

یادداشت تحقیقاتی:

بررسی آزمایشگاهی روش‌های تثبیت خاک‌های سولفاته در

راه‌های کویری ایران

مرتضی عراقی^{۱*}، حسین نوفرستی^۲

۱- استادیار بخش مهندسی عمران، دانشگاه بیرجند

۲- استادیار بخش مهندسی معدن، دانشگاه بیرجند

*m.araghi@birjand.ac.ir

تاریخ پذیرش: [۹۶/۱۱/۲۳]

تاریخ دریافت: [۹۵/۱۱/۲۱]

چکیده

بخش عمده‌ای از راه‌های فعلی و در دست احداث ایران از کویرهای خشکی می‌گذرد که بیشتر آنها فاقد مصالح مرغوب برای استفاده در راه‌سازی است، از سوی دیگر حمل خاک مرغوب به کارگاه‌های راه‌سازی نیز با توجه به فاصله حمل زیاد صرفه اقتصادی ندارد. در این مقاله به بررسی و پژوهش در رابطه با روش تثبیت خاک در پروژه راه‌سازی محور کویری خور- عرب‌آباد در استان خراسان جنوبی پرداخته شده است. بدین منظور بعد از مرور تحقیقات گذشته و مطالعات زمین‌شناسی، نمونه‌برداری شده و در آزمایشگاه بررسی شده است. در آزمایش‌های شیمیایی وضعیت اولیه نمونه‌ها مشخص شد که بیشتر نمونه‌ها در رده خاک‌های شور قرار می‌گیرند. برای مطالعه ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی خاک تعداد ۷ ایستگاه نمونه‌برداری تعیین شد. آزمایش‌های انجام‌شده شامل آزمایش دانه‌بندی مصالح، ارزش ماسه، تعیین چگالی ویژه، تعیین حد خمیری و حد روانی، تراکم، نسبت باربری کالیفرنیا (CBR) و تورم بود. گزینه‌های تثبیت خاک شامل آهک، سرباره کلوخه‌ای و سرباره دانه‌ای کارخانه ذوب‌آهن، منیزیت ریزدانه و باطله سنگ مس بودند. برای تعیین میزان بهینه آهک، نمونه‌هایی با ۲، ۵ و ۱۰ درصد آهک تهیه شد. درصد بهینه سه عامل تثبیت‌کننده دیگر، طبق مطالعات و پیشنهادهای قبلی ۵٪ انتخاب شد و ۲٪ آهک نیز به نیمی از نمونه‌ها به عنوان کاتالیزور اضافه شد. 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 تأثیر روی همه نمونه‌ها، و کمی تورم نمونه‌های عمل‌آوری شده ۷ روزه از خود نشان دادند. دلیل دیگر کنار گذاشتن سرباره‌های آهن این بود که سه ماده افزودنی درحالی که عملکرد بهتر یا مشابهی نسبت به سرباره‌های آهن نشان دادند، از مزیت اقتصادی نیز با توجه به کوتاهی فاصله حمل برخوردار بودند. در رابطه با منیزیت ریزدانه نیز این نگرانی وجود دارد که در دراز مدت باعث تشکیل کانی تورم‌زای سولفات منیزیم ($MgSO_4$) در خاک شود. بنابراین استفاده از دو ماده افزودنی آهک ۵ درصد یا باطله مس ۵ درصد بیشتر توصیه می‌شود.

کلمات کلیدی: تثبیت خاک، خاک شور با سولفات زیاد، محور خور- عرب‌آباد

مقدمه (۱)

شامازیت و $(Ca_6.[Al(OH)_6]_2.(SO_4)_3.26H_2O)$

ربط داده $(Ca_6.[Si(OH)_6]_2.(SO_4).(CO_3)_2.24H_2O)$

می‌شود. تحت شرایط رطوبتی، شیمیایی و دمایی مناسب این کانی‌ها رشد کرده و منجر به تورم بیشتر خاک می‌شوند. تثبیت خاک‌های سولفاته با آهک و سیمان را می‌توان عامل تشکیل خاک‌های انبساطی بشرزاد در نظر گرفت. البته این نکته را نیز باید در نظر داشت که طبق نظر مرجع [8] در خاک‌هایی با نسبت رس کمتر از ۱۰ درصد حتی با وجود سولفات زیاد نیز تورم و اترینگایت کمی مشاهده می‌شود.

با بررسی تجربیات ناموفق تثبیت خاک‌های سولفاته، پژوهشگران "مقادیر آستانه‌ای سولفات" را که در ورای آن تثبیت خاک با آهک قابل اعتماد نیست، ارائه داده‌اند. مقادیر آستانه سولفات ارائه‌شده توسط پژوهشگران مختلف، متفاوت بوده و توافق همه‌گیری در این رابطه وجود ندارد. در مرجع [9] برای خاک با سولفات کمتر از ۰/۳ درصد تثبیت کننده‌های کلسیمی بی‌خطر، برای سولفات بین ۰/۳ تا ۰/۵ درصد تثبیت با آهک همراه با ریسک، برای سولفات بین ۰/۵ تا ۰/۸ درصد همراه با ریسک زیاد، برای سولفات بین ۰/۸ تا ۱ درصد همراه با ریسک بسیار زیاد و برای سولفات بیش از ۱ درصد غیرمجاز اعلام شد. در مرجع [10] برای سولفات کمتر از ۰/۳ درصد تثبیت کننده‌های کلسیمی بی‌خطر، برای سولفات بین ۰/۳ تا ۰/۸ درصد همراه با احتیاط و بیش از ۰/۸ درصد تثبیت با آهک/سیمان غیرمجاز اعلام شد. در مرجع [6] مشخص شد که برای خاک‌های با سولفات کمتر از ۰/۸ درصد نگرانی وجود ندارد، برای خاک‌های حاوی سولفات مابین ۰/۲۵ - ۰/۸ درصد با افزایش آهک مصرفی نگرانی برطرف می‌شود ولی برای سولفات بیش از ۰/۲۵ درصد تثبیت با آهک نباید انجام شود. در مرجع [11] نیز تایید شد که برای خاک‌های با سولفات بیش از ۰/۷ درصد تثبیت با آهک قابل اعتماد نیست.

با جمع‌بندی نظر پژوهشگران مختلف، می‌توان نتیجه گرفت که برای خاک‌های با مقادیر سولفات بیش از ۱ درصد کاربرد تثبیت کننده‌های آهکی غیرمجاز است. لازم به ذکر است که روش احتیاط‌آمیز و دو مرحله‌ای تثبیت با آهک برای این

حرکت رو به بالای آب در اثر پدیده موئینگی و تبخیر در نواحی بیابانی سبب مهاجرت نمک‌های محلول و رسوب نمک‌های هیدراته در ۲۰ تا ۳۰ سانتی‌متر سطحی بخش روسازی راه می‌شود. این نمک‌ها حتی ممکن است به زیر لایه آسفالت نیز برسند. تبلور و آبگیری انواع نمک‌ها به ویژه نمک‌های سولفاته در زیر لایه آسفالت فشارهای شدیدی به آن اعمال می‌کنند که اغلب با گذشت زمان بسیار کمتر از عمر مفید آسفالت باعث موجدار شدن روکش و یا شکافته شدن آن به صورت لکه‌ای یا شیاری می‌شود. با شکافته شدن آسفالت امکان حضور آب در زیر آسفالت و آبگیری نمک‌های موجود در محیط تسهیل شده و تخریب رویه جاده شدت می‌گیرد. به عنوان نمونه، سولفات سدیم محلول در آب در دماهای بالاتر از ۳۲ درجه سانتیگراد بصورت کانی تناردیت (Na_2SO_4) تبلور می‌شود ولی اگر درجه حرارت محیط به زیر ۳۲ درجه افت کند کانی میرابیلیت ($Na_2SO_4, 10H_2O$) شکل می‌گیرد. بنابراین در طول شب که اغلب دمای محیط به زیر ۳۲ درجه افت می‌نماید، کانی تناردیت، ۱۰ مولکول آب جذب کرده و به صورت میرابیلیت تبلور می‌شود [1]. در این فرآیند افزایش حجمی در حدود ۳۰۰٪ برای سولفات سدیم اتفاق می‌افتد که می‌تواند فشارهای تورمی بسیار شدیدی را به محیط اطراف و منجمله لایه روکش راه اعمال کند.

در صورتی که در مراحل برنامه‌ریزی، طراحی، اجراء و نگهداری راه توجهی به شوری خاک نشود، تاثیر شوری بر ساختمان راه ممکن است بسیار جدی باشد [2]. برای خاک‌های رسی انبساطی، روش‌های تثبیت خاک با افزودن انواع مواد شیمیایی مورد استفاده فراوان است. این موضوع ثابت شده است که اگر خاک رسی بطور طبیعی حاوی ژپس ($CaSO_4, 2H_2O$) و یا سولفات سدیم (Na_2SO_4) بوده و با تثبیت کننده‌های حاوی کلسیم (آهک، سیمان) مخلوط گردد، نتایج معکوسی در دراز مدت ببار خواهد آمد و خاک دچار تورم و تنش‌های حجمی جدید خواهد شد [3,4,5,6,7]. این نتایج نامطلوب به شکل‌گیری کانی‌های انبساطی جدید در خاک از قبیل اترینگایت

(جدول ۱). درصد سدیم تبادلی^۲ در خاک‌های سدیمی ۱۵ یا بیشتر و pH در حدود ۸/۵ تا ۱۰ است. در مرجع [19] نشان داده شده است که استفاده از شاخص نسبت جذب سدیم^۳ دقت بیشتری از درصد سدیم تبادلی برای تشخیص خاک‌های سدیمی دارد. شاخص SAR نشان‌دهنده غلظت یون‌های سدیم در مقایسه با غلظت یون‌های کلسیم و منیزیم طبق رابطه (۱) محاسبه می‌شود [19]:

$$SAR = \frac{[Na^+]}{\sqrt{\frac{[Mg^{2+}] + [Ca^{2+}]}{2}}} \quad (1)$$

خاک سدیمی خاکی است که SAR ≥ 13 داشته باشد. روش‌های مقابله با خاک‌های سدیمی باید در تمام مراحل توسعه راه مورد توجه قرار گیرد تا عواقب مالی و محیطی استفاده از این خاک‌ها در راه‌سازی کاهش یابد. این روش‌ها شامل مراحل برنامه ریزی، طراحی، ساخت و نگهداری است [2].

جدول (۱) خصوصیات خاکهای شور [20]

Salted Soil Class	Conductivity (ds/m)	Exchangeable Sodium (%)	Sodium Adsorption Ratio	Soil pH	Soil Structure
Saline	>4	<15	<13	<8.5	Normal
Sodic	<4	>15	>13	>8.5	Poor
Saline-Sodic	>4	>15	>13	<8.5	Normal

Table (1) Characteristics of salted soils [20]

۳-۱-۱) نمونه برداری

برای مطالعه شیمیایی خاک در محور خور-عرب‌آباد تعداد ۷ ایستگاه نمونه‌برداری در طول مسیر انتخاب شد (شکل ۱). در هر ایستگاه برای نمونه‌گیری چاله کوچکی به کمک بیلچه تا عمق ۳۰ سانتیمتر ایجاد و سپس نمونه‌هایی به وزن تقریبی ۱ کیلوگرم برداشت شد. در بعضی ایستگاه‌ها به دلیل تغییرات بارز خاک بیش از یک نمونه برداشت شد. در مجموع ۱۱ نمونه خاک برای مطالعات شیمی خاک برداشت شد.

خاک‌ها نیز استفاده شده است ولی هیچ گونه تضمینی برای موفقیت وجود ندارد. در مرجع [12] نشان داده شد که تاثیر منفی آهک بر خاک‌های پرسولفات در صورت کم‌بودن درصد آلومینای موجود در خاک یا مترکم‌تر بودن ساختمان خاک شدیدتر خواهد بود. در مرجع [13] با آزمایش ۱۲ نوع ماده مختلف برای تثبیت خاک‌های سولفات نشان داده شد که افزودن ۵٪ سرباره کوره بلند آهن‌گدازی^۱ بعلاوه ۱٪ آهک به عنوان کاتالیزور بهترین نتیجه را برای تثبیت این خاک‌ها بدست می‌دهد. همچنین خاکستر بادی کلاس F نیز برای خاک‌های با درصد سولفات سدیم ناچیز نتیجه مطلوبی حاصل می‌نماید. در مجموع پژوهشگران مختلف عمدتاً استفاده از سرباره کوره بلند آهن‌گدازی یا GGBFS را برای تثبیت خاک‌های سولفات پیشنهاد نموده‌اند [13,14,15,16,17,18]. توجه به مطالب ذکر شده در این مقاله ضمن بررسی شوری خاک در محور منتخب با تمرکز روی ساده‌ترین و اقتصادی‌ترین روش تثبیت رایج یعنی استفاده از آهک و سایر افزودنی‌های مقرون به صرفه و در دسترس مانند سرباره‌های آهن، سرباره منیزیم و باطله کارخانه فرآوری مس به ارائه روش مناسب تثبیت خاک پرداخته خواهد شد.

۲) مشخصات محور منتخب (خور-عرب‌آباد)

محور خور-عرب‌آباد در استان خراسان جنوبی قرار دارد که از نظر آب و هوایی گرم و خشک محسوب شده و از لحاظ وضعیت توپوگرافی دشت-تپه‌ماهوری ارزیابی می‌شود. نوع راه طبق استاندارد وزارت راه و شهرسازی اصلی-معمولی و با توجه به ترافیک عبوری وسایل نقلیه سنگین محور ترانزیتی محسوب می‌شود.

۳) وضعیت شیمیایی و شوری خاک در محور منتخب

۳-۱-۳) شوری خاک

خاک‌شناسان سه نوع خاک متأثر از شوری را بررسی کردند: خاک‌های شور، خاک‌های سدیمی و خاک‌های شور-سدیمی

1 Ground granulated blast furnace slag (GGBFS)

2 Exchangeable sodium percentage (ESP)

3 Sodium adsorption ratio (SAR)

سولفات در خاک‌های شور است. با توجه به درصد گچ نمونه‌ها، می‌توان درصد سولفات را با لحاظ جرم ملکولی یون SO_4^{2-} نسبت به جرم ملکولی گچ با فرمول $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ محاسبه نمود. نتیجه محاسبه در جدول (۳) ملاحظه می‌شود. از روش جذب اتمی برای تعیین دقیق غلظت یون‌های سدیم، کلسیم و منیزیم در نمونه‌ها استفاده شد. بدین ترتیب غلظت این یون‌ها اندازه‌گیری و شاخص SAR نمونه‌ها رابطه ۱ محاسبه شد (جدول ۳).

۲-۳ وضعیت شیمی خاک در محور منتخب

در رابطه با مقادیر pH اندازه‌گیری شده جدول (۲) بیشتر اندازه‌گیری‌ها در محدوده ۷/۵ تا ۸/۵ قرار دارد. بدین لحاظ خاک منطقه در رده‌ی قلیایی ضعیف تا قوی قرار دارد. با توجه به وضعیت pH و درصد بالای آهک، خاک منطقه را باید یک خاک آهکی به حساب آورد.

با مقایسه EC نمونه‌ها با رده‌بندی خاک‌های شور ملاحظه شد که درجات متفاوتی از شوری از حالت غیرشور تا بسیار زیاد وجود دارد. درصد سولفات خاک در تمامی ایستگاه‌ها جدول (۲) بسیار زیاد است. اگرچه قابلیت انحلال سولفات موجود در گچ ناچیز است، ولی صرف وجود این مقادیر که همگی بیش از ۲٪ هستند ایمنی و پایداری دراز مدت خاکریز و روکش را تحت الشعاع قرار داده و کاربرد روش‌های تثبیت با آهک را مبهم می‌سازند.

البته نکته مثبت در رابطه با خاک محور خور- عرب‌آباد این است که طبق آزمایش‌های دانه‌بندی انجام شده جدول (۴) این خاک غالباً ماسه‌ای بوده و درصد رس آنها به ندرت به ۱۰ درصد می‌رسد. در این گونه خاک‌ها طبق نظر مرجع [8] حتی با وجود سولفات زیاد نیز تورم و اترینگایت کمی مشاهده می‌شود. به هر حال به نظر می‌رسد که تاثیر مثبت یا منفی آهک در تثبیت خاک در پروژه حاضر نیاز به مطالعات آزمایشگاهی دارد که در ادامه به آن پرداخته شده است. همچنین در صورت نیاز به تثبیت خاک در این محور باید غیر از آهک گزینه‌هایی دیگری منجمله سرباره کوره بلند آهن گدازی GGBFS نیز مدنظر قرار گیرد.

شکل ۱. نقشه موقعیت محل‌های نمونه‌برداری



Fig. 1. Location map of sampling sites

۳-۱-۲ آزمایشات آزمایشگاهی و نتایج:

در این راستا نمونه‌های خاک برای تعیین بافت، pH، هدایت الکتریکی (EC)، درصد آهک و گچ مورد آزمایش قرار گرفتند. نتایج آزمایش‌ها در جدول (۲) ملاحظه می‌شود.

جدول ۲. نتایج تحلیل شیمیایی خاک محور منتخب

Sample No.	Sampling Station	pH	Conductivity ds/m	Lime %	Gypsum %	Soil Salinity
1	A	8.4	8.7	35.1	5.9	Very Saline
2	B	12.2	0.7	37.8	6.5	Non Saline
3	B	8.3	0.7	25.6	6.1	Non Saline
4	C	7.7	4.7	28.8	5.7	Moderately Saline
5	D	8.6	3.4	36.3	5.2	Slightly Saline
6	E	8.7	4.4	21.5	4.9	Moderately Saline
7	F	7.9	12.6	40	4.3	Very Saline
8	F	8.3	20.6	48.1	5.2	Highly Saline
9	F	7.8	14.8	41.2	5.4	Very Saline
10	G	7.9	2.1	28.3	5.6	Slightly Saline
11	G	7.9	2.3	28.8	5.2	Slightly Saline

Table 2. Results of chemical analysis of soil in the selected road axis

جدول ۳. درصد سولفات و غلظت کاتیون‌های سدیم، منیزیم و کلسیم در نمونه‌های خاک

Sample No.	Ca-ppm	Na-ppm	Mg-ppm	[Ca]-meq/l	[Na]-meq/l	[Mg]-meq/l	SAR
1	13036	5354	7720	652	233	643	9.1
2	24500	3602	9056	1225	157	754	5.0
3	9402	2562	7134	470	111	594	4.8
4	7414	3418	6738	371	149	561	6.9
5	20340	2332	6330	1017	101	527	3.6
6	6310	3176	6114	315	138	509	6.8
7	9142	5574	4334	457	242	361	12.0
8	9664	6648	4902	483	289	408	13.7
9	14430	8188	4340	721	356	361	15.3
10	15328	2092	5238	766	91	436	3.7
11	16628	1792	3134	831	78	261	3.3

Table 3. Percentage of sulfate and concentration of sodium, magnesium and calcium cations in soil samples

با توجه به تاثیر مخرب سولفات‌ها بر رفتار خاک‌های شور، تعیین درصد سولفات اهمیت زیادی دارد. گچ بیشترین درصد

جدول ۴. نتایج آزمایش‌های شناسایی فیزیکی - مکانیکی نمونه‌های خاک مسیر خور - عرب‌آباد

Sampling Station	Atterberg Limits		Specific Gravity	Soil components			Sand Equivalent %	Soil Classification		Modified Proctor Test	
	PL %	LL %		Gravel %	Sand %	Fines %		AASHTO	USCS	γ_{dmax} (kN/m ³)	W _{opt} %
A	14.5	17.9	2.55	4.94	93.25	1.81	22.94	A-2-4	SP	26.00	9.00
B	15.0	18.	2.55	5.85	92.56	1.59	19.53	A-2-4	SP	25.31	7.90
C	NP	NP	2.55	14.30	82.51	3.19	34.09	A-3	SP	25.31	10.90
D	NP	NP	2.53	11.89	86.05	2.06	64.00	A-3	SP	25.90	6.70
E	NP	NP	2.56	1.93	97.88	0.19	28.72	A-3	SP	24.23	8.80
F	13.0	23.8	2.28	4.87	91.13	3.99	15.04	A-2-6	SP	22.96	13.50
G	NP	NP	2.57	12.40	85.42	2.18	61.76	A-3	SP	24.53	9.20

* NP : Non Plastic

Table 4. Results of physical and mechanical characterization tests on soil samples of the selected road axis

دانه‌ای کارخانه ذوب آهن، باطله اکسید منیزیم و باطله مس است. مشخصات ظاهری در جدول (۵) ارائه شده است.

جدول ۵. مشخصات ظاهری عوامل تثبیت کننده استفاده شده

	Lime	Magnesite	FBFS	GGBS	Copper tailing
Colour	White	White	Black	light	Green
Form	Powder	Powder	Lump	Granular	Powder
Specific gravity	2.09	2.74	3.5	2.4	2.74
Particle size, mm	<5	0.15-2.5	0.5-10	0.1-6	<0.4
Chemical composition	Calcium hydroxide	Magnesium carbonate		Silicates	

Table (5) The apparent characteristics of the stabilization agents used

از دو نوع سرباره تولیدی در کارخانه ذوب آهن اصفهان یعنی سرباره کلوخه‌ای و سرباره دانه‌ای استفاده شد.

با توجه به وجود کارخانه تولید اکسید منیزیم در نزدیکی محور مورد مطالعه و انباشت باطله‌های مرحله سنگ‌شکنی آن در محوطه کارخانه که تقریباً بلااستفاده هستند این گزینه نیز به عنوان یک عامل تثبیت کننده احتمالی مورد بررسی قرار گرفت.

وجود معدن مس قلعه‌زری در نزدیکی محور خور - عرب‌آباد انگیزه‌ای شد تا پتانسیل کاربرد باطله‌های کارخانه فرآوری مس این معدن نیز برای تثبیت خاک بررسی شود.

۴) مشخصات فیزیکی و مکانیکی خاکهای محور منتخب

برای مطالعه ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی خاک‌های موجود در محورمنتخب همان ۷ ایستگاه نمونه برداری شکل (۱) مدنظر قرار گرفتند. در این نقاط نمونه‌های خاک به طور معمول از عمق ۳۰ تا ۱۰۰ سانتی‌متر و به میزان لازم برداشت شده است. آزمایش‌های انجام شده شامل آزمایش حدود اتربرگ خاک طبق استاندارد شماره ASTM D4318، چگالی ویژه طبق استاندارد شماره ASTM D854، دانه‌بندی خاک طبق استاندارد ASTM D422، هم ارز ماسه طبق استاندارد شماره ASTM D2419، طبقه‌بندی خاک به روش‌های متحده (ASTM D2487) و آشتو (ASTM D3282)، و پروکتور اصلاح شده طبق استاندارد ASTM D1557 بودند ([21-27]). خلاصه نتایج آزمایش‌های فیزیکی و مکانیکی انجام‌شده در جدول (۴) ملاحظه می‌شود.

با نگاهی به جدول (۴) ملاحظه می‌شود که در تمامی نمونه‌ها ذرات ماسه‌ای غالب هستند که بالتبع یک ویژگی مثبت برای خاک منطقه است زیرا بیشتر مشکلات مرتبط با تراکم، در احداث خاکریزهای راه، مربوط به خاک‌های رسی هستند. ویژگی‌های انواع مصالح افزودنی به خاک محور منتخب گزینه‌های تثبیت خاک شامل آهک، سرباره کلوخه‌ای^۱ و سرباره

1 Foamed Blast Furnace Slag (FBFS)

۱-۵) چگونگی بهسازی خاک

در آزمایشگاه به نمونه‌های خاک انواع مواد ذکر شده شامل آهک شکفته، سرباره آهن کلوخه‌ای، سرباره آهن دانه‌ای، منیزیت ریزدانه و باطله مس افزوده شد. به این ترتیب ۵ گروه از نمونه‌ها با مواد مختلف ساخته شد. برای تعیین میزان بهینه آهک، نمونه‌هایی با ۲، ۵ و ۱۰ درصد آهک تهیه شد. درصد بهینه سرباره آهن طبق مطالعات و پیشنهادات قبلی ۵٪ انتخاب شد و ۲٪ آهک نیز به نیمی از نمونه‌های سرباره به عنوان کاتالیزور اضافه شد [13, 18, 28]. برای دو ماده جدید منیزیت و باطله مس نیز درصدهای اختلاط مشابه سرباره آهن بکاربرده شد تا نتایج قابل مقایسه با هم باشد.

برای سهولت نام‌گذاری انواع نمونه‌ها از علائم اختصاری استفاده شد. از نماد L برای آهک، Sa برای سرباره آهن کلوخه‌ای، Sb برای سرباره آهن دانه‌ای، M برای منیزیت ریزدانه و C برای باطله مس استفاده شده است.

نمونه‌ها طبق استاندارد شماره ASTM D1557 مترکم شدند. قالب حاوی نمونه مترکم شده برای اطمینان نسبت به از دست ندادن رطوبت داخل کیسه نایلونی قرار داده شد و به مدت ۷ روز برای عمل‌آوری نگهداری شد. پس از سپری شدن این زمان بمدت ۴ روز نیز در داخل آب نگهداری گردید و در خلال این ۴ روز تورم نمونه‌ها با استفاده از گیج اندازه‌گیری شد. در نهایت نمونه از آب خارج و آزمایش CBR طبق استاندارد AASHTO T193 بر روی آن انجام شد [29].

۵) بررسی نتایج آزمایشگاهی انواع مصالح افزودنی به خاکهای محور منتخب

در این تحقیق حدود ۱۱۰ آزمایش CBR بر روی نمونه‌های خاک حاوی مواد افزودنی متنوع انجام پذیرفته است. خلاصه نتایج آزمایشات CBR و تورم اندازه‌گیری شده در جدول (۶) ارائه شده است.

در ابتدا برای ارزیابی وضعیت تناسب خاک‌های مورد بررسی برای استفاده در مصارف راه‌سازی، آزمایش‌های CBR خشک و اشباع بر روی نمونه‌های خاک بدون هرگونه ماده افزودنی انجام پذیرفت. در این آزمایش‌ها علاوه بر نمونه‌های اخذ شده از ۷ ایستگاه اصلی، نمونه‌هایی نیز از ایستگاههای فرعی اشاره شده در بخش شیمی خاک استفاده شد. نتیجه آزمایش‌های CBR خشک و اشباع ۱۳ نمونه ردیف ۱ تا ۲۶ جدول (۶) نشان داد که مطابق انتظار تمام مقادیر CBR خشک به جز یک استثناء (نمونه K50) فراتر از اعداد CBR اشباع هستند. همچنین متوسط اعداد CBR خشک و اشباع به ترتیب ۴۲ و ۱۵ درصد بدست آمد.

با افزودن آهک به نمونه‌های اشباع بدون عمل‌آوری ردیف‌های ۲۷ تا ۴۷ جدول (۶)، در تمامی نمونه‌ها افزایش میانگین عدد CBR مشاهده شد.

با افزودن ۵ درصد از دو نوع سرباره آهن به نمونه‌های بدون آهک یا با ۲ درصد آهک مشاهده می‌شود ردیف‌های ۵۵ تا ۸۲ جدول (۶) که سرباره کلوخه‌ای (Sa) تاثیر بهتری بر افزایش باربری خاک‌ها نسبت به سرباره دانه‌ای (Sb) بجا گذاشته است. همچنین برای هر دو مدل سرباره، اضافه نمودن آهک همراه با سرباره سبب افزایش چشمگیرتری در مقادیر CBR می‌شود ولی این تغییرات در نمونه‌های مختلف یکسان نبوده و نوسان زیادی نشان می‌دهد.

با بررسی تغییرات حجمی نمونه‌ها ناشی از افزودن سرباره‌های آهن در دو حالت همراه یا بدون آهک مشاهده می‌شود که در حالت بدون آهک افزودن سرباره کلوخه‌ای تغییرات حجمی کمتری را سبب شده است، ولی به همراه ۲ درصد آهک عملکرد سرباره دانه‌ای بهتر بوده است.

درخصوص عملکرد منیزیت ریزدانه در تقویت ظرفیت باربری خاک‌ها مشاهده می‌شود که با افزودن ۲ درصد آهک به همراه منیزیت تاثیر خیلی بهتری بروز نموده و میانگین بسیار خوبی برای اعداد CBR بدست آمده است.

جدول ۶. نتایج آزمایش‌های CBR و تورم نمونه‌های خاک محور منتخب

Test No.	Sample No.	CBR %	ΔV %	Test No.	Sample No.	CBR %	ΔV %	Test No.	Sample No.	CBR %	ΔV %
1	K4(d)	49.75	-	38	K50L5*	29.70	0.10	75	K70Sb5	34.9	0.06
2	K10(d)	18	-	39	K60L5*	48.82	0.70	76	K10Sb5L2	15.22	-0.81
3	K11(d)	3.71	-	40	K70L5*	26.36	0.17	77	K20Sb5L2	209.7	0.5
4	K20(d)	9.1	-	41	K10L10*	122.8	0.35	78	K30Sb5L2	107.2	-0.01
5	K22(d)	115.2	-	42	K20L10*	163.1	0.15	79	K40Sb5L2	64.16	-0.01
6	K30(d)	9.28	-	43	K30L10*	66.82	0.03	80	K50Sb5L2	18.56	0.12
7	K33(d)	13.92	-	44	K40L10*	135.5	0.44	81	K60Sb5L2	79.63	0.03
8	K40(d)	173.1	-	45	K50L10*	64.96	0.43	82	K70Sb5L2	177.2	0
9	K43(d)	6.12	-	46	K60L10*	48.33	1.96	83	K10M5	4.64	0.02
10	K50(d)	41.58	-	47	K70L10*	18.19	0.09	84	K20M5	5.57	2.32
11	K60(d)	4.64	-	48	K10L5	155.3	0.02	85	K30M5	96.52	-0.01
12	K67(d)	22.27	-	49	K20L5	100.7	0.18	86	K40M5	31.65	0.48
13	K70(d)	81.3	-	50	K30L5	105.8	-0.11	87	K50M5	144.8	0.01
14	K4(s)	39.91	-0.08	51	K40L5	127.1	0.04	88	K60M5	44.55	-0.08
15	K10(s)	14.84	0.01	52	K50L5	93.73	0.1	89	K70M5	77.96	0
16	K11(s)	4.08	0.05	53	K60L5	70.53	0.03	90	K10M5L2	24.45	0.01
17	K20(s)	13.36	-0.27	54	K70L5	76.1	-0.32	91	K20M5L2	102.1	0.03
18	K22(s)	7.61	3.52	55	K10Sa5	10.39	0.12	92	K30M5L2	124.4	0.02
19	K30(s)	9.65	-0.18	56	K20Sa5	45.48	0.05	93	K40M5L2	100.7	0.26
20	K33(s)	0.56	-0.01	57	K30Sa5	97.45	0.22	94	K50M5L2	148.5	0.01
21	K40(s)	118.7	0.01	58	K40Sa5	57.15	0.08	95	K60M5L2	148.5	0.86
22	K43(s)	1.67	-0.54	59	K50Sa5	14.85	0.19	96	K70M5L2	132.3	0.02
23	K50(s)	70.16	-0.01	60	K60Sa5	52.53	0.01	97	K10C5	24.45	0
24	K60(s)	4.83	0.81	61	K70Sa5	113.6	0.02	98	K20C5	112.3	-0.22
25	K67(s)	13.36	-0.02	62	K10Sa5L2	28.21	0.11	99	K30C5	89.09	0.01
26	K70(s)	25.24	-0.04	63	K20Sa5L2	144.7	-0.02	100	K40C5	51.04	0.41
27	K10L2*	28.77	0.10	64	K30Sa5L2	269	0.09	101	K50C5	185.6	-0.01
28	K20L2*	148.8	0.04	65	K40Sa5L2	60.13	0.67	102	K60C5	181.3	-0.01
29	K30L2*	31.93	0.03	66	K50Sa5L2	31.18	0.99	103	K70C5	158.2	0.01
30	K40L2*	24.50	0.18	67	K60Sa5L2	151.2	-0.05	104	K10C5L2	3.74	0.12
31	K50L2*	41.76	0.29	68	K70Sa5L2	254.2	-0.05	105	K20C5L2	28.19	1.07
32	K60L2*	25.06	0.44	69	K10Sb5	5.754	-1.02	106	K30C5L2	363.9	0
33	K70L2*	20.05	0.14	70	K20Sb5	31.55	0.17	107	K40C5L2	45.48	0.07
34	K10L5*	54.76	0.6	71	K30Sb5	29.7	0.32	108	K50C5L2	148.5	0.86
35	K20L5*	197.6	0.08	72	K40Sb5	6.68	0.46	109	K60C5L2	91.88	0
36	K30L5*	66.82	0.21	73	K50Sb5	8.91	0.37	110	K70C5L2	91.88	0.02
37	K40L5*	30.21	0.18	74	K60Sb5	37.49	0.02				

* این آزمایش‌ها در شرایط عمل‌آوری نشده انجام شده است.

Table 6 Results of the CBR and inflation tests on soil samples of the selected road axis

در مقابل مشاهده می‌شود 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 ایستگاه‌ها مقادیر CBR بدست‌آمده بسیار بالا است.
 با بررسی تغییرات حجمی نمونه‌های خاک در اثر اختلاط با
 باطله مس مشخص شد که در نمونه‌هایی که با باطله مس به-
 تنهایی تثبیت شده‌اند، به جز نمونه‌های K40 و K20 تغییرات
 حجمی بسیار ناچیز است. در مجموع نیز باطله مس به تنهایی

تغییرات حجمی خاک در اثر تثبیت با منیزیت ریزدانه نشان
 داد که اگرچه در بیشتر ایستگاه‌ها ترمی 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.
 عملکرد باطله مس در تثبیت خاک‌های موجود برخلاف دیگر
 مواد نشان داد که افزودن آهک نقش مثبتی در بالابردن
 میانگین CBR نداشته است.

وضعیت منیزیت ریزدانه بهتر از باطله مس و ضعیفتر از آهک است.

با دقت در شکل (۳) مشاهده می‌شود که عملکرد باطله مس و آهک در جلوگیری از تغییرات حجمی خاک در نمونه‌های عمل‌آوری شده تقریباً مشابه بوده و مقدار کمی تورم در بعضی نمونه‌ها مشاهده شده است.

شکل ۲. مقایسه تغییرات CBR اشباع نمونه‌های تثبیت شده با آهک،

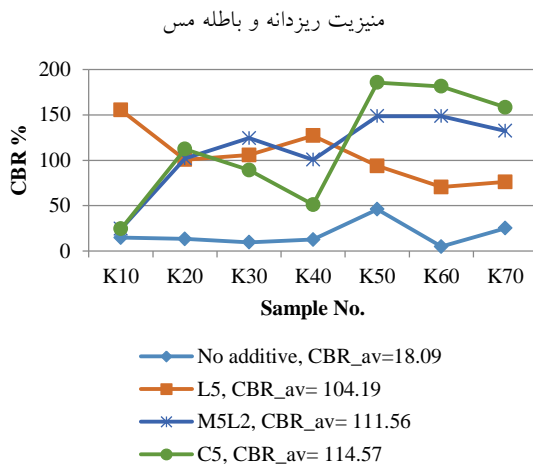


Fig. 2. Comparison of CBR of saturated samples stabilized with lime, fine magnesite and copper slag

شکل ۳. مقایسه تغییرات حجمی نمونه‌های تثبیت شده با آهک، منیزیت

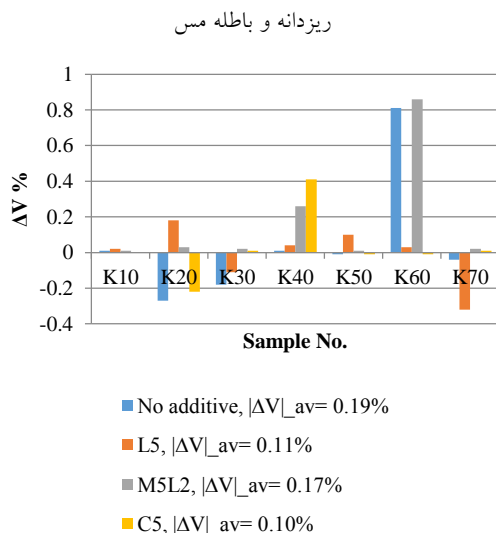


Fig. 3. Comparison of volumetric changes of samples stabilized with lime, fine magnesite and copper slag

عملکرد منیزیت ریزدانه نسبت به دو ماده دیگر ضعیفتر می‌باشد، بنحویکه در نمونه K60 تورم نسبتاً زیادی را نشان داده است. در رابطه با منیزیت با توجه به ترکیب شیمیایی آن

تغییرات حجمی بسیار کمتری را نسبت به باطله مس با آهک نشان داده است.

۱-۶) تحلیل مقایسه‌ای نتایج آزمایش CBR و درصد تورم انواع مواد افزودنی

با مرور نتایج آزمایش‌های CBR انجام شده روی ترکیب‌های مختلف افزودنی 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 روی همه نمونه‌ها، و عدم تورم نمونه‌های عمل‌آوری شده ۷ روزه به نمایش گذاشته‌اند. سرباره‌های آهن به ویژه همراه با آهک عملکرد موثری در زمینه افزایش CBR نشان داده‌اند ولی این عملکرد به شدت نوسان داشته و در ایستگاه‌های مختلف نمونه‌گیری یکنواخت نبوده است. این موضوع حکایت از این دارد که ترکیب شیمیایی خاک در عملکرد سرباره‌ها تاثیر زیادی دارد. بنابراین در وضعیت شیمیایی خاکی که در آزمایش‌های فعلی رصد نشده باشد رفتار سرباره آهن ممکن است قابل انتظار نباشد. با این وجود، مهمترین دلیل در کنار گذاشتن سرباره‌های آهن این است که سه ماده افزودنی آهک، منیزیت و باطله مس در حالی که عملکرد بهتر یا بعضاً مشابهی نسبت به سرباره‌های آهن نشان داده‌اند، با توجه به کوتاهی فاصله حمل از مزیت اقتصادی نیز برخوردار هستند.

برای بررسی دقیقتر روی ۳ ترکیب نهایی فوق در شکل‌های (۲ و ۳) تاثیر آنها در افزایش CBR خاک و جلوگیری از تورم به صورت مقایسه‌ای و به همراه اعداد مربوط به خاک بدون افزودنی ترسیم شده است. در شکل (۲) مشاهده می‌شود که بالاترین افزایش در میانگین CBR از افزودن ۵ درصد باطله مس بدست آمده است. شکل (۲) همچنین نشان می‌دهد که آهک ۵ درصد بهترین عملکرد را از لحاظ یکنواختی تاثیر در افزایش CBR نشان داده است 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

سرباره‌های آهن در افزایش CBR همراه با نوسان شدید بود. بیشتر روی خاک‌های رسی منبسط شونده انجام شده بود. در مورد کاربرد باطله مس برای تثبیت خاک شایان ذکر است که این ماده توسط معدودی از پژوهشگران مورد تایید قرار گرفته است (هاوناگی و همکاران ۲۰۰۶، گوپتا و همکاران ۲۰۱۲). در رابطه با منیزیت ریزدانه این نگرانی وجود دارد که در دراز مدت باعث تشکیل کانی تورمزای سولفات منیزیم ($MgSO_4$) در خاک شود.

در مقایسه آهک و باطله مس با توجه به هزینه قابل چشم-پوشی خرید باطله مس در مقایسه با آهک، استفاده از باطله مس بسیار به صرفه‌تر است. بنابراین باطله مس ۵ درصد به عنوان گزینه نهایی تثبیت خاک در محور خور - عرب‌آباد پیشنهاد شد.

۷) تقدیر و تشکر

این پژوهش در قالب طرح پژوهشی به شماره ابلاغیه ۹۳/د/۱۰۹۲ مورخ ۱۳۹۳/۱/۲۰ و با استفاده از اعتبارات پژوهشی دانشگاه بیرجند انجام شده است که بدین وسیله تشکر و قدردانی می‌شود.

همچنین از آقایان مهندس مجتبی محمدی و حسن بصیرانی مقدم که در تهیه نمونه‌ها و انجام آزمایش‌ها یاری نمودند، صمیمانه تشکر می‌گردد.

References

- 1- Merkle D. 2004 Chemical Heave and Expansive Salts, In Muckel G.B. Editor, Understanding Soil Risks and Hazards: Using Soil Survey to Identify Areas with Risks and Hazards to Human Life and Property, United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service, National Soil Survey Center.
- 2- Biggs A.J.W., and Mahony K.M. 2004 Is Soil Science Relevant to Road Infrastructure, 13th International Soil Conservation Organisation Conference - Brisbane.
- 3- Mitchell J. K. 1986 Practical Problems from Surprising Soil Behavior. *Journal of Geotechnical Engineering Division*, ASCE, 112 (3), 259-289.
- 4- Hunter D. 1988 Lime-Induced Heave in Sulfate-Bearing Clay Soils., *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, 114, 50-167.

۸) منابع

($MgCO_3$) که یون Mg^{2+} را وارد خاک سولفات می‌کند، این نگرانی نیز 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. بنابراین استفاده از دو ماده افزودنی آهک ۵ درصد یا باطله مس ۵ درصد بیشتر توصیه می‌گردد.

۶) نتیجه‌گیری

انتخاب نوع ماده تثبیت کننده به وضعیت شیمیایی و فیزیکی خاک و عواملی همچون شرایط جوی منطقه، میزان رفت و آمد، صرفه اقتصادی و هدف انجام تثبیت بستگی دارد. مهندسین راه‌سازی عموماً از دانش و تجربه خوبی در زمینه ارزیابی، درک و مدیریت ویژگی‌های فیزیکی خاکها برخوردارند ولی در زمینه ارزیابی و مدیریت خصوصیات شیمی خاک که حتی مهمتر از مباحث فیزیکی خاک است دچار ضعف شدید می‌باشند. در این مقاله بر اهمیت و جایگاه فوق العاده مطالعات شیمی خاک در راه‌سازی تاکید شده است.

برای مطالعه ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی خاک در محور منتخب تعداد ۷ ایستگاه نمونه‌برداری در حاشیه جاده انتخاب شد. در این پژوهش برای تثبیت خاک از آهک، سرباره کلوخه‌ای و سرباره دانه‌ای کارخانه ذوب‌آهن، باطله اکسید منیزیم و باطله مس استفاده شد. در مجموع ۱۱۰ آزمایش CBR روی نمونه‌های خاک حاوی مواد افزودنی متنوع انجام پذیرفت.

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 کمی تورم نمونه‌های عمل‌آوری شده ۷ روزه از خود نشان دادند. این در حالی است که پژوهشگران دیگر بیشتر استفاده از سرباره کوره بلند آهن گدازی یا GGBFS را برای تثبیت خاک‌های سولفات‌ه‌نموده‌اند [13 - 18]. در این پژوهش، در مقایسه با سه ماده فوق‌الذکر عملکرد

- Steel Company on Strength and Swelling Properties of Clay Stabilized with Lime in Presence of Sulfate, MSc. Thesis, University of Bu Ali Sina, Hamadan, Iran (In Persian).
- 19- Rengasamy P., Olsson K.A. 1991 Sodicy and Soil Structure. *Australian Journal of Soil Research*, 29, 935-952.
- 20- Plaster E.J. 2009 Soil Science and Management, 5th edition, Cengage Learning, 512p.
- 21- ASTM D4318, 1998 Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils, Annual book of ASTM standards, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- 22- ASTM D854-00, 2000 Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- 23- ASTM D422, 1963 Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils, Annual book of ASTM standards, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- 24- ASTM D2419-02, 2002 Standard Test Method for Sand Equivalent Value of Soils and Fine Aggregate, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- 25- ASTM D2487, 1998 Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System), Annual book of ASTM standards, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- 26- ASTM D3282-93(1997)e1, 1998 Standard Classification of Soils and Soil-Aggregate Mixtures for Highway Construction Purposes, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- 27- ASTM D1557-12e1, 2012 Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (56,000 ft-lbf/ft³ (2,700 kN-m/m³)), ASTM International, West Conshohocken, PA.
- 28- Akrami A., 2006 Investigation of Clay Stabilized with Lime and Ground Granulated Blast Furnace Slag (GGBS) in Presence of Sulfate, MSc. Thesis, University of Bu Ali Sina, Hamadan, Iran (In Persian).
- 29- AASHTO, T., 1993 Standard Method of Test for the California Bearing Ratio, In Standard Specifications for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing, American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), Washington DC.
- 30- Havanagi V.G., Prasad P.S., Guruvittal U.K. and Mathur S. 2006 Feasibility of Utilization of Copper Slag –Fly Ash –Soil Mixes for Road Construction, *Highway Research Bulletin*, 75, 59-67.
- 31- Gupta R.C., Thomas B. S., Gupta P., Rajan L., Thagriya D., 2012 An Experimental Study of Clayey Soil Stabilized By Copper Slag. *Int J Struct Civ Eng Res* 1(1):110–9.
- 5- Puppala A. J., Hanchanloet S., Jadeja M., Burkart B. 1999 Sulfate Induced Heave Distress: A Case Study. Proceedings, Transportation Research Board Annual Meeting, Washington D.C, USA.
- 6- Puppala A. J., Wattanasanticharoen E. and Punthutaecha K. 2003 Experimental Evaluations of Stabilization Methods for Sulphate rich Expansive Soils. *Ground Improvement*, 7(1), 25-35.
- 7- Puppala A.J., Naga S. Talluri., Bhaskar S. Chittoori and Gaily A. 2012 Lessons Learned from Sulfate Induced Heaving Studies in Chemically Treated Soils. Proceedings of the International Conference on Ground Improvement and Ground Control. Research Publishing, Vol. 1, November, pp.85-98.
- 8- Rajasekaran G. 2005 Sulphate Attack and Ettringite Formation in The Lime and Cement Stabilized Marine Clays, *Ocean Engineering*, 32(55), 1133-1159.
- 9- Little D. N. and R. Graves, 1995 Guidelines for Use of Lime in Sulfate-bearing Soils, Chemical Lime Company.
- 10- Berger E., Little D. N. and Graves R. 2001 Technical Memorandum: Guidelines for Stabilization of Soils Containing Sulfate. <http://www.lime.org/publications.html>.
- 11- Harris J. P., Sebesta S., and Scullion T. 2004 Hydrated Lime Stabilization of Sulfate-bearing Vertisols in Texas. *Transportation Research Record* 1868, TRB, National Research Council, Washington, D.C., pp. 31-39.
- 12- Puppala A.J., Talluri N., Gaily A., Bhaskar, Chittoori, C.S. 2013 Heaving Mechanisms in High Sulfate Soils. Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Paris, pp.3125-3128.
- 13- Harris P., VonHoldt J., Sebesta S., and Scullion T. 2006 Recommendations for Stabilization of High-Sulfate Soils in Texas, Texas Transportation Institute, Report No: 0-4240-3, Texas.
- 14- Cokca E. Yazici V. and Ozaydin V. 2009 Stabilisation of Expansive Clays Using Granulated Blast Furnace Slag (GBFS) and GBFS-Cement, *Geotechnical and Geological Engineering*, 27(4), 489-499.
- 15- Sharma A.K. and Sivapullaiah P.V. 2012 Improvement of Strength of Expansive Soil With Waste Granulated Blast Furnace Slag, Proceedings of Geo Congress-2012 , 3920-3928.
- 16- Osinubi K.J., Diden R., Ijimdiya T.S. and Eberemu A.O. 2012 Effect of Elapsed Time after Mixing on the Strength Properties of Black Cotton Soil Cement Blast Furnace Slag Mixtures, *Journal of Engineering Research*, 17(4), 63-75.
- 17- Celik E. and Nalbantoglu Z. 2013 Effects of Ground Granulated Blast Furnace Slag (GGBS) on the Swelling Properties of Lime-Stabilized Sulfate – Bearing Soils, *Engineering Geology*, 163, 20-25.
- 18- Naderi H. 2010 The Effect of Ground Granulated Blast Furnace Slag (GGBS) of Esfahan

Experimental Evaluations of Stabilization Methods for High Sulfate Soils in Iran Desert Roads

Morteza Araghi^{1*}, Hossain Nofaresti²

1. Assistant Professor, Department of Civil Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran
2. Assistant Professor, Department of Mining Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran

*m.araghi@birjand.ac.ir

Abstract:

Most of the current and under-construction road projects of Iran pass through vast deserts, which are often lacking suitable materials for use in road construction. On the other hand, due to transportation distance, carrying good soil to road construction sites is not often economical. This paper investigates the soil stabilization method in the Khor-Arababad road construction project in South Khorasan Province.

The choice of the stabilizing agent depends on the chemical and physical condition of the soil and factors such as atmospheric conditions, traffic volume, cost-effectiveness and the purpose of stabilization. Road construction engineers usually have good knowledge and experience in evaluating, understanding and managing the physical properties of soils, but they are seriously incapable in evaluating and managing the chemical properties of soil, which are even more important than the physical issues. In this paper, the importance and the vital status of soil chemistry studies in road construction have been emphasized.

Initial chemical experiments showed that most of the samples were classified as saline soils. Seven sampling stations were selected to study the physical and mechanical properties of soil. The laboratory experiments performed included sieve analysis test, sand equivalent test, specific gravity, plastic and liquid limit, compaction, California bearing ratio (CBR) and swelling.

Considering the financial factors, the first option of soil stabilization was lime. Also, two types of iron slag namely ground granulated blast furnace slag (GGBFS) and foamed blast furnace slag (FBFS) were used. Moreover, due to the existence of a magnesium oxide factory and the Qalazari copper mine near the Khor-Arababad axis, magnesium oxide and copper tailing were also investigated as potential soil stabilizing agents in this study. Lime samples were prepared with 2, 5 and 10% lime to determine the optimum amount of lime. The optimal percentage of the other three stabilizing agents, according to previous studies, was 5%, and 2% of the lime was added to half of the samples as a catalyst.

Three admixtures of 5% lime, 5% fine magnesite and 2% lime, and 5% copper tailing demonstrated the best performance regarding the increased CBR, uniformity of effect on all samples, and a slight swelling of 7-day cured samples. Another reason behind putting aside the iron slags was that the three additives while showing better or similar performance to the iron slags were also economically advantageous given the short distance of transportation. In the case of fine magnesite, there is also a concern that in the long run, the expansive magnesium sulfate ($MgSO_4$) may form in the soil. Therefore, the use of 5% lime additive or 5% copper tailing is preferred.

From an economic point of view, it should be noted that the lime should be purchased from the nearest lime production mine and transported to the road construction site. However, copper tailing is the waste of the processing plant of the Qalazari copper mine, which can be provided for free or at a very low price. Therefore, the use of copper tailing is much more cost-effective and 5% copper tailing was proposed as the final option of soil stabilization in the Khor-Arababad road construction project.

Key words: Soil stabilization, High sulfate saline soils, Khor-Arababad axis