

بهسازی خاک های مناطق کویری و کاربرد آنها در راهسازی

(مطالعه موردی: محور خور - عرب آباد خراسان جنوبی)

مجتبی محمدی^۱، محمد غفوری^{۲*}، غلامرضا لشکری پور^۳

دریافت مقاله: ۹۷/۰۹/۱۸ پذیرش مقاله: ۹۸/۰۳/۱۸

چکیده

برای مطالعه خصوصیات فیزیکی و مکانیکی خاک های موجود در محور خور-عرب آباد تعداد ۷ ایستگاه نمونه برداری در طول مسیر به فاصله ۱۰ کیلومتر از هم و در حاشیه جاده انتخاب گردید. به دلایل اقتصادی و دسترسی آسان معمولاً گزینه اول تثبیت خاک در پروژه های راه سازی استفاده از آهک می باشد. با توجه به وجود کارخانه تولید اکسید منیزیم در استان خراسان جنوبی، این گزینه نیز به عنوان یک عامل تثبیت کننده در تحقیق حاضر مورد بررسی قرار گرفت. وجود معدن مس قلعه زری در نزدیکی محور خور-عرب آباد انگیزه ای شد تا پتانسیل کاربرد باطله های کارخانه فرآوری مس این معدن نیز برای تثبیت خاک مورد بررسی قرار گیرد. درصد بهینه برای دو ماده منیزیت و باطله مس طبق مطالعات و پیشنهادات قبلی ۵٪ انتخاب شد و ۲٪ آهک نیز به نیمی از نمونه های به عنوان کاتالیزور اضافه شد. با توجه به نتایج بدست آمده سه ترکیب افزودنی آهک ۵ درصد، منیزیت ریزدانه ۵ درصد به همراه ۲ درصد آهک و باطله مس ۵ درصد بهترین عملکرد را از لحاظ افزایش CBR، یکنواختی تاثیر بر روی همه نمونه ها، و عدم تورم از خود نشان داده اند. از لحاظ یکنواختی عملکرد در افزایش CBR وضعیت منیزیت ریزدانه بهتر از باطله مس و ضعیف تر از آهک می باشد.

کلید واژه ها: منیزیت ریزدانه، باطله مس، جاده خور -عرب آباد، خاک های شور، بهسازی خاک.

۱- دانشجوی دکتری زمین شناسی مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران

۲- استاد زمین شناسی مهندسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران ghafoori@um.ac.ir

۳-استاد زمین شناسی مهندسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران

* مسئول مکاتبات

۱. مقدمه

تثبیت خاک برای بهبود بخشیدن به خواص مهندسی خاک های نامرغوب در احداث سازه های مهندسی عمران مثل راه ها، فرودگاه ها، خاکریزها، سدها و پی های کم عمق، بکار می رود. 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، دستورالعمل هایی برای تعیین مناسب بودن خاک جهت هر نوع تثبیت پیشنهاد شده است (Gharib et al., 2012). با وجود این، در عمل انتخاب مناسب ترین ماده تثبیت کننده و میزان آن، به طور معمول، بر مقاومت فشاری محدوده نشده ۷ روزه خاک تثبیت شده استوار است (Celik et al., 2013). اگرچه تکنیک های 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 بررسی های آزمایشگاهی بر روی خاک های مورد نظر برای استفاده در پروژه فراهم نمی شود. علیرغم این واقعیت که مناطق کویری دربرگیرنده حدود دو سوم خاک کشور می باشد، بر روی خاک های مهندسی این مناطق، تاکنون مطالعات اندکی 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 پروژه های راه سازی در این مناطق ایجاد کرده است. از آنجایی که خاکهای سست مانند خاکهای ریزدانه رسی و ماسه های روان، مشکلات زیادی را در پایداری خاک بستر پروژه های عمرانی از قبیل بزرگراه ها و راه های آهن ایجاد میکنند، بایستی قبل از شروع ساخت و ساز به تثبیت آنها پرداخته شود. یک روش رایج در راه سازی برای تأمین هدف تثبیت خاک، استفاده از افزودنی های مختلفی است که به این افزودنی ها اصطلاحاً تثبیت کننده گفته میشود. تینگل (Tingel., 2003)، در آخرین طبقه بندی ارایه شده در سال 2003 مواد تثبیت کننده را به گروههای زیر تقسیم بندی می کند.

۱. افزودنی های متعارف، ۲. سیلیکاتها، ۳. فرآورده های معدنی، ۴. نمکها، ۵. اسیدها، ۶. آنزیم ها، ۷. افزودنی های یونی، ۸. پلیمرها، ۹. لیگنین ها.

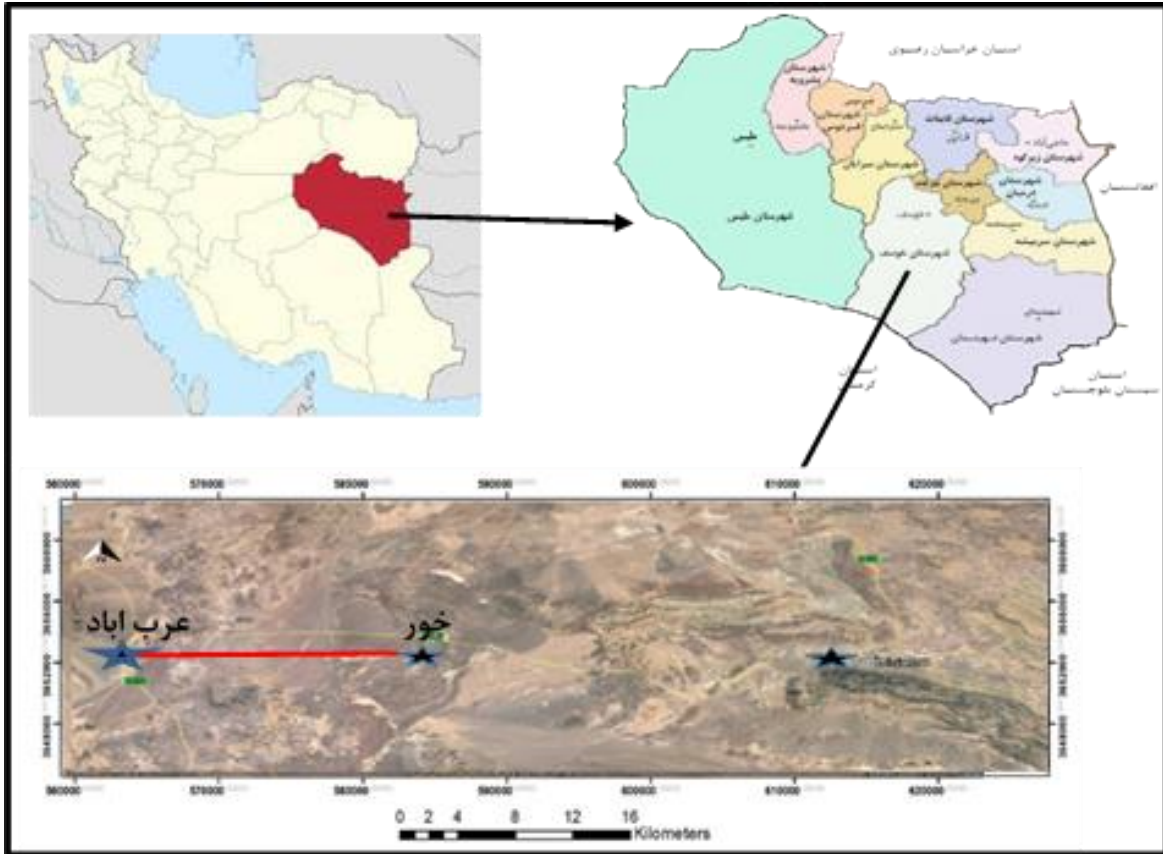
افزودن های متعارف از قبیل: آهک، سیمان و قیر، پرکاربردترین دسته از افزودنی ها هستند که به تنهایی یا به صورت ترکیب در تثبیت محدوده وسیعی از خاکها کاربرد دارند. هر چند برخی از این تثبیت کننده ها تأثیراتی غیر از چسبانندن ذرات خاک را نیز دارا هستند، اما تثبیت خاکها با استفاده از این سه تثبیت کننده، غالباً بر اساس چسبانندن ذرات به یکدیگر صورت میگیرد. اساس کار دو تثبیت کننده اول بر مبنای واکنشهای شیمیایی بین تثبیت کننده، آب و ذرات خاک بوده و این دو ماده به تثبیت کنندگی های سیمانی معروفند (بیات، ۱۳۸۵). علاوه بر افزودنیهای متعارف سایر افزودنی های ذکر شده جز دسته افزودنی های غیر متعارف قرار می گیرند. انتخاب نوع ماده تثبیت کننده به عوامل زیادی از قبیل جنس خاک، شرایط جوی منطقه، میزان مقاومت و دوام مورد نیاز برای خاک، و فور ماده تثبیت کننده و سهولت استفاده در خاک، خصوصیات ماده تثبیت کننده (واکنشها، نحوه عمل کرد و محدودیت ها) میزان بارگذاری و بهره برداری و نوع کاربرد و فاکتورهای اقتصادی و محیطی بستگی دارد (Phoon Yin Han, 2008-2009)

۲. موقعیت جغرافیایی و زمین شناسی

منطقه مورد بررسی در غرب بیرجند ۵۷,۵ تا ۵۸,۵ درجه طول خاوری و ۳۲,۵ تا ۳۳,۵ درجه عرض شمالی جای گرفته است. (شکل ۱) با توجه به طبقه بندی آب و هوایی ایران این منطقه در ناحیه بیابانی داخلی قرار می گیرد. این ناحیه در بیشتر ماه های سال خشک و کم باران است و بطور معمول در فصل زمستان و آغاز بهار باران اندکی می بارد. در مجموع بارش سالانه از ۵۰ میلیمتر در سال فراتر نیست. از ویژگیهای ناحیه تغییرات زیاد دمای تابستان و زمستان و نیز شب و روز است. محدوده مورد مطالعه در شمال بلوک لوت قرار گرفته است. این بلوک واحد تکتونیکي سخت شده ای است که در روند

بهمراه انواع توفها پدیدار شده است، که بلندیهایی کم شیبی و تپه ماهورمانندی را می سازند که دشت بسیار خشک لوت با خاک بیابانی آنها را از هم جدا می نمایند (اکرمی، ۱۳۸۵).

رخدادهای کوهزایی سیمین و آلپ مستحکم شده است و خود بخشی از یک محدوده بزرگتر تکتونیکی یعنی خرد قاره خاور ایران به شمار می آید. این بلوک در محدوده مورد بررسی از سنگهای آتشفشانی نسبتا جوان با ترکیب اسیدی و حد واسط

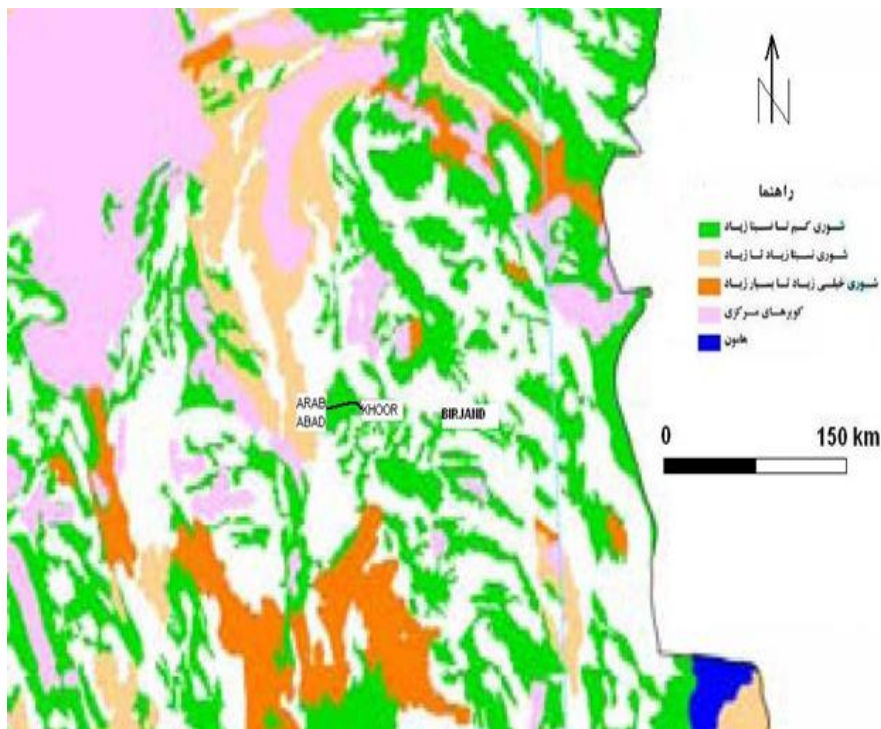


شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه و راههای دسترسی به آن

۳. وضعیت خاکشناسی منطقه

شیمی و مکانیک خاک ارسال گردید. با استناد به نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰۰ خاکهای شور ایران که در (شکل ۲) ملاحظه می گردد، محور خور-عرب-آباد تماما در محدوده خاکهای با شوری کم تا نسبتا زیاد قرار می گیرد (مومنی، ۱۳۸۹). همچنین حدود ۵ درصد، بلورهای درشت و روشن کلسیت در نمونه وجود دارد.

محور خور-عرب آباد در بیشتر مسیر از درون آبرفتهای کوتاهتر دشت لوت عبور می کند. این نهشته های آبرفتی با بررسی اولیه که در بازدید صحرائی از منطقه بعمل آمد دارای درصدی نمک که البته درصد نمک در مسیر رودخانه های فصلی غالبا افزایش یافته بطوریکه با چشم نیز قابل تشخیص بود. برای ارزیابی دقیقتر، از خاک منطقه نمونه گیری شده و برای انجام آزمایشات



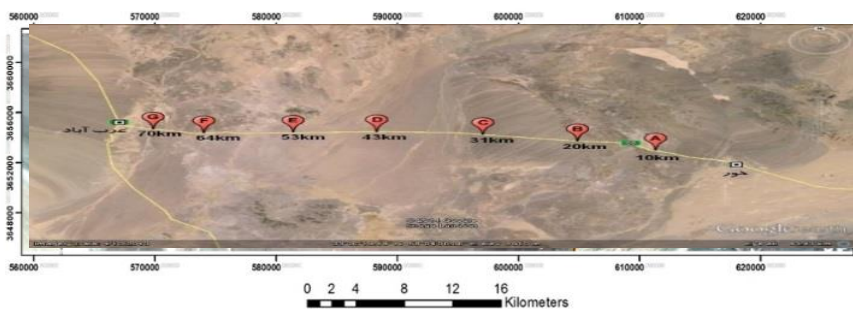
شکل ۲. نقشه خاکهای شور شرق ایران برگرفته از نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰۰ خاکهای شور ایران

۴. بررسی شوری خاک در محور خور-عرب آباد

۴-۱. نمونه گیری

ها تا محور کمتر از ۲۰ متر بوده و در هر ایستگاه برای نمونه گیری چاله کوچکی به کمک بیلچه تا عمق ۲۰ تا ۳۰ سانتیمتر ایجاد شده و سپس نمونه هایی به وزن تقریبی ۱ کیلوگرم برداشت شد

برای مطالعه شیمیایی خاک های موجود در محور خور-عرب آباد تعداد ۷ ایستگاه نمونه برداری که در طول مسیر به فاصله تقریبی ۱۰ کیلومتر از هم قرار داشتند در حاشیه جاده انتخاب گردید (شکل ۳). فاصله عرضی این ایستگاه



شکل ۳. موقعیت ایستگاه های نمونه برداری در امتداد جاده خور - عرب آباد (فاصله ایستگاه ها از شهر خور مشخص شده است)

۲-۴. روش آزمایشگاهی و نتایج

نمونه های خاک برای تعیین بافت، pH، هدایت الکتریکی (EC)، درصد آهک و گچ مورد آزمایش قرار گرفتند. نتایج آزمایشات صورت گرفته در جدول ۱ ملاحظه می شود. نتایج بدست آمده در آزمایشات شیمیایی اولیه نمونه ها نشان دادند که اکثر نمونه ها در رده خاک های شور قرار می گیرند، برای تعیین این موضوع که در این پروژه با چه نوع خاک های شوری روبرو هستیم، از روش پیشرفته جذب اتمی به طریقه تر برای تعیین دقیق غلظت یون های سدیم، کلسیم و منیزیم در نمونه ها استفاده گردید. بدین ترتیب غلظت این یونها برحسب ppm اندازه گیری شد که این مقادیر برای محاسبه شاخص SAR نمونه ها به میلی اکوی والان بر لیتر تبدیل شدند. جدول ۲ نتایج اندازه گیری ها و محاسبات صورت گرفته را نشان می دهد.

۳-۴. نتایج بررسی وضعیت شوری خاک در محور خور-

عرب آباد

شوری خاک در مناطق مرطوب بیشتر با خاکهای اسیدی روبرو هستیم بدین دلیل که بارندگی زیاد سبب شست و شوی عمقی کلسیم، منیزیم و سدیم از خاک می شود. در مقابل در بیشتر نواحی خشک مشکل اصلی خاک، تجمع نمک های محلول حاصل از بازها می باشد که باعث شوری خاک می گردد. نمکی که در آب حلالیت بیشتری نسبت به گچ (سولفات کلسیم) داشته باشد، نمک محلول گفته می شود. بیشترین میزان غلظت نمکهای محلول در خاک، سولفاتها (SO_4^{--}) بیکربناتها (HCO_3^-) و کلریدها (Cl^-) با بازهای کلسیم، منیزیم و سدیم هستند. این نمکها ممکن است از مواد مادری یا آبیاری خاک با آب شور حاصل شوند. خاکشناسان بر اساس نوع نمکهای محلول سه نوع خاک را مورد بررسی قرار می دهند: خاکهای شور، خاکهای سدیمی و خاکهای شور-سدیمی (جداول ۱ و ۲).

جدول ۱. خصوصیات خاکهای تحت تاثیر شوری (پلاستر، ۲۰۰۹)

Soil building	pH	Sodium absorption ratio (SAR)	Exchangeable sodium percent (ESP)	Electrical conductivity (EC)	Soil salinity class
normal	8.5<	13<	15<	4>	Passion
Weak	8.5>	13>	15>	4<	Sodium
normal	< 8.5	>13	> 15	> 4	Salty-sodomy

جدول ۲. رده بندی خاک های شور (پلاستر، ۲۰۰۹)

Electrical conductivity (EC) ds/m	Salinity class
0-2	Non salty
2-4	Low salinity
4-8	Medium salinity
8-16	High salinity
>16	Very high salinity

خصوصیات این سه نوع خاک در جداول ۳ و ۴ آورده شده است. با مقایسه EC نمونه‌ها بارده بندی مرجع پلاستر (۲۰۰۹) (Plaster, 2009) ملاحظه گردید که درجات متفاوتی از شوری از حالت غیر شور تا بسیار زیاد در منطقه وجود دارد. در مجموع به جز ایستگاه B در مابقی مسیر با خاکی شور روبرو هستیم. بدترین وضعیت شوری در ایستگاه F وجود دارد. این ایستگاه که در ۶۴ کیلومتری روستای خور قرار دارد، مسیر جریانات و سیلاب‌های سطحی می‌باشد. در این ایستگاه در ۳ نقطه نمونه گیری انجام شد. نمونه‌های ۸ و ۹ از بستر مسیل و در دو نقطه که رنگ خاک متفاوت از هم بود برداشت شدند. سطح خاک در هر دو نقطه سخت بود. نمونه شماره ۷ از خاکریز جاده جدید در حال احداث خور- عرب آباد برداشت گردید. مصالح خاکریز انجام شده با خاک محل یکسان نمی‌باشند که نشان دهنده حمل از محل دیگری می‌باشند. نتایج آزمایش‌های انجام شده نشان داد که خاک خاکریز نیز به شدت شور می‌باشد. این نکته اثبات می‌کند که خاکریز دچار شوری ثانویه که احتمالاً ناشی از مهاجرت نمک‌ها است گردیده است. ایستگاه G نیز در مسیر رودخانه فصلی "اوکمر" انتخاب گردید و در دو نقطه یکی در کف رودخانه و دیگری در تراز بالاتر از کف رودخانه نمونه گیری انجام شد. نکته جالب اینکه شوری خاک در این ایستگاه بسیار کم و نزدیک به خاک غیر شور است. این وضعیت می‌تواند ناشی از سرچشمه گرفتن جریانات فصلی این رودخانه از زمین‌های و سنگ‌های فاقد نمک باشد. ۲ ایستگاه B و G در محور خور- عرب آباد و احتمالاً زمین‌های نزدیک به آنها دارای خاک تقریباً غیر شور هستند. با توجه به موقعیت

مناسب این دو ایستگاه که یکی در ابتدای مسیر و دیگری در انتهای مسیر قرار گرفته می‌توان آنها را به عنوان مکان‌های قرضه مناسب برای تامین خاک غیر شور در طرح‌های توسعه مسیر در نظر گرفت. با مقایسه شاخص SAR نمونه‌ها و میزان EC و pH آنها با محدوده‌های تعریف شده مشخص می‌گردد که خاک مسیر در ایستگاه A نزدیک به شور- سدیمی، در ایستگاه F شور- سدیمی و در مابقی ایستگاه‌ها غیر سدیمی می‌باشد. عمده‌ترین خطر خاک سدیمی همان گونه که در بخش قبل مطرح شد، پتانسیل واگرایی این خاک‌ها می‌باشد. در ایستگاه F همان گونه که در بحث شوری نیز مطرح شد، سطح خاک دارای ترک و سخت مشاهده گردید که خود تاییدی بر سدیمی بودن خاک (علاوه بر شوری) در این محل می‌باشد. از میان گزینه‌های مختلف مقابله با خاک‌های سدیمی که گزینه یا گزینه‌های مناسب بایستی در این ایستگاه حتماً مد نظر قرار گیرد.

۵. انواع مصالح مورد استفاده

۵-۱. خاک مسیر

برای مطالعه خصوصیات فیزیکی و مکانیکی خاک‌های موجود در محور خور-عرب آباد تعداد ۷ ایستگاه نمونه برداری در طول مسیر به فاصله ۱۰ کیلومتر از هم و در خلاصه نتایج آزمایش‌های انجام شده بر روی نمونه‌ها در جدول ۵ ارائه شده است همچنین منحنی‌های دانه‌بندی برای انواع خاک‌های حاشیه جاده انتخاب گردید (شکل ۴)

جدول ۳. نتایج آنالیز فیزیکی و شیمیایی اولیه خاک محور خور- عرب آباد

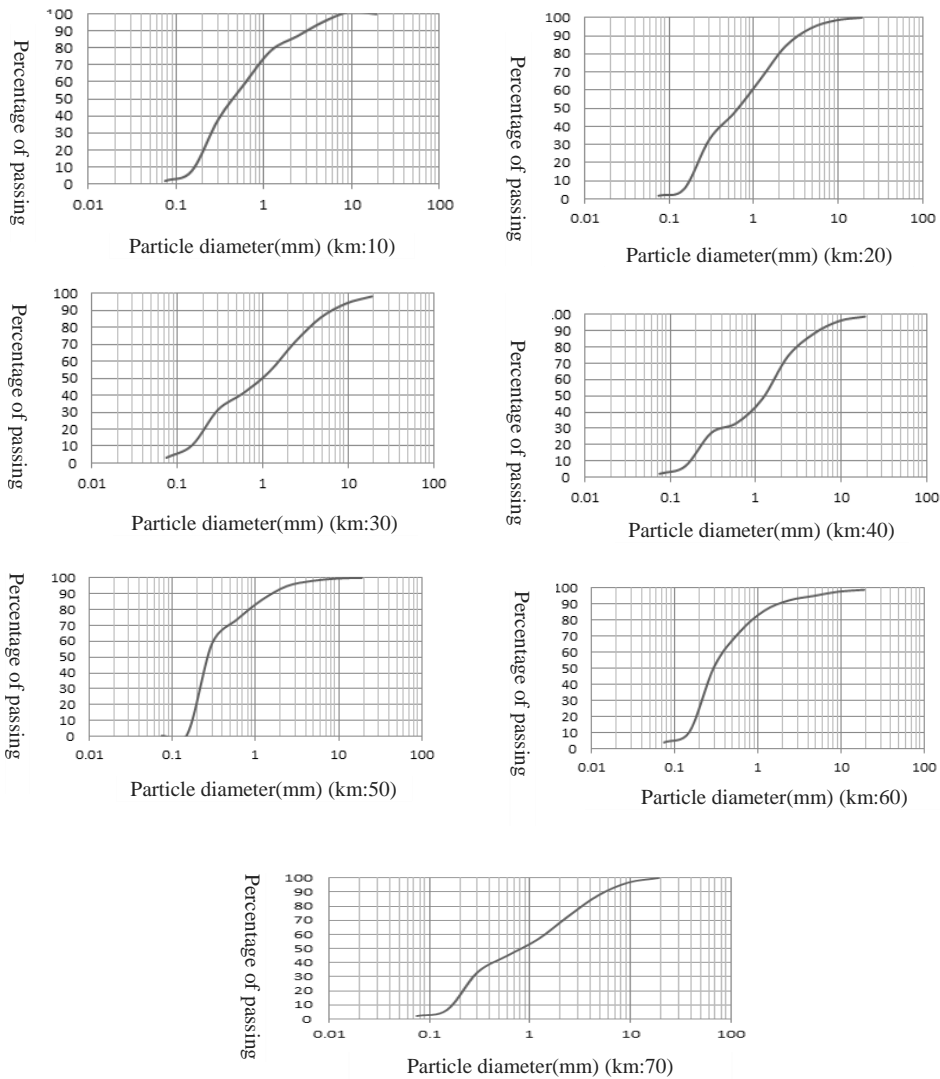
Description of Soil Salinity	Plaster %	Lime %	Electrical conductivity		pH	Soil aggregation			Coordinates		Station sampling
			μs/cm	ds/m		clay %	Silt %	sand %	Y	X	
High salinity	5.9	35.1	8700	8.7	8.4	17.1	6.5	76.4	3649966	623313	A
Non salty	6.5	37.8	707	0.7	12.2	1.3	5.8	92.9	3651467	612393	B
Non salty	6.1	25.6	718	0.7	8.3	8.5	9.1	82.4	3652147	609867	B
Medium salinity	5.7	28.8	4740	4.7	7.7	8.5	3.1	88.4	3653297	602277	C
Low salinity	5.2	36.3	3390	3.4	8.6	4.9	8.2	86.9	3651826	590406	D
Medium salinity	4.9	21.5	4350	4.4	8.7	6.7	6.4	86.9	3652938	580146	E
High salinity	4.3	40	12580	12.6	7.9	13.9	17.2	68.9	3653315	569038	F
Very high salinity	5.2	48.1	20600	20.6	8.3	6.7	16.9	76.4	3653907	565557	F
High salinity	5.4	41.2	14760	14.8	7.8	10.3	4.3	85.4	3654088	564959	F
Low salinity	5.6	28.3	2090	2.1	7.9	2.6	0.5	96.9	3654391	564256	G
Low salinity	5.2	28.8	2290	2.3	7.9	11.6	0.6	87.8	3544578	564153	G

جدول ۴. غلظت کاتیون های سدیم، منیزیم و کلسیم در خاک محور خور- عرب آباد

Ca ppm	Na ppm	Mg ppm	Ca meq/l	Na meq/l	Mg meq/l	SAR	Sample number	Station Sampling
13036	5354	7720	651.80	232.78	643.33	9.1	1	A
24500	3602	9056	1225.00	156.61	754.67	5.0	2	B
9402	2562	7134	470.10	111.39	594.50	4.8	3	B
7414	3418	6738	370.70	148.61	561.50	6.9	4	C
20340	2332	6330	1017.00	101.39	527.50	3.6	5	D
6310	3176	6114	315.50	138.09	509.50	6.8	6	E
9142	5574	4334	457.10	242.35	361.17	12.0	7	F
9664	6648	4902	483.20	289.04	408.50	13.7	8	F
14430	8188	4340	721.50	356.00	361.67	15.3	9	F
15328	2092	5238	766.40	90.96	436.50	3.7	10	G
16628	1792	3134	831.40	77.91	261.17	3.3	11	G

جدول ۵. نتایج آزمایش‌های خصوصیات فیزیکی - مکانیکی مصالح خاکی در مسیر خور - عرب‌آباد

Modified Proctor	Soil classification	SE	Percentage of the main soil components			The Atterberg Circle		GS	Sampling site (Distance from the khor)	Sample number		
			silt	sand	Gravel	PL	LL					
$d_{max}\gamma(kN/m^3)$	wopt %	AASHTO	USCS									
26.00	9.00	A-2-4	SP	22.94	1.81	93.25	4.94	2.55	14	18	Km10	1
25.31	7.90	A-2-4	SP	19.53	1.59	92.56	5.85	2.55	15	19	Km20	2
25.31	10.90	A-3	SP	34.09	3.19	82.51	14.30	2.55	NP	NP	Km30	3
25.90	6.70	A-3	SP	64.00	2.06	86.05	11.89	2.53	NP	NP	Km40	4
24.23	8.80	A-3	SP	28.72	0.19	97.88	1.93	2.56	NP	NP	Km50	5
22.96	13.50	A-2-6	SP	15.04	3.99	91.13	4.87	2.28	13	24	Km60	6
24.53	9.20	A-3	SP	61.76	2.18	85.42	12.40	2.57	NP	NP	Km70	7



شکل ۴. منحنی های دانه بندی

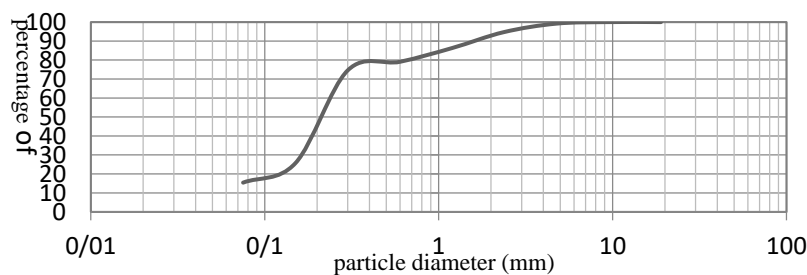
۲-۵. آهک صنعتی

به دلایل اقتصادی و دسترسی آسان معمولاً از آهک برای تثبیت خاک در پروژه‌های راه سازی استفاده می شود. در تحقیق حاضر نیز در ابتدا از آهک شکفته تهیه شده از بازار که در

کیسه‌های ۵۰ کیلوگرمی بسته بندی شده بود استفاده گردید. مشخصات ظاهری آهک مصرفی در این تحقیق در جدول ۶ و منحنی دانه بندی آن در (شکل ۵) مشاهده می گردد.

جدول ۶. مشخصات ظاهری آهک مصرفی

White	Color
Powder	the shape
2.09	Special density
Calcium Hydroxide	The predominant chemical composition



شکل ۵. منحنی دانه بندی آهک مصرفی

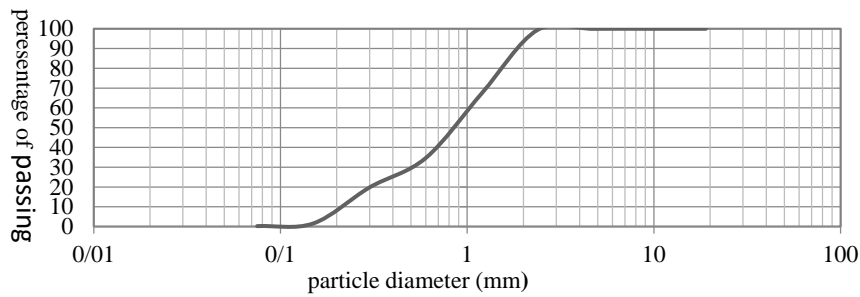
۵-۳. منیزیت ریزدانه

منیزیت ریزدانه نسبت به سربراره آهن دارای فاصله حمل کوتاهتری تا محور خور-عرب آباد است که قطعاً بر جنبه های اقتصادی عملیات تثبیت اثر گذار است. مشخصات ظاهری و کلی منیزیت ریزدانه در جدول ۷ و منحنی دانه بندی نمونه مورد استفاده در این تحقیق در (شکل ۶) مشاهده می گردد. با توجه به وجود کارخانه تولید اکسید منیزیم در شهرستان سربیشه استان خراسان جنوبی و انباشت باطله های مرحله سنگ شکنی آن در محوطه کارخانه که تقریباً بلا استفاده

هستند. این گزینه به عنوان یک عامل تثبیت کننده احتمالی در تحقیق حاضر مورد بررسی قرار گرفت. این مواد به دلیل ریزدانه بودن مناسب برای عملیات پخت در مرحله بعدی تولید اکسید منیزیم نیستند و در حال حاضر به عنوان باطله در محوطه کارخانه انباشت می شوند. از آنجایی که این مواد تنها به دلیل اندازه نامناسب باطله محسوب می شوند، ترکیب شیمیایی غالب آنها همان ترکیب شیمیایی سنگ معدن ورودی به کارخانه یعنی منیزیت (کربنات منیزیم، $MgCO_3$) می باشد.

جدول ۷. مشخصات ظاهری منیزیت ریزدانه

White	Color
Powder	Size
2.74	Gs
Magnesium carbonate	predominant chemical composition



شکل ۶. منحنی دانه بندی منیزیت ریزدانه

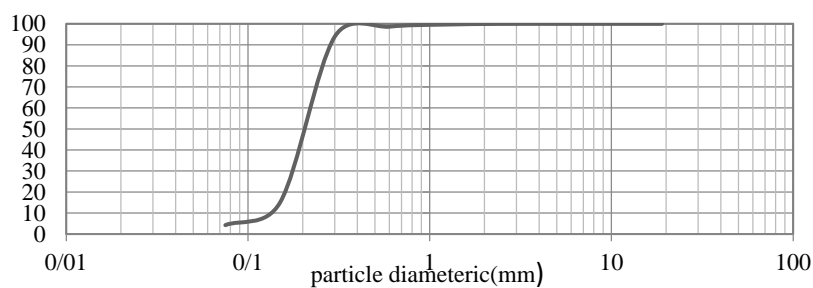
۵-۴. باطله کارخانه فرآوری مس

بودن در تثبیت خاک، این ماده نیز نسبت به سرباره آهن مزیت اقتصادی خواهد داشت. مشخصات ظاهری باطله کارخانه فرآوری مس در جدول ۸ و منحنی دانه بندی نمونه مورد استفاده در این تحقیق در (شکل ۷) مشاهده می گردد.

مشابه بحث منیزیت ریزدانه، وجود معدن مس قلعهزری در نزدیکی محور خور-عرب آباد انگیزه ای شد تا پتانسیل کاربرد باطله های کارخانه فرآوری مس این معدن نیز برای تثبیت خاک مورد بررسی قرار گیرد. بدیهی است که در صورت مفید

جدول ۸. مشخصات ظاهری باطله کارخانه فرآوری مس قلعهزری

Dark	Color
Powder	Size
2.74	Gs
Silicates	predominant chemical composition



شکل ۷. منحنی دانه بندی منیزیت ریزدانه

۶. نحوه ساخت نمونه ها

شد. برای تعیین میزان بهینه آهک، نمونه هایی با ۲، ۵ و ۱۰ درصد آهک تهیه گردید. برای دو ماده جدید منیزیت و باطله مس طبق مطالعات و پیشنهادات قبلی ۵٪ انتخاب شد و ۲٪ آهک نیز به نیمی از نمونه های سرباره به عنوان کاتالیزور اضافه

در تحقیق حاضر برای بهسازی خاک به نمونه های خاک اخذ شده از محور خور - عرب آباد انواع مواد ذکر شده در بخش ۳ شامل آهک شکفته، منیزیت ریزدانه و باطله مس اضافه گردید. بدین ترتیب ۳ گروه از نمونه ها با مواد مختلف ساخته

یافته است. در تحقیق حاضر به نمونه های خاک اخذ شده از محور خور - عرب آباد انواع مواد ذکر شده شامل آهک شکفته، منیزیت ریزدانه و باطله مس افزوده گردید. بدین ترتیب ۳ گروه از نمونه ها با مواد مختلف ساخته شد. برای تعیین میزان بهینه آهک، نمونه هایی با ۲، ۵ و ۱۰ درصد آهک تهیه گردید. و همچنین برای تعیین درصد بهینه منیزیت و باطله مس نمونه هایی با ۵ و ۷ درصد انتخاب شد. تمامی نمونه ها با درصد رطوبت بهینه آماده شدند. بنابراین برای هر نمونه با ترکیب جدید آزمایش تراکم مجزایی انجام و درصد رطوبت بهینه آن مشخص گردید. همچنین برای اکثر نمونه ها از زمان عمل آوری ۷ روزه استفاده شد و پس از آن آزمایش CBR انجام شد. برای ساخت نمونه های ۴ کیلوگرمی CBR مقدار خاک و مواد افزودنی لازم آماده و بصورت خشک با هم مخلوط شدند. در ادامه آب مورد نیاز برای رسیدن به رطوبت بهینه به نمونه اضافه و بخوبی با آن مخلوط شد. پس از آن مواد نمونه داخل قالب CBR ریخته شده و طبق استاندارد شماره ASTM D698 در ۵ لایه و هر لایه با ۵۶ ضربه چکش ۴،۵ کیلوگرمی متراکم شدند. قالب حاوی نمونه متراکم شده برای اطمینان نسبت به از دست ندادن رطوبت داخل کیسه نایلونی قرار داده شده و بمدت ۷ روز برای عمل آوری نگهداری شد. پس از سپری شدن این زمان بمدت ۴ روز نیز در داخل آب نگهداری گردید و در خلال این ۴ روز تورم نمونه ها با استفاده از گیج اندازه گیری شد. در نهایت نمونه از آب خارج و آزمایش CBR بر روی آن انجام شد. در (شکل ۸) نحوه اندازه گیری تورم نمونه ها نشان داده شده است.



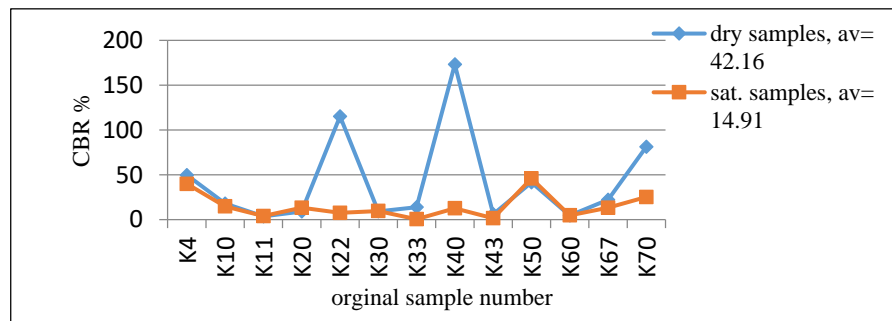
شکل ۸. طریقه اندازه گیری تورم نمونه های CBR

شد (هریس و همکاران ۲۰۰۶، اکرمی ۱۳۸۵، نادری ۱۳۸۸). تمامی نمونه ها با درصد رطوبت بهینه آماده شدند. بنابراین برای هر نمونه با ترکیب جدید آزمایش تراکم مجزایی انجام و درصد رطوبت بهینه آن مشخص گردید. همچنین برای اکثر نمونه ها از زمان عمل آوری ۷ روزه استفاده شد و پس از آن آزمایش CBR اشباع انجام شد. برای سهولت نامگذاری انواع نمونه های آزمایش شده از علائم اختصاری استفاده شد. طریقه نامگذاری نمونه ها بدین صورت است که برای هر نمونه از یک نام ترکیبی ۲ قسمتی استفاده شده است. قسمت اول مشخص کننده محل اخذ نمونه از محور خور-عرب آباد و قسمت دوم نوع و درصد ماده افزودنی را نشان می دهد. در این روش نام گذاری از نماد K برای بیان کیلومتر، L برای آهک، M برای منیزیت ریزدانه و C برای باطله مس استفاده شده است. برای مثال، نمونه با نام اختصاری K20L5 نمونه خاکی است که از کیلومتر ۲۰ محور خور-عرب آباد برداشته شده و ۵ درصد آهک به آن افزوده شده است. برای ساخت نمونه های ۴ کیلوگرمی CBR مقدار خاک و مواد افزودنی لازم آماده و بصورت خشک با هم مخلوط شدند. در ادامه آب مورد نیاز برای رسیدن به رطوبت بهینه به نمونه اضافه و بخوبی با آن مخلوط شد. پس از آن مواد نمونه داخل قالب CBR ریخته شده و طبق استاندارد شماره ASTM D698 در ۵ لایه و هر لایه با ۵۶ ضربه چکش ۴/۵ کیلوگرمی متراکم شدند. قالب حاوی نمونه متراکم شده برای اطمینان نسبت به از دست ندادن رطوبت داخل کیسه نایلونی قرار داده شده و بمدت ۷ روز برای عمل آوری نگهداری شد. پس از سپری شدن این زمان به مدت ۴ روز نیز در داخل آب نگهداری گردید و در خلال این ۴ روز تورم نمونه ها با استفاده از گیج اندازه گیری شد. در نهایت نمونه از آب خارج و آزمایش CBR بر روی آن انجام شد. در شکل ۸ نحوه اندازه گیری تورم نمونه ها نشان داده شده است. در این پروژه حدود ۸۲ آزمایش CBR بر روی نمونه های خاک حاوی مواد افزودنی متنوع انجام گرفته است. هر نمونه نیز دارای یک علامت اختصاری منحصر به فرد است که بر اساس نوع و درصد مواد افزودنی بدان اختصاص

۷. خاک بدون افزودنی

در ابتدا برای ارزیابی وضعیت تناسب خاک های مورد بررسی در این تحقیق برای استفاده در مصارف راهسازی، آزمایش های CBR خشک و اشباع بر روی نمونه های خاک بدون هرگونه ماده افزودنی انجام پذیرفت. در این آزمایشات علاوه بر نمونه های اخذ شده از ۷ ایستگاه اصلی نمونه هایی نیز از ایستگاه های فرعی اشاره شده قسمت شوری خاک مورد استفاده قرار گرفتند. در شکل ۹ نتیجه آزمایش های CBR

خشک و اشباع ۱۳ نمونه مورد بررسی بصورت مقایسه ای ترسیم شده است. مطابق انتظار تمام مقادیر CBR خشک بجز یک استثناء (نمونه K50) فراتر از اعداد CBR اشباع نمونه ها هستند. همچنین متوسط اعداد CBR خشک و اشباع نمونه ها به ترتیب ۴۲/۱۶ و ۱۴/۹۱ و به ترتیب در محدوده خوب و متوسط بدست آمده است. با دقت در (شکل ۹) مشاهده می گردد که از ۱۳ مورد CBR اشباع بررسی شده ۱۰ تای آنها زیر ۲۰ یعنی متوسط و ضعیف هستند.

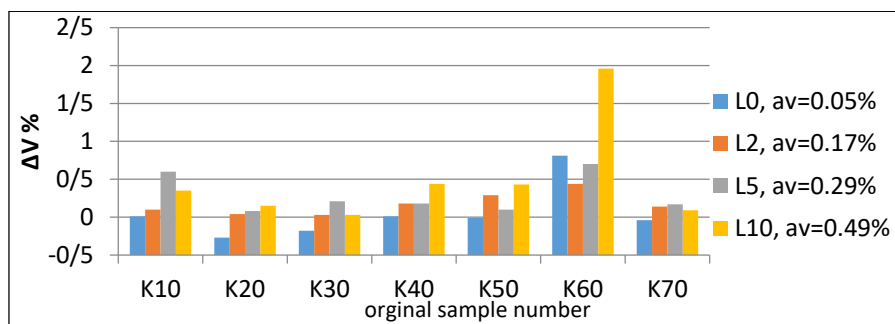


شکل ۹. نتایج CBR خشک و اشباع نمونه های خاک بدون افزودنی

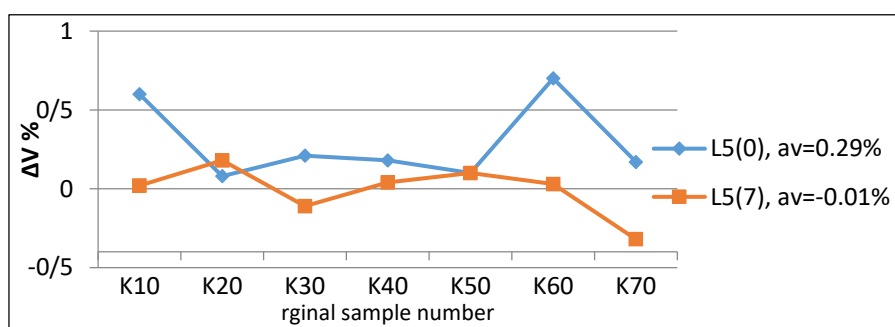
۷-۱. تاثیر آهک

تاثیر افزودن آهک با درصد های مختلف بر مقدار CBR اشباع در حالت بدون عمل آوری در (شکل ۱۰) مشاهده می گردد. برای تمامی نمونه های حاوی آهک افزایش میانگین CBR نسبت به نمونه فاقد آهک (L0) مشاهده می شود. چنانچه مطابق عدد ۲۰ حداقل یک CBR خوب برای استفاده خاک در لایه های زیر اساس و اساس فرض شود، ملاحظه می گردد که حتی با افزودن ۲ درصد آهک نیز در تمامی نمونه ها این مقدار باربری تامین شده است و متوسط اعداد CBR افزایش یافته به مقدار ۴۵/۸۵ رسیده است. با افزودن ۱۰ درصد آهک مشاهده می گردد که حداقل یک CBR بسیار خوب (عدد ۵۰) تقریباً در تمامی نمونه ها حاصل شده است. در (شکل ۱۱) تاثیر زمان عمل آوری (یا گذشت زمان) بر افزایش باربری نمونه های خاکی مخلوط شده با ۵ درصد آهک نشان داده شده است.

مشاهده می شود که بجز در مورد نمونه K20 که احتمالاً ناشی از خطا در نمونه گیری یا آزمایش بوده است در تمامی نمونه ها عدد CBR به مقدار قابل ملاحظه ای افزایش یافته و متوسط مقادیر CBR با رشد در حدود ۶۰ درصد از مقدار ۶۴,۹۱ به عدد ۱۰۴,۱۹ افزایش یافته است. با توجه به نکات فوق ملاحظه می شود که تثبیت خاک محور خور-عرب آباد با آهک از لحاظ تامین عدد CBR لازم کاملاً جواب گو است. در رابطه با میزان آهک لازم نیز به نظر می رسد که حتی ۲ درصد آهک نیز کفایت می کند، هر چند درصدهای بالاتر نظیر ۵ درصد نتایج قابل اعتمادتری خواهد داشت.



شکل ۱۲. تغییرات حجمی نمونه‌های خاک تثبیت شده با آهک بدون عمل آوری



شکل ۱۳. مقایسه تغییرات حجمی نمونه‌های تثبیت شده با ۵ درصد آهک بدون عمل آوری و پس از عمل آوری

۷-۲. تاثیر منیزیت ریزدانه

عملکرد منیزیت ریزدانه در تقویت ظرفیت باربری خاک ها در شکل ۱۴ نشان داده شده است. در اینجا نیز مشاهده می شود که با افزودن ۲ درصد آهک به همراه منیزیت تاثیر خیلی بهتری بروز نموده و میانگین بسیار خوبی برای اعداد CBR بدست آمده است. در حالتی که منیزیت به تنهایی استفاده شده است، هرچند میانگین مقادیر CBR حاصله قابل قبول است ولی برای دو نمونه K10 و K20 هیچگونه افزایشی در ظرفیت باربری خاک بروز نکرده و اعداد CBR غیر قابل قبولی بدست آمده است. تاثیر متفاوت یک ماده افزودنی بر روی خاک در ایستگاه های مختلف ناشی از تفاوت های شیمیایی خاک و نوع یا شدت واکنش هایی است که اتفاق می افتد. تغییرات حجمی خاک در اثر تثبیت با منیزیت ریزدانه در شکل ۱۵ نشان شده است. اگرچه در اکثر ایستگاه ها تورمی اتفاق نیفتاده ولی در ۳ ایستگاه تورم نسبتاً زیادی بروز کرده است. البته در

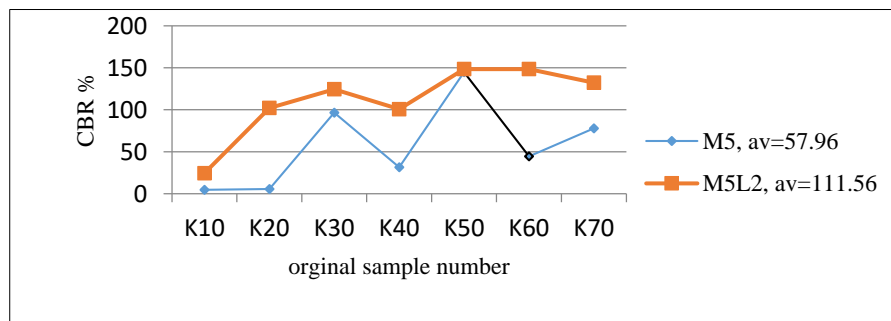
مجموع تورم رخ داده برای ترکیب منیزیت و آهک کمتر بوده است.

۷-۳. تاثیر باطله مس

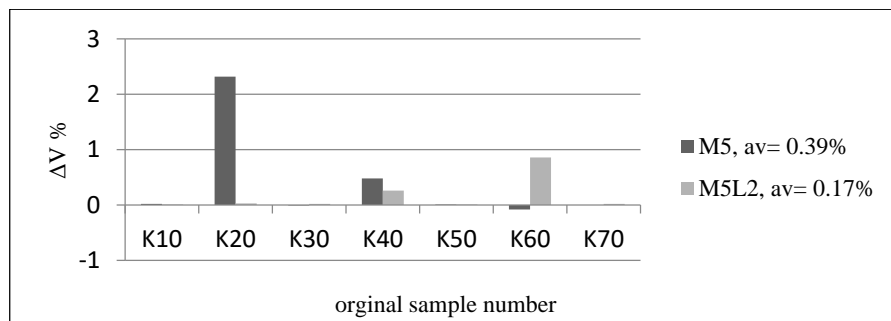
عملکرد باطله مس در تثبیت خاک های موجود در محور خور-عرب آباد در شکل ۱۶ نشان داده شده است. برخلاف دیگر مواد ملاحظه می شود که افزودن آهک نقش مثبتی در بالا بردن میانگین CBR نداشته است و مهم تر اینکه تغییرات غیر قابل انتظاری در CBR بعضی نمونه ها بروز کرده است، بطوری که عدد CBR نمونه K10 از مقدار ۲۴/۴۵ به مقدار بسیار پائین ۳/۷۴ افت کرده در حالیکه در مورد نمونه K30 مقدار CBR از ۸۹/۰۹ به مقدار بسیار زیاد ۳۶۳/۹ افزایش یافته است. در مقابل مشاهده می شود که کاربرد ۵ درصد باطله مس به تنهایی عملکرد قابل قبولی داشته است، بدین ترتیب که نه تنها سبب رسیدن به میانگین CBR بسیار خوبی شده بلکه تقریباً در همه ایستگاه ها (به جز نمونه K10) مقادیر CBR

رخ نداده است در حالی که در دو نمونه از نمونه‌هایی که با مخلوط باطله مس و آهک تثبیت شده‌اند افزایش حجم قابل ملاحظه‌ای مشاهده شده است.

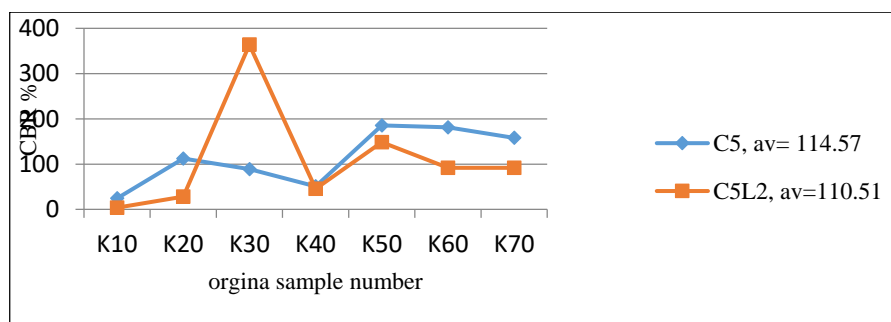
بدست آمده بسیار بالا است. شکل ۱۷ میزان تورم نمونه‌های خاک در اثر اختلاط با باطله مس را نشان می‌دهد. همانگونه که در این شکل مشاهده می‌شود، در نمونه‌هایی که با باطله مس به تنهایی تثبیت شده‌اند، بجز نمونه K40 هیچگونه تورمی



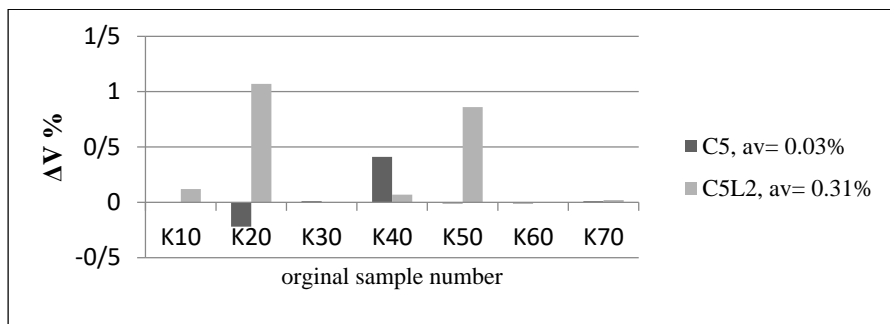
شکل ۱۴. تغییرات CBR اشباع نمونه‌های تثبیت شده با ۵ درصد منیزیت ریزدانه پس از ۷ روز عمل آوری



شکل ۱۵. تغییرات حجمی نمونه‌های تثبیت شده با ۵ درصد منیزیت ریزدانه پس از ۷ روز عمل آوری



شکل ۱۶. تغییرات CBR اشباع نمونه‌های تثبیت شده با ۵ درصد باطله مس پس از ۷ روز عمل آوری

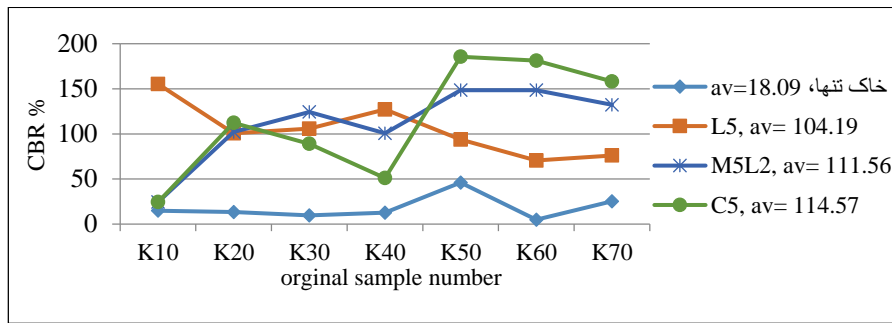


شکل ۱۷. تغییرات CBR اشباع نمونه‌های تثبیت‌شده با ۵ درصد باطله مس پس از ۷ روز عمل‌آوری

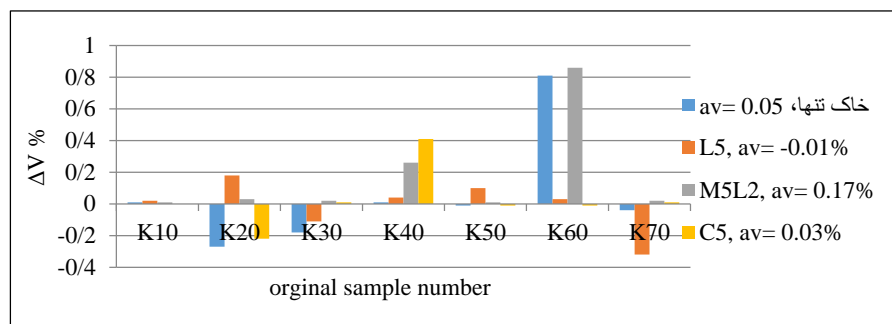
۹. تحلیل نتایج

با مرور نتایج آزمایش‌های CBR انجام‌شده بر روی ترکیب‌های مختلف افزودنی بر روی خاک‌های مورد بررسی ملاحظه می‌شود که سه ترکیب افزودنی آهک ۵ درصد، منیزیت ریزدانه ۵ درصد به همراه ۲ درصد آهک، و باطله مس ۵ درصد بهترین عملکرد را از لحاظ افزایش CBR، یکنواختی تاثیر بر روی همه نمونه‌ها، و عدم تورم نمونه‌های عمل‌آوری شده ۷ روزه به نمایش گذاشته‌اند برای بررسی دقیق‌تر بر روی ۳ ترکیب نهایی فوق در (شکل‌های ۱۱ و ۱۲) تاثیر آنها در افزایش CBR خاک و جلوگیری از تورم به صورت مقایسه‌ای و به همراه اعداد مربوط به خاک بدون افزودنی ترسیم شده‌است. در شکل ۱۸ مشاهده می‌گردد که بالاترین افزایش در میانگین CBR از افزودن ۵ درصد باطله مس بدست آمده است. نقطه ضعف باطله مس این است که در نمونه K10 افزایش کمی در باربری خاک حاصل شده‌است (هر چند که CBR حاصله در محدوده خوب قرار دارد). نکته جالب این که این وضعیت در رابطه با منیزیت ریزدانه نیز به همین صورت است و با مرور نتایج در قسمت قبلی ملاحظه می‌شود که خاک ایستگاه K10 در برابر همه افزودنی‌ها بجز آهک ۵ درصد مقاومت کرده و افزایش قابل

ملاحظه‌ای در CBR بروز نداده‌است. این پدیده متأثر از ترکیب شیمیایی یا زمین‌شناسی خاص خاک در این ایستگاه و نقاط مجاور می‌باشد. شکل ۱۸ همچنین نشان می‌دهد که آهک ۵ درصد بهترین عملکرد را از لحاظ یکنواختی تاثیر در افزایش CBR نشان داده‌است و در همین حال متوسط افزایش CBR با این ماده نیز تفاوت چندانی با افزایش ناشی از باطله مس ندارد. از لحاظ یکنواختی عملکرد در افزایش CBR وضعیت منیزیت ریزدانه بهتر از باطله مس و ضعیف‌تر از آهک می‌باشد. با دقت در (شکل ۱۹) مشاهده می‌شود که عملکرد باطله مس و آهک در جلوگیری از تورم خاک در نمونه‌های عمل‌آوری شده تقریباً مشابه بوده و مقدار کمی تورم در بعضی نمونه‌ها مشاهده شده است. عملکرد منیزیت ریزدانه نسبت به دو ماده دیگر اندکی ضعیف‌تر می‌باشد، به نحوی که در نمونه K60 تورم نسبتاً زیادی را نشان داده است. در رابطه با منیزیت با توجه به ترکیب شیمیایی آن ($MgCO_3$) که یون Mg^{2+} را وارد خاک سولفات می‌کند، این نگرانی وجود دارد که در دراز مدت باعث تشکیل کانی سولفات منیزیم ($MgSO_4$) در خاک شود. در چنین حالتی این ترکیب به مراتب انبساطی‌تر از سولفات کلسیم یا گچ موجود در خاک خواهد بود.



شکل ۱۸. مقایسه تغییرات CBR اشباع نمونه‌های تثبیت شده با آهک، منیزیت ریزدانه و باطله مس



شکل ۱۹. مقایسه تغییرات حجمی نمونه‌های تثبیت شده با آهک، منیزیت ریزدانه و باطله مس

۱۰. نتیجه گیری

افزودنی آهک ۵ درصد، منیزیت ریزدانه ۵ درصد به همراه ۲ درصد آهک، و باطله مس ۵ درصد بهترین عملکرد را از لحاظ افزایش CBR، یکنواختی تاثیر بر روی همه نمونه‌ها، و عدم تورم نمونه‌های عمل‌آوری شده ۷ روزه به نمایش گذاشته‌اند. از لحاظ یکنواختی عملکرد در افزایش CBR وضعیت منیزیت ریزدانه بهتر از باطله مس و ضعیفتر از آهک می‌باشد. عملکرد باطله مس و آهک در جلوگیری از تورم خاک در نمونه‌های عمل‌آوری شده تقریباً مشابه بوده و مقدار کمی تورم در بعضی نمونه‌ها مشاهده شده است. عملکرد منیزیت ریزدانه نسبت به دو ماده دیگر اندکی ضعیفتر می‌باشد. سه ترکیب افزودنی آهک ۵ درصد، منیزیت ریزدانه ۵ درصد به همراه ۲ درصد آهک، و باطله مس ۵ درصد بهترین عملکرد را از لحاظ افزایش CBR،

کاربرد ۵ درصد باطله مس به تنهایی عملکرد قابل قبولی داشته است، بدین ترتیب که نه تنها سبب رسیدن به میانگین CBR بسیار خوبی شده بلکه تقریباً در همه ایستگاهها مقادیر CBR بدست آمده بسیار بالا است. درحالیکه افزودن آهک نقش مثبتی در بالا بردن میانگین CBR نداشته‌است و مهمتر اینکه تغییرات غیرقابل انتظاری در CBR بعضی نمونه‌ها بروز کرده است. در نمونه‌هایی که با باطله مس به تنهایی تثبیت شده‌اند، تورم خیلی کمی رخ داده‌است در حالیکه در بعضی از نمونه‌هایی که با مخلوط باطله مس و آهک تثبیت شده‌اند افزایش حجم بیشتری مشاهده شده‌است. در مجموع باطله مس به عنوان یک ماده تثبیت کننده، عملکرد رضایت بخشی هم به لحاظ معیار CBR و هم به لحاظ کمی تورم به نمایش گذاشته‌است. سه ترکیب

یکنواختی تاثیر بر روی همه نمونه‌ها، و عدم تورم نمونه‌های عمل‌آوری شده ۷ روزه به‌نمایش گذاشته‌اند. از لحاظ یکنواختی عملکرد افزایش CBR وضعیت منیزیت ریزدانه بهتر از باطله مس و ضعیفتر از آهک می‌باشد. عملکرد باطله مس و آهک در جلوگیری از تورم خاک در نمونه‌های عمل‌آوری شده تقریباً مشابه بوده و مقدار کمی تورم در بعضی نمونه‌ها مشاهده شده است. عملکرد منیزیت ریزدانه نسبت به دو ماده دیگر اندکی ضعیفتر می‌باشد

منابع

- اکرمی، ۱۳۸۵. بررسی خاک رس تشبیت شده با آهک و سرباره کوره و اثر سولفات بر آن، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه بوعلی سینا، همدان.
- حافظی مقدس ن.، غفور م.، و قزاق.، ۱۳۸۸. ارزیابی و پهنه بند بافت خاک در گستره شهر مشهد، بیست و پنجمین گرد همایی علوم زمین. فهمی‌فر، ا.، سروش، ح.، ۱۳۸۰. آزمایش‌های مکانیک سنگ، مبانی نظری و استانداردها. جلد اول: آزمون‌های آزمایشگاهی، آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک. چاپ اول. تهران. ۷۱۹ ص.
- کاوسی، ا.، هاشمیان، ل.، ۱۳۸۰. بررسی تثبیت خاک با استفاده از آهک در فرودگاه پارس، مجموعه مقالات نخستین کنفرانس بهسازی زمین، دانشگاه صنعتی امیر کبیر، تهران.
- هاشمی طباطبایی، س.، آقایی آرابی، ع.، ۱۳۸۴. بررسی تاثیر آهک شکفته و زنده بر مشخصات فیزیکی و مقاومتی خاکهای اصلاح شده، پروژه تحقیقاتی مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن.
- Ahmed, A.; Ugai, K., Kamei, T. 2010. Application of Gypsum Waste Plasterboard and Waste Plastic Trays to Enhance the Performance of Sandy Soil, Proceedings of Geo-Shanghai International Conference, Shanghai, China, No. 207, pp. 165–173.
- Bell, F.G. and Coulthard, J.M., 1990. Stabilization of clay soils with lime, *Mutual Engineering*, 7, pp. 140-125.
- Celik, C., Nalbantoglu, Z. E 2013. Effects of ground granulated blastfurnace slag (GGBS) on the swelling properties of lime-stabilized sulfate-bearing soils, *Engineering Geology*, 163, pp. 20-25.
- Diamond, S., Kinter, E. B. 1965. Mechanisms of Soil-Lime Stabilisation, *Highway Research Record* 92, pp. 83-102.
- Elsharawy, M. A. O., Elbording, M. M., Sedeka, A. A. 2008. Improvement of a salt affected soil on Bahr EL-Bakar area using certain industrial by products. *Journal of Applied Science and Research*, 47, 839-846.
- Gharib, M., Saba, H., Barazesh, A. 2012. Experimental investigation of impact of adding lime on atterberg limits in golestan province soils, *International Research Journal of Applied and Basic Sciences*, 3(4), pp. 796800.
- Hopkins, T. C. Hunsucker, D. q., Beckhan, T. 1994. Selection of Design Strengths of Untreated Soil Subgrades and Subgrades Treated With Cement and Hydrated Lime, *Transportation Research Record* 1440, 1, 44-37.
- Harty, J. R., Thompson, M. R. 1973. Lime Reactivity of Tropical and Subtropical Soils, *Highway Research Record* 442, pp. 112-102.
- Khoury, N. N., Zaman, M. M. 2007. Environmental Effects of Aggregate Stabilized with Cementation Materials, *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 18, No. 1, pp. 41–48.
- Klug, H. P., Alexander, L. E. 1974. X-Ray Diffraction Procedures for Polycrystalline and Amorphous Materials, 3rd. Printing, John Wiley & Sons Inc., New York.
- Mostafazadeh-Farad, B., Heidarpour, M. Aghakhani, A., Feizi, M. 2007. Effects of irrigation water salinity and leaching on soil chemical properties in an arid region.
- Mcdowell, C. 1960. Evaluation of Soil-lime Stabilisation Mixtures, *Highway Research Record* 139, pp. 25-15.
- Moh, Z. C. 1965. Reactions of Soil Minerals With Cement and Chemical, *Highway Research Record* 86, pp. 0-39.
- Li, F. H., 2009. Reclamation of sodic soil as affected by corn stalk application and incubation: A laboratory study. *Pedosphere*, 19, 465-475.
- Sherwood, P. T. 1993. Soil Stabilisation With Cement and Lime, State of the Art Report, Transport Research Laboratory, IIMSO Publication, London.