



## Investigation of Landfill Stability Under Unsaturated Conditions Using the Concept of Suction Stress

Mohammad Reza Motahari<sup>1✉</sup> , Maryam Dehaqin<sup>2</sup> 

1. Corresponding Author, Civil Engineering Dept., Faculty of Engineering, Arak University, Arak, Iran. E-mail: [m-motahari@araku.ac.ir](mailto:m-motahari@araku.ac.ir).

2. Department, Faculty of Engineering, Arak University, Arak, Iran. E-mail: [Maryam.dehaqin@gmail.com](mailto:Maryam.dehaqin@gmail.com)

### Article Info

**Article type:**  
Research Article

**Article history:**

**Received**

2024-03-03

**Received in revised form**

2024-04-26

**Accepted**

2024-05-30

**Available online**

2024-06-26

**Keywords:**

Geo-studio,  
Reinforcement, Unsaturated  
soil,  
Landfill,  
Slope stability

### ABSTRACT

As we know, landfills contain large amounts of various pollutants, and any instability or destruction on the landfill slope can lead to significant human and financial losses. In such conditions, pollution can easily spread in the environment and lead to an ecological disaster. Therefore, the sustainability analysis of the landfill slope is of great importance. Since, due to climatic conditions, the amount of rainfall and the level of groundwater, soils are generally in an unsaturated state, in this article, the sustainability of the landfill is investigated using the unsaturated theory by considering the concept of suction stress and coding in C# in the Geo-studio software environment. To properly model and design the landfill, the properties of the soil materials of the covering parts of the landfill surface and the impermeable barriers at the bottom were considered. The safety factor of the landfill slope in the dry state was obtained, then the changes in the safety factor at different volumetric moisture percentages for the unsaturated surface and bottom soils of the landfill were calculated, and the effect of reinforcing the clay layers of the cover and bottom of the landfill on the slope stability was also investigated. The results obtained indicate that the safety factor in the unsaturated state compared to the dry state increases significantly; also, in the area of unsaturated soils, with a decrease in the volumetric moisture percentage, the safety factor increases. The notable result is that in unsaturated soils, the safety factor does not necessarily increase with the occurrence of reinforcement.

**Cite this article:** Motahari, M., Dehaqin, M. (2024) Investigating of landfill stability under unsaturated conditions using the concept of suction stress. *Advanced Modeling in Civil Engineering* 1(1), 95-105

DOI: 10.22126/amcen.2024.3290



© The Author(s).

DOI: 10.22126/amcen.2024.3290

Publisher: Razi University.

## Introduction

Today, population growth, urbanization, and industrialization have led to an increase in the amount of waste produced. The large volume of waste, environmental pollution through its spread, the creation of unpleasant odors and appearances, and the possibility of transmitting various diseases in humans and other living beings have led to the introduction of various strategies such as recycling, incineration, and landfill disposal to control the issues above. Among these, landfill disposal is more popular due to economic reasons and ease of implementation. In the study by Fityus et al. [2] on preventing the spread of landfill pollution to the surrounding environment through the use of unsaturated soil layers, it was determined that due to the critical role of moisture content in pollutant transfer, the use of unsaturated layers could prevent the transfer and spread of pollution. Liu et al. [3] also examined the long-term settlement of unsaturated municipal landfills by presenting a theoretical model and comparing it with a case study. In a comparative study conducted by Song et al. [7] on suction stress in silt and sand, the results, along with the estimation of the suction stress curve using the soil-water characteristic curve, showed that the suction stress changes in silty soils are much more significant than in sandy soils. Currently, the sustainability of landfills is generally calculated and controlled in the dry state, but this assumption needs to be more generally correct. In this article, an attempt has been made to investigate the effects of the unsaturated state on the safety factor of landfill stability and to examine the number of changes in the safety factor over the long term and during the reinforcement process in the clay layers covering the bottom of the landfill.

## Method

Until now, the concept of unsaturated soil has been studied through two basic approaches. In the first approach, used by Fredlund et al. [8], and Fredlund and Rahardjo [9], two components of stress are defined: net stress and matrix suction, which act as two independent components [8 and 9]. In the second approach, which has recently been the focus of researchers such as Lu and Likos [10], Khalili and Khabbaz [11], the effective stress method is used, which employs a parameter called suction stress in its calculation. This is used with the help of the following relationships:

$$\sigma' = (\sigma - u_a) - \sigma^s \quad (1)$$

$$\sigma^s = -\frac{S_e}{\alpha} (S_e^{\frac{n}{1-n}} - 1)^{\frac{1}{n}} \quad (2)$$

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (3)$$

$$\tau_f = c' + \sigma' \tan \varphi' \quad (4)$$

$$\Delta u_a = \left\{ \frac{\Delta n}{[1 - S_0]n_0 + hS_0n_0 - \Delta n} \right\} \bar{u}_{a0} \quad (5)$$

$$\Delta e = C_c \times \log(\sigma'/\sigma'_e) \quad (6)$$

In the present article, numerical modeling using Bishop's method has been employed for the static stability analysis of slopes. The next step involves selecting a structural model for the materials and assigning it to the different parts. Finally, it becomes possible to analyze the slope stability and obtain the safety factor by determining the water level. A model has been developed using the C# programming language in a software environment to study the behavior

of unsaturated soil using the concept of suction stress. This model is then used for stability analysis and assigning shear parameters to the materials in the new structural model.

## Results

For the design of a landfill, it is necessary to comply with the operational guidelines for establishing and managing sanitary landfills for municipal solid waste. These guidelines say landfill capacity should not be completed for at least five years. The required waste volume per person per year can be obtained from the following relationship:

$$V = 1.25 \left[ \frac{R}{D} \left( 1 - \frac{P}{100} \right) \right] \quad (7)$$

This relationship helps estimate the total waste volume the landfill needs to accommodate over a given period, ensuring sufficient capacity for at least five years.

In the relationship above, the annual waste generation per person is in kilograms, the density is in kilograms per cubic meter, and the volume reduction is due to compaction. Waste's characteristics can vary greatly depending on its type. In the present article, the landfill and its related parameters are designed to dispose of municipal solid waste (MSW). Assuming a daily waste generation of 0.7 kilograms per person and a 30% reduction in density due to compaction, with a waste density of 1100 kilograms per cubic meter, the annual waste volume per person is approximately 0.203 cubic meters. Considering a population of 400,000 and a 15-year lifespan for the landfill, the required area is approximately 10 to 12 hectares with a height of about 8 to 10 meters; one-third to one-half of this height is above ground level, and the rest is below ground level. Furthermore, according to the guidelines, the slope of the final cover should be between 5% to 33%, and the landfill walls should be between 25% to 33%. Additionally, there must be a minimum distance of 1.5 meters between the bottom of the landfill and the groundwater level.

## Conclusions

By examining the slope stability of the landfill using the limit equilibrium method and the concept of suction stress in both pre-and post-reinforcement conditions, the following results were obtained:

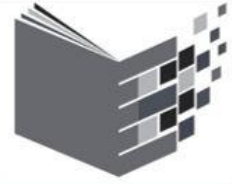
1. A higher safety factor is obtained than in the dry state because the landfill is unsaturated. Therefore, the landfill can be constructed with a steeper slope or greater height in this condition, which may facilitate more accessible site selection.
2. The safety factor does not necessarily increase after reinforcement for unsaturated soils. Instead, the increase or decrease in the safety factor depends on the moisture content. Generally, at high moisture content, the safety factor increases after reinforcement. This could be due to increased water pressure and air permeability differences, resulting in increased suction stress. At low-volume moisture contents, no change in the safety factor is observed after reinforcement, as practically no reinforcement may occur due to the low water pressure.

## Author Contributions

All authors participated in writing and revising the article.

## Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.



## بررسی پایداری مدفن زباله در شرایط غیر اشباع با استفاده از مفهوم تنش مکشی

محمد رضا مطهری<sup>۱</sup>، مریم دهاقین<sup>۲</sup>

۱. نویسنده مسئول، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران. رایانامه: [m-motahari@araku.ac.ir](mailto:m-motahari@araku.ac.ir)

۲. گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک، اراک، ایران. رایانامه: [Maryam.dehaqin@gmail.com](mailto:Maryam.dehaqin@gmail.com)

### چکیده

### اطلاعات مقاله

همانطور که می‌دانیم مدفن زباله حاوی مقادیر زیادی از آلاینده‌های گوناگون است و ایجاد هرگونه ناپایداری و تخریب در شیب مدفن خسارات جانی و مالی زیادی به همراه دارد. در این شرایط آلودگی به راحتی می‌تواند در محیط گسترش یافته و منجر به ایجاد یک فاجعه‌ی زیست محیطی گردد. بنابراین بررسی پایداری شیب مدفن زباله از اهمیت بالایی برخوردار است. از آنجا که با توجه به شرایط اقلیمی، میزان بارش و تراز آب زیرزمینی، خاک‌ها عموماً در حالت غیراشباع می‌باشند، در این مقاله با در نظر گرفتن تئوری غیر اشباع با استفاده از مفهوم تنش مکشی و کد نویسی به زبان C# در محیط نرم افزار Geo-studio پایداری مدفن زباله بررسی گردید. به منظور مدل‌سازی و طراحی صحیح مدفن زباله، خواص مصالح حاکی قسمت‌های پوشاننده سطح مدفن و موانع نفوذ ناپذیر در کف مورد توجه قرار گرفت. ضریب اطمینان پایداری شیب مدفن در حالت خشک به دست آمد، سپس تغییرات ضریب اطمینان در درصد رطوبت‌های حجمی مختلف برای خاک غیراشباع سطح و کف مدفن محاسبه شد و تأثیر تحکیم لایه‌های رسی پوشش و کف مدفن بر پایداری شیب مدفن نیز مورد بررسی قرار گرفت. نتایج به دست آمده حاکی از آن است که ضریب اطمینان حالت غیراشباع در مقایسه با حالت خشک به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد، همچنین در حیطه خاک‌های غیراشباع با کاهش درصد رطوبت حجمی ضریب اطمینان بیشتر می‌شود. نتیجه‌ی شایان ذکر آن است که در خاک‌های غیراشباع لزوماً با رخ دادن عمل تحکیم، ضریب اطمینان پایداری افزایش نمی‌یابد. نتیجه‌ی شایان ذکر آن است که در خاک‌های غیراشباع لزوماً با رخ داد عمل تحکیم، ضریب اطمینان پایداری افزایش نمی‌یابد.

نوع مقاله:

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت:

۱۴۰۲/۱۲/۱۳

تاریخ بازنگری:

۱۴۰۳/۰۲/۰۷

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۳/۰۳/۱۰

تاریخ انتشار:

۱۴۰۳/۰۴/۰۶

کلیدواژه‌ها:

پایداری شیروانی،

مدفن زباله،

خاک غیراشباع،

تحکیم

Geo-studio

استناد: مطهری، محمد رضا؛ دهاقین، مریم. (۱۴۰۳). بررسی پایداری مدفن در شرایط غیر اشباع با استفاده از مفهوم تنش مکشی. *مجله مدلسازی*

پیشرفته در مهندسی عمران، ۱ (۱)، ۹۵-۱۰۵.

DOI: 10.22126/amcen.2024.3290

ناشر: دانشگاه رازی.



© نویسندگان.

## ۱. مقدمه

در صورتی که چگالی زباله‌ها کم باشد و مدفن در حالت اشباع قرار گیرد، فشار آب حفره‌ای افزایش یافته و نهایتاً منجر به تخریب شیب مدفن می‌گردد. در بررسی‌های گیری<sup>۴</sup> و ردی<sup>۵</sup> [۵] پایداری مدفن در زمان ورود شیرابه مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت. آنها نشان دادند که در زمان ورود شیرابه به مدفن، به علت تولید فشارهای منفذی بیش‌ازحد، ضریب اطمینان شیب به‌طور قابل‌توجهی کاهش یافته و پایداری شیب به خطر می‌افتد. باتالی<sup>۶</sup> و همکاران [۶] با مقایسه مدل‌سازی عددی و مقایسه آن با مطالعه موردی جهت بررسی پایداری شیب مدفن در حالت‌های اشباع و غیراشباع به این نتیجه رسیدند که مدل‌سازی نرم افزاری نتایجی نزدیک به واقعیت دارد. عموماً در ساخت مدفن از لایه‌هایی با جنس‌های متفاوت استفاده می‌شود. بنابراین باید به تأثیر غیراشباع بودن هر لایه بر پایداری مدفن توجه نمود. در مقایسه‌ای که توسط سانگ<sup>۷</sup> و همکاران [۷] بر روی تنش مکشی در سیلت و ماسه انجام شد، نتایج با تخمین منحنی مشخصه‌ی تنش مکشی با استفاده از منحنی مشخصه‌ی خاک-آب نشان داد که میزان تغییرات تنش مکشی در خاک‌های سیلتی بسیار بیشتر از خاک‌های ماسه‌ای است. در حال حاضر عموماً محاسبه و کنترل پایداری مدفن در حالت خشک انجام می‌گیرد لیکن این فرض به طور کلی درست نمی‌باشد. در این مقاله سعی شده است تأثیرات حالت غیراشباع بر ضریب اطمینان پایداری مدفن مورد بحث قرار گیرد و میزان تغییرات ضریب اطمینان در بلندمدت و طی عمل تحکیم در لایه‌های رسی پوشش کف مدفن، بررسی شود.

۲. مفهوم تنش مکشی<sup>۸</sup> و تنش مؤثر

تاکنون مفهوم غیراشباع بودن در خاک توسط دو رویکرد اساسی مورد بررسی قرار گرفته است. در رویکرد اول که توسط فردلاندا<sup>۹</sup> و همکاران

امروزه رشد جمعیت، توسعه‌ی شهرنشینی و صنعتی شدن موجب افزایش میزان زباله‌های تولیدی شده است. حجم زیاد زباله‌ها، آلوده شدن محیط از طریق انتشار آن‌ها، ایجاد بو و نمای نامطلوب علاوه بر امکان انتقال بیماری‌های گوناگون در انسان‌ها و سایر جانداران موجب شده است تا راهکارهای متنوعی نظیر بازیافت، سوزاندن و دفن کردن زباله جهت کنترل موارد فوق‌الذکر ارائه گردد. در این بین دفن زباله به دلایل اقتصادی و سهولت اجرا از اقبال بیشتری برخوردار است. طبق شیوه‌نامه‌ی اجرایی احداث و راهبری محل دفن بهداشتی پسماندهای عادی شهری [۱]، جهت جلوگیری از منتقل شدن آلودگی به آب‌های زیرزمینی و دامنه‌ی پائین‌دست می‌بایست طراحی مدفن با استفاده از چندلایه خاک با جنس‌های متفاوت در کف و پوشش مدفن انجام شود، به‌گونه‌ای که حتی‌الامکان با استفاده از خاک رس، لایه‌ها و لوله‌های زهکش، مدفنی ایزوله ایجاد گردد. همچنین لازم است جهت کنترل انتشار آلودگی به آب‌های زیرزمینی رعایت حداقل فاصله‌ی ساخت مدفن از سطح آب زیرزمینی نیز مورد توجه قرار گیرد. در مطالعه فیتیوس<sup>۱</sup> و همکاران [۲] روی جلوگیری از انتشار آلودگی مدفن به محیط مجاور از طریق استفاده از لایه‌های خاکی غیراشباع، مشخص گردید به دلیل نقش مهم میزان درصد رطوبت در انتقال آلاینده، با استفاده از لایه‌های غیراشباع می‌توان از انتقال و انتشار آلودگی جلوگیری کرد. لیو<sup>۲</sup> و همکاران [۳] نیز نشست بلند مدت مدفن زباله‌های شهری غیراشباع را با ارائه‌ی مدلی تئوری و مقایسه آن با یک مطالعه موردی بررسی قرار دادند. کولش<sup>۳</sup> [۴] با استفاده از مطالعه‌ی یک مدفن زباله‌ی شهری تخریب شده در فیلیپین نشان داد که

<sup>6</sup> Batali

<sup>7</sup> Song

<sup>8</sup> Suction stress

<sup>9</sup> Fredlund

<sup>1</sup> Fityus

<sup>2</sup> Liu

<sup>3</sup> Koelsch

<sup>4</sup> Giri

<sup>5</sup> Reddy

زهکشی شده می‌باشد. جهت تحلیل تحکیم در خاک‌های غیراشباع نیز با توجه به وجود دو فاز سیال (آب) و هوا در خاک و بررسی تغییرات فشار منفذی در این دو فاز، تغییر فشار آب و هوای منفذی یکسان بوده و از رابطه (۵) برای محاسبه تغییرات فشار هوای منفذی استفاده می‌شود و این امر منافاتی با استفاده از مفهوم تنش موثر در خاک‌های غیر اشباع ندارد [۹].

$$\Delta u_a = \left\{ \frac{\Delta n}{[1 - S_0]n_0 + hS_0n_0 - \Delta n} \right\} \bar{u}_{a0} \quad (5)$$

در رابطه (۵)،  $\Delta u_a$  تغییرات فشار هوای منفذی،  $\Delta n$  تغییرات پوکی،  $S_0$  درصد اشباع اولیه،  $n_0$  پوکی اولیه،  $\bar{u}_{a0}$  فشار هوای منفذی اولیه و  $h$  ثابت هنری<sup>۱۳</sup> است که معمولاً ۰/۰۲ در نظر گرفته می‌شود. برای به دست آوردن  $\Delta n$  ابتدا می‌بایست  $\Delta e$  (تغییرات نسبت تخلخل) را از رابطه (۶) محاسبه نمود.

$$\Delta e = C_c \times \log(\sigma' / \sigma'_0) \quad (6)$$

در رابطه فوق،  $C_c$  ضریب فشردگی،  $\sigma'$  تنش مؤثر لایه‌های واقع بر لایه‌ی رس و  $\sigma'_0$  تنش مؤثر اولیه‌ی لایه‌ی رس می‌باشد. باید توجه داشت که در رابطه اخیر برای به دست آوردن تنش مؤثر از رابطه‌ی (۱) استفاده می‌شود و سپس تغییرات پوکی مطابق رابطه (۷) محاسبه می‌گردد [۱۳].

$$\Delta n = \frac{\Delta e}{1 + \Delta e} \quad (7)$$

برای محاسبه‌ی  $S_0$  در رابطه (۵) نیز از رابطه زیر استفاده می‌شود.

$$S_0 = \frac{(w \times G_s)}{e_0} \quad (8)$$

در معادله‌ی فوق  $e_0$  نسبت تخلخل و  $G_s$  چگالی دانه‌ها می‌باشد. با داشتن پارامترهای فوق و قرار دادن پارامترها در رابطه (۵) تغییرات فشار هوای منفذی در حالت غیر اشباع به دست می‌آید.

و همچنین فردلانند و رهااردجو<sup>۱۰</sup> مورد استفاده قرار گرفته است، دو مؤلفه‌ی تنش خالص  $(\sigma - u_a)$  و مکش ماتریسی  $(u_a - u_w)$  تعریف می‌شوند که به صورت دو مؤلفه‌ی مستقل عمل می‌کنند [۸ و ۹]. در رویکرد دوم که در چند سال اخیر مورد توجه محققانی همچون لو<sup>۱۱</sup> و لیکس<sup>۱۲</sup>، خلیلی و خباز قرار گرفته، استفاده از روش تنش مؤثر می‌باشد، که در محاسبه آن از پارامتری به نام تنش مکشی استفاده می‌شود [۱۰ و ۱۱].

$$\sigma' = (\sigma - u_a) - \sigma^s \quad (1)$$

در رابطه فوق  $\sigma'$  تنش مؤثر،  $u_a$  فشار هوای حفره‌ای و  $\sigma^s$  تنش مکشی نامیده می‌شود که می‌توان بسط آن را به صورت زیر نوشت [۱۰].

$$\sigma^s = -\frac{S_e}{\alpha} (S_e^{\frac{n}{1-n}} - 1)^{\frac{1}{n}} \quad (2)$$

در رابطه اخیر،  $\alpha$  عکس فشار هوا و  $n$  پارامتر مربوط به عرض توزیع اندازه‌ی منفذ خاک و  $S_e$  درجه اشباع مؤثر می‌باشد و به صورت زیر تعریف می‌شود [۱۲].

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (3)$$

در رابطه (۳)،  $\theta$  درصد رطوبت حجمی،  $\theta_s$  درصد رطوبت حجمی اشباع و  $\theta_r$  درصد رطوبت حجمی باقی‌مانده می‌باشد. لازم به یادآوری می‌باشد که استفاده از رویکرد تنش مؤثر هم زمان با کاهش پیچیدگی‌ها، سرعت محاسبات را افزایش داده و از دقت بالایی برخوردار است. در مقاله حاضر نیز جهت محاسبه تنش مؤثر از این روش استفاده می‌شود. بنابر مطالعات انجام یافته، تنش برشی در خاک‌های غیر اشباع با استفاده از ایده تنش مؤثر و کاربرد مفهوم تنش مکشی به صورت زیر تعریف می‌شود [۱۰].

$$\tau_f = c' + \sigma' \tan \phi' \quad (4)$$

در معادله (۴)،  $\tau_f$  تنش برشی گسیختگی،  $c'$  چسبندگی زهکشی شده،  $\sigma'$  تنش مؤثر و  $\phi'$  زاویه‌ی اصطکاک داخلی در شرایط

<sup>12</sup> Likos

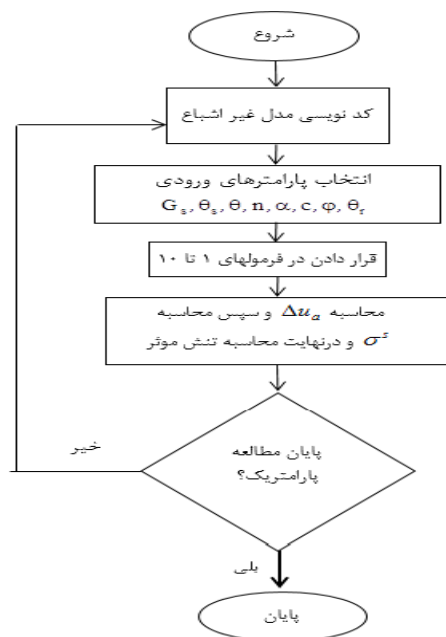
<sup>13</sup> Henry

<sup>10</sup> Rahardjo

<sup>11</sup> Lu

### ۳. تخمین پارامترهای مدل‌های سختی برشی اولیه

در رابطه (۹)،  $R$  وزن تولیدی پسماند هر نفر در سال برحسب کیلوگرم،  $D$  چگالی برحسب کیلوگرم بر مترمکعب و  $P$  کاهش حجم در اثر تراکم است. مشخصات زباله با توجه به نوع آن بسیار متفاوت می‌باشد، در مقاله حاضر مدفن مورد نظر و پارامترهای مربوط به آن برای دفن زباله‌های شهری MSW طراحی شده نفر و کاهش در تراکم ۳۰ درصدی و چگالی ۱۱۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب حجم زباله، ۰/۲۰۳ مترمکعب به ازای هر نفر در سال به دست می‌آید. با در نظر گرفتن جمعیت ۴۰۰۰۰۰ نفری و مدت عمر ۱۵ ساله برای مدفن مساحتی حدود ۱۰ تا ۱۲ هکتار ارتفاعی حدود ۸-۱۰ متر برای مدفن نتیجه می‌شود؛ که بین یک دوم تا یک سوم ارتفاع آن روی سطح زمین و مابقی ارتفاع زیر سطح زمین قرار می‌گیرد. هم‌چنین طبق شیوه‌نامه می‌بایست شیب پوشش نهایی بین ۵ تا ۳۳ درصد و شیب دیواره‌های کف مدفن بین ۲۵ تا ۳۳ درصد باشد. به‌علاوه لازم است حداقل فاصله‌ی ۱/۲ متری بین کف مدفن و تراز آب زیرزمینی واقع گردد. در شکل (۲) مقطع هندسی مدفن مهندسی مورد مطالعه نشان شده است.



شکل ۱. فلوچارت محاسبه تنش مکشی

در مقاله حاضر، پایداری شیب مدفن با مطالعه مدل‌های دو بعدی در حالت کرنش مسطح و با استفاده از روش تعادل حدی توسط نرم افزار [۱۴] Geo-Studio بررسی شده است. این نرم‌افزار شامل زیر منوهای متفاوتی است که با توجه به نوع تحلیل مد نظر کاربر، قابل دسترسی می‌باشند. به طور خلاصه باید گفت که در این نرم‌افزار ابتدا هندسه‌ی مدل به صورت صحیح ترسیم شده و سپس با استفاده از روابط تحلیلی ارائه شده در این مقاله و با بهره گیری از روش بیشاپ<sup>۱۴</sup> تحلیل پایداری انجام می‌گیرد. این نرم افزار قابلیت تحلیل پایداری به روش های بیشاپ، فلینوس<sup>۱۵</sup>، شده است. مرحله‌ی بعد، انتخاب مدل ساختاری برای مصالح و اسپنسر<sup>۱۶</sup> و سایر روش های تعادل حدی را دارد. در مقاله حاضر از روش بیشاپ در تحلیل استاتیکی پایداری شیروانی استفاده اختصاص آن به قسمت‌های مختلف می‌باشد. در نهایت با مشخص شدن تراز آب، امکان تحلیل پایداری شیب و به دست آوردن ضریب اطمینان فراهم می‌گردد. برای بررسی رفتار خاک غیراشباع با استفاده از مفهوم تنش مکشی، با استفاده از زبان برنامه نویسی C# در محیط نرم افزار مدلی برای این امر توسعه یافته و سپس جهت تحلیل پایداری و تخصیص پارامترهای برشی مصالح از مدل ساختاری جدید استفاده می‌شود. فلوچارت برنامه نویسی این مدل در نرم افزار Geo-Studio مطابق شکل (۱) می‌باشد.

### ۴. مطالعه‌ی پارامتری

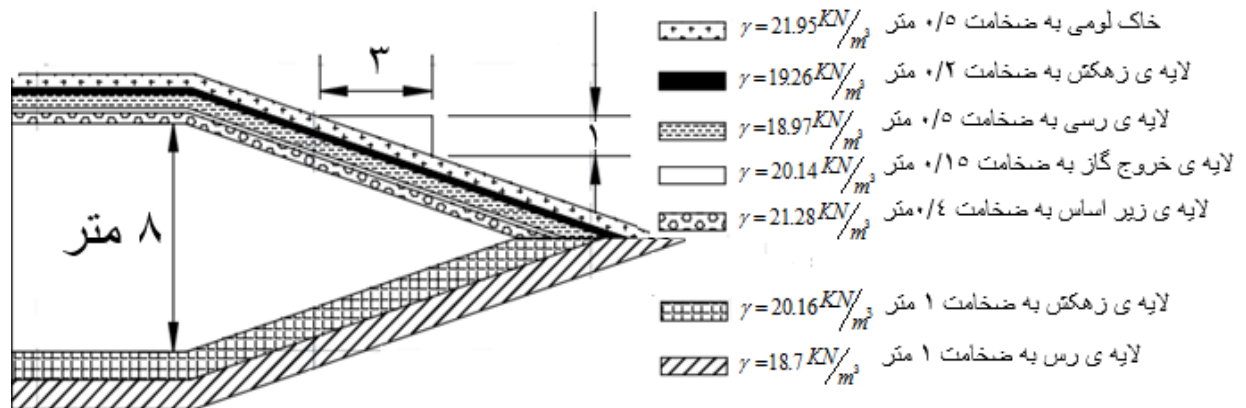
جهت طراحی مدفن، می‌بایست مطابق شیوه‌نامه اجرایی احداث و راهبری محل دفن بهداشتی پسماندهای عادی شهری عمل نمود. طبق این آئین‌نامه [۱] لازم است حداقل تا پنج سال گنجایش مدفن تکمیل نگردد. حجم موردنیاز زباله برای هر نفر در سال از رابطه زیر به دست می‌آید.

$$V = 1,25 \left[ \frac{R}{D} \left( 1 - \frac{P}{100} \right) \right] \quad (9)$$

<sup>16</sup> Spencer

<sup>14</sup> Bishop

<sup>15</sup> Fellenius



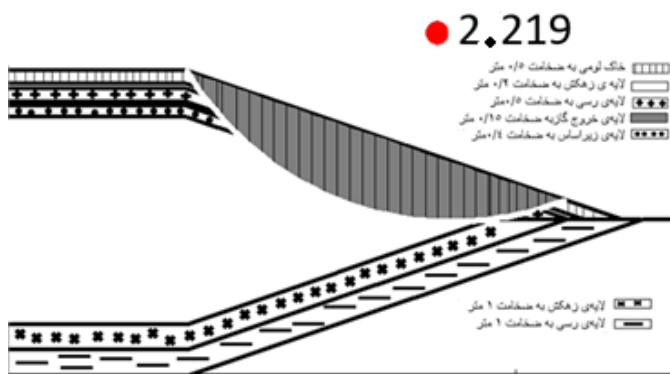
شکل ۲. مقطع هندسی مدفن

جدول ۱. مشخصات خاک‌های استفاده‌شده در ساخت مدفن [۷ و ۱۶]

نوع خاک	$c' (kPa)$	$\varphi^\circ$	$\theta_r$	$\theta_s$	$\alpha$	$n$
CL	۵	۲۹	۰	۰/۳۴	۰/۱۰۰۱	۱/۰۹۲
SC	۵/۹۷	۳۶	۰	۰/۳۵۸	۰/۸۷۷	۱/۲۹۱

## ۱.۴. مدل‌سازی مدفن در حالت غیراشباع

در این مرحله با استفاده از کدنویسی‌های انجام شده و اختصاص مدل ساختاری خاک در حالت غیراشباع با استفاده از مفهوم تنش مکشی پایداری مدفن برای درصدهای مختلفی از رطوبت حجمی محاسبه گردید. در شکل (۳) نمونه‌ای از یک تحلیل انجام یافته نشان داده شده است.



شکل ۳. نمونه‌ای از یک مدل تحلیلی در شرایط قبل از تحکیم با درصد رطوبت حجمی ۰/۲۵

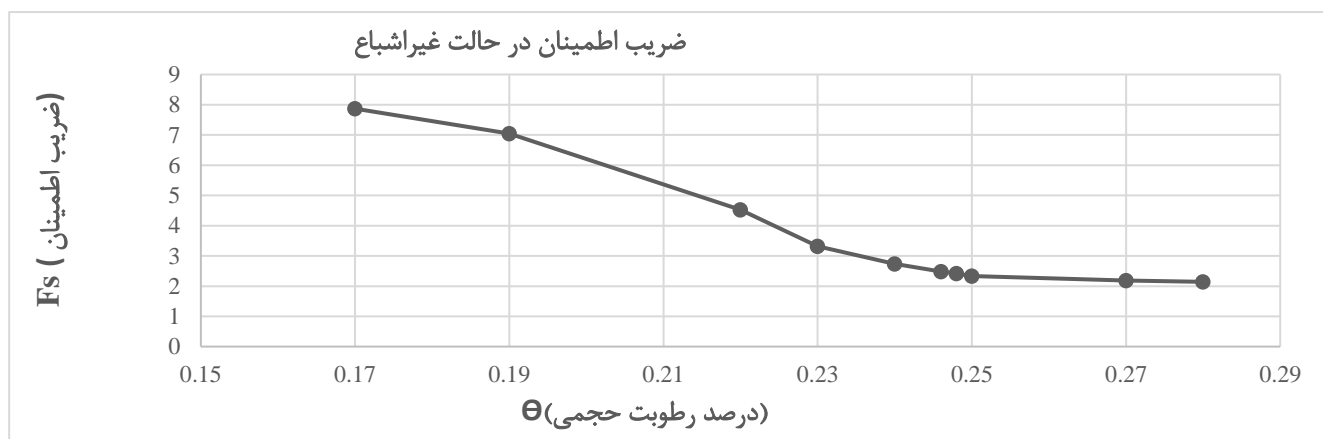
لایه‌های پوشش نهایی و کف مدفن طبق شیوه‌نامه‌ی ایران مدل‌سازی شده و با توجه به جنس مصالح حداکثر ارتفاع صعود مویینگی به‌دست‌آمده است. با توجه به ضخامت لایه‌های خاک، اطلاعات موجود و ضوابط طراحی مدفن، به دلیل وجود لوله‌های زهکش در لایه‌ی فوقانی لایه‌ی رس و هدایت شیرابه به داخل حوضچه‌های مخصوص به منظور جلوگیری از نفوذ شیرابه به لایه‌های خاک، می‌توان تمامی لایه‌ها را غیراشباع در نظر گرفت. از آنجا که هدف مقاله حاضر بررسی پایداری مصالح در حالت غیراشباع می‌باشد، باید به تأثیر درصد رطوبت بر وزن مخصوص مصالح توجه نمود. با توجه به استفاده از رویکرد تنش مؤثر در بررسی رفتار خاک غیراشباع، با استفاده از مدل کد نویسی شده، در این مقاله ابتدا ضریب اطمینان پایداری شیب در حالت خشک و سپس در حالت‌های غیراشباع با درصد رطوبت‌های حجمی مختلف در شرایط اولیه مورد بررسی قرار می‌گیرد و سپس ضریب اطمینان بعد از انجام عمل تحکیم نیز محاسبه می‌گردد. مطابق شکل (۲)، وزن مخصوص خاک ( $\gamma$ ) برحسب  $\text{kN/m}^3$  و ابعاد بر حسب متر است. پارامترهای مورد استفاده جهت تعیین مقاومت برشی خاک ( $c', \varphi$ ) و همچنین پارامترهای خاک در حالت غیراشباع ( $n, \alpha, \theta_r, \theta_s$ ) مطابق جدول (۱) می‌باشد.



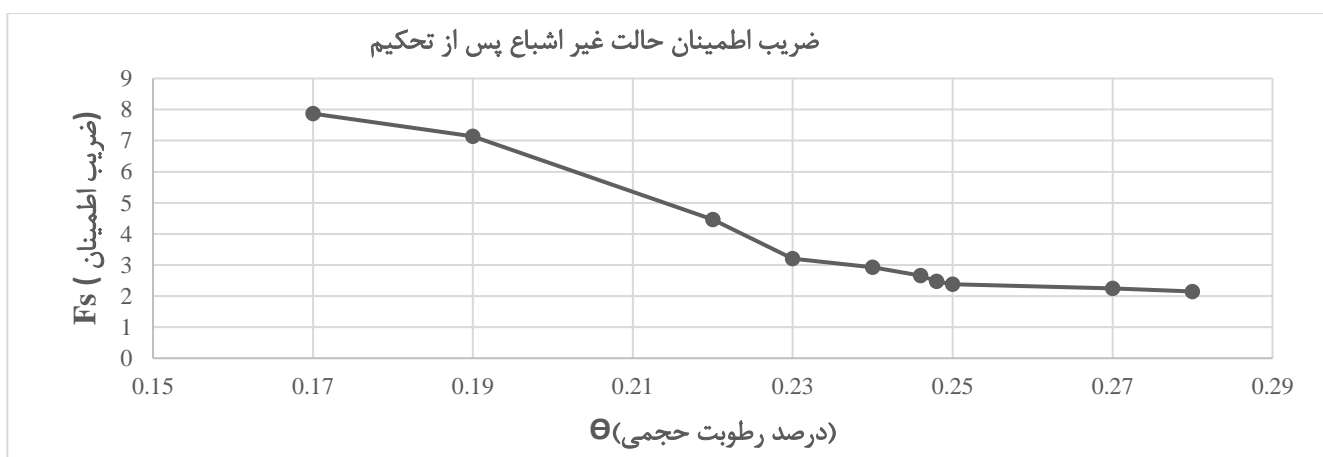
#### ۲.۴. مدل سازی مدفن غیراشباع در بلند مدت

در این قسمت با انتخاب مدل ساختاری توسعه یافته برای حالت غیراشباع با استفاده از مفهوم تنش مکشی برای لایه‌های ماسه‌ای-سیلتی در بلند مدت و با در نظر گرفتن تحکیم در لایه‌های رسی، ضرایب اطمینان و تحلیل پایداری به صورت به زیر می‌باشد. همان‌طور که در شکل (۵) نشان داده شده است پس از تحکیم نیز با افزایش درصد رطوبت در حالت غیراشباع ضریب اطمینان کاهش یافته و با حالت پیش از تحکیم، متفاوت است.

نتایج به دست آمده از تحلیل پایداری مدفن برای درصد رطوبت‌های حجمی متفاوت مطابق شکل (۴) می‌باشد. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود با افزایش درصد رطوبت حجمی، حرکت به سمت حالت اشباع، ضریب اطمینان پایداری شیب مدفن کاهش می‌یابد. با توجه به اینکه مقدار ضریب اطمینان در حالت خشک ۱/۶۸۸ است، نتیجه می‌شود که ضریب اطمینان در حالت غیر اشباع نسبت به حالت خشک افزایش می‌یابد.



شکل ۴. نمودار تغییرات ضریب اطمینان و درصد رطوبت حجمی در حالت غیر اشباع

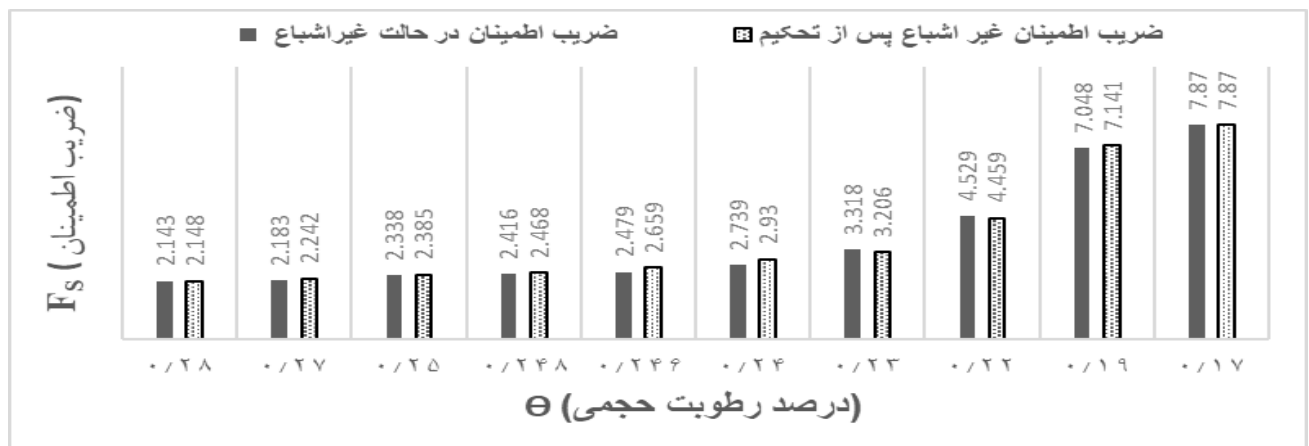


شکل ۵. نمودار تغییرات ضریب اطمینان و درصد رطوبت حجمی در حالت غیر اشباع پس از تحکیم

باشد. اما نکته‌ی قابل توجه و تامل آن است که در خاک‌های غیر اشباع، با انجام عمل تحکیم، ضریب اطمینان مدفن لزوماً افزایش نمی‌یابد. به طور مثال، در درصد رطوبت‌های حجمی زیاد  $\theta = 0.28$  ضریب اطمینان بعد از تحکیم افزایش یافته ولی در بقیه حالات این روند ادامه دار نیست. برای نمونه در  $\theta = 0.22$  ضریب اطمینان بعد از تحکیم کاهش می‌یابد.

### ۳.۴. مقایسه‌ی ضریب اطمینان غیراشباع قبل و بعد از تحکیم

در نهایت پایداری شیب مدفن قبل و بعد از انجام عمل تحکیم با یکدیگر مقایسه شدند. مطابق شکل (۶) در خاک‌های غیراشباع ضریب اطمینان پایداری با کاهش درصد رطوبت حجمی افزایش می‌یابد و دلیل این امر می‌تواند افزایش مکش به علت کاهش درصد رطوبت



شکل ۶. نمودار مقایسه‌ی ضریب اطمینان غیراشباع قبل و بعد از انجام عمل تحکیم

### ۵. نتیجه‌گیری

در این شرایط به علت پائین بودن فشار آب منفذی، عملاً تحکیمی رخ ندهد.

۳- در درصد رطوبت‌های حجمی کمتر از  $\theta = 0.23$  ضریب اطمینان بعد از تحکیم، اندکی کاهش می‌یابد. نکته‌ی قابل توجه افزایش چشمگیر ضریب اطمینان در درصد رطوبت‌های پائین است. به عبارت دیگر با افزایش قابل ملاحظه ضریب اطمینان به دلیل افزایش تنش مکشی در درصد رطوبت‌های پائین، کاهش ناچیز ضریب اطمینان بعد از انجام عمل تحکیم محسوس نخواهد بود.

۴- اگرچه به طور کلی تغییرات ضریب اطمینان قبل و بعد از تحکیم چندان زیاد نیست اما این اختلاف کم ممکن است به دلیل کم بودن ضخامت لایه‌ی رس، نسبت به سایر لایه‌ها باشد. بنابراین باید تغییرات ضریب اطمینان برای ضخامت‌های بیشتر لایه‌ی رس نیز مورد محاسبه قرار گیرد. ممکن است در این شرایط با افزایش ضخامت لایه‌ی رسی، تغییرات ضریب اطمینان بیشتر شود.

با بررسی پایداری شیب مدفن با استفاده از روش تعادل حدی و مفهوم تنش مکشی در دو حالت قبل و بعد از انجام عمل تحکیم نتایج زیر حاصل گردید.

۱- در نظر گرفتن مدفن در حالت غیراشباع، ضریب اطمینان بیشتری نسبت به حالت خشک به دست می‌دهد. بنابراین در این حالت می‌توان مدفن را با زاویه شیب یا ارتفاع بیشتر ساخت و این امر می‌تواند موجب سهولت نسبی مکان‌یابی شود.

۲- خاک‌های غیراشباع، پس از انجام عمل تحکیم ضریب اطمینان الزاماً افزایش نمی‌یابد. بلکه افزایش یا کاهش ضریب اطمینان وابسته به درصد رطوبت می‌باشد. به طور کلی در درصد رطوبت‌های بالا با انجام عمل تحکیم ضریب اطمینان افزایش می‌یابد. این امر می‌تواند به دلیل افزایش اختلاف فشار آب و هوای منفذی و در نتیجه افزایش تنش مکشی باشد. در درصد رطوبت حجمی  $\theta = 0.17$  با انجام عمل تحکیم تغییری در ضریب اطمینان دیده نمی‌شود زیرا ممکن است

- مراجع**
- [1] معاونت امور شهرداری‌ها، دفتر هماهنگی عمران و خدمات شهری مرکز مطالعات برنامه‌ریزی شهری و روستایی، شیوه‌نامه‌ی اجرایی احداث و راهبری محل دفن بهداشتی پسماندهای عادی شهری (۱۳۹۴).
- [2] Fityus, SG, Smith, Daniel W, & Booker, JR. "Contaminant transport through an unsaturated soil liner beneath a landfill", *Can. Geotech. J.*, 36(2), pp. 330-354 (1999).
- [3] Liu, Chia-Nan, Chen, Rong-Her, & Chen, Kuo-Sheng. "Unsaturated consolidation theory for the prediction of long-term municipal solid waste landfill settlement", *Waste Manag. Res.*, 24(1), pp. 80-91 (2006).
- [4] Koelsch, F. "Stability problems of landfills–The Payatas landslide", 17th Int. Paper presented at the Conf. Solid Waste Tech. and Manag. Philadelphia, PA (2007).
- [5] Giri, Rajiv K, & Reddy, Krishna R. "Slope stability of bioreactor landfills during leachate injection: effects of unsaturated hydraulic properties of municipal solid waste", *Int. J. Geotech. Eng.*, 8(2), pp. 144-156 (2014).
- [6] Batali, Loretta, Carastoian, Andreea, Popa, Horatiu, & Pantel, Gheorghe. "Instability phenomena in municipal waste landfill. Numerical modeling in saturated and unsaturated conditions", *Energy Procedia.*, 112, pp. 481-488 (2017).
- [7] Song, Young-Suk, Hwang, Woong-Ki, Jung, Soo-Jung, & Kim, Tae-Hyung. "A comparative study of suction stress between sand and silt under unsaturated conditions", *Eng. Geol.*, 124, pp. 90-97 (2012).
- [8] Fredlund, DG, Morgenstern, N Ro, & Widger, RA. "The shear strength of unsaturated soils", *Can. Geotech. J.* 15(3), pp. 313-321 (1978).
- [9] Fredlund, Delwyn G, & Rahardjo, Harianto. "Soil mechanics for unsaturated soils", John Wiley & Sons (1993).
- [10] Lu, Ning, & Likos, William J. "Unsaturated soil mechanics", Wiley (2004).
- [11] Khalili, N, & Khabbaz, MH. "A unique relationship of chi for the determination of the shear strength of unsaturated soils", *Geotechnique*, 48(5) (1998).
- [12] Heshmati, A. A, Motahari, M. R. "Modeling the dependency of Suction Stress Characteristic Curve on void ratio in unsaturated soils", *KSCE*, 19(1), pp. 91-97 (2014).
- [13] M. Das, Braja. "Principles of Foundation Engineering", Boston (1941).
- [14] GEO-SLOPE International, GeoStudio. "Add-Ins Programming Guide and Reference Manual", (2007).
- [15] Mitchell, J. K., Bray, J. D., & Mitchell, R. A. "Material interactions in solid waste landfills. In Geo-environment 2000: Characterization, Containment, Remediation, and Performance in Environmental Geotechnics", ASCE, pp. 568-590 (2000).
- [16] Greco, R., Gargano, R. "A novel equation for determining the suction stress of unsaturated soils from the water retention curve based on wetted surface area in pores", *Water Resour. Res.*, 51(8), pp. 6143-6155 (2015).