Archive of SID

تثبیت خاکهای منتخب از حاشیه شرقی کویر نمک با آهک و سیمان*

یونس نیازی (۱)

چکیده تحقیقات انجام شده در راستای شناخت خاکهای مناطق کویری کشور از دیدگاه مهندسی راه، اندک است. در این مناطق تهیه مصالح متعارف مورد نیاز برای ساخت لایه‌های روسازی بعضاً با مشکلات و هزینه زیاد همراه است. تحقیق حاضر بررسی خواص ژئوتکنیکی چهار نمونه خاک مناطق حاشیه شرقی کویر نمک و امکان کاربرد آنها در روسازی راههای منطقه پس از تثبیت با آهک و سیمان را در برمی‌گیرد. انتخاب خاکها به گونه‌ای انجام شد که نمونه‌ها تا حد امکان دربرگیرنده مشخصه‌های عمومی خاکهای منطقه باشند. تکنیکهای استاندارد برای تعیین خواص فیزیکی، شیمیائی و کانی‌شناسی چهار نمونه خاک بکار گرفته شد. تأثیر درصد آهک و سیمان و دوره نگهداری بر خواص مخلوطهای خاک، آهک و سیمان مورد بررسی قرار گرفت. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که خاکهای لس قابلیت تثبیت با آهک و سیمان و خاکهای ماسه‌ای قابلیت تثبیت با سیمان را داشته و می‌توان از آنها در روسازی راه‌های منطقه استفاده نمود. لیکن خاکهای نمکی حاوی املاح تبخیری زیاد، به تثبیت پاسخ نمی‌دهند.

واژه‌های کلیدی خاکهای کویری، تثبیت، آهک، تثبیت، سیمان، روسازی

The Stabilization of Selected Soils from Eastern Fringes of Kavir-e Namak with Lime and Cement

Y. Naiazi

Abstract *Little research has been carried out to characterize Iranian desert solis from highway engineering point of view sofar. In such areas conventional paving materials are sometimes difficult and costly to provide. The research presented herein include studying the geotechnical properties of four soils sampleds from eastern fringes of Kavir-e Namak, and determining their suitability as paving materials once stabilized with lime and cement. Selection and sampling of soils were accomplished so that they represent the general characteristics of soils in the area. Standard techniques were used to determine the physico-chemical and mineralogical properties of soils. The influence of lime-cement content and curing period on the properties of lime-cement-soil mixtures were investigated. The results show that loess soils are amenable to stabilization with lime and cement while sandy soils are amenable to stabilization with cement, and both might be used as paving materials. But, saline soils containing high proportions of salts do not respond to stabilization.*

Key Words Desert Soils, Stabilization, Lime, Cement, Pavement Construction.

---

* نسخه اولیه مقاله در تاریخ ۸۰/۶/۴ و نسخه نهایی آن در تاریخ ۸۰/۷/۱۴ به دفتر نشریه رسیده است.

۱ - استادیار دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

www.SID.ir

Archive of SID

مقدمه

تثبیت خاک برای بهبود بخشیدن به خواص مهندسی خاکهای نامرغوب در احداث سازه‌های مهندسی عمران مثل راه‌ها، فرودگاه‌ها، خاکریزها، سدها و پی‌های کم‌عمق، بکار می‌رود. نوع تثبیت انتخابی در هر پروژه بستگی به ماهیت سازه و خواص ژئوتکنیکی و فیزیکی - شیمیائی خاکهای مورد نظر دارد. براساس پاسخ اجزاء متشکله خاک به تثبیت، دستورالعملهائی برای تعیین مناسب بودن خاک جهت هر نوع تثبیت پیشنهاد شده است[11,12]. با وجود این، در عمل انتخاب مناسبترین ماده تثبیت کننده و میزان آن، به‌طور معمول، بر مقاومت فشاری محدوده نشده ۷ روزه خاک تثبیت شده استوار است[7,9,11].

اگرچه تکنیکهای تثبیت خاک با توجه به تحقیقات صورت گرفته در طی چند دهه گذشته اغلب شناخته شده است، لیکن در بیشتر موارد اطلاعات کافی برای ارزیابی میزان بهبود در خواص مهندسی مورد نظر و آثار احتمالی تثبیت بدون انجام بررسیهای آزمایشگاهی برروی خاکهای مورد نظر برای استفاده در پروژه فراهم نمی‌شود.

علیرغم این واقعیت که مناطق کویری دربر گیرنده حدود دو سوم خاک کشور می‌باشد، برروی خاکهای مهندسی این مناطق، تاکنون، مطالعات ناچیزی انجام شده است. وجود این ضعف و نیز، کمبود مصالح متعارف مرغوب که در فاصله حمل اقتصادی در منطقه قابل دستیابی باشد، بعضاً مشکلاتی را در اجرای پروژه‌های راهسازی در این مناطق ایجاد می‌کند.

موضوع این تحقیق بررسی امکان کاربرد آهک شکفته و سیمان در بهبود بخشیدن به خواص مهندسی خاکهای منتخب از مناطق حاشیه شرقی کویر نمک به‌منظور کاربرد در لایه‌های روسازی راههای منطقه است. انتخاب سیمان و آهک با توجه به سوابق مثبت استفاده از آنها و نیز امکان تهیه و کاربرد در محل صورت گرفته است.

واکنشهای خاک - آهک

افزودن آهک به خاک ریزدانه در صورت وجود آب شروع واکنشهای متعددی را موجب می‌شود. تبادل یونی و تجمع سبب بهبود فوری خواص خمیری، کارپذیری و مقاومت عمل‌آوری نشده و نیز نمودار تنش-کرنش می‌گردد. همچنین، ممکن است واکنش پوزولانی برای تشکیل مواد سیمانی گوناگون که مقاومت و دوام مخلوط متراکم شده را افزایش می‌دهد، روی دهد[5,12]. مطالعات صورت گرفته با استفاده از طیف پراش اشعه X(XRD) و نیز میکروسکوپ الکترونی بر روی خاک تثبیت شده با آهک، نشان داده است که واکنش پوزولانی را می‌توان واکنشی آهسته و مداوم در شرایط وجود $Ca(oH)_2$ و سیلیس و یا آلومین محلول توصیف نمود. واکنشهای پوزولانی به زمان و دما وابسته‌اند. کسب مقاومت نهائی عمل‌آوری شده تدریجی است اما ممکن است در پاره‌ای موارد سالها ادامه یابد. دماهای کمتر از ۱۲ تا ۱۵ درجه سانتی‌گراد تأخیر واکنشها و دماهای بالاتر تسریع آنها را سبب می‌گردند[5].

واکنشهای خاک - سیمان

در صورت وجود آب، سیلیکاتها و آلومیناتهای کلسیم سیمان ترکیبات هیدراته‌ای را تشکیل می‌دهند که بنوبه خود خمیر سیمان سخت شده با استحکام زیاد را بوجود آورده مصالح مخلوط شده با سیمان را در خود می‌گیرند. واکنش هیدراته شدن با توجه به‌اینکه از سطح ذره سیمان به پیش می‌رود، کند بوده و حتی ممکن است مرکز ذره اصلاً هیدراته نشود. از این‌رو روند هیدراته شدن به‌طور مداوم در حال کاهش است که خود بیانگر علت کاهش

www.SID.ir

Archive of SID

سریع در روند کسب مقاومت با گذشت زمان در مصالح تثبیت شده با سیمان می‌باشد. تشکیل یا عدم تشکیل پیوند بین ساختار سیمان سخت شده و ذرات مصالح مورد تثبیت به ترکیب شیمیائی مصالح بستگی دارد[4].

علاوه بر سیلیکاتها و آلومیناتهای کلسیم هیدراته، هیدروکسید کلسیم از دیگر فرآورده‌های هیدراته شدن سیمان پرتلند است که در صورت وجود مصالح پوزولانی در خاک مورد تثبیت قادر است با آنها وارد واکنش شده و مواد سیمانی اضافی تولید نماید. تحقیقات متعدد نشان داده است که مواد سیمانی شکل گرفته در طی سخت‌شدن مخلوط خاک - سیمان از لحاظ ترکیب با خمیر سیمان سخت شده متفاوت است. در اینگونه مخلوطها بازهای قوی تشکیل یافته در خلال هیدراسیون سیمان، مقادیر کمی از سیلیس و آلومین سطحی رس را حل نموده و آنگاه یونهای کلسیم موجود با سیلیس و آلومین حل شده وارد واکنش شده و مصالح سیمانی بوجود می‌آورند. [10,11].

خاکهای مورد مطالعه

در طبقه‌بندی مناطق بیابانی زمین کویر نمک ایران در زمره بیابانهای گرم با زمستانهای سرد محسوب می‌شود. ارتفاع متوسط آن از سطح دریا در حدود ۷۰۰ متر، میزان بارندگی سالیانه آن در حدود ۱۰۰ میلیمتر و تغییرات دمای هوای آن در طول سال بسیار زیاد است به‌طوری که در تابستان به بیش از ۵۰ درجه سانتی‌گراد و در زمستان به زیر صفر می‌رسد و فاقد شرایط حیاتی برای زیست انسان است[21].

در این تحقیق چهار نمونه خاک مورد مطالعه قرار گرفت. نمونه‌های A و B در حوالی مسیر بجستان به بردسکن و نمونه‌های C و D در حوالی مسیر طبس به یزد تهیه شد. تعداد و محل نمونه‌ها بر مبنای داده‌های زمین‌شناسی محل با استفاده از نقشه‌های ۱/۲۵۰۰۰۰ زمین‌شناسی کشور [2] و نیز بررسیهای محلی به‌گونه‌ای انتخاب گردید که تا حد امکان معرف انواع غالب خاکهای قابل مطالعه برای تثبیت در منطقه باشند. با توجه به لزوم یکدست بودن نمونه خاک از لحاظ تأثیر ترکیبات خاک بر واکنشهای تثبیت که در تحقیقات مشابه[6] نیز مورد توجه قرار گرفته، است در کلیه موارد نمونه‌گیری پس از کنارزدن لایه سطحی خاک به عمق ۲۰ سانتی‌متر که بعضاً حاوی ریشه‌های نباتی و یا در مورد خاک دق حاوی درصد بالای املاح تبخیری بود، صورت گرفت.

در مناطق گرمسیری و نیمه‌گرمسیری، خاکها را می‌توان به‌طورکلی به دو دسته خاکهای پس‌ماند حاصل از هوازدگی در جای سنگها و خاکهای آبرفتی تقسیم نمود[1]. از نظر بافت، به‌طور عمده چهار نوع خاک قابل مطالعه برای تثبیت در منطقه وجود دارد که عبارتند از: خاکهای نمکی حاوی رسوبات تبخیری (خاک دق)، خاک لس، خاکهای ماسه‌ای و ماسه‌های روان. لس‌های کویر نمک رسوبات بادی پودر مانند هستند. در خاکهای نمکی منطقه املاح عمدتاً به‌صورت کربنات کلسیم دیده می‌شود که در اثر تبخیر آبهای زیرزمینی حاوی املاح و در نتیجه تجمع نمک در لایه سطحی خاک و یا تبخیر آبهائی که املاح را از قسمتهای دیگر در خود حل و حمل کرده‌اند، به‌وجود می‌آید. خاکهای ماسه‌ای و ماسه‌های روان حاصل تخریب فیزیکی سنگها و خاکهای رسوبی و حمل توسط بادهای شدید هستند[1]. در این تحقیق خاکهای A و D از نوع نمکی، خاک B از نوع لس و خاک C از نوع ماسه‌ای است. دانه‌بندی این خاکها در شکل (۱) و شاخص‌های خواص ژئوتکنیکی و ترکیب کانی‌شناسی آنها در جدول (۱) نشان داده شده است. شاخصهای خواص ژئوتکنیکی این خاکها در مجموع نشان می‌دهد که آنها پائین‌تر از استانداردهای توصیه شده برای راهسازی قرار داشته و ازاین‌رو نیاز به تثبیت دارند.

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۱ خصوصیات فیزیکی و کانی‌شناسی خاکها

خاصیت	نمونه			
	A	B	C	D
طبقه‌بندی از لحاظ اندازه دانه‌ها:				
شن(٪)	–	–	۵	۹
ماسه(٪)	۲	۹	۸۷	۶۲/۵
لای(٪)	۹۵	۸۵	۵	۲۶
رس(٪)	۳	۶	۳	۲/۵
pH	۷/۹۹	۸/۷۳	۷/۱۷	۸/۳۵
حدود اتربرگ:				
حد روانی	۱۹/۵	۵۶/۷	غیرخمیری	۱۶/۷
نشانه خمیری	۰/۲	۲۸/۱	–	۸/۲
چگالی دانه‌ها	۲/۷۵	۲/۷۷	۲/۷۳	۲/۷۶
دانسیته خشک حداکثر (g/cm^3)	۱/۸۹	۱/۶۹	۱/۹۷	۲/۱
رطوبت بهینه(٪)	۱۴	۲۳	۱۲	۹/۵
کانیهای عمده متشکله (XRD):				
رس‌ها	کلریت	کائولینیت	ایلیت	کلریت
	دیکیت	مسکویت	مسکویت	مسکویت
	مسکویت	کلریت	کائولینیت	سپیولیت
کائولینیت	بیوتیت		کائولینیت	
سیلیکاتها	تالک	فلدسپار	فلدسپار	فلدسپار
		تالک	تالک	تالک
اکسیدها،هیدروکسیدها،کربناتها و...	کوارتز	کوارتز	کوارتز	کوارتز
	کلسیت	کلسیت	کلسیت	کلسیت
رده‌بندی در سیستم:				
یونیفاید	ML	MH	SM	CL
آشو	۸۰(A-۴)	A-۷-۵(۱۸)	A-۳	A-۴(۸)

مصالح تثبیت کننده

آهک هیدراته کلسیمی پرمایه با وزن مخصوص ۲/۳۴ که به‌صورت کیسه‌ای در بازار عرضه می‌شود، پس از گذراندن از الک شماره ۲۰۰ (۰/۰۷۵ میلیمتر) مورد استفاده قرار گرفت. آهک‌های تولید شده برای عرضه در بازار از لحاظ شیمیائی خالص نبوده و در قیاس با هیدروکسید کلسیم خالص به‌طور جزئی دارای خواص متفاوتی هستند.

سیمان پرتلند تیپ IIکیسه‌ای سیمان مشهد که برای

www.SID.ir

Archive of SID

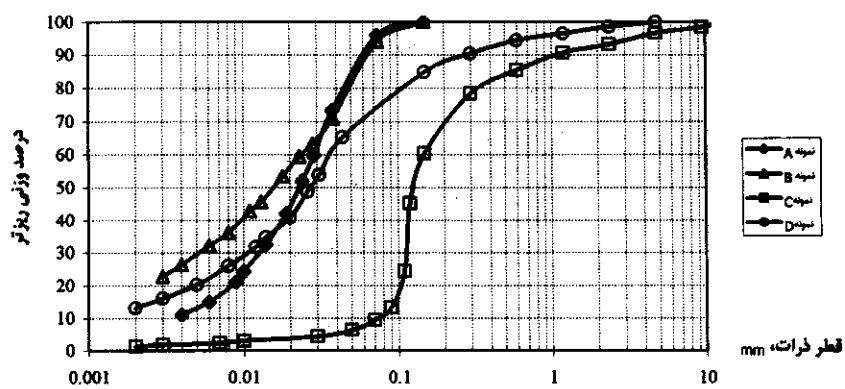
مصارف عمومی عرضه می‌شود مورد استفاده قرار گرفت. برای حفاظت از تأثیر مخرب گاز کربنیک هوا و رطوبت در طی استفاده، مصالح با قراردادن در کیسه‌های نایلونی و ظروف درب‌دار محافظت شد.

روشهای آزمایش

آزمایشات انجام شده برروی خاکهای تثبیت نشده شامل دانه‌بندی، حدود اتربرگ، کانی‌شناسی با استفاده از XRD، تراکم، pH و فشاری محدود نشده و در مورد مخلوطهای خاک - آهک / سیمان شامل حدود اتربرگ، تراکم و فشاری محدود نشده می‌باشد.

در انجام آزمایشات محدود نشده از نمونه‌های استوانه‌ای به قطر ۵۰ و بلندی ۱۰۰ میلیمتر استفاده شد. این نمونه‌ها در رطوبت بهینه و دانسیته خشک حداکثر که قبلاً در آزمایشات تراکم با استفاده از نمونه‌های با همین ابعاد برروی مخلوطهای خاک - آهک/ سیمان تعیین شده بود، تهیه گردید (جداول ۲ و ۳). در تهیه نمونه‌ها ابتدا وزن معینی از خاک خشک شده در هوا با ۰، ۳، ۵ و ۷ درصد آهک / سیمان (بر مبنای وزن خشک خاک) با استفاده از همزن مکانیکی به‌مدت ۱ دقیقه مخلوط گردید و سپس مقدار آب لازم اضافه شد و اختلاط به‌مدت ۲ دقیقه دیگر اداه یافت. متراکم ساختن مخلوط در قالب استوانه‌ای به‌طور دینامیکی با وارد کردن ۱۰ ضربه به هر انتهای نمونه توسط وزنه ۲/۵ کیلوگرمی که از ارتفاع ۹۰ سانتیمتر رها می‌شد، صورت گرفت. این روش تراکمی تقریباً در حد استاندارد آشو اصلاح شده (AASHTOT T۱۸۰) ایجاد می‌کند. بازاء هر درصد آهک/ سیمان و رژیم نگهداری ۳ نمونه ساخته شد.

نمونه‌های آزمایشات فشاری پس از پیچیده شدن در نایلون برای پیش‌گیری از کربناته شدن و از دست دادن رطوبت، تا زمان انجام آزمایش در گرمخانه با رطوبت نسبی ۱۰۰ درصد و دمای ۲۵°C به مدتهای متفاوت از ۷ تا ۵۶ روز نگهداری شد. نمونه‌های مستغرق ابتدا به مدت ۶ روز در شرایط ذکر شده نگهداری گردید و پس از خارج کردن از پوشش به‌مدت ۲۴ ساعت در حمام آب به دمای ۲۵°C قرار داده شد. هدف از تهیه و آزمایش نمونه‌های مستغرق بررسی وارفتن احتمالی نمونه‌ها براثر حل شدن املاح محلول خاک و نیز تحقیق این موضوع بود که مقاومتهای فشاری حاصله نتیجه پیشرفت واکنشهای سیمانی و پوزولانی بوده و ناشی از سخت شدن فیزیکی مخلوط متراکم شده نمی‌باشد.



شکل ۱ منحنی‌های دانه‌بندی خاکهای مورد مطالعه

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۲ درصد رطوبت بهینه و دانسیته خشک حداکثر خاکها در تثبیت با آهک

درصد آهک	نمونه خاک							
	A		B		C		D	
	OMC	MDD	OMC	MDD	OMC	MDD	OMC	MDD
۰	۱۴	۱/۸۹	۲۳	۱/۶۹	۱۲	۱/۹۷	۹/۵	۲/۱۰
۳	۱۵	۱/۷۸	۲۷/۲	۱/۵۹	۱۴/۷	۱/۹۷	۱۱/۱	۱/۹۷
۵	۱۶/۹	۱/۸۱	۲۱	۱/۶۲	۱۵	۱/۹۶	۸	۲/۰۶
۷	۱۴/۳	۱/۸۴	۱۹/۷	۱/۵۸	۱۴/۷	۱/۹۵	۸/۶	۱/۹۵

جدول ۳ درصد رطوبت بهینه و دانسیته خشک حداکثر خاکها در تثبیت با سیمان

درصد آهک	نمونه خاک							
	A		B		C		D	
	OMC	MDD	OMC	MDD	OMC	MDD	OMC	MDD
۰	۱۴	۱/۸۹	۲۳	۱/۶۹	۱۲	۱/۹۷	۹/۵	۲/۱۰
۳	۱۲/۴	۱/۸۸	۲۳/۴	۱/۶۵	۱۳/۴	۱/۸۹	۸/۶	۲/۱۰
۵	۱۴/۷	۱/۸۹	۱۹/۰	۱/۶۷	۱۳/۵	۱/۹۶	۱۰/۳	۲/۰۴
۷	۱۴/۸	۱/۹۲	۱۹/۷	۱/۶۶	۱۴/۵	۱/۹۷	۱/۳	۲/۰۷

یادداشت : درصد رطوبت بهینه = OMC دانسیته خشک حداکثر (g/cm^3) = MDD

در پایان هر دوره نگهداری، نمونه‌ها از پوشش و یا حمام آب خارج و بلافاصله آزمایش فشاری محدود نشده برروی آن انجام گرفت. بار حداکثر برای شکستن نمونه، در بارگذاری با آهنگ تغییر شکل یک میلیمتر در دقیقه به عنوان مقاومت فشاری ثبت و مقدار میانگین مقاومت سه نمونه گزارش شد. تفاوت بین مقدار مقاومت هر یک از نمونه‌ها با میانگین کمتر از ۱۰٪ بود. در موارد محدودی که شرط مذکور حاصل نشد آزمایش تکرار گردید.

نتایج آزمایش

کانی‌شناسی خاکها . به‌منظور آنالیز کانی‌شناسی خاکها و به‌ویژه تعیین نوع کانی‌های رسی موجود در آنها که از لحاظ پاسخ به تثبیت حائز اهمیت بسیار می‌باشد، آزمایش XRD برروی نمونه‌های خاک انجام شد. طیف پراش اشعه X خاکهای (شکلهای ۲ تا ۵) با استفاده از تابش K_a آند مسی دستگاه با ولتاژ ۴۰kV و جریان ۳۰mA و طول موج ۱/۵۴۰۶A° با تغییر زاویه 2_q از ۵ تا ۷۵ درجه ثبت گردید. ترکیب کانی‌شناسی خاکها (جدول ۱) حاکی از نبود رسهای فعال (منبسط شونده) در آنهاست. درعین حال باید خاطرنشان ساخت که به‌علت پیچیدگی خاکها از نظر ترکیب شیمیائی و میزان بلوری بودن بخش رسی آنها، در بسیاری از موارد تعیین

www.SID.ir

Archive of SID

کانیهای متشکله نمونه جداسازی نشده خاک به روش XRD و یا دیگر روشهای آنالیز بسیار مشکل است[8].

همانطور که در جدول (۱) ملاحظه می‌شود کلیه خاکها قلیائی و دارای pH بزرگتر از ۷ است. این خود بدان معنی است که در روند واکنشهای تثبیت آهک موجود و آزاد شده بالقوه می‌تواند تماماً صرف واکنشهای پوزولانی شود.

تأثیر آهک - سیمان بر خواص خمیری خاکها

همانطور که از داده‌های ارائه شده در جدول (۱) برمی‌آید به‌جز نمونه B نشانه خمیری سایر خاکها کمتر از ۱۰ بوده و ازاین رو، می‌توان آنها را در زمره خاکهای غیرخمیری تا خمیری کم محسوب نمود. در مورد این دسته خاکها افزودن آهک و یا سیمان عملاً تأثیر چندانی بر خصوصیات خمیری آنها ندارد[11]. تأثیر افزودن آهک و سیمان بر خصوصیات خمیری نمونه B، به‌ترتیب، در شکل‌های (۶ و ۷) نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود تأثیر افزودن آهک و سیمان به خاک مشابه بوده و با افزایش درصد آهک / سیمان به‌کار رفته حد روانی و نشانه خمیری کاهش می‌یابد لیکن تأثیر آهک به‌ویژه درکاهش حد روانی خاک چشمگیرتر است که خود حاکی از وجود درصد قابل ملاحظه کانیهای رسی در خاک B است [5].

تأثیر آهک - سیمان بر دانسیته خاکها

همانطور که از داده‌های ارائه شده در جدول (۴) و شکل (۸) برمی‌آید مقاومت فشاری ۷ روزه نمونه‌های نگهداری شده در رطوبت از مقاومت نمونه‌های نظیر که ابتدا در رطوبت و سپس در آب نگهداری شده‌اند (نمونه‌های مستغرق)، بیشتر است. نتایج نشان می‌دهد که هیچ یک از نمونه‌های متسغرق دستخوش افت قابل ملاحظه مقاومت نشده‌اند. تغییرات مقاومت این‌دو سری نمونه با تغییر مقدار درصد آهک در مورد کلیه خاکها کم و بیش الگوی مشابهی را نشان می‌دهد. تنها در مورد نمونه B افزایش درصد آهک منظماً افزایش مقاومت را باعث می‌شود که حاکی از افزایش در میزان فرآورده‌های ناشی از واکنشهای پوزولانی با افزایش مقدار درصد آهک است.

همانطور که ملاحظه می‌شود مقاومت نمونه‌های A و D با افزایش درصد آهک تغییرات خاصی را نشان می‌دهند؛ به این ترتیب که بازاء ۳ درصد آهک رشد مقاومت، و سپس با افزایش آهک به ۵ درصد تقلیل مقاومت، و در پی آن با افزایش آهک به ۷ درصد مجدداً رشد مقاومت مشاهده می‌شود. این تغییرات در مورد نمونه‌های مستغرق این خاکها نیز ملاحظه می‌شود و دلیل آن در حال حاضر مشخص نیست.

در مورد نمونه C بازاء ۳ درصد آهک افزایش مقاومت و سپس با افزایش درصد آهک منظماً تقلیل مقاومت مشاهده می‌شود و علت آن به احتمال زیاد این است که این خاک دارای مقادیر ناچیزی سیلیس و آلومین فعال است که با مقادیر کم‌آهک وارد واکنش شده، سبب رشد مقاومت می‌شود. مقادیر اضافی آهک عملاً جایگزین ذرات خاک شده و با توجه به پایین‌تر بودن وزن مخصوص آهک شکفته در مقایسه با خاک تقلیل دانسیته و در نتیجه مقاومت را سبب می‌شود. با توجه به نتایج ارائه شده در شکل (۸)، به‌جز در مورد نمونه B، در مورد سایر خاکها مقادیر بیش از ۳ درصد آهک عملاً تأثیر چندانی در افزایش مقاومت ندارد و ازاین‌رو به‌نظر می‌رسد بین ۳ تا ۴ درصد آهک مقدار بهینه مورد لزوم برای تثبیت این خاکها تحت شرایط آزمایش است.

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۴ مقاومت فشاری ۷ روزه خاکها در تثبیت با آهک (N/mm^2)

درصد آهک	نمونه خاک							
	A		B		C		D	
	۷	۶+۱	۷	۶+۱	۷	۶+۱	۷	۶+۱
۰	۰/۰۲	۰/۰۰	۰/۰۵	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۲	۰/۰۰
۳	۰/۲۵	۰/۱۵	۰/۳۸	۰/۲۶	۰/۲۶	۰/۱۳	۰/۲۰	۰/۱۳
۵	۰/۱۷	۰/۱۱	۰/۵۰	۰/۳۰	۰/۱	۰/۰۹	۰/۱۱	۰/۰۴
۷	۰/۲۷	۰/۱۳	۰/۵۲	۰/۳۹	۰/۱۱	۰/۰۵	۰/۱۵	۰/۰۴

یادداشت : هفت روزه =۷ شش روز در رطوبت و یک روز در آب =۱+۶

تثبیت با سیمان

همانطور که از داده‌های ارائه شده در جدول (۵) و شکل (۹) برمی‌آید در مورد کلیه خاکها افزایش درصد سیمان منظماً افزایش مقاومت ۷ روزه را سبب می‌شود. مقایسه شکلهای (۸ و ۹) نشان می‌دهد که مقاومت خاکها در تثبیت با سیمان همواره بیشتر از مقاومتهای نظیر در تثبیت با آهک است. این مطلب با یافته‌های کرافت که گزارش نمود خاکهای فاقد کانیهای رسی فعال بیش از آهک مناسب تثبیت با سیمان هستند، مطابقت دارد[4]. برخلاف نمونه‌های تثبیت شده با آهک مستغرق ساختن در آب تأثیر منفی قابل ملاحظه‌ای بر مقاومت نمونه‌های ۷ روزه تثبیت شده با سیمان ندارد. در اینجا نیز نمونه B به‌علت دارا بودن مواد پوزولانی قابل توجه که واکنشهای اضافی را سبب می‌شوند، بیشترین مقاومت را بازاء مقادیر مختلف سیمان از خود نشان می‌دهد. همانطور که در شکل (۹) ملاحظه می‌شود روند افزایش مقاومت در پی افزایش مقدار سیمان در مورد نمونه‌های A و D (خاکهای نمکی) در مقایسه با خاکهای B و C بسیار کندتر است. علت این امر گذشته از کمبود مواد پوزولانی فعال در خاکهای نمکی که منشاء واکنشهای ثانوی در مخلوطهای خاک - سیمان هستند، تشکیل پیوندهای شیمیائی ضعیف بین ساختار سیمان و سطح ذرات کانی در روند واکنش‌های سیمانی است که می‌توان آنرا به وجود درصد زیاد املاح در این خاکها نسبت داد.

تأثیر دوره نگهداری بر مقاومت فشاری

نتایج آزمایشات فشاری ۷ روزه نشان داد که خاکهای A و D عملاً قابلیت تثبیت با آهک را نداشته و در مورد تثبیت با سیمان نیز با صرف مقادیر معمول و اقتصادی آن قابل تثبیت نمی‌باشند. ازاین‌رو، طبق جدول (۶) تأثیر دوره نگهداری صرفاً بر مقاومت فشاری نمونه B تثبیت شده با آهک و سیمان و نیز، نمونه C تثبیت شده با سیمان از طریق نگهداری نمونه‌ها در شرایط پیش گفته شده به‌مدتهای چهار و هشت هفته مورد مطالعه قرار گرفت.

تغییرات مقاومت فشاری نمونه B با تداوم نگهداری در تثبیت با آهک و سیمان در شکل (۱۰) نشان داده شده است. همانطور که از شکل یاد شده برمی‌آید در تثبیت نمونه B با آهک و سیمان، کسب مقاومت با گذشت زمان روند افزایشی دارد و این روند بخصوص در مورد نمونه تثبیت شده با سیمان تا سن چهار هفته چشمگیرتر

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۵ مقاومت فشاری ۷ روزه خاکها در تثبیت با سیمان (N/mm^2)

درصد آهک	نمونه خاک							
	A		B		C		D	
	۷	۶+۱	۷	۶+۱	۷	۶+۱	۷	۶+۱
۰	۰/۰۲	۰/۰۰	۰/۰۵	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۲	۰/۰۰
۳	۰/۳۵	۰/۴۲	۰/۶۹	۰/۳۳	۰/۵۶	۰/۳۶	۰/۱۶	۰/۱۹
۵	۰/۵۶	۰/۵۲	۰/۸۹	۰/۵۵	۰/۷۸	۰/۶۲	۰/۵۸	۰/۴۳
۷	۰/۶۵	۰/۷۳	۲/۱۲	۱/۷۸	۱/۴۰	۱/۱۴	۰/۶۲	۰/۵۵

یادداشت : هفت روزه =۷ شش روز در رطوبت و یک روز در آب =۱+۶

جدول ۶ تأثیر دوره نگهداری و درصد آهک / سیمان بر مقاومت فشاری خاکها (N/mm^2)

نوع و مقدارماده تثبیت کننده		نمونه خاک			
		B		C	
		۲۸ روزه	۵۶ روزه	۲۸ روزه	۵۶ روزه
آهک	٪۵	۰/۶۰	۰/۷۸	–	–
	٪۷	۰/۵۵	۰/۸۱	–	–
سیمان	٪۳	۰/۸۱	۱/۰۸	–	–
	٪۵	۱/۶۹	۱/۷۳	۱/۶۱	۲/۱۵
	٪۷	–	–	۱/۷۱	۲/۴۶

است که با توجه به وجود درصد بالای رس در این خاک علت آنرا می‌توان پیشرفت واکنشهای ثانوی (پوزولانی) همزمان با واکنشهای سیمانی دانست. همانطورکه ملاحظه می‌شود افزایش مقدار آهک از ۵ درصد به ۷ درصد عملاً تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر رشد و افزایش مقاومت در طی زمان ندارد و از این‌رو به‌نظر می‌رسد حدود ۵ درصد وزنی آهک مقدار بهینه مورد نیاز در تثبیت این خاک است.

شکل (۱۱) نشان می‌دهد که تداوم نگهداری سبب رشد قابل ملاحظه مقاومت در نمونه C تثبیت شده با سیمان می‌گردد. نتایج آزمایش دانه‌بندی و نیز آزمایشات حدود اتربرگ (شکل ۱ و جدول ۱) نشان می‌دهد که مقدار رس موجود در این خاک اندک است و از این‌رو، این رشد مقاومت را باید عمدتاً به پیشرفت واکنشهای سیمانی در طی زمان نسبت داد.

ارزیابی به‌عنوان مصالح روسازی

هدف از طرح مخلوط، تعیین مقدار آهک / سیمان مناسب برای تثبیت رضایت‌بخش است. در استفاده از خاک تثبیت شده با آهک / سیمان در لایه‌های روسازی معیارهای متفاوتی از لحاظ حداقل مقاومت فشاری

www.SID.ir

Archive of SID

مورد لزوم در سن ۷ روز و بالاتر ذکر شده است.

از خاکهای تثبیت شده با سیمان در لایه‌های زیر و اساس روسازیهای با رویه آسفالتی به نحو گسترده‌ای استفاده شده است. در تثبیت با سیمان برای لایه اساس مقاومت فشاری محدود نشده ۷ روزه مساوی یا بزرگتر از $۱/۷۲N/mm^۲$ به عنوان معیار مقاومت پیشنهاد شده است. این رقم تجربی بوده و بسته به شرایط بستر آماده شده راه (سابگرید) و بار ترافیک مورد انتظار مقادیر بالاتر و پائینتر از آن نیز ذکر شده است[11].

از خاکهای تثبیت شده با آهک بیشتر در لایه‌های زیراساس و بستر آماده شده استفاده شده که در موارد مذکور حداقل مقاومت فشاری ۷ روزه محدود نشده $۰/۶۸N/mm^۲$ برای مصالح زیراساس و $۰/۳۴N/mm^۲$ برای مصالح بستر پیشنهاد شده است [11,9,7].

براساس معیارهای فوق و با توجه به داده‌های شکل (۹) تنها خاک لس (نمونه B) تثبیت شده با حدود ۶ درصد وزنی سیمان قابل مصرف در لایه اساس روسازی است. در عین حال با توجه به‌اینکه در اجرا، لایه‌های تثبیت شده پس از ساخته شدن معمولاً با اندودکردن رویه در برابر از دست دادن رطوبت و نیز کرناته شدن احتمالی محافظت می‌شوند و با توجه به داده‌های شکل (۱۰) که کسب سطح مقاومتی ذکر شده برای لایه اساس در سن چهار هفته بازاء ۵ درصد سیمان را نشان می‌دهد، در تثبیت این خاک ممکن است بتوان مصرف سیمان را به ۵ درصد وزن خاک تقلیل داد.

همانطور که شکل (۱۱) نشان می‌دهد کسب سطح مقاومتی مورد لزوم در سن چهارهفته در مورد خاک ماسه‌ای (نمونهC) تثبیت شده با ۷ درصد سیمان نیز صادق است. با توجه به روند افزایش مقاومت این خاک با افزایش درصد سیمان که در شکل (۹) ملاحظه می‌شود، احتمالاً می‌توان سطح مقاومتی ذکر شده برای لایه اساس را با افزایشی اندک (حدود یک درصد) در سیمان مصرفی، به‌دست آورد.

براساس معیارهای آشتو در طرح روسازی[3] ضریب لایه برابر با $a_۲=۰/۱۳$ راکه به مصالح اساس از نوع سند شکسته مرغوب (CBR=۷۰) مربوط می‌شود، می‌توان با استفاده از خاکهای تثبیت شده با سیمان که مقاومت فشاری ۷ روزه برابر با $۱/۵۸N/mm^۲$ دارند، نیز تأمین نمود. با توجه به‌اینکه با قیمتهای فعلی هزینه یک متر مکعب لایه اساس ساخته شده از مصالح شکسته در شرایط ضخامت برابر، حدود چهار برابر هزیه نظیر برای لایه اساس از خاک لس تثبیت شده با سیمان می‌باشد و با توجه به منابع عظیم و پراکنده خاک لس در منطقه، صرفه‌جوئی قابل ملاحظه در هزینه‌ها در صورت استفاده از تثبیت خاک آشکار می‌شود.

با توجه به داده‌های شکلهای (۸) و (۱۰) تثبیت با آهک بجز در مورد خاک لس سطح مقاومتی مورد لزوم برای مصالح زیر اساس را تأمین نمی‌کند. در مورد این خاک نیز با توجه به روند کند رشد مقاومت با افزایش درصد آهک شکل (۸) و نیز در طی دوره نگهداری شکل (۱۰) استفاده از درصد بالاتر آهک، احتمالاً در حدود ۱۰ درصد وزنی برای حصول سطح مقاومتی مورد نیاز لازم خواهد بود.

نتیجه‌گیری

تمامی خاکهای مورد بررسی قابلیت تثبیت بهتری با سیمان دارند تا آهک. خاک B (لس) قابلیت تثبیت با آهک و سیمان، و خاک C (ماسه‌ای) قابلیت تثبیت با سیمان را داشته و می‌توان با صرف مقادیر مناسب و اقتصادی ماده تثبیت کننده از آنها در روسازی راه‌های منطقه استفاده نمود. خاکهای نمکی به‌علت ساختار ضعیف دانه‌ها ناشی از

www.SID.ir

Archive of SID

وجود املاح تبخیری زیاد در آنها و نیز فقدان مواد پوزولانی لازم قابل تثبیت با آهک و سیمان نیستند.

سپاسگزاری

مـحقق لازم مـی‌دانـد از مـعاونت پـژوهشی دانشگـاه فردوسی مشهد به‌خاطر تأمین پشتوانه مالی تـحقیق، از مـدیریت دانشکـده مـهندسی دانشگـاه بـه‌خاطر اجـازه استفاده از امکـانات آزمـایشگاهی دانشکـده و از آقـای محمد داروغه که انجام بخش عمده‌ای از آزمـایشات را برعهده داشته‌اند تشکر و قدردانی نماید.

مراجع

۱. دکتر درویش‌زاده، علی، " زمین‌شناسی ایران " انتشارات نشر دانش امروز، (۱۳۷۰).

۲. سازمان زمین‌شناسی کشور، نقشه‌های زمین‌شناسی مقیاس ۱/۲۵۰۰۰۰.

3. Sherwood, P. T. "Soil Stabilisation With Cement and Lime", State of the Art Report, Transport Tesearch Laboratory, HMSO Publication, London, (1993).

4. Transport Road Ressearch Board, "Lime Stabilisation-Reactions, Properties, Design and Construction", State of the Art Report No.5, Washington D.C. (1987).

5. Hopkins, T. C. Hunsucker, D. q. and Beckham, T. "Selection of Design Strengths of Untreated Soil Subgrades and Subgrades Treated With Cement and Hydrated Lime", Transportaion Reseach Record 1440, pp. 37-44, (1994).

6. Mcdowell, C. "Evaluation of Soil-Lime Stabilisation Mixtures", Highway Research Record 139, pp. 15-25, (1966)

7. Diamond, S. and Kinter, E. B. "Mechanisms of Soil-Lime Stabilisation", Highway Research Record 92, pp. 83-102, (1965).

8. Croft, J. B. "The influence of soil mineralogical composition on cement stabilisation", *Geotechnique 17*, pp. 119-135, (1967).

9. Moh, Z. C. "Reactions of Soil Minerals With Cement and Chemical", Highway Research Record 86, pp. 39-61, (1965).

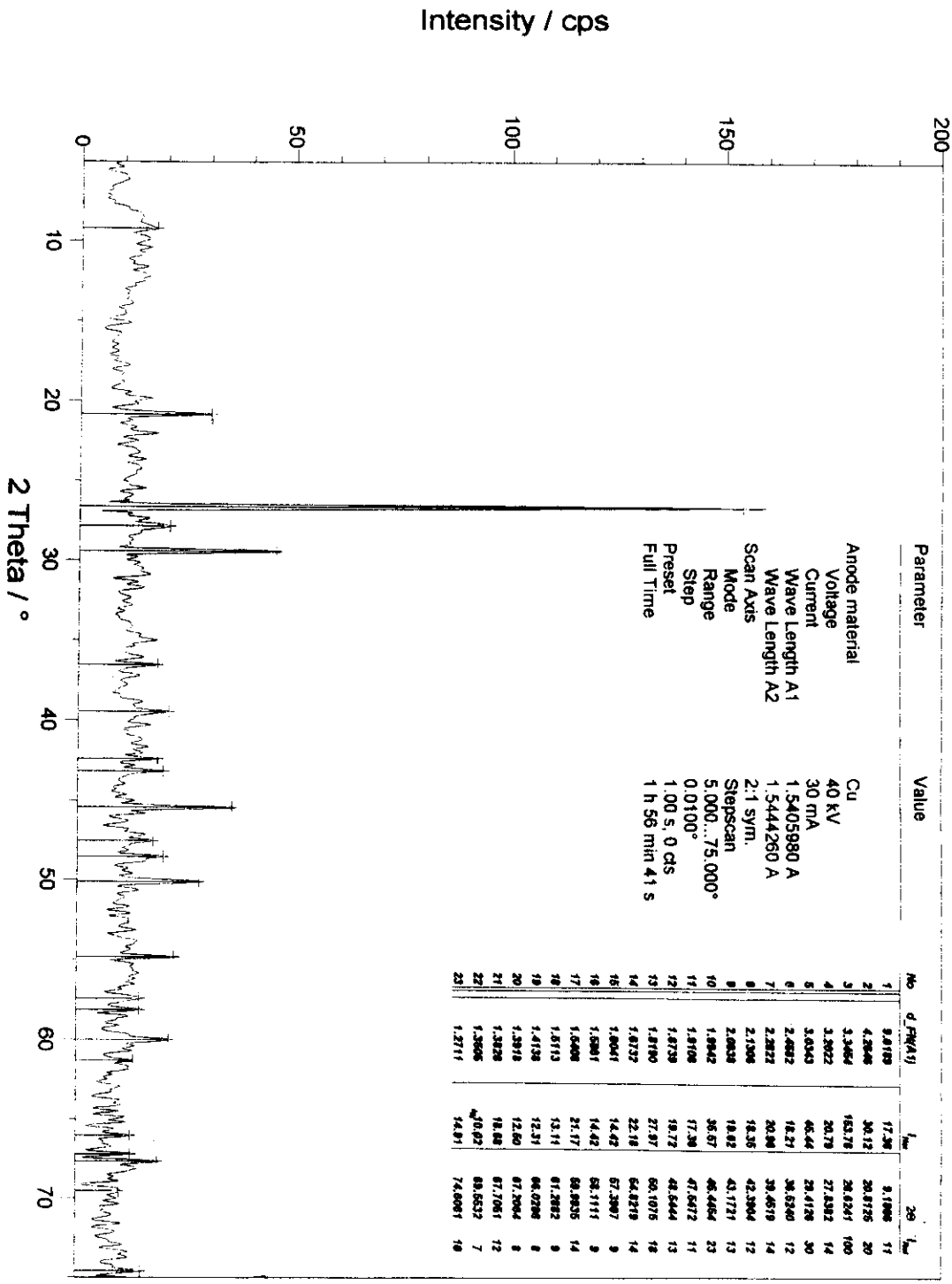
10. Harty, J. R. and Thompson, M. R. "Lime Reactivity of Tropical and Sugtropical Soils", Highway Research Record 442, pp. 102-112, (1973).

11. Klug, H. P. and Alexander, L. E. "*X-Ray Diffraction Procedures for Polycrystalline and Amorphous Materials*", 3rd. Printing, John wiley & Sons Inc., New York, (1974).

12. Aashto, "*Aashto Guide for Design of Pavement Structures*", Part II, Chapter 3, (1993).

www.SID.ir

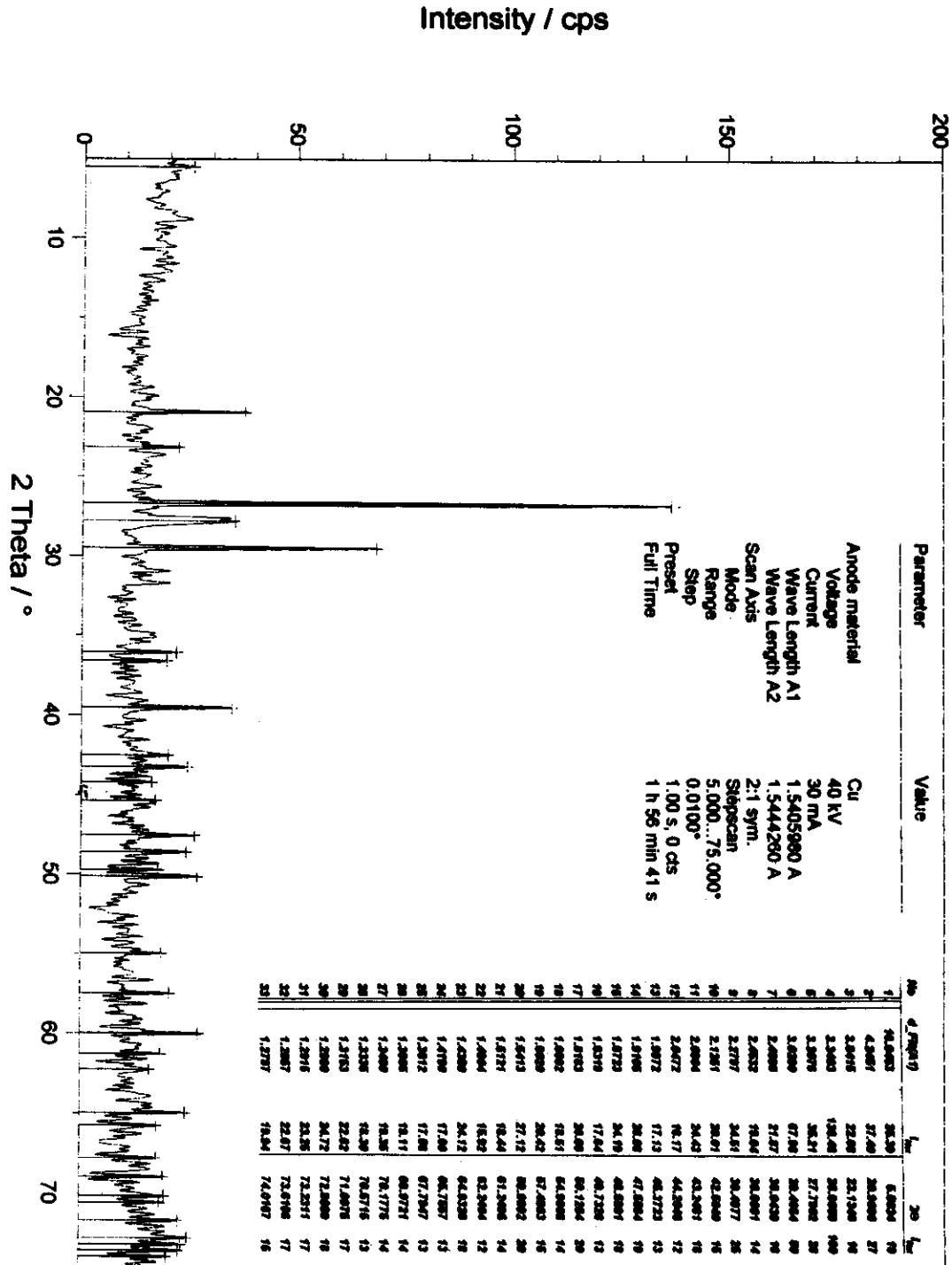
Archive of SID



شکل ۲ طیف پراش اشعه X پودر نمونه A

www.SID.ir

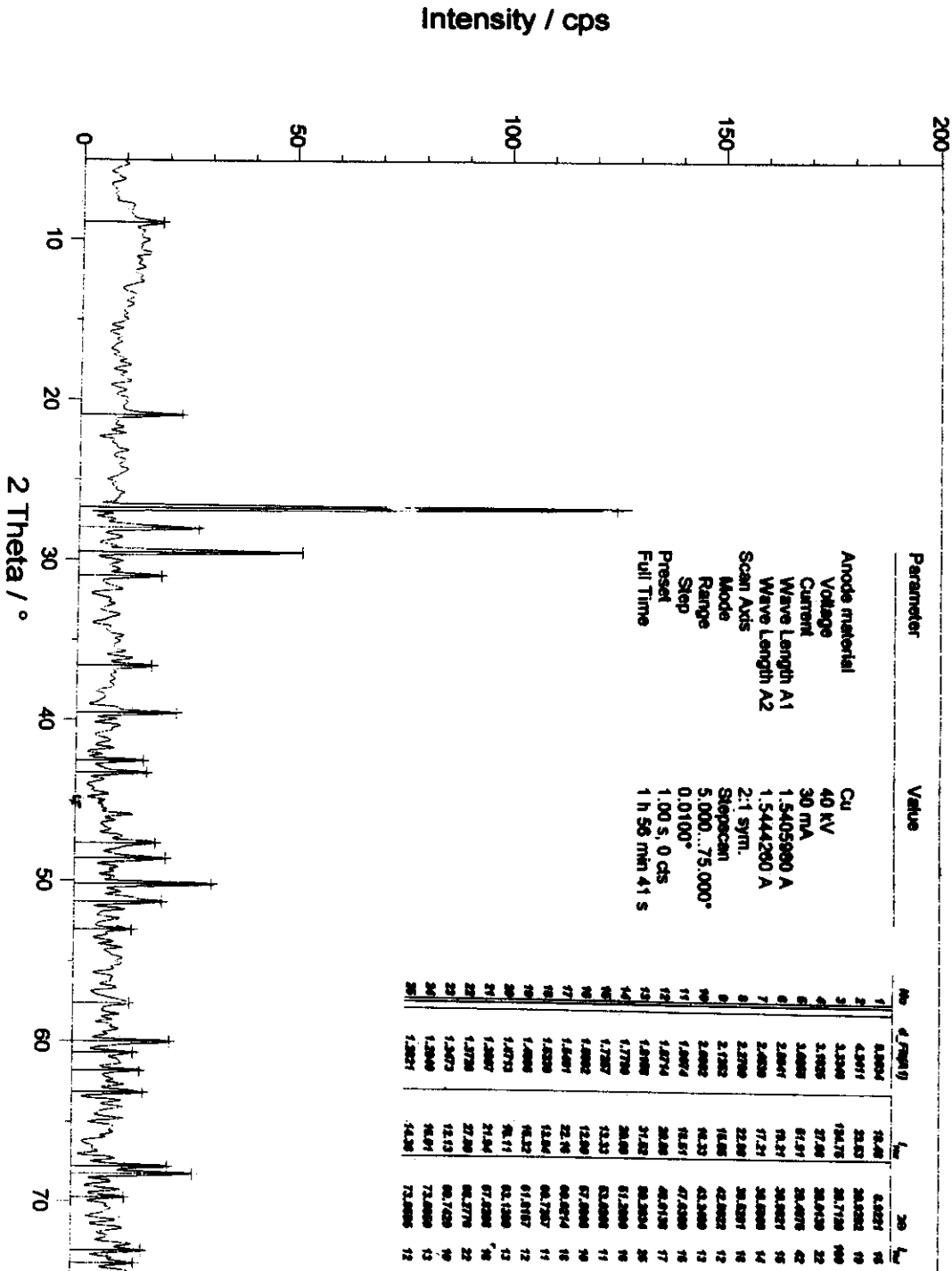
Archive of SID



شکل ۳ طیف پراش اشعه X پودر نمونه B

www.SID.ir

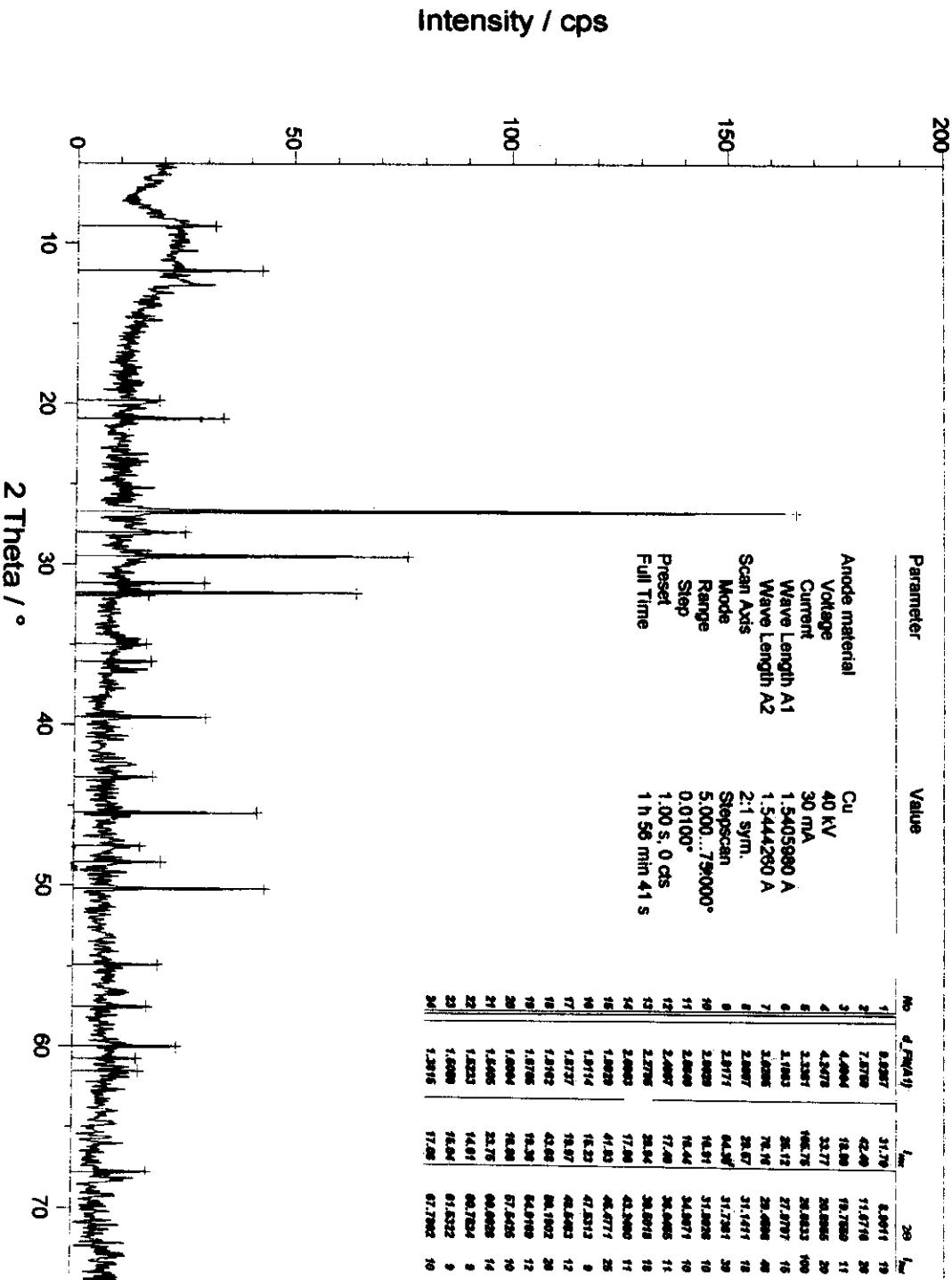
Archive of SID



شکل ۴ طیف پراش اشعه X پودر نمونه C

www.SID.ir

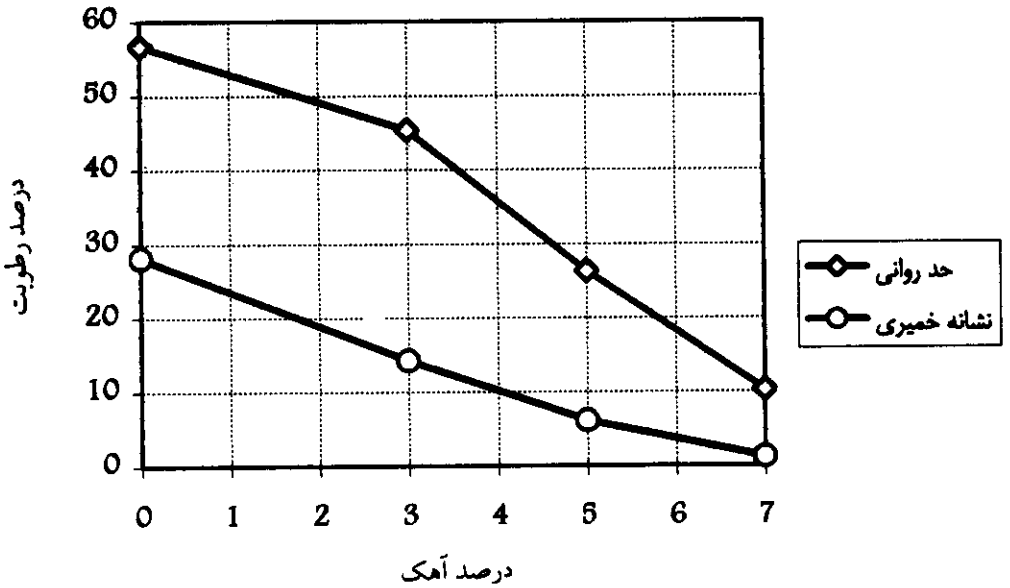
Archive of SID



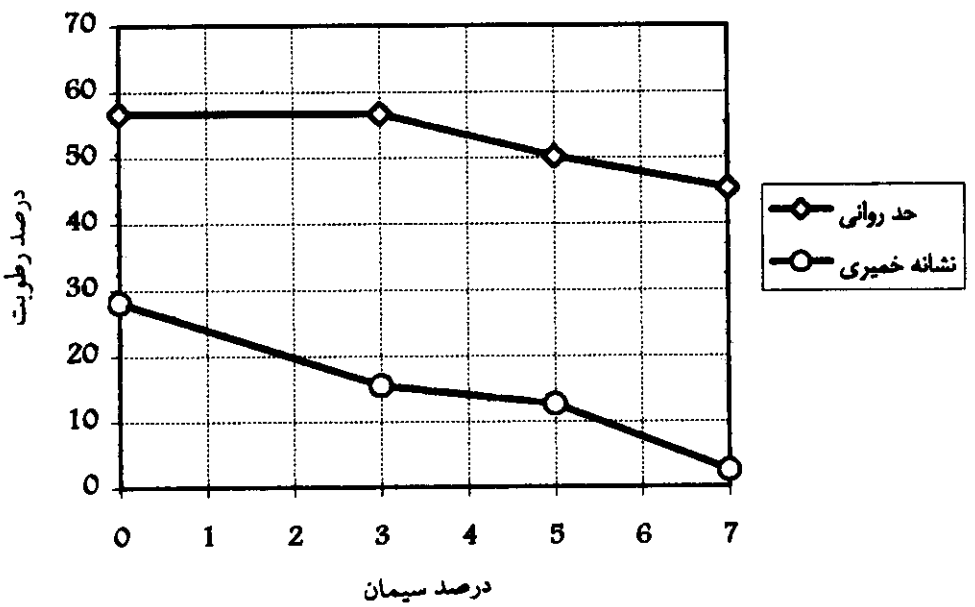
شکل ۵ طیف پراش اشعه X پودر نمونه D

www.SID.ir

Archive of SID



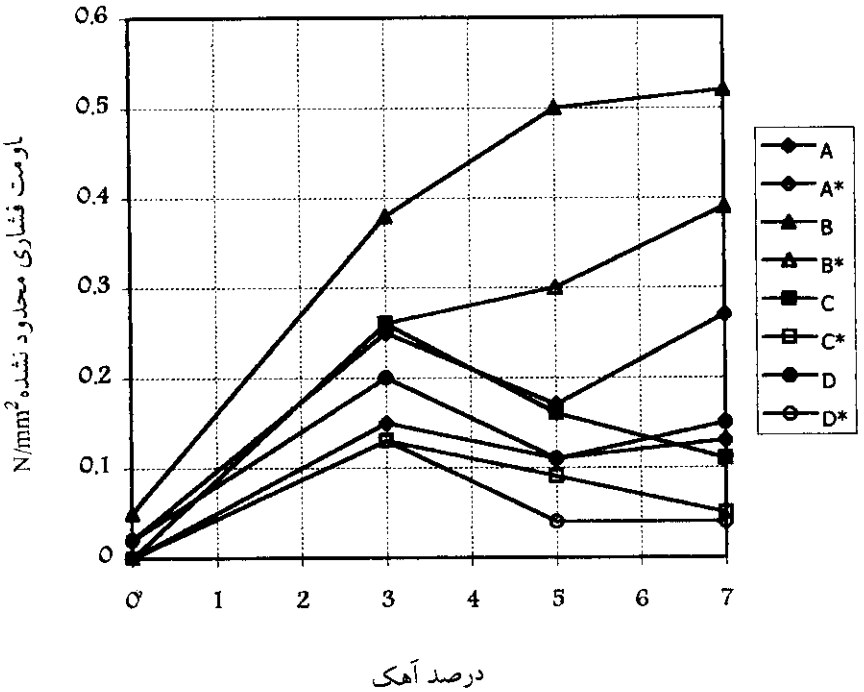
شکل ۶ تأثیر مقدار آهک بر خصوصیات خمیری B



شکل ۷ تأثیر مقدار سیمان بر خصوصیات خمیری B

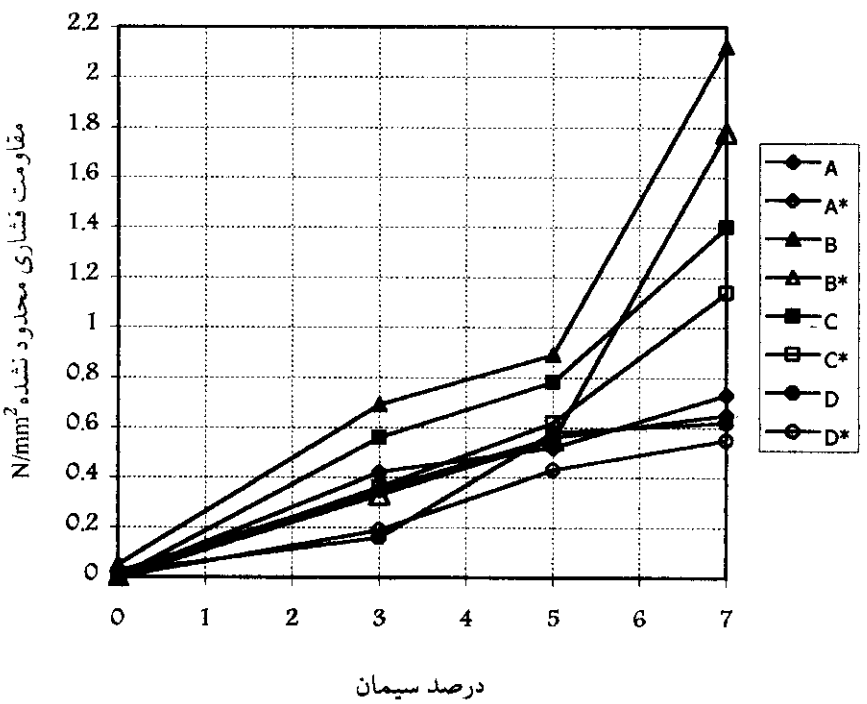
www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۸ تأثیر مقدار آهک بر مقاومت فشاری ۷ روزه خاکها

(علامت ستاره در راهنما مربوط به نمونه مستغرق است)

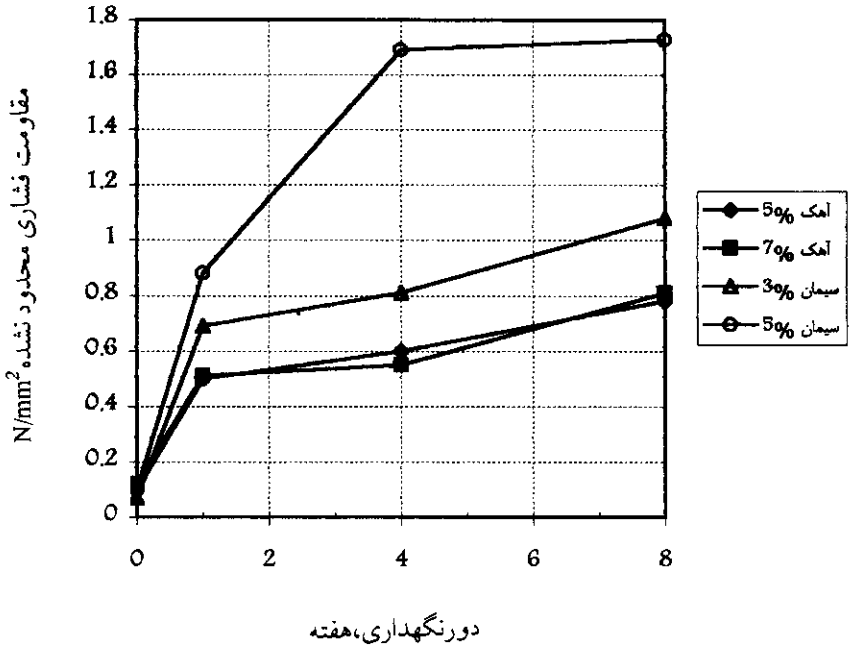


شکل ۹ تأثیر مقدار سیمان بر مقاومت فشاری ۷ روزه خاکها

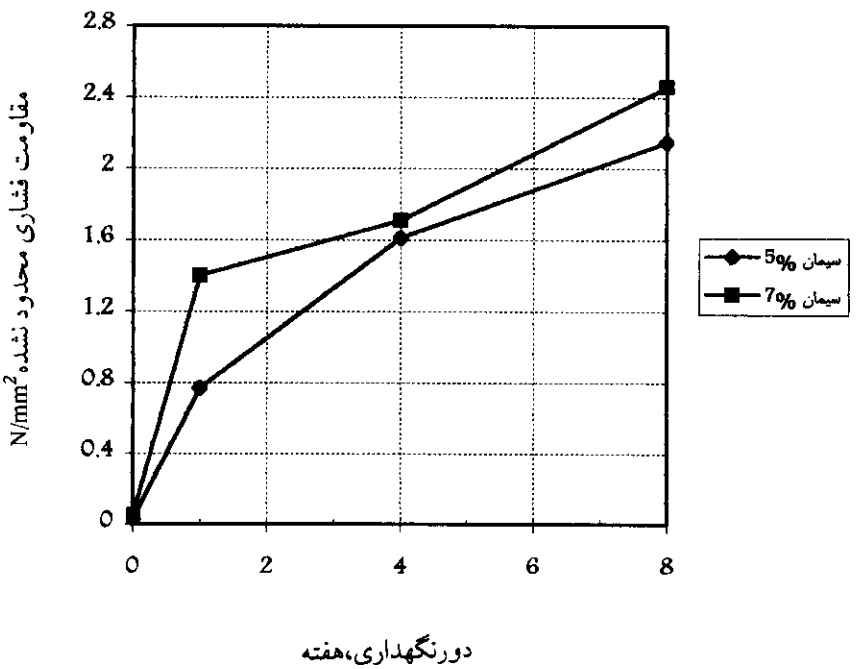
(علامت ستاره در راهنما مربوط به نمونه مستغرق است)

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۱۰ تأثیر دوره نگهداری و مقدار درصد آهک و سیمان بر مقاومت فشاری نمونه B



شکل ۱۱ تأثیر دوره نگهداری و مقدار درصد سیمان بر مقاومت فشاری نمونه C

www.SID.ir