

## EXTENDED ABSTRACT

# Laboratory Study on the Effect of Adding Iron Powder with Cement on the Compressive Strength of Kaolinite Soil

Hamed Yousefi<sup>a</sup>, Seyed Morteza Marandi<sup>b</sup>, Salaheddin Hamidi<sup>c,\*</sup>

<sup>a</sup> PhD Student, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran

<sup>b</sup> Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran

<sup>c</sup> Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Kaboudarahang Faculty of Technology and Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

**Received:** 07 November 2025; **Reviewed:** 24 December 2025; **Accepted:** 07 January 2026

### Keywords:

Clay, Kaolinite, Soil stabilization, UCS, Iron powder.

## 1. Introduction

With the growth and development of cities, civil engineers are forced to design and build various structures on loose clay soils that cover a significant portion of the land surface. Therefore, to do so, these soils must be improved. Today, various methods and additives are used to improve and stabilize problematic soils, including clay soils. Accordingly, many researchers around the world have studied the stabilization of clay soils with various materials.

## 2. Methodology

This study examines the effect of adding different percentages of iron powder and cement to stabilize kaolinite soil as a new method. To conduct this study, kaolinite soil was mixed with iron powder and cement with percentages (0, 5, 10 and 20) individually and in combination, and then the prepared samples were subjected to uniaxial compressive strength tests. The parameters of kaolinite soil are presented in (Table 1) and the parameters of iron powder are presented in (Table 2).

**Table 1.** Physical properties of kaolinite Soil

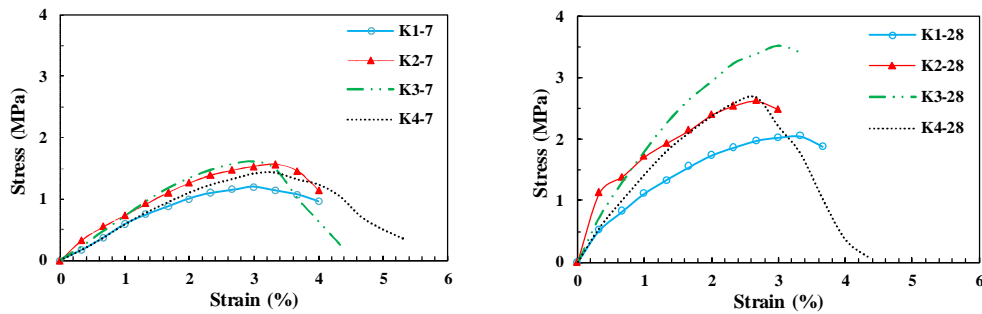
Properties	Data
XRD Analysis	Kaolinite, Quartz, Carbonate, Calcite
SSA (m <sup>2</sup> /g)	14.2
pH	8.79
Clay (%)	58
Silt (%)	38
Sand (%)	4
Liquid limit (%)	36
Plastic Limit (%)	20
Plasticity Index (%)	16
G <sub>s</sub>	2.75
Classification	CL

**Table 2.** Chemical parameters of iron powder

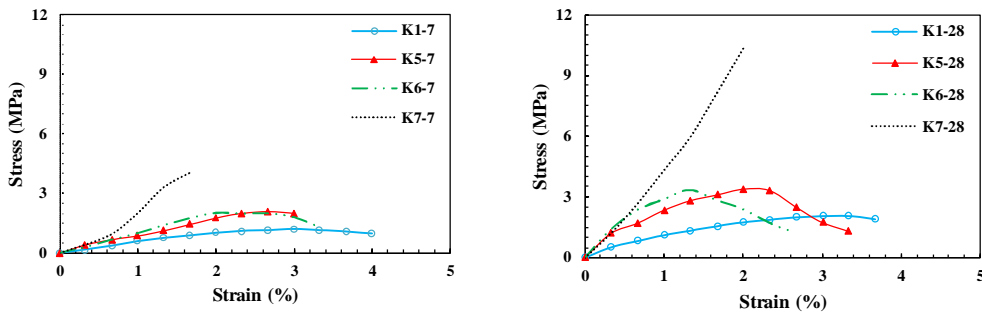
Elt	W (%)	A (%)
C	8.02	22.80
N	1.22	2.98
O	7.25	15.49
Mg	4.50	6.32
Al	2.23	2.82
Si	3.30	4.01
S	1.09	1.16
Ca	0.60	0.51
Fe	71.80	43.92

### 3. Results and discussion

Fig. 1 and 2 are the results of the uniaxial compressive strength test of samples prepared from a combination of kaolinite soil and cement with percentages of (0, 5, 10 and 20) and kaolinite soil and iron powder with percentages of (0, 5, 10 and 20). According to the figures, it can be seen that the uniaxial compressive strength of 28-day samples is much higher than that of 7-day samples. Also, the optimal percentage of iron powder and cement for stabilizing kaolinite soil is 10 and 5 percent of the dry weight of kaolinite soil, respectively.

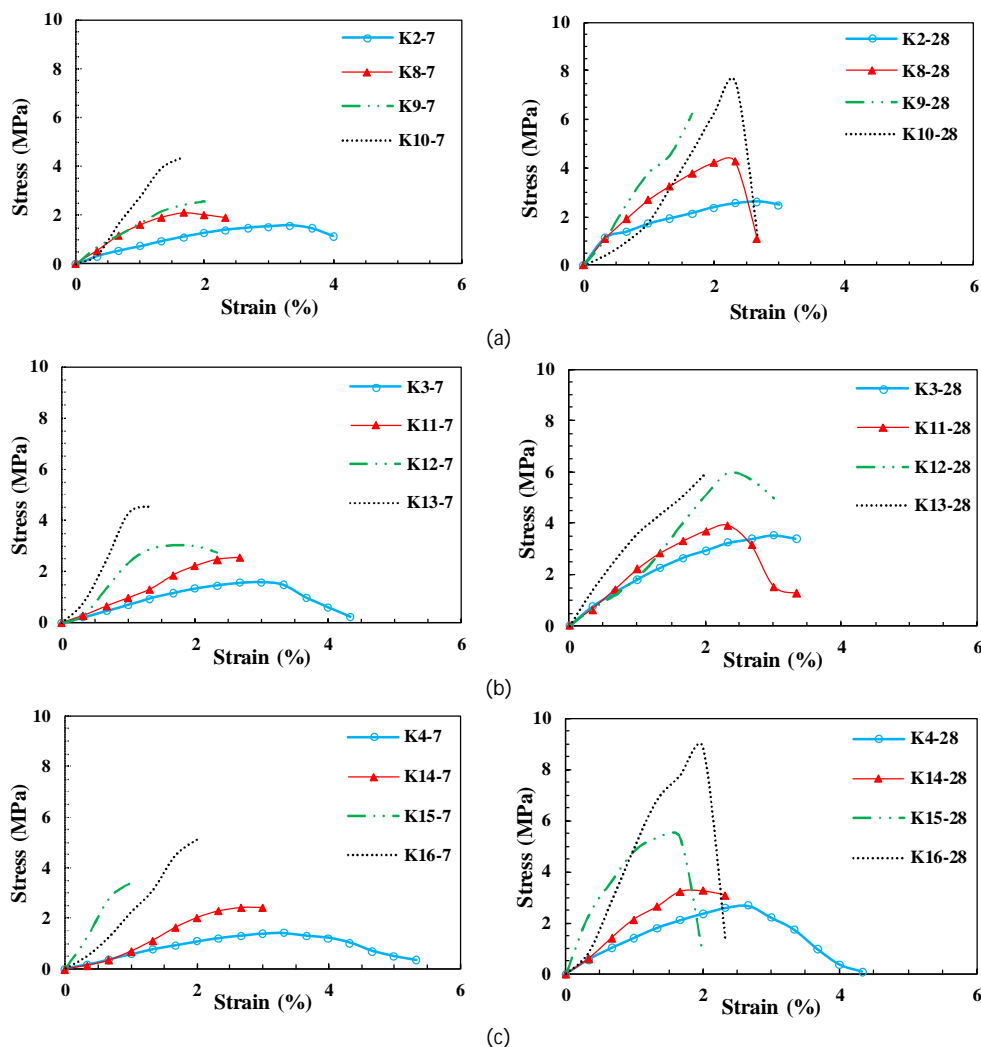


**Fig. 1.** Stress-strain diagram of 7 and 28 day samples of kaolinite stabilized with iron powder



**Fig. 2.** Stress-strain diagram of 7 and 28 day samples of kaolinite stabilized with cement

In Fig. 3, graphs a, b, and c, respectively, correspond to the results of uniaxial compressive strength tests of samples prepared from a combination of kaolinite soil, iron powder, and cement simultaneously. According to the graphs, it can be seen that as the curing time of the samples increases, the uniaxial compressive strength also increases. It was also observed that the axial strain decreases with increasing curing time of the samples.



**Fig. 3.** Stress-strain diagram of kaolinite soil stabilized with iron powder and cement: **a)** Stress-strain diagram of kaolinite soil stabilized with 5% iron powder and different percentages of cement, **b)** Stress-strain diagram of kaolinite soil stabilized with 10% iron powder and different percentages of cement, **c)** Stress-strain diagram of kaolinite soil stabilized with 20% iron powder and different percentages of cement

#### 4. Conclusions

The most important results of this study are:

1) According to the results obtained from uniaxial compressive strength tests and stress-strain diagrams obtained from the tests, the optimal amount of iron powder and cement for stabilizing kaolinite soil was determined to be 10 and 5% of the dry weight of kaolinite soil, respectively.

2) It was observed that in kaolinite soil samples stabilized only with iron powder at percentages (0, 5, 10 and 20), with increasing the curing time of the samples from 7 days to 28 days, the uniaxial compressive strength increased by an average of 86.50% and the strain corresponding to the maximum compressive strength decreased. Also, the maximum and minimum values of uniaxial compressive strength for 7-day samples were 1.6 and 1.43 MPa, respectively, and for 28-day samples were 3.54 and 2.68 MPa, respectively.

3) It was observed that in kaolinite soil samples stabilized only with cement at percentages of (0, 5, 10 and 20), with increasing the curing time of the samples from 7 days to 28 days, the uniaxial compressive strength increased by an average of 94% and the strain corresponding to the highest value of compressive strength increased in samples (K5-28) and (K7-28) compared to samples (K5-7) and (K7-7) and decreased in sample (K6-28) compared to sample (K6-7). Due to the presence of the maximum amount of cement in samples (K7-28) and (K7-7), these samples showed linear behavior and became brittle and brittle. Also, the highest and lowest uniaxial compressive strength values for 7-day samples are 4.05 and 2.06 MPa, respectively, and for 28-day samples are 10.33 and 3.31 MPa, respectively.

## **5. Acknowledgments**

In this section, I would like to thank Mr. Hassan Rabbani Arshad, the respected manager of the Soil Mechanics and Technical Laboratory Company of East Azerbaijan Province in Tabriz, for providing the laboratory environment for this study. I also want to thank Mr. Fardin Asadollahi, a senior expert in the geotechnical department of this unique complex, for guiding me in the laboratory environment. I wish continued success for this vital complex.

## مطالعه آزمایشگاهی تأثیر افزودن پودر آهن به همراه سیمان بر مقاومت فشاری خاک کائولینیت

حامد یوسفی<sup>1</sup>، سیدمرتضی مرندی<sup>2</sup>، صلاح‌الدین حمیدی<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup> دانشجوی دکتری عمران، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید باهنر، کرمان  
<sup>2</sup> استاد گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید باهنر، کرمان  
<sup>3</sup> استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی کبودرآهنگ، دانشگاه بوعلی سینا، همدان

دریافت: 1404/8/16، بازنگری: 1404/10/3، پذیرش: 1404/10/17، نشر آنلاین: 1404/10/17

### چکیده

خاک‌های رسی به‌طور وسیع در سطح کره زمین یافت می‌شود. با توجه به افزایش جمعیت، نیاز به احداث سازه‌های متنوع بر روی این نوع خاک‌ها اجتناب‌ناپذیر است. جهت احداث چنین سازه‌هایی بر روی خاک‌های رسی، عموماً این نوع خاک‌ها می‌بایست بهسازی شوند. مطالعات زیادی در رابطه با تأثیر افزودنی‌های مختلف جهت تثبیت خاک‌های رسی انجام شده ولی نقش پودر آهن (Pfe) همچنان ناشناخته مانده است. در مطالعه حاضر خاک رس کائولینیت جهت تثبیت با افزودنی‌های پودر آهن و سیمان با درصدهای مختلف (0، 5، 10 و 20) و دوره‌های عمل‌آوری 7 و 28 روزه، مورد مطالعه قرار گرفت. آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری بر روی نمونه‌ها انجام شد. مقدار بهینه پودر آهن و سیمان به‌ترتیب 10 و 5 درصد وزنی خشک خاک تعیین شد. مقاومت فشاری خاک عمل‌آوری شده با مقادیر بهینه پودر آهن و سیمان نسبت به خاک تمیز برای نمونه‌های 7 روزه به‌ترتیب 34 و 72 درصد و برای نمونه‌های 28 روزه به‌ترتیب 72 و 65 درصد افزایش داشت. همچنین عملکرد ریزساختاری و واکنش‌های شیمیایی مناسب پودر آهن و کانی‌های رسی و سیمان نسبت به خاک تمیز، در نمونه‌های 28 روزه باعث افزایش مقاومت تا 331 درصد شد.

**کلیدواژه‌ها:** خاک رس، کائولینیت، تثبیت خاک، مقاومت فشاری تک‌محوری، پودر آهن.

### 1- مقدمه

Tajaddini و همکاران (2023) برای بهسازی رفتار مکانیکی خاک رس، آن را با سرباره مس و پودر شیشه بازیافتی ترکیب کرده و از هیدروکسید سدیم به‌عنوان فعال‌کننده سرباره مس و پودر شیشه ضایعاتی استفاده کردند و نمونه‌های به‌دست آمده را تحت شرایط خشک و رطوبت بهینه با آزمایش‌های مقاومت فشاری نامحدود و نسبت باربری کالیفرنیا مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج به‌دست آمده حاکی از آن است که سرباره مس بیشتر از پودر شیشه بازیافتی بر حدود اتربرگ و پارامترهای تراکم تأثیرگذار است.

Thomas و همکاران (2018) به بررسی تأثیر افزودن سرباره کوره بلند دانه‌بندی شده با مقادیر (6، 9، 12، 15 و 20 درصد) به‌همراه فعال‌کننده قلیایی و سیمان پرتلند معمولی با مقادیر (3، 6، 9، 12 و 15 درصد) به خاک رس پرداختند. نتایج آزمایش‌های

با رشد و توسعه شهرها و مناطق صنعتی، مهندسین عمران ناگزیر به طراحی و ساخت سازه‌های مختلف بر روی خاک‌های رسی سست می‌باشند. در همین راستا، خاک‌های مذکور باید بهسازی شود. امروزه جهت بهسازی و تثبیت خاک‌های مسأله‌دار از جمله خاک‌های رسی، از روش‌ها و مواد افزودنی مختلف استفاده می‌شود. با توجه به نوع پروژه و هدف از انجام آن، مشخصه‌ها و ویژگی‌های ژئوتکنیکی که باید بهینه شوند تشخیص داده شده و بر اساس آن نوع تثبیت مشخص می‌گردد (Bell و Kirsch، 2012؛ James و همکاران، 2018؛ Valipour و همکاران، 2021؛ Dehghan و Dabiri، 2021؛ Tavakoli و همکاران، 2022؛ Dibamehr و همکاران، 2024).



نانومگنتیت در مخلوط‌های جداگانه عملکرد بهتری نسبت به زئولیت داشت و در ترکیب با زئولیت اثر هم‌افزایی نشان داد.

Rajabi و همکاران (2021) به مطالعه تأثیر افزودن نانواکسید آهن به مقدار (0/5، 1، 2، 3، 4 و 5 درصد) به خاک رس پرداختند و سپس آزمایش‌های برش مستقیم، مقاومت فشاری تک‌محوری و تحکیم را بر روی نمونه‌ها انجام دادند. براساس نتایج به‌دست آمده مشاهده شد که افزودن مواد نانواکسید آهن تا 2 درصد می‌تواند باعث افزایش پارامترهای مقاومتی و کاهش تورم‌پذیری خاک رس شود. همچنین نانوذرات و اکسیدهای آهن در تثبیت و رفع آلودگی خاک‌های آلوده (Shariatmadari و همکاران، 2015؛ Nasehi و همکاران، 2015؛ Kazemzadeh و همکاران، 2024) و آب‌های آلوده (rahmani و همکاران، 2021) کاربرد فراوان دارد و بیشتر مطالعات انجام شده در مورد افزودنی آهن در شکل‌های مختلف یاف، پودر، نانوذرات و اکسیدها در رابطه با تأثیر آن بر بتن است (Saini، 2024؛ Abdulhasan و Chkheiwir، 2025).

Meimaroglou و Mouzakis (2025) سه نوع خاک رس شامل کائولینیت، بنتونیت و خاک طبیعی را با افزودن اکسید آهن، پودر آهن و پودر سنگ آهک مورد مطالعه قرار دادند. ترکیب به‌کار رفته در نمونه رسی کائولینیت حاوی 18/2 درصد کائولینیت، 72/7 ماسه سیلتی و 9/1 درصد پودر آهن در نمونه اول و در نمونه دوم 9/1 درصد اکسید آهن بوده است. به‌عبارت دیگر خاک مورد مطالعه در مطالعات مذکور خاک ماسه سیلتی (SC) بوده است. نتایج مطالعات انجام شده بیانگر آن است که افزودن پودر آهن و اکسیدهای آهن تأثیر قابل‌توجهی بر مقاومت فشاری نداشت.

Yan و همکاران (2025) به مطالعه تأثیر افزودن سه شکل مختلف اکسید آهن (هماتیت: HT، گوتیت: GT و اکسید آهن آمورف: AIO) بر خاک کائولینیت پرداختند. در مطالعات مذکور 990 گرم خاک کائولینیت با 10 گرم انواع اکسید آهن مخلوط شد (یک درصد وزنی). نتایج به‌دست آمده نشان داد که:

- (1) با افزودن شکل‌های مختلف اکسید آهن به کائولینیت، ویژگی‌های ریزساختاری خاک به‌مراتب بهبود یافته بود.
- (2) تأثیر انواع مختلف اکسید آهن بر چسبندگی خاک بیشتر از تأثیر آن بر زاویه اصطکاک داخلی بود و افزایش غلظت اکسید آهن عمدتاً منجر به افزایش چسبندگی خاک شد.
- (3) مقاومت برشی خاک کائولینیت با افزودن گوتیت در غلظت‌های مختلف افزایش و با افزودن اکسید آهن آمورف در غلظت‌های بالا باعث بهبود آن و افزودن هماتیت تأثیر محدودی بر بهبود آن داشت.

مجموعه مطالعات انجام شده بیانگر آن است که مطالعات زیادی در خصوص تثبیت خاک‌های رسی با روش‌های مختلف انجام شده است. لیکن، تاکنون مطالعات جامعی در خصوص تأثیر افزودن پودر آهن با حضور سیمان جهت تثبیت خاک‌رس

انجام شده، نشان داد که چسبندگی و تخلخل خاک تثبیت شده به‌صورت چشم‌گیری به‌ترتیب افزایش و کاهش یافت، اما زاویه اصطکاک داخلی تغییر چندانی از خود نشان نداد. همچنین پارامترهای مقاومتی، خاک رس تثبیت شده با 20 درصد سرباره کوره بلند دانه‌بندی شده نسبت به خاک رس تثبیت شده با 12 درصد سیمان پرتلند معمولی، افزایش قابل توجهی پیدا کرد.

Hoseinzadeh و همکاران (2021) به بررسی تثبیت خاک ریزدانه منطقه اروند خرمشهر با آهک و سرباره کوره فولادسازی پرداختند. بدین‌منظور درصد‌های مختلفی از سرباره و آهک را با نمونه خاک ترکیب کرده و پس از عمل‌آوری، آزمایش‌های تعیین حدود اتربرگ، تراکم، مقاومت فشاری تک‌محوری و CBR اشباع و غیراشباع را انجام دادند. نتایج به‌دست آمده حاکی از آن است که شاخص خمیری خاک کاهش یافته و مقاومت فشاری و مقدار CBR افزایش می‌یابد. همچنین براساس نتایج به‌دست آمده تأثیر آهک بر خاک رس نسبت به سرباره بیشتر می‌باشد و سرباره در مقادیر کمتر از 35 درصد تأثیر چشم‌گیری در مقاومت فشاری خاک رس ندارد.

Ghanizadeh و همکاران (2020) به بررسی تثبیت خاک رس با مقادیر مختلفی از آهک هیدراته (صفر، 2، 4 و 6 درصد) و باطله سنگ آهن (صفر، 10، 20 و 30 درصد) پرداختند. نتایج مطالعات انجام شده نشان داد که با فرض ثابت بودن درصد باطله سنگ آهن، افزایش مقدار آهک تا 4 درصد باعث افزایش مقاومت فشاری و مدول یانگ نمونه‌ها گردیده و پس از آن باعث کاهش پارامترهای ذکر شده می‌شود. همچنین نتایج حاصل از مطالعات انجام شده در رابطه با تثبیت خاک‌های رسی با استفاده از آهک، حاکی از آن است که افزودن آهک باعث بهبود پارامترهای خاک رس از جمله مقاومت فشاری، سی بی آر و مدول یانگ می‌شود (Chemeda و همکاران، 2015؛ Dhar و Hussain، 2021).

Cai و همکاران (2025) به مطالعه تأثیر افزودن خاکستر پوسته برنج، سرباره فولاد و پودر باطله آهن به‌میزان صفر تا 8 درصد و سیمان به‌میزان (4، 5 و 6) درصد، بر یک نوع خاک نرم حاصل از محل خاک‌برداری یک ساختمان پرداختند. نتایج به‌دست آمده نشان داد، سیمان با مقدار 5 و 6 درصد باعث افزایش مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی سرباره فولاد تا 40 درصد و نمونه‌های حاوی پودر باطله آهن تا 60 درصد شد. همچنین سرباره فولاد و پودر باطله آهن باعث کاهش منافذ نمونه‌ها شد.

Eshghi و همکاران (2024) به بررسی تأثیر زئولیت و نانومگنتیت بر رفتار خاک رس پرداختند. جهت تهیه نمونه‌ها از (0، 5، 10، 15 و 20) درصد وزنی زئولیت و (0/5، 1، 1/5 و 2) درصد وزنی نانومگنتیت استفاده شد. نتایج به‌دست آمده نشان داد در نمونه خاک رس حاوی 5 درصد زئولیت و 1 درصد نانومگنتیت، مقاومت فشاری تک‌محوری افزایش قابل توجهی دارد و همچنین

کارخانه سیمان صوفیان در استان آذربایجان شرقی می‌باشد. در شکل (1-ج) تصویر و در جدول (3) مشخصات فنی آن ارائه شده است.

جدول 2- آنالیز شیمیایی پودر آهن

Elit	W (%)	A (%)
C	8/02	22/80
N	1/22	2/98
O	7/25	15/49
Mg	4/50	6/32
Al	2/23	2/82
Si	3/30	4/01
S	1/09	1/16
Ca	0/60	0/51
Fe	71/80	43/92

جدول 3- پارامترهای شیمیایی سیمان مصرفی

وزن (%)	پارامترها
21/70 ± 0/335	اکسید سیلیسیم
5/22 ± 0/364	اکسید آلومینیوم
3/74 ± 0/329	اکسید فربک
64/44 ± 0/532	اکسید کلسیم
2/22 ± 0/125	اکسید منیزیم
2/00 ± 0/038	سولفیت
0/22 ± 0/025	اکسید سدیم
0/58 ± 0/038	اکسید پتاسیم
0/010 ± 0/001	یون کلرید
1/35 ± 0/143	آهک آزاد
1/36 ± 0/397	افت در اثر احتراق
0/62 ± 0/118	باقی‌مانده نامحلول



(ب)

(الف)



(ج)

شکل 1- تصاویر مواد مورد استفاده در این مطالعه:  
الف) کائولینیت، ب) پودر آهن، ج) سیمان

کائولینیت انجام نشده است. از این رو در مطالعه آزمایشگاهی حاضر، خاک رس کائولینیت (Kaol) با مقادیر مختلف (صفر، 5، 10 و 20 درصد) از پودر آهن (PFe) و سیمان (Cem) ترکیب شده و نمونه‌های تهیه شده در بازه‌های زمانی 7 و 28 روزه عمل‌آوری شد و سپس جهت بررسی رفتار خاک رس کائولینیتی تثبیت شده با پودر آهن و سیمان، آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری بر نمونه‌های تهیه شده انجام شد.

## 2- مواد و روش‌ها

### 2-1- خاک رسی مورد مطالعه

خاک رسی مورد استفاده در این مطالعه کائولینیت می‌باشد که به صورت پودر با رنگ سفید مایل به زرد است و از شرکت صنایع خاک چینی ایران در منطقه نوز استان آذربایجان شرقی تهیه شد. در شکل (1-الف) تصویر خاک و در جدول (1) مشخصات ژئوتکنیکی آن ارائه شده است. دلیل استفاده از خاک رسی کائولینیت در پژوهش حاضر آن است که یکی از کانی‌های اصلی اغلب خاک‌های رسی طبیعی موجود در سطح زمین، کانی کائولینیت است و در نمونه‌ی رسی مورد استفاده در پژوهش حاضر نیز کانی رسی اصلی موجود در نمونه مورد مطالعه، کانی کائولینیت است.

جدول 1- ویژگی‌های ژئوتکنیکی نمونه خاک رس کائولینیت

پارامترها	مقدار/مشخصات
آنالیز XRD	کائولینیت، کوآرتز، کربنات، کلسیت
سطح ویژه (مترمربع بر گرم)	14/2
pH	8/79
رس (%)	58
سیلت (%)	38
ماسه (%)	4
حد روانی (%)	36
حد خمیری (%)	20
شاخص خمیری (%)	16
چگالی ویژه	2/75
طبقه‌بندی (روش متحد)	CL

### 2-2- پودر آهن و سیمان مورد استفاده

پودر آهن مورد استفاده از کارخانه توسعه آهن و فولاد گل‌گوهر شهرستان سیرجان در استان کرمان تهیه شده است که یک پودر با رنگ سیاه می‌باشد و در شکل (1-ب) تصویر آن ارائه شده است. با توجه به آنالیز EDS انجام شده بر روی نمونه پودر آهن، پارامترهای تشکیل‌دهنده آن برحسب درصد وزنی (%W) و درصد مولی (%A) در جدول (2) ارائه شده است. سیمان مورد استفاده در این مطالعه، سیمان پرتلند تیپ 2 است که محصول

### 2-3- برنامه آزمایشگاهی و نحوه آماده‌سازی نمونه‌ها

هدف از انجام این مطالعه تثبیت خاک رس کائولینیت با افزودن پودر آهن و سیمان با درصدهای مختلف (صفر، 5، 10 و 20) است. علی‌رغم آن‌که در کارهای اجرایی عموماً بیشتر از 10 درصد سیمان استفاده نمی‌شود، اما در راستای بررسی کامل روند تغییرات پارامترهای ژئوتکنیکی خاک تثبیت شده به‌ازای درصدهای مختلف سیمان و تکمیل نمودار تغییرات آن، درصدهای بیشتر سیمان (20%) نیز مورد مطالعه قرار گرفت. آزمایش‌های دانه‌بندی، حدود اتربرگ و مقاومت فشاری تک‌محوری انجام شد. روش ساخت نمونه‌ها دانسیته - کنترل است. و در جدول (4) الگوی ساخت نمونه‌ها برای نمونه‌های 7 و 28 روزه ارائه شده است. تمامی نسبت‌های ارائه شده در جدول (4) بر اساس درصد وزنی خشک مصالح می‌باشد. براساس روش دانسیته - کنترل، دانسیته خشک و درصد رطوبت در تمامی نمونه‌ها به‌ترتیب 1/75 گرم بر سانتی‌متر مکعب و 20 درصد، یکسان در نظر گرفته شد تا پارامترها و متغیرهای مهم دانسیته و درصد رطوبت موجب تغییر در نتایج آزمایش‌ها نگردد و صرفاً تأثیر افزودنی‌های مورد استفاده بررسی گردد (Hamidi و Marandi، 2018).

به‌صورتی که رطوبت نقاط مختلف نمونه یکسان شده و نمونه همگن گردد (Mohammadzadeh و همکاران، 2023). سپس مخلوط به‌دست آمده از لحاظ وزنی به 3 قسمت مساوی تقسیم و در 3 مرحله در قالب آزمون تک‌محوری به ارتفاع 7/62 و قطر 3/81 سانتی‌متر براساس استاندارد (ASTM, D2166) متراکم شد (ASTM، 2016).

جهت انجام هر آزمایش، 3 نمونه مشابه ساخته شد. همچنین تمامی نمونه‌های تهیه شده، ابتدا به‌صورت تکی در داخل نایلون‌های زیپ‌کیپ گذاشته شد (شکل (2))، و سپس هر 3 نمونه مشابه در داخل نایلون دوم گذاشته شد تا رطوبت نمونه‌ها ثابت بماند و به‌مدت 7 و 28 روز در دمای اتاق نگهداری و عمل‌آوری شدند (Hosseinpour Babaei و همکاران، 2023).



شکل 2- تصویر نمونه‌ها در داخل نایلون‌های زیپ‌کیپ

### جدول 4- الگوی تهیه نمونه‌های آزمایشگاهی 7 و 28 روزه

کد نمونه	کد نمونه	ترکیبات نمونه 28 روزه
K1-7	K1-28	Kaol
K2-7	K2-28	Kaol + 5% PFe
K3-7	K3-28	Kaol + 10% PFe
K4-7	K4-28	Kaol + 20% PFe
K5-7	K5-28	Kaol + 5% Cem
K6-7	K6-28	Kaol + 10% Cem
K7-7	K7-28	Kaol + 20% Cem
K8-7	K8-28	Kaol + 5% PFe + 5% Cem
K9-7	K9-28	Kaol + 5% PFe + 10% Cem
K10-7	K10-28	Kaol + 5% PFe + 20% Cem
K11-7	K11-28	Kaol + 10% PFe + 5% Cem
K12-7	K12-28	Kaol + 10% PFe + 10% Cem
K13-7	K13-28	Kaol + 10% PFe + 20% Cem
K14-7	K14-28	Kaol + 20% PFe + 5% Cem
K15-7	K15-28	Kaol + 20% PFe + 10% Cem
K16-7	K16-28	Kaol + 20% PFe + 20% Cem

### 2-4- آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری

پس از عمل‌آوری نمونه‌ها به مدت 7 و 28 روز، نمونه‌ها مورد آزمایش قرار گرفت. برای انجام آزمایش‌ها از دستگاه مقاومت فشاری تک‌محوری شرکت آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک استان آذربایجان شرقی در شهر تبریز استفاده شد. در شکل (3) تصاویری از نمونه‌های شکسته شده ارائه شده است.



شکل 3- تصاویر نمونه‌های شکسته شده

جهت آماده‌سازی نمونه‌ها، نمونه‌های خاک کائولینیت به‌صورت خشک، به‌ترتیب فقط با درصدهای مختلفی از پودر آهن و سپس با درصدهای مختلفی از سیمان و در نهایت به‌طور هم‌زمان با درصدهای مختلفی از پودر آهن و سیمان حداقل به‌مدت دو دقیقه با هم مخلوط شدند و این کار تا زمانی که مخلوط، ظاهری یکنواخت و همگن پیدا کند ادامه داده شد. در مرحله بعدی رطوبت مورد نظر به ترکیب اضافه و حداقل به‌مدت 10 دقیقه ورز داده شد

### 3- تجزیه و تحلیل نتایج

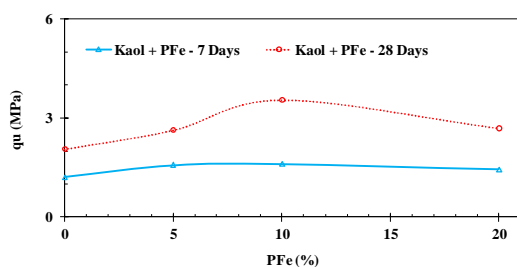
در این بخش از مطالعه، به آنالیز نتایج به دست آمده از آزمایش‌های مقاومت فشاری تک‌محوری انجام شده بر روی نمونه‌های تهیه شده پرداخته شده است.

### 3-1- تحلیل نتایج نمونه رسی کائولینیت تثبیت شده با درصد‌های مختلف پودر آهن

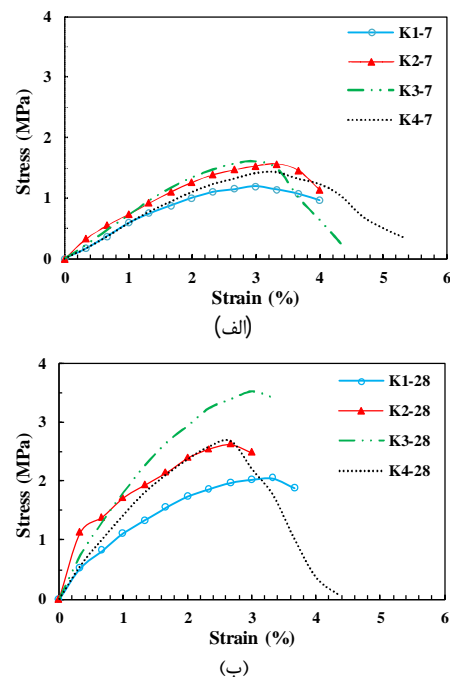
در شکل (4) نمودارهای تنش- کرنش نمونه‌های خاک رس کائولینیت تثبیت شده با پودر آهن با درصد‌های (صفر، 5، 10 و 20) نشان داده شده است. شکل‌های (4-الف) نمودار نمونه‌های 7 روزه و (4-ب) مربوط به نمودار نمونه‌های 28 روزه می‌باشد. با توجه به نمودارهای تنش- کرنش ارائه شده، با افزایش مقدار پودر آهن در نمونه‌های 7 و 28 روزه خصوصیات مقاومتی و شکل‌پذیری نمونه‌ها دچار تغییراتی شده است. به این صورت که مقاومت نمونه‌های 28 روزه نسبت به نمونه‌های 7 روزه افزایش زیادی دارد و شکل‌پذیری نمونه‌های 7 روزه نسبت به نمونه‌های 28 روزه بیشتر می‌باشد.

نمونه‌های (K2-28)، (K3-28) و (K4-28) نسبت به (K1-28) به ترتیب 28، 72 و 31 درصد افزایش یافته است. با توجه به نتایج به دست آمده از آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری برای نمونه‌های 7 و 28 روزه، مشاهده شد که استفاده از پودر آهن تا 10 درصد وزن خشک خاک کائولینیت، باعث افزایش و استفاده بیش‌تر از 10 درصد باعث کاهش مقاومت فشاری تک‌محوری می‌شود. دلیل این کاهش مقاومت، افزایش مقدار ذرات پودر آهن در بین ذرات خاک کائولینیت می‌باشد. به طوری که ذرات پودر آهن بین ذرات خاک کائولینیت نفوذ کرده و مانع از پیوستگی و چسبندگی بین ذرات خاک می‌شوند. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که مقدار بهینه پودر آهن مورد استفاده جهت تثبیت خاک کائولینیت، برابر با 10 درصد وزنی خشک خاک کائولینیت است. این موضوع با مطالعه (Rajabi و همکاران، 2021) که به بررسی تأثیر افزودن نانو اکسید آهن با درصد‌های مختلف به خاک رس پرداخته بودند مطابقت دارد. به این شکل که با افزایش درصد افزودنی نانو اکسید آهن به بیش از درصد بهینه (2%)، ذرات نانو اکسید آهن به‌عنوان مازاد در بین ذرات خاک قرار گرفته و باعث کاهش مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌ها شد.

مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌های 28 روزه (K1-28)، (K2-28)، (K3-28) و (K4-28) نسبت به نمونه‌های 7 روزه (K1-7)، (K2-7)، (K3-7) و (K4-7) به ترتیب 68، 71، 120 و 87 درصد افزایش یافته است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد با افزایش مدت زمان عمل‌آوری نمونه‌ها از 7 به 28 روز، مقاومت فشاری تک‌محوری به طور متوسط 86/5 درصد افزایش یافته است. در نمودار شکل (5)، محور قائم بیشترین مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌های 7 و 28 روزه تثبیت شده با پودر آهن و محور افقی مقدار درصد پودر آهن استفاده شده در نمونه‌ها را نشان می‌دهد. با توجه به نمودار مشاهده می‌شود که با افزایش مقدار درصد پودر آهن ترکیبی در نمونه‌ها تا مقدار بهینه یعنی تا 10 درصد، مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌ها افزایش و با رد شدن از مقدار بهینه پودر آهن مقاومت فشاری تک‌محوری کاهش می‌یابد. همچنین مشاهده شد با افزایش مدت زمان عمل‌آوری نمونه‌ها، مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌ها نیز افزایش می‌یابد.



شکل 5- نمودار تغییرات مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌های 7 و 28 روزه با درصد‌های مختلف پودر آهن

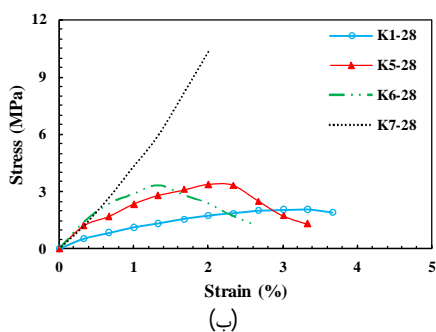
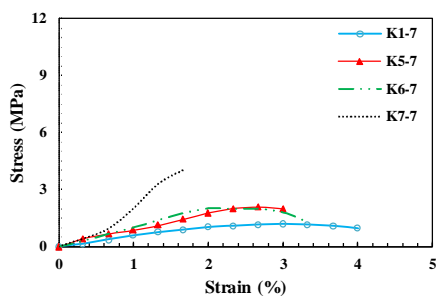


شکل 4- نمودار تنش کرنش نمونه‌های 7 و 28 روزه کائولینیت تثبیت شده با پودر آهن: الف) نمودار تنش کرنش نمونه‌های 7 روزه، ب) نمودار تنش کرنش نمونه‌های 28 روزه

در نمونه‌های 7 روزه مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌های (K2-7)، (K3-7) و (K4-7) نسبت به (K1-7) به ترتیب 31، 34 و 20 درصد و در نمونه‌های 28 روزه نیز مقاومت فشاری تک‌محوری

داشت که این موضوع با تحقیقات انجام شده توسط (Zahedi و Ghaffarpour Jahromi، 2018، Keramati و همکاران، 2022) مطابقت دارد.

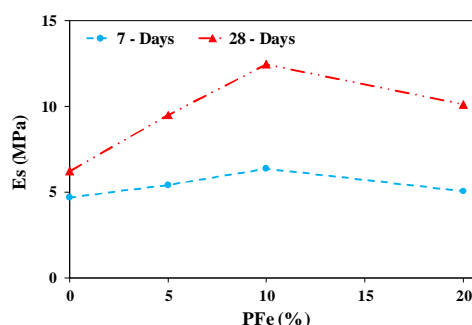
براساس نمودار شکل (7-الف) و (7-ب)، مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌های 7 روزه (K5-7)، (K6-7) و (K7-7) نسبت به (K1-7) به ترتیب 72، 69 و 238 درصد و مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌های 28 روزه (K5-28)، (K6-28) و (K7-28) نسبت به (K1-28) به ترتیب 65، 61 و 403 درصد افزایش یافته است. همچنین مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌های 28 روزه (K5-28)، (K6-28) و (K7-28) نسبت به نمونه‌های 7 روزه (K5-7)، (K6-7) و (K7-7) به ترتیب 64، 63 و 155 درصد افزایش یافته است. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد با افزایش مدت زمان عمل‌آوری نمونه‌ها از 7 به 28 روز، مقاومت فشاری تک‌محوری به‌طور متوسط 94 درصد افزایش یافته است.



شکل 7- نمودار تنش کرنش نمونه‌های 7 و 28 روزه کائولینیت تثبیت شده با سیمان: الف) نمودار تنش کرنش نمونه‌های 7 روزه، ب) نمودار تنش کرنش نمونه‌های 28 روزه

با بررسی و مقایسه نمودارهای ارائه شده در شکل (7-الف) و (7-ب)، نتیجه می‌گیریم که مقدار بهینه سیمان برای استفاده در تثبیت خاک رس کائولینیت 5 درصد می‌باشد. زیرا براساس نمودارهای تنش-کرنش شکل (7) با افزایش میزان سیمان به 10 درصد برای عمل تثبیت، نه تنها مقاومت فشاری تک‌محوری افزایش نیافت، بلکه دچار افت مقاومت نیز شد و کرنش نمونه‌ها نیز کاهش یافت و با افزایش مقدار سیمان به 20 درصد، نمودار

شکل (6) مربوط به نمودار مدول الاستیسیته-درصد پودر آهن استفاده شده، در نمونه‌های 7 و 28 روزه جهت تثبیت خاک کائولینیت می‌باشد. مدول الاستیسیته، شیب قسمت خطی نمودار تنش-کرنش در ناحیه الاستیک می‌باشد (Abbasi و Golchinfar، 2014). طبق نمودار ارائه شده در شکل (6) مشاهده می‌شود که با افزایش درصد پودر آهن جهت تثبیت، مدول الاستیسیته نیز تا مقدار بهینه پودر آهن استفاده شده، افزایش و سپس کاهش می‌یابد.

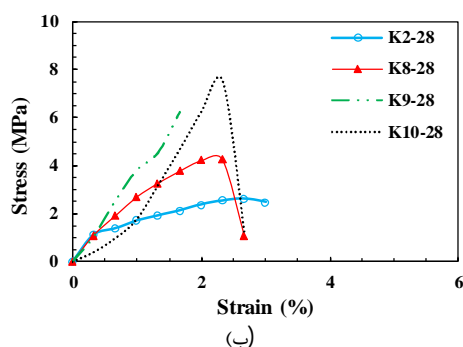
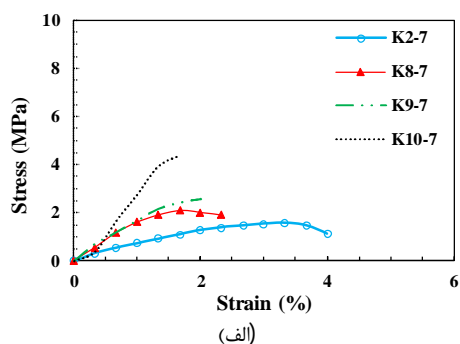


شکل 6- نمودار مدول الاستیسیته-درصد پودر آهن مصرفی جهت تثبیت خاک کائولینیت

### 3-2- تحلیل نتایج نمونه رسی کائولینیت تثبیت شده با درصدهای مختلف سیمان

در شکل (7) نمودارهای تنش-کرنش نمونه‌های خاک رس کائولینیت تثبیت شده با سیمان با درصدهای (صفر، 5، 10 و 20) نشان داده شده است. که شکل (7-الف) نمودار نمونه‌های 7 روزه و شکل (7-ب) نمودار نمونه‌های 28 روزه می‌باشد. با توجه به نمودارهای تنش-کرنش ارائه شده، با افزایش مقدار سیمان و مدت‌زمان عمل‌آوری نمونه‌ها، مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌ها افزایش یافته است. که این مسئله مطابق با تحقیقات پیشین می‌باشد (Hamidi و Marandi، 2018، Yao و همکاران، 2020). دلیل اصلی این افزایش مقاومت واکنش شیمیایی سیمان و آب است که در اثر این واکنش‌ها کلسیم هیدروکسید و کلسیم سیلیکات هیدرات (C-S-H) و همچنین کلسیم آلومینات هیدرات (C-A-H) تولید می‌شود. ژل‌های (C-S-H) و (C-A-H) باعث پر شدن فضای بین ذرات خاک و همچنین احاطه ذرات خاک می‌شوند، که این عمل در نهایت منجر به افزایش مقاومت خاک کائولینیت می‌شود (Herzog و Mitchell، 1963، Croft، 1967). بر اساس نمودارهای ارائه شده در شکل (7) مشاهده می‌شود که پارامترهای مقاومتی نمونه‌هایی که به مدت 28 روز عمل‌آوری شده‌اند نسبت به نمونه‌هایی که 7 روز عمل‌آوری شده‌اند، بهبود یافته و افزایش چشمگیری دارند، به عبارت دیگر افزایش مدت زمان عمل‌آوری نمونه‌ها تأثیر مثبت در بهبود پارامترهای مقاومتی

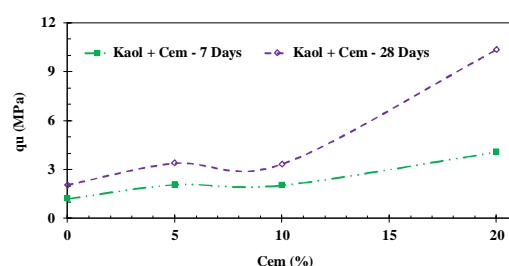
و 178 درصد و مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌های 28 روزه (K8-28)، (K9-28) و (K10-28) نسبت به (K2-28) به ترتیب 63، 137 و 186 درصد افزایش یافته است. همچنین مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌های 28 روزه (K2-28)، (K8-28) و (K9-28) و (K10-28) نسبت به نمونه‌های 7 روزه (K8-7)، (K9-7) و (K10-7) و به ترتیب 68، 104، 141 و 73 درصد افزایش یافته است.



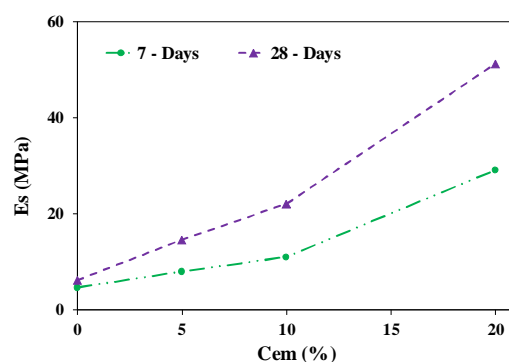
شکل 10- نمودار تنش کرنش کائولینیت تثبیت شده با 5 درصد پودر آهن و (0، 5، 10 و 20) درصد سیمان: الف) نمودار تنش کرنش نمونه‌های 7 روزه، ب) نمودار تنش کرنش نمونه‌های 28 روزه

بر اساس نتایج به دست آمده، با افزایش درصد سیمان استفاده شده در نمونه‌های حاوی 5 درصد پودر آهن، به طور متوسط مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌های 7 و 28 روزه به ترتیب 92/33 و 128/67 درصد و متوسط مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌های 28 روزه نسبت به 7 روزه، 96/5 درصد افزایش یافته است. نتایج به دست آمده بیانگر آن می‌باشد که با افزایش مدت زمان عمل‌آوری نمونه‌ها، مقاومت فشاری تک‌محوری افزایش می‌یابد. و همچنین با توجه به نمودارهای شکل (10) مشاهده شد که با افزایش مقدار سیمان و همچنین مدت زمان عمل‌آوری، رفتار نمونه‌ها از حالت منحنی به حالت خطی تبدیل شده و به این ترتیب رفتار ترد و شکست ناگهانی از خود نشان دادند.

نمونه‌ها از حالت منحنی خارج شده و شکل خطی به خود گرفتند. در این حالت مقاومت فشاری تک‌محوری افزایش چشمگیری پیدا کرد لیکن، منجر به شکست نمونه‌ها به صورت ناگهانی و ترد شد. در نمودارهای شکل‌های (8) و (9)، محور قائم به ترتیب بیشترین مقدار مقاومت فشاری تک‌محوری و مدول الاستیسیته نمونه‌های 7 و 28 روزه تثبیت شده با سیمان و محور افقی مقدار درصد سیمان استفاده شده در نمونه‌ها را نشان می‌دهد. با توجه به نمودارها مشاهده می‌شود که با افزایش مقدار درصد سیمان ترکیبی در نمونه‌ها و مدت زمان عمل‌آوری، مقاومت فشاری تک‌محوری و مدول الاستیسیته نیز افزایش می‌یابد.



شکل 8- نمودار تغییرات مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌های 7 و 28 روزه با درصد‌های مختلف سیمان



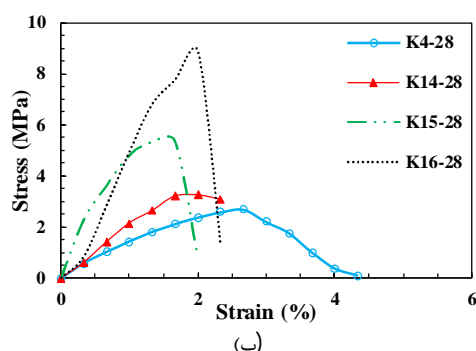
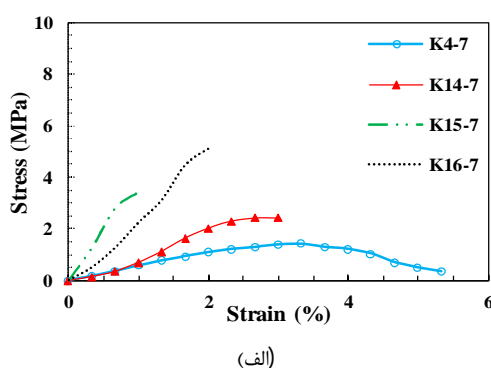
شکل 9- نمودار مدول الاستیسیته - درصد سیمان مصرفی جهت تثبیت خاک کائولینیت

### 3-3- تحلیل نتایج نمونه رسی کائولینیت تثبیت شده با درصد‌های مختلف پودر آهن و سیمان

در این بخش نمودارهای تنش-کرنش نمونه‌های خاک کائولینیت تثبیت شده با درصد‌های مختلفی از پودر آهن و سیمان ارائه شده است. در نمودارهای شکل (10-الف) و (10-ب) که به ترتیب مربوط به نمونه‌های 7 و 28 روزه می‌باشند، مقدار پودر آهن به میزان 5 درصد ثابت بوده و فقط مقدار سیمان با درصد‌های (صفر، 5، 10 و 20) متغیر می‌باشد. با توجه به نمودارهای شکل (10)، در نمونه‌های 7 روزه مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌های (K8-7)، (K9-7) و (K10-7) نسبت به (K2-7) به ترتیب 34، 65

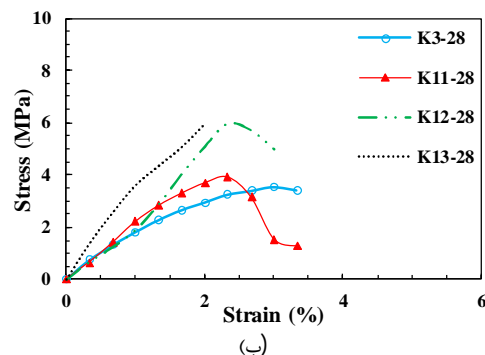
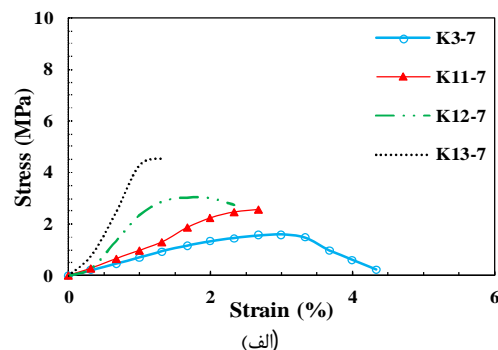
بر اساس نمودارهای شکل (11-الف) و (11-ب) و همچنین نتایج به دست آمده، با افزایش مقدار سیمان مصرفی در نمونه‌ها و همچنین با افزایش مدت زمان عمل‌آوری نمونه‌ها، مقاومت فشاری تک‌محوری افزایش می‌یابد. در حالی که با افزایش مقدار سیمان در نمونه‌ها، کرنش یا تغییر شکل نمونه‌ها کاهش یافته و نمونه‌ها رفتار خطی از خود نشان می‌دهند.

با توجه به نمودارهای شکل (12) که در آن‌ها، مقدار پودر آهن به میزان 20 درصد ثابت بوده و فقط مقدار سیمان با درصد های (صفر، 5، 10 و 20) متغیر می‌باشد. در نمودار (الف) که مربوط به نمونه‌های 7 روزه است، مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌های (K14-7)، (K15-7) و (K16-7) نسبت به (K4-7) به ترتیب 69، 139 و 255 درصد و در نمودار شکل (12-ب) که مربوط به نمونه‌های 28 روزه است، مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌های (K14-28)، (K15-28)، (K16-28) نسبت به (K4-28) به ترتیب 21، 99 و 230 درصد افزایش یافته است. همچنین مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌های 28 روزه (K4-28)، (K14-28)، (K15-28) و (K16-28) نسبت به نمونه‌های 7 روزه (K4-7)، (K14-7) و (K15-7) به ترتیب 87، 34، 56 و 74 درصد افزایش یافته است.



شکل 12- نمودار تنش کرنش کائولینیت تثبیت شده با 20 درصد پودر آهن و (0، 5، 10 و 20) درصد سیمان: (الف) نمودار تنش کرنش نمونه‌های 7 روزه، (ب) نمودار تنش کرنش نمونه‌های 28 روزه

در نمودارهای شکل (11-الف) و (11-ب) مقدار پودر آهن به میزان 10 درصد ثابت بوده و فقط مقدار سیمان با درصد های (صفر، 5، 10 و 20) متغیر می‌باشد.



شکل 11- نمودار تنش کرنش کائولینیت تثبیت شده با 10 درصد پودر آهن و (0، 5، 10 و 20) درصد سیمان: (الف) نمودار تنش کرنش نمونه‌های 7 روزه، (ب) نمودار تنش کرنش نمونه‌های 28 روزه

با توجه به نمودارهای شکل (11)، در نمونه‌های 7 روزه مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌های (K11-7)، (K12-7) و (K13-7) نسبت به (K3-7) به ترتیب 59، 88 و 184 درصد و مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌های 28 روزه (K11-28) و (K12-28) نسبت به (K3-28) به ترتیب 11، 68 و 67 درصد افزایش یافته است. همچنین مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌های 28 روزه (K11-28)، (K12-28) و (K13-28) نسبت به نمونه‌های 7 روزه (K3-7)، (K11-7)، (K12-7) و (K13-7) به ترتیب 120، 54، 97 و 30 درصد افزایش یافته است. نتایج به دست آمده حاکی از آن است که با افزایش درصد سیمان استفاده شده در نمونه‌های حاوی 10 درصد پودر آهن، به طور متوسط مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌های 7 و 28 روزه به ترتیب 110/33 و 48/67 درصد و متوسط مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌های 28 روزه نسبت به 7 روزه، 75/25 درصد افزایش یافته است.

با پودر آهن و سیمان تثبیت شده‌اند، در نمونه‌های 7 روزه به ترتیب مربوط به (K16-7) و (K4-7) و در نمونه‌های 28 روزه به ترتیب مربوط به (K2-28) و (K16-28) است.

#### 4- نتیجه‌گیری

مهم‌ترین یافته‌های این مطالعه عبارتند از:

(1) در نمونه‌های خاک کائولینیت که فقط با پودر آهن با درصدهای (صفر، 5، 10 و 20) تثبیت شده، با افزایش مدت زمان عمل‌آوری نمونه‌ها از 7 روز به 28 روز، مقاومت فشاری تک‌محوری به‌طور متوسط 86/50 درصد افزایش و کرنش متناظر با بیشترین مقدار مقاومت فشاری کاهش یافته است.

(2) در نمونه‌های خاک کائولینیت که فقط با سیمان تثبیت شده‌اند، با افزایش مدت زمان عمل‌آوری نمونه‌ها از 7 روز به 28 روز، مقاومت فشاری تک‌محوری به‌طور متوسط 94 درصد افزایش و کرنش متناظر با بیشترین مقدار مقاومت فشاری در نمونه‌های (K5-28) و (K7-28) نسبت به نمونه‌های (K5-7) و (K7-7) افزایش و در نمونه (K6-28) نسبت به نمونه (K6-7) کاهش یافته است. به‌علت وجود ماکزیمم مقدار سیمان در نمونه‌های (K7-28) و (K7-7) این نمونه‌ها رفتار خطی پیدا کرده و حالت تردد و شکننده پیدا کرده‌اند. بیشترین و کمترین مقدار مقاومت فشاری تک‌محوری برای نمونه‌های 7 روزه به ترتیب برابر با 4/05 و 2/06 مگاپاسکال و برای نمونه‌های 28 روزه به ترتیب برابر با 10/33 و 3/31 مگاپاسکال می‌باشد.

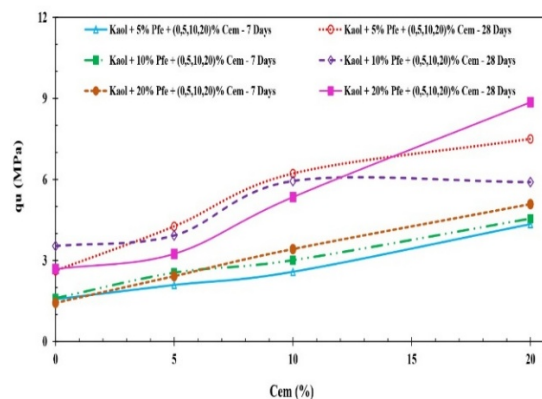
(3) مقاومت فشاری نمونه‌های خاک کائولینیت تثبیت شده با سیمان به مراتب بیشتر از نمونه‌های خاک کائولینیتی تثبیت شده با پودر آهن است و این امر به‌علت واکنش‌های هیدراتاسیون و پوزولانی سیمان و در نتیجه تولید ژل‌های چسباننده (C-S-H) و (C-A-H) است.

(4) مقدار بهینه پودر آهن و سیمان برای تثبیت خاک کائولینیت به ترتیب 10 و 5 درصد وزنی خشک خاک کائولینیت تعیین شد.

(5) بیشترین مقدار مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌های 7 و 28 روزه به ترتیب مربوط به نمونه (K16-7) با مقدار 5/09 MPa و نمونه (K16-28) با مقدار 8/86 MPa است.

(6) در تمام نمونه‌هایی که هم‌زمان از پودر آهن و سیمان جهت تثبیت خاک کائولینیت استفاده شده، مقاومت فشاری تک‌محوری افزایش یافته است. این امر نقش کلیدی و اساسی سیمان را در افزایش مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌هایی که هم‌زمان با پودر آهن و سیمان تثبیت شده‌اند، نشان می‌دهد و نیز بیانگر اندرکنش مناسب پودر آهن و سیمان با یکدیگر در نمونه‌های رسی کائولینیت است.

شکل (13)، نشان‌دهنده نمودار بیشترین مقاومت فشاری تک‌محوری حاصل از آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌هایی که به‌طور هم‌زمان با درصدهای مختلف پودر آهن و سیمان تثبیت شده‌اند، است.



شکل 13- نمودار تغییرات مقاومت فشاری تک‌محوری خاک کائولینیت تثبیت شده با پودر آهن و سیمان به‌صورت هم‌زمان

با توجه به نمودارهای شکل (4) و نتایج به‌دست آمده، مقدار درصد بهینه پودر آهن جهت تثبیت خاک کائولینیت 10 درصد وزن خشک خاک کائولینیت می‌باشد و در صورت تجاوز از این مقدار، مقاومت فشاری تک‌محوری کاهش می‌یابد، در حالی که در شکل (13) در تمامی نمونه‌ها که هم‌زمان از پودر آهن و سیمان جهت تثبیت خاک کائولینیت استفاده شده، شاهد افزایش مقاومت فشاری تک‌محوری می‌باشیم، این امر نقش کلیدی سیمان را در جهت حفظ و افزایش مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌هایی که هم‌زمان با پودر آهن و سیمان تثبیت شده‌اند را نشان می‌دهد. نتایج به‌دست آمده در این بخش همسو با نتایج مطالعات (Ghavami و همکاران، 2018) می‌باشد. آن‌ها جهت تثبیت خاک کائولینیت از سیمان پرتلند تیپ 2 و غبار کوره سیمان به‌مقدار (5، 10 و 15 درصد) وزن خشک خاک کائولینیت استفاده کردند و نمونه‌ها به مدت 7 و 28 روز عمل‌آوری شده و سپس آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری بر روی نمونه‌ها انجام شد. بر اساس نتایج آزمایش‌ها، مشاهده شد که مقاومت نمونه‌های تهیه شده با افزودن سیمان و غبار کوره سیمان افزایش یافت. افزایش مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی سیمان نسبت به نمونه‌های حاوی غبار کوره سیمان، چشمگیر و قابل توجه بود. به‌طوری که در نمونه‌های 28 روزه، مقاومت فشاری نمونه‌های تثبیت شده با 10 درصد سیمان تقریباً برابر با مقاومت فشاری نمونه‌های خاک کائولینیت تثبیت شده با 15 درصد غبار کوره سیمان بود.

همچنین طبق نمودار شکل (13) بیشترین و کمترین مقاومت فشاری تک‌محوری نمونه‌های خاک کائولینیت که به‌طور هم‌زمان

ارشد بخش ژئوتکنیک این مجموعه بی‌نظیر، جهت راهنمایی‌هایشان در محیط آزمایشگاه تشکر نموده و آرزوی موفقیت روز افزون بر این مجموعه عظیم می‌نمایم.

## 6- مراجع

- Abdulhasan M, Chkheiw A, "Effect of incorporating hematite powder on the properties of high strength fiber reinforced concrete", *Civil and Environmental Engineering*, 2025, 1-14.  
<https://doi.org/10.2478/cee-2026-0026>
- American Society for Testing and Materials, (ASTM), "Standard test method for unconfined compressive strength of cohesive soil: ASTM D2166-16", 2016.  
[https://store.astm.org/d2166\\_d2166m-16.html](https://store.astm.org/d2166_d2166m-16.html)
- Cai D, Ouyang M, Bao X, Zhang Q, Bi Z, Yan H, Li S, Shi Y, "Performance evaluation of stabilized soils with selected common waste materials of rice husk ash, steel slag and iron tailing powder", *Materials*, 2025, 18 (2), 346, 1-12. <https://doi.org/10.3390/ma18020346>
- Chemed YC, Deneele D, Christidis GE, Ouvrard G, "Influence of hydrated lime on the surface properties and interaction of kaolinite particles", *Applied Clay Science*, 2015, 107, 1-13.  
<https://doi.org/10.1016/j.clay.2015.01.019>
- Croft JB, "The influence of soil mineralogical composition on cement stabilization", *Géotechnique*, 1967, 17 (2), 119-135. <https://doi.org/10.1680/geot.1967.17.2.119>
- Dehghan Y, Dabiri R, "Effects of waste plastic strips (pet) on improvement of fine-grained soil", *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2021, 51 (103), 127-139.  
<https://doi.org/10.22034/jcee.2019.9474>
- Dhar S, Hussain M, "The strength and microstructural behavior of lime stabilized subgrade soil in road construction", *International Journal of Geotechnical Engineering*, 2021, 15 (4), 471-483.  
<https://doi.org/10.1080/19386362.2019.1598623>
- Dibamehr A, Behrouz Sarand F, Vafaiepour Sorkhabi R, "Improvement of tabriz green marl using alkaline activated zeolite and metaclay", *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2024, 53 (113), 24-35.  
<https://doi.org/10.22034/ceej.2023.54867.2213>
- Eshghi P, Azadi M, Ahmadi H, "Investigating the geomechanical behavior and mechanism of clay stabilization with natural zeolite and nano-magnetite under accelerated curing conditions (ACC)", *Results in Engineering*, 2024, 24, 103529, 1-19.  
<https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.103529>
- Ghaffarpour Jahromi S, Zahedi H, "Investigating the effecting of nano aluminum on mechanical and volumetric properties of clay", *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 2018, 50 (3), 597-606.  
<https://doi.org/10.22060/ceej.2017.12241.5157>
- Ghanizadeh AR, Zolfaghari M, Abbaslou H, "Mechanical properties and durability of clayey subgrade stabilized with iron ore mine tailing and hydrated lime", *Journal of Transportation Infrastructure Engineering*, 2020, 6 (3), 69-88. <https://doi.org/10.22075/jtie.2020.18494.1410>
- Ghavami S, Jahanbakhsh H, Moghaddasnezhad F, "Laboratory study on stabilization of kaolinite clay with cement and cement kiln dust", *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 2020, 52 (4), 935-948.  
<https://doi.org/10.22060/ceej.2018.15100.5829>

(7) از نتایج مهم پژوهش حاضر آن است که در تثبیت نمونه خاک کائولینیت با پودر آهن و سیمان، عملکرد ریزساختاری مناسب پودر آهن و کانی‌های رسی و سیمان، در نمونه‌های 28 روزه باعث افزایش مقاومت تا 331 درصد شد. این در حالی است که انتظار می‌رفت به‌واسطه خوردگی پودر آهن در حضور کانی‌های رسی و رطوبت، کاهش مقاومت قابل توجه حاصل شود.

(8) تأثیر پودر آهن بر افزایش مقاومت نمونه رسی کائولینیت حاوی سیمان می‌تواند از دو دیدگاه فیزیکی و شیمیایی قابل تفسیر است؛ از نظر فیزیکی پودر آهن با نفوذ بین ذرات تشکیل‌دهنده خاک، نسبت تخلخل را کاهش داده و بنابراین تماس بین ذرات جامد خاک افزایش می‌یابد و به‌عبارت بهتر مقدار تنش مؤثر افزایش خواهد یافت که این امر باعث افزایش مقاومت فشاری تک‌محوری می‌شود. از نظر شیمیایی پودر آهن در حضور آب و اکسیژن واکنش داده و اکسیده می‌شود و یون‌های دوظرفیتی و سه‌ظرفیتی آهن ( $Fe^{2+}/Fe^{3+}$ ) تولید می‌شود که این یون‌ها بر روی سطوح منفی صفحات رس قرار گرفته و باعث افزایش پیوند بین دو صفحه خواهد شد. همچنین می‌تواند باعث تولید رسوب اکسید  $Fe(OH)_2$ ،  $Fe(OH)_3$  و یا  $FeOH$  شود. این رسوبات ابتدا به‌صورت کلوئیدی یا نانوذرات تشکیل می‌شود و با گذشت زمان (افزایش مدت زمان عمل‌آوری)، تجمع و رشد کرده و باعث ایجاد ارتباط و پل بین ذرات خاک می‌شود. این امر در نهایت موجب افزایش مقاومت فشاری می‌شود. در واقع، زمانی که با افزایش مدت زمان عمل‌آوری مقاومت فشاری افزایش می‌یابد، می‌توان نتیجه‌گیری نمود که یک فرایند شیمیایی یا فیزیکوشیمیایی پیوسته در حال رخ دادن است.

(9) پودر آهن در حضور آب و اکسیژن وارد واکنش‌های شیمیایی شده و باعث تولید اکسیدها و زنگ آهن می‌شود و بنابراین بر خلاف آن که انتظار می‌رفت که در عملکرد هیدراتاسیون سیمان اختلال ایجاد کند و مانع از گیرش مناسب نمونه‌های ساخته شده شود؛ نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد ترکیب پودر آهن و سیمان باعث افزایش مقاومت شد. برگرداندن پودر آهن غیر قابل استفاده حاصل از کارخانه‌های تولید فولاد به چرخه استفاده مجدد و هم‌زمان کاهش تولید سیمان و به تبع آن جلوگیری از آلودگی‌های زیست‌محیطی و بیماری‌های حاصل از آن‌ها از دیدگاه زیست‌محیطی و اقتصادی اهمیت ویژه دارد.

## 5- تقدیر و تشکر

در این بخش از حضور جناب آقای مهندس حسن ربانی ارشد، مدیریت محترم شرکت آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک استان آذربایجان شرقی جهت فراهم نمودن بستر آزمایشگاه برای انجام این مطالعه و از جناب آقای مهندس فردین اسدالهی کارشناس

- nanoparticles", Amirkabir Journal of Civil Engineering, 2021, 53 (1), 213-228.  
<https://doi.org/10.22060/ceej.2019.14480.5667>
- Rajabi AM, Ardakani SB, Abdollahi AH, "The Effect of Nano-Iron Oxide on the Strength and Consolidation Parameters of a Clay Soil: An Experimental Study", Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering, 2021, 45 (3), 1759-1768.  
<https://doi.org/10.1007/s40996-021-00640-9>
- Saini R, "Examining the effects of nano iron oxide on physical and mechanical characteristics of rubberized concrete", Innovative Infrastructure Solutions, 2024, 9 (180), 1-18. <https://doi.org/10.1007/s41062-024-01494-6>
- Shariatmadari N, Asadi Seyfar N, Saeidijam S, Heshmati AA, "Remediation of BTEX-contaminated groundwaters by Nano scale zero-valent Iron based PRBs", Modares Civil Engineering Journal, 2015, 15 (1), 47-57.  
[https://mcej.modares.ac.ir/article\\_11763.html](https://mcej.modares.ac.ir/article_11763.html)
- Tajaddini A, Saberian M, Kamalzadeh Sirchi V, Li J, Maqsood T, "Improvement of mechanical strength of low-plasticity clay soil using geopolymer-based materials synthesized from glass powder and copper slag", Case Studies in Construction Materials, 2023, 18, e01820.  
<https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01820>
- Tavakoli S, Aminfar MH, Hashemzadeh A, "Investigation of the effect of microsilica on the variations of strength, atterberg limits and permeability in cement-stabilized clay", Journal of Civil and Environmental Engineering, 2022, 52 (107), 57-63.  
<https://doi.org/10.22034/jcee.2021.44697.2009>
- Thomas A, Tripathi RK, Yadu LK, "A laboratory investigation of soil stabilization using enzyme and alkali-activated ground granulated blast-furnace slag", Arabian Journal for Science and Engineering, 2018, 43 (10), 5193-51202.  
<https://doi.org/10.1007/s13369-017-3033-x>
- Valipour M, Shourijeh PT, Mohammadinia A, "Application of recycled tire polymer fibers and glass fibers for clay reinforcement", Transportation Geotechnics, 2021, 27, 100474. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2020.100474>
- Yan H, Cen N, Zheng Q, Lin J, Jiang F, Huang Y, Zhang Y, "Analysis of the shear strength of iron oxide-kaolinite cementing materials in granite red soil", Minerals, 2025, 15 (1), 16, 1-13.  
<https://doi.org/10.3390/min15010016>
- Yao K, Pan Y, Jia L, Yi JT, Hu J, Wu C, "Strength evaluation of marine clay stabilized by cementitious binder", Marine Georesources & Geotechnology, 2020, 38 (6), 730-743.  
<https://doi.org/10.1080/1064119X.2019.1615583>
- Golchinfar N, Abbasi N, "The effects of freezing and thawing cycles on mechanical properties of fine-grained soils stabilized with lime and reinforced with polypropylene fiber", Amirkabir Journal of Civil Engineering, 2014, 45 (2), 1-12.  
<https://doi.org/10.22060/ceej.2014.306>
- Hamidi S, Marandi SM, "Clay concrete and effect of clay minerals types on stabilized soft clay soils by epoxy resin", Applied Clay Science, 2018, 151, 92-101.  
<https://doi.org/10.1016/j.clay.2017.10.010>
- Herzog A, Mitchell JK, "Reactions accompanying stabilization of clay with cement", Highway Research Record, 1963.  
<http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/hrr/1963/36/36-008.pdf>
- Hoseinzadeh Z, Asghari-Kalajahi E, Mansouri H, "Improvement of fine-grained soils of khorramshahr arvand free zone with lime and steel slag for using at earth works", Journal of Engineering Geology, 2021, 15 (2), 207-232. <https://doi.org/10.52547/jeg.15.2.207>
- Hosseinpour I, Rezvani R, Kavoshmelli M, "Experimental investigation of the behavior of cemented-clay specimen reinforced with geotextile layers", Journal of Structural and Construction Engineering, 2023, 10 (7), 74-91.  
<https://doi.org/10.22065/jsce.2023.365452.2949>
- James J, David EPBG, Nagarathinam M, Thaniyarasu MK, Madhu J, "Pozzolanic benefit of fly ash and steel slag blends in the development of uniaxial compressive strength of lime stabilized soil", Revista Facultad de Ingenieria, 2018, 27 (49), 7-21.  
<https://doi.org/10.19053/01211129.v28.n49.2018.8544>
- Kazemzadeh M, Zoghi P, Zad AA, "Evaluating the effect of using iron nanoparticles on geotechnical parameters of soils contaminated with cadmium", Amirkabir Journal of Civil Engineering, 2024, 55 (12), 2343-2364.  
<https://doi.org/10.22060/ceej.2023.22337.7954>
- Keramati M, Sabbaqzade F, Ramesh A, "Investigation of the effect of natural rice straw fibers on the mechanical behavior of clayey soils stabilized with cement", Amirkabir Journal of Civil Engineering, 2022, 54 (8), 3067-3082.  
<https://doi.org/10.22060/ceej.2022.19397.7158>
- Kirsch K, Bell A, "Ground Improvement", 3rd ed, CRC Press, 2012. <https://doi.org/10.1201/b13678>
- Meimaroglou N, Mouzakis C, "Evaluation of the effects of intrinsic soil calcium carbonate and iron oxides on the properties of earthen building materials by means of engineered soils", Low-carbon Materials and Green Construction, 2025, 3 (1), 8, 1-13.  
<https://doi.org/10.1007/s44242-025-00066-w>
- Mohammadzadeh MA, Toufigh MM, Toufigh V, "Durability and strength of geopolymer with recycled glass powder base for clay stabilization", KSCE Journal of Civil Engineering, 2023, 27 (1), 156-168.  
<https://doi.org/10.1007/s12205-022-0681-5>
- Nasehi SA, Uromeihy A, Morsali A, Nikudel MR, "Use of nanoscale zero-valent iron to improve the shear strength parameters of gas oil contaminated clay", Geopersia, 2015, 5 (2), 161-175.  
<https://doi.org/10.22059/jgeope.2015.56093>
- Rahmani s, beheshti b, doosti mr, "Removal of cobalt from contaminated water using magnetic iron oxide