

# ارزیابی روش AE و DRA در اندازه‌گیری تنش برجا و بررسی اثر زمان تأخیر در این دو روش

علی آرین فرا<sup>۱</sup>، مرتضی احمدی<sup>۲\*</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی معدن-مکانیک سنگ، دانشگاه تربیت مدرس،

۲- عضو هیأت علمی بخش مهندسی معدن- مکانیک سنگ، دانشگاه تربیت مدرس

moahmadi@modares.ac.ir

تاریخ پذیرش: [۱۳۹۲/۸/۱۸]

تاریخ دریافت: [۱۳۹۱/۳/۲۷]

**چکیده-** تخمین تنش برجا به روش آزمایشگاهی به خاطر هزینه کم و سریع بودن، امروزه مورد توجه پژوهشگران مکانیک سنگ قرار گرفته است. از روش‌های آزمایشگاهی تخمین تنش برجا که پژوهش روی آن افزایش یافته است، روش انتشار آکوستیک (Acoustic Emission) و آنالیز نرخ تغییر شکل (Deformation Rate Analysis) است. دقت نتایج در این روش‌ها برگرفته از بافت سنگ، نوع ترک‌ها و اثر زمان تأخیر است. در این پژوهش توانایی روش AE و DRA در تخمین تنش برجا و اثر زمان تأخیر در مقدار تنش اندازه‌گیری شده بررسی شده است. زمان تأخیر فاصله زمانی بین کرگیری از محل و زمان آزمایش است. برای اندازه‌گیری تنش برجا از تکیه‌گاه سد سیمه، ۶ سری نمونه با زمان تأخیرهای متفاوت (دو سری نمونه با زمان تأخیر ۵ سال و چهار سری نمونه با زمان تأخیر ۲۰ روز) تهیه و آزمایش روی آنها انجام شد. مقدار تنش تخمین زده شده از روش‌های AE و DRA محاسبه و با نتایج روش شکست هیدرولیکی (Hydraulic Fracturing) مقایسه شد. نتایج حاکی از هم‌خوانی خوب بین روش AE و DRA با روش شکست هیدرولیکی است. تنها اختلاف در مقدار تنش قائم بوده که علت این امر این است که در روش HF فرض برابری تنش قائم اصلی معادل با وزن روباره است. نتایج نشان می‌دهند که زمان تأخیر باعث پراکندگی نتایج در دو روش AE و DRA شده و برای حصول نتیجه بهتر در مقدار اندازه‌گیری شده زمان تأخیر باید کمینه ممکن باشد.

**واژگان کلیدی:** انتشار آوایی، آنالیز نرخ تغییر شکل، تنش سنجی، زمان تأخیر

## ۱. معرفی AE<sup>۱</sup> و DRA<sup>۲</sup>

شد. به نقطه‌ای که پدیده اثر کایزر خود را در آن نشان می‌دهد نقطه کایزر و مقدار تنش معادل آن نقطه تنش قبلی است.

در این سال‌ها با پیشرفت تکنولوژی مطالعه‌های زیادی در این راستا صورت گرفته است. از افرادی که در راستای اعتبار سنجی این روش فعالیت داشته‌اند می‌توان به هولوکوم<sup>۳</sup> (۱۹۹۳)، هاگسان و کروهورد<sup>۴</sup> (۱۹۸۷)، ستو و همکاران<sup>۵</sup> (۱۹۹۹)،

مواد، فلزات و سنگ‌ها، زمانی که تحت بار واقع شوند، از خود صدا و سیگنال‌های لرزه‌ای با فرکانس بالا بروز می‌دهند. این پدیده انتشار آکوستیک (AE) است. اولین بار کایزر<sup>۳</sup> (۱۹۵۰) دریافت که تا زمانی که مقدار تنش اعمالی به نمونه از مقدار تنش قبلی بیشتر نشود، نمونه از خود سیگنال بروز نمی‌دهد [۱]. بر این اساس این پدیده، اثر کایزر<sup>۴</sup> (KE) نامیده

۵. Holcomb

۶. Hughson & Crawford

۷. Seto et al

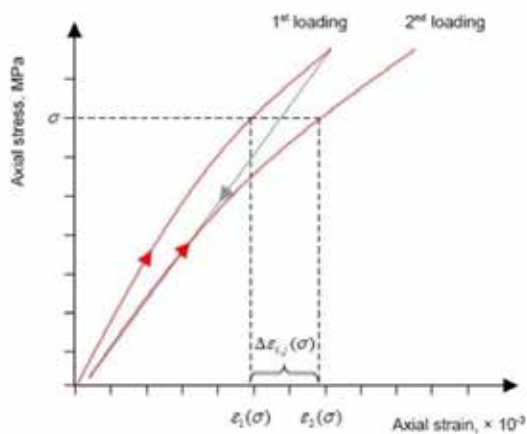
۱. Acoustic Emission

۲. Deformation Rate Analysis

۳. Kaiser

۴. Kaiser Effect

نامیده می‌شود و تفاضل کرنش غیر الاستیک بین دو سیکل متفاوت را نشان می‌دهد [۶]. شکل ۱ اصول روش تحلیل نرخ تفاضلی را نشان می‌دهد. مطالعه‌های متعددی در زمینه استفاده از روش DRA در اندازه‌گیری تنش برجا صورت گرفته است که دو مورد از آنها مراجع [۷] و [۸] است.



شکل ۱- اصول روش تحلیل نرخ تفاضلی [۹].

## ۲. تانسور تنش

تانسور تنش مانند تانسور ارائه شده در معادله (۲) می‌باشد.  $\sigma_n$  برابر تنش نرمال در صفحه‌ای که بردار نرمال آن عبارتند از  $l_x$ ،  $l_y$  و  $l_z$  است. مقدار تنش نرمال در این صفحه با مقادیر تنش‌های برشی و محوری طبق معادله (۳) ارتباط دارد [۶]. با داشتن شش مقدار تنش در جهت صفحه مستقل می‌توان شش معادله تشکیل داد و با حل آنها شش مجهول تانسور تنش را به دست آورد [۶].

$$\sigma_{xyz} = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{bmatrix} \quad (2)$$

(۳)

$$\sigma_n = l_x^2 \sigma_x + l_y^2 \sigma_y + l_z^2 \sigma_z + 2(l_x l_y \tau_{xy} + l_x l_z \tau_{xz} + l_y l_z \tau_{yz})$$

تانکای و همکاران<sup>۱</sup> (۲۰۰۲)، ویلاسکوزا و همکاران<sup>۲</sup> (۲۰۰۲)، وانگ و همکاران<sup>۳</sup> (۲۰۰۲)، واتانابه و تانو<sup>۴</sup> (۱۹۹۹) و واتانابه و همکاران (۱۹۹۴-۱۹۹۹) اشاره داشت [۲]. دایدو و همکاران<sup>۵</sup> (۲۰۰۳) با انجام یک سری آزمایش ثابت نمودند که با کاربرد روش AE مقدار تنش قبلی را می‌تواند بازیابی کرد [۲]. ستو و ناگ در یک کار آزمایشگاهی بر روی گرانیته اینادا مقدار تنش قبلی را با استفاده از روش AE مشاهده کردند [۵].

روش دیگری از انواع روش‌های اندازه‌گیری غیر مستقیم آزمایشگاهی بر روی مغزه‌های سنگی مبتنی بر اثر حافظه سنگ روش تحلیل نرخ تغییر شکل (DRA) است. DRA از رفتار کرنش غیر الاستیک نمونه سنگی تحت فشار تک‌محوری به منظور تعیین تنش اعمال شده قبلی استفاده می‌کند. این روش مشابه روش AE است. زیرا هر دوی آنها از خواص غیر الاستیک سنگ‌های تحت فشارش استفاده می‌کنند. یاماموتو<sup>۶</sup> و همکاران (۱۹۹۰) ثابت کردند که تنش اولیه را می‌توان از تغییر در گرادیان منحنی تنش-کرنش نمونه، تحت بارگذاری تک محوره سیکلی تعیین نمود. این روش به روش تحلیل نرخ تغییر شکل (DRA) شناخته می‌شود [۶]. یاماموتو و همکاران (۱۹۹۰) با انجام آزمایش‌ها بارگذاری تک محوره سیکلی، مقادیر تفاضل کرنش<sup>۷</sup> را در طول بارگذاری، بین دو سیکل، به عنوان تابعی از تنش محوری اعمالی اندازه‌گیری نمودند [۶]:

$$\Delta \epsilon_{ij} = \epsilon_j(\sigma) - \epsilon_i(\sigma), \quad j > i \quad (1)$$

در معادله بالا، کرنش در  $K$  امین بارگذاری و تنش اعمال شده است. این تابع، تابع تفاضل کرنش

۱. Tuncay et al  
۲. Villaescusa et al  
۳. Wang et al  
۴. Watanabe & Tano  
۵. Daido et al  
۶. Yamamoto  
۷. Strain difference value

## ۲-۱- محاسبه برای تنش‌های اصلی

با حل دستگاه معادلات (۴) و (۵) کسینوس‌های هادی مربوط به هر یک از تنش‌های اصلی محاسبه می‌شود [۱۰].

$$\begin{pmatrix} \sigma_x - \Sigma & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{xy} & \sigma_y - \Sigma & \tau_{yz} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & \sigma_z - \Sigma \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} l_x \\ l_y \\ l_z \end{pmatrix} = 0 \quad (4)$$

با جای‌گذاری  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  به جای  $\Sigma$  و حل هر معادله کسینوس‌های هادی هر یک از تنش‌های اصلی حاصل خواهد شد. همان‌گونه که مشخص است کسینوس‌های هادی تنش‌های اصلی طبق رابطه (۵) با هم ارتباط دارند. با لحاظ نکردن این موضوع جواب  $l_x = 0, l_y = 0, l_z = 0$  اولین جواب برای معادله فوق است که اشتباه می‌باشد.

$$l_x^2 + l_y^2 + l_z^2 = 1 \quad (5)$$

سپس با بدست آوردن کسینوس‌های هادی می‌توان از معادلات (۶) استفاده و مقادیر شیب و امتداد شیب تنش‌های اصلی را روی صفحه استریوگراف نسبت به شمال جغرافیایی رسم کرد [۱۱].

$$\begin{aligned} l_x &= \cos \alpha \cos \beta \\ l_y &= \sin \alpha \cos \beta \\ l_z &= \sin \beta \end{aligned} \quad (6)$$

که  $\alpha$  و  $\beta$  به ترتیب امتداد شیب و شیب برای هر کدام از بردارهای تنش اصلی باشند.

## ۳. اندازه‌گیری تنش برجا

به منظور انجام اهداف پژوهش یعنی توانایی روش AE و DRA در تخمین تنش برجا و اثر زمان تاخیر در مقدار اندازه‌گیری شده، تنش برجای ساختگاه سد سیمره به وسیله‌ی روش AE و DRA بر روی نمونه‌های اخذ شده از ساختگاه مذکور تعیین شده

است. ۶ سری نمونه که هر سری شامل ۶ عدد نمونه در ۶ جهت مختلف کم مغزه‌گیری<sup>۱</sup> شده، تحت آزمایش قرار گرفت. نمونه‌های A و B دارای زمان تاخیر حدود ۵ سال و نمونه‌های C تا F زمان تاخیر کمتر از ۲۰ روز داشته‌اند. پارامترهای ژئومکانیکی و پارامترهای معیار شکست هوک و براون نمونه‌های آزمایش شده به شرح جدول ۱ است. از هر سری، ۶ نمونه کم مغزه‌گیری شده و مقدار تنش در هر جهت تخمین زده شده، با اعمال معادلات مکانیک محیط‌های پیوسته تانسور تنش محاسبه و سپس تنش‌های اصلی تعیین شده‌اند. تفاضل مقدار تنش به دست آمده از روش DRA نرمالیزه شده است. مقایسه عادی شده اختلاف تنش بر حسب درصد در شکل ۲ ارائه شده است. همان‌گونه که از شکل ۲ مشخص است درصد اختلاف تنش به دست آمده از هر دو روش زیر ۱۰٪ بوده که نشان دهنده تطابق دو روش در اندازه‌گیری است. در ۱۲ آزمایش اول که مربوط به نمونه‌های A و B بوده، اختلاف نتایج AE و DRA زیاد بوده، اما در آزمایش‌های بعدی این اختلاف زیر ۱۰٪ است. در بیشتر آزمایش‌ها اختلاف تنش بدست آمده بین دو روش، در محدوده‌ی صفر تا ۱۰٪ است. در ۴۷/۲۲٪ آزمایش‌ها اختلاف بین تنش اندازه‌گیری شده در روش AE و DRA کمتر از ۵٪ است. در ۳۳/۳۳٪ آزمایش‌ها این اختلاف بین ۵ تا ۱۰٪ بوده و مابقی آزمایش‌ها بیشتر از ۱۰٪ اختلاف را نشان می‌دهند (شکل ۳). در شکل ۴ مقادیر تنش اصلی بیشینه به دست آمده از روش AE و DRA برای نمونه‌های A تا G ارائه شده است که نشان دهنده تطابق خوبی بین نتایج هر دو روش است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود مقادیر هر سه تنش اصلی در آزمایش ۱ و ۲ (نمونه‌های A و B) نسبت به مقادیر تنش‌های اصلی حاصل از بقیه آزمایش‌ها تفاوت دارد.

در تنش اصلی بیشینه مقادیر به دست آمده از دو در

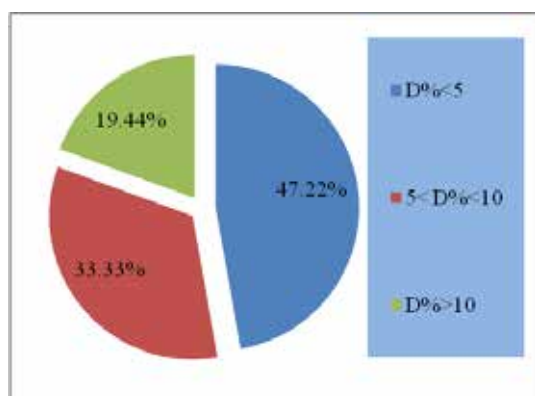
۱. Overcoring

باعث اختلال در حافظه سنگ شده است. از طرفی اختلاف مقدار تنش به دست آمده از روش AE و DRA در نمونه‌های با زمان تأخیر کم ناچیز است، اما نمونه‌هایی که دارای زمان تأخیر ۵ سال هستند دارای اختلاف زیادی هستند.

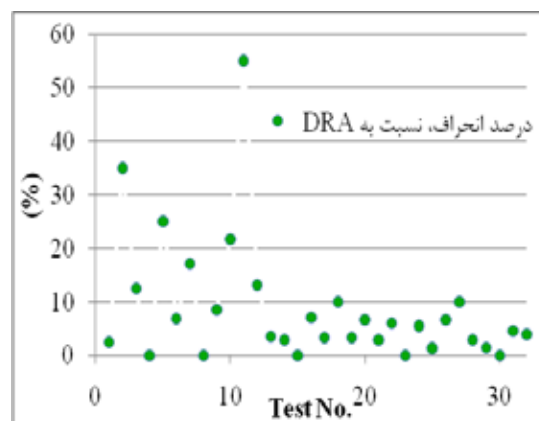
آزمایش‌ها است. این روند در تنش اصلی متوسط (شکل ۵) دیده می‌شود. اما در تنش اصلی کمینه (شکل ۶) مقادیر به دست آمده از نمونه‌های A و B کمتر از سایر آزمایش‌ها است. به این ترتیب می‌توان بیان نمود زمان تأخیر بیش از ۵ سال،

جدول ۱- خصوصیات مکانیکی سنگ مورد آزمایش [۱۲]

۹	مدول تغییر شکل پذیری (GPa)	۸۳/۴	$\sigma_c$ (MPa)	۲/۶۲	چگالی (gr/cm <sup>۳</sup> )
۰/۲۵	ضریب پواسون	۱۲/۹	m	۱/۵	چسبندگی (MPa)
		۱	s	۴۵	زاویه اصطکاک داخلی (درجه)



شکل ۳- نمودار توزیع مقادیر نرمالیزه شده اختلاف تنش به دست آمده از روش‌های DRA و AE نسبت به تنش DRA.



شکل ۲- مقادیر نرمالیزه شده اختلاف تنش به دست آمده از روش DRA و AE نسبت به تنش بدست آمده از روش DRA.

در تنش اصلی متوسط (شکل ۵) نیز دیده می‌شود. اما در تنش اصلی حداقل (شکل ۶) مقادیر به دست آمده از نمونه‌های A و B کمتر از سایر آزمایش‌ها است. به این ترتیب می‌توان بیان نمود زمان تأخیر بیش از ۵ سال، باعث اختلال در حافظه سنگ شده است. از طرفی اختلاف مقدار تنش به دست آمده از روش AE و DRA در نمونه‌های با زمان تأخیر کم ناچیز است، اما نمونه‌هایی که دارای زمان تأخیر ۵ سال هستند دارای اختلاف زیادی هستند.

شکل ۴ مقادیر تنش اصلی بیشینه به دست آمده از روش AE و DRA برای نمونه‌های A تا G ارائه شده است که نشان دهنده تطابق خوبی بین نتایج هر دو روش است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود مقادیر هر سه تنش اصلی در آزمایش ۱ و ۲ (نمونه‌های A و B) نسبت به مقادیر تنش‌های اصلی حاصل از مابقی آزمایش‌ها تفاوت دارد. در تنش اصلی بیشینه مقادیر به دست آمده از دو نمونه A و B بیشتر از نتایج به دست آمده از سایر آزمایش‌ها است. این روند

بر این اساس مقدار تنش‌های اصلی برای ساختگاه سد سیمره در محدوده‌ی تونل‌های آبرسان با یک میانگین‌گیری از آزمایش‌های نمونه‌های C، D، E و F به تفکیک به شرح جدول ۲ است.

جدول ۲- مقادیر تنش‌های اصلی حاصل از روش‌های AE و DRA

تنش اصلی	روش AE	روش DRA
$\sigma_1$ (MPa)	$3/9 \pm 0/3$	$3/9 \pm 0/4$
$\sigma_2$ (MPa)	$3/1 \pm 0/8$	$3/2 \pm 0/3$
$\sigma_3$ (MPa)	$2/5 \pm 0/4$	$2/5 \pm 0/3$

#### ۴. مقایسه مقادیر به دست آمده با شکست هیدرولیکی

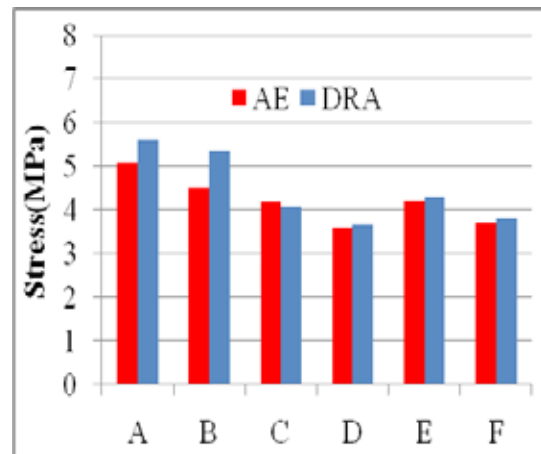
مقدار تنش‌های اصلی ساختگاه سد سیمره در محدوده تونل‌های آبرسان، براساس آزمایش‌های شکست هیدرولیکی<sup>۱</sup> انجام شده توسط شرکت MeSy مطابق جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۳- مقادیر تنش‌های اصلی و جهت آن براساس گزارش شرکت

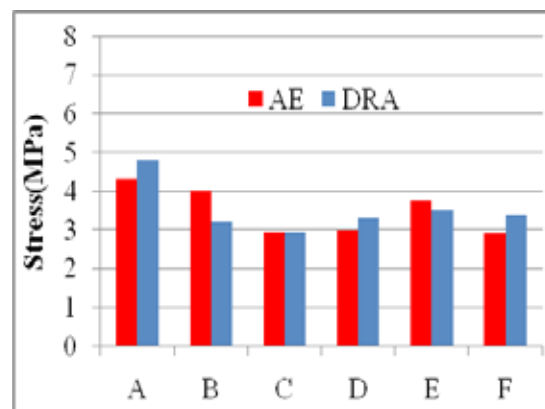
[۱۳] MeSy

تنش	جهت	مقدار (MPa)
$S_H$	$(NE-SW) 7 \pm 0.50$ N	$3/9 - 4$
$S_h$	$(NW-ES) 7 \pm 1.40$ N	$2/2 - 2/4$
$S_v$	قائم	$2/2 - 2/5$

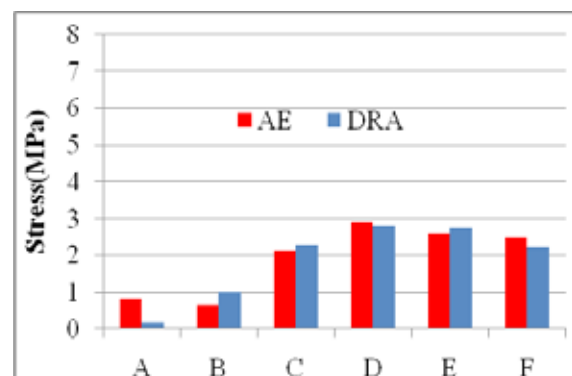
همان‌گونه که در قسمت قبل ذکر شد زمان تاخیر باعث شده است تا مقادیر تنش‌های اصلی به دست آمده از نمونه‌های A و B اختلاف زیادی با مقادیر تنش‌های اصلی سایر نمونه‌ها داشته باشند.



شکل ۴- تغییرات مقادیر تنش اصلی بیشینه در آزمایش‌ها مختلف در دو روش AE و DRA.



شکل ۵- تغییرات مقادیر تنش اصلی متوسط در آزمایش‌ها مختلف در دو روش AE و DRA.



شکل ۶- تغییرات مقادیر تنش اصلی کمینه در آزمایش‌ها مختلف در دو روش AE و DRA.

۱. Hydraulic Fracturing

$$\sigma_{\theta} = \sigma_x \cos^2 \theta + \sigma_y \sin^2 \theta + 2\tau_{xy} \sin \theta \cos \theta \quad (7)$$

$\sigma_{\theta}$  تنش اندازه‌گیری شده به روش AE و DRA در جهت زاویه  $\theta$  است. با توجه به رابطه فوق و با حل دستگاه معادلات مربوطه، مقادیر  $\sigma_x$ ،  $\sigma_y$  و  $\tau_{xy}$  محاسبه شده و از رابطه (۸) مقادیر بیشینه و کمینه تنش در صفحه عمود بر محور گمانه به دست می‌آید [۱۰].

$$\sigma_H, \sigma_h = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \quad (8)$$

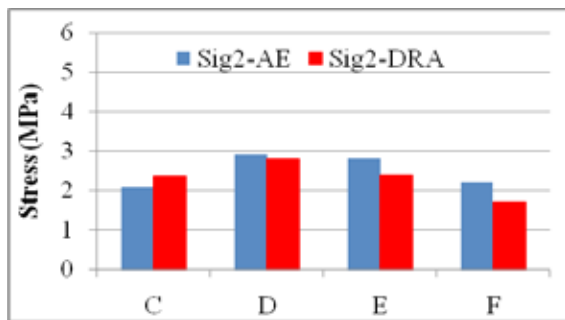
نمودار مقادیر تنش بیشینه و کمینه در صفحه عمود بر محور گمانه دوم در شکل ۹ و شکل ۱۰ ارائه شده است. مقدار تنش بیشینه در صفحه عمود بر محور گمانه دوم به صورت میانگین در روش AE برابر MPa ۳/۷۳ و در روش DRA برابر MPa ۴ است. میانگین مقدار تنش کمینه در این صفحه از روش AE برابر MPa ۲/۵۰ و از روش DRA، برابر MPa ۲/۳۲ به دست آمده است.

طبق گزارش شرکت MeSy مقدار تنش  $S_H$  برابر MPa ۳/۹۵ است. این تنش با تنش به دست آمده از نمونه‌هایی که در جهت محور گمانه دوم کم مغزه‌گیری شده و سپس روی آنها آزمایش AE و DRA انجام شده است، همخوانی خوبی دارد. بر همین اساس مقدار تنش در صفحه عمود بر محور گمانه دوم معادل تنش  $S_H$  و  $S_v$  است.

طبق جدول ۳ مقدار  $S_v$  برابر MPa ۲/۳۵ و مقدار  $S_H$  برابر MPa ۲/۳ است. مقدار تنش حداقل در صفحه عمود بر محور گمانه دوم با مقدار  $S_H$  تطابق داشته، اما مقدار  $S_v$  با مقدار تنش بیشینه در صفحه مذکور اختلاف دارد. پس طبق این مقایسه مقدار تنش بیشینه و کمینه ( $S_H$  و  $S_v$ ) با نتایج روش AE و DRA یکسان است. اما تنش  $S_v$  با نتایج روش‌های مذکور هم‌خوانی ندارد.

لذا مقادیر آنها منطقی نبوده و به همین دلیل از نتایج آنها در تجزیه و تحلیل استفاده نشده است. تعیین جهت تنش‌های اصلی در این دو روش به علت نبود جهت‌بندی نمونه‌ها، امکان نداشته است، از آنجا که نمونه‌های سری اول در امتداد تنش  $S_H$  (با ۹ درجه اختلاف زاویه) و نمونه‌های سری دوم در امتداد  $S_H$  است، می‌توان مقادیر تنش بیشینه و کمینه را در صفحه عمود بر محور نمونه‌گیری تعیین کرد. به دلیل اینکه نمونه‌های سری اول شامل مطلب زمان تاخیر شده‌اند، از آنها جهت تعیین تنش صفحه‌ای عمود بر محور گمانه استفاده نشده است. سری دوم نمونه‌ها از گمانه‌ای که در جهت عمود بر محور تونل حفاری شده است، اخذ شده‌اند. با توجه به گزارش شرکت MeSy جهت تنش اصلی  $S_H$  نیز هم راستا با این جهت است (شکل ۷)، در نتیجه مقادیر تنش به دست آمده از روش AE و DRA، از نمونه‌هایی که در راستای محور گمانه (عمود بر محور تونل) کم مغزه‌گیری شده‌اند، باید با تنش  $S_H$  اختلاف زیادی نداشته باشد. نمودار مقادیر تنش به دست آمده در جهت محور گمانه از نمونه‌های C تا F در شکل ۸ ارائه شده است. مقدار متوسط تنش در این جهت در هر دو روش AE و DRA برابر MPa ۳/۴ است.

به منظور مقایسه تنش بر جای اندازه‌گیری شده از دو روش (AE و DRA) با روش شکست هیدرولیکی، تصویر تنش‌ها در راستای عمود بر محور گمانه از تانسور تنش حاصل از روش AE و DRA محاسبه شده است. بدین ترتیب که با استفاده از روابط (۳) و (۷) تنش در فضای دو بعدی محاسبه می‌شود. برای محاسبه تنش در صفحه عمود بر محور گمانه، باید از مقادیر تنش‌های به دست آمده برای نمونه‌های کم مغزه‌گیری در جهت محور  $Z, Y$  و  $ZY$  که با محور  $Z$  و  $Y$  زاویه ۴۵ درجه می‌سازد، استفاده کرد [۱۰].



شکل ۱۰- مقادیر تنش اصلی حداقل در صفحه عمود بر محور گمانه دوم.

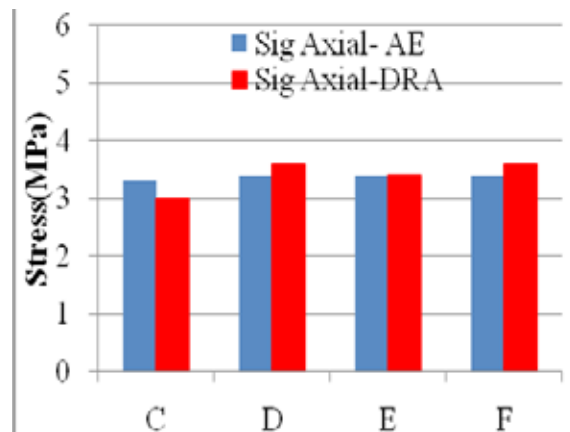
همان‌گونه که از نتایج مشخص است اختلافی بین نتایج روش AE و DRA با روش HF وجود دارد که این اختلاف به علت زیر است.

در روش شکست هیدرولیکی فرض می‌شود که جهت یکی از تنش‌های اصلی در راستای قائم بوده و مقدار آن برابر وزن روباره است، و جهت دو تنش دیگر افقی خواهد بود. اما در روش‌های AE و DRA چنین فرضی وجود ندارد. مقدار و جهت تنش‌های اصلی در این دو روش مستقل از هر فرضی به دست می‌آیند. با توجه به اینکه در این پژوهش نمونه آزمایش شده در روش AE و DRA دارای جهت‌بندی نبوده، پس نمی‌توان جهت تنش‌ها را مشخص کرد. اگر این امکان فراهم بود، با چرخش محورهای ماتریس تنش، مقادیر تنش در راستاهای ذکر شده در روش هیدرولیکی، محاسبه شده و اختلاف‌ها به صورت دقیق بررسی می‌شد. ویلاسکوزا و ماچوکا با انجام آزمایش AE در ۸۰ معدن در اعماق زیاد (بیش از ۱۵۰۰ متر) به این نتیجه رسیدند که جهت یکی از تنش‌های اصلی همواره قائم و مقدار آن برابر وزن روباره است و جهت دو تنش دیگر افقی هستند [۱۴]. پس می‌توان بیان داشت روش شکست هیدرولیکی در اعماق زیاد نتایج قابل قبولی را ارائه خواهد کرد، اما در اعماق کم مقادیر تنش قائم به دست آمده از این روش، زیاد قابل اطمینان نمی‌باشد. پس

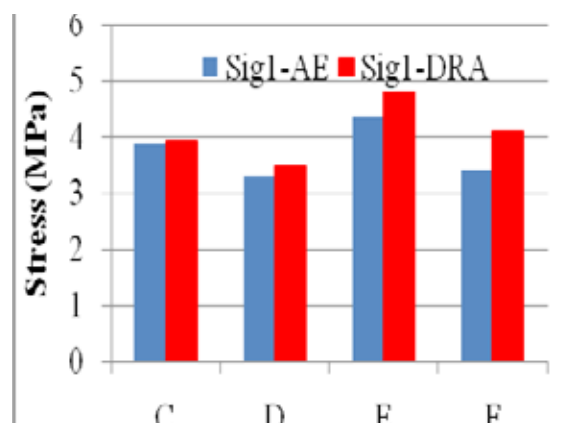
۱. Villaescusa & Machuca



شکل ۷- شماتیکی از محور تونل و جهت تنش‌های افقی حاصل از آزمایش HF.



شکل ۸- مقادیر تنش در جهت محور گمانه دوم.



شکل ۹- مقادیر تنش اصلی بیشینه در صفحه عمود بر محور گمانه دوم.

## ۷- مراجع

- [1] Lavrov, A. "The Kaiser effect in rocks: principles and stress estimation techniques", International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences 40 (2003). pp 151-171.
- [2] Daido, M. Aydan, O. Kuwae, H. & Sakoda, S. "An experimental study on the validity of Kaiser effect for in-situ stress measurements by Acoustic Emission Method (AEM) in rocks subjected to cyclic loads", Journal of The School of Marine Science and Technology, (2003). Vol.1 No.1 pp.17-22.
- [3] Kojima, T. and Matsuki, K. "A fundamental study on the use of the Kaiser effect for tectonic stress measurement", NDT & E International, (1994), Vol. 27 pp. 33-39
- [4] Yan, J. Zili, Q. "Time-sensitivity of the Kaiser effect of acoustic emission in limestone and its application to measurements of in-situ stress", Pet.Sci. (2009). 6:176-180.
- [5] Seto, M. Nag, D. & Vutukuri, V. "In-situ rock stress measurement from rock cores using the acoustic emission method and deformation rate analysis", Geotechnical and Geological engineering, (1999)17: 241-266.
- [6] Villaescusa, E. Seto, M. Baird, G. "Stress measurements from oriented core" Int. J. of Rock Mech. & Min. Sci. 39, (2002) 603-615.
- [7] Yamamoto, K. & Kuwahara, Y., Kato, K. Hirasawa, T. "Deformation Rate Analysis A New Method In Situ Stress estimation from Inelastic Deformation of Rock Samples under Uni-Axial Compressions", Tohoku Geophys. Journ. (Sci. Rep. Tohoku Univ., Ser. 5), (1990) Vol. 33, No. 2, pp. 127-147.
- [8] Lin, H. Wu, I. & Lee, D. "Evaluating the pre-

جهت‌هایی که در روش شکست هیدرولیکی ذکر شده‌اند جهت تنش‌های اصلی نیست و در این جهت‌ها تنش‌های برشی نیز وجود دارد. می‌توان نتیجه‌گیری کرد که مقادیر تنش‌های به دست آمده از روش‌های AE و DRA با روش HF مطابقت خوبی داشته، پس تنش‌های تخمین زده شده از دو روش صحیح است.

## ۶- نتیجه‌گیری

با استفاده از آزمایش‌های انجام شده بر روی نمونه‌های اخذ شده از سایت سیمره به روش AE و DRA و مقایسه مقادیر تنش با مقادیر تنش حاصل شده از روش شکست هیدرولیکی نتایج زیر می‌توان نتیجه گرفت:

- ۱- مقادیر تخمین تنش‌های اصلی به دست آمده از روش‌های AE و DRA دارای اختلاف ناچیزی است.
- ۲- براساس مراحل انجام شده در آزمایش‌ها، تعیین نقطه تنش پیشین در روش AE نسبت به روش DRA ساده‌تر است.
- ۳- آزمایش‌های انجام شده برای تخمین تنش در روش AE و DRA مشخص کردند که تاخیر در انجام آزمایش مقادیر صحیح را ارائه نمی‌دهند.
- ۴- مقادیر تنش SH و Sh حاصل از روش شکست هیدرولیکی با مقادیر تنش به دست آمده از روش AE و DRA انطباق داشته، اما مقدار تنش Sv تعیین شده از روش شکست هیدرولیکی با مقادیر تنش تخمین زده شده یکسان نیست
- ۵- در روش شکست هیدرولیکی فرض بر این است که یکی از تنش‌های اصلی قائم بوده و مقدار آن برابر وزن روباره است. اما در این دو روش مقادیر به دست آمده، مستقل از فرض فوق می‌باشد پس این دو روش در تعیین میزان تنش قائم نسبت به روش شکست هیدرولیکی بهتر است.



- [12] Mahab Ghodss Consulting Engineering Company, "Seymareh and Hydropower Plant Project. *Rock Mechanics Report, phase-II design studies*" (2003)
- [13] Mesy GmbH Company, "Hydraulic fracturing/ Hydraulic injection tests at the Seymareh hydropower project site, Iran, Final Report Part I: Results of In - Situ Tests", Date: 26.04.2007, Report No.:05.07A
- [14] Villaescusa, E. Machuca, L. & Windsor, C. "Stress measurements at great depth at Craig-Onaping Mines, Sudbury Canada". Proceedings of the 3rd CANUS Rock Mechanics Symposium, (2009) Toronto.
- stress of Mu-Shan sandstone using acoustic emission and deformation rate analysis* " International Symposium on In-Situ Rock Stress, Trondheim, Norway, (2006) pp 215–222
- [9] Louchinkov, V. "A Numerical investigation into the stress memory effect in rocks", University of Adelaide, Australia , M.Sc .Thesis, (2004)
- [10] Jaeger, J. Cook, N. and Zimmerman, R. "Fundamentals of Rock Mechanics", Fourth Edition, (2007) Blackwell Publishing.
- [۱۱] عطار.ایمان، «بررسی روش‌های تخمین تنش برجا از روی مغزه‌های حفاری شده»، پایان نامه دوره کارشناسی ارشد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، ۱۳۸۷.