مطالعه ساختاری و شناخت ترکیب ملات ساسانی مجموعه تخت سلیمان در شمال غرب ایران به روش XRD

شاهین ماهیار

دانشجوی دکتری رشته باستان شناسی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران

دکتر بهمن فیروزمندی شیره جینی(نویسنده مسئول)

استاد باستان شناسی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

dr.firouzmandi@gmail.com

دکتر هایده خمسه

استادیار باستان شناسی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۰/۲۹ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۲/۱۰)

چکیده

هدف این تحقیق بر شناسایی ساختار جامع ملات به کار گرفته شده استوار است که بر اساس آن، می توان با تهیه بانک اطلاعاتی از ملات بناهای شاخص دوره ساسانی، کمکی به پژوهش‌های میدانی باستان شناسی در جهت دستیابی به بافت زمانی این سازه ها انجام داد. استفاده از روش XRD در شناسایی اجزای ملات، که بر پراکنش اشعهٔ X در اثر برخورد به بلور کانی ها استوار است، به عنوان روشی غیر مخرب ، دسترسی به ساختار بلورین ملات را میسر خواهد کرد. نتایج حاصل از آنالیز حاکی از این است که فاز اصلی در نمونه های ملات این مجموعه، عبارت از "ژیپس" ($CaSO_4 (H_2O)_2$)، "کوارتز"(SiO_2) و "کلسیت" ($CaCo_3$) است. از سوی دیگر نتایج این پژوهش از راز دوام طولانی مدت ملات ساسانی پرده بر می دارد که می توان آن را در وجود ترکیب "کلسیت" در ملات دانست. این نکته حائز اهمیت است که ترکیب اخیر در ملات های گچی که امروز به کار گرفته می شود و به عنوان نمونهٔ شاهد مورد سنجش قرار گرفته اند، وجود ندارد. آزمایش روی نمونه های سنگ خام گچ نشان می دهد، کربنات های فلزی، ترکیب دولومیت یا کلسیت و کوارتز از طریق سنگ معدن خام اولیه به ملات راه می یابند. مقایسهٔ نتایج مزبور با آنالیز ملات چند بنای ساسانی در پهنهٔ ایران کنونی، حاکی از متمایز بودن ترکیب ملات ساسانی است که نوعی نمایه برای این بناها محسوب می گردد که شامل ژیپس، کلسیت یا دولومیت، برخی سولفیدهای فلزی و ترکیبات سیلیکاته است.

واژگان کلیدی :XRD ، فاز، ملات ساسانی، ژیپس، تخت سلیمان

. مقدمه

قدمت استفاده از ملات گچ به دوره آشوریان و بابلی ها در بین النهرین می رسد که به عنوان لایه تزیینی بر روی آجرهای سازه استفاده می گردید. در مصر باستان نیز در هزاره سوم پیش از میلاد در ساخت اهرام از ملات گچ به همراه ملات آهک استفاده شده است (Kirca,2005:87). در ایران دوره ساسانی معماری بر دو محور استفاده از ملات و فناوری های نوین طاق زنی استوار بود هر چند استفاده از آجر و ملات در دوره اشکانی نیز رایج بوده است اما در این زمان استفاده از این دو عنصر با کیفیت بالا به صورت شاخصی از معماری عصر ساسانی قرار گرفت (Wulff,1966:102). فناوری منحصر به فرد طاق زنی در بناهای با مساحت بزرگ در دوره ساسانی ابداع شد که به طور عمده بر استفاده از ملات گچ استوار بود و علت آن نیز در خاصیت زودگیری گچ نهفته بود (Creswell,1969:544). استفاده از گچ به عنوان لایه تزیینی در بناهای طاق دار و هم چنین کف سازه ها نیز رواج کامل داشت. اغلب این لایه ها را با نقاشی هایی رنگ آمیزی نیز می کرده اند (Azarnoush,1977:159). اعتقاد بر این است که معماری ساسانی بر پایه معماری مناطق مرکزی و شرقی فلات ایران شکل گرفته که مناطقی گرم و خشک محسوب می شوند. از این رو ملات گچ که در این نقاط در پاسخ به خشکی هوا و آفتاب زیاد به کار می رفت تبدیل به یک عنصراساسی در این شیوه معماری گردید (Nassiri Ansari,1971:121-122). شیوه به کار رفته در ساخت قلعه دختر بر فراز کوه در منطقه فیروزآباد ، استفاده از ردیفی از سنگ های بزرگ است که پس از جایگذاری، فواصل میان آن با سنگ های کوچک تر و ملات گچ پوشیده شده و سپس لایه ای از ملات به صورت پوششی بر کل سطح استفاده شده است (Valaei I,2011:1388). به نظر می رسد این دژ نخستین سازه ساسانی است که در روزگار "اردشیر" ساخته شده است و با لاشه سنگ و ملات استوار گردیده است. بر این اساس باید تاریخ ساختی حدود سالهای ۲۲۴ تا ۲۴۱ میلادی داشته باشد (دریایی، ۱۳۸۷ : ۱۸). در آتشکده آذربرزین مهر سبزوار به خاطر ساخت و ساز در ارتفاع کوه، ابتدا یک پی حاوی لاشه سنگ ایجاد شده که با ملاتی روان از گچ ساخته شده و بناهای بعدی با ملاتی آهکی به همراه ملات گچ به آن اضافه گردیده است. به علت ارتفاع زیاد آتشکده و سختی حمل مواد اولیه، از سنگ های آهکی و سنگ گچ در ساختار بنا نیز استفاده شده است که در نزدیکی محل یافت می شوند. وجود لایه ای تزئینی از گچ در نزدیکی بنا حاکی از وجود محلی در آن مکان برای مراسم مذهبی بوده است که از دیگر کاربردهای ملات گچ در این بنا محسوب می گردد (Valaei II,2011:164-166). اما در عصر شاپور یکم به خاطر استفاده از اسرای رومی در ساخت و ساز در بیشاپور تغییراتی در ملات مورد استفاده ایجاد شد که تا آن زمان به کار نمی رفت. ملات آهکی به همراه ماسه بسیار رایج گشت. هر چند ملات گچ به همراه ماسه نیز هم چنان مورد استفاده بود که این به خاطر تاثیرپذیری از تکنیک های ساخت و ساز معماران رومی بود (فرشاد و نائیج پور، ۱۳۹۲ ، صص ۴۰-۲۹). در بخش های فوقانی پلیه های پل معروف به مهرنرسه در تنگاب فیروزآباد که در قرن پنجم ساخته شده نیز آثاری از استفاده از ملات گچ به دست آمده

است. بخش های زیرین ملاتی آهکی و مقاوم تر دارد تا در برابر آب استحکام داشته باشد (Valaei I,2011:1389). "مهرنرسه" وزیر"بهرام پنجم" (۴۲۰-۴۳۱ میلادی) بود و بقایای پل مزبور به همراه کتیبه پهلوی آن هم چنان به جای مانده است (سرفراز و فیروزمندی، ۱۳۸۳، ص ۲۹۱). در پژوهش حاضر، مجموعه تخت سلیمان تکاب به عنوان یکی از مجموعه بناهای مذهبی مهم ساسانی برگزیده شد. با توجه به اثر مهر مکشوفه در محل و مستندات تاریخی فراوان، آتشکده مجموعه، باید همان آتشکده "آذرگشنسب" باشد که یکی از سه آتشکده مهم در دوره ساسانی شمرده می شده است. وجود بنایی موسوم به "ایوان خسرو" که باید کاخی سلطنتی باشد و هم چنین وجود دریاچه طبیعی و دائمی آب در میان مجموعه، اهمیت تخت سلیمان به عنوان محوطه شاخص ساسانی را دو چندان می کنند. مجموعه تخت سلیمان تکاب ۲۰۹۷ متر از سطح دریا ارتفاع داشته و در نزدیکی شهر تکاب در استان آذربایجان غربی و در درون حصاری بیضی شکل با دو دروازه بزرگ قرار دارد و مساحت آن حدود ۱۲ هکتار است. تخت سلیمان در تاریخ ۱۴ تیرماه سال ۱۳۸۲ توسط یونسکو به عنوان چهارمین اثر باستانی ایران در فهرست میراث فرهنگی جهان به ثبت رسیده است (گوبل، ۱۳۸۴ ، صص ۹-۷). این مکان باستانی طی ادوار مختلف تاریخی محل سکونت اقوامی مانند مادها، هخامنشیان، اشکانیان، ساسانیان و مغولان بوده است (هنینگ و دیگران ۱۳۸۲، صص ۱۴-۱۳).

در آنالیز های صورت گرفته بر روی ملات باستانی با استفاده از روش XRD می توان به مطالعات چندی نظیر (مصطفی نژادی و محمودوندی، ۱۳۹۱)، (Szafranski, 2015)، (Osman et al., 2014 & 2016) و (De Luca et al., 2013) اشاره کرد که نتایج آنالیز حاکی از فاز غالب کلسیت به همراه کوارتز در نمونه ها بوده است که نشان از وجود ملاتی از جنس آهک است. علاوه بر این تعداد دیگری از ملات های باستانی سرزمین ایران مورد آزمایش قرار گرفته لند (شکفته و دیگران، ۱۳۸۷)، (محمودوندی و مصطفی نژادی، ۱۳۹۱)، (میش مست، ۱۳۹۴) و (حسین پور، ۱۳۸۹) که نشان دهنده حضور ملات هایی از جنس گچ می باشند. همین شیوه آنالیز را می توان پس از انحلال ملات در آب و بر روی بخش نامحلول به جای مانده انجام داد (Alvarez et al., 2000). مزیت این روش نیز در انجام همزمان روش های جداسازی شیمیایی و اسپکتروسکوپی غیر مخرب است. هم چنین می توان به گچ بری های تزیینی به عنوان نوعی ملات نگاه کرد که نیازی به تحمل وزن سازه را ندارند. در پژوهش صورت گرفته توسط (Gasior et al., 2014) و (Bartz et al., 2012) جنس این لایه ملات از آهک تشخیص داده شد که با لایه ای بسیار نازک از گچ پوشیده شده بود.

۲. اهداف پژوهش

هدف اصلی نویسندگان مقاله، دستیابی به ساختار ملات مورد استفاده در یکی از بناهای شاخص دوره ساسانی با روش غیر مخرب XRD است. از این رو استفاده از نمونه های مدل سازی شده و نمونه های جدیدتر ملات که توسط مرمت گران پایگاه تخت سلیمان ساخته می شود مد نظر قرار گرفت. با توجه به نتایج آنالیز XRD ملات می توان این پروژه را تا تهیه یک بانک اطلاعاتی از ملات سازه های دیگر به جای مانده از دوران ساسانی نیز گسترش داد که

هدف بعدی نویسندگان خواهد بود. با در دسترس بودن چنین بانک اطلاعات از ملات سازه‌های شاخص ساسانی می توان در مورد ملات بناهایی که به این دوره منتسب است اظهار نظر قطعی کرد. نتایج آنالیز XRD حاکی از آن است که ترکیب ملات در دوره ساسانی تقریبا یکنواخت است و چند سده پس از سقط امپراتوری نیز به همان شکل باقی مانده ولی در طول سالیان دیگر دچار دگرگونی در ساختار شده است.

۳. مواد و روش ها

برای دستیابی به ساختار ملات به کار رفته در مجموعه تخت سلیمان، روش XRD انتخاب گردید. این روش در مورد تشخیص ساختار نمونه های حساس نظیر گچ بری ها و نمونه هایی نظیر برخی ملات ها که به خاطر نقش محافظتی قابل برداشت نیستند، به کار گرفته می شود. این روش در اصطلاح غیر تخریبی بوده و به اصل نمونه آسیب نمی زند و حساسیت خوبی نیز در تشخیص اجزاء سازنده کانی ها دارد (Malainey 2011: 85-87). در این مقاله از دستگاه SEIFERT با مدل 3003 PTS با مولد تابش مس با طول موج ۱.۵۴ آنگستروم استفاده شده است. تفسیر فازی داده های خام حاصل از آنالیز با استفاده از نرم افزار (Xpert HighScore V.3) و توسط نگارنده صورت گرفته است. بانک اطلاعاتی مورد استفاده در این پژوهش نیز PDF2 نسخه 2011 میلادی و زاویه گردش (2θ) از ۰ تا ۹۰ درجه است. ساده ترین شیوه برای نمونه برداری از مواد باستانی حساس استفاده از یک خراشنده تیز برای برداشت یک لایه نازک از نمونه است که به طور معمول بین ۵ تا ۱۰ میلی گرم وزن دارد. این نمونه کاملا سابیده شده و در نمونه گیر دستگاه به صورت لایه ای نازک قرار می گیرد. این کار به خاطر حساس بودن زمان بسیاری را از اپراتور دستگاه می گیرد (Pollard 2007:115). در این مطالعه همه نمونه برداری ها به صورت دستی و با استفاده از یک اسکنه نیمگرد با دهانه ۱.۵ سانتیمتر صورت گرفته است. این ابعاد دهانه به علاوه جنس فولادی ابزار، هم در جدا شدن ملات موثر واقع می شود و هم می توان از ورود ناخالصی از طریق ابزار به نمونه ها مطمئن گردید. آنالیز تقریبا با ۲۰ میلی گرم از نمونه پودری بر روی صفحه شیشه ای نمونه گیر صورت می گیرد. در این پژوهش نمونه ها از الک ۸ اینچی از جنس استیل با قطر ۳۷ میکرون (Mesh 400) عبور داده شده اند (شکل شماره ۲)

با توجه به حساسیت های حفاظتی برای سازه های پایگاه تخت سلیمان عملیات نمونه گیری تحت نظارت کارشناسان مجموعه به نحوی صورت گرفته است تا آسیب رسی به بناها به حداقل میزان خود برسد. جامعه آماری مورد بررسی شامل نمونه ای از ملات قدیمی موجود درآتشکده (نمونه با کدTS1)، تالار ستوندار (نمونه با کدTS3)، معبد آناهیتا (نمونه با کدTS2) و باروی خارجی (نمونه با کدTS4) است. (شکل۳) (کد TS برگرفته از سر نام تخت سلیمان است)

در شکل های شماره ۴ و ۵ مکان های نمونه برداری و تصویر قطعات نمونه های گرفته شده از مجموعه تخت سلیمان آورده شده است.

با توجه به فعالیت پژوهشگران پایگاه تخت سلیمان در مورد مرمت بنا های باقی مانده و همچنین تلاش ایشان در جهت ساخت ملاتی مشابه ملات اصلی، نمونه هایی نیز از کوره های جدید ساخت ملات

برداشته شد. چهار نمونه از کوره های مورد استفاده در پختن گچ گرفته شد که شرایط پخت متفاوتی با هم داشتند. روش چیدن سنگ ها در کوره و همچنین استفاده از چوب به عنوان سوخت، موجب می شود توزیع گرما در کوره همگن نباشد. نمونه های مربوط به بالای کوره (نمونه با کدTS7) گرمای کمتری می گیرند و در پایین کوره (نمونه با کدTS5) بیشترین حرارت به سنگ گچ برخورد می کند. نمونه ای نیز (نمونه با کدTS6) از بخش میانی کوره های جدید برداشت گردید. نمونه ای نیز (نمونه با کدTS8) گرفته شد که حاصل ترکیب هر سه نمونه قبلی با نسبت وزنی مساوی بود. (شکل ۶)

نمونه ای از رسوبات دریاچه (نمونه با کدTS9) (شکل شماره ۷) و دو نمونه مدل سازی شده با گچ سفید سفت کاری به منظور مقایسه با نمونه های باستانی نیز برداشت گردید.

برای درک این که چگونه برخی کانی ها به ترکیب نهایی ملات راه یافته اند، تعداد دو نمونه سنگ گچ خام نیز نمونه گیری شد. یک نمونه متعلق به معدنی نزدیک تخت سلیمان و نمونه دیگر در جغرافیایی متفاوت و در استان فارس واقع شده است که معدنی قدیمی است. مشخصات معادن در جدول شماره ۱ آمده است. هم چنین در شکل شماره ۸ نمونه ای از این سنگ های معدن آورده شده است.

هم چنین دو نمونه از خاک رس و ماسه موجود در مکان معدن نیز به منظور درک بهتر از ترکیب ملات برداشت و مورد آزمایش قرار گرفت. برای قابل مقایسه بودن نتایج با دیگر ملات های مربوط به دوره ساسانی، تعداد ۶ نمونه دیگر نیز مورد نمونه گیری و آنالیز قرار گرفتند. نمونه ها شامل قلعه، آتشکده، پل و چهارتاقی می باشند که ساخت آن ها به دوره ساسانی باز می گردد و از نظر پراکنش، در جغرافیایی متفاوت با تخت سلیمان واقع شده اند که شامل استان های مازندران (قلعه کنگلو)، فارس (قلعه دختر فیروزآباد، قلعه دختر بیشاپور و چهارتاقی کنار سیاه)، البرز (آتشکده تخت رستم) و خوزستان (پل شادروان) می گردند. (شکل ۹)

موقعیت ۶ مکان از نظر جغرافیایی در جدول شماره ۲ تصویر نمونه های گرفته شده از این ۶ مکان در شکل های ۱۰ و ۱۱ به تفکیک آمده است.

۴. یافته های آنالیز

برای دستیابی به تحلیل دقیق نتایج، جامعه آماری نمونه ها را در چهار گروه مورد بررسی قرار می دهیم. گروه نخست مربوط به چهار نمونه باستانی از چهار سازه شاخص در تخت سلیمان است. در مقایسه نمونه های مختلف ملات ساسانی همان طور که در جدول شماره ۳ نیز دیده می شود میان ترکیب نمونه های آتشکده و معبد آناهیتا مشابهت نسبی زیادی دیده می شود.

در مورد دو نمونه TS1 و TS2 درصد وزنی "کلسیت" از سایر ترکیبات ملات بیشتر است. اختلاف دو نمونه در ترکیب دوم و سوم نیز چندان قابل تامل نیست چراکه ترکیب Syngenite سولفات مضاعف کلسیم و پتاسیم است و مشابهت فرمولی با Gypsum دارد. هم چنین ترکیب Pseudobrookite که نمکی از تیتانیوم است و ترکیب Montmorillonite که سیلیکات سه گانه فلزی است به صورت ناخالصی از سنگ معدن خام وارد ترکیب ملات شده است. غلظت کمّی دقیق بر اساس سطح زیر پیک ها قابل محاسبه است که مد نظر این

پژوهش نیست. نتایج آنالیز XRD این گروه در شکل شماره ۱۲ به صورت یکجا داده شده است :

گروه دوم شامل نمونه های امروزین است که در پایگاه تخت سلیمان و به منظور مرمت بخش های آسیب دیده مورد استفاده قرار می گیرد. محققان پایگاه برای حفظ شکل اولیه سازه های به جای مانده با استفاده از معدن سنگ گچ خام در نزدیکی محل و با برپایی کوره هایی با شیوه پخت سنتی در تلاشند تا ملاتی مشابه ملات اصلی بسازند. از این رو از بخش های مختلف این کوره ها نیز چهار نمونه جمع آوری گردید که نتایج آنالیز آن را در جدول شماره ۵ آمده است.

نتایج به دست آمده برای نمونه های کوره های جدید حاکی از این است که در سه نمونه TS5، TS6 و TS7 ترکیب غالب Gypsum است. ترکیب دوم که فاز مهمی را تشکیل می دهد مربوط به کربنات های کلسیم و منیزیم می باشد که باز هم از نظر ساختاری بسیار مشابهند. نتایج آنالیز XRD این گروه نیز در شکل شماره ۱۳ به صورت یکجا داده شده است.

گروه سوم شامل یک نمونه از رسوبات دائمی دریاچه آب مجموعه تخت سلیمان است که نرخ رسوب گذاری بالایی دارد و به منظور بررسی اثر این آب بر ساخت ملات برداشته شده است (نمونه با کد TS9). هم چنین دو نمونه مدل سازی شده با گچ سفت کاری امروزین نیز در این گروه بررسی و مقایسه گردیدند. این دو نمونه با کد های MT1 و MT2 مشخص شده اند (کد MT بر گرفته از کلمه Mortar است). مقدار ۵۰ گرم گچ سفید که امروز به عنوان سفت کاری در بناها استفاده می شود در دو ظرف جداگانه قرار داده شد و به هر ظرف مقدار ۳۰ میلی لیتر آب افزوده شد. نمونه MT1 با آب برداشت شده از دریاچه تخت سلیمان و نمونه MT2 با آب مقطر ساخته شدند. نتایج آنالیز این گروه در جدول شماره ۵ آمده است :

در نمونه TS9 ترکیبات به دست آمده به ترتیب میزان کمّی عبارت از: "کلسیت"، "ژیپس" و "کوارتز" است که مشابهتی با هیچ یک از نمونه های گرفته شده در دو گروه قبلی ندارد. هم چنین دو نمونه مدل سازی شده نیز نتیجه ای کاملا مشابه به دست دادند. البته نبود ترکیب "کلسیت" در این نمونه ها قابل توجه است که در مورد آن در ادامه به بحث خواهیم نشست. نتایج آنالیز XRD این گروه در شکل شماره ۱۴ به صورت یکجا داده شده است.

گروه چهارم نیز شامل چند نمونه از سازه های مختلف ساسانی از نقاط مختلف ایران است تا بتوان در مورد ساختار ملات ساسانی مقایسه ای به عمل آورد. به این منظور نمونه های زیر جمع آوری و مورد آنالیز قرار گرفتند:

آتشکده تخت رستم شهریار کرج، قلعه دختر فیروزآباد، قلعه دختر بیشاپور، قلعه کنگلو مازندران، پل شادروان شوشتر(تاق پل) و آتشکده کنار سیاه فیروزآباد. نتایج آنالیز این نمونه ها در جدول شماره ۶ آمده است.

در این گروه نمونه ها که مربوط به استان های تهران، فارس و مازندران با شرایط اقلیمی کاملا متفاوت هستند می توان نوعی تشابه در ترکیب ملات را تشخیص داد. در همه نمونه ها فاز پیشرو متعلق به ژیپس است. ترکیب کربناته نیز به شکل کلسیت یا دولومیت در همه نمونه ها به چشم می خورد. فاز متعلق به کوارتز نیز در ۴ نمونه موجود است. فاز مشترک دیگر که در نیمی از نمونه ها دیده می شود مربوط به ترکیبات سیلیکاته است که به صورت

Colusite، Schwertmannite و Palygorskite در آنالیز به دست آمده است.

فازهای کم مقدارتر دیگری که در آنالیز به دست آمده مربوط به سولفید چندگانه فلزی شامل مس، قلع، وانادیم و آرسنیک است که به شکل بلورین Colusite و اکسید تیتانیوم به شکل بلورین Anatase است.

ترکیب Nevskite نیز حاوی بیسموت و سلنیوم است که فرمی بلورین از این دو فلز است و خاصیت یونی ندارد.

این کانی ها بسته به محل استخراج سنگ گچ به همراه مواد اولیه وارد ترکیب ملات می گردند اما شیوه پخت سنتی گچ در آن زمان باعث می شد بسیاری از این ترکیبات اولیه تجزیه نشده و وارد ترکیب نهایی ملات گردند. امروز در دماهای بالاتر در کوره های جدید همه سولفیدهای فلزی و ترکیبات سیلیکاته نظیر Schwertmannite و سایر ترکیبات هم چون Dolomite و Calcite تجزیه شده و به صورت اکسیدهای فلزی قابل آب گیری وارد ملات شده و مقاومت مکانیکی بیشتر را ایجاد می کنند.

۵. بحث و تحلیل نتایج

همان طور که پیشتر نیز ذکر شد نمونه های TS1 و TS2 از گروه نخست، از نظر ترکیب بسیار به هم شبیهند. در مورد نمونه های تالار ستون دار (TS3) و بارو (TS4) نیز وضعیتی مشابه به چشم می خورد. سه ترکیب نخست در دو نمونه اخیر که حاوی بیشترین درصد وزنی کانی های ملات اند کاملا مشابه هستند. ترکیبات بعدی که از نظر غلظت نیز چندان موثر نمی باشند باید مربوط به ناخالصی های سنگ معدن باشند.

در این جا نیز یک کانی از تیتانیوم (Rutile) به چشم می خورد که غلظت پایین تری در ترکیب کلی دارد.

در مورد نمونه های گروه دوم با بالاتر رفتن دما شاهد ظهور سیلیکات های چند گانه (Allophane) هستیم که به خصوص در قسمت بالای کوره (نمونه TS7) نمایان ترند. در نمونه های وسط و پایین کوره شاهد ظهور "سیلیس" (SiO_2) هستیم که باید از حرارت دیدن ترکیب های سیلیکاتی اولیه حاصل شده باشد.

هم چنین نتایج XRD نمونه TS8 که شامل مخلوط یکسانی از سه نمونه ذکر شده قبلی است، به نمونه های ساسانی بسیار نزدیک تر است. این نشان می دهد شیوه پخت و ساختار کوره ای که امروز مورد استفاده قرار می گیرد به شیوه معماران باستانی بسیار نزدیک است.

آنالیز XRD در مورد گروه سوم نمونه ها نشان از حذف یون های کلر و هیدروسولفید دارند که در ترکیب اولیه آب دریاچه دیده می شوند. با توجه با آنالیز موجود برای آب دریاچه، عناصر سدیم، پتاسیم و منیزیم و که در آب وجود دارند، پس از رسوبگذاری در ترکیب رسوب دیده نمی شوند. به نظر می رسد آب دریاچه در طول رسوبگذاری دچار تغییر کیفی می گردد و میزان کربنات کلسیم در رسوب مزبور به حداکثر می رسد. در مورد نمونه مربوط به رسوبات دریاچه (TS9) هدف ما درک این نکته بود که آیا آب دریاچه که به احتمال فراوان برای ساختن ملات به کار برده می شده، در طول فرایند رسوب گذاری دچار تغییری شیمیایی می شود یا خیر. آن طور که تا کنون مشخص شده آب دریاچه قابل شرب و استفاده کشاورزی نیست و نرخ رسوبگذاری بالایی هم دارد.

آنالیز آب سطحی دریاچه تخت سلیمان به این قرار است :

در مورد نمونه های مدل سازی شده (MT1و MT2) با شرایط ساختی که پیشتر نیز ذکر گردید مدت زمان گیرش و سفت شدن سطحی نمونه MT1، ۲۰ دقیقه و ۵۳ ثانیه و نمونه MT2، ۱۳ دقیقه و ۵۲ ثانیه ثبت گردید که نمونه با آب تخت سلیمان حدود ۱.۵ برابر زمان بیشتری را مصرف کرد. نتایج آنالیز XRD این دو نمونه کاملا یکسان است و این ثابت می کند آب دریاچه که برای ساخت ملات به کار می رفته علیرغم ترکیب شیمیایی خاصی که دارد تغییری در کیفیت ملات ایجاد نمی کند هرچند مدت زمان گرفتن و سفت شدن ملات را در مقایسه با آب معمولی افزایش می دهد. این گفته زمانی اهمیت می یابد که با توجه به جریان دائمی آب دریاچه برای ساخت و ساز از این منبع استفاده می شده است. به منظور درک بهتر نحوه تشکیل ترکیبات موجود در ملات و فرایند تبدیلی طی شده از سنگ معدن خام تا ملات نمونه های دیگر از طیف های XRD را مورد واکاوی قرار می دهیم. نمونه ای با کد TS10 که مربوط به نمونه سابیده شده از سنگ گچ خام است که از نزدیک ترین معدن به پایگاه تخت سلیمان(معدن یارعزیز) برداشت شده است. به زعم کارشناسان پایگاه، معدن مزبور باید همان معدنی باشد که در دوره ساسانی از آن بهره می گرفته اند. نمونه دوم (Sp - SP3 سر نام Sarvestan Palace است) نیز مربوط به استان فارس و معدن سنگ گچ سروستان است که کارشناسان مجموعه امروز از آن برای ساختن ملات استفاده می کنند. هر چند این نمونه خارج از جغرافیای تعریف شده برای مقاله حاضر است اما از آن جا که پروژه اولیه در سطح استان فارس نیز تعریف شده بود از این نمونه در مقاله بهره می بریم تا در مورد ساختار اولیه سنگ گچ راهگشا باشد. همان طور که در طیف های شکل شماره ۱۶ نیز دیده می شود، ساختار سنگ گچ در این دو ناحیه با فاصله زیاد جغرافیایی به طرز قابل توجهی به هم شبیه است.

فازهای شناسایی شده در این دو نمونه به قرار جدول شماره ۹ است. در جدول فوق فاز پیشرو متعلق به "ژیپس" و ترکیب "کربناته" است که در یک مورد کربنات کلسیم (Calcite)، در دیگری کربنات منیزیم(Magnesite) و یا کربنات مضاعف کلسیم – آلومینیوم(Aluminohydrocalcite) است. پس از آن ترکیبات سیلیکاته چند گلنه و در نهایت فاز کم مقدار "سیلیس"(Cristobalite) را شاهد هستیم. ترکیبات سیلیکات دو یا چند گانه که دارای عنصر آلومینیوم هستند از جنس مواد تشکیل دهنده خاک رس می باشند که به علت پایداری بالا و ساختار بلورین خاص خواص خود را حفظ کرده و به همین شکل وارد ملات نهایی می گردند.

به منظور درک تاثیر افزوده شدن احتمالی ماسه یا خاک رس حین ساخت ملات و یا حین پخت سنگ گچ، دو نمونه از ماسه و خاک رس که در همان حوالی معدن گچ منطقه به وفور وجود دارند نیز مورد آنالیز قرار گرفتند که نتایج آن در شکل ۱۷ و جدول شماره ۹ آمده است. همان طور که قابل انتظار بود ترکیب عمده نمونه ماسه شامل "کوارتز" است. ترکیب های Erniggliite و Chalcopyrite که در فازهای دیگر نمونه دیده می شوند سولفیدهای فلزی از تیتانیوم، آرسنیک، قلع، مس و آهن می باشند. فاز Montmorillonite و Berlinite و Calcite نیز سایر ترکیبات این نمونه اند که به ترتیب شامل ترکیبات سیلیکاته، فسفاته و کربناته است.

در مورد نمونه خاک رس ترکیبات سولفیدهای فلزی به صورت فازهای Putoranite و Helvite به چشم می خورند که شامل سولفید مس، آهن، منگنز و بیسموت می باشند. ترکیب سیلیس نیز به فرم های بلورین Quartz و Coesite در این نمونه دیده می شوند. ترکیبات فسفاته و سیلیکاته در این جا هم دیده می شوند که به فرم Berlinite و Leucite هستند. فاز دیگر شناسایی شده در این نمونه Pyrochlore است که ترکیب هیدراته پیچیده فلزی شامل سدیم، کلسیم و پتاسیم و ... است.

۶. نتیجه گیری

بر اساس موارد به دست آمده از آنالیزهای صورت گرفته و با توجه به شرایط گرمادهی کوره‌های مورد استفاده در آن زمان، سنگ گچ با از دست دادن آب تبلور اولیه خود به گچ آماده ملات تبدیل می شود (ژیپس). با توجه به عدم یکنواختی دما در کوره ها، ترکیب های کربناته "کلسیت" ،"دولومیت" یا "منیزیت[۱]" تجزیه نشده و در ترکیب اولیه باقی می مانند. ظهور برخی کانی ها که در آنالیز ملات به دست آمده اند ناشی از ناخالصی های اولیه در سنگ گچ است و یا در حین عملیات فراوری اعم از حمل و پخت و جا به جایی و ... وارد ترکیب می گردد و البته می تواند برای گیرش ملات به طور دستی به آن افزوده شده باشد هر چند میزان آن ها در ملات بسیار پایین است.

۱- بر اساس آنالیز نمونه های باستانی و نمونه های شاهد تهیه شده، ساختار ملات از دوران تاریخی تا امروز تغییر یافته است. این تغییر در عدم وجود ترکیب "کلسیت" در نمونه های امروز است. ملات ساسانی مجموعه تخت سلیمان از ترکیب های "ژیپس" ($CaSO_4(H_2O)_2$)، "کوارتز" (SiO_2) و کلسیت ($CaCo_3$) تشکیل شده و ساختار این ملات از نوع ملات های گچی است. بخش عمده ای از ترکیبات کربناته به صورت "کلسیت"، "دولومیت" یا "منیزیت" به صورت تجزیه نشده به همراه سنگ گچ باقی مانده و به همین شکل وارد ملات می گردید. علت تغییر مزبور در ترکیب نیز در پخت سنگ گچ خلاصه می شود مگر نه امروز چیزی را به طور دستی وارد ترکیب گچ خام نمی کنند. این نکته حائز اهمیت است که در ملات های گچی که امروز در ایران به کار گرفته می شوند ترکیب اخیر وجود ندارد و در کارخانه با حرارت دهی کنترل شده از سیستم واکنش خارج می گردد. این شیوه خاص پخت سنگ گچ باعث می گردید تا ملاتی با استحکام به وجود آید که ماندگاری آن پس از گذشت بیش از هزار سال این امر را به اثبات می رساند.

۲- با توجه به نمونه گیری از کوره های مرمت گران پایگاه و مقایسه ریزساختاری ملات آن با نمونه های باستانی و تشابه فراوان ترکیب های به دست آمده می توان نتیجه گرفت شیوه پخت و ساختار گرمادهی کوره های پخت گچ باستانی بسیار مشابه نمونه های کوره هایی است که امروز بر پا شده و در آن ملات برای کار مرمت بناهای پایگاه ساخته می شود. کوره های اخیر با توجه به بقایای به جای مانده از کوره های دوره ساسانی توسط کارشناسان پایگاه تخت سلیمان در مکانی نزدیک به مجموعه بر پا گردیده اند که در آن از سوخت چوب برای گرمایش بهره گرفته

---

[۱] . Magnesite

می شود. سنگ گچ پخته شده سپس با پتک های چوبی بزرگ به صورت نیمکوب در آمده و پس از دانه بندی مقدماتی برای مرمت سازه های ساسانی به جای مانده در مجموعه، زیر نظر کارشناسان یونسکو استفاده می گردد.

۳- با عنایت به نتایج به دست آمده از آنالیز ملات سایر سازه های ساسانی در جغرافیایی متفاوت با نمونه های تخت سلیمان، می توان گفت ملات به کار رفته در ساخت و سازهای این دوره به جز آب بندها و پایه های پل ها، ملات گچی است که با توجه به شرایط پخت خاص دارای ترکیبات کربناته کلسیم یا منیزیم به همراه کوارتز و مقادیری ترکیبات سیلیکاته و سولفیدهای فلزی است که به همراه مواد اولیه سنگ گچ خام وارد ملات فراوری شده می شوند. این ترکیب چندگلنه از دوران ساسانی به بعد در ملات های به کار رفته قابل بازیابی است و طبق تحقیق دیگری که توسط نویسندگان صورت گرفته پس از سقوط ساسانیان و تا حدود قرن چهارم هجری در مازندران ادامه می یابد و از آن پس شاهد ظهور ملات هایی هستیم که با توجه به پخت بهتر و کنترل دمایی بهتر، ساختاری مشابه ملات های سیمان امروزی دارند.

سپاسگزاری:

این بنده بر خود لازم می داند تا مراتب قدردانی و سپاس خویش را از همه کسانی که در تهیه این نوشتار و درمراحل نمونه برداری و آنالیز یاریش کرده اند به جای آورد :

- اداره میراث فرهنگی ارومیه، جناب آقای مهندس احمدی و جناب آقای فرازی.
- پایگاه تخت سلیمان، جناب مهندس عزیزی و مهندس شکیبی جهت نمونه گیری.
- سرکار خانم دکتر رضایی برای نمونه های فارس.
- اداره کل میراث فرهنگی مازندران، جناب آقای سورتیجی برای هماهنگی در نمونه گیری های مازندران.
- دانشگاه آزاد تهران واحد شمال، جناب مهندس سید محمد صادق هاشمی برای هماهنگی جهت آنالیزها.
- آزمایشگاه زمین شناسی واحد تهران شمال، جناب آقای کاظم زادگان در آزمایشگاه XRD.
- آزمایشگاه رازی واحد علوم و تحقیقات تهران ، جناب آقای پورحاجی در آزمایشگاه XRD.

منابع:

- حسین پور دوانی، عاطفه. (۱۳۸۹)، مطالعات ساختاری فن شناسی بر روی ملات های گچ و خاک ساسانی بیشاپور. اصفهان : پایان نامه چاپ نشده کارشناسی ارشد دانشگاه هنر اصفهان، دانشکده حفاظت، مرمت اشیا و ابینه تاریخی.
- دریایی، تورج. شاهنشاهی ساسانی. (۱۳۸۷)، تهران: انتشارات ققنوس. چاپ چهارم؛.ص۱۲.
- سرفراز، علی اکبر و فیروزمندی، بهمن، (۱۳۸۳)، باستان شناسی و هنر دوران تاریخی ماد، هخامنشی، اشکانی، ساسانی، چاپ دوم، تهران، انتشارات عفاف.
- شکفته، عاطفه و نیلفروشان، محمد رضا و حاتم، غلامعلی (۱۳۸۷)، بررسی ماهیت شیمیایی و ریزساختاری ملات به کار رفته در آرامگاه تپتی آهار- هفت تپه خوزستان-. مجله مرمت و پژوهش. بهار و تابستان شماره ۴، ص۷۸-۷۱.

– فرشاد، مهدی و نائیج پور، تورج (۱۳۹۲)، تاریخ مهندسی در ایران.تهران: انتشارات میرماه.چاپ اول. ص۴۰–۲۹.

– گوبل،روبرت (۱۳۸۴)، گل مهرهای تخت سلیمان – جستاری در مهرشناسی اواخر ساسانی–. تهران: انتشارت سازمان میراث فرهنگی. ترجمه: فرامرز نجد سمیعی. چاپ اول؛ص۹–۷.

– محمودوندی، نرجس و مصطفی نژادی، علی (۱۳۹۱)، بازشناسی مواد و مصالح پل تاریخی گاومیشان. مجموعه مقالات نخستین همایش علم مواد و حفاظت آثار فرهنگی تاریخی. تهران: انتشارات پژوهشگاه میراث فرهنگی. چاپ اول؛ ص۴۴۵–۴۳۹.

– مصطفی نژادی، علی و محمودوندی، نرجس (۱۳۹۱)، بازشناسی مواد و مصالح پل تاریخی کلهر. مجموعه مقالات نخستین همایش علم مواد و حفاظت آثار فرهنگی تاریخی. تهران: انتشارات پژوهشگاه میراث فرهنگی. چاپ اول؛ ص۴۵۲–۴۴۷.

– میش مست نهی، مسلم (۱۳۹۴)، کاربرد تحلیل های بلورشناسی در مطالعات فنی آثار تاریخی گچی (مطالعه ی موردی گچ بری کوه خواجه ی سیستان، ملات گچ شادیاخ نیشابور و ملات گچ قلعه الموت قزوین). مجله پژوهه باستان سنجی. پاییز و زمستان ، سال اول، شماره ۲، ص۱۴–۱.

– هنینگ،هانس و فون دراوستن و ناومان، رودولف (۱۳۸۲)، تخت سلیمان. تهران: انتشارت سازمان میراث فرهنگی. ترجمه فرامرز نجد سمیعی چاپ دوم؛ص۱۴–۱۳.

- Alvarez, J. I. , Navarro, I. Casado, G. Thermal, Mineralogical and Chemical Studies of the Mortars Used in the Cathedral of Pamplona (Spain). UK: ELSEVIER press. Thermochimica Acta,Volume 365, Issues 1–2, 29 December 2000. P183.

- Azarnoush M. Excavations at Hâjîâbâd, 1977, *Iranica Antiqua* 18, 1983, pp. 159ff

- Bartz, W. Rogo, J. , Rogal, R. , Cupa, A. Szroeder, P. Characterization of historical lime plasters by combined non-destructive and destructive tests: The case of the sgraffito in Boznow (SW Poland). UK: Construction and Building Materials 30, 2012. P444. journal homepage: www.elsevier.com /locate/conbuildmat

- Creswell K. A. C. *Early Muslim Architecture* 1/2, Oxford, 1969, p. 544

- De Luca, R. , Ontiveros, M. A. C. , Miriello, D. Pecci, A. , Le Pera, E. , Bloise, A. Mirocle, G. M. Archaeometric study of mortars and plasters from the Roman City of Pollentia (Mallorca - Balearic Islands). Spain: Periodico di Mineralogia.2013. p366.

- Gasior, M. Bartz, W. , Kierczak, J. Mineralogical study of Baroque stuccoes from the Church of the Assumption of the Virgin Mary (The Lubiaz Abbey, SW Poland). Poland: MINERALOGIA - SPECIAL PAPERS, 42, 2014. p52.

- Kirca, O. Structural Analysis of Historical Constructions - Ancient binding materials, mortars and concrete technology: history and durability aspects -Modena, Lourenço & Roca (eds), Taylor & Francis Group, London, 2005. P87.

- Malainey, Mary. E. A Consumer`s Guide to Archaeological Science. New York : Springer New York Heidelberg London press; 2011.p398.

- Nassiri Ansari, M. Seiry Dar Memary Iran, Honarsara Aly Tehran, Tehran, 1971.p. 121-122

- Osman, A. & Bartz, W. & Kosciuk, J. Characterization of Binding Lime Mortar used in the Ruins of Anba Bishoi Monastery near SOHAG (Egypt). 9th International Masonry Conference 2014 in Guimarães, Web access:https://www.researchgate.net.p7.

- Osman, A. & Bartz, W. & Kosciuk, J. 2014. Characterization of Binding Lime Mortar used in the Ruins of Anba Bishoi Monastery near SOHAG (Egypt). 9th International Masonry

- Szafranski, Z. E. Deir el-Bahari Studies-XXIV/2 studies-. Poland : University of Warsaw Press. 2015. P108.

- Valaei, Z. I. Consideration on Sassanid architectural works and urban planning in ancient Persia, Indian Journal of Science and Technology, Oct 2011.Vol. 4 No. 10 .P1388.
-Valaei, Z. II. Fire Temples at Sassanid Era, Journal of American Science, 2011. 7(9).p.164-166.
- Wulff H. *Traditional Crafts of Persia*, Cambridge, Mass., 1966, p. 102
- www.mapquest.com : Takht –e Soleyman
- www.iranicaonline.com

Conference 2014 in Guimarães, Web access:https://www.researchgate.net.p7.
- Osman, A., Bartz, W. & Kosciuk, J. Charecterization of Historical Mortar Used In Loom Factory Site at Abydos. Egypt: Egyptian Journal of Archaeological and Restoration Studies "EJARS". Volume 6, Issue 2, December – 2016.p101.
- Pollard, M. & Batt, C. & Stem, B. & Young, S. M. M. Analytical Chemistry in Archaeology. UK: Cambridge Manual in Archaeology. Cambridge Univercity Press;2007.p115.

جدول شماره ۱: مشخصات معادن سنگ گچ مورد آزمایش (نویسنده)

Mine Name	Location	Coordination (Google Earth)
Yar Aziz Morghoo Ghalaat	Yar Aziz Village,Ahmad Abad-Takab Sarvestaan (city suburb)	47.1329 E – 36.6521 N 53.5110 E – 29.1639 N

جدول شماره ۲: مشخصات ۶ مکان نمونه گیری شده برای مقایسه نتایج (نویسنده)

Mine Name	Location	Coordination (Google Earth)
Takht-e Rostam Fire Temple	Qajar Village, Karaj	35.34 N – 50.46 E
Qaleh Dokhtar Firoozabad	Firoozabad	30.12 N – 53.11 E
Qaleh Dokhtar Bishapoor	Bishapoor	29.46 N – 51.34 E
Kangloo Castle	Savaadkooh	35.56 N – 53.09 E
Shadorvan Bridge	Shooshtar	32.03 N – 48.50 E
Konarsiyah Chartaq	Firoozabad	28.43 N – 52.25 E

جدول شماره ۳ : نتایج XRD چهار نمونه آتشکده (TS1)، نیایشگاه آناهیتا (TS2)، تالار ستون دار (TS3) و بارو (TS4) (نگارنده)

Samples	Location	Era	Minerals						
TS1	Takht-e Soleyman	Sassanid	Calcite	Syngenite	Gypsum	Quartz	Anhydrite	Pseudobrookite	---
TS2	Takht-e Soleyman	Sassanid	Calcite	Gypsum	Montmorillonite (heated)	Quartz	Anhydrite	---	---
TS3	Takht-e Soleyman	Sassanid	Gypsum	Calcite	Quartz	Rutile	Schlossmacherite	Beidellite	Sodalite
TS4	Takht-e Soleyman	Sassanid	Gypsum	Calcite	Quartz	Dolomite	---	---	---

جدول شماره ۴ : نتایج XRD مربوط به چهار نمونه امروزین، (نگارنده)

(TS5=بالای کوره،TS6= وسط کوره، TS7=پایین کوره، TS8=ترکیب مساوی سه نمونه قبل)

Samples	Location	Era	Minerals				
TS5	Takht-e Soleyman	New	Gypsum	Calcite	Vermiculite	Quartz	--
TS6	Takht-e Soleyman	New	Gypsum	Calcite	Calcite-Magnesian	Anhydrite	Quartz
TS7	Takht-e Soleyman	New	Gypsum	Magnesite	Allophane	Uklonskovite	--
TS8	Takht-e Soleyman	New	Gypsum	Anhydrite	Calcite	Graphite-3	Quartz

جدول شماره ۵ : نتایج XRD مربوط به نمونه های رسوب مجموعه آبی تخت سلیمان (TS9)، نمونه دست ساز با آب دریاچه (MT1)، نمونه دست ساز با آب مقطر (MT2).

Samples	Location	Era	Minerals			
TS9	Takht-e Soleyman	Sassanid	Calcite	Gypsum	Quartz	--
MT1,MT2	--	New	Gypsum	Anhydrite	Bassanite,syn	Quartz

جدول شماره ۶ : نتایج XRD مربوط به شش نمونه مقایسه ای، (نگارنده)
(TR1=آتشکده تخت رستم،QD1= قلعه دختر فیروزآباد، BC1=قلعه دختر بیشاپور، قلعه کنگلو، آتشکده کنارسیاه و پل شادروان شوشتر)

Samples	Location	Era	Minerals					
TR1	Karaj	Sassanid	Gypsum	Calcite	Quartz	Graphite	Schwertmannite	Anatase
QD1	Firoozabad	Sassanid	Gypsum	Calcite	Quartz	Graphite	--	--
BC1	Bishapoor	Sassanid	Gypsum	Calcite	Quartz	Graphite	--	--
Kangloo	Savaadkooh	Sassanid	Gypsum	Quartz	Dolomite	Colusite	--	--
Konarsiyah	Firoozabad	Sassanid	Gypsum	Palygorskite	Nevskite	Calcite	--	--
Shadorvan	Shooshtar	Sassanid	Gypsum	Calcite	Dolomite	Akermanite	--	--

جدول شماره۷ : آنالیز آب سطحی چشمه تخت سلیمان (هنینگ و دیگران. ۱۳۸۲ ص۳۷)

Ions	Chemical Formula	Concentration (gr/litre)
Sodium	Na+	0.11
Potasium	K+	0.22
Calcium	Ca++	0.192
Magnesium	Mg++	0.43
Colorine	Cl-	0.1
Hydro Carbonate	HCO_3_	0.718
Hydro Sulphide	HS-	0.12
Sulphate	SO_4--	0.1

جدول شماره۸ : نتایج آنالیز XRD برای نمونه های سنگ گچ خام از تخت سلیمان و سروستان فارس (نگارنده)

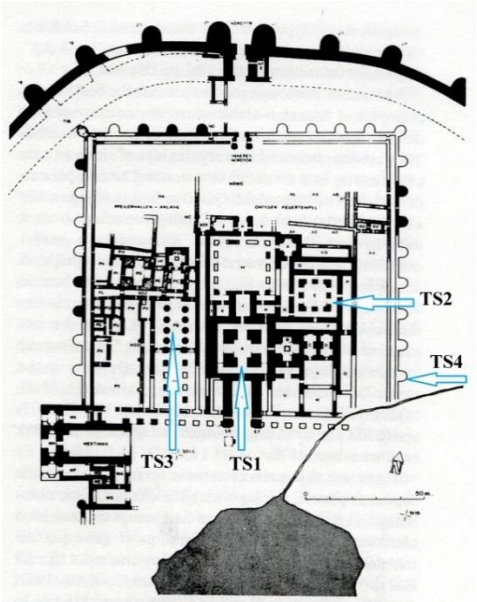
Samples	Minerals Based on peak count (Descending)	
TS10	Gypsum	$CaSO_4$ (H_20)2
	Magnesite	$MgCO_3$
	Natrolite(Dehydrated)	$Na_2(Al_2Si_3O_{10})$
	Cristobalite low	SiO_2
SP3	Gypsum	$CaSO_4$ (H_20)2
	Calcite	$CaCO_3$
	Alumohydrocalcite	$CaAl_2(CO_3)2$ (OH)4 ! $3H_2O$
	Montmorillonite	$Na_{0.3}$ (Al,Mg)2 Si_4O_{10} (OH)2 !xH_2O
	Saponite	$Ca_{0.2}$ Mg_3 (Si,Al)4 O10 (OH)2 ! $4H_2O$
	Cristobalite low	SiO_2

جدول شماره ۹ : نتایج آنالیز XRD برای نمونه های ماسه و خاک رس در تخت سلیمان (نگارنده)

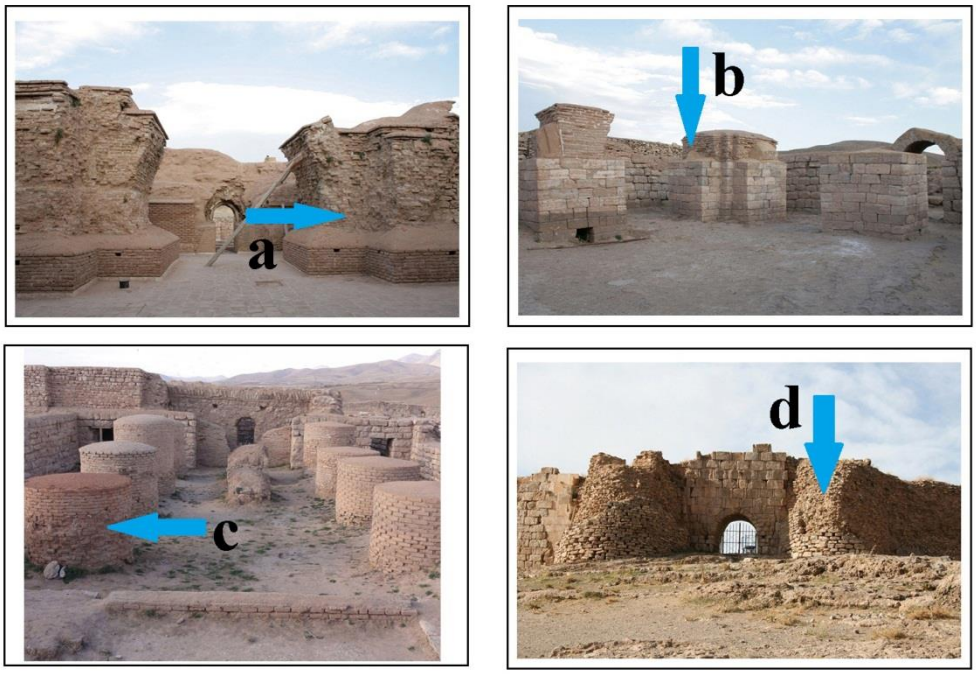
Samples	**Location**	**Era**	**Minerals**						
Sand	Yaraziz Mine	New	Quartz	Chalcopyrite	Montmorillonite	Berlinite	Calcite	Erniggliite	--
Clay	Yaraziz Mine	New	Quartz	Putoranite	PyroChlore	Berlinite	Leucite	Helvite	Coesite

شکل ۱: موقعیت محوطه تخت سلیمان (ماخذ نقشه: Mapquest)

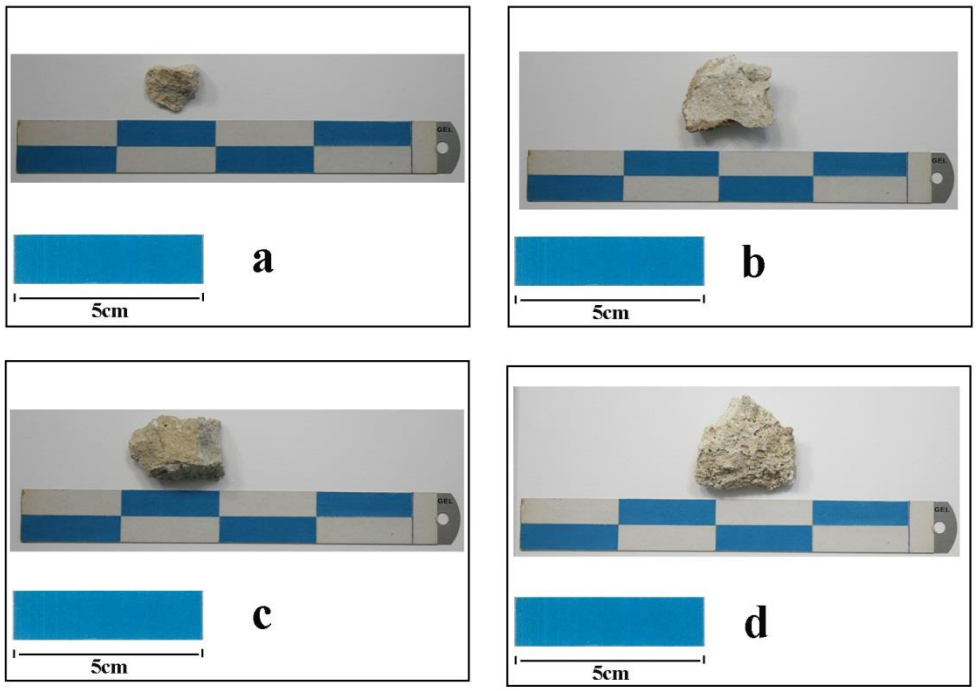
شکل شماره ۲: a) الک ۸ اینچی با قطر توری ۳۷ میکرون، b) اسکنه نیم گرد نمونه گیری، c) نمونه ملات کوبیده شده قبل از الک، d) نمونه های الک شده درون ظروف مخصوص نمونه گیری (نگارنده)



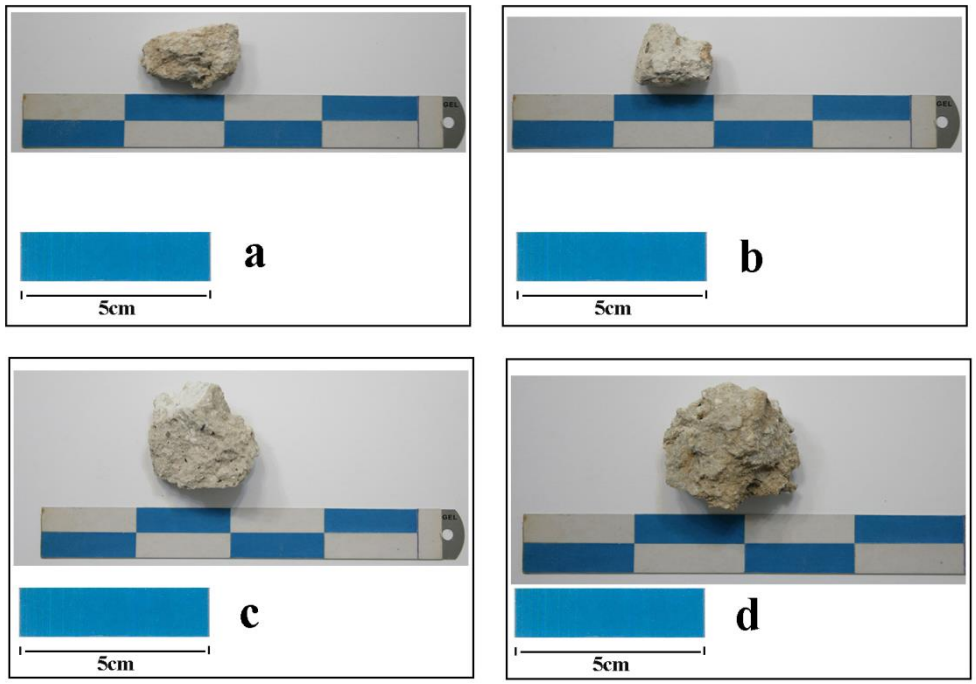
شکل۳ : پلان محوطه تخت سلیمان و کد نمونه های برداشت شده از محل
TS1، آتشکده= TS2، نیایشگاه آناهیتا= TS3، تالار ستوندار= TS4 بارو=
(دایره المعارف ایرانیکا:مقاله تخت سلیمان)



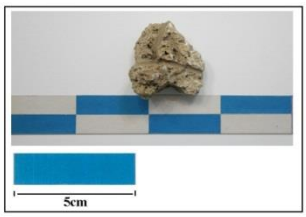
شکل شماره ۴: مکان های نمونه برداری داخل مجموعه تخت سلیمان: a) آتشکده، b) نیایشگاه آناهیتا، c) تالار ستون دار، d) باروی مجموعه (نگارنده)



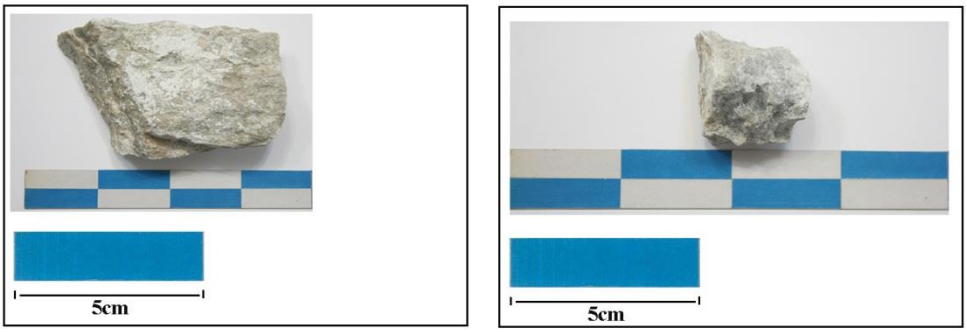
شکل شماره ۵: نمونه ملات های برداشت شده : a) آتشکده، b) نیایشگاه آناهیتا، c) تالار ستون دار، d) باروی مجموعه (نگارنده)



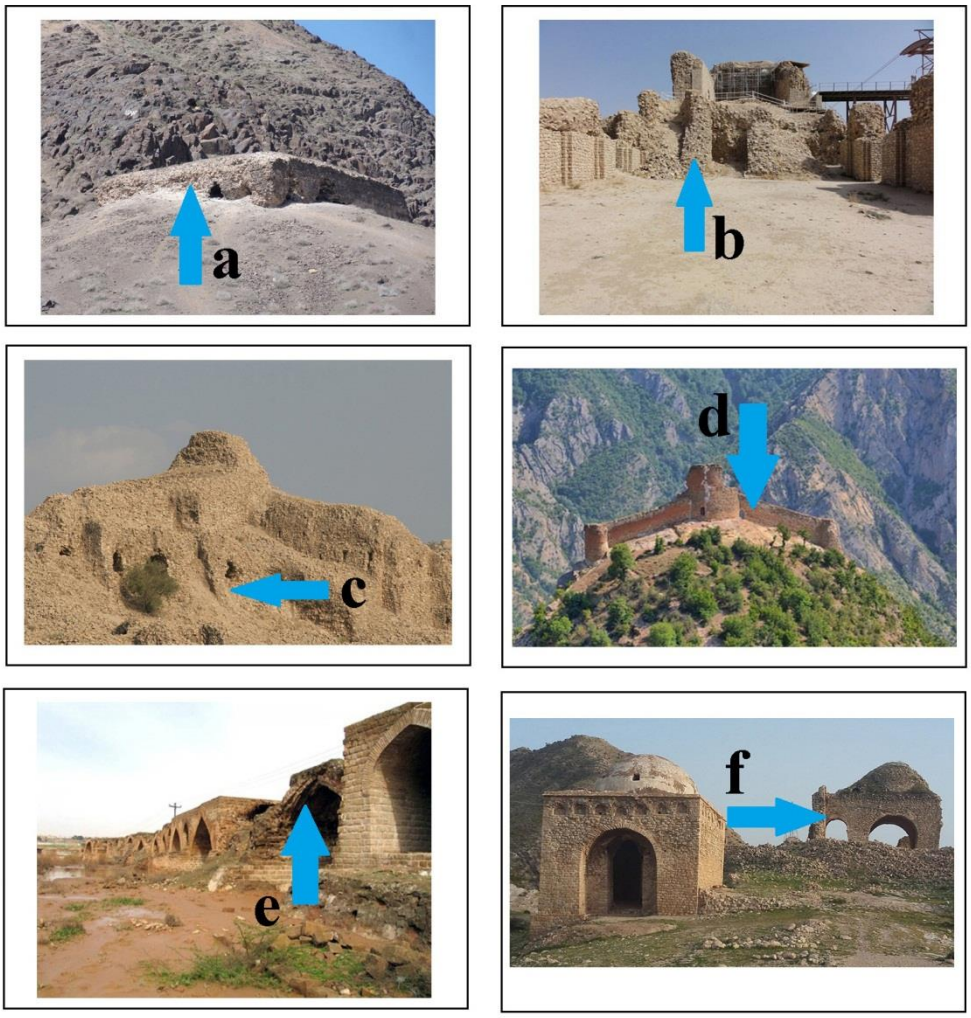
شکل شماره ۶: نمونه ملات های کوره های جدید : a) نمونه TS5 بالای کوره، b) نمونه TS6 وسط کوره ، c) نمونه TS7 پایین کوره ، d) نمونه TS8 مخلوط هم وزن از سه نمونه قبلی (نگارنده)



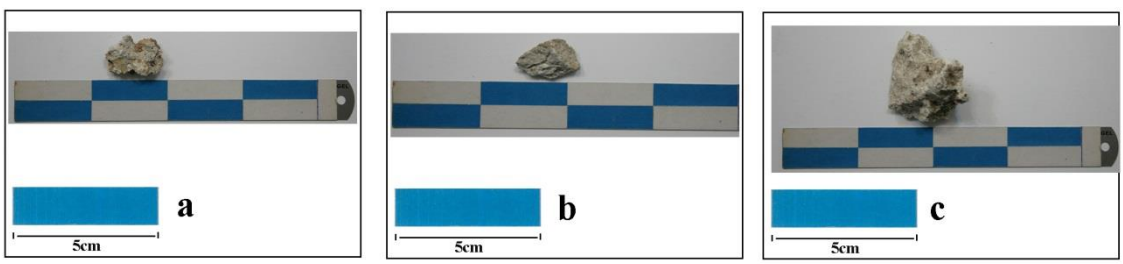
شکل شماره ۷: نمونه رسوب دریاچه (نگارنده)



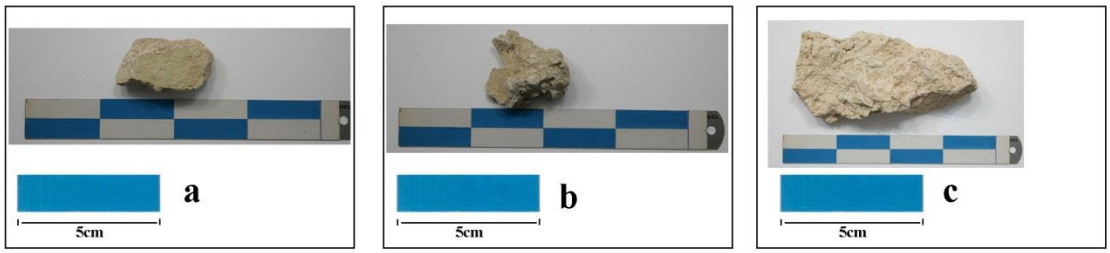
شکل شماره ۸: نمونه سنگ های خام معدن: راست: معدن یارعزیز، چپ: معدن مرغو قلات (نگارنده)



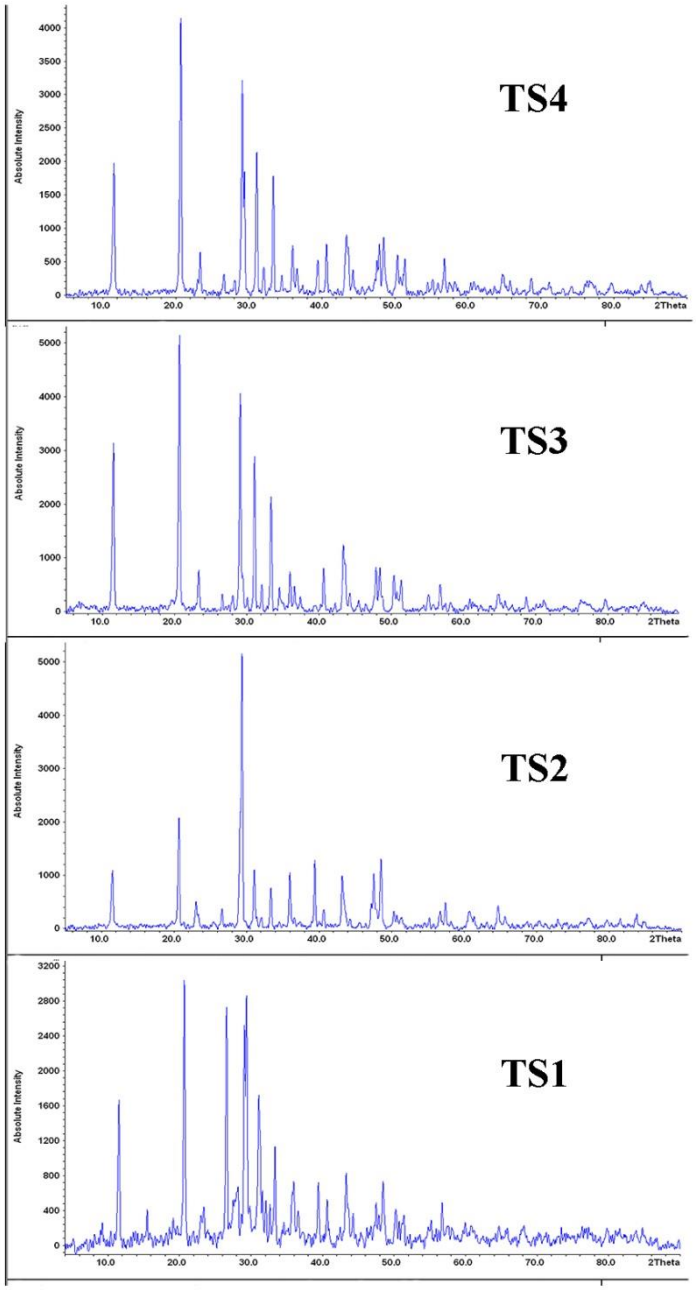
شکل شماره ۹: تصویر مکان های نمونه گیری برای مقایسه نتایج: a) آتشکده تخت رستم، b) قلعه دختر فیروزآباد، c) قلعه دختر بیشاپور، d) قلعه کنگلو، e) پل شادروان، f) چهارتاقی کنارسیاه (نگارنده)



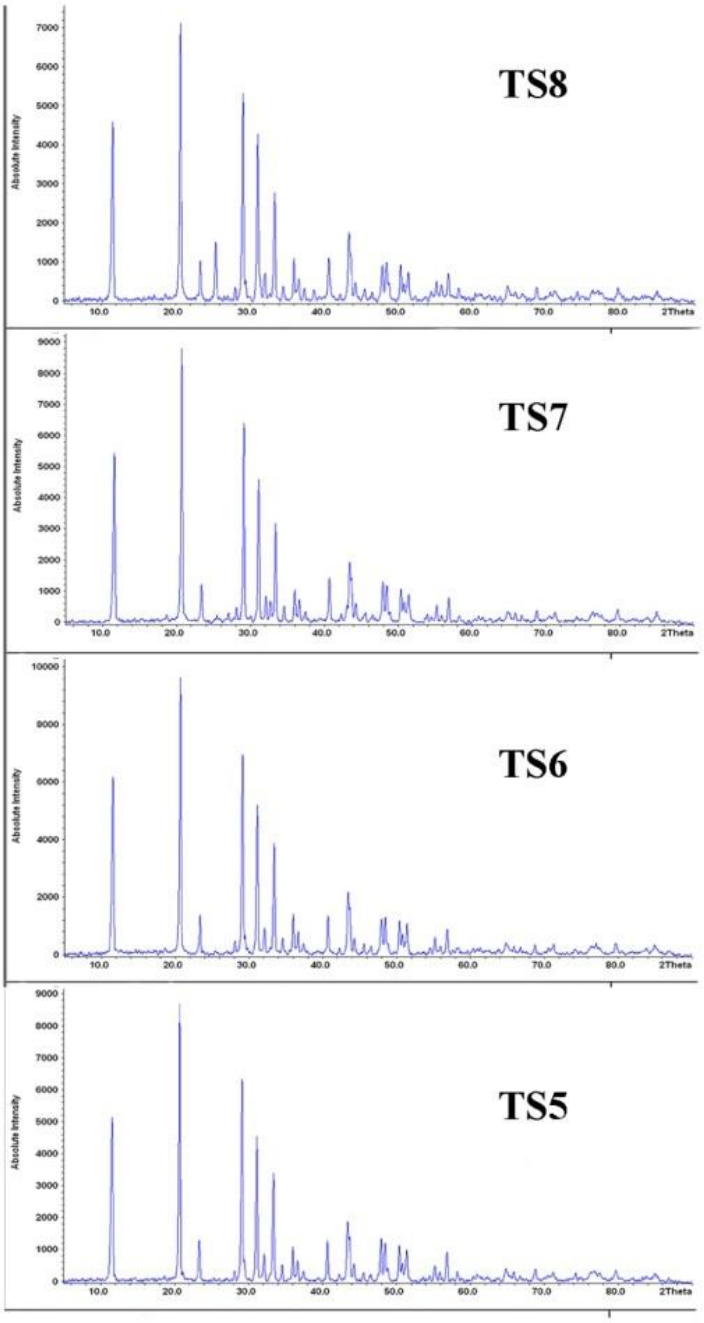
شکل شماره ۱۰: تصویر نمونه های مقایسه ای برای مقایسه نتایج: a) آتشکده تخت رستم، b) قلعه دختر فیروزآباد، c) قلعه دختر بیشاپور، (نگارنده)



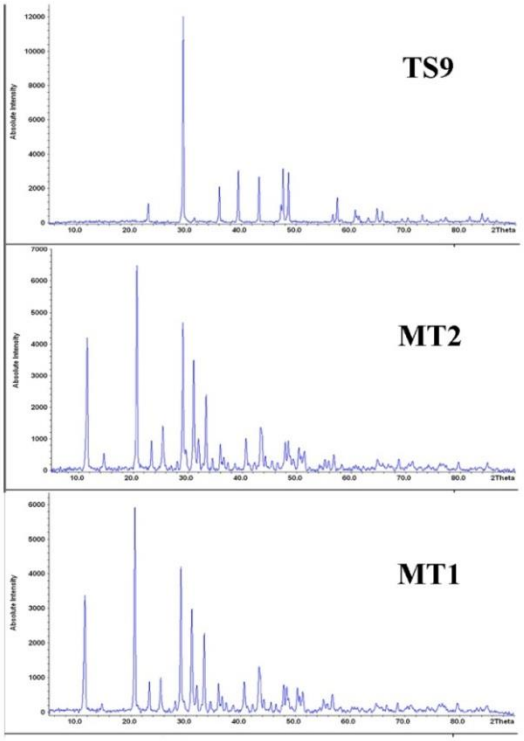
شکل شماره ۱۱: تصویر نمونه های مقایسه ای برای مقایسه نتایج: a) قلعه کنگلو، b) پل شادروان، c) چهارتاقی کنارسیاه (نگارنده)



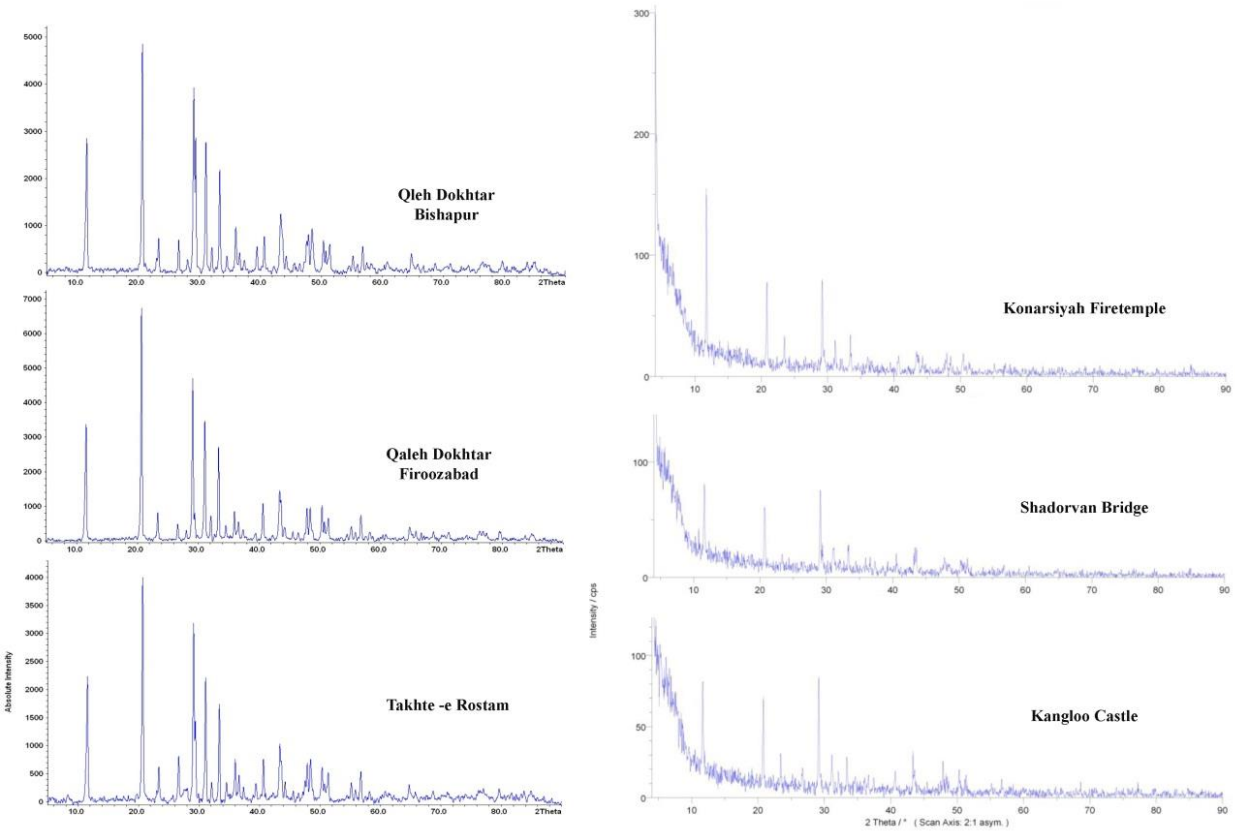
شکل ۱۲: طیف XRD برای نمونه های گروه ۱ (نگارنده)



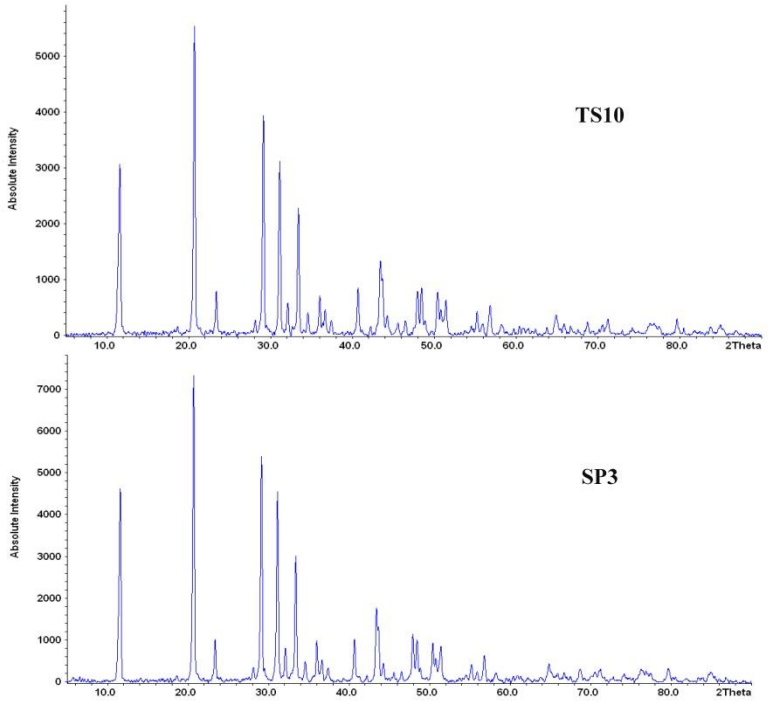
شکل ۱۳ : طیف XRD برای نمونه های گروه ۲ (نگارنده)



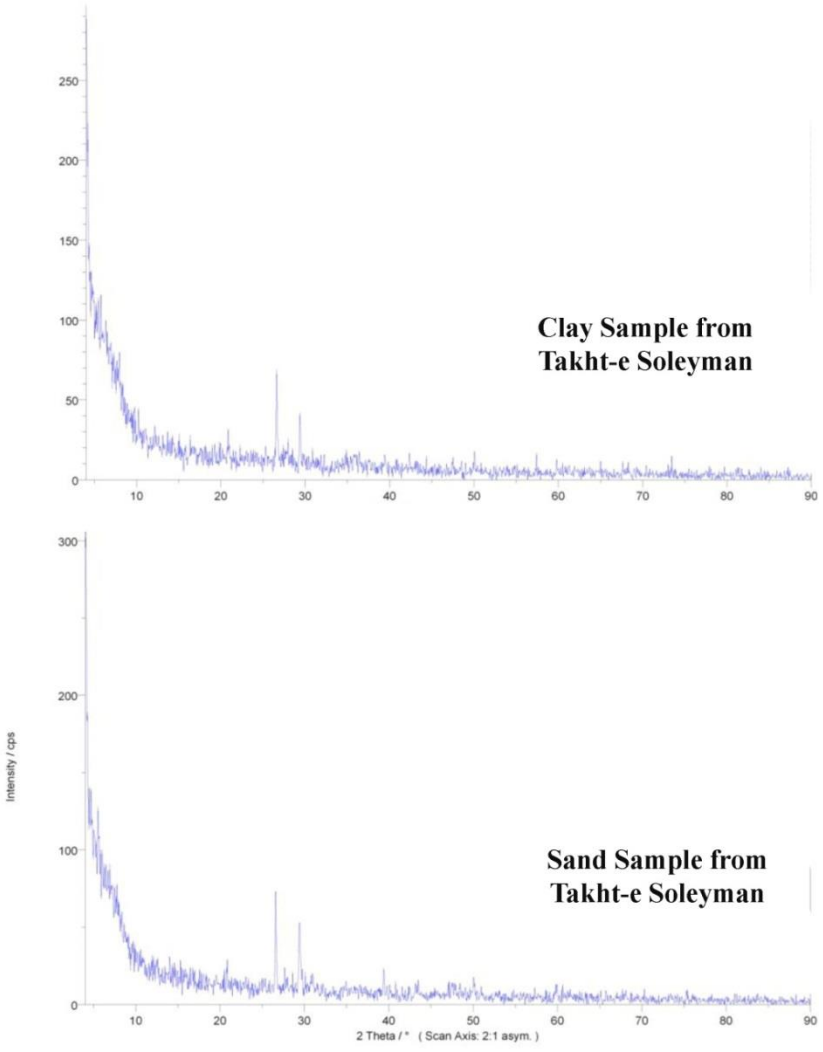
شکل ۱۴ : طیف XRD برای نمونه های گروه ۳ (نگارنده)



شکل ۱۵ : طیف XRD برای نمونه های گروه ۴ (نگارنده)



شکل ۱۶ : طیف XRD برای نمونه های گچ خام (نگارنده)



شکل ۱۷ : طیف XRD برای نمونه های ماسه و خاک رس در تخت سلیمان (نگارنده)