

Thermal treatment investigation of natural lizardite at the atmospheric pressure, based on XRD and DTA/TG analysis methods

R. Dabiri¹, B. Karimi Shahraki², H. Mollaei^{3*}, M. Ghaffari³

1- Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

2- Mineralogy Lab, Iran Mineral Processing Research Centre (IMPRC)

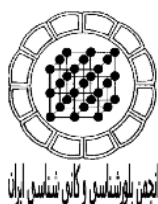
3-Department of Geology, Faculty of Sciences, Islamic Azad University-Mashhad Branch

(Received: 15/12/2008, in revised form: 25/5/2009)

Abstract: Determination of stability limits, mineralogical changes and thermal reaction of serpentine minerals are very important for the investigation of magmatism, mechanism and depth of plates of subduction. During the subduction process, serpentine (Lizardite) minerals will release their water due to thermal reactions. This dehydration can play an important role in volcanism processes related to the subduction. In this study, serpentine minerals (Lizardite) collected from the Neyriz Ophiolite Complex (NOC) were dehydrated under the constant atmospheric pressure. These mineralogical changes were determined by X-Ray diffraction and DTA-TG analyses methods. This study shows natural lizardites that heated for about one hour is stable up to 550°C. Dehydration reactions on lizardite started at approximately between 100 to 150°C and dehydroxilation reactions started at approximately 550-690°C. As a result of thermal reaction, the decomposition of lizardite will take place and then changes in to olivine (forsterite). Crystallization of olivine (forsterite) will start at 600°C. This mineral is stable up to 700°C and then crystallization of enstatite will start at 700°C. During this dehydration and crystallization reaction, amorphous processes will start at 600°C and some amount water and silica will release.

Keywords: Lizardite, serpentine, thermal reaction, XRD, DTA-TG

* Corresponding author, Tel.: +98 (0511) 8408008, Fax: +98 (0511) 8446361, E-mail: hamollai@yahoo.com



بررسی رفتار گرمایی لیزاردیت‌های طبیعی در فشار اتمسفری، بر اساس تجزیه دستگاهی XRD و DTA-TG

رحیم دبیری^۱، بهروز کریمی شهرکی^۲، حبیب ملائی^{۳*}، میترا غفاری^۳

۱- دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران

۲- موسسه تحقیقات فرآوری مواد معدنی، کرج، ایران

۳- گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه آزاد اسلامی مشهد

(دریافت مقاله: ۸۷/۹/۲۵، نسخه نهایی: ۸۸/۲/۶)

چکیده: تعیین میزان پایداری، تغییرات کانی‌شناسی و واکنش‌های گرمایی کانی‌های سرپانتین، می‌تواند در تعیین ساز و کار فرورانش، ماگماتیسم و عمق صفحات فرورونده بسیار راهگشا باشد. طی فرایند فرورانش، واکنش‌های گرمایی، باعث آزاد شدن آب کانی‌های سرپانتینی می‌شود. این امر نقش به سزایی را در فرایندهای آتشفشانی وابسته به فرورانش ایفا می‌کند. در این کار پژوهشی، رفتار گرمایی و تغییرات کانی‌شناختی کانی لیزاردیت (سرپانتین)، وابسته به منطقه فیولیته نیریز، در گستره‌های گرمایی متفاوت و در فشار جوی، با پراش پرتو X (XRD) و آنالیزهای DTA-TG، مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد. بررسی‌ها نشان داد که، واکنش‌های آبدایی (Dehydration) لیزاردیت‌های طبیعی، که به مدت یک ساعت، در دمای ۱۰۰ تا ۱۵۰ درجه سانتیگراد گرما گرفته‌اند، واکنش‌های هیدورکسیل زدایی (Dehydroxilation) آنها در گستره دمایی ۵۵۰ تا ۶۹۰ درجه سانتیگراد صورت می‌گیرد. لیزاردیت‌های طبیعی تا دمای ۵۵۰ درجه سانتیگراد پایدار بوده و در دمای ۶۰۰ درجه سانتیگراد به الیوین (فورستریت) تبدیل می‌شوند. همچنین در دمای ۷۰۰ درجه سانتیگراد، پیروکسن (انستاتیت) در نتیجه تجزیه لیزاردیت تشکیل می‌شود. بین واکنش‌های آب زدایی و تبلور، آمورف شدن، در دمای ۶۰۰ درجه سانتیگراد رخ داده و باعث تشکیل مقادیر اندکی آب و سیلیس آزاد شده است.

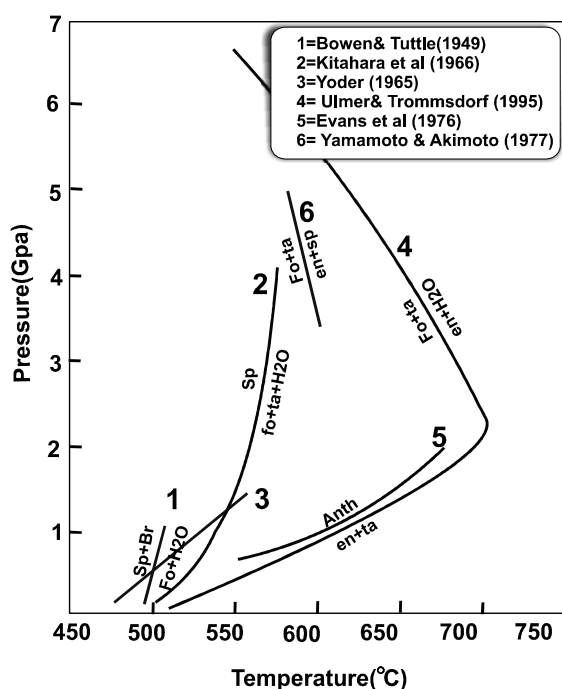
واژه‌های کلیدی: لیزاردیت، سرپانتین، رفتار گرمایی، DTA-TG، XRD

مقدمه

کانی‌ها، جزء فیلوسیلیکات‌های آبدار بوده و در ساختار خود حدود ۱۳٪ آب دارند. کانی‌های سرپانتین، در نتیجه آبدگیری از الیوین، پیروکسن و کانی‌های سیلیکاتی دیگر غنی از منیزیم،

لیزاردیت، آنتیگوریت و کریزوتیل، سه چند ریخت مهم گروه سرپانتین، با فرمول عمومی $Mg_3Si_2O_5(OH)_4$ هستند. این

* نویسنده مسئول، تلفن: ۰۸۴۰۸۰۰۸ (۰۵۱۱) ۹۸+، نمابر: ۰۸۴۴۶۳۶۱ (۰۵۱۱) ۹۸+، پست الکترونیکی: hamollai@yahoo.com

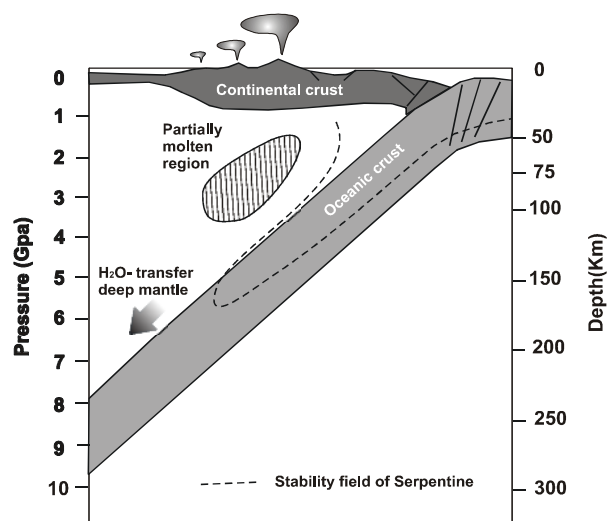


شکل ۲ گستره‌های پایداری تعیین شده برای کانی‌های گروه سرپانتین برگرفته از کارهای تجربی [۶].
(سرپانتین=Sp، بروسیت=Br، فورستريت=Fo، تالک=ta، آنستاتیت=en، آنتوفیلیت=Anth).

روش کار

این کار پژوهشی شامل سه مرحله، سنگ‌شناختی، بررسی‌های XRD و DTA-TG است. کلیه آزمایش‌ها، در موسسه تحقیقات پیشرفته فرآوری مواد معدنی ایران^۲ (IMPRC)، که دارای گواهینامه مدیریت کیفیت ISO17025 است، صورت گرفته است. نمونه‌های سرپانتینیت، نخست به منظور تعیین پاراژن کانیایی و ویژگی‌های بافتی سنگ‌ها، مورد بررسی‌های سنگ‌شناختی قرار گرفتند. به منظور بررسی رفتار گرمایی، نمونه‌ها در شرایط فشار جو و به روش پراش پرتو X مورد بررسی قرار گرفتند. این کار در گستره $80^\circ - 4^\circ = 2\theta$ و با دستگاه XRD Philips مدل XPert انجام پذیرفت. در ادامه تحت شرایط کنترل شده، پودرها با آب مقطر مخلوط شده و به تعلیق در آمدند. نمونه‌ها، پس از خشک شدن، به مدت یک ساعت، و در فشار جو، در کوره‌ای در دماهای ۲۵۰، ۴۰۰، ۵۵۰،

تشکیل می‌شوند. فرایندی که از آن با عنوان سرپانتینیت شدن^۱ یاد می‌شود. کانی‌های سرپانتین، در زون فرورانس و اعماق ۱۵۰ تا ۲۰۰ کیلومتری، آب موجود در ساختار بلوری خود را از دست می‌دهند (شکل ۱) [۱، ۲]. این آب، باعث ذوب بخشی سنگ‌ها، در اعماق ۱۰۰ تا ۱۳۰ کیلومتری و دمای ۱۳۰۰ درجه سانتیگراد شده و ماگماتیسم سری آهکی-قلیایی را در جزایر قوسی، موجب می‌شود [۳-۵]. لذا دانستن میزان پایداری، تغییرات کانی‌شناسی و واکنش‌های گرمایی کانی‌های سرپانتین، در تعیین ساز و کار فرورانس، ماگماتیسم و عمق صفحات فرورونده بسیار راهگشا خواهد بود. از جمله کارهای تجربی که برای تعیین میزان پایداری کانی‌های سرپانتین انجام گرفته، می‌توان به وندر و شریر [۶] اشاره کرد (شکل ۲). تولید و واپاشی سرپانتین، در فرایندهای چین‌خوردگی لبه‌های فرورونده زمین لرزه‌های عمیق نیز اخیراً مورد توجه برخی از پژوهشگران قرار گرفته است [۷، ۸]. به طور کلی هدف از این کار پژوهشی، بررسی رفتار گرمایی لیزاردیت‌های طبیعی در فشار جوی، بر اساس روش‌های سنگ‌شناختی، XRD، DTA، TG است. بدین منظور، نمونه‌هایی از سرپانتینیت‌های منطقه افیولیتی نیریز انتخاب شده و تغییرات آن‌ها مورد بررسی قرار گرفتند.



شکل ۱ تصویر نمادی از ساختار گرمایی در نواحی فرورانسی و میدان پایداری سرپانتین در کمان آتشفشانی. تصویر اقتباس از [۳۱].

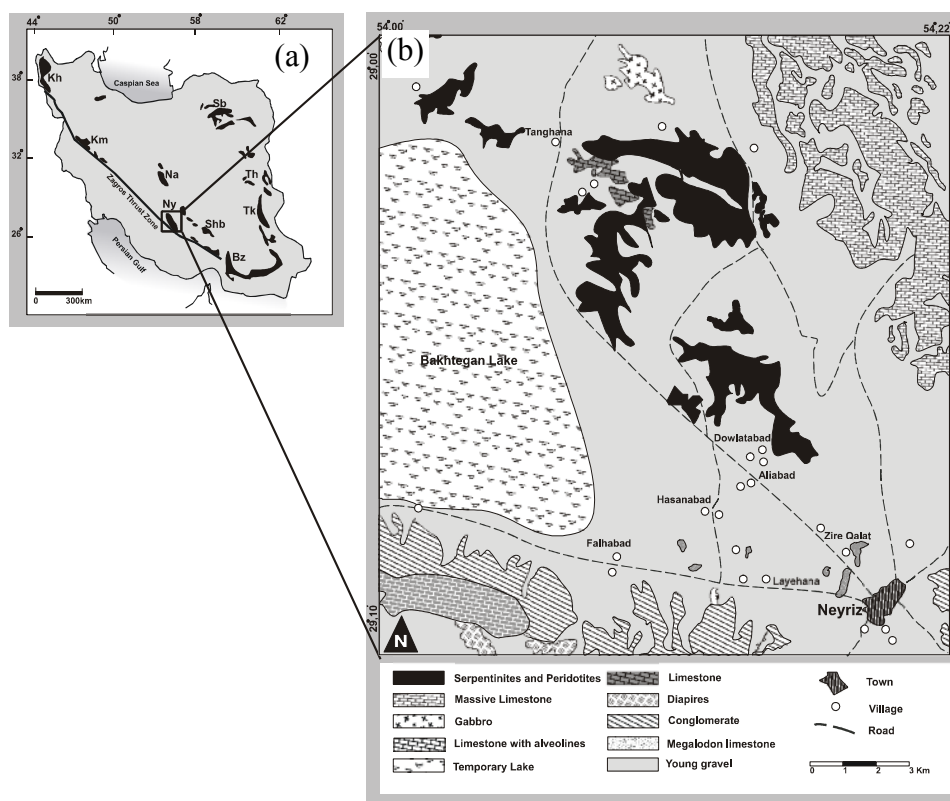
اشتوتکلین برای آن نام نوار افیولیتی (Ophiolitique Peri Arabe) نام داده است [۱۰، ۱۱]. ولی محوری بیرونی (Outer Axial Ophiolitic Belt) را انتخاب کرده است [۱۲]. افیولیت نیریز را می‌توان بخشی از گوشته بالایی و پوسته اقیانوسی نئوتتیس در نظر گرفت [۱۳]. بر اساس بررسی‌های سن سنجی Ar/Ar افیولیت‌های نیریز را به کرتاسه بالایی وابسته می‌دانند [۱۴، ۱۵]. بیشتر پژوهشگران [۱۶، ۱۷] فروانش صفحه عربی به زیر ریز پهنه ایران مرکزی، در نتیجه بسته شدن اقیانوس نئوتتیس، را عامل جایگیری این افیولیت‌ها دانسته‌اند. براساس داده‌های ژئوشیمیایی نیز، سنگ‌های این منطقه، در گستره جزایر قوسی با ویژگی‌های سری آهکی - قلیایی قرار می‌گیرد، واقع می‌شود [۱۷]. سنگ‌های موجود در این همبافت، شامل پریدوتیت‌های سرپانتینی شده (از جمله هارزبورژیت، لروزولیت، دونیت و پیروکسنیت)، گابروهای لایه‌ای و توده‌ای، گدازه‌های بالشی و چرت‌های رادیولاریتی است [۱۸، ۱۹]. در مواردی نفوذ ماگماهای پریدوتیتی در دمای بالا، به درون آهک‌های بلورین، موجب اسکارن‌زایی در منطقه شده است [۲۰].

۶۰۰، ۶۵۰، ۷۰۰، ۷۵۰، ۸۵۰ و ۱۱۰۰ درجه سانتیگراد قرار گرفتند.

بررسی (DTA-TG Differential Thermal Analysis and Thermal Gravimetry Analysis) نمونه‌ها، به منظور آگاهی از چگونگی تبادل‌های فازی، به موازات افزایش دما و کاهش وزن ناشی از واکنش‌ها، با تجزیه کننده گرمایی STA 409 PC Luxx (NETZSCH) صورت گرفت. در طول آنالیزها، دما به طور پیوسته از ۲۰°C (دمای آزمایشگاه) تا ۱۱۰۰°C افزایش داده شد و نرخ افزایش دما ۲۰°C در دقیقه بوده و از ۱۰۰ میلی گرم نمونه برای آنالیزها استفاده شده است.

زمین‌شناسی منطقه مورد بررسی

افیولیت نیریز، بخشی از نوار افیولیتی، به طول تقریبی ۳۰۰۰ کیلومتر، است که به طور ناپیوسته از سوریه شروع و پس از گذر از جنوب ترکیه و زاگرس به عمان می‌رود (شکل ۳) [۹]. این نوار، که به صورت یک کمان در راستای راندگی‌های میان دو صفحه عربستان و صفحه ایران قرار دارد، به وسیله ریکو، بررسی و به آن هلال افیولیتی حاشیه عربستان (Croissant



شکل ۳ (a) نقشه پراکندگی مجموعه افیولیتی و آمیزه‌های رنگین ایران (اقتباس از [۳۲]) و موقعیت منطقه مورد بررسی. اصلی‌ترین افیولیت‌های ایران عبارتند از: Ny = نیریز، Na = نائین، Shb = شهربابک، Bz = بندزیارت، Kh = خوی، Sb = سبزوار، Tk = چهل کوه، Th = تربت حیدریه، Km = کرمانشاه. (b) نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد بررسی و رخنمون سنگ‌های سرپانتینی در آن.

بررسی‌های سنگ شناختی

بررسی‌های سنگ‌شناختی نشان داد که، خاستگاه این نمونه سنگ‌های افیولیتی، هارزبورژیت است. این سنگ‌ها، به طور کامل سرپانتینی و به سنگ سرپانتینیت تبدیل شده‌اند. هارزبورژیت‌های سرپانتینی شده، منطقه‌ای به گستردگی ۵۵ کیلومتر مربع را می‌پوشانند. در این سنگ‌ها، پارائنز کانیاپی سرپانتین $\pm$ تالک $\pm$ ماگنتیت، مشاهده می‌شود. کانی‌های فرومنیزین، همچون الیون (فورستريت) یا ارتو پيروكسن (انستاتيت)، مشاهده نشدند. در مواردی، فقط قالبی از این کانی‌ها قابل تشخیص است، به طوری که، برخی از ارتوپيروكسن‌ها دگرسان شده و فقط قالبی از آن‌ها باقی مانده است. بر اساس رده‌بندی اوهانی و ویکس - ویتاکر و ویژگی‌های بافتی، سرپانتین‌های موجود از نوع لیزاردیت $\pm$ آنتیگوریت و رگه‌هایی از نوع کریزوتیل است (شکل ۴) [۲۱-۲۳].

واکنش‌های وابسته به تجزیه سرپانتین

با افزایش دما، میدان پایداری کانی‌های سرپانتین محدودتر می‌شود، به طوری که لیزاردیت و کریزوتیل تا رخساره شیب سبز بالایی (550°C) و آنتیگوریت تا رخساره آمفیبولیت میانی (700°C) پایداری دارند [۲۴]. در اینجا لازم به یادآوری است که میزان پایداری لیزاردیت علاوه بر دما و فشار به دو عامل زمان و اندازه ذرات نیز بستگی دارد. بر اساس بررسی‌های [۲۶]، مشخص شد که لیزاردیت در دمای 600°C (873°C کلون) پس از ۲۷ دقیقه و در دمای 700°C (973°C کلون) پس از ۱۰ دقیقه دستخوش واپاشی می‌شود [۲۵].

تجزیه سرپانتین به الیون، پيروكسن، تالک، کلریت و کانی‌های کم آب، فرایندی است که از آن به دسرپانتینیزاسیون

(Deserpentinization) یاد می‌شود. این فرایند می‌تواند در دما و فشارهای مختلف رخ دهد. تعادل‌های فازی وابسته به کانی‌های سرپانتین، در سیستم $\text{MgO-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$ ، توسط اوهانی در سال ۱۹۹۲ بررسی شد [۲۶]. وی نشان داد که، کانی‌های سرپانتین، با افزایش دما، آب خود را از دست داده و به کانی‌هایی چون الیون، پيروكسن، تالک و کلریت تبدیل می‌شوند. این واکنش‌ها گرماگیر بوده و مقداری آب تولید خواهند کرد. روابط فازی لیزاردیت، آنتیگوریت، کریزوتیل، بروسیت، فورستريت، تالک، انستاتيت، آنتوفیلیت، کوارتز و آب، در دما و فشارهای مختلف، توسط برمن و همکاران (۱۹۸۶) مورد بررسی قرار گرفته است [۲۷]. بر این اساس، واکنش‌های زیر، در شرایط ترمودینامیکی پایدار، می‌توانند بوقوع به پیوندند [۲۸]:

کریزوتیل $\rightarrow$ لیزاردیت

(در دمای حدود 180°C سانتیگراد)

بروسیت + کریزوتیل $\rightarrow$ لیزاردیت

(در دمای حدود 220°C سانتیگراد)

بروسیت + آنتیگوریت $\rightarrow$ کریزوتیل

(در دمای حدود 250°C سانتیگراد)

آب + فورستريت $\rightarrow$ بروسیت + آنتیگوریت

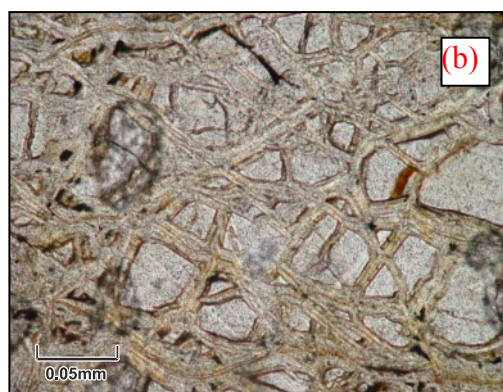
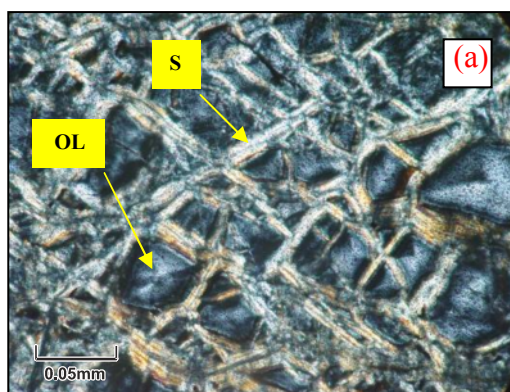
(در دمای حدود 350°C سانتیگراد)

آب + فورستريت + شبه تالک $\rightarrow$ آنتیگوریت

(در دمای حدود 550°C سانتیگراد)

انستاتيت + فورستريت $\rightarrow$ آب + فورستريت + شبه تالک

(در دمای حدود 700°C سانتیگراد)



شکل ۴ تصویری از مقطع میکروسکوپی سرپانتینیت‌های نیریز با بافت غربالی (mesh-texture) و شبه ریختی‌هایی از الیون (OL) که فقط قالبی از آن باقی مانده و به سرپانتین (S) دگرسان شده‌اند. (تصویر (a) در نور XPL و تصویر (b) در نور PPL).

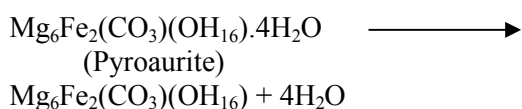
آنالیزهای پراش پرتو ایکس (XRD)

چنانکه اشاره شد، به منظور بررسی رفتار گرمایی و تغییرات فازی، نمونه‌ها در گستره‌های دمایی متفاوت، تا یک ساعت در شرایط جوی، گرما داده شدند. نخست روی نمونه‌های طبیعی وابسته به سرپانتینیت حاوی لیزاردیت، از مجموعه افیولیتی نیز، بررسی‌های XRD صورت گرفت. این بررسی‌ها نشان داد که، لیزاردیت مهمترین کانی تشکیل دهنده این سنگ‌هاست. علاوه بر آن، اندکی تالک آبدار بنام پیروآوریت، نیز با آن دیده می‌شود. به منظور بررسی تغییرات کانی‌شناسی ناشی از واکنش‌های گرمایی، بررسی‌های XRD روی نمونه‌های گرما دیده انجام شد. نتایج آنالیزها حکایت از آن دارد که، در دمای 250°C کانی تالک آبدار از بین می‌رود. در دماهای 400°C و 550°C درجه سانتیگراد، تغییرات کانی‌شناسی نداشته، ولی با افزایش دما از مقدار لیزاردیت کاسته می‌شود. تا اینکه، در دمای 600°C لیزاردیت کاملاً محو شده و دیگر آثاری از آن دیده نمی‌شود و الیون (فورستريت) از این دما شروع به تبلور می‌کند. در 650°C ، فورستريت همچنان به تبلور خود ادامه داده و در 700°C انستاتيت نیز شروع به ظهور می‌کند. در دماهای بالاتر، فورستريت و انستاتيت به همراه هم متبلور شده و مقدار آنها افزایش می‌یابد. بنابر نتایج بررسی‌ها، در 600°C آمورفی شدن قابل توجهی در نمونه‌ها دیده می‌شود (شکل ۵).

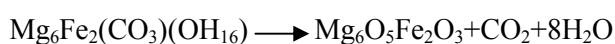
آنالیزهای DTA-TG:

بر اساس نتایج بررسی‌های DTA-TG، نمونه‌های لیزاردیت منطقه مورد بررسی، سه قله گرماگیر در دماهای 245°C ، 400°C و 690°C درجه سانتیگراد و یک قله گرمازا در دمای 810°C را نشان می‌دهند (شکل ۶). واکنش‌های گرمایی لیزاردیت با افزایش دما، گسترش می‌یابد. چنانکه در نمودارهای DTA و TG مشاهده می‌شود، از دمای 150°C آب آزاد و آب جذبی موجود در نمونه‌ها از بین رفته و نمونه‌ها دستخوش آبزدایی^۳ می‌شوند. قله‌های گرماگیر در دماهای 245°C و 400°C درجه سانتیگراد را می‌توان به وجود کانی تالک آبدار (پیروآوریت) نسبت داد. بر اساس بررسی‌های فراست و اریکسون در سال ۲۰۰۴ کانی پیروآوریت در سه مرحله دستخوش واپاشی می‌شود [۲۹]. مرحله اول در گستره دمایی $150-0^{\circ}\text{C}$ درجه سانتیگراد، مرحله دوم در گستره دمایی $245-150^{\circ}\text{C}$ درجه

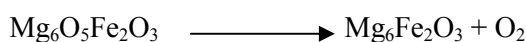
سانتیگراد و مرحله سوم در گستره دمایی $400-245^{\circ}\text{C}$ درجه سانتیگراد صورت می‌گیرد. این پژوهشگران مرحله اول را مرحله آبزدایی، مرحله دوم را مرحله کربن‌زدایی و هیدرواکسیل زدایی و مرحله سوم را مرحله اکسیژن زدایی خوانده‌اند. لذا نمونه‌های مورد بررسی در مرحله اول (در دمای 150°C) بنابر واکنش زیر، آب جذبی را از دست داده و دستخوش آبزدایی شده‌اند.



در مرحله دوم پیروآوریت موجود در نمونه‌های مورد بررسی دی اکسید کربن و آب خود را در دمای 245°C از دست داده و بنابر واکنش زیر دستخوش کربن زدایی و هیدرواکسل زدایی (از دست دادن آب ساختاری) شده است.

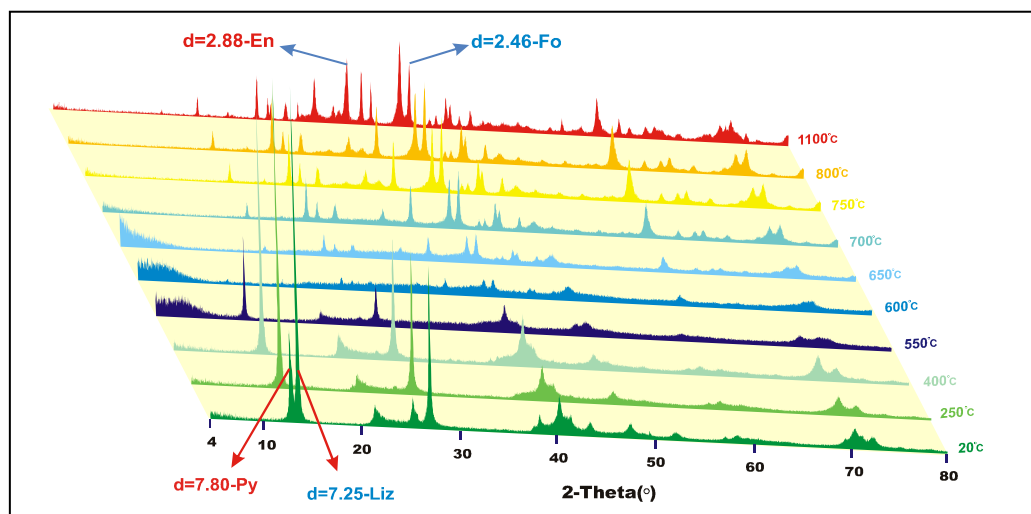


و در مرحله آخر بنا بر واکنش زیر (در دمای 400°C)، کانی پیروآوریت اکسیژن خود را نیز از دست داده و دستخوش اکسیژن زدایی شده است.

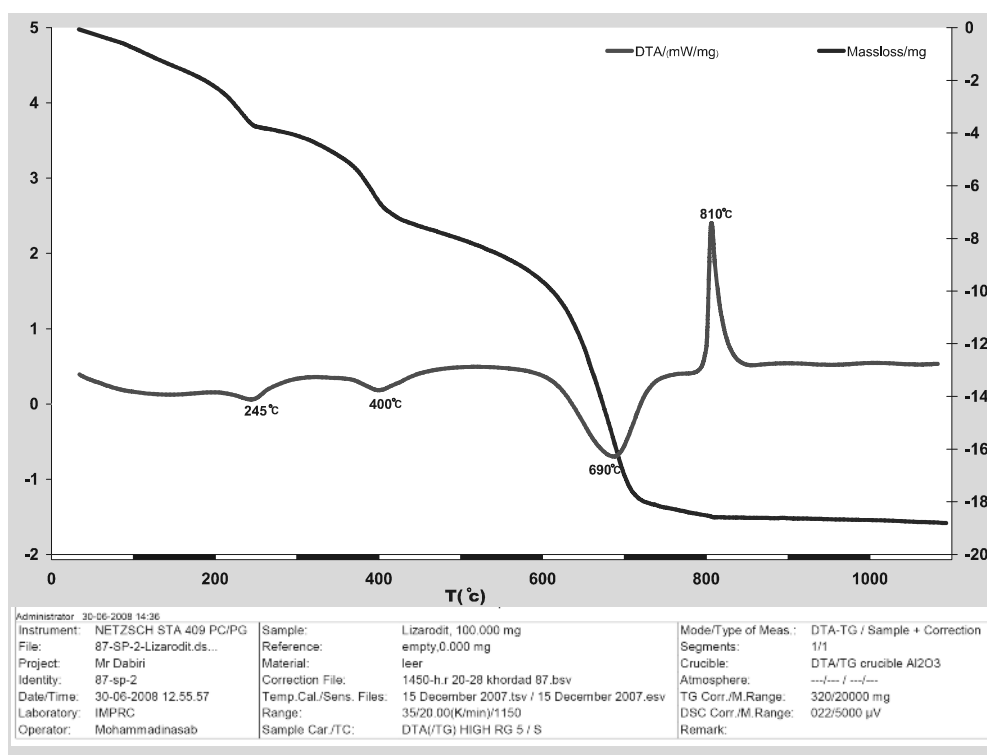


بر اساس نمودار TG می‌توان دریافت که، در این سه مرحله، نمونه ۷ درصد کاهش وزن پیدا کرده است.

چنانکه اشاره شد، یک قله گرماگیر در 690°C و یک قله گرمازا در دمای 810°C داریم. براساس نمودار DTA می‌توان دریافت که، در گستره دمایی 550°C تا 690°C واکنش‌های تجزیه لیزاردیت آغاز می‌شود. لیزاردیت $(\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4)$ در نتیجه از دست دادن عامل (OH) خود، در دمای بیش از 600°C ، به فورستريت $(\text{Mg}_2\text{SiO}_4)$ و در دمای حدود 700°C ، به انستاتيت (MgSiO_3) تبدیل می‌شود. نتایج XRD، نیز نشان می‌دهد که، لیزاردیت تا دمای 550°C مقاوم بوده و در دماهای بالاتر پایداری آن محدود شده و فورستريت و انستاتيت گسترش می‌یابند. اوج تبلور این دو کانی جدید با قله گرمازای 810°C ثبت شده است. تمامی تغییرات کانی‌شناسی که با بررسی‌های XRD انجام گرفته با آنالیزهای DTA همخوانی دارد. بر اساس نتایج آنالیزهای TG می‌توان دریافت که نمونه‌ها طی این واکنش‌ها، ۱۹ درصد کاهش وزن یافته‌اند.



شکل ۵ تصویر بلوک دیگرام XRD یک نمونه از لیزاردیت (نمونه SP-2) منطقه نیریز. در دماهای ۲۰، ۲۵۰، ۴۰۰، ۵۵۰، ۶۰۰، ۶۵۰، ۷۰۰، ۷۵۰، ۸۰۰ و ۱۱۰۰ درجه سانتیگراد و نتایج آنالیزهای آنها در دماهای یاد شده. (Liz = لیزاردیت، Py = Pyroaurite، Fo = فورستريت، En = انستاتیت).



شکل ۶ تصویر نمودارهای DTA-TG مربوط به یک نمونه از لیزاردیت منطقه نیریز (نمونه SP-2).

برداشت

نتیجه گرفت که لیزاردیت‌هایی که به مدت یک ساعت گرما دیده‌اند تا دمای ۵۵۰°C هنوز پایداری داشته و از آن پس دستخوش تجزیه شده و نخست فورستريت و سپس انستاتیت تشکیل می‌شود. در زیر واکنش مربوط طی هیدروکسیل زدایی لیزاردیت ارائه شده است:

بر اساس نتایج XRD انجام شده در این بررسی معلوم شد که با افزایش دما به مرور از شدت قله‌ها در نمودارهای XRD کاسته می‌شود. به طوری که در دمای بیش از ۵۵۰°C قله‌های مربوط به کانی لیزاردیت دیگر مشاهده نمی‌شوند. لذا می‌توان

- Kerman and Neyriz", *Journal of Asian Earth Sciences* 24/4 (2005) 405-417.
- [17] Sheikholeslami M.R., Piqué A., Mobayen P., Sabzehei M., Bellon H., Emami M.H., "Tectono-metamorphic evolution of the Neyriz metamorphic complex, Quri-Kor-e-Sefid area (Sanandaj-Sirjan Zone, SW Iran)", *Journal of Asian Earth Sciences* 31/4-6 (2008) 504-521.
- [18] Babaie H.A., Ghazi A.M., Babaie A., La Tour T.E., Hassanipak A.A., "Geochemistry of arc volcanic rocks of the Zagros Crush Zone, Neyriz, Iran", *Journal of Asian Earth Sciences* 19/1-2 (2001) 61-76.
- [19] NADIMI A., "Microstructural analysis of plastic deformation of upper mantle and shear zones of the Neyriz ophiolite, southeastern Iran", MSc. Thesis, Shiraz University, Shiraz, Iran (1999).
- [20] NADIMI A., "Mantle flow patterns at the Neyriz paleospreading center, Iran", *Earth and Planetary Science Letters* 203 (2002) 93-104.
- [21] Hall R., "Contact metamorphism by an ophiolite peridotite from Neyriz, Iran", *Science*, 208/4449 (1980) 1259-1262.
- [22] O'Hanley D.S., "Serpentinities-Records of Tectonic and Petrological History", *Oxford Monographs on Geology and Geophysics*, 34 (1996) 277pp.
- [23] Wicks F.J., Whittaker E.J.W., "Serpentine textures and serpentinization", *Canadian Mineralogist* 15 (1977) 459-488.
- [24] O'Hanley D. S., "Fault-Related phenomena associated with hydration and serpentine recrystallization during serpentinization", *Canadian Mineralogist* 29 (1991) 21-35.
- [25] Bucher K., Frey M., "Petrogenesis of Metamorphic Rocks", sixth Edition (1994) 318 pp.
- [26] Frank M.R., Earnest D.J., Candela P.A., Wylie A.G., Wilmot M., Maglio S.J., "Experimental Study of the Thermal Decomposition of Lizardite up to 973 K", *GSA Abstracts with Programs* (2005).
- [27] Berman R.G., Engi M., Greenwood H.J., Brown T. H., "Derivation of internally consistent thermodynamic data by the technique of mathematical programming: a review with application to the system MgO-SiO₂-H₂O", *J. Petrol.* 27 (1986) 1331-1364.
- deserpentinization in bending and unbending slabs", *Geophysical Research Abstracts* 5 (2003) 05421.
- [8] Jung H., Dobrzynetska L. F., Green H. W., "Dehydration embrittlement of serpentine and its implications for earthquakes at depth", *Geophysical Research Abstracts* 5 (2003) 12702.
- [9] Sheikholeslami M.R., Bellon H., Emami H., Sabzehei M., Piqué A., "Nouvelles données structurales et datations ⁴⁰K-⁴⁰Ar sur les roches métamorphiques de la région de Neyriz (zone de Sanandaj-Sirjan, Iran méridional). Leur intérêt dans le cadre du domaine néo-téthysien du Moyen-Orient", *New structural and ⁴⁰K-⁴⁰Ar data for the metamorphic rocks in Neyriz area (Sanandaj-Sirjan Zone, Southern Iran). Their interest for an overview of the Neo-Tethyan domain in the Middle East*", *Comptes Rendus Geosciences* 335(2003) 981-991.
- [10] RICO L.E., "Le croissant ophiolitique periarabe, une ceinture de nappes mises en place au Cretace superieur", *Rev. Geol. Phys. Geol. Dyn.* 13/4 (1971) 327-350
- [11] Ricou L.E., "Evolution structurale des Zagrides: la region clef de Neyriz (Zagros Iranien)", *Memoir de la Societe Geologique de France, Nouvelle serie* (40) 125 (1976) 140pp.
- [12] Stocklin J., "Structural correlation of the Alpine ranges between Iran and central Asia", *Societe Geologique de France Memoire Hors-Serie*, 8 (1977) 333-353.
- [13] Sarkarinejad Kh., "Structures and microstructures related to steady-state mantle flow in the Neyriz ophiolite, Iran", *Journal of Asian Earth Sciences* 25/6 (2005) 859-881
- [14] Babaie H. A., Ghazi M., Babaie A., Duncan R., Mahoney J., Hassanipak A.A., "New Ar-Ar age, isotopic, and geochemical data for basalts in the Neyriz ophiolite, Iran", *Geophysical Research Abstracts, European Geophysical Society* 5 (2003) 12899.
- [15] Lanphere M.A., Pamić J., "⁴⁰Ar/⁴⁰Ar Ages and tectonic setting of ophiolite from the Neyriz area, southeast Zagros Range, Iran", *Tectonophysics* 96/3-4 (1983) 245-256.
- [16] Shahabpour J., "Tectonic evolution of the orogenic belt in the region located between

- [31] Fumagalli P., Poli S., *"Experimentally Determined Phase Relations in Hydrous Peridotites to 6.5 GPa and Their Consequences on the Dynamics of Subduction Zones"*, Journal of Petrology 46 (2005) 555-578.
- [32] Emami M.H., Sadegi M.M., Omrani S.J., *"Magmatic map of Iran, Scale 1/1,000,000"*, Geological Survey of Iran, (1993).
- [28] Skelton A., Jakobsson M., *"Could peridotite hydration reactions have provided a contributory driving force for Cenozoic uplift and accelerated subsidence along the margins of the North Atlantic and Labrador Sea? Norwegian"*, Journal of Geology 87 (2007) 241-248.
- [29] Frost Ray L., Erickson Kristy L., *"Thermal decomposition of synthetic hydrotalcites reevesite and pyroaurite"*, Journal of Thermal Analysis and Calorimetry 76/1 (2004) 217-225.
- [30] Irifune T., Kuroda K., Funamori N., Uchida T., Takehito Y., Inoue T., Miyajima N., *"Amorphization of serpentine at high pressure and high temperature"*, Science 272 (1996) 1468-1470.