



ارتباط بین شدت سرپانتینی شدن و ویژگی‌های ژئوتکنیکی افیولیت‌ها (مطالعه موردی: افیولیت‌های پالئوتیس جنوب غرب مشهد)

سلمه افشار، محمد غفوری*، ناصر حافظی مقدس و غلامرضا لشکری پور

گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

دریافت مقاله: ۱۳۹۷/۰۴/۲۹، پذیرش: ۱۳۹۷/۱۰/۱۹

چکیده

سنگ‌های اولترامافیک از بخش‌های مهم مجموعه افیولیتی جنوب غرب مشهد هستند که در این پژوهش در دو گروه متاپریدوتیت‌ها و متاپیروکسنیت‌ها مورد بررسی قرار گرفته‌اند. پس از تعیین درصد سرپانتینی شدن در مقاطع نازک، آزمایش‌های ژئوتکنیکی بر روی نمونه‌های جمع‌آوری شده، صورت گرفته و رفتار سنگ‌ها مقایسه شده است. نتایج نشان‌دهنده ارتباط نزدیک بین فرایند سرپانتینی شدن و مقاومت تک‌محوری در سنگ‌های اولترامافیک منطقه است؛ به طوری که در درجه سرپانتینی متوسط در نمونه‌هایی که ۲۵ تا ۴۰ درصد سرپانتینی شده‌اند، درجه مقاومت بسیار سخت (۲۵۰-۱۰۰ MPa)، ۴۰ تا ۶۰ درصد سرپانتینی شده مقاومت سخت (۱۰۰-۵۰ MPa)، ۶۰ تا ۷۵ درصد سرپانتین، مقاومت نسبتاً سخت (۲۵-۵۰ MPa) و در درجه سرپانتینی شدید با شدت ۷۵ تا ۹۵ درصد مقاومت ضعیف (۲۵-۵ MPa) مشاهده می‌شود. مطابق این پژوهش به دلیل درجات مختلف سرپانتینی شدن احتمال وقوع لغزش، ناپایداری و یا ریزش ترانشه در این سنگ‌ها زیاد است

واژه‌های کلیدی: سرپانتینی شدن، مقاومت فشاری تک‌محوری^۱، ویژگی‌های ژئوتکنیکی، افیولیت‌های پالئوتیس

مقدمه

بخش‌ها به همراه رسوبات دریایی در طی مراحل جایگزینی زمین‌ساختی به دلیل عوامل دینامیکی و حرارتی متحمل دگرگونی ناحیه‌ای می‌شوند. با توجه به سازوکار و شرایطی که در زمان راندگی‌ها و زمین‌ساخت هر منطقه به وقوع می‌پیوندد، بخش‌های مختلفی از پوسته اقیانوسی رانده می‌شوند و به همین دلیل افیولیت‌ها در مناطق مختلف دنیا از نظر ضخامت متفاوت بوده و تنوع زمین‌ساختی دارند. در برخی مواقع عوامل

افیولیت‌ها بخش‌هایی از پوسته اقیانوسی هستند (Ghaseminejad and Torabi, 2015; Khanchuk et al., 2017; Shirdashtzadeh et al., 2016) که در مراحل پایانی فرورانش و هم‌زمان با برخورد به صورت زمین‌ساختی جایگزین رانده شده‌اند (Alavi, 1991; Karimpour et al., 2010; Sheikholeslami and Kouhpeyma, 2012; Zanchetta et al., 2013; Shafaii Moghadam et al., 2014).

1. Uniaxial Compressive Strength (UCS)

*مسئول مکاتبات: ghafoori@um.ac.ir

آید که موضوع مورد بررسی در این مطالعه است. از آنجا که نتایج این پژوهش نشان می‌دهد، فرایند سرپانتینی شدن تأثیر کاهنده‌ای بر روی مقاومت و مشخصات دگرشکلی سنگ‌ها دارد؛ لذا باید در مراحل اولیه اجرای هر پروژه و برای انجام هر گونه فعالیت عمرانی مدنظر قرار گیرد. بدین منظور در این پژوهش نیز با توجه به اینکه اغلب سنگ‌های اولترامافیک در منطقه مورد بررسی به دو گروه متاپریدوتیت‌ها و متاپیروکسنیت‌ها تعلق دارند، به بررسی ارتباط میان درجات مختلف سرپانتینی شدن و ویژگی‌های ژئوتکنیکی این دو گروه از سنگ‌ها پرداخته شده است.

روش مطالعه

برای انجام بررسی‌های سنگ‌شناسی، تعداد ۳۱۳ نمونه دستی از رخنمون‌های طبیعی، ترانشه‌های موجود در منطقه و پهنه‌های گسلی و طی چندین مرحله بازدید صحرایی از مسیری به طول حدود ۱۴ کیلومتر برداشت شد. در برداشت نمونه‌ها و برای مقایسه‌ای جامع میان این سنگ‌ها، سعی شد انواعی از اولترامافیک‌ها با درجات سرپانتینی مختلف انتخاب شود. پس از تهیه مقطع میکروسکوپی از نمونه‌ها، ویژگی‌های مربوط به کانی‌شناسی، تغییرات بافتی، تغییرات رنگ، تجزیه، تغییر و یا عدم تغییر کانی‌ها و گسترش ریزترک‌ها توسط میکروسکوپ پلاریزان در آزمایشگاه زمین‌شناسی اقتصادی دانشگاه فردوسی مشهد مورد بررسی قرار گرفت. پس از انجام بررسی‌های میکروسکوپی و تفکیک انواع متاپریدوتیت‌ها و متاپیروکسنیت‌ها، درصد سرپانتینی شدن در نمونه‌ها تعیین شد. سپس ۶۰ نمونه با درجه سرپانتینی متفاوت انتخاب و از محل آنها بلوک‌های سنگی برای تهیه مغزه آماده شد. در ادامه بر روی مغزه‌ها آزمایش‌های ژئوتکنیکی شامل: تعیین ویژگی‌های فیزیکی و ویژگی‌های مکانیکی بر اساس استاندارد ارائه شده توسط براون (Brown, 1981) و با دستگاه مقاومت فشاری تک‌محوری (Type: C0162)، دستگاه مقاومت کششی برزیلی

زمین‌ساختی به‌حدی باعث به‌هم‌ریختگی افیولیت‌ها می‌شوند که به آنها آمیزه‌رنگی^۱ نیز گفته می‌شود. در مجموعه‌های افیولیتی، سنگ‌های اولترامافیک عمده‌ترین بخش افیولیت‌ها را تشکیل می‌دهند. به‌طور کلی در محدوده جغرافیایی ایران دو مجموعه رخنمون از سنگ‌های افیولیتی وجود دارد که یک مجموعه مربوط به افیولیت‌های پالئوتتیس (مانند افیولیت‌های مشهد) و مجموعه دیگر مربوط به افیولیت‌های نئوتتیس (بخش اعظم افیولیت‌های ایران مربوط به زمان ژوراسیک-کرتاسه) است. بنابراین، افیولیت‌های مشهد رخنمون‌هایی از افیولیت‌های پالئوتتیس هستند (Alavi, 1991; Karimpour et al., 2010; Sheikholeslami and Kouhpeyma, 2012; Zanchetta et al., 2013; Shafaii Moghadam and Stern, 2014). شکل‌گیری اقیانوس پالئوتتیس در اوایل پالئوزوئیک به‌دلیل ریفتی که میان صفحه ایران و صفحه توران به‌وجود آمده، آغاز شده است. گسترش ریفت به تشکیل دریا و در نهایت تشکیل اقیانوس پالئوتتیس منجر شده است. در اواخر پالئوزوئیک این اقیانوس شروع به بسته شدن می‌کند که در نهایت به تغییر شکل در شمال ایران و افغانستان منجر شده است (Boulin, 1988; Stampfli, 1996; Zanchi et al., 2009; Abdelaziz et al., 2018). در تریاس میانی بسته شدن پالئوتتیس در ایران کامل شده و افیولیت‌های مشهد در محل برخورد صفحه ایران و توران که به آن زمین‌درز یا محدوده مفصلی^۲ نیز می‌گویند، رانده شده است. افیولیت‌های مشهد و سنگ‌های رسوبی دگرگون شده شواهدی از دگرگونی ناحیه‌ای درجه پایین در حد رخساره شیب‌های سبز نشان می‌دهند. از جمله این شواهد می‌توان به تشکیل سرپانتین از اولترامافیک‌ها و تشکیل اسلیت از سنگ‌های رسوبی رس‌دار مانند شیل و مارن نام برد. از تریاس میانی تا عهد حاضر زمین‌ساخت منطقه فعال بوده و تراست‌ها که عمده‌ترین گسل‌های منطقه هستند، موجب شده‌اند که راندگی‌ها تا عهد حاضر ادامه یابند. این تغییرات مکرر زمین‌ساختی باعث شده است درجات مختلفی از سرپانتینی شدن با ویژگی‌های ژئوتکنیکی متفاوت در این مجموعه سنگی به وجود

1. Coloured Melange

2. Suture Zone

گروه اصلی پریدوتیت‌ها، پیروکسنیت‌ها و هورنبلندیت‌ها هستند که سنگ‌های اولترامافیکی برداشت شده از منطقه مورد بررسی با توجه به تحمل دگرگونی ناحیه‌ای، در دو گروه متاپریدوتیت‌ها و متاپیروکسنیت‌ها قرار می‌گیرند که ویژگی‌های آنها به‌طور کلی در زیر آورده شده است:

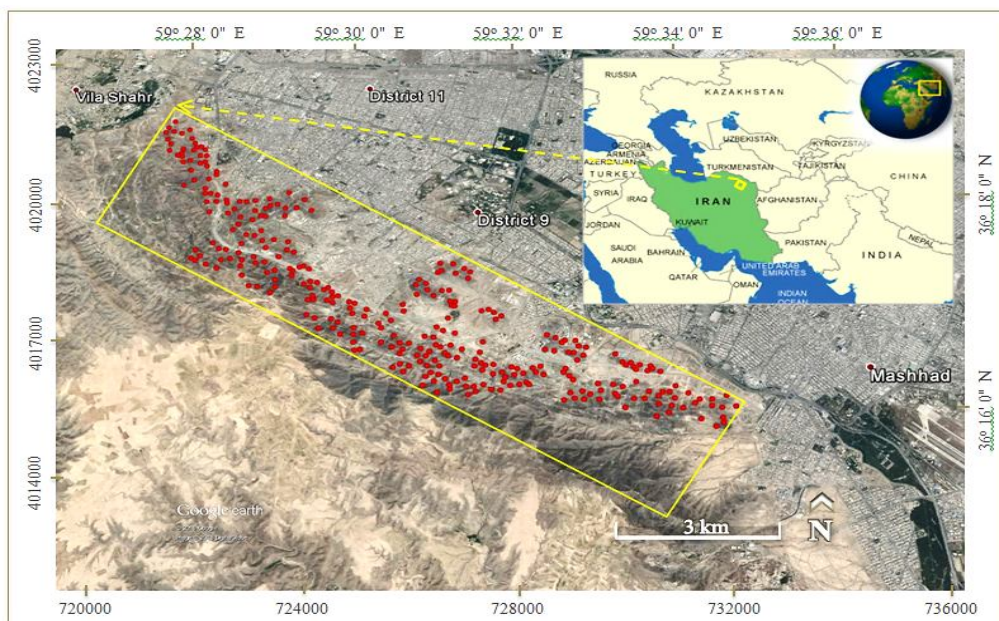
متاپریدوتیت‌ها: این گروه از سنگ‌های اولترامافیک بیش از ۴۰ درصد الیونین دارند و دارای بافت گرانولار هستند. در منطقه مورد بررسی نمونه بدون آثار سرپانتینی شدن مشاهده نشد. در تمامی مقاطع و با افزایش تغییرات کانی‌شناسی، سرپانتین‌هایی که جانشین الیونین‌ها شده‌اند (شکل ۳-۳) و قالب‌های مدور الیونین‌ها (شکل ۳-۳) به‌وضوح مشاهده می‌شوند. در نتیجه در این نمونه‌ها و همراه با افزایش سرپانتینی شدن بافت غربالی (مشبک) همراه بافت گرانولار به‌چشم می‌خورد (شکل ۴-۳). هرچه بر شدت سرپانتینی شدن افزوده می‌شود، از کانی‌های اولیه چیزی باقی نمی‌ماند و کانی‌های اولیه همگی تجزیه می‌شوند. در این حالت بافت مشبک در این گروه از سنگ‌ها قابل مشاهده است (شکل ۴-۳).

(Type: R0140)، دستگاه مقاومت فشاری بار نقطه‌ای (Type: R0140) و دستگاه اندازه‌گیری شاخص دوام وارفتگی (Type: ELE75642) در آزمایشگاه زمین‌شناسی مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد انجام شد. در نهایت نتایج به‌دست آمده با یکدیگر مقایسه و مورد تعبیر و تفسیر قرار گرفت که در ادامه هریک از مراحل به اختصار آورده شده است.

توصیف پتروگرافی

طول محدوده نمونه‌های برداشت شده از نمونه شماره ۱ با مختصات $X:732267$ و $Y:4015291$ تا نمونه شماره ۳۱۳ با مختصات $X:721170$ و $Y:4021868$ ، حدود ۱۴ کیلومتر است که در شکل ۱ موقعیت آن نشان داده شده است. اولترامافیکی‌های منطقه اغلب شامل انواعی از متاپریدوتیت‌ها و متاپیروکسنیت‌های مختلف و با درجات سرپانتینیتی مختلف هستند که مطابق طبقه‌بندی عمومی سنگ‌های اولترامافیک (Streckeisen, 1974) نام‌گذاری شده‌اند (شکل ۲).

چنان‌که در طبقه‌بندی استریکسیسن (Streckeisen, 1974) در شکل ۲ نشان داده شده است، سنگ‌های اولترامافیک شامل سه



شکل ۱. موقعیت نمونه‌های برداشت شده از منطقه مورد بررسی (جنوب غرب مشهد)

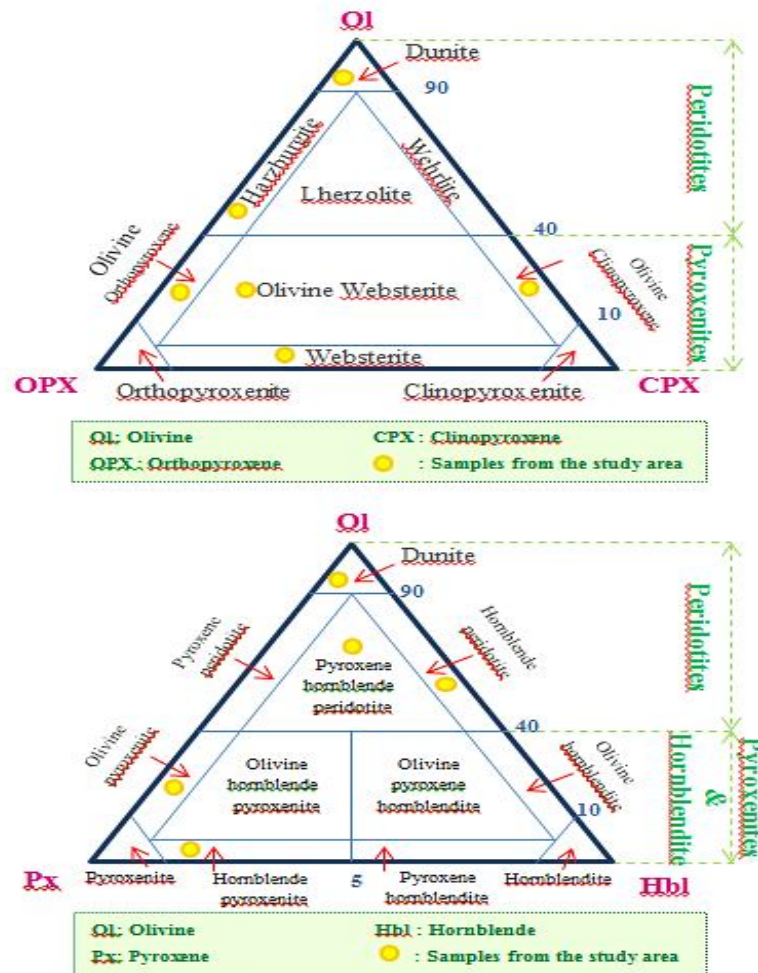
Fig. 1. Position of samples taken from the study area (Southwest of Mashhad)

متاورلیت: این سنگ‌ها در صحرا به رنگ‌های قهوه‌ای مایل به سبز، کاملاً یکنواخت و ریزبلور مشاهده می‌شوند و در مقطع نازک اغلب شامل پزدومورف‌های سرپانتینی شده الیوین و اوژیت است که در مواردی کلینو انستاتیت نیز مشاهده می‌شود. انستاتیت به مقدار خیلی کم و در حدود چند درصد، در این سنگ مشاهده می‌شود.

متالزولیت: قسمت عمده‌ای از سنگ‌های اولترابازیک منطقه از متالزولیت تشکیل شده است که در نمونه دستی تیره تا سبز تیره است. در مقطع میکروسکوپی الیوین‌های فورستریتی توسط بلورهای انستاتیت و اوژیت فرا گرفته شده‌اند. در اغلب موارد نیز پیروکسن‌ها به آمفیبول (هورنبلند) تبدیل شده‌اند.

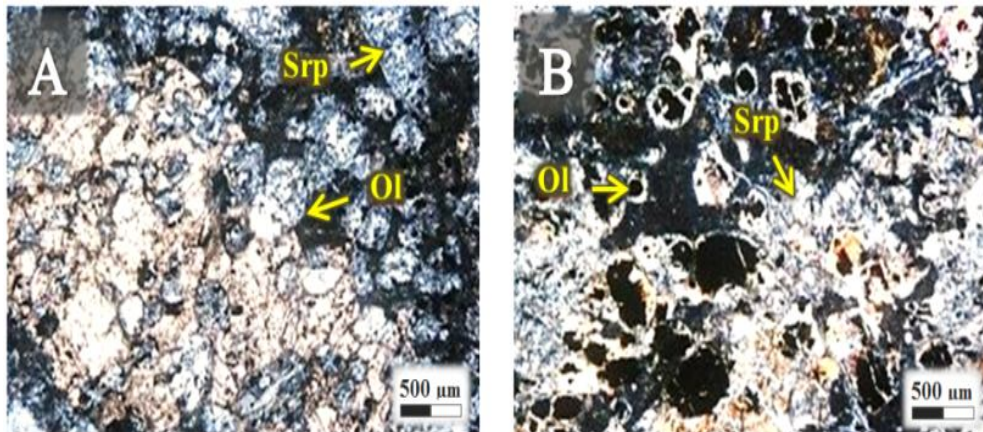
از متاپریدوتیت‌های برداشت‌شده از منطقه می‌توان به انواع نشان‌داده شده در شکل ۲ اشاره کرد که اصلی‌ترین آنها در منطقه مورد بررسی شامل: متادونیت، متاورلیت، متالزولیت و متاهارزبورژیت است که به اختصار به شرح آنها پرداخته می‌شود:

متادونیت: این سنگ‌ها اغلب از الیوین تشکیل شده و کانی‌های فرعی آنها شامل مقدار کمی ارتوپروکسن و کلینوپروکسن است و در نمونه دستی سبزرنگ هستند. از ویژگی‌های مقاطع نازک متادونیت‌ها، سرپانتین فراوان است که در شکاف‌های الیوین گسترش پیدا کرده است؛ به طوری که در مواردی فقط قالبی از الیوین باقی می‌ماند.



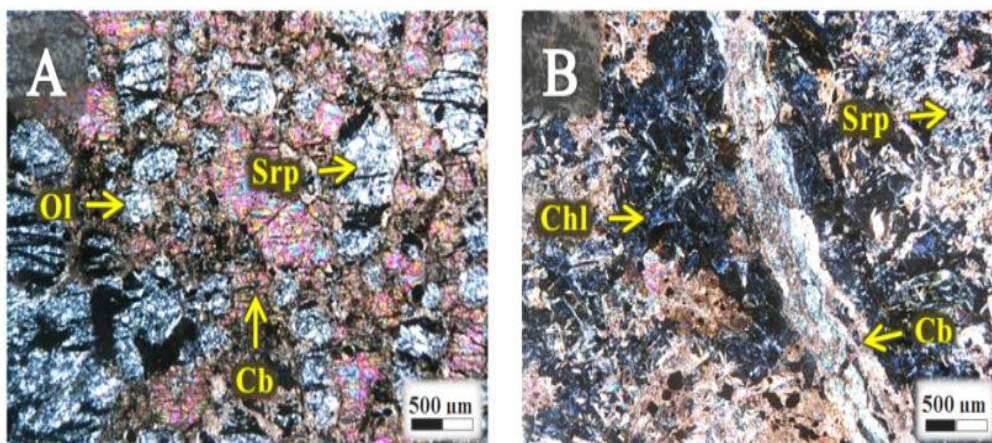
شکل ۲. طبقه‌بندی عمومی سنگ‌های اولترامافیک (Streckeisen, 1974) و انواع نمونه‌های برداشت‌شده از جنوب غرب مشهد

Fig. 2. General classification of ultramafic rocks (Streckeisen, 1974) and types of samples from Southwest of Mashhad



شکل ۳. A: جانشینی سرپانتین به جای الیون و B: باقی ماندن قالب‌های مدور الیون با افزایش سرپانتینی شدن (جنوب غرب مشهد). علایم اختصاری از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است (Srp: سرپانتین، Ol: الیون).

Fig. 3. A: Serpentine successor instead of Olivine, and B: Maintaining Olivine circular molds by increasing serpentinization (Southwest of Mashhad). Abbreviations after Whitney and Evans (2010) (Srp: Serpentine, Ol: Olivine).

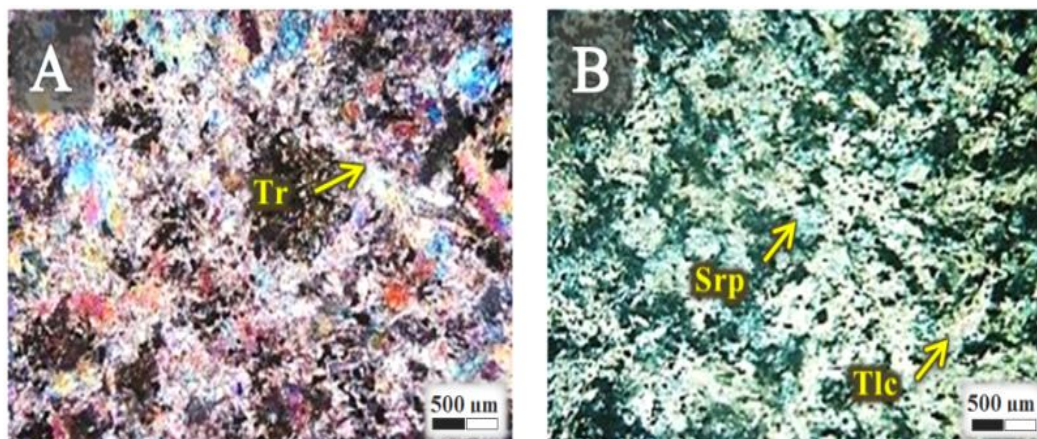


شکل ۴. A: نمونه‌ای از مقطع میکروسکوپی متاپریدوتیت مورد بررسی با بافت اولیه گرانولار به همراه بافت مشبک و B: از نمونه‌های مورد بررسی در جنوب غرب مشهد با درجه سرپانتینی شدید و بافت مشبک. علایم اختصاری از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است (Srp: سرپانتین، Ol: الیون، Cb: کربنات، Chl: کلریت).

Fig. 4. A: Sample of the microscopic section of studied meta peridotite with primary granular and lattice texture, and B: A studied samples in southwest of Mashhad with severe serpentine degree and lattice texture. Abbreviations after Whitney and Evans (2010) (Srp: Serpentine, Ol: Olivine, Cb: Carbonate, Chl: Chlorite).

کانی الیون به کمتر از ۴۰ درصد کاهش پیدا می‌کند. بافت این گروه از سنگ‌ها نیز گرانولار است. با افزایش تغییرات کانی‌شناسی در متاپیروکسنیت‌های دارای کلینوپیروکسن تشکیل کانی ترمولیت (شکل ۵-A) و در متاپیروکسنیت‌های دارای ارتوپیروکسن تشکیل کانی تالک مشاهده می‌شود (شکل ۵-B).

متاپیروکسنیت‌ها: گروه دیگر اولترامافیک‌های منطقه متاپیروکسنیت‌ها هستند. این گروه شامل انواع مختلفی از سنگ‌های دارای پیروکسن است که در شکل ۲ انواع نمونه‌های برداشت شده از آنها نشان داده شده است. در متاپیروکسنیت‌ها مقدار کانی پیروکسن به بیش از ۶۰ درصد رسیده است و مقدار



شکل ۵. A: تبدیل کلینوپیروکسن به ترمولیت و B: تبدیل ارتوپیروکسن به تالک (جنوب‌غرب مشهد). علایم اختصاری از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است (Tr: ترمولیت، Tlc: تالک، Srp: سرپانتین).

Fig. 5. A: Conversion of clinopyroxene to Thermolite; B: Conversion of orthopyroxene to talc (Southwest of Mashhad). Abbreviations after Whitney and Evans (2010) (Tr: Thermolite, Tlc: Talc, Srp: Serpentine).

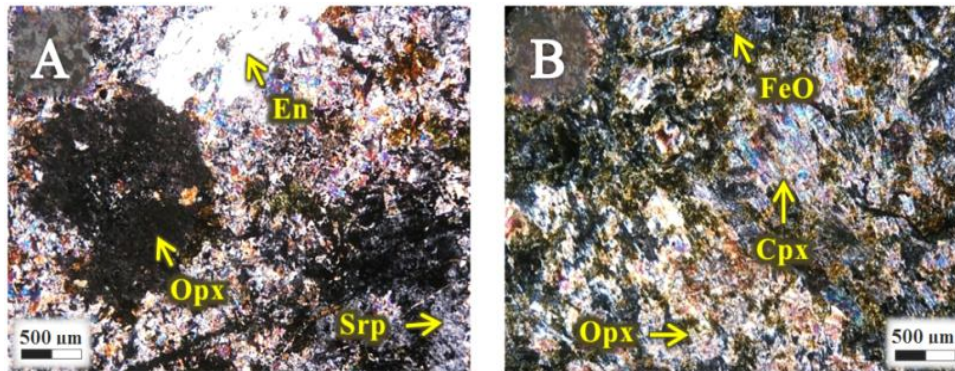
بلورهای فراوان اوژیت تجزیه شده است و ایلمنیت و همچنین به مقدار خیلی کم بلورهای الیوین و انستاتیت مشاهده می‌شود. از مهم‌ترین محصولات حاصل از تغییرات اولترامافیک‌ها، سرپانتینیت‌ها هستند که در طی دگرگونی ناحیه‌ای از متاپریدوتیت‌ها و متاپیروکسنیت‌ها به وجود آمده و سپس در اثر تغییرات مکرر زمین‌ساختی، درجات مختلفی از سرپانتینیت شدن در آنها پدیدار شده است. سنگ اولیه سرپانتینیت‌ها در درجات سرپانتینیت شده بالا به راحتی قابل تشخیص نیست. به همین دلیل، نمی‌توان آنها را در مقایسه میان متاپریدوتیت‌ها و متاپیروکسنیت‌های مورد بررسی در نظر گرفت. سرپانتینیت‌ها به رنگ‌های سبز مغز پسته‌ای، سبز روشن و یا سبز تیره مشاهده می‌شوند و روی هم رفته روشن‌تر از بخش‌های سرپانتینیت نشده به نظر می‌رسند. در مقطع نازک عموماً دارای بافت غربالی (مشبک) هستند و در درجات سرپانتینیت شده بسیار بالا، بافت رشته‌ای مشاهده می‌شود. بررسی مقاطع نازک نشان می‌دهد که در سنگ‌های اولترامافیک منطقه با افزایش تغییرات کانی‌شناسی از همان ابتدا الیوین تبدیل به سرپانتینیت می‌شود (شکل A-۷)؛ ولی در ارتوپیروکسن‌ها در ابتدا افزایش شکستگی مشاهده می‌شود و سپس تغییرات کانی‌شناسی رخ می‌دهد (شکل B-۷).

از متاپیروکسنیت‌های برداشت شده از منطقه می‌توان به انواع نشان داده شده در شکل ۲ اشاره کرد که از آن میان بیشترین فراوانی مربوط به انواع متاارتوپیروکسنیت (شکل A-۶)، متاوستریت (شکل B-۶) و متاکلینوپیروکسنیت است که به اختصار در ادامه آورده شده است:

متاارتوپیروکسنیت: این سنگ‌ها در روی زمین به رنگ قهوه‌ای تیره مشاهده می‌شوند و در مقطع میکروسکوپی اغلب از بلورهای ارتوپیروکسن به خصوص انستاتیت تشکیل شده‌اند. بلورهای کلینوپیروکسن و الیوین به مقدار خیلی کم و در بعضی مواقع پلاژیوکلاز نیز در مقطع نازک این سنگ‌ها مشاهده می‌شود.

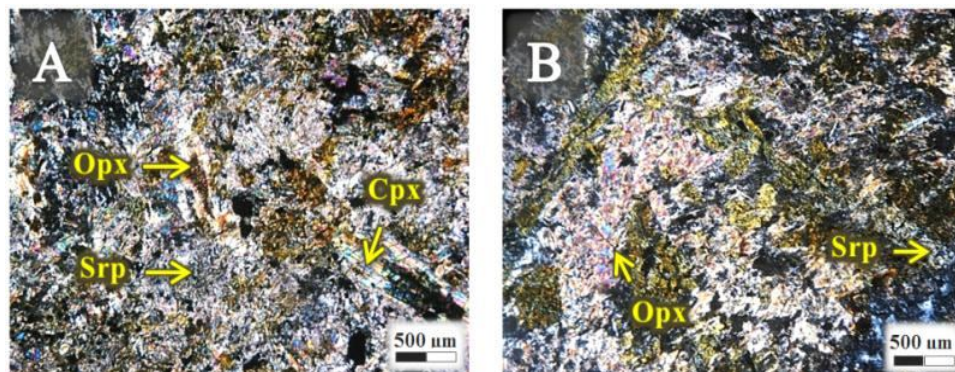
متاوستریت: این سنگ‌ها فراوان‌ترین نوع متاپیروکسنیت‌های منطقه را تشکیل می‌دهند که در آنها بلورهای درشت کلینوپیروکسن و ارتوپیروکسن به همراه مقدار کمی الیوین و در مواردی پلاژیوکلاز نیز دیده می‌شود. بلورهای ایلمنیت نیز در برخی مقاطع حضور دارند.

متاکلینوپیروکسنیت: این سنگ‌ها در منطقه تیره‌رنگ هستند و اثرات کلینوپیروکسن اوژیت به صورت کدر و سیاه بر روی سطح سنگ مشاهده می‌شود. در مقطع میکروسکوپی نیز



شکل ۶. A: مقطع نازک یک متا‌رتوپیروکسنیت در منطقه مورد بررسی و B: نمونه‌ای از مقطع نازک یک متا‌وبستریت در جنوب غرب مشهد. علایم اختصاری از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است (En: انستاتیت، Opx: ارتوپیروکسن، Srp: سرپانتین، FeO: اکسید آهن، Cpx: کلینوپیروکسن).

Fig. 6. A: Thin section of a meta orthopyroxenite in the studied area, and B: Thin section of a meta webstree in southwest of Mashhad. Abbreviations after Whitney and Evans (2010) (En: Enstatite, Opx: Orthopyroxene, Srp: Serpentine, FeO: Ferrous Oxide, Cpx: Clinopyroxene).



شکل ۷. A: تبدیل الیوین به سرپانتین و B: افزایش شکستگی و ریز ترک در ارتوپیروکسن با افزایش سرپانتینی شدن (جنوب غرب مشهد). علایم اختصاری از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است (Opx: ارتوپیروکسن، Srp: سرپانتین، Cpx: کلینوپیروکسن).

Fig. 7. A: Olivine conversion to serpentine, and B: Increased fracture and microfracture in orthopyroxene with increased serpentinization (Southwest of Mashhad). Abbreviations after Whitney and Evans (2010) (Opx: Orthopyroxene, Srp: Serpentine, Cpx: Clinopyroxene).

سنگ‌ها وقت گیر و پر هزینه است، در برخی موارد به کارگیری مؤلفه‌های مکانیک سنگی برای طبقه‌بندی سنگ موردنظر از لحاظ قرارگیری در بازه‌ای خاص مدنظر است. بدین منظور با استفاده از تجزیه و تحلیل داده‌های آزمایشگاهی، برای تفسیر نتایج آزمایش‌های بعدی و پیدا کردن دیدگاهی مناسب برای قضاوت مهندسی، می‌توان محدوده تغییرات این داده‌ها را مشخص کرد و پس از برقراری روابط بین ویژگی‌های فیزیکی،

ارتباط میان ویژگی‌های ژئوتکنیکی و شدت

سرپانتینی شدن در نمونه‌های مورد بررسی

تعیین ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی سنگ‌ها

ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی از جمله مهم‌ترین مؤلفه‌های سنگ است که به‌طور گسترده‌ای در برنامه‌های عمرانی برای بررسی‌های مکانیک سنگی مورد نیاز بوده است. از آنجا که انجام بسیاری از آزمایش‌های مکانیکی و فیزیکی بر روی

این سنگ‌ها مسئله‌ساز نخواهد بود. مقایسه میان شدت سرپانتینی شدن با ویژگی‌های فیزیکی نمونه‌ها نشان می‌دهد که در هر دو گروه از سنگ‌ها شدت سرپانتینی شدن با چگالی نمونه‌ها رابطه‌ای معکوس و با درصد جذب آب و تخلخل رابطه‌ای مستقیم دارد. همچنین مقایسه ارتباط میان شدت سرپانتینی شدن با مؤلفه‌های مکانیکی نام‌برده شده، بیانگر ارتباط معکوس میان مؤلفه‌های مکانیکی و سرپانتینی شدن است. در میان مؤلفه‌های ژئوتکنیکی بیان‌شده، مقاومت فشاری تک‌محوری سنگ نزدیک‌ترین ارتباط را با شدت سرپانتینی شدن نشان می‌دهد. مقاومت فشاری تک‌محوری از کاربردی‌ترین مؤلفه‌های مکانیکی سنگ است که در طراحی‌ها بیش از سایر مؤلفه‌ها استفاده می‌شود (Bieniawski, 1974). این نوع از مقاومت ۹ برابر کاربردی‌تر از دومین مؤلفه مهم مکانیک سنگ یعنی مقاومت فشاری سه محوری است (Cargill and Shakoor, 1990). به دلیل اهمیت این مؤلفه در برنامه‌های مهندسی و همچنین ارتباط نزدیک آن با شدت سرپانتینی شدن، نمونه‌های مورد بررسی بر اساس مقاومت تک‌محوری به روش استاندارد بیاوسکی و برنید (Bieniawski and Bernede, 1979) ارائه شده در جدول ۱، طبقه‌بندی شد که مطابق این استاندارد متاپریدوتیت‌ها و متاپیروکسنیت‌های برداشت‌شده از منطقه در سه رده مقاومت نسبتاً سخت^۱، مقاومت سخت^۲ و مقاومت بسیار سخت^۳ (قرار می‌گیرند).

مکانیکی و پتروگرافی سنگ‌ها، راه‌کارهایی برای تخمین ویژگی‌های ژئومکانیکی سنگ‌ها ارائه کرد. در این پژوهش، برای مقایسه بهتر نمونه‌ها از نظر ویژگی‌های ژئوتکنیکی و درصد سرپانتینی شدن آنها، نمونه‌هایی که تشابه زیادی در مقطع میکروسکوپی داشتند، حذف شده است و در مجموع، درصد سرپانتینی شدن در مقطع میکروسکوپی بر روی ۶۰ نمونه شامل ۳۰ نمونه پریدوتیت و ۳۰ نمونه پیروکسنیت تعیین شد و آزمایش‌های ژئوتکنیکی بر روی نمونه‌های آماده‌سازی شده، انجام شد. در ادامه برای تعیین ویژگی‌های فیزیکی (چگالی، تخلخل و جذب آب) و ویژگی‌های مکانیکی نمونه‌ها (مقاومت فشاری تک‌محوری، مقاومت بار نقطه‌ای، مقاومت کششی برزیلی و دوام‌پذیری)، از روش استاندارد براون (Brown, 1981) استفاده شده است. نتایج حاصل از آزمایش‌ها نشان می‌دهد که بر اساس رده‌بندی انجمن بین‌المللی زمین‌شناسی مهندسی (IAEG, 1979) برای چگالی و تخلخل، بیشتر نمونه‌ها در گروه با چگالی خیلی زیاد ($> 2.75 \text{ gr/cm}^3$) و زیاد ($2.75 - 2.55 \text{ gr/cm}^3$) و در گروه تخلخل کم (۵٪ - ۱) قرار می‌گیرند. همچنین مطابق طبقه‌بندی سنگ‌ها بر اساس شاخص دوام (Gamble, 1971) تمامی نمونه‌های برداشت‌شده از متاپریدوتیت‌ها و متاپیروکسنیت‌ها دارای دوام خیلی زیاد ($> Id_2$) هستند. این نتایج نشان می‌دهد که سنگ‌های اولترامافیک منطقه از لحاظ تخلخل و جذب آب و نیز از لحاظ دوام‌پذیری مشکلی نداشته است و پدیده فرسایش یا انحلال در

جدول ۱. طبقه‌بندی عمومی سنگ‌ها بر اساس مقاومت فشاری تک‌محوری (Bieniawski and Bernede, 1979)

Table 1. Classification of rocks based on Uniaxial compressive strength (Bieniawski and Bernede, 1979)

Classification	Symbol (in this paper)	uniaxial compressive strength (MPa)
Very Weak	VW	1 - 5
Weak	W	5 - 25
Medium Strong	MS	25 - 50
Strong	S	50 - 100
Very Strong	VS	100 - 250
Extra Strong	ES	> 250

1. MS

3. VS

2. S

بنیادوسکی و برنند (Bieniawski and Bernede, 1979) است. که با توجه به نتایج حاصل از مقاومت فشاری تک‌محوری، نمونه‌ها در سه رده مقاومتی بسیار سخت، سخت و نسبتاً سخت قرار می‌گیرند.

در جدول ۲، نتایج حاصل از آزمایش‌های فیزیکی و مکانیکی متاپریدوتیت‌ها و در جدول ۳، نتایج حاصل از آزمایش‌های فیزیکی و مکانیکی متاپیروکسنیت‌ها آمده است. چنان‌که در بالا بیان شد، اساس تقسیم‌بندی متاپریدوتیت‌ها و متاپیروکسنیت‌های منطقه، مقاومت فشاری تک‌محوری آنها مطابق استاندارد

جدول ۲. مؤلفه‌های فیزیکی و مکانیکی نمونه‌های مورد بررسی (جنوب‌غرب مشهد) در گروه متاپریدوتیت‌ها و در سه رده مقاومت فشاری تک‌محوری بر اساس استاندارد بنیادوسکی و برنند (Bieniawski and Bernede, 1979)

Table 2. Physical and mechanical parameters of the studied samples (southwest of Mashhad) in meta peridotites group for three classes of uniaxial compressive strength according to the classification of Bieniawski and Bernede (1979)

Meta peridotites								
Strength classification	Sample number	Porosity (%)	Water absorption (%)	Density (gr/cm ³)	UCS (MPa)	Is ₅₀ (MPa)	BT (MPa)	Serpentini zation (%)
Very Strong (VS)	Pr-H1	0.81	1.6	3.30	120	8.1	7.7	20 - 30
	Pr-H2	0.68	2.9	3.18	98	7.6	7.0	25 - 35
	Pr-H3	0.90	1.9	3.05	115	7.9	8.9	30 - 40
	Pr-H4	0.41	1.5	3.28	116	8.0	8.3	25 - 35
	Pr-H5	0.73	3.2	2.99	104	5.9	7.4	35 - 45
	Pr-H6	0.45	1.7	3.21	107	5.6	7.2	30 - 40
	Pr-H7	0.51	2.1	3.32	130	6.9	9.5	25 - 35
	Pr-H8	0.57	2.7	3.11	130	5.8	9.7	20 - 30
	Pr-H9	0.50	1.5	3.08	135	7.7	8.6	25 - 35
	Pr-H10	1.03	2.3	3.25	124	7.2	8.1	30 - 40
Strong (S)	Pr-M1	0.95	3.9	2.89	69	5.7	5.9	55 - 65
	Pr-M2	1.26	3.4	2.60	100	5.5	6.9	45 - 55
	Pr-M3	0.74	1.9	3.12	73	5.1	5.8	35 - 45
	Pr-M4	0.85	2.0	2.95	71	4.8	4.7	50 - 60
	Pr-M5	0.91	2.8	2.56	79	4.3	5.4	45 - 50
	Pr-M6	1.99	4.2	2.25	56	3.9	7.9	50 - 60
	Pr-M7	0.62	2.3	2.81	58	5.9	8.3	45 - 55
	Pr-M8	1.80	2.8	2.66	49	5.5	5.1	50 - 60
	Pr-M9	0.66	1.5	3.22	74	6.6	6.7	40 - 50
	Pr-M10	1.34	3.1	2.79	98	5.9	9.0	35 - 45
Medium Strong (MS)	Pr-FL1	2.97	7.1	2.64	39	4.4	5.1	55 - 65
	Pr-FL2	0.90	3.1	2.59	49	4.5	3.8	70 - 80
	Pr-FL3	1.57	3.4	2.54	52	5.4	3.4	60 - 70
	Pr-FL4	2.14	5.5	2.42	58	3.9	6.4	60 - 70
	Pr-FL5	1.84	4.5	2.39	48	2.7	3.4	65 - 75
	Pr-FL6	1.53	3.7	2.34	31	4.2	3.3	50 - 60
	Pr-FL7	3.39	4.4	2.60	27	4.0	3.9	70 - 80
	Pr-FL8	1.85	3.2	2.46	30	3.3	4.9	55 - 65
	Pr-FL9	2.13	6.3	2.52	43	2.1	5.8	65 - 75
	Pr-FL10	1.17	3.7	2.70	35	4.1	3.6	70 - 80

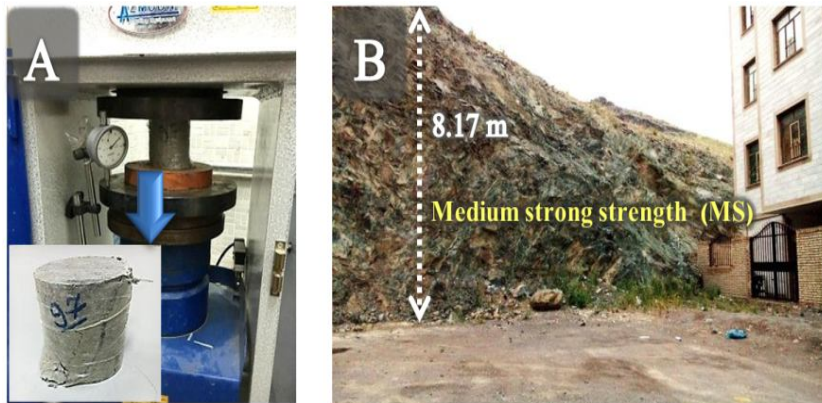
جدول ۳. مؤلفه‌های فیزیکی و مکانیکی نمونه‌های مورد بررسی (جنوب‌غرب مشهد) در گروه متاپیروکسنیت‌ها و در سه رده مقاومت فشاری تک‌محوری بر اساس استاندارد بنیواسکی و برند (Bieniawski and Bernede, 1979)

Table 3. Physical and mechanical parameters of the studied samples (southwest of Mashhad) in meta pyroxenites group for three classes of uniaxial compressive strength according to the classification of Bieniawski and Bernede (1979)

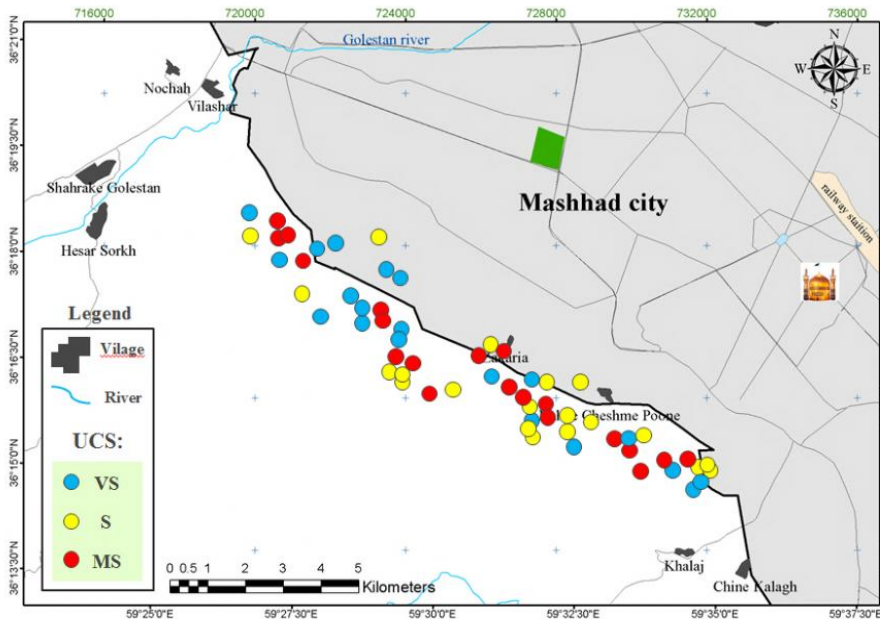
Meta pyroxenites								
Strength classification	Sample number	Porosity (%)	Water absorption (%)	Density (gr/cm ³)	UCS (MPa)	Is ₅₀ (MPa)	BT (MPa)	Serpentini zation (%)
Very Strong (VS)	Px-H1	0.57	2.6	3.22	107	7.0	8.5	20 - 30
	Px-H2	0.52	1.4	3.31	137	8.1	9.2	20 - 30
	Px-H3	0.86	2.5	3.00	100	5.6	7.3	35 - 45
	Px-H4	0.62	1.5	3.17	135	7.7	9.1	30 - 40
	Px-H5	0.52	2.2	3.24	134	7.8	8.7	25 - 35
	Px-H6	0.74	1.9	3.27	114	6.3	8.2	35 - 45
	Px-H7	0.51	1.3	3.31	98	7.6	7.1	25 - 35
	Px-H8	0.66	1.7	3.29	103	5.1	7.2	30 - 40
	Px-H9	0.70	2.8	3.11	110	6.9	9.3	25 - 35
	Px-H10	0.64	2.4	3.25	100	5.2	6.7	35 - 45
Strong (S)	Px-M1	1.21	2.2	3.07	97	5.2	5.7	55 - 65
	Px-M2	0.69	1.9	3.21	88	5.7	7.6	35 - 45
	Px-M3	0.85	3.2	2.98	83	6.2	5.8	50 - 60
	Px-M4	1.82	3.9	2.64	66	3.9	6.2	45 - 55
	Px-M5	0.72	3.5	2.85	62	4.7	6.9	55 - 65
	Px-M6	0.67	1.9	3.01	96	6.3	7.8	40 - 50
	Px-M7	0.53	1.8	2.84	87	5.3	5.4	45 - 55
	Px-M8	1.02	3.2	2.87	59	5.5	5.7	50 - 60
	Px-M9	1.07	2.1	2.95	69	5.9	6.1	35 - 45
	Px-M10	0.87	2.3	2.82	67	4.6	6.6	45 - 55
Medium Strong (MS)	Px-FL1	1.27	2.6	2.85	51	3.8	4.0	70 - 80
	Px-FL2	0.71	2.8	2.71	56	5.3	4.9	70 - 80
	Px-FL3	0.73	2.5	2.82	30	5.8	3.8	60 - 70
	Px-FL4	1.32	3.5	2.69	35	3.7	6.0	55 - 65
	Px-FL5	0.92	2.9	2.88	46	3.4	4.1	65 - 75
	Px-FL6	1.06	4.5	2.73	50	4.1	6.3	55 - 65
	Px-FL7	1.97	3.7	2.48	55	3.3	4.9	60 - 70
	Px-FL8	2.16	4.2	2.56	39	5.6	5.2	65 - 75
	Px-FL9	1.02	3.0	2.77	50	4.2	6.5	65 - 75
	Px-FL10	0.98	2.9	2.84	47	5.2	6.1	60 - 70

سرپانتینی شدن در آنها بالاتر از سایر نمونه هاست (شکل ۸-۸).
شکل ۹، موقعیت ۶۰ نمونه مورد مقایسه را در سه رده مقاومت نسبتاً سخت، مقاومت سخت و مقاومت بسیار سخت از لحاظ مقاومت فشاری تک محوری نشان می دهد.

بازه وسیع مقاومت های به دست آمده در اولترامافیک های منطقه نشان دهنده تغییرات زیاد کانی شناسی در این گروه از سنگ هاست. مشاهدات صحرائی نشان می دهد بیشتر نمونه هایی که مقاومت نسبتاً سخت برای آنها به دست آمده است (شکل ۸-۸)، در زون ها و پهنه های خرد شده گسلی واقع شده اند و شدت



شکل ۸. A: یک نمونه متاپریدوتیت با مقاومت فشاری تک محوری نسبتاً سخت و B: موقعیت نمونه در یک زون گسلی (جنوب غرب مشهد)
Fig. 8. A: A meta peridotite sample with a medium strong uniaxial compressive strength, and B: The sample location in a fault zone (southwest of Mashhad)

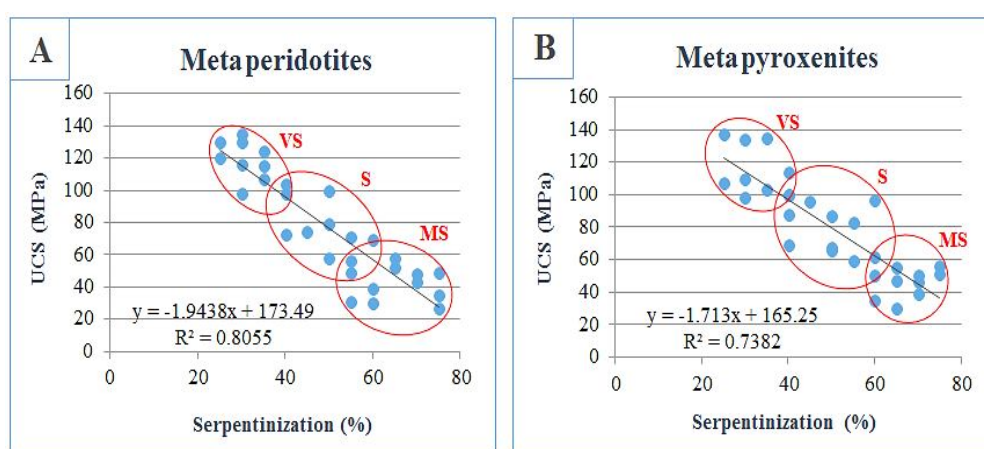


شکل ۹. موقعیت نمونه های جنوب غرب مشهد در سه رده مقاومت تک محوری بر اساس استاندارد بنیواسکی و برنید (Bieniawski and Bernede, 1979)

Fig. 9. Position of specimens from southwest of Mashhad in three classes of uniaxial compressive strength according to Bieniawski and Bernede (1979)

مقاومت فشاری تک‌محوری با شدت سرپانتینی شدن را در متاپریدوتیت‌ها و شکل B-۱۰، رابطه میان مقاومت فشاری تک‌محوری را با درصد سرپانتینی شدن در متاپیروکسنیت‌ها نشان می‌دهد. با توجه به اهمیت این موضوع در ادامه شدت سرپانتینی شدن نمونه‌ها مورد توجه قرار گرفته است.

به عبارت دیگر، مقایسه نمونه‌ها در مقاطع میکروسکوپی با مقاومت به دست آمده برای آنها نشان می‌دهد که ارتباط نزدیکی میان شدت سرپانتینی شدن نمونه‌ها با مقاومت فشاری تک‌محوری حاصل از آنها برقرار است؛ به طوری که هرچه نمونه از شدت سرپانتینی شدن بیشتری برخوردار باشد، مقاومت تک‌محوری در آن کاهش می‌یابد. شکل A-۱۰، ارتباط میان



شکل ۱۰. A: رابطه میان مقاومت فشاری تک‌محوری و درصد سرپانتینی شدن در متاپریدوتیت‌ها و B: رابطه میان UCS و سرپانتینیزاسیون در متاپیروکسنیت‌ها (جنوب‌غرب مشهد)

Fig. 10. A: Relationship between the Uniaxial compressive strength and the percentage of serpentinization in meta peridotites, and B: Relationship between UCS and serpentinization in meta pyroxenites (southwest of Mashhad)

سنگ با درجه سرپانتینی ضعیف در نظر گرفته شده‌اند. همچنین اولترامافیک‌هایی که ۲۵ تا ۷۵ درصد هیدراسیون دارند، با درجه سرپانتینی متوسط و نمونه‌هایی با ۷۵ تا ۹۵ درصد هیدراسیون دارای درجه سرپانتینی شدید هستند. طبق نظر استیلس و همکاران (Styles et al., 2014)، در این نمودار سنگ‌های اولترامافیک با کمتر از ۵ درصد هیدراسیون به عنوان سنگ سالم^۱ و سنگ‌های اولترامافیک با درصد هیدراسیون بالاتر از ۹۵ درصد به عنوان سنگ آتره^۲ در نظر گرفته می‌شوند. این در حالی است که باید اصطلاح سنگ سالم در مقابل سنگ هوازده و اصطلاح سنگ آتره در برابر سنگ غیر آتره استفاده شود. به این

تعیین شدت سرپانتینی شدن در نمونه‌های مورد بررسی

در منطقه مورد بررسی می‌توان درجات مختلف سرپانتینی شدن را در واحدهای اولترامافیک مشاهده کرد؛ به طوری که در برخی نقاط به علت شدت بالای تغییرات نام سنگ به متاسرپانتینیت تغییر کرده است. در شکل A-۱۱، نمودار ارائه شده توسط استیلس و همکاران (Styles et al., 2014) نشان داده شده است که در آن تغییرات کانی‌های اولترامافیک با افزایش درصد هیدراسیون بیان شده است. بر طبق این نمودار سنگ‌های اولترامافیکی که ۵ تا ۲۵ درصد هیدراسیون داشته‌اند، به عنوان

1. Fresh
2. Altered

دلیل که ممکن است سنگی در اثر محلول‌های گرمابی آلتیره شده باشد و در سطح دچار هوازدگی شود؛ ولی در عمق بدون هوازدگی باقی بماند. همچنین یک سنگ سالم که از هوازدگی به دور بوده است، ممکن است در عمق دچار آلتراسیون شود و یا از محلول‌های گرمابی به دور باشد و از دگرسانی محفوظ بماند. از طرف دیگر، برای استفاده از این نمودار در منطقه مورد بررسی، استفاده از اصطلاح سنگ سالم و سنگ آلتیره در مورد سرپانتین‌های مشهد صحیح نیست؛ زیرا افیولیت‌های مشهد در اثر فرایند جایگزینی زمین‌ساختی دچار دگرگونی ناحیه‌ای در حد رخساره شیب‌های سبز شده‌اند که در نتیجه آن سرپانتین‌ها به وجود آمده‌اند. این سرپانتین‌ها گستردگی فراوانی دارند و در طول چندین کیلومتر و در شهرستان‌های اطراف مانند نیشابور و تربت جام و... نیز دیده می‌شوند؛ در حالی که تأثیر دگرسانی در یک منطقه محدود است. از طرف دیگر، فرایند دگرسانی در افیولیت‌ها موجب کانی‌سازی کرومیت می‌شود که این کانی در افیولیت‌های مشهد و در مقیاس وسیع به چشم نمی‌خورد. در مورد فرایند هوازدگی نیز در سرپانتین‌های مشهد این فرایند اهمیت زیادی ندارد؛ زیرا در هوازدگی دو مؤلفه دما و بارش سالانه نقشی مهم ایفا می‌کنند که با توجه به اینکه شهر مشهد در یک منطقه خشک و نیمه‌خشک قرار گرفته است و با توجه به میانگین دمای سالانه ۱۳/۵ درجه سانتی‌گراد و میانگین بارش سالانه ۲۵۱ میلی‌متر در این منطقه، بر اساس تقسیم‌بندی پلتیر (Peltier, 1950) میزان هوازدگی در سنگ‌های این منطقه بسیار کم است. همچنین در اثر هوازدگی اولترامافیک‌ها لاتریت‌ها به وجود می‌آیند که کانسار آهن نیکل دار است و برای تشکیل آن نزولات جوی بالا مورد نیاز است؛ در حالی که در افیولیت‌های مشهد ذخایر نیکل به دلیل میزان بارش کم تشکیل نشده است. از طرف دیگر اگر سرپانتین‌های مشهد محصول هوازدگی بودند، باید در طی زمان تبدیل به خاک شده و با فرسایش از بین می‌رفتند؛ در حالی که در جنوب غرب مشهد و در اعماق مختلف سرپانتین‌ها تکرار می‌شوند و در ترانشه‌ها

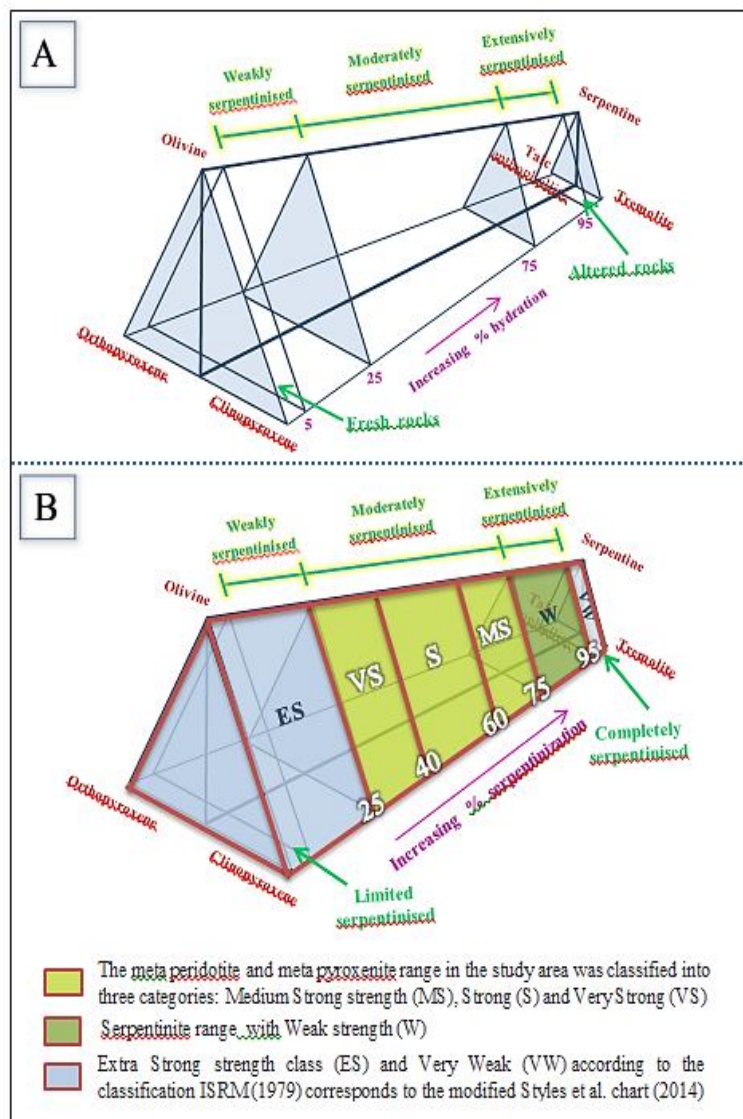
به وضوح قابل تشخیص هستند. در نتیجه هوازدگی نیز نمی‌تواند عامل تشکیل سرپانتین‌های مشهد باشد. تمام این موارد نشان‌دهنده این هستند که سرپانتین‌های مشهد در اثر دگرگونی ناحیه‌ای (رخساره شیب‌های سبز) در همان زمان جای‌گیری افیولیت‌ها تشکیل شده‌اند. با توجه به دلایل بیان‌شده و برای استفاده از نمودار استیلس و همکاران (Styles et al., 2014) برای درجات سرپانتینی شدن افیولیت‌های مشهد، نویسندگان نمودار شکل B-۱۱ را پیشنهاد می‌کنند که در این نمودار برای نمونه‌هایی که کمتر از ۵ درصد سرپانتینی شده‌اند، اصطلاح سرپانتینی محدود^۱ و برای نمونه‌هایی که بیشتر از ۹۵ درصد سرپانتینی شده‌اند، از اصطلاح کاملاً سرپانتینی^۲ استفاده شده است. در نمودار اصلاح شده استیلس و همکاران (Styles et al., 2014) در شکل B-۱۱، علاوه بر در نظر گرفتن درجات سرپانتینی شدن، محدوده مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌های مورد بررسی نیز آورده شده است.

پس از بررسی مقاطع میکروسکوپی تهیه‌شده از نمونه‌های مورد مطالعه و تعیین درصد سرپانتینی شدن در آنها (جدول ۲) و انطباق آنها بر روی نمودار اصلاح شده استیلس و همکاران (2014 Styles et al.)، مشخص شد که نمونه‌های منطقه در محدوده سنگ‌های سرپانتینی متوسط و سرپانتینی شدید قرار می‌گیرند. با مقایسه درصد سرپانتینی شدن نمونه‌ها در مقطع میکروسکوپی و مقاومت فشاری تک‌محوری آنها مشخص شد که متاپریدوتیت‌ها و متاپیروکسنیت‌هایی که طبق جدول ۱، دارای مقاومت نسبتاً سخت، سخت و بسیار سخت هستند، در محدوده سنگ‌های سرپانتینی متوسط قرار می‌گیرند؛ به طوری که نمونه‌هایی که مقاومت بسیار سخت دارند، در مقطع میکروسکوپی به طور میانگین حدود ۲۵ تا ۴۰ درصد سرپانتینی شدن نشان می‌دهند، نمونه‌های با مقاومت سخت حدود ۴۰ تا ۶۰ درصد سرپانتین در مقطع میکروسکوپی دارند و نمونه‌های با مقاومت نسبتاً سخت حدود ۶۰ تا ۷۵ درصد سرپانتین را در مقطع میکروسکوپی نشان می‌دهند (شکل B-۱۱).

1. Limited serpentinised
2. Completely serpentinised

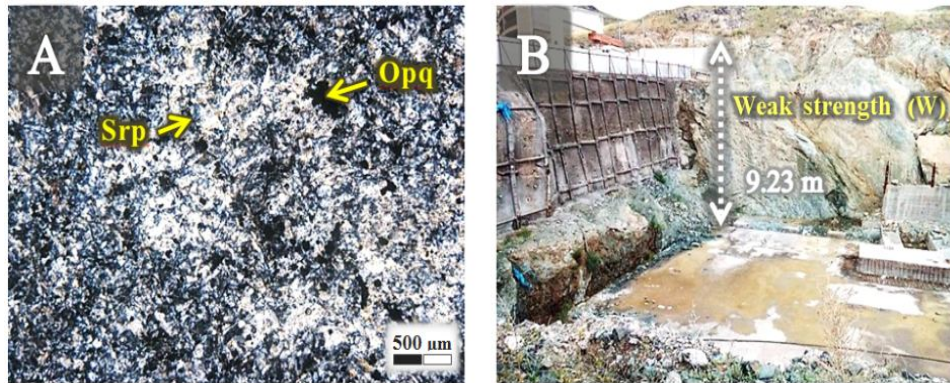
نتایج حاصل از مقاومت فشاری تک‌محوری این گروه از نمونه‌ها نشان می‌دهد که این دسته از سرپانتینیت‌ها دارای مقاومت ضعیف هستند (شکل ۱۲-B).

همچنین بررسی مقاطع میکروسکوپی نمونه‌های برداشت شده از منطقه با درجه سرپانتینیتی ۷۵ تا ۹۵ درصد نشان می‌دهد که این نمونه‌ها شدیداً سرپانتینیتی شده (شکل ۱۱-B) و سنگ اولیه آنها قابل تشخیص نیست. در نتیجه نمی‌توان آنها را جزو دو گروه متاپریدوتیت‌ها و متاپروکسنیت‌ها در نظر گرفت (شکل ۱۲-A).



شکل ۱۱. A: نمودار درجات مختلف سرپانتینیتی شدن در سنگ‌های اولترامافیک (Styles et al., 2014) و B: نمودار اصلاح شده (Styles et al., 2014) و ارتباط میان درصد سرپانتینیتی شدن و مقاومت فشاری تک‌محوری بر اساس سه رده مقاومتی MS، S و VS در متاپریدوتیت‌ها و متاپروکسنیت‌ها (جنوب غرب مشهد)

Fig. 11. A: Different degrees of serpentinization in ultramafic rocks (Styles et al., 2014), and B: Corrected chart (Styles et al., 2014) and the relationship between the serpentinization percentage and uniaxial compressive strength based on three classes of resistance MS, S, and VS in meta peridotites and meta pyroxenites (southwest of Mashhad)



شکل ۱۲. A: مقطع میکروسکوپی نمونه سنگ سرپانتینیت با شدت سرپانتینی شدید و B: توده سنگ سرپانتینیت با مقاومت ضعیف (جنوب‌غرب مشهد). علائم اختصاری از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است (Opq: کانی اوپاک، Srp: سرپانتین).

Fig. 12. A: Microscopic section of serpentinite sample with severe serpentinite intensity, and B: Serpentinite rock mass with weak strength (W) (southwest of Mashhad). Abbreviations after Whitney and Evans (2010) (Opq: Opaque mineral, Srp: Serpentine).

بازهای از مقاومت تک‌محوری مورد نیاز است از روی درصد سرپانتینی شدن سنگ‌های اولترامافیک محدوده‌ای برای مقاومت تک‌محوری آنها پیش‌بینی و در هزینه‌های مربوط به آزمایش صرفه‌جویی کرد.

نتایج پژوهش‌های قبلی نشان می‌دهد که سنگ‌های اولترامافیک سرپانتینی شده نیز به اندازه کافی برای سنگ پی قوی و مستحکم هستند (Kurtulus et al., 2011). اما بررسی‌ها در منطقه مورد بررسی نشان می‌دهد که این سنگ‌ها حتی در رده مقاومت سخت دارای مشکلات عدیده‌ای هستند که از آن میان می‌توان به ناپایداری دامنه‌ها، ریزش ترانشه و لغزش‌های متعدد در این نوع سنگ‌ها اشاره کرد (شکل ۱۳). از آنجا که با پیشرفت و گسترش شهر در منطقه مورد بررسی، اغلب ساخت و سازهای اخیر بر روی دامنه‌ها صورت گرفته است؛ لذا شیب این دامنه‌ها نیز می‌تواند در ناپایداری منطقه و افزایش لغزش‌ها بسیار مؤثر باشد (شکل ۱۳-A). همچنین در اثر وجود درزه‌ها و شکستگی‌های فراوان و نامنظم و نیز درجه سرپانتینی شدید، ریزش گود در سنگ‌های منطقه مورد بررسی به چشم می‌خورد (شکل ۱۳-B).

با توجه به اینکه در نمونه‌های کاملاً سرپانتینی شده با درصد سرپانتینی بیشتر از ۹۵ درصد، مغزه‌گیری بسیار دشوار بوده و در مغزه‌های تهیه شده از این نمونه‌ها انواع ریز ترک‌ها و ترک‌ها به وجود می‌آید، در نتیجه در این گروه از سنگ‌ها انجام آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری با خطای زیادی مواجه می‌شد. به همین دلیل، مطابق نمودار شکل ۱۱-A پیش‌بینی می‌شود که این گروه از سنگ‌ها در رده مقاومت بسیار ضعیف^۱ در طبقه‌بندی استاندارد بنیواسکی و برنرند (Bieniawski and Bernede, 1979) قرار گیرند. به همین ترتیب و با توجه به اینکه در سنگ‌های منطقه نمونه‌های اولترامافیکی با درصد سرپانتین کمتر از ۲۵ درصد (سرپانتینی کم و سرپانتینی محدود) به دست نیامد، می‌توان بر اساس نمودار شکل ۱۱-B پیش‌بینی کرد که این گروه از سنگ‌هایی که زیر ۲۵ درصد سرپانتینی شده‌اند، در رده مقاومت به شدت سخت^۲ در طبقه‌بندی استاندارد بنیواسکی و برنرند (Bieniawski and Bernede, 1979) قرار می‌گیرند.

چنان که نمودار شکل ۱۱-B نشان می‌دهد، رابطه‌ای نزدیک میان درصد سرپانتینی شدن و مقاومت فشاری تک‌محوری در سنگ‌های اولترامافیک برقرار است. می‌توان در مواردی که

1. VW
2. ES

همچنین متاپیروکسنیت‌های با مقاومت نسبتاً پایین دارای تخلخل کمتر و جذب آب کمتری نسبت به متاپریدوتیت‌های با مقاومت نسبتاً پایین هستند. ولی این مسئله را که متاپیروکسنیت‌های با مقاومت نسبتاً سخت مشکلات بیشتری را در منطقه ایجاد کرده‌اند، می‌توان به درزه‌ها و شکستگی‌های بیشتر در این نوع سنگ‌ها مربوط دانست که یکی از دلایل آن می‌تواند رفتار الاستیک کانی پیروکسن باشد (Rigopoulos et al., 2015). از طرف دیگر در متاپیروکسنیت‌ها با افزایش تغییرات کانی‌شناسی، افزایش تشکیل کانی تالک به چشم می‌خورد که دلیل لغزش‌های بیشتر در این گروه از سنگ‌ها را می‌توان علاوه بر سطوح ضعف به خاصیت صابونی این کانی تعمیم داد.

به عبارت دیگر نتایج به دست آمده در این پژوهش نشان می‌دهد که حتی در سنگ‌های اولترامافیک با مقاومت فشاری تک‌محوری سخت، به دلیل فرایند سرپانتینی شدن، تغییرات کانی‌ها می‌تواند به بروز مشکلاتی برای سازه منجر شود. بنابراین شدت سرپانتینی شدن در این سنگ‌ها نسبت به مقاومت آنها در اولویت قرار دارد.

بررسی ناپایداری‌ها در منطقه نشان می‌دهد که اغلب لغزش‌های ایجاد شده در متاپیروکسنیت‌های با مقاومت نسبتاً سخت به وقوع می‌پیوندد (شکل ۱۳- C و D). در حالی که متاپیروکسنیت‌ها در درجات سرپانتینی شدید از مقاومت بیشتری نسبت به متاپریدوتیت‌های شدیداً سرپانتینی شده برخوردار هستند.



شکل ۱۳. مشکلات مربوط به سنگ‌های اولترامافیک منطقه، A: ناپایداری دامنه، B: ریزش گود، C و D: لغزش سنگ‌ها (جنوب‌غرب مشهد)

Fig. 13. Problems with ultramafic rocks of the region, A: slope instability, B: excavation collapse, C and D: various sliding (southwest of Mashhad)

در این سنگ‌ها می‌توان این گونه استنباط کرد که حتی اگر نمونه اولترامافیک دارای مقاومت سخت باشد، به دلیل پدیده سرپانتینی شدن، احتمال وقوع لغزش، ناپایداری دامنه و ریزش گود در این گروه از سنگ‌ها دور از انتظار نیست.

با توجه به موارد بیان شده، در سنگ‌های اولترامافیک شدت سرپانتینی شدن نسبت به مقاومت سنگ‌ها در اولویت قرار دارد و مشکلات مربوط به احداث سازه را باید در میزان سرپانتینی شدن این سنگ‌ها جستجو کرد. در نتیجه با بررسی‌های کانی‌شناسی

نتیجه گیری

بررسی‌های آزمایشگاهی بر روی نمونه‌های برداشت شده از سنگ‌های اولترامافیک جنوب غرب مشهد نشان می‌دهد که:

- سنگ‌های اولترامافیک مشهد بخش عمده‌ای از افیولیت‌های این منطقه را تشکیل داده‌اند که پس از جای گیری زمین ساختی متحمل دگرگونی ناحیه‌ای (در حد رخساره شیست سبز) شده‌اند و اغلب در دو گروه متاپریدوتیت‌ها و متاپیروکسنیت‌ها در صد‌های مختلفی از سرپانتینی شدن را نشان می‌دهند.

- ارتباطی میان درصد سرپانتینی شدن و مقاومت فشاری تک‌محوری سنگ‌های منطقه وجود دارد؛ به این صورت که متاپریدوتیت‌ها و متاپیروکسنیت‌هایی که بر اساس روش استاندارد بنیاسکی و برنند (Bieniawski and Bernede, 1979) دارای مقاومت نسبتاً سخت، سخت و بسیار سخت هستند، در محدوده سنگ‌هایی با درجه متوسط سرپانتینی شده (۲۵ تا ۷۵ درصد سرپانتینی) قرار می‌گیرند.

- در نمونه‌های شدیداً سرپانتینی شده (۷۵ تا ۹۵ درصد سرپانتینی)، سنگ اولیه قابل تشخیص نیست و در نتیجه نمی‌توان آنها را جزو دو گروه متاپریدوتیت‌ها و متاپیروکسنیت‌ها در نظر گرفت. این گروه از سنگ‌ها با عنوان سرپانتینیت‌ها شناخته می‌شوند. مقایسه این گروه از نمونه‌ها با مقاومت فشاری تک‌محوری آنها نشان می‌دهد که این سنگ‌ها در رده مقاومت ضعیف قرار می‌گیرند. همچنین در نمونه‌های کاملاً سرپانتینی شده (دارای بیش از ۹۵ درصد سرپانتین) چون شرایط انجام آزمایش بسیار دشوار است، با توجه به نمودار ارائه شده پیش‌بینی می‌شود که این گروه از سنگ‌ها در رده مقاومت فشاری بسیار ضعیف قرار گیرند.

- از آنجا که در منطقه نمونه‌هایی با شدت سرپانتینی شدن کمتر از ۲۵ درصد یافت‌نشده و با توجه به ارتباط نزدیک میان مقاومت فشاری تک‌محوری و شدت سرپانتینی شدن نمونه‌ها، این گونه استنباط شد که نمونه‌های با درجه سرپانتینی کمتر از ۲۵ درصد (سرپانتینی کم و سرپانتینی محدود) احتمالاً در رده مقاومت فشاری تک‌محوری به شدت سخت قرار می‌گیرند.

- با توجه به ارتباط میان درصد سرپانتینی شدن و مقاومت فشاری تک‌محوری سنگ‌های منطقه، می‌توان بر اساس درصد سرپانتینی شدن، بازه‌ای برای مقاومت فشاری تک‌محوری پیش‌بینی کرد و در تعداد آزمایش‌ها و هزینه‌ها صرفه‌جویی کرد. - در سنگ‌های اولترامافیک منطقه در اغلب رده‌های مقاومتی پدیده‌هایی مانند ناپایداری دامنه، لغزش و ریزش گود در این سنگ‌ها به وقوع می‌پیوندد. این مسئله نشان می‌دهد که با وجود مقاومت قابل قبول به دست آمده از آزمایش‌های فیزیکی و مکانیکی نمونه‌ها، احداث سازه در این سنگ‌ها ممکن است با مشکلاتی روبرو شود. این موضوع اهمیت شدت سرپانتینی شدن را نسبت به مقاومت در این سنگ‌ها نشان می‌دهد.

قدردانی

نویسندگان از جناب آقای پروفیسور محمدحسن کریم‌پور بابت راهنمایی‌های بی‌دریغ و مؤثرشان در بخش پتروگرافی مقاله، نهایت سپاس و قدردانی را دارند. شایان ذکر است که اجرای این طرح مستخرج از رساله دکتری، طرح شماره ۳/۳۸۳۶۷/مصوبه ۹۴/۵/۱۰ دانشگاه فردوسی مشهد است.

References

Abdelaziz, R., Abdel-Rahman, Y. and Wilhelm, S., 2018. Landsat-8 data for chromite prospecting in the Logar Massif, Afghanistan. *Heliyon*, 4(2): 1-18

Alavi, M., 1991. Sedimentary and structural characteristics of the Paleo-Tethys remnants in northeastern Iran. *Geological Society of America Bulletin*, 103(8): 983-992.

- Bieniawski, Z.T., 1974. Estimating the strength of rock materials. *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy*, 74(8): 312–320.
- Bieniawski, Z.T. and Bernede, M.J., 1979. Suggested methods for determining the uniaxial compressive strength and deformability of rock materials. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics abstracts*, 16(2): 138–140.
- Boulin, J., 1988. Hercynian and Eocimmerian events in Afghanistan and adjoining regions. *Tectonophysics*, 148(3): 253–278.
- Brown, E.T. 1981. *Rock characterization, Testing and monitoring ISRM suggested methods*. Pergamon press, Oxford, 211 pp.
- Cargill, J.S. and Shakoor, A. 1990. Evaluation of empirical methods for measuring the uniaxial compressive strength of rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 27(6): 495–503.
- Gamble, J.C., 1971. *Durability-plasticity classification of shale and other argillaceous rocks*. Ph.D. Theses, University of Illinois, Urbana, Illinois, 161 pp.
- Ghaseminejad, F. and Torabi, Gh., 2015. Petrography and mineral chemistry of Twehrlites in contact zone of gabbro intrusions and mantle peridotites of the Naein ophiolite. *Journal of Economic Geology*, 6(2): 291–304. (in Persian with English abstract)
- IAEG, 1979. Classification of rocks and soils for engineering geological mapping. Part 1: Rock and Soil Materials. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, 19(1): 355–371.
- Karimpour, M.H., Stern, C.R. and Farmer, G.L., 2010. Zircon U–Pb geochronology, Sr–Nd isotope analyses, and petrogenetic study of the Dehnow diorite and Kuhsangi granodiorite (Paleo-Tethys), NE Iran. *Journal of Asian Earth Sciences*, 37(4): 384–393.
- Khanchuk, A.I. and Vysotsky, S.V., 2016. Different-depth gabbro–ultrabasic associations in the Sikhote-Alin ophiolites (Russian Far East). *Russian Geology and Geophysics*, 57(1): 141–154.
- Kurtulus, C., Bozkurt, A. and Endes, H., 2011. Physical and mechanical properties of serpentinized ultrabasic rocks in NW Turkey. *Pure and applied geophysics*, 169(7): 1205–1215.
- Peltier, L.C., 1950. The Geographic Cycle in Periglacial Regions as it is Related to Climatic Geomorphology. *Annals of the Association of American Geographers*, 40(3): 214–236.
- Rigopoulos, I., Tsikouras, B., Pomonis, P. and Hatzipanagiotou, K., 2015. Assessment of the engineering behavior of ultramafic and mafic rocks using chemical indices. *Engineering Geology*, 196(1): 222–237.
- Shafaii Moghadam, H., Hua Li, X., Xiao Ling, X., Stern, R., Zaki Khedr, M., Chiaradia, M., Ghorbani, Gh., Arai, Sh. and Tamura, A., 2014. Devonian to Permian evolution of the Paleo-Tethys Ocean: New evidence from U–Pb zircon dating and Sr–Nd–Pb isotopes of the Darrehanjir – Mashhad “ophiolites”, NE Iran. *Gondwana Research*, 28(1): 781–799.
- Shafaii Moghadam, H. and Stern, R.J., 2014. Ophiolites of Iran: Keys to understanding the tectonic evolution of SW Asia: (I) Paleozoic ophiolites. *Journal of Asian Earth Sciences*, 91(1): 19–38.
- Sheikholeslami, M.R. and Kouhpeyma, M., 2012. Structural analysis and tectonic evolution of the eastern Binalud Mountains, NE Iran. *Journal of Geodynamics*, 61(1): 23–46.
- Shirdashtzadeh, N., Torabi, GH. and Samadi, R., 2017. Petrography and mineral chemistry of metamorphosed mantle peridotites of Nain Ophiolite (Central Iran). *Journal of Economic Geology*, 9(1): 57–72. (in Persian with English abstract)
- Stampfli, G.M., 1996. The intra-alpine terrain: a Paleo-Tethyan remnant in the alpine variscides. *Eclogae Geologicae Helvetiae*, 89(1): 13–42.
- Strecheisen, A., 1974. Classification and nomenclature of plutonic rocks recommendations of the IUGS subcommission on the systematics of igneous rocks. *Geologische Rundschau*, 63(2): 773–786.
- Styles, M.T., Sanna, A., Lacinska, A.M., Naden, J. and Maroto-Valer, M., 2014. The variation in composition of ultramafic rocks and the effect on their suitability for carbon dioxide sequestration by mineralization following acid leaching. *Modeling and Analysis*, 4(1): 1–12.
- Whitney, D.L. and Evans B.W., 2010. Abbreviations for names of rock-forming

- minerals. *American Mineralogist*, 95(1): 185–187.
- Zanchetta, S., Berra, F., Zanchi, A., Bergomi, M., Caridroit, M., Nicora, A. and Heidarzadeh, G., 2013. The record of the Late Palaeozoic active margin of the Palaeotethys in NE Iran: constraints on the Cimmerian orogeny. *Gondwana Research*, 24(3): 1237–1266.
- Zanchi, A., Zanchetta, S., Berra, F., Mattei, M., Garzanti, E., Molyneux, S., Nawab, A. and Sabouri, J., 2009. The Eo-Cimmerian (Late? Triassic) orogeny in north Iran. In: M.F. Brunet, M. Wilmsen and J.W. Granath (Editors), *South Caspian to Central Iran Basins*. Geological Society, London Special Publication, pp. 31–55.



The relationship between serpentinization and geotechnical properties of ophiolites (Case study: Paleotethys ophiolites of the Southwest of Mashhad)

Salameh Afshar, Mohammad Ghafoori*, Naser Hafezi Moghaddas and Gholam Reza Lashkaripour

Department of Geology, Faculty of Science, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

Submitted: July 20, 2018

Accepted: Jan. 09, 2019

Keywords: *serpentinization, uniaxial compressive strength, geotechnical properties, Paleotethys ophiolites*

Introduction

In the southern margin of the Mashhad plain in Northeastern Iran, there are strips with tens of kilometers length consisting of metamorphic rocks and ophiolite complexes with the NE-SW trend. Ophiolites are fragments of ancient Oceanic crust (Ghaseminejad and Torabi, 2015; Khanchuk et al., 2016; Shirdashtzadeh et al., 2017) most of which consists of ultramafic rocks. Ophiolites are formed during tectonic displacement in the southern part of the Mashhad plain (Alavi, 1991; Karimpour et al., 2010; Sheikholeslami and Kouhpeyma, 2012; Zanchetta et al., 2013; Shafaii Moghadam and Stern, 2014). These undergoing metamorphosed regions ultimately lead to the formation of serpentines complex due to factors of pressure and temperature. Subsequently, tectonic variations create different levels of serpentinization in the region. Different degrees of serpentines have different geotechnical properties that are discussed in this study.

Materials and methods

To conduct the lithological studies, 313 samples were collected from surface and trenches in the studied area. Following the preparation of the microscopic cross-section of all specimens, the mineralogical characteristics, texture changes, color changes, degradation and microcrack development were studied. Then, the samples were classified based on the general classification of ultramafic rocks (Streckeisen, 1974).

According to this classification, the ultramafics extracted from the studied area were classified in the metaperidotite and metapyroxenite groups. After separating various metaperidotites and metapyroxenites the percentage of serpentinization in all specimens were determined and 60 samples with different serpentinite percentages were selected. Also, the stone blocks were provided for preparing the core samples. Physical tests (such as dry and saturated unit weights, porosity, and water absorption percentage), and mechanical tests (such as uniaxial compressive strength, point load strength, and Brazilian tensile strength) were performed based on the Brown (1981) method in the laboratory of the Ferdowsi University of Mashhad.

Results

The results show that there is a good relationship between the percentage of serpentinization of samples and uniaxial compressive strength (the most important geotechnical parameter in rocks). The ultramafic rocks are divided into three groups based on uniaxial strength and 25 to 40% of serpentine are very strong, 40 to 60% of serpentine are strong and 60 to 75% serpentine are of medium strength. Also, the ultramafics with 75% to 95% of serpentine, are named as serpentinite rocks with weak uniaxial compressive strength.

*Corresponding authors Email: ghafoori@um.ac.ir

Discussion

Although most of the ultramafic rocks have good strength as the foundation for building, the construction of a structure on these rocks has numerous problems due to the formation of minerals such as serpentine and talc with one-directional cleavage. With increasing the degree of serpentinization, some phenomena such as slope instability, sliding, excavation collapse will occur. The results of the present research indicated the priority of serpentinization degree of ultramafic rocks compared to their strength. As it is seen, although in a high degree of serpentinization, the metapyroxenites have higher strength and lower water absorption compared to metaperidotites. Therefore, the mentioned issues demonstrated the importance of the degree of serpentinization compared to strength in ultramafic rocks.

Acknowledgements

The authors would like to thank Professor Mohammad Hassan Karimpour for his helpful and effective guidance on the petrography of ultramafics rocks in this paper.

References

- Alavi, M., 1991. Sedimentary and structural characteristics of the Paleo-Tethys remnants in northeastern Iran. *Geological Society of America Bulletin*, 103(8): 983–992.
- Brown, E.T. 1981. *Rock characterization, Testing and monitoring ISRM suggested methods*. Pergamon press, Oxford, 211 pp.
- Ghaseminejad, F. and Torabi, Gh., 2015. Petrography and mineral chemistry of Twehrlites in contact zone of gabbro intrusions and mantle peridotites of the Naein ophiolite. *Journal of Economic Geology*, 6(2): 291–304. (in Persian with English abstract)
- Karimpour, M.H., Stern, C.R. and Farmer, G.L., 2010. Zircon U–Pb geochronology, Sr–Nd isotope analyses, and petrogenetic study of the Dehnow diorite and Kuhsangi granodiorite (Paleo-Tethys), NE Iran. *Journal of Asian Earth Sciences*, 37(4): 384–393.
- Khanchuk, A.I. and Vysotsky, S.V., 2016. Different-depth gabbro–ultrabasite associations in the Sikhote-Alin ophiolites (Russian Far East). *Russian Geology and Geophysics*, 57(1): 141–154.
- Shafaii Moghadam, H. and Stern, R.J., 2014. Ophiolites of Iran: Keys to understanding the tectonic evolution of SW Asia: (I) Paleozoic ophiolites. *Journal of Asian Earth Sciences*, 91(1): 19–38.
- Sheikholeslami, M.R. and Kouhpeyma, M., 2012. Structural analysis and tectonic evolution of the eastern Binalud Mountains, NE Iran. *Journal of Geodynamics*, 61(1): 23–46.
- Shirdashtzadeh, N., Torabi, GH. and Samadi, R., 2017. Petrography and mineral chemistry of metamorphosed mantle peridotites of Nain Ophiolite (Central Iran). *Journal of Economic Geology*, 9(1): 57–72. (in persian with English abstract)
- Streckeisen, A., 1974. Classification and nomenclature of plutonic rocks recommendations of the IUGS subcommission on the systematics of igneous rocks. *Geologische Rundschau*, 63(2): 773–786.