسبتاً ساده براساس فرضیه‌های مختلف بحث می‌کنند از این رو کاربردشان محدود است (Yang et al., 2018).

مدل‌های عددی و تحلیلی نیازمند تأیید براساس آزمایش‌های آزمایشگاهی یا صحرایی است. با وجود استفاده گسترده از روش‌های آزمایشگاهی برای بررسی انتشار امواج لرزه‌ای، جنبه‌های مختلف اثرات درزه‌داری بر انتشار امواج لرزه‌ای به اندازه کافی مطالعه نشده است (Zhukov and Kuzmin, 2020). همچنین در مطالعات پیشین، با تغییر یک پارامتر و ثابت نگه داشتن سایر پارامترهای درزه‌داری، اثر جداگانه پارامتر متغیر بر انتشار امواج مورد بررسی قرار گرفته است. حال آن که در

در این مطالعه، به منظور بررسی نقش مواد پرکننده بر ارتعاش ذرات، از دو نوع مواد پرکننده استفاده شده است. مواد پرکننده درزه‌ها در این آزمایش‌ها شامل دو نوع خاک رسی و خاک ماسه‌ای با ویژگی‌های ارائه شده در جدول ۲ و توزیع دانه‌بندی در شکل ۲ است.

اندازه‌گیری سرعت موج تراکمی در مواد پرکننده درزه‌ها (مصلح خاکی) مشابه با روش اندازه‌گیری سرعت موج تراکمی در بلوک‌های سنگی و با استفاده از دستگاه Pundit بر طبق استاندارد ASTM D2845 (1978) انجام شد. برای اندازه‌گیری سرعت موج طولی در نمونه‌های خاکی، ابتدا نمونه خاک با چگالی و درصد رطوبت مورد

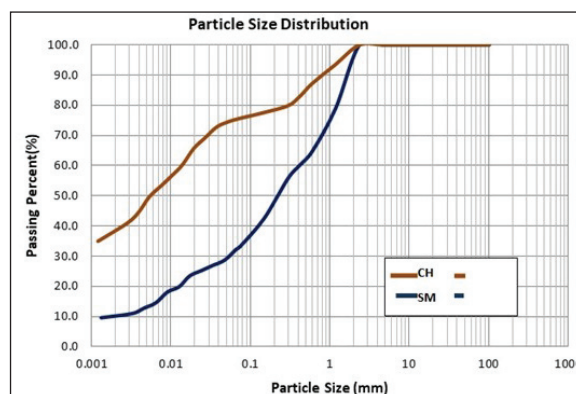
در بلوک شماره ۴ در تغییر است. این درزه‌ها با زاویه قائم و در جهت عمود بر محور طولی بلوک‌ها به صورت مصنوعی و توسط اره ایجاد شدند. لازم به یادآوری است که فاصله درزه‌ها در هر چهار بلوک ثابت و برابر با ۸ سانتی‌متر است (شکل ۳-ب).

فاقد درزه و شکاف بوده و همگی از سنگ بکر تشکیل شده‌اند (شکل ۳-ا). به منظور بررسی اثر درزه‌ها بر تغییرات ارتعاش ذرات، پارامترهای درزه‌داری شامل تعداد درزه‌ها، بازشدگی درزه‌ها، نوع و ستبرای مواد پرکننده مورد توجه قرار گرفت. تعداد درزه‌ها در این آزمایش از یک درزه در بلوک شماره ۱ تا چهار درزه

جدول ۲- ویژگی‌های مواد پرکننده درزه‌ها.

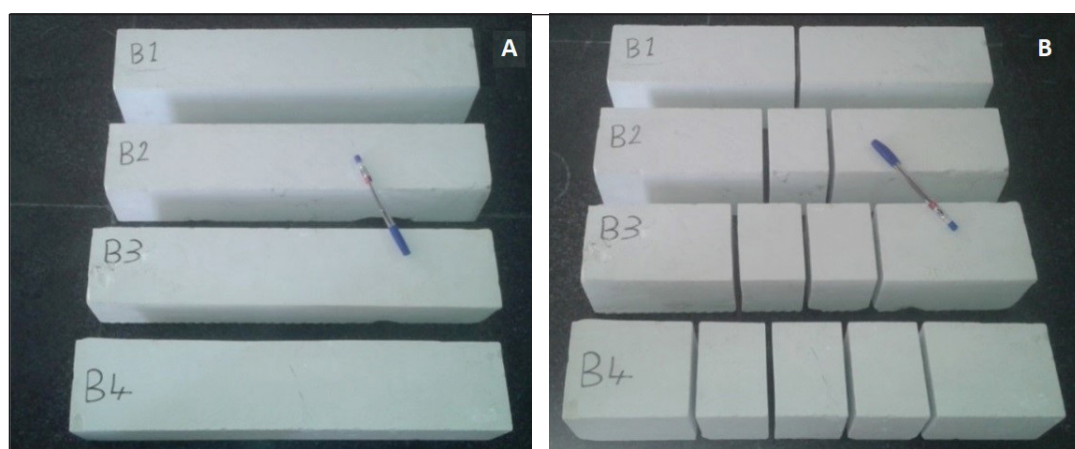
Table 2. Characteristics of joint filling materials.

Joint filling	Density (gr/cm ³)	Water content (%)	Plasticity index (%)	Liquid limit (%)	Vp(m/s)
Clay (CH)	1.87	22	32	52	1527
Sand (SM)	1.92	22	11	36	1985



شکل ۲- نمودار توزیع دانه‌بندی خاک‌های ماسه‌ای و رسی مورد استفاده.

Figure 2. Grain size distribution diagram of the used sandy and clay soils.



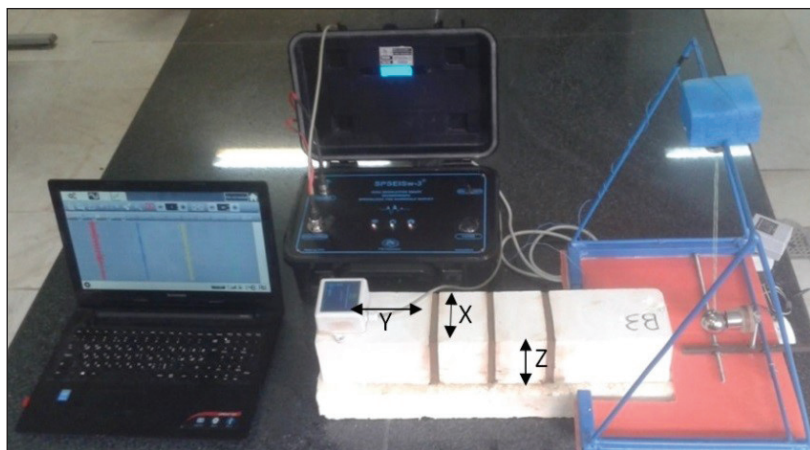
شکل ۳- بلوک‌های سنگی (A) بدون درزه و (B) درزه‌دار.

Figure 3. Rock blocks (A) without joints and (B) with joints.

جذب و رهاسازی آونگ توسط آهنربای الکتریکی انجام شد. امواج لرزه‌ای ایجاد شده ناشی از برخورد آونگ پس از عبور از داخل بلوک سنگی سبب ارتعاش ذرات در سنگ می‌شود. ثبت و اندازه‌گیری ارتعاش ذرات در بلوک‌های سنگی توسط ژئوفون سه مولفه‌ای ۳۰ هرتز و دستگاه لرزه‌نگار مدل SPSEISw با سه کانال فعال و فاصله داده‌برداری ۳۳ میکروثانیه انجام شد (شکل ۴). در این سری از آزمایش‌ها محل قرارگیری ژئوفون بر روی بلوک سنگی و در انتهای آن می‌باشد. بدیهی است با تغییر موقعیت ژئوفون، نتایج ثبت شده متفاوت خواهد بود. از این رو، در همه آزمایش‌ها دقت شد تا ژئوفون در موقعیت‌های یکسان و مشابه قرار داده شود.

۲-۲- روش انجام آزمایش

در مطالعات پیشین که با انتشار امواج اولتراسونیک در نمونه‌های آزمایشگاهی انجام شده است، ارتعاش ذرات ناشی از انتشار امواج با بسامد (فرکانس) بالا و دامنه پایین مورد بررسی قرار گرفته است. در این مطالعه تلاش شده تا ارتعاش ذرات ناشی از انتشار امواج با بسامد کمتر و دامنه بزرگ‌تر از امواج اولتراسونیک ثبت و مورد مطالعه قرار گیرد. از این رو، با نواختن ضربه ناشی از حرکت آونگ ساده بر بلوک سنگی، امواج لرزه‌ای با بسامد ۲۰۰ تا ۲۶۰۰ هرتز ایجاد شد. در این آونگ به منظور ایجاد ضربه‌هایی با انرژی برابر، وزنه‌ای به جرم ۱۲۵ گرم با زاویه ۵ درجه نسبت به قائم رها گردید و بر بلوک سنگی ضربه نواخته شد (شکل ۴).



شکل ۴- نمایی از تجهیزات تولید موج و اندازه گیری ارتعاش ذرات.

Figure 4. Wave source and particle vibration record equipment.

تمامی جهت ها ارائه می کند. از این رو، در این مطالعه نیز مقدار PPV توسط لرزه سنج سه مؤلفه در سه جهت (یک مؤلفه در جهت انتشار امواج لرزه ای و دو مؤلفه عمود بر راستای انتشار امواج) ثبت و اندازه گیری شد. سپس اثر ویژگی های درزه داری بر تغییرات PPV در هر کدام از این جهات بررسی گردید.

برای تحلیل دقیق تر نحوه و میزان تغییرات PPV متأثر از ویژگی های درزه داری، شاخصی تحت عنوان «کاهش حداکثر سرعت ذرات» (Peak Particle Velocity Reduction (PPVR)) تعریف شد که بیان کننده میزان کاهش PPV در هر حالت از درزه داری نسبت به سنگ بکر و بدون درزه است.

$$PPVR = \frac{PPV_0 - PPV}{PPV_0} \quad (1)$$

در رابطه ۱، PPV و PPV₀ به ترتیب پیشینه سرعت ذرات در نمونه سنگ بکر و نمونه درزه دار است. با این شاخص می توان درصد افت PPV متأثر از شرایط درزه داری مختلف در یک نمونه را تعیین کرد. مهم تر این که می توان به راحتی درصد کاهش PPV در نمونه های مختلف با شرایط درزه داری گوناگون را با هم مقایسه کرد.

در بیشتر مطالعات پیشین انجام شده، به منظور بررسی ارتباط بین ویژگی های درزه داری و پارامترهای مرتبط با انتشار امواج لرزه ای اعم از سرعت انتشار امواج و PPV، تنها به ارائه روابط تجربی ساده و دربردارنده تنها یک ویژگی درزه داری مانند بازشدگی، پرشدگی، جهت درزه یا تعداد درزه بسنده شده است. حال آن که بهتر است اثر همزمان چند ویژگی درزه داری بر پارامترهای مرتبط با انتشار امواج لرزه ای بررسی گردد و رابطه ای کامل تر ارائه گردد. در این پژوهش با انجام ۶۰ آزمایش آزمایشگاهی، اثر همزمان تغییرات تعداد درزه، بازشدگی، نوع و ستبرای پرشدگی بر مقدار PPV بررسی و رابطه تجربی چند متغیره ارائه گردیده است.

۳-۱- کمی سازی ویژگی های درزه

برای بررسی اثر ویژگی های درزه داری و ارائه رابطه تجربی لازم است تا ابتدا با کمی سازی ویژگی های درزه داری، شاخصی معرفی گردد که بیانگر شرایط درزه داری در بلوک های سنگی باشد. این شاخص تحت عنوان شاخص درزه داری معرفی می گردد. برای دستیابی به شاخص درزه داری در اولین گام برای کمی کردن نوع پرشدگی درزه، از شاخص امپدانس استفاده شد. امپدانس یک ماده برابر است با حاصل ضرب چگالی در سرعت انتشار امواج طولی در آن ماده (Zhang et al., 2020). مواد پرکننده در این سری از آزمایش ها شامل خاک رس و خاک ماسه ای است. شاخص امپدانس این مواد و بلوک های سنگی به شرح جدول ۳ است.

پیش از شروع آزمایش، بلوک های سنگی در آون قرار گرفت تا خشک شوند. روش انجام آزمایش این گونه بوده که ابتدا و پیش از ایجاد درزه در هر بلوک با نواختن ضربه به انتهای بلوک، ارتعاش ذرات در سنگ بکر در سه جهت توسط ژئوفون سه مؤلفه ای در دیگر انتهای بلوک ثبت شد. سه جهت ثبت ارتعاش ذرات در شکل ۴ نشان داده شده اند، Y: هم راستا با انتشار امواج در صفحه افقی، Z: عمود بر امتداد انتشار امواج در صفحه قائم، X: عمود بر امتداد انتشار امواج در صفحه افقی می باشند. سپس به منظور بررسی اثر درزه ها بر ارتعاش ذرات، آزمایش بر روی بلوک های درزه دار انجام شد. در بلوک شماره ۱ با یک درزه در وسط بلوک، میزان بازشدگی درزه از ۳-۶-۹-۱۲-۱۵-۱۸-۲۱ میلی متر تغییر یافت و اندازه گیری ها برای هر مقدار بازشدگی در دو سری انجام شد. در سری اول، درزه پر شده با خاک رس و در سری دوم، درزه پر شده با خاک ماسه ای مورد آزمایش قرار گرفت. این سری آزمایش ها بر روی بلوک های شماره ۲ با دو درزه، بلوک شماره ۳ با سه درزه و بلوک شماره ۴ با چهار درزه نیز انجام شد. برای مثال در شکل ۴ آزمایش بر روی بلوک شماره ۳ با سه درزه قائم هر کدام با بازشدگی ۱۰ میلی متر و پر شده با خاک رس نشان داده شده است. لازم به توضیح است مصالح خاکی استفاده شده دارای رطوبت ۲۲ درصد و در واقع خمیری می باشند. این مصالح به دلیل چسبنده بودن، در درون درزه های مصنوعی در حالت پایدار می باشند و به فضای بیرون تخلیه نمی شوند.

۳-۲ بحث

برای توصیف ارتعاش ذرات اگرچه پارامترهای میزان جابه جایی، سرعت و شتاب ذره قابل استفاده است، اما پارامتر پیشینه سرعت درزه ((Peak Particle Velocity (PPV)) ترجیح داده می شود (ISRM, 1992). دلیل استفاده از پیشینه سرعت ذره این است که به طور تنوری نشان داده شده که دگرشکلی ایجاد شده در محیط، متناسب با سرعت ذرات است (Athanasopoulos and Pelekis, 2000). طبق نظر پژوهشگران مختلف و مرور ادبیات فنی، پیشینه سرعت ذرات (PPV) به عنوان شاخص برای اندازه گیری مقدار ارتعاش ذرات معرفی شده است (Singh, 2004; Singh and Singh, 2005; Khandelwal and Singh, 2006; Monjezi et al., 2010; Hudaverdi, 2012; Kumar et al., 2016). در این مطالعه نیز از پارامتر PPV به منظور بررسی میزان ارتعاش ذرات ناشی از انتشار امواج لرزه ای استفاده شده است.

اگرچه فاکتور پیشینه سرعت ذره برای هر نقطه با استفاده از لرزه سنج های سه مؤلفه ای و محاسبه برآیند سرعت ذره در سه جهت تعیین می شود، اما بنابر نتایج به دست آمده از پژوهش های کوزو (Kuzu, 2008) ارائه روابط تجربی بین ویژگی های درزه داری سنگ و PPV در هر جهت، برآورد بهتری نسبت به یک رابطه کلی برای

جدول ۳- امپدانس مواد پرکننده درزه ها و بلوک های سنگی.

Table 3. Impedance of filling materials for joints and rock blocks.

	Clay (CH)	Sand (SM)	Block 1	Block 2	Block 3	Block 4
Density(gr/cm ³)	1.87	1.92	2.56	2.53	2.55	2.58
Vp(m/s)	1527	1985	3589	3538	3552	3595
Impedance (kg/m ² .sec)	2855490	3811200	9187840	8951140	9057600	9275100

در این رابطه، N: تعداد شکستگی، Vc: حجم یک شکستگی و V: حجم مدل یا نمونه است. مقدار چگالی شکستگی برای هر بلوک با درزهایی با بازشدگی متفاوت طبق رابطه ۳ محاسبه و در جدول ۵ ارائه شده است.

در گام آخر، حاصل ضرب نسبت امپدانس در چگالی شکستگی به عنوان شاخص درزه داری معرفی شد (رابطه ۴). این شاخص دربردارنده ویژگی های درزه اعم از تعداد درزه، بازشدگی درزه و نوع پرشدگی است و می تواند معرف شرایط درزه داری در هر بلوک باشد.

$$\text{Joint Index (JI)} = \epsilon_c \times IR \quad (4)$$

مقدار شاخص درزه داری برای هر بلوک با درزهایی با بازشدگی و پرشدگی متفاوت طبق رابطه ۴ محاسبه و در جدول ۶ ارائه شده است.

نسبت امپدانس سنگ بکر به امپدانس مواد پرکننده به عنوان فاکتور ناهمگنی سنگ معرفی شده که پارامتری مؤثر بر ویژگی های انتشار و انعکاس امواج لرزه ای است (Boadu and Long, 1996).

$$(2) \quad (\text{امپدانس مواد پرکننده}) / (\text{امپدانس سنگ بکر}) = \text{نسبت امپدانس}$$

در این پژوهش نیز از فاکتور نسبت امپدانس برای معرفی نوع پرشدگی استفاده شد. نسبت امپدانس پرشدگی ها در هر بلوک سنگی در جدول ۴ ارائه شده است.

در دومین گام برای کمی سازی و تلفیق اثر تعداد درزه و بازشدگی درزه ها، از رابطه چگالی (دانسیته) شکستگی ارائه شده توسط هادسون استفاده شد. براساس رابطه هادسون (Hudson, 1981) چگالی شکستگی در یک نمونه سنگی برابر است با

$$\epsilon_c = \frac{N V c}{V} \quad (3)$$

جدول ۵- چگالی شکستگی در بلوک های سنگی.

Table 5. Fracture density in rock blocks.

Aperture (cm)	Block 1	Block 2	Block 3	Block 4
0.3	0.006	0.012	0.018	0.024
0.6	0.012	0.024	0.036	0.048
0.9	0.018	0.036	0.054	0.072
1.2	0.024	0.048	0.072	0.096
1.5	0.030	0.060	0.090	0.120
1.8	0.036	0.072	0.108	0.144
2.1	0.042	0.084	0.126	0.168

جدول ۴- نسبت امپدانس مواد پرکننده درزه ها در بلوک های سنگی.

Table 4. Impedance ratio of filling materials for joints in rock blocks.

	Clay (CH)	Sand (SM)
Block 1	3.218	2.411
Block 2	3.135	2.349
Block 3	3.172	2.377
Block 4	3.249	2.434

جدول ۶- شاخص درزه داری در بلوک های سنگی.

Table 6. Joint Index of rock blocks.

Blocks		Block 1			Block 2			Block 3			Block 4		
Filling		Air	Clay	Sand	Air	Clay	Sand	Air	Clay	Sand	Air	Clay	Sand
Aperture (cm)	0.3	136.203	0.019	0.014	265.389	0.038	0.028	402.818	0.057	0.043	549.988	0.078	0.058
	0.6	272.407	0.039	0.029	530.779	0.075	0.056	805.637	0.114	0.086	1099.977	0.156	0.117
	0.9	408.610	0.058	0.043	796.168	0.113	0.084	1208.456	0.171	0.128	1649.966	0.234	0.175
	1.2	544.814	0.077	0.058	1061.557	0.150	0.113	1611.274	0.228	0.171	2199.955	0.312	0.234
	1.5	681.018	0.097	0.072	1326.947	0.188	0.141	2014.093	0.286	0.214	2749.943	0.390	0.292
	1.8	817.221	0.116	0.087	1592.336	0.226	0.169	2416.912	0.343	0.257	3299.932	0.468	0.350
	2.1	953.425	0.135	0.101	1857.725	0.263	0.197	2819.730	0.340	0.299	3849.920	0.546	0.409

۳-۲- نتایج

سری اول و دوم آزمایش‌ها به ترتیب بر روی بلوک‌های درزه‌دار با پرشدگی رس و ماسه انجام شد. با توجه به اینکه اثر نوع مواد پرکننده درزه‌ها توسط نسبت امپدانس کمی گردید و در رابطه شاخص درزه‌داری قرار داده شد، از این رو، با استفاده از این شاخص امکان بهره‌برداری از تمامی داده‌های حاصل از هر دو سری آزمایش‌ها در یک جامعه آماری واحد با هدف دستیابی به رابطه بین شاخص درزه‌داری و PPVR مقدور می‌باشد. از این رو، با بررسی جامعه آماری داده‌های حاصل از ارتعاش ذرات در همه نمونه‌ها، شامل نمونه‌های با پرشدگی رس (سری اول آزمایش‌ها) و ماسه (سری دوم آزمایش‌ها)، با استفاده از روش آماری حداقل مربعات، همبستگی داده‌های شاخص درزه‌داری و PPVR مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج این بررسی‌ها در شکل ۵ ارائه شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود در بلوک‌های درزه‌دار با پرشدگی رس یا ماسه با افزایش شاخص درزه‌داری مقدار PPVR در هر سه جهت افزایش یافته است و رابطه لگاریتمی بین شاخص درزه‌داری و مقدار PPVR در بلوک‌های درزه‌دار دارای مواد پرکننده وجود دارد.

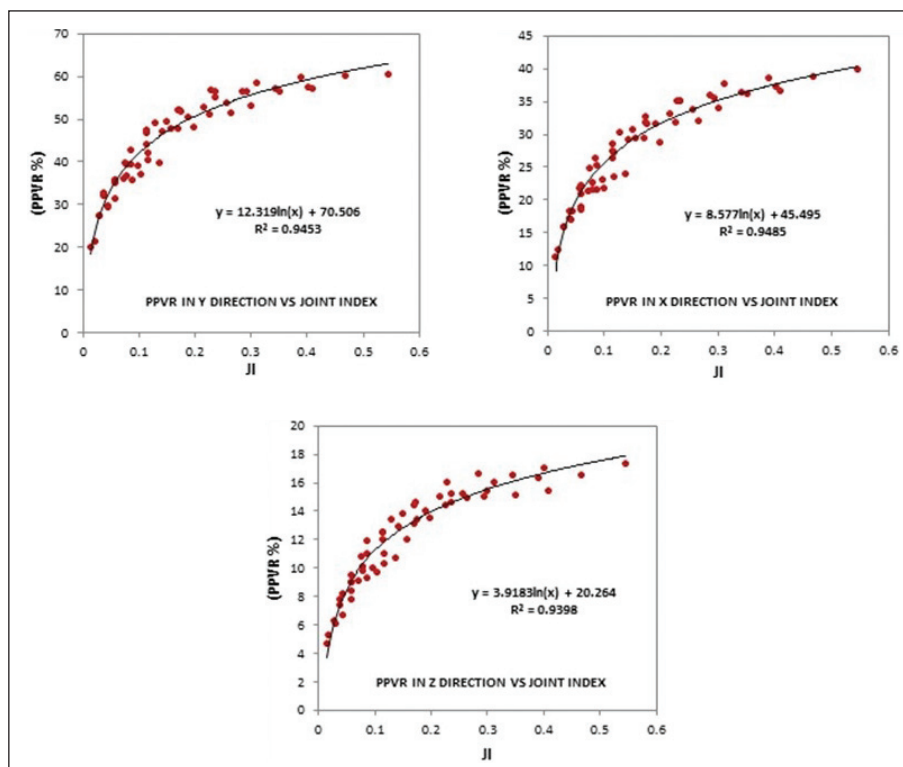
$$R^2=0.94 \quad PPVR = 12.319\ln(JI) + 70.506 \quad \text{در جهت Y} \quad (5)$$

$$R^2=0.95 \quad PPVR = 8.577\ln(JI) + 45.495 \quad \text{در جهت X} \quad (6)$$

$$R^2=0.94 \quad PPVR = 3.9183\ln(JI) + 20.264 \quad \text{در جهت Z} \quad (7)$$

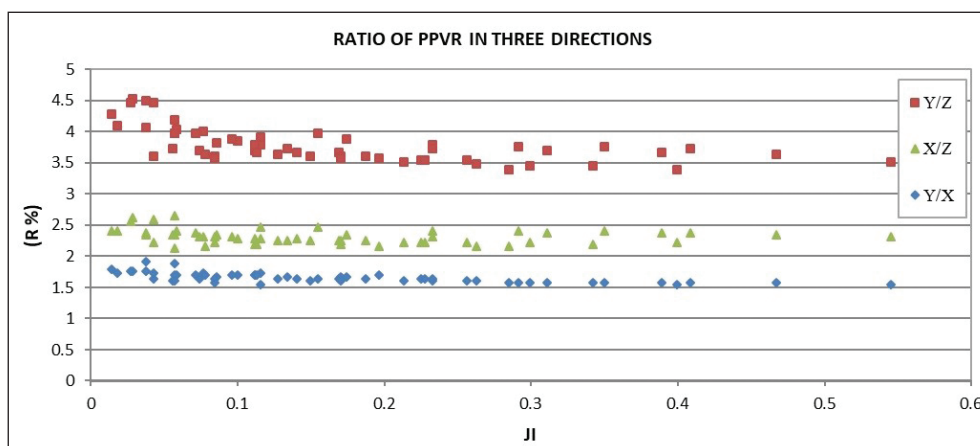
با توجه به شکل ۵ و روابط بالا، سهم شاخص درزه‌داری مختلف در افزایش PPVR یکسان نمی‌باشد و در بازه ۰ تا ۰/۶ از شاخص درزه‌داری، نرخ افزایش PPVR

بیش از سایر شاخص‌های درزه‌داری است. به‌طور کلی بررسی نتایج آزمایش روی بلوک‌های درزه‌دار دارای پرشدگی بیانگر آن است که اگرچه با افزایش شاخص درزه‌داری، مقدار PPVR افزایش می‌یابد، اما این روند افزایشی به صورت غیرخطی است و با افزایش تعداد و مقدار بازشدگی درزه‌ها، ارتعاش ذرات با نرخ کمتری کاهش می‌یابد. دلیل افزایش غیرخطی مقدار PPVR آن است که با افزایش تعداد درزه، رفتار دینامیکی در نمونه تغییر می‌یابد. این تغییر رفتار در ابتدا و با اضافه کردن یک درزه به بلوک سنگی مشخص تر می‌باشد، به دلیل آن‌که با افزودن اولین درزه، رفتار دینامیکی در سنگ بکر به رفتار دینامیکی در سنگ درزه‌دار تغییر می‌یابد. با افزودن تعداد درزه‌ها در روند آزمایش، نمونه سنگی به سنگ درزه‌دار و همگن با رفتار دینامیکی رو به ثبات تبدیل می‌شود. از این رو، افزایش بیشتر درزه‌ها به نمونه سنگی اگرچه همچنان سبب افزایش PPVR می‌شود، اما این نرخ افزایش به دلیل رفتار دینامیکی رو به ثبات در سنگ درزه‌دار با شیب کمتری انجام می‌شود. مقدار کاهش ارتعاش ذرات به سبب حضور درزه در بلوک‌های سنگی در سه جهت X، Y و Z برابر نمی‌باشند. شکل ۶ نسبت PPVR در جهت‌های مختلف را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل، PPVR در جهت Y حدود ۳/۴ تا ۴/۵ برابر PPVR در جهت Z و ۱/۵ تا ۲ برابر PPVR در جهت X است. بنابراین وجود درزه‌های دارای پرشدگی در بلوک‌های سنگی، ارتعاش ذرات در جهت انتشار امواج (جهت Y) را بیش از سایر جهات کاهش داده است. نسبت PPVR در جهت X به PPVR در جهت Z بین ۲ تا ۲/۷ در تغییر است. در بلوک‌های درزه‌دار دارای پرشدگی ارتعاش ذرات در جهت Y بیش از جهت X و ارتعاش ذرات در جهت X بیش از جهت Z کاهش یافته است.



شکل ۵- تغییرات PPVR در برابر شاخص درزه‌داری (JI) در بلوک‌های درزه‌دار با پرشدگی.

Figure 5. PPVR versus joint index (JI) in jointed rock blocks with filling.



شکل ۶- نسبت PPVR در بلوک‌های درزه‌دار با پرشدگی در سه جهت X، Y و Z.

Figure 6. PPVR ratio in three directions Y, X and Z in jointed rock blocks with filling.

۴- نتیجه گیری

- در بلوک‌های سنگی درزه‌دار، با افزایش شاخص درزه‌داری، مقدار PPVR افزایش می‌یابد اما این روند افزایشی به صورت غیرخطی است و با افزایش تعداد و مقدار بازشدگی درزه‌ها، ارتعاش ذرات با نرخ کمتری کاهش می‌یابد.

- مقدار کاهش ارتعاش ذرات به سبب حضور درزه در بلوک‌های سنگی در سه جهت X، Y و Z برابر نمی‌باشند و ارتعاش ذرات در جهت انتشار امواج (جهت Y) بیش از سایر جهات کاهش می‌یابد.

- پیشنهاد می‌شود این مطالعات آزمایشگاهی روی سایر سنگ‌ها با دیگر مواد پرکننده انجام گردد تا رابطه جامع‌تری حاصل گردد.

سپاسگزاری

مقاله حاضر بخشی از دستاوردهای رساله دکتری نگارنده ردیف اول است. نگارندگان این مقاله مراتب سپاس و قدردانی خود را از کارکنان بخش آزمایشگاه زمین‌شناسی مهندسی دانشگاه تربیت مدرس ابراز می‌دارند. همچنین از نظرات داوران محترم که سبب بهبود و ارتقای کیفیت مقاله شد، کمال تشکر را دارند.

در این پژوهش، آزمایش‌های آزمایشگاهی با هدف بررسی اثر همزمان تعداد درزه، بازشدگی، نوع و سبب پرشدگی درزه‌ها بر تغییر ارتعاش ذرات ناشی از انتشار امواج لرزه‌ای انجام شد. درزه‌ها توسط اهر به صورت مصنوعی در بلوک‌های سنگی ایجاد و برای شبیه‌سازی هرچه بیشتر شرایط طبیعی، با خاک رس و ماسه پر شدند. ارتعاش ناشی از برخورد آونگ به بلوک‌های سنگ بکر و درزه‌دار در سه جهت عمود بر هم ثبت و با استفاده از روش آماری تفسیر شد و روابطی با بیشینه همبستگی بین شاخص درزه‌داری و تغییر بیشینه ارتعاش ذرات به‌دست آمد. مهم‌ترین نتایج به‌دست آمده به شرح ذیل است:

- کمی‌سازی نوع پرکننده درزه‌ها براساس ضریب امیدانس مواد و همچنین کمی‌سازی تعداد و بازشدگی درزه‌ها براساس چگالی شکستگی و در نهایت معرفی شاخص درزه‌داری، روشی کارا برای دستیابی به روابط تجربی بین ویژگی‌های درزه و تغییر ارتعاش ذرات است.

- براساس بند بالا، در مدل‌سازی‌های عددی می‌توان از شاخص درزه‌داری تعریف شده در این مطالعه به منظور معرفی ویژگی‌های درزه‌های موجود در توده سنگ استفاده نمود.

References

- Athanasopoulos, G.A., and Pelekis, P.C., 2000. Ground vibrations from sheet pile driving in urban environment: measurements, analysis and effects on buildings and occupants. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 19:371–87. DOI:10.1016/s0267-7261(00)00008-7.
- Barton, N., 2006. *Rock Quality, Seismic Velocity, Attenuation and Anisotropy*. CRC Press: Boca Raton, FL, USA, 756p. DOI.org/10.1201/9780203964453.
- Boadu, F.K., 1997. Fractured rock mass characterization parameters and seismic properties, analytical studies. *Journal of Applied Geophysics*, 36: 1–19. DOI.org/10.1016/S0926-9851(97)00008-6.
- Boadu, F.K., and Long, L.T., 1996. Effects of fractures on seismic-wave velocity and attenuation. *Geophysical Journal International*, 127: 86–110. DOI.org/10.1111/j.1365-246X.1996.tb01537.x.
- Cai, J. G., and Zaho, J., 2000. Effects of multiple parallel fractures on apparent wave attenuation in rock masses. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 37(4): 661–682. DOI:10.1016/S1365-1609(00)00013-7.
- Chong, S.H., Kim, J.W., Cho, G.C., and Song, K.I., 2020. Preliminary numerical study on long-wavelength wave propagation in a jointed rock mass. *Geomechanics and Engineering*, 21:227–236. DOI.org/10.12989/gae.2020.21.3.227.
- El Azhari, H., El Amrani, I-E., and El Hassani, I-E., 2013. Effect of the number and orientation of fractures on the P-wave velocity diminution: application on the building stones of the rabat area (Morocco). *Geomaterials*, 3: 71–81. DOI:10.4236/gm.2013.33010.
- Gao, K., Fu, S., Gibson, R. L., Chung, E. T., and Efendiev, Y., 2015. Generalized multiscale finite-element method (GMSFEM) for elastic wave propagation in heterogeneous, anisotropic media. *Journal of Computational and Physics*, 259: 161–188. DOI:10.1016/j.jcp.2015.03.068.
- Gu, B., Nihei, K. T., and Myer, L. R., 1997. Numerical investigation of fracture interface waves. *Journal of the Acoustical Society of America*, 102 (1): 120–127. DOI:10.1121/1.419769.
- Han, Z., Li, D., Zhou, T., Zhu, Q., and Ranjith, P.G., 2020. Experimental study of stress wave propagation and energy characteristics across rock specimens containing cemented mortar joint with various thicknesses. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 131: 104352. DOI.org/10.1016/j.ijrmms.2020.104352.
- Hudaverdi, T., 2012. Application of multivariate analysis for prediction of blast-induced ground vibrations. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 43:300–308. DOI:10.1016/j.soildyn.2012.08.002.
- Hudson, J.A., 1981. Wave speeds and attenuation of elastic waves in material containing cracks. *Geophysical Journal International*, 64(1): 133– 150. DOI.org/10.1111/j.1365-246X.1981.tb02662.x.
- ISRM, 1992. Suggested method for blast vibration monitoring. *International Journal of Rock Mechanics and Mining & Sciences*, 29(2):145–6. <http://worldcat.org/issn/01489062>.
- Jug, J., Stanko, D., Grabar, K., and Hrzenjak, P., 2020. New approach in the application of seismic methods for assessing surface excavatability of sedimentary rocks. *Bulletin of Engineering Geology and Environment*, 79: 3797–3813. DOI:10.1007/s10064-020-01802-1.
- Kahraman, S., 2002. The effects of fracture roughness on P-wave velocity. *Engineering Geology*, 63: 347– 350. DOI.org/10.1016/S0013-7952(01)00089-8.
- Khandelwal, M., and Singh, T.N., 2006. Prediction of blast induced ground vibrations and frequency in opencast mine: a neural network approach. *Journal of Sound and Vibration*, 289 (4–5):711–25. DOI:10.1016/j.jsv.2005.02.044.
- Kim, J.W., Chong, S.H., and Cho, G.C., 2021. Effects of gouge fill on elastic wave propagation in equivalent continuum jointed rock mass. *Materials*, 14: 3173. DOI: 10.3390/ma14123173.
- Kumar, R., Choudhury, D., and Bhargava, K., 2016. Determination of blast-induced ground vibration equations for rocks using mechanical and geological properties. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 8: 341–349. DOI.org/10.1016/j.jrmge.2015.10.009.
- Kuzu, C., 2008. The importance of site-specific characters in prediction models for blast-induced ground vibrations. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 28: 405–414. DOI:10.1016/j.soildyn.2007.06.013.
- Leucci, G., and Giorgi, L.D., 2006. Experimental studies on the effects of fracture on the P and S wave velocity propagation in sedimentary rock (Calcarenite del Salento). *Engineering Geology*, 84: 130–142. DOI:10.1016/j.enggeo.2005.12.004.
- Liu, T., Li, J., Li, H., Zheng, Y., and Li, N., 2015. Numerical analysis on effect of nonlinear joints on propagation of stress wave. 34(5): 953–959. DOI:10.13722/j.cnki.jrme.2014.0262.
- Liu, Y., Lu, C-P., Liu, B., Zhang, H., and Wang, H-Y., 2019. Experimental and field investigation on seismic response of joints and bedding in rocks. *Ultrasonic*, 97: 46–56. DOI: 10.1016/j.ultras.2019.05.001.
- Monjezi, M., Ahmadi, M., Sheikhan, M., Bahrami, A., and Salimi, A.R., 2010. Predicting blast-induced ground vibration using various types of neural networks. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 30:1233–1236. DOI.org/10.1016/j.soildyn.2010.05.005.
- Resende, J.R.P., 2010. An investigation of stress wave propagation through rock joints and rock masses. Ph.D. Thesis, Universidade do Porto, Porto, Portugal.
- Singh, T.N., 2004. Artificial neural network approach for prediction and control of ground vibrations in mines. *Mining Technology*, 113(4):251–256. DOI:10.1179/037178404225006137.

- Singh, T.N., and Singh, V., 2005. An intelligent approach to prediction and control ground vibration in mines; *Geotechnical and Geological Engineering*, 23:249–62. DOI:10.1007/S10706-004-7068-X.
- Wang, W.H., Li, X-B., Zuo, 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: 728-734. DOI.org/10.1016/S1003-6326(06)60129-5.
- Wu, W., and Zhao, J., 2015. Effect of water content on P-wave attenuation across a rock fracture filled with granular materials. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 48: 867–871. DOI:10.1007/s00603-014-0606-9.
- Yang, H., Duan, H.F., and Zhu, J. B., 2019. Ultrasonic P-wave propagation through water-filled rock joint: An experimental investigation. *Journal of Applied Geophysics*, 169: 1–14. DOI.org/10.1016/j.jappgeo.2019.06.014.
- Yang, H., Duan, H-F., and Zhu, J., 2020. Effects of filling fluid type and composition and joint orientation on acoustic wave propagation across individual fluid-filled rock joints. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 128: 104248. DOI:10.1016/j.ijrmms.2020.104248.
- Yang, L., Mei, J., Li, S.H., Jiang, Y., Guo, K., Zhang, B., and Yang, W., 2018. Experimental study of open fractures multifarious effects on ultrasonic wave propagation in rock masses. *Journal of the Society of Materials Science, Japan*, 67(8): 818. DOI.org/10.2472/jsms67.811.
- Zhang, Z.X., Hou, D.F., and Aladejare, A., 2020. Empirical equations between characteristic impedance and mechanical properties of rocks. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 12: 975-983. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2020.05.006>.
- Zhao, X. B., Zhao, J., Cai, J. G, and Hefny, A. M., 2008. UDEC modeling on wave propagation across fractured rock masses. *Computer and Geotechnics.*, 35: 97-104. DOI.org/10.1016/j.compgeo.2007.01.001.
- Zheng, B., Qi, Sh., Huang, X., Liu, Y., Xue, L., and Liang, N., 2020. Stress wave propagation through rock joints filled with viscoelastic medium considering different water contents. *Applied Sciences*, 10: 47-97. DOI:10.3390/app10144797.
- Zhu, J.B., Perino, A., Zhao, G.F., Barla, G., Li, J.C., Ma, G.W., and Zhao, J., 2011. Seismic response of a single and a set of filled joints of viscoelastic deformational behavior. *Geophysical Journal International*, 186: 1315–1330. DOI.org/10.1111/j.1365-246X.2011.05110.x.
- Zhukov, V.S., and Kuzmin, Y. O., 2020. The influence of fracturing of the rocks and model materials on p-wave propagation velocity: experimental studies. *Physics of the solid earth*, 56 (4): 39-50. Doi: 10.1134/S1069351320040102.