پنجمین کنگره بین المللی معدن و صنایع معدنی ایران
هفتمین کنفرانس مهندسی معدن ایران
www.mineconf.ir
IRAN MINE HOUSE

اکتشاف سیستماتیک ذخایر بال کلی منطقهٔ رباط خان طبس بر اساس خصوصیات کاربردی آنها در صنایع کاشی سرامیک، چینی بهداشتی و نسوز

علیرضا گنجی[۱]، حمید رضا معصومی[۲]، امیر حاجی بابائی[۳*]، جواد آندی[۴]

[۱] گروه زمین شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه آزاد اسلامی واحد لاهیجان، لاهیجان، ایران arganji@liau.ac.ir

[۲] مدیریت عامل شرکت معدنی و صنعتی سوراوجین عقیق، عضو هیئت مدیره خانه معدن ایران، تهران، ایران masoumi@iranclay.ir

[۳*] واحد اکتشافات، شرکت معدنی و صنعتی سوراوجین عقیق، تهران، ایران amirhajibabaei@iranclay.ir

[۴] واحد تحقیق و توسعه، شرکت معدنی و صنعتی سوراوجین عقیق، تهران، ایران andi@iranclay.ir

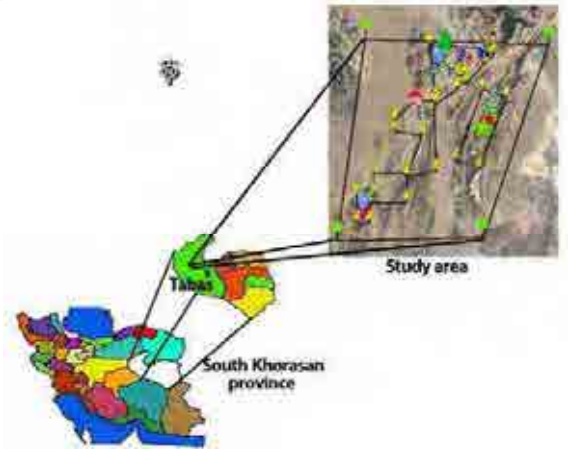
چکیده

منطقهٔ رباط خان واقع در جنوب غربی شهر طبس در شرق ایران مهمترین مکان قرارگیری ذخایر بال کلی کشور می باشد. از دیدگاه زمین شناسی ذخایر بال کلی این منطقه متشکل از یکسری لایه های رسوبی از جنس کلیستون (رس سنگ) کائولینیتی هستند که حداکثر در ۹ افق چینه شناسی مختلف در بین لایه های ماسه سنگی و کنگلومرایی مربوط به بخش میانی سازند آب حاجی قرار گرفته اند. در این تحقیق اکتشاف سیستماتیک لایه های بال کلی به روش حفر ترانشه های اکتشافی منظم و با تراکم شبکه ای زیاد و سپس احداث کارگاه های استخراج آزمایشی صورت گرفته و سپس نمونه برداری سیستماتیک به روش لبپری-شیاری با دقت بالا از تمامی لایه ها و جزئی ترین تغییرات خصوصیات سنگ شناسی ظاهری لایه ها انجام گردید. به منظور شناسایی دقیق و کاربردی لایه های بال کلی علاوه بر انجام آنالیز شیمی و آزمایشات کانی شناسی، خصوصیات فیزیکی مکانیکی و کاربردی نمونه های بال کلی با انجام تست های کاشی سرامیک و تست های چینی بهداشتی مطالعه و بررسی گردید. نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد، به منظور اکتشاف سیستماتیک و همچنین بهینه سازی استخراج ذخایر بال کلی نوع لایه ای یا رسوبی، ضروری است به موازات انجام بررسی های زمین شناسی اکتشافی، مطالعات آزمایشگاهی خواص سنجی کاربردی بر روی نمونه های برداشت شده از حفریات اکتشافی و کارگاه های استخراج آزمایشی صورت پذیرد تا بدین ترتیب ابتدا لایه های بال کلی مختلف با ویژگی های کاربردی متفاوت شناسایی و تفکیک شده و سپس به روش استخراج انتخابی دقیق هر یک از لایه های دارای ویژگی های کاربردی و خصوصیات شیمیایی و فیزیکی مکانیکی منحصر بفرد بطور جداگانه استخراج شوند.

واژه‌های کلیدی (اکتشاف سیستماتیک، خصوصیات کاربردی، ذخایر بال کلی، طبس، ایران)

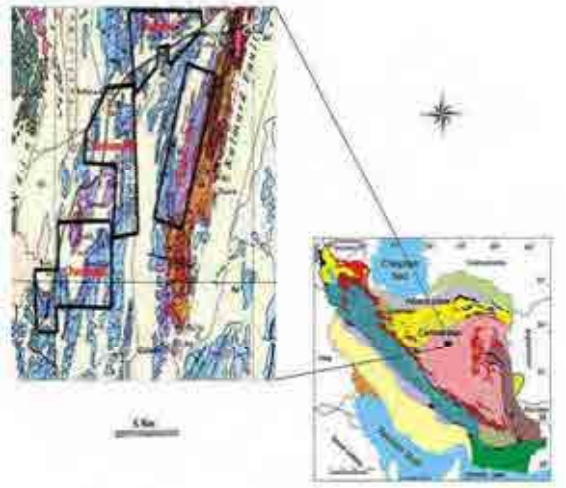
۱- مقدمه

از لحاظ فنی، بال کلی یا رس توپی یک نوع خاک رس بسیار دانه ریز است که کانی تشکیل دهنده اصلی آن کائولنیت است [۱]. این مادهٔ رسی به عنوان یکی از مواد خام اصلی بطور گسترده در بسیاری از صنایع مانند کاشی، سرامیک، چینی بهداشتی، نسوز و آجر نما مورد استفاده قرار می گیرد. کاربرد بال کلی در صنعت، به ترکیب کانی شناسی، شیمیایی و خصوصیات فیزیکی مکانیکی و کاربردی آن بستگی دارد [۲]. بنابراین مشخص کردن خصوصیات کاربردی بال کلی ها از دیدگاه کانی شناسی، شیمیایی و تکنولوژیک، در تمامی مراحل اکتشاف مقدماتی، تفصیلی، تکمیلی و حین استخراج بسیار لازم و ضروری است. مهمترین مکان قرارگیری ذخایر بال کلی کشور، منطقهٔ رباط خان واقع در جنوب غربی شهر طبس در شرق ایران می باشد. منطقه مورد مطالعه در این تحقیق در عرضهای شمالی ′33°11 تا ′33°27 و طولهای خاوری ′55°56 تا ′56°16 واقع شده است (شکل ۱). همانطور که در شکل ۱ دیده می شود، ذخایر بال کلی مورد مطالعه در چهار محدوده ی معدنی به نام های چاهبید، چاهکولار، چشمه شتران و رباط خان واقع شده اند که همگی این محدوده ها توسط شرکت معدنی و صنعتی سوراوجین عقیق مورد بهره برداری قرار می گیرند.



شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه و محدوده های معدنی مورد بررسی

از دیدگاه زمین شناسی ذخایر بال کلی منطقهٔ طبس متشکل از یکسری لایه های کلیستون (رس سنگ) کائولینیتی هستند که حداکثر در ۹ افق چینه شناسی مختلف در بین لایه های ماسه سنگی و کنگلومرایی مربوط به بخش میانی سازند آب حاجی قرار گرفته اند. سازند آب حاجی یکی از تشکیلات چینه شناسی معادل گروه شمشک با سن ژوراسیک تحتانی (لیاس تحتانی – میانی) در ایران مرکزی است. تشکیل میان لایه های بال کلی بطور متناوب در بین رسوبات کنگلومرایی و ماسه سنگی نشانه ی تغییر رسوبگذاری بصورت تناوبی است، همچنین وجود آثار و بقایایی گیاهی و مواد آلی همراه با بال کلی ها و سنگهای مجاور آنها، بر این مسئله دلالت دارند که محیط رسوبی ته نشست رسوبات بال کلی دوره های رسوبگذاری آرام و متلاطم حاکم بر یک محیط دلتایی-مردابی را به تناوب سپری کرده است. البته بدیهی است کانیهای سازنده ی بال کلی خود توسط رودخانه هایی از محل سنگهای منشأ وارد اینگونه حوضه های رسوبی شده اند. در خصوص سنگهای منشأ تأمین کننده ی کائولینیت و سایر کانیهای سازنده بال کلی ها و دیگر رسوبات همراه آنها نیز چنین به نظر می رسد که دگرسانی گرمابی و فرسایش سنگهای آذرین (عمدتاً گرانیتی) و یا سنگهای دگرگونی غنی از فلدسپات، با سن قدیمی تر از ژوراسیک، که در شمالغرب و غرب منطقه ی رباط خان رخنمون دارند این مواد را تأمین نموده اند [۴].



شکل ۲. موقعیت محدوده های معدنی مورد مطالعه بروی نقشه زمین شناسی ۱/۲۵۰۰۰۰ طبس

هدف از این مطالعه، انجام اکتشافات سیستماتیک لایه های معدنی بال کلی بر اساس خصوصیات کاربردی آنها و بررسی نتایج اکتشافی، نحوهٔ انتخاب و مطالعهٔ کارگاه های استخراج آزمایشی و کنترل استخراج انتخابی لایه های بال کلی مختلف بر مبنای کدهای تجاری تعریف شده و طبقه بندی انواع بال کلی ها مورد کاربرد در صنایع مختلف بر اساس خصوصیات کاربردی آنها می باشد، که در ادامه بطور کامل توضیح داده خواهد شد.

۲- مواد و روش ها

به طور کلی، در چهار محدودهٔ معدنی مورد مطالعه، تعداد ۶۶ ترانشه اکتشافی بر روی لایه های بال کلی مختلف حفر گردید که از این ترانشه ها، تعداد ۲۸۶ نمونه بال کلی به روش لبپری-شیاری برداشت گردید. سپس نمونه های برداشت شده که هر کدام وزنی حدود ۸ کیلوگرم داشتند، در آزمایشگاه های شیمی، سرامیک و چینی بهداشتی شرکت معدنی و صنعتی سوراوجین عقیق مورد آزمایشات مختلف، شامل ۱۰۵ آنالیز شیمی، ۱۱۲ تست فیزیکی مکانیکی کاشی-سرامیک و ۹۲ تست فیزیکی و رئولوژیکی چینی بهداشتی، قرار گرفتند. بر اساس نتایج حاصل از انجام این آزمایشات و ویژگی های شیمیایی، فیزیکی و مکانیکی بدست آمده برای نمونه های مورد مطالعه، کدهای تجاری ذیل برای طبقه بندی کاربردی بال کلی های مورد مطالعه مشخص گردیدند. جهت کدگذاری نمونه ها از علائم تجاری تعریف شده توسط شرکت تولیدکننده (شرکت معدنی و صنعتی سوراوجین عقیق) استفاده گردید. این کدها شامل (۱) کدهای مناسب جهت مصرف در

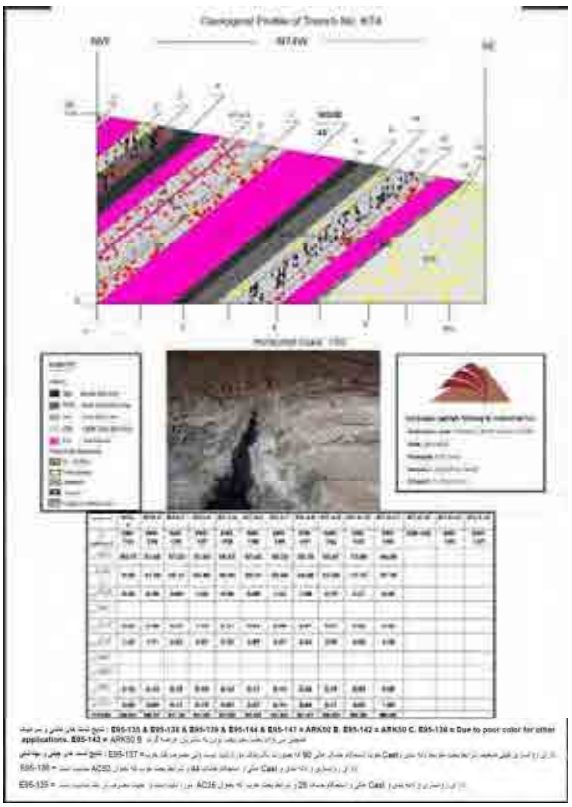
صنایع چینی بهداشتی، مشتمل بر AC-50 ، AC-35 ، U1 ، ARK20L و ARK10 ، (۲) کدهای مناسب جهت مصرف در صنایع کاشی و سرامیک، مشتمل برARK50B ، ARK50A ، ARK50C و ARK20 ، (۳) کدهای مناسب جهت مصرف در صنایع نسوز، مشتمل بر ARB-10 ، ARB-30 ، ARB-100 و (۴) سایر کدهای مناسب جهت مصرف در صنایع آجر نسوز نما می باشند. به منظور بررسی ترکیب کانی شناسی بال کلی های مورد مطالعه، آنالیز کانی شناسی نمونه های بال کلی توسط روش پراش اشعه ایکس (XRD) با استفاده از دستگاه دیفرکتومتر اشعه ایکس مدل بروکر D-5000، پرتو CuKα ، بر روی نمونه های پودری (نمونه های فله) و نمونه های جهت یابی شده (خشک شده در هوا و عمل آوری شده با اتیلن گلیکول برای مدت ۱ ساعت و حرارت دیده به مدت ۰/۵ ساعت در دمای ۵۵۰ درجه سانتیگراد) بر روی فراکسیون رسی (<۲ میکرومتر) انجام گردید [۳]. همچنین مطالعه دقیق کانی شناسی نمونه های بال کلی و بررسی میکروساختار آنها توسط میکروسکوپ الکترونی (SEM، VEGA // TESCAN) مورد بررسی قرار گرفت و ترکیب شیمیایی نقطه ای کانیهای رسی با استفاده از ابزار اسپکترومتر اشعه ایکس پراکنده (EDS) تعیین شد. در این روش ولتاژ شتاب دهنده ۱۵ کیلوولت برای تصویر برداری ثانویه الکترونی و تجزیه عناصر انتخاب شد. تجزیه ی شیمیایی نمونه های بال کلی مورد مطالعه به روش شیمی تر با استفاده از دستگاههای اسپکترومتر و فتومتر شعله ای انجام گرفت. مطالعات خواص سنجی، مشتمل بر بررسی خصوصیات فیزیکی مکانیکی، تست های سرامیکی، تست های چینی بهداشتی و خصوصیات رئولوژیکی نمونه های مورد مطالعه در آزمایشگاه کاشی و سرامیک (واحد سوراوجین قزوین) و آزمایشگاه چینی بهداشتی (واحد رباط خان طبس) شرکت معدنی و صنعتی سوراوجین عقیق انجام شدند. جهت پخت نمونه های مورد مطالعه و بررسی خصوصیات بعد از پخت نمونه ها، که کدهای مربوط به ARK50 در کوره رولری صنعتی پخت سریع در دمای 1190°C و سیکل پخت ۶۰ دقیقه و کدهای U-1، AC-35، AC-50 و ARK20-L در کوره تونلی صنعتی با حداکثر دمای 1200°C پخت شده اند. همچنین مقادیر استحکام (خام، خشک و پخت) کدهای U-1، AC-35، AC-50 و ARK20-L بر اساس نمونه ریخته گری (خط کش) بوده و کد ARK50 بر اساس پرس پودر (بیسکویت) می باشد، از این رو، جهت انجام تست های سرامیکی، نمونه های مورد مطالعه آسیاب شده و سپس پودر حاصل از نمونه ها (حاوی ۶٪ رطوبت) توسط دستگاه پرس اتوماتیک و تحت فشار پرس ۳۰۰ کیلوگرم در سانتی متر به بیسکویت های آزمایشی با ابعاد ۱۰۰ × ۵۰ × ۵ میلی متر مکعب تبدیل شدند و بعد از آن در دمای ۱۱۰ درجه سانتیگراد به مدت ۲۴ ساعت خشک شدند تا جرم ثابت آنها بدست آید. درصد انقباض خشک و مقاومت خمشی بیسکویت های آزمایشی خشک شده اندازه گیری و ثبت گردیدند. مرحله پخت بیسکویت های آزمایشی در کوره تونلی صنعتی کارخانه کاشی انجام شد، که بدین منظور نمونه های آزمایشی آماده سازی شده به مدت ۶۰ دقیقه در کورۀ تونلی قرار گرفتند. در طی پخت، میزان گرمایش و خنک شدن به ترتیب در دامنۀ 80°C/min و 90°C/min نگهداری شدند. سپس نمونه ها به مدت ۱۵ دقیقه در دمای حدود ۱۲۰۰ درجه سانتی گراد قرار داده شدند. پس از پخت نمونه ها، خصوصیات بعد از پخت نمونه ها شامل درصد انقباض، درصد جذب آب و مقاومت خمشی اندازه گیری شدند. استحکام خمشی با استفاده از آزمون خمشی سه نقطه ای و با استفاده از معادله $3FL / 2bh^2$ که در آن F = بار شکستن (کیلوگرم)، L = فاصله بین دو تکیه گاه (mm)، b = عرض مقطع (میلی متر) h = ضخامت (میلی متر) اندازه گیری شد. ابعاد نمونه های بیسکویت آزمایشی قبل و بعد از پخت اندازه گیری شد تا میزان درصد انقباض پخت توسط معادله ۱۰۰ Ld / (Ld-Lf) تعیین شود، که در آن Ld = طول نمونه خشک شده و Lf = طول نمونه پخت شده می باشد. مقادیر درصد جذب آب توسط روش معمولی شامل اندازه گیری تفاوت های جرمی بین نمونه های اشباع شده و پخته شده (۲ ساعت غوطه وری در آب، خنک شده به مدت ۳ ساعت و شستشوی سطح آنها با یک حوله مرطوب) تعیین شد. آزمایشات چینی بهداشتی نیز شباهت های بسیاری با آزمایشات مربوط به نمونه های سرامیکی دارند. از این رو در اینجا تنها برخی از تفاوت های این آزمایشات بیان می شوند که عبارتند از: ۱- آماده سازی نمونه ها به روش دوغاب و ریخته گری تر انجام می شود، ۲- تعیین درصد میزان مصرف روانساز (افزودنی شامل کربنات باریوم ، کربنات سدیم و سیلیکات سدیم مایع)، ۳- رئولوژی دوغاب و ۴- جداره بندی دوغاب در زمان مشخص برای هر نمونه.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- اکتشاف و نمونه برداری سیستماتیک

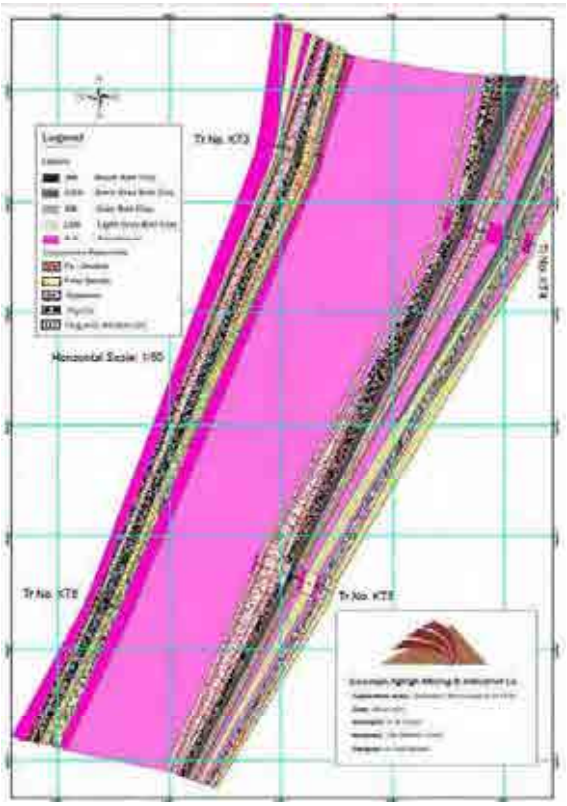
به منظور اکتشاف سیستماتیک لایه های بال کلی در اولین مرحله یکسری ترانشه های اکتشافی در فواصل منظم و با تراکم شبکه

زیاد توسط دستگاه بیل مکانیکی حفر گردیده و سپس ترانشه های حفر شده مورد برداشت زمین شناسی دقیق قرار می گیرند. برداشت زمین شناسی ترانشه های اکتشافی بر اساس خصوصیات سنگ شناسی، کانی شناسی و کیفیت لایه های بال کلی (بسته به میزان آلودگی های با اهمیت در کاربردهای صنعتی لایه های بال کلی) صورت می پذیرد. نمونه ای از پروفیل های زمین شناسی-کیفی ترانشه های اکتشافی در شکل ۳ آورده شده است.



شکل ۳. نمونه ای از یک پروفیل زمین شناسی-کیفی ترسیم شده از ترانشه های اکتشافی

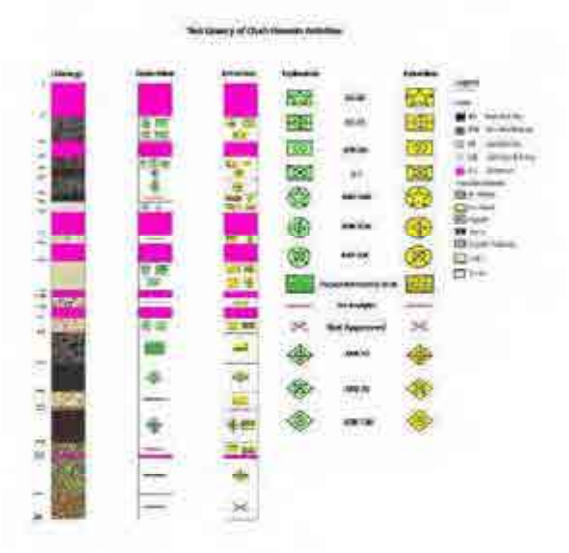
همانطور که در شکل ۳ قابل مشاهده است، در پروفیل زمین شناسی-کیفی ترسیم شده، علاوه بر مشخص کردن لایه های بال کلی مختلف و سایر لایه های مجاور، نتایج آنالیز شیمی به همراه نتایج حاصل از انجام آزمایشات چینی بهداشتی و سرامیکی لایه های بال کلی نیز در پروفیل آورده شده است، که این باعث می گردد، لایه های بال کلی مورد نظر در هر ترانشهٔ اکتشافی دقیقاً به آسانی مشخص شود و خصوصیات کیفی (کاربردی) هر لایهٔ بال کلی معین شود. بنابراین به راحتی میتوان کاربرد صنعتی تمامی لایه های بال کلی اکتشاف شده را تعیین نموده و بر این اساس لایه های بال کلی را طبق کد تجاری-کاربردی آنها طبقه بندی نمود. از آنجا که لایه های بال کلی در جوانب تغییرات خواص فیزیکی مکانیکی بسیار شدیدی نشان می دهند، لذا جهت دنبال نمودن لایه های بال کلی دارای خصوصیات کاربردی مشابه در جوانب، نقشه های کرولاسیون دقیق با مقیاس ۱/۵۰ در فاصلهٔ بین ترانشه های اکتشافی مجاور ترسیم می گردد (شکل ۴).



شکل ۴. نمونه ای از یک نقشه کرولاسیون ترانشه های اکتشافی

پس از ترسیم پروفیل های زمین شناسی-کیفی و نقشه های کرولاسیون لایه های بال کلی اکتشاف شده در هرمنطقهٔ اکتشافی، لایه های بال کلی مختلف بر اساس کدهای تجاری-کاربردی (بسته به مصارف صنعتی آنها در صنایع چینی بهداشتی، کاشی سرامیک و صنعت نسوز) طبقه بندی شده و بر این اساس یکسری ستون های سنگ شناسی-کاربردی برای هر ترانشهٔ اکتشافی و هر منطقهٔ اکتشافی تهیه و ترسیم می گردند (شکل ۵). در نهایت بر اساس اولویت تجاری و نیاز روز بازارهای مصرف، برطبق ستون

های سنگ شناسی-کاربردی ترسیم شده در یک منطقهٔ اکتشافی مشخص اقدام به احداث کارگاههای استخراجی آزمایشی می شود. در طی انجام عملیات استخراج آزمایشی، هر لایهٔ بال کلی به روش استخراج انتخابی و بصورت جداگانه استخراج و دپو می شود. بدلیل تغییرات جانبی شدید لایه های بال کلی، نمونه های متعددی از دپوهای استخراجی مختلف مربوط به هر لایهٔ بال کلی مشخص برداشت می شود. بدین ترتیب پس از بررسی نتایج حاصل از انجام تست های آزمایشگاهی شیمیایی، فیزیکی مکانیکی و کاربردی بروی لایه های بال کلی، می توان بطور مرتب و دقیق کیفیت و خصوصیات کاربردی لایه های بال کلی را بطور جداگانه و در طول هر کارگاه استخراج آزمایشی بررسی نمود. بطور معمول با توجه به تغییرات جانبی شدید لایه های بال کلی، متأثر از چین خوردگی ها و گسل خوردگی های محلی کوچک و نیز شرایط متفاوت حوضه رسوبی در زمان تشکیل و رسوبگذاری لایه های بال کلی، تغییرات کیفی قابل توجهی در اکثر لایه های بال کلی مشاهده می گردد. لذا جهت مدیریت استخراج بهینه و شناخت دقیق تر تغییرات کیفی لایه های بال کلی، مقایسهٔ ستون های زمین شناسی-کاربردی ترسیم شده با استفاده از نتایج ترانشه های اکتشافی و نتایج کارگاه های استخراج آزمایشی انجام می گردد (شکل ۵).



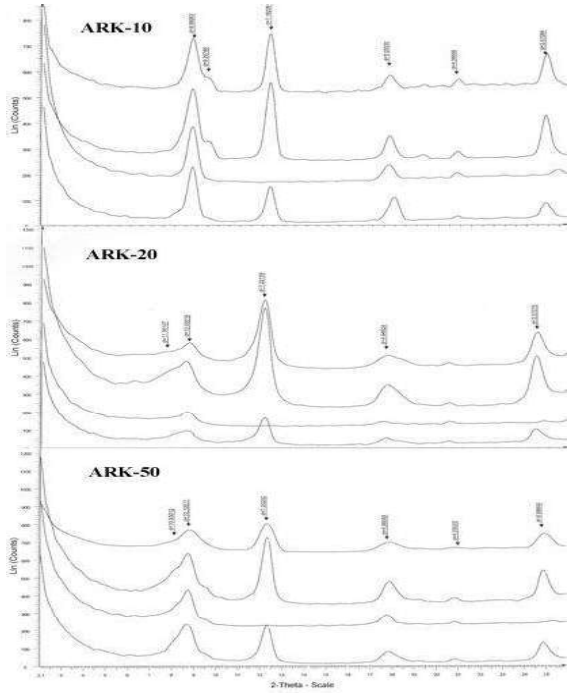
شکل ۵. نمونه ای از ستون های زمین شناسی-کاربردی مقایسه ای لایه های بال کلی در ترانشه های اکتشافی و کارگاههای استخراجی آزمایشی یک منطقهٔ اکتشافی مشخص

۳-۲- کانی شناسی

به منظور بررسی ترکیب کانی شناسی تشکیل دهندهٔ لایه های بال کلی در منطقهٔ مورد مطالعه از روش آنالیز پراش اشعه ایکس(XRD) استفاده شد. الگوهای پراش اشعه ایکس بدست آمده از نمونه های اکتشافی نشان می دهد؛ کانی اصلی تشکیل دهنده لایه های بال کلی مورد مطالعه کائولینیت بوده و کانیهای فرعی موجود در آنها به ترتیب فراوانی کوارتز، ایلیت، آناتاز و مقدار بسیار کمی پیروفیلیت هستند. علاوه بر این کانی ها، در نمونه های ناخالص کانیهای ژیپس، هماتیت، لیمونیت و پیریت نیز به میزان کم مشاهده می شوند (جدول ۱ و شکل ۶). البته لازم به ذکر است که مهمترین ناخالصی موجود در لایه های بال کلی خاکستری تیره تا سیاه رنگ (مانند کد U1)، مواد آلی(لیگنیت) است.

جدول ۱. ترکیبات کانی شناسی لایه های بال کلی های مورد مطالعه

Sample	Clay minerals	Associated minerals
U1	Kaolinite, illite	Quartz, anatase
ARK-50	Kaolinite, illite, pyrophillite	Quartz, gypsum, anatase
ARK-20	Kaolinite, illite	Quartz, anatase
ARK-10	Kaolinite, illite, pyrophillite	Quartz, gypsum, anatase, diaspore



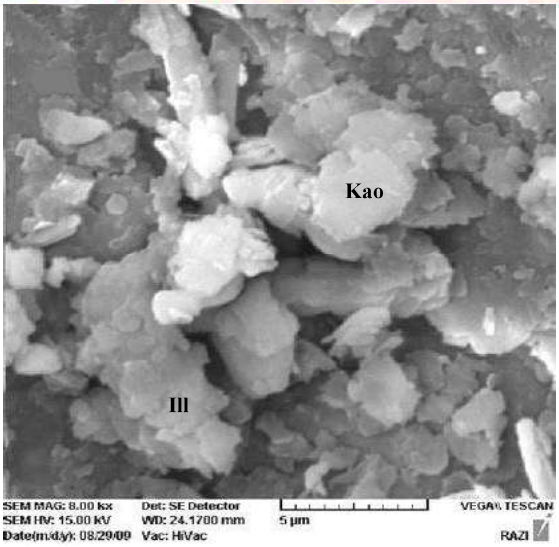
شکل ۶. الگوهای پراش اشعه ایکس نمونه های بال کلی مورد مطالعه.

(در شکل فوق دیفرکتوگرامهای آورده شده برای هر یک از نمونه های مطالعه شده به ترتیب از بالا به پایین مربوط به نمونه های پودری کلی، فراکسیون رسی جهت یابی شده و خشک شده در هوا، فراکسیون رسی جهت یابی شده و عمل آوری شده با اتیلن گلیکول برای مدت ۱ ساعت و جهت یابی شده و فراکسیون رسی حرارت دیده به مدت ۰/۵ ساعت در دمای ۵۵۰ درجه سانتیگراد می باشند.)

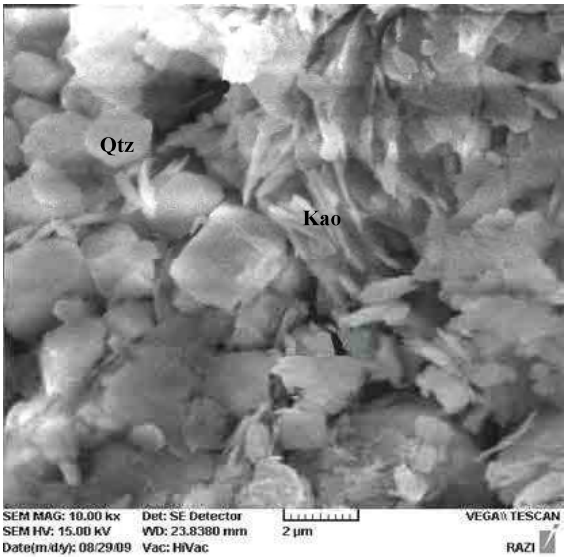
برای تعیین دقیق نوع کانیهای رسی موجود در نمونه های بال کلی مورد مطالعه از روش آماده سازی نمونه های با قطر زیر ۲ میکرون به روش ته نشینی جهت یابی شده و سه نوع استاندارد عمل آوری، شامل عمل آوری با اتیلن گلیکول، خشک کردن در دمای معمولی و گرم کردن تا حرارت ۵۵۰ درجه سانتیگراد، استفاده گردید. پیک گراف پراش اشعه ایکس در موقعیت d = 7.21 Å و ۳,۵۷ Å برای ذرات کمتر از دو میکرومتر (<۲ µm) پس از حرارت دیدن در دمای ۵۵۰ درجه سانتیگراد ناپدید شد که این نشان دهنده حضور کائولینیت به عنوان فاز اصلی تشکیل دهندهٔ نمونه های بال کلی مورد مطالعه است [۵]. پس از افزودن اتیلن گلیکول، هیچ تغییری در الگوهای XRD نمونه های مورد مطالعه مشاهده نگردید که این نشان می دهد نمونه های مورد مطالعه حاوی کانیهای رسی قابل تورم اسمکتیتی مانند مونتموریلونیت نیستند.

به منظور مطالعه ریزساختاری، بافت و مورفولوژی کانیهای رسی در نمونه های بال کلی مورد مطالعه، دو نمونه بال کلی کاملاً متفاوت به لحاظ خصوصیات شیمیایی و فیزیکی مکانیکی، شامل یک نمونه با کد U1 بال کلی خاکستری تیره تا سیاه و یک نمونه با کد ARK-10 بال کلی خاکستری روشن مایل به سفید، توسط دستگاه میکروسکوپ الکترونی SEM مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. در این مطالعات از روش آنالیز SEM-EDS برای تعیین ترکیب شیمیایی کیفی و نیمه کمی کانیهای رسی استفاده شد. لازم به ذکر در محاسبات مربوط به تعیین ترکیب شیمیایی نیمه کمی کانیها با استفاده از داده های EDS، مقادیر مربوط به طلا (که ناشی از پوشش طلا بر روی نمونه های مورد مطالعه بوده است) حذف شده و سپس مقادیر نیمه کمی هر یک از عناصر تشکیل دهندهٔ کانیها محاسبه شده اند.

بال کلی های مطالعه شده دارای آگلومرات های ذرات ریز با ضخامت حدود ۲ میکرون می باشند. بال کلی کد U1 (شکل ۷) و بال کلی کد ARK-10 (شکل ۸) دارای تجمعات ستونی شکل بسیار کوچکی از بلورهای کائولینیت و ایلیت صفحه ای هستند.



شکل ۷. تصویر میکروسکوپ الکترونی SEM نمونه ی بال کلی کد U1 که در آن بلورهای کائولینیت(Kao) و ایلیت(Ill) صفحه ای شکل بوضوح مشاهده می گردند

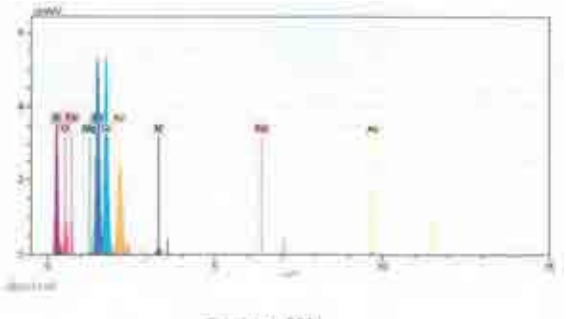


شکل ۸. تصویر میکروسکوپ الکترونی SEM نمونه ی بال کلی کد ARK-10 که در آن بوضوح بلورهای کائولینیت صفحه ای شکل(Kao) و بلورهای چندضلعی کوارتز(Qtz) قابل مشاهده می باشند.

بلورهای کائولینیت به طور عمده بصورت شش ضلعی کاذب با لبه های نا منظم با ترکیب ایده آل (Al/Si ratio ~1.0) دیده می شوند که توسط آنالیز EDS تأیید شده اند (شکل ۹).

نتایج آنالیز EDS انجام شده بر روی بلورهای کانیهای رسی تشکیل دهندهٔ نمونه های مورد مطالعه حاکی از آن است که

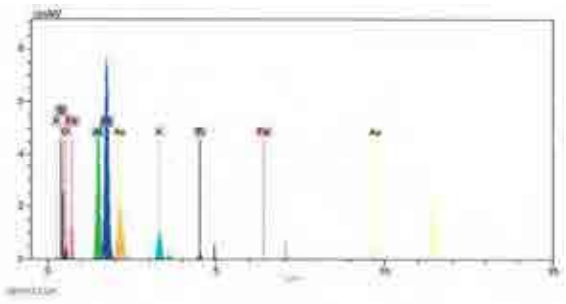
بلورهای کائولینیت عمدتاً دارای نسبت Al / Si نزدیک به ۰,۹: ۱ بوده که بسیار نزدیک به نسبت کائولینیت ایده آل ۱: ۱ است. مقادیر K در کائولینیت بسیار کم است، در حالیکه بلورهای ایلیت حاوی K زیادی هستند (شکل ۱۰).



Spectra: 004

Element	Series	unn. C [wt.-%]	norm. C [wt.-%]	Atom. C [at.-%]
Oxygen	K series	12.58	14.19	32.65
Magnesium	K series	0.44	0.50	0.76
Aluminium	K series	17.58	19.84	27.07
Silicon	K series	19.76	22.30	29.22
Potassium	K series	1.77	1.99	1.88
Iron	K series	1.36	1.54	1.01
Gold	M series	35.12	39.63	7.41
Total:		88.6 %		

شکل ۹. گراف آنالیز EDS کانی کائولینیت (این گراف و مقادیر آنالیز نیمه کمی عناصر بدون حذف اثر پوشش عنصر طلا ارائه شده است. در محاسبات مورد نظر مجدداً مقادیر اندازه گیری شده پس از حذف طلا اصلاح شده اند.)



Spectra: 006

Element	Series	unn. C [wt.-%]	norm. C [wt.-%]	Atom. C [at.-%]
Oxygen	K series	12.05	15.14	31.16
Aluminium	K series	13.87	17.42	21.25
Silicon	K series	22.98	28.87	33.84
Potassium	K series	6.70	8.41	7.09
Titanium	K series	1.74	2.19	1.50
Iron	K series	0.91	1.15	0.68
Gold	M series	21.36	26.83	4.48
Total:		79.6 %		

شکل ۱۰. گراف آنالیز EDS کانی ایلیت(این گراف و مقادیر آنالیز نیمه کمی عناصر بدون حذف اثر پوشش عنصر طلا ارائه شده است. در محاسبات مورد نظر مجدداً مقادیر اندازه گیری شده پس از حذف طلا اصلاح شده اند.)

علاوه بر کانیهای رسی شناسایی شده، مواد آلی(لیگنیت) و کانی دیاسپور نیز در نمونه های مورد مطالعه تشخیص داده شدند. تک کریستال های دیاسپور که بعضی از آنها تقریباً شکلدار هستند بخوبی قابل مشاهده می باشند. نتایج حاصل از انجام آزمایشات بعدی نشان داد که تفاوت های کانی شناسی در بال کلی های مورد مطالعه تأثیر بسیار زیادی بروی ویژگی های تکنولوژیکی و خصوصیات فیزیکی مکانیکی کاربردی آنها، شامل نتایج تست های کاشی سرامیکی، چینی بهداشتی و نسوز، داشته و تأثیر قابل توجهی بر روی خواص رئولوژیکی و حرارتی آنها و همچنین ساختار متخلخل نمونه های پخته شده دارند [۶].

۳-۳- ترکیب شیمیایی

جهت مطالعه ترکیب شیمیایی لایه های بال کلی مورد مطالعه (با کدهای تجاری-کاربردی مشخص)، از ۲۸۶ نمونه برداشت شده از ترانشه های اکتشافی و دپوهای کارگاههای استخراجی آزمایشی، تعداد ۱۰۵ نمونه مورد آنالیز شیمی تر قرار گرفتند که نتایج حاصل در جدول ۲ آورده شده است. از این جدول میتوان نتایج مهمی را در خصوص تغییرات سازنده های شیمیایی اصلی بال کلی های مورد مطالعه بدست آورد. مقدار SiO2 در کدهای AC-50 ، AC-35 ، U-1 ، ARK20L ، ARK-10 (کدهای مربوط به چینی بهداشتی) و ARK50B ، ARK50C ، ARK50A و ARK-20 (کدهای مربوط به کاشی سرامیک) حدوداً بین ۶۲ تا ۷۰ درصد وزنی است ولی در کدهای مربوط به صنعت نسوز به علت بالا بودن میزان آلومین به همین نسبت از مقدار سیلیس کاسته می شود. بنابراین کدهای ARB-10 ، ARB-30 و ARB-100 میزان سیلیس بسیار کمتری بین ۳۸ تا ۴۶ درصد وزنی را دارا می باشند. هرچه میزان سیلیس نمونه های بال کلی از مقادیر مربوط به کدهای چینی بهداشتی و کاشی سرامیک بالاتر باشد، درصد زبره ی آنها بالا می رود که در عمل باعث بهبود خصوصیات روانسازی آنها خواهد بود ولی استحکام خشک نمونه ها افت می کند. در مقابل هر چه آلومین موجود در نمونه ها از مقدار ۲۴٪ بیشتر باشد، روانسازی نمونه ها پایین آمده ولی استحکام خشک آنها بالا می رود. چنانچه میزان اکسید آهن نمونه ها بالاتر از ۲ تا ۳ درصد وزنی باشد رنگ بعد از پخت آنها قهوه ای چرک تا سوخته می شود که باعث می شود این نمونه ها از نظر کاربردهای چینی بهداشتی و کاشی سرامیک مردود باشند و تنها می توانند جهت کاربرد آجر نسوز نما مورد استفاده قرار گیرند.

مجموع اکسیدهای Na2O و K2O بایستی زیر ۲ درصد وزنی باشد تا از لحاظ خصوصیات پخت در کاربرد چینی بهداشتی قابل قبول باشد. البته میزان آلومین و LOI نمونه ها نیز در این مورد تأثیر گذار می باشد. افزایش میزانSO3 در نمونه های مورد مطالعه باعث رخداد پدیدهٔ باد کردگی بعد از پخت و ایجاد حالت سوزن سوزنی بعد از پخت می گردد که باعث مردود شدن نمونه از نظر کابرد در چینی بهداشتی و کاشی سرامیک می گردد. میزان مواد آلی موجود در نمونه ها در کاربرد چینی بهداشتی بین ۵ تا ۷ درصد وزنی قابل قبول است و بیشتر از این میزان باعث تغییر رنگ بعد از پخت نمونه ها به قهوه ای تیره و همچنین باد کردگی و ایجاد هستهٔ سیاه (بلک کور) در آنها می گردد.

۳-۴- خصوصیات فیزیکی مکانیکی- کاربردی

۳-۴-۱- آزمایشات چینی بهداشتی

به منظور خواص سنجی و بررسی خصوصیات فیزیکی مکانیکی لایه های بال کلی های مورد مطالعه، از میان ۲۸۶ نمونه برداشت شده از ترانشه های اکتشافی و دپوهای کارگاههای استخراجی آزمایشی، تعداد ۹۲ نمونه جهت انجام تست های چینی بهداشتی انتخاب گردیدند. بهترین کد نمونهٔ بال کلی های مورد مطالعه از نظر کاربرد چینی بهداشتی، کد AC-50 می باشد که استحکام خشک آن از ۳۸ کیلوگرم نیرو بر سانتی متر مربع به بالا است که تقریباً استحکام بالایی است. رنگ پخت آن کرم روشن تا کمی تیره است. کد AC-35 از نظر خصوصیات چینی بهداشتی مورد قبول می باشد. **این کد** از نظر استحکام خشک در دامنه بین ۲۸ تا ۳۵ کیلوگرم نیرو بر سانتی متر مربع قرار دارد. از لحاظ میزان زبره در مش ۲۷۰، زیر یک گرم، مش ۲۳۰ تقریباً ۶ تا ۷ گرم و مش ۳۵ تقریباً ۴۰ گرم می باشد. رنگ پخت آن نیز بین AC-50 و U-1 است که تقریباً کرمی می باشد. بعد از کد AC-35 از نظر کیفیت کد U-1 مورد توجه قرار دارد که استحکام خام این کد در حد کد ARK20L می باشد ولی ویژگی بارز این کد، رنگ پخت روشن آن است. درصد زبره ی آن بالا می باشد، بطوریکه زبره ی روی مش ۳۵، بعضی مواقع از ۷۰ گرم تا حتی ۱۲۰ گرم نیز بوده است. در نهایت کد ARK20L دارای استحکام خام مشابه با کد U-1 بوده یعنی بین ۲۲ تا ۲۸ می باشد. تفاوت آن در رنگ بعد از پخت است که تیره رنگ می باشد. روانسازی آن در حد مطلوبی است و از لحاظ این خصوصیت شبیه کد U-1 می باشد.

۳-۴-۲- آزمایشات کاشی سرامیک

به منظور خواص سنجی و بررسی خصوصیات فیزیکی مکانیکی لایه های بال کلی های مورد مطالعه، از بین ۲۸۶ نمونه برداشت شده از ترانشه های اکتشافی و دپوهای کارگاه های استخراج آزمایشی، تعداد ۱۱۲ نمونه جهت انجام تست های کاشی سرامیک انتخاب گردیدند. در این آزمایشات با توجه به نیاز بازار فعلی کاشی و سرامیک کشور به استفاده از بال کلی های مناسب برای تولید کاشی پرسلانی، خصوصیات رئولوژیکی، رنگ بعد از پخت، استحکام خشک، جذب آب و انقباض بعد از پخت نمونه ها مورد بررسی قرار گرفتند. از بین نمونه های مورد مطالعه، نمونه های بال کلی خاکستری تا خاکستری روشن رنگ دارای رئولوژی مناسب بوده و قابلیت تولید دوغاب با دانسیته ی ۱,۷ تا ۱,۸ گرم بر سانتیمتر مکعب را دارند. اما نمونه های بال کلی خاکستری تیره تا سیاه رنگ رئولوژی نامناسبی دارند.

رنگ بعد از پخت تمامی کد نمونه های مربوط به بال کلی های با کاربرد کاشی و سرامیک، اعم از گروه ARK50 (ARK50B ، ARK50A، ARK50C) مناسب بوده و از کرم روشن تا شیری متغیر است. استحکام خشک نمونه های بال کلی خاکستری روشن تا خاکستری رنگ کمتر از ۱۵ تا حداکثر ۲۵ کیلوگرم نیرو بر سانتی متر مربع متغیر است. در حالیکه در مورد نمونه های بال کلی خاکستری تیره تا سیاه رنگ این مقدار به ۲۵ تا ۳۰ کیلوگرم نیرو بر سانتی متر مربع می رسد. جذب آب بعد از پخت نمونه ها بسیار متغیر بوده و بطور متوسط از ۴ تا ۸ درصد وزنی تغییر می نماید. انقباض بعد از پخت نمونه ها نیز بسیار متغیر بوده و بطور متوسط بین ۵ تا بالاتر از ۱۰ درصد متغیر است بطوریکه مقادیر آن در نمونه های بال کلی تیره رنگ بیشتر از سایر نمونه ها می باشد.

۳-۴-۳- آزمایشات نسوز

جهت مطالعه ی کد نمونه های با کاربرد نسوز (ARB-10 ، ARB-30، ARB-100) بایستی ترکیب شیمیایی نمونه های بال کلی مشخص گردد. همانطور که قبلاً نیز ذکر شد از بین ۲۸۶ نمونه برداشت شده از ترانشه های اکتشافی و دپوهای کارگاه های استخراج آزمایشی، تعداد ۱۰۵ نمونه مورد آنالیز شیمی تر قرار گرفتند تا بدین ترتیب نمونه های بال کلی سیاه رنگ به لحاظ کیفیت و امکان کاربرد به عنوان خاک نسوز، طبقه بندی شوند.

جدول ۲. ترکیب شیمیایی نمونه های بال کلی مورد مطالعه

CODE	AC-50	AC-35	U-1	ARK20L	ARK-50	ARK-20	ARK-10	ARB-10	ARB-30	ARB-100
SiO۲	65-67	66-68	70	65-67	۶۶	64.5	62.5	۴۶	۳۸	۴۲
Al2O3	19-21	19-21	18-19	19-21	19-21	19-21	20-22	۲۷	۲۶	۳۳
Fe2O3	<2	<1.8	<1	<2	۰/۸	<1.5	<1.6	<1.5	۱/۵	<2
TiO2	<1	<1	<1	<1	۱/۵	<1.5	۱/۵	<1.5	۱	۱/۵
Na2O	<1	<1	<1	<1	۰/۶۵	<0.45	<0.5	<1	<1	<0.5
K2O	1.5-2.5	1.5-2.5	1.5-2.5	1.5-2.5	۲/۵	2.1	2.3	<1	<1	<0.5
CaO	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	۰/۵	<0.5	<0.5	<0.5	۰/۵	<0.4
MgO	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	-	-	-	-	-	-
SO3	<0.8	<0.8	<0.8	<0.8	۰/۶	<0.5	<1	-	-	-
LOI	6	6	6	6	5-6	6-7.5	7.5	19-21	<30	۱۶
Sample Color	Gray	Gray	Black to dark gray	Gray	Gray	Light gray to gray	White to Light gray	Black ball clay	Black ball clay	Black ball clay
Dry strength (Kg/cm2)	34-42	28-35	22-28	22-28	25-30	-	-	-	-	-
%Dry shrinkage	4.69	4.84	4.47	4.58	-	-	-	-	-	-
%Firing shrinkage	10.23	10.76	12.45	10.36	۵/۵	-	-	-	-	-
Firing strength (Kg/cm2)	644	780	459	469	>450	-	-	-	-	-
%Water absorption	1.1	0.05	5.51	4.20	۶	-	-	-	-	-
Firing color	نخودی تیره	L*a*b 61.12*1.44*13.26	نخودی روشن	نخودی تیره	L*a*b 83.09*1.54*11.62	-	-	-	-	-

همانطور که در جدول ۲ مشاهده می گردد، در کد نمونه های با کاربرد نسوز، محتوای آلومینای آنها بسیار مهم است. البته میزان اکسید آهن نیز بعنوان یک جزء شیمیایی مزاحم در این نوع بال کلی ها حائز اهمیت می باشد. علاوه بر آن میزان سولفور و یا SO3 نیز یک جزء شیمیایی مزاحم دیگر به شمار می رود. اکسیدهای قلیایی و قلیایی خاکی نیز هر کدام به نوبه ی خود از اهمیت خاصی برخوردار هستند. بدین صورت که اکسیدهای قلیایی، شامل Na2O و K2O ، باعث گدازآوری محصولات نسوز می شوند. از این رو بایستی میزان مجموع آنها زیر یک درصد وزنی باشد. اکسیدهای عناصر قلیایی خاکی نیز، شامل MgO و CaO، به همین منوال هستند با این تفاوت که تأثیر به نسبت کمتری بر روی گداز آوری محصولات نسوز دارند.

۴- نتیجه گیری و پیشنهادات

مهمترین مکان قرارگیری ذخایر بال کلی کشور، منطقهٔ رباط خان واقع در جنوب غربی شهر طبس در شرق ایران می باشد. از دیدگاه زمین شناسی ذخایر بال کلی منطقهٔ طبس متشکل از یکسری لایه های کلیستون (رس سنگ) کائولینیتی هستند که حداکثر در ۹ افق چینه شناسی مختلف در بین لایه های ماسه سنگی و کنگلومرایی مربوط به بخش میانی سازند آب حاجی قرار گرفته اند. سازند آب حاجی یکی از تشکیلات چینه شناسی معادل گروه شمشک با سن ژوراسیک تحتانی (لیاس تحتانی – میانی) در ایران مرکزی است. محیط رسوبی ته نشست این رسوبات بال کلی یک محیط دلتایی-مردابی بوده که متأثر از دوره های رسوبگذاری آرام و متلاطم بوده است.

به منظور اکتشاف سیستماتیک لایه های بال کلی در اولین مرحله یکسری ترانشه های اکتشافی در فواصل منظم و با تراکم شبکه زیاد توسط دستگاه بیل مکانیکی حفر گردیده و سپس با توجه به نتایج حاصل کارگاه های استخراج آزمایشی احداث و مورد مطالعه دقیق قرار می گیرند. جهت تهیه و ترسیم نتایج اکتشافی، پروفیل های زمین شناسی-کیفی ترسیم شده، که در آنها علاوه بر مشخص کردن لایه های بال کلی مختلف و سایر لایه های سنگی مجاور، نتایج آنالیز شیمی به همراه نتایج حاصل از انجام آزمایشات کاربردی چینی بهداشتی و سرامیکی لایه های بال کلی نیز آورده می شوند. ترسیم این نوع پروفیل های کاربردی باعث می گردد، لایه های بال کلی مورد نظر در هر ترانشهٔ اکتشافی دقیقاً و به آسانی مشخص شوند و خصوصیات کیفی (کاربردی) هر لایهٔ بال کلی معین شود. علاوه بر آن، از آنجا که لایه های بال کلی در جوانب تغییرات خواص فیزیکی مکانیکی بسیار شدیدی نشان می دهند، لذا جهت دنبال نمودن لایه های بال کلی دارای خصوصیات کاربردی مشابه در جوانب، نقشه های کرولاسیون دقیق با مقیاس ۱/۵۰ در فاصلهٔ بین ترانشه های اکتشافی مجاور نیز ترسیم می گردند. پس از ترسیم پروفیل های زمین شناسی-کیفی و نقشه های کرولاسیون لایه های بال کلی اکتشاف شده در هرمنطقهٔ اکتشافی، لایه های بال کلی مختلف بر اساس کدهای تجاری-کاربردی طبقه بندی شده و بر این اساس یکسری ستون های سنگ شناسی-کاربردی برای هر ترانشهٔ اکتشافی و هر منطقهٔ اکتشافی تهیه و ترسیم می گردند. بطور معمول با توجه به تغییرات جانبی شدید لایه های بال کلی، متأثر از چین خوردگی ها و گسل خوردگی های محلی کوچک و نیز شرایط متفاوت حوضه رسوبی در زمان تشکیل و رسوبگذاری لایه های بال کلی، تغییرات کیفی قابل توجهی در اکثر لایه های بال کلی مشاهده می گردد. لذا جهت مدیریت استخراج بهینه و شناخت دقیق تر تغییرات کیفی لایه های بال کلی، مقایسهٔ ستون های زمین شناسی-کاربردی ترسیم شده با استفاده از نتایج ترانشه های اکتشافی و نتایج کارگاه های استخراج آزمایشی انجام می گردد.

الگوهای پراش اشعه ایکس بدست آمده از نمونه های اکتشافی نشان می دهد؛ کانی اصلی تشکیل دهنده لایه های بال کلی مورد مطالعه کائولینیت بوده و کانیهای فرعی موجود در آنها به ترتیب فراوانی کوارتز، ایلیت، آناتاز و مقدار بسیار کمی پیروفیلیت هستند. علاوه بر این کانی ها، در نمونه های ناخالص کانیهای ژیپس، هماتیت، لیمونیت و پیریت نیز به میزان کم مشاهده می شوند.

نتایج آنالیز شیمیایی نمونه های بال کلی مورد مطالعه حاکی از تغییرات بسیار زیاد درصد وزنی اکسیدهای اصلی سازندهٔ آنها بوده بطوریکه جز در مورد مطالعهٔ کاربرد بال کلی های مورد مصرف در صنایع نسوز جهت بررسی سایر کاربردهای صنعتی آنها کمک قابل توجهی به اکتشاف و استخراج آنها نمی کند.

انجام تست های فیزیکی مکانیکی و کاربردی، با هدف بررسی امکان کاربرد و نیز کیفیت لایه های بال کلی، جهت استفاده در صنایع کاشی سرامیک و چینی بهداشتی از جمله مهمترین آزمایشات لازم در طی مراحل مختلف اکتشاف سیستماتیک لایه های بال کلی بوده که در واقع نتایج حاصل از این آزمایشات در کنار سایر داده ها و نتایج اکتشافی بدست آمده منجر به مدیریت استخراج بهینهٔ لایه های بال کلی در منطقهٔ مورد مطالعه شده است.

با عنایت به مطالب فوق الذکر و نتایج بدست آمده از این تحقیق می توان در مجموع چنین جمع بندی و پیشنهاد نمود که، به منظور اکتشاف سیستماتیک و همچنین بهینه سازی استخراج ذخایر بال کلی نوع لایه ای یا رسوبی، به موازات انجام بررسی های زمین شناسی اکتشافی، بایستی مطالعات آزمایشگاهی در قالب سه گروه اصلی (۱) مطالعات کانی شناسی، (۲) آنالیز شیمیایی و (۳) آزمایشات فیزیکی مکانیکی و کاربردی، مشتمل بر تست های کاشی و سرامیک و تست های چینی بهداشتی و غیرو، نیز بر روی نمونه های اکتشافی صورت پذیرفته و سپس، بر اساس نتایج بدست آمده از انجام تمامی بررسی ها و مطالعات فوق الذکر، لایه های بال کلی مختلف با ویژگی های کاربردی متفاوت شناسایی و تفکیک شده و سپس به روش استخراج انتخابی دقیق هر یک از

لایه های دارای ویژگی های کاربردی و خصوصیات شیمیایی و فیزیکی مکانیکی منحصر بفرد بطور جداگانه استخراج شوند.

مراجع

[۱]. Echlin, C., (2002). "Evaluation of a commercial ball clay deposit ", J.Am.Ceram.Soc.Bull. 81[8]

[۲]. Baccour, H., Medhioub, M., Jamoussi, F., Mhiri, T., Daoud, A. (2008). Mineralogical evaluation and industrial applications of the Triassic clay deposits, Southern Tunisia. Mater. Charact. 59, pp.1613–1622.

[۳]. Moore, D.M., Reynolds Jr., R.C. (1997). X-ray diffraction and the identification and analysis of clay minerals. Oxford University Press, p.214.

[۴]. Ganji, A.R., Masoumi, H.R., (2011). Characterization of ball clays from Tabas-Iran for the ceramic industry, Proceeding of the 22th Word Mining Congress, Istanbul, Turkey, pp. 719-723.

[۵]. Brindley, G.W., Brown, G. (1980). Crystal Structures of Clay Minerals and their X-ray Identification. Mineralogical Society.

[۶]. Celik, H., Erturk, O., Day, N. (2009). Characterization of the clay in the region of Afyon and investigation of its utilization in ceramic floor tile bodies. Proceedings of the 7th Industrial Mineral Symposium and Exhibition. 25–27 February 2009. Kusadası, Izmir, Turkey, pp.1–7.