



## Research Paper

## Controlling the Growth Rate of Gullies Using Lime Saturated Solution

Rahim Kazemi<sup>1\*</sup>, Reza Bayat<sup>1</sup>, Ziaoddin Shoaei<sup>2</sup> and Seyed Reza Emam-Jomeh<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Assist. Professor, Soil Conservation and Watershed Management Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Tehran, Iran

<sup>2</sup>Associate Professor, Soil Conservation and Watershed Management Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Tehran, Iran

<sup>3</sup>Expert, Soil Conservation and Watershed Management Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Tehran, Iran

### Article information

**Received:** October 26, 2021

**Revised:** December 13, 2021

**Accepted:** December 14, 2021

### Keywords:

Erosion

Porosity

Stabilization

Strength

\*Corresponding author:

[kazemi@itc.nl](mailto:kazemi@itc.nl)



### Abstract

Gully erosion is an important and major process of land destruction and is considered one of the most important sources of erosion and sediment production in the country. The purpose of this research was to determine the effect of saturated lime solution (SLS) in reducing the growth rate of gullies. After locating two active gullies with similar physiographic and soil characteristics in one of the gully areas of Tehran province and recording the physiographic and soil characteristics, one was considered as a control and the other as a treatment. The effect of volume of SLS and curing time in improving the uniaxial strength of gully soil was investigated and tested. To inject SLS, a strip pond was created around the gully and the optimal volume of SLS was discharged on the surface of the pond. Then, in six-month periods, the length and volume growth of gullies were measured and the results were compared with each other. The results of the effect of the volume of SLS on the uniaxial strength of gully soil during constant curing time showed that the maximum increase in soil strength by 420% of the control sample was obtained by injecting 40 times the volume of soil porosity. The results of the study of the effect of curing time on the soil strength showed the maximum increase in the 60-day curing period and as much as 400%. Also, the stabilized gully had a 58% decrease in longitudinal growth and an 83% decrease in volume growth.

© Authors, Published by **Environment and Water Engineering** journal. This is an open-access article distributed under the CC BY (license <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



### Introduction

Gully erosion is a major process in land degradation and one of the most important sources of erosion and sediment production in our country. Researchers believe that the sediment production contribution of gullies per

unit area is several hundred times that of splash and surface erosion. According to research in the Mediterranean region, 80% of sediment is caused by gully erosion. Therefore, by stabilizing and controlling gullies, a significant volume of soil erosion can be reduced. The aim of this study was to investigate the effect of saturated lime



solution (SLS) on reducing the growth rate of gullies. In this study, two active gullies with similar physiographic and soil characteristics in one of the gully areas of Tehran province were selected. One was considered as a control and the other as a treatment. The effect of volume of SLS and curing time in improving the uniaxial strength of gully soil was investigated and tested. To inject SLS, a strip pond was created around the gully and the optimal volume of SLS was discharged on the surface of the pond. Then, in six-month periods, the length and volume growth of gullies was measured and the results were compared with each other.

## Material and Methods

The study area was located in one of the gully areas of Tehran province, in the southwest of Mahdasht city, in the general area of the Shur river basin; The location of the study area was shown in Fig. 1.a and an example of the created gully was shown in Fig. 1-b. In this figure, two similar samples of gullies can be seen; Number one and two have similar characteristics in terms of size and physiographic and soil characteristics, and gully number three and four also have the same characteristics. As can be seen from the image; The growth of gully number four has been controlled naturally by vegetation cover.

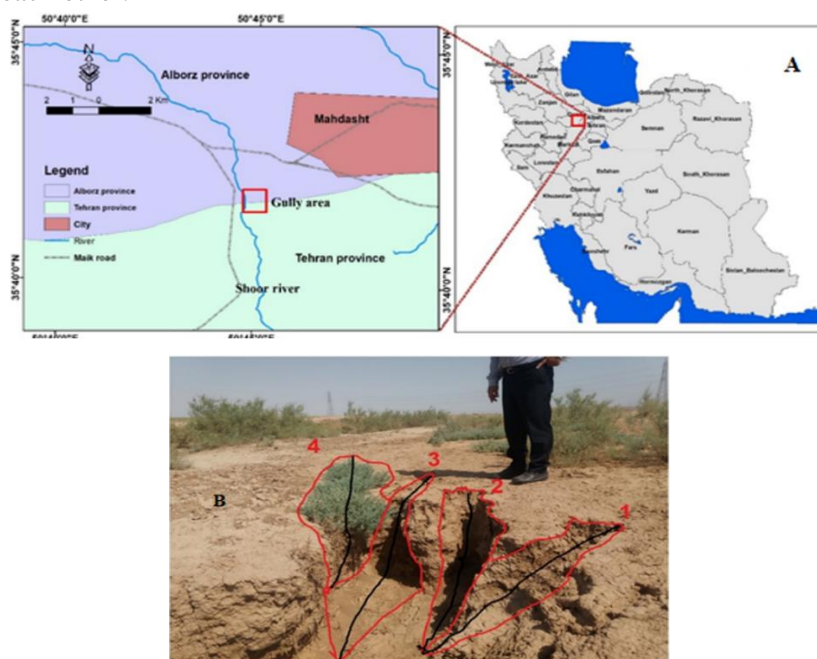


Fig. 1: A) Study area and B) selected gullies

After locating, two active gullies with similar physiographic and soil characteristics in one of the gully areas in Tehran province were selected and recorded physiographic and soil characteristics, one was considered as a control and the other as a treatment. Then, their soil was sampled and its chemical, physical and mechanical characteristics including Porosity, Atterberg limits (according to ASTM-D4318), pH,  $E_c$ ,  $Ca^{++}$ , uniaxial strength (according to ASTM D2166-66), density, and grain size were determined. In order to determine the optimal moisture and maximum density, a Proctor compaction test was performed and samples were prepared with 80% density of standard Proctor. Six soil samples were prepared and SLS was passed through them at the rate of 2, 4, 8, 20,

40, and 50, equal to the volume of soil porosity. One sample was also prepared and tested as a control. The effect of SLS volume and curing time on improving the uniaxial strength of gully soils were investigated and tested. In the next step, to allow SLS to enter the soil, a strip pond was created around a gully and vertical holes with a diameter of 5 cm were made in the bottom of the strip pond and filled with sand. Then based on the results of the laboratory test, the injection of SLS was done in one of the gullies when there was no rain (summer) and the other one was used as a control. In the next step, base points were installed around gullies. Then, in six-month periods, using a laser mapping camera as well as aerial imaging of the gully and preparing its digital elevation model, the longitudinal and

volumetric growth of gullies were measured and the results were compared with each other.

### Results

The results of the physical tests of the soil sample showed that the soil of the gully region was of CL type, and its characteristics were as follows. The liquid limit (32.4); the plastic limit (17.78); the Plastic Index (14.62); the percentage passing through sieve No. 200 was equal to 85% by weight and the density of the grains was equal to 2.59 g/cm<sup>3</sup>.

The results of chemical tests showed that the pH of the soil was 7.72, EC (37.6 mS/m) and the Ca<sup>++</sup> was 108 meq/l. Other soluble salts in one liter of extract were as follows: HCO<sub>3</sub><sup>2-</sup> (6); Cl<sup>-</sup> (430); SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> (51.2); Mg<sup>2+</sup> (98); Na<sup>+</sup> (265) and K<sup>+</sup> equal to 59 meq/l and the total percentage of neutralizing substances was 46.18 percent. The results of the effect of the volume of SLS on soil strength during constant curing time showed that by injecting SLS at 40 times the porosity of the soil, soil strength increased by 420% of the control sample. The results of the investigation of the effect of curing time on soil strength during the constant volume of SLS showed a 400% increase in soil strength over a 60-day curing time. A comparison of the longitudinal growth rate of the stabilized gully with the control sample showed that the stabilized gully had a 58% reduction in longitudinal growth and 83% in volumetric growth (Fig. 2).

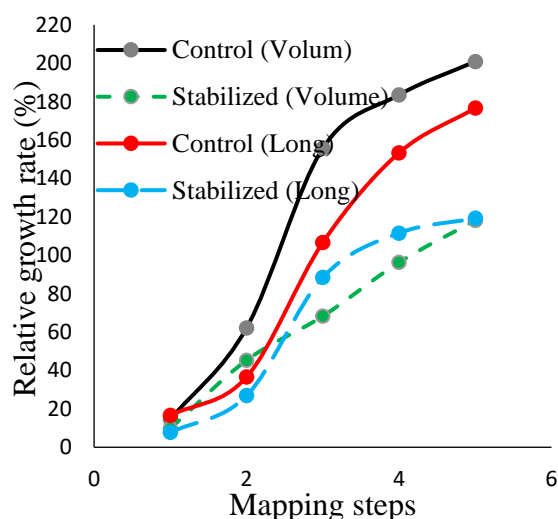


Fig. 2 Cumulative curve of relative growth changes of gully length and volume

### Conclusion

In this study, the effect of SLS on reducing the longitudinal and volumetric growth of the gullies was investigated during two series of laboratory tests and field operations. The overall conclusion of the results showed, the ability of the SLS method to control and reduce, longitudinal and volumetric growth of gullies; In this regard, the following results were noteworthy.

1. The optimal volume of SLS for injection in gullies was found to be 40 times the porosity volume of the soil samples.
2. The optimal curing period for the maximum stabilization of gullies was found to be between 28-60 days.
3. Comparison of the length and volume growth of the stabilized gullies with the control gully showed that the stabilized gully decreased by 58% in terms of length and 83% in terms of volume compared to the control sample.

### Acknowledgment

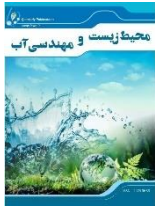
This paper is an excerpt from some of the results of a research project entitled "Investigation of the effect of lime saturated solution in reducing the growth rate of gullies" with project number: 92128-29-29-2, which has been done in the Soil Conservation and Watershed Management Research Institute of Iran (SCWMRI). We would like to thank the esteemed officials of the research institute for their support and assistance.

### Data Availability

The data used in this research are presented in the paper.

### Conflicts of interest

The authors of this article declared no conflict of interest regarding the authorship or publication of this article.



ISSN: 2476-3683

محیط زیست و مهندسی آب

Homepage: [www.jewe.ir](http://www.jewe.ir)

مقاله پژوهشی

## کنترل آهنگ رشد آبکندها با استفاده از محلول اشباع آهک

رحیم کاظمی<sup>۱\*</sup>، رضا بیات<sup>۱</sup>، ضیالالدین شعاعی<sup>۲</sup> و سید رضا امام جمعه<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup>استادیار پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران  
<sup>۲</sup>دانشیار پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران  
<sup>۳</sup>کارشناس ارشد پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران

### اطلاعات مقاله

### چکیده

تاریخ دریافت: [۱۴۰۰/۰۸/۰۴]

تاریخ بازنگری: [۱۴۰۰/۰۹/۲۲]

تاریخ پذیرش: [۱۴۰۰/۰۹/۲۳]

### واژه‌های کلیدی:

تشبیت خاک

تخلخل

فرسایش

مقاومت

### \*نویسنده مسئول:

[kazemi@itc.nl](mailto:kazemi@itc.nl)



فرسایش آبکندی فرآیند مهم و عمده تخریب اراضی و از مهم‌ترین منابع فرسایش و تولید رسوب در کشور محسوب می‌شود. هدف از این پژوهش، تعیین تأثیر محلول سیرشده آهک در کاهش آهنگ رشد آبکندها بود. پس از مکان‌یابی دو آبکند فعال با خصوصیات فیزیوگرافی و خاک‌شناسی مشابه در یکی از مناطق آبکندی استان تهران و ثبت مشخصه‌های فیزیوگرافی و خاک‌شناسی، یکی به‌عنوان شاهد و دیگری به‌عنوان تیمار در نظر گرفته شد. اثر حجم محلول سیرشده آهک و زمان نگهداشت در اصلاح مقاومت تک‌محوری خاک آبکند، مورد بررسی و آزمایش قرار گرفت. برای تزریق محلول آهک، یک حوضچه نواری پیرامون آبکند، ایجاد و به‌میزان حجم بهینه محلول سیرشده آهک در سطح حوضچه تخلیه شد. سپس در دوره‌های شش‌ماهه رشد طولی و حجمی آبکندها تعیین و نتایج با یکدیگر مقایسه شد. نتایج تأثیر حجم محلول سیرشده آهک بر مقاومت خاک آبکند در زمان نگهداری ثابت، نشان داد که حداکثر افزایش مقاومت خاک به‌میزان ۴۲٪ نمونه شاهد، با تزریق ۴۰ برابر حجم تخلخل خاک به‌دست آمد. نتایج بررسی تأثیر زمان نگهداری بر میزان افزایش مقاومت خاک، حداکثر افزایش مقاومت در دوره نگهداری ۶۰ روز و به‌میزان ۴۰٪ را نشان داد. همچنین، آبکند تشبیت‌شده ۵۸٪ کاهش رشد طولی و ۸۳٪ کاهش رشد حجمی داشت.

### ۱- مقدمه

فرسایش آبکندی (خندقی) فرآیند عمده تخریب اراضی و از مهم‌ترین منابع فرسایش و تولید رسوب در کشور محسوب می‌شود؛ بنابراین با تشبیت و کنترل آبکندها، می‌توان حجم قابل‌توجهی از فرسایش خاک را کاهش داد. براساس پژوهش‌های انجام‌شده، پژوهش‌گران سهم تولید رسوب آبکندها را در واحد سطح، چند صد برابر فرسایش پاشمانی و سطحی می‌دانند (Soufi 2007). نتایج پژوهش De Baets et al. (2007) در خصوص تعیین سهم رسوب آبکندها، نشان داد که در مناطق مدیترانه‌ای ۸۰٪ رسوب به‌وسیله فرسایش آبکندی ایجاد می‌شود. نتایج پژوهش Karimi (1998) در زمینه عوامل شکل‌گیری آبکند در زهان قائن، نشان داد که عوامل مساحت حوضه بالادست، شدت بارش و خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک از عوامل مهم شکل‌گیری آبکند هستند. مشاهدات میدانی Martinaz-

فرسایش آبکندی (خندقی) فرآیند عمده تخریب اراضی و از مهم‌ترین منابع فرسایش و تولید رسوب در کشور محسوب می‌شود؛ بنابراین با تشبیت و کنترل آبکندها، می‌توان حجم قابل‌توجهی از فرسایش خاک را کاهش داد. براساس پژوهش‌های انجام‌شده، پژوهش‌گران سهم تولید رسوب آبکندها را در واحد سطح، چند صد برابر فرسایش پاشمانی و سطحی می‌دانند (Soufi 2007). نتایج پژوهش De Baets et al. (2007) در خصوص تعیین سهم رسوب آبکندها، نشان داد که در مناطق مدیترانه‌ای ۸۰٪ رسوب به‌وسیله فرسایش آبکندی ایجاد می‌شود. نتایج پژوهش Karimi (1998) در زمینه عوامل شکل‌گیری آبکند در زهان قائن، نشان داد که عوامل مساحت حوضه بالادست، شدت بارش و خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک از عوامل مهم شکل‌گیری آبکند هستند. مشاهدات میدانی Martinaz-



های تبادل کاتیونی مفید است و این روش را برای خاک‌های متورم شونده نیز مفید دانستند. خصوصیات مکانیکی خاک تثبیت‌شده با آهک با میزان متغیر آهک توسط Bzybey (2010) and Garaisayev مورد آزمایش قرار گرفت؛ نتایج نشان داد که پایدارسازی خاک با آهک، پلاستیسیته<sup>۱</sup>، مقاومت فشاری، مدول الاستیک<sup>۲</sup>، خواص تورمی و قابلیت تحکیم رس‌ها را توسعه می‌دهد. نتایج پژوهش افزایش مقاومت خاک با استفاده از آهک و پوزولان‌های طبیعی<sup>۳</sup> در دوره‌های نگهداری مختلف، توسط Harichane et al. (2011) نشان داد که این روش، اثرات بسزایی در افزایش چسبندگی و زاویه داخلی خاک با افزایش زمان نگهداری دارد. در پژوهشی که به منظور بررسی مزایا و معایب تثبیت خاک‌های ریزدانه با افزودن آهک، توسط Ibtahaj et al. (2014) انجام شده است؛ برای اجتناب از اثرات مخرب زیست‌محیطی، افزودن اکسید و هیدروکسید منیزیم را توصیه نموده‌اند. نتایج پژوهش Babu and Poulouse (2018) در خصوص تثبیت خاک به وسیله مواد افزودنی، مانند سیمان، آهک و پوزولان‌های طبیعی نشان داد که این روش‌ها برای خاک‌ریزهای در دست‌ساخت، نیز امکان‌پذیر است و برای توده‌های طبیعی موجود که دارای عمق و سطح وسیعی هستند، قابل استفاده نیست. نتایج پژوهش Kumar et al. (2020) در خصوص مقایسه روش‌های اصلاح در عمق خاک‌های رسی با آهک، از جمله روش ستون آهکی، دوغ-آب‌آهک و بارش آهک، نشان داد که روش بارش محلول آهک، بیشترین تأثیر را در افزایش مقاومت خاک رسی دارد. در خصوص افزایش پارامترهای مقاومت برشی و مقاومت تک‌محوری خاک‌های ریزدانه تحت تأثیر افزودن آهک، مطالعات متعددی در داخل کشور انجام شده است. از جمله Qabezlu (2001) در خصوص افزایش پارامترهای مقاومتی خاک‌های ماری با استفاده از پوزولان، Fatehi and Hassani (2006) در زمینه تثبیت بسترهای لجنی با استفاده از آهک و Farzaneh and Mossadegh (2011) در زمینه تثبیت خاک‌های شور با استفاده از آهک، پژوهش انجام داده و نتایج آن‌ها نشان‌دهنده قابلیت بالای افزودنی آهک در افزایش پارامترهای مقاومتی خاک ریزدانه و در نتیجه امکان کاهش فرسایش و رسوب از این طریق است.

Casansnovas et al. (2007) در آبکندهای شمال شرق اسپانیا نشان داد، که حضور پوشش گیاهی برای جلوگیری از پیشروی آبکند کافی نیست و برای کاهش آهنگ عقب‌نشینی دیواره‌های آبکند بایستی، مدیریت رواناب سطحی در اطراف آبکندها را اعمال نمود. بخشی از آبکندهای منطقه طرود فیروزکوه نیز دارای شرایط مشابهی هستند که برای مهار گسترش آن‌ها، نیاز به ساماندهی سامانه آبیاری در اراضی زراعی است (Bayat and Rostami 2016). از دیرباز کوشش‌های مختلفی برای تثبیت توده‌های لغزشی با استفاده از بقایای گیاهی، مواد معدنی و طبیعی از جمله آهک شده است. برخی از روش‌های ارزان‌قیمت که برای تثبیت توده‌های لغزشی استفاده شده عبارت‌اند از: زهکشی، استفاده از ریشه گیاهان، اصلاح هندسی توده لغزشی، خاک‌ریز در پنجه و دیوار نگهدارنده (Farkas 2021). نتایج پژوهش Indaratna (1996) در خصوص افزایش مقاومت خاک با افزودن آهک، نشان داد، افزایش آهک، مقاومت تک‌محوری خاک ریزدانه را ۷۷٪ و زاویه اصطکاک داخلی را ۷۲٪ افزایش می‌دهد. نتایج مطالعات آزمایشگاهی انجام‌شده توسط Bell (1996) برای پایدارسازی خاک‌های رسی به تأثیر توأم محتوای کانی‌شناسی خاک‌ها و همچنین زمان نگهداری و درجه حرارت توجه ویژه داده‌اند. در نتیجه‌گیری پژوهش Sivapullaiah et al. (2000) اشاره شده است که آهک، خصوصیات مکانیکی و مقاومتی خاک را در یک دوره زمانی طولانی تغییر می‌دهد. نتایج پژوهش Peyrowan et al. (2005) در خصوص بهسازی و تثبیت واحدهای ماری منطقه تهران-قم با استفاده از محلول گچ، نشان داد که این روش برای بهبود مشخصه‌های مقاومتی خاک‌های سدیمی و کاهش فرسایش مفید است. نتایج پژوهش Pui Ling (2005) در خصوص تثبیت خاک‌های رسی با محلول آهک، غلظت بهینه محلول آهک، برای تزریق به خاک‌های رسی را (mol) ۱/۳۵ در دوره نگهداری ۲۸ روزه گزارش کرد. نتایج مطالعات تجربی (Yong and Ouhadi 2007) در خصوص بررسی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک‌های رسی و ماری، به روش افزودن آهک، نشان داد که روش‌های معمول و سنتی پایدارسازی بدون توجه به کانی‌شناسی خاک و آنالیزهای x-ray نمی‌تواند مفید باشد. نتایج پژوهش Al-Mukhtar et al. (2010) در خصوص بررسی تغییرات کانی‌شناسی خاک‌های تثبیت‌شده با آهک در شرایط محیطی ۲۰°C نشان داد که میزان اختلاط ۵٪ آهک برای واکنش-

<sup>1</sup>Plasticity

<sup>2</sup>Elastic modulus

<sup>3</sup>Natural pozzolan





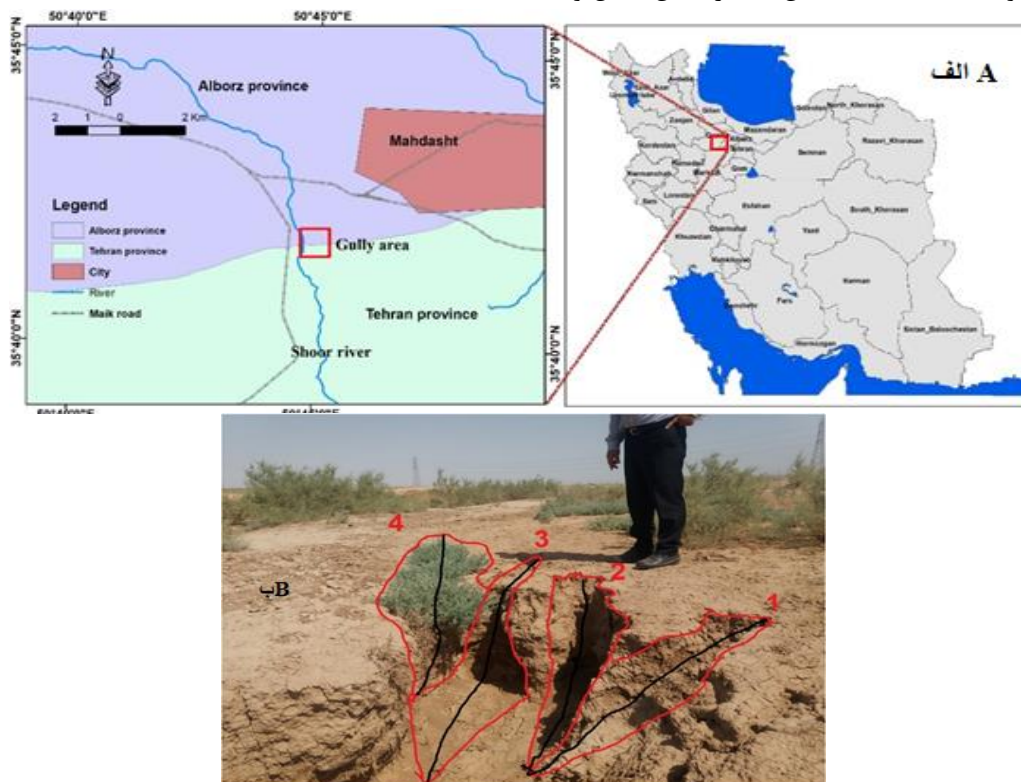
اینکه، اغلب این پژوهش‌ها در خصوص کاربرد آهک به روش سنتی و به‌منظور کاربرد در پروژه‌های ساختمانی انجام شده است، درحالی‌که برای کاربرد در منابع طبیعی و کنترل آبکندها روش‌های مناسب‌تری لازم است. بنابراین هدف از پژوهش حاضر، امکان‌سنجی کنترل آهنگ رشد آبکندها به روش تثبیت با محلول سیرشده آهک است.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- منطقه مورد مطالعه

منطقه انتخاب‌شده، در یکی از مناطق آبکنده استان تهران، در جنوب غرب شهرستان ماهدشت، در منطقه عمومی حوضه رود شور قرار دارد؛ موقعیت منطقه پژوهش در شکل (۱-الف) و نمونه‌ای از آبکنده ایجادشده در شکل (۱-ب) نشان داده شده است. در این شکل، دو نمونه آبکنده مشابه قابل‌مشاهده است؛ شماره یک و دو دارای مشخصات مشابه از نظر اندازه و مشخصات فیزیوگرافی و خاک‌شناسی هستند و آبکندهای شماره سه و چهار نیز دارای مشخصات یکسانی هستند. همان‌طور که از تصویر قابل دریافت است؛ رشد آبکنده شماره چهار به‌صورت طبیعی به‌وسیله رویش گیاه کنترل شده است.

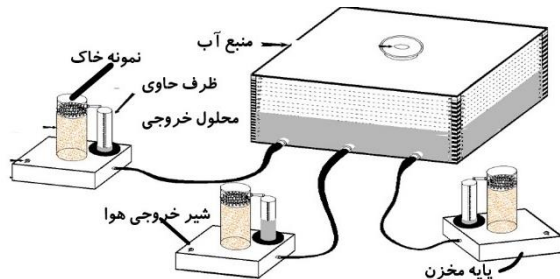
امکان تثبیت دامنه‌های خاکی هوازده خزشی به روش ترانشه محلول سیرشده آهک در توده دنبلید شرقی در منطقه طالقان توسط Davoodi (2010) بررسی شده است. نتایج نشان داد که این روش در ایجاد چسبندگی و افزایش زاویه اصطکاک داخلی خاک مؤثر است. نتایج پژوهش Davoodi and Kadivar (2011) در خصوص افزایش پارامترهای مقاومتی خاک با افزودن یون کلسیم و به روش الکتروسینتتیک، نشان داد که این روش تحت تنش قائم ۷۵kpa به‌میزان ۴۰٪ باعث افزایش مقاومت برشی خاک شده است. نتایج پژوهش کاربرد محلول سیرشده آب‌آهک در کنترل زمین‌لغزش‌ها توسط Kazemi (2012) نشان داد که با افزایش زمان نگهداری تا ۲۸ روز، مقاومت خاک، بیش از ۴۰٪ افزایش می‌یابد. Shoaie et al. (2017) تأثیر محلول سیرشده آهک بر تغییرات واگرایی خاک از طریق آزمایش Pin hole را در عرصه‌های مارنی ناحیه حسن‌آباد، جنوب ورامین و ناحیه کوه دو برادر قم مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که با افزایش درصد محلول سیرشده آب‌آهک و افزایش زمان عمل‌آوری تیمار خاک از یک سو و افزایش بار تزریق محلول، میزان موفقیت در کاهش درجه واگرایی خاک افزوده می‌شود. در جمع‌بندی پژوهش‌های انجام شده، برای افزایش مقاومت خاک‌های حساس به فرسایش، قابل‌توجه



شکل ۱- الف) منطقه پژوهشی و ب) تصویر آبکندهای منتخب  
Fig. 1: A) Study area and B) selected gullies

## ۲-۲- روش پژوهش

با دوربین نقشه‌برداری لیزری TS06 و تصویربرداری با دوربین کانون D80 انجام شد. پس از تهیه مدل رقمی ارتفاعی از تصاویر دوربین در محیط نرم‌افزار 3D surface mapping software و Agisoft PhotoScan و تعیین سطح و حجم آبکند، پایش میزان تغییرات آن در پنج دوره زمانی شش‌ماهه انجام شد.



شکل ۲- طرح شماتیک مدل فیزیکی ساخته شده در پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری

Fig. 2 Schematic physical model made in the Soil Conservation and Watershed Management Research Institute

## ۲-۲-۱- اجرای تزریق محلول سیرشده آهک در صحرا

تزریق محلول سیرشده آهک در یکی از آبکندها انجام و دیگری به‌عنوان شاهد استفاده شد. ابتدا ضمن ایجاد حوضچه نواری پیرامون آبکند، با استفاده از نمونه گیر اوگر<sup>۴</sup> با سایز متناسب با ابعاد آبکند، که موجب تخریب دیواره‌های آن نشود، تعدادی حفره تا سطح معادل کف آبکند در حاشیه آبکند ایجاد و سپس با ماسه پر شد و تزریق محلول سیرشده آهک، متناسب با حجم بهینه به‌دست‌آمده در مرحله آزمایشگاهی انجام شد. تصویر شماتیک آبکند و مدل ایجاد فرآیند تزریق در شکل (۳) ارائه شده است.

## ۲- یافته‌ها و بحث

نتایج آزمایش‌های فیزیکی نمونه خاک نشان داد که خاک منطقه آبکندی از نوع CL بوده که منحنی دانه‌بندی آن در شکل (۴) ارائه شده و مشخصات مهندسی آن به شرح ذیل است. حد روانی ۳۲/۴، حد خمیری ۱۷/۷۸، شاخص خمیری ۱۴/۶۲، درصد عبوری از الک شماره ۲۰۰ معادل ۰.۸۵٪ وزنی، چگالی دانه‌ها معادل ۲/۵۹ g/cm<sup>3</sup> است. با توجه به نظر انجمن ملی آهک به نقل از (Ahadi-Ali (2007 مبنی بر تعیین محدوده شاخص‌های خمیری و حد خمیری خاک‌های قابل اصلاح به‌وسیله آهک، محدوده شاخص خمیری و حد خمیری نمونه خاک برداشت‌شده از آبکند منتخب در

ابتدا با بررسی‌های میدانی دو آبکند با مشخصه‌های فیزیوگرافی، پوشش و خاک‌شناسی مشابه (یکی به‌عنوان تیمار و دیگری شاهد) انتخاب شد. از خاک آبکندها، پس از برداشت خاک سطحی از دیواره آبکند، به مقدار موردنیاز نمونه‌برداری شد و در آزمایشگاه مشخصه‌های فیزیکی و شیمیایی شامل: تخلخل، حدود اتربرگ<sup>۱</sup> (براساس استاندارد ASTM-D4318)، pH، Ec، غلظت Ca<sup>++</sup> در خاک، مقاومت تک-محوری<sup>۲</sup> (استاندارد ASTM D2166-66)، چگالی و دانه-بندی، تعیین شد (Hazelton and Murphy 2016). به‌منظور تعیین رطوبت بهینه و حداکثر چگالی، آزمایش پروکتور استاندارد<sup>۳</sup> (تراکم) انجام شد. تعداد ۶ نمونه با تراکم ۸۰٪ پروکتور استاندارد تهیه و همچنین محلول سیرشده آهک با نسبت ۵ (g/L) با اقتباس از Alvandkuhi (2006) تهیه شد. سرانجام، آزمایش اصلاح خاک با محلول سیرشده آهک بر نمونه آزمایشگاهی متراکم شده به‌منظور تعیین میزان تأثیر حجم محلول و زمان نگهداشت بر افزایش مقاومت خاک، در مدل آزمایشگاهی ساخته شده در آزمایشگاه پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، انجام شد (شکل ۲). به‌منظور امکان بهره‌برداری بیشتر از نتایج این پژوهش، حجم محلول سیرشده به‌صورت بی‌بعد و به‌صورت نسبتی از حجم تخلخل خاک، بیان شد، تا قابلیت تفسیر و مقایسه بیشتری یافته و کاربرد آن در طرح‌های اجرایی تسهیل گردد. بدین منظور پس از اندازه‌گیری حجم محلول عبوری از نسبت آن به حجم خلل و فرج نمونه و با عنوان ضریبی از آن در این پژوهش یاد شده است. بدین ترتیب در ۶ نمونه آزمایشی به‌میزان ۲، ۴، ۸، ۲۰، ۴۰، ۵۰، برابر حجم تخلخل، از آن‌ها محلول سیرشده عبور داده شده است. علاوه بر این نمونه‌ها، یک نمونه نیز به‌عنوان شاهد تهیه و مورد آزمایش قرار گرفتند، برای سهولت مقایسه، نتایج به‌صورت درصدی از افزایش مقاومت نمونه تثبیت‌شده، نسبت به متوسط مقاومت نمونه‌های شاهد ارائه شده است. براساس نتایج مرحله آزمایشگاهی، تزریق محلول سیرشده آهک در زمانی که بارش نداشته باشیم (تابستان) در یکی از آبکندها انجام و دیگری به‌عنوان شاهد استفاده شد. در مرحله بعدی نقاط مبنا در اطراف آبکند نصب شد. اندازه‌گیری ابعاد آبکند

<sup>1</sup>Atterberg limits

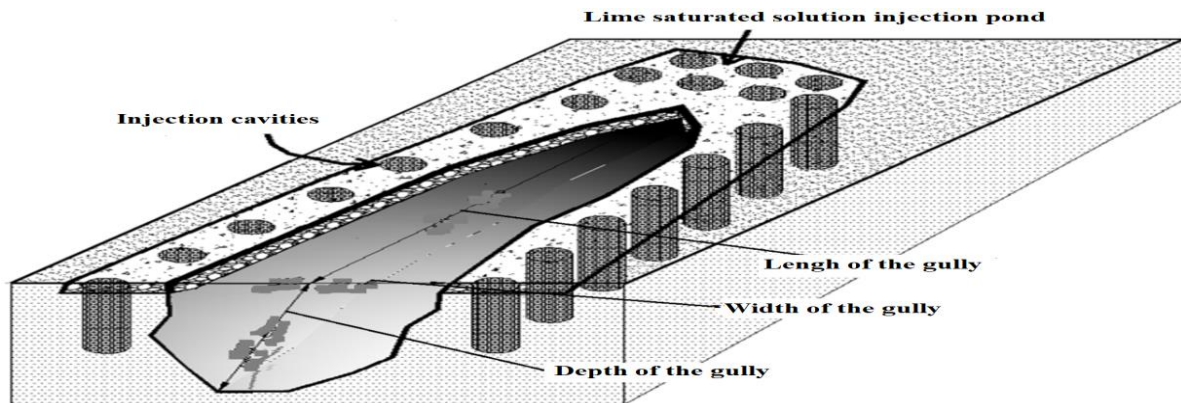
<sup>2</sup>Unconfined compression test

<sup>3</sup>Proctor compaction test

<sup>4</sup>Augar

محدوده‌ای است که قابلیت اصلاح با آهک را دارا است؛ لذا مراحل بعدی اصلاح مشخصه‌های مقاومتی خاک آبکند با استفاده از محلول سیرشده آهک پیگیری شد. نتایج آزمایش‌های شیمیایی، حاکی از آن است که pH خاک ۷/۷۲، EC آن برابر ۳۷/۶ mS/m و غلظت یون کلسیم با  $Ca^{++}$  در خاک برابر با ۱۰۸ meq/l است. سایر نمک‌های محلول در یک لیتر عصاره نیز بدین شرح است:  $HCO_3^{2-}$  برابر با ۶،  $Cl^-$  برابر با ۴۳۰،  $SO_4^{2-}$  برابر با ۵۱/۲،  $Mg^{2+}$  برابر با ۹۸،  $Na^+$  برابر با ۲۶۵ و  $K^+$  معادل ۰/۵۹ meq/l و درصد کل مواد خنثی شونده برابر ۴۶/۱۸ است.

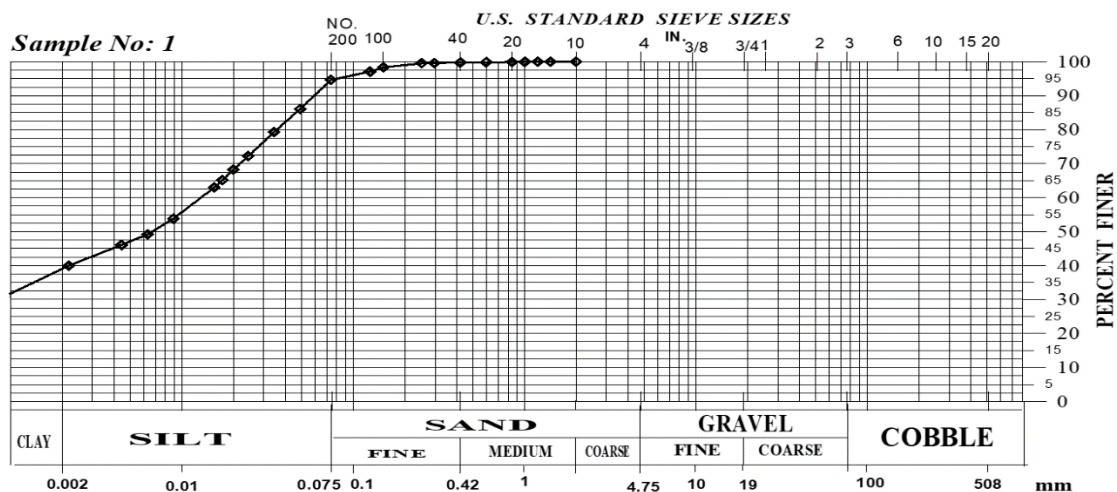
محدوده‌ای است که قابلیت اصلاح با آهک را دارا است؛ لذا مراحل بعدی اصلاح مشخصه‌های مقاومتی خاک آبکند با استفاده از محلول سیرشده آهک پیگیری شد. نتایج آزمایش‌های شیمیایی، حاکی از آن است که pH خاک ۷/۷۲، EC آن برابر ۳۷/۶ mS/m و غلظت یون کلسیم



شکل ۳- شکل شماتیک نحوه تزریق محلول سیرشده آهک در صحرا

Fig. 3 Schematic figure of how to inject lime saturated solution in the field

#### Soil Conservation and Watershed Management Research Institute Lab



شکل ۴- منحنی دانه‌بندی خاک مورد آزمایش

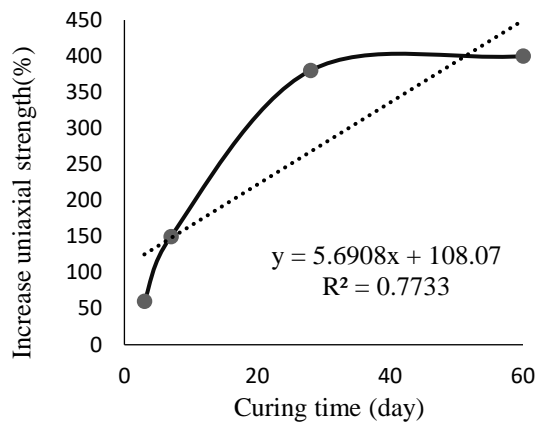
Fig. 4 Granulometric curves of the tested soil

محلول سیرشده آهک، افزایشی در مقاومت مشاهده نشد. لذا همین میزان به‌عنوان حجم بهینه برای تزریق در مرحله اولیه در صحرا، در نظر گرفته شد. افزایش مقاومت خاک با میزان درصد اختلاط مختلف ۳ تا ۱۰٪ آهک در پژوهش and Yong Ouhadi (2007) نیز بررسی شده و نتایج ایشان مبنی بر اختلاط بهینه ۵٪ آهک در زمان ۲۸ روز گزارش شده است. همچنین نتایج پژوهش Pui Ling (2005) غلظت بهینه محلول آهک، برای تزریق به خاک‌های رسی را به‌میزان ۱/۳۵ (mol) در دوره نگهداری ۲۸ روز تعیین کرده است. کوشش در جهت تعیین میزان بهینه اختلاط آهک،

۳-۱- حالت حجم متغیر و زمان نگهداشت ثابت  
برای به‌دست آوردن حجم بهینه و لازم برای تزریق محلول آهک، نتایج رابطه میزان حجم محلول سیرشده عبور داده شده و تغییر مقاومت تک‌محوری در زمان نگهداشت ثابت در شکل (۵) ارائه شده است. همان‌طور که از شکل قابل‌مشاهده است، رابطه میزان مقاومت خاک با میزان محلول سیرشده آهک تزریق‌شده، یک رابطه افزایشی است، به‌نحوی که بعد از تزریق محلول سیرشده آهک، به‌میزان ۴۰ برابر حجم تخلخل خاک، حداکثر افزایش مقاومت به‌میزان ۴۲۰٪ نسبت به نمونه شاهد به‌دست آمد. بعدازآن با افزایش میزان حجم



توسط Harichane et al. (2011) نیز تأیید و گزارش شده که افزایش زمان نگهداری، اثرات بسزایی در افزایش چسبندگی و زاویه داخلی خاک دارد.



شکل ۶- رابطه زمان نگهداری و افزایش نسبی مقاومت در حجم یکسان محلول آهک

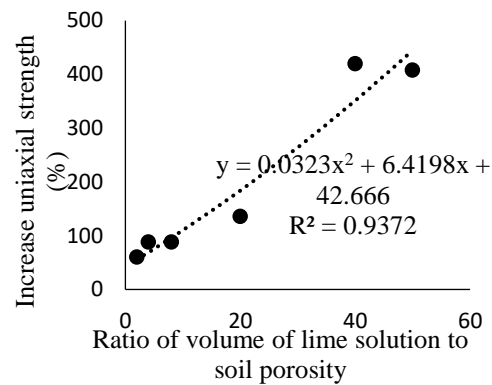
Fig. 6 Relationship between curing time and relative increase of strength in the same volume of lime solution

همچنین نتایج Sivapullaiah et al. (2000) مبنی بر اینکه آهک، خصوصیات مکانیکی و مقاومتی خاک را در یک دوره زمانی طولانی افزایش می‌دهد؛ با نتایج این پژوهش مبنی بر افزایش مقاومت در دوره زمانی طولانی تا ۶۰ روز مطابقت دارد.

### ۳-۳- رابطه بین میزان یون کلسیم جذب شده و زمان نگهداشت

جهت تدوین رابطه بین میزان یون کلسیم ترکیب شده با کانی‌های رسی در حالت حجم ثابت محلول تزریق شده، اختلاف غلظت یون کلسیم قبل و بعد از عبور میزان یکسان از محلول سیر شده آهک، برحسب  $\text{meq/l}$  به‌عنوان شاخص میزان کل یون کلسیم ترکیب شده و تبادل شده با کانی‌های رسی و یون کلسیم آزاد شرکت کننده در واکنش‌های مربوط به گیرش ملاط آهک بین‌دانه‌ای خاک در نظر گرفته شده است. میانگین مصرف در چهار دوره عمل‌آوری مدنظر قرار گرفته و نتیجه در شکل (۷) ارائه شده است. البته کلیه نمونه‌ها در معرض حجم ثابتی از محلول سیر شده آهک قرار گرفته‌اند؛ لذا عامل متغیر، فقط دوره عمل‌آوری است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، ارتباط بسیار مشخص و مناسبی بین دوره نگهداری و میزان یون کلسیم ترکیب شده وجود دارد. روند صعودی نمودار تا دوره ۲۸ روز ادامه دارد و بعدازآن کاهش اندکی در میزان یون ترکیب شده مشاهده

به‌صورت پودر یا محلول به جهت تقویت مؤلفه‌های مقاومتی خاک و احتراز از اثرات محیط‌زیستی محتمل، انجام شده و اهداف آن با تعیین حجم بهینه محلول آهک در این پژوهش، در یک راستا است ولی در این پژوهش، افزودنی به‌صورت محلول سیر شده و به‌صورت درصدی از میزان تخلخل خاک صورت گرفته است که با روش آن‌ها متفاوت و دارای نوآوری است.

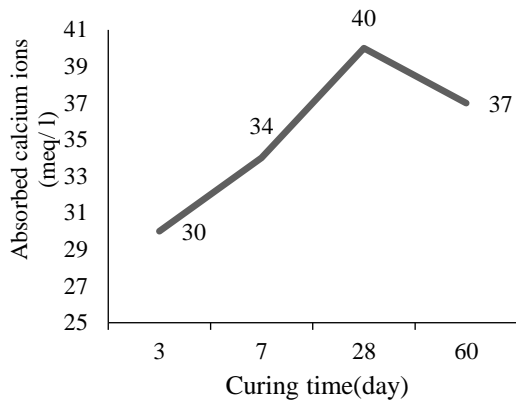


شکل ۵- رابطه میزان حجم محلول سیر شده عبور داده شده و تغییر مقاومت تک‌محوری در زمان ثابت

Fig. 5 Relationship between saturated solution passed and changing uniaxial strength at a constant time

### ۳-۲- حالت حجم ثابت و زمان نگهداشت متغیر

در این مرحله برای به‌دست آوردن زمان بهینه نگهداری نمونه‌ها، بعد از تزریق محلول سیر شده آهک، نمونه‌ها در مدل فیزیکی، تحت تأثیر حجم عبوری یکسان به‌میزان ۴۰ برابر میزان تخلخل نمونه‌ها (حجم بهینه به‌دست آمده از مرحله قبل) قرار گرفته و در دوره‌های زمانی ۳ تا ۶۰ روزه نگهداری و سپس مقاومت تک‌محوری آن‌ها اندازه‌گیری شد. نتایج روند تغییرات مقاومت تک‌محوری با زمان نگهداری متغیر برای کلیه نمونه‌ها در شکل (۶) ارائه شده است. همان‌گونه که مشخص است، مؤلفه مقاومتی از زمان نگهداری ۳ تا ۶۰ روزه یک روند افزایشی را تجربه کرده است و بیش‌ترین افزایش در زمان نگهداری ۶۰ روزه و به‌میزان ۴۰٪ نسبت به نمونه شاهد به‌دست آمد. البته افزایش مقاومت در دوره نگهداری ۲۸ روزه نزدیکی بسیاری با دوره ۶۰ روزه دارد که نشان از کفایت دوره نگهداری از ۲۸ تا ۶۰ روز را دارد، قابل‌توجه اینکه نتایج نمونه‌های ۴۲ روزه به‌دلیل تخریب نمونه‌ها در روند تزریق، استفاده نشده است. در نتایج پژوهش Yong and Ouhadi (2007) نیز زمان بهینه ۲۸ روز برای حداکثر افزایش مقاومت گزارش شده است. مدت‌زمان افزایش مقاومت خاک با استفاده از آهک و پوزولان‌های طبیعی،



شکل ۷- رابطه بین میزان یون کلسیم جذب شده و زمان نگهداشت

Fig. 7 The relationship between the amount of calcium ions absorbed and curing time

### ۳-۴- اندازه‌گیری‌های صحرایی

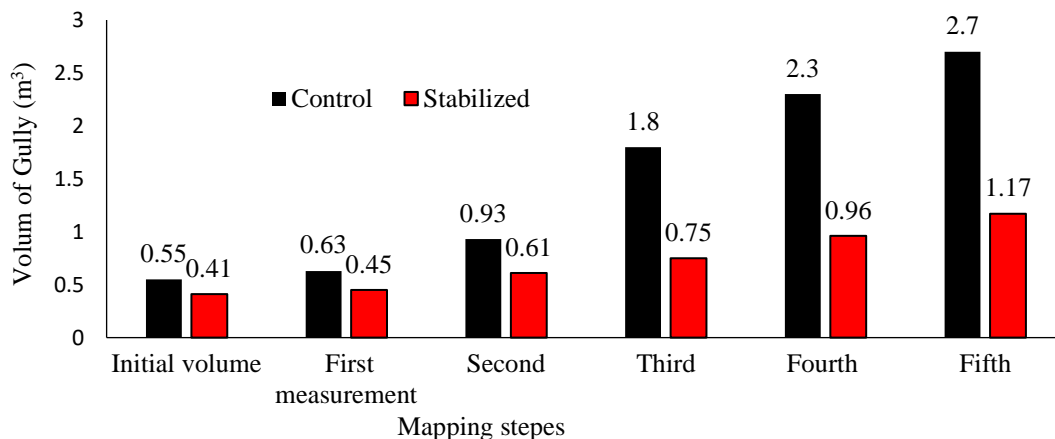
نقشه‌برداری از آبکندهای منتخب و ثبت مشخصه‌های فیزیوگرافی، با نصب نقاط مبنا در اطراف آبکند به منظور اندازه‌گیری و پایش تغییرات بعدی انجام شده است. در دوره‌های پایش شش‌ماهه، با استفاده از دوربین نقشه‌برداری لیزری و همچنین تصویربرداری هوایی از آبکند و تهیه مدل رقومی ارتفاعی آن، حجم آبکند و میزان تغییرات حجم و رشد طولی آن در محیط رقومی، پایش شد. نتایج ثبت مشخصات دو نمونه آبکند در ابتدای شروع تزریق محلول سیرشده آهک در جدول (۱) ارائه شده است.

می‌شود و روند مربوطه مجدداً ادامه پیدا می‌کند. حسب نتایج پژوهش Bell (1996) قابلیت انحلال سیلیکات‌های آلومینیوم در pH حدود ۱۲/۴ افزایش می‌یابد و منجر به افزایش سرعت واکنش‌های پوزولانی می‌شود و مقاومت خاک را در طول زمان افزایش می‌دهد. میانگین pH نمونه‌های مورد آزمایش در این پژوهش بعد از تزریق محلول سیرشده، بالا رفته و به حدود ۱۲ رسیده است و شرایط محیطی منطبق با نتایج پژوهش نامبرده است. میزان یون کلسیم ترکیب‌شده در دوره نگهداری کوتاه مدت ۳ روزه، به‌عنوان یک آستانه اولیه و حداقل میزان یون کلسیم لازم برای افزایش محسوس پارامترهای مقاومتی خاک در نظر گرفته شده است. در این پژوهش حداقل یون کلسیم لازم برای پایدارسازی خاک،  $30 \text{ meq/l}$  به‌دست آمده است؛ و مقاومت نمونه اصلاح‌شده بعد از ۶۰ روز به‌میزان ۴۰٪ نسبت به نمونه شاهد افزایش نشان داد. حداکثر یون کلسیم جذب‌شده مربوط به نمونه‌های با دوره نگهداشت ۲۸ روز است که معادل ۴۰ میلی‌گرم درلیتر به‌دست آمده است. حداکثر مصرف در دوره ۲۸ روز و عدم تغییر فاحش مصرف یون کلسیم بعد از آن می‌تواند، نشان‌دهنده حداکثر یون کلسیم موردنیاز برای دستیابی به حداکثر افزایش مقاومت باشد. همچنین امکان توصیه زمان نگهداری دوره ۲۸ روز در فرآیند افزایش مقاومت خاک آبکندها با محلول سیرشده آهک را میسر می‌سازد.

جدول ۱- مشخصات اولیه دو نمونه آبکند منتخب برای تثبیت

Table 1 Preliminary characteristics of two selected gully for stabilization

Characteristic/ Type	Length (m)	Up width (m)	Middle width (m)	Down width (m)	Depth (m)	Volume ( $\text{m}^3$ )
Control gully	1.50	0.30	0.75	0.50	0.55	0.55
Stabilized gully	1.30	0.45	0.60	0.40	0.50	0.41



شکل ۸- تغییرات حجم آبکندهای شاهد و تثبیت‌شده طی پنج مرحله نقشه‌برداری

Fig. 8 Control and stabilized gully volume changes during five mapping steps

و حجمی آبکندها است؛ در این خصوص نتایج ذیل شایان توجه است.

۱- حجم بهینه محلول سیرشده آهک، برای تزریق در آبکند-ها، به میزان ۴۰ برابر حجم تخلخل نمونه‌های خاک، به دست آمد.

۲- زمان بهینه برای تحکیم حداکثری آبکندها، بازه ۲۸ تا ۶۰ روز به دست آمد.

۳- مقایسه رشد طولی و حجمی آبکندهای تثبیت شده با آبکند شاهد، نشان داد که آبکند تثبیت شده از نظر طولی به-میزان ۵۸٪ و از نظر حجمی ۸۳٪ نسبت به نمونه شاهد کاهش رشد داشته است.

نظر به مشکلات ناشی از اجرای طرح در صحرا، در خصوص پژوهش‌های آتی، پیشنهاد می‌شود، روش‌های ساده‌تری برای وارد کردن محلول سیرشده آهک، مانند پاشش یا روش‌های ابداعی دیگری مورد آزمون قرار گیرد. همچنین توسعه آزمایش‌ها به منظور تأثیر این روش بر روی انواع مختلف خاک در مناطق مختلف آبکندی، مورد توجه قرار گیرد. در خصوص بررسی‌های زیست‌محیطی و اثرات این روش، بر روی گیاهان مناطق آبکندی، توجه لازم شود.

### سپاسگزاری

این مقاله مستخرج از بخشی از نتایج پروژه پژوهشی با عنوان "بررسی تأثیر محلول سیرشده آهک در کاهش آهنگ رشد خندق‌ها" با شماره پروژه: ۹۲۱۲۸-۲۹-۲ است که در پژوهشکده حفاظت خاک و آب‌خیزداری به انجام رسیده است. بدین وسیله از همراهی و مساعدت مسئولین محترم پژوهشکده تشکر می‌شود.

### دسترسی به داده‌ها

داده‌های این پژوهش متعلق به پژوهشکده حفاظت خاک و آب‌خیزداری است و پس از دفاع و اخذ شماره فروست، از انتشارات سازمان متبوع قابل دریافت است.

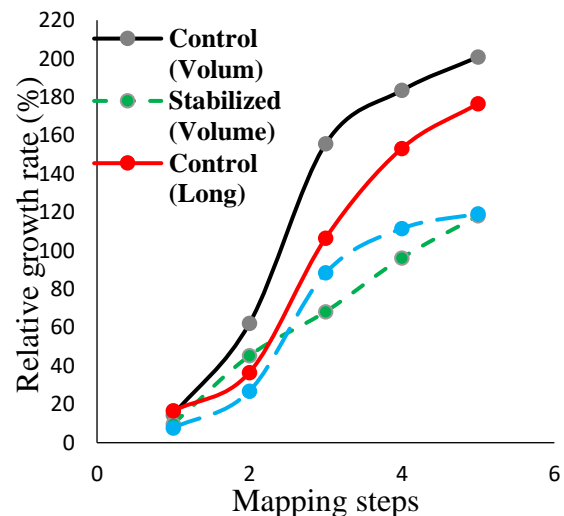
### تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ تضاد منافی در رابطه با نویسندگی و یا انتشار این مقاله ندارند.

### ۳-۵- مشخصات آبکند پس از تزریق و گذشت زمان نگهداشت

نتایج ثبت و پایش تغییرات حجم آبکندها و پیشروی رأس آن‌ها، نسبت به نقطه مبنا، پس از تزریق محلول سیرشده آهک و گذشت دوره تثبیت و نگهداری، در شکل (۸) و تغییرات نسبی حجم دو نمونه آبکند در شکل (۹) ارائه شده است. حجم آبکند تثبیت شده از  $0.41M^3$  به حجم  $1/17M^3$  و رشد  $2/8$  برابری را تجربه کرده است و در برابر حجم آبکند شاهد، از  $0.55$  به  $2/7 m^3$  رسیده و رشد  $4/9$  برابری را نشان داده است.

منحنی تجمعی تغییرات نسبی رشد طول و حجم آبکند در شکل (۹) حاکی از این است که آبکند تثبیت شده، رشد تجمعی  $118\%$  و آبکند شاهد، رشد تجمعی  $201\%$  را نسبت به اندازه اولیه نشان می‌دهد. در مقایسه نسبی آن‌ها میزان کاهش  $83\%$  رشد حجمی آبکند تثبیت شده، نسبت به آبکند شاهد، قابل توجه است. منحنی تجمعی تغییرات رشد طولی رأس آبکند نسبت به نقطه مبنا، میزان کاهش رشد طولی آبکند تثبیت شده، نسبت به آبکند شاهد، برابر با  $58\%$  است.



شکل ۹- منحنی تجمعی تغییرات رشد نسبی طول و حجم آبکند  
Fig. 9 Cumulative curve of relative growth changes of gully length and volume

### ۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، تأثیر محلول سیرشده آهک بر کاهش رشد طولی و حجمی آبکندها، طی دو سری آزمون آزمایشگاهی و عملیات صحرائی مورد بررسی قرار گرفت. جمع‌بندی نتایج، نشان‌دهنده قابلیت این روش در کنترل و کاهش رشد طولی

## References

- Ahadi-Ali, V. (2007). Stabilization of unstable masses by adding lime saturated solution. Master Thesis, Islamic Azad University, Central Tehran Branch., 169 pp. [In Persian].
- Al-Mukhtar, M., Lasledj, A. and Alcover, J. F. (2010). Behaviour and mineralogy changes in lime-treated expansive soil at 20 C. *Appl. Clay Sci.*, 50(2), 191-198. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2010.07.023>
- Alvandkuhi, H. (2006). Increasing the shear strength of soil in a slippery natural mass using wells containing water and lime, Master Thesis in Soil and Foundation Mechanics, Islamic Azad University, Tehran Branch, Faculty of Engineering., 130 pp. [In Persian].
- Babu, N. and Poulouse, E. (2018). Effect of lime on soil properties: A review. *Int. Res. J. Eng. Technol.*, 5(11), 606-610. <https://www.irjet.net/archives/V5/i11/IRJET-V5I11119.pdf>
- Bayat, R. and Rostami, M. (2016). Investigation of the gully erosion development and providing approaches for conflict with it (case study: Aro Watershed). *Ext. Develop. Watershed Manage.*, 4(14), 43-51 [In Persian]. <http://www.wmji.ir/>
- Bell, F. G. (1996). Lime stabilization of clay minerals and soils. *Eng. Geol.*, 42(4), 223-237. [https://doi.org/10.1016/0013-7952\(96\)00028-2](https://doi.org/10.1016/0013-7952(96)00028-2)
- Bozbey, I. and Garaisayev, S. (2010). Effects of soil pulverization quality on lime stabilization of an expansive clay. *Environ. Earth Sci.*, 60(6), 1137-1151. <https://doi.org/10.1007/s12665-009-0256-5>
- Davoodi, M. H. (2010). Investigating the possibility of stabilizing crepey weather slopes by lime saturated solution trench method (case study of Eastern Dunblade Massif), *Soil Conserv. Watershed Manage. Res. Inst.*, 140 pp. [In Persian].
- Davoodi, M. H. and Kadivar, A. (2011). Evaluation of improvement of mechanical resistance of fine soils due to the intrusion of calcium ions by means of electrokinetic method. *Eng. Geol.*, 4(1-2), 47-60 [In Persian].
- De Baets, S., Poesen, J., Knappen, A., Barberá, G. G. and Navarro, J. A. (2007). Root characteristics of representative Mediterranean plant species and their erosion-reducing potential during concentrated runoff. *Plant Soil*, 294(1), 169-183. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11104-007-9244-2>
- Farkas, J. (2021). Investigation and Stabilization of a Sliding Hillside Proc. of Int. Symp. On slope stability engineering, Japan, 2, 931-935. <https://www.taylorfrancis.com/chapters/edit/10.1201/9780203739600-50>
- Farzaneh, O. and Mossadegh, A. (2011). Experimental analysis to evaluate the effectiveness of lime and non-traditional additives subgrade soil stabilization of Kerman-Zangiabad Road. *Civil engineering infrastructures journal (CEIJ) (Journal of faculty of engineering)*, 45(1), 23-33. <https://www.sid.ir/en/journal/ViewPaper.aspx?id=253217> [In Persian].
- Fatehi, B. and Hassani, A. (2006). Presenting the optimal method of stabilizing swampy soils in South Pars region, 7th International Congress of Civil Engineering, Tehran, Tarbiat Modares University, Faculty of Civil Engineering [In Persian].
- Harichane, K., Ghrici, M. and Kenai, S. (2011). Effect of curing time on shear strength of cohesive soils stabilized with combination of lime and natural pozzolana, *Int. J. Civil Eng.*, 90-96. <https://www.sid.ir/en/Journal/JournalList.aspx?ID=293>
- Hazelton, P. and Murphy, B. (2016). Interpreting soil test results: What do all the numbers mean? CSIRO publishing. 200 pp.
- Ibtehaj, T. J., Mohd, R. T., Zaid, H. M. and Khan, T. A. (2014). Soil stabilization using lime: advantages, disadvantages and proposing a potential alternative. *Research J. Appl. Sci. Eng. Technol.*, 8(4), 510-520. <https://www.airitilibrary.com/Publication/aIDetailedMesh?docid=20407467-201407-201507080015-201507080015-510-520>
- Indaratna, B. (1996). Utilization of lime, slag and fly ash for improvement of a colluvial soil in new south wales, Australia. *Geotech. Geol. Eng.*, 14, 169-191. <https://link.springer.com/article/10.1007/BF00452946>
- Karimi, M. (1998). Investigation of effective factors on moat erosion and introduction of





- the most appropriate ways to control it in Zahan Ghaen region. Master Dissertation, Irrigation Facilities, Tarbiat Modares University., 192 pp. [In Persian].
- Kazemi, R. (2012). Investigation of application of saturation lime solution in landslide control. Final report of the research project. Soil Conserv. Watershed Manage. Res. Instit., 120 pp [In Persian].
- Kumar, T. A., Raheena, M., Robinson, R. G. and Thyagaraj, T. (2020). A rapid method of determination of swell potential and swell pressure of expansive soils using constant rate of strain apparatus. *Geotech. Test. J.*, 43(6), 1368-1378.  
<https://www.astm.org/gtj20180414.html>
- Martinaz-Casansnovas, J. A., Garcia-Hernandez, D. and Ramos, M. C. (2007). Does vegetation cover suppose gully erosion stabilization? Casali, J., Gimenez, R., (Eds.), 2007, Progress in gully erosion research, IV International Symposium on Gully Erosion, (upna) public University of Navarre, 78-79.  
<https://hdl.handle.net/2454/27414>
- Peyrowan, H. R., Jafari-Ardakani, A., Ghayoumiyan, J. and Shariat-Jafari, M. (2005). Improvement and stabilization of marl deposits to control erosion and runoff, 4th Iranian Conference on Engineering Geology and Environment, Tehran [In Persian].
- Pui Ling, N. (2005). Determination of optimum concentration of lime solution for soil stabilization. M.Sc. Dissertation, Universiti Teknologi Malaysia, Faculty of Civil Engineering., 120 pp.  
<http://eprints.utm.my/id/eprint/4219/1/NgPuiLingMFKA2005.pdf>
- Qabezlu, S. (2001). Improving the mechanical properties of marl soil using pozzolan and lime. Master Dissertation, Tarbiat Modares University, Faculty of Engineering., 220 pp. [In Persian].
- Shoaei, Z., Peyrowan, H., Imam-Jome S. R. and Ahmadi, P. (2017). Investigation of the effect of lime saturation solution on soil divergence changes through pinhole experiment, final research project report, code: 94121-29-29-29-29, Soil Conserv. Watershed Manage. Res. Inst., 83 pp. [In Persian].
- Sivapullaiah, P. V., Sridharan, A. and Ramesh, H. N. (2000). Strength behavior of lime-treated soils in the presence of sulphate. *Canadian Geotech. J.*, 37, 1358-1367.  
<https://doi.org/10.1139/t00-052>.
- Soufi, M. (2007). Understanding the factors affecting the creation and expansion of gully from the strategic plan understanding the factors affecting the creation of erosion and sediment production. *Soil Conserv. Watershed Manage. Res. Inst.*, 32 pp [In Persian].
- Yong, R. N. and Ouhadi, V. R. (2007). Experimental study on instability of bases on natural and lime/cement-stabilized clayey soils. *Appl. Clay Sci.*, 35(3-4), 238-249.  
<https://doi.org/10.1016/j.clay.2006.08.009>.

### How to cite this paper:

Kazemi, R., Bayat, R., Shoaei, Z. and Emam-Jomeh, S. R. (2022). Controlling the growth rate of gullies using lime saturated solution. *Environ. Water Eng.*, 8(3), 669-681. DOI: 10.22034/JEWE.2021.312162.1655

