## بررسی رفتار تغییرشکلی سرپانتینیتهای آمیزه افیولیتی بافت (استان کرمان) و تأثیر آن در توانایی لرزهخیزی منطقه

**نادیه محمدی<sup>(۱وه)</sup>، حمید احمدیپور<sup>۲</sup>و سیما پیغمبری"** ۱. کارشناسی ارشد پترولوژی، گروه زمینشناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید باهنر، کرمان ۲. استادیار گروه زمینشناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید باهنر، کرمان ۳. استادیار گروه زمینشناسی، دانشگاه پیام نور، تهران

تاریخ دریافت: ۸۹/۱۰/۲۳ تاریخ پذیرش: ۹۱/۱۰/۱۱

#### چکیدہ

مجموعه افیولیتی بافت در امتداد دو گسل بزرگ بافت و شهر بابک در جنوب استان کرمان قرار گرفته و در حال حاضر بهصورت یک آمیزه رنگین دیده می شود که خمیره آن سرپانتینیت است. مطالعات پتروفابریکی انجام شده بر روی سرپانتینیتهای این منطقه، نشان میدهد که آنها از نظر تشکیل، یک تاریخ ۵ مرحلهای را از زمان تشکیل تا جایگیری در وضعیت فعلی پشت سر گذاشتهاند که بهترتیب عبارتند از: سرپانتینیتی شدن در جای پریدوتیت های اولیه در کف اقیانوس، تغییر شکل پلاستیک در رخساره شیست سبز که احتمالا به دلیل فرورانش پوسته اقیانوسی نائین – بافت صورت گرفته، آغاز صعود دیاییریک سریانتینیتها با شرایط رژیم تغییر شکل پلاستیک، قرارگرفتن در شرایط رژیم تغییر شکل پلاستیک – شکنا و در نهایت، تحمل تغییر شکل شکنا و جایگیری در نزدیکی سطح زمين. تجزيههای الکترونميکروپروب سرپانتينهای حاصله نشان ميدهد که ترکيب محلولهای سازنده سریانتین در هر مرحله، متفاوت است. عناصر سازگار مانند نیکل، کروم و یا منیزیم در هر مرحله تفاوت واضحی دارند، اما عناصر ناسازگار مانند سدیم و یا پتاسیم تفاوت چندانی نشان نمیدهند. این سنگها در مقابل استرس های وارده، سه رفتار متفاوت را از خود نشان دادهاند که شامل مکانیزمهای تغییر شکل نوع پلاستیک، پلاستیک – شکنا و شکنا است که دو مورد اولی با زمینلرزههای کوچک و یا بدون ایجاد هیچ لرزهای همراه هستند، درحالی که تغییرشکل نوع سوم باعث ایجاد زلزلههای کوچک تا بزرگ می شود. تمامی شواهد ساختاری حاصل از تغییر شکل های مذکور در همه مقیاس ها قابل تشخیص است. ساختارهای پلاستیک فراگیر موجود در سرپانتینیتهای آمیزه رنگین منطقه بافت، موجب گردیده که در این منطقه، حرکت در طول گسلهای بزرگ بافت و شهر بابک تا حدود زیادی مستهلک شده و با زلزلههای بزرگ همراه نباشد. این توجیه با آمار زلزلههای این منطقه نیز تأیید میگردد. با توجه به تحقيقات فوق، مي توان پيش بيني نمود كه احتمالا در آينده نيز وارد آمدن استرس به اين سرپانتينيتها، نباید با زلزلههای بزرگی همراه باشد.

**واژههای کلیدی**: آمیزه افیولیتی بافت، تغییر شکل پلاستیک، سرپانتینیت، لرزهخیزی

<sup>\*</sup> نویسنده مرتبط nadia\_mohammadi@yahoo.com

#### مقدمه

یکی از محصولات مهم دگرسانی هیدروترمال سنگهای اولترامافیک، سرپانتینیتها میباشند که در محیطهای تکتونیکی مختلف ظاهر شده و در اکثر موارد در طول گسلهای بزرگ و فعال قرار دارند. تحقیقاتی که بر روی این سنگها انجام شده، نشان میدهد که آنها میتوانند از نظر رفتار مکانیکی، بهعنوان نرمکننده عمل کرده و بهعلت رفتارهای خاص، تأثیر قابل توجهی بر روی ژئولوژی لیتوسفر اقیانوسی و قارهای داشته باشند (-Can بر روی ژئولوژی لیتوسفر اقیانوسی و قارهای داشته باشند (-can بر روی ژئولوژی لیتوسفر اقیانوسی و قارهای داشته باشند (-can بر روی ژئولوژی لیتوسفر اینانوسی و قارهای داشته باشند (-can بر روی ژئولوژی لیتوسفر اینوسی و قارهای داشته باشند (-can بر روی ژئولوژی لیتوسفر اینوسی و قارهای داشته باشند (-can بر روی ژئولوژی لیتوسفر اینوسی و قارهای داشته باشند (-can بور زرازلههای مختلف نشان داده که در اثر حرکت گسل، بهصورت پلاستیک (شکلپذیر) تغییرشکل پیدا کنند، میتواند مانع بروز زلزلههای مخرب شوند.

مطالعه حاضر، رفتار تغییرشکلی سرپانتینیتهای مجموعه آمیزه رنگین بافت را بررسی میکند. پدیدههای دگرگونی و دگرشکلی وابسته به افیولیتهای استان کرمان، پیش از این نیز مورد مطالعه قرار گرفته است. (1974) Sabzehei ضمن مطالعه مجموعههای افیولیتی اسفندقه، اولین حادثه دگرگونی مشاهده شده در این مجموعهها را دگرگونی استاتیک کف دریا دانسته و دگرشکلیهای پلاستیک سرپانتینیتها را به صعود دیاپیرهای سرپانتینیتی نسبت میدهد. بهزادی (۱۳۷۱) نیز دگرشکلیهای سرپانتینیتها و کرومیتیتهای آمیزه رنگین بافت را مورد مطالعه قرار داده و علت این تغییر شکلها را، حرکات صعودی دیاپیرهای سرپانتینیتی میداند.

در این مطالعه با استفاده از مطالعات قبلی سه هدف مورد بررسی قرار گرفته است. اول: استفاده از ریزساختارهای موجود در سنگهای سرپانتینیتی شده در توجیه تغییر شکلهای بزرگ مقیاس. (2000) Reinen بر اساس مطالعات خود توانست بین رفتار مکانیکی سرپانتینیت (که در طول آزمایشات مربوط به اصطکاک سرپانتینیتها مشاهده کرده بود) و ریزساختارهایی که در طول این آزمایش ها تشکیل شده بودند، ارتباط برقرار کند و سپس این ارتباط را برای پی بردن به لرزه خیزی زون گسلی رفتار سرپانتینیتی در بخش مونتری' کالیفرنیا به کار برد. دوم: بررسی رفتار سرپانتینیتهای مورد مطالعه از نظر تغییر شکلهای نوع شکنا، پلاستیک و شکنا – پلاستیک در طول جایگیری و بعد از آن و سوم: بررسی لرزه خیزی منطقه در آینده با توجه به لرزه خیزی قدیمی<sup>۲</sup> و ساختارهای موجود در سنگها.

در این مطالعه سرپانتینیتهای مجموعه آمیزه رنگین بافت که در طول بخش جنوب شرقی گسل نائین – بافت قرار دارند مورد بررسی قرار گرفته و برای دستیابی به اهداف مذکور، مطالعات در قالب بررسی ساختارهای موجود در سرپانتینیتهای مورد مطالعه

در مقیاسهای ماکروسکوپی و میکروسکوپی، مطالعات SEM و تجزیههای نوع الکترونمیکروپروب انجام شده است.

## روشهای مطالعاتی

در مطالعات صحرایی منطقه مورد مطالعه، هر ۱۴ رخنمون بزرگ و اصلی سرپانتینیتی موجود در محدوده آمیزه رنگین بافت، مورد بررسی قرار گرفتند. تعداد ۱۲ مقطع نازک صیقلی از نمونههای سنگی اولترامافیک برای مطالعات SEM آماده گردید. عکسبرداری از این مقاطع توسط میکروسکوپ الکترونی LEO 1530 (EHT=15.00 kv, Mag=2.00KX, sig-مدل -nal A=BSD) در دانشگاه کارلسروهه آلمان صورت گرفت. از نمونههای سنگی گروه اولترامافیک و سرپانتینیت، ۱۲ مقطع نازک JEOL JXA 8900 SUPER میکروپروب تهیه و آنالیزها توسط دستگاه میکروسکوپ الکترونی مدل -PROBE و جریان اشعهای ۵ نانو آمپر و قطر ۵ میکرومتر در دانشگاه مانستر<sup>۳</sup> آلمان انجام شدند.

#### محيط زمين شناسي سرپانتينيت هاي مورد مطالعه

آمیزه رنگین مورد مطالعه در فاصله ۲۸/۷۵ کیلومتری شمال شرقی شهرستان سیرجان و در استان کرمان قرار دارد. این آمیزه با طول ۸۷/۵ کیلومتر و با روند شمال غرب - جنوب شرق، به موازات زون سنندج - سیرجان تا شهرستان بافت ادامه پیدا کرده است (شکل ۸–۱). منطقه مورد مطالعه با مساحت تقریبی ۶۱۷/۷ کیلومتر مربع بین طولهای جغرافیایی '۵۶ ، ۵۵ و ۲۵/۴ ،۶۰۶ و بافت و شهر بابک قرار گرفته است. این دو گسل از شاخههای فرعی گسل اصلی نائین - بافت هستند (رگرفته و آن الامه همای فرعی گسل اصلی نائین - بافت هستند (رگرفته و با آنها ایمان و باز زمین شناسی، آمیزه رنگین بافت بین دو زون مرز گسله دارد (شکل B-۱). سرپانتینیتهای مورد مطالعه هم به مرز گسله دارد (شکل B-۱). سرپانتینیتهای مورد مطالعه هم به مورت رخنمونهای بزرگ و پراکنده و هم به صورت زمینهای که واحدهای سنگی دیگر را احاطه کرده، با مساحت تقریبی ۲۴ کیلومتر مربع در تمام طول این دو گسل دیده می شوند (شکل ۲).

## مطالعات صحرايي

از آنجایی که بیش ترین پراکندگی رخنمونهای سرپانتینیتی در سه منطقه چهارگنبد، گوغر و بافت می باشد، تمرکز مطالعات نیز بر روی این سه منطقه بوده است. آمیزه رنگین در این منطقه شامل قطعات مختلفی از لیتولوژیهای افیولیتی است که در یک زمینه متشکل از هارزبورژیتها و دونیتهای تکتونیزه و سرپانتینیتی شده قرار دارند. از لیتولوژیهای موجود در این منطقه بازالتهای ریزدانه بسیاردگرسان (در بعضی نقاط با ساختار بالشی)، هارزبورژیتها و دونیتهای سرپانتینیتی شده با درجات

<sup>1.</sup> Monterey county

<sup>2.</sup> Paleoseismicity

<sup>3.</sup> Munster University



شکل ۸. A، نقشه پراکندگی افیولیتهای ایران (Arvin and Robinson, 1994) و موقعیت آمیزه رنگین مورد مطالعه بر روی آن. B، موقعیت زمین شناسی آمیزه رنگین مورد مطالعه (Baft ophiolitic belt) بین زون دگرگونی سنندج – سیرجان و کمربند آتش فشانی ارومیه– دختر.



شکل ۲. نقشه زمینشناسی آمیزه افیولیتی بافت با اقتباس از نقشه ۲۵۰۰۰ ۱ سیرجان، شماره ۱۱۱، (۱۹۹۵). (نمونهها بهطور پراکنده از رخنمونهای سرپانتينيتي منطقه مورد مطالعه برداشت شده است).

متفاوت تبدیل شدگی، گابروهای دگرسان با بلورهای درشتشده یلاژیوکلاز و آمفیبول، لکههای آهکی با رنگ روشن، به میزان کمی دایکها و میکروگابروها، رگههای پیروکسنیتی دگرسانشده، آهکها و چرتهای رادیولاریتی، به میزان خیلی کمتر آمفیبولیت و قطعات لرزولیتی و فلسیکی و همین طور رگههای نازک ذخایر سر **پانتینیتهای آمیزه افیولیتی بافت** سولفیدی و کرومیتیتی میباشد. لیتولوژیهای موجود بهصورت قطعاتی با اندازههای متفاوت (حداکثر صد متر) در زمینه سرپانتینیتی پراکندهاند و اکثر قطعات کوچکتر بهصورت کشیده و یا بیضی شکل درآمدهاند و توسط سرپانتینیتهای شیستوز در بر گرفته شدهاند.

> شواهد د گرشکلی در سرپانتینیت های منطقه در این بخش، ابتدا شواهد صحرایی و میکروسکپی مرتبط

با دگرشکلی در منطقه ارائه (جدول ۱) و سپس سازوکارهای احتمالی به بحث و بررسی گذاشته میشود.

## شواهد ساختاری حاصل از رفتار پلاستیک بوديناژ

تودههای فلسیک موجود در آمیزه رنگین مورد مطالعه، از جمله لیتولوژیهای نوع سخت هستند که با قرارگرفتن در یک لیتولوژی نرم (در این جا سریانتینیت)، بودیناژها را می سازند (شکل bو a-۳). علت رفتار متفاوت این دو لیتولوژی در برابر استرس، متفاوت بودن عملکرد سیستمهای لغزشی کانیهای موجود در آنهاست؛ بدینصورت که سیستمهای لغزشی کانیهای گروه سرپانتین در دماهای خیلی کمتر و زودتر از کانیهای موجود در لایه فلسیکی

(فلدسپات یا کوارتز) به کار میافتند و باعث ایجاد حالت خمیری و پلاستیک مانند در سنگ سرپانتینیتی می شوند؛ این در حالی است که در این شرایط هنوز سیستمهای لغزشی فلدسپات و یا کوارتز عمل نکرده و در مقابل استرسهای وارده، رفتار شکننده را از خود نشان می دهند و به همین دلیل، قطعه – قطعه شده و به صورت بودیناژ در می آیند (Passchier and Truw, 1992).

#### فابريك C-S

در این نوع فابریک، شیستوزیته (S) به وسیله جهتیافتگی دانههای سرپانتین به وجود میآید که میتواند نتیجه رشد همزمان با تکتونیک آنها باشد (Reinen, 2000). فولیاسیون نوع C بهوسیله مجموعهای از برشهای مجزا مشخص میشود که موازی با بُرش اصلی بوده، با شیستوزیته نوع S زاویه ساخته و معمولاً آنها را قطع میکند. شکل o-۳ این فابریک را در اصلی یک برش راستگرد بوده که در امتداد آن، رشتههای ضخیم آنتی گوریتی سبزرنگ تشکیل شده است. این حرکت راستگرد باعث ایجاد یک شیستوزیته در سنگ شده که با وجود رگههای شیستوزیته، خود باعث چرخیدن قطعات قدیمی تر شده و اشکال زیگموئیدال مانندی را ساخته است. در مرز این قطعات در اثر کشش، فضاهای خالی ایجاد شده که برای رشد هر نوع کانی سرپانتین مناسب هستند. برشهای ایجاد شده به موررت خمیده

بوده و مستقيم نيستند.

در مقیاس میکروسکوپی نیز دقیقاً چنین اشکالی دیده می شوند (شکل b-۳). در این مورد نیز برش اصلی با تبلور آنتی گوریت ها همراه بوده و این کانی ها به شکل تیغه های عمودی از دو طرف سطح بازشدگی به سمت مرکز شکاف رشد کرده اند. برش های دوم که شیستوزیته را ساخته اند (S)، توسط رشته های ظریف کریزوتیلی مشخص می شوند و برش سوم که به صورت مواج دو برش قبلی را قطع کرده (C) توسط رشته های کریزوتیل و یا تالک پر شده است. این برش ها نیز اشکال زیگموئیدال مانند را ساخته اند و درون بعضی از آن ها شکل های دروغین ار تو پیروکسن کاملاً باستیتی قرار دارد. همراه با تمامی این رگه ها، مگنتیت نیز رشد کرده که باعث تشخیص بهتر فابریکها می شود.

در تصاویر SEM تهیه شده از این نوع سنگها نیز این فابریک قابل تشخیص است. در شکل e–۳، دانههای ریز مگنتیتی که بهرنگ روشن دیده میشوند، نشاندهنده شیستوزیته اصلی هستند که در اثر رشد همزمان با دانههای سرپانتین ایجاد شده است.

#### شيستوزيته

در سنگهای سرپانتینیتی، به علت وجود کانیهای ورقهای سرپانتین، در هنگام اعمال استرس، ورقهها بر روی یکدیگر لغزیده و استرس از آنها عبور میکند. در این حالت، سنگ سرپانتینیتی بهصورت صفحاتی در میآید که صفحات، مانند قطعات صابون بر روی یکدیگر میلغزند. در واقع بهترین

Reinen et al., 1991, Chester et ابا اقتباس از التباس از التباس از شکنا و شکنا و شکنا در سرپانتينيتهاي منطقه مورد مطالعه (با اقتباس از د. (.al., 1993, Passchier and Truw, 1998).

شكنا	پلاستيک-شکنا	پلاستىك	رژیم تغییر شکلی:		
rate weakening	_	rate strengthening	 رفتار ساختمانی: انواع ساختارها:		
- برش های ریدل	- گسل،های رشتهای- لغزشی	– فابریک S-C	C		
– دور دسلی – قطعات شکسته	– ر که پر کننده شکاف یا crack-seal vein	– بودينار – شيستوزيته			
- شكستگىھاى ضربدرىشكل		- ساختھای چشمی			
- شكستگىھاى شبكەاي		- كلاستھاي سرپانتينيتي			
- گسلهای عادی، معکوس و امتدادلغز		- قطعات بیضی شکل با سرپانتین های ریشهمانند در اطراف آن (فاکوئید)			
محلى	_	فراگیر	تغيير شكل كلي:		
لرزەاي	غير لرزهاى	غیر لرزهای	رفتار زمینشناسی:		
آرى	خير	خير	خطر زلزله		

www.SID.ir

حالتي كه سریانتینیت مي تواند این استرس را از خود عبور دهد، تشکیل حالتهای صفحهای و عدسیمانند است، زیرا با ایجاد این نوع اشکال، اگر استرسهای عمودی به سنگ وارد شود. صفحات کشیدهتر می گردند و چنانچه استرس افقی وارد شود. صفحات موجود بر روی یکدیگر لغزیده و به این ترتیب سنگ به استرس جواب مي دهد. حاصل اين حركات و اشكال حاصله، این است که ظاهر سنگ شیستوزیته پیدا میکند (شکل f–۳). در مقیاس میکروسکوپی، شیستوزیته با وجود بافتهای نواری ا مشخص می شود که توسط کانی لیزاردیت شکل گرفته است. Francis (1956) این بافت را با اصطلاحهای رشد نواری و یا رشد دیوارهمانند ٔ معرفی کرده و آن را مجموعهای از رگههای نیمهموازی با یکدیگر میداند که در بین آنها هیچ بافت شبکهای وجود نداشته و معمولاً با رگهها یا عدسیهای مگنتیتی همراه هستند. در نور طبیعی وجود رگههای مگنتیتی باعث میشود كه شيستوزيته بهتر قابل تشخيص باشد (شكل g-۳). اين نوع شیستوزیته میتواند با جایگیری سنگها در نزدیکی سطح زمین مرتبط باشد (Andreani et al., 2005). در تصاویر SEM تهیه شده از سریانتینیتهای منطقه نیز اشکال شیستوزیته قابل تشخیص است (شکل h–۳).

#### ساختهای چشمی

در هنگام تشکیل شیستوزیته، هرگاه در سرپانتینیتها قطعه سخت تری به دام افتاده باشد، آن قطعه نیز هم زمان با کشیدگی صفحات سرپانتینیتی، کشیده شده و به صورت بیضی شکل در می آید و سرپانتینیتهای شیستوز در اطراف آن ها چرخیده و ساخت های چشمی را می سازند (شکل i-۳) . چنین ساخت هایی در واحدهای اولترامافیکی غرب کالیفرنیا نیز گزارش داده شده است (Page, 1968; Page et al., 1998).

در مقیاس میکروسکوپی این حالت زمانی دیده می شود که بلورهای ارتوپیروکسن، اسپینل و یا بقایای بلورهای الیوین سالم، بهصورت پورفیروکلاست عمل کرده و سرپانتینهای شیستوز با بافت نواری در اطراف بلور قرار می گیرند (شکل j–۳). گاهی نیز مجموعه کانیهای الیوین، پیروکسن و اسپینل که از قبل در کنار هم متبلور شده بودند، در امتداد شیستوزیته کشیده می شوند و ساختهای چشمی را می سازند. در تصاویر SEM معمولاً بقایای دانههای بسیار ریز الیوین، ساختهای چشمی را نشان می دهند (شکل k–۳).

## قطعات کشیده و بیضی شکل با حاشیه سرپانتین های ریشه مانند (فاکوئید)

تقریباً تمامی قطعاتی که در زمینه سرپانتینیتی قرار گرفتهاند، به حالت کشیده، بیضی شکل و یا مدور درآمدهاند. گاهی فاز

تغییر شکل بعدی که همراه با سیالات است، موجب می شود که کانی های سرپانتین (اَنتی گوریت و یا کریزوتیل) به صورت شعاعی و عمود بر سطح قطعه بیضی شکل رشد کنند (تا قطر حداکثر ۲۰ سانتی متر) و کل قطعه را دربر بگیرند (شکل ا–۳). در واقع تشکیل این نوع سرپانتین های ریشه مانند در اطراف قطعات سخت ر، مانع بروز حرکت در طول سنگ شده و استرس وارده به سنگ با تشکیل این کانی ها، انرژی خود را از دست می دهد و مانع ایجاد لرزش در منطقه می شود. یک نمونه از این سرپانتین های ریشه مانند مورد تجزیه XRD قرار گرفت که پیک های حاصله به سرپانتین نوع آنتی گوریت نزدیک تر است.

در مقیاس میکروسکوپی، این اشکال توسط کانی های ارتوپیروکسن، کرماسپینل و یا بقایای الیوین سالم قابل تشخیص است که یا توسط آنتی گوریت های ریشهمانند و یا کریزوتیل های رشتهای در بر گرفته شدهاند (شکل m, n–۳).

#### کلاستهای سرپانتینیتی

کلاستها یا قطعات پریدوتیتی از قبل سرپانتینیتی شده که هیچ تغییرشکلی بر آنها اعمال نشده و در این منطقه توسط سرپانتینیتهای شیستوز دربرگرفته شدهاند (شکل ٥–٣)، درست مانند پورفیروکلاست در سنگهای دگرگونی عمل کرده و در اطراف آنها بخش سایه فشاری و بخش کلاهک کرنشی<sup>۳</sup> قابل تشخیص است. این اجزا در شکل p–۳ نشان داده شدهاند.

در مقیاس میکروسکوپی نیز این اجزا قابل تشخیص هستند با این تفاوت که، پیروکسن و یا الیوین نقش پورفیروکلاست را داشته و سرپانتین (لیزاردیت) با بافت نواری در اطراف آن قرار گرفته و شیستوزیته را ساخته است (شکل p-۳).

# شواهد ساختاری حاصل از رفتار پلاستیک- شکنا در سرپانتینیِتهای آمیزه افیولیتی بافت

معمولا این رژیم تغییر شکلی در مقیاس ماکروسکوپی توسط گسلهای نوع «رشتهای لغزشی» و در مقیاس میکروسکوپی توسط ترکهای ریز برشی قابل تشخیص است (Bellot, 2008). شکافهای ریز توسط رشتههای کریزوتیلی پر شدهاند و در برخی از سنگهای منطقه مورد مطالعه دیده میشوند (شکل و رشد این دسته از سرپانتینها (کریزوتیلها) که رشد آنها در رگهها به شکل نواری است، ذکر شده است. این مدل شامل یک بازشدگی فزاینده است که با پرشدن کامل شکستگیهای متوالی کوچک ادامه می یابد (Ramsay, 1980) و ممکن است با صدها شکستگی متوالی و کوچک همراه باشد. بازشدگی دوباره شکافها بعد از پرشدن توسط نوسانهای فشار سیال و یا فشار کل (Ramsay, 1980) و یا توسط فشار حاصل از تبلور یا فشار کل (Ramsay, 1980) و یا توسط فشار حاصل از تبلور

<sup>1.</sup> Ribbon

<sup>2.</sup> Banded growth or curtain-like growth

<sup>3.</sup> Strain Cap

<sup>4.</sup> Crack-seal



شکل ۳. انواع ساختارهای ایجادشده در اثر تغییرشکل نوع پلاستیک در سرپانتینیتهای منطقه مورد مطالعه.

قسمت a، ایجاد بودیناژ در اثر کشیده شدن توده فلسیکی سفیدرنگ در زمینه سرپانتینیی. قسمت d، تشکیل بودیناژ در اثر کشیده شدن توده بازالتی تیره رنگ که بعداً در اثر قرارگیری در محیط شکنا دچار چندین شکستگی شده است. قسمت d ، c و e بهترتیب فلبریک c-8 را در سه مقیاس ماکروسکوپی، میکروسکوپی و تصویر SEM نشان میدهند (برای توضیح بیش تر به متن مراجعه شود). قسمت f، g و h بهترتیب فلبریک c-8 را در سه مقیاس ماکروسکوپی، میکروسکوپی و تصویر SEM نشان میدهند (برای توضیح بیش تر به متن مراجعه شود). قسمت f، g و h بهترتیب فلبریک c-8 را در سه مقیاس ماکروسکوپی، میکروسکوپی و تصویر SEM نشان میدهند (توضیح بیش تر در متن آمده است). قسمت f، تصویر شماتیک ساخت چشمی که به وسیله قطعه دونیتی سالم تر ایجاد و توسط سرپانتینیتهای خردشده در برگرفته شده است. قسمت j، ساخت چشمی در مقیاس میکروسکوپی که به وسیله بلور ارتوپیروکسن ایجاد و توسط بافت نواری در بر گرفته شده است. قسمت j، ساخت چشمی در مقیاس میکروسکوپی که به وسیله بلور ارتوپیروکسن ایجاد و توسط نوع لیزاردیت قرار گرفته شده است. قسمت s معی در تصویر SEM که توسط بقایای الیوینهای سالم ایجاد شده و در اطراف آنها نیز سرپانتینهای نوع لیزاردیت قرار گرفته شده است.

بوده، آنتی گوریتهای ریشه مانند بهصورت عمود بر قطعه بازالتی در اطراف آن رشد کردهاند و کل قطعه بازالتی را احاطه کردهاند. شکستگیهای بعدی به موازات حلقه آنتی گوریتی ایجاد شدهاند که توسط مگنزیت و یا کریزوتیل پر شدهاند. کل مجموعه در زمینه سرپانتینیتهای خردشده قرار گرفتهاند. قسمت m، فاکوئید در مقیاس میکروسکوپی که بهوسیله بلور ارتوپیروکسن باستیتی شده ایجاد و توسط آنتی گوریتهای ریشه مانند احاطه شده است. قسمت n، فاکوئید در نور طبیعی که شکل اولیه بلور ارتوپیرکسن باستیتی شده و مان مگنتیت با باستیت، حفظ شده و مگنتیتهای ایجادشده در حاشیه بلور ارتوپیروکسن باستیتی شده ایجاد و توسط آنتی گوریتهای ریشه مانند احاطه شده است. نور طبیعی که شکل اولیه بلور ارتوپیرکسن باستیتی شده توسط رشد همزمان مگنتیت با باستیت، حفظ شده و مگنتیتهای ایجادشده در حاشیه بلور ارتوپیروکسن اولیه قرار گرفتهاند. قسمت ٥، کلاست سرپانتینیتی در زمینه سرپانتینیتهای خردشده. قسمت p، بلور ارتوپیروکسن که توسط سرپانتینیتهای شیا بافت نواری احاطه گرفته شده است و در آن بخش سایه فشاری و بخش estrain cap قابل تشخیص است. قسمت p، بلور ارتوپیروکسن که توسط سرپانتینی در ای فادر دورای احمود رشیه و در آن بخش مهاری و در مد می ماند. و مگنتیت با استیت، منفر شده و مگنتیت یکه توسط سرپانتینیتهای شیستوز در بر شده و در آن بخش می می مقاری و بخش strain cap دی در ده می می و دونیت یکه، ارتوپیروکسن که توسط سرپانتینیت های شده ا



شکل ۴. ساختارهای ایجادشده در اثر تغییرشکل نوع پلاستیک- شکنا در سرپانتینیتهای منطقه مورد مطالعه. قسمت a، رگه نوع «پرکننده شکاف» در نور متقاطع. قسمت b، تصویر شماتیک رگه قسمت a که برای تشکیل این رگه حداقل ۹ مرحله رشدی (ایجاد شکاف، ورود سیالات به شکاف و رشد کریزوتیل برای هر مرحله) قابل تشخیص است که در نور متقاطع با بیرفرژانس پایینتر نسبت به اطراف دیده میشوند. خطهای تیره ضخیم خاموشی محلی رشتههای کریزوتیل را در نور متقاطع نشان میدهند. قسمت a، یک رگه نوع «پرکننده شکاف» در سنگ مادر هارزبورژیتی که پس از عبور از رژیم تغییرشکلی پلاستیک-شکنا در محدوده رژیم تغییرشکلی نوع شکنا قرار گرفته و در آن آثار چندین گسل خوردگی (حاصل رژیم تغییر شکلی شکنا) دیده میشود که باعث این رگه شکنا در محدوده رژیم تغییرشکلی نوع شکنا قرار گرفته و در آن آثار چندین گسل خوردگی (حاصل رژیم تغییر شکلی شکنا) دیده میشود که باعث جابجایی

شده است. در نتیجه، بخشهای نفوذپذیری ایجاد شده که سیالات در آنها نفوذ و با رسوبگذاری مواد محلول خود، قطعات سرپانتینیت را به یکدیگر متصل و برشها یا گوژهای گسلی (کاتاکلازیت) را در منطقه ساختهاند. در واقع تغییر شکل نوع کاتاکلازیت، مکانیزمی است که فقط سنگ را خرد میکند و قطعات داخل آن و یا بلورهای موجود در قطعات هیچ تغییرشکل ساختمانی پیدا نمیکنند (شکل ه-۵).

#### شکستگیهای شبکهای

در منطقه مورد مطالعه (حوالی گوغر) یک رخنمون شبکهای از سرپانتینیت دیده میشود (شکل d-۵) که وجود شکستگیهای متقاطع به آن شکل شبکهای داده و وجود همین شکستگیهای فراوان (که توسط کلسیت یا مگنزیت پر شدهاند)، مانع فرسایش آن شده است. سنگ مادر آن، هارزبورژیت بوده و حاوی رگههای چند سانتیمتری پیروکسنیت است. اکثر شکستگیها با زاویه ۹۰ درجه یکدیگر را قطع کردهاند.

## بُرشهای ریدل'

این ساخت حداقل توسط سه بُرش در سنگهای سرپانتینیتی قابل تشخیص است. اولین برش نوع Y است که به موازات مرز گسله و در جهت گسلخوردگی اصلی منطقه قرار گرفته و برش نوع دوم (R) با زاویه تقریبی ۴۵ درجه، برش نوع اول را قطع کرده است. برش نوع سوم با زاویه تقریباً ۹۰ درجه، برش نوع دوم را قطع میکند (شکل ۵-۵). در مقیاس میکروسکوپی این ساخت با وجود رگههای مختلف کلسیت، مگنزیت، سرپانتین، مگنتیت و یا ترمولیت مشخص می شود (شکل ۵-۵). شکل ۹-۵، این ساخت را در تصویر SEM نشان میدهد.

کانی ها در رگه، افزایش می یابد (Wiltschko and Morse, 2001). به عقیده (Bellot (2008) تشکیل ترکهای ریز بُرشی و رشد رگەھاي كريزوتيلي نوع پرشدگي شكاف، بايد همزمان باشند. برای تشکیل این نوع رگهها، سه مرحله توسط .Andreani et al (2004) ارائه شده است که شامل بازشدگی شکاف، انتقال عناصر توسط محلولها و تشکیل کانی در شکاف است. شکل ۴-۴، این نوع رگههای نواری و چگونگی رشد کانی های رشتهای کریزوتیل را در آن نشان میدهد که حداقل نَه مرحله رشدی (ایجاد شکاف، ورود سیالات به درون شکاف و تشکیل کریزوتیل برای هر مرحله) آنها با بیرفرژانس پایین تر خود در نور متقاطع، به راحتی قابل تشخیص هستند. این رگهها مشابه با رگههایی هستند که Andreani et al. (2004)، معرفي كردهاند و تشكيل أنها را مختص شرایط مرطوب و دمای نسبتاً پایین دانستهاند. آنها اظهار داشتهاند که توسعه چنین رگههایی بهطور محلی، می تواند مناطق ضعیفی را درون تودههای سرپانتینیتی ایجاد و منطقه را برای تغییرشکل بیشتر در آینده آماده کند. تحقیقاتی که (Bellot (2008) بر روی ساختارهای حاصل از رفتار تغییرشکلی پلاستیک - شکنا مربوط به سرپانتينيتها انجام داده، نشان مي دهد كه به طور كلي اين نوع ساختارها با ایجاد یک رفتار غیرلرزهای همراه هستند؛ بنابراین وجود این نوع ساختارها در منطقه مورد مطالعه را نیز می توان با رفتار غیر لرزهای در سرپانتینیتها همراه دانست.

شواهد ساختاری حاصل از رفتار شکنا در سرپانتینیتهای آمیزه افیولیتی بافت گوژ گسلی عملکرد گسلها در نزدیکی سطح (که دما و فشار پایین است و سنگها در محدوده شکنا قرار دارند) باعث گسلخوردگی سرپانتینیتهای موجود در منطقه، و شکسته و خردشدن آنها

بررسی رفتار تغییر شکلی سرپانتینیتهای...

#### قطعات شكسته

با ایجاد استرس بر روی قطعات سالم موجود در آمیزه رنگین مورد مطالعه، انواع شکستگی در آنها ایجاد شده و باعث قطعهقطعهشدن آنها شده است (شکل f–۵). در مقیاس میکروسکوپی این نوع ساخت توسط رگههای قبلی مشخص میشود که قطعه قطعه شدهاند (شکل g–۵) و این شکستگیها در مقیاس بسیار کوچکتر (SEM) نیز قابل مشاهده می باشند (شکل d–۵).

## شکستگیهای ضربدریشکل

از دیگر شواهد برای رفتار شکنندگی سرپانتینیتها، شکستگیهای ضربدریشکل است (شکل i–۵) که گاهی این شکستگیها باعث شده که رشد بعدی کانیهای سرپانتین در همان محلها افزایش یابد.

در مقیاس میکروسکوپی نیز این ساخت توسط رگههایی دیده می شود که به صورت ضربدری یکدیگر را قطع کرده اند. در شکل می شود که به صورت ضربدری یکدیگر را قطع کرده اند. در شکل م. این شکستگی ها توسط رشته های ظریف کریزوتیلی پر شده اند و قسمت k-۵ شکستگی های ضربدری شکل در تصویر SEM را نشان می دهد که اولین شکستگی توسط رشته های کریزوتیل و شکستگی بعدی که رگه اولی را قطع کرده، توسط لیزاردیت پر شده است.

#### گسلهای عادی، معکوس و امتدادلغز

از جمله شاخصهای گسلی در منطقه مورد مطالعه، آینههای گسلی هستند که در اکثر نقاط بر روی سطح آنها، کانیهای گروه سرپانتین رشد کرده و سطح گسل به رنگ سبز و یا آبی تا بنفش در آمده است. قطعات سخت تر که در زمینه سرپانتینیتهای شیستوز قرار گرفتهاند، گسل خوردگیها را به خوبی نشان میدهند (شکل ا-۵). در مقیاس میکروسکوپی و تصاویر SEM نیز وجود گسلها به خوبی قابل تشخیص است که باعث جابجاشدگی رگههای قبلی (مانند رگههای سرپانتینیتی) شدهاند (شکل mm-۵ به ترتیب).

#### بحث

در آزمایشات اصطکاکی که توسط (1994) Moore et al. (1996, 1991) در Reinen and Tullis (1995) و Moore et al. (1996, 1991) در شرایط پوسته ای بر روی سرپانتینیت ها صورت گرفت، دو رژیم مکانیکی پلاستیک و شکنا در این سنگها تشخیص داده شد. بعدها Bellot (2008) رژیم تغییر شکلی حدواسط این دو یعنی رژیم مکانیکی پلاستیک – شکنا را نیز معرفی کرد. در بحث زیر به توضیح جداگانه هر کدام از آنها می پردازیم:

## رفتار مکانیکی سرپانتینیتها در رژیم تغییرشکلی پلاستیک

تغيير شكل نوع پلاستيك' در محدوده فشاري بالا يعنى بيش از ۴۰۰ مگاپاسکال (در عمق های بیش تر) در سنگ های سرپانتینیتی به وجود مي آيد (Escartin et al., 1997). در اين نوع تغيير شكل، مقاومت اصطكاكي مربوط به لغزش، بهصورت خطي با لگاريتم طبیعی سرعت لغزش، افزایش مییابد. در این رژیم، فقط رفتار تحکيم اصطکاک می تواند وجود داشته باشد و تغيير شکل بهصورت فراگیر ۳ در تمام سطوح گسترش می یابد. این نوع تغییر شکل در سرپانتینیتها نتیجه خزش گسلی پایدار است. تغییر شکل فراگیر در سرپانتینیتها، یک جهتیافتگی ترجیحی از دانههای سرپانتین و یا فابریک S-C خیلی قوی ایجاد میکند. جهتیافتگی دانههای سرپانتین باید نتیجه رشد همزمان آنها با تکتونیک باشد، زیرا آزمایشات در دمای اتاق و بدون اضافهشدن هیچ سیالی انجام شدهاند و بعید بهنظر میرسد که دانههای موازی سرپانتین در طول آزمایش متبلور شده باشند. بنابراین این احتمال وجود دارد که دانههای موازی سرپانتین بهطور قابل توجهی در طول جريان كاتاكلاستيك قطعات گوژ سرپانتينيتي، چرخيده باشند (Reinen, 2000). این آزمایش با تجربیات .Escartin et al (1997) نيز قابل مقايسه است. اين نوع تغيير شكل، با ايجاد لرزههای کوچک و یا بدون ایجاد هیچ لرزهای همراه است.

## رفتار مکانیکی سرپانتینیتها در رژیم تغییرشکلی پلاستیک- شکنا<sup>†</sup>

این رژیم تغییر شکلی در محدوده بین ۲۰۰ تا ۴۰۰ مگاپاسکال و در دمای اتاق تشکیل می شود (Escartin et al., 1997). در مقیاس ماکروسکوپی توسط گسل های نوع «رشته ای لغزشی»<sup>۵</sup> و در مقیاس میکروسکوپی توسط ترکهای ریز برشی<sup>۶</sup> قابل تشخیص است (Bellot, 2008).

رفتار مکانیکی سرپانتینیتها در رژیم تغییرشکلی شکنا

تغییر شکل نوع شکنا در محدوده فشاری پایین یعنی از صفر تا ۲۰۰ مگاپاسکال (در شرایط نزدیک سطح زمین یا روی سطح زمین) در سنگهای سرپانتینیتی به وجود می آید (...Escartin et al) (1997). در این رژیم در ابتدا اصطکاک افزایش می یابد، سپس با افزایش سرعت لغزش، اصطکاک کاهش یافته تا به یک میزان ثابتی می رسد. در این رژیم ممکن است هر دو رفتار تحکیم و یا تضعیف اتفاق بیفتد (Reinen, 2000). رفتار تحکیم به علت خزش گسلی پایدار بوده و لرزهای است، در حالی که رفتار تضعیف، پتانسیل لغزش غیر پایدار داشته و با زلزله همراه است (Rice Rice). این نوع تغییر شکل به صورت

Plastic-brittle
Slikenfibers

<sup>1.</sup> Ductile

<sup>2.</sup> Rate-strengthening

<sup>3.</sup> Distributed

<sup>6.</sup> Shear microcracks



شکل ۵ انواع ساختارهای ایجادشده در اثر تغییرشکل نوع شکنا در سرپانتینیتهای منطقه مورد مطالعه. قسمت ۵، گوژ گسلی سرپانتینیتی که در زمینه مگنزیتی قرار گرفتهاند. قسمت ۵ شکستگیهای شبکه مانند در توده سرپانتینیتی که شکستگیها توسط کلسیت یا مگنزیت پر شدهاند. قسمت c و b و e به ترتیب بُرشهای ریدل را در سه مقیاس ماکروسکوپی، میکروسکوپی و تصویر SEM نشان میدهند (برای توضیح بیش تر به متن مراجعه شود). قسمت f، یک قطعه فلسیکی که در اثر استرس به شدت شکسته و خردشده است. قسمت g، قطعات شکسته در مقیاس میکروسکوپی که توسط تکه تکهشدن رگه کریزوتیلی در این شکل مشخص است و قسمت h، نیز همین موضوع را در تصویر SEM نشان میدهد. قسمت i، شکستگیهای ضربدری شکل در مقیاس ماکروسکوپی که در محل شکستگیها رشد کانیهای سرپانتین افزایش یافته است. قسمت g، قطعات شکستگیهای ضربدری شکل در مقیاس ماکروسکوپی که و قائم کریزوتیل پر شدهاند. قسمت h، نیز همین موضوع را در تصویر SEM نشان میدهد. قسمت i، شکستگیهای ضربدری شکل در مقیاس ماکروسکوپی که و قائم کریزوتیل پر شدهاند. قسمت h، نیز همین موضوع را در تصویر SEM نشان میدهد. قسمت i، شکستگیهای ضربدری شکل در مقیاس ماکروسکوپی که را و قائم کریزوتیل پر شدهاند. قسمت h، شکستگیهای ضربدری شکل در مقیاس میکروسکوپی که توسط رشتههای ظریف رگه اولی را قطع کرده، توسط لیزاردیت پر شده است. قسمت ا، یک قطعه گابرویی که دو بار توسط گسل نوع عادی جابجا شده و به شدت خردشده قرار گرفته است. قسمت h، یک قطعه گابرویی که دو بار توسط گسل نوع عادی جابجا شده است. قسمت n، رشد دو رگه به شدت خردشده قرار گرفته است. قسمت h، یک قطعه گابرویی که دو بار توسط گسل نوع عادی جابجا شده است. قسمت n، رشد دو به قائم کریزوتیل پر زماند. آنده است. قسمت ا، یک قطعه گابرویی که دو بار توسط گسل نوع عادی جابجا شده است. قسمت n، رشد دو رگه به شدت خردشده قرار گرفته است. قسمت n، رگه لیزاردیتی در مقیاس میکروسکوپی که دو بار توسط گسل خوردگی، جابجا شده است. آنتیگوریتی درون یک بلور ار توپیروکسن که رگه نازک تر آنتیگوریتی چندین گسل خوردگی را نشان میدهد که در امتداد آنها جابجا شده است (ار توپیروکسن: sopx

مها ایجاد شبکهای، نواری و یا ساعت شنی ایجاد و رگههای کریزوتیل ±
مگتیت بر روی این بافتها توسعه پیدا کرده است. بنا به تحقیقات
مگتیت بر روی این بافتها توسعه پیدا کرده است. بنا به تحقیقات
یک بلور سالم الیوین تا از بینرفتن کامل آن، ۷ مرحله معرفی شده
منطقه
است. با پیشرفت واکنش سیال/سنگ، تشکیل کانیهای لیزاردیت
ساختاری باعث تشکیل نوعی منطقهبندی ساختاری می شود. منطقهبندی رشکل و ایجاد شده، رشد چندمرحلهای لیزاردیت به سمت مرکز الیوین را

بهطور واضح نشان می دهد. در همین مرحله ارتوپیروکسن به سرپانتین (باستیت) ± مگنتیت ± تالک ± ترمولیت و دیگر کانی ها تجزیه شده است. اکثر این کانی ها به موازات کلیواژهای اولیه در بلور ارتوپیروکسن رشد کردهاند. در سنگهای کاملاً سرپانتینیتی شده، بلورهای ارتوپیروکسن کاملاً باستیتی شدهاند. در جاهایی که باستیتی شدن با تشکیل مگنتیت همراه بوده، دانه های بسیار ریز مگنتیت در حاشیه بلور ارتوپیروکسن اولیه قرار گرفتهاند و باعث شده که شکل اولیه بلور ارتوپیروکسن، قابل تشخیص باشد (شکل ۳، قسمت (1979) نیز گزارش شده است. کرم اسپینل ها نیز اکثراً از حاشیه به فریت-کرومیت، کلریت کرمدار و یا مگنتیت تبدیل شدهاند.

## مرحله دوم: تغییر شکل پلاستیک در رخساره شیست سبز (احتمالاً به دلیل فرورانش پوسته اقیانوسی سرپانتینیتیشده)

در این مرحله احتمالاً پوسته اقیانوسی - که پریدوتیتهای موجود در آن درجات متفاوتی از سرپانتینیتیشدن را پشت سر گذاشتهاند- شروع به فرورانش میکند. فرورانش در کمربند کوهزایی بین کرمان و نیریز که منطقه مورد مطالعه در این کمربند قرار دارد، توسط (Shahabpour (2005) نیز بیان شده است. با تشکیل شرایط مطلوب، آنتی گوریت تالک بر روی بافت شبکهای قبلی شروع به رشد می کند. رشد آنتی گوریت در امتداد شکافهایی ديده مي شود كه در اين مرحله ايجاد شدهاند. با عبور سيال از اين شكافها، آنتي گوريت بهاحتمال زياد بهصورت تيغههايي عمود بر سطح شکاف، از دوطرف رشد کرده و باعث از بینرفتن لیزاردیت و بافت شبکهای قبلی شده است (احمدی پور و محمدی، ۱۳۹۱). مطالعات (Boudier et al. (2009) با استفاده از عكس های TEM، نشان داده است که آنتی گوریت روی سطحی که تغییرشکل بر آن اعمال میشده، هستهبندی کرده و الیوین اولیه را از بین میبرد. این هستهبندی کمی بعد از توقف تغییرشکل نیز ادامه می یابد. با توجه به مجموعه کانیایی موجود در سرپانتینیتهای منطقه مورد مطالعه، بهاحتمال زیاد درجه دگرگونی در این مرحله تا شرایط رخساره شیست سبز صورت گرفته است. زیرا از طرفی دیگر مطالعاتی که بر روی شرایط پایداری کانی های گروه سرپانتین صورت گرفته (Güartekin and Albayrak, 2006)، نیز نشان داده

محلی به همراه زلزلههای کوچک تا بزرگ در سرپانتینیتها ایجاد و در آزمایشگاه در قالب بُرشهای ریدل دیده شده است -Pass) chier and Truw., 1998).

## مکانیزمهای احتمالی تغییر شکل سرپانتینیتهای منطقه مورد مطالعه

در سرپانتینیتهای منطقه مورد مطالعه شواهد ساختاری مختلفی دیده می شود که هم می تواند نشانه نوع تغییر شکل و هم نحوه جایگزینی سنگها باشد. تحقیقاتی که تاکنون روی سرپانتینیتهای بخش مونتری در کالیفرنیا (Reinen, 2000)، انجام شده، نشان می دهد که هر کدام از شیوههای تغییر شکل، می تواند ساختمانهای خاص و رفتارهای رئولوژیکی خاصی را در سرپانتینیت به وجود آورد. همان گونه که در جدول ۱ نیز دیده می شود، سرپانتینیتهای منطقه مورد مطالعه، تحت تأثیر ۳ مکانیزم پلاستیک، پلاستیک – شکنا و شکنا در مقیاسهای مختلف و با ساختارهای متفاوت، تغییر شکل یافته اند.

## تاریخ تحول احتمالی سرپانتینیتهای منطقه با توجه به ریزساختهای موجود در آنها

به منظور تشریح دقیق سرگذشت آمیزه رنگین مورد مطالعه، مراحل مختلف سرگذشت سنگهای سرپانتینیتی منطقه از ابتدای سرپانتینیتی شدن اولیه سنگ مادر آن (پریدو تیت) در کف اقیانوس تا قرارگیری آن در نزدیکی سطح زمین، با توجه به ساخت و بافتهای به ارثرسیده در سرپانتینیتها، مورد مطالعه قرار گرفته است. در واقع سعی شده با استفاده از روابط جانشینی' یا منقوش شدگی، تاریخچه احتمالی سنگی مورد مطالعه بازسازی شود. مطالعات نشان می دهد که برای نمونههای سنگی مذکور، حداقل ۵ تاریخ مجزا قابل تشخیص است که به ترتیب شامل مراحل زیر می باشد:

## مرحله اول: سرپانتینیتی شدن درجای ٔ پریدوتیت های اولیه در کف اقیانوس

سرپانتینیتی شدن اولیه پریدو تیت های گوشته ای، احتمالاً به وسیله نفوذ آب توسط شکستگی های موجود در پوسته اقیانوسی (در رژیم شکنا و دمای زیر ۶۰۰–۵۰۰ درجه سانتی گراد) توسعه پیدا میکند و یا ممکن است در نتیجه چرخه هیدرو ترمال در اعماق لیتوسفر اقیانوسی سردشده در پشته های میان اقیانوسی باشد دگر گونی در دمای کم تر از ۲۵۰ تا ۳۰۰ درجه سانتی گراد و فشار تقریبی ۲۰۰ مگاپاسکال شروع و تا دمای ۵۵۰ درجه سانتی گراد و فشار تقریباً ۴۰۰ مگاپاسکال اتفاق می افتد (Bellot, 2008). در سنگهای پریدو تیتی منطقه، سرپانتینیتی شدن با تجزیه کانی الیوین شروع و همراه با آن کانی های لیزاردیت ± بروسیت ± تالک شروع و مگزیت تشکیل شده است. در نتیجه، بافتهای

<sup>1.</sup> Overprinting

<sup>2.</sup> Static

که آنتی گوریت تا دمای ۶۵۰ تا ۶۹۰ درجه سانتی گراد می تواند پایدار باقی بماند.

## مرحله سوم: آغاز صعود سرپانتینیتها بهسمت سطح زمین با شرایط رژیم تغییرشکلی پلاستیک

افزایش سرپانتینیی شدن پریدوتیت ها و افزایش حجم سنگ ها از یک طرف و عملکرد گسل ها و تکتونیک از طرف دیگر، باعث شده است که سرپانتینیت های منطقه به صورت دیاپیریک به سمت سطح حرکت کنند. در طول این حرکت که با عملکرد گسل های بزرگ همراه است، سرپانتینیت ها تغییر شکل های زیادی را متحمل می شوند و چون در این اعماق، در محدوده پلاستیک قرار گرفته اند، جواب آن ها به تغییر شکل های اعمال شده، همراه با ایجاد ساخت های خاصی است که در بحث رفتار مکانیکی سرپانتینیت ها در رژیم تغییر شکل های اعمال شده، هراه آن ها صحبت شد. ساخت های حاصل از این نوع تغییر شکل بر روی بافت های قبلی رشد کرده و به تدریج باعث از بین رفتن بافت های قبلی شده اند (مثل رشد فابریک نوع C-8 بر روی زمینه هنوز بافت های قبلی حفظ شده است.

این حرکت های دیاپیریک در منطقه، هم شیستوزیته واضحی را در سرپانتینیت ها به وجود آورده و هم کرومیتیت ها را قطعه قطعه کرده و عیار کرومیت را در آنها بالاتر برده است ,Sabzehei) 1974 و بهزادی ۱۳۷۱).

## مرحله چهارم: ادامه صعود سرپانتینیتها تا قرار گرفتن در شرایط رژیم تغییرشکلی پلاستیک - شکنا

با ادامه فرآیند سرپانتینیتیشدن، سنگها وارد محدوده رژیم تغییرشکلی پلاستیک – شکنا میشوند (محدوده فشاری بین ۲۰۰ تا ۴۰۰ مگاپاسکال). در این مرحله ساختهای خاص حاصل از این رژیم تشکیل میشوند و معمولاً توسعه آنها با محو ساختهای مربوط به رژیم قبلی (رژیم پلاستیک) همراه است.

## مرحله پنجم: قرار گیری سرپانتینیتها در رژیم تغییر شکلی شکنا و جایگیری آنها در نزدیکی سطح زمین یا روی سطح زمین

در این مرحله سرپانتینیت وارد محدوده فشاری کمتر از ۲۰۰ مگاپاسکال، یعنی رژیم تغییرشکلی شکنا (شرایط نزدیک به سطح یا روی سطح زمین) شده و طی آن، ساختهای خاص مربوط به این رژیم ایجاد میشود که روی بافت و ساختهای حاصل از مراحل قبل شروع بهرشد میکنند. بهعنوان مثال در یک نمونه سنگی مورد مطالعه، این مکانیزم باعث گسل خوردگی یک رگه پرکننده شکاف (مربوط به رژیم تغییرشکلی پلاستیک – شکنا) شده است (شکل ۵-۴).

تمامی مراحل تشریحشده در این بحث، نشاندهنده چگونگی جایگیری سرپانتینیتهای مورد مطالعه در موقعیت فعلی است.

تغییر شکل های پلاستیک فراگیر، شاهدی برای صعود و جایگیری آنها در اعماق زیادتر است. آثار تغییر شکل نوع پلاستیک – شکنا شاهدی برای صعود بیش تر و جایگیری آنها در عمق کم تری است و در نهایت ساختهای حاصل از رژیم تغییر شکلی شکنا شاهدی برای جایگیری سرپانتینیتها در موقعیت فعلی است. باید به این مسأله توجه شود که تشکیل بافتهای شبکهای و یا ساعت شنی مربوط به لیزاردیت، ربطی به جایگیری سرپانتینیتها در سطح زمین ندارد و آنها محصول دگرسانی کف اقیانوس هستند که در شرایط بدون وجود استرس شکل گرفتهاند (۱۳۸۹ 1974 و محمدی، ۱۳۸۹).

## تغییرات ترکیبی انواع سرپانتینهای تشکیل شده در مراحل مختلف تحول سنگهای منطقه

انواع کانی های سرپانتین ایجادشده در ۵ مرحله مذکور، مورد تجزیه الکترونمیکروپروب قرار گرفتند (جدول ۲). برای مقایسه درصد عناصر هر مرحله، میانگین درصد وزنی عناصر موجود در کانی های سریانتین مربوط به هر مرحله، محاسبه گردید و سپس در شکل ۶ رسم گردید. نتایج این تجزیه، نشان میدهد که ترکیب محلولهای سازنده سرپانتین در هر مرحله، متفاوت است. سیالاتی که این سرپانتینها را ساختهاند، در محیطهای اکسیدی و احیایی متفاوتی قرار داشتهاند و بههمین خاطر، این تفاوت ترکیبی در عناصری مشخص تر است که نسبت به شرایط اکسیداسیون و احیا حساسیت بیشتری دارند. از جمله عناصر سازگار مانند نیکل، کرم و یا منیزیم که در هر مرحله تفاوت واضحی را نشان میدهند، اما عناصر ناسازگار مربوط به هر مرحله مانند سدیم و يا پتاسيم تفاوت چنداني نشان نميدهند. مقدار عنصر آلومينيوم در مرحله سوم (فاز تغییرشکلی پلاستیک) به میزان چشمگیری کاهش یافته و در همین مرحله، درصد عنصر آهن به حداکثر ميزان خود رسيده است.

## پاسخ کانیهای گروه سرپانتین به استرسهای وارده

Peacock and Hyndman (1999) به منظور تعیین حداکثر عمق زلزلههای تراستی مربوط به زون فرورانشی، رفتار کانیهای گروه سرپانتین در مقابل استرس را مورد بررسی قرار دادند. آنها پی بردند که تشکیل کانیهای گروه سرپانتین در حین فرورانش پوسته اقیانوسی، میتواند عمق زلزلههای تراستی را کنترل نماید. با آزادشدن سیالات از زون فرورانش و نفوذ آنها به بخش پریدوتیتی، تشکیل کانیهای گروه سرپانتین + بروسیت (در ترکیبات غنی از الیوین) + تالک (در ترکیبات غنی از پیروکسن) شروع میشود. وجود این کانیها در زون فرورانش با ایجاد یک فرآیند غیرلرزهای همراه است و باعث میشود در بخشهایی که آمنیبولیت)، در هنگام فرورانش، زلزلهای در آن عمق صورت نگیرد. با توجه به این که در سنگهای مورد مطالعه نیز مجموعه کانیهای سرپانتین + بروسیت و تالک دیده میشود، احتمال دارد

بررسی رفتار تغییر شکلی سرپانتینیت های...

جدول ۲. نتایج تجزیه الکترونمیکروپروب انواع کانیهای سرپانتین ایجادشده در ۵ مرحله مختلف تغییرشکلی در سرپانتینیتهای آمیزه افیولیتی بافت\*.

Sample	Na <sub>2</sub> O	Al <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	K.O	MnO	MgO	SiO,	CaO	Cr <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	TiO,	FeO	NiO	stage
GB1	0.00	0.51	0.02	0.17	39.99	48.63	0.31	0.00	0.03	9.71	0.63	
GB2	0.00	0.00	0.00	0.06	45.80	49.83	0.10	0.05	0.00	3.89	0.27	
GE40	0.00	0.51	0.00	0.05	46.29	49.24	0.10	0.09	0.00	2.80	0.94	
GC7	0.04	0.24	0.00	0.09	44.49	48.04	0.08	0.02	0.00	6.32	0.67	
GE23	0.00	0.19	0.01	0.04	45.44	49.26	0.07	0.00	0.00	4.36	0.64	
GC1	0.00	0.68	0.01	0.09	42.81	49.46	0.13	0.01	0.00	6.53	0.28	S1
GC1	0.07	0.32	0.03	0.10	40.68	50.27	0.07	0.00	0.00	8.21	0.25	
GC1	0.01	0.60	0.01	0.06	43.09	49.70	0.06	0.10	0.00	5.86	0.50	
GC1	0.01	0.32	0.00	0.09	45.88	49.39	0.08	0.23	0.00	3.34	0.64	
GC1	0.00	0.71	0.00	0.12	43.48	48.42	0.12	0.08	0.00	6.48	0.60	
GC1	0.00	0.45	0.03	0.08	44.46	49.07	0.07	0.04	0.00	5.24	0.56	
GB2	0.07	0.00	0.03	0.27	33.46	36.02	0.10	0.00	0.00	30.01	0.05	
GB2	0.00	0.00	0.00	0.04	45.65	49.98	0.10	0.00	0.00	4.16	0.08	
GC7	0.00	0.11	0.00	0.05	45.53	50.80	0.01	0.00	0.01	2.96	0.51	S2
GD18	0.00	3.60	0.03	0.07	43.64	47.85	0.04	0.31	0.01	4.13	0.31	
GE23	0.00	0.35	0.01	0.24	43.70	51.16	0.06	0.03	0.00	4.24	0.23	
GB2	0.07	0.03	0.04	0.30	31.74	34.83	0.08	0.00	0.00	32.82	0.10	S3
GC7	0.00	0.50	0.03	0.08	44.06	49.96	0.02	0.02	0.00	5.11	0.22	54
GD18	0.00	0.48	0.02	0.15	46.40	49.73	0.04	0.06	0.00	2.91	0.21	54
GC1	0.00	0.52	0.02	0.35	46.69	49.80	0.05	0.02	0.00	1.97	0.57	
GC7	0.01	0.40	0.00	0.12	44.44	52.53	0.05	0.02	0.00	2.31	0.13	85
GC7	0.05	0.35	0.03	0.08	44.47	53.51	0.04	0.03	0.04	1.37	0.03	55
GC7	0.05	0.35	0.03	0.08	44.47	53.51	0.04	0.03	0.04	1.37	0.03	

\* مرحله اول: سرپانتینهای حاصل از سرپانتینیتی شدن اولیه پریدوتیتها در کف اقیانوس: برای این منظور سرپانتینهای تشکیل دهنده بافت شبکهای یا mesh در اطراف دانههای الیوین برای تجزیه الکترون میکروپروب انتخاب شدهاند. مرحله دوم: سرپانتینهای حاصل از فرورانش پوسته اقیانوسی: برای این مرحله آنتی گوریتهایی با بافت تیغهای که مختص شرایط دما و فشار بالاتر هستند، مورد تجزیه قرار گرفتهاند. این آنتی گوریتها یا ماتریکس را ساختهاند و یا اینکه بهصورت رگه بر روی بافتهای قبلی رشد کردهاند. مرحله سوم: سرپانتینهای حاصل از فاز تغییر شکلی نوع پلاستیک: سرپانتینهایی که برای تجزیه انتخاب گردیدهاند، سرپانتینهایی هستند که در رگهها تشکیل فابریک نوع C-کا را دادهاند. مرحله چهارم: سرپانتینهای حاصل از فاز تغییرشکلی نوع پلاستیک: سرپانتینهایی که برای تجزیه انتخاب گردیدهاند، سرپانتینهایی هستند که در رگهها تشکیل فابریک نوع C-کا را دادهاند. مرحله چهارم: سرپانتینهای حاصل از فاز تغییرشکلی نوع پلاستیک: سرپانتینهایی که برای تجزیه انتخاب سرپانتینهای تشکیل شده در رگههای نوع پلاستیک می مراد گرفتهاند. مرحله چهارم: سرپانتینهای حاصل از فاز تغییرشکلی نوع پلاستیک نوع پلاستیک. شکنا ردیدهاند، ریپانتینهای مستند که در رگههای نوع پلاستیک اور گرفتهاند. مرحله چهارم: سرپانتینهای حاصل از فاز تغییرشکلی نوع پلاستیک. شکنا: در اینجا ردیهای ری اینتینهای می دو رگههای نوع ایریک نوع گرار گرفتهاند. مرحله پنجم: سرپانتینهای حاصل از فاز تغییرشکلی نوع شکنا: در اینجا رگههای کریزوتیلی و لیزاردیتی که در مرحله آخر بر روی بافتهای قبلی رشد کردهاند، مورد تجزیه الکترون میکروپروب قرار گرفتهاند (Stage).

جدول۳. آمار زلزلههای رخداده در منطقه مورد مطالعه با اقتباس از پژوهشگاه بینالمللی زلزلهشناسی و مهندسی زلزله\*.

Date (yyyy/mm/dd)	Time (UTC)	Latitude	Longitude	Depth	Magnitude	Reference
2005/06/03	17:59:51.9	29.14	56.40	18	ML:3.3	IIEES
2005/11/20	20:15:26.0	29.29	56.38	14	ML:3.3	IIEES
2006/09/22	17:45:03.4	29.27	56.42	15	ML:3.5	IIEES
2008/01/27	17:00:25.1	29.27	56.45	16	ML:3	IIEES
2011/01/10	10:57:55.0	29.28	56.28	14	ML:3.2	IIEES

\*(IIEES) جدول فوق نشان میدهد که از سال ۱۹۲۳ تا کنون (۲۰۱۲) هیچ زلزله بزرگی در محدوده مورد مطالعه (طولهای جغرافیایی ۶۶ ،۵۵ و ۵۶٬۴۷/۵ و ۵۶٬۶۲ و عرضهای جغرافیایی ۱۴ ،۲۹ و ۵۲٬۳۶٬۲ ثبت نشده است و بزرگای هر ۵ زلزلهای که تا کنون به ثبت رسیده، بالاتر از ۳/۵ درجه در مقیاس ریشتر نیست.



شکل ۶. تغییرات ترکیبی سرپانتینهای موجود در سرپانتینیتهای آمیزه افیولیتی بافت که طی ۵ مرحله مختلف تشکیل شدهاند. توضیحات مربوط به هر مرحله در زیرنویس جدول ۲ آمده است.

که در هنگام فرورانش پوسته اقیانوسی در دوره کرتاسه -Shahab) pour, 2005) در منطقه مورد مطالعه و در منطقهای که این کانی ها تشکیل شدهاند، فرورانش با زلزله همراه نبوده است.

#### بررسی لرزهخیزی سرپانتینیتهای مورد مطالعه

مطالعات ساختاری و بررسی ساختمانهای تغییرشکلی در سرپانتینیتهای آمیزه رنگین چهارگنبد – گوغر – بافت، نشان می دهد که این سنگها عمدتاً با شیوه شکل پذیر، تغییرشکل یافته و از آنجائیکه این نوع تغییرشکل با سرعت کم و به صورت فراگیر و در حالت پلاستیک در سنگ ایجاد می شود، با ایجاد زلزله همراه نیست. در حقیقت، سرپانتینیت، حرکت گسل را به صورت تغییرشکل پلاستیک رد میکند و از آنجاکه گسترش سرپانتینیتها در این منطقه خیلی زیاد است و هم به صورت رخنمونهای پراکنده و بزرگ و هم در زمینه و در زیر واحدهای دیگر گسترش دارند، از سال ۱۹۲۳ تا کنون (۲۰۱۲) هیچ زلزله بزرگی در این منطقه ثبت نشده است (جدول ۳).

#### نتيجه گيري

مطالعات نشان می دهد که ساختارهای ریزمقیاس موجود در سرپانتینیتهای آمیزه رنگین بافت با ساختارهای بزرگمقیاس موجود در منطقه قابل تطابق می باشند. این ساختارها حاکی از این است که سرپانتینیتهای مورد مطالعه، پنج مرحله تغییر شکلی را پشت سر گذاشتهاند که در هر مرحله با تشکیل ساخت، بافت و کانی های خاصی همراه بوده است. آنالیز الکترون میکرو پروب انواع کانی های سرپانتین مربوط به هر مرحله نشان می دهد که

ترکیب محلول سازنده کانیهای سرپانتین در هر مرحله متفاوت بوده است. با وجودیکه منطقه در بین گسلهای بزرگ قرار گرفته، اما تغییرشکل فراگیر موجود در این سرپانتینیتها از نوع پلاستیک بوده و با ایجاد ساختارهای خاص، مانع بروز زلزلههای مخرب در این منطقه شده است. با توجه با نتایج مذکور میتوان پیشینی نمود که احتمالاً در آینده نیز واردآمدن استرس به این سرپانتینیتها، نباید با زلزلههای بزرگی همراه باشد.

#### سپاسگزاری

در اینجا لازم است از همکاریهای بیدریغ پرفسور هینز گانتر استچ و دکتر فرحناز دلیران از دانشگاه کارلسروهه آلمان برای تهیه تصاویر SEM و آنالیزهای الکترونمیکروپروب، تقدیر و تشکر نماییم.

#### منابع

 احمدی پور، ح.، محمدی، ن.، ۱۳۹۱. کانی شناسی و نحوه تشکیل کانی های گروه سرپانتین در سرپانتینیت های آمیزه افیولیتی بافت در استان کرمان. مجله بلور شناسی و کانی شناسی ایران، ۲۰، ۱۱۰-۹۷.

– بهزادی، ح.، ۱۳۷۱. بررسی مکانیسم تشکیل و جایگزینی ذخایر کرومیت انبانی موجود در آمیزه افیولیتی بافت. رساله کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید باهنر کرمان، ۱۲۱.

– پژوهشگاه بین المللی زلزلهشناسی و مهندسی زلزله (IIEES). – محمدی، ن.، ۱۳۸۹. کانیشناسی، لرزهخیزی و پتروژنز سرپانتینیتهای آمیزه رنگین چهارگنبد – گوغر – بافت در استان

بررسی رفتار تغییرشکلی سرپانتینیتهای...

Mohr–Coulomb theory and the strength of faults. Journal of Geophysical Research, 102, 2897–2913.

- Francis, G.H., 1956. The serpentinite mass in Glen Urquhart, Inverness-shire, Scotland. American. Journal of Science, 254, 201-226.

- Gillis, K.M., 2002. Root-zones of a fossil oceanic hydrothermal system exposed in the Troodos Ophiolite. Journal of Geology, 110, 57–74.

- Güartekin, G. and Albayrak, M., 2006. Thermal reaction of antigorite: A XRD, DTA-TG work. Mineral Research Exploration, 133, 41-49.

- Moore, D.E., Lockner, D.A., Ma Shengli, Summers, R. and Byerlee, J.D., 1996. Strength of chrysotile-serpentinite gouge under hydrothermal conditions: Can it explain a weak San Andreas fault?. Geology, 24, 1041–1044.

- Moore, D.E., Lockner, D.A., Shengli, M., Summers, R. and Byerlee, J.D., 1997. Strengths of serpentinite gouges at elevated temperatures. Journal of Geophysical Research, 102, 14787–14801.

- Page, B.M., Thompson, G.A. and Coleman, R.G., 1998. Late Cenozoic tectonics of the central and southern Coast Ranges of California. Geological Society of America Bulletin, 110, 846–876.

- Page, N.J., 1968. Serpentinization in a sheared serpentinite lens, Tiburon Peninsula, California. U.S. Geological Survey Professional, 600, 21–28.

- Park, J., Yuan, H. and Levin, V., 2004 . Subduction zone anisotropy beneath Corvallis, Oregon: a serpentinite skid mark of trench-parallel terrane migration?. Journal of Geophysical Research – Solid Earth, 109, 1978-2012.

- Passchier, C.W. and Truw, R.A.J., 1998. Microtectonics, Berlin, Springer- Verlag, 289.

- Passchier, C.W. and Truw, R.A.J., 1992. Microtectonics. Springer, 289.

- Peacock, S.M. and Hyndman, R.D., 1999. Hydrous minerals in the mantle wedge and the maximum depth of subduction thrust earthquakes. Geophysical research letters, 26, 2517-2520.

- Ramsay, J.G., 1980. The crack-seal mechanism of rock deformation. Nature, 284, 135-139

- Reinen, L.A., Weeks, J.D. and Tullis, T.E., 1991. The frictional behavior of serpentinite: Implications for aseismic creep on shallow crustal faults: Geophysical Research Letters, 18, 1921–1924.

- Reinen, L.A., Weeks, J.D. and Tullis, T.E., 1994. The-

کرمان. پایاننامه مقطع کارشناسی ارشد، انتشارات دانشگاه شهید باهنر کرمان، ۲۱۵.

- محمدی، ن.، احمدیپور، ح.، ۱۳۸۸. بررسی بافت و نحوه تشکیل کانی های گروه سرپانتین موجود در سرپانتینیت های آمیزه رنگین چهارگنبد - گوغر - بافت در استان کرمان. هفدهمین همایش بلورشناسی و کانی شناسی ایران، همدان، ۲۹۸–۲۹۲. - نقشه زمین شناسی سیرجان، مقیاس ۲۵۰۰۰۰ ، شماره III (۱۹۹۵). سازمان زمین شناسی کشور.

- Andreani, M., Boullier, A.M. and Gratier, J.P., 2005. Development of schistosity by dissolution–crystallization in a Californian serpentinite gouge. Journal of Structural Geology, 27, 2256–2267.

- Andreani, M., Baronnet, A., Boullier, A.M. and Gratier, J.P., 2004. A microstructural study of a "crack-seal" type serpentine vein using SEM and TEM techniques. Europian Journal Mineral, 16, 585-595.

- Arvin, M. and Robinson, P.T., 1994. The petrogenesis and tectonic setting of lavas from the Baft Ophiolitic Melange, southwest of Kerman, Iran. Canadian Journal of Earth Science, 31, 824-834.

- Bellot , J.Ph., 2008. Natural deformation related to serpentinisation of an ultramafic inclusion within a continental shear zone: The key role of fluids. Tectonophysics, 449, 133-144 .

- Berberian, M. and King, C.P., 1981. Towards a paleogeography and Tectonic Evolution of Iran. Canadian Journal of Earth Science, 18, 210-265.

- Boudier, F., Baronnet, A. and Mainprice, D., 2009. Serpentine mineral replacements of natural olivine and their seismic implications: oceanic lizardite versus Subductionrelated antigorite. Journal of Petrology, 51, 495-512.

- Cannat, M., Bideau, D. and Bougault, H., 1992. Serpentinized peridotites and gabbros in the Mid-Atlantic Ridge axial valley at 15°37'N and 16°52'N. Earth and Planetary Science Letters, 109, 87–106.

- Chester, F.M., Evans, J.P. and Biegel, R.L., 1993. Internal structure and weakening mechanisms of the San Andreas Fault. Journal of Geophysical Research, 98, 771-786.

- Dungan, M.A., (1979). A microprobe study of antigorite and some serpentine polymorphs. Canadian Mineralogist, 17, 771-784.

- Escartin, J., Hirth, G. and Evans, B., 1997. Non-dilatant brittle deformation of serpentinites: implications for **Archive of SID** نادیه محمدی و همکاران

> frictional behavior of lizardite and antigorite serpentinites: Experiments, constitutive models, and implications for natural faults. Pure and Applied Geophysics, 143, 317– 358.

> - Reinen, L. A. and Tullis, T.E., 1995. Microstructural evidence of strain localization and distributed strain in serpentine friction experiments. Eos (Transactions, American Geophysical Union). 76, F560.

- Reinen, L.A., 2000. Seismic and aseismic slip indicators in serpentinite gouge. Geology, 28, 135–138.

- Rice, J.R. and Ruina, A.L., 1983. Stability of steady frictional slipping. Journal of Applied Mechanics. 105, 343–349.

- Sabzehei, M., 1974. Les mélanges ophiolitiques de la region d'Esfandagheh. These d'etate, Universite' scienti-

fique et medicale de Grenoble, France, 306.

- Shahabpour, J., 2005. Tectonic evolution of the orogenic belt in the region located between Kerman and Nwyriz. Journal of Asian Earth Sciences, 24, 405-417.

- Tullis, T.E., 1988. Rock friction constitutive behavior from laboratory experiments and its implications for an earthquake prediction field monitoring program. Pure and Applied Geophysics, 126, 555–558.

- Wicks, F.J., Whittaker, E.J.W. and Zussman, J., 1977. An idealized model for Serpentine texture after Olivine. Canadian Mineralogist, 15, 464-458.

- Wiltschko, D.V. and Morse, J.W., 2001. Crystallization pressure versus "crack seal" as the mechanism for banded veins, Geology. 29, 79-82.