مروری بر مطالعات انجام شده در خصوص تاثیر خاکستر پوسته برنج (RHA) و متاکائولن در بهسازی و تثبیت خاک

محمد حسین محمدرضایی[۱]، مهدی خداپرست[*،۲]
۱- دانشجوی کارشناسی ارشد ارشد ژئوتکنیک دانشگاه قم
۲- دانشیار گروه عمران دانشکده فنی دانشگاه قم
khodaparast@qom.ac.ir

خلاصه

با توجه به افزایش جمعیت، رشد صنعت و افزایش منابع آلوده کننده، محیط زیست بیش از پیش در معرض تهدید قرار گرفته است. یکی از منابع قابل توجه تولید گاز کربن دی اکسید، کارخانجات تولید سیمان است. سیمان یکی از اصلی ترین مصالحی است که در بهسازی و تثبیت خاک های مساله دار مورد استفاده قرار می گیرد. بنابراین استفاده از یک ماده جایگزین برای سیمان که دارای خواص و خصوصیات مشابه باشد، از اهمیت بالایی برخوردار است. در این مقاله، برخی از مهم ترین تحقیقات گذشته در خصوص استفاده از مواد سازگار با محیط زیست مانند متاکائولن و خاکستر پوسته برنج برای بهسازی و تثبیت خاک مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. بر اساس نتایج بدست آمده، لزوم بررسی های بیشتر در زمینه استفاده از مواد جایگزین سیمان و توجه بیشتر مهندسان و مجریان به استفاده بیشتر از آن ها بخصوص در برخی از انواع خاک های مسئله دار مورد تاکید می باشد.

کلمات کلیدی: خاکستر پوسته برنج، متاکائولن، تثبیت، حدود اتربرگ

۱. مقدمه

تثبیت خاک شامل اصلاح و بهبود مشخصات و پارامتر های مقاومتی و خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک می باشد. عموما قبل از هرگونه عملیات عمرانی بر روی خاک های مساله دار، نیاز به تثبیت و بهسازی خاک است. خاک های مساله دار، خاک هایی هستند که در پروژه های عمرانی مشکلات فنی و مهندسی زیادی مانند ریزش، ترک خوردگی و نشست نا همگون سازه ها را ایجاد می کنند. به طور کلی مهم ترین روش های تثبیت خاک به چهار دسته تثبیت مکانیکی، تثبیت شیمیایی، تثبیت حرارتی و تثبیت الکتریک تقسیم می شود.

[*] **Corresponding author: توضیحات مربوط به نویسنده مسئول**
Email: khodaparast@qom.ac.ir

انتخاب روش مناسب تثبیت و نوع ماده تثبیت کننده به عوامل متعددی از جمله نوع دانه بندی خاک، مشخصات فیزیکی و شیمیایی خاک و میزان اهمیت پروژه مورد نظر بستگی دارد. در این تحقیق تثبیت از نوع شیمیایی مورد مطالعه قرار گرفته است. منظور از تثبیت شیمیایی، اصلاح ویژگی های مورد نظر خاک به وسیله مواد افزودنی می باشد. در این مطالعه به بررسی تحقیقات انجام شده جهت تثبیت خاک با استفاده از دو افزودنی خاکستر پوسته برنج و همچنین متاکائولن پرداخته می شود. لازم به ذکر است که در برخی موارد در کنار این دو ماده از یک ماده مکمل نیز برای تثبیت بهره گرفته شده است.

نتایج تحقیقات انجام شده نشان داده است که اضافه کردن خاکستر پوسته برنج باعث افزایش مشخصات مکانیکی خاک، مقدار CBR، مقاومت فشاری تک محوری و به طور کلی افزایش مقاومت خاک می گردد. از خاکستر پوسته برنج می توان به عنوان یک افزودنی در بهسازی خاک استفاده کرد و هم چنین آن را دوستدار محیط زیست دانست[۱]. همچنین این ماده به عنوان یک افزودنی مقرون به صرفه در ساخت بتن مورد استفاده قرار می گیرد و مقاومت فشاری و کششی بتن را به صورت قابل ملاحظه افزایش می دهد[۲]. همچنین برای تولید هر تن سیمان، نیاز به سوزاندن ۲/۸ تن مواد اولیه است که این فرایند باعث تولید ۱ تن گاز کربن دی اکسید می شود. همچنین تولید آهک نیز اثرات مخرب زیست محیطی دارد. برای جلوگیری از اثرات مخرب سیمان و آهک در محیط زیست، می توان از ژئوپلیمر ها که از لحاظ قدرت، سختی و پایداری شیمیایی خصوصیات مشابه با سیمان را دارند به عنوان جایگزین سیمان استفاده کرد[۳]. ژئوپلیمر ها به عنوان یک مصالح ساختمانی جدید، مزیت قابل توجهی در کارایی، مصرف انرژی و انتشار گاز های گلخانه ای نسبت به سیمان پرتلند دارند[۴]. ژئوپلیمر متاکائولن، یک ماده آلومینوسیلیکات حرارتی فعال است که به رنگ سفید و کدر می باشد و از رس کائولن در فرایندی با دمای ۶۵۰ تا ۸۰۰ درجه سانتی گراد بدست می آید[۵].

۲. مروری بر تحقیقات پیشین

در سال های گذشته تحقیقات مختلفی در زمینه استفاده از متاکائولن و خاکستر پوسته برنج به منظور بهسازی و تثبیت خاک صورت گرفته است. محققین مختلف با اضافه کردن درصد های وزنی و حجمی مختلف متاکائولن و یا خاکستر پوسته برنج به خاک، آزمایش های مختلفی برروی خاک انجام داده اند. نتایج برخی از این تحقیق ها در ادامه آورده شده است.

۲-۱. تثبیت با استفاده از خاکستر پوسته برنج

جیلی کو و همکاران (۲۰۱۴) اثرات خاکستر پوسته برنج بر استحکام و تراکم پذیری خاک را مطالعه کردند[۶]. این مطالعه آزمایشگاهی با هدف ارزیابی اثرات خاکستر پوسته برنج با درصد های حجمی ۰٪، ۱۰٪، ۲۰٪ و ۳۰٪ بر حدود قوام خاک و پارامترهای تراکم سه نوع خاک با بافت های مختلف انجام شد. مشخصات فیزیکی و شیمیایی سه نوع خاک مورد آزمایش در جدول ۱ آمده است.

جدول۱- مشخصات فیزیکی و شیمیایی خاک ها در تحقیق جیلی کو و همکاران (۲۰۱۴)

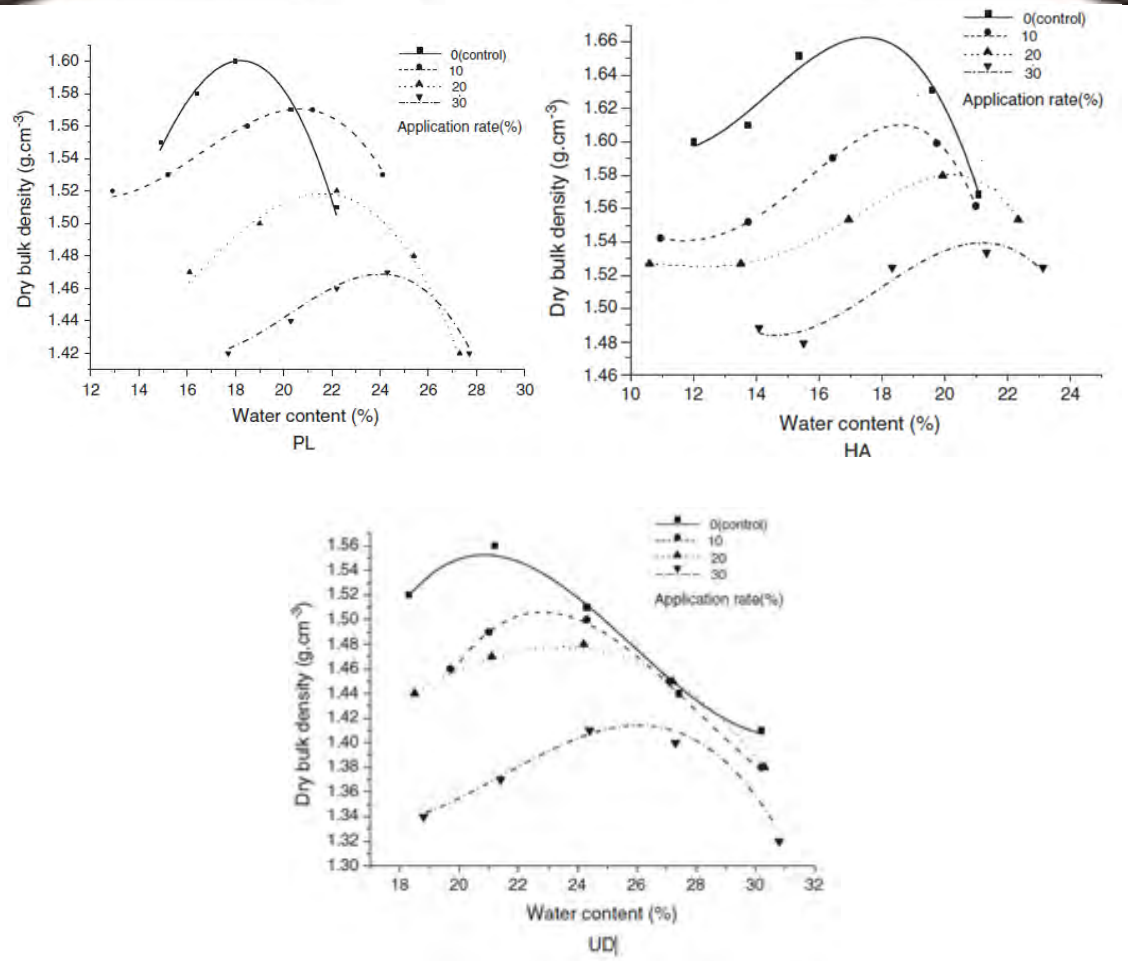
	مصالح (انواع خاک)		
	HA	PL	UD
رس (٪)	۷/۷۱	۱۵/۳۷	۳۱/۴۰
سیلت (٪)	۶۰/۳۳	۶۸/۵۱	۵۰/۱
ماسه (٪)	۳۱/۹۶	۱۶/۱۲	۱۸/۵۰
طبقه بندی بافت	سیلت	سیلت	رس سیلت دار
pH	۸/۰	۸/۱	۸/۱
هدایت الکتریکی	۰/۲۱	۰/۱۶	۰/۱۲
ظرفیت تبادل کاتیون	۱۲/۹۴	۱۲/۳۰	۱۵/۰۰
CaCO3(%)	۴/۳۲	۵/۳۰	۷/۰۰
مواد آلی (٪)	۰/۹۷	۱/۵۶	۱/۵۹

آزمایش ها در تحقیق مذکور تحت رطوبت نسبی ٪۵±۶۵ و دمای میانگین $21\pm2^{\circ}C$ انجام شده و نمونه های خاک از اعماق ۰ تا ۲۰ سانتی متر از زمین های کشاورزی شانگهای چین اخذ شد. همچنین پوسته برنج مورد استفاده در دمای ۱۰۰۰ درجه سانتی گراد سوزانده شد و به رنگ سیاه و خاکستری در آمد. جدول ۲ مشخصات شیمیایی خاکستر پوسته برنج مورد استفاده را نشان می دهد.

جدول۲- مشخصات شیمیایی خاکستر پوسته برنج مورد استفاده در تحقیق جیلی کو و همکاران (۲۰۱۴)

عناصر	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	SO_3	P_2O_3	Cl^{-1}
مقادیر	۸۷/۸۹	۰/۶۶	۰/۵۵	۲/۴۱	۰/۵۶	۲/۵	۰/۱۴	۰/۳	۰/۸۲	۰/۲۵

با توجه به آزمایش های انجام شده توسط این محققین، با اضافه کردن خاکستر پوسته برنج به هر سه نوع خاک، مقادیر حد مایع و حد پلاستیک به دلیل فعالیت ذاتی خاکستر پوسته برنج افزایش یافتند و این محققین بیشترین میزان این افزایش را در حالت اضافه کردن ٪۳۰ خاکستر پوسته برنج گزارش کردند. ایشان همچنین ذکر کردند که نمی توان قضاوت درستی در مورد تغییر نشانه خمیری داشت. ایشان هم چنین با انجام آزمایش پروکتور استاندارد دریافتند که با افزودن خاکستر پوسته برنج به خاک، تغییرات حداکثر چگالی خشک نسبت به درصد رطوبت ملایم تر می شود و هر چه درصد کاربرد خاکستر پوسته برنج افزایش یابد این تغییرات کمتر می شود. جیلی کو و همکاران (۲۰۱۴)، تغییرات چگالی خشک نسبت به رطوبت در درصد های مختلف خاکستر پوسته برنج در هر سه نوع خاک را در نمودار های شکل ۱ نشان دادند.



شکل۱- نمودار های آزمایش پروکتور استاندارد خاک های مورد مطالعه در تحقیق جیلی کو و همکاران (۲۰۱۴)

نتایج این محققین بیان می کند که خاکستر پوسته برنج باعث بهبود مشخصات فیزیکی و مکانیکی خاک می شود. در مجموع علت این مسئله بهبود پایداری دانه بندی خاک در اثر افزودن خاکستر پوسته برنج و مقاوم تر شدن خاک در برابر نیروهای مکانیکی ذکر گردید.

یویی لیو و همکاران (۲۰۱۹) خاک منبسط شونده را با استفاده از خاکستر پوسته برنج و کلسیم کاربید تثبیت کردند [۷]. ایشان با هدف استفاده از منابع زباله، خاکستر پوسته برنج و کلسیم کاربید (RHA/CCR) را به ترتیب به نسبت وزنی ۶۵ به ۳۵ ترکیب کرده و به خاک اضافه نمودند. این محققین برای تثبیت خاک منبسط شونده، افزودن ۱۵٪ مخلوط RHA/CCR و رطوبت ۱/۲ برابر مقدار رطوبت بهینه را بهترین حالت از نظر بهبود مقاومت معرفی کردند. خصوصیات تورم و انقباض خاک منبسط شونده از طریق یک سری آزمایش ها بررسی شد. خاک مورد استفاده در تحقیق مورد اشاره، شامل ۷/۱٪ ماسه، ۴۲/۷٪ سیلت و ۵۰/۲٪ رس بوده و خاک به صورت CH با پلاستیسیته بالا نامگذاری شده است. مشخصات مکانیکی خاک منبسط شونده مورد استفاده بعد از انجام آزمایش های مختلف توسط یویی لیو و همکاران(۲۰۱۹)، در جدول ۳ آمده است.

جدول۳- مشخصات مکانیکی خاک منبسط شونده در تحقیق یویی لیو و همکاران(۲۰۱۹)

وزن مخصوص	حد مایع(٪)	حد پلاستیک(٪)	نشانه خمیری	نسبت تورم آزاد(٪)	پتانسیل تورم(٪)	چگالی خشک حداکثر($g.cm^{-3}$)	رطوبت بهینه(٪)
۲/۶۱	۷۷/۶	۳۶/۹	۴۰/۷	۱۳۲/۰	۲۶/۲۱	۱/۴۷	۲۸/۰

همچنین مشخصات شیمیایی خاک مورد استفاده در تحقیق مذکور، در جدول ۴ آورده شده است:

جدول۴-ترکیبات مصالح مورد استفاده در تحقیق یویی لیو و همکاران(۲۰۱۹)

ترکیبات شیمیایی	درصد جرمی		
	خاک منبسط شونده	خاکستر پوسته برنج	باقیمانده کلسیم کاربید
CaO	۵/۷۶	۱/۵۴	۷۱/۵۴
SiO2	۵۸/۷۱	۷۲/۳۴	۵/۷۳
Na2O	۱/۰۸	۰/۷۵	۱/۲۲
MgO	۲/۰۲	۰/۹۸	۰/۳۴
Al2O3	۱۸/۴۴	۴/۴۳	۳/۸۲
Fe2O3	۷/۱۱	۱/۲۱	۴/۴۶
K2O	۳/۴۵	۳/۵۴	۵/۰۱
Loss	۳/۴۳	۱۵/۲۱	۲/۳۳

ایشان برای مقایسه عملکرد ملات RHA-CCR و سیمان، پنج نسبت مختلف از این مواد را با هم ترکیب نمودند که به طور خلاصه در جدول ۵ قابل مشاهده است:

جدول ۵-ترکیبات ملات بر اساس وزن در تحقیق یویی لیو و همکاران(۲۰۱۹)

نوع ملات	RHA/CCR	RHA(g)	CCR(g)	سیمان(گرم)	ماسه(گرم)
M0	-	-	-	۴۵۰	۱۳۵۰
M1	۲۰:۸۰	۹۰	۳۶۰	-	۱۳۵۰
M2	۳۵:۶۵	۱۵۷/۵	۲۸۲۵	-	۱۳۵۰
M3	۵۰:۵۰	۲۲۵	۲۲۵	-	۱۳۵۰
M4	۶۵:۳۵	۲۹۲/۵	۱۵۷/۵	-	۱۳۵۰
M5	۸۰:۲۰	۳۶۰	۹۰	-	۱۳۵۰

یویی لیو و همکاران(۲۰۱۹) بیان کردند که ترکیب RHA و CCR یک ماده سیمانی را تشکیل داده و مقاومت فشاری ملات RHA-CCR تقریبا نصف ملات سیمان و مقاومت خمشی این ملات تقریبا یک سوم ملات سیمان بوده است. برای ملات RHA-CCR، نسبت اختلاط ۶۵:۳۵ بهترین عملکرد را در تثبیت خاک منبسط شونده با پتانسیل تورم

بالا داشته و هم چنین پتانسیل تورم و فشار تورم خاک، با افزایش میزان ملات، زمان عمل آوری و مقدار اولیه آب کاهش یافته است. از طرفی مقاومت فشاری تک محوری خاک منبسط شونده با افزودن ملات RHA-CCR افزایش یافته است. مقدار آب اولیه نیز تاثیر زیادی در مقدار مقاومت فشاری تک محوری داشته و نتایج آزمایش، امکان سنجی و اثربخشی این ماده سیمانی را اثبات کرده است.

باقریان و همکاران (۱۳۸۴) نیز از خاکستر پوسته برنج در تثبیت خاک ها همراه با آهک استفاده کردند[۸]. در تحقیق مذکور، خاک مورد نظر متورم شونده و از نوع ریزدانه رسی و یا رس لای دار بوده است که به منظور افزایش مقاومت و تسریع سرعت واکنش آهک با آب، از افزودنی خاکستر پوسته برنج نیز استفاده شد. مشخصات فنی خاک مورد آزمایش در تحقیق باقریان و همکاران[۸] در جدول ۶ آورده شده است:

جدول۶- مشخصات فنی خاک مورد آزمایش در تحقیق باقریان و همکاران[۸]

چگالی ذرات	حد روانی	حد خمیری	نشانه خمیری	حد انقباض	PH
۲/۷۹	۲۹	۲۱	۸	۱۹	۶/۵

پوسته برنج استفاده شده از نوع طارم محلی بوده که آن را تحت دمای کنترل شده ای سوزانده و از آن خاکستری به رنگ سفید همراه با دانه های سیاه و با وزن مخصوص ۱/۸۲۷ بدست آمده است. در جداول ۷ و ۸، آنالیز شیمیایی خاک و خاکستر پوسته برنج مصرفی در تحقیق باقریان و همکاران[۸] نشان داده شده است:

جدول۷- آنالیز شیمیایی خاک مورد آزمایش(به درصد) در تحقیق باقریان و همکاران[۸]

نوع عنصر	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	Cl
مقدار آن در خاکستر	۵۵	۱۵	۷	۸	۲	۰/۰۱

جدول۸- آنالیز شیمیایی خاکستر پوسته برنج مصرفی در تحقیق باقریان و همکاران[۸]

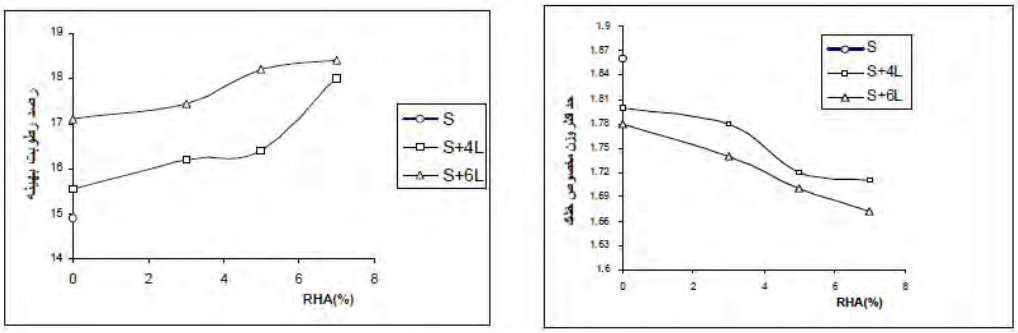
نوع عنصر	SiO_2(%)	Na(ppm)	K(ppm)	Ca^{2+}(ppm)	Mg^{2+}(ppm)	P(ppm)
مقدار آن در خاکستر	۸۳/۷	۰/۱۱۴	۰/۱۲۴	۰/۰۱۶	۶۶/۱	۲۴/۷

ایشان درصد های مختلفی از خاک، آهک و خاکستر پوسته برنج به خاک افزودند که در جدول ۹ آورده شده است:

جدول۹- ترکیبات و علائم مورد استفاده در تحقیق باقریان و همکاران[۸]

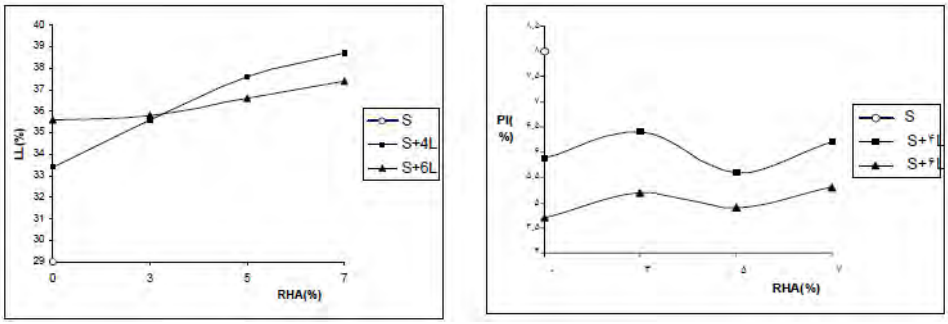
نوع ترکیب	علائم استفاده شده
خاک خالی	S
خاک + ۴ درصد آهک	S+4L
خاک + ۴ درصد آهک + ۳ درصد خاکستر	S+4L+3R
خاک + ۴ درصد آهک + ۵ درصد خاکستر	S+4L+5R
خاک + ۴ درصد آهک + ۷ درصد خاکستر	S+4L+7R
خاک + ۶ درصد آهک + ۳ درصد خاکستر	S+6L+3R
خاک + ۶ درصد آهک + ۵ درصد خاکستر	S+6L+5R
خاک + ۶ درصد آهک + ۷ درصد خاکستر	S+6L+7R

باقریان و همکاران[۸] برای ساخت نمونه های برش و CBR، خاک را از الک ۴ عبور داده و به همراه مواد افزودنی خشک نموده و سپس بر اساس درصد ترکیبات مورد نیاز به خاک مواد افزودنی اضافه نمودند. برای آزمایش برش مستقیم از خاک متراکم کوبیده شده با استفاده از نمونه گیر استوانه ای نمونه برداشته و آن را با سه سربار مختلف ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ کیلوپاسکال تحت آزمایش قرار دادند. در شکل ۲، حداکثر وزن مخصوص خشک و رطوبت بهینه خاک مورد استفاده در تحقیق مذکور نشان داده شده است.



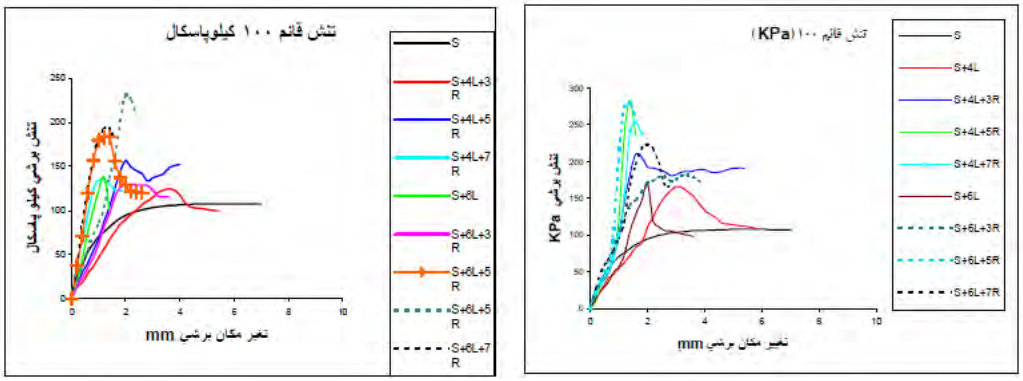
شکل۲-تاثیر RHA بر حداکثر وزن مخصوص خشک و رطوبت بهینه خاک در تحقیق باقریان و همکاران[۸]

با توجه به شکل بالا، ایشان دریافتند که وزن مخصوص خشک خاک با افزودن آهک و خاکستر پوسته برنج کاهش و میزان رطوبت بهینه افزایش یافته است. در شکل ۳ تاثیر افزودن خاکستر پوسته برنج بر حدود اتربرگ خاک در تحقیق مذکور نشان داده شده است.



شکل۳-تاثیر آهک و RHA بر حدود اتربرگ خاک در تحقیق باقریان و همکاران [۸]

بر اساس شکل ۳ باقریان و همکاران[۸] بیان کردند که با اضافه نمودن ۴ و ۶ درصد آهک به خاک حد روانی آن به ترتیب ۱۵ و ۲۲/۷ درصد افزایش ولی دامنه خمیری ۲۶ و ۴۱ درصد کاهش پیدا کرده است. همچنین با افزودن خاکستر پوسته برنج به خاک حد روانی افزایش یافته ولی نشانه خمیری خاک ابتدا افزایش سپس کاهش و دوباره افزایش پیدا کرده است. ایشان همچنین بیان کردند که برای هر دو ترکیب خاک با آهک، با افزودن ۵ درصد خاکستر پوسته برنج کمترین PI بدست آمد. در مطالعه مورد اشاره نمودار تنش کرنش آزمایش برش مستقیم برای سربار ۱۰۰KPA در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل۴- نمودار تنش کرنش ازمایش برش مستقیم(سربار=۱۰۰kpa) در تحقیق باقریان و همکاران[۸]

ایشان نتیجه گرفتند که برای خاک طبیعی c و φ خاک به ترتیب ۳۹ کیلوپاسکال و ۳۴/۸ درجه بوده و با افزودن ۴ درصد آهک، c و φ خاک به ترتیب ۵۳/۵ و ۱۴/۸ درصد و با افزودن ۶ درصد آهک، ۶۱/۸ و ۵/۴ درصد افزایش از خود نشان داده است. همچنین با افزودن ۵ درصد خاکستر پوسته برنج به ترکیب خاک و آهک، مقادیر c و φ در قیاس با حالت ترکیب خاک و آهک بدون هیچ آمیزه ای از خاکستر پوسته برنج برای ترکیب خاک با ۴ درصد آهک به ترتیب ۱۵۴ و ۸/۹ درصد و برای ترکیب خاک با ۶ درصد آهک به ترتیب ۱۶۹ و ۵/۱ درصد افزایش یافته است.

۲-۲. تثبیت با استفاده از متاکائولن

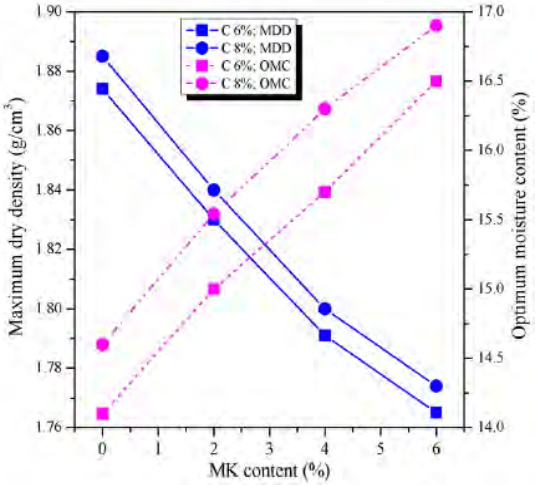
از جمله تحقیقات انجام شده در خصوص استفاده از متاکائولن می توان به مطالعه ژیلانگ وو و همکاران (۲۰۱۶) اشاره کرد که آنها به ارزیابی مقاومت و ریز ساختار خاک متراکم شده اصلاح شده با سیمان و متاکائولن پرداختند[۹]. در تحقیق مورد اشاره نمونه خاک مورد استفاده، از شهر لیانیونگانگ در شرق چین برداشته شده و از نوع ماسه سیلت دار است.

سیمان پرتلند معمولی و متاکائولن مورد استفاده در این تحقیق، در چین و آلمان تولید شده و خصوصیات اکسید سیمان پرتلند معمولی و متاکائولن مصرفی توسط ژیلانگ وو و همکاران(۲۰۱۶) نیز در جدول ۱۰ قابل مشاهده است.

جدول۱۰- ترکیبات اکسید سیمان پرتلند معمولی و متاکائولن مصرفی در تحقیق ژیلانگ وو وهمکاران (۲۰۱۶)

مقدار اکسیدها(٪)	SiO_2	Al_2O_3	CaO	Fe_2O_3	SO_3	MgO	Na_2O	K_2O	Loss
سیمان پرتلند معمولی	۱۹	۶/۵	۶۵	۳/۲	۲/۵	۰/۸	۰/۵	۰/۴	۲/۱
متاکائولن	۵۲	۴۰	۱/۰	۲/۵	–	۰/۸	۰/۵	–	–

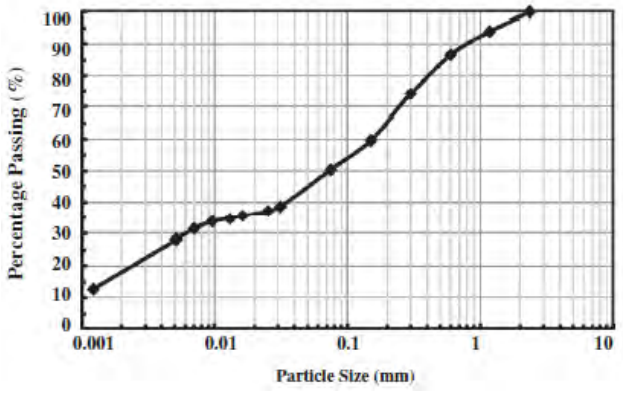
در تحقیق مذکور برای یافتن چگالی خشک حداکثر و رطوبت بهینه، از آزمایش پروکتور استاندارد استفاده شده است. شکل ۵ رابطه بین مقادیر مختلف سیمان و متاکائولن و مقدار رطوبت بهینه در این تحقیق نشان داده شده است.



شکل۵-رابطه بین حداکثر چگالی خشک، رطوبت بهینه و مقدار متاکائولن در تحقیق ژیلانگ وو وهمکاران (۲۰۱۶)

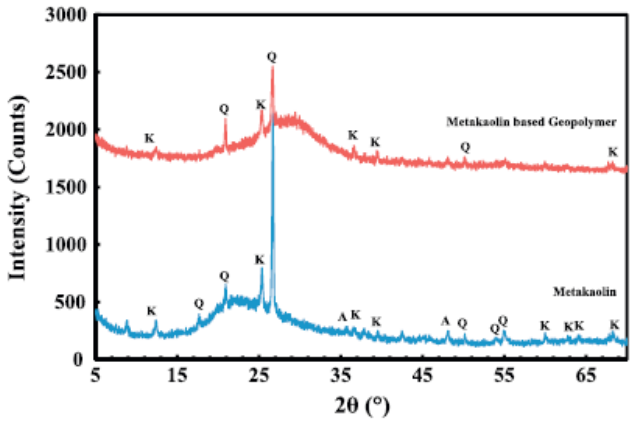
همچنین ژیلانگ وو و همکاران (۲۰۱۶) ذکر کردند که با افزودن متاکائولن به خاک اصلاح شده با سیمان، مشخصات مکانیکی خاک از جمله UCS و STT بهبود یافته است.

موژانگ و همکاران (۲۰۱۳) به صورت تجربی ژئوپلیمر مبتنی بر متاکائولن را به عنوان نسل جدید تثبیت کننده خاک امکان سنجی کردند[۱۰]. در تحقیق مورد اشاره، خاک رس با ژئوپلیمر مبتنی بر متاکائولن در غلظت های مختلف (از ۳ تا ۱۵ درصد وزنی از خاک تثبیت نشده در مقدار مطلوب آب آن) تثبیت شد تا امکان سنجی ژئوپلیمر در تثبیت خاک بررسی شود. نمونه های خاک تثبیت شده با ژئوپلیمر با آزمایش های مقاومت فشاری، اندازه گیری حجم در طول عمل آوری، تهیه تصاویر SEM، طیف سنجی اشعه ایکس، پراکندگی انرژی (EDX) و پراش اشعه X (XRD) بررسی شدند. خاک مورد استفاده در این آزمایش در سیستم طبقه بندی متحد خاک (USCS) به صورت CL (خاک رس با پلاستیسیته کم) نامگذاری شده است و نشانه خمیری آن ۱۵٪ و حد مایع آن ۲۹٪ است. با انجام آزمایش پروکتور استاندارد مشخص شد که مقدار رطوبت بهینه خاک برابر ۱۵٪ و ρ_{max} برابر ۱/۸g/cm^3 است. منحنی دانه بندی خاک در تحقیق مذکور در شکل ۶ نشان داده شده است.



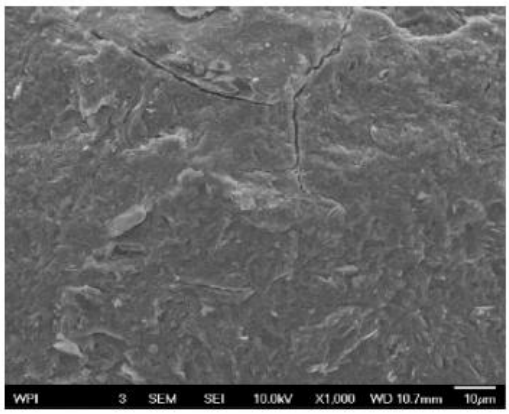
شکل۶- منحنی توزیع اندازه ذرات خاک مورد مطالعه در تحقیق موژانگ و همکاران (۲۰۱۳)

همچنین در مطالعه مورد اشاره علاوه بر متاکائولن، از سیمان پرتلند نوع دو نیز برای تثبیت خاک استفاده شد. علاوه بر آن از محلول سدیم هیدروکسید و سیکات هیدروکسید به عنوان فعال کننده ژئوپلیمر استفاده شد. عمل آوری متاکائولن در دمای ۲۳ درجه سانتی گراد و رطوبت نسبی ۵۰-۴۰ درصد انجام شده و آزمایشهای XRD و SEM با هدف تعیین ویژگی های کانی شناسی و ریز ساختاری و آزمایش مقاومت فشاری محدود نشده در دوره های ۷ یا ۲۸ روزه بر روی نمونه های متاکائولن انجام شده است. در شکل ۷ الگوی XRD برای متاکائولن و ژئوپلیمر مبتنی بر متاکائولن نشان داده شده است.



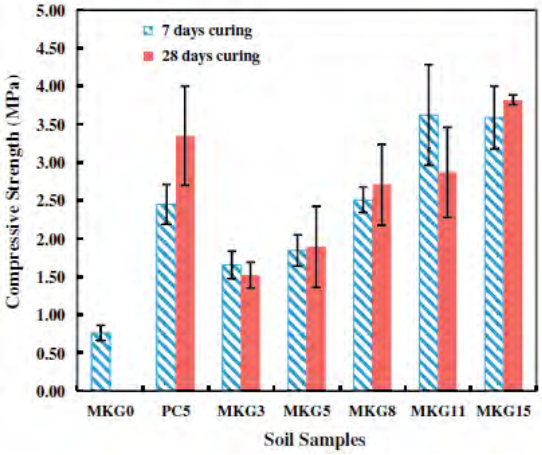
شکل ۷- الگوی XRD متاکائولن و ژئوپلیمر مبتنی بر متاکائولن(K:کائولینیت، Q:کوارتز و A:آناتاز) در تحقیق موژانگ و همکاران(۲۰۱۳)

شکل ۸ عکس SEM را پس از عمل آوری ۲۸ روزه ژئوپلیمر مبتنی بر متاکائولن در تحقیق موژانگ و همکاران (۲۰۱۳) نشان می دهد.



شکل ۸- عکس SEM ژئوپلیمر مبتنی بر متاکائولن پس از عمل آوری ۲۸ روزه در تحقیق موژانگ و همکاران (۲۰۱۳)

در شکل ۹ مقاومت فشاری محدود نشده خاک تثبیت شده با متاکائولن و خاک تثبیت شده با سیمان نشان داده شده است و می توان نتایج حاصل از آزمایشهای مختلف را با هم مقایسه کرد.



شکل ۹- منحنی UCS برای خاک تثبیت شده با متاکائولن،خاک و خاک تثبیت شده با سیمان پرتلند پس از ۷ و ۲۸ روز عمل آوری در تحقیق موژانگ و همکاران(۲۰۱۳)

نتایج SEM و XRD نشان داد که ژل های ژئوپلیمر مبتنی بر متاکائولن (MKG) به طور مؤثر در خاک توسعه یافته و به ذرات خاک کمک کرده تا ساختارهای فشرده تری ایجاد کنند و خصوصیات مکانیکی و ثبات حجم آن را بهبود بخشند. موژانگ و همکاران (۲۰۱۳) بیان کردند که مقادیر UCS خاک تثبیت شده با متاکائولن بسیار بیشتر از خاک تثبیت نشده است و زمانی که بیش از ۱۱٪ درصد متاکائولن در تثبیت خاک استفاده شود، مقادیر UCS بیشتر از حالتی است که ۵٪ سیمان برای تثبیت خاک استفاده شده است. ایشان هم چنین نتیجه گرفتند که افزایش مقدار متاکائولن باعث افزایش مقاومت فشاری و سختی خاک شده است، در حالی که این افزایش مقاومت به پارامتر های مختلفی از جمله فشار، دما و رطوبت عمل آوری، مقدار آب، نوع فعال کننده و... بستگی داشته است. همچنین نتایج نشان داد که متاکائولن برای بهبود مشخصات مکانیکی خاک، به زمان کمتری از سیمان نیاز دارد. علاوه بر این موژانگ و همکاران(۲۰۱۳) بیان کردند که خاصیت انعطاف پذیر خاک های تثبیت شده با ژئوپلیمر می تواند به طور موثری باعث کاهش ترک در طول ساخت و ساز، روکش و بهره برداری روسازی شود.

۳. چالشهای تحقیقاتی و بحث

همانطور که در قبل اشاره شد عمده تحقیقات انجام شده در رابطه با افزودن خاکستر پوسته برنج و متاکائولن مربوط به خاک های ریز دانه رسی و سیلتی و بعضا ماسه ای بوده و تاکنون بررسی اثر استفاده از دو افزودنی خاکستر پوسته برنج و متاکائولن بر خاک مارن به ندرت مورد توجه قرار گرفته است. خاک مارن یکی از انواع مهم خاک های ریزدانه است که در برخی نقاط کشور، گستردگی قابل توجهی دارد و دارای رفتار ویژه‌ای در حالت خشک و مرطوب است. در ادامه به بررسی خاک مارن به عنوان یکی از مهم ترین انواع خاک های مورد توجه جهت بهسازی پرداخته می شود.

از دیدگاه مهندسی ژئوتکنیک به کلیه خاک هایی که احداث سازه بر روی آنها با مشکل مواجه بوده و یا تحت تاثیر شرایط آب و هوایی و رطوبت تغییراتی در آن ها ایجاد می شود، خاک های مسئله دار یا مشکل آفرین می گویند که خاک مارن یکی از این نوع خاک ها به حساب می آید [۱۱]. خاک مارن از مصالحی است که مقدار کربنات کلسیم آن بین ۳۵ تا ۶۵ درصد بوده و به همان نسبت مقدار رس در آنها متغیر است. همچنین خواص مارن وابسته به محتوای کربنات و نوع کانی های رسی موجود در آن می باشد. مارن در شرایط خشک و تر رفتار منحصر به فردی از خود نشان می دهد به گونه

ای که با وجود مقاومت بسیار بالای آن در حالت خشک، مقاومت آن در هنگام اشباع به میزان قابل توجهی (تا ۸۵ درصد) کاهش می یابد [۱۲].

عمده نکات منفی در عملکرد خاک های مارنی که موجب ایجاد مشکلاتی در پروژه های عمرانی و ژئوتکنیکی شده است، شامل فرسایش و هوازدگی سریع، گسیختگی های پی ها و شیب ها، ترک های کششی در جاده ها، گسترش ناپایداری ها در شیب های طبیعی و ترانشه ها و شسته شدن خاک ها می باشد. در این خصوص اغلب گسیختگی ها بعد از چندین دوره بارانی صورت می گیرد و سیکل های مرطوب و خشک تأثیرات مهمی روی رفتار خاک های مارنی دارد [۱۳].

در حالت تثبیت خاک با افزودن خاکستر پوسته برنج با درصد های مختلف با توجه به نتایج آزمایش حدود اتربرگ، مشاهده شد که با افزودن خاکستر پوسته برنج، حد مایع و حد پلاستیک افزایش می یابند که بیشترین افزایش در حالتی است که ۳۰٪ خاکستر پوسته برنج با خاک مخلوط شد. همچنین افزودن خاکستر پوسته برنج سبب افزایش رطوبت بهینه و پایداری دانه بندی می شود و این افزایش در پایداری دانه بندی، افزایش مقاومت خاک در برابر نیروهای مکانیکی را به همراه دارد. در بررسی تثبیت خاک با ملات خاکستر پوسته برنج و کلسیم کاربید، نتایج نشان داد که اختلاط خاکستر پوسته برنج و کلسیم کاربید با نسبت ۶۵ به ۳۵ بهترین عملکرد را در تثبیت دارد. نتایج در بررسی تثبیت با استفاده از خاکستر پوسته برنج و آهک با نسبت های مختلف نشان می دهد که به هر میزان که مقادیر خاکستر پوسته برنج و آهک افزایش یابند، مقاومت برشی و رطوبت بهینه خاک افزایش می یابد و کاهش مقدار وزن مخصوص خشک به علت سبک تر بودن خاکستر پوسته برنج و آهک نسبت به خاک می باشد.

برای بررسی اثر متاکائولن بر بهبود مشخصات خاک، این ماده با سیمان مخلوط شده و به خاک اضافه شده است که بر اساس نتایج مطالعات قبلی محدوده نسبت اختلاط بهینه متاکائولن با سیمان بین یک سوم تا یک دوم است. همچنین نتایج نشان داده است که افزودن متاکائولن به خاک سبب افزایش رطوبت بهینه می شود. هم چنین نمودار مقادیر UCS بر حسب مقدار متاکائولن نشان می دهد که مقادیر UCS با افزایش مقدار متاکائولن تا مقدار مشخصی، افزایش می یابد ولی بعد از مقدار آستانه متاکائولن، با افزایش مقدار متاکائولن مقادیر UCS رو به کاهش می رود. به منظور مقایسه اثر متاکائولن و سیمان، از یک نمونه خاک با ۵٪ سیمان پرتلند معمولی نوع دو نیز استفاده شده و نتایج نشان داده است که مقادیر UCS خاک تثبیت شده با متاکائولن بسیار بیشتر از خاک تثبیت نشده است و زمانی که بیش از ۱۱٪ درصد متاکائولن در تثبیت خاک استفاده شود، مقادیر UCS بیشتر از حالتی است که ۵٪ سیمان برای تثبیت خاک استفاده شده است. همچنین افزایش مقدار متاکائولن باعث افزایش مقاومت فشاری و سختی خاک شده در حالی که این افزایش مقاومت به پارامتر های مختلفی از جمله فشار، دما و رطوبت عمل آوری، مقدار آب، نوع فعال کننده و... بستگی دارد. همچنین نتایج نشان داد که متاکائولن برای بهبود مشخصات مکانیکی خاک، به زمان کمتری از سیمان نیاز دارد.

۴. نتیجه گیری

بر اساس نتایج بدست آمده در مطالعات گذشته، افزودن خاکستر پوسته برنج (RHA) و متاکائولن باعث افزایش مقاومت و بهبود مشخصات مکانیکی خاک می شود. با توجه به مرور تحقیقات مورد اشاره و بررسی آزمایشها و نتایج آنها، افزودن RHA و متاکائولن سبب افزایش مقاومت فشاری محدود نشده، CBR، سختی، مقاومت برشی، حد پلاستیک و مایع، چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی خاک شده و از طرفی کاهش کرنش انقباضی و فشار تورم خاک را در پی دارد. با تحلیل نتایج تحقیقات مذکور می توان نتیجه گرفت که میزان افزودن خاکستر پوسته برنج و متاکائولن به خاک، به عوامل مختلفی نظیر نوع خاک، میزان رطوبت خاک، مشخصات فیزیکی و شیمیایی خاک و همچنین میزان اهمیت پروژه بستگی دارد و می بایست در هر پروژه با توجه به شرایط آن، مقدار خاکستر پوسته برنج و متاکائولن مصرفی مشخص گردد.

در مجموع عمده تحقیقات انجام شده مربوط به استفاده از یکی از افزودنی های متاکائولن و RHA به همراه سیمان، آهک و دیگر مواد رایج در تثبیت خاک بوده و در حوزه تثبیت خاک، به بررسی اثر همزمان این دو افزودنی و بی نیازی از استفاده از سیمان کمتر پرداخته شده است. همچنین بررسی اثر افزودنی های خاکستر پوسته برنج و متاکائولن در خاک مارن که رفتار های ویژه‌ای در حالت خشک و مرطوب دارد و غالبا در پروژه های مختلف مشکلات عدیده‌ای را ایجاد می کند، از اهمیت بالایی برخوردار است که می تواند موضوع تحقیقات بیشتر در آینده باشد.

۵. مراجع

1.Choobasti, A. J. Ghodrat, H. Vahdatirad, M. J. Firouziani, S. Barari, A. Torabi, M. and Bagherian, A. (2010), “Influence of using rice husk ash in soil stabilization method with lime ” , Front. Earth Sci. China 4(4), 471–480.

2.Rodrı´guez, G. (2006), “Strength development of concrete with rice-husk ash”, Cement & Concrete Composites 28, 158–160.

3.Kaur, K. Singh, J. and Kaur, M. (2018), “Compressive strength of rice husk ash based geopolymer: The effect of alkaline activator”, Construction and Building Materials, 169, 188–192.

4. Zhu, H. Liang, G. Zhang, Z. Wu, Q. and Du, J. (2019), “Partial replacement of metakaolin with thermally treated rice husk ash in metakaolin-based geopolymer”, Construction and Building Materials 221, 527–538.

5. Kolovos, K.G. Asteris, P.G. Cotsovos, D.M. Badogiannis, E. and Tsivilis, S. (2013), “Mechanical properties of soilcrete mixtures modified with metakaolin”, Construction and Building Materials 47, 1026–1036.

6. Qu, J. Li, B. Wei, T. Li, T and Liu, B. (2014), “Effects of rice-husk ash on soil consistency and compactibility”, Catena 122, 54–60.

7. Liu, Y. Chang, Ch. Namdar, A. She, Y. Lin, Ch. H. Yuan, X. and Yang, Q. (2019), “Stabilization of expansive soil using cementing material from rice husk ash and calcium carbide residue”, Construction and Building Materials 221, 1–11.

۸. باقریان، ا. جانعلی زاده، ع. و حسامی، س. (۱۳۸۴)، "استفاده از خاکستر پوسته برنج در تثبیت خاکها با آهک"، دومین کنگره ملی مهندسی عمران، تهران، دانشگاه علم و صنعت، تهران.

9. Wua, Z. Deng, Y. Liu, S. Liu, Q. Chen, Y. and Zha, F. (2016), “Strength and micro-structure evolution of compacted soils modified by admixtures of cement and metakaolin”, Applied Clay Science 44–51.

10.Zhang, M. Guo, H. El-Korchi, T. Zhang, G. and Tao, M. (2013), “Experimental feasibility study of geopolymer as the next-generation soil stabilizer”, Construction and Building Materials 47, 1468–1478.

۱۱. مهدی زاده نادری، م. (۱۳۹۶)."شناخت خاک مارن و بهسازی این خاک و سازه ساخته شده روی آن"، کنفرانس بین المللی عمران، معماری و شهرسازی ایران معاصر، ایران، تهران.

۱۲. پاپی، م. دهقانی، م. امیری، م. (۱۳۹۷)." بررسی تأثیر حرارت بر مقاومت فشاری و وارفتگی مارن جنوب ایران" سومین کنفرانس ملی مهندسی ژئوتکنیک، ایران، تهران.

13. Ouhadi, V.R. and Yong, R.N. (2003), “The role of clay fractions of marly soils on their post stabilization failure”, Engineering Geology 70, 365–375.