

بررسی کانی‌شناسی، ژئوشیمی و تصاویر SEM کلینکر و سیمان پرتلند تولید شده در کارخانه سیمان ارومیه، استان آذربایجان غربی

زهرا احمدی*

گروه علوم زمین، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

(دریافت مقاله: ۹۵/۱۲/۱۵، نسخه نهایی: ۹۶/۴/۴)

چکیده: در این پژوهش کانی‌شناسی، ژئوشیمی و تصاویر SEM کلینکر و سیمان پرتلند کارخانه سیمان ارومیه با استفاده از مقاطع صیقلی و تصاویر SEM کلینکر و نیز آنالیز شیمیایی سیمان و کلینکر به روش XRF در آزمایشگاه شیمی کارخانه سیمان ارومیه بررسی شد. شاخص‌های بوگه محاسبه شدند و برای مقایسه سیمان و کلینکر ارومیه با استاندارد جهانی از شاخص اشباع آهک، نسبت سیلیس و آلومینیوم نیز استفاده و موقعیت کلینکر و سیمان‌های پرتلند در نمودارهای فازی مختلف نشان داده شد. نتایج نشان دهنده وجود فازهای آلیت، بلیت، کوارتز و آلومینات در مقاطع صیقلی است، سوخت لازم از نوع میدین گازی است، سرعت بالا رفتن گرما در کوره و سرعت سرد شدن کلینکر ضعیف است، پخت کلینکر در زمان نسبتاً طولانی صورت گرفت و معلوم شد کلینکر و سیمان پرتلند نوع ۲ ارومیه با استاندارد کلینکر و سیمان جهان همخوانی دارند.

واژه‌های کلیدی: کانی‌شناسی، ژئوشیمی، SEM، کلینکر، سیمان پرتلند و ارومیه.

مقدمه

عنوان یکی از ابزارهای اساسی در کنترل کیفی سیمان به کار رود. مطالعات میکروسکوپی غالباً دلایل آشفتگی را که ممکن است در ساختمان کلینکر باشد و شواهدی از نوع تشکیل و توزیع فازهای کلینکر را مشخص می‌کند همچنین می‌تواند مشخص کننده درجه‌ی پخت، میزان و نحوه‌ی سرد شدن، همگن یا ناهمگن بودن موادخام اولیه، نوع سوخت مصرفی و غیره را بیان کند [۲]. ترکیب بهینه مینرالوژی موادخام سیمان عمدتاً به ترتیب مقدار عبارتند از: کلسیت، کوارتز و فلدسپات (مینرال‌های اصلی) و مینرال‌های فرعی مواد خام را عمدتاً کانی‌های رسی تشکیل می‌دهند [۲]. سنگ آهک یکی از اصلی‌ترین مواد اولیه است [۲]. برای تولید سیمان ابتدا مصالح خام آسیاب شده و با نسبت‌های مورد نظر با هم مخلوط می‌شوند و سپس در کوره تا دمای ۱۵۰۰ درجه سانتی‌گراد پخته می‌شوند تا به صورت جوش در آیند [۳]. در این فرایند آب و گازهایی آزاد شده و ترکیب شیمیایی جدیدی تولید می‌شود که

سیمان به عنوان یک کالای صنعتی با بیش از یکصد سال عمر از ضروری‌ترین محصول برای آبادانی است در حالت کلی سیمان ماده‌ای است که با قرار گرفتن روی سطح جامد، آنها را به همدیگر می‌چسباند. به عبارت مشخص‌تر سیمان پودری است که در مجاورت آب خاصیت پلاستیکی پیدا می‌کند و به شکل ماده‌ای نرم و خمیری، ضمن خشک شدن سخت می‌شود و برای اتصال آجر و سنگدانه‌ها در ساختمان سازی کاربرد دارد [۱]. آنچه به عنوان یک نکته کلیدی در راهبری واحدهای تولید سیمان مطرح است کنترل کیفیت این محصول است و آنچه در این امر می‌تواند کارساز باشد مطالعه‌ی محصول با استفاده از دانش میکروسکوپی و پتروگرافی است [۲]. نارسایی‌های موجود در روابط محاسباتی فازهای کلینکر و عدم توانایی این روابط در تعیین مقادیر فازهای کلینکر صنعتی باعث شده که در بسیاری از کشورها مطالعات میکروسکوپی کلینکر به

به صورت گلوله‌های کوچک به رنگ سیاه تا قهوه‌ای با قطر ۱۲/۵ میلیمتر است که کلینکر نامیده می‌شود [۴] کلینکر به همراه ۵ درصد گچ (به منظور کنترل گیرش آن) ساییده می‌شود تا نرمی مطلوب حاصل گردد و پودر حاصل همان سیمان می‌باشد [۵] (جدول ۱).

سیمان دارای ۴ تشکیل دهنده اصلی است که عبارتند از: درصد هر یک از ترکیب‌های شیمیایی فوق در محصول نهایی بستگی به مشخصه‌های مورد نظر مثل سرعت گیرش، گرمای گیرش و میزان مقابله با حملات شیمیایی دارد [۶].

در این پژوهش کانی‌شناسی و تصاویر SEM کلینکر تولید شده در کارخانه سیمان ارومیه، همچنین ترکیب شیمیایی سیمان پرتلند پوزولانی و سیمان پرتلند تیپ ۲ این کارخانه مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که کلینکرهای تولیدی در این کارخانه متشکل از فازهای آلایت (حدود ۵۵ درصد)، بلیت (حدود ۲۵ درصد) و کوارتز (حدود ۱۰ درصد) می‌باشند و فاز آلومینات نیز ماتریکس یا زمینه را تشکیل می‌دهد (حدود ۱۰ درصد). فاز آلایت و سپس بلیت فراوان‌ترین فازهای تشکیل دهنده کلینکرهای تولیدی در این کارخانه می‌باشند همچنین تصاویر SEM تهیه شده از کلینکرهای این کارخانه نیز تابید کننده‌ی فراوانی فاز آلایت و سپس بلیت می‌باشند. براساس ویژگی‌های میکروسکوپی مشاهده شده از کلینکرهای کارخانه سیمان ارومیه و مقایسه‌ی آنها با طبقه‌بندی‌ها و جداول استاندارد مربوط به بررسی شرایط پخت کلینکر [۵] مشخص گردید که سوخت لازم از نوع میادین گازی است، سرعت بالا رفتن حرارت در طول کوره و سرعت سرد شدن کلینکر ضعیف است و زمان پخت کلینکر در مدت زمان نسبتاً طولانی صورت گرفته است همچنین مقایسه‌ی کلینکر و سیمان پرتلند پوزولانی و سیمان پرتلند تیپ ۲ تولیدی در کارخانه سیمان ارومیه با استاندارد کلینکر و سیمان

جهان [۷] نشان می‌دهد که کلینکر و سیمان پرتلند تیپ ۲ تولیدی در کارخانه سیمان ارومیه با استاندارد جهانی مطابقت دارند اما سیمان پرتلند پوزولانی این کارخانه به دلیل وجود مقدار بالای سیلیس در ترکیب پوزولان مورد استفاده برای تولید این تیپ سیمان (حدود ۲۷/۵۸ درصد) با استاندارد جهانی سیمان مطابقت ندارد و در صورت استفاده از پوزولان طبیعی با مقدار سیلیس کمتر جهت تولید این نوع سیمان، سیمان پرتلند پوزولانی کارخانه سیمان ارومیه نیز در محدوده‌ی استاندارد جهانی سیمان قرار خواهد گرفت.

روش مطالعه

به منظور مطالعات میکروسکوپی کلینکرهای کارخانه سیمان ارومیه، تعداد ۸ مقطع صیقلی از کلینکرهای تولید شده در خط تولید ۲ این کارخانه در آذرماه ۱۳۹۵ تهیه و توسط میکروسکپ پلاریزان انعکاسی مدل Olympus BH2-UMA در آزمایشگاه زمین‌شناسی اقتصادی تبریز مورد مطالعه قرار گرفت. تصاویر SEM مربوط به ۲ نمونه از کلینکرهای کارخانه سیمان ارومیه توسط دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی مدل MIRA3 FEG-SEM با قدرت بزرگ‌نمایی یک میلیون برابر و ولتاژ ۳۰ کیلو ولت در مرکز تحقیقات علوم پایه دانشگاه تبریز تهیه شد، همچنین آنالیز شیمیایی کلینکر، سیمان پرتلند تیپ ۳۲۵-۱، سیمان پرتلند تیپ ۴۲۵-۱، سیمان پرتلند پوزولانی و سیمان پرتلند تیپ ۲ جهت تعیین ۱۰ اکسید اصلی، توسط دستگاه XRF مدل ARL Perform, X با حد آشکارسازی ۰/۰۱ درصد در آزمایشگاه شیمی کارخانه سیمان ارومیه انجام گرفت (جدول-۱). برای محاسبه‌ی ترکیب فازهای کلینکر، سیمان پرتلند پوزولانی و سیمان پرتلند تیپ ۲ بر اساس مقادیر حاصل از آنالیز شیمیایی، از روابط بوگه [۸] استفاده گردید.

جدول ۱ ترکیب شیمیایی سیمان [۵].

| نام | نماد شیمیایی | ترکیب شیمیایی |
|--------------------|--------------|---|
| تری کلسیم سیلیکات | C3S | 3CaO.SiO ₂ |
| دی کلسیم سیلیکات | C2S | 2CaO.SiO ₂ |
| تری کلسیم آلومینات | C3A | 3CaO.Al ₂ O ₃ |
| فریت | C4AF | 4CaO.Al ₂ O ₃ .Fe ₂ O ₃ |

جدول ۲ نتایج بررسی شیمیایی سیمان تیپ ۱-۴۲۵ (به روش XRF) در آزمایشگاه شیمی کارخانه سیمان ارومیه بر حسب درصد.

| سیمان ۱-۳۲۵ | سیمان ۱-۴۲۵ نرمال | کلینکر سیمان | اکسیدها |
|-------------|-------------------|--------------|--------------------------------|
| ۲۱٫۹۰ | ۲۰٫۹۲ | ۲۲٫۰۰ | SiO ₂ |
| ۵٫۱۱ | ۴٫۸۵ | ۵٫۴۵ | Al ₂ O ₃ |
| ۲٫۸۱ | ۲٫۸۴ | ۳٫۰۱ | Fe ₂ O ₃ |
| ۶۳٫۰۰ | ۶۳٫۲۵ | ۶۴٫۱۱ | CaO |
| ۱٫۷۱ | ۱٫۵۸ | ۱٫۸۲ | MgO |
| ۲٫۳۰ | ۲٫۶۳ | ۰٫۷۸ | SO ₃ |
| ۰٫۸۴ | ۱٫۰۸ | ۰٫۹۰ | K ₂ O |
| ۰٫۲۳ | ۰٫۳۰ | ۰٫۳۰ | Na ₂ O |
| ۰٫۰۱ | ۰٫۰۱ | ۰٫۰۱ | CL ⁻ |
| ۲٫۲۰ | ۲٫۲۵ | ۰٫۱۰ | L.O.I |
| ۱٫۲۰ | ۱٫۰۱ | ۰٫۷۰ | Free Lime |

جدول ۳ نتایج بررسی شیمیایی سیمان نوع پرتلند پوزولانی به روش XRF، در آزمایشگاه شیمی کارخانه سیمان ارومیه، بر حسب درصد.

| Days | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | CaO | MgO | SO ₃ | Na ₂ O | K ₂ O | Cl ⁻ | L.O.I | Total |
|------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------|------|-----------------|-------------------|------------------|-----------------|-------|--------|
| ۱ | ۲۷٫۴۹ | ۴٫۶۰ | ۲٫۸۸ | ۵۴٫۷۰ | ۱٫۸۱ | ۲٫۳۹ | ۰٫۲۷ | ۱٫۰۲ | ۰٫۰۲ | ۴٫۸۵ | ۱۰۰٫۰۳ |
| ۲ | ۲۸٫۰۰ | ۴٫۵۰ | ۲٫۹۲ | ۵۴٫۱۰ | ۱٫۶۹ | ۲٫۷۵ | ۰٫۲۵ | ۱٫۰۰ | ۰٫۰۲ | ۵٫۱۵ | ۱۰۰٫۳۸ |
| ۳ | ۲۸٫۶۳ | ۵٫۲۱ | ۲٫۹۲ | ۵۳٫۵۳ | ۱٫۴۵ | ۲٫۴۹ | ۰٫۲۳ | ۰٫۹۵ | ۰٫۰۲ | ۴٫۱۲ | ۹۹٫۵۵ |
| ۴ | ۲۶٫۶۶ | ۴٫۴۸ | ۲٫۸۰ | ۵۶٫۴۸ | ۱٫۶۹ | ۲٫۴۰ | ۰٫۲۸ | ۱٫۱۲ | ۰٫۰۲ | ۳٫۷۰ | ۹۹٫۶۳ |
| ۵ | ۲۸٫۳۸ | ۴٫۵۲ | ۲٫۹۲ | ۵۴٫۲۰ | ۱٫۶۹ | ۲٫۴۸ | ۰٫۳۳ | ۱٫۰۶ | ۰٫۰۲ | ۴٫۶۵ | ۱۰۰٫۲۵ |
| ۶ | ۲۷٫۷۴ | ۵٫۳۳ | ۲٫۷۴ | ۵۴٫۵۰ | ۱٫۹۵ | ۲٫۴۰ | ۰٫۲۱ | ۰٫۹۳ | ۰٫۰۲ | ۴٫۴۷ | ۱۰۰٫۲۹ |
| ۷ | ۲۸٫۲۸ | ۴٫۵۸ | ۲٫۸۰ | ۵۴٫۳۲ | ۱٫۶۹ | ۲٫۵۵ | ۰٫۳۰ | ۱٫۰۶ | ۰٫۰۲ | ۴٫۸۸ | ۱۰۰٫۴۸ |
| ۸ | ۲۷٫۱۴ | ۴٫۳۸ | ۲٫۹۲ | ۵۵٫۹۲ | ۱٫۸۱ | ۲٫۴۳ | ۰٫۲۳ | ۱٫۰۵ | ۰٫۰۲ | ۴٫۲۸ | ۱۰۰٫۱۸ |
| ۹ | ۲۷٫۳۳ | ۵٫۰۰ | ۲٫۸۰ | ۵۵٫۵۴ | ۱٫۶۹ | ۲٫۳۸ | ۰٫۲۳ | ۱٫۰۷ | ۰٫۰۳ | ۳٫۴۸ | ۹۵٫۵۵ |
| ۱۰ | ۲۷٫۵۲ | ۴٫۶۰ | ۲٫۹۲ | ۵۵٫۴۷ | ۱٫۴۵ | ۲٫۳۹ | ۰٫۲۳ | ۱٫۰۰ | ۰٫۰۲ | ۴٫۳۲ | ۹۹٫۹۲ |
| ۱۱ | ۲۷٫۸۴ | ۵٫۱۴ | ۲٫۷۴ | ۵۴٫۸۵ | ۱٫۸۱ | ۲٫۴۸ | ۰٫۲۳ | ۰٫۹۵ | ۰٫۰۳ | ۳٫۷۵ | ۹۹٫۸۲ |
| ۱۲ | ۲۶٫۱۲ | ۴٫۲۶ | ۲٫۸۴ | ۵۶٫۹۰ | ۱٫۸۱ | ۲٫۹۱ | ۰٫۲۶ | ۰٫۹۹ | ۰٫۰۱ | ۳٫۷۶ | ۹۹٫۸۶ |
| ۱۳ | ۲۶٫۱۸ | ۴٫۹۸ | ۲٫۷۶ | ۵۶٫۲۰ | ۱٫۸۰ | ۲٫۷۹ | ۰٫۱۹ | ۱٫۰۵ | ۰٫۰۱ | ۳٫۸۴ | ۹۹٫۸۰ |
| ۱۴ | ۲۷٫۹۶ | ۵٫۶۲ | ۲٫۸۴ | ۵۵٫۳۰ | ۱٫۶۰ | ۲٫۳۶ | ۰٫۲۱ | ۰٫۸۴ | ۰٫۰۲ | ۳٫۲۱ | ۹۹٫۹۶ |
| ۱۵ | ۲۸٫۳۴ | ۵٫۴۵ | ۲٫۹۲ | ۵۴٫۸۸ | ۱٫۴۵ | ۲٫۲۹ | ۰٫۲۱ | ۰٫۹۰ | ۰٫۰۲ | ۳٫۶۳ | ۱۰۰٫۰۹ |
| ۱۶ | ۲۷٫۳۲ | ۴٫۴۲ | ۲٫۸۰ | ۵۵٫۷۲ | ۱٫۶۹ | ۲٫۴۷ | ۰٫۲۳ | ۱٫۰۳ | ۰٫۰۲ | ۳٫۸۹ | ۹۹٫۵۹ |
| ۱۷ | ۲۵٫۵۲ | ۴٫۷۵ | ۲٫۹۲ | ۵۶٫۳۴ | ۱٫۹۵ | ۲٫۸۵ | ۰٫۲۳ | ۱٫۰۳ | ۰٫۰۲ | ۳٫۹۵ | ۹۹٫۵۶ |
| ۱۸ | ۲۷٫۴۶ | ۵٫۳۴ | ۲٫۶۰ | ۵۵٫۱۴ | ۱٫۸۰ | ۲٫۵۰ | ۰٫۲۷ | ۱٫۱۳ | ۰٫۰۲ | ۳٫۸۳ | ۱۰۰٫۰۹ |
| ۱۹ | ۲۷٫۱۵ | ۵٫۱۲ | ۲٫۸۲ | ۵۵٫۲۷ | ۱٫۶۹ | ۲٫۴۵ | ۰٫۲۵ | ۱٫۱۱ | ۰٫۰۳ | ۳٫۷۴ | ۹۹٫۶۳ |
| ۲۰ | ۲۷٫۸۲ | ۴٫۳۶ | ۲٫۹۰ | ۵۵٫۳۲ | ۱٫۸۱ | ۲٫۵۳ | ۰٫۲۷ | ۱٫۰۹ | ۰٫۰۲ | ۴٫۱۲ | ۱۰۰٫۲۴ |
| ۲۱ | ۲۷٫۱۸ | ۵٫۰۸ | ۲٫۹۲ | ۵۵٫۱۳ | ۱٫۸۱ | ۲٫۵۵ | ۰٫۲۸ | ۱٫۱۵ | ۰٫۰۲ | ۳٫۴۵ | ۹۹٫۵۷ |
| ۲۲ | ۲۶٫۹۶ | ۴٫۵۶ | ۲٫۸۰ | ۵۵٫۸۸ | ۱٫۶۹ | ۲٫۴۸ | ۰٫۳۰ | ۰٫۹۹ | ۰٫۰۲ | ۴٫۳۲ | ۱۰۰٫۰۰ |
| ۲۳ | ۲۷٫۴۵ | ۵٫۱۸ | ۲٫۹۲ | ۵۵٫۰۶ | ۱٫۴۵ | ۲٫۶۳ | ۰٫۲۷ | ۱٫۱۲ | ۰٫۰۳ | ۳٫۵۳ | ۹۹٫۶۴ |
| ۲۴ | ۲۷٫۲۳ | ۴٫۷۴ | ۲٫۹۲ | ۵۵٫۵۵ | ۱٫۴۵ | ۲٫۳۳ | ۰٫۲۴ | ۰٫۹۷ | ۰٫۰۳ | ۴٫۱۱ | ۹۹٫۵۷ |
| ۲۵ | ۲۶٫۲۳ | ۴٫۵۶ | ۲٫۷۴ | ۵۶٫۵۵ | ۱٫۸۱ | ۲٫۴۸ | ۰٫۲۳ | ۱٫۱۲ | ۰٫۰۱ | ۴٫۲۵ | ۹۹٫۹۸ |
| ۲۶ | ۳۰٫۹۰ | ۴٫۸۴ | ۳٫۰۴ | ۵۲٫۶۴ | ۱٫۶۹ | ۲٫۳۴ | ۰٫۲۱ | ۰٫۸۵ | ۰٫۰۲ | ۳٫۵۹ | ۱۰۰٫۱۲ |
| ۲۷ | ۲۹٫۷۸ | ۵٫۱۸ | ۲٫۹۶ | ۵۳٫۰۰ | ۱٫۴۵ | ۲٫۴۸ | ۰٫۲۲ | ۰٫۸۷ | ۰٫۰۲ | ۳٫۷۴ | ۹۹٫۷۰ |
| ۲۸ | ۲۷٫۴۲ | ۵٫۱۰ | ۳٫۱۲ | ۵۵٫۲۰ | ۱٫۸۰ | ۲٫۶۷ | ۰٫۲۸ | ۰٫۸۶ | ۰٫۰۲ | ۳٫۶۳ | ۱۰۰٫۱۰ |
| ۲۹ | ۲۶٫۱۴ | ۴٫۶۲ | ۲٫۹۲ | ۵۶٫۳۲ | ۱٫۶۹ | ۲٫۵۳ | ۰٫۲۱ | ۱٫۱۴ | ۰٫۰۲ | ۴٫۹۰ | ۱۰۰٫۴۹ |
| ۳۰ | ۲۸٫۸۷ | ۵٫۱۳ | ۳٫۰۰ | ۵۳٫۷۴ | ۱٫۶۹ | ۲٫۴۲ | ۰٫۲۵ | ۰٫۹۲ | ۰٫۰۲ | ۳٫۹۶ | ۱۰۰٫۰۰ |
| Ave. | ۲۷٫۵۸ | ۴٫۸۶ | ۲٫۸۷ | ۵۵٫۱۰ | ۱٫۷۰ | ۲٫۵۲ | ۰٫۲۵ | ۱٫۰۱ | ۰٫۰۲ | ۴٫۰۳ | ۹۹٫۹۴ |
| Max | ۳۰٫۹۰ | ۵٫۶۲ | ۳٫۱۲ | ۵۲٫۶۴ | ۱٫۹۵ | ۲٫۹۱ | ۰٫۳۳ | ۱٫۱۵ | ۰٫۰۲ | ۵٫۱۵ | ۱۰۰٫۰۵ |
| Min | ۲۵٫۵۲ | ۴٫۲۶ | ۲٫۶۰ | ۵۶٫۹۰ | ۱٫۴۵ | ۲٫۲۹ | ۰٫۱۹ | ۰٫۸۴ | ۰٫۰۱ | ۳٫۲۱ | ۹۳٫۰۱ |

جدول ۴ نتایج بررسی شیمیایی سیمان نوع ۲ به روش XRF در آزمایشگاه شیمی کارخانه سیمان ارومیه، بر حسب درصد.

| Days | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | CaO | MgO | SO ₃ | Na ₂ O | K ₂ O | Cl | L.O.I | Total |
|------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------|------|-----------------|-------------------|------------------|------|-------|---------|
| ۱ | ۲۰٫۱۲ | ۴٫۷۸ | ۳٫۰۰ | ۶۳٫۲۵ | ۱٫۸۱ | ۲٫۹۶ | ۰٫۱۷ | ۱٫۱۲ | ۰٫۰۲ | ۲٫۸۳ | ۱۰۰٫۰۶ |
| ۲ | ۲۰٫۷۴ | ۴٫۹۲ | ۳٫۰۰ | ۶۳٫۴۴ | ۱٫۸۱ | ۲٫۴۷ | ۰٫۲۳ | ۰٫۹۱ | ۰٫۰۲ | ۲٫۶۸ | ۱۰۰٫۲۲ |
| ۳ | ۱۹٫۸۸ | ۴٫۶۶ | ۲٫۹۶ | ۶۳٫۴۴ | ۱٫۸۱ | ۲٫۷۵ | ۰٫۲۲ | ۱٫۰۸ | ۰٫۰۲ | ۲٫۹۵ | ۹۹٫۷۷ |
| ۴ | ۲۰٫۲۰ | ۴٫۸۲ | ۲٫۹۲ | ۶۳٫۳۴ | ۱٫۶۹ | ۲٫۹۴ | ۰٫۲۴ | ۱٫۱۸ | ۰٫۰۳ | ۲٫۸۰ | ۱۰۰٫۱۶ |
| ۵ | ۲۰٫۰۸ | ۴٫۷۴ | ۲٫۸۰ | ۶۳٫۲۵ | ۱٫۸۰ | ۲٫۷۵ | ۰٫۱۹ | ۱٫۱۳ | ۰٫۰۳ | ۲٫۷۴ | ۹۹٫۳۳ |
| ۶ | ۱۹٫۶۸ | ۴٫۷۴ | ۳٫۱۲ | ۶۳٫۸۸ | ۱٫۸۰ | ۲٫۹۴ | ۰٫۳۳ | ۱٫۱۴ | ۰٫۰۳ | ۲٫۸۵ | ۱۰۰٫۲۴ |
| ۷ | ۲۰٫۶۵ | ۵٫۲۰ | ۲٫۸۴ | ۶۳٫۲۰ | ۱٫۶۹ | ۲٫۶۵ | ۰٫۲۴ | ۰٫۸۸ | ۰٫۰۱ | ۲٫۷۲ | ۱۰۰٫۰۸ |
| ۸ | ۱۹٫۸۴ | ۴٫۹۲ | ۳٫۲۰ | ۶۳٫۰۰ | ۱٫۶۹ | ۲٫۸۸ | ۰٫۲۳ | ۱٫۱۰ | ۰٫۰۳ | ۲٫۹۶ | ۹۹٫۸۵ |
| ۹ | ۲۰٫۷۰ | ۴٫۹۶ | ۲٫۹۶ | ۶۳٫۴۰ | ۱٫۴۵ | ۲٫۵۲ | ۰٫۲۵ | ۰٫۹۱ | ۰٫۰۱ | ۲٫۷۵ | ۹۹٫۹۱ |
| ۱۰ | ۱۹٫۸۲ | ۴٫۶۶ | ۳٫۲۰ | ۶۳٫۷۴ | ۱٫۸۰ | ۲٫۵۴ | ۰٫۱۴ | ۰٫۹۳ | ۰٫۰۲ | ۲٫۷۵ | ۹۹٫۶۰ |
| ۱۱ | ۱۹٫۹۲ | ۴٫۸۰ | ۳٫۱۲ | ۶۳٫۴۴ | ۱٫۶۹ | ۳٫۰۰ | ۰٫۲۴ | ۱٫۰۰ | ۰٫۰۳ | ۲٫۸۶ | ۱۰۰٫۱۰ |
| ۱۲ | ۲۰٫۰۲ | ۴٫۸۸ | ۳٫۰۰ | ۶۳٫۱۶ | ۱٫۸۰ | ۲٫۹۲ | ۰٫۲۴ | ۱٫۰۳ | ۰٫۰۳ | ۳٫۰۰ | ۱۰۰٫۰۸ |
| ۱۳ | ۱۹٫۸۰ | ۴٫۶۰ | ۳٫۰۰ | ۶۳٫۵۱ | ۱٫۶۰ | ۲٫۸۷ | ۰٫۲۹ | ۱٫۰۶ | ۰٫۰۲ | ۲٫۸۲ | ۹۹٫۵۷ |
| ۱۴ | ۲۰٫۱۲ | ۴٫۸۲ | ۲٫۹۶ | ۶۳٫۳۸ | ۱٫۸۰ | ۲٫۸۴ | ۰٫۲۷ | ۱٫۱۳ | ۰٫۰۲ | ۲٫۷۱ | ۱۰۰٫۰۵ |
| ۱۵ | ۲۰٫۸۸ | ۵٫۰۸ | ۳٫۱۲ | ۶۳٫۳۲ | ۱٫۸۱ | ۲٫۳۳ | ۰٫۲۱ | ۰٫۹۹ | ۰٫۰۲ | ۲٫۵۵ | ۱۰۰٫۳۱ |
| ۱۶ | ۲۰٫۷۴ | ۴٫۷۴ | ۲٫۹۲ | ۶۳٫۴۲ | ۱٫۴۵ | ۲٫۹۴ | ۰٫۲۳ | ۰٫۹۵ | ۰٫۰۳ | ۲٫۸۶ | ۱۰۰٫۲۸ |
| ۱۷ | ۲۱٫۲۴ | ۴٫۴۸ | ۳٫۱۲ | ۶۲٫۹۰ | ۱٫۸۰ | ۲٫۸۰ | ۰٫۱۲ | ۰٫۹۶ | ۰٫۰۲ | ۲٫۹۵ | ۱۰۰٫۳۹ |
| ۱۸ | ۲۱٫۱۰ | ۴٫۶۲ | ۲٫۹۲ | ۶۳٫۰۸ | ۱٫۶۹ | ۲٫۷۷ | ۰٫۱۹ | ۰٫۹۹ | ۰٫۰۲ | ۲٫۸۴ | ۱۰۰٫۲۲ |
| ۱۹ | ۲۰٫۳۴ | ۵٫۱۰ | ۲٫۹۶ | ۶۳٫۸۴ | ۱٫۷۴ | ۲٫۰۰ | ۰٫۲۷ | ۰٫۹۹ | ۰٫۰۲ | ۲٫۷۹ | ۱۰۰٫۰۵ |
| ۲۰ | ۲۰٫۴۷ | ۴٫۹۶ | ۳٫۰۰ | ۶۳٫۶۶ | ۱٫۶۹ | ۲٫۴۰ | ۰٫۲۴ | ۰٫۹۲ | ۰٫۰۱ | ۲٫۷۸ | ۱۰۰٫۱۳ |
| ۲۱ | ۲۰٫۵۶ | ۴٫۷۲ | ۲٫۹۰ | ۶۳٫۴۰ | ۱٫۴۵ | ۲٫۵۳ | ۰٫۳۵ | ۰٫۹۸ | ۰٫۰۲ | ۲٫۵۹ | ۹۹٫۵۰ |
| ۲۲ | ۲۱٫۲۰ | ۴٫۵۲ | ۲٫۸۰ | ۶۳٫۱۶ | ۱٫۸۱ | ۲٫۹۶ | ۰٫۲۱ | ۰٫۹۲ | ۰٫۰۳ | ۲٫۸۶ | ۱۰۰٫۴۷ |
| ۲۳ | ۲۰٫۴۵ | ۴٫۸۰ | ۳٫۲۰ | ۶۳٫۷۰ | ۱٫۶۹ | ۲٫۳۲ | ۰٫۳۱ | ۰٫۸۵ | ۰٫۰۱ | ۲٫۲۶ | ۹۹٫۶۹ |
| ۲۴ | ۲۰٫۵۶ | ۵٫۰۰ | ۲٫۸۸ | ۶۲٫۷۴ | ۱٫۸۰ | ۲٫۹۲ | ۰٫۲۷ | ۰٫۸۹ | ۰٫۰۲ | ۲٫۹۸ | ۱۰۰٫۰۶ |
| ۲۵ | ۲۰٫۷۲ | ۴٫۹۲ | ۲٫۷۸ | ۶۲٫۹۲ | ۱٫۶۹ | ۲٫۷۴ | ۰٫۲۳ | ۰٫۹۹ | ۰٫۰۲ | ۲٫۸۸ | ۹۹٫۸۹ |
| ۲۶ | ۲۰٫۶۶ | ۴٫۸۲ | ۲٫۹۲ | ۶۳٫۰۲ | ۱٫۸۰ | ۲٫۶۶ | ۰٫۲۴ | ۰٫۹۷ | ۰٫۰۲ | ۲٫۷۹ | ۹۹٫۹۰ |
| ۲۷ | ۲۰٫۹۶ | ۴٫۹۲ | ۲٫۸۰ | ۶۲٫۹۰ | ۱٫۸۰ | ۲٫۶۷ | ۰٫۳۵ | ۰٫۹۰ | ۰٫۰۲ | ۲٫۸۲ | ۱۰۰٫۱۴ |
| ۲۸ | ۲۰٫۹۲ | ۴٫۷۶ | ۳٫۰۰ | ۶۲٫۸۲ | ۲٫۰۵ | ۲٫۲۶ | ۰٫۳۳ | ۰٫۹۵ | ۰٫۰۲ | ۲٫۳۳ | ۹۹٫۸۴ |
| ۲۹ | ۲۰٫۵۰ | ۵٫۰۸ | ۳٫۱۲ | ۶۳٫۴۲ | ۱٫۸۰ | ۲٫۱۸ | ۰٫۲۷ | ۰٫۹۰ | ۰٫۰۲ | ۲٫۹۳ | ۱۰۰٫۲۲ |
| ۳۰ | ۲۰٫۷۰ | ۴٫۹۲ | ۲٫۹۶ | ۶۳٫۳۲ | ۱٫۶۹ | ۲٫۳۳ | ۰٫۲۸ | ۰٫۹۳ | ۰٫۰۲ | ۲٫۸۱ | ۹۹٫۹۶ |
| Ave. | ۲۰٫۴۵ | ۴٫۸۳ | ۲٫۹۸ | ۶۳٫۲۴ | ۱٫۷۳ | ۲٫۶۶ | ۰٫۲۵ | ۰٫۹۹ | ۰٫۰۲ | ۲٫۸۰ | ۹۹٫۹۵ |
| Max | ۲۱٫۲۴ | ۵٫۲۰ | ۳٫۲۰ | ۶۳٫۸۴ | ۲٫۰۵ | ۳٫۰۰ | ۰٫۳۵ | ۱٫۱۸ | ۰٫۰۳ | ۳٫۰۰ | ۱۰۰٫۳۰۹ |
| Min | ۱۹٫۶۸ | ۴٫۴۸ | ۲٫۷۸ | ۶۲٫۵۴ | ۱٫۴۵ | ۲٫۰۰ | ۰٫۱۲ | ۰٫۸۵ | ۰٫۰۱ | ۲٫۲۶ | ۹۶٫۲۷ |

کارخانه سیمان ارومیه و ویژگی‌های زمین‌شناسی مناطق همجوار

منطقه مورد مطالعه در قسمت جنوب و جنوب شرقی شهرستان ارومیه (آذربایجان غربی) و در ۳۵ کیلومتری جاده ارومیه به مهاباد قرار گرفته است. این کارخانه با طول جغرافیایی $37^{\circ} 16' 05''$ تا $37^{\circ} 27' 30''$ شرقی و عرض جغرافیایی $37^{\circ} 19' 15''$ تا $37^{\circ} 26' 32''$ شمالی در سال ۱۳۶۴ تاسیس گردید و از سال ۱۳۸۶ تولید آزمایشی کلینکر در این کارخانه آغاز گردید. این کارخانه با احداث و راه اندازی ۲ خط تولید ظرفیت تولید روزانه کلینکر خود را به ۲۸۲۰ تن

کلینکر در روز و سپس به ۲۸۵۰ تن کلینکر در روز رسانید و هم اکنون ظرفیت تولید روزانه سیمان در این کارخانه ۶۰۰۰ تن می‌باشد. انواع سیمان‌های تولید شده در این کارخانه شامل سیمان پرتلند پوزولانی، سیمان پرتلند تپ ۱-۴۲۵، سیمان پرتلند تپ ۲ و سیمان پرتلند تپ ۱-۳۲۵ می‌باشند. در این کارخانه جهت تولید سیمان‌هایی با کیفیت مطلوب و مطابق با استانداردهای ملی ایران و جهان در کلیه مراحل تولید از آزمایش‌های شیمیایی، فیزیکی و X-RAY استفاده می‌شود. خوراک کوره‌های این کارخانه به طور معمول شامل ۷۸ تا ۸۰ درصد کربنات کلسیم (آهک)، ۲۰ درصد سیلیس و در مقادیر

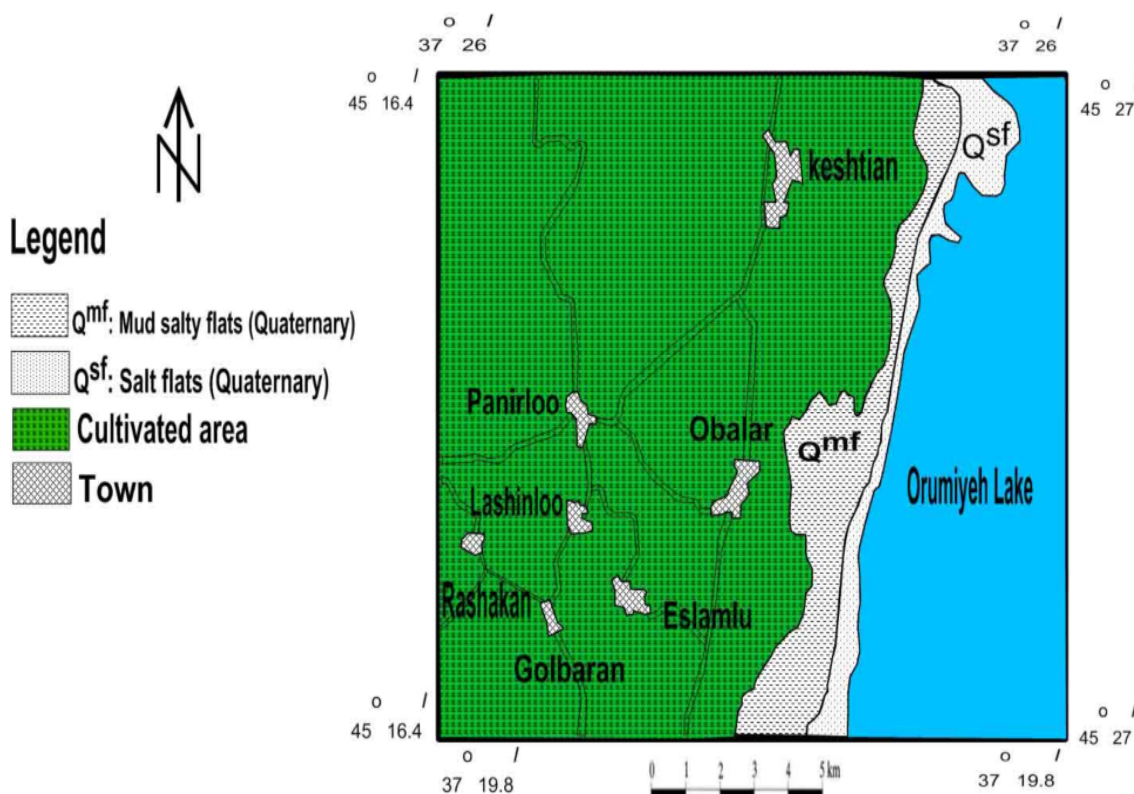
مطالعه را در نقشه ۱/۱۰۰۰۰۰۰ ارومیه نشان می‌دهد (شکل ۱).

بحث و بررسی

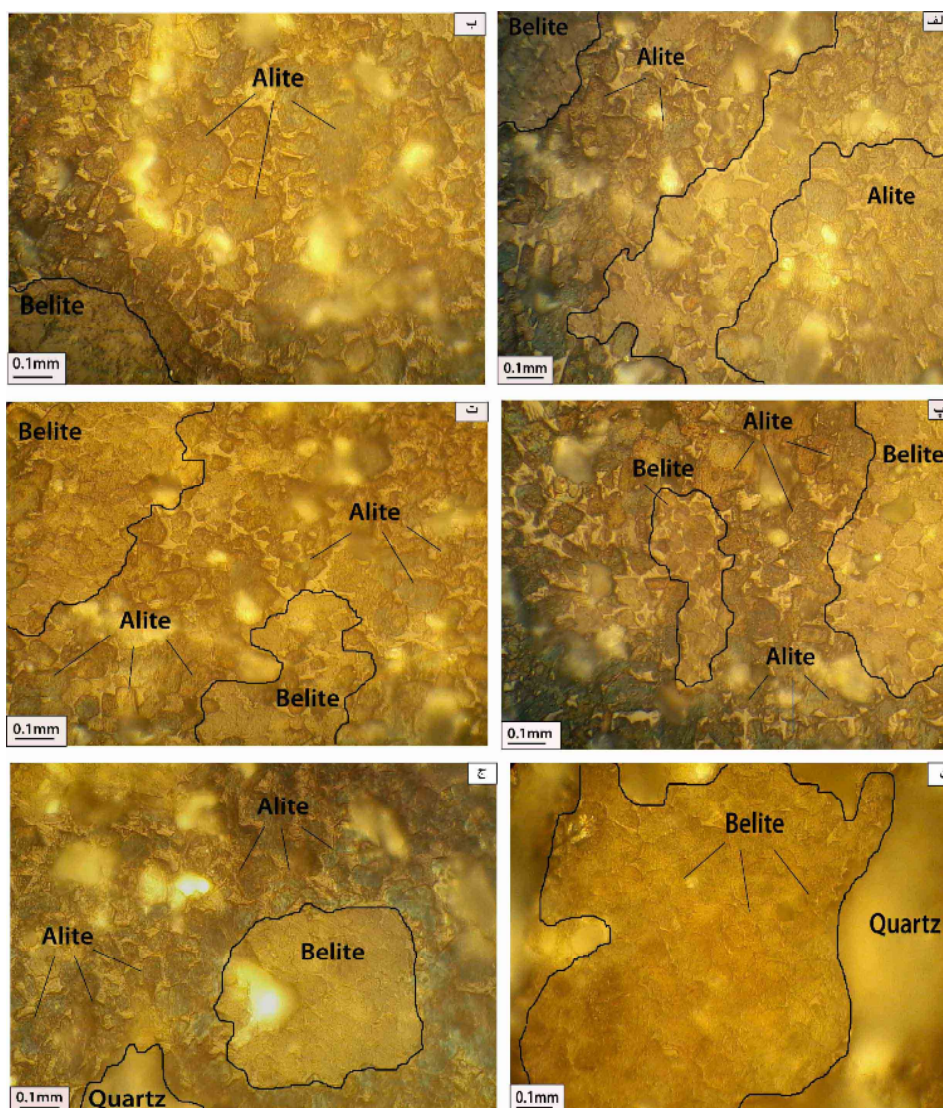
کانی شناسی

بر اساس بررسی‌های میکروسکوپی انجام شده در رابطه با کلینکرها تولید شده در کارخانه‌ی سیمان ارومیه، کانی‌های آلیت، بلیت، کوارتز و آلومینات در مقاطع صیقلی تهیه شده از این کلینکرها تشخیص داده شده‌اند (شکل ۲). برای شناسایی کانی‌های تشکیل دهنده کلینکر در مقطع میکروسکوپی از روش کمپل استفاده شد [۵]، در این روش کانی‌های تشکیل دهنده-ی کلینکر از طریق شکل آنها در مقاطع صیقلی تشخیص داده می‌شوند. در حالت کلی بلورهای آلیت منشوری، گاهی شبیه هشت‌وجهی و اغلب سطوحی واضح و قابل تشخیص دارند (شکل ۲ ب)، بلیت به طور معمول به صورت بلورهای گرد دیده می‌شود (شکل ۲ ث)، فاز آلومینات به صورت بلورهای بلند و باریک گسترش می‌یابند و فاز فریت از طریق بازتاب زیاد در مقطع صیقلی دیده می‌شوند [۵]. در ادامه سایر ویژگی‌های میکروسکوپی فازهای تشکیل دهنده کلینکر ارائه شده است [۵].

فرعی شامل آلومینیوم و آهن هستند. سنگ آهک و مارل مورد نیاز برای تولید سیمان در این کارخانه از معدن سنگ آهک رشکان که به طور رو باز استخراج می‌شود و در نزدیکی کارخانه قرار دارد بهره‌برداری می‌شود. سنگ آهک مربوط به یک واحد سنگی آهکی ضخیم لایه تا متوسط لایه مربوط به سازند قم است همچنین سنگ آهن و خاک رس مورد نیاز نیز از شهرستان‌های همجوار تامین می‌گردند. بخش عمده‌ی رخنمون‌های سنگی در منطقه مورد مطالعه شامل سنگ‌های رسوبی دوره‌ی میوسن می‌باشد که از سمت شرق توسط دریاچه ارومیه محدود شده و از سمت غرب به طور دگرشیب بر روی سنگ‌های قدیمی‌تر پرکامبرین و پرمین قرار گرفته‌اند. محل اصلی کارخانه توسط تراس‌های قدیمی و نهشته‌های رودخانه‌ای پوشیده شده است. نوع رسوبات میوسن در این ناحیه عموماً آهکی و مارنی بوده و هم به طور جانبی و هم در جهت عمودی تغییر کرده و به یکدیگر تبدیل می‌شوند نهشته‌های مارنی در این منطقه دارای مورفولوژی پست بوده و رنگ آنها سفید است و به علت نرمی و سهولت فرسایش، زمین‌های کشاورزی موجود در منطقه را تشکیل داده‌اند. تصویر زیر موقعیت منطقه مورد



شکل ۱ نقشه‌ی زمین شناسی منطقه‌ی مورد بررسی، اقتباس از نقشه‌ی ۱/۱۰۰۰۰۰۰ ارومیه [۹].



شکل ۲ الف و ب) حضور کانی های شکل دار آلیت و کانی های گرد شده بلیت (PPL). پ و ت) حضور کانی های شکل دار آلیت و کانی های کهربایی بلیت (PPL). ث) حضور آشیانه بلیت گرد شده و کانی کوارتز (PPL). ج) حضور کانی های شکل دار آلیت و کوارتز (PPL). در تمام تصاویر زمینه فاز آلومینات است.

جزئیات بلیت

اولین محصول واکنش بین سیلیس و اکسید کلسیم در مرحله ی پخت، ایجاد دی کلسیم سیلکات یا بلیت است. بلیت در شرایط مناسب به صورت بلورهای کاملاً گرد شده است و نیمه شکل دار است و دارای ساختارهایی است که در چندین جهت کشیده شده اند، در قطبیده ساده به رنگ زرد و بنفش با سایه های سبز دیده می شود، رنگ اینترفرانس آن زرد تا سفید سری اول است، مقدار بیرفرنزانس آن در مقطع نازک ۰/۱۵۳ تا ۰/۱۵۳ میکرون است، سائز نرمال کریستال های آن ۱ تا ۴ میکرون است ولی در اثر تبلور مجدد به علت افزایش دما سائز آن به ۲۰

تا ۴۰ میکرون می رسد. آرایش و نوع تجمع این بلورها می تواند تعیین کننده ی نارسایی هایی مختلف در هنگام تولید کلینکر باشد.

جزئیات آلیت

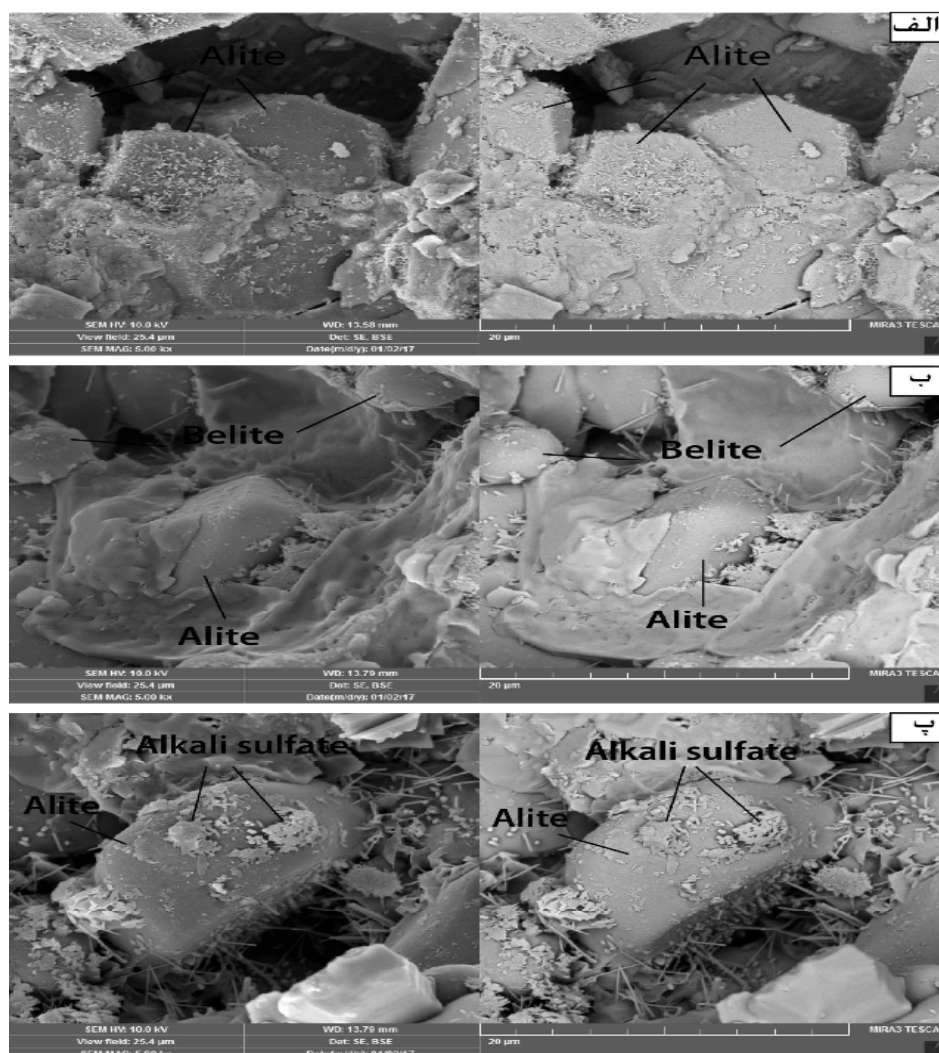
در حالت کلی واکنش حالت جامد ما بین دی کلسیم سیلکات (بلیت) و اکسید کلسیم در دمای بالاتر از ۱۲۵۰ درجه سانتی-گراد فاز آلیت را ایجاد می کند. در مقاطع صیقلی رنگ اینترفرانس کانی آلیت کم است (خاکستری سری اول)، در نور پلاریزه ساده به رنگ آبی، قهوه ای، سبز و زرد دیده می شود، مقدار زاویه ی ۲۷ آن برابر ۲۰ تا ۶۰ درجه است و تک محوره

است ولی اگر میزان آلومینات در کلینکر کم باشد فاز آلومینات کم ولی فریت زیاد است. اگر مقدار آلومین کمتر از ۰/۷ باشد فاز آلومینات ناپایدار می‌شود [۲]. در حالت کلی در بررسی‌های میکروسکوپی آلومینات به صورت بلورهای بی شکل، کوچک و غیر یکنواخت است، دارای شکست صدفی است و پرکننده و فضای بین فریت و بلیت است بنابراین با تاخیر متبلور می‌شود. فاز فریت نیز به صورت منشوری و دارای چندرنگی است (چندرنگی قهوه‌ای شدید)، سیستم تبلور آن ارترومبیک است، طولیل‌شدگی مثبت است، و شکل بلوری آنها خود شکل است و حالت صفحه‌ای دارد و ممکن است حالت منشوری و دندریتی یا حالت توده‌ای نیز داشته باشند.

منفی است، شکل‌دار تا نیمه شکل‌دار با حاشیه‌های زاویه‌دار است و در مقاطع عرضی شش‌وجهی است (بسته به جهت برش)، منطقه‌بندی در این کانی رایج است. کلیواژ ضعیفی دارد (بسته به جانشینی یونی)، محدوده دوشکستی آن ۰/۰۰۲ تا ۰/۱۰ میکرون است، سختی این کانی در جدول سختی ماوس حدود ۵ است (شکل ۳).

ماتریکس (زمینه)

کلینکر عادی و نرمال در دمای ۱۴۵۰ درجه سانتی‌گراد شامل ۳۰ درصد فاز مذاب در کنار فازهای اولیه است [۲]. در ضمن سرد شدن در داخل کوره فازهای ثانویه متبلور می‌شوند. آلومینات و فریت جزء این فازها محسوب می‌شوند. اگر مقدار آلومین در کلینکر بالا باشد کلینکر دارای مقدار بالایی آلومینات



شکل ۳ الف) حضور کانی‌های شکل‌دار شش‌گوشی آلیت ب) حضور کانی‌های شکل‌دار آلیت و کانی‌های گرد شده بلیت پ) حضور کانی شکل‌دار آلیت همراه با سولفات.

زمین شیمی

نتایج تجزیه‌ی شیمیایی اکسیدهای اصلی وابسته به کلینکر و سیمان پرتلند نوع ۱-۴۲۵ و پرتلند نوع ۱-۳۲۵ تولید شده در کارخانه سیمان ارومیه در جدول (۲) و نتایج تجزیه شیمیایی اکسیدهای اصلی مربوط به سیمان پرتلند پوزولانی و سیمان پرتلند تیپ ۲ در جدول‌های ۳ و ۴ ارائه شده‌اند. گستره‌ی کلینکر و ۴ نوع مختلف سیمان تولیدی در کارخانه سیمان ارومیه در نمودار فاز SiO_2 -CaO- Al_2O_3 نشان داده شدند. (شکل ۴ و ۵). بر این اساس کلینکر کارخانه نزدیک به قطب CaO قرار می‌گیرد زیرا ۷۸-۸۰ درصد اصلی خوراک کوره را آهک تشکیل می‌دهد و کلینکر کارخانه در گستره‌ی فاز C3S (آلیت) و C2S (بلیت) قرار می‌گیرد که خود تاییدی بر فراوانی فاز آلیت و سپس بلیت مشاهده شده در مقاطع صیقلی کلینکرهای این کارخانه است همچنین تصاویر SEM وابسته به کلینکرهای تولیدی در این کارخانه نیز نشان دهنده‌ی فازهای آلیت، بلیت و سولفات قلیایی هستند. سیمان پرتلند نوع ۱-۴۲۵، سیمان پرتلند نوع ۱-۳۲۵ و سیمان پرتلند نوع ۲ نزدیک به قطب CaO و در گستره‌ی فاز آلیت و بلیت قرار می‌گیرند و سیمان پرتلند پوزولانی به دلیل مقدار بالای سیلیس ترکیب آن در گستره‌ی C2S و نزدیک به قطب SiO_2 قرار می‌گیرد. نتایج نشان می‌دهند که موقعیت قرارگیری کلینکر و ۴ نوع مختلف سیمان تولیدی در کارخانه سیمان ارومیه با موقعیت قرارگیری کلینکر و انواع مختلف سیمان در شکل ۴ همخوانی زیادی دارند. برای محاسبه‌ی ترکیب فازهای کلینکر، سیمان پرتلند پوزولانی و سیمان پرتلند نوع ۲ براساس مقادیر حاصل از آنالیز شیمیایی، از روابط بوگه [۸] استفاده شد.

شاخص‌های بوگه شامل ضریب اشباع آهک (رابطه‌ی ۱)، نسبت سیلیس (رابطه‌ی ۲) و نسبت آلومینیوم (رابطه‌ی ۳)، مقدار تری‌کلسیم سیلیکات (رابطه‌ی ۴)، دی‌کلسیم سیلیکات (رابطه‌ی ۵)، تری‌کلسیم آلومینات (رابطه‌ی ۶) و تتراکلسیم آلومینوفریت (رابطه‌ی ۷) است:

Lime Saturation Factor: $LSF = \frac{CaO}{2.8SiO_2 + 1.18Al_2O_3 + 0.65Fe_2O_3}$ (۱) ضریب اشباع آهک

SilicaRatio: $SR = \frac{SiO_2}{Al_2O_3 + Fe_2O_3}$ (۲) نسبت سیلیس

Alumina Ratio: $AR = \frac{Al_2O_3}{Fe_2O_3}$ (۳) نسبت آلومینیوم

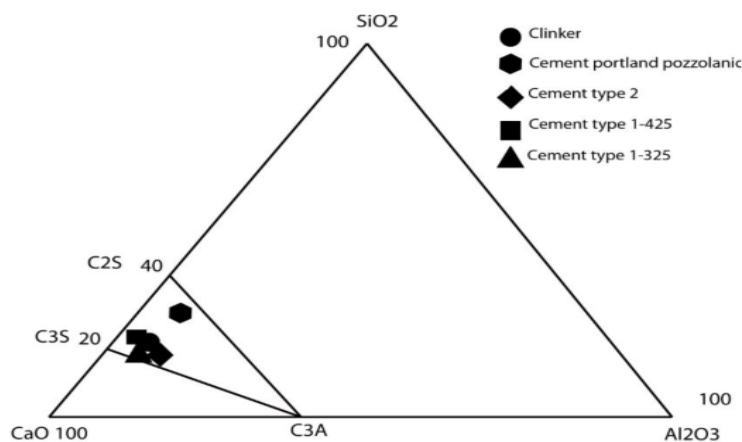
Alite or C3S = $4.07CaO - 60.7SiO_2 - 1.43Fe_2O_3 - 6.72Al_2O_3$ (۴) تری‌کلسیم سیلیکات

Belite or C2S = $8.60SiO_2 + 1.08Fe_2O_3 + 5.07Al_2O_3 - 3.07CaO$ (۵) دی‌کلسیم سیلیکات

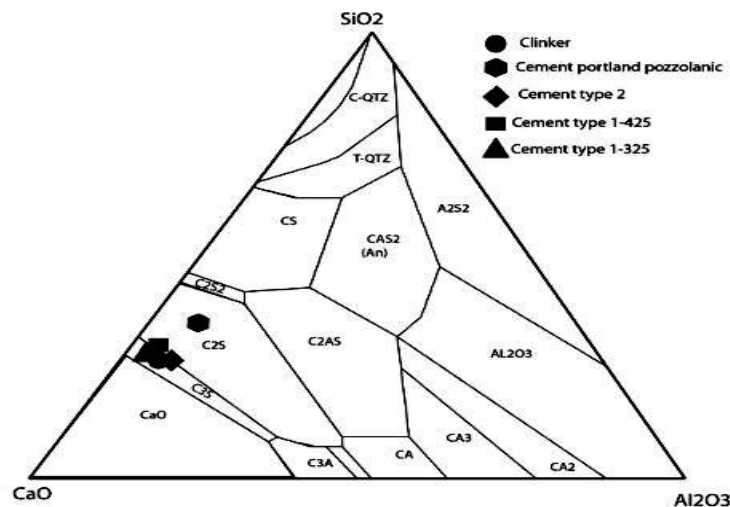
C3A = $2.65Al_2O_3 - 1.692Fe_2O_3$ (۶) تری‌کلسیم آلومینات

Ferrite or C4AF = $3.04Fe_2O_3$ (۷) فریت یا ضریب اشباع آهک

نسبت مقدار واقعی اکسید کلسیم موجود در مواد خام یا کلینکر سیمان را نسبت به بیشینه مقدار اکسید کلسیم (یعنی مقدار بیشینه اکسید کلسیم) قابل پیوند با ترکیباتی مانند سیلیس، آلومین و اکسید فریک در شرایط پخت و خنک کردن صنعتی را نشان می‌دهد، وقتی این مقدار برابر ۱ باشد مقدار آهک دقیقاً با مقدار سیلیس، آلومین و فریک اکسید در تعادل است [۱۰]. اگر این مقدار بیشتر از یک باشد در کلینکر تولید شده آهک آزاد وجود دارد و اگر این مقدار پایین‌تر از ۱ باشد کلینکر تولیدی از بلیت غنی خواهد شد که معمولاً به صورت درصد بیان می‌شود. نسبت سیلیس نسبت وزنی دی‌اکسید سیلیس به مجموع مقادیر اکسید آلومینیوم و اکسید آهن است.



شکل ۴ موقعیت ترسیمی سیمان نوع ۱-۴۲۵، سیمان نوع ۲، سیمان پرتلند پوزولانی، سیمان نوع ۱-۳۲۵ و کلینکر در سیستم فاز C-S-A [۱۱]. C3S نشان دهنده فاز آلیت، C2S نشان دهنده فاز بلیت و C3A نشان دهنده فاز تری‌کلسیم آلومینات هستند.



شکل ۵ روابط فازی در سیستم فازی C-A-S نشان دهنده‌ی موقعیت ترسیمی کلینکر و ۴ نوع مختلف سیمان تولید شده در کارخانه سیمان ارومیه در فاصله‌ی نشان داده شده در شکل ۴ است [۱۱]. C3S نشان دهنده فاز آلیت، C2S نشان دهنده فاز بلیت و C3A نشان دهنده‌تری کلسیم آلومینات است.

اطلاعات ارزشمندی را در رابطه با دما و سرعت پخت کلینکر در کوره، فازهای تشکیل دهنده آن، زمان پخت، سرعت سرد شدن، نوع سوخت مصرفی برای تامین دمای کوره و غیره به دست آورد. به طوری که همواره می‌توان از این روش به عنوان یک روش کنترل کیفی متداول مواد و شرایط پخت استفاده کرده و مشکلات موجود در فرایند بهره‌برداری را به سرعت حل کرد. با توجه به این که با استفاده از میکروسکپ الکترونی می‌توان تصاویر فازهای موجود را به طور مستقیم مشاهده کرد بنابراین اندازه و توزیع فازها را نیز می‌توان بررسی کرد و بهتر است که در کنار بررسی‌های میکروسکوپی از روش‌های دیگر همانند پراش سنج پرتو ایکس و میکروسکوپ الکترونی هم برای دست یافتن به نتایج دقیق تر استفاده کرد.

جدول ۸ شرایط پخت کلینکر در کارخانه سیمان ارومیه را در مقایسه با شرایط استاندارد جهانی برای پخت کلینکر را نشان می‌دهد. بر اساس نتایج حاصل از جدول ۸، سرعت افزایش دمای کوره (با توجه به میانگین آلیت که حدوداً ۴۰ تا ۶۰ میکرون است) و نیز سرعت سرد شدن کلینکر (با توجه به رنگ بلیت که به رنگ زرد است) در کارخانه سیمان ارومیه ضعیف بوده و زمان پخت کلینکر (بر اساس اندازه میانگین بلیت) در مدت نسبتاً طولانی صورت گرفته است.

مقدار این ضریب معمولاً در دامنه‌ی ۴-۱/۵ تغییر می‌کند [۱۰] ولی مطلوب‌ترین تغییرات آن بین ۲/۸-۲/۳ است. نسبت آلومین نسبت وزنی اکسید آلومینیوم به اکسید آهن است به کمک این نسبت اطلاعاتی در خصوص نسبت مقدار آلومینات کلسیم به کلسیم آلومینوفریت و در نتیجه ماهیت گدازه کلینکر به دست می‌آید. مقایسه‌ی مقادیر شاخص اشباع آهک، نسبت سیلیس، نسبت آلومینیوم و نیز مقادیر فازهای تری کلسیم سیلیکات (آلیت)، دی کلسیم سیلیکات (بلیت)، تری کلسیم آلومینات و فریت در کلینکر و سیمان پرتلند نوع پوزولانی و سیمان پرتلند نوع ۲ ارومیه با معیارهای جهانی در جدول‌های ۵ تا ۷ نشان داده شده‌اند بر این اساس ترکیب شیمیایی کلینکر و سیمان پرتلند نوع ۲ تولیدی کارخانه سیمان ارومیه مطابق با استاندارد جهانی بوده اما سیمان پرتلند پوزولانی به دلیل مقدار بالای سیلیس (حدود ۲۷/۵۸ درصد) در ترکیب آن با استاندارد جهانی سیمان مطابقت ندارد.

بررسی شرایط پخت کوره در کلینکرهای کارخانه سیمان ارومیه

با توجه به روش‌های مختلفی که برای بررسی کلینکر، سیمان و فازهای تشکیل دهنده آنها وجود دارند استفاده از بررسی‌های میکروسکوپی می‌تواند به سادگی و در مدت بسیار کوتاه

جدول ۵ مقایسه‌ی کلینکر ارومیه با استاندارد کلینکر جهان (بر اساس محاسبات بوگه) [۱۲].

| LSF | SR | AR | C3S | C2S | C3A | C4AF | ترکیب |
|--------|-----------|-----------|-------|----------|------|------|------------------------|
| ۹۱/۶۱ | ۲/۶۰ | ۱/۸۱ | ۵۲/۷۹ | ۲۳/۲۶ | ۹/۳۵ | ۹/۱۵ | کلینکر کارخانه ارومیه |
| ۹۰-۱۰۴ | ۱/۶ - ۱/۴ | ۱/۴ - ۳/۷ | ۵۲-۸۵ | ۰/۲ - ۲۷ | ۷-۱۶ | ۴-۱۶ | استاندارد جهانی کلینکر |

جدول ۶ مقایسه‌ی سیمان پرتلند تیپ ۲ ارومیه با استاندارد سیمان جهان (بر اساس محاسبات بوگه) [۱۳].

| نوع ماده | C4AF | C3A | C2S | C3S | AR | SR | LSF |
|-----------------------|------|------|------|-------|------|------|-------|
| سیمان پرتلند تیپ ۲ | ۹/۰۵ | ۷/۷۶ | ۹/۴۲ | ۶۵/۲۵ | ۱/۶۲ | ۲/۶۱ | ۹۷/۴۷ |
| استاندارد جهانی سیمان | ۷-۱۰ | ۲-۸ | ۷-۳۰ | ۴۵-۶۵ | ۱-۴ | ۲-۴ | ۹۰-۹۸ |

جدول ۷ مقایسه‌ی سیمان پرتلند پوزولانی ارومیه با استاندارد سیمان جهان (بر اساس محاسبات بوگه) [۱۳].

| نوع ماده | C4AF | C3A | C2S | C3S | AR | SR | LSF |
|-----------------------|------|------|-------|-------|------|------|-------|
| سیمان پرتلند پوزولانی | ۸/۷۲ | ۸/۰۲ | ۹۵/۷۵ | -۲۲/۱ | ۱/۶۹ | ۳/۵۶ | ۹۶/۶۴ |
| استاندارد جهانی سیمان | ۷-۱۰ | ۲-۸ | ۷-۳۰ | ۴۵-۶۵ | ۱-۴ | ۲-۴ | ۹۰-۹۸ |

جدول ۸ شرایط پخت کوره در کلینکرهای کارخانه سیمان ارومیه در مقایسه با شرایط استاندارد جهانی [۵].

| شرایط پخت کلینکر بر اساس استاندارد جهانی | | شرایط پخت کلینکر در فعالیت هیدرولیکی کوره (ارومیه) | |
|--|--|---|--|
| تعیین سرعت افزایش دمای پخت بر اساس اندازه متوسط آلیت به میکرون | | اندازه متوسط آلیت ۰/۰۶ میلی متر یا ۶۰ میکرون، سرعت افزایش دما بسیار کم. | |
| ۱- ۴۰ تا ۶۰ میکرون =سرعت بسیار کم افزایش دما از دمای °C ۱۲۰۰ تا ۱۴۵۰ | | ۱ یا ضعیف | |
| ۲- ۳۰ تا ۴۰ میکرون=سرعت کم افزایش دما از دمای °C ۱۲۰۰ تا ۱۴۵۰ | | | |
| ۳- ۲۰ تا ۳۰ میکرون=سرعت متوسط افزایش دما از دمای °C ۱۲۰۰ تا ۱۴۵۰ | | | |
| ۴- ۱۵ تا ۲۰ میکرون= سرعت بالای افزایش دما از دمای °C ۱۲۰۰ تا ۱۴۵۰ | | | |
| تعیین حداکثر درجه حرارت پخت بر اساس بیرفرنژانس آلیت | | بیرفرنژانس آلیت ۰/۰۰۸-۰/۰۱۰، ماکزیمم دمای کوره بالا. | |
| ۱- بیرفرنژانس ۰/۰۰۲ تا ۰/۰۰۵ =ماکزیمم دمای کوره پایین است. | | ۴ یا عالی | |
| ۲- بیرفرنژانس ۰/۰۰۵ تا ۰/۰۰۶ =ماکزیمم دمای کوره نسبتا پایین است. | | | |
| ۳- بیرفرنژانس ۰/۰۰۶ تا ۰/۰۰۷ =ماکزیمم دمای کوره متوسط است. | | | |
| ۴- بیرفرنژانس ۰/۰۰۸ تا ۰/۰۱۰ =ماکزیمم دمای کوره بالا است. | | | |
| تعیین زمان پخت بر اساس اندازه متوسط بلیت به میکرون | | ابعاد بلیت برابر ۰/۰۲۵ میلی متر (۲۵ میکرون)، زمان پخت نسبتا طولانی. | |
| ۱- ابعاد بلیت از ۵ تا ۱۰ میکرون=زمان کوتاه پخت | | ۳ یا متوسط | |
| ۲- ابعاد بلیت از ۱۵ تا ۲۰ میکرون= زمان متوسط پخت | | | |
| ۳- ابعاد بلیت از ۲۰ تا ۲۵ میکرون=زمان نسبتا طولانی پخت | | | |
| ۴- ابعاد بلیت از ۲۵ تا ۴۰ میکرون=زمان طولانی پخت | | | |
| تعیین سرعت سرد شدن بر اساس رنگ بلیت | | رنگ بلیت ها زرد، سرعت سرد شدگی کلینکر نسبتا آهسته. | |
| ۱- رنگ بلیت ها کهربایی= سرعت آهسته سرد شدن کلینکر | | ۲ یا نسبتا ضعیف | |
| ۲- رنگ بلیت ها زرد=سرعت نسبتا آهسته سرد شدن کلینکر | | | |
| ۳- رنگ بلیت ها زرد کم رنگ= سرعت متوسط سرد شدن کلینکر | | | |
| ۴- رنگ بلیت ها شفاف=سرعت زیاد سرد شدن کلینکر | | | |

برداشت

- براساس بررسی‌های میکروسکوپی انجام شده در مقاطع صیقلی، فازهای مختلف در نمونه‌های کلینکر تولید شده در کارخانه سیمان ارومیه شامل آلیت، بلیت، کوارتز و آلومینات هستند (شکل ۲ الف، ج).

- بر اساس نتایج حاصل از آنالیز شیمیایی، CaO اکسید اصلی کلینکر را تشکیل می‌دهد. ترکیب کلینکر و سیمان پرتلند پوزولانی و سیمان پرتلند نوع ۲ در نمودار فازی $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-CaO}$ در گستره‌ی C_3S و C_2S قرار گرفته‌اند. فراوانی فاز آلیت و بلیت در مقاطع صیقلی کلینکرهای بررسی شده در کارخانه سیمان ارومیه، نتایج ژئوشیمیایی را تایید می‌کند.

- بررسی تصاویر SEM وابسته به کلینکرهای کارخانه سیمان ارومیه نیز نشان دهنده‌ی فراوانی فاز آلیت و سپس بلیت در کلینکرهای تولیدی در این کارخانه هستند. (شکل ۳ الف، پ).

- بر اساس محاسبات بوگه ضریب اشباع آهک در کلینکر کارخانه سیمان ارومیه کمتر از ۱ است (حدوداً ۰/۹۱) که نشان دهنده‌ی غنی بودن کلینکر از فاز بلیت است که در تصاویر میکروسکوپی نیز کانی بلیت با فراوانی نسبتاً زیاد و به صورت آشیانه‌های بزرگ مشاهده می‌شوند (شکل ۲ ث).

- بر اساس محاسبات بوگه ترکیب شیمیایی کلینکر و سیمان پرتلند تیپ ۲ تولیدی کارخانه سیمان ارومیه بنابر استاندارد جهانی بوده ولی سیمان پرتلند پوزولانی تولیدی در این کارخانه به دلیل مقدار بالای سیلیس در ترکیب آن (۲۷/۵۸ درصد) با استاندارد جهانی سیمان همخوانی ندارد و پیشنهاد می‌شود تا از یک پوزولان طبیعی با مقدار سیلیس کمتر برای تولید این نوع سیمان استفاده شود تا ترکیب شیمیایی این نوع سیمان نیز از نظر مقدار C_2S و C_3S با استاندارد جهانی سیمان همخوانی داشته باشد.

- بر اساس جداول استاندارد وابسته به شرایط پخت کوره، سرعت افزایش دمای کوره (با توجه به اندازه متوسط آلیت که در حدود ۴۰ تا ۶۰ میکرون است) و نیز سرعت سرد شدن

کلینکر (با توجه به رنگ بلیت که زرد رنگ است) در کارخانه سیمان ارومیه ضعیف بوده و پخت کلینکر (بر اساس اندازه میانگین بلیت) در مدت نسبتاً طولانی صورت گرفته است.

قدردانی

نویسنده مقاله از جناب آقای مهندس عباسی مسئول محترم معدن کارخانه سیمان ارومیه، خانم دکتر رباب حاجی علی اوغلی دانشیار محترم گروه علوم زمین دانشگاه تبریز و جناب آقای مهندس مصیب زاده مسئول محترم آزمایشگاه سنگ‌بری دانشگاه تبریز جهت همکاری‌های لازم در زمینه تهیه کلینکر و مقاطع صیقلی لازم کمال تشکر را دارد.

مراجع

- [1] Alsop P.h., Chen H., Tseng H., "The Cement plant operation Hand book", Fifth Edition, International Cement Review (2007).
- [2] Ezatian F., "Application of cement microscopy in cement industry", international symposium of cement technology, (2004), 9-18pp.
- [3] Ahangaran A., "Portland cement chemistry", Journal of cement technology, part35, Vol1 (2010), 58-66pp.
- [4] Mindess S., Young F., "Concrete", Prentice Hall Inco, Engle-Wood cliffs. Newjersy (1981).
- [5] Campbell D.H., "Microscopically Examination and Interpretation of Portland cement and Clinker", Second Edition (1999).
- [6] Ghosh S.N., "Advances in cement technology; Chemistry, Manufacture and testing", Second Edition, Publishing by tech books international. New Delhi-110019 India (2002)804.
- [7] Locher F.W., "Cement Principles of production and use", Part3 (2006) 20-70.
- [8] Bouge R.H., "Calculation of phase composition in the chemistry of Portland cement", Reinhold publishing, New York, USA (1974) 184-203.
- [9] Soltani Gh.A., "Geological map of orumia province", Geological survey of Iran (2006).
- [10] Mahdavi H., Raghimi M., Shamanian Gh., Gholipour M., "Mineralogy and geochemistry of

[12] Vanoss H.G., Padorani A.C., "*Cement and the Environment*", Part1, Journal of industrial Ecology, Vol.6, No 1 (2003) 89.

[13] Van Oss H.G., "*Background facts and issues concerning cement and cement data*", Open –file report 2005-1152.u.s. Department of interior.u.s. Geological survey (2005).

Primary material, Clinker and Portland cement of Neka cement factory, Mazandaran province", Journal of Iranian Mineralogy and crystallography, Part1, Vol1 (2016) 173-188pp.

[11] Taylor F.W., "*Cement chemistry*", Second Edition, Thomas Telford, London (1997) 459.