

## بررسی تأثیر تخلخل سنگ مصنوعی در اندازه‌گیری تنش به روش انتشار آوایی محمود قورچیان<sup>۱</sup>؛ مرتضی احمدی<sup>۲\*</sup>؛ حمید اسکندری<sup>۳</sup>

۱- کارشناسی ارشد مکانیک سنگ، بخش مهندسی معدن، دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه تربیت مدرس  
۲- استاد مکانیک سنگ، بخش معدن، دانشگاه تربیت مدرس، moahmadi@modares.ac.ir  
۳- دانشیار گروه عمران، دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه حکیم سبزواری  
(دریافت ۳۰ فروردین ۱۳۹۶، پذیرش ۲۱ آبان ۱۳۹۶)

### چکیده

تخمین مقدار تنش برجا از پارامترهای مهم در طراحی سازه‌های زیر زمینی است. روش‌های مختلفی از جمله روش‌های غیر مستقیم با استفاده از مغزه حفاری برای رسیدن به این منظور وجود دارد. از طرفی امروزه استفاده از انتشار آوایی در مکانیک سنگ در حال گسترش است. سنگ‌ها وقتی تحت تنش قرار می‌گیرند سیگنال‌های آکوستیکی منتشر می‌کنند، این پدیده انتشار آوایی نامیده می‌شود. استفاده از انتشار آوایی در تنش‌سنجی نیز به دلیل هزینه کم، آسانی و سرعت در آزمایشگاه، مورد توجه صنعت ژئوتکنیک واقع شده است. در روش تخمین تنش به کمک انتشار آوایی، از پدیده اثر کایزر استفاده می‌شود. اما هنوز جنبه‌های مختلف و تأثیر پارامترهای گوناگون در این روش نیازمند توجه و تحقیق بیشتر است. در این تحقیق به بررسی تأثیر پارامتر تخلخل به عنوان یکی از خواص فیزیکی نمونه در تخمین تنش به روش انتشار آوایی پرداخته شده است. وجود تخلخل، با ایجاد محیط ناهمگن در نمونه سبب تأثیر در انتشار امواج فشاری و سیگنال‌های آکوستیکی می‌شود. بنابراین برای عدم تداخل تأثیر پارامترهای دیگر از نمونه‌های سنگ مصنوعی (ملات فرو سیمان) با دانه‌بندی ثابت و بدون حافظه تنش قبلی با ساختار یکنواخت استفاده شده است که تنها عامل متغیر درصد حفرات هوا به عبارتی دیگر درصد تخلخل در نمونه‌ها است. با القای تنش معین در آزمایشگاه و بازیابی آن با روش انتشار آوایی به بررسی تأثیر تخلخل بر اثر کایزر پرداخته شد. نتایج تحقیق مشخص کرد که ملات نیز تنش را در حافظه خود نگه می‌دارد و همچنین علاوه بر تخلخلی که به صورت غیر یکنواخت در نمونه وجود دارد (تخلخل کارست مانند) که قابلیت بازیابی تنش را تا حد زیادی کم می‌کند و حتی از بین می‌برد، تخلخلی که به صورت یکنواخت نیز در نمونه پخش شده باشد هم روی دقت اثر کایزر تأثیر دارد.

### کلمات کلیدی

انتشار آوایی، تنش برجا، ملات فرو سیمان، خواص فیزیکی سنگ، اثر تخلخل در حافظه تنش

\* نویسنده مسئول مکاتبات

## ۱- مقدمه

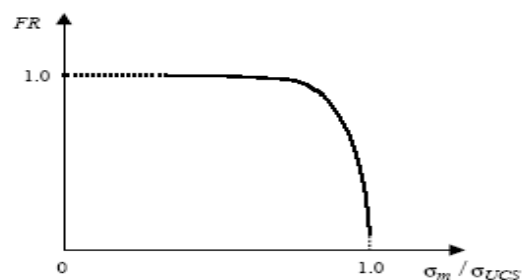
اثر زمان تأخیر، ساختار زمین‌شناسی و خواص مواد، اندازه نمونه، چرخش محورهای اصلی نسبت به محور بارگذاری، پیش بارگذاری یک‌محوری و سه‌محوری، سطح تنش پیش بارگذاری و نرخ بارگذاری بررسی شده است [۶-۹]. دانگ و همکارانش در سال ۱۹۹۷ بر این باور بودند که اثر کایزر به خصوصیات سنگ بستگی داشته و نمونه سنگ پس از مغزه‌گیری باید به صورت مهر و موم شده و یک روز پس از آن آزمایش شود. علاوه بر این مغزه باید مقاومت بالا و تخلخل کمی داشته باشد [۱۰]. به منظور بررسی اثر تخلخل در حافظه تنش از سه نوع سنگ توف پیروکلاستیک، آندزیت و بتن مورد آزمایش قرار داده شده است [۱۰]. قبل از انجام آزمایش، خواص فیزیکی و مکانیکی مواد مشخص شد. مقادیر متوسط برای تخلخل و مقاومت تک-محوری برای نمونه‌ها در جدول ۱ ارائه شده است. آن‌ها اثر کایزر را در آندزیت و بتن مشاهده کردند و دلیل ندیدن اثر کایزر در سنگ توف پیروکلاستیک را تخلخل بالای نمونه بیان کردند [۱۰].

جدول ۱: مشخصات نمونه‌ها و نتایج آزمایش [۱۰].

تعداد نمونه	نوع سنگ	میانگین UCS (MPa)	تخلخل متوسط %	اثر کایزر
۸	پیروکلاستیک توف	۸,۴۴	۲۰,۳۹	خیر
۴	آندزیت	۱۱۱,۴۴	۴,۸۰	بله
۵	بتن	۱۵,۵۸	۳,۷۷	بله

هدف این تحقیق بررسی تأثیر مقدار تخلخل سنگ در حافظه تنش بوده است. با توجه به اینکه در سنگ طبیعی در نمونه‌هایی با تخلخل مختلف جنس ماده، دانه‌بندی و به عبارتی فیزیک نمونه تغییر می‌کند و از قبل نیز حافظه تنش دارد، بنابراین از سنگ مصنوعی یعنی بتن که ماده آن هموزن، دانه‌بندی آن یکسان، درصد تخلخل آن در کل نمونه یکنواخت و بدون حافظه تنش، استفاده شد. بدین منظور نمونه ملات با طرح اختلاط ثابت و با درصد حباب افزوده شده متفاوت ساخته و ابتدا با روش تخلخل مؤثر درصد تخلخل محاسبه شد و تأثیر تخلخل بر بازیابی تنش به روش انتشار آوایی بررسی شد.

آگاهی از مقدار و جهت تنش برجا در بسیاری از سازه‌های سنگی از قبیل فضا‌های زیرزمینی، پایداری سطوح شیب‌دار و همچنین برای تفسیر زمین‌لرزه ضروری است. برای برآورد تنش برجا روش‌های مختلف برجا و آزمایشگاهی وجود دارد که تمامی روش‌های آزمایشگاهی مبتنی بر نمونه‌های مغزه‌گیری شده است. زمانی که عمق حفاری زیاد باشد، اندازه‌گیری بر اساس مغزه‌های حفاری خواهد بود. یکی از روش‌های مبتنی بر مغزه، استفاده از روش انتشار آکوستیک است. اساس این روش مبتنی بر اثر کایزر<sup>۱</sup> است. در این روش حداکثر تنش وارد شده به نمونه سنگ معادل با نقطه‌ی تغییر در فعالیت انتشار آکوستیک است. اثر کایزر اصلی‌ترین مفهوم در بررسی تنش برجا با استفاده از انتشار آکوستیک است. این پدیده به دلیل عدم وجود سیگنال‌های آکوستیکی در سطوح تنش پایین‌تر از حداکثر تنشی که سنگ قبلاً تجربه کرده است، می‌باشد [۳-۵]. برای بررسی دقت اثر کایزر از مفهوم نسبت فلسیتی استفاده می‌شود. نسبت فلسیتی<sup>۲</sup> در سطوح مختلف تنش و در مراحل مختلف رفتاری سنگ مقادیر متفاوتی دارد. در شکل ۱ وابستگی نسبت فلسیتی به میزان بار اعمال در پیش بارگذاری  $(\sigma_m)$  ارائه شده است [۲].



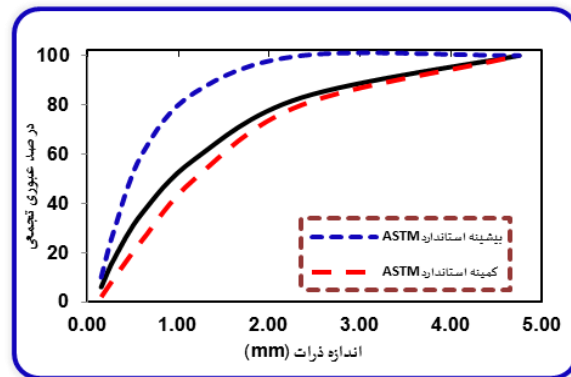
شکل ۱: نسبت فلسیتی در سطوح مختلف تنش [۲].

این روش توسط محققان مختلف به منظور ارائه یک روش عملی از اثر کایزر در اندازه‌گیری تنش برجا توسعه پیدا کرده است. تحقیقات فراوانی در زمینه اثر کایزر از سال ۱۹۶۰ تاکنون انجام شده است. در این تحقیقات، عوامل مؤثر بر حافظه‌ی تنش برجا در شرایط بارگذاری یک‌محوره و سه‌محوره مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. در تحقیقات انجام شده توسط محققان مختلف عوامل مختلف و تأثیرگذار بر مفهوم اثر کایزر از جمله

## ۲- تهیه نمونه

### ۲-۱- ماسه استاندارد

مصالح سنگی استفاده شده در نمونه‌های مصنوعی باید دارای یک دانه‌بندی مشخص و یکسان باشند، به همین منظور از ماسه استاندارد ریز دانه مطابق با استاندارد ASTM C33 که در شکل (۲) ارائه شده، استفاده شد.



شکل ۲: نمودار دانه بندی ماسه مصرفی و استاندارد [۱].

### ۲-۲- سیمان استاندارد

از سیمان مصرفی نوع پرتلند معمولی ۵۲۵ کارخانه سیمان فیروزآباد با مقاومت بالا استفاده شد.

### ۲-۳- مواد افزودنی حباب ساز

به منظور ایجاد تخلخل از ماده حباب‌ساز استفاده شد. ماده حباب‌ساز از نوع P.N.Air HP5 محصول شرکت پنتا<sup>۳</sup> بوده و مطابق با استاندارد ASTM C233 عمل شده است.

### ۲-۴- طرح اختلاط

نسبت سنگدانه (ماسه) به سیمان پرتلند برابر ۲٫۷۵ و نسبت آب به سیمان ۰٫۶ در نظر گرفته شده است. میزان ماده افزودنی نیز در سری‌های مختلف نمونه برای ایجاد هوای بیشتر افزایش یافته است و در جدول ۲ ارائه شده است.

نمونه‌ها مکعبی با ابعاد ۵۰ میلی‌متر مطابق با استاندارد ASTM C109 ساخته شده‌اند. قطر نمونه‌های استوانه‌ای

معادل مغزه NX برابر ۵۴ میلی‌متر و ارتفاع آن‌ها ۱۱۶ میلی-متر با نسبت طول به قطر بین ۲٫۱ بوده است که با استاندارد ASTM D2938 مطابقت داشته است. لازم به ذکر است که نمونه‌های استوانه‌ای به صورت A، B، C، D، E به همراه اندیس اعداد از یک تا ۱۵ و نمونه‌های مکعبی به صورت AC، BC، Cc، Dc، Ec به همراه اندیس اعداد از یک تا ۱۲ نام-گذاری شده‌اند (شکل ۳). همچنین نمونه‌ها بعد از قالب‌گیری برای رسیدن به مقاومت نهایی برای ۲۸ روز درون آب غوطه‌ور بوده‌اند.

جدول ۲: درصد اختلاط نمونه‌ها

سری نمونه	FA (Kg)	C (Kg)	W (Kg)	AEA (gr)	C/FA	C/W	C/AEA
A	۱۸	۶٫۵۴	۳٫۹۲	۰	۲٫۷۵	۰٫۶	۰
B	۱۸	۶٫۵۴	۳٫۹۲	۱۶	۲٫۷۵	۰٫۶	۰٫۲۴
C	۱۸	۶٫۵۴	۳٫۹۲	۳۵٫۹	۲٫۷۵	۰٫۶	۰٫۵۵
D	۱۸	۶٫۵۴	۳٫۹۲	۵۵٫۹	۲٫۷۵	۰٫۶	۰٫۸۵
E	۱۸	۶٫۵۴	۳٫۹۲	۷۹٫۹	۲٫۷۵	۰٫۶	۱٫۲۲

FA: ماسه ریز دانه، C: سیمان، W: آب و AEA: ماده حباب‌ساز



شکل ۳: نمونه‌های ساخته شده درون آب

### ۳- آزمونها

#### ۳-۱- تخلخل موثر

ابعاد نمونه‌های منشوری با کولیس اندازه‌گیری و حجم آن محاسبه و نمونه‌ها با غوطه‌ور شدن در آب و تحت خلاء ۸۰۰ پاسکال به مدت ۲۴ ساعت اشباع شدند. پس از اندازه‌گیری جرم اشباع، نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت درون آون قرار گرفته و جرم خشک آن‌ها محاسبه شد. سپس با استفاده از رابطه (۱) حجم حفرات در نمونه محاسبه و میزان تخلخل هر نمونه با رابطه ۲ محاسبه شد [۱۱].

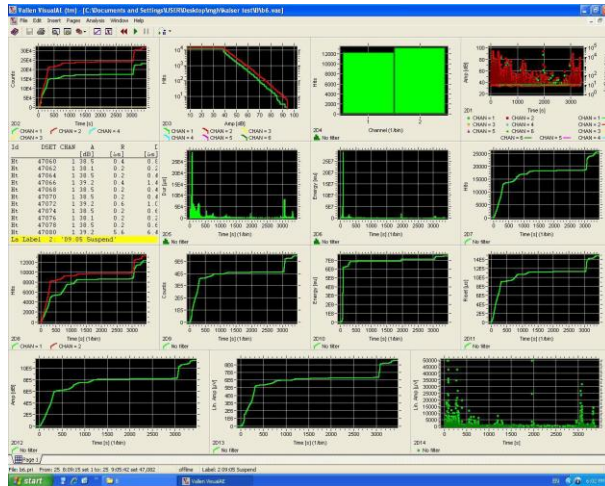
$$V_V = \frac{M_{sat} - M_s}{\rho_w} \quad \text{رابطه (۱)}$$

$$n = \frac{V_V}{V_t} \quad \text{رابطه (۲)}$$

در روابط (۱) و (۲)  $M_{sat}$ ، جرم اشباع،  $M_s$ ، جرم خشک و  $\rho_w$ ، جرم مخصوص آب،  $V_t$  حجم کل و  $n$  درصد تخلخل است.

#### ۳-۲- انتشار آوایی

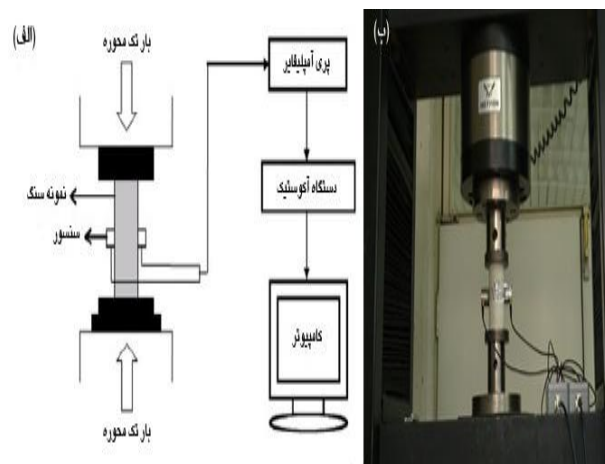
برای انجام آزمایش، ابتدا سنسورهای آکوستیک به نمونه متصل و پس از تنظیمات دستگاه انتشار آوایی (AE)، بارگذاری روی نمونه‌ها به صورتی که در شکل ۶ و در قسمت ۳-۳ توضیح داده شده است انجام شد. دستگاه انتشار آوایی مورد نظر مدل «AMS۵-۵» است که ساخت شرکت Vallen system GmbH است. این دستگاه اغلب برای اندازه‌گیری و آنالیز سیگنال‌های آکوستیک که بیشتر از حد مقدار آستانه است، استفاده می‌شود. مقدار حد آستانه بسته به محل آزمایش و میزان صدای متفاوت است و برای هر آزمایش در ابتدا این مقدار تنظیم می‌شود (حذف نویز). به علاوه این سیستم قابلیت نمایش همزمان نمودارهای آکوستیک را روی کامپیوتر با کمک نرم‌افزار Visual AE دارد که نمونه‌ای از آن در شکل ۴ ارائه شده است.



شکل ۴: نمایش همزمان نمودارهای آکوستیک در مانیتور کامپیوتر.

در شکل ۵ قسمت الف- ترتیب انتقال داده‌ها برای اندازه‌گیری مقادیر آکوستیکی ناشی از بارگذاری تک‌محوره روی نمونه و در قسمت ب- دستگاه بارگذاری و آزمایش انتشار آکوستیک را نشان داده شده است [۱۲، ۱۳].

با دریافت سیگنال‌های آکوستیکی دستگاه انتشار آوایی، آن‌ها را به معادلات موج تبدیل کرده و بر اساس این معادلات، پارامترهای هر موج شامل زمان شروع موج، مدت زمان موج، بیشترین دامنه موج، انرژی، کانت و غیره استخراج می‌شود.

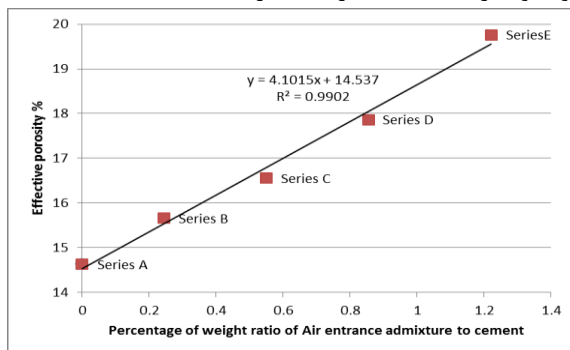


شکل ۵: دستگاه آکوستیک به همراه دستگاه بارگذاری

## ۳-۳- پیش بارگذاری

محاسبه و ارائه شده است. مقادیر جرم مخصوص، حاصل میانگین جرم مخصوص نه نمونه برای هر سری از نمونه‌ها است. حجم شش نمونه با اندازه‌گیری مستقیم به کمک کولیس و سه نمونه دیگر با کمک تفاضل وزن اشباع و وزن غوطه‌وری به دست آمده است. در شکل ۷ رابطه میزان ماده افزودنی هواساز با تخلخل ایجاد شده نشان داده شده است. شیب این خط می‌تواند به عنوان تأثیر ماده افزودنی در افزایش تخلخل در نظر گرفته شود. یعنی اگر نسبت وزنی ماده هواساز به سیمان یک درصد افزایش یابد حدود چهار درصد تخلخل مؤثر افزایش می‌یابد.

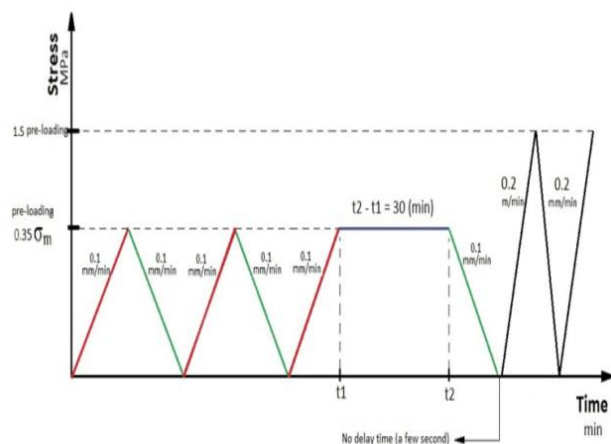
در نمونه A از ماده حباب‌ساز استفاده نشده و میزان تخلخل مؤثر اندازه‌گیری براساس جدول ۳ حدود ۱۴,۵ درصد است که نشان‌دهنده میزان درصد تخلخل نمونه ملات طبیعی است. روش تجزیه و تحلیل کیفی AE بر اساس زمان و منبع بوده و فقط ویژگی‌های پارامتری AE در موج پیدا و ذخیره می‌شود. روش تجزیه و تحلیل کمی (بر اساس سیگنال) به صورت موج کامل در نظر گرفته می‌شود. روش کمی AE بسیار پیچیده بوده و نیاز به محاسبات زیادی دارد [۱۴].



شکل ۷: نمودار رابطه تخلخل با افزودنی هواساز

مقدار بار برای پیش بارگذاری با توجه به نمودار تنش-کرنش سنگ در مرحله الاستیک نمونه اعمال شد. در مرحله الاستیک مقدار نسبت فلسیتی برابر یک است [۱۳]. بارگذاری برای ایجاد حافظه‌ی تنش با استفاده از بارگذاری چرخه‌ای انجام شده است. روی هر نمونه سه چرخه بارگذاری با نرخ ۰/۱ میلی‌متر بر دقیقه انجام شد. بار در مقدار حداکثر به مدت یک دقیقه ثابت نگه داشته شده و سپس باربرداری انجام می‌شود. سپس در چرخه سوم بار برای زمان سی دقیقه به صورت ثابت بر نمونه اعمال شد. بارگذاری برای بازیابی اثر کایزر بدون تأخیر زمانی بلافاصله بعد از پیش بارگذاری و القای تنش انجام شد. در شکل ۶ نحوه اعمال بار بر روی نمونه‌ها ارائه شده است.

این پیش بارگذاری در حقیقت معرف حداکثر تنش قبلی است که نمونه متحمل شده و در حافظه خود ثبت کرده است که به عنوان همان تنش برجایی در نظر گرفته شده است که نمونه‌های مغزه که از عمق زمین گرفته در حافظه خود نگه داشته‌اند و برای تعیین تنش به روش انتشار آوایی به آزمایشگاه آورده می‌شوند.

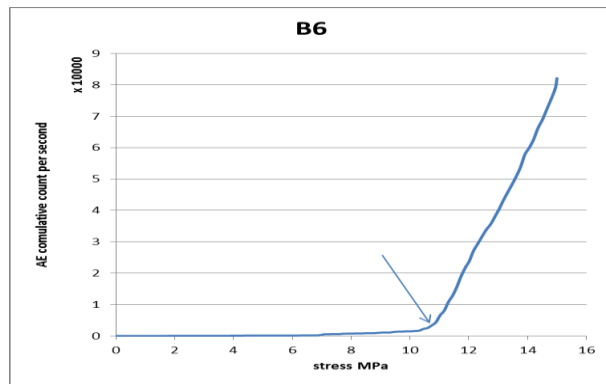


شکل ۶: مسیر پیش بارگذاری برای القاء تنش به نمونه‌ها و بارگذاری مجدد برای بازیابی تنش

## ۴- تجزیه و تحلیل

هدف از این تحقیق بررسی تأثیر تخلخل به عنوان یکی از خواص فیزیکی بوده است و در جدول ۳ مقدار تخلخل نمونه‌ها

نمودار شکل ۸ نرخ کانت تجمعی بر حسب تنش برای نمونه B6 رسم شده است. در این نمونه مقدار بار اعمالی به عنوان پیش بارگذاری برای القای تنش (MPa) ۱۰ بوده است.



شکل ۸: نمودار نرخ کانت تجمعی بر حسب تنش برای B6

همان طور که در شکل ۸ دیده می شود، روش انتشار آوایی قابلیت بازیابی تنش را برای این نمونه به خوبی داشته و با مقداری خطا، تنش القا شده از قبل را نشان می دهد. مقدار تنش بازیابی شده از هر نمونه و دقت آن به کمک نسبت فلیسیتی بیان شده است. همچنین درصد خطا به کمک رابطه (۳) محاسبه شده است [۱۳].

$$e\% = \frac{\text{Prestress applied in lab.} - (\text{Kaiser effect point stress})}{\text{Prestress applied in lab.}} \quad \text{رابطه (۳)}$$

نسبت فلیسیتی در شکل ۹ برای هر نمونه به صورت جداگانه ارائه شده است و در شکل ۱۰ تأثیر تخلخل در دقت بازیابی تنش با روش انتشار آوایی که در واقع تأثیر تخلخل بر نسبت فلیسیتی است، نشان داده شده است. همچنین در شکل ۱۱ رابطه تخلخل با درصد خطا در بازیابی تنش به روش انتشار آوایی دیده می شود.

همان طور که در این نمودارها نشان داده شده، تغییر در دقت بازیابی تنش تنها با تغییرات تخلخل اتفاق افتاده است و این نمودارها علاوه بر این که مؤثر بودن تخلخل را نشان می دهند، بلکه روند تأثیر تخلخل را نیز بیان می کند.

جدول ۳: تخلخل نمونه های ملات

شماره نمونه	قطر نمونه (mm)	ارتفاع نمونه (mm)	وزن خشک (gr)	وزن اشباع (gr)	وزن غوطه وری (gr)	حجم حفرات (cm <sup>3</sup> )	تخلخل مؤثر
A8	53	116	535	571	320	36	14.2
A10	53	116	533	570	318	37	14.5
A12	53	115	528	568	305	40	15.2
B3	53	116	498	537	283	39	15.4
B4	53	117	502	544	286	43	16.4
B5	53	116	503	542	285	39	15.1
C2	53	116	488	530	274	42	16.4
C9	53	115	485	527	273	42	16.4
C13	53	116	489	533	276	44	16.9
D1	53	117	466	512	253	47	18.0
D4	53	116	458	504	248	46	17.9
D10	53	116	457	502	249	45	17.9
E1	53	117	457	512	253	55	21
E2	53	116	456	504	247	48	19.1
E3	53	115	446	496	243	50	19.9

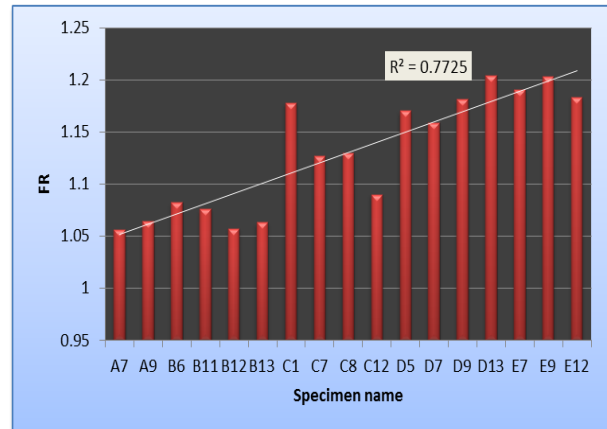
در روش تجزیه و تحلیل کلاسیک داده های آکوستیک از پارامترهای حداکثر دامنه، Rise Time، دوره تناوب، کانت، هیت و انرژی استفاده می شود. در این تحقیق از روش تجزیه و تحلیل کلاسیک داده های آکوستیک برای پردازش داده ها استفاده شده است. بررسی پارامترهای نسبت به زمان انتشار آکوستیک اغلب روی شمارش رویدادها و روند آنها متمرکز شده است. داده های نرخ انتشار آکوستیک در هر یک از نمونه ها با استفاده از نرم افزار Visual AE مربوط به دستگاه آکوستیک به دست آمده و اثر کایزر با توجه به تغییرات در این نرخ مشخص شد. آکوستیک از منابعی داخلی نمونه و از تغییر شکل ریزترکها منتشر می شود. از عواملی که باعث انتشار آکوستیک می شود، می توان به بسته شدن ترکها، رشد و گسترش ترک، ایجاد ترک و اصطکاک بین دانه ها و سطوح ترک اشاره کرد. با توجه به این تغییر شکل های برگشت ناپذیری که در طول اعمال بار به نمونه اتفاق می افتد، رویدادهای آکوستیکی در نمونه منتشر می شود. این نمودارها پس از ثبت توسط دستگاه AE مورد تجزیه و تحلیل قرار می گیرند. در

می‌توان بیان کرد که از لحاظ تخلخل، تأثیر کمتری می‌پذیرد و دقت کار بالاتر است. میزان افزایش ماده حباب‌ساز نیز که عامل افزایش تخلخل بوده است روند مشابهی با کمی تغییر نسبت به تخلخل برای تغییرات نسبت فلیسیتی دارد. اما چیزی که مشخص است با افزایش میزان ماده هوازا از دقت بازیابی تنش کاسته شده است. آزاد و همکاران (۱۳۹۱) در همین رابطه تحقیقاتی را روی سنگ طبیعی انجام داده‌اند که تأثیر تخلخل یکنواخت (همگن) و تخلخل کارست مانند (ناهمگن) که به‌طور یکنواخت در نمونه پخش نشده در آن مشهود بود. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که در نمونه‌هایی که تخلخل کارستی دارند، تنش قابل بازیابی نبوده و یا خطای آن زیاد است. تخلخل ناهمگن نیز باعث میرایی امواج و تغییر در ماهیت سیگنال آکوستیکی می‌شود. اما به دلیل هم جنس نبودن نمونه و تغییر در دانه‌بندی و استفاده از سنگ طبیعی که خود حافظه‌ای از تنش دارد به‌عنوان نمونه‌هایی با تخلخل مختلف، روند خاصی در دقت بازیابی تنش پیدا نکردند و فقط بیان کرده‌اند که تنش در صورتی که تخلخل همگن باشد، قابل بازیابی است. تخلخل باعث میرایی سیگنال‌های آکوستیکی شده و همین مسئله بیان‌گر عدم قابلیت بازیابی درست تنش در نمونه‌هایی با تخلخل بالا در تحقیقات آن‌ها بوده است. همچنین استفاده از سنگ‌های مختلف با حافظه تنش‌های قبلی در تاریخچه حافظه سنگ و دانه‌بندی‌های مختلف روند مشخصی در تحقیقات ایشان نشان نداده بود. بنابراین در این تحقیق با استفاده از نمونه‌های مصنوعی با تخلخل متفاوت که دانه‌بندی آن‌ها ثابت بوده بدون تاریخچه تنش قبلی هستند، تغییر نسبت فلیسیتی از یک با افزایش تخلخل یکنواخت مشهود است.

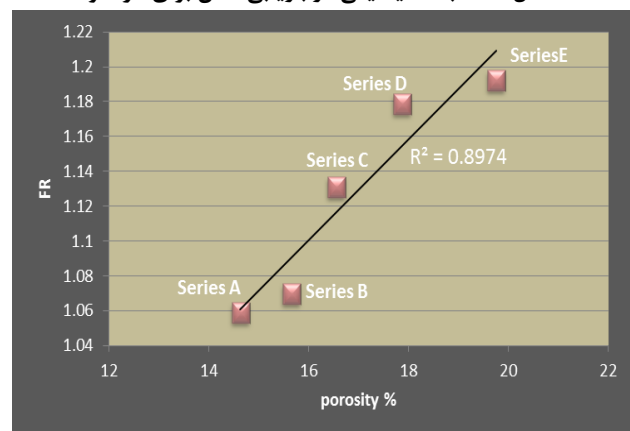
#### ۵- نتیجه‌گیری

برای بررسی اثر تخلخل در تعیین مقدار تنش پیشین در سنگ از ملات فرو سیمان که تخلخل متفاوت در نمونه‌های آن بوجود آورده شده استفاده شد. نتایج تحقیق عبارت است از:

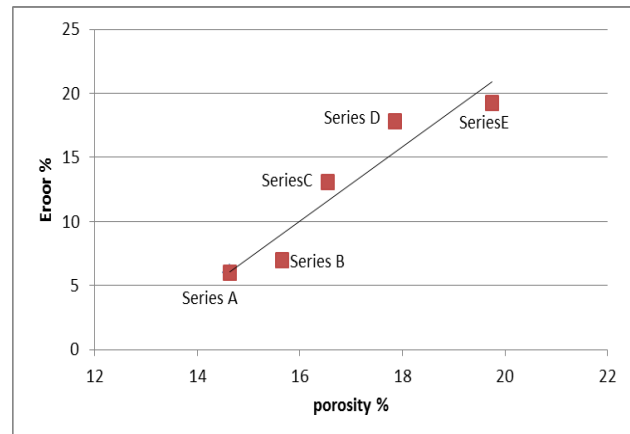
نتایج بدست آمده از آزمایش نشان داد که ملات نیز قابلیت نگهداری تنش در حافظه خود را دارد و وجود این عامل توسط



شکل ۹: نسبت فلیسیتی در بازیابی تنش برای هر نمونه



شکل ۱۰: تأثیر تخلخل بر نسبت فلیسیتی



شکل ۱۱: تأثیر تخلخل بر درصد خطا در بازیابی تنش

پس بهترین پیشنهاد در انتخاب نمونه از طبیعت برای تنش‌سنجی استفاده از نمونه‌هایی است که تا حد ممکن کمترین تخلخل را داشته باشند و با علم به این‌که با افزایش عمق از تخلخل کاسته می‌شود، هر چه مناطق عمیق‌تری مورد نظر برای تنش‌سنجی به روش انتشار آوایی و اثر کایزر باشند



- [5] Tuncay, E. and Y. Obara, *Comparison of stresses obtained from Acoustic Emission and Compact Conical-Ended Borehole Overcoring techniques and an evaluation of the Kaiser Effect level*. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2012: p. 1-11.
- [6] Shkuratnik, V., Y.L. Filimonov, and S. Kuchurin, *Experimental investigations into acoustic emission in coal samples under uniaxial loading*. Journal of Mining Science, 2004. **40**(5): p. 458.
- [7] Alkan, H., Y. Cinar, and G. Pusch, *Rock salt dilatancy boundary from combined acoustic emission and triaxial compression tests*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2007. **44**(1): p. 108-119.
- [8] Filimonov, Y. and et al., *Memory effects in rock salt under triaxial stress state and their use for stress measurement in a rock mass*. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2001. **34**(4): p. 275-291.
- [9] Jin, Y. and et al., *Time-sensitivity of the Kaiser effect of acoustic emission in limestone and its application to measurements of in-situ stress*. Petroleum Science, 2009. **6**(2): p. 176-180.
- [10] Kramadibrata, S. and et al., *Role of acoustic emission for solving rock engineering problems in Indonesian underground mining*. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2011. **44**(3): p. 281-289.

[۱۱] فهمی فر، ا. و سروش ح.، آزمایشهای مکانیک سنگ (مبانی نظری و استانداردها)، ویرایش اول. ۱۳۸۰، تهران انتشارات شرکت سهامی آزمایشگاه فنی مکانیک خاک وزارت راه و ترابری.

[12] GmbH, V.s., 2010. "Vallen Acoustic Emission Information suite.

[۱۳] آزاد ع. و احمدی م. و دینی ع. "بررسی رفتار سنگ تحت بارگذاری چرخهای با استفاده از پارامتر *b-value*" دومین کنفرانس بین المللی آکوستیک و ارتعاشات. ۱۳۹۱ دانشگاه صنعتی شریف.

[14] Kocur, G.K., *Time reverse modeling of acoustic emissions in structural concrete*. Diss. Eidgenössische Technische Hochschule ETH Zürich, Nr. 20368, 2012.

پدیده اثر کایزر تأیید می شود. همچنین قابل ذکر است که از بین پارامترهای انتشار آوایی، نمودارهای دو پارامتر انرژی و کانت بر حسب تنش اعمالی برای محاسبه نقطه اثر کایزر مناسب ترند، ضمن اینکه سایر پارامترها نیز قابل بررسی هستند. برای ایجاد حافظه تنش استفاده از سه سیکل بارگذاری می تواند مفید باشد که بازدهی آزمایشات این مسئله را تأیید نمود. همچنین میزان تنش پیشین که در حدود ۰,۳۳ حداکثر مقاومت انتخاب شد، مطلوب بوده است. به علاوه این که نمونه ها دارای حافظه تنش قبلی نبوده اند و این مسئله نیز می تواند در آزمایشات و نتایج تاثیر مثبت داشته باشد. سرعت سیر امواج طولی با افزایش تخلخل کاهش یافته و تخلخل باعث میرایی سیگنال های انتشار آوایی بوده و همین مسئله بیانگر عدم قابلیت بازیابی درست تنش در نمونه هایی با تخلخل کارست مانند است. در این تحقیق مشخص شد که علاوه بر تخلخلی که به صورت غیر یکنواخت در نمونه وجود دارد (تخلخل کارست مانند) که قابلیت بازیابی تنش را تا حد زیادی کم می کند و حتی از بین می برد، تخلخلی که به صورت یکنواخت نیز در نمونه پخش شده باشد هم روی دقت اثر کایزر تأثیر منفی دارد و هر چه میزان تخلخل افزایش یابد دقت کار کمتر می شود.

#### مراجع

- [1] Kosmatka, S.H. and W.C. Panarese. 1994, *Design and control of concrete mixture*. 1994: Portland cement association.
- [2] Lavrov, A., *The Kaiser effect in rocks: principles and stress estimation techniques*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2003. **40**(2): p. 151-171.
- [3] Seto, M., D. Nag, and V. Vutukuri, *In-situ rock stress measurement from rock cores using the acoustic emission method and deformation rate analysis*. Geotechnical and Geological Engineering, 1999. **17**(3): p. 241-266.
- [4] Tuncay, E. and R. Ulusay, *Relation between Kaiser Effect levels and pre-stresses applied in the laboratory*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2008. **45**(4): p. 524-537.



پی نوشت

---

<sup>1</sup>Kaiser Effect

<sup>2</sup>Felicity Ratio

<sup>3</sup> PANTA Co.