



Modulus of resilience under road and runway stresses for base soil modified with cement and lime

A. Aghaei Araei^{1*}, M. Ghazavi², F. Lashani Zand², I. Rahmani¹

¹ Geotechnical Engineering Department of Road, Housing & Urban Development Research Center, Tehran, Iran

² Faculty of Civil Engineering of K.N Toosi University, Tehran, Iran

Review History:

Received: Aug. 19, 2022

Revised: May, 30, 2023

Accepted: Aug. 12, 2023

Available Online: Sep. 26, 2023

Keywords:

treated soil

cement

lime

resilient modulus

shear modulus

ABSTRACT: This paper examines the behavior of untreated and treated soil with cement and lime, as well as the relationship between the design parameters of the base layer such as uniaxial compressive strength (UCS), CBR with resilient modulus. The specimen selection for the triaxial test was based on the results of UCS, indirect tensile strength (INTS), wetting-drying, and freezing-thawing cycles tests. In general, the addition of lime along with cement causes the tensile strength to be halved compared to the addition of cement alone, but it eliminates the volume reduction problems caused by modification with cement. Also, a large-scale dynamic triaxial test was performed on the untreated base and C7L2 specimens. In all confining pressures, the values of elasticity modulus and damping ratio of C7L2 are higher and lower, respectively, compared to the untreated soil. The data points of the ratio of modulus of the elasticity-axial strain of specimen C7L2 are above the corresponding curves for sand and even higher than the rock ones, and its damping ratio data points are above the corresponding curve for rock specimens. The average values of the modulus of elasticity increase with the increase of confining pressure and initial axial stress. Increasing the loading frequency increases the Yang modulus, shear modulus, and damping ratio, but decreases the induced shear strain on the specimen.

1- Introduction

According to the current code of practice, soil stabilization with lime or cement alone is questionable for soil with a fine grain percentage of less than 25% and $PI \geq 10$, and treating with both materials simultaneously is recommended in different layers of the pavement, especially the base materials [1]. One of the main features of in-situ chemical stabilization and modification of soil, whether as a base, sub-base, or modified subgrade, is to improve its engineering characteristics to meet minimum design and operation requirements and reduce costs [2]. The most widely used chemicals for traditional stabilization are lime and cement [3]. The mechanism of chemical stabilization mainly depends on the type of soil, the type of additive, the mixing method, and even the purpose of stabilization [4]. In general, although the addition of cement increases the strength and resilient modulus, but it reduces the ductility with higher shrinkage percentages and the specimen reaches its maximum strength at lower strains [5].

2- Methodology

Soil stabilization tests with cement-lime and Nicoflock admixture include determination of soil-lime proportion requirements (ASTM D6276), dry-wet durability (ASTM D559), freezing-thawing evaluation (ASTM D560), the

California bearing ratio-CBR (ASTM D1883), the uniaxial compressive strength, UCS (ASTM D1633/D5102) and indirect (Splitting) tensile strength, INTS (ASTM C496). Three curing conditions including normal, thaw-freeze, and wet-dry were employed. Dynamic tests include triaxial tests to determine shear modulus and damping ratio (ASTM D3999) and resilient modulus (AASHTO T307) as well as the determination of permanent settlement. The soil used in these experiments has with maximum grain size is about 25 mm and fine grain of 23 percent. The average liquid limit, plastic limit, and plasticity index of natural soil are 23%, 11%, and 12, respectively, and its G_s is 2.65. The soil is GM-SM according to the unified classification system and according to ASSHTO is classified as A-2. A soundness of aggregates test (ASTM C88/C88M-18) was performed and the weight loss of the treated soil specimen was 11% (1% for the coarse grain part with the size of 4.75-25 mm and 10% for the fine grain part with the grain size of 0.3-9.5 mm) was acquired. All the specimens were compacted with a dry density of 22 kN/m³ (ASTM D1557), initial moisture content of 8%, and 6% in 3 layers with the same thickness. The specimens were cured for 3, 7, 28, 56 and 90 days in the humidity room, and then they were tested.

*Corresponding author's email: aghaeiarai@bhr.ac.ir



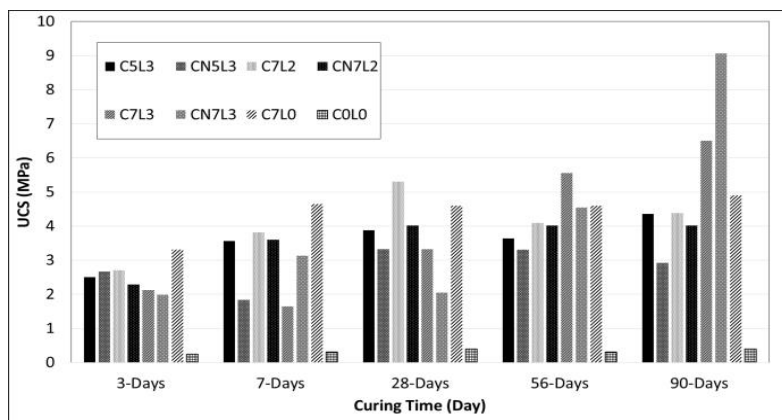


Fig. 1. Results of uniaxial compressive strength

Table 1. Results of resilient modulus and shear modulus, damping ratio and shear strain according to AASHTO T307 and isotropic stress state and untreated (UTS) and treated (TS) soils for the base and sub-base of the road and runway

	Frequency (Hz)	M _r (kPa)		G (kPa)		D (%)		Shear Strain (%)	
		UTS	TS	UTS	TS	UTS	TS	UTS	TS
Isotropic Confining Pressure (A)	10	219.1	867.4	87.0	377.2	19.7	13.2	0.0114	0.0037
	5	159.2	760.7	64.7	330.7	13.3	6.6	0.0250	0.0056
	2	147.8	750.3	59.9	326.2	7.0	2.2	0.0276	0.0056
AASHTO T307 (B)	10	301.3	944.6	120.4	410.7	19.7	14.6	0.0121	0.0049
	5	228.4	885.0	90.6	384.8	12.5	7.4	0.0217	0.0067
	2	203.1	871.4	80.6	378.9	6.3	2.1	0.0286	0.0074
Modified AASHTO T307 (C)	10	519.8	1489.4	194.5	647.6	18.5	14.7	0.0133	0.0052
	5	393.8	1411.4	164.4	613.6	12.2	8.9	0.0313	0.0130
	2	324.9	1286.7	135.7	559.4	7.2	3.1	0.0622	0.0277

3- Results and Discussion

Figure 1 presents the results of uniaxial compressive strength (UCS) of tested materials. According to the design requirements for the road and runway base, C7L2 specimen (containing 7% cement and 2% lime) has the best performance in terms of UCS. Moreover, UCS value for CN7L2, specimen containing the Nicoflock [6] as well is almost constant after 7 days of

curing. The UCS of C7L2 and C7L3 specimens in the unbrushed freezing-thawing test are half of those of the brushed one. The secant modulus of C7L2 specimen with increasing curing time is higher than for the curing times of 56 and 90 days. The secant modulus of C7L0 specimen is increased up to a curing time of 28 days of and then almost constant. The addition of Nicoflock for the CN7L2 specimen causes a decrease in the values of the secant modulus over time. The increase of moisture from 6% to 8% in the melting-freezing test causes a slight decrease in uniaxial compressive strength and secant modulus. The uniaxial compressive strength of specimens in the wet-dry test is higher than the values such as freezing-thawing and increases with increasing moisture content during the construction stage. Based on the results of freezing-thawing and wet-dry conditions, specimen C7L2 is more suitable for the base layer in hot-dry conditions. The tensile strength of CN7L2 specimen is lower than C7L2 and

both of them are lower than C7L0 values.

The CBR values of the dry C7L2 specimen are about 5 times the values of the untreated dry specimen, which is higher than the minimum values required for the road base and sub-base with values of 80 and 25, respectively.

The weight loss of the specimen after treated specimen with cement-lime in freezing-thawing and wet-dry tests was 10.85 and 8.5%, respectively, which is less than the allowed value of 14%.

The highest percentage of volume change of freezing-thawing and wet-dry tests for brushed specimen CN7L2 and 8% moisture is 1.89% and 1.457%, respectively, which is less than the allowed values of 2%. The percentage of volume changes of the specimen treated with cement only in the freezing-thawing test for moisture percentage between 6 and 8% is -2 and -4.1%, respectively.

Table 1 shows the results of resilient modulus and shear modulus, damping ratio, and shear strain according to AASHTO T307 under isotropic stress state for untreated (UTS) and treated (TS) soils for the base and sub-base of the road and runway. The average values of maximum elasticity modulus under the frequency of 10 Hz, 5 Hz, and 2 Hz for treated and untreated dry soil are 1018.6, 964.3, 961.1, and 404.7, 351.1 and 324.7 MPa, respectively. Therefore, soil modification for frequencies of 10 Hz, 5 Hz, and 2 Hz causes

an increase of 2.5, 2.75, and 3 times the average maximum modulus of elasticity compared to untreated soil. The maximum damping ratio for the frequency of Hz 2, Hz 5, and Hz 10 for the treated specimen is 4%, 11%, and 17% respectively, and for the untreated specimen is 10%, 15%, and 22% respectively.

The results show that untreated materials are more dependent on anisotropy than treated materials. With the increase of anisotropy, for the treated specimen, the effect of other factors on the damping ratio is insignificant compared to the frequency, while for the untreated specimen, the effect of other factors on the damping ratio compared to the frequency is slightly higher than the other treated specimen before cracking.

The average values of the resilient modulus for all test conditions in the treated state are more than 3.5 times the same values in the untreated state (328.5 MPa compared to 1148.1 MPa). The ratio of similar values for shear modulus values is about 3.8 times. The ratio of average damping ratio and shear strain of untreated to treated specimens are equal to 1.5 and 2.6.

The post-cyclic monotonic strength of specimen C7L2 is equal to 5.8 MPa for 15 days of curing time, which is comparable to the UCS values of wet-drying and freezing-thawing, and also untreated natural soil with the values of 7.18 MPa, 3.37 MPa, 5.3 MPa respectively for 28-day curing.

The secant modulus of the C7L2 specimen obtained from the UCS test is approximately one-fourth to one-fifth of the values of the post cyclic monotonic test under the confining pressure of 34.5 kPa.

4- Conclusion

In this research, a soil specimen with a fine percentage of 23% and PI of more than 12%, which is not suitable for use as a base for roads and runways in unmodified form, was subjected to various tests in treated and untreated form. The results show that soil modification by combining an optimal percentage of cement and lime under suitable curing conditions improves soil behavior in cyclic loadings. Also,

the increase in the loading frequency causes an increase in the resilient modulus, shear modulus, and damping ratio, and a decrease in the applied shear strain on the specimen. The resilient modulus (in MPa) for dry untreated soil is equal to $10 \times \text{CBR}$ and for C7L2 is approximately equal to $20 \times \text{UCS}$ or $3 \times \text{CBR}$ in soaked state or $2.5 \times \text{CBR}$ in the dry state for 1.25 mm penetration.

References

- [1] Aghaei Araei, A., Rahnani, I., Lashani Zand, F., Attarchian, N., Salamat, A., Hasani, H., Rezaei, M., Niaki, M., Study and presentation of technical specifications of soil modified with cement and lime, research project of Road, Housing and Urban Development Research Center, In Persian, 2020.
- [2] Kolay, P.K. Pant, A., Puri, V.K., Kumar, S., Effect of Liquid Polymer Stabilizer on geotechnical properties of fine-grained soil, Indian Geotechnical Conference IGC2016, 2016.
- [3] Bandara, N., Jensen, E. and Binoy, T.H. (2016) Performance evaluation of subgrade stabilization with recycled materials, mdt research project no. or14-009, mdt contract no. 0065, Department of Civil and Architectural Engineering Lawrence Technological University, 2013 February 29.
- [4] Elkady, T., Al-Mahbashia, A. and AL-Shamrani, M., Resilient modulus lime-treated expansive subgrade, King Abdulaziz City for Science and Technology, Kingdom of Saudi Arabia, Award Number (11-BUI-1901-02), 2013.
- [5] Y. Lu, S. Liu, Y. Zhang, Z. Li, L. Xu, Freeze-thaw performance of a cement-treated expansive soil, Cold Regions Science and Technology, 170 (2020) 102926.
- [6] Aghaei Arai, A., Rahmani, A., Attarchian, N., Salamat, A.S., Hosni, H., Niaki, M., Rezaei, M., Investigating the effect of additive on soil amended with cement to Title of airport road and runway materials, research report, polymer-mineral Nicoflock. Client: Protective coating company (Pamco), consultant: Geotechnical and infrastructure department, In Persian, February 2019.

HOW TO CITE THIS ARTICLE

A. Aghaei Araei, M. Ghazavi, F. Lashani Zand, I. Rahmani, Modulus of resilience under road and runway stresses for base soil modified with cement and lime, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 55(10) (2024) 435-438.

DOI: [10.22060/ceej.2023.21624.7802](https://doi.org/10.22060/ceej.2023.21624.7802)





مدول برجهنگی تحت تنش‌های راه و باند برای خاک اساس اصلاح‌شده با سیمان و آهک

عطا آقایی آرایی^{*}، محمود قضاوی، فرشاد لشنی زند^۱، ایرج رحمانی^۱

۱- بخش ژئوتکنیک و زیرساخت، مرکز تحقیقات راه و مسکن و شهرسازی، تهران ایران
۲- گروه مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۱/۰۵/۲۸
بازنگری: ۱۴۰۲/۰۳/۰۹
پذیرش: ۱۴۰۲/۰۵/۲۱
ارائه آنلاین: ۱۴۰۲/۰۷/۰۴

کلمات کلیدی:

خاک اصلاح شده
سیمان
آهک
مدول برجهنگی
مدول برشی

خلاصه: این مقاله به بررسی رفتار خاک اصلاح‌نشده و اصلاح‌شده با سیمان و آهک و همچنین ارتباط بین پارامترهای طراحی لایه اساس مانند مقاومت فشاری تک محوری (UCS، CBR) با مدول برجهنگی می‌پردازد. انتخاب نمونه برای انجام آزمایش سه‌محوری براساس نتایج آزمایش‌های UCS، کشش غیرمستقیم برزیلی (INTS) و تر- خشک و یخبندان- ذوب بوده است. بطور کلی افزودن آهک به همراه سیمان سبب نصف شدن مقاومت کششی در مقایسه با افزودن سیمان تنها می‌شود، اما سبب حذف مشکلات کاهش حجم ناشی از اصلاح با سیمان می‌شود. UCS نمونه اصلاح شده با ۷ درصد سیمان و ۲ درصد آهک (C7L2) با مقدار برابر ۳۸۱۰ kPa در محدوده مجاز تعیین شده برای اساس راه و باند قرار دارد. همچنین آزمایش سهمحوری دینامیکی بزرگ مقیاس روی نمونه اساس اصلاح‌نشده و C7L2 انجام شد. در تمام تنش‌های محدودکننده، مقادیر مدول الاستیسیته و نسبت میرایی C7L2 نسبت به خاک اصلاح‌نشده، به ترتیب بیشتر و کمتر است. نقطه داده‌های نسبت مدول الاستیسیته- کرنش محوری نمونه C7L2 بالای منحنیهای مربوط به ماسه و حتی بالاتر از منحنی سنگ قرار دارد و نقطه داده‌های نسبت میرایی آن بالای منحنی مربوطه برای نمونه‌های سنگ است. متوسط مقادیر مدول برجهنگی با افزایش غیرهمسانی و تنش محوری اولیه افزایش می‌یابد. افزایش فرکانس بارگذاری سبب افزایش مدول برجهنگی، مدول برشی و نسبت میرایی، اما کاهش کرنش برشی اعمالی بر نمونه می‌شود. مدول برجهنگی سه محوری (برحسب MPa) برای خاک اصلاح نشده خشک برابر CBR $\times 10$ و برای C7L2 تقریباً برابر UCS20 و یا CBR $\times 3$ حالت غرقاب و یا CBR $\times 2/5$ حالت خشک برای نفوذ ۱/۲۵ mm است.

۱- مقدمه

ذوب، تر-خشک شدن، مدول برجهنگی، میرایی و میزان نشست دائمی قابل اندازه‌گیری است. بطور کلی تثبیت خاک بستر با مصالحی مثل سیمان و آهک، برای کنترل تورم، یخ‌زدگی و افزایش مقاومت آن مناسب است. افزایش طول مدت عمل‌آوری و کاهش درجه اشباع نمونه باعث افزایش قابل ملاحظه‌ای در مقاومت می‌شود [۵]. افزودن سیمان به خاک‌های منبسط‌شونده باعث وابستگی کمتر رفتار و مقاومت نمونه‌ها به رطوبت اولیه هنگام ساخت و کاهش جمع‌شدگی آن‌ها بعد از انجام سیکل‌های ذوب-یخبندان می‌شود [۶]. به طور کلی هرچند افزودن سیمان باعث افزایش مقاومت و مدول برجهنگی می‌شود ولی شکل‌پذیری را کاهش داده و نمونه در کرنش‌های کمتری به مقاومت حداکثر خود می‌رسد [۷]. با توجه به قیمت بالا و همچنین تسریع فرایند تثبیت، سیمان عمدتاً در ترکیب با تثبیت‌کننده‌های دیگر به کار می‌رود [۸]. استفاده از مواد تثبیت‌کننده دیگر در کنار سیمان مانند آهک، خاکستر آتشفشانی و... در بهبود رفتار خاک بعد از تثبیت مانند شکل‌پذیری،

طبق آیین‌نامه‌ها تثبیت خاک با آهک یا سیمان تنها، برای خاک با درصد ریزدانه کمتر از ۲۵٪ و $PI \leq 10$ مورد تشکیک است و اصلاح با هر دو مصالح به صورت همزمان در لایه‌های مختلف روسازی خصوصاً مصالح اساس توصیه می‌شود [۱]. از ویژگیهای اصلی تثبیت و اصلاح درجای خاک به صورت شیمیایی چه به عنوان اساس و زیراساس و بستر اصلاح‌شده، بهبود مشخصات مهندسی آن برای تأمین حداقل نیازهای طراحی و بهره‌برداری، کاهش هزینه‌ها است [۲]. پرکاربردترین مواد شیمیایی به کار رفته برای تثبیت به روش سنتی، آهک و سیمان هستند [۳]. مکانیسم تثبیت شیمیایی عمدتاً به نوع خاک، نوع افزودنی، روش اختلاط و حتی هدف از تثبیت بستگی دارد [۴]. دستیابی به اهداف تثبیت با انجام آزمایش‌های مختلفی از جمله مقاومت فشاری تک‌محوری، کششی غیرمستقیم (برزیلی) و یخبندان-

^{*} نویسنده عهده‌دار مکاتبات: aghaeiaraei@bhr.ac.ir



دوام و کاهش ترک‌های ناشی از جمع‌شدگی موثر است [۹]. روند اثرگذاری تثبیت با سیمان، افزایش مقاومت خاک از طریق پرکردن حفره‌های خالی موجود در دانه‌بندی و افزودن میزان چسبندگی در خاک‌ها می‌باشد [۱۰]. در رابطه با آهک نیز در استاندارد ASTM C977، مشخصات استاندارد آهک زودگیر و آهک هیدراته مورد استفاده در تثبیت خاک ارایه شده است. تثبیت‌کننده‌های سنتی بر واکنش‌های پوزولانی و تبادل کاتیون تکیه دارند [۱۱]. لذا مصالحی مثل سیمان و آهک، جهت شروع واکنش‌های مناسب با خاک باید در مجاورت آب قرار بگیرند، یعنی اختلاط با مقدار مناسبی آب صورت می‌گیرد و موجب تولید ژلهای پوزولانی (سیلیکات کلسیم، سیلیکات آلومین و کلسیم هیدراته) می‌شود. روند کلی تثبیت در حضور آب می‌تواند در ۴ فرآیند خلاصه گردد: تبادل کاتیون، لخته شدن و انباشتگی، هیدراتاسیون سیمانی، واکنش پوزولانی. سیمان پرتلند و آهک، هر دو محصولاتی با پایه کلسیم هستند. تفاوت‌ها آنها ممکن است شامل ویژگی‌های مهمی همچون مقاومت، گسترش مقاومت وابسته به زمان، عمل‌آوری و دوام و عملکرد بهسازی باشد. در مورد خاک‌های تثبیت شده با سیمان، همه چهار فرآیند یادشده رخ خواهد داد. در حالیکه در مورد خاک‌های بهسازی یا تثبیت‌شده با آهک، هیدراتاسیون سیمانی وجود نخواهد داشت. یکی از مهمترین واکنش‌های اصلاح خاک با آهک کربناته شدن است. برای مخلوط‌های خاک-آهک، تبادل کاتیونی و لخته‌شدن-انباشتگی واکنش‌های اصلی هستند، که پس از اختلاط، فوری رخ می‌دهند. در هنگام این واکنش‌ها، یون‌های دوتایی کلسیم (تامین‌شده از آهک) با کاتیون‌های تکی (به طور کلی مرتبط به کانی رس)، جایگزین می‌گردد. این واکنش‌ها تغییرات فوری در بافت، ویژگی خمیری و کارایی پدید می‌آورد. زیرا تبادل کاتیون‌ها موجب کاهش اندازه لایه آب دوگانه پخش شده می‌گردد. بنابراین به ذرات رس اجازه می‌دهد تا به صورت سنگدانه درشت در کنار یکدیگر انباشته (توده) شوند. روند واکنش پوزولانی، فرآیندی کند و طولانی است. این فرآیند میان آهک و سیلیکا و آلومینای کانی رس رخ می‌دهد، و مواد چسباننده‌ای مانند کلسیم-سیلیکات-هیدرات و کلسیم-آلومینا-هیدرات تولید می‌کند. واکنش پوزولانی ناشی از اصلاح با آهک در pH خاک بیش از ۱۲/۴ ادامه خواهد داشت. فعالیت پوزولانی برای فعل و انفعال شیمیایی خاک با آهک توسط ترکیبات موجود در خاک تامین می‌گردد. در حالی که، مواد پوزولانی برای تثبیت خاک با سیمان به صورت بالقوه در سیمان وجود دارد و توسط خاک تامین نمی‌شود. برای مخلوط‌های خاک-سیمان، هیدراتاسیون تری کلسیم سیلیکات (Ca_3SiO_5) سیمان مهمترین عامل ایجاد مقاومت‌گیری فوری خاک است. هیدراتاسیون

دی کلسیم سیلیکات (Ca_2SiO_4) در مقاومت آغازین خاک-سیمان اثر کمی دارد، اما تاثیر قابل توجهی در مقاومت خمیر سیمان عمل‌آمده دارد. در مخلوط‌های آهک-سیمان، تبادل کاتیون و لخته‌شدن-انباشتگی نیز فوری پس از مخلوط کردن خاک و سیمان رخ می‌دهد و منجر به کاهش ویژگی خمیری خاک می‌گردد. آهک ساخته شده در هنگام هیدراتاسیون سیمان، به افزایش چسبندگی میان ذرات خاک در واکنش‌های پوزولانی کمک می‌کند [۱۲]. از سیمان، آهک و ترکیب هر دو برای بررسی نشست و مدول برجهندگی (AASHTO T307) خاک‌های خیلی ضعیف بستر با مقاومت کمتر از ۱۷۵ kPa استفاده شده است. استفاده از هر ماده تثبیت‌کننده‌ای تا درصد معلومی باعث افزایش مقاومت و بهبود دیگر مشخصات خاک‌های مسئله‌دار می‌شود و اضافه کردن بیشتر از این مقدار سبب کاهش مقاومت و مدول الاستیسیته خواهد شد [۱۳]. بنابراین درصد بهینه اختلاط برای هر ماده اصلاح کننده و افزودنی با توجه به نیازهای طراحی و دانه‌بندی خاک قبل از استفاده تعیین شود [۱۴][۱۵]. درصد تثبیت‌کننده بیش از ۴ درصد سیمان می‌تواند غیراقتصادی باشد و بسته به مشخصات خاک و نوع تثبیت کننده می‌تواند مشکلات مربوط به جمع‌شدگی را در پی داشته باشد. تا سال ۱۹۸۶ میلادی، عمدتاً از نتایج آزمایش CBR جهت تعیین خصوصیات مقاومتی لایه‌های روسازی و تعیین ضخامت لایه‌های روسازی در AAS-HTO استفاده می‌شد، ولی CBR، پارامتر استاتیکی بوده، بیانگر وضعیت لایه‌های روسازی تحت بارهای تکراری نمی‌باشد [۱۶]. مدول برجهندگی مصالح خاکی لایه‌های روسازی نشان دهنده مدول الاستیک خاک در سطوح مختلف بارگذاری تکراری و شرایط سرویس‌دهی آنها است [۱۷] و در آیین‌نامه‌های معتبر طراحی به عنوان پارامتر اصلی مقاومتی لایه‌های روسازی و بستر نهایی روسازی مورد استفاده قرار گرفته است (-AAS-HTO ۱۹۹۳، FHA (۲۰۰۶)، نشریه ۲۳۴ [۱۸]). این پارامتر به صورت نسبت تنش انحرافی اعمال شده به کرنش محوری برگشت پذیر تحت بار دینامیکی تعریف می‌شود [۱۹]. این پارامتر با استفاده از روابط تجربی به وسیله مقادیر آزمایش CBR و حتی تک محوری تعیین می‌شود ولی امروزه با توجه به تجهیزات آزمایشگاهی و امکانات اندازه‌گیری میدانی آن ممکن است [۲۰]. پارامترهای تاثیرگذار بر مدول برجهندگی شامل درصد رطوبت، درجه اشباع خاک، تراکم، مقدار تنش محدودکننده، مقدار تنش سیکی وارد، تعداد سیکل‌های بارگذاری، جنس تثبیت‌کننده و نظایر آن می‌باشند [۲۱]. نتایج نشان می‌دهد هنگامی که درجه تراکم و فرکانس بارگذاری ثابت باشند، مدول برجهندگی با افزایش رطوبت کاهش می‌یابد و با ثابت ماندن درصد

۲۰۰ به ۱۵٪ محدود می‌شود. برای لایه اساس دانه‌ای باند فرودگاه طبق AC 150/5370-10G: P-209، حدود روانی و خمیری مصالح گذشته از الک شماره ۴۰ باید به ترتیب کمتر از ۲۵ و ۵ درصد باشد (ASTM D4318) و مصالح کوچکتر از ۰/۰۲ میلی‌متر (ASTM D422) باید محدود به ۳٪ و حداکثر درصد گذشته از الک نمره ۲۰۰ از ۸-۰٪ به ۵-۰٪ کاهش یابد. لذا در صورت اصلاح و دارا بودن معیارهای طراحی، استفاده از این خاک به عنوان اساس راه و باند مجاز است.

۳- ساخت نمونه‌ها

تمام نمونه های خاک با و بدون تثبیت‌کننده ها برای آزمایشهای معمول مکانیک خاک با وزن مخصوص g/cm^3 ۲/۲ طبق تراکم اصلاح‌شده (ASTM D1557) رطوبت اولیه ۰/۸٪ و ۰/۶٪ در ۳ لایه با ضخامت یکسان کوبیده شدند. رابطه رطوبت-دانسیتة خشک مخلوط خاک-سیمان برای درصد آهک تعیین شده باید مطابق AASHTO T99 تعیین شود. تراکم عموماً برابر با حداقل ۰/۹۵ دانسیته پروکتور اصلاح‌شده می‌باشد. درصد رطوبت ± 2 درصد با توجه به شرایط آب و هوایی با رطوبت بهینه اختلاف دارد. طبق استاندارد زمان ساخت نمونه تثبیت با آهک ۶ تا ۸ ساعت و تثبیت با سیمان ۰/۵ ساعت است، لذا در کمتر از ۳۰ دقیقه ساخت نمونه ها در قالب انجام شد. برای ساخت هر نمونه، درصدهای گذشته از الکهای مختلف به صورت جداگانه تهیه می‌شوند. برای ساخت نمونه اصلاح شده، طبق استاندارد (ASTM D 560) ابتدا آهک-سیمان به بخشی از خاک رد شده از ۴/۷۵ mm اضافه و پس از مخلوط شدن کامل، بخش درشت دانه خاک (دانه‌های ۴/۷۵ تا ۱۹ میلی‌متر) به آن اضافه می‌شود. بعد از ساخت نمونه عمل‌آوری به مدت ۳، ۷، ۲۸، ۵۶ و ۹۰ روز در اتاق رطوبت انجام، و سپس مورد آزمایش قرار گرفتند. نام گذاری نمونه‌ها با توجه به درصد مواد تثبیت‌کننده به کاررفته در آنها انجام شده است. ماده افزودنی پلیمری- معدنی نیکوفلاک استفاده شده در نمونه‌ها به میزان ۱۰ درصد سیمان به کار رفته است [۲۷]. درصد توصیه شده آهک برای تثبیت خاک بستر، زیراساس و اساس (نشریه ۲۶۸، ۱۳۹۸ [۲۸]) با توجه به مشخصات خاک مصرفی بین ۲-۳٪ می‌باشد. طبق نشریه ۲۶۸ (۱۳۸۲)، PCI (۱۹۹۲) تخمین وزنی درصد سیمان مورد نیاز برای تثبیت خاک گروه A-2 طبق AASHTO به طور متوسط ۷٪ با دامنه‌ای بین ۵ تا ۹٪ است و برای نمونه‌های آزمایش تر-خشک و یخبندان-ذوب، میزان سیمان مصرفی برای اصلاح خاک مورد بررسی به مقدار ۷٪ وزنی پیشنهاد می‌شود.

رطوبت و فرکانس بارگذاری، مدول برجهندگی با افزایش درجه تراکم افزایش می‌یابد. همچنین هنگامی که رطوبت و درجه تراکم ثابت نگه داشته شده مدول برجهندگی با افزایش فرکانس بارگذاری افزایش یافته است. طبق تحقیقات چن و همکاران (۲۰۱۳) [۲۲] و همچنین سو و همکاران (۲۰۲۱) [۲۳] با افزایش میزان رطوبت اولیه در ساخت نمونه، مقادیر مدول برجهندگی کاهش قابل ملاحظه‌ای خواهد داشت. همچنین طبق مطالعات چن و همکاران (۲۰۲۰) [۲۴] کاهش رطوبت نمونه نسبت به مقدار بهینه خاک‌های دانه‌ای با مقادیر ریزدانه بالا، سبب افزایش مدول برجهندگی می‌شود. به منظور دستیابی به بالاترین مدول برجهندگی ممکن، استفاده از رطوبت بهینه برای ساخت اولیه لازم است که این رطوبت برای خاک اصلاح‌شده با آهک و سیمان حدود ۶ درصد است [۲۵]. لیو و همکاران (۲۰۲۱) در تحقیق خود نشان دادند چسبندگی، مقاومت برشی و مدول برجهندگی با افزایش تعداد سیکل‌های ذوب-یخبندان کاهش می‌یابد [۲۶]. از طرفی تعیین ارتباط بین مدول برجهندگی با پارامترهای استاتیکی از جمله CBR، مقاومت تک‌محوری نمونه‌های معمولی و نمونه تحت سیکل‌های ذوب-یخبندان و تر-خشک برای اهداف مهندسی مهم می‌باشد. لذا این مقاله به مطالعه رفتار خاک اصلاح شده با سیمان-آهک و مقایسه آن با خاک معمولی و تعیین پارامترهای طراحی برای اساس راه و باند می‌پردازد.

۲- معرفی مصالح

خاک مورد استفاده در این آزمایش‌ها حاصل از برداشت مصالح محلی موجود در بستر بزرگراهی در شهر تبریز، آذربایجان شرقی-ایران می‌باشد. هدف استفاده از روش بهسازی خاک به منظور کاهش هزینه های ساخت بوده است. آزمایش‌های شاخص شامل دانه‌بندی (ASTM D6913)، هیدرومتری (ASTM D7928)، اتربرگ و درصد رطوبت روی خاک مورد بررسی انجام شده است. حداکثر اندازه دانه حدود ۲۵ mm، درصد گذشته از الک ۱/۱۹، ۹/۵، ۴/۷۵، ۲، ۰/۶، ۰/۴۲۵، ۰/۰۷۵، ۰/۰۰۲ و ۰/۰۰۱ به ترتیب ۹۰، ۷۲، ۵۷، ۴۵، ۳۲، ۳۰، ۲۳ و ۱۰ و صفر درصد است. متوسط حدود روانی خاک طبیعی ۲/۲۳٪ (شامل ۲/۵٪ رطوبت باقیمانده) و حد خمیری آن ۱۱٪ و شاخص خمیری خاک آن برابر ۱۲/۲ و G_s آن برابر ۲/۶۵ است. خاک بر اساس طبقه‌بندی یونیفاید GM-SM و طبق ASSHTO در طبقه A-2 است. درصد ریزدانه ۲۳٪ خاک مورد مطالعه بالای ۲۰٪ توصیه شده نشریه ۲۳۴ برای اساس حتی برای مناطق خشک است. برای اساس باند در مناطق خشک حداکثر درصد گذشته از الک نمره



شکل ۱. سنگدانه های با اندازه دانه ۱۲/۵-۱۹ mm پس از آزمایش سلامت سنگدانه (ASTM C88) نمونه خاک اصلاح نشده

Fig. 1. Aggregate with grain size of 12.5-19 mm after aggregate soundness test (ASTM C88) for untreated soil specimen

۴- برنامه آزمایش ها

آزمون های ارزیابی تثبیت با سیمان-آهک و افزودنی نیکوفلاک شامل تعیین تثبیت کننده اولیه (ICS) (ASTM D6276)، ارزیابی کفایت مقدار تثبیت کننده آهک (ASTM D5102)، ارزیابی دوام خشک-تر شدن (ASTM D559)، ارزیابی یخندان-ذوب (ASTM D560)، نسبت باربری کالیفرنیا CBR (ASTM D1883)، مقاومت فشاری تک محوری، UCS (ASTM D1633/D5102) و مقاومت کششی غیرمستقیم برزیلی INTS (ASTM C496) است. سه شرایط عمل آوری شامل معمولی، ذوب-یخندان و تر-خشک می باشد. در مراحل اولیه، برای پیش بینی ویژگی های خاک تثبیت شده از UCS و CBR استفاده می شود [۲۹]. آزمایش های دینامیکی شامل آزمایش های سه محوری تعیین مدول برشی و نسبت میرایی (ASTM D3999) و مدول برجهنگی (AASHTO T307) و همچنین تعیین میزان نشست دائمی می باشد. به منظور تعیین سلامت سنگدانه ها در مقابل عوامل جوی آزمایش سلامت (ASTM C88/C88M-18) انجام و افت وزنی نمونه خاک اصلاح نشده آزمایش سلامت، ۱۱٪ (۱ درصد برای بخش دانه درشت با اندازه ۲۵-۴/۷۵ میلی متر (شکل ۱) و ۱۰٪ برای بخش دانه ریز با اندازه دانه ۹/۵-۰/۳ میلی متر) بدست آمد.

۵- نتایج مقاومت تک محوری فشاری

آزمایش با سرعت بارگذاری ۰/۵۲۵ mm/min برای زمانهای عمل آوری معمولی ۳، ۷، ۲۸، ۵۶ و ۹۰ روزه انجام شد. همچنین در خاتمه آزمایش های یخندان-ذوب (FT) و تر-خشک (WD)، روی نمونه ها آزمایش های UCS و INT انجام شده است که زمان انجام آزمایش روی این نمونه ها ۳۱ روز بعد از ساخت می باشد که می توان با تقریب مناسب با مقاومت نمونه های عمل آوری معمولی ۲۸ روزه مقایسه کرد. همچنین از نمودارهای تنش-کرنش حاصل شده از آزمایش های تک محوری مدول الاستیسیته سکانتی (E_{50}) محاسبه شد که مقدار آن برای هر نمونه برابر با حاصل تقسیم ۵۰٪ بیشینه مقاومت فشاری بر کرنش نظیر است. خلاصه UCS، کرنش نظیر مقاومت حداکثر و مدول سکانتی در جدول ۱ ارائه شده است. نتایج آزمایش تک محوری نمونه های مختلف در زمان های مختلف عمل آوری معمولی در شکل (۲-الف و ب) ارائه شده است. به طور کلی نمونه های C7L2 و C7L0 دارای بیشترین UCS هستند که با افزایش زمان عمل آوری مقاومت آن ها افزایش می یابد. نکته جالب توجه کاهش و حتی ثابت ماندن UCS نمونه های C7L3، CN5L3 و CN7L3 با افزایش زمان عمل آوری است. مقدار UCS برای عمل آوری ۳ و ۷ روزه C7L0 بیشتر از سایر نمونه های مشابه است. مقدار UCS برای ۲۸ روز

جدول ۱. نتایج UCS ساخته شده با رطوبت ۸٪ (MPa)، کرنش محوری نظیر AS (%) و مدول سکانتی، E_{50} (MPa)، تحت عمل آوری معمولی و سیکلهای یخبندان-ذوب (FT) و تر-خشک (WD)

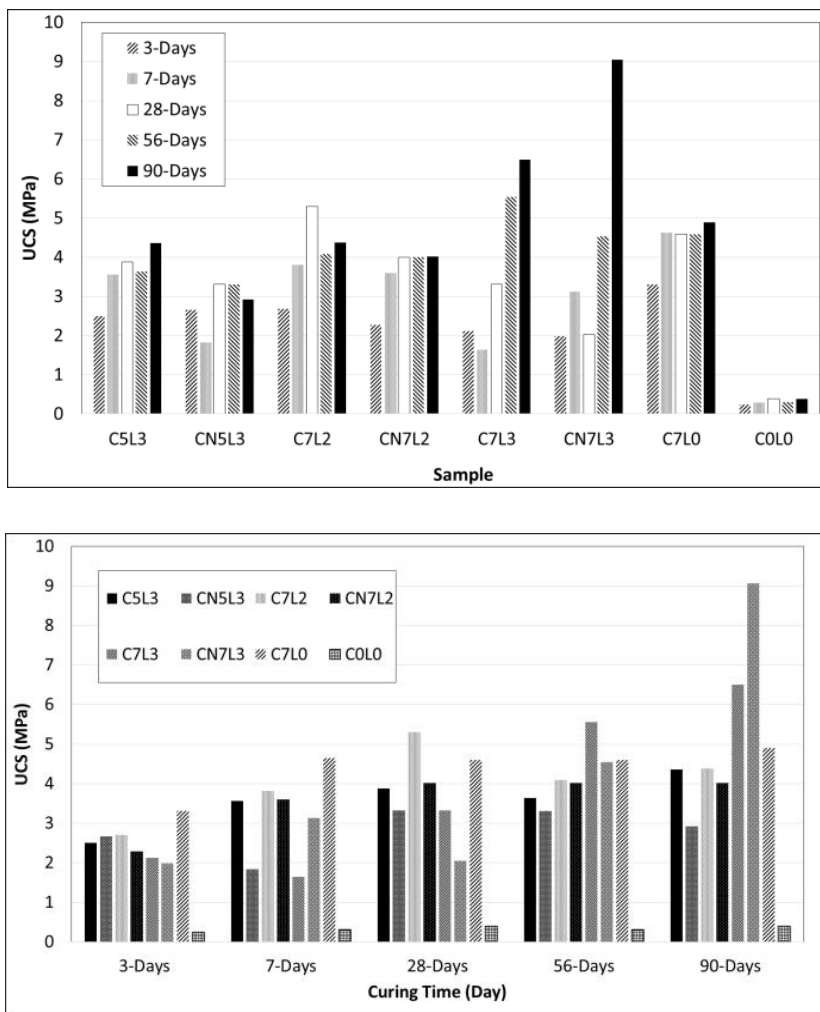
Table 1. UCS results of specimens constructed 8% moisture in MPa, corresponding axial strain, AS (%), secant modulus, E_{50} (MPa) under room curing condition, freezing- thawing (FT) cycles tests and wetting-drying (WD) cycles tests

Sample Name	3-Days			7-Days			28-Days			56-Days			90-Days		
	UCS	AS	E50	UCS	AS	E50	UCS	AS	E50	UCS	AS	E50	UCS	AS	E50
C5L3	2.50	0.008	432.8	3.57	0.011	431.7	3.88	0.014	377.6	3.64	0.016	260.0	4.36	0.023	240.6
C5NL3	2.66	0.010	271.0	1.83	0.019	166.1	3.31	0.015	277.3	3.30	0.015	275.7	2.92	0.016	298.8
C7L2	2.62	0.013	313.2	3.81	0.015	333.7	5.30	0.015	360.6	4.09	0.017	389.0	4.38	0.011	534.9
CN7L2	2.28	0.013	248.6	3.59	0.014	394.8	3.99	0.017	400.0	4.03	0.018	315.6	4.01	0.017	295.2
C7L3	2.12	0.021	230.8	1.64	0.017	168.8	3.32	0.011	324.2	5.54	0.018	350.0	6.49	0.027	295.0
CN7L3	1.98	0.011	303.7	3.12	0.014	330.8	2.04	0.006	250.0	4.54	0.011	314.2	9.03	0.023	504.6
C7L0	3.30	0.018	255.2	4.62	0.023	328.5	4.59	0.013	383.3	4.59	0.020	379.3	4.89	0.020	384.6
C7L2-6 (FT)	-	-	-	-	-	-	8.65	0.0270	368.2	-	-	-	-	-	-
C7L2-8 (FT)	-	-	-	-	-	-	6.63	0.0235	370.6	-	-	-	-	-	-
C7L2-6*(FT)	-	-	-	-	-	-	3.69	0.034	176.8	-	-	-	-	-	-
C7L2-8*(FT)	-	-	-	-	-	-	3.37	0.0249	161.8	-	-	-	-	-	-
C7L2-6 (DW)	-	-	-	-	-	-	5.97	0.0295	236.5	-	-	-	-	-	-
C7L2-8 (DW)	-	-	-	-	-	-	7.18	0.0247	319.5	-	-	-	-	-	-
C7L3-6 (FT)	-	-	-	-	-	-	5.20	0.0200	368.0	-	-	-	-	-	-
C7L3-8 (FT)	-	-	-	-	-	-	4.43	0.0204	375.6	-	-	-	-	-	-
C7L3-6*(FT)	-	-	-	-	-	-	2.56	0.0271	125.9	-	-	-	-	-	-
C7L3-8*(FT)	-	-	-	-	-	-	3.38	0.0184	226.1	-	-	-	-	-	-
C7L3-6 (DW)	-	-	-	-	-	-	5.11	0.0253	275.7	-	-	-	-	-	-
C7L3-8 (DW)	-	-	-	-	-	-	5.61	0.0279	250.6	-	-	-	-	-	-
C0L0	0.24	0.024	12.8	0.29	0.023	13.9	0.39	0.025	13.8	0.30	0.018	24.4	0.39	0.025	14.2

افزایش رطوبت برای هر دو نمونه برس خورده و برس نخورده C7L2 در آزمایش یخبندان-ذوب (ASTM D-560) سبب کاهش اندک UCS می‌شود، اما در نمونه C7L3 در حالت برس خورده و برس نخورده با افزایش رطوبت به ترتیب کاهش و افزایش UCS می‌شود. مقادیر UCS نمونه C7L2 و C7L3 در آزمایش یخبندان-ذوب حالت برس نخورده نصف مقادیر نظیر برس خورده می‌باشد. مقادیر UCS نمونه برس نخورده C7L2 به صورت جزئی از مقادیر نظیر C7L3 برای آزمایش یخبندان-ذوب بیشتر است. بطور کلی در حالت برس خورده مقادیر UCS نمونه‌های C7L2 و C7L3 در آزمایش یخبندان-ذوب بیشتر از مقادیر نظیر عمل آوری معمولی در زمان ۲۸ روزه و آزمایش تر-خشک می‌باشد. در برای حالت هر دو نمونه

عمل آوری نمونه C7L3 بیشتر از سایر نمونه‌های در زمان مشابه است. همچنین UCS نمونه C7L3 به صورت جزئی بیشتر از C7L2 می‌باشد. UCS در ۹۰ روز عمل آوری نمونه CN7L3 دارای بیشترین مقدار در بین سایر نمونه‌ها است. نکته جالب توجه افزایش قابل توجه UCS نمونه C7L2 با زمان عمل آوری است. افزودن نیکوفلاک سبب کاهش UCS می‌شود. با توجه به نیازهای طراحی برای اساس راه و باند، نمونه C7L2 برای بهترین عملکرد از نظر UCS است.

C: سیمان، L: آهک، N: ماده پلیمری-معدنی، اعداد معرف درصد افزودنی، UCS: حداکثر مقاومت فشاری تک محوری، AS: کرنش محوری نظیر UCS، *: برس نخورده

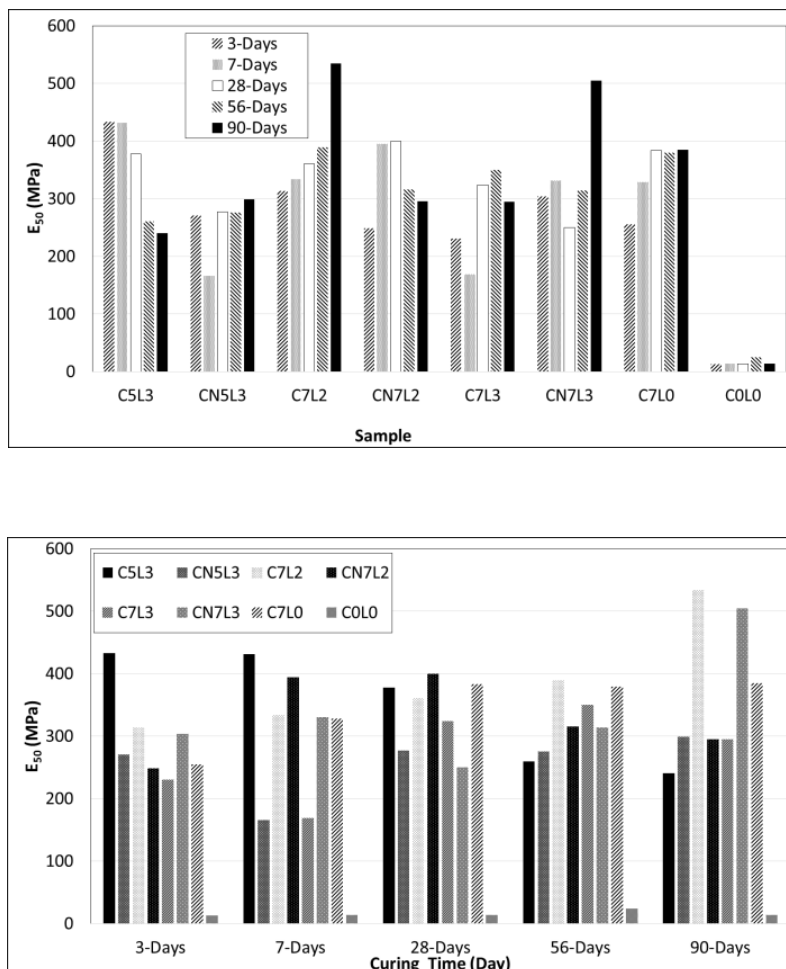


شکل ۲. نتایج UCS نمونه‌های مختلف در زمان‌های مختلف عمل‌آوری معمولی

Fig. 2. UCS of different specimens under room different curing time

مدول سکانتی نمون C7L2 با افزایش زمان عمل‌آوری همواره افزایشی است. اما مدول سکانتی نمونه C7L0 تا ۲۸ روز عمل‌آوری افزایشی و سپس تقریباً ثابت است. افزودن نیکوفلاک برای نمونه CN7L2 سبب کاهش مقادیر مدول سکانتی باگذشت زمان می‌شود. در آزمایش یخبندان-ذوب در نمونه‌های برس‌خورده یخبندان-ذوب افزایش رطوبت ساخت سبب افزایش جزئی مدول سکانتی می‌شود در حالی‌که تأثیر آن روی مدول سکانتی نمونه‌های برس‌نخورده ناچیز است. برای هر دو نمونه C7L2 و C7L3 با افزایش رطوبت ساخت شرایط یخبندان-ذوب مقادیر مدول سکانتی اندکی افزایش می‌یابد. مشابه UCS مقادیر مدول سکانتی نمونه

C7L2 و C7L3 افزایش رطوبت ساخت سبب افزایش UCS می‌شود. نتایج مدول سکانتی نمونه‌های مختلف در زمان‌های مختلف عمل‌آوری در شکل (۳-الف و ب) ارائه شده‌است. مدول سکانتی ۳ و ۷ روزه نمونه C5L3 بیشترین مقدار است. تفاوت چندانی بین مدول ۲۸ روزه نمونه های C5L3، C7L2، CN7L2 و C7L0 وجود ندارد. هرچند اندکی مقادیر مدول CN7L2 بیشتر است. مدول سکانتی نمونه C7L2 برای زمانهای عمل‌آوری ۵۶ و ۹۰ روزه از همه نمونه‌ها بیشتر است. برعکس مقاومت فشاری، مدول سکانتی نمونه C5L3 با افزایش زمان عمل‌آوری کاهش یافته و مقدار آن بعد از زمان ۹۰ روزه حدود نصف مقادیر نظیر ۳ روزه است.



شکل ۳. مدول سکانتی حاصل از نمودارهای تنش-کرنش UCS نمونه‌های مختلف در زمان‌های مختلف عمل‌آوری معمولی

Fig. 3. Secant modulus form UCS stress-strain curves for different specimens under different usual curing time

درصد آهک و سیمان به عنوان یک ماده تثبیت کننده برای پایدارسازی برای دستیابی به مقاومت فشاری هدف ۷ روزه برابر 345 kPa (به عنوان راهکار بهسازی برای کاربرد در روزمره) و مقاومت فشاری 1034 kPa به عنوان مصالح زیراساس قابل استفاده، انتخاب شده است. حداقل مقاومت فشاری محدود نشده توصیه شده مصالح اساس با روسازی انعطاف پذیر تثبیت شده با آهک شریط مختلف خیساندن به مدت ۸ روز برابر 900 kPa است. توجه شود برای شرایط سیکل رطوبت دهی، نمونه‌ها بایدطوری ساخته شود که به 80% رطوبت حالت "خیس" و 50% رطوبت حالت "خشک" برسند. برای سیکلهای یخبندان- ذوب شدن ۳، ۷ و ۱۰ سیکل مقادیر خاک اصلاح شده با آهک نظیر به ترتیب 900 ، 1200 و 1400 kPa است.

های برس نخورده $C7L2$ ، حدود نصف مقادیر نظیر برس خورده می‌باشند. همچنین مدول سکانتی $C7L2$ و $C7L3$ برس خورده تفاوت اندکی با هم دارند. مقادیر مدول سکانتی نمونه $C7L2$ در حالت تر-خشک (ASTM D-559) در مقایسه با نمونه $C7L3$ بیشتر است. کاهش مقادیر مدول در حالت تر-خشک نسبت به حالت معمولی جالب توجه است، هرچند که از مقادیر نظیر یخبندان-ذوب بیشتر است. لذا با توجه مقاومت فشاری تک‌محوری و مدول سکانتی نمونه‌های در آزمایش تر-خشک و یخبندان-ذوب توصیه می‌شود نمونه اصلاح شده با سیمان و آهک در شرایط مرطوب کوبیده شود. با توجه به ملاحظات اقتصادی نمونه $C7L2$ بهترین عملکرد از نظر مدول سکانتی را دارا است.

جدول ۲. نتایج مقاومت کشش غیرمستقیم (برزیلی)

Table 2. Indirect tensile strength (Brazilians) test results (*unbrushed)

Sample Name	3-Days			7-Days			28-Days		
	In-DTS (kPa)	AS (%)	E ₅₀ (MPa)	In-DTS (kPa)	AS (%)	E ₅₀ (MPa)	In-DTS (kPa)	AS (%)	E ₅₀ (MPa)
C5L3	278	0.0059	75.9	347	0.0089	43.7	516	0.0059	73.6
CN5L3	155	0.0039	43.0	241	0.0059	46.3	404	0.0050	80.7
C7L2	304	0.0062	55.5	430	0.0059	80.0	441	0.0059	72.0
CN7L2	246	0.0031	80.5	235	0.0069	38.0	665	0.0074	80.3
C7L3	292	0.0059	75.0	496	0.0079	62.5	690	0.0074	100.5
CN7L3	158	0.0040	50.0	433	0.0089	47.8	404	0.0069	58.2
C7L0	584	0.0083	70.0	-	-	-	135	0.0079	155.5
C7L2-6 (FT)	-	-	-	-	-	-	665	0.0169	80.4
C7L2-8 (FT)	-	-	-	-	-	-	771	0.0114	102.5
C7L2-6*(FT)	-	-	-	-	-	-	203	0.0100	21.1
C7L2-8*(FT)	-	-	-	-	-	-	347	0.0149	37.6
C7L2-6 (DW)	-	-	-	-	-	-	619	0.0089	85.7
C7L2-8 (DW)	-	-	-	-	-	-	817	0.0076	117.7
C7L3-6 (FT)	-	-	-	-	-	-	427	0.0165	28.9
C7L3-8 (FT)	-	-	-	-	-	-	619	0.0139	119.3
C7L3-6*(FT)	-	-	-	-	-	-	235	0.0119	43.4
C7L3-8*(FT)	-	-	-	-	-	-	301	0.0136	28.9
C7L3-6 (DW)	-	-	-	-	-	-	613	0.0069	83.0
C7L3-8 (DW)	-	-	-	-	-	-	544	0.0089	76.8

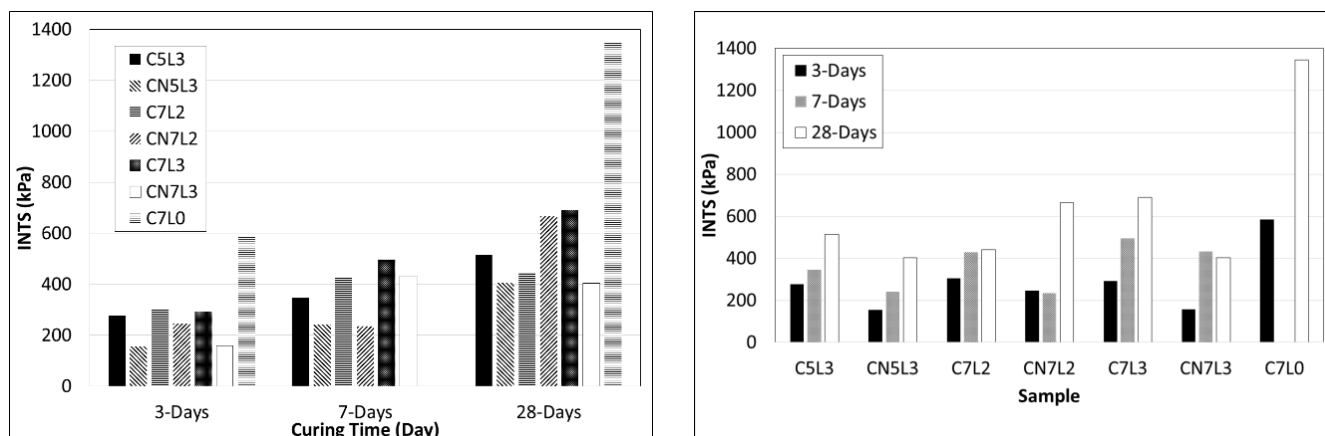
*: برس نخورده

اساس CTB بین ۲۸۰۰ kPa تا ۵۵۰۰ kPa باشد. مقاومت ۲۸ روزه آن از ۶۹۰۰ kPa تجاوز نکند. بطور کلی حداقل مقاومت مورد نیاز برای اساس باند تا ۳۳٪ بیشتر از مقادیر نظیر برای راه است. براساس مقاومت ۷ روزه، اصلاح با سیمان-آهک صورت گرفته (نمونه C7L2) با مقدار ۳۸۱۰ kPa برای استفاده اساس راه و باند مناسب است. لذا با توجه به سایر شاخص‌های بررسی شده، می‌توان گفت اصلاح خاک با ترکیب بهینه‌ای از سیمان و آهک برای تمام شرایط آب و هوایی خصوصاً شرایط آب و هوایی گرم برای خاک مورد مطالعه به عنوان اساس راه و باند فرودگاه، مناسب است.

۶- نتایج مقاومت کششی غیرمستقیم (برزیلی)

آزمایش بر روی نمونه‌ها در زمان عمل‌آوری ۳، ۷ و ۲۸ انجام شد. برنامه آزمایش‌های INTS نمونه‌ها در جدول ۲ ارائه شده‌است. شکل ۴

همچنین محدوده قابل قبول مقاومت فشاری محصور نشده ۷ روزه و ۲۸ روزه نمونه‌های خاک سیمان در حالت مرطوب برای انواع خاک A-2 به عنوان اساس به ترتیب ۲۱۰۰-۳۲۰۰ kPa و ۲۸۰۰-۷۰۰۰ kPa ارائه شده است. براساس معیارهای مقاومتی، خاکی که درصد سیمان آن بر اساس آزمایش‌های دوام تعیین شده است، اگر پس از عمل‌آوردن به مدت ۷ روز در اتاق مرطوب، دارای مقاومت فشاری برابر با ۲۱۰۰ kPa باشد، و افزون بر آن با گذشت زمان بر مقاومت آن افزوده شود، برای تثبیت مناسب است (نشریه ۲۶۸). نمونه مقاومت فشاری محصور نشده ۷ روزه مورد انتظار از لایه خاک اساس درشت‌دانه تثبیت شده برای رویه‌های انعطال‌پذیر و صلب به ترتیب ۲۱۰۰-۵۳۰۰ kPa و ۲۱۰۰-۳۵۰۰ kPa است. لایه اساس اصلاح شده با سیمان CTB باند فرودگاه (AC 150/5370-10G: P-304) طراحی مخلوط مطابق ASTM D1633 طوری باشد که مقاومت فشاری ۷ روزه



شکل ۴. نتایج آزمایش کشش غیرمستقیم نمونه‌های مختلف در زمان‌های مختلف عمل‌آوری

Fig. 4. Indirect tensile strength test results for different specimens under different curing times

نظیر خشک نمونه اصلاح‌نشده می‌باشد که باز هم از حداقل مقادیر مورد نیاز برای اساس و زیراساس جاده به ترتیب با مقادیر ۸۰ و ۲۵ بیشتر است. حداقل CBR (ASTM D1883) برای اساس و زیراساس باند فرودگاه (مشروط به عدم یخ زدن) برای شرایط بالا حداقل ۱۰۰ و ۳۵ است. مقادیر CBR اساس و زیراساس باند به ترتیب ۲۵ و ۴۰ درصد بیشتر از مقادیر نظیر راه است. ذکر این نکته ضروری است که با توجه به CBR بالا و توان سیستم بارگذاری محوری اکثر دستگاه‌های معمولی که ۳ تن بیشتر می‌باشد، لزوم استفاده از دستگاه با ظرفیت بار محوری حدود ۱۰ تن و بیشتر برای خاک‌های اصلاح شده توصیه می‌شود.

۸- آزمایش یخبندان- ذوب

آزمایش مقاومت یخبندان- ذوب (ASTM D560) روش B با هدف تعیین رطوبت بعد از پایان سیکل‌های یخبندان-ذوب، افت وزنی نمونه‌ها، تغییرحجم (تورم یا انقباض) و اندازه‌گیری UCS (جدول ۱) و INTS (جدول ۲) نمونه‌ها، بعد از ۷ روز عمل‌آوری اولیه و پس از ۱۲ سیکل ذوب و یخبندان (۴۸ ساعت یک سیکل) می‌باشد. نمونه اصلاح‌شده با ۰.۷٪ سیمان و ۲٪ آهک با رطوبت ساخت ۶ و ۸ درصد برس خورده و نخورده (در کل ۴ نمونه) تحت آزمایش یخبندان- ذوب قرار گرفتند. جدول ۴ متوسط افت وزنی نمونه‌های یخبندان-ذوب به ترتیب برای شرایط برس‌خورده و برس‌خورده برای دو نمونه UCS و In-DTS ارائه شده‌است. بطورکلی

نتایج آزمایش INTS نمونه‌های مختلف در زمان‌های مختلف عمل‌آوری را نشان می‌دهد. بیشترین مقاومت INTS برای ۲۸ روزه به ترتیب برای نمونه با C7L0، C7L2 و C7L3 است که نشان‌دهنده تاثیر مستقیم درصد سیمان بر INTS و تاثیر معکوس درصد آهک روی آن است. نکته جالب توجه افزایش قابل توجه INTS سه نمونه یاد شده با افزایش زمان عمل‌آوری خصوصاً برای نمونه C7L0 است. بطورکلی وجود نیکوفلاک سبب کاهش INTS می‌شود. نکته جالب بیشترین مدول سکانتی مربوط به نمونه C7L0 در زمان ۲۸ روز عمل‌آوری است. مقاومت کششی نمونه C7L2 برس نخورده در شرایط یخبندان- ذوب بسیار کمتر از مقادیر برای شرایط تر- خشک و نمونه یخبندان-ذوب برس خورده است. بطورکلی اصلاح با سیمان-آهک سبب کمتر از نصف شدن مقاومت کششی می‌شود. حداقل مقاومت کششی به روش غیرمستقیم حدود ۱۴۰۰ kPa و ۲۸۰۰ kPa به ترتیب برای بستر و اساس اصلاح‌شده با سیمان پیشنهاد می‌شود.

۷- نتایج آزمایش CBR

در جدول ۳ نتایج آزمایش CBR روی نمونه‌های خاک طبیعی و C7L2 برای درصد‌های مختلف نفوذ (mm) ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که در حالت خشک نمونه‌های اصلاح‌نشده از CBR مناسبی برخوردار هستند، اما افزایش رطوبت سبب کاهش شدید مقادیر CBR به حدود یک‌دهم مقدار اولیه می‌شود. مقادیر CBR نمونه خشک C7L2 حدود ۵ برابر مقادیر

جدول ۳. خلاصه نتایج CBR

Table 3. CBR Tests results

Additive	Water Content	Age(days)	State	CBR (%) in Penetration: 1.25mm	CBR (%) in Penetration: 2.5mm	CBR (%) in Penetration: 5mm
C0L0	6%	1	Dry	47.15	69.3	91.64
				48.3	73.2	98.1
	8%	4	Soaked	2.65	4.03	5.88
				3.7	5.5	7.4
		6	Soaked	5.68	7.36	10
C7L2	8%	3	Dry	217.7	330.2	442.4
			Soaked	211	319.8	428.3
		56	Dry	439.1	666.1	-
			Soaked	329.4	499.7	-
		3	Dry	275.6	505.3	-
			Soaked	230.8	350.2	469.3
C7L3	8%	3	Dry	530.3	-	-
			Soaked	631.8	-	-
		56	Dry	-	-	-
			Soaked	-	-	-

جدول ۴. نتایج آزمایش نمونه‌های یخبندان - ذوب نمونه‌های برس خورده و نخورده (*)

Table 4. Tests results under freezing- thawing cycles tests for brushed and un-brushed (*) specimens

Sample	Moisture of Tamping (%)	Moisture percentage after freezing and thaw cycles	Weight loses (%)	Volume changes (%)
C7L2*	6	15	7.35	-0.495
C7L2	6	15	10.85	-1.66
C7L2*	8	14.72	6.3	-0.59
C7L2	8	14.72	7.05	-1.895
C7L3*	6	15.45	9.0	-0.32
C7L3	6	15.45	9.2	-0.13
C7L3*	8	13.77	4.45	-0.325
C7L3	8	13.77	4.45	-2.495

جدول ۵. نتایج اندازه گیری جذب آب، تغییر دانسیته و تغییر حجم در آزمایش تر- خشک شدن نمونه C7L2

Table 5. Tests results of water absorption measurement, density and volume change for wetting-drying test for C7L2 specimens

Sample	C7L2		C7L3		
	6	8	6	8	
Moisture of Tamping (%)					
	Average	27.84	4.945	39.135	5.185
Moisture absorption percentage after wetting and drying cycles	Max Cycle 1	59.41	20.12	66.04	34.23
	Min Cycle 12	19.965	-11.695	31.42	-0.005
Weight loses (%)		-8.505	-8.395	-8.405	-9.515
Volume changes (%)		-0.66	-1.475	-0.805	-1.11

خشک شدن نمونه C7L2 و C7L3 ارائه شده است. کمترین درصد جذب آب در سیکل اول، حداقل و حداکثر درصد جذب آب برای نمونه C7L2-8 می‌باشد. به طور کلی درصد جذب آب نمونه‌های با رطوبت ساخت کمتر، بیشتر از نمونه‌های با رطوبت ساخت بیشتر در آزمایش تر-خشک است. افزایش سیکل تر-خشک سبب کاهش درصد جذب آب می‌شود. حداقل درصد کاهش وزن مربوط به نمونه C7L2-8 با مقدار ۸/۳۹۵٪ می‌باشد و کاهش وزن آن در محدوده مجاز آیین‌نامه با مقدار حدود ۱۴٪ می‌شود. بیشترین درصد تغییر حجم در نمونه C7L2-8 با مقدار ۱/۴۵۷٪- است که کمتر از مقدار مجاز ۲٪ نمونه‌های تثبیت شده است. لازم به ذکر است درصد تغییرات حجمی نمونه اصلاح با سیمان تنها در آزمایش تر-خشک برای درصد رطوبت ساخت بین ۶ و ۸٪ به ترتیب ۱/۲- و ۴/۶٪- است (آقایی آرایی و همکاران ۱۳۹۹). لذا اصلاح خاک با سیمان-آهک، سبب کاهش حجم نمونه می‌شود.

افزایش رطوبت سبب افزایش افت وزنی می‌شود. بیشترین متوسط افت وزنی در نمونه C7L2 برس‌خورده با رطوبت ساخت ۶٪ مشاهده شد. افزایش رطوبت حین ساخت سبب کاهش درصد رطوبت نمونه بعد از آزمایش یخبندان-ذوب می‌شود. بیشترین درصد تغییر حجم برای نمونه C7L3 با رطوبت ساخت ۸٪ برس‌خورده با مقدار ۱/۸۹۵٪- می‌باشد که کمتر از مقادیر مجاز ۲٪ است. لازم به ذکر است درصد تغییرات حجمی نمونه اصلاح با سیمان تنها در آزمایش یخبندان-ذوب برای درصد رطوبت ساخت بین ۶ و ۸٪ به ترتیب ۲- و ۴/۱٪- است [۳۰]. حداکثر افت وزنی مجاز آیین‌نامه برای خاک A-2-4 (AASHTO M145) ۱۴٪ است. مقادیر افت وزنی نمونه اصلاح شده مورد بررسی در محدوده مجاز برای اساس راه و باند قرار دارد.

۹- آزمایش تر-خشک

هدف از این آزمایش تعیین درصد جذب آب، کاهش وزن و تغییر حجم نمونه‌ها با رطوبت‌های ساخت ۶ و ۸ درصد طبق روش B استاندارد ASTM D-559 برای ۱۲ سیکل (هر سیکل ۴۸ ساعت) است. در پایان انجام ۱۲ سیکل، بر روی نمونه‌ها آزمایش UCS و INTS طبق استاندارد انجام می‌شود که نتایج آن قبلاً در جدول ۱ و ۲ ارائه شده است. جدول ۵ نتایج اندازه‌گیری جذب آب، تغییر دانسیته و تغییر حجم در آزمایش تر و

۱۰- آزمایش‌های دینامیکی سه‌محوری قطر بزرگ

آزمایش تعیین مدول و نسبت میرایی و مدول برجهندگی روی دو نمونه خاک اصلاح‌نشده و اصلاح‌شده با ۷٪ سیمان و ۲٪ آهک با دانسیته خشک 2.2 g/cm^3 و عمل آوری خشک با دستگاه سه‌محوری قطر بزرگ مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی انجام شد. قطر و ارتفاع نمونه‌ها به ترتیب

عمل‌آوری شد و ۳ روز در اتاق رطوبت قرار گرفت و سپس ۳ روز در گرمخانه در دمای 71°C (دمای کویر شهداد 76°C) قرار گرفت و ۲ روز دیگر در اتاق رطوبت قرار گرفت (۱۲ روز) و سپس به صورت خشک تحت آزمایش قرار گرفت. Tian و همکاران (۲۰۱۹) اثر عمل‌آوری تحت سیکل‌های یخبندان-ذوب بر رفتار دینامیکی خاک اساس اصلاح شده با استفاده از آزمایش های سه محوری سیکلیک روی خاکی مطابق با شرایط آب و هوایی منطقه مورد مطالعه به صورت دمای (-20°C) به مدت ۱۲ ساعت برای چرخه انجماد و دمای ۲۰ درجه سانتی گراد به مدت ۱۲ ساعت برای چرخه ذوب کردند.

۱۲- ساخت و عمل‌آوری نمونه خاک اصلاح‌نشده

این نمونه بدون افزودن هر گونه ماده اصلاح کننده با قطر ۲۰ و ارتفاع ۴۰ سانتیمتر ساخته شد. برای این نمونه شرایط عمل‌آوری خشک (ساخته شده با رطوبت ۶٪) در نظر گرفته شد. بطوریکه بعد از ۳ روز گیرش اولیه، نمونه به مدت ۴ روز در رطوبت ۱۰٪ و دمای ۲۱ درجه قرار گرفت. در ادامه به مدت ۶۱ ساعت در دمای $71^{\circ}\text{C}+$ در گرمخانه قرار داده شد و بعد از ۲۴ ساعت قرار دادن در اتاق رطوبت، در دوازدهمین روز عمل‌آوری تحت آزمایش سه محوری دینامیکی قرار گرفت.

۱۳- مدول یانگ

نتایج مدول یانگ یا الاستیسیته (E) در برابر e_1 (مقدار سیکل ۱۰ در کرنش‌های کوچک) در شکل‌های ۵ الف- و ب برای نمونه‌های اصلاح شده و اصلاح نشده به ترتیب برای تنش‌های محدودکننده $20/7 \text{ kPa}$ ، $34/5 \text{ kPa}$ ، $68/90 \text{ kPa}$ و $103/4 \text{ kPa}$ و $137/9 \text{ kPa}$ ارائه شده است. آزمایشها طبق ASTM D3999 در تنش‌های غیرهمسانی مختلف (تنش‌های استاندارد و بالاتر از مقادیر استاندارد AASHTO T307) انجام شد. فرکانس بارگذاری ۲ Hz، ۵ Hz و ۱۰ Hz و شکل موج سینوسی است. آزمایش‌های محدودده کرنش‌های اندازه‌گیری شده از $0/0004\%$ تا حداکثر $0/1\%$ می‌باشد. مطابق شکل ۵-الف برای تنش‌های محدودکننده $20/7 \text{ kPa}$ مقادیر مدول الاستیسیته همسان نمونه اصلاح شده و غیرهمسان و همسان نمونه اصلاح نشده خشک با هم تقریباً برابر است. اما با افزایش غیرهمسانی مقادیر مدول الاستیسیته نمونه اصلاح شده افزایش حدود ۲ تا ۳ برابری (حداکثر حدود 900 MPa) می‌یابد. مطابق شکل ۵-ب هرچند مقادیر مدول الاستیسیته تحت تنش محدودکننده $34/5 \text{ kPa}$ در حالت همسان و غیرهمسان خاک اصلاح نشده دارای بازه تغییرات بین 240 تا 370 MPa است. اما مقادیر نظیر برای خاک اصلاح شده بین 780 تا 970 MPa است. مطابق شکل

۲۰ cm و ۴۰ cm است. طبق AFESC/RD (ESL-TR40-10) فرکانس بارگذاری بر طراحی و بهسازی بستر باند تاثیر دارد. فرکانس معمول بارگذاری طبق ادبیات فنی ۱ تا ۵ هرتز است. بارگذاری چرخ‌های بوئینگ ۷۴۷ بین ۱/۶ تا ۲ هرتز و فرکانس جنگنده F-5 حدود ۲ هرتز می‌باشد. در این تحقیق فرکانس بارگذاری ۱۰، ۵ برای اساس راه و فرکانس ۲ Hz برای اساس باند فرودگاه انتخاب شد. Tian و همکاران ۲۰۱۹ برای بررسی سیکل‌های یخبندان-ذوب محدوده تنش محدودکننده بین ۳۰، ۶۰، ۹۰، ۱۲۰، ۱۵۰ kPa، تنش انحرافی بین ۲۴۰-۲۰ kPa و فرکانس بارگذاری ۳ Hz را انتخاب کردند [۳۱]. مقدار بار فشار چرخها در گزارش PCN به ترتیب برای طبقه بندی های خیلی زیاد، زیاد، متوسط و کم به ترتیب برابر ۲۴۰۰، ۱۷۵۰، ۱۲۵۰ و ۵۰۰ kPa می‌باشد. برای رویه آسفالتی حداکثر فشار چرخ ۱۷۵۰ kPa در نظر گرفته می‌شود. اثر فشار چرخ روی پی صلب ناچیز است. همچنین بار ضربه ای مورد نظر برای طراحی آزمایش‌های دینامیکی ۲/۵ تا ۳ برابر بار استاتیکی نظیر برای چرخ است. حداکثر تنش دینامیکی در نظر گرفته در سطح روسازی حدود 3500 kPa گزارش شده است. لازم به ذکر است حداکثر تنش دینامیکی در عمق لایه اساس اساس به طول قابل ملاحظه کاهش می‌یابد. طبق تحقیق Hanifa (۲۰۱۵) برای خاک‌های اساس (A-2-4) اصلاح شده با ۶٪ سیمان، دامنه تنش‌های بارگذاری استاتیکی اولیه و سیکلی استاندارد AASHTO T307 باید افزایش یابد [۳۲]. برنامه آزمایش‌های تعیین مدول برشی و میرایی در جدول ۶ ارائه شده است. مطابق جدول ۶ تنش محدودکننده 30 kPa و 60 kPa ، حداکثر تنش انحرافی بین 275 kPa برای اساس جاده تا 825 kPa برای اساس باند فرودگاه انتخاب شد. آزمایش تعیین مدول الاستیسیته و نسبت میرایی طبق ASTM D3999 با اعمال ۱۰۰ سیکل سینوسی انجام شد. در تحقیق Hanifa (۲۰۱۵) آزمایشها روی نمونه با هفت روز عمل‌آوری و مقاومت فشاری حدود 2000 kPa انجام شد. طبق AFESC/RD (ESL-TR40-10) تغییرات دمای مورد بهره برداری از ۱۳-۲ در $28-46^{\circ}\text{C}$ می‌تواند متغیر باشد. لذا این بازه از تغییرات اثر زیادی بر رفتار و عمر بهره برداری رویه دارد که باید حتی در ساخت و عمل‌آوری نمونه‌ها به آن توجه شود.

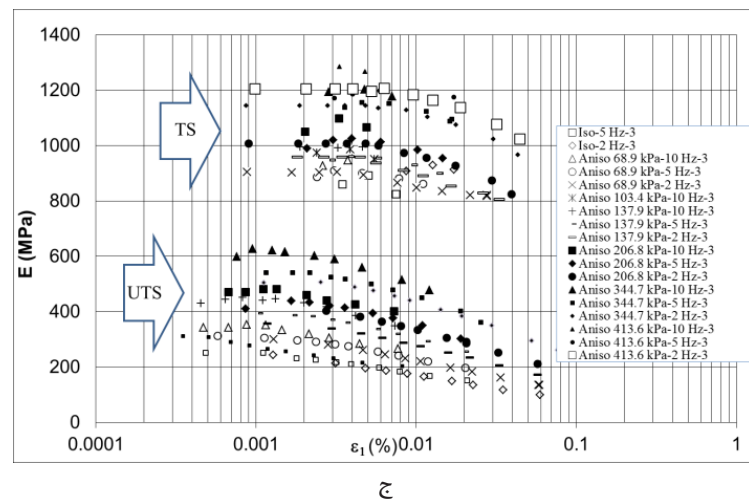
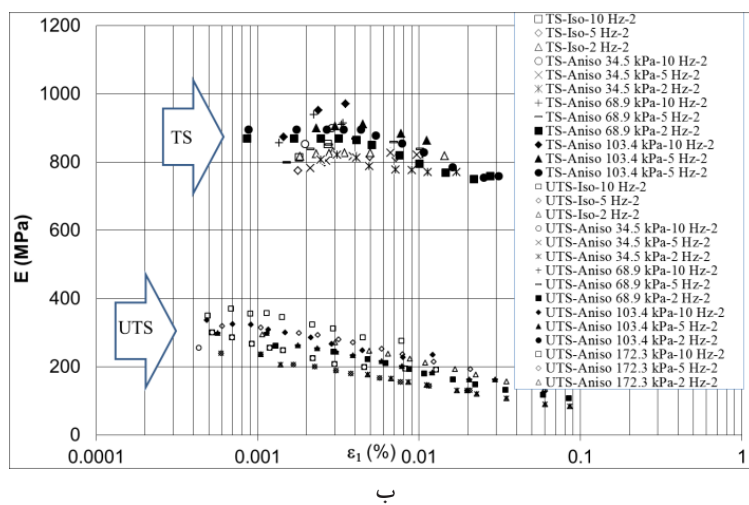
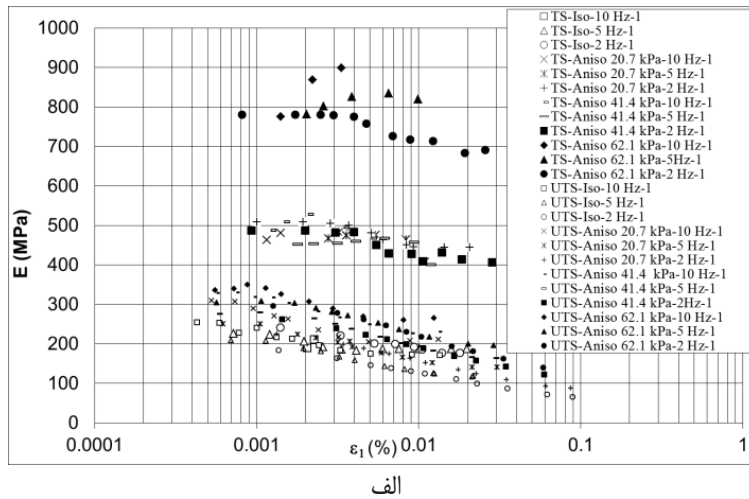
۱۱- ساخت و عمل‌آوری نمونه اصلاح شده با ۷٪ سیمان و ۳٪ آهک

این نمونه اصلاح شده از مخلوط خاک با ۷٪ سیمان و ۳٪ آهک و رطوبت ۸٪ ساخته شد. این نمونه بعد از ساخت ۴ روز در دمای معمولی

جدول ۶. برنامه آزمایش‌های تعیین مدول یانگ و نسبت میرایی و مقادیر مدول یانگ حداکثر تحت تنش‌های اولیه مختلف، a: تنش فقط برای نمونه خاک اصلاح‌نشده، b: تنش فقط برای نمونه خاک اصلاح‌شده، c: تنش برای هر دو نمونه خاک اصلاح‌شده و اصلاح‌نشده

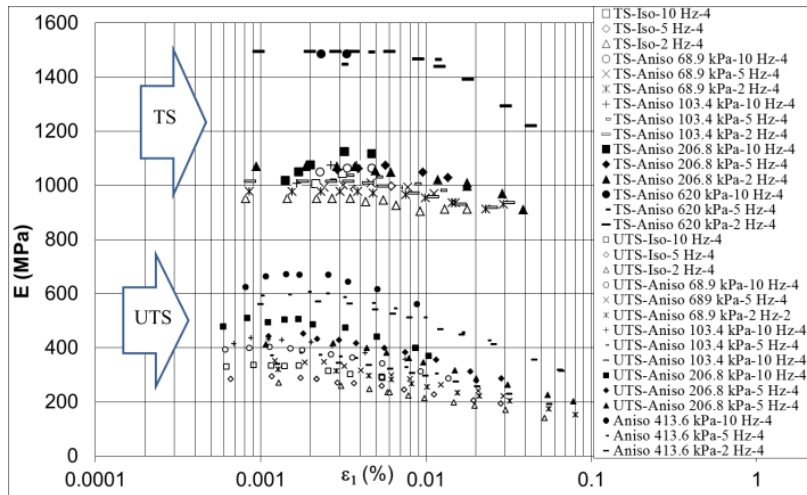
Table 6. Tests program for determination of Yang modulus, damping ratio and maximum Yang Modulus for treated under different initial axial stress, a: only for untreated, b: only for treated, c: for both treated and untreated soil specimens

No. of Sequence	Effective Confining Pressure (kPa)	Initial Axial Stress (kPa)	σ'_m (kPa)	E_{max} (MPa) at Frequency of (Hz)					
				10		5		2	
				TS	UTS	TS	UTS	TS	UTS
1	20.7	ISO(0) c	20.7	211.9	253.7	226.3	209.1	241.9	183.8
		20.7 c	27.6	489.8	309.5	476.0	250.4	508.4	224.9
		41.4 c	34.5	527.8	329.9	467.0	279.4	487.6	261.6
		62.1 c	41.4	899.2	349.6	834.3	308.2	780.9	255.6
2	34.5	ISO(0) c	34.5	852.6	300.2	815.7	238.8	830.8	235.9
		34.5 c	46.0	899.7	300.2	827.0	238.8	820.8	235.9
		68.9 c	57.5	939.4	336.2	868.5	298.9	868.7	261.6
		103.4 c	69.0	970.5	336.2	911.1	298.8	894.7	261.6
		172.3 a	91.9	-	369.8	-	319.2	-	293.9
3	68.9	ISO(0) c	68.9	-	311.0	891.5	250.1	999.2	243.9
		68.9 c	91.9	946.8	353.2	908.9	312.2	905.0	300.6
		103.4 c	103.4	985.8	412.9	-	-	-	-
		137.9 c	114.7	994.5	451.6	958.6	353.9	958.1	357.9
		206.8 c	137.8	1098.8	471.0	1025.6	439.1	1008.1	402.8
		344.7* c	183.8	1202.9	626.3	1155.5	540.9	1144.9	506.9
		413.6* b	206.8	1283.8	-	1197.9	-	1206.9	-
4	103.4	ISO(0) c	103.4	1116.8	334.5	996.3	294.2	951.5	270.0
		68.9 c	126.4	1064.4	402.6	1008.5	351.0	977.7	319.0
		103.4 b	137.9	1073.0	435.2	1036.2	381.1	1014.0	343.9
		206.8 c	172.3	1124.6	509.3	1073.2	452.6	1070.4	416.2
		413.6 a	241.3	-	671.9	-	605.6	-	571.0
		620.0* c	310.1	1486.0	-	1492.5	-	1466.7	-
5	137.9	ISO(0) c	137.9	1036.7	346.8	985.3	309.4	985.5	285.1
		103.4 c	172.4	1146.6	441.1	1070.8	396.4	1067.4	366.2
		137.9 c	183.9	1141.4	467.9	1086.9	423.1	1065.7	373.4
		275.8 c	229.8	1218.1	592.2	1160.4	524.0	1158.0	495.5
		825.0* b	412.9	1735.8	-	1670.6	-	1654.0	-

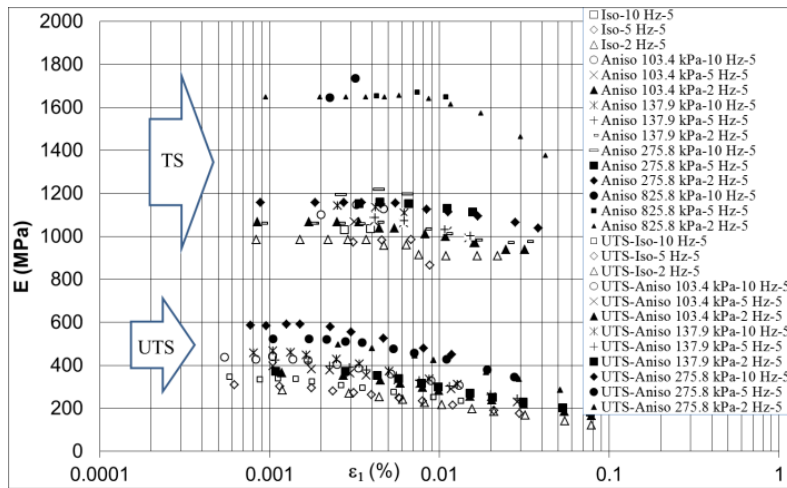


شکل ۵. نتایج مدول الاستیسیته- کرنش محوری در تنشهای محدودکننده، (الف) ۲۰/۷ kPa (ب) ۳۴/۵ kPa (ج) ۶۸/۹ kPa (د) ۱۰۳/۴ kPa (و) ۱۳۷/۹ kPa و فرکانسهای ۲ Hz، ۵ Hz و ۱۰ Hz تحت شرایط همسان و غیرهمسان خاکهای اصلاح نشده (UTS) با علائم کوچکتر و اصلاح شده (TS) با علائم بزرگتر (ادامه دارد)

Fig. 5. Results of modulus of elasticity-axial strain under confining pressures, (a) 20.7 kPa, (b) 34.5 kPa, (c) 68.9 kPa, (d) 103.4 kPa, and (e) 137.9 kPa and loading frequencies of 2, 5 and 10 Hz under isotropic and unisotropic stress condition for untreated (UTS), show with a smaller signs and treated soil (TS) specimens, show with bigger signs (Continued)



۸



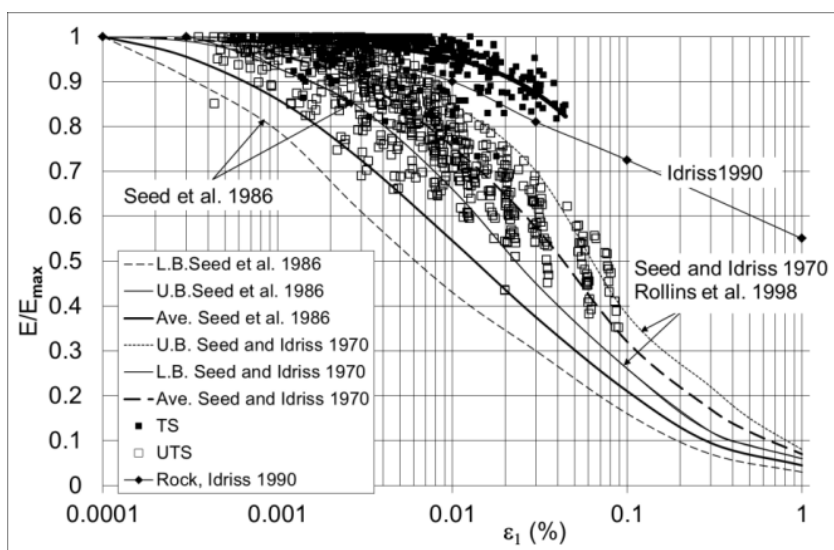
۹

شکل ۵. نتایج مدول الاستیسیته- کرنش محوری در تنشهای محدودکننده، الف) ۲۰٫۷ kPa (ب) ۳۴٫۵ kPa (ج) ۶۸٫۹ kPa (د) ۱۰۳٫۴ kPa و ۱۳۷٫۹ kPa و فرکانسهای ۲ Hz، ۵ Hz و ۱۰ Hz تحت شرایط همسان و غیرهمسان خاکهای اصلاح نشده (UTS) با علایم کوچکتر و اصلاح شده (TS) با علایم بزرگتر

Fig. 5. Results of modulus of elasticity-axial strain under confining pressures, (a) 20.7 kPa, (b) 34.5 kPa, (c) 68.9 kPa, (d) 103.4 kPa, and (e) 137.9 kPa and loading frequencies of 2, 5 and 10 Hz under isotropic and unisotropic stress condition for untreated(UTS), show with a smaller signs and treated soil (TS) specimens, show with bigger signs

باعث افزایش ۵۰٪ مقادیر مدول الاستیسیته می شود. مطابق شکل ۵- و روند مشابهی برای مدول الاستیسیته تحت تنش محدودکننده ۱۳۷٫۹ kPa مشاهده می شود. بطور کلی با افزایش تنش محدود کننده نرخ افزایشی مدول الاستیسیته با افزایش غیرهمسانی کاهش می یابد در صورتیکه برای نمونه اصلاح شده در سطح تنش محدودکننده مورد بررسی، افزایش غیرهمسانی سبب افزایش مقادیر الاستیسیته مدول می شود.

۵- ج مقادیر مدول الاستیسیته تحت تنش محدود کننده ۶۸٫۹۰ kPa در حالت همسان و غیرهمسان خاک اصلاح نشده حدوداً نصف مقادیر نظیر برای خاک اصلاح شده است. مقادیر مدول الاستیسیته تحت تنش محدود کننده ۱۰۳٫۴ kPa در حالت همسان و غیرهمسان خاک اصلاح نشده حدوداً نصف مقادیر نظیر برای خاک اصلاح شده است (شکل ۵-د). افزایش غیر همسانی نمونه اصلاح نشده و اصلاح شده به ۴۱۳٫۶ kPa و ۶۲۰ kPa



شکل ۶. نتایج نسبت مدول الاستیسیته - کرنش محوری در تنش‌های محدودکننده، غیرهمسانیها و فرکانسهای مختلف نمونه خاک اصلاح نشده (UTS) و اصلاح شده (TS) و مقایسه آن با منحنیهای ادبیات فنی برای سنگ، ماسه و شن

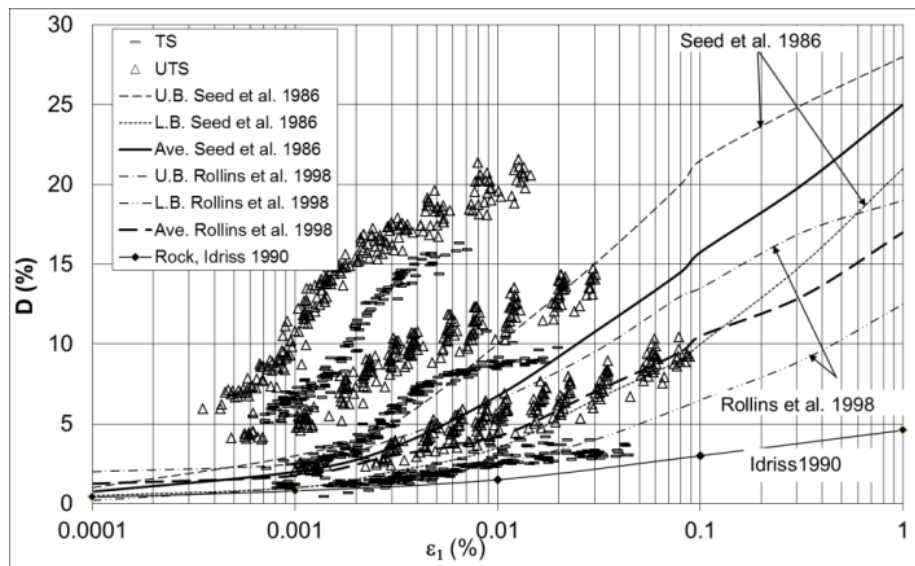
Fig. 6. Results of modulus of elasticity ratio-axial strain under different confining pressure, un-isotropic stress condition and loading frequencies for untreated and treated soil specimens and a comparison with related curves in literature for rock, sand and gravel

۶۲/۱ kPa برعکس می شود. به غیر از حالت همسان، در مابقی تنشها و غیرهمسانی، معمولاً با افزایش فرکانس، مقادیر مدول الاستیسیته حداکثر افزایش می یابد. تحت غیر همسانی بالا، گاهی مقادیر مدول حداکثر فرکانس ۵ Hz و ۲ Hz با هم برابر می شوند که شاید دلیل آن رشد میکروترکها در نمونه باشد. طبق جدول ۶ احتمالاً با رشد ترکها تحت تنش محدودکننده ۱۰۳/۴ kPa و تنش اولیه محوری ۶۲۰ kPa برای فرکانس ۵ Hz مقدار مدول الاستیسیته اندکی بیشتر در مقایسه با دو فرکانس ۱۰ Hz و ۲ Hz بدست آید. متوسط مقادیر مدول الاستیسیته حداکثر برای فرکانس ۱۰ Hz، ۵ Hz و ۲ Hz برای خاک اصلاح شده و اصلاح نشده خشک به ترتیب ۱۰۱۸/۶، ۹۶۴/۳، ۹۶۱/۱ و ۴۰۴/۷، ۳۵۱/۱ و ۳۲۴/۷ kPa است. لذا اصلاح خاک برای فرکانس ۱۰ Hz، ۵ Hz و ۲ Hz به ترتیب سبب افزایش ۲/۵، ۲/۷۵ و ۳ برابری متوسط مدول الاستیسیته حداکثر نسبت به خاک اصلاح نشده می شود. شکل ۶ نتایج E/E_{max} در برابر ϵ_1 تحت تنش‌های محدودکننده، غیرهمسانیها و فرکانسهای مختلف خاک اصلاح نشده (UTS)، خاک اصلاح شده (TS) را نشان می دهد. منحنی برآزش شده بر نقطه داده های نمونه خاک اصلاح شده بالای منحنیهای مربوط به ماسه

در اکثر موارد در تنش‌های محدودکننده یکسان و فرکانس ثابت با افزایش کرنش محوری مقادیر E خصوصاً برای نمونه اصلاح نشده کاهش می یابد. همچنین افزایش فرکانس باعث افزایش مدول الاستیسیته می شود. برعکس روندهای مشاهده شده برای خاک اصلاح شده با سیمان و آهک، روند تغییرات مدول الاستیسیته با افزایش کرنش برای خاک اصلاح نشده همواره کاهشی است. در تمام تنش‌های محدودکننده مقادیر مدول الاستیسیته برای خاک اصلاح شده نسبت به خاک اصلاح نشده بسیار بیشتر است که نشان دهنده تأثیر مستقیم درصد سیمان بر بهبود رفتار الاستیک خاک اصلاح شده است.

۱۴- نسبت مدول الاستیسیته

در این تحقیق در تمام نمونه ها تعیین حداکثر مدول الاستیسیته با توجه به دقت اندازه گیری کرنشها و ابعاد نمونه امکان پذیر است. مطابق جدول ۶ در نمونه اصلاح شده برای تنش محدود کننده ۲۰/۷ kPa و غیر همسانی کمتر از ۴۱/۴ kPa مقادیر مدول برشی حداکثر فرکانس ۱۰ Hz و کمتر و برای فرکانس ۲ Hz بیشترین است که این روند با افزایش غیرهمسانی به



شکل ۷. نتایج $D - \varepsilon_1$ در تنش‌های محدود کننده همسان و شرایط غیرهمسانی متفاوت و فرکانس‌های مختلف تحت موج سینوسی نمونه خاک اصلاح‌نشده (UTS) و اصلاح‌شده (TS)

Fig. 7. Results of $D - \varepsilon_1$ under isotropic and un-isotropic stress condition and different loading frequencies under sinusoidal wave for untreated and treated soil specimens

۱۰٪، ۱۵٪ و ۲۲٪ می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد که مصالح اصلاح شده وابستگی بیشتری به ناهمسانی نسبت به مصالح اصلاح شده دارند. با افزایش غیرهمسانی برای نمونه اصلاح‌شده اثر عوامل دیگر روی نسبت میرایی در مقایسه با فرکانس اندک است در حالی که برای نمونه اصلاح‌نشده اثر عوامل دیگر روی نسبت میرایی در مقایسه با فرکانس اندکی بیشتر از دیگر نمونه های اصلاح‌شده (ترک نخورده) است. مقادیر نسبت میرایی فرکانس ۱۰ هرترز برای هر دو نمونه اصلاح شده و نشده بالای منحنی Seed و همکاران برای شن قرار دارند.

۱۶- نتایج آزمایش تعیین مدول برجهندگی

در جدول ۷ برنامه و نتایج آزمایش تعیین مدول برجهندگی، مدول برشی، نسبت میرایی، کرنش برشی تحت تنشهای مختلف طبق AASHTO T307 اصلاح شده ارائه شده است. تعداد سیکل بارگذاری برای هر گام در حالت غیرهمسان ۵۰۰۰ سیکل است. اعمال این تعداد از سیکل برای تعیین عملکرد و تغییرات احتمالی مدول انجام شده است. در جدول ۸ متوسط مقادیر پارامترهای مختلف در حالت تنش محدود کننده همسان (ASTM

Rollins و همکاران (۱۹۹۸) [۳۳] و Seed و Idriss [۳۴] و حتی بالاتر از نمونه سنگ Idriss (۱۹۹۰) [۳۵] قرار دارد. نقطه داده‌های نسبت مدول خاک اصلاح نشده ماسه ای خشک بالای منحنی های منحنی‌های ادبیات برای شن (Seed و همکاران) و منحنی برازش داده ها بر منحنی متوسط Seed و Idriss برای ماسه منطبق است.

۱۵- نتایج نسبت میرایی

در شکل ۷ نتایج $D - \varepsilon_1$ تحت تنش‌های محدودکننده همسان و غیرهمسانی‌های متفاوت و فرکانس‌های مختلف تحت موج سینوسی طبق ASTM D3999 ارائه شده است. منحنی Seed و همکاران برای شن و Rollins و همکاران (۱۹۹۸) برای ماسه و Idriss (۱۹۹۰) برای سنگ برای اهداف مقایسه ای ارائه شده است. مقادیر نسبت میرایی خاک اصلاح شده در فرکانس ۲ Hz به مقادیر منحنی Idriss (۱۹۹۰) برای سنگ مشابه تر است. افزایش فرکانس سبب افزایش نسبت میرایی می‌شود. حداکثر نسبت میرایی برای فرکانس ۲ Hz، ۵ Hz و ۱۰ Hz برای نمونه اصلاح شده به ترتیب ۰.۴٪، ۱.۱٪ و ۱.۷٪ و برای نمونه اصلاح‌نشده به ترتیب

جدول ۷. برنامه و نتایج آزمایش تعیین مدول برجهندگی، مدول برشی، نسبت میرایی، کرنش برشی تحت تنشهای مختلف (AASHTO T307) خاک اصلاح شده با ۷٪ سیمان+۳٪ آهک و خاک اصلاح نشده و شرایط خشک (ادامه دارد)

Table 7. Test program and results of resilience modulus, shear modulus, damping ratio and shear strain under different stress according to AASHTO T307 for untreated and treated soil with 7% cement and 2% lime specimens under dry condition(Continued)

σ_3' (kPa)	Initial Axial Stress (kPa)	Frequency (Hz)	M_r (kPa)		G (kPa)		D (%)		Shear Strain (%)		σ_m' (kPa)
			UTS	TS	UTS	TS	UTS	TS	UTS	TS	
103.4	103.4	10	357.4	767.2	155.4	333.6	18.3	16.7	0.0095	0.0075	137.9
	103.4	5	272.6	698.2	108.2	303.6	12.3	9.1	0.0253	0.0077	137.9
	103.4	2	256.8	681.1	101.9	296.1	5.6	3.1	0.026	0.0093	137.9
20.7	ISO(0)	10	174.5	502.9	69.3	218.7	18.5	13.8	0.0064	0.0029	20.7
	ISO(0)	5	135.5	187.7	53.8	81.6	11.9	8.1	0.0104	0.0069	20.7
	ISO(0)	2	138.5	200.9	55	87.3	5.3	2	0.0086	0.0061	20.7
	20.7	10	205	489.7	81.4	212.9	19.6	9.6	0.0062	0.0023	27.6
	20.7	5	176.7	467.5	70.1	203.3	11.6	5	0.0075	0.0032	27.6
	20.7	2	174.9	508.4	69.4	221	5.7	1.5	0.0083	0.0022	27.6
	41.4	10	226.9	494.5	90	215	20.3	13.7	0.0116	0.004	34.5
	41.4	5	181.9	459.2	72.2	199.7	12.9	6.9	0.0156	0.0047	34.5
	41.4	2	188.9	483.3	74.9	210.1	6.3	1.7	0.0135	0.0046	34.5
	62.1	10	265.7	899.2	105.4	391	20.3	13.6	0.0158	0.0038	41.4
	62.1	5	200	825.4	79.4	358.9	13.1	6.8	0.0257	0.0045	41.4
	62.1	2	193.9	775.9	76.9	337.3	6.4	1.6	0.0204	0.0046	41.4
34.5	ISO(0)	10	191.8	813.3	76.1	353.6	21.6	9.1	0.0161	0.0021	34.5
	ISO(0)	5	142.8	775.2	56.7	337	13.2	3.6	0.0147	0.002	34.5
	ISO(0)	2	129.9	823.4	51.6	358	7.3	1.8	0.0218	0.0027	34.5
	34.5	10	227.2	852.6	90.1	370.7	21.4	11.1	0.0101	0.0023	46
	34.5	5	181.8	782.3	72.2	340.2	13.5	3.9	0.0153	0.0024	46
	34.5	2	179.7	806.3	71.3	350.6	6.9	1.5	0.0137	0.0028	46
	68.9	10	232.3	914.2	92.2	397.5	19.8	14.3	0.0118	0.0039	57.5
	68.9	5	186.7	868.4	74.1	377.6	13.6	7.1	0.0276	0.0046	57.5
	68.9	2	159.1	865.1	63.1	376.2	7	1.7	0.0292	0.0047	57.5
	103.4	10	275.2	970.4	109.2	421.9	20.2	14.5	0.0099	0.004	69
	103.4	5	192.7	911.1	76.5	396.1	13.7	7.6	0.0264	0.0051	69
	103.4	2	156.7	877.2	62.2	381.4	7.7	2.2	0.0442	0.0062	69
68.9	ISO(0)	10	202.5		80.4		20.2	-	0.0104	-	68.9
	ISO(0)	5	150.5	859.3	59.7	373.6	13.8	5.7	0.0265	0.004	68.9
	ISO(0)	2	134.3	867	53.3	377	7.7	2.1	0.0288	0.0043	68.9
	68.9	10	266.9	946.7	105.9	411.6	19.5	14.7	0.0098	0.0043	91.9
	68.9	5	221	901.6	87.7	392	12.4	7.6	0.015	0.0053	91.9
	68.9	2	197.5	892.9	78.4	388.2	6.4	2.1	0.0208	0.0054	91.9
	103.4	10	292.3	950.7	116	413.4	19.6	15.6	0.0128	0.0063	103.4
	137.4	10	347.6	994.2	137.9	432.2	18.8	14.9	0.0094	0.0053	114.7
	137.4	5	255.2	954.2	101.3	414.9	13.1	8	0.0254	0.0065	114.7
	137.4	2	206.7	935.4	82	406.7	7.5	2	0.0418	0.0064	114.7
	206.8	10	401	1066.7	159.1	463.8	18.4	15.4	0.0092	0.0056	137.8
	206.8	5	349.6	983.9	138.7	427.8	11.1	8.6	0.0139	0.0117	137.8
206.8	2	333.3	956.5	132.3	415.9	4.6	2.6	0.013	0.0133	137.8	
344.7	10	478.3	1177.2	189.8	511.8	18.8	15.9	0.0153	0.0081	183.8	
344.7	5	361.3	1122.1	143.4	487.8	12.4	9	0.0323	0.0134	183.8	
344.7	2	294.1	1104.2	116.7	480.1	7.7	2.7	0.0669	0.0135	183.8	
413.6	10		1266.9		550.8	-	15.1	-	0.0055	206.8	
413.6	5		1174.6		510.7	-	8.8	-	0.0198	206.8	
413.6	2		1136.9		494.3	-	2.7	-	0.0218	206.8	

جدول ۷. برنامه و نتایج آزمایش تعیین مدول برجهندگی، مدول برشی، نسبت میرایی، کرنش برشی تحت تنش‌های مختلف (AASHTO T307) خاک اصلاح‌شده با ۷٪ سیمان+۳٪ آهک و خاک اصلاح‌نشده و شرایط خشک

Table 7. Test program and results of resilience modulus, shear modulus, damping ratio and shear strain under different stress according to AASHTO T307 for untreated and treated soil with 7% cement and 2% lime specimens under dry condition

σ_3' (kPa)	Initial Axial Stress (kPa)	Frequency (Hz)	M_r (kPa)		G (kPa)		D (%)		Shear Strain (%)		σ_m' (kPa)
			UTS	TS	UTS	TS	UTS	TS	UTS	TS	
103.4	ISO(0)	10	292.2	1116.8	115.9	485.6	17.6	15.7	0.0069	0.0054	103.4
	ISO(0)	5	192.5	996.2	83.7	433.1	13.5	7.7	0.0359	0.0071	103.4
	ISO(0)	2	168.9	946.1	73.4	411.4	6.9	1.8	0.0384	0.0064	103.4
	68.9	10	286.2	1064.4	113.6	462.8	19.8	14.6	0.0174	0.0038	126.4
	68.9	5	241.3	1000.6	95.8	435.1	12.5	6.1	0.0263	0.0036	126.4
	68.9	2	221.3	976.4	87.8	424.5	6	1.9	0.0267	0.0045	126.4
	103.4	10		1097.6		477.2	-	15.4	-	0.0044	137.9
	103.4	5		1030.7		448.1	-	7.9	-	0.0058	137.9
	103.4	2		996.5		433.3	-	2	-	0.0063	137.9
	206.8	10	368.2	1116	146.1	485.2	19.2	15.7	0.0132	0.0054	172.3
	206.8	5	286.9	1048	113.8	455.6	13.5	8.9	0.0361	0.0111	172.3
	206.8	2	224.8	1020.8	89.2	443.8	8.3	2.6	0.0693	0.0135	172.3
	413.6	10	561.3		199.1		18.1	-	0.0112	-	241.3
	413.6	5	426.3		185.4		12	-	0.0303	-	241.3
	413.6	2	355.6		154.6		6.7	-	0.0574	-	241.3
	620	10		1555.3		676.2	-	14.2	-	0.0038	310.1
	620	5		1465.1		637	-	8.9	-	0.0131	310.1
	620	2		1291.8		561.6	-	3.3	-	0.035	310.1
137.9	ISO(0)	10	234.6	1036.7	93.1	450.7	20.6	14.3	0.017	0.0045	137.9
	ISO(0)	5	174.8	985.2	69.4	428.4	14.2	8.1	0.0376	0.0078	137.9
	ISO(0)	2	167.2	914.1	66.4	397.4	7.6	3.3	0.0405	0.0087	137.9
	103.4	10	306.1	1128.8	121.5	490.8	20.1	15.6	0.0165	0.0054	172.4
	103.4	5	254.2	1070.6	100.9	465.5	12.9	7.3	0.0255	0.0047	172.4
	103.4	2	239.9	1039.1	95.2	451.8	6.4	1.8	0.0259	0.0062	172.4
	137.9	10	312.4	1107.6	124	481.6	21.1	15.9	0.0162	0.0072	183.9
	137.9	5	243	1071	96.4	465.6	14	8.3	0.0363	0.0072	183.9
	137.9	2	230.1	1032.8	91.3	449	7.3	2.4	0.0395	0.0096	183.9
	275.8	10	450.7	1196.9	178.8	520.4	19.3	16.3	0.0149	0.0074	229.8
	275.8	5	345.1	1114.1	137	484.4	13.1	9	0.035	0.0181	229.8
	275.8	2	286.2	1094.5	113.6	475.9	8	2.8	0.0649	0.0193	229.8
	825	10		1735.8		754.7	-	14	-	0.0037	412.9
	825	5		1646.9		716	-	8.8	-	0.0126	412.9
	825	2		1464.1		636.6	-	3.3	-	0.0345	412.9

جدول ۸. خلاصه نتایج مدول برجهندگی و مقادیر نظیر مدول برشی، نسبت میرایی و کرنش برشی طبق AASHTO T307 و حالت تنش همسان و نمونه خاکهای اصلاح نشده (UTS) و اصلاح شده (TS) برای اساس و زیراساس جاده و باند

Table 8. Summary result of resilience modulus, shear modulus, damping ratio and shear strain according to AASHTO T307 and isotropic stress condition for untreated and treated soil specimens as base and sub-base of road and runway

	Frequency (Hz)	M _r (kPa)		G (kPa)		D (%)		Shear Strain (%)	
		UTS	TS	UTS	TS	UTS	TS	UTS	TS
Isotropic	10	219.1	867.4	87.0	377.2	19.7	13.2	0.0114	0.0037
Confining Pressure (A)	5	159.2	760.7	64.7	330.7	13.3	6.6	0.0250	0.0056
	2	147.8	750.3	59.9	326.2	7.0	2.2	0.0276	0.0056
AASHTO T307 (B)	10	301.3	944.6	120.4	410.7	19.7	14.6	0.0121	0.0049
	5	228.4	885.0	90.6	384.8	12.5	7.4	0.0217	0.0067
	2	203.1	871.4	80.6	378.9	6.3	2.1	0.0286	0.0074
Modified AASHTO T307 (C)	10	519.8	1489.4	194.5	647.6	18.5	14.7	0.0133	0.0052
	5	393.8	1411.4	164.4	613.6	12.2	8.9	0.0313	0.0130
	2	324.9	1286.7	135.7	559.4	7.2	3.1	0.0622	0.0277

۱۰× (برای نفوذ برابر ۲/۵ تا ۵ mm) مقادیر مدول برجهندگی بر حسب MPa یا برای خاک اصلاح شده تقریباً برابر با UCS_{۲۰} است. مقادیر مدول بستر برای خاک اصلاح شده برابر مقادیر CBR در نفوذ ۱/۲۵ mm در حالت غرقاب با CBR×۳ و برای حالت خشک CBR×۲/۵ است. در خاک اصلاح شده در برای سطح تنشهای مورد بررسی، مقادیر متوسط مدول برجهندگی اساس باند فرودگاه حدوداً بیش از ۴۰٪ مقدار نظیر اساس جاده طبق AASHTO T307 است.

۱۷- تغییر شکل قائم محوری و تجمعی

تغییر شکل‌های ماندگار در هر لایه مجزا به جای کرنش فشاری قائم یکی از مشخصات مصالح در طراحی روسازی انعطاف پذیر است [۳۶]. برای خاک اصلاح شده مقادیر تغییر شکل تجمعی طبق الگوی جدول ۸ در تنشهای محدودکننده ۲۰/۷، ۳۴/۵، ۶۸/۹، ۱۰۳/۴ و ۱۳۷/۹ kPa به ترتیب ۰/۲۹۸، ۰/۲۸۱، ۰/۳۷۲، ۰/۴۸۷ و ۰/۳۸۱ mm با مجموع ۱/۸۱۹ mm برای ۸۲۰۰۰ سیکل بدست آمد. همچنین برای خاک اصلاح نشده مقادیر تغییر شکل تجمعی در تنشهای محدودکننده ۲۰/۷، ۳۴/۵، ۶۸/۹، ۱۰۳/۴ و ۱۳۷/۹ kPa به ترتیب ۰/۲۶۳، ۰/۲۲۱، ۰/۷۵۱، ۰/۳۴۴ و ۰/۶۶۵ mm با مجموع ۲/۲۴۴ mm برای ۷۳۰۰۰ سیکل بدست آمد. میزان تغییر شکل تجمعی خاک اصلاح شده با سیمان و آهک به صورت جزئی کمتر از خاک

(D399) و طبق AASHTO T307 و اصلاح شده تحت تنشهای محوری اولیه بالا (برای باند فرودگاه) شامل نتایج مدول برجهندگی و مدول برشی، نسبت میرایی و کرنش برشی برای دو نمونه اصلاح نشده و اصلاح شده ارائه شده است. متوسط مقادیر مدول برجهندگی با افزایش غیرهمسانی و افزایش تنش محوری اولیه افزایش می‌یابد. افزایش فرکانس بارگذاری سبب افزایش مدولهای برجهندگی، مدول برشی و نسبت میرایی می‌شود، اما افزایش فرکانس سبب کاهش کرنش برشی اعمالی بر نمونه می‌شود. مقادیر متوسط مدول برجهندگی برای تمام شرایط آزمایش در حالت اصلاح شده بیش از ۳/۵ برابر مقادیر نظیر در حالت اصلاح نشده (۳۲۸/۵ kPa) اصلاح نشده در برابر ۱۱۴۸/۱ kPa (اصلاح شده) است. نسبت مقادیر نظیر برای مقادیر مدول برشی حدود ۳/۸ برابر است. متوسط نسبت میرایی و نسبت کرنشهای برشی حالت اصلاح نشده به اصلاح شده برابر ۱/۵ و ۲/۶ است. بطور کلی با افزایش فرکانس مقادیر نسبت میرایی و کرنش برشی به ترتیب کاهش و افزایش می‌یابد. برای رویه انعطاف پذیر $E \text{ (MPa)} = 10 \times \text{CBR}$ و یا PLT (رویه صلب) برای تعیین مدول استفاده می‌شود. استاندارد AAF برای طراحی رویه فرودگاه حداکثر E بستر راه با CBR=۳۳ برابر ۳۴۵ MPa برای طراحی توصیه می‌کند. با توجه به حداقل مقادیر ۸۰ و ۱۰۰ برای اساس راه و باند، مقادیر مدول اساس اصلاح شده باید به ترتیب بیش از ۸۰۰ و ۱۰۰۰ MPa باشند. برای خاک اصلاح نشده خشک CBR



شکل ۸. نمایش ترکهای ریز روی نمونه C7L2 بعد از آزمایش مونوتونیک سه سیکلی سه محوری

Fig. 8. Micro-crack in surface of C7L2 specimen after post cyclic monotonic triaxial test

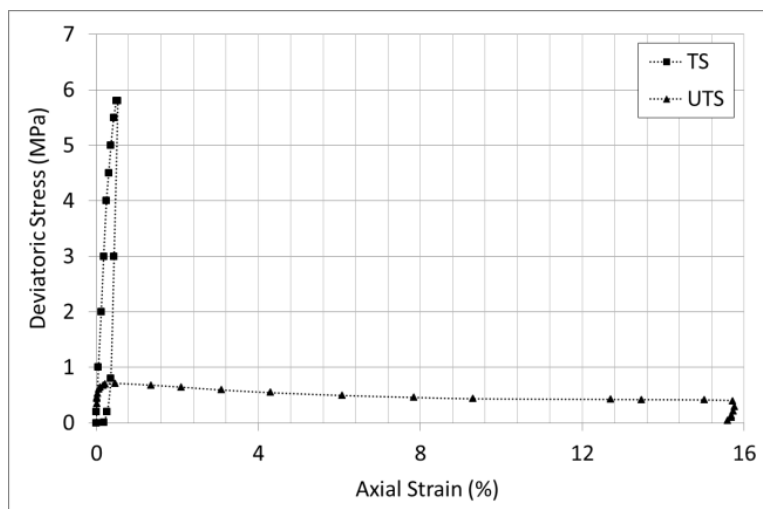
طبیعی خشک اصلاح نشده است.

۱۸- نتایج آزمایش مونوتونیک پساسیکلی

پس از آزمایش تعیین مدول برجهندگی، مدول برشی و نسبت میرایی، آزمایش پسا سیکلی روی نمونه‌ها انجام شد (شکل ۸). با این آزمایش حدودی از مقاومت فشاری سه محوری و منحنی تنش- کرنش بدست می آید. آزمایش تحت تنش محدود کننده $34/5 \text{ kPa}$ با اعمال مکش و با سرعت بارگذاری $0/5 \text{ mm/min}$ انجام می شود. به توجه به در دسترس بودن محیط پیرامونی نمونه اندازه گیری تغییر قطر نمونه در چند تراز مختلف فراهم است. در شکل ۹ نمودار تنش تفاضلی- کرنش محوری پسا سیکلی برای نمونه اصلاح شده با 7% سیمان و 2% آهک و نمونه اصلاح نشده خشک ارائه شده است. بعد از رسیدن به مقاومت حداکثری در حدود $5/8 \text{ MPa}$ به علت نزدیک شدن به ظرفیت حداکثر 20 تنی لودسل، ادامه بارگذاری ممکن نشد. این مقدار قابل مقایسه با مقادیر آزمایش تک محوری برای نمونه های اصلاح شده با 7% سیمان و 2% آهک بعد آزمایش های تر-خشک شدن، یخبندان-ذوب، نمونه تحت عمل آوری معمولی، و خاک طبیعی (بدون مواد تثبیت کننده) به ترتیب با مقادیر $7/18 \text{ MPa}$ ، $3/37 \text{ MPa}$ ، $5/30 \text{ MPa}$ و $0/93-0/42$ برای زمان عمل آوری 28 روزه می باشد. لازم به ذکر است که براساس نتایج بررسی عمل آوری یخبندان و ذوب و تر-خشک، نمونه خاک اصلاح شده با 7% سیمان و 2% آهک برای شرایط خشک مناسبتر است.

تغییرات قطر نمونه به ترتیب با فواصل در ارتفاع 5 ، 10 ، 15 ، 20 ، 25 ، 35 سانتیمتر از بالای نمونه برای نمونه اصلاح شده حدود 63 ، $63/1$ ، 63 ، 63 ، 63 ، 63 ، 63 ، 63 میلیمتر و برای نمونه اصلاح نشده حدود 0 ، 76 ، 84 ، 70 ، $64/5$ میلیمتر می باشد. متوسط ارتفاع نمونه بعد از آزمایش با اندازه گیری در 8 نقطه برای نمونه اصلاح شده و اصلاح نشده به ترتیب حدود $40/0 \text{ cm}$ و حدود 35 cm به دست آمد. تغییر شکل ماندگار بعد از آزمایش مونوتونیک پساسیکلی نمونه اصلاح شده ناچیز (حدود $0/08 \text{ mm}$) که قابل مقایسه با مقدار تغییر شکل تجمعی $1/66 \text{ mm}$ بارهای سیکلی می باشد و برای نمونه اصلاح نشده بیش از 50 mm (تغییر شکل تجمعی $1/25 \text{ mm}$ بارهای سیکلی) می باشد. مقدار ضریب پواسون نمونه اصلاح شده و اصلاح نشده به ترتیب $0/15$ و $0/268$ است.

مقادیر مدول سکانتی تحت آزمایش تک محوری نمونه C7L2 برای عمل آوری معمولی و تر-خشک با رطوبت ساخت 8% به ترتیب برابر $360/6 \text{ MPa}$ و $319/5 \text{ MPa}$ است. در آزمایش مونوتونیک پساسیکلی سه محوری تحت محدود کننده $34/5 \text{ kPa}$ مدول سکانتی بارگذاری اولیه برای خاک اصلاح شده و اصلاح نشده به ترتیب $1666/7 \text{ MPa}$ و $233/3 \text{ MPa}$ و مدول بارداری آنها به ترتیب حدود $2873/6 \text{ MPa}$ و $255/0 \text{ MPa}$ می باشد. مقایسه مدول سکانتی حاصل از آزمایش های استاتیکی با نتایج سه محوری مشاهده می شود مدول سکانتی به دست آمده از آزمایش مقاومت فشاری تک محوری برای نمونه اصلاح شده با 7 درصد سیمان و 2 درصد



شکل ۹. نمودار تنش تفاضلی- کرنش محوری مونوتونیک پس‌ساییکلی خاکهای اصلاح‌نشده (UTS) و اصلاح‌شده (TS)

Fig. 9. Deviatoric stress-axial stress curve under post cyclic monotonic test for untreated and treated soil

نتایج به شرح زیر است:

- با توجه به نیازهای طراحی برای اساس راه و باند، نمونه (C7L2) دارای بهترین عملکرد از نظر UCS است. مقادیر UCS برای CN7L2 (نمونه همراه با افزودن نیکوفلاک) بعد از ۷ روزه تقریباً ثابت است. مقادیر UCS نمونه بهینه C7L2 و نمونه C7L3 در آزمایش یخبندان-ذوب حالت برس نخورده نصف مقادیر نظیر برس خورده می باشد. مدول سکانتی نمونه C7L2 با زمان عمل آوری افزایشی است و برای زمانهای عمل آوری ۵۶ و ۹۰ روزه از همه نمونه ها بیشتر است. اما مدول سکانتی نمونه C7L0 تا ۲۸ روز عمل آوری افزایشی و سپس تقریباً ثابت است. افزودن نیکوفلاک برای نمونه CN7L2 سبب کاهش مقادیر مدول سکانتی باگذشت زمان می‌شود. افزایش رطوبت در آزمایش ذوب-یخبندان سبب کاهش اندک مقاومت فشاری تک‌محوری و مدول سکانتی می‌شود. مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه های در آزمایش تر-خشک بیشتر از مقادیر نظیر یخبندان-ذوب است و با افزایش رطوبت افزایش می‌یابد. لذا توصیه می‌شود نمونه اصلاح‌شده با سیمان و آهک در شرایط مرطوب کوبیده شود. براساس نتایج بررسی عمل آوری یخبندان و ذوب و تر-خشک، نمونه C7L2 برای لایه اساس شرایط گرم-خشک مناسب تر است.

- مقاومت کششی نمونه CN7L2 کمتر از C7L2 و هر دو آنها کمتر

آهک تقریباً یک چهارم تا یک پنجم مقادیر آزمایش سه محوری می‌باشد.

۱۹- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این تحقیق یک نمونه خاک با درصد ریزانه ۲۳٪ و PI بیش از ۱۲٪ که به صورت اصلاح نشده برای استفاده به عنوان اساس راه و باند مناسب نمی باشد، به صورت اصلاح شده و نشده تحت آزمایشهای مختلف قرار گرفت. ابتدا نمونه‌هایی با ترکیب‌های مختلفی از سیمان، آهک و ماده پلیمری معدنی نیکوفلاک با مدت‌های مختلف عمل آوری برای انجام انواع آزمایش‌های UCS و کشش برزیلی و یخبندان-ذوب و تر با دانستیه خشک $2/2 \text{ g/cm}^3$ و رطوبت ۶٪ و ۸٪ ساخته شدند و در نهایت نمونه خاک خشک و اصلاح‌شده با ۷٪ سیمان و ۲٪ آهک (C7L2) به عنوان نمونه مورد بررسی در آزمایش‌های دینامیکی برای تعیین مدول برجهندگی، مدول برشی و میرایی در نظر گرفته شد. اندازه‌گیری مدول برشی و نسبت میرایی طبق استاندارد ASTM D3999 و انتخاب تشه‌های محدودکننده و سربارهای استاتیکی اولیه و تشه‌های سیکی برای اساس راه و باند فرودگاه برای تعیین مدول برجهندگی به ترتیب طبق AASHTO T307 و شرایط تنش واقعی و ادبیات فنی می‌باشد. در نهایت ارتباط بین مدول برجهندگی، UCS و مدول سکانتی آن و مقادیر CBR برای اهداف طراحی ارائه شد. خلاصه

از مقادیر C7L0 است.

قرار دارند.

-مقادیر متوسط مدول برجهندگی برای تمام شرایط آزمایش در حالت اصلاح شده بیش از $3/5$ برابر مقادیر نظیر در حالت اصلاح نشده (MPa) $328/5$ اصلاح نشده در مقایسه با $1148/1$ MPa نمونه اصلاح شده) است. نسبت مقادیر نظیر برای مقادیر مدول برشی حدود $3/8$ برابر است. متوسط نسبت میرایی و نسبت کرنشهای برشی حالت اصلاح نشده به اصلاح شده برابر $1/5$ و $2/6$ است.

-در خاک اصلاح شده در برای سطح تنشهای مورد بررسی، مقادیر متوسط مدول برجهندگی اساس باند فرودگاه بیش از مقدار نظیر اساس جاده طبق AASHTO T307 است.

-با توجه به حداقل مقادیر CBR برابر 80 و 100 برای اساس راه و باند، مقادیر مدول اساس اصلاح شده به ترتیب بیش از 800 و 1000 MPa است.

-مقاومت مونوتونیک پساسیکلی نمونه C7L2 برابر $5/8$ MPa برای 15 روز زمان عمل آوری است که قابل مقایسه با مقادیر UCS آزمایشهای تر-خشک شدن، یخبندان-ذوب، نمونه تحت عمل آوری معمولی، و خاک طبیعی به ترتیب با مقادیر $7/18$ MPa، $3/37$ MPa و $5/3$ MPa و $0/39$ - $0/24$ MPa برای عمل آوری 28 روزه است.

-مدول سکانتی نمونه C7L2 حاصل از آزمایش UCS تقریباً یک چهارم تا یک پنجم مقادیر نظیر آزمایش مونوتونیک تحت محدودکننده kPa $34/5$ است.

آزمونههای ارزیابی و تعیین پارامترهای طراحی تثبیت با آهک-سیمان لایه‌های روسازی راه و باند، به دلیل سخت، زمان‌بر و گران بودن و نبود استاندارد برای تنشهای اعمالی، تعیین مستقیم خصوصاً مدول برجهندگی، اکثراً طراحان از پارامترهای معادل نظیر CBR یا UCS و یا روابط همبستگی آنها با مدول برجهندگی استفاده می‌کنند. با انجام تحقیقات مشابه، تعیین مستقیم مدول برجهندگی با آزمایشهای ساده و ارائه استاندارد تعیین مدول برجهندگی برای خاک اصلاح شده فراهم می‌شود.

تقدیر و تشکر

داده‌های این مقاله از پروژه تحقیقاتی با عنوان «بررسی و ارائه مشخصات فنی خاک اساس اصلاح شده با آهک و سیمان» با شماره $7-97-12893$ مورخ $1397/6/19$ توسط مرکز تحقیقات، راه، مسکن و شهرسازی استخراج شده است.

-مقادیر CBR نمونه خشک C7L2 حدود 5 برابر مقادیر نظیر خشک نمونه اصلاح نشده می‌باشد که از حداقل مقادیر مورد نیاز برای اساس و زیراساس جاده به ترتیب با مقادیر 80 و 25 بیشتر است.

-افت وزنی بخش درشت‌دانه نمونه خاک اصلاح نشده در آزمایش سلامت، 11% است. افت وزنی نمونه بعد از اصلاح با سیمان-آهک در آزمایش یخبندان-ذوب و تر-خشک به ترتیب $10/85$ و $8/85\%$ بوده که کمتر از مقدار مجاز 14% است.

-بیشترین درصد تغییرحجم آزمایش یخبندان-ذوب و تر-خشک برای نمونه C7L2، رطوبت ساخت 8% برس خورده به ترتیب $1/66\%$ و $1/457\%$ می‌باشد که کمتر از مقادیر مجاز 2% است. درصد تغییرات حجمی نمونه اصلاح با سیمان تنها در آزمایش یخبندان-ذوب برای درصد رطوبت ساخت بین 6 و 8% به ترتیب 2 و $4/1\%$ است.

-متوسط مقادیر مدول الاستیسیته حداکثر برای فرکانس 10 Hz، 5 و 2 Hz برای خاک اصلاح شده و اصلاح نشده خشک به ترتیب $1018/6$ ، $964/3$ ، $961/1$ و $404/7$ ، $351/1$ و $334/7$ MPa است. لذا اصلاح خاک برای فرکانس 10 Hz، 5 Hz و 2 Hz به ترتیب سبب افزایش $2/75$ ، $2/5$ و 3 برابری متوسط مدول الاستیسیته حداکثر نسبت به خاک اصلاح نشده می‌شود.

-نقطه داده‌های نسبت مدول الاستیسیته خاک اصلاح نشده خشک بالای منحنی‌های منحنی‌های ادبیات برای شن (Seed و همکاران ۱۹۸۶) و منحنی برازش داده‌ها بر منحنی متوسط Seed و Idriss برای ماسه منطبق است. مقادیر نسبت میرایی خاک اصلاح شده در فرکانس 2 Hz به مقادیر منحنی Idriss (۱۹۹۰) برای سنگ مشابه‌تر است. افزایش فرکانس سبب افزایش نسبت میرایی می‌شود. حداکثر نسبت میرایی برای فرکانس 2 Hz، 5 Hz و 10 Hz برای نمونه اصلاح شده به ترتیب 4% ، 11% و 17% و برای نمونه اصلاح نشده به ترتیب 10% ، 15% و 22% می‌باشد.

-نتایج نشان می‌دهد که مصالح اصلاح شده وابستگی بیشتری به ناهمسانی نسبت به مصالح اصلاح شده دارند. با افزایش غیرهمسانی برای نمونه اصلاح شده اثر عوامل دیگر روی نسبت میرایی در مقایسه با فرکانس اندک است در حالی که برای نمونه اصلاح نشده اثر عوامل دیگر روی نسبت میرایی در مقایسه با فرکانس اندکی بیشتر از دیگر نمونه‌های اصلاح شده (ترک نخورده) است. مقادیر نسبت میرایی فرکانس 10 Hz برای هر دو نمونه اصلاح شده و نشده بالای منحنی Seed و همکاران برای شن

- fiber-reinforced and geopolymer-stabilized clay soil. *Construction and Building Materials*, 272 (2021), 121914.
- [10] O. Amini, M. Ghasemi, Laboratory study of the effects of using magnesium slag on the geotechnical properties of cement stabilized soil, *Construction and Building Materials*, 223 (2019) 409-420.
- [11] Little, N.D. and Nair, S, Recommended practice for stabilization of subgrade soils and base materials, The National Academies Press, NCHRP Web-Only Document 144, Texas Transportation Institute, August 2009.
- [12] Abu-Farsakh, M., Dhakal, S., & Chen, Q., Laboratory characterization of cementitiously treated/stabilized very weak subgrade soil under cyclic loading. *Soils and Foundations*, 55(3) (2015) 504-516.
- [13] Andavan, S., & Pagadala, V. K., A study on soil stabilization by addition of fly ash and lime. *Materials Today: Proceedings*, 22 (2020) 1125-1129.
- [14] Yin, Z., Lekalpore, R. L., & Ndiema, K. M., Experimental Study of Black Cotton Soil Stabilization with Natural Lime and Pozzolans in Pavement Subgrade Construction. *Coatings*, 12(1) (2022) 103.
- [15] James, J., Sugarcane press mud modification of expansive soil stabilized at optimum lime content: Strength, mineralogy and microstructural investigation. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2020.
- [16] Malla, R.B. and Joshi, S., Resilient modulus prediction models based on analysis of LTPP data for subgrade soils and experimental verification, *Journal of transportation engineering*, 133(9) 2007.
- [17] Ricardo A., Philip, S., Kealohi, K. and Standefur, G., Estimation of a resilient modulus model for cohesive soils using joint estimation and mixed effects, *Journal of transportation engineering*, 133(8) 2007.
- [18] Regulation of Asphalt Paving of Iranian Roads, Publication No. 234, Deputy Planning and Supervision. President's Strategy, Documents and Publications Center, First Revision, In Persian, 2013.
- [19] M.W. Witzcak, X. Qi, M.W. Mirza, Use of nonlinear
- [1] Aghaei Araei, A., Rahnani, I., Lashani Zand, F., Attarchian, N., Salamat, A., Hasani, H., Rezaei, M., Niaki, M., Study and presentation of technical specifications of soil modified with cement and lime, Research Project of Road, Housing and Urban Development Research Center, In Persian, 2020.
- [2] Kolay, P.K. Pant, A., Puri, V.K., Kumar, S., Effect of Liquid Polymer Stabilizer on geotechnical properties of fine-grained soil, *Indian Geotechnical Conference IGC2016*, 2016.
- [3] Bandara, N., Jensen, E. and Binoy, T.H. (2016) Performance evaluation of subgrade stabilization with recycled materials, mdt research project no. or14-009, mdt contract no. 0065, Department of Civil and Architectural Engineering Lawrence Technological University, 2013 February 29.
- [4] Elkady, T., Al-Mahbashia, A. and AL-Shamrani, M., Resilient modulus lime-treated expansive subgrade, King Abdulaziz City for Science and Technology, Kingdom of Saudi Arabia, Award Number (11-BUI-1901-02), 2013.
- [5] S. Jahandari, M. Saberian, Z. Tao, S.F. Mojtahedi, J. Li, M. Ghasemi, S.S. Rezvani, W. Li, Effects of saturation degrees, freezing-thawing, and curing on geotechnical properties of lime and lime-cement concretes, *Cold Regions Science and Technology*, 160 (2019) 242-251.
- [6] He, L., Wang, Z., & Gu, W. B, Evolution of freeze-thaw properties of cement-lime solidified contaminated soil. *Environmental Technology & Innovation*, 21 (2021), 101189.
- [7] Y. Lu, S. Liu, Y. Zhang, Z. Li, L. Xu, Freeze-thaw performance of a cement-treated expansive soil, *Cold Regions Science and Technology*, 170 (2020) 102926.
- [8] Solanki, P., Zaman, M. and Dean, J, Resilient modulus of clay subgrades stabilized with lime, class C fly ash and cement kiln dust for pavement design, *Journal of the transportation research board*, 2014.
- [9] Wang, S., Xue, Q., Ma, W., Zhao, K., & Wu, Z., Experimental study on mechanical properties of

- 268, Guidelines for Stabilization of Road Pavement Embankment Layers, Publications of the Organization of Management and Planning of the country, In Persian, 2013.
- [29] Ghorbani, A. and Hasanzadehshoili, H., Prediction of UCS and CBR of microsilica-lime stabilized sulfate silty sand using ANN and EPR models; application to the deep soil mixing, *Soils and Foundations*, 2018.
- [30] Aghaei Arai, A., Rahmani, A., Attarchian, N., Salamat, A.S., Hosni, H., Niaki, M., Rezaei, M., Investigating the effect of additive on soil amended with cement to Title of airport road and runway materials, research report, polymer-mineral Nicoflock. Client: Protective coating company (Pamco), consultant: Geotechnical and infrastructure department, In Persian, February 2019.
- [31] Tian, S., et al., Experimental and analytical investigation of the dynamic behavior of granular base course materials used for China's high-speed railways subjected to freeze-thaw cycles. *Cold Regions Science and Technology*, 157 (2019) 139-148.
- [32] Hanifa, K, Design values of resilient modulus of stabilized and non-stabilized base, Louisiana Transportation Research Center, 2015.
- [33] Rollins, K.M., Evans, M.D., Diehl, N.B., and Daily, W.D., Shear modulus and damping relationships for gravels. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 124(5) (1998) 398–405.
- [34] Seed, H. B., Wong, R.T., Idriss, I. M., and Tokimatsu, K., Moduli and damping factors for dynamic analyses of cohesion-less soils, *J. Geotech. Eng.*, 112(11) (1986) 1016-1032.
- [35] Idriss, I. M. "Response of soft soil sites during earthquakes", In Proceedings of the Symposium to Honor Professor H. B. Seed, Berkeley, May 1990, pp. 273-289.
- [36] Chummuneerat, S. and Jitsangiam, P. Permanent deformation behavior of a cement-modified base course material, *Procedia engineering*, 143 (2016) 42-50.
- subgrade modulus in AASHTO design procedure, *Journal of transportation engineering*, 121(3) (1995) 273-282.
- [20] W. Lee, N. Bohra, A. Altschaeffl, T. White, Resilient modulus of cohesive soils, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 123(2) (1997) 131-136.
- [21] X. Liu, X. Zhang, H. Wang, B. Jiang, Laboratory testing and analysis of dynamic and static resilient modulus of subgrade soil under various influencing factors, *Construction and Building Materials*, 195 (2019) 178-186.
- [22] Chen, C., & Zheng, J. L., Relationship between Dynamic Modulus and Static Detection Index in Red Sandstone Subgrade, In *Applied Mechanics and Materials*, Trans Tech Publications Ltd, Vol. 353, pp. 1112-1115, 2013.
- [23] Y. Su, Y.-J. Cui, J.-C. Dupla, J. Canou, Effect of water content on resilient modulus and damping ratio of fine/coarse soil mixtures with varying coarse grain contents, *Transportation Geotechnics*, 26 (2021) 100452.
- [24] Chen, W.-B., W.-Q. Feng, and J.-H. Yin, Effects of water content on resilient modulus of a granular material with high fines content. *Construction and Building Materials*, 236 (2020) 117542.
- [25] Boz, A., et al., Mechanical properties of lime-treated clay reinforced with different types of randomly distributed fibers. *Arabian Journal of Geosciences*, 11 (2018) 122.
- [26] Liu, H.B., Sun, S., Wei, H.B. and Li, W.J., Effect of freeze-thaw cycles on static properties of cement stabilised subgrade silty soil. *International Journal of Pavement Engineering*, 2021, pp.1-13.
- [27] Aghaei Araei, A., Rahmani, I., Lashani Zand, F., Attarchian, N, Salamat, A., Hasani, H., Rezaei, M., Niaki, M., Study and presentation of technical specifications of soil modified with cement and lime, research project of Road, Housing and Urban Development Research Center, In Persian, 2020.
- [28] Country Management and Planning Organization, Technical Affairs Deputy, Office for Compilation of Technical Standards and Criteria, Publication No.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

A. Aghaei Araei, M. Ghazavi, F. Lashani Zand, I. Rahmani, *Modulus of resilience under road and runway stresses for base soil modified with cement and lime*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 55(10) (2024) 2065-2090.

DOI: [10.22060/ceej.2023.21624.7802](https://doi.org/10.22060/ceej.2023.21624.7802)

