

## بررسی خصوصیات مکانیکی سنگ نمک با تکیه بر ریزساختار آن

حدیثه منصوری<sup>1\*</sup>، رسول اجل لوئیان<sup>2</sup>، رامین الیاس زاده<sup>3</sup>، علیرضا ندیمی<sup>4</sup>

پذیرش مقاله: 97/10/15

دریافت مقاله: 97/08/19

### چکیده

در این مقاله تأثیر ریزساختار اولیه سنگ نمک بر رفتار دگرشکلی آن مورد بررسی قرار گرفت. نمونه‌های مورد مطالعه از دیپایر نمکی دهکویه واقع در 27 کیلومتری شهرستان لار در استان فارس برداشت شدند. ریزساختار اولیه دو نمونه متعلق به بخش‌های فوقانی دیپایر و یک نمونه متعلق به قسمت میانی ساقه دیپایر به روش پراش الکترون‌های برگشتی در دانشگاه اتاگو نیوزیلند مطالعه شد. اکثر دانه‌ها در نمونه متعلق به ساقه دارای دگرشکلی داخلی هستند، اندازه دانه‌های آن کوچکتر و فراوانی مرزهای کم زاویه در آن بیشتر است. مقاومت تراکمی تک محوری، مدول الاستیک و مقاومت کششی این نمونه کمتر و کرنش آنی، کرنش خزشی و نرخ کرنش آن تحت تنش محوری 12 مگاپاسکال بیشتر از نمونه‌های متعلق به بخش‌های فوقانی دیپایر است که می‌تواند در نتیجه بیشتر بودن درصد تخلخل و منافذ کوچک میکروسکوپی در امتداد مرز دانه‌ها در این نمونه باشد. در مقابل ساز و کار دگرشکلی غالب در نمونه‌های متعلق به بخش‌های فوقانی دیپایر رشد دانه‌ها در اثر مهاجرت مرز دانه‌ها بوده است. این سازوکار سبب حذف منافذ و نقص‌های موجود در دانه‌ها می‌شود. از این رو این نمونه‌ها از مقاومت و مدول الاستیک بالاتری برخوردار بوده و دگرشکلی پلاستیک دانه‌ها در حین آزمون‌ها مکانیکی با سهولت بیشتری انجام می‌شده است. در کل نتایج این تحقیق پیشنهاد می‌کند که بررسی ریزساختار سنگ نمک و چگونگی رفتار آن تحت شرایط بارگذاری مختلف در درک رفتار مخازن ذخیره ایجاد شده در نمک مهم و اساسی است.

**کلید واژه‌ها:** سنگ نمک، ریزساختار، خصوصیات مکانیکی، روش پراش الکترون‌های برگشتی.

1. گروه زمین شناسی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران، hadismansouri2000@gmail.com

2. استاد گروه زمین شناسی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

3. سازمان زمین شناسی، تبریز، ایران

4. دانشیار گروه زمین شناسی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

\* مسئول مکاتبات

**1. مقدمه**

گنبد‌های نمکی از جمله ساختارهای زمین شناسی هستند که از ارزش اقتصادی بسیار بالایی برخوردارند. آن‌ها مهم‌ترین منبع تأمین هالیت (نمک طعام و نمک صنعتی)، انیدریت و ژپس (گچ) هستند. علاوه بر رسوبات تبخیری، عناصر فلزی و مواد رادیو اکتیو نیز در آن‌ها یافت می‌شود؛ وجود ذخایر نفت و گاز فراوان نیز بر اهمیت آن‌ها می‌افزاید. از طرف دیگر، با توجه به تخلخل و نفوذپذیری پایین این تشکیلات، از آن‌ها می‌توان برای ذخیره گاز و دفع ضایعات هسته‌ای نیز استفاده کرد. سنگ نمک همچنین می‌تواند برای شبیه سازی رفتار سنگ‌های سیلیکاته تحت بارگذاری استفاده شود. محققین بر این باورند که سنگ نمک می‌تواند ریزساختارهایی که در سنگ‌های سیلیکاته در شرایط بالایی از دما و فشار ایجاد می‌شوند را در محیط آزمایشگاه و در بازه زمانی کمتر نشان دهند (Bestmann et al., 2005; Piazolet et al., 2006). اما نکته بسیار مهم در مورد نمک رفتار شکل پذیر آن است به طوریکه نمک در مقایسه با سایر سنگ‌ها در دما و فشار پایین جریان می‌یابد. از این رو آماده سازی مغارهای نمکی و بهره برداری از آن‌ها سبب تغییر در وضعیت اولیه تنش‌ها، ایجاد تنش‌های انحرافی، بروز رفتار خزش در سنگ نمک و کاهش حجم مغار و آسیب در محیط اطراف خواهد شد. بنابراین با توجه دلایل ذکر شده توجه به سنگ نمک و بررسی خصوصیات فیزیکی و مکانیکی آن بسیار مهم خواهد بود.

بی‌شک یکی از عوامل مهم تأثیر گذار بر رفتار مکانیکی سنگ، خصوصیات آن در مقیاس بلور است. به طور مثال بعضی از بلورها دارای سطوح لغزش فعال می‌باشند. در یک بلور منفرد نمک شش سیستم لغزش مشاهده شده‌است. این سیستم‌ها به عنوان سطوح برش عمل کرده و لغزش شبکه بلور در امتداد آن‌ها به آسانی انجام می‌شود. بنابراین مطالعه ریزساختار سنگ‌هایی که به طور طبیعی یا در آزمایشگاه دگرشکل شده‌اند مهم خواهد بود. بررسی ریزساختار در سنگ نمکی که در حین صعود دگرشکل شده‌است، می‌تواند صحت

داده‌های آزمایشگاهی را تأیید کند. همچنین می‌تواند فهم دقیقی از ساز و کارهای دگرشکلی که در نرخ کرنش پایین، کمتر از آنچه که در آزمایشگاه قابل دسترسی است فراهم کند. در سال‌های اخیر، پیشرفت زیادی در روش‌های مطالعه ریزساختار حاصل شده‌است. یکی از این روش‌ها، روش پراش الکترون‌های برگشتی (Electron Backscatter Diffraction; EBSD) است که قادر است وضعیت جهت‌یابی بلورها در یک نمونه را با سرعت و دقت بالا برداشت کند. اطلاع از وضعیت جهت‌یابی بلورها در یک نمونه، می‌تواند جهت‌های بارگذاری احتمالی که بیشترین تغییر شکل نمونه را به دنبال دارد پیشنهاد کند.

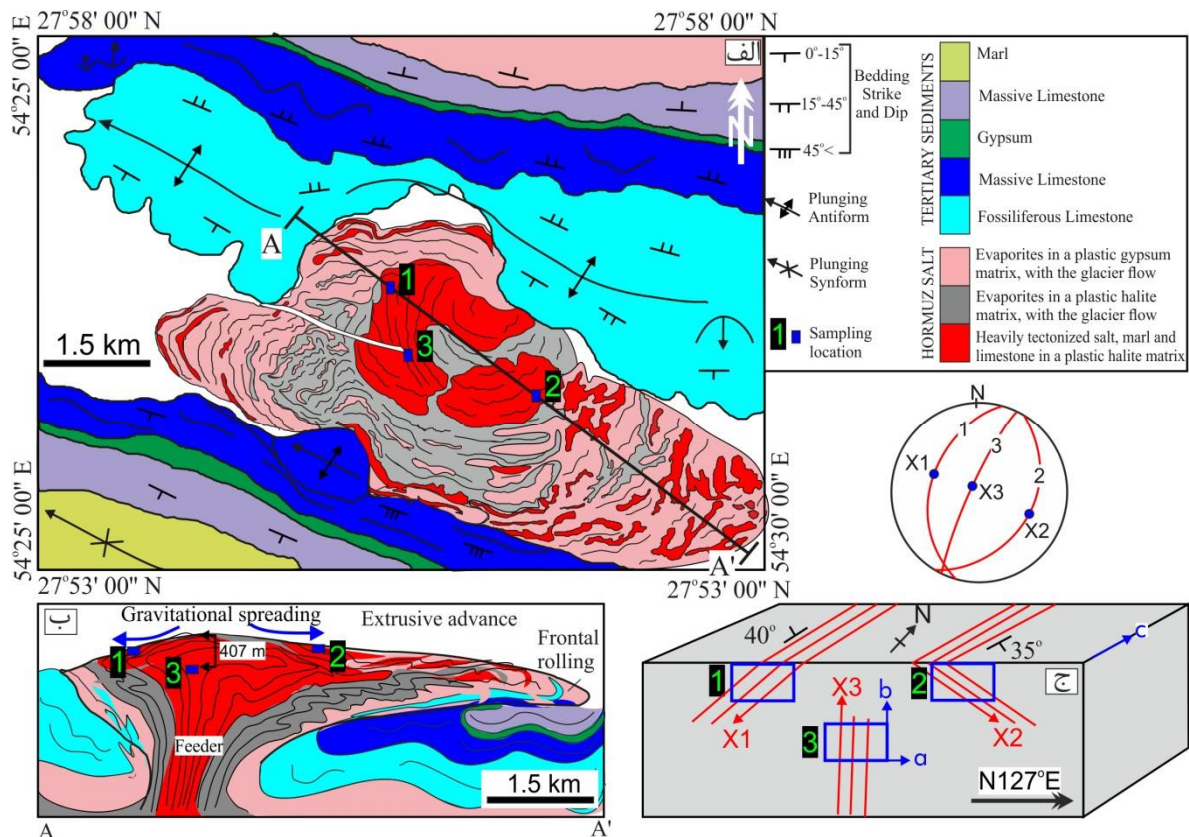
با وجود اهمیت مطالعه ریزساختار و توسعه فراوان روش‌های مطالعه آن، هنوز مهندسیین زمین شناس آنچنان که شایسته است به این بخش از علم توجه نداشته‌اند. معمولاً در زمین شناسی مهندسی برای پی بردن به رفتار سنگ‌ها در مقیاس‌های بزرگ، خصوصیات فیزیکی و مکانیکی در مقیاس ماکروسکوپی بررسی شده و کمتر توجهی به توسعه بافت و ساخت سنگ در حین دگرشکلی می‌شود. بنابراین اهمیت مطالعه بر روی سنگ نمک و فراوانی زیاد گنبد‌های نمکی در ایران از یک سو و ارزش بالای مطالعه ریزساختار موجود در سنگ از سوی دیگر سبب شد تا در این مقاله تأثیر ساخت و بافت میکروسکوپی بر خصوصیات مکانیکی سنگ نمک بررسی شود. نمونه‌های مورد مطالعه از قسمت ساقه و بخش‌های فوقانی دیپایر نمکی دهکویه واقع در 27 کیلومتری شهر لار در استان فارس برداشت شد.

**2. مواد و روش‌ها****2-1. نمونه برداری**

نمونه‌های سنگ نمک مورد مطالعه از گنبد نمکی دهکویه برداشت گردید. این دیپایر از تناوب لایه‌های خاکستری، صورتی و سفید تشکیل شده‌است و دارای یک هسته مرکزی

قطر تقریبی 59 میلیمتر در راستای قائم از آنها تهیه شد. مقاطع نازک از سطح طولی نمونه‌های استوانه‌ای و در واقع از سطح قائم آماده شدند. محور طولی مقاطع نازک در راستای  $127^{\circ}$  (SE) است. چنانچه در شکل 1-ج دیده می‌شود محورهای a و b به ترتیب به موازات محور طولی و محور کوچک مقاطع نازک بوده و محور c عمود بر سطح نمونه‌ها است. مقاطع نازک تقریباً عمود بر لایه‌بندی نمک بوده و در بردارنده خطوارگی ناشی از کشیدگی دانه‌ها می‌باشند. خطوارگی در این نمونه‌ها در جهت شیب لایه‌بندی بوده و در نمونه  $S_3$  قائم است.

و دو نمکشار در بخش شرقی و غربی می‌باشد. شیب این لایه‌ها در نمکشار غربی 10 تا 40 درجه به سمت شمال غرب و در نمکشار شرقی 0 تا 50 درجه به سمت جنوب شرق می‌باشد. ریزساختار موجود در سه نمونه به روش EBSD مطالعه شد. موقعیت این نمونه‌ها در شکل 1 نشان داده شده‌است. نمونه‌های  $S_1$  و  $S_2$  از بخش‌های فوقانی دیاپیر برداشت شده‌اند و نمونه  $S_3$  متعلق به قسمت میانی دیاپیر است. چندین بلوک سنگی از این سه محل برداشت شد. در آزمایشگاه با استفاده از گردبر الماسه نمونه‌های استوانه‌ای به



شکل 1. الف) نقشه زمین شناسی گنبد نمکی دهکویه. (ب) نیمرخ گنبد نمکی در راستای  $AA'$  مشخص شده در نقشه. (ج) وضعیت جهت‌یابی نمونه‌های برداشت شده. استریونت (مربوط به نیمکره پایینی، سطوح برابر) وضعیت لایه بندی و خطوارگی در محل برداشت نمونه‌ها را نشان می‌دهد.

2-2. مطالعه ریزساختاری

نمونه‌های متعلق به نمکشار غربی و ساقه دیاپیر انجام شد. آزمون‌های سه محوری تحت فشار همه جانبه 5، 10 و 15 مگاپاسکال در سرعت تغییر طول 0/3 میلیمتر بر دقیقه و آزمون سه محوری دیگری در فشار همه جانبه 40 مگاپاسکال و سرعت تغییر طول 0/05 میلیمتر بر دقیقه در آزمایشگاه آزمون فولاد اصفهان بر روی نمونه‌های متعلق به نمکشار انجام شد.

آزمون‌های خزش در آزمایشگاه مکانیک سنگ دانشگاه تهران انجام شد. کرنش خزشی ایجاد شده در نمونه‌های متعلق به نمکشار در دمای اتاق و تحت تنش‌های محوری (S<sub>1</sub>) 10، 12 و 15 مگاپاسکال به مدت چهارده روز ثبت گردید. همچنین آزمون خزش دیگری در تنش محوری 12 مگاپاسکال بر روی نمونه متعلق به ساقه دیاپیر انجام شد. در دستگاه موجود در دانشگاه تهران ابتدا بار توسط جک هیدرولیکی به نمونه وارد می‌شود. با اعمال تنش، فنرهایی که در زیر صفحه بارگذاری قرار دارند فشرده می‌شوند. وقتی بار به حد نصاب رسید جک هیدرولیکی از مدار خارج شده و بار توسط فنرها به نمونه وارد می‌شود. مقدار تنش همواره توسط سنسور مخصوص کنترل می‌شود. اگر بار در اثر کرنش نمونه و بازتر شدن فنرها از مقدار تعیین شده افت پیدا کند، دوباره توسط جک به حد نصاب برگردانده می‌شود. مقدار کرنش محوری نمونه توسط دو گیج عقربه‌ای در طول زمان ثبت می‌شوند. بعد از بدست آمدن منحنی‌های کرنش-زمان از رابطه بورگرز برای مدلسازی استفاده شد:

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma}{E_M} + \frac{\sigma}{E_K} (1 - \exp\left(-\frac{E_K}{\eta_K} t\right)) + \frac{\sigma}{\eta_M} t \quad (1)$$

در این رابطه  $\varepsilon$  کرنش در زمان  $t$ ،  $\sigma$  تنش اعمال شده بر نمونه،  $E_M$  مدول الاستیک آنی،  $E_K$  مدول الاستیک تأخیری،  $\eta_K$  ضریب گرانیوی کلون و  $\eta_M$  ضریب گرانیوی ماکسول می‌باشد.

مطالعه ریزساختاری مقاطع نازک با استفاده از دستگاه Zeiss SIGMAVP FEGSEM در دانشگاه اتاگو نیوزیلند انجام گرفت. الگوهای EBSD با ولتاژ 30 kV، جریان 100 nA در فاصله کاری حدوداً 30 mm برداشت گردید. فاصله نقاط برداشت اطلاعات ریز ساختاری 10  $\mu$ m می‌باشد. اطلاعات خام بدست آمده با استفاده از نرم افزار HKL Channel 5 پردازش گردید.

EBSD تفاوت جهت‌یافتگی تمام نقاط (Pixels) یا همان بلورها را نسبت به یکدیگر برداشت می‌کند. در این روش به مجموعه نقاط پیوسته که دارای جهت‌گیری یکسان بلوری باشند، دانه گفته می‌شود. بدین ترتیب تغییر جهت‌یافتگی بلورها که با زاویه سنجیده می‌شود و به آن تفاوت جهتی (Misorientation) گفته می‌شود، ملاک اندازه‌گیری اندازه دانه است. معمولاً در زمین شناسی تفاوت جهت‌یافتگی 10 درجه ملاک اندازه‌گیری اندازه دانه است. بدان گونه که فرایند تعیین اندازه دانه و مرز دانه‌ها از یک نقطه شروع می‌شود. نقاط و بلورهایی که تفاوت جهت‌یافتگی‌شان نسبت به یکدیگر کمتر از 10 درجه باشد به عنوان یک دانه قلمداد شده و مرز دانه در اطراف آن‌ها ترسیم می‌شود.

### 2-3- آزمون‌های مکانیکی

آزمون برزیلین مطابق با استاندارد ASTM D3967، بر روی ده نمونه دیسکی با نسبت ضخامت به قطر 0/5 تا 0/75 انجام شد. پنج نمونه متعلق به نمکشار (S<sub>1</sub>) و پنج نمونه دیگر متعلق به ساقه دیاپیر (S<sub>3</sub>) می‌باشند.

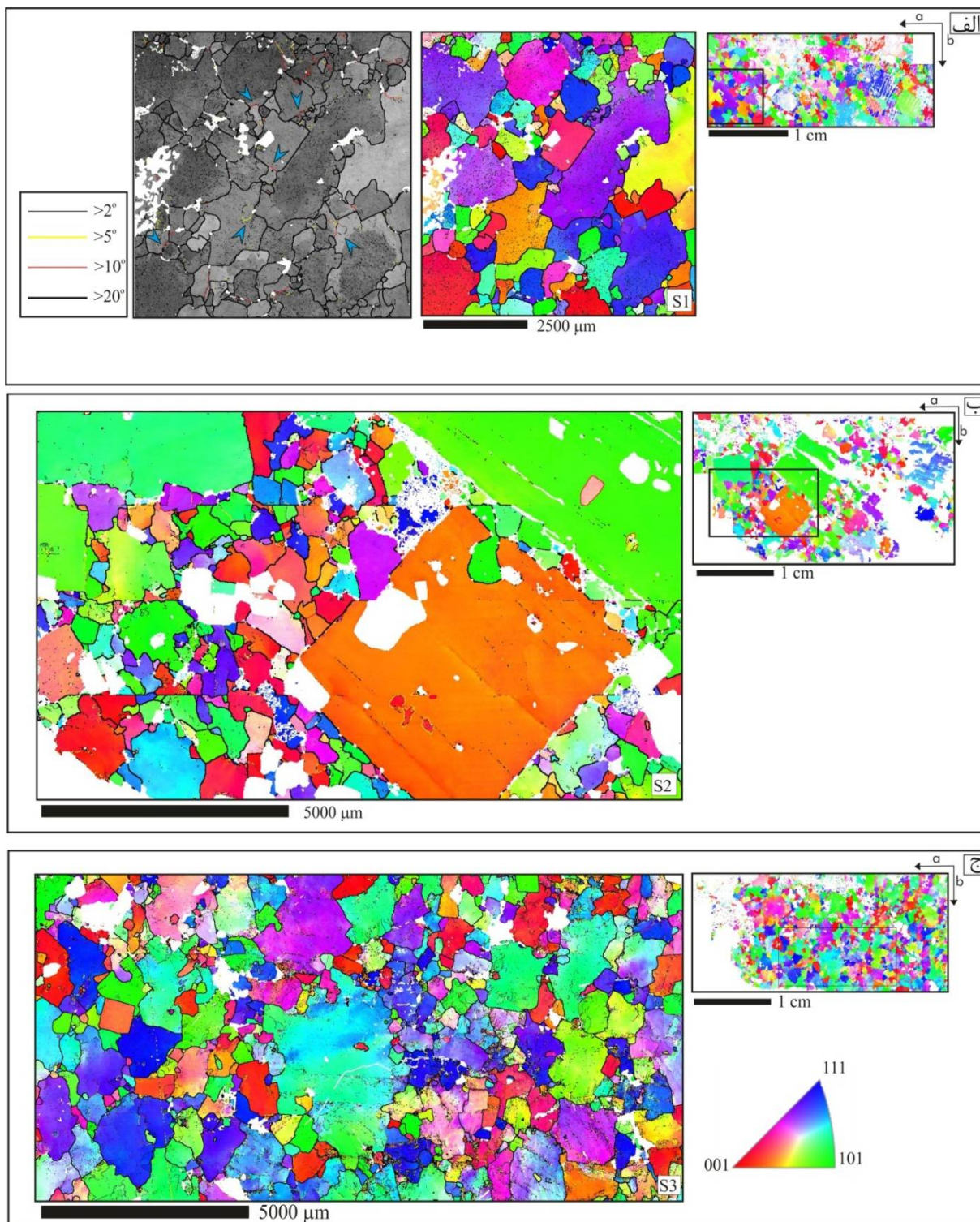
آزمون مقاومت فشاری تک محوری مطابق با استاندارد ASTM D7012 بر روی نمونه‌های استوانه‌ای نمک با قطر تقریبی 59 میلیمتر و با نسبت طول به قطر 2 تا 3 انجام شد. این آزمون توسط دستگاه کشش، خمش و فشارش سنتم (مدل STM-150) در دانشگاه اصفهان انجام گرفت. در این مطالعه به منظور رفتار سنجی نمک، آزمون‌های تک محوری با سرعت تغییر طول 0/05 و 0/2 میلیمتر بر دقیقه بر روی

## 3. نتایج

## 3-1. توصیف ریزساختار اولیه نمونه‌ها به روش EBSD

بخشی از هر نمونه که بافتی معادل با کل نمونه داشت مورد مطالعه به روش EBSD قرار گرفت. نقشه‌های جهت‌یافتگی سه نمونه بررسی شده در شکل 2 نشان داده شده‌است. این نقشه‌ها وضعیت جهت‌گیری محورهای بلورشناسی را نسبت به محورهای نمونه نشان می‌دهند. هر نقشه از میلیون‌ها پیکسل تشکیل شده‌است. هر پیکسل به مصداق یک بلور کوبیک هالیت است. این نقشه‌ها جهت‌گیری محورهای بلورشناسی <100>، <110> و <111> هر یک از بلورهای نمک را نسبت به محوری که عمود بر صفحه کاغذ است نشان می‌دهند. به مفهوم ساده‌تر می‌توان گفت محورهای بلورشناسی <100>، <110> و <111> در واقع محورهای x، y و z بلور هستند که ارتباطشان با محورهای a، b و c نمونه توسط نقشه‌های جهت‌یافتگی بررسی می‌شود. با توجه به راهنمای موجود در شکل، اگر محور <111> بلور عمود بر صفحه کاغذ باشد بلور به رنگ آبی، اگر محور <110> عمود بر صفحه کاغذ باشد بلور به رنگ سبز و اگر محور <100> بلورها عمود بر صفحه کاغذ باشد، بلور به رنگ قرمز خواهد بود.

رنگ‌های متنوع در نقشه‌های جهت‌یافتگی شکل 2 گویای آن است که بلورها جهت‌یابی ترجیحی به خصوصی ندارند. بافت و ساخت هر سه نمونه تقریباً مشابه است. در هر سه نمونه، دانه‌های درشت در زمینه‌ای از دانه‌های ریز قرار گرفته‌اند. بیشتر دانه‌ها بی‌شکل، دارای مرزهای نامنظم و منحنی شکل و برخی از دانه‌ها شکل‌دار و دارای وجوه منظم هستند. تغییر رنگ مشاهده شده در برخی از دانه‌ها به دگرشکلی پلاستیک درون بلوری اشاره دارد. بر خلاف تصاویر میکروسکوپ نوری که تفکیک بین انواع مرز فرعی ممکن نیست، در نقشه‌های جهت‌یافتگی مرزهای دانه‌ای بر اساس زاویه به چهار دسته تقسیم شده‌اند که با رنگ‌های مختلف نشان داده شده‌اند (شکل 2-الف). وقتی زاویه بین دو بلوری که هم‌جهت بوده‌اند در اثر دگرشکلی تغییر می‌کند، آن دو بلور با یک مرز از یکدیگر جدا می‌شوند. زاویه آن مرز بستگی به اختلاف زاویه بلورها دارد. معمولاً مرزهای کوچکتر از 10 درجه به عنوان مرز فرعی یا مرز زبردانه در نظر گرفته می‌شوند. فلش‌ها در نقشه باند کنتراست شکل 2-الف به محل‌های تشکیل مرزهای دانه‌ای و زبردانه‌ای اشاره می‌کنند. چنانچه دیده می‌شود مرزهای زبردانه‌ای در نمونه S3 (متعلق به ساقه دی‌اپیر) فراوانی بیشتری داشته و تغییر رنگ در اکثر دانه‌های آن (شکل 2-ج) مشاهده می‌شود که نشان می‌دهد بیشتر دانه‌ها در این نمونه دگرشکل شده‌اند.



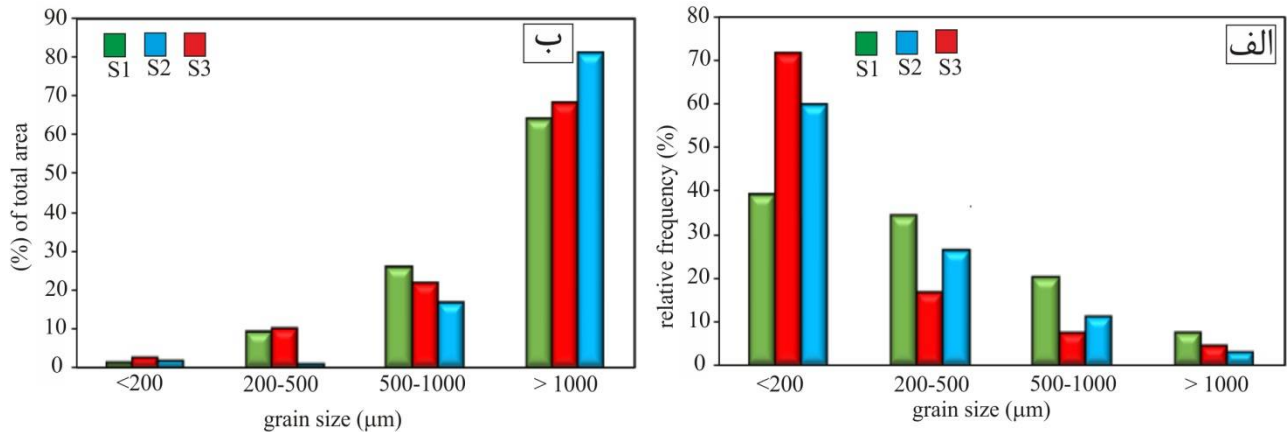
شکل 2. نقشه جهت‌یافتگی برای (الف) نمونه S<sub>1</sub> (ب) نمونه S<sub>2</sub> و (ج) نمونه S<sub>3</sub>.

نمونه S<sub>3</sub> (متعلق به ساقه دیپیر)، دانه‌های ریز فراوانی زیادی دارند. شکل 3-ب درصد مساحت اشغال شده را برای

نمودار فراوانی اندازه دانه در شکل 3-الف نشان داده شده‌است. چنانچه دیده می‌شود در هر سه نمونه خصوصاً در

میکرون مساحت بیشتری را به خود اختصاص داده‌اند.

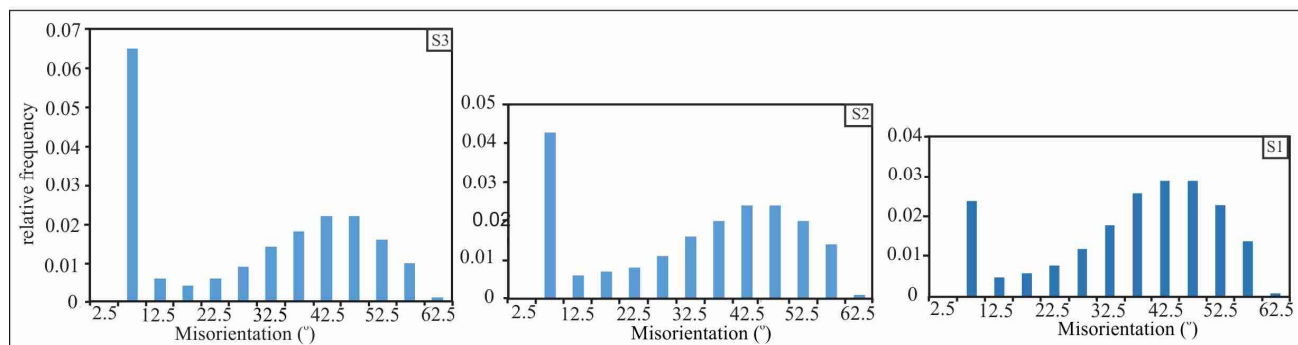
دانه‌های مختلف نشان می‌دهد. واضح است که در هر سه نمونه، بویژه نمونه‌های S<sub>1</sub> و S<sub>2</sub> دانه‌های بزرگتر از 1000



شکل 3. الف) توزیع فراوانی اندازه دانه‌ها (ب) درصد مساحت هر گروه از دانه‌ها

(1999)، فراوانی آن‌ها در نظر گرفته نشده‌است. در هر سه نمونه زوایای کوچک فراوانی بیشتری دارند. فراوانی این زوایای کوچک در نمونه S<sub>3</sub> بیشتر است. زاویه‌های کوچک در ارتباط با مرزهای زیردانه‌ای هستند که در داخل دانه‌ها مشاهده می‌شوند.

به طور کلی دگرشکلی یک سنگ نتیجه تغییر در زوایای بین بلورهای سازنده آن است. بنابراین بررسی توزیع فراوانی زوایای بین بلورها خواهد توانست اطلاعاتی در خصوص نحوه دگرشکلی نمونه فراهم کند. نمودارها در شکل 4 توزیع زوایای بین بلورهای مجاور را در هر یک از نمونه‌های مطالعه شده نشان می‌دهد. به علت خطاهایی که در اندازه‌گیری زوایایی کمتر از 5 درجه وجود دارد (Prioi,



شکل 4. توزیع فراوانی جهت‌یافتگی بین بلورها

انجام شد. در شکل 5 وضعیت نمونه‌ها قبل از آزمون دیده می‌شود. پنج نمونه متعلق به ساقه دی‌پایر در ظاهر سالم هستند و در 5 نمونه متعلق به نمکشار آثاری از فرایند انحلال-فشاری

3-2. نتایج آزمون برزیلین در این مطالعه پنج آزمون برزیلین بر روی نمونه‌های متعلق به ساقه و پنج آزمون بر روی نمونه‌های متعلق به نمکشار

سریپای و همکاران (Sriapai et al., 2012) در دمای اتاق تقریباً دو برابر مقاومت کششی بدست آمده در این مطالعه است. در مطالعه آنها نمونه‌های نمک از عمق 70 تا 100 متری یک معدن پتاس برداشت شده و در مقایسه با نمونه‌های مورد بررسی در این مطالعه دانه ریزتر بوده‌اند. چنانچه در جدول 1 دیده می‌شود مقادیر مقاومت کششی نمونه‌های متعلق به نمکشار قدری بزرگتر از مقاومت کششی نمونه‌های متعلق به ساقه دیپیر است. به طوریکه میانگین مقاومت کششی این نمونه‌ها 20 درصد بیشتر از میانگین مقاومت کششی نمونه‌های متعلق به ساقه است.

دیده می‌شود. به طوریکه به نظر می‌رسد در اثر شدت تنش وارد شده دانه‌های نمک در هم فرو رفته و در اثر انحلال و احتمالاً ایجاد ترک‌های میکروسکوپی مرزهای مضرس تشکیل شده‌است. محور بارگذاری در آزمون برزیلین نسبت به این مرزهای مضرس در وضعیت عمود (نمونه‌های 6، 8 و 10)، موازی (نمونه 7) و مایل (نمونه 9) قرار دارد. نتایج بدست آمده از این آزمون در جدول 1 ارائه شده‌است. مقدار نیروی اعمال شده برای شکست نمونه‌ها از 6 تا 9 کیلونیوتن و مقدار مقاومت کششی نمونه‌ها از 2/86 تا 4/18 مگاپاسکال تغییر می‌کند. این اعداد در محدوده مقاومت کششی ارائه شده برای سنگ نمک خالص متعلق به هیمالیا قرار دارند (Wang et al., 2016). مقاومت کششی سنگ نمک مطالعه شده توسط

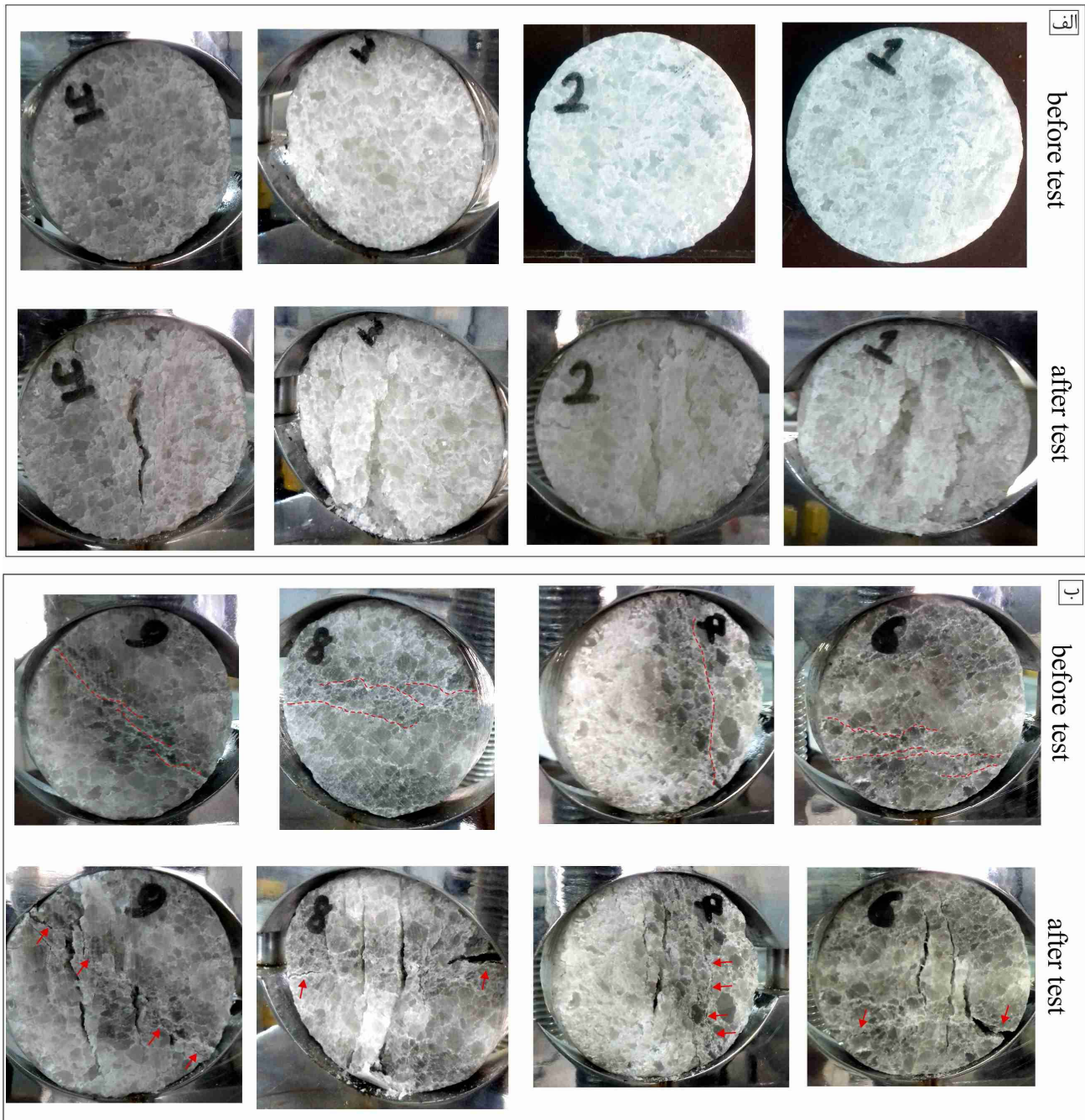
جدول 1. نتایج آزمون برزیلین

Tensile strength (MPa)	Applied force (kN)	density (gr/cm <sup>3</sup> )	diameter (mm)	thickness (mm)	weight (gr)	Sample location	No
3.09	6.00	2.04	59.42	20.83	117.53		1
3.81	8.00	2.06	59.00	22.68	127.77		2
2.86	6.00	2.06	59.00	22.67	127.44	diaipiric stem	3
3.72	7.90	2.08	59.00	22.95	130.24		4
3.03	6.00	1.84	59.00	21.35	107.60		5
4.17	9.00	2.01	58.75	23.40	127.74		6
4.18	8.00	2.01	58.40	20.88	112.61		7
4.30	9.00	1.97	58.80	22.65	121.08	west glacier	8
3.35	7.00	2.05	58.89	22.69	125.54		9
3.85	8.00	2.01	58.62	22.57	122.34		10

نمونه‌های نمک تحت آزمون برزیلین از وسط و به موازات محور بارگذاری شکسته شده و تقریباً هر دو نیمه انسجام خود را حفظ کرده‌اند. اما در مطالعه حاضر ترک‌های کششی در محدوده‌ای به عرض 2 تا 3 سانتیمتر گسترش یافته‌اند.

3-2-1. توصیف شکست نمونه‌ها در آزمون برزیلین در شکل 5 وضعیت نمونه‌های سنگ نمک قبل و بعد از آزمون برزیلین نشان داده شده‌است. شکست نمونه‌ها نتیجه گسترش ترک‌های کششی به موازات محور بارگذاری است. در مطالعه سریپای و همکاران (Sriapai et al., 2012)،





**شکل 5.** وضعیت نمونه‌ها قبل و بعد از آزمون برزیلین. (الف) نمونه‌های متعلق به ساقه دیابیر (ب) نمونه‌های متعلق به نمکشار که در آن‌ها آثاری از فرایند انحلال-فشاری دیده می‌شود.

گسترش شکستگی‌های مرکزی، مرزهای مضرس موجود در نمونه‌ها (که می‌توانند شواهد فرایند انحلال-فشاری باشند) نیز باز شده‌اند (شکل 5-ب). بر طبق مطالعه باسو و همکاران (Basu et al., 2013) حالت شکست در این نمونه‌ها را می‌توان به صورت گسترش شکستگی‌های مرکزی + فعالیت

بر طبق مطالعه باسو و همکاران، حالت شکست در پنج نمونه اول از نوع گسترش شکستگی‌ها در قسمت مرکزی نمونه است. این شکستگی‌ها به موازات محور بارگذاری هستند و به لحاظ عرضی محدوده‌ای بیشتر از 10 درصد قطر نمونه را در برمی‌گیرند (شکل 5-الف). در پنج نمونه دوم، علاوه بر

دنبال داشته‌است. به طوریکه در سرعت تغییر شکل 0/05 میلیمتر بر دقیقه، کرنش در شکست 4/1 درصد و در سرعت 0/2 میلیمتر بر دقیقه 5% است (شکل 6 و جدول 2).

نتایج آزمون‌های سه محوری بر روی نمونه‌های متعلق به نمک‌شمار نشان می‌دهند که افزایش فشار همه جانبه سبب افزایش مقاومت و مدول الاستیک نمک می‌شود. در آزمون‌های سه محوری تحت فشارهای همه جانبه 5، 10 و 15 مگاپاسکال و سرعت 0/3 میلیمتر بر دقیقه در مقایسه با آزمون‌های تک محوری که در سرعت کمتر (0/2 و 0/05 میلیمتر بر دقیقه) انجام شد، مقدار کرنش در لحظه شکست کاهش یافته‌است. همچنان که در منحنی‌های تنش-کرنش دیده می‌شود به علت سرعت بارگذاری بالا، تحت این آزمون‌های سه محوری، سنگ نمک رفتار ترد و شکننده داشته و شکست آن در کرنش 2% اتفاق افتاده است. این درحالی است که در آزمون‌های تک محوری میزان کرنش نهایی بیشتر از 4% است. این نتایج با نتایج آزمون‌های سه محوری که توسط لیانگ و همکاران (Liang et al., 2007) بر روی نمونه‌های نمک و انیدریت انجام شده‌است همخوانی دارد. آن‌ها معتقدند هالیت در فشارهای همه‌جانبه پایین و نرخ کرنش بالا (بیشتر از  $s^{-1}$   $10^{-5} \times 4$ ) به صورت ماده‌ای الاستیک با رفتار مور-کولمب در نظر گرفته می‌شود. کریستسکو و هانش (Cristescu and Hunsche 1998) نیز بیان می‌کنند که اگرچه سنگ نمک در مقایسه با دیگر سنگ‌ها شکل‌پذیرتر است اما در سرعت بارگذاری بالا یا در شرایط غیرمحصور، به صورت ترد و الاستیک رفتار کرده و در اثر گسترش ریزترک‌ها می‌شکند. از طرف دیگر سنگ نمک مطالعه شده خالص نبوده و دارای 20 تا 30 درصد انیدریت می‌باشد. لیانگ و همکاران (Liang et al., 2007) نشان داده‌اند که وجود انیدریت در سنگ نمک باعث افزایش استحکام نمک می‌شود و از بروز رفتار خمیرسان جلوگیری می‌کند.

اعمال فشار همه جانبه 40 مگاپاسکال و سرعت بارگذاری 0/05 میلیمتر بر دقیقه سبب بروز رفتار پلاستیک گسترده در

مرزهای مضرس (یا نقاط ضعف موجود در نمونه) نامگذاری کرد. چنانچه در شکل 5-ب دیده می‌شود، مرزهای مضرس در هر سه حالت بارگذاری مایل، موازی و عمود باز شده‌اند. این امر می‌تواند نشان دهنده تمرکز تنش در حفرات موجود بر روی این مرزهای انحلالی باشد.

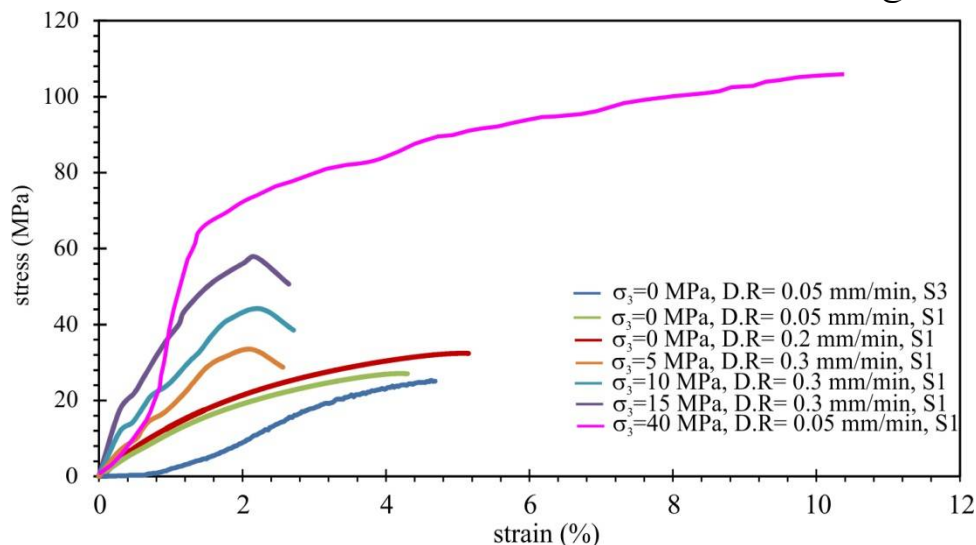
### 3-3. آزمون مقاومت تراکمی تک محوری

آزمون‌های مقاومت تراکمی تحت سرعت‌های جابجایی و فشارهای همه جانبه مختلف بر روی نمونه‌های نمکی انجام شد. منحنی‌های تنش-کرنش این آزمون‌ها در شکل 6 و نتایج آن‌ها در جدول 2 ارائه شده‌است. مقاومت تک محوری نمونه متعلق به ساقه دیپیر در سرعت جابجایی 0/2 میلیمتر بر دقیقه، 25 مگاپاسکال و مدول الاستیک آن 1/01 گیگاپاسکال است. این مقادیر اندکی از مقاومت تراکمی تک محوری و مدول الاستیک نمونه متعلق به نمک‌شمار کمتر است. این تفاوت می‌تواند نتیجه تفاوت در ریزساختار نمونه‌ها باشد که در ادامه مورد بحث قرار می‌گیرد.

نمونه‌های متعلق به نمک‌شمار تحت آزمون تک محوری عمدتاً رفتار پلاستیک نشان داده‌اند. طبق انتظار کاهش نرخ کرنش در این نمونه‌ها، کاهش مقاومت تراکمی تک محوری را به دنبال داشته‌است. مقاومت تراکمی این نمونه‌ها برای سرعت 0/2 و 0/05 میلیمتر بر دقیقه به ترتیب 32 و 27 مگاپاسکال است. این مقادیر با مقاومت تراکمی تک محوری گزارش شده برای سنگ نمک توسط هنسن و همکاران (Hansen et al., 1984) (15 تا 32 مگاپاسکال) مطابقت دارد. با افزایش سرعت بارگذاری مدول الاستیک به میزان ناچیزی (25%) افزایش یافته‌است. به طوریکه در سرعت 0/05 میلیمتر بر دقیقه، مدول الاستیک 1/35 گیگاپاسکال بوده و با افزایش سرعت بارگذاری به مقدار 1/67 گیگاپاسکال رسیده‌است. چنین روندی در مطالعه لیانگ و همکاران (Liang et al., 2011) نیز مشاهده شده‌است. منحنی‌های تنش-کرنش همچنین نشان می‌دهند که در شرایط غیر محصور افزایش نرخ کرنش، افزایش درصد کرنش در لحظه شکست را در نمونه متعلق به نمک‌شمار به

نشد. مدول الاستیک سنگ نمک تحت این فشار همه جانبه افزایش و به 8/13 گیگاپاسکال رسید.

سنگ نمک شد. به طوریکه سنگ نمک تنش محوری 105 مگاپاسکال را تحمل کرد و 10 درصد کاهش طول یافت اما تقریباً سالم مانده و سطح شکست مشخصی در آن پدیدار



شکل 6. مقایسه منحنی‌های تنش- کرنش در فشارها و سرعت بارگذاری‌های مختلف

جدول 2. نتایج آزمون‌های مقاومت فشاری نمونه‌های نمک مورد مطالعه

Strain at failure (%)	E (GPa)	Stress at failure (MPa)	$\sigma_3$ (MPa)	Replacement rate (mm/min)	Sample location
4.7	1.01	25	0	0.2	stem
5	1.67	32.43	0	0.2	glacier
4.1	1.35	27	0	0.05	glacier
2.12	1.8	33.34	5	0.3	glacier
2.25	1.9	44.11	10	0.3	glacier
2.19	3.1	57.65	15	0.3	glacier
10.4	8.31	105.68	40	0.05	glacier

نرخ کرنش در آن تقریباً ثابت است. منحنی‌های کرنش-زمان در شکل 7 نشان می‌دهند که سطح تنش بر میزان کرنش و نرخ کرنش تأثیرگذار است.

طبق انتظار هر چه سطح تنش در آزمون خزش بالاتر باشد کرنش ایجاد شده نیز بزرگتر خواهد بود (Yang et al., 1999; Liu et al., 2015). مقدار کرنش الاستیک آنی بر طبق تعریف Adams et al., 1994) از روی منحنی‌های خزش تعیین گردید. بدین ترتیب کرنش آنی، مقدار کرنش ایجاد شده در نمونه از لحظه شروع بارگذاری تا نقطه‌ای است

### 3-4 نتایج آزمون خزش

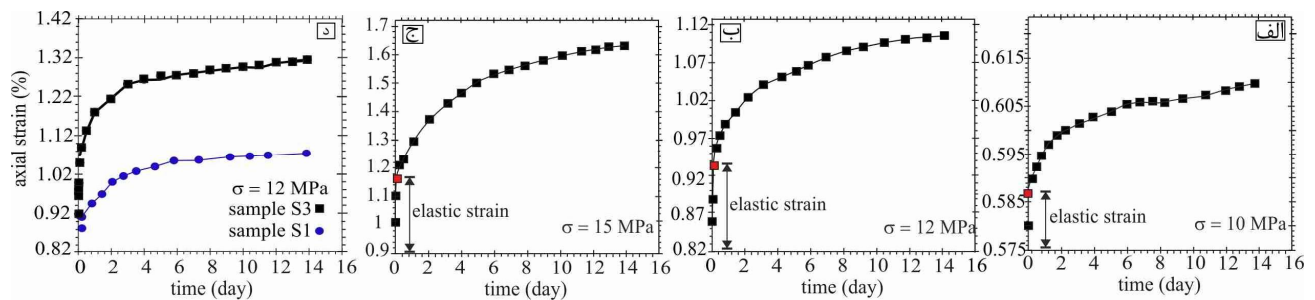
#### 3-4-1 منحنی‌های کرنش-زمان

شکل 7-الف تاج منحنی‌های کرنش-زمان نمونه‌های متعلق به نمکشار را در سه سطح تنش محوری 10، 12 و 15 مگاپاسکال نشان می‌دهد. این منحنی‌ها دو مرحله خزش را نشان می‌دهند: 1) خزش اول یا گذرا که در نتیجه کرنش ویسکوالاستیک نمونه است و در آن نرخ بالای کرنش الاستیک اولیه در طول زمان کاهش می‌یابد و 2) خزش پایدار یا خزش دوم که در نتیجه دگرشکلی ویسکوپلاستیک است و

مگاپاسکال پایین‌تر از نقطه تسلیم نمک مورد مطالعه بوده باشد و بدین ترتیب کرنش کمی را در نمونه به دنبال داشته‌است. شکل 7-د منحنی کرنش-زمان نمونه متعلق به ساقه دی‌پایر تحت تنش 12 مگاپاسکال را نشان می‌دهد. در این نمونه نیز دو مرحله خزش اول و خزش دوم دیده می‌شود. اما چنانچه دیده می‌شود مقدار کرنش آنی و کرنش خزشی ایجاد شده در این نمونه در مقایسه با نمونه متعلق به نمکشار تحت تنش مشابه بیشتر است. مقدار کرنش آنی در نمونه متعلق به نمکشار 0/88 درصد بوده که در نمونه متعلق به ساقه دی‌پایر به 1/09 درصد رسیده‌است. نرخ کرنش نیز اندکی برای نمونه متعلق به ساقه بالاتر است. به طوریکه نرخ کرنش در مرحله دوم خزش برای نمونه متعلق به ساقه  $4/1 \times 10^{-3} / \text{day}$  بوده که نسبت به نمونه متعلق به نمکشار 37 درصد افزایش یافته‌است. این تفاوت‌ها می‌تواند نتیجه تفاوت در ریزساختار نمونه‌ها باشد که در ادامه مورد بحث قرار می‌گیرد.

که در منحنی یک ناپیوستگی دیده می‌شود. در آن نقطه نرخ کرنش بالای الاستیک اولیه به نرخ کرنش خزشی در حال کاهش تبدیل می‌شود. شکل 7 نشان می‌دهد که با افزایش سطح تنش، درصد کرنش آنی یا الاستیک افزایش می‌یابد. در تنش‌های 10، 12 و 15 مگاپاسکال، مقدار کرنش الاستیک به ترتیب 0/585، 0/88 و 1/19 درصد است. مقدار کرنش خزشی نیز با افزایش تنش افزایش می‌یابد.

نرخ کرنش در مرحله دوم خزش تحت تنش‌های 10، 12 و 15 مگاپاسکال به ترتیب  $8 \times 10^{-4} / \text{day}$ ،  $3 \times 10^{-3} / \text{day}$  و  $1/5 \times 10^{-2}$  می‌باشد. بنابراین درصد کرنش و نرخ کرنش تحت تنش 10 مگاپاسکال بسیار کمتر از تنش‌های 12 و 15 مگاپاسکال است. دانکن و لجتای (Duncan and Lajtai 1993) بیان کرده‌اند که کرنش اساسی در بلورهای نمک وقتی اتفاق می‌افتد که تنش اعمال شده بر روی آن‌ها از تنش تسلیم بالاتر باشد و در تنش پایین‌تر از نقطه تسلیم، خزش کوچکی در نمک ایجاد می‌شود. از این رو ممکن است تنش 10

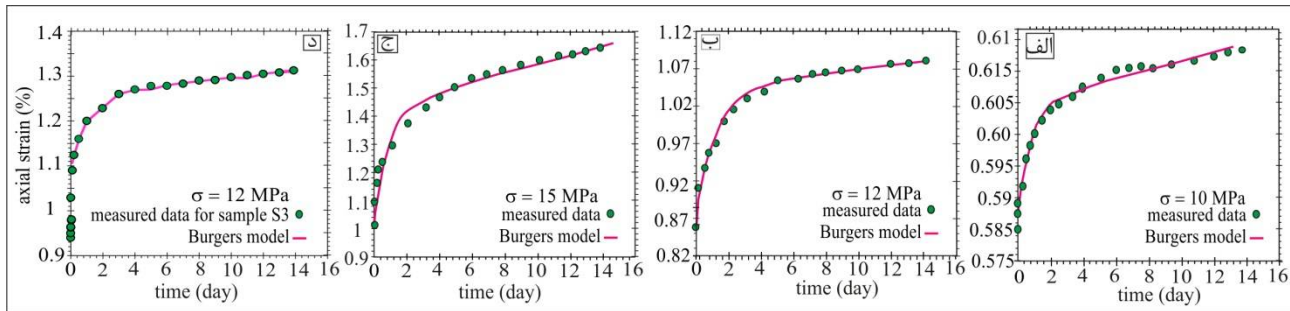


شکل 7. منحنی‌های کرنش در مقابل زمان. (الف-ج) نتایج آزمون خزش بر روی نمونه‌های متعلق به نمکشار. (د) مقایسه نتایج آزمون خزش بر روی نمونه متعلق به ساقه دی‌پایر و نمکشار تحت تنش محوری 12 مگاپاسکال.

محاسبه گردید. این پارامترها در جدول 3 ارائه شده‌اند. همچنین در شکل 8 منحنی‌های کرنش-زمان محاسبه شده با استفاده از مدل بورگرز به همراه داده‌های کرنش-زمان اندازه گیری شده نشان داده شده‌است. مقدار بالای ضریب تعیین ( $R^2$ ) گویای آن است که این مدل رفتار تابع زمان نمونه‌های نمکی را به خوبی شبیه سازی کرده‌است.

2-4-3. برآورد پارامترهای رابطه بورگرز برای نمونه‌های مطالعه شده

مدل رئولوژیکی بورگرز (رابطه 1)، متداولترین مدل برای شبیه سازی رفتار خزش مواد است. پارامترهای این مدل برای نمونه‌های مورد مطالعه تحت تنش‌های محوری 10، 12 و 15 مگاپاسکال به روش متا و پینتو (Motta and Pinto 2014)



شکل 8. مدلسازی منحنی‌های کرنش-زمان بدست آمده از آزمون خزش با استفاده از مدل بورگرز. نمونه S<sub>1</sub> تحت تنش 10 مگاپاسکال (الف)، 12 مگاپاسکال (ب) و 15 مگاپاسکال (ج). (د) نمونه S<sub>3</sub> تحت تنش 12 مگاپاسکال

جدول 3. پارامترهای مدل بورگرز برای نمونه‌های نمکی مورد مطالعه

R <sup>2</sup>	$\eta_K$ (GPa D)	E <sub>K</sub> (GPa)	$\eta_M$ (GPa D)	E <sub>M</sub> (GPa)	$\sigma$ (MPa)	sample
0.98	53.46	67.67	1250	1.71	10	
0.99	9.05	7.54	400	1.36	12	S1
0.98	4.66	5.82	98.04	1.26	15	
0.99	7.24	7.24	292.68	1.1	12	S3

در سطوح پایین تنش، نمک گرانروی بالایی داشته و بدین ترتیب کرنش کوچکی در آن ایجاد می‌شود. اما با افزایش تنش ضریب گرانروی کاهش و مقدار کرنش خزشی افزایش می‌یابد. در جدول 3 دیده می‌شود که مقادیر E<sub>K</sub> و  $\eta_K$  وابستگی زیادی به تنش داشته و کاهش قابل توجهی با افزایش تنش در این پارامترها دیده می‌شود. چنین روندی گویای آن است که در سطوح پایین تنش اجزای کلویین در مدل بورگرز، مدول الاستیک و ضریب گرانروی بسیار بالایی دارند (Yang et al., 2006). از این رو تغییر شکل بسیار کمی در سطوح پایین تنش در سنگ نمک ایجاد می‌شود. با افزایش تنش و کاهش E<sub>K</sub> و  $\eta_K$  تغییر شکل الاستیک و جریان گرانروی افزایش می‌یابند.

تفاوت اندکی بین پارامترهای مدل بورگرز برای نمونه متعلق به ساقه و نمونه متعلق به نمکشار تحت تنش 12 مگاپاسکال دیده می‌شود. با توجه به بالاتر بودن درصد کرنش آنی و خزشی در نمونه متعلق به ساقه (شکل 7-د)، مدول الاستیک

افزایش تنش محوری در نمونه متعلق به نمکشار تغییراتی را در پارامترهای مدل بورگرز به دنبال داشته‌است. مدول الاستیک ماکسول (E<sub>M</sub>) با کرنش الاستیک آنی مرتبط است. چنانچه در شکل 7-الف تا ج دیده می‌شود با افزایش تنش، مقدار کرنش آنی (ε<sub>M</sub>) افزایش و در نتیجه مقدار E<sub>M</sub> کاهش می‌یابد (جدول 3). لازم به ذکر است که مدول الاستیک ماکسول تقریباً در محدوده مدول الاستیک بدست آمده از آزمون‌های مقاومت فشاری تک محوری است.

ضریب گرانروی ماکسول یا تعیین کننده سرعت جریان نیوتنی ( $\eta_M$ ) در ارتباط با سرعت کرنش ویسکوپلاستیک بوده و چند ده برابر بزرگتر از ضریب گرانروی کلویین  $\eta_K$  است. مقدار این پارامتر به بزرگی تنش بستگی دارد (Yang et al., 2006). جدول 3 نشان می‌دهد که  $\eta_M$  با افزایش تنش کاهش یافته‌است.  $\eta_M$  به طور معکوس با نرخ کرنش مرحله دوم خزش در ارتباط است. بدین ترتیب افزایش نرخ کرنش در اثر افزایش سطح تنش، کاهش  $\eta_M$  را در پی داشته‌است. در واقع

موازی و عمود بر جهت بارگذاری است. در آزمون تک محوری با سرعت بارگذاری کمتر (0/05 میلیمتر بر دقیقه) بر روی نمونه متعلق به نمکشار شواهد تغییر شکل پلاستیک همچون ایجاد انحنا در بلورها (شکل 9-ث) و احتمالاً تشکیل مرزهای زیردانه (شکل 9-ج) دیده می‌شود.

با توجه به شکستگی ترد نمونه‌ها در آزمون‌های سه محوری با سرعت بالا تهیه مقاطع نازک ممکن نبود. تصاویری از مقاطع نازکی که در راستای موازی با محور  $\sigma_1$  از نمونه‌ی بار گذاری شده تحت فشار همه جانبه 40 مگاپاسکال و سرعت 0/05 میلیمتر بر دقیقه تهیه شده‌اند در شکل 9-چ-خ نشان داده شده‌است. این تصاویر نشان می‌دهند که توسعه ریزترک‌ها در این آزمون در مقایسه با آزمون‌های دیگر کمتر است. در تصویر میکروسکوپی مربوط به حاشیه نمونه حفرات کوچکی در محل اتصال دانه‌ها دیده می‌شود (شکل 9-چ). با نزدیک شدن به مرکز نمونه توسعه ریزترک‌ها در دانه‌ها کاهش یافته و زیردانه‌ها در برخی از دانه‌ها تشکیل شده‌اند (شکل 9-ح،خ). ریزترک‌ها در راستای عمود بر محور بارگذاری کمتر مشاهده می‌شوند. اما زیردانه‌ها یا سابگرین‌ها که به دگرشکلی پلاستیک نمک توسط خزش نابه‌جایی اشاره می‌کنند در برخی از دانه‌ها دیده می‌شوند (شکل 9-د).

شکل 9-ذ، تصاویر میکروسکوپی تهیه شده از نمونه  $S_3$  را بعد از آزمون خزش نشان می‌دهد. در این آزمون نیز همچون آزمون‌های تک محوری عمده تغییرات شامل ایجاد حفراتی در بین دانه‌ها و تشکیل ترک‌های درون دانه‌ای و بین دانه‌ای می‌باشد (شکل 9-ذ،ر). مطالعه میکروسکوپی نمونه‌های  $S_1$  خزش یافته نشان می‌دهد که در این نمونه‌ها نیز ریزترک‌ها (شکل 9-ز) و ایجاد انحنا در دانه‌ها (شکل 9-ژ) در حین دگرشکلی ایجاد شده‌است. مرزهای زیردانه در مجاورت برخی از ترک‌های درون دانه‌ای دیده می‌شوند (شکل 9-س).

ماکسول ( $E_M$ ) و مدول الاستیک تأخیری کلومین ( $E_K$ ) در آن به ترتیب 19 و 4 درصد در مقایسه با نمونه متعلق به نمکشار کمتر است (جدول 3). با توجه به بالاتر بودن نرخ کرنش در نمونه متعلق به ساقه، ضریب گرانیروی ماکسول ( $\eta_M$ ) این نمونه در مقایسه با نمونه متعلق به نمکشار، 27 درصد کاهش یافته‌است. ضریب گرانیروی کلومین ( $\eta_K$ ) در نمونه متعلق به ساقه، 20 درصد کوچکتر از نمونه متعلق به نمکشار است که نشان می‌دهد تغییرشکل در مراحل اولیه خزش با سرعت بیشتری در این نمونه انجام شده‌است.

2-5. توصیف میکروسکوپی نمونه‌ها بعد از آزمون‌های مکانیکی

شکل 9 تصاویر مقاطع نازک تهیه شده از نمونه‌ها را بعد از آزمون‌های مکانیکی نشان می‌دهد. می‌توان گفت میکروسکوپ نوری اثری از تغییرشکل خمیرسان در نمونه  $S_3$  بعد از آزمون تک محوری نشان نمی‌دهد (شکل 9-الف). عمده تغییرات مشاهده شده در این نمونه ایجاد حفراتی در مرز بین دانه‌ها و در اتصالات سه گانه‌ای دانه‌ها است. ترک‌های بین دانه‌ای و درون دانه‌ای نیز گسترش زیادی در این نمونه نشان می‌دهند. شکل 9-ب-ت تصاویر مقاطع نازک تهیه شده از نمونه  $S_1$  را بعد از آزمون تک محوری با سرعت 0/2 میلیمتر بر دقیقه نشان می‌دهد. در این نمونه نیز عمده تغییرات به دگرشکلی شکننده اشاره دارند. همچون نمونه  $S_3$ ، در مرز برخی از دانه‌ها و اتصالات سه گانه‌ای حفرات و ریزترک‌هایی ایجاد شده‌است (شکل 9-ب). طبق مطالعه دینگ و همکاران (Ding et al., 2017) این ترک‌ها از نوع ترک باله‌ای (Wing-crack) هستند و در اثر لغزش در امتداد مرز دانه‌ها ایجاد می‌شوند. جابجایی کوچکی که در امتداد مرز برخی از دانه‌ها (شکل 9-ب) و شکستگی‌ها (شکل 9-پ) دیده می‌شود نیز می‌تواند نشانه‌ای از لغزش در امتداد مرز دانه‌ها باشد. الگویی مضرس (Serration pattern) در نزدیکی مرز برخی از دانه‌ها دیده می‌شود (شکل 9-ت). این الگو نتیجه تشکیل ریزترک‌های



شکل 9. ریزساختار ایجاد شده در نمونه‌های نمکی بعد از آزمون‌های مکانیکی.

مطالعه مقاطع نازک تهیه شده از سنگ نمک پیشنهاد می‌کند که خزش نابه‌جایی به همراه باز بلورش دینامیکی نقش اصلی در شکل‌گیری ریزساختار اولیه نمونه‌ها داشته‌است. باز بلورش توسط مهاجرت مرز دانه‌ها و چرخش زیردانه‌ها هر دو در

#### 4. بحث

4-1. تفسیر سازوکار دگرشکلی نمونه‌ها قبل از آزمون‌های

مکانیکی

در حاشیه دانه‌ها (Schléder and Urai, 2007). دانه درشت‌تر بودن نمونه‌های  $S_1$  و  $S_2$  (شکل 3) و فراوانی کمتر مرزهای کم زاویه (شکل 4) در آن‌ها به نقش غالب مهاجرت مرز دانه‌ها در این نمونه‌ها اشاره می‌کند. بر طبق مطالعه دسبویس و همکاران (Desbois et al., 2010) عملکرد بیشتر مهاجرت مرز دانه‌ها در نمونه‌های متعلق به نمکشار می‌تواند در اثر تماس با آب‌های جوی و در نتیجه افزایش فعالیت مرز دانه‌ها باشد.

#### 4-2. تفسیر نتایج آزمون‌های مکانیکی

تفاوت در ریزساختار اولیه نمونه‌ها تفاوت اندکی را در رفتار نمونه‌ها تحت بارگذاری‌های کششی، فشارشی و خزشی به دنبال داشت. چنانچه ذکر شد در نمونه متعلق به ساقه اندازه دانه‌ها و زیردانه‌ها کوچکتر بوده، فراوانی مرزهای زیردانه‌ای در آن بیشتر و ساز و کار دگرشکلی غالب در آن چرخش زیردانه‌ها است. تشکیل مرزهای زیردانه نتیجه جابجا شدن اتم‌ها با فضاهای خالی در شبکه بلور است. راج و آشبی (Raj and Ashby 1975) اشاره می‌کنند که در حین صعود و لغزش درون بلوری، فضاهای خالی در شبکه بلور به سمت مرزهای دانه انتشار می‌یابند. از این رو انتظار می‌رود که درصد تخلخل در نمونه متعلق به ساقه بالاتر بوده‌است که سبب انحنای اولیه در منحنی تنش- کرنش این نمونه (شکل 6)، کمتر بودن مقاومت کششی (جدول 1)، کاهش 22 درصدی مقاومت تراکمی تک محوری و کاهش 40 درصدی مدول الاستیک (جدول 2) آن نسبت به نمونه‌های متعلق به بخش‌های فوقانی دیپایر شده‌است. در مطالعه ویلکوز و همکاران (Wilkosz et al., 2012) نیز سنگ نمکی که دارای فراوانی بالایی از زیردانه‌ها است مقاومت کمتری را نشان داده‌است. بیشتر بودن منافذ ریز میکروسکوپی در نمونه متعلق به ساقه همچنین می‌تواند دلیلی بر بیشتر بودن درصد کرنش آنی، درصد کرنش خزشی و نرخ کرنش (شکل 7-د) آن نسبت به نمونه متعلق به نمکشار باشد. مطالعه ریزساختار نشان داد که ساز و کار دگرشکلی غالب در نمونه‌های متعلق به نمکشار مهاجرت مرز دانه‌ها است. این سازوکار سبب حذف مرزهای زیردانه و

سنگ نمک فعال بوده‌اند. توزیع اندازه دانه‌ها می‌تواند نتیجه رقابت بین این دو ساز و کار باشد. به طوریکه مهاجرت مرز دانه منجر به افزایش اندازه دانه‌ها و چرخش زیردانه‌ها منجر به کاهش اندازه دانه‌ها شده‌است (Ter Heege et al., 2005).

تغییر رنگ مشاهده شده در اکثر دانه‌ها در نقشه جهت‌یافتگی مربوط به نمونه  $S_3$  (شکل 2-ج). نشان می‌دهد که اکثر دانه‌ها در این نمونه دگرشکل شده و دارای فراوانی بالایی از مرزهای کم زاویه هستند. چنین شواهدی به عملکرد خزش نابه‌جایی در این نمونه اشاره دارد. خزش نابه‌جایی نتیجه لغزش بر روی سطوح درون بلوری است که در نتیجه آن دانه‌ها دگرشکل می‌شوند. فراوانی بیشتر دانه‌های ریز (شکل 3-الف) و فراوانی بیشتر زوایای بین بلوری کمتر از 10 درجه (شکل 4) در نمونه  $S_3$  به نقش غالب چرخش زیردانه‌ها اشاره دارد. به طور ساده می‌توان این سازوکار را بدین صورت توضیح داد: دانه‌ای را در نظر بگیرید که از چندین بلور تشکیل شده‌است. قبل از دگرشکلی جهت‌یابی بلورها یکسان است. در اثر دگرشکلی درون دانه‌ای، بلورهای تشکیل دهنده این دانه نسبت به یکدیگر می‌چرخند و با تغییر زاویه قرار می‌گیرند. این تغییر زاویه سبب تشکیل دانه‌های فرعی در درون دانه والد می‌شود. با ادامه دگرشکلی، چرخش‌های بلورها افزایش یافته و منجر به افزایش اختلاف زاویه در بین دانه‌های فرعی مجاور و دانه‌های فرعی و دانه والد می‌شود. با ادامه یافتن این فرایند، دانه‌های کوچک مستقل جدیدی در درون و در اطراف دانه والد تشکیل می‌شود. به نظر می‌رسد بیشتر بودن تنش و درجه حرارت در ساقه دیپایر باعث عملکرد بیشتر چرخش زیردانه‌ها در نمونه متعلق به ساقه شده‌است.

شواهد مهاجرت مرز دانه‌ها در هر سه نمونه مطالعه شده وجود دارد. این شواهد عبارتند از: حضور دانه‌های درشت (Pennock et al., 2006; Piazzolo et al., 2006) با دگرشکلی درون بلوری کمتر، در زمینه‌ای از دانه‌های دگرشکل یافته (Piazzolo et al., 2006)، مرزهای دانه‌ای نامنظم و منحنی شکل (Bestmann et al., 2005) و مرزهای زیردانه‌ای کشیده



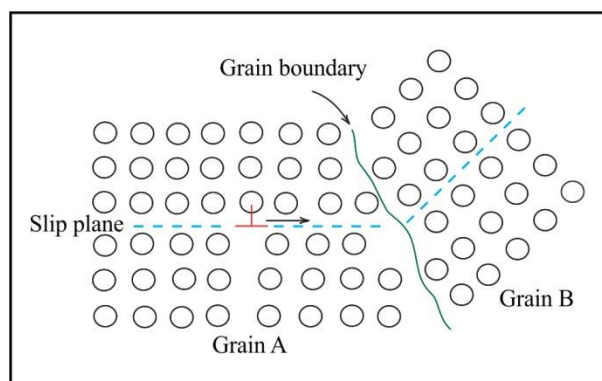
دانه‌ها کمتر از سرعت بارگذاری است. در این شرایط انرژی کرنشی ذخیره شده در ماده نمی‌تواند با سرعت مصرف شود یا بر اثر توسعه سریع ریزترک‌ها آزاد گردد. از این رو همزمان با تراکم یافتن نمونه، این انرژی به طور موقت در آن ذخیره شده و سبب افزایش مقاومت نمونه می‌گردد. اما در سنگ شکل‌پذیری همچون نمک، انرژی تجمع یافته در طول بارگذاری سریع، صرف دگرشکلی نمونه می‌شود. از این رو در مقایسه با سنگ‌های شکننده، با افزایش نرخ کرنش در سنگ نمک، درصد کرنش در لحظه شکست افزایش می‌یابد و درصد افزایش مقاومت و مدول آن کمتر از سنگ‌های شکننده است. از طرف دیگر مطالعه ریزساختار نشان داد که ساز و کار دگرشکلی غالب در نمونه‌های متعلق به نمک‌شمار مهاجرت مرز دانه‌ها بوده‌است. همانطور که در نقشه‌های جهت‌یافتگی این نمونه‌ها (شکل 2-الف، ب) دیده شد، اکثر دانه‌ها درشت بوده و فراوانی مرزهای زیردانه یا مرزهای فرعی در آن‌ها کم است. این نوع ساختمان درونی نیز می‌توانسته در سهولت دگرشکلی پلاستیک دانه‌های نمک تحت بارگذاری با سرعت بالا مؤثر بوده باشد.

نتایج آزمون‌های سه محوری نشان می‌دهد که اعمال فشار همه جانبه به نمونه‌ها، افزایش مقاومت نهایی، مقاومت تسلیم و مدول الاستیک نمک را به دنبال دارد. اما اگر در این شرایط بارگذاری محوری با سرعت بالا انجام پذیرد نمک عمدتاً به صورت ترد و الاستیک رفتار کرده به طوری که شکست آن در کرنش 2 درصد انجام می‌شود که تقریباً نصف کرنش ایجاد شده در شرایط بارگذاری تک محوری است. اعمال فشار همه جانبه بالا (40 مگاپاسکال) و نرخ بارگذاری پایین (0/05 میلیمتر بر دقیقه) سبب می‌شود نمک به صورت پلاستیک رفتار کند. به طوریکه توانسته کرنش ده درصدی را بدون ایجاد سطح شکست ویژه‌ای تحمل کند. بنابراین به نظر می‌رسد از بین نرخ کرنش و فشار همه جانبه تأثیر نرخ کرنش در بروز رفتار پلاستیک نمک بیشتر باشد.

تخلخل موجود در مرز دانه‌ها می‌شود. از این رو این نمونه‌ها مقاومت کششی و فشاری بالاتری نسبت به نمونه متعلق به ساقه نشان داده‌اند (جدول 1 و 2). به نظر می‌رسد فراوانی کمتر مرزهای زیردانه‌ای در دانه‌های نمک موجود در این نمونه‌ها سبب شده‌است تغییر شکل پلاستیک با سهولت بیشتری در دانه‌ها رخ دهد. از این رو منحنی‌های تنش-کرنش این نمونه‌ها در شرایط بارگذاری تک محوری یک مرحله الاستیک کوتاه و یک مرحله پلاستیک گسترده را نشان می‌دهد و نقطه تسلیم مشخصی ورود به مرحله پلاستیک را بارز نمی‌سازد (شکل 6). لازم به ذکر است که فرایند انحلال فشاری نیز ممکن است در افزایش مقاومت فشاری و کششی نمونه‌های متعلق به نمک‌شمار مؤثر بوده باشد. چنانچه ذکر شد مرزهای مضرس در این نمونه‌ها می‌تواند نتیجه فرایند انحلال-فشاری باشد. مطالعات دیگر محققین نشان می‌دهد که وقوع فرایند انحلال فشاری با لغزش بین دانه‌ای و چرخش دانه‌ها (آرایش مجدد دانه‌ها) همراه بوده و می‌تواند منجر به تراکم بیشتر نمک گردد (Spiers et al., 1990). البته آزمون برزیلین نشان داد این مرزهای انحلالی-فشاری محلی برای تمرکز تنش هستند و در هر زاویه‌ای نسبت به محور بارگذاری باز می‌شوند و به افزایش نفوذپذیری نمک منجر می‌شوند.

در آزمون مقاومت تراکمی تک محوری بر روی نمونه متعلق به نمک‌شمار با افزایش 4 برابری نرخ کرنش، مقاومت تراکمی تک محوری و مدول الاستیک سنگ نمک به ترتیب به میزان 20 و 25 درصد افزایش یافت. این اعداد گویای آن است که در مقایسه با سنگ‌هایی با رفتار شکننده، درصد افزایش مقاومت و مدول به دنبال افزایش چهار برابری نرخ کرنش ناچیز بوده‌است. همچنین بر خلاف آنچه که در سنگ‌های شکننده دیده می‌شود، درصد کرنش در لحظه شکست نیز با افزایش نرخ کرنش افزایش یافته‌است (جدول 2). این رفتار می‌تواند نتیجه شکل‌پذیر بودن سنگ نمک باشد. لیانگ و همکاران (Liang et al., 2011) بیان می‌کنند که در طول بارگذاری سریع در سنگ‌های شکننده، سرعت دگرشکلی

نابه‌جایی‌ها نمی‌توانند از مرزهای بزرگ زاویه بین دانه‌ها عبور کنند. شکل 10 دو دانه با جهت‌یابی متفاوت را نشان می‌دهد. لغزش در دانه A در جهتی خاص انجام می‌شود. اما وقتی این لغزش به مرز دانه می‌رسد برای ورود به دانه B باید جهت خود را عوض کند. این امر موجب از دست رفتن انرژی لغزش می‌شود (Callister and Rethwisch, 1991).



شکل 10. نمایی از سختی لغزش درون بلوری در مواد دانه ریز فاقد جهت‌یافتگی (Callister and Rethwisch, 1991)

شواهد دگرشکلی خمیرسان همچون انحنا در دانه‌ها و ظهور مرزهای زیردانه در مقاطع نازک تهیه شده از نمونه‌های S<sub>1</sub> بعد از آزمون تک محوری و سه محوری با سرعت پایین دیده شدند. همچنین در تصاویر مقاطع نازک تهیه شده از نمونه‌های S<sub>1</sub> خزش یافته، مرزهای زیردانه‌ای در نزدیکی ترک‌های درون دانه‌ای تشکیل شده‌اند. این مرزهای کم زاویه ممکن است از قبل در نمونه موجود بوده و یا بر طبق نظر ایکسو و همکاران (Xu et al., 1999) در حین دگرشکلی ایجاد شده باشند. این محققین معتقدند تمرکز تنش بالا در نوک ترک، می‌تواند نیروی لازم برای لغزش در درون دانه‌ها را فراهم کند. در واقع لغزش در امتداد مرز دانه‌ها منجر به گسترش ترک‌های درون دانه‌ای می‌شود و فرایند خزش نابه‌جایی از طریق لغزش بر روی صفحات درون بلوری منجر به رها شدن تنش در نوک ترک می‌گردد.

### 3-4. تفسیر ساز و کار دگرشکلی غالب در حین آزمون‌های مکانیکی

مطالعه میکروسکوپی نمونه‌ها بعد از آزمون‌های مکانیکی پیشنهاد می‌کند که همانند مطالعات جی و همکاران (Jie et al., 2015) و لیانگ و همکاران (Liang et al., 2011) کرنش ایجاد شده در نمک به طور عمده نتیجه لغزش دانه‌ها بر روی یکدیگر و تخریب شدن آن‌ها است. علائمی همچون الگوی مضرس در نزدیکی مرز دانه‌ها (Sugino et al., 2012)، حفرات مشاهده شده در مرز بین دانه‌ها (Sugino et al., 2012) و ایجاد ترک‌های باله‌ای در اتصالات سه گانه (Závada et al., 2012; Ding et al., 2017) می‌تواند در نتیجه لغزش بر روی مرز دانه‌ها (Grain Boundary Sliding; GBS) ایجاد شده باشند. توسعه ترک‌های بین دانه‌ای به وضعیت تنش، هندسه مرز دانه‌ها و ارتباط تنش با مرز دانه بستگی دارد. در نمونه‌های آزمایش شده مرز دانه‌ها عمدتاً زاویه 45 درجه با امتداد بارگذاری می‌سازند. دینگ و همکاران (Ding et al., 2017) نشان داده‌اند که وقتی مرز دانه‌ها نسبت به محور بارگذاری مایل باشند، لغزش بر روی مرز دانه‌ها اتفاق می‌افتد و ترک‌های باله‌ای در محل تقاطع دانه‌ها ایجاد می‌شوند. بر اساس مطالعه ساگینو و همکاران (Sugino et al., 2012) لغزش دانه‌ها بر روی یکدیگر باعث تجمع تنش می‌شود. از این رو ترک‌های پلکانی برای آزاد شدن این تنش‌ها ایجاد می‌شوند و به ایجاد الگوی مضرس در مرز دانه‌ها منجر می‌شوند.

اثری از دگرشکلی خمیرسان در نمونه‌های متعلق به ساقه دیاپیر بعد از آزمون‌های مکانیکی دیده نشد. این امر می‌تواند در نتیجه عملکرد بیشتر چرخش زیردانه در این نمونه باشد. از بعد ریزساختاری، در اثر چرخش زیردانه‌ها حول محورهای بلورشناسی مختلف، اختلاف زاویه بین آن‌ها افزایش یافته و در نهایت ماتریکسی از دانه‌های ریز فاقد جهت‌یافتگی تشکیل می‌شود. مطالعات دیگر محققین نشان می‌دهد که خزش نابه‌جایی در چنین ریزساختاری به سختی انجام می‌شود. زیرا

**5. نتیجه‌گیری**

نتایج این مطالعه پیشنهاد می‌کند که پیش از استفاده از تشکیلات نمکی برای ذخیره گاز و یا دفع ضایعات هسته‌ای لازم است ریزساختار اولیه نمک به دقت مطالعه شود. بر اساس نتایج بدست آمده می‌توان گفت اگر ریزساختار اولیه سنگ نمک عمدتاً نتیجه عملکرد لغزش‌های درون بلوری و تشکیل مرزهای کم زاویه باشد، به علت بیشتر بودن منافذ میکروسکوپی در امتداد مرز دانه‌ها، مقاومت فشاری و کششی نمک تا حدی کمتر از مقدار مورد انتظار خواهد بود. در چنین ریزساختاری دگرشکلی پلاستیک درون بلوری تحت بارگذاری با تنش ثابت یا نرخ کرنش ثابت کمتر اتفاق می‌افتد و عمده کرنش ایجاد شده نتیجه لغزش در امتداد مرز دانه‌هاست که به تشکیل ترک‌های درون دانه‌ای و بین دانه‌ای و در نتیجه افزایش نفوذپذیری سنگ نمک منجر می‌شود. در مقابل اگر بازبلورش به روش مهاجرت مرز دانه‌ها ساز و کار دگرشکلی غالب در سنگ نمک باشد، با توجه به حذف شدن منافذ و مرزهای کم زاویه موجود در درون و در مرز دانه‌ها توسط این سازوکار، اتصالات دانه‌ای از استحکام بیشتری برخوردارند و در نتیجه مقاومت فشاری و کششی نمک قدری بیشتر از ریزساختار قبلی خواهد بود. در این حالت با توجه به کمبود موانع کریستالین در درون دانه‌ها، دگرشکلی پلاستیک درون دانه‌ای با سهولت بیشتری انجام می‌شود. نتایج آزمون‌های خزش نشان داد در دمای اتاق خزش در اثر لغزش دانه‌ها بر روی یکدیگر با سرعت بیشتری نسبت به خزش در اثر لغزش سطوح بلوری انجام می‌شود. از این رو ممکن است در شرایط حاکم بر پوسته زمین و در دمای پایین خزش یافتن نمک و کاهش حجم مغار در نمک‌های دانه ریز و با فراوانی بالای مرزهای کم زاویه با سرعت بیشتری انجام شود.

در کل به نظر می‌رسد عمده کرنش‌های آنی و خزشی ایجاد شده در نمونه متعلق به ساقه در نتیجه لغزش دانه‌ها بر روی یکدیگر باشد. زیرا همچنان که ذکر شد دانه ریزتر بودن این نمونه و فراوانی بیشتر مرزهای فرعی در آن از جمله موانعی در مقابل تغییر شکل پلاستیک درون دانه‌ای هستند. اما در مقابل مهاجرت مرز دانه‌ها در نمونه متعلق به نمکشار منجر به تشکیل دانه‌های بزرگ با فراوانی کمتر مرزهای کم زاویه شده‌است. از این رو وقتی این دانه‌ها تحت بار واقع می‌شوند دگرشکلی پلاستیک آن‌ها با سهولت بیشتری انجام می‌شود. به نظر می‌رسد در دمای اتاق و در شرایط غیر محصور لغزش در امتداد مرز دانه‌ها نسبت به لغزش در امتداد صفحات درون بلوری (یا همان خزش نابه‌جایی) با سرعت بیشتری انجام می‌شود. از این رو نرخ کرنش در نمونه متعلق به ساقه بالاتر است.

در کل نتایج این تحقیق پیشنهاد می‌کند در استفاده از مغارهای نمکی برای ذخیره گاز یا دفع ضایعات هسته‌ای، علاوه بر اندازه گیری خصوصیات مکانیکی نمک، توجه به ریزساختار غالب در آن نیز در پیش‌بینی رفتار مغار مفید خواهد بود. به نظر می‌رسد هر چه نمک دانه ریزتر و فراوانی دانه‌های فرعی در آن بالاتر باشد، خزش در اثر لغزش در امتداد مرز دانه‌ها با سرعت بیشتری در آن انجام می‌شود. در شرایط حاکم در پوسته زمین جایی که درجه حرارت و فشار همه جانبه پایین است نمک عمدتاً به صورت ترد و الاستیک رفتار می‌کند. از این رو پیشنهاد می‌شود در صورت استفاده از مغارهای نمکی برای ذخیره گاز، تزریق با سرعت پایین انجام شود و فشار گاز از مقاومت تسلیم نمک فراتر نرود.

## منابع

- Adams, B.L., Dingley, D.J., Kunze, K., Wright, S.I., 1994. Orientation imaging microscopy: new possibilities for microstructural investigations using automated BKD analysis, *Materials Science Forum*. Trans Tech Publ, pp. 31-42.
- Basu, A., Mishra, D., Roychowdhury, K., 2013. Rock failure modes under uniaxial compression, Brazilian, and point load tests. *Bulletin of Engineering Geology And The Environment*, 72: 457-475.
- Bestmann, M., Piazzolo, S., Spiers, C.J., Prior, D.J., 2005. Microstructural evolution during initial stages of static recovery and recrystallization: new insights from in-situ heating experiments combined with electron backscatter diffraction analysis. *Journal of Structural Geology*, 27: 447-457.
- Callister, W.D., Rethwisch, D.G., 1991. *Materials science and engineering: an introduction*. Wiley New York ,
- Cristescu, N., Hunsche, U., 1998. *Time effects in rock mechanics*. Wiley New York.
- Desbois, G., Závada, P., Schléder, Z., Urai, J.L., 2010. Deformation and recrystallization mechanisms in actively extruding salt fountain: Microstructural evidence for a switch in deformation mechanisms with increased availability of meteoric water and decreased grain size (Qum Kuh, central Iran). *Journal of Structural Geology*, 32: 580-594.
- Ding, J., Chester, F.M., Chester, J.S., Xianda, S., Arson, C., 2017. *Microcrack Network Development in Salt-Rock During Cyclic Loading at Low Confining Pressure*. Georgia Institute of Technology.
- Duncan, E.S., Lajtai, E.Z., 1993. The creep of potash salt rocks from Saskatchewan. *Geotechnical & Geological Engineering*, 11: 159-184.
- Hansen, F.D., Mellegard, K.D., Senseny, P.E., 1984. Elasticity and strength of ten natural rock salts, *Proc First Conf. on the Mechanical Behavior of Salt*, pp. 71-83.
- Jie, C., Junwei, Z., Song, R., Lin, L., Liming, Y., 2015. Determination of Damage Constitutive Behavior for Rock Salt Under Uniaxial Compression Condition with Acoustic Emission. *Open Civil Engineering Journal*, 9: 75-81.
- Liang, W.-g., Yang, C.-h., Zhao, Y.-s., Dusseault, M., Liu, J., 2007. Experimental investigation of mechanical properties of bedded salt rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 44: 400-411.
- Liang, W., Zhao, Y., Xu, S., Dusseault, M., 2011. Effect of strain rate on the mechanical properties of salt rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 48: 161-167.
- Liu, Z., Xie, S., Shao, J.-F., Conil, N., 2015. Effects of deviatoric stress and structural anisotropy on compressive creep behavior of a clayey rock. *Applied Clay Science*, 1. ۴۹۶-۴۹۱ : ۴
- Motta, G.E., Pinto, C.L.L., 2014. New constitutive equation for salt rock creep. *Rem: Revista Escola de Minas*, 67: 397-403.
- Pennock, G., Drury, M., Peach, C., Spiers, C., 2006. The influence of water on deformation microstructures and textures in synthetic NaCl measured using EBSD. *Journal of Structural Geology*, 28: 588-601.
- Piazzolo, S., Bestmann, M., Prior, D., Spiers, C., 2006. Temperature dependent grain boundary migration in deformed-then-annealed material: observations from experimentally deformed synthetic rocksalt. *Tectonophysics*, 427: 55-71.
- Prior, D., 1999. Problems in determining the misorientation axes, for small angular misorientations, using electron backscatter diffraction in the SEM. *Journal of microscopy*, 195: 217-225.
- Raj, R., Ashby, M., 1975. Intergranular fracture at elevated temperature. *Acta metallurgica*, 23: 653-666.
- Schléder, Z., Urai, J.L., 2007. Deformation and recrystallization mechanisms in mylonitic shear zones in naturally deformed extrusive Eocene-Oligocene rocksalt from Eyvanekey plateau and Garmsar hills (central Iran). *Journal of Structural Geology*, 29: 241-255.
- Spiers, C., Schutjens, P., Brzesowsky, R., Peach, C., Liezenberg, J., Zwart, H., 1990. Experimental determination of constitutive parameters governing creep of rocksalt by pressure solution. *Geological Society, London, Special Publications*, 54: 215-227.
- Sriapai, T., Walsri, C., Fuenkajorn, K., 2012. Effect of temperature on compressive and tensile strengths of salt. *ScienceAsia*, 38: 166-174.

- Sugino, Y., Ukai, S., Leng, B., Oono, N., Hayashi, S., Kaito, T., Ohtsuka, S., 2012. Grain boundary related deformation in ODS ferritic steel during creep test. *Materials Transactions*, 53: 1753-1757.
- Ter Heege, J., De Bresser, J., Spiers, C., 2005. Dynamic recrystallization of wet synthetic polycrystalline halite: dependence of grain size distribution on flow stress, temperature and strain. *Tectonophysics*, 396: 35-57.
- Wang, J., Liu, X., Zhao, B., Song, Z., Lai, J., 2016. Experimental investigation and constitutive model for lime mudstone. *SpringerPlus*, 5: 1634.
- Wilkosz, P., Burliga, S., Grzybowski, Ł., Kasprzyk, W., 2012. Comparison of internal structure and geomechanical properties in horizontally layered Zechstein rock salt. *Mechanical Behavior of Salt*, 7: 89-96.
- Xu, S., Wu, X.-J., Koul, A., Dickson, J., 1999. An intergranular creep crack growth model based on grain boundary sliding. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 30: 1039-1045.
- Yang, C., Daemen, J., Yin, J.-H., 1999. Experimental investigation of creep behavior of salt rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 36: 233-242.
- Yang, J.-L., Zhang, Z., Schlarb, A.K., Friedrich, K., 2006. On the characterization of tensile creep resistance of polyamide 66 nanocomposites. Part II: Modeling and prediction of long-term performance. *Polymer*, 47: 6745-6758.
- Závada, P., Desbois, G., Schwedt, A., Lexa, O., Urai, J.L., 2012. Extreme ductile deformation of fine-grained salt by coupled solution-precipitation creep and microcracking: Microstructural evidence from perennial Zechstein sequence (Neuhof salt mine, Germany).