علوم و تکنولوژی محیط زیست ، دوره چهاردهم، شماره چهار، زمستان ۹۱

کاربرد مواد آهکی در معماری بومی ایران ؛ رمزینه حفاظت از محیط زیست

محمدصادق طاهر طلوع دل[۱*]

msttd@srttu.edu

سعید عظمتی[۲]

تاریخ دریافت:۹۰/۳/۲۵ **تاریخ پذیرش:۹۰/۵/۲**

چکیده

بررسی خصوصیات فنی مصالح مورد استفاده درمعماری سنتی و بومی ایران که برگرفته شده از مواد موجود در محیط استقرار آن بناها و تأمین کننده همسازگاری لازم با محیط زیست می باشند.

تبیین علل استفاده از این گونه مصالح در بناها، از یک طرف به منظور کاهش مصرف منابع طبیعی و از طرف دیگر صرفه جویی در منابع انرژی طی مراحل تولید مصالح، ساخت بناهای سنتی و نیز نگه داری، حفاظت و مرمت این گونه بناها می باشد. لذا این مقاله برآن است که استفاده از آهک و ملات های با پایه مواد آهکی ارزان، در دسترس و با دوام در ساختمان را به عنوان رمزینه سازگاری مصالح سنتی درمعماری بومی ایران؛ آشکار سازد.

در این مقاله ضمن مطالعه تجربیات تخصصی دیگران در زمینه موضوع و کسب نتایج آزمایش های مکانیکی بر روی نمونه خاک های رسی ریزدانه مخلوط شده با درصدهای مختلف آهک و تحلیل نتایج مزبور؛ جنبه های فنی ، اقتصادی و اجرایی استفاده از آهک در بناهای کهن و معاصر مورد تحقیق قرار گرفته است.

معیارها و الگوهای فنی ساخت مصالح سنتی توسط پیشینیان را می توان به همراه بهره گیری از فناوری های نوین مرتبط با صنایع تولید محصولات جدید آهکی به گونه ای به کار گرفت که موجب بهینه ساختن میزان مصرف منابع طبیعی و صرفه جویی در مصرف انرژی شود.

تولید مواد و مصالح بازگشت پذیر به دامان طبیعت، برخلاف سیمان های صنعتی، مانع از جذب و توسعه دی اکسید کربن ناشی از تولید محصولات صنعتی ساختمانی و در نتیجه جلوگیری از افزایش گازهای گلخانه ای آلوده کننده هوا در محیط زیست می شود.

امکان ممانعت از بروز اثرات مخرب باران های اسیدی درمحیط زیست می باشد.

واژه های کلیدی: معماری بومی، مصالح آهکی، اثرگلخانه ای، باران اسیدی، صرفه جویی انرژی، حفاظت محیط.

۱- استادیار، گروه های عمران و معماری دانشکده های مهندسی عمران و معماری، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی *(مسئول مکاتبات).

۲- کارشناس ارشد مهندسی معماری، فارغ التحصیل دانشکده معماری و شهرسازی دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی تهران.

مقدمه

۱. ضرورت استفاده از ملات های آهکی

در تولید صنعتی آهک به منظور آزادسازی آب و دی اکسید کربن از سنگ آهک می بایستی انرژی حرارتی دردمای بین ۶۰۰ تا ۹۵۰ درجه سانتی گراد حرارت استفاده شود. ولی در روند تولید سیمان صنعتی حداقل ۱۱۰۰ تا ۱۴۰۰ درجه سانتی گراد حرارت لازم است . لذا در تولید سیمان صنعتی برخلاف آهک یک ونیم تا دو برابر انرژی سوختی مصرف می شود و افزایش آلایندگی در محیط به همین ترتیب توسعه خواهد یافت. اگرچه مقاومت زودهنگام بتن ساخته شده با سیمان صنعتی طی ۲۸ روز به کفایت لازم می رسد، ولی مقاومت دیرهنگام مصالح ساخته شده با آهک طی ۴۸ روز بادوام تر می باشد. به لحاظ پایداری، پایایی و مانایی نیز در ساختمان های کهن و بناهای تاریخی ارزشمند این موضوع به سبب ثبات کیفیت ظاهری از نظر رنگ و شفافیت سطوح و براق بودن آن ها نسبت به ساختمان های صنعتی نوین معاصر به وضوح قابل تشخیص می باشد. در این رابطه ماندگاری بسیاری از بناهای تاریخی ایران در معرض حوادث طبیعی مانند زلزله مخرب، آب های نفوذی خورنده، سیلاب ها و امواج ساحلی، تغییرات شدید رطوبت، برودت و حرارت محیطی مانند بناهای تاریخی ارایه شده در شکل ۱ قابل اشاره است. به عبارت دیگر می توان گفت، نیاز به پالایش و زدایش زنگار و آلودگی سطحی بناهای نوین باعث شده، امروزه مصالح ساختمانی خود تمیز شونده با استفاده از مواد آهکی و با کمک فناوری نانو[1] اختراع شوند و مشکلات زیست محیطی بناهای نوین صنعتی را حل کنند. لذا پس از بررسی شواهد و کارهای تحقیقاتی انجام یافته توسط دیگران در این زمینه به این اطمینان خواهیم رسید که با شناخت رمزینه نهفته در هنر تولید مصالح ساختمانی معماران سنتی این مرز و بوم، به ازای مصرف انرژی حداقل می توانیم به بهبود شرایط محیط زیست خودمان کمک نماییم. به عنوان مثال به کار گرفتن مصالح بومی همچون خشت و آجر آهکی، گچ آهکی، شفته آهکی، ساروج، آجر ماسه آهکی، آهک اسفنجی و رنگ های آهکی ترمیم کننده از جمله مواردی می باشند که نیازمند واکاوی دانش فنی، اجرایی، ایمنی، اقتصادی و زیستی محیط هستند .

شکل ۱- تصاویر تعدادی از بناهای تاریخی ماندگار ایرانی پایدار در مقابل عوامل مخرب محیطی

1 - Nanotechnology

۲. سوابق و شواهد زیست محیطی بودن ملات های آهکی

مجموعه مطالعات و مشاهدات دیگران در زمینه ضرورت و محاسن کاربرد مصالح آهکی در بناهای تاریخی می تواند از جنبه های خصوصیات فنی، زمینه های آزمایشگاهی، معایب و معضلات کاربرد آن ها، نحوه استفاده و بهسازی و در نهایت اثرات بهبود خصوصیات مصالح آهکی در نظر گرفته شود؛

۲-۱- خصوصیات فنی و مکانیکی ملات های آهکی

در ارزیابی نقش ملات های با پایه آهکی، در خصوص ضد آب ساختن سطوح نمای بناهای تاریخی و اعاده کیفیت و امکان مرمت سطوح نما از جنبه کیفیت رنگ و میزان براقیّت لازم مشخص شده است که این گونه ملات ها به خوبی می توانند در مقابله با آثار زیست محیطی عوامل آلوده و کدرکننده جایگزین سیمان های صنعتی گردند. این عمل موجب برخورداری از امکان ترمیم و پرکنندگی سطوح بیرون پریده یا تخریب شده و فرسوده، از نظر قابلیت لکه گیری، اعاده رنگ و تأمین تلألو لازم برخوردار می شود. طبق تحقیق در محاسن کاربرد ملات های مرمتی با پایه آهکی در اسپانیا و ایتالیا بر روی تعداد متنابهی از بناهای تاریخی با مصالح آجری، گچی و آهکی؛ کاهش قابل توجهی در میزان نفوذپذیری آب، نمک های خورنده سولفاته و کلراته مشاهده شده است. این ملات ها به عنوان مواد اصلی در ترمیم و بهسازی سطوح نماهای تاریخی در نظر گرفته شده اند. زیرا با کمک این مواد نفوذپذیری شدیداً کاهش یافته، دفع آب های خورنده عامل هوازدگی و خوردگی باران های اسیدی و کدرکننده صورت می پذیرد. این مطلب به کمک روش های غیرمخرب حرارت سنجی[1] و آزمون اشعه مجهول از جنبه کانی شناسی در سطوح ترمیم شده با ملات های آهکی ذکر شده تأیید شده است. ملات های با پایه آهکی، می توانند ترکیبی از سیمان سفید، آهک، پوزولان های سیلیسی ویا روباره های کوره سیمان یا ذوب آهن باشند و به خوبی می توانند رنگ ملات های بناهای تاریخی را به روشنی برگردانیده، میزان براقیّت آن ها را توسعه بخشند. در ضمن به نحو مطلوبی از میزان جذب آب های مزاحم و احتمال نفوذ مواد کدرکننده، مات کننده و ملوث سازنده در نمای بناهای تاریخی بکاهند تا بتوانیم میزان دوام و پایایی مصالح و مواد این گونه بناهای تاریخی ارزشمند را توسعه بخشیم. نمونه ای ازکاربرد این مواد در شکل ۲ مربوط به برج طلا واقع در شهر سویل جنوب اسپانیا ارایه شده است (۱).

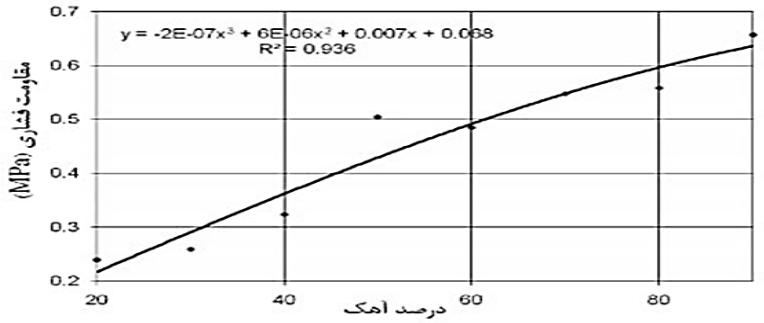
شکل ۲- تصویر برج طلا در شهر سویل جنوب اسپانیا

مشخصات مکانیکی مقاومت ملات های آهکی در صورت ثبات و پایایی، ارزش بهره برداری پیدا می کنند. لذا به منظور اندازه گیری میزان مقاومت مکانیکی و دوام این خصایص در طول عمر بنای ساخته شده از ملات های آهکی، طبق تحقیق می توانیم از میزان تخلخل ملات های آهکی به عنوان شاخص ارزیابی کمّی در کیفیت پایداری و پایایی خصایص فنی مصالح آهکی استفاده نماییم. البته تخلخل ملات های آهکی با بالارفتن سن ملات به تدریج کاهش خواهد یافت. حداقل معیار بررسی مقاومت می تواند طی یک دوره ۶۰ روزه سن ملات در تعیین تخلخل ملات آهکی محسوب شود. لذا میزان تخلخل ۶۰ روزه ملاک تعیین کیفیت ملات آهکی خواهدبود و نتایج آزمایش های مربوطه در نمودار ۱ ارایه شده است (۲).

1- (TDT): Thermal Detecting Testing

مقاومت فشاری نمونه های عمل آوری شده در شرایط مختلف با درصد آهک مختلف

مقدار آهک (٪)	در محیط آزمایشگاه	در محیط مرطوب	یک روز نگهداری در آب
۲۰	۰.۲۳۹	۰.۶۹۸	–
۳۰	۰.۲۵۹	۰.۵۸۲	–
۴۰	۰.۳۲۳	۰.۵۰۴	–
۵۰	۰.۵۰۵	۰.۴۴۸	۰.۲۰۸
۶۰	۰.۴۸۵	۰.۴۱۴	۰.۲۵۱
۷۰	۰.۵۴۷	۰.۳۸۶	۰.۲۸۰
۸۰	۰.۵۵۸	۰.۵۲۷	۰.۲۹۰
۹۰	۰.۶۵۶	۰.۵۴۶	۰.۲۹۳



نمودار مقاومت فشاری نمونه های عمل آوری شده در محیط آزمایشگاه

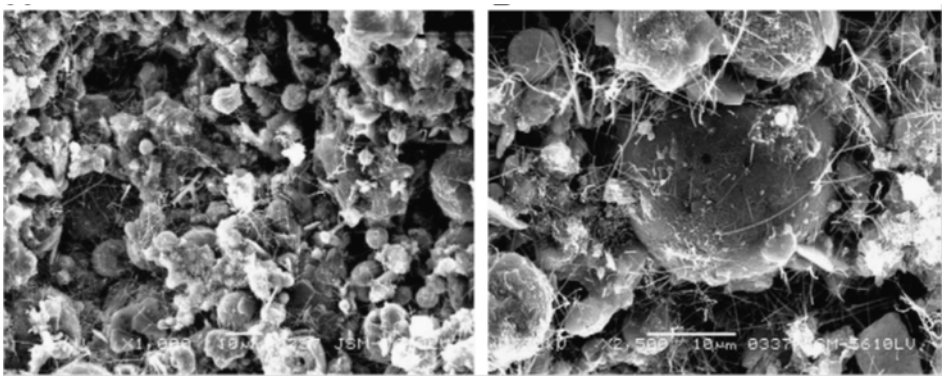
نمودار ۱- نمودار ونتایج آزمایش های مکانیکی بر روی نمونه های ملات های آهکی طی یک دوره زمانی ۶۰ روزه

۲-۲- مطالعات و آزمایش های ملات های آهکی

مطالعات آزمایشگاهی بر روی خاک های شفته ای طبیعی یا گل آهکی (مارن) در مناطق استوایی کالیفرنیا نشان داده است که علت اصلی ناپایداری و یا عدم استحکام مکانیکی آن ها حضور آب زیاد در کنار آهک به عنوان سیمان و چسب نگه دارنده اجزای این خاک های طبیعی است. از طرفی نتایج آزمایش های غیرمخرب[1] به کمک اشعه مجهول[2] نیز نشان داده است که غرقاب بودن این خاک های آهکی تثبیت شده، مقاومت آن ها را می کاهد و میزان ظرفیت باربری معادل با خاک استاندارد کالیفرنیا[3] در این لایه ها را حتی به مقدار ربع حالت خشک آن ها می رساند. در صورت ثبات وضعیت غوطه وری در آب، فعالیت فیزیکی و شیمیایی گل آهک (مارن) شروع می شود و یون آلومینیم و سولفات های موجود در آن ، داخل آب حاکم برخاک حل می شوند و ژل اترنجیت[4] که عامل سستی در گل آهک (مارن) است، می تواند رشد یابد. لذا برای جلوگیری از این ضعف می بایستی از غرقاب شدن خاک های آهکی تثبیت نشده و به تعادل نرسیده ، ممانعت به عمل آورده شود. یا به طریقی تثبیت این گونه خاک ها صورت پذیرد)۳(.

از سویی مطالعه بر روی ملات های آهکی پوزولانی (خاکستردار) در چین نشان داده است که به منظـور تولید ملات های آهکی قوی در لایه های زیرین جاده های محلی با استحکام بالا ، می توان از خاکسترها و خاک های ریزدانه درون ملات های آهکی گچ دار استفاده نمود. این عمل موجب کاهش عمل انقباض حجمی در هنگام گیرش ملات گردیده ، ساختار منافذ داخلی ملات را در نهایت ظرافت قرار می دهد. لذا عمل نفوذپذیری ملات های آهکی با مصرف خاکسترهای سیلیسی بسیار کاهش می یابد. این کاهش امکان نفوذ پذیری در شکل ۳ قابل مشاهده می باشد (۴).

1- (NDT): Nondestructive Testing
2- (XRD): X Ray Detecting
3- (CBR): California Bearing Ratio
4- Ettringite



شکل ۳- نمایش میکروسکوپیک وضعیت توپرشدگی فضاهای خالی و کاهش نفوذپذیری ملات های آهکی خاکستردار

۲-۳- مشکلات و معضلات ملات های آهکی

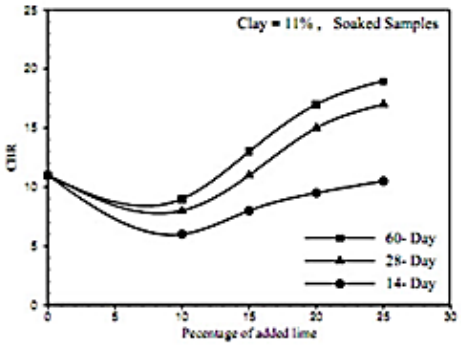
یکی از مشکلات اصلی خاک های طبیعی داشتن آلودگی به مواد آلی و حضور گیاهان در این گونه خاک ها می باشد. از جانب دیگر ارزان بودن و در دسترس بودن این گونه خاک های طبیعی و ضرورت همسازگاری بناهای احداثی با محیط زیست به منظور تأمین پایداری، حکم می نماید که از خاک های طبیعی در محل احداث بنا به شرط اصلاح معایب آن ها بهره گیری شود. طی تحقیقاتی که در هلند بر روی این گونه خاک های هموسی یا گیاهی و فقیر از جنبه شن و ماسه انجام شده است ، مشخص گردیده که با به کارگیری خاکستر روباره کارخانجات سیمان صنعتی و آهک و ماسه بادی ریزدانه به ابعاد ۲ تا ۵ میلی متر می توان به نحو مؤثری قلیائیت مورد نیاز در ملات ترکیبی مزبور را فراهم آورده ، میزان نفوذپذیری و جذب آب ملات آهکی را ضمن حفظ صرفه اقتصادی مقتضی کاهش دهیم (۵).

در زمینه امکان فرسایش ملات های آهکی دارای خاکستر و ماسه بادی نیز تحقیقات نشان داده است که ترکیب عوامل درونی مانند اکسید کلسیم (CaO) با پودر ریزدانه خاکسترهای سیلیسی (SiO_2) و عوامل محیطی همچون انقباض و حرارت و کربناته شدن در اثر جذب دی اکسید کربن (CO_2) از طرف محیط می توانند خمیر شل قلیایی آهکی را به خوبی مستحکم نموده و منافذ آن را کاهش دهد. لذا هوازدگی و فرسایش شیمیایی هوا در ملات های آهکی پوزولانی کاهش شدیدی می یابد. پس عامل کربناته شدن موجبات دوام آن ها را فراهم می سازد (۶). در زمینه ترد شکنی و خرابی ملات های دارای سیمان آهکی یعنی ملات ساروج دارنده مواد ریزدانه نیز می توان گفت، شکست تحت شرایط تنش های ترکیبی یعنی ترکیب بارهای کششی و برشی رخ می دهد. در ضمن به سبب همگونی رفتار سه جهته این گونه مواد، استحکام و ظرفیت باربری خوبی در تحمل تنش های منفی کششی در هنگام ترد شکنی و گسیختگی از خود نشان می دهند (۷).

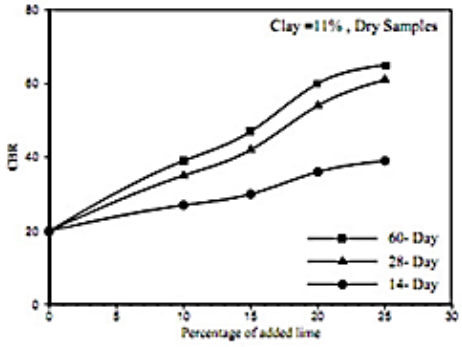
۲-۴- بهسازی و کاربرد مواد ملات های آهکی

در قدیمی ترین روش تثبیت خاک های ریزدانه سست، از روش ایجاد ستون های سنگی آهکی حاصل از ترکیب آهک با خاک اطراف درداخل زمین طبیعی بهره گیری می شده است. با بررسی های آزمایشگاهی و تعیین مقاومت های مکانیکی این مصالح، وضعیت بهینه مصرف در ترکیب ۲۰ درصدی آهک در کنار ۲۲ درصدی خاک رس بیشترین مقدار مقاومت مکانیکی از نمونه های آزمایشی به دست آمده است. این روش در ساخت ستون پایه های سنگی آهکی در پایه پل های قدیمی، آب بندها، دیواره چاه ها، جداره آب انبارها، حوض ها، خزینه حمام ها و کانال های آب رسانی قدیمی در ایران کاربرد داشته است. مخازن این آب انبارها به صورت ستون دار یا بی ستون و با مقاطع مربع، مربع مستطیل یا هشت ضلعی و حتی دایروی به کمک آهک ساخته می شده اند. این پایه های سنگی شفته آهکی نه تنها می بایستی وظیفه تحمل وزن سقف فوقانی را برعهده می گرفتند،

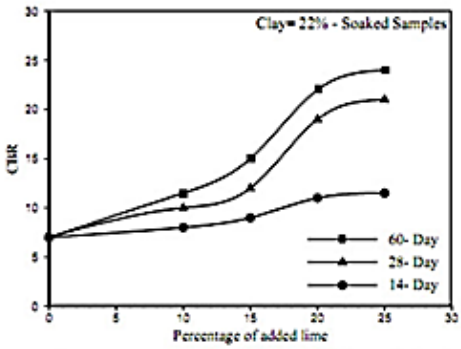
بلکه گاهی خروارها خاک بر روی آن ها انباشته شده بود و وظیفه جلوگیری از عبور و نشست آب را از مخزن برعهده داشته اند. طی آزمایش های به عمل آمده و تصاویر ارایه شده در نمودارهای گروهی ۲ حضور ۲۰ درصدی آهک در نمونه های آزمایشی بهترین نتایج را به دنبال داشته است (۸).



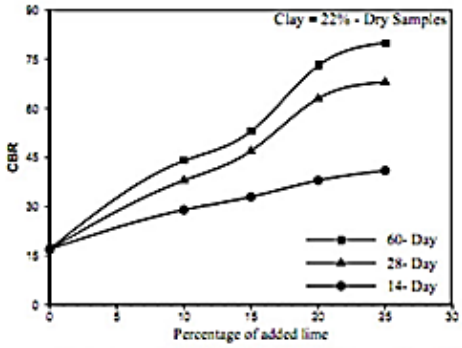
رابطه بین عدد CBR و درصد آهک افزوده شده در نمونه‌های شفته‌آهکی در حالت خیس



رابطه بین عدد CBR و درصد آهک افزوده شده در نمونه‌های شفته‌آهکی در حالت خشک



رابطه بین CBR و درصد آهک افزوده شده در نمونه‌های شفته‌آهکی در حالت خیس



رابطه بین CBR و درصد آهک اضافه شده در نمونه‌های شفته‌آهکی در حالت خشک

نمودار ۲- نمودارها و نتایج آزمایش های مربوط به کاربرد درصدهای مختلف آهک در بهبود خصایص شفته های آهکی

لذا بهترین روش اصلاح خصـــوصیات مکانیکی خاک های سست ریزدانه، به کارگیری آهک به صورت ملات شفته در ترکیب با این خاک ها می باشد. این روش ضمن افزایش توان باربری خاک های سست مزبور، موجب کاهش قیمت های اجرایی مصالح نیز می شود. اگرچه بهترین درصد اختلاط آهک برای ترکیب مخلوط های شفته مرکب از شن، ماسه وخاک رس همان گونه که آمد ۲۰٪ تشخیص داده شده است. در همین خصوص به طور مشخص اعمال شرائط اشباع یا غرقاب بودن نمونه های آزمایشی در مقاومت های زود هنگام فشاری، نتایج و عملکرد منـاسبی از خـــود نشـــان نداده اند (۹).

استفاده از دوده سیلیسی و ماسه بادی ریزدانه در ملات های آهکی هیدراته شده یا آهک شکفته می تواند در بهبود مقاومت اولیه ملات های آهکی به جای ۶۰ روزه طی دوره کوتاه مدت ۲۸ روزه کمک نماید. به عبارت دیگر ملات های آهکی دارای دوده سیلیسی ریزدانه درعین افزایش توپری در حجم دچار کاهش نفوذپذیری جسم می شوند و به مقاومت اولیه خوب و دوام بالایی دست می یابند (۱۰). به دیگر سخن شفته آهکی از ملات های قدیمی و سنتی ایران است و از آن برای ساختن پی بناها و نیز اندود کردن سطوح ابنیه سنتی و ساختن ملات دیوارهای سنگی به ویژه در پایه پل ها از دیرباز استفاده فراوانی شده است . به دست آوردن روابط میان مقدار مصـــرف بهینه

آهک در ملات های شفته آهکی به منظور اجرایی و اقتصادی و فنی نمودن مصرف آن در تناظر با میزان مقاومت های فشاری، ضریب کشسانی و چگالی این گونه ملات ها می تواند در بهینه سازی مقادیر مصرف آهک براساس نیازهای مهندسی مؤثر باشد (۱۱). از طرفی ملات ساروج نیز به عنوان یکی از مهم ترین ملات های آبی بناهای سنتی ایران است که در مواضع در تماس با آب و رطوبت برای جلوگیری از نفوذپذیری و خرابی بنا استفاده می شده است. این ملات حتی در خاورمیانه نیز کاربرد فراوانی یافته است. در صورتی که درصدهای اختلاط مناسبی در طرح آن به کارگرفته شود، از مقاومت مکانیکی خوبی نیز بهره مند می شود. البته چون این ملات دیرگیر می باشد، به منظور افزایش مقاومت زود هنگام آن بایستی از مواد افزودنی زودگیر کننده در آن بهره گرفت. این ملات جایگزین مناسبی برای بتن مصرفی درآب بندها و به ویژه کانال های انتقال آب محسوب می شود. از طرفی به منظور گسترش آبادانی کشور و جلوگیری از خروج ارز، در زمینه تولید و خرید سیمان صنعتی، به ویژه برای ساخت مصالح همسازگار با محیط زیست و ارزان قیمت، تولید مواد و مصالح ساختمانی آهکی مانند ساروج در ایران مورد تأکید می باشد (۱۲).

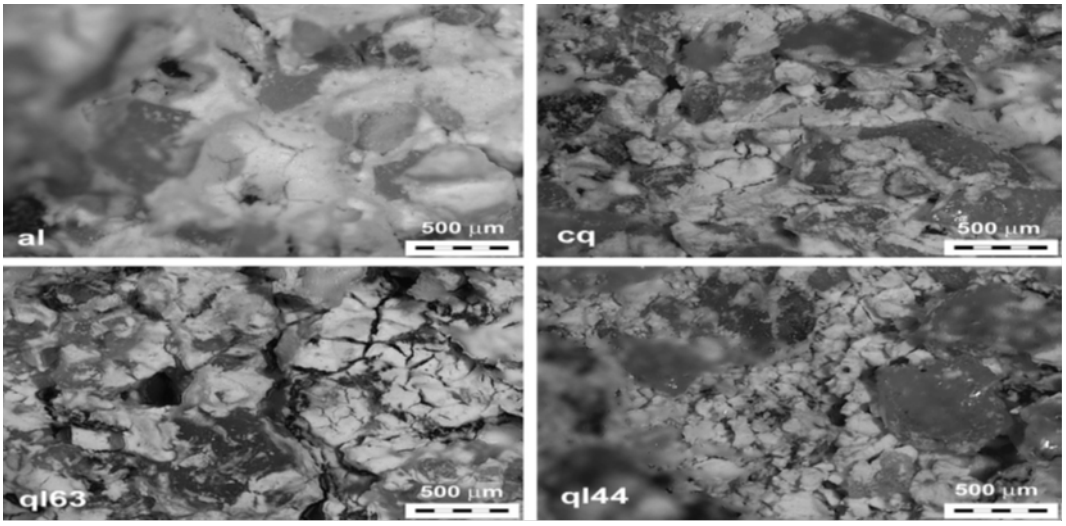
بررسی اثر افزودنی های پوزولانی در ملات های آهکی نشان داده است که ضمن افـزایش کیفیت مکانیکی مقاومت های فشاری، خمشی ، رسانایی حرارتی، کاهش میزان جذب آب و قدرت تبخیرپذیری این ملات ها، میزان ظرفیت انبساطی و هدایت حرارتی ملات های آهکی همتراز ملات های گچی و همسازگار با آن هـــا خواهد شـــد. به این ترتیب از ملات های خاکستر دار آهکی به خوبی می توانیم در امر مرمت و بهسازی اندودهای گچی بناهای تاریخی استفاده کنیم و نگران ناسازگاری و انبساط و انقباض ناهمگون حرارتی تحت اثر شرایط محیطی بین لایه های اندود قدیمی و جدید نباشیم. لذا این مسئله می تواند رمز پایداری ملات های آهکی پوزولانی باشد. زیرا عامل نفوذپذیری در کاهش مقاومت مکانیکی این ملات ها نقش اساسی را برعهده دارد (۱۳).

طی تحقیقات انجام شده درزمینه سبک سازی بتن های آهکی اسفنجی، مشخص شده است که براساس میزان بهره گیری از هریک از اجزای این نوع مصالح، شیوه پیمانه کردن، نحوه اختلاط، روش ساخت و خصوصیات مورد انتظار از بتن آهکی اسفنجی تازه و سخت شده، کیفیت اقتصادی بودن، همسازگاری افزودنی حباب ساز از جنبه شیمیایی با دیگر اجزای ملات، پایایی و دوام خصوصیات مهندسی بتن اسفنجی همچون شیوه ساخت، اختلاط، حمل، پمپاژ و پرداخت نهایی آن قابل مشاهده و سنجش هستند. لذا طبق تحقیقات انجام شده در صورت رعایت درصد مناسب هوا دمیدگی و حصول درصد کاهش لازم در وزن مخصوص و کنترل دوام و همسازگاری میان اجزای بتن آهکی اسفنجی به خوبی می توان صرفه اقتصادی را در ضمن تأمین مقاومت های مکانیکی و کاهش وزن در قطعات آهکی ساختمانی را به ارمغان آورد (۱۴).

۲-۵- اثرات بهبود خصوصیات ملات های آهکی

بررسی صرفه اقتصادی کاربرد ملات شفته آهک در حفاظت و ساخت ابنیه نشان می دهد که عملکرد فیزیکی، شیمیایی و مکانیکی خوبی در همسازگاری با شرایط محیطی به عنوان مهم ترین مصالح ساختمانی وجود دارد. گاهی برخی افراد معتقدند که مصرف آهک در بناهای نوین لازم نمی باشد و تنها در بناهای تاریخی مناسب هستند ولی فناوری های نوین درسطح جهانی به کشف مجدد مصالح آهکی به عنوان یک ماده جایگزین مفید، ارزان و همسازگار با محیط زیست بشری نایل شده است. طی بیست سال اخیر، ملات های آهکی اعتبار و آبروی خویش را به عنوان یک محصول ارزان، پایدار و سازگار با محیط، در عین حال قابل بازگشت به طبیعت و قابل تولید با صرف انرژی به میزان حتی یک سوم انرژی لازم بـــرای تولیـد سیمان های صنعتی کسب کرده است. در ضمن تجهیزات کارخانه ای ارزان قیمتی را نیز احتیاج دارند. تنها ضعف اصلی ملات های آهکی در میزان مقاومت و سختی زودرس آن ها طی مدت ۲۸ روزه در مقایسه با سیمان صنعتی است. اولاً با مقایسه قیمت و میزان مصرف این دو ماده در کل محصول،

قابـــل تشخیص می باشد، ثانیاً با استفاده از ریزدانه های سخت کننـــده و افزودنی های زودگیر کننده می توان عیب و ضعف مقاومتی را نیز حل نمود. ازطرفی با استاندارد نمودن روش تولید و بهبود کیفیت محصولات آهکی می توان درک درستی از کاربرد مصالح آهکی در صنعت ساخت و ساز ابنیه به وجود آورد. در هر حال آزمایش بر روی ملات تازه و سخت شده خمیرهای آهکی از جنبه کارآیی، ثبات، چگالی، تخلخل، جذب آب ، درصدهای اختلاط بهینه، بررسی نحوه رشد مقاومت های مکانیکی ، ضریب کشسانی طی سن رشد ملات درسنین ۶۰ و ۹۰ و ۱۸۰ روزه و ۴ ساله و دوام در مقابل خورندگی کلرایدها و سولفات ها نتایج قابل توجهی به دست آمده است. چون کاربرد مصالح آهکی به عنوان مصالح جایگزین و ملات مرمتی در بناهای تاریخی مطرح است ، پس جذب و تبخیر آب در این ملات ها کاملاً مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته؛ شناخت فرآیند نفوذ آب، کلراید، سولفات در عمل تخریب ملات ها ملاک واقع شده است. با بررسی دوام و پایایی خصوصیات مکانیکی و فیزیکی و شیمیایی ملات های آهکی، مشخص شده که در دراز مدت کاهش قابل توجهی در کیفیت این ملات ها رخ نمی دهد و همسازگاری با شرایط محیطی خورنده در آن ها تضمین شده است. به عبارت دیگر ضمن حفظ میزان قلیائیت لازم به کمک خصوصیت شعریه یا موئینگی پس از جذب آب، عمل تبخیر آب به سرعت صورت می گیرد. لذا این موضوع مانع تشکیل و ثبات اسیدهای مخرب در کنار نمک های خورنده می شود. به این ترتیب علت پایداری بناهای تاریخی در معرض عوامل خورنده یعنی حضور املاح در کنار آب های نفوذکننده مخرب، داشتن سازوکار موئینگی، جذب، تبخیر و دفع آب های مضر در ملات های آهکی به ویژه در شالوده ها و پی ساختمان های تاریخی دور از حفاظت و دسترسی هستند. این عامل خود موجبات حذف هراس از مسئولیت حفاظت و آرامش خاطر در نگه داری بناهای تاریخی را فراهم می سازد. میزان تغییرات کیفی ملات های شفته آهکی طی مدت چهار سال به کمک تصویر برداشته شده توسط میکروسکپ نـــوری در شکل ۴ قابل مشـــاهـــده می باشد (۱۵).



شکل ۴- اثرات دوام بخش سازوکار موئینگی در دفع و تبخیر آب های خورنده به مدت چهارسال در ملات های آهکی

۳. تفسیر نتایج کاربرد ملات های آهکی

طی پنجاه سال اخیر استفاده از آجر ماسه آهکی در کشور ایران ؛ همچنان ارزش ، اعتبار ، مقاومت و کیفیت خود را در مقایسه با دیگر قطعات و محصولات نوین ساختمانی حفظ کرده است. این موضوع خود می تواند میزان توانمندی بومی کشور را در حوزه ساخت و سازهای سنتی و تولیدات محصولات ساختمانی آهکی، همچون شفته وساروج را از دیرباز نشان دهد.

به این ترتیب امکان پیشتازی در امر استاندارد سازی، توسعه دانش فنی و کاربردی نمودن صنعت ساخت مصالح نوین مرکب یا مختلط با پایه آهکی وجود دارد. طبق آنچه گفته شده بناهای تاریخی در سطح جهان و ایران عمدتاً به کمک ملات های با پایه آهکی و با کاربرد مصالح بوم آورد مربوط به محیط استقرار خود ساخته شده اند و دمای پخت این مصالح حداکثر در شرایط رسیدن به مرحله شیشه ای شدن بین ۹۵۰-۹۰۰ درجه سانتی گراد است. این موضوع خود قابلیت بازگشت پذیری این مصالح را به دامان طبیعت عیان می سازد. زیرا برای استخراج فلزات و تولید سیمان ، سرامیک و لعاب های سرامیکی می بایستی درجه حرارت از حداقل ۱۱۰۰ درجه سانتی گراد فراتر رود. این مطلب مصرف سوخت و انرژی برای تأمین درجه حرارت مزبور را حداقل بین یک و نیم تا دو برابر مقادیر مربوط به مصالح ساختمانی سنتی افزایش می دهد. از طرفی آنچه مسلم است مصرف انرژی بیشتر خود معادل با تولید مقدار دی اکسید کربن بیشتر (CO_2) خواهد بود. این مسئله می تواند خود معضل آفرینی مربوط به پدیده گازهای گلخانه ای در سطح کره زمین را تشدید نماید و موجبات گرم تر شدن هوای زیست کره را فراهم سازد . از سوی دیگر همان گونه که می دانیم اگرچه تولید آهک خود نیازمند مصرف سوخت و حتی تولید گاز دی اکسید کربن مطابق رابطه شیمیایی زیر است ولی این فرآیند دارای چرخه بازگشت زیر می باشد:

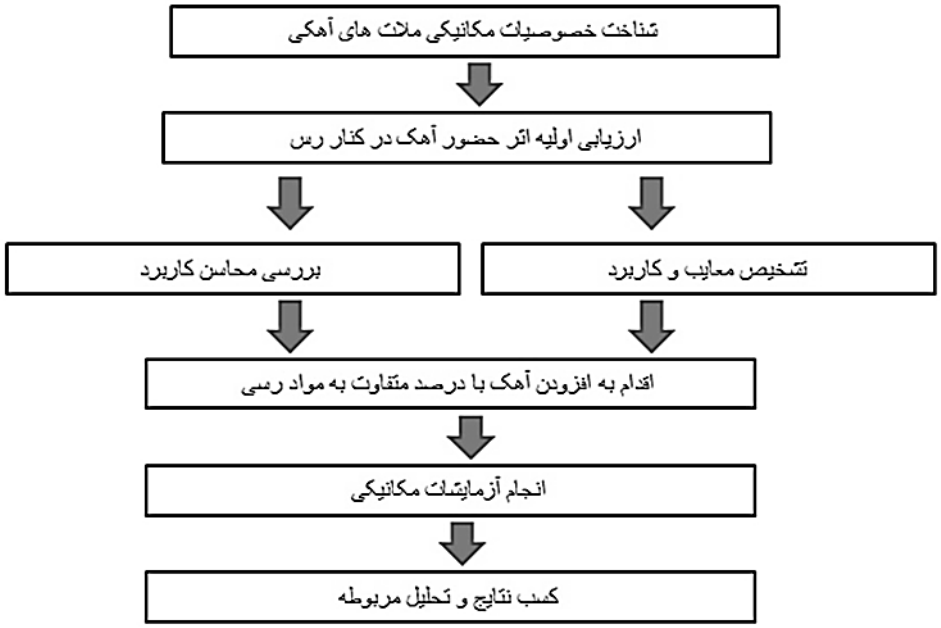
$$CaCo_3 \xrightarrow{900^{\circ}C\&753Kcal} (\%56)Cao + (\%44)Co_2 \uparrow \xrightarrow{H_2o} Ca(oH)_2 + 275Kcal \xrightarrow{Co_2} CaCo_3 + H_2o$$

لذا عین مقادیر (CO_2) تولید شده در فرآیند تولید آهک پس از طی مرحله آب گیری یا هیدراسیون ، مجدداً در مرحله کربناسیون یا دی اکسید کربن گیری (CO2) به آهک شکفته بر می گردد تا آن را دچار سختی نموده و به سنگ بادوام و همسازگار با محیط استقرار خود تبدیل کند. درشرایطی که فرق اساسی سیمان صنعتی با آهک در مقاومت مکانیکی آن است و در میان فازهای چهارگانه اجزای بنیادی سیمان صنعتی یعنی C_3S و C_2S و C_3A و C_4AF تنها عامل سختی یعنی S که همان (Sio_2) ؛ عامل ایجاد توپری و ایجاد مقاومت است. ضعف مقاومتی آهک در مقایسه با این عامل با مصرف دوده های سیلیسی، خاکسترهای آتش فشانی و یا ضایعات صنعتی روباره کوره ذوب آهن به عنوان افزودنی در تولید محصولات آهکی به خوبی می تواند مرتفع گردد. به عبارت دیگر با بذل تلاش بیشتر و به کارگیری توان مهندسی بومی کشور، به خوبی می توانیم مطابق با دانش فنی گذشتگان و مصرف پوزولان های طبیعی یا ضایعات صنعتی، میزان توپری و سختی ملات های آهکی را افزایش داده و با کاهش نفوذپذیری در درون این محصولات ساختمانی، دوام، پایایی و ماندگاری مقتضی را در بناهای ایرانی فراهم سازیم. در این مورد در شکل ۵ نحوه ساخت و چگونگی انجام آزمایش های مربوط به تأثیر میزان درصد حضور آهک در مقاومت فشاری تک محوری خاک های سست ریزدانه رسی، به منظور تعیین درصد اختلاط بهینه آهک مربوط به افزایش خصوصیات مکانیکی و مقاومت برتر خاک های سست رسی درکنار آهک به تصویر کشیده شده است. لذا هدف از انجام این تحقیق تبیین درصد مفید اثر آهک در مصالح ساختمانی از نظر فنی، اقتصادی و اجرایی با قابلیت بازگشت پذیری به طبیعت می باشد.

۴. روش کار در انجام تحقیق

روش تحقیق در این مطالعه مبتنی بر روش انجام آزمایش های تک محوری برای تشخیص میزان تاثیر درصد حضور آهک در بهبود خواص مکانیکی ملات های آهکی بوده است. به عبارت دیگر با توجه به حضور گسترده خاک های رسی ناپایدار در مقابل آب های نفوذی مخرب در ایران و احتمال بروز نشست های ناهمگن و روان گرایی حاصل از زمین لغزه و خرابی های وابسته؛ تثبیت خاک های رسی می تواند به کمک آهک، سیمان صنعتی، قیر، کلرورسدیم یا کلرورکلسیم بر اساس جنس خاک رس، شرایط محیط، سهولت کاربرد، وضعیت بارگذاری،

هزینه های اجرایی انجام پذیرد. ضـــرورت انجـــام تثبیت و مقاوم سازی خاک های سست رسی در پهنه فلات ایران از نظر ارتقای مشخصات فنی مهندسی خاک رس، تثبیت غبارات و خاک های روان سطحی و باز سازی مصالح باستانی ومرمت بناهای تاریخی، موجب انتخاب چسب ارجح یعنی آهک برای انسجام و تثبیت خاک های رسی می شود. لذا طبق گردش کار به تصویر کشیده شده در نمودار ۳ اقدامات مورد نظر تحقیق به شرح زیر تدوین و به اجرا در آمده است.



نمودار ۳- نمودار بیانگر روش انجام کار در تحقیق و کسب نتایج آزمایشگاهی و تحلیل داده های مربوطه

طی اقدامات انجام یافته، آهک مورد استفاده عبوری از الک استاندارد نمره #۴۰ با مقادیر متغیر درصد وزنی بین ۰٪ تا ۱۴٪ بوده است. برای آزمایش تعیین مقاومت فشاری تک محوری محدود نشده و ارزیابی و تعیین درصد بهینه مصرف آهک در خاک رس اقدام به تهیه نمونه های آزمایشی به تعداد لازم شده است. برای هر درصد اختلاط آهک مورد آزمایش عملاً ۲۴ نمونه استاندارد استوانه ای به قطر پنج سانتی متری ساخته شد. لذا در این تحقیق آزمایشگاهی در مجموع ۱۲۰ نمونه ساخته شده بوده است. فواصل زمانی آزمایش ها نیز به صورت آنی یعنی صفر روزه ، دو هفته ای، ۲۸ روزه و نهایتاً ۶۰ روزه تنظیم گردیده، درصد های وزنی آهک نیز در حالات صفر ، شش ، ده و چهارده درصد منظور شده بود. مطابق نتایج مندرجه در جدول ۱ وضعیت نتایج مقاومت های نوبه ای مربوط به نمونه های آزمایشی ارایه شده است. درصد رطوبت مورد استفاده در ساخت نمونه ها نیز به میزان رطوبت بهینه مورد نیاز خاک رس انتخاب شده بوده است.در حالت صفر روزه چون هنوز آهک غیرفعال بود به عنوان یک لغزاننده و درعین حال به نوعی عامل مصرف و جذب آب عمل می نمود. مطابق نتایج ارایه شده حضور آهک در مرحله ساخت نمونه ها یک تأثیر دوگانه به شکل روان کننده و سفت کننده به طور همزمان داشت که خود عامل سهولت ساخت و پایداری نمونه ها محسوب می گردید.

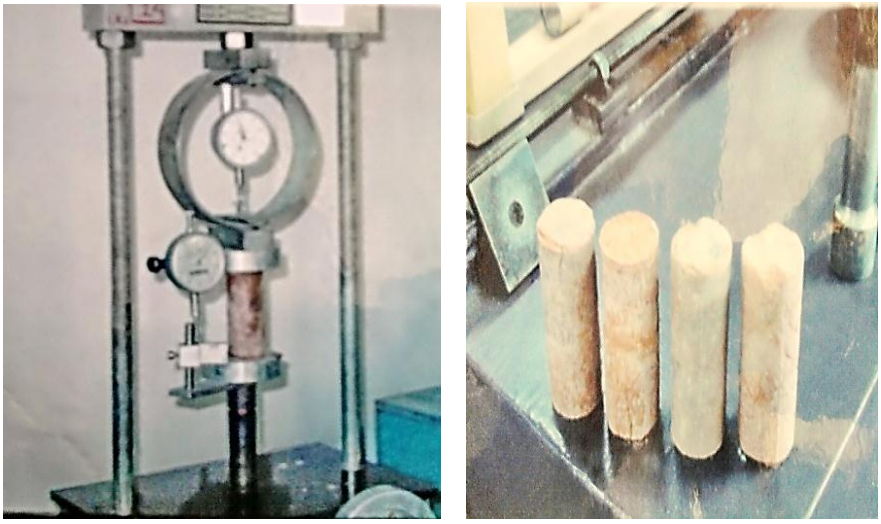
۵. نتایج کسب شده و یافته های تحقیق

در پایان مرحله آزمایش ها به کمک ترسیم نتایج کسب شده مشخص گردید که بهترین درصد اختلاط آهک جهت تثبیت خاک های رسی ریزدانه سست و مقاوم سازی ۱۰٪ وزنی می باشد. به دیگر سخن براساس نتایج به دست آمده در این آزمایش ها بر خلاف نتایج آزموده شده در محوطه و تأثیر ۲۰٪ درصدی بهینه مصرف آهک در خاک های مخلوط طبیعی ذکر شده در منابع مورد مطالعه (۸و۹)؛ برای تولید مصالح ساختمانی مقاوم، با دوام و اقتصادی تنها با ۱۰٪ مصرف

آهک در کنار خاک رس بهترین نتایج مکانیکی را می توان به دست آورد. لذا در صورت ادامه روند این تحقیق نیز به خوبی می توان پیش بینی نمود که با کاربرد دوده های سیلیسی و الیاف های مسلح کننده طبیعی و مصنوعی همچون الیاف های گیاهی، پشم و موی حیوانات و الیاف های تولید شده صنعتی، فریزه یا تراشه های ضایعات صنعتی به خوبی می توان برای بهبود کیفیت های مورد انتظار از محصولات آهکی و جبران ضعف های مقاومتی در انواع کششی، خمشی و به ویــژه مقاومت های ارتعاشی این گونه ملات ها اقدام نمود.

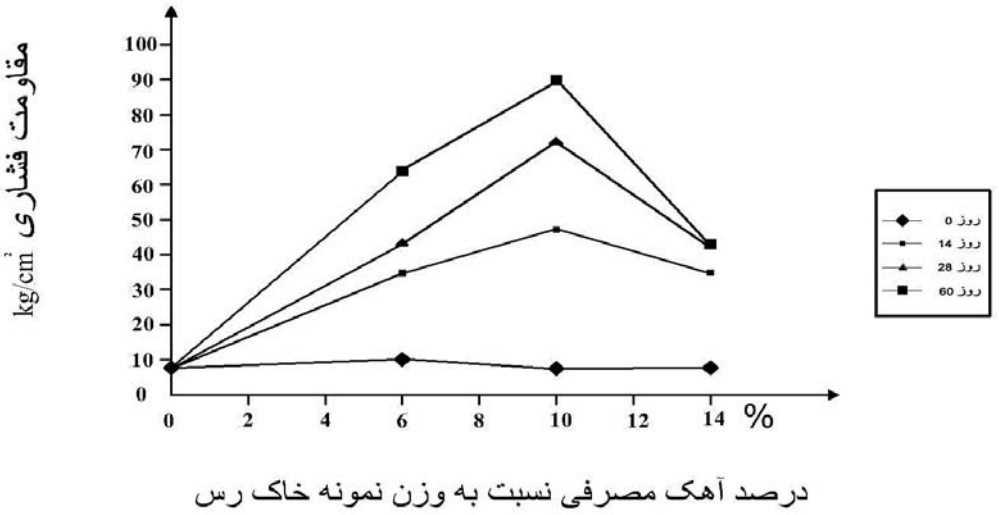
جدول ۱- نتایج آزمایش های مربوط به تأثیر درصد آهک در مقاومت فشاری خاک رس ریزدانه عبوری از الک۴۰#

ردیف	درصد آهک مصرفی نسبت به وزن نمونه خاک رس	مقاومت فشاری صفر روزه Kg/Cm^2	مقاومت فشاری ۱۴ روزه Kg/Cm^2	مقاومت فشاری ۲۸ روزه Kg/Cm^2	مقاومت فشاری ۶۰ روزه Kg/Cm^2
۱	صفردرصد	۷/۵۰	۳۲/۰۷	۶۵/۰۷	۷/۵۳
۲	شش درصد	۱۱/۸۰	۳۰/۱۰	۴۷/۸۰	۶۰/۷۶
۳	ده درصد	۷/۰۰	۳۹/۰۰	۷۰/۱۲	۹۳/۰۰
۴	چهارده درصد	۸/۰۰	۳۲/۲۵	۴۲/۵۸	۴۲/۰۰



شکل ۵- نمایش نحوه انجام آزمایش تک محوری تعیین مقاومت فشاری خاک های رسی مخلوط با آهک

از جنبه مقایسه ای و تحلیل نتایج کسب شده در آزمایش های یک دوره شصت روزه نیز به ارایه تناظر ارتباطی میان درصد آهک مصرفی در خاک رس و مقاومت های نوبه ای نمونه های آزمایشی طی نمودار ۴ اکتفا شده است که این نمودار مبین وضعیت بهینه درصد اختلاط آهک در نمونه های خاک های رسی است.



نمودار ۴- نمایش نحوه تغییرات مقاومت نمونه ها متناظر با درصد حضور آهک در خاک رس

۶. نتیجه گیری

براساس بحث و تفسیر اطلاعات ارایه شده می توان نتیجه گرفت که به منظور حفاظت اصولی از محیط زیست طبیعی، کاهش مصرف مواد و مصالح صنعتی هزینه آفرین، کاهش هزینه های اجرایی و هرچه سهل الوصول تر کردن تهیه و تولید مصالح ساختمانی، استفاده از آهک به عنوان مواد تکمیل کننده مصالح ساختمانی بسیار مفید خواهد بود. همچنین برای بازگشت پذیر نمودن مواد و مصالح ساختمانی و به ویژه کاهش اثرات گلخانه ای حاصل از تولید مصالح صنعتی و جلوگیری از افزایش بیش از حد گاز مضر دی اکسید کربن در جو زیست محیطی کره زمین، به خوبی می توانیم از فنون به کارگرفته شده در بناهای سنتی کشورمان درس بگیریم. لذا با شناخت رمزینه اهداف نهایی این گونه ساخت و سازهای بومی پایدار در جهت حفاظت هرچه بیشتر از طبیعت برآییم. پس با کمک ساخت مواد و مصالح دارای آهک موجبات کاهش مصرف انرژی و افزایش کیفیت مصالح ساختمانی را با بهره گیری از مواد و مصالح آهکی حاصل از فناوری های نوین فراهم سازیم. از طرفی طی نتایج تحقیقات مورد استدلال با استفاده از تنها ۵۰٪ از مقدار انرژی مشابه در محیط طبیعی حاوی سنگدانه و درشت دانه، عملاً در خط تولید کارخانه ای با خاک های رسی ریزدانه، محصولات ساختمانی آهکی ارزان تر، مقاوم تر و همچنین با دوام تری می توانیم بسازیم.

به عبارت نهایی می توان نتیجه گرفت که رمزینه نهفته در میراث فنی مهندسی پیشینیان این مرز و بوم، در ساخت بناهای کهن ماندگار ایرانی بیانگر؛ اقتصادی بودن، اجرایی بودن، زیست محیطی و بوم آورد بودن مواد و مصالح یعنی در واقع مصرف مواد و مصالح حاوی آهک موجود در محیط طبیعی در این بناها می باشد. این دستاورد می تواند الگوی خوبی برای ایجاد تحول در صنایع تولید کننده مصالح نوین ساختمانی و به ویژه مواد خاص ترمیم کننده بناهای تاریخی این مرز و بوم محسوب گردد.

منابع

1. P.M. Carmona-Quiroga, S. Martinez-Ramirez, M.I. Sanchez de Rojas, M.T. Blanco-Varela, “Surface water repellent-mediated change in lime mortar color and gloss”, 2010

2. Stefanidou Maria, “Methods for porosity measurement in lime-based mortars”, 2010
3. Raymond N. Yong, Vahid R. Ouhadi, “Experimental study on instability of bases on natural and lime-cement-stabilized clayey soils”, 2007
4. Weiguo Shen , Mingkai Zhou, Qinglin Zhao, “Study on lime–fly ash–phosphogypsum binder”, 2007
5. A.C.J. de Korte, H.J.H. Brouwers, “Production of non-constructive concrete blocks using contaminated soil”, 2009
6. Shiqun Li, Jishan Hu, Lui Biao, Xinguo Li, “Study on the weathering resistance of fly ash–lime compacts”, 2004

۷. محمدرضا محمدعلی ها، مجیدرضا آیت اللهی، "تخمین استحکام شکست مود ترکیبی یک نوع سیمان ساروجی ریز دانه"، هشتمین کنگره بین المللی مهندسی عمران، (۱۳۸۸).

۸. محمدرضا ملک پور ، محمدمحسن توفیق، " تعیین درصد بهینه آهک و رس در ستون های سنگی از نوع شفته آهکی با استفاده از مطالعات آزمایشگاهی و شبکه عصبی مصنوعی"، چهارمین کنگره ملی مهندسی عمران، (۱۳۸۷).

۹. محمدحسین توفیق ، محمدرضا ملک پور، " مطالعه آزمایشگاهی اصلاح خاک های ریزدانه سست با استفاده از ستون های سنگی از نوع شفته آهکی" ، سومین کنگره ملی مهندسی عمران ، (۱۳۸۶)

10. S.A. Barbhuiya, J.K. Gbagbo, M.I. Russell, P.A.M.Basheer , “Properties of fly ash concrete modified with hydrated lime and silica fume”, 2009

۱۱. علیرضا رمضانی ، دانیال غفاریان ،محمدرضا توکلی زاده ، " بررسی مقاومت فشاری و برخی دیگر از ویژگی های ملات شفته آهکی" ، 14th کنفرانس دانشجویان مهندسی عمران سراسرکشور ، (۱۳۸۷)

۱۲. سیاوش فرازمان ، رضا عطارنژاد ، " معرفی ساروج و بررسی آن به عنوان ملات سازگار با محیط زیست" ، اولین همایش تخصصی مهندسی محیط زیست ، (۱۳۸۵)

13. Robert Cerny, Ales Kunca , Vratislav Tydlitat , Jaroslava Drchalova, Pavla Rovnani kova, “Effect of pozzolanic admixtures on mechanical, thermal and hygric properties of lime plasters”, 2006
14. K. Ramamurthy, E.K. Kunhanandan Nambiar, G. Indu Siva Ranjani, “A classification of studies on properties of foam concrete”, 2009
15. Paulina Faria, Fernando Henriques, Vasco Rato, “Comparative evaluation of lime mortars for architectural conservation”, 2008