[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.2.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.511]

ارزیابی علت پدیده لهیدگی در تونل‌ها بر اساس ریزساختارهای مشاهده شده در سنگ نمک

حدیثه منصوری، رسول اجل لوئیان*، علیرضا ندیمی؛
دانشگاه اصفهان، دانشکدهٔ علوم، گروه زمین‌شناسی

تاریخ: دریافت ۹۶/۱۱/۰۸ پذیرش ۹۷/۰۷/۰۸

چکیده

سنگ نمک در مقایسه با سنگ‌های سیلیکاته رفتار شکل‌پذیر زیادی را حتی در شرایط پایینی از دما و فشار نشان می‌دهد. بنابراین بررسی ریزساختارهای سنگ نمک در درک مکانیزم‌های دگرشکلی که تغییرشکل سنگ‌ها را کنترل می‌کنند کمک کننده است. در این پژوهش ریزساختارهای موجود در سنگ‌نمک طبیعی متعلق به گنبدنمکی دهکویه با استفاده از روش پراش الکترون‌های برگشتی (EBSD) به‌منظور یافتن علت پدیدهٔ لهیدگی در مقیاس میکروسکوپی بررسی شد. بررسی ریزساختاری نشان داد که جریان شکل‌پذیر نمک نتیجهٔ عملکرد خزش نابه‌جایی و تبلور مجدد است. برخی از دانه‌ها تغییرشکل درون بلوری مهمی را نشان دادند. تحلیل دگرشکلی دانه‌های تغییر شکل یافته نشان داد که تغییر شکل درون دانه‌ای نتیجه لغزش بر روی سیستم لغزشی <۱۱۰> (۱۱۰) و <۱۱۰> (۱۱۱) است. لغزش روی چنین سطوحی می‌تواند در همگرایی دیوارهٔ تونل نیز مؤثر باشد. ریزساختارهای مشاهده شده در این پژوهش با ریزساختارهای ارائه شده برای نمونه‌های شیستی در منطقهٔ هیمالیا قابل قیاس است. از این‌رو، این پژوهش پیشنهاد می‌کند که وقتی سنگ‌های اطراف تونل دربردارندهٔ برخی از ریزساختارهای خاص باشند لهیدگی بوقوع می‌پیوندد. به‌نظر می‌رسد نوع سنگ و تاریخچهٔ تکتونیکی مهم‌ترین عوامل در وقوع این پدیده هستند.

واژه‌های کلیدی: لهیدگی، ریزساختارهای موجود در سنگ، خزش نابه‌جایی، روش پراش الکترون‌های برگشتی.

* نویسنده مسئول alimajdii@yahoo.com

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.2.7]

[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.511]

مقدمه

در زمین‌شناسی مهندسی برای پی بردن به رفتار سنگ‌ها در مقیاس‌های بزرگ (مثلاً رفتار تودهٔ سنگ‌ها در تونل)، معمولاً خصوصیات فیزیکی و مکانیکی در مقیاس ماکروسکوپی بررسی شده و کم‌تر توجهی به توسعهٔ بافت و ساخت سنگ در حین دگرشکلی می‌شود. سنگ نمک به‌عنوان نمونه‌ای از سنگ شکل‌پذیر، تاکنون توجه بسیاری از محققان را به‌خود جلب کرده است. از دید یک مهندس زمین‌شناس، آن‌چه‌که در مورد سنگ‌های شکل‌پذیر مانند سنگ‌نمک باید مورد توجه قرار گیرد ثبت رفتار دگرشکلی آن‌ها تحت بار ثابت در طول زمان و ارائه مدلی برای رفتار خزش آن‌ها است. حال آن‌که در گرایش میکروتکتونیک سنگ‌های شکل‌پذیر مخصوصاً سنگ‌نمک از این‌رو حائز اهمیت‌اند که می‌توانند ریزساختارهایی که در سنگ‌های سیلیکاته در شرایط بالایی از دما و فشار ایجاد می‌شوند را در محیط آزمایشگاه و در بازهٔ زمانی کم‌تر نشان دهند [۱]، [۲]. از دید این گروه از محققان، پژوهش‌های ریزساختاری می‌تواند رفتار دگرشکلی سنگ در مقیاس‌های بزرگ‌تر را مشخص سازد [۳]. از این‌رو به‌نظر می‌رسد بررسی‌های ریزساختاری و الگوگیری از رفتار دگرشکلی سنگ‌های شکل‌پذیر مانند سنگ‌نمک در حل مسائل روبه‌رو در پروژه‌های مهندسی از جمله مسئلهٔ لهیدگی نیز راه گشا باشد. اگر ریزساختارهای توسعه یافته در سنگ‌نمک قابل قیاس با سنگ‌های سیلیکاته باشد از این‌رو، بررسی دقیق آن ریزساختارها و شناخت سازوکارهای دگرشکلی درگیر می‌تواند در درک چرایی هم‌گرایی دیواره‌های تونل نیز کمک‌کننده باشد.

کمسیون وابسته به انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ لهیدگی را به‌عنوان تغییرشکل بزرگ تابع زمان در سنگ‌های اطراف تونل تعریف می‌کند که اساساً به‌دلیل ایجاد خزش در سنگ و افزایش مقدار آن از مقاومت برشی سنگ ایجاد می‌شود [٤]. معمولاً روش‌های تجربی، نیمه‌تجربی، تحلیلی و عددی برای پیش‌بینی پدیده لهیدگی استفاده می‌شود. این روش‌ها پارامترهایی مانند عمق تونل، شاخص کیفیت تونل زنی (Q)، ابعاد تونل، سختی ساپورت (K)، نسبت تنش روباره به مقاومت توده سنگ، مقاومت تودهٔ سنگ، وزن مخصوص تودهٔ سنگ و فشار ساپورت را در بروز این پدیده مؤثر دانسته‌اند [۵]–[۹]. با توجه به نتایج برخی از پژوهش‌ها می‌توان گفت پارامترهای در نظرگرفته شده در این روابط، تمامی واقعیت حاکم

در تونل را نشان نمی‌دهند. به‌طور مثال از میان روش‌های تجربی و نیمه‌تجربی ارائه شده، تنها روش آیدان[1] و همکاران [۱۰] توانسته‌است وقوع لهیدگی را در یک زون برشی با ارتفاع روباره نسبتاً کم در تونل سوروک[2] در ترکیه به درستی پیش‌بینی کند. به‌نظر می‌رسد توجه زیاد به تنش روباره و مقاومت تودهٔ سنگ در اغلب روش‌های پیش‌بینی لهیدگی باعث شده است این روش‌ها نتوانند برآورد خوبی از شرایط زمین در مواردی که ارتفاع روباره کم است داشته باشند.

یکی از عوامل تأثیرگذار بر این پدیده ساختارها و ریزساختارهای موجود در سنگ است. در روش‌های پیش‌بینی لهیدگی طبقه‌بندی تودهٔ سنگ که دربردارندهٔ ساختارهای موجود در آن است مورد توجه قرار گرفته است. اما تاکنون توجهی به نقش ریزساختارهای موجود در سنگ‌ها در پیش‌بینی این پدیده نشده است. در این‌جا به برخی از پژوهش‌هایی که نقش بافت و ساخت سنگ را در بروز رفتار دگرشکلی متفاوت در تونل نشان می‌دهند اشاره می‌شود. تونل کالیگانداکی[3] واقع در هیمالیای پایینی از فیلیت‌های سیلیسی و گرافیکی شدیداً دگرشکل شده عبور می‌کند که ترکیب شیمیایی و درجهٔ دگرگونی آن‌ها در طول مسیر تونل تغییر می‌کند. در این تونل در ارتفاع‌های تقریباً برابر، تفاوت چشم‌گیری در درجهٔ لهیدگی دیده شده است [۱۱]. بنابراین به‌نظر می‌رسد نوع ریزساختارهای موجود در سنگ‌ها در ایجاد رفتار متفاوت در برابر سیستم تنش موجود تأثیر داشته‌است. تونل انتقال آب شمال غرب واقع در شمال‌غرب ایران عمدتاً از شیل و ماسه سنگ‌های آرژیلیتی عبور می‌کند. به لحاظ ساختاری، توده سنگ‌های مسیر تونل از حالت بسیار ضعیف و گسل‌خورده تا نسبتاً مقاوم و ضخیم لایه تغییر می‌کنند. شمس‌الدین و معارف‌وند[4] [۱۲] پتانسیل لهیدگی زیادی را برای زون‌های خرد شده و گسل خورده پیش‌بینی کرده‌اند. تونل انتقال آب T4 به‌طول ۱۱۳۸۰ متر بین استان‌های کردستان و کرمانشاه و در زون برخوردی بین صفحهٔ عربی و صفحهٔ ایران واقع شده است. در بعضی از بخش‌ها، تونل از سنگ‌های با برگوارگی زیاد، گوژ گسلی، زون خرد شده و سنگ‌های سرپانتینیتی شده عبور می‌کند. با وجود ارتفاع روباره کم، اجل‌لوئیان و همکاران

1. Aydan
2. Suruc
3. Kaligandaki
4. Shamsoddin and Maarefvand

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.2.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.511]

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.2.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.511]

[۱۳] پتانسیل لهیدگی زیادی را برای این تونل برآورد کرده‌اند. تونل تالون به‌طول تقریبی ۵ کیلومتر طویل‌ترین و عمیق‌ترین تونل در مسیر آزاد راه تهران–شمال است. عمده سنگ‌های مسیر این تونل توف کرج است. در بعضی از قسمت‌ها در اثر نفوذ توده‌های آذرین به‌صورت سیل و دایک، توف‌ها به‌شدت دگرسان شده و برگوارگی شدیدی در آن‌ها ایجاد شده است. حفاری تونل در سنگ‌های توف به‌راحتی انجام شده اما با ورود تونل به محل تماس توف و تودهٔ آذرین، هم‌گرایی زیادی در تونل رخ داده و این هم‌گرایی بعد از نصب پوشش اولیه نیز ادامه داشته است. یساقی و سالاری–راد [۱٤] معتقدند علت هم‌گرایی زیاد این تونل تنها ضعیف بودن سنگ‌ها در زون تماسی نیست، بلکه عمق زیاد تونل و تشکیل برگوارگی شدید این پدیده را تشدید کرده است. تونل انتقال آب یاکامبو–کوئیبر[1] در منطقهٔ فعال تکتونیکی در عمق ۱۲۷۰ متری حفر شده است. این تونل از رشته کوه‌های آند عبور می‌کند. مسیر تونل به‌طور غالب از توده سنگ‌های فیلیتی تشکیل شده که در ورودی تونل به‌صورت فیلوسیلیکات‌های توده‌ای مقاوم بوده است و در امتداد تونل به‌صورت گرافیت فیلیت‌های شدیداً تکتونیزه و دگرشکل شده هستند. بیش‌تر حفاری‌های انجام شده در فیلیت‌های سیلیسی بدون نیاز به نگه‌دارنده پایدار بوده‌اند. این درحالی است که گرافیت فیلیت‌ها رفتاری کاملاً متفاوت نشان داده‌اند [۱۵]. اخیراً مزگر[2] و همکاران [۱٦] روشی در پیش‌بینی کرنش در اطراف تونل معرفی کرده‌اند که پارامترهای درگیر در آن با روش‌های رایج متفاوت است. آن‌ها دریافتند که بزرگی تغییر شکل تونل در فواصل اندک و در شرایطی که عمق تونل و سنگ‌شناسی ثابت است تغییر می‌کند. آن‌ها توانستند با استفاده از پارامترهایی نظیر درجه برش یافتگی سنگ، درجهٔ شیستوزیته و نزدیکی با زون‌های قوی یا ضعیف‌تر رابطه‌ای با ضریب تعیین (R^2) ۰/۷۵ برای تخمین مقدار کرنش دیواره تونل ارائه دهند.

علی رغم بررسی‌ها و تعاریف زیاد در مورد لهیدگی، به‌نظر می‌رسد هنوز سوالات زیادی بی‌پاسخ مانده است. از جمله آن‌که چرا لهیدگی عمدتاً در سنگ‌هایی نظیر شیل، اسلیت، فیلیت، شیست رخ می‌دهد؟ علت ضعف این سنگ‌ها چیست؟ آیا وجود این سنگ‌ها در

1. Yacambu-Quibor
2. Mezger

عمق زیاد برای وقوع این پدیده کافی است؟ آیا نقش تنش روباره مهم‌تر است یا تنش‌های افقی؟ آیا روش‌های ارائه شده در پیش‌بینی این پدیده عوامل اصلی کنترل‌کننده این پدیده را دربردارند؟ آیا سنگ‌ها تحت سیستم تنش حاکم در تونل ضعیف می‌شوند و یا در ابتدا ضعیف بوده و بعد از حفاری به داخل حفره باز شده وارد می‌شوند؟ این پژوهش به‌دنبال یافتن پاسخ چنین سوالاتی در مقیاس میکروسکوپی است. در کل این پژوهش سعی دارد که از طریق بررسی ریزساختارها در یک سنگ نمک طبیعی (متعلق به گنبد نمکی دهکویه در استان فارس) به‌عنوان نمونه‌ای شاخص از یک سنگ شکل‌پذیر و مقایسه با ریزساختارهای ارائه شده برای نمونه‌هایی از سنگ‌های شیستی در منطقهٔ هیمالیا، سازوکار اصلی پدیدهٔ لهیدگی را شناسایی کند. بررسی ریزساختاری نمونه‌ها با استفاده از روش پراش الکترون‌های برگشتی[1] در دانشگاه اتاگو[2] نیوزیلند انجام گرفت. EBSD روشی در میکروسکوپ الکترونی روبشی[3] برای اندازه‌گیری جهت‌گیری بلورین و ریزساختارهای موجود در سنگ است [۱۷]. این روش تعاریف جدیدی از کمیت‌هایی همانند دانه و مرز دانه ارائه می‌کند. تعاریف و اندازه گیری‌ها همگی بر پایه جهت‌یافتگی بلوری[4] و تفاوت جهتی[5] هستند. EBSD اولین روشی است که قادر است خصوصیات آماری مرز بین دانه‌ها را با دقت و سرعت چشم‌گیری برداشت کند [۱۸], [۱۹].

زمین‌شناسی منطقه

انتهای شرقی کمربند چین–راندگی زاگرس (استان فارس و پس بوم بندرعباس) و خلیج فارس به‌وجود برونزادهای نمکی مشهور است. این گستره در بخش شمال شرقی ورقهٔ عربی واقع شده است. قدیمی‌ترین بخش‌های ورقهٔ عربی در پروتروزوییک پایانی شکل گرفته‌اند، زمانی که یک سری از جزایر کمانی و قطعات خرده قاره‌ای به حاشیهٔ کراتون آفریقا افزوده می‌شدند. این فرایندهای برخوردی باعث ایجاد ساختارهایی با روند شمالی–جنوبی شده که به‌موجب آن‌ها حوضه‌های رسوبی و گسله‌های پی سنگی شکل گرفته‌اند. در زمان

1. Electron Backscatter diffraction
2. Otago
3. SEM
4. Lattice orientation
5. Misorientation

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.2.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.511]

پروتروزوئیک پایانی-کامبرین آغازین، یک دوره کافت‌زایی باعث ایجاد حوضه‌هایی با همان روند شمالی-جنوبی شده که رسوب‌گذاری و توزیع نمک هرمز را در بخش شمالی ورقهٔ عربی و معادل آن در عمان (نمک سازند Ara) کنترل می‌کرده‌اند [۲۰].

لایه نمکی هرمز نقش سطح جدایش اصلی را در گستره فارس-بندرعباس و نهشته‌های رسوبی معادل آن در گسترهٔ لرستان و دزفول-ایذه بازی می‌کنند. این افق جدایشی، رسوبات پوششی به‌ضخامت ۱۰-۱۵ کیلومتر را از نهشته‌های قبل از سری هرمز جدا می‌کند و خود این رسوبات نیز به‌طور مستقیم روی پی سنگ ورقهٔ عربی نهشته شده‌اند [۲۱]. سری هرمز به‌صورت دیاپیرهایی در این روباره نفوذ کرده و روانه‌های نمکی را که از طریق جریان پلاستیک در سطح زمین حرکت می‌کنند تغذیه می‌کند [۲۲]. حدود ۲۱۷ گنبد نمکی در زاگرس و خلیج فارس شناسایی شده‌اند. از این تعداد ۱۳۲ مورد به سطح رسیده‌اند و دیاپیرها و جزایر نمکی را به‌وجود آورده‌اند. در صورتی که بقیه آن‌ها (۸۵ مورد) به‌صورت دیاپیرهای مدفون (گنبد) هستند که بیش‌تر در بخش جنوب خلیج فارس قرار دارند (شکل ۱ ب) [۲۰].

نقش فرایندهای تکتونیکی به‌ویژه گسلش نوع کششی، به‌عنوان عامل محرک شروع دیاپیرها به‌خوبی شناخته شده است. با این حال، نیروی رانشی اولیه در زاگرس هنوز به‌طور کامل مشخص نشده است. وجود گسله‌های عمیق در دو سمت بلندای قطر-فارس و افزایش ضخامت رسوبات به طرفین حوضه و هم‌چنین وجود یک گسله کششی در زیر گنبد نمکی کیش بیان‌گر فعالیت تکتونیک کششی (تداوم ریف زایی تا اوایل پالئوزوییک) است [۲۱]. فعالیت تکتوینک کششی در این زمان سبب افزایش ضخامت رسوبات به طرفین بلندا و به تبع از آن، اختلاف بارگذاری رسوبی در بلندا و حوضه‌های رسوبی مجاور آن شده است و به‌عنوان عامل دیگری برای رانش نمک عمل کرده است [۲۰].

نمونه‌های سنگ نمک بررسی شده از گنبد نمکی دهکویه در ۲۷ کیلومتری شمال‌شرق لار در استان فارس برداشت شد (شکل ۱ الف). مساحت این دیاپیر نمکی حدود ۳۳ کیلومتر مربع است. محور طویل آن به‌طول ۱۱ کیلومتر در راستای شمال غربی-جنوب شرقی و محور کوچک آن به‌طول ۳ کیلومتر تقریباً عمود بر محور طویل است [۲۳]. این برون‌زاد

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.2.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.511]

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.2.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.511]

نمکی از یک هسته مرکزی به‌همراه دو نمکشار[1] در بخش غربی و شرقی تشکیل شده‌است (شکل ۱ پ). هسته در قسمت غربی گنبد واقع است و دارای شکل نعل اسبی به قطر دو و نیم کیلومتر است. این گنبد از رسوبات تبخیری به‌ویژه هالیت تشکیل می‌شود. در اثر انحلال هالیت، درصد ژیپس در روانه‌های غربی و شرقی نمکشار افزایش یافته است [۲٤]. سنگ‌های پیرامون این دیاپیر نمکی سازندهای آسماری–جهرم هستند. علت انتخاب نمونه‌ها از این گنبد نمکی، رخنمون خوب و دسترسی نسبتاً آسان است [۲۵].

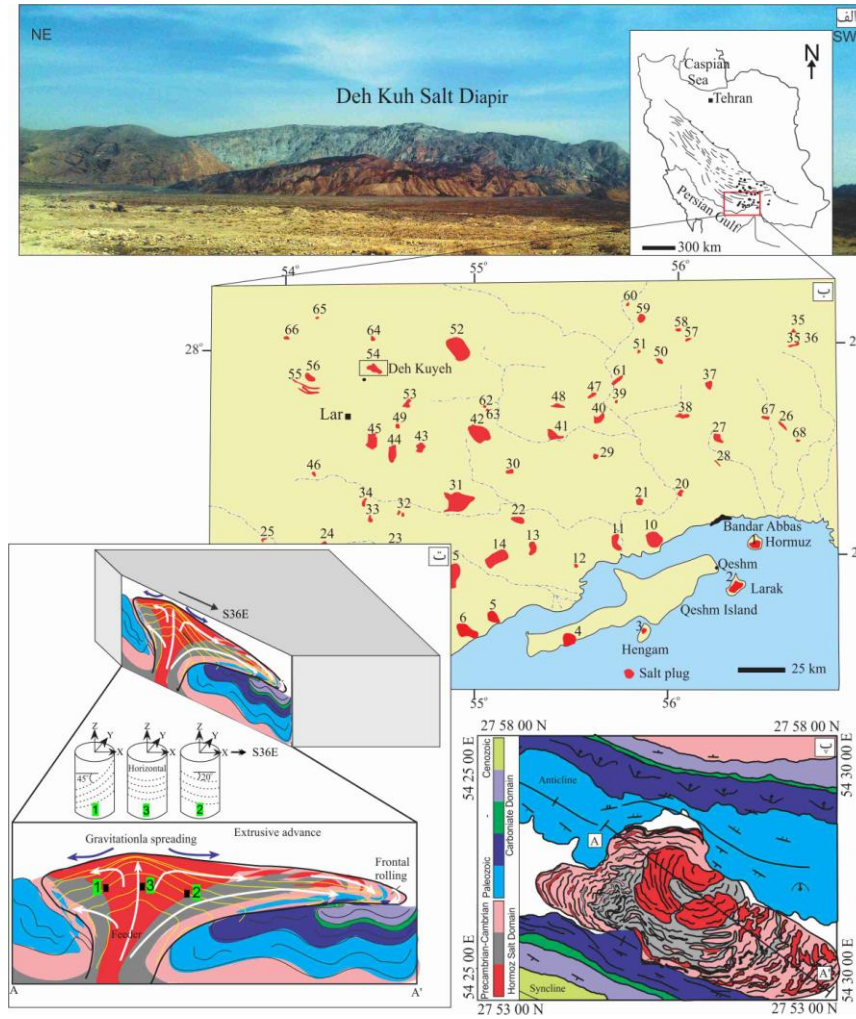
مواد و روش‌ها

دیاپیر دهکویه از تناوب لایه‌های خاکستری، صورتی و سفید تشکیل شده است. سه بلوک از محل‌هایی که در شکل ۱ ت نشان داده شده است برداشت شده است. تناوب لایه‌های رنگی در موقعیت نمونه ۱، N54°E/45°NW ، در نمونه ۲، N54°E/20°SE و در نمونه ۳، لایه ها تقریبا افقی هستند. در آزمایشگاه نمونه‌های استوانه‌ای به قطر ٥٤ میلی‌متر و طول ۱۰۲ میلی‌متر به‌گونه‌ای تهیه شد که محور X آن‌ها به‌موازات افق (S36°W) باشد. محور طویل مقاطع نازک نیز به موازات افق و در جهت S36°E است. سایش مقاطع نازک در دانشگاه اتاگو نیوزیلند و طبق روش پیشنهاد شده پناک[2] و همکاران [۱۷] تکمیل شد.

بررسی ریزساختاری مقاطع نازک با استفاده از دستگاه Zeiss SIGMAVP FEGSEM در دانشگاه اتاگو نیوزیلند انجام گرفت. الگوهای EBSD با ولتاژ ۳۰ kV، جریان ۱۰۰ nA در فاصلهٔ کاری حدوداً ۳۰ mm برداشت شد. فاصله نقاط برداشت اطلاعات ریز ساختاری µm ۱۰ است. اطلاعات خام به‌دست آمده با استفاده از نرم‌افزار HKL Channel 5 پردازش شد.

EBSD تفاوت جهت‌یافتگی تمام نقاط[3] 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. بدین‌ترتیب تغییر جهت‌یافتگی بلورها که با زاویه سنجیده می‌شود و به آن تفاوت جهتی[4] گفته می‌شود، ملاک اندازه‌گیری اندازهٔ دانه است. معمولاً در زمین‌شناسی تفاوت

1. Salt glacier
2. Pennock
3. Pixels
4. Misorientation



شکل ۱. الف) نمایی از دیاپیر نمکی دهکویه، ب) موقعیت دیاپیرهای نمکی شناسایی شده در زاگرس و خلیج فارس، پ) نقشه زمین شناسی دیاپیر نمکی دهکویه، ت) برش ختاری از موقعیت 'AA در نقشه زمین شناسی (تصویر پ)

جهت‌یافتگی ۱۰ درجه ملاک اندازه گیری اندازه دانه است. بدان‌گونه که فرایند تعیین اندازهٔ دانه و مرز دانه‌ها از یک نقطه شروع می‌شود. نقاط و بلورهایی که تفاوت جهت‌یافتگی‌شان نسبت به یک‌دیگر کم‌تر از ۱۰ درجه باشد به‌عنوان یک دانه قلمداد شده و مرز دانه در اطراف

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.2.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.511]

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.2.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.511]

آن‌ها ترسیم می‌شود. هر چه تفاوت جهتی در نظر گرفته شده کوچک‌تر باشد، اندازهٔ دانه‌های شناسایی شده کوچک‌تر است. در این پژوهش تفاوت‌های جهتی ۲ تا ۲۰ درجه به‌عنوان ملاک اندازه‌گیری اندازهٔ دانه در نظر گرفته شد. میانگین اندازهٔ دانه‌های شناسایی شده در مقابل زاویه در نظر گرفته شده ترسیم شد. منحنی به‌دست آمده می‌تواند سازوکارهای دگرشکلی غالب در نمونه را نشان دهد. از تجزیهٔ عامل اشمید[1] برای یافتن جهتی از تنش تراکمی که بیش‌ترین فعالیت را برای سیستم‌های لغزشی شناخته شده در بلورهای هالیت به‌دست می‌دهد استفاده شد.

سازوکارهای دگرشکلی در مقیاس میکروسکوپی

توصیف برخی از سازوکارهای دگرشکلی غالب در سنگ‌ها

قبل از توصیف ریزساختارها در سنگ نمک لازم است برخی از سازوکارهای دگرشکلی در مقیاس میکروسکوپی به اختصار تشریح شوند. وقتی یک ساختار بلورین تحت تنش قرار می‌گیرد به‌صورت‌های مختلفی تغییر شکل می‌یابد. سازوکارهای تغییر شکل به‌عوامل مختلفی از جمله ترکیب کانی‌شناسی، اندازهٔ دانه، دما، فشار، فشار سیالات، تفاوت تنش و نرخ کرنش بستگی دارد. سازوکارهای اصلی تغییر شکل بلورها و کانی‌ها به پنج دسته تقسیم می‌شوند: ۱. ایجاد ریز شکستگی، تنش‌آواری و لغزش اصطکاکی، ۲. دوقلویی مکانیکی، ۳. خزش انحلالی، ٤. خزش انتشاری و ۵. خزش نابه‌جایی. این سازوکارها در منابعی مانند معماریان [۲٦] و پشیر و تروو[2] [۲۷] به‌طور مفصل تشریح شده‌اند. در این پژوهش بیش‌تر به خزش نابه‌جایی توجه شده است.

نابه‌جایی یا نقص خطی در شبکه بلور، آرایه‌ای خطی از ناکامل بودن شبکه است. به بیان دیگر، نابه‌جایی آرایه‌ای خطی از اتم‌هاست که محدوده‌ای از بلور را که اتم‌ها نسبت به بقیهٔ بلور لغزیده‌اند، جدا می‌کند [۲۷]، [۲٦]. خزش نابه‌جایی به‌نحو خاصی در اثر لغزش و برش شبکه در راستای بلورشناسی مناسب صورت می‌گیرد (شکل ۲ الف). نابه‌جایی‌ها جهت‌گیری

1. Schmid factor
2. Passchier & Trouw

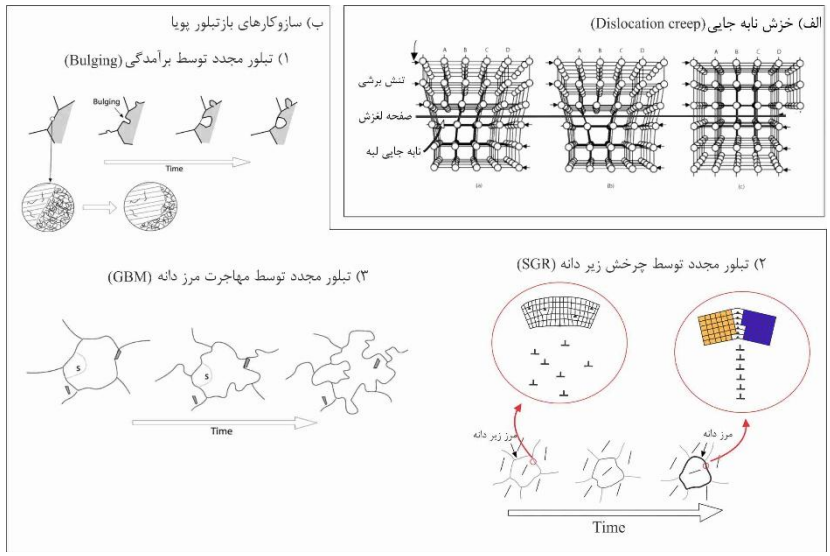
مشخصی دارند و تنها روی صفحات بلورشناسی خاص و در جهات بلورشناسی خاصی حرکت می‌کنند. یک سطح لغزش به‌همراه جهت لغزش سیستم لغزش نامیده می‌شود [۲۷]. به بیان دیگر وقتی تنش لازم برای گسیختگی بیش‌تر از تنش لازم برای لغزش باشد، بلور ممکن است رفتار شکل‌پذیر از خود نشان دهد. امتدادی از بلور که در آن لغزش صورت می‌گیرد، سطح لغزش نامیده می‌شود. جهاتی از لغزش که امکان لغزش در آن‌ها وجود دارد به نوع پیوند و مقاومت آن بستگی دارد. لازم به ذکر است که سیستم‌های لغزش در بلورها بر اساس نمایش صفحات و محورهای بلورشناسی به‌وسیلهٔ اندیس میلر به‌صورت <hkl> (hkl) نشان داده می‌شوند. به‌طور مثال سیستم لغزشی <۱۱۱> (۱۰۰) نشان‌دهندهٔ لغزش روی صفحه (۱۰۰) در جهت <۱۱۱> است. بلورها در امتدادهایی گسیخته می‌شوند یا می‌لغزند که دارای پیوندهای ضعیف‌تر یا کم‌ترین پیوند مستحکم باشند [۲۶]. اغلب کانی‌های سنگ ساز چندین سیستم لغزشی دارند. در این تعاریف فعالیت هر سیستم لغزشی در بلور به جهت و بزرگی تنش اعمال شده و یا مقاومت تسلیم آن بستگی دارد. بزرگی مقاومت تسلیم در درجه اول به درجهٔ حرارت و سپس به عوامل دیگری مانند نرخ کرنش، تفاوت تنش و فعالیت شیمیایی برخی از اجزا مثل آب وابسته است [۲۷].

فرایندهای بازیابی و بازتبلور سبب ترمیم و حذف نقص‌های شبکه بلور می‌شوند. در فرایند بازیابی نابه‌جایی‌های مجاور به‌صورت یک دیوار در کنار یک‌دیگر مرتب شده و دو قسمت تا حدی تغییر جهت یافته را به‌وسیلهٔ یک مرز کم‌زاویه از هم جدا می‌کنند. مرزهای کم‌زاویه یک دانه را به دو یا چند زیردانه (دانه فرعی) تبدیل می‌کنند. باز تبلور مرزهای با زاویه زیاد ایجاد می‌کند. سه نوع سازوکار برای باز تبلور وجود دارد. با افزایش حرارت و کاهش تنش این سازوکارها شامل برآمدگی، بازتبلور با چرخش زیردانه و بازتبلور به‌وسیلهٔ مهاجرت مرزدانه است (شکل ۲ ب). در حرارت کم تحرک مرز دانه‌ها به‌صورت محلی است. به‌نحوی که مرز دانه به داخل دانه‌ای که دگرشکلی بیش‌تری را متحمل شده برآمده می‌شود و دانه‌ای کوچک مستقلی را تشکیل می‌دهد. این پدیده برآمدگی نامیده می‌شود. در فرایند چرخش زیردانه، نابه‌جایی‌ها به‌طور مداوم به مرز زیردانه اضافه شده تا جایی که مرز زیردانه به مرزی تبدیل شود که دو دانه‌ای که جهت‌یافتگی متفاوتی دارند را از هم جدا

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.2.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.511]

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.2.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.511]

می‌کند. در حرارت‌های نسبتاً زیاد، تحرک مرز دانه به درجه‌ای افزایش می‌یابد که می‌تواند نقاط ضعف و مرز زیردانه‌ها در سراسر دانه‌های مجاور را جارو کرده و از بین ببرد [۲۸]. این فرایند مهاجرت مرز دانه نامیده می‌شود که مشخصه آن ایجاد مرزهای نامنظم و منحنی شکل است.



شکل ۲. سازوکارهای دگرشکلی در مقیاس میکروسکوپی، الف) خزش نابه‌جایی، ب) سازوکارهای بازتبلور پویا

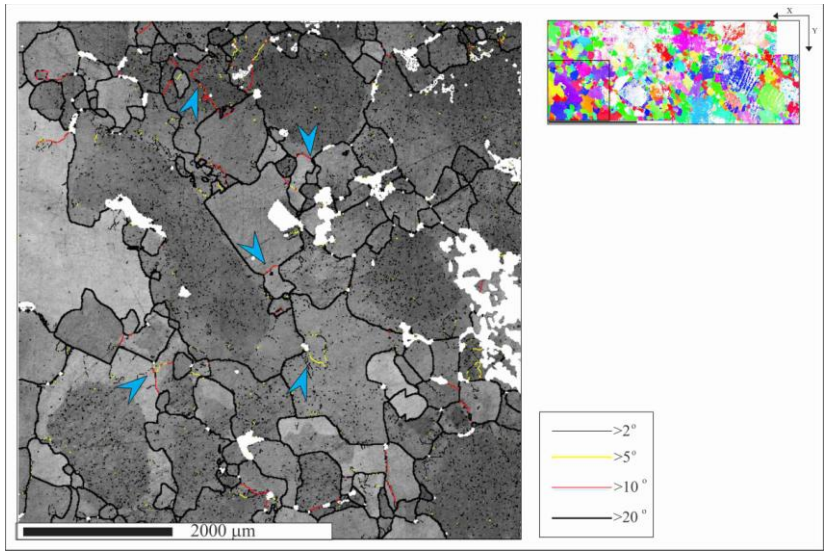
توصیف ریزساختارها در سنگ نمک

بررسی زوایای جهت‌یافتگی بین بلورها

هر سه نمونه نمک بررسی شده تقریباً خصوصیات بلورشناسی مشابهی را دارند. شکل ۳ تصویر باند کنتراست[1] را برای نمونه ۱ نشان می‌دهد. چنان‌چه دیده می‌شود تعداد کمی از دانه‌های بزرگ 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 به‌طوری که مرزهای آن‌ها با صفحات (۱۰۰) بلورهای نمک مطابقت دارد. در این شکل، مرز

1. Band contrast map

بین دانه‌ها و زیردانه‌ها (دانه‌های فرعی) بر اساس زاویهٔ تغییر جهت‌یافتگی بین بلورها با رنگ‌های مختلف نشان داده شده‌است. هم‌چنان‌که دیده می‌شود در بعضی از قسمت‌ها، مرزهای پر زاویه در حال تشکیل شدن است (فلش‌ها در شکل ۳).



شکل ۳. نقشهٔ باندکنتراست از نمونه ۱. فلش‌ها محل افزایش تفاوت جهت‌یافتگی را نشان می‌دهند.

جدول ۱ اطلاعات آماری اندازه دانه‌ها را در سه نمونه بررسی شده نشان می‌دهد. پژوهش‌های فراوان انجام شده در زمینهٔ ریزساختار نشان می‌دهد که ارتباط معناداری بین اندازهٔ دانه و تنش برجا برقرار است. در مورد هالیت رابطهٔ (۱) را برخی از محققان [۲۹]، [۳۰] ارائه کرده‌اند:

$$D\ (\mu m) = 215\ \sigma^{-1.15} (MPa) \qquad (۱)$$

در این رابطه D میانگین اندازه زیردانه‌ها و σ تنش است. با توجه به میانگین اندازه زیردانه‌ها در نمک بررسی شده، مقدار تنش برآورد شده ۰/۹ تا ۲ مگاپاسکال است که با مقادیر ارائه شده در پژوهش‌های قبلی هم‌خوانی دارد. اسشولدر و یورایی[1] [۳۱] معتقدند این تنش در ارتباط با صعود نمک در مجرای گنبد نمکی است.

1. Schléder and Urai

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.2.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.511]

جدول ۱. اطلاعات آماری اندازهٔ دانه‌ها (اندازه‌ها بر حسب میکرون است)

نمونه	حداقل	حداکثر	میانگین	انحراف معیار	میانگین اندازه زیردانه‌ها
۱	۳۶	۲۹۹۶	۴۱۳	۴۸۲	۲۴۳
۲	۲۹	۳۵۰۰	۲۲۰	۳۶۱	۹۲
۳	۳۶	۷۳۱۲	۲۸۷	۵۲۲	۱۹۵

یکی از خصوصیاتی که می‌تواند اطلاعاتی از تاریخچهٔ دگرشکلی نمونه به‌دست دهد، بررسی توزیع فراوانی زوایای جهت‌یافتگی بین بلورها است. شکل ٤ الف و ب این توزیع فراوانی را برای سه نمونه بررسی شده نشان می‌دهد. به‌علت خطاهای موجود در اندازه‌گیری زوایای کم‌تر از ۳ درجه، این زوایا مورد توجه قرار نگرفته‌اند. در هر سه نمونه، مرزهای کم زاویه درصد زیادی را به خود اختصاص می‌دهند (شکل ٤ الف). در نمونه‌های ۱ و ۳، یک فقدان نسبی برای مرزهای با تفاوت جهتی ٦ تا ۱۵ درجه دیده می‌شود. فراوانی مرزهای با تفاوت جهتی زیاد (شکل ٤ ب) تا زاویهٔ ٤۵ درجه افزایش و سپس کاهش یافته و به حداکثر تفاوت جهتی مجاز برای سیستم تبلور کوبیک ($٦٢/٨^{\circ}$) می‌رسند.

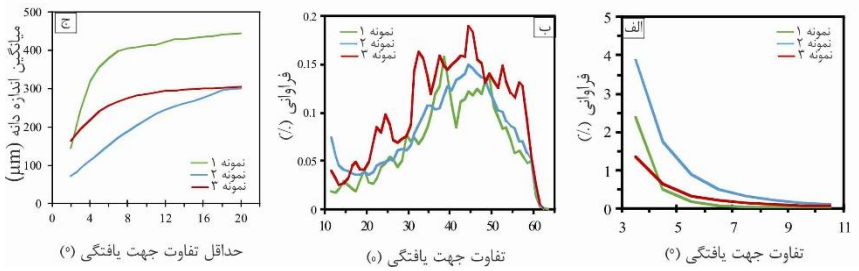
تریمبی[1] و همکاران [۳۲] پیشنهاد می‌کنند که رابطهٔ بین تفاوت جهتی و اندازهٔ دانه ارتباط نزدیک با سازوکار دگرشکلی نمونه دارد. این ارتباط برای هر سه نمونه در شکل ٤ پ نشان داده شده است. مطابق با تقسیم‌بندی ارائه شده به‌وسیلهٔ تریمبی و همکاران [۳۳]، نمونه‌های ۱ و ۳ روند گسسته[2] نشان می‌دهند به‌طوری‌که تفاوت آشکاری در شیب منحنی در زاویهٔ ٦ درجه در آن‌ها دیده می‌شود. نمونه ۲ تقریباً روند پیوسته[3] دارد. به‌طوری‌که اندازهٔ دانه به‌طور پیوسته با افزایش زاویه افزایش یافته‌است.

بررسی دگرشکلی درون دانه‌ای و شناسایی سیستم‌های لغزشی مؤثر در ایجاد آن

یکی از کاربردهای مهم روش EBSD شناسایی سیستم‌های لغزشی فعال در بلورهاست. شکل ۵- الف نقشه بافت[4] را در دو دانه که هر کدام متعلق به یکی از نمونه‌های مطالعه شده‌است نشان می‌دهد. این تصاویر تغییرات زاویه بلورها را نسبت به یک نقطه انتخاب شده نمایش می‌دهند. مرزهای پدیدار شده در هر دانه، معرف مرز دگرشکلی خمیرسان درون

1. Trimby
2. discrete
3. continuous
4. Texture component map

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.2.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.511]



شکل ٤- الف) توزیع فراوانی تفاوت جهت‌یافتگی‌های کم زاویه در سنگ نمک؛ ب) توزیع فراوانی تفاوت جهت‌یافتگی‌های پر زاویه؛ پ) نمودار حداقل جهت‌یافتگی در مقابل اندازه دانه.

دانه‌ای است. این مرز به شکل صفحه‌ای فرض می‌شود که دو جزء دانه را که نسبت به‌هم کمی چرخیده‌اند جدا می‌سازد. این چرخش حول محور چرخش انجام می‌شود. مرزها براساس نسبت‌شان با محور چرخش به دو دسته تقسیم می‌شوند. مرزهایی که به موازات محور چرخش باشند دیواره‌های مایل[1] و مرزهایی که عمود بر محور چرخش باشند دیواره‌های تابدار[2] نامیده می‌شوند [۲۸]. شکل ۵ پ، ث نمایش سه‌بعدی از مرز مایل و تابدار را نشان می‌دهد. در این شکل ارتباط بین جهت‌یابی دیواره مرز، سطح لغزش، جهت لغزش و محور چرخش آشکار می‌شود [۱۸]. استریونت‌ها در این شکل وضعیت جهت‌یابی محورهای <۱۱۱>، <۱۱۰> و <۱۰۰> را در راستای عمودی و افقی مشخص شده در دانه‌ها نشان می‌دهند (شکل ۵ ب). لازم به ذکر است بلورهایی با سیستم تبلور کوبیک مانند هالیت به‌وسیلهٔ این سه محور در استریوگرام نمایش داده می‌شوند. محور چرخش از روی میزان پراکندگی این جهت‌ها شناسایی می‌شود. جهتی که کم‌ترین پراکندگی را دارد به‌عنوان محور چرخش انتخاب می‌شود. محور چرخش در دانه‌های بررسی شده ممکن است <۱۰۰> و یا <۱۱۰> بوده باشد به‌طوری‌که پراکندگی دیگر جهت‌های بلورشناسی حول آن‌ها اتفاق افتاده‌است. این محورها با حرف R در شکل ۵ ب نشان داده شده‌است.

به‌منظور شناسایی سیستم‌های لغزشی فعال در بلورها، روند مرز دگرشکلی مشخص شده در دانه (BT) و محور چرخش (R) روی استریوگرام پیاده می‌شود. اگر مرز دگرشکلی

1. tilt wall
2. twist wall

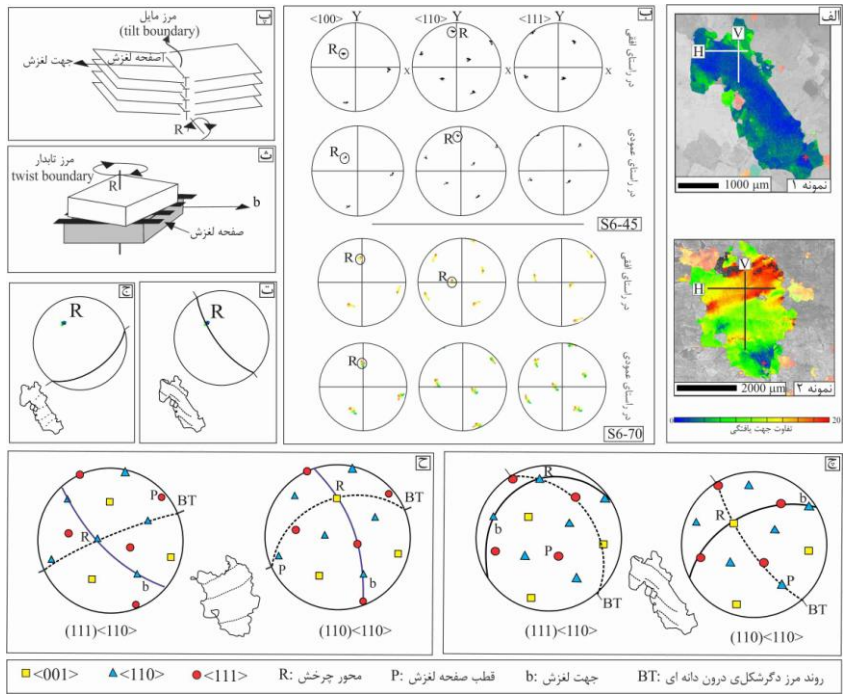
[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.2.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.511]

مربوط به دیواره مایل باشد (شکل ۵ پ) محور باید روی صفحه مرز قرار بگیرد (شکل ۵ ت) و اگر مرز یک دیواره تابدار باشد (شکل ۵ ث) محور چرخش باید عمود بر صفحه مرز باشد (شکل ۵ ج). از آن‌جاکه صفحه‌ای که عمود بر محور چرخش است با روند مرز پدیدار شده در دانه‌ها تطابق ندارد، فرض مرز تابدار رد می‌شود. از این‌رو، با توجه به این‌که احتمال می‌رود مرز دگرشکلی یک دیواره مایل باشد، این مرز به‌گونه‌ای روی استریوگرام تصویر می‌شود که از محور چرخش عبور کرده و روند آن مطابق با روند مرز دگرشکلی در دانه باشد (شکل ۵ چ، ح). چنان‌چه در شکل ۵ پ دیده می‌شود سطح لغزش دربردارنده محور چرخش و جهت لغزش است. برای شناسایی سطح لغزش صفحات بلورشناسی مختلفی که می‌توانند از محور عبور کنند ترسیم می‌شوند. صفحه‌ای که از محور عبور کرده و بیش‌ترین زاویه را با مرز دگرشکلی بسازد به‌عنوان سطح لغزش عمل کرده است. بردار لغزش (یا جهت لغزش) جهت بلورشناسی است که روی صفحه لغزش قرار گرفته و زاویهٔ ۹۰ درجه با محور چرخش می‌سازد. در هر دو دانه، دایره عظیمه مربوط به یکی از قطب‌های (۱۱۰) صفحه‌ای را به‌دست می‌دهد که از محور چرخش <۱۰۰> عبور کرده و زاویهٔ ۹۰ درجه با مرز دگرشکلی (BT) می‌سازد (شکل ۵ چ، ح). از روی بردارهایی که بر صفحه (۱۱۰) قرار گرفته‌اند، بردار <۱۱۰> که زاویهٔ ۹۰ درجه با محور چرخش ساخته‌است به‌عنوان جهت لغزش در نظر گرفته می‌شود. بدین‌ترتیب احتمال آن وجود دارد که سیستم لغزشی <۱۱۰> (۱۱۰) مسئول لغزش بلوری و دگرشکلی درون دانه‌ای باشد. با توجه به‌روش توضیح داده شده و با در نظر گرفتن <۱۱۰> به‌عنوان محور چرخش، سیستم لغزشی <۱۱۰> (۱۱۱) نیز در این دانه‌ها شناسایی شد (شکل ۵ چ، ح).

تجزیهٔ عامل اشمید

<۱۱۰> (۱۱۰) اولین سیستم لغزشی در بلورهای هالیت است [۳٤]. سیستم‌های لغزشی ثانویه در این بلور شامل <۱۱۰> (۱۰۰) و <۱۱۰> (۱۱۱) است [۱۷]. به‌منظور بررسی چگونگی فعالیت این سیستم‌ها از تجزیهٔ عامل اشمید استفاده شد. عامل اشمید شاخصی است که امکان لغزش یک سیستم لغزش را نسبت به جهت اعمال بار نشان می‌دهد [۱۷].

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.2.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.511]



شکل ۵. مراحل شناسایی سیستم‌های لغزشی فعال در بلورهای نمک به‌روش تحلیل دگرشکلی پدیدار شده در دانه‌ها. توضیح قسمت‌های الف تا چ در متن ارائه شده است. در قسمت‌های ج و چ، دایره عظیمه خط چین معرف مرز دگرشکلی درون دانه، دایره عظیمه توپر معرف سطح لغزش، نماد ( ) معرف صفحه و نماد < > معرف محور بلورشناسی است.

عامل اشمید به زاویه‌ای که سطح لغزش و جهت لغزش با جهت اعمال بار می‌سازد بستگی دارد و مقدار عددی آن بین صفر تا ۰/۵ تغییر می‌کند [۳۵]. عامل اشمید صفر حاکی از آن است که جهت‌گیری بلور برای فعال شدن یک سیستم لغزشی به‌خصوص مناسب نبوده، حال آن‌که عامل اشمید ۰/۵ از مناسب‌ترین جهت‌گیری بلور برای فعال شدن سیستم لغزشی در برابر جهت بارگذاری اعمال شده حکایت دارد [۳۶]. در تجزیه عامل اشمید برای سیستم‌های لغزشی هالیت به‌کمک نرم‌افزار Channel 5 تنش تراکمی در جهتی خاص اعمال می‌شود. از آن‌جاکه بخشی از مقطع نازک که به‌روش EBSD بررسی می‌شود از تعداد زیادی بلور تشکیل شده که در جهات مختلفی آرایش یافته‌اند، نتایج تحلیل عامل اشمید برای هر سیستم

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.2.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.511]

لغزشی در قالب نقشه یا نمودار فراوانی نمایش داده می‌شود. در نمودار، فراوانی نسبی مقادیر عامل اشمید (۰ تا ۰/۵) برای سطح بررسی شده نمایش داده می‌شود. برای هر سیستم لغزش، هر چه فراوانی عامل اشمید ۰/۵ بیش‌تر باشد، فعالیت آن سیستم لغزشی در جهت بار اعمال شده بیش‌تر خواهد بود.

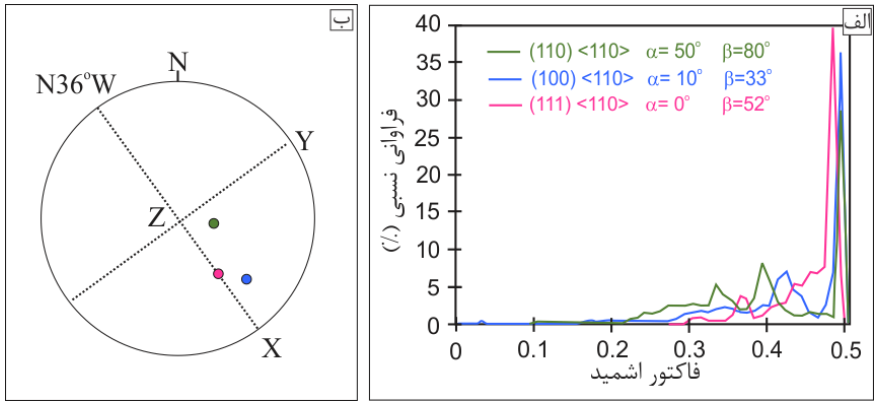
طبق روش پیشنهاد شده الیاس‌زاده و همکاران [۳۷]، برای اعمال تنش تراکمی با فواصل پنج درجه در نرم‌افزار Channel 5 تغییر داده شد تا بیش‌ترین عامل اشمید برای سیستم‌های لغزشی موجود در بلورهای هالیت به‌دست آید. نتایج این تجزیه برای نمونه ۳ (که از مرکز دیاپیر برداشت شده است) در شکل ٦ نشان داده شده است. در این شکل α زاویهٔ انحراف برای بارگذاری از محور X در صفحه افقی و β زاویهٔ انحراف از سطح افق در صفحه قائم است. چنان‌چه مشخص است سیستم‌های لغزشی ثانویه یا سیستم‌هایی که لغزش روی آن‌ها سخت‌تر است (<۱۱۰> (۱۰۰) و <۱۱۰> (۱۱۱)) پیک بیش‌تری را برای حداکثر مقدار عامل اشمید (۰/۵) نشان داده‌اند (شکل ٦ الف). برای تنش‌های تراکمی که بیش‌ترین مقدار عامل اشمید را برای هر سه سیستم لغزشی به‌دست داده است در شکل ٦ ب نشان داده شده‌است. چنان‌چه دیده می‌شود این تنش‌ها در وضعیت تقریباً مایل قرار دارند.

بحث

تفسیر ریزساختارها در نمونه‌های بررسی شده و مقایسه با وضعیت ریزساختاری در سنگ‌های با پتانسیل لهیدگی زیاد در منطقهٔ هیمالیا

چنان‌چه ذکر شد بررسی ریزساختارهای یک سنگ می‌تواند سازوکارهای مؤثر در دگرشکلی آن را مشخص سازد. در طی صعود گنبد نمکی، فرایندهای دگرشکلی مختلفی نقش داشته و ریزساختارهای متنوعی را در سنگ نمک به‌وجود می‌آورند. یکی از سازوکارهای دگرشکلی در سنگ نمک بررسی شده خزش نابه‌جایی است. دانه‌های موجود در این سنگ نمک شواهد لغزش درون بلوری را نشان می‌دهند.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.2.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.511]



شکل ٦. نتایج تجزیل عامل اشمید،الف) منحنی‌های فراوانی عامل اشمید برای سه سیستم لغزشی موجود در بلورهای هالیت، ب) موقعیت تنش‌های تراکمی مربوط به بیش‌ترین مقدار عامل اشمید برای هر سیستم لغزشی در استریونت

فرایندهای بازتبلور به‌وسیلهٔ چرخش زیردانه‌ها و مهاجرت مرز دانه‌ها نیز در توسعهٔ ریزساختار این سنگ تأثیر داشته‌است. توزیع اندازه دانه‌ها می‌تواند متأثر از رقابت بین این دو سازوکار باشد. به‌طوری‌که مهاجرت مرز دانه منجر به افزایش اندازهٔ دانه‌ها و چرخش زیردانه‌ها منجر به کاهش اندازه دانه‌ها شده است. افزایش زاویهٔ مرزهای زیردانه (شکل ۳) به فرایند بازیابی و چرخش زیردانه‌ها نسبت داده می‌شود. زیرا در نتیجه این فرایند مرزهای جدید تشکیل می‌شوند [۳۸]. حضور دانه‌های درشت [۲]، [۱۷] با دگرشکلی درون بلوری کم‌تر، در زمینه‌ای از دانه‌های دگرشکل یافته [۲]، مرزهای دانه‌ای نامنظم و منحنی شکل [۱] از جمله شواهدی هستند که مهاجرت مرز دانه‌ها در نمک بررسی شده را نشان می‌دهند. تریمبی و همکاران [۳۲] پیشنهاد می‌کنند که توزیع فراوانی زوایایی جهت‌یافتگی بین بلورها و نمودار میانگین اندازهٔ دانه در مقابل تفاوت جهتی در شناسایی فرایندهای بازتبلور مؤثر است. فقدان نسبی تفاوت‌های جهت‌یافتگی ٦ تا ۱۵ درجه در نمونه‌های ۱ و ۳ می‌تواند نشان دهنده بازتبلور به‌وسیلهٔمهاجرت مرز دانه‌ها باشد. مهاجرت مرز دانه‌ها، فراوانی مرزهایی که دارای تفاوت جهتی متوسط هستند را در هالیت و کوارتز کاهش می‌دهد [۳۲]. روند پیوسته‌ای که در نمونه ۲ در نمودار اندازه دانه در مقابل تفاوت جهتی مشاهده شد، می‌تواند نشان‌گر فعالیت بیش‌تر بازتبلور به‌وسیلهٔ چرخش زیردانه در این نمونه در مقایسه با دو نمونه

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.2.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.511]

دیگر باشد. زیرا این سازوکار منجر به تشکیل مرزهای زیردانه جدید و افزایش زاویه مرزهای قدیمی می‌شود.

بررسی دگرشکلی درون دانه‌ای پیشنهاد می‌کند که سیستم‌های لغزشی اولیه و ثانویه هر دو در دگرشکلی درون دانه‌ها نقش دارند. لغزش بر روی سیستم‌های لغزشی ثانویه <۱۱۰> (۱۰۰) و <۱۱۰> (۱۱۱) در دمای اتاق ٦ تا ۷ برابر سخت‌تر از لغزش روی سیستم لغزشی اولیه <۱۱۰> (۱۱۰) هستند. اما با افزایش درجه حرارت مقاومت تسلیم سیستم‌های لغزشی ثانویه کاهش یافته به‌طوری‌که در درجهٔ حرارت ۲۵۰ درجهٔ سانتی‌گراد تقریباً معادل با سیستم لغزشی اولیه می‌شود [۳۹]. از این‌رو با توجه به شناسایی سیستم لغزش ثانویه <۱۱۰> (۱۱۱) در دانه‌های دگرشکل شده (شکل ۵ چ، ح) و مقدار بالای عامل اشمید این سیستم لغزشی (شکل ٦ الف) می‌توان انتظار داشت که فرایند صعود نمک در درجه حرارت بالاتر از ۲۰۰ درجه اتفاق افتاده است. در موقعیت نمونه ۳ (که از مرکز دیاپیر برداشت شده است)، تنش‌های تراکمی که بیش‌ترین مقدار عامل اشمید را برای سیستم‌های لغزشی مختلف به‌دست دادند در وضعیت تقریباً مایل قرار دارند (شکل ٦ ب). این تنش‌ها می‌توانند عملکرد نیروهای رانشی مختلف در صعود نمک را نشان دهند. محققان مختلف حرکت نمک در زاگرس را به فعالیت مجدد بلوک‌های پی سنگی در حاشیه گندوانا، گسله‌های راستالغز و حوضه‌های کششی–جدایشی [٤۰] و یا در اثر عملکرد گسلش راندگی و انحرافات موجود در راستای گسله‌های راستالغز [٤۱] نسبت داده‌اند. به‌نظر این محققان دیاپیرهای نمکی کنونی زاگرس، گنبدهای نمکی مدفون گذشته هستند که در طی فشارش سنوزوییک پسین بالا آمده‌اند.

در کل دگرشکلی این نمک طبیعی حاصل سازوکارهای خزش نابه‌جایی و بازتبلور است. این فرایندها می‌توانند در معادن نمک و یا در چاه استخراج نفت نیز رخ دهند و دگرشکلی بزرگ مقیاسی را ایجاد کنند. لازم به ذکر است که فرایندهای باز تبلور در دماهای بالا اتفاق می‌افتد. اما حضور آب در مرز دانه‌ها رخداد این فرایندها را در دماهای پایین‌تر ممکن می‌سازد.

بررسی ریزساختاری به دقتی که در این پژوهش برای سنگ نمک انجام شد برای هیچ یک از نمونه‌های شیستی موجود در تونل‌های لهیده شده انجام نشده است. با این حال

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.2.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.511]

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.2.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.511]

بررسی‌های ریزساختاری که در حوضهٔ میکروتکتونیک بر نمونه‌های شیستی برداشت شده از منطقهٔ هیمالیا انجام شده است نشان می‌دهد که آن نمونه‌ها نیز شواهدی از لغزش بلوری و دگرشکلی درون دانه‌ای را دارا هستند. به‌نظر می‌رسد چنین ریزساختارهایی شکل‌پذیری زیاد سنگ‌ها را در این نواحی سبب می‌شود.

بررسی علت و سازوکار پدیده لهیدگی

بر اساس مشاهده ریزساختارها در سنگ نمک و مقایسهٔ آن‌ها با نمونه‌های شیستی به‌نظر می‌رسد که نوع سنگ و ریزساختارهای موجود در آن مهم‌ترین نقش را در بروز پدیده لهیدگی ایفا می‌کنند. تمام سنگ‌ها وقتی در معرض شرایط مختلفی از دما و فشار قرار بگیرند، رفتار شکل‌پذیر نشان خواهند داد. تفاوت اصلی بین سنگ‌های مختلف، طول مدت زمان بروز رفتار شکل‌پذیر است که خود متأثر از ساختمان داخلی سنگ و کانی‌ها و بلورهای سازنده آن است. به‌طور مثال علت شکل‌پذیری زیاد نمک را باید در خواص داخلی آن جستجو کرد. یکی از عوامل مؤثر در تغییر شکل بلور، مقاومت تسلیم بلور است که حداکثر تنشی است که بلور قبل از شکسته شدن یا لغزش می‌تواند تحمل کند. مقاومت تسلیم کوارتز و الماس که پیوند کووالان دارند، بیش‌تر از مقاومت تسلیم هالیت است که دارای پیوند یونی است. در کانی‌هایی با مقاومت تسلیم کم ده‌ها سطح لغزش ممکن است به‌صورت هم‌زمان عمل کنند و جریان شکل‌پذیر کانی را میسر سازند. هالیت و دیگر جامدات دارای پیوند یونی، که ساده‌تر از کانی‌های دارای پیوند کوالان در سیالات حل می‌شوند، در اثر تنش وارد آمده حل می‌شوند و به نقاط کم‌تر تنش می‌روند [۲۶]. هم‌چنان‌که ذکر شد سیستم لغزشی اولیه در بلور هالیت <۱۱۰> (۱۱۰) است. هر گاه سطوح شبکه‌ای به‌موازات سطح (۱۱۰) انتقال پیدا کنند، همواره یون‌های غیرهمنام در مقابل یک‌دیگر قرار گرفته و در نتیجه تغییر شکل بدون شکستگی انجام می‌پذیرد [۴۳].

معمولاً ذکر می‌شود که لهیدگی در سنگ‌های ضعیف مثل اسلیت، فیلیت، شیست رخ می‌دهد. سنگ‌های دارنده فیلوسیلکات‌ها نقش مهمی را در دگرشکلی‌های محلی در پوسته بالایی تا میانی بازی می‌کنند. مرز جدایش تراست‌های اصلی معمولاً از واحدهای شیلی تشکیل شده است. عقیده بر آن است که کانی‌های رسی لغزش گوژ و کاتاکلازیت‌ها را در

امتداد گسل‌ها تسهیل می‌کنند. ریزساختارهای سنگ‌های گسلی شواهدی از دگرشکلی خمیرسانی بلوری را در رس‌ها و میکاها نشان می‌دهند. این شواهد پیشنهاد می‌کند که فیلوسیلیکات‌ها ضعیف بوده است و دگرشکلی غیرالاستیک آن‌ها در شکل‌پذیری پوسته نقش دارد. بررسی‌های انجام شده بر سنگ‌های غنی از فیلوسیلیکات‌ها (اسلیت، فیلیت، شیست و گنیس) نشان می‌دهد که حضور میکا در این سنگ‌ها سبب ضعیف شدن و افزایش شکل‌پذیری آن‌ها در مقابل سنگ‌های غنی از سیلیکات‌های قوی‌تر نظیر کوارتز و فلدسپار می‌شود [۴۲].

پژوهش‌های انجام شده نشان می‌دهد که هم‌گرایی دیواره تونل‌ها عمدتاً در حوالی گسل‌ها و زون‌های برشی اتفاق می‌افتد. زون برشی ممکن است در شرایط ترد، شکل‌پذیر و یا حالت بینابینی شکل گرفته باشد. تونل‌هایی که در زون‌های برشی ترد حفر شده‌اند عمدتاً با مشکل ریزش روبه‌رو هستند که طبق تعریف شرستا[1] [٤] آناً اتفاق می‌افتد. اما در زون‌های برشی شکل‌پذیر هم‌گرایی تونل در طول زمان اتفاق می‌افتد. سازوکارهایی که در بخش ۳-۱ اشاره شد، می‌تواند در هم‌گرایی سنگ‌ها در داخل حفره تونل نیز رخ دهد. بعضی از بررسی‌های انجام شده اشاره می‌کنند که دگرشکلی سنگ‌ها به‌وسیله فرایند انحلال فشاری به‌وسیلهٔ سیال موجود در مرز دانه‌ها مهم‌ترین مکانیزم دگرشکلی در پوسته است [٤٤]-[٤٦]. مشاهدات صحرایی نشان می‌دهد که انحلال فشاری عمدتاً در امتداد مرز بین دانه‌ها و موادی با قابلیت انحلال کم‌تر مثل رس‌ها رخ می‌دهد [٥٤]. بدین‌ترتیب پیشنهاد می‌شود ریزساختارهای موجود در توده سنگ در مراحل طراحی تونل از طریق بررسی مقاطع نازک تهیه شده از گمانه‌ها بررسی شود. مقایسه این ریزساختارها با ریزساختارهای موجود در مقاطع نازک تهیه شده از دیواره‌های تونل می‌تواند سازوکارهای دگرشکلی غالب در مسیر تونل را نشان دهد. هر سازوکار معمولاً با رابطه‌ای ویژه‌ای به‌صورت کمی درآمده است. چنین روابطی می‌تواند در مدل کردن رفتار توده سنگ‌های مسیر تونل کمک کننده باشد.

با توجه به توضیحات ارائه شده پاسخ سوالات مطرح شده در قسمت مقدمه مشخص می‌شود. از آن‌جاکه عمده تونل‌های لهیده شده در مناطق فعال تکتونیکی از جمله هیمالیا حفر

1. Shrestha

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.2.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.511]

شده‌اند و چنان‌چه ذکر شد مرز تراست‌های اصلی معمولاً از واحدهای شیلی تشکیل شده‌است، از این‌رو، تصور بر این است که لهیدگی عمدتاً در سنگ‌های نظیر اسلیت، فیلیت، شیست رخ می‌دهد. حال آن‌که لهیدگی در هر سنگ شکل‌پذیری می‌تواند رخ دهد. در واقع به‌نظر می‌رسد عامل اصلی در وقوع لهیدگی ریزساختارهای موجود در سنگ است که زمینه را برای خزش و دگرشکلی فراهم می‌کند. در پاسخ به این‌که نقش تنش روباره مهم‌تر است یا تنش‌های افقی به‌نظر می‌رسد نقش تنش در پدیدهٔ لهیدگی کنترل کردن سرعت تغییر شکل است. معمولاً در پژوهش‌ها به تنش روباره توجه شده است. حال آن‌که با توجه به بزرگ‌تر بودن تنش افقی در برخی از تونل‌های حفر شده در زون‌های برشی [٤]، [٤٧]، [٤٨]، [٤٩]، لازم است که در روش‌های پیش‌بینی لهیدگی نقش تنش‌های تکتونیکی نیز در نظر گرفته شود.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش علت و سازوکارهای درگیر در پدیده لهیدگی بررسی شد. از بررسی پژوهش‌های مختلف صورت گرفته به‌نظر می‌رسد سازوکارهای دگرشکلی در مقیاس میکروسکوپی می‌تواند رفتار سنگ و توده سنگ را در مقیاس‌های بزرگ‌تر مشخص کند.

به‌نظر می‌رسد در مورد سنگ‌هایی که ذاتاً شکل‌پذیر هستند از جمله سنگ نمک، مهم‌ترین عامل در وقوع پدیدهٔ لهیدگی و هجوم سنگ در تونل، خواص بلوری خاص مثل کثرت زیاد سیستم‌های لغزشی در آن است. از این‌رو، این سنگ‌ها معمولاً با خزش نابه‌جایی و تبلور مجدد در دما و فشار کم‌تر نسبت به سنگ‌های سیلیکاته دگرشکل می‌شوند. مهم‌ترین عامل وقوع هم‌گرایی در دیگر سنگ‌ها، تحمل تنش‌های زیاد تکتونیکی و ایجاد ریزساختارهای خاص در آن‌هاست که سبب بروز رفتار شکل‌پذیر در آن‌ها می‌شود. در واقع زون‌های برشی در نتیجهٔ عواملی همچون فراوانی فیلوسیلیکات‌ها و افزایش احتمال لغزش بر روی سطوح برگوارگی ایجاد شده به‌وسیلهٔ آن‌ها، توسعهٔ جهت‌یابی ترجیحی بلورین و احتمال افزایش خزش نابه‌جایی، فرایندهای انحلال–فشاری، ریز شدن اندازه دانه‌ها و افزایش احتمال سازوکارهایی مانند جریان دانه‌ای و لغزش اصطکاکی مرز دانه شکل‌پذیر بوده است و

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.2.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.511]

زمینه را برای هجوم سنگ در داخل تونل فراهم می‌سازند. بدین‌ترتیب به‌نظر می‌رسد نوع سنگ و تاریخچهٔ تکتونیکی منطقه مهم‌ترین عوامل در وقوع پدیده لهیدگی باشند و عوامل دیگر نظیر سیستم تنش فعلی در منطقه سرعت دگرشکلی در تونل را کنترل می‌کنند.

بررسی ریزساختار سنگ نمک به‌روش EBSD پیشنهاد کرد که خزش نابه‌جایی و بازتبلور دینامیکی مکانیزم‌های دگرشکلی غالب در نمک در حال صعود بوده است. با توجه به شناسایی سیستم‌های لغزشی ثانویه در دانه‌های نمک می‌توان انتظار داشت که صعود نمک در دمای بیش‌تر از ۲۰۰ درجهٔ سانتی‌گراد انجام شده است. تجزیه عامل اشمید نشان داد که اگر تنش‌ها در راستای مایل تا قائم در نمک وارد شوند بیش‌ترین فعالیت سیستم‌های لغزشی حاصل می‌شود. این جهت تنش می تواند نتیجهٔ عملکرد نیروهای مختلفی باشد که در صعود نمک نقش داشته‌اند.

بدین‌ترتیب بررسی ریزساختار سنگ‌های موجود در دیواره‌های تونل نیز اطلاعاتی از تاریخچهٔ دگرشکلی سنگ‌ها به‌دست می‌دهد. سرعت و دقت زیاد روش EBSD در جمع آوری خصوصیات جهت‌یافتگی بلورها، آن را به‌روشی کارآمد در بررسی ریزساختارها و دگرشکلی‌های درون‌دانه‌ای تبدیل کرده‌است. وقتی نمونه‌ای تحت بار واقع شود در شرایط دگرشکلی خمیرسان، این بلورها هستند که نسبت به یک‌دیگر چرخش یافته و با تغییر زاویه نسبت به حالت قبل قرار می‌گیرند. در طی بارگذاری، نابه‌جایی‌ها موجود در بلورها حرکت می‌کنند. هم‌چنین ممکن است نابه‌جایی‌های جدیدی در بلورها ایجاد شوند. سرانجام ممکن است نابه‌جایی‌ها در بلور به خط شده و مرزهای کم زاویه را ایجاد کنند. این مرزها دو جزء بلور را که نسبت به یک‌دیگر قدری چرخیده‌اند از هم جدا می‌کنند. بنابراین بررسی فراوانی مرزها و شناسایی سیستم‌های لغزشی در سنگ‌های موجود در تونل به‌روش EBSD می‌تواند در شناسایی نواحی با پتانسیل لهیدگی بالا کارساز باشد. در این روش با استفاده از نرم‌افزارهای موجود می‌توان با اعمال جهت تنش برجا فعالیت سیستم‌های لغزشی مختلف که منجر به خزش نابه‌جایی می‌شوند را شناسایی کرد و یا به‌طور معکوس جهتی از تنش که منجر به بیش‌ترین ناپایداری در تونل می‌شود را ارزیابی کرد.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.2.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.511]

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.2.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.511]

در کل به‌نظر می‌رسد با جمع‌آوری و بررسی دقیق مقاطع نازک تهیه شده از تونل‌هایی که با مشکل لهیدگی روبرو بوده‌اند، می‌توان طبقه‌بندی جدیدی برای رفتار توده سنگ‌ها ارائه کرد.

منابع

1. Bestmann M., Piazolo S., Spiers C. J. Prior D. J., "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, Vol. 27 (2005) 447-457.
2. Piazolo S., Bestmann M., Prior D. Spiers C., "Temperature dependent grain boundary migration in deformed-then-annealed material: observations from experimentally deformed synthetic rocksalt", Tectonophysics, Vol. 427 (2006) 55-71.
3. Závada P., Desbois G., Schwedt A., Lexa O. Urai J.L., "Extreme ductile deformation of fine-grained salt by coupled solution-precipitation creep and microcracking: Microstructural evidence from perennial Zechstein sequence (Neuhof salt mine, Germany)", Journal of Structural Geology, Vol. 37 (2012) 89-104.
4. Shrestha G. L., "Stress induced problems in Himalayan tunnels with special reference to squeezing, Doctoral Thesis, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway.", (2006).
5. Carranza-Torres C. Fairhurst, C., "The elasto-plastic response of underground excavations in rock masses that satisfy the Hoek–Brown failure criterion", International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 36 (1999) 777-809.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.2.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.511]

6. Goel R., Jethwa J., Paithankar A., "Tunnelling through the young Himalayas-a case history of the Maneri-Uttarkashi power tunnel", Engineering Geology, Vol. 39 (1995) 31-44.
7. Hoek E. Marinos P., "Predicting tunnel squeezing problems in weak heterogeneous rock masses", Tunnels and tunnelling international, Vol. 32 (2000) 45-51.
8. Jethwa J., Singh B., Singh B., "28 Estimation of ultimate rock pressure for tunnel linings under squeezing rock conditions-a new approach. in Design and Performance of Underground Excavations: ISRM Symposium-Cambridge, UK, 3–6 September 1984, Thomas Telford Publishing (1984).
9. Singh B., Jethwa J., Dube A., Singh B., "Correlation between observed support pressure and rock mass quality", Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 7 (1992) 59-74.
10. Aydan Ö., Akagi T. Kawamoto T., "The squeezing potential of rocks around tunnels; theory and prediction", Rock Mechanics and Rock Engineering, Vol. 26 (1993) 137-163.
11. Panthi K. Nilsen B., "Uncertainty analysis of tunnel squeezing for two tunnel cases from Nepal Himalaya", International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 44 (2007) 67-76.
12. Shamsoddin M. S. Maarefvand P., "Engineering geological study of NWCT tunnel in Iran with emphasis on squeezing problems", Indian Geotechnical Journal, Vol. 44 (2014) 357-369.
13. Ajalloeian R., Moghaddam B., Azimian A., "Prediction of Rock Mass Squeezing of T4 Tunnel in Iran", Geotechnical and Geological Engineering, Vol. 35 (2017) 747-763.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.2.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.511]

14. Yassaghi A. Salari-Rad H., "Squeezing rock conditions at an igneous contact zone in the Taloun tunnels, Tehran-Shomal freeway, Iran: a case study", International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 42 (2005) 95-108.
15. Sulem J., Subrin D., ,Monin N., Lascols, J., "Anisotropic closure in squeezing rocks: the example of Saint-Martin-la-Porte access gallery", Rock mechanics and rock engineering, Vol. 46 (2013) 231-246.
16. Mezger F., Anagnostou G. Ziegler H.-J., "The excavation-induced convergences in the Sedrun section of the Gotthard Base Tunnel", Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 38 (2013) 447-463.
17. Pennock G., Drury M., Peach C., Spiers C., "The influence of water on deformation microstructures and textures in synthetic NaCl measured using EBSD", Journal of structural geology, Vol. 28 (2006) 588-601.
18. Prior D. J., Wheeler J., Peruzzo L., Spiess R. Storey C., "Some garnet microstructures: an illustration of the potential of orientation maps and misorientation analysis in microstructural studies", Journal of Structural Geology, Vol. 24 (2002) 999-1011.
19. Wheeler J., Prior D., Jiang Z., Spiess R., Trimby P., "The petrological significance of misorientations between grains", Contributions to Mineralogy and Petrology, Vol. 141 (2001) 109-124.
۲۰. جهانی س.،"تکتونیک نمک، چین‌خوردگی و گسلش در زاگرس و خلیج فارس"، مجموعه مقالات سی امین گردهمایی علوم زمین (۱۳۹۰).
21. Jahani S., Callot J.-P., Letouzey J., Laotte D., "The eastern termination of the Zagros Fold-and-Thrust Belt, Iran: Structures, evolution, and

relationships between salt plugs, folding, and faulting", Tectonics, Vol. 28 (2009).

22. Talbot C. J., "Extrusions of Hormuz salt in Iran", Geological Society, London, Special Publications, Vol. 143 (1998) 315-334.

۲۳. مرادی س.، "استفاده از داده های استر در تحلیل ارتباط سنگ-شناسی و پتانسیل‌های معدنی گنبد نمکی دهکویه، شمال شرقی لار"، پایان‌نامهٔ کارشناسی ارشد، دانشگاه شیراز (۱۳۹۳)، ۱٤۰ صفحه.

24. Bosák P., "Salt plugs in the eastern Zagros, Iran: results of regional geological reconnaisance: Institute of Geology, Academy of Sciences of the Czech Republic (1998).

25. Jahani S., Callot J.-P., de Lamotte D. F., Letouzey J., Leturmy P., "The salt diapirs of the eastern Fars province (Zagros, Iran): A brief outline of their past and present, in Thrust Belts and Foreland Basins", (2007) Springer 289-308.

۲٦. معماریان ح.، "زمین‌شناسی ساختاری، مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران"، تهران، چاپ دوم، (۱۳۸۸) ۸٤۲.

27. Passchier C. Trouw R., "Microtectonics, Second, Revisited and Enlarged Edition", Springer-Verlag, Berlin Heidelberg (2005)366.

۲۸. محجل م.، "میکروتکتونیک، ترجمهٔ کتاب Microtectonics نوشتهٔ Passchier, C. W. & Trow, R, A. J.,"، مرکز نشر آثار علمی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، چاپ اول، (۱۳۸۸) ۷٤۲.

29. Schleder Z., Urai J. L., "Microstructural evolution of deformation-modified primary halite from the Middle Triassic Röt Formation at Hengelo, The Netherlands", International Journal of Earth Sciences, Vol. 94 (2005) 941-955.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.2.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.511]

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.2.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.511]

30. Urai J. Spiers C., "The effect of grain boundary water on deformation mechanisms and rheology of rocksalt during long-term deformation", in Proc. 6th Conf. Mech. Beh. of Salt (2007).
31. Schléder Z., Urai J. L., "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, Vol. 29 (2007) 241-255.
32. Trimby P. W., Drury M. R., Spiers C. J., "Recognising the crystallographic signature of recrystallisation processes in deformed rocks: a study of experimentally deformed rocksalt", Journal of Structural Geology, Vol. 22 (2000) 1609-1620.
33. Trimby P. W., Prior D. J., Wheeler J., "Grain boundary hierarchy development in a quartz mylonite", Journal of Structural Geology, Vol. (1998) 917-935.
34. Reusch E., "Über eine besondere Gattung von Durchgängen im Steinsalz und Kalkspath", Annalen der Physik, Vol. (1867) 441-451.
35. Wang Z., "Mechanical Properties of Crystalline Materials", Material Science and Engneering, Vol. 208 (1966).
36. Barreiro J. G., Lonardelli I., Wenk H., Dresen G., Rybacki E., Ren Y. Tomé C., "Preferred orientation of anorthite deformed experimentally in Newtonian creep", Earth and Planetary Science Letters, Vol. 264 (2007) 188-207.
37. Elyaszadeh R., Sarkarinejad K. Prior D. J., "Intracrystalline deformation of garnet, wollastonite and pectolite grains during development of a crenulation cleavage in the sheared skarn", Journal of Structural Geology, 101 (2017) (15-25).

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.2.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.511]

38. Drury M. R., Urai J. L., "Deformation-related recrystallization processes", Tectonophysics, Vol. 172 (1990) 235-253.

39. Wenk H., Canova G., Molinari A., Mecking H., "Texture development in halite: comparison of Taylor model and self-consistent theory", Acta metallurgica, Vol. 37 (1989) 2017-2029.

40. Talbot C., Alavi M., "The past of a future syntaxis across the Zagros", Geological Society, London, Special Publications, Vol. 100 (1996) 89-109.

41. Callot J. P., Jahani S., Letouzey J., "The role of pre-existing diapirs in fold and thrust belt development", Thrust belts and foreland basins, Vol. 16 (2007) 309-325.

42. Shea W. T. Kronenberg A. K., "Rheology and deformation mechanisms of an isotropic mica schist", Journal of Geophysical Research: Solid Earth, Vol. 97 (1992) 15201-15237.

۴۳. نوربهشت ا.، "مقدمه‌ای بر بلورشناسی"، انتشارات دانشگاه اصفهان، اصفهان، چاپ چهارم، (۱۳۸۳) ۲۳۳.

44. Brander L., Svahnberg H. Piazolo S., "Brittle-plastic deformation in initially dry rocks at fluid-present conditions: transient behaviour of feldspar at mid-crustal levels", Contributions to Mineralogy and Petrology, Vol. 163 (2012) 403-425.

45. Fukuda J.-i., Okudaira T., Satsukawa T. Michibayashi K., "Solution-precipitation of K-feldspar in deformed granitoids and its relationship to the distribution of water", Tectonophysics, Vol. 532 (2012) 175-185.

46. Menegon L., Pennacchioni G., Heilbronner R. Pittarello L., "Evolution of quartz microstructure and c-axis crystallographic preferred

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1398.13.3.2.7]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.13.3.511]

orientation within ductilely deformed granitoids (Arolla unit, Western Alps)", Journal of Structural Geology, Vol. 30 (2008) 1332-1347.

47. Hickman S. H., Evans B., "Experimental pressure solution in halite: the effect of grain/interphase boundary structure", Journal of the Geological Society, Vol. 148 (1991) 549-560.
48. Swannell N., Palmer M., Barla G. Barla M., "Geotechnical risk management approach for TBM tunnelling in squeezing ground conditions", Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 57 (2016) 201-210.
49. Wang C. Bao L., "Predictive analysis of stress regime and possible squeezing deformation for super-long water conveyance tunnels in Pakistan", International Journal of Mining Science and Technology, Vol. 24 (2014) 825-831.