



## **Modeling Deformation and Design of Truss Retaining Structures in Multi-layered Soil Using an Equivalent Single-layer Soil with the Finite Element Method**

**Farhad Pirmohammadi Alishah<sup>1\*</sup>, Masoud Motalbian<sup>2</sup>, Mehdi Mohammadrezaei<sup>3</sup>**

1\*- Assistant Professor, Islamic Azad University, Shabestar Branch, Shabestar, Iran.

2- Assistant Professor, Islamic Azad University, Shabestar Branch, Shabestar, Iran.

3- Assistant Professor, Islamic Azad University, Tasuj Branch, Tasuj, Iran.

Received: 23 January 2025; Revised: 27 February 2025; Accepted: 04 March 2025; Published: 21 April 2025

### **Abstract**

*Nowadays, creating excavations with different depths for the construction of tall buildings and important structures is inevitable. This issue is of great importance in urban areas, given the shortage of land and the presence of buildings and facilities around the excavation site. Inaccuracy in the design and calculation of excavation protection methods and the implementation of excavations in these areas may lead to irreparable human and financial losses, especially to structures adjacent to the excavation. Truss guard structure is one of the most suitable and common methods of excavation protection in urban areas. The use of finite element software, given the extraordinary features and facilities of these software, is of considerable importance in identifying the behavior of excavations and analyzing the behavior of structures adjacent to the excavation. In the design and calculations of guard structures, simplification is of great use in initial estimates and even final evaluation, and ready-made maps are widely used in this field. So far, the effect of the method of equating the properties of multilayered soil in the design and control of deformation of guard structures has not been investigated. In this research, a truss guard structure in multilayer soil was designed and its deformation was calculated using finite element modeling. Then, the deformation of this guard structure in a single-layer soil was designed and calculated using the properties obtained for the soil from the weighted averaging, moment and minimum methods. The results of this research show that the best method of equivalence was based on the height of the guard structure and the condition of the soil layer.*

**Keywords:** *Equivalence, Multilayer soil, Excavation deformation, Guard structure, 3D modeling.*

**Cite this article as:** *pirmohammadi alishah, F., Motalbian, M. and Mohammadrezaei, M. (2025). Modeling Deformation and Design of Truss Retaining Structures in Multi-layered Soil Using an Equivalent Single-layer Soil with the Finite Element Method.. Civil and Project, 7(2), -. <https://doi.org/10.22034/cpj.2025.508117.1347>*

**ISSN:** 2676-511X / **Copyright:** © 2025 by the authors.

**Open Access:** This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License, which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons licence, and indicate if changes were made. The images or other third party material in this article are included in the article's Creative Commons licence, unless indicated otherwise in a credit line to the material. If material is not included in the article's Creative Commons licence and your intended use is not permitted by statutory regulation or exceeds the permitted use, you will need to obtain permission directly from the copyright holder. To view a copy of this licence, visit <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

**Journal's Note:** CPJ remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.



نشریه عمران و پروژه  
<http://www.cpjournals.com/>

## مدلسازی تغییر شکل و طرح سازه نگهبان خرپایی در خاک چندلایه با استفاده از خاک یک لایه معادل توسط روش اجزای محدود

فرهاد پیرمحمدی علیشاه<sup>۱\*</sup>، مسعود مطلبیان<sup>۲</sup>، مهدی محمدرضایی<sup>۳</sup>

\* ۱- استادیار، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد شبستر، شبستر، ایران  
۲- استادیار، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد شبستر، شبستر، ایران  
۳- استادیار، دانشگاه آزاد اسلامی، مرکز تسوج، تسوج، ایران

تاریخ دریافت: ۰۴ بهمن ۱۴۰۳؛ تاریخ بازنگری: ۰۹ اسفند ۱۴۰۳؛ تاریخ پذیرش: ۱۴ اسفند ۱۴۰۳؛ تاریخ انتشار آنلاین: ۰۱ اردیبهشت ۱۴۰۴

### چکیده

امروزه، ایجاد گودبرداری با اعماق مختلف جهت احداث ساختمان‌های بلند و بناهای مهم، امری اجتناب ناپذیر می‌باشد. این موضوع در مناطق شهری، باتوجه به کمبود زمین و وجود ساختمان‌ها و تاسیسات در اطراف محل گود برداری از اهمیت زیادی برخوردار است. عدم دقت در طرح و محاسبه روش‌های حفاظت گود و اجرای گودبرداری‌ها در این مناطق، ممکن است منجر به خسارات جانی و مالی جبران ناپذیری به ویژه سازه‌های مجاور گود، گردد. سازه نگهبان خرپایی یکی از مناسب‌ترین و مرسوم‌ترین روش‌های محافظت از گودبرداری در مناطق شهری به شمار می‌رود. کاربرد نرم افزارهای اجزا محدود باتوجه به امکانات و تسهیلات فوق العاده این نرم افزارها، در شناسایی رفتار گودبرداری‌ها و تحلیل رفتار سازه‌های مجاور گود از اهمیت قابل توجهی برخوردار است. در طراحی و محاسبات سازه نگهبان، انجام ساده‌سازی در تخمین‌های اولیه و حتی ارزیابی نهایی کاربرد زیادی دارد و از نقشه‌های آماده در این زمینه استفاده زیادی بعمل می‌آید. تاکنون تاثیر نحوه معادل سازی خصوصیات خاک چند لایه در طراحی و کنترل تغییر شکل سازه نگهبان بررسی نشده است. در این پژوهش، سازه نگهبان خرپایی در خاک چند لایه، طراحی شده و توسط مدلسازی اجزای محدود، تغییر شکل آن محاسبه گردید. سپس طراحی و محاسبه تغییر شکل این سازه نگهبان در خاک یک لایه معادل با خصوصیات بدست آمده برای خاک از روش‌های میانگین گیری وزنی، گشتاوری و حداقل این روش‌ها انجام شد. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد بهترین روش معادل سازی نسبت به ارتفاع سازه نگهبان و وضعیت لایه خاک متغیر بوده است.

کلمات کلیدی:

معادل سازی، خاک چند لایه، تغییر شکل گودبرداری، سازه نگهبان، مدلسازی سه بعدی.

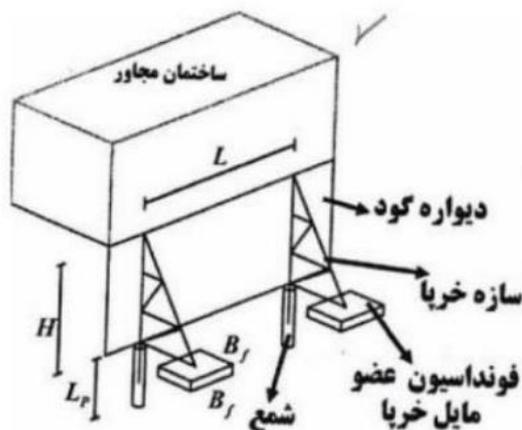
## ۱- مقدمه

امروزه با افزایش و گسترش روزافزون احداث ساختمان‌های مرتفع و لزوم قرارگیری پارکینگ در طبقات پایین‌تر از سطح زمین، رعایت اصول و قوانین گودبرداری صحیح شهری در راستای کاهش خطرات و آسیب‌های مالی و جانی، ضروری و غیرقابل اغماض است. گودبرداری در زمره عملیات خاکی خطرناک قرار دارد. یکی از حساسترین مسائل ژئوتکنیکی، گودبرداری در مجاورت ساختمان موجود است. براساس آمارهای موجود، خسارت زیادی تاکنون در اثر گودبرداری‌ها به ساختمان‌های همسایه در درجات مختلف وارد شده است. گودبرداری سبب برهم‌خوردن تعادل خاک و تغییر وضعیت تنش‌ها در خاک می‌شود. بنابراین انجام عملیات گودبرداری می‌تواند باعث برهم خوردن انسجام خاک و گسیختگی آن شده و یا موجب از بین رفتن تعادل و پایداری سازه مجاور گود گردد (Das and Sivakugan, 2021). در پروژه‌هایی که نیازمند گودبرداری هستند، ابتدا باید وضعیت پایداری شیب طبیعی موجود در محل کنترل شود و به تناسب آن نسبت به انتخاب سازه‌های نگهدارنده، اقدام نمود. سازه‌های نگهدارنده ممکن است موقت باشند مانند سیستم تیرک مایل و سیستم خرپایی و یا اینکه دائمی باشند مانند دیوارهای حائل دائمی زیرزمین ساختمان‌ها و نظایر آنها (Maleki and Nabizadeh, 2021). همچنین ممکن است سازه‌های نگهدارنده موقت، پس از اتمام گودبرداری برچیده نشوند و به عنوان دیوارهای حائل دائمی عمل کنند و یا اینکه پس از اجرای سازه نگهدارنده موقت گودبرداری، اقدام به تکمیل یا تقویت آنها نموده و سپس به عنوان دیوار حائل دائمی مورد استفاده قرار گیرند. مساله اصلی در انتخاب مناسب سازه نگهدارنده، کنترل تغییرشکل گود و سازه‌های اطراف آن است. در روش خرپایی محافظت از گود یک از مناسب‌ترین و متداولترین روش‌های اجرای سازه نگهدارنده در مناطق شهری است. اجرای آن ساده بوده و نیاز به تجهیزات و تخصص بالایی ندارد و در عین حال قابلیت انعطاف زیادی از نظر اجرا در شرایط مختلف دارد. روش‌های محاسباتی مدل‌سازی و شبیه‌سازی یارانه‌ای و به ویژه روش مدل‌سازی اجزای محدود، با توجه به اینکه دقت بالایی در تخمین رفتار تنش-کرنش لایه‌های زمین در شرایط پیچیده نشان داده‌اند، لذا از روش‌های جذاب مطالعاتی در سال‌های اخیر به شمار می‌روند. با توجه به اینکه در محاسبات مهندسی، به منظور اجتناب از محاسبات پیچیده، انجام معادل‌سازی برای خصوصیات لایه‌های زمین، عملی مرسوم و متداول به شمار می‌رود. برای سازه نگهدارنده خرپایی نیز، استفاده از نقشه‌های آماده اجرایی برای شرایط مختلف خصوصیات سربار و مشخصات هندسی و خصوصیات خاک محل متداول می‌باشد (Juang et al., 2016). با اینحال در این طرح‌های آماده، خصوصیات خاک چند لایه در نظر گرفته نشده و صرفاً یک لایه خاک معادل مبنای محاسبات می‌باشد. برای مثال، شرایط وجود لایه خاک دستی سطحی و در زیر آن لایه خاک بکر با خصوصیات متفاوت در اکثر پروژه‌های واقع در بافت شهری دیده می‌شود، که صرفاً خصوصیات یک لایه خاک در طرح‌های آماده معرفی می‌شود. بنابراین استفاده از این طرح‌ها مستلزم انجام معادل‌سازی برای شرایط خاک چند لایه پشت سازه نگهدارنده خواهد بود. لذا بررسی صحت معادل‌سازی و تاثیر آن بر طراحی سازه نگهدارنده ضرورت خواهد داشت. توکلی و همکاران (2017) در تحقیقی تغییرشکل‌های محیط اطراف گودبرداری و میزان تاثیر این تغییرمکان‌ها بر روی سازه‌های اطراف را مورد مطالعه و بررسی قرار دادند. برای این منظور اثر سختی سازه‌های مجاور بر میزان جابجایی زمین ناشی از گودبرداری لحاظ شد. در این تحقیق از دو نرم‌افزار Etabs و Plaxis و از مدل رفتاری خاک سخت شونده برای مصالح زمین استفاده گردید. نتایج این تحقیق نشان داد که سختی سازه مجاور گود تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر روی کنترل تغییر مکان زمین ناشی از گودبرداری دارد. یکی از سیستم‌های متداول و سنتی در ایران برای محافظت گود، سیستم تیرک مایل است که تحقیقات کمی روی آن انجام شده است. برای مثال (Katami 2007)، سیستم تیرک مایل را با مدل‌سازی دو بعدی مورد مطالعه قرار داد. وی در این تحقیق به چگونگی تاثیر پارامترهای مؤثر  $2m/N$  بر رفتار تیرک مایل پرداخت و به این نتیجه رسید که خاک‌هایی که چسبندگی آنها کمتر از  $k = 51$  است و همچنین در گودهای عمیقتر از ۱۵ متر استفاده از تیرک مایل باعث ریزش گود خواهد شد. (Fakher 2005) درباره مکانیزم عملکرد تیرک مایل مطالعاتی انجام داد و ضمن تشریح عملکرد تیرک مایل توصیه‌های کاربردی راجع به نحوه اتصال تیرک مایل به کف گود و ساختمان همسایه ارائه داد. (Sabzi and Fakher, 2017) در یک پروژه گودبرداری که با سیستم تیرک مایل محافظت می‌شد کرنش‌سنج‌هایی را در مجاورت ساختمان همسایه در شهر تهران نصب کرده و در مراحل مختلف گودبرداری تغییرشکل‌ها را اندازه‌گیری نمودند. همچنین به کمک ابزار الکترونیکی نصب شده در تیرک‌های مایل نیروی وارد شده به هر تیرک را اندازه‌گیری کردند. در این تحقیق میزان تغییر شکل‌های اندازه‌گیری شده خاک مجاور گود و میزان نیروی‌های

وارد بر تیرک به نمایش درآمد. بررسی منابع فنی و مقالات علمی، نشان می‌دهد در زمینه مورد بحث، تحقیقات چندانی صورت نگرفته است. لذا هدف این پژوهش در مرحله اول شامل طراحی سازه نگهدارنده در شرایط پیچیده لایه بندی خاک می‌باشد. هدف بعدی انجام معادل‌سازی برای خاک چند لایه و تولید یک لایه خاک معادل برای شرایط پروژه خواهد بود که در زیر مجموعه این هدف نیز طراحی و کنترل تغییر شکل سازه نگهدارنده لازم است انجام شود. هدف بعدی، مقایسه روش‌های معادل‌سازی برای خاک چند لایه و معرفی بهترین روش معادل‌سازی برای طراحی سازه نگهدارنده برای یک لایه خاک معادل می‌باشد. در زمینه طراحی و محاسبه تغییر شکل سازه نگهدارنده تحقیقات زیادی انجام شده است (Bilgin et al., 2009, Finno and Roboski, 2005, Hsieh and Ou, 1998, Roboski and Finno, 2006). از جمله کارهای قبلی در این زمینه می‌توان به تحقیقات (Mahdavi 2020, Emamzadeh 2022, Fakhre 2005, Roboski and Finno, 2006) اشاره نمود.

## ۲- روش سازه نگهبان خرابایی

این روش یکی از متداول‌ترین و مناسب‌ترین روش‌ها به منظور پایدارسازی گودبرداری‌ها در مناطق شهری محسوب می‌شود. دلیل این امر، ساده بودن اجرای آن و عدم وابستگی به ماشین‌آلات تخصصی در حین اجرا است. مراحل اجرای اصولی سازه نگهدارنده خرابایی بدین صورت است که ابتدا در محل قرارگیری عضو قائم خرپا در مجاورت گود چاهک‌هایی با عمقی برابر با مجموع عمق گود و طولی برای گیرداری عضو حفر می‌شود (شکل ۱). سپس قفسه پیش‌ساخته آرماتورهای فولادی و عضو قائم را درون شمع فرستاده و اقدام به بتن‌ریزی شمع (قسمت انتهایی چاهک) می‌کنند. بعد از سخت شدن بتن شمع، می‌توان با یک شیب مطمئن خاک‌برداری را شروع کرد و اعضای مایل را مرحله به مرحله از بال به پایین اجرا نمود. شکل ۱ نمایی از سازه نگهدارنده خرابایی را نشان می‌دهد (Katami 2007).



شکل ۱- نمایی از پایدارسازی گود با سازه نگهدارنده خرابایی (Katami 2007)

روش سازه نگهدارنده خرابایی دارای مزایای بسیار زیادی است و از نظر اجرا در شرایط مختلف قابلیت انعطاف زیادی دارد ولی در عین حال معایبی نیز دارد. از مهمترین مزایای این روش می‌توان به مناسب بودن این روش برای اغلب گودهای واقع در مناطق شهری، امکان استفاده مجدد از سازه (خرپا)، ساده بودن مراحل اجرا و عدم نیاز به ماشین‌آلات تخصصی اشاره کرد. از طرفی دیگر از معایب قابل توجه این روش نیز می‌توان گفت در مقایسه با روش‌های پیشرفته‌تر سرعت اجرای کمتری دارد. همچنین نیاز به خاک‌برداری دستی در مراحل اولیه سرعت اجرا را کند می‌کند. از طرفی دیگر، جاگیر بودن خرپاها مشکلاتی را در روند اجرای سازه اصلی بوجود می‌آورد. روش سازه نگهدارنده خرابایی در ایران به میزان بسیار گسترده‌ای به کار می‌رود و می‌توان گفت که پرکاربردترین سازه نگهدارنده گودها در ایران است. در این تحقیق برای پایدارسازی گودهایی به عمق ۴، ۷ و ۱۱ متر از سیستم خرابایی استفاده شده است. رفتار اعضای خرابایی بصورت الاستوپلاستیک در نظر گرفته می‌شود تا در صورت افزایش بار ناشی از سربار اطراف گود وضعیت غیرارتجاعی و نهایتاً گسیختگی اعضا قابل بررسی باشد.

### ۳- روش طراحی سازه نگهبان در خاک چندلایه و خاک یک لایه معادل

در این پژوهش سازه نگهبان خرابایی به ارتفاع ۴ متر و ۷ متر مطابق ساختار معرفی شده در کتاب اصول و مبانی گودبرداری و سازه های نگهبان (Ashrafi 1393) (مربوط به دفتر تدوین و ترویج مقررات ملی ساختمان) مورد طراحی قرار می‌گیرد. در شکل (۳) ساختار سازه نگهبان خرابایی ۴ و ۷ متری از منبع مذکور که در برنامه SAP2000 تعریف شده مشاهده می‌شود. خاک چندلایه پشت سازه نگهبان در حالت‌های زیر فرض شده است:

(الف) خاک دستی و خاک ماسه‌ای زیرین.

(ب) خاک دستی و خاک رسی زیرین.

(ج) ترکیب لایه‌های خاک رسی و خاک ماسه‌ای.

#### ۳-۱- محاسبه نیروهای وارد بر سازه نگهبان

اولین گام در تحلیل سازه نگهبان، محاسبه نیروهای وارد بر آن می‌باشد. عمده‌ترین بارهای وارد بر سازه نگهبان شامل فشار جانبی خاک و فشار جانبی ناشی از سربار مجاور گود می‌باشد. جهت تعیین فشار جانبی خاک و سربار می‌توان از روش محاسبه دستی و یا نرم افزارهای طراحی شده به این منظور بهره برد. در این تحقیق، نرم افزار GEO5 جهت محاسبه فشار جانبی وارد بر سازه نگهبان بکار گرفته شده و نتایج بدست آمده با محاسبات دستی نیز کنترل شده است. منحنی توزیع فشار در پشت سازه نگهبان در حالت محرک رانکین توسط رابطه (۱) ترسیم می‌شود.

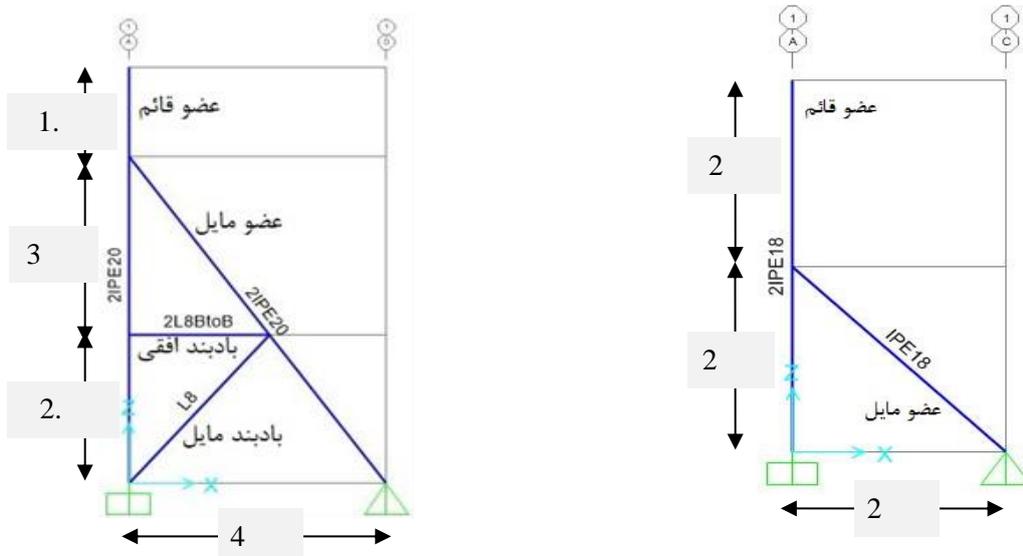
$$\sigma_x = (\gamma H + Q)K_a - 2c\sqrt{K_a} \quad (1)$$

در این رابطه،  $\gamma$  وزن مخصوص خاک،  $Q$  سربار وارد بر مجاور گود،  $c$  ضریب چسبندگی خاک و  $K_a$  ضریب فشار جانبی محرک خاک ( $K_a = \tan^2(45 - \phi/2)$ ) می‌باشد. در صورت پایین بودن سطح آب زیرزمینی و در حالت  $2c > Q\sqrt{K_a}$ ، فشار خاک تا عمق معینی منفی می‌شود که به آن عمق ترک کششی گفته می‌شود و با رابطه زیر محاسبه می‌گردد. برای مقاصد طراحی و اجتناب از تنش منفی، تنش خاک بر روی سطح زمین برابر صفر و در انتهای گود برابر رابطه (۱) منظور می‌گردد (Ashrafi 1393).

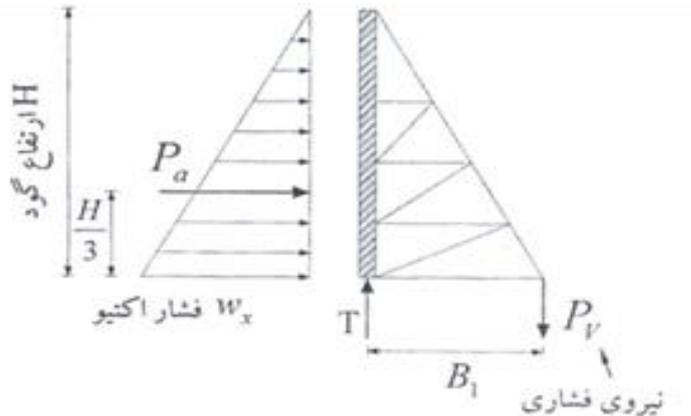
$$H_t = \frac{2c}{\gamma\sqrt{K_a}} - \frac{Q}{c} \quad (2)$$

بنابراین شدت بار وارد بر واحد طول خرپا ( $w_x$ ) از رابطه (۳) بدست می‌آید که در آن  $L$  فاصله بین دو خرپای مجاور است. در شکل (۳) نیروهای وارد بر خرپا به صورت شماتیک و ساده شده مشاهده می‌شود.  $T$  نیروی کششی وارد بر خرپا و  $B_1$  بازوی اهرم (فاصله تکیه گاه عضو مایل از عضو قائم خرپا) می‌باشد.

$$w_x = [(\gamma H + Q)K_a - 2c\sqrt{K_a}]L \quad (3)$$



شکل ۲- ساختار کلی سازه نگهدارنده خرپایی به ارتفاع ۴ و ۷ متر (برنامه SAP2000).



شکل ۳- نیروهای وارد بر خرپا

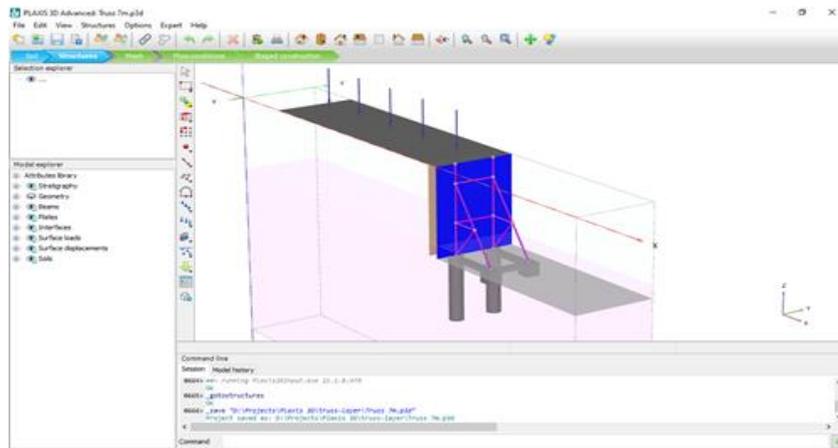
### ۳-۲- انتخاب پروفیل‌های فولادی سازه نگهدارنده

برای طراحی پروفیل‌های فولادی سازه نگهدارنده از نرم افزار تحلیل سازه SAP2000 بهره گرفته شده است. در این برنامه، در ابتدا طرح سازه نگهدارنده و تکیه‌گاه‌ها ترسیم می‌گردد. نحوه گیرداری اعضا مشخص می‌شود که برای خرپا به صورت مفصلی تعریف می‌گردد. تکیه‌گاه اعضای قائم و مایل نیز به ترتیب به صورت گیردار و مفصلی تعریف می‌شود. پس از آن خصوصیات مقاطع فولادی لازم است در برنامه تعریف شود، نوع مقاطع فولادی بکار رفته از نوع ST-37 با تنش تسلیم ۲۴۰۰ و تنش نهایی ۳۷۰۰ (Kg/cm<sup>2</sup>) می‌باشد. طراحی به روش LRFD بوده و آیین نامه مورد استفاده AISC360-16 می‌باشد. مشخصات مقاطع مطابق پروفیل‌های فولادی موجود در بازار ایران در برنامه معرفی شده است. به منظور اعمال فشار جانبی بر عضو قائم، مطابق مبحث ششم مقررات ملی ساختمان، ضریب فشار خاک و سربار برابر با ۱/۶ لحاظ می‌گردد.

### ۳-۳- مدلسازی ۳ بعدی اجزای محدود و محاسبه تغییر شکل سازه نگهدارنده

به منظور محاسبه دقیق‌تر تغییر شکل سازه نگهدارنده، لازم است مدلسازی ۳ بعدی توسط نرم افزار اجزاء محدود PLAXIS 3D با منظور نمودن اندرکنش خاک و سازه بکار گرفته شود. مدل رفتاری انتخاب شده برای خاک از نوع موه‌ر- کولمب بنابر گستردگی کاربرد آن می‌باشد. وزن مخصوص فولاد برابر با ۷۷ (kN/m<sup>3</sup>) و مدول الاستیک فولاد برابر با ۲۰۲\*۱۰<sup>۶</sup> (kN/m<sup>2</sup>) در برنامه

تعریف شده است. برای فاصله بین خرابها شاتکریت به ضخامت ۱۲ و ۱۵ سانتیمتر به ترتیب برای سازه نگهبان به ارتفاع ۴ و ۷ متر فرض شده و در قسمت plates به برنامه معرفی می‌شود. ماده اختصاص یافته برای شاتکریت از نوع بتن با مدل رفتاری الاستیک خطی، وزن مخصوص برابر با  $25 \text{ (kN/m}^3\text{)}$ ، مدول الاستیک برابر با  $10^6 * 25 \text{ (kN/m}^2\text{)}$  و ضریب پواسون  $0/15$  می‌باشد. فاصله بین خرابها به جهت امکان مقایسه، در تمامی حالتها برابر با ۳ متر انتخاب شده است. طول شمع عضو قائم به منظور اجتناب از تغییر شکل تکیه‌گاه، به طول حداکثر ۵ متر و میزان فرورفتگی عضو قائم در داخل شمع به منظور صلب فرض نمودن تکیه‌گاه، به اندازه ۲ متر انتخاب شده است. به توصیه منابع برای هر طبقه ساختمان مجاور گود، سربار به میزان ۱۰ کیلوپاسکال منظور می‌گردد. در این تحقیق چند حالت برای سربار مجاور گود فرض شده است. حالت‌های مفروض سربار مجاور گود برابر با ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۵۰ کیلوپاسکال خواهد بود. عرض سربار در حدود ۲ برابر عمق گود انتخاب شده و مدلسازی می‌گردد.

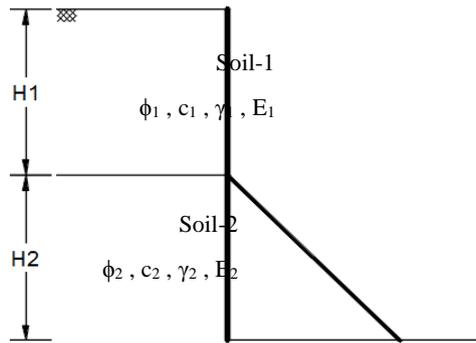


شکل ۴- نمایی از نحوه ترسیم سازه نگهبان خرابایی در برنامه PLAXIS 3D

برای مش‌بندی مدل، سایز متوسط به منظور اجتناب از طولانی شدن زمان تحلیل و همچنین اجتناب از کاهش دقت مدل‌ها در برنامه انتخاب شده است. همچنین در صفحه دیواره گود، امکان ریز کردن سایز مش‌بندی وجود دارد که در مدلسازی، از این مورد نیز بهره گرفته شده است. به منظور اجتناب از پیچیدگی مدل‌ها و نتایج، از منظور نمودن سطح آب زیرزمینی صرف‌نظر شده و شرایط مدل‌ها با فرض عمق زیاد سطح آب زیرزمینی یا زهکشی کامل آب می‌باشد. در شکل (۴) نمایی از نحوه مدلسازی در برنامه PLAXIS 3D مشاهده می‌شود.

### ۳-۴- میانگین‌گیری از خصوصیات خاک چند لایه

به عنوان روش اول برای میانگین‌گیری پارامترهای خاک چندلایه، روش میانگین‌گیری وزنی ساده مورد بررسی قرار می‌گیرد. در شکل (۵)، تصویر شماتیک خاک پشت سازه نگهبان شامل دو لایه خاک با خصوصیات متفاوت نمایش داده شده است. در روش میانگین‌گیری وزنی ساده، میانگین پارامترهای لایه‌های خاک نسبت به ضخامت لایه سنجیده می‌شود. لذا میانگین هر کدام از پارامترها با استفاده رابطه (۵) محاسبه می‌شود. به جای پارامتر  $\phi$  (زاویه اصطکاک داخلی خاک) در این رابطه می‌تواند سایر پارامترهای خاک شامل  $c$ ،  $\gamma$  و  $E$  (چسبندگی، چگالی، مدول الاستیسیته) نیز قرار بگیرد. روش میانگین‌گیری وزنی قبلاً توسط Boone (1996) جهت ساده‌سازی خصوصیات خاک چند لایه زیر فونداسیون برای تخمین نشست الاستیک پی مورد استفاده قرار گرفته است.



شکل ۵- ترسیم شماتیک خاک دولایه پشت سازه نگهدارنده

$$\phi = \frac{\phi_1 H_1 + \phi_2 H_2}{H_1 + H_2} \quad (۴)$$

روش میانگین‌گیری دیگری که برای اولین بار در این تحقیق مورد بررسی قرار می‌گیرد، روش میانگین‌گیری گشتاوری می‌باشد. برای توضیح این روش لازم است یکبار مکانیزم گشتاور نیروهای ناشی از فشار جانبی خاک وارد بر سازه نگهدارنده مورد توجه قرار گیرد. مطابق رابطه (۳) توزیع فشار خاک پشت سازه نگهدارنده به شکل مثلثی بوده و لنگر گشتاور نیرو در یک سوم ارتفاع لایه می‌باشد. همانطور که از محاسبات فشار جانبی خاک می‌دانیم، میزان تاثیر خصوصیات لایه خاک بالایی در نیروهای وارده (در اثر بازوی لنگر بزرگتر آن) بیشتر است. لذا میانگین گشتاوری به صورت رابطه (۵) معرفی می‌گردد که در آن، لایه بالاتر خاک تاثیر بیشتری در میانگین پارامترها خواهد داشت. به جای پارامتر  $\phi$  در این رابطه می‌تواند سایر پارامترهای خاک شامل  $c$ ،  $\gamma$  و  $E$  نیز قرار بگیرد.

$$\phi = \frac{\phi_1 \left( \frac{H_1}{3} + H_2 \right) + \phi_2 \left( \frac{H_2}{3} \right)}{\frac{H_1}{3} + H_2 + \frac{H_2}{3}} \quad (۵)$$

به عنوان روش سوم در تعیین میانگین پارامترها روش حداقل دو روش فوق معرفی می‌گردد. حداقل مقادیر بدست آمده از روابط (۴) و (۵) می‌تواند پارامترهای لایه میانگین خاک را در جهت اطمینان تخمین بزند.

#### ۴- بررسی نتایج مدلسازی

همانطور که در بخش ۲ ذکر شد، خاک پشت گود به صورت ترکیبی از خاک دستی و خاک بکر ماسه‌ای و رسی در مدلسازی‌ها منظور شده است. در ادامه، جزئیات و نتایج هر کدام از حالت‌های میانگین‌گیری بررسی شده ارائه می‌شود.

##### ۴-۱- سازه نگهدارنده در شرایط لایه بندی خاک دستی فوقانی و خاک ماسه‌ای زیرین

در این حالت مشخصات خاک دستی و خاک ماسه‌ای مطابق جدول (۱) انتخاب شده است. ضخامت انتخاب شده برای لایه‌های خاک در سازه نگهدارنده ۴ متری برابر با ۱، ۲ و ۳ متر و در سازه نگهدارنده ۷ متری برابر با ۲، ۴ و ۶ متر می‌باشد. پارامترهای خاک شامل زاویه اصطکاک داخلی خاک ( $\phi^\circ$ )، چسبندگی ( $c$ , kPa)، چگالی ( $\gamma$ , kN/m<sup>3</sup>) و مدول تغییر شکل خاک ( $E$ , kPa) است. میزان سربار مجاور گود در این حالت برابر با ۱۰ کیلوپاسکال و فاصله خرپاها ۳ متر می‌باشد.

جدول ۱- خصوصیات لایه های خاک پشت سازه نگهبان در شرایط خاک دستی فوقانی و خاک ماسه‌ای زیرین

ارتفاع سازه نگهبان	نام لایه خاک	ضخامت لایه خاک	$\phi^\circ$	c (kPa)	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	E (kPa)
۴ متر	خاک دستی فوقانی	1, 2, 3 (m)	25	0	16	8000
	خاک ماسه‌ای زیرین	3, 2, 1 (m)	30	10	18	20000
۷ متر	خاک دستی فوقانی	2, 4, 6 (m)	25	0	16	8000
	خاک ماسه‌ای زیرین	5, 3, 1 (m)	30	10	18	20000

در جدول (۲) پارامترهای محاسبه شده برای سه روش میانگین‌گیری که در بخش قبلی شرح داده شده برای شرایط مذکور ارائه شده است. در جدول (۳) نیز نتایج طراحی مقاطع سازه خریا در برنامه SAP2000 برای حالت‌های مختلف جدول (۲) به همراه تغییر شکل‌های افقی و قائم محاسبه شده در نرم‌افزار اجزای محدود PLAXIS 3D مشاهده می‌شود. برای نتایج طراحی غیرمطلوب حالت‌های میانگین‌گیری، تغییر شکل‌ها محاسبه نشده است. در شکل (۵) مثالی از شرایط بارگذاری برای سازه نگهبان ۴ متری در برنامه مذکور برای حالت خاک دستی فوقانی و ماسه‌ای زیرین و روش میانگین‌گیری حداقل مشاهده می‌شود.

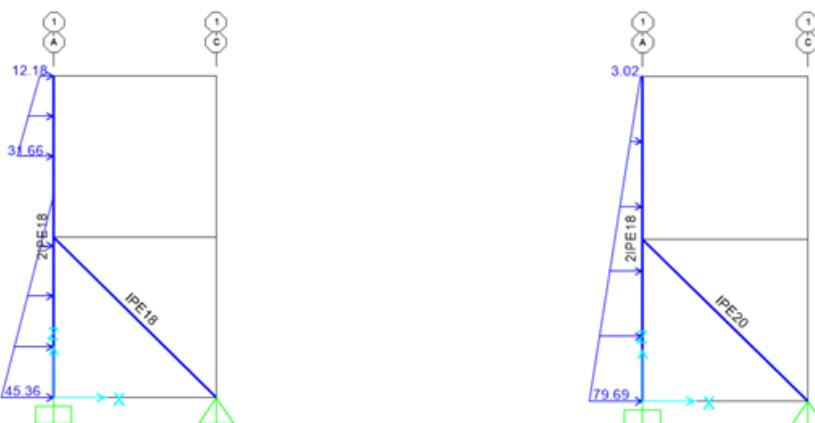
جدول ۲- خصوصیات لایه معادل خاک پشت سازه نگهبان در شرایط خاک دستی فوقانی و خاک ماسه‌ای زیرین

ارتفاع سازه نگهبان	ضخامت لایه های خاک	روش میانگین گیری	$\phi^\circ$	c (kPa)	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	E (kPa)
۴ متر	دستی ۱ متر، ماسه‌ای ۳ متر	وزنی	28.75	7.5	17.5	17000
		گشتاوری	26.15	2.31	16.46	10769
		حداقل	26.15	2.31	16.46	10769
	دستی ۲ متر، ماسه‌ای ۲ متر	وزنی	27.5	5	17	14000
		گشتاوری	26	2	16.4	10400
		حداقل	26	2	16.4	10400
	دستی ۳ متر، ماسه‌ای ۱ متر	وزنی	26.25	2.5	16.5	11000
		گشتاوری	25.71	1.43	16.29	9714
		حداقل	25.71	1.43	16.29	9714
	دستی ۲ متر، ماسه‌ای ۵ متر	وزنی	28.57	7.14	17.43	16571
		گشتاوری	26.14	2.24	16.45	10727
		حداقل	26.14	2.24	16.45	10727
۷ متر	دستی ۴ متر، ماسه‌ای ۳ متر	وزنی	27.14	4.29	16.86	13143
		گشتاوری	25.94	1.88	16.38	10250
		حداقل	25.94	1.88	16.38	10250
	دستی ۶ متر، ماسه‌ای ۱ متر	وزنی	25.71	1.43	16.29	9714
		گشتاوری	25.5	1.0	16.2	9200
		حداقل	25.5	1.0	16.2	9200

همانطور که از جدول (۳) مشاهده می‌شود، برای سازه نگهبان ۴ متری، روش میانگین‌گیری گشتاوری و روش میانگین‌گیری حداقل برای حالت خاک دستی و خاک ماسه‌ای زیرین نتایج مشابهی را بدست می‌دهد. همچنین برای این نوع سازه نگهبان، مقاطع طراحی شده با پارامترهای روش میانگین‌گیری گشتاوری و حداقل برای لایه‌بندی مورد بررسی، به حالت اصلی طراحی نزدیک‌تر بوده است. در طراحی با پارامترهای میانگین‌گیری گشتاوری یا حداقل، پروفیل عضو قائم، مشابه یا ضعیف‌تر از حالت اصلی و پروفیل عضو مایل، مشابه یا قویتر از حالت اصلی بوده است. تغییر شکل‌های بدست آمده از مدلسازی نشان می‌دهد، در این نوع سازه نگهبان، بیشترین تفاضل بین تغییر شکل‌ها در حالت اصلی و حالت میانگین‌گیری گشتاوری یا حداقل مربوط به لایه یک متری خاک دستی بوده و با افزایش ضخامت این لایه، تغییر شکل‌های افقی و قائم برآورد شده تقریباً نزدیک به حالت اصلی بوده است. در شکل ۷ مثالی از نتایج مدلسازی و تغییر شکل سازه نگهبان در برنامه PLAXIS 3D مشاهده می‌شود.

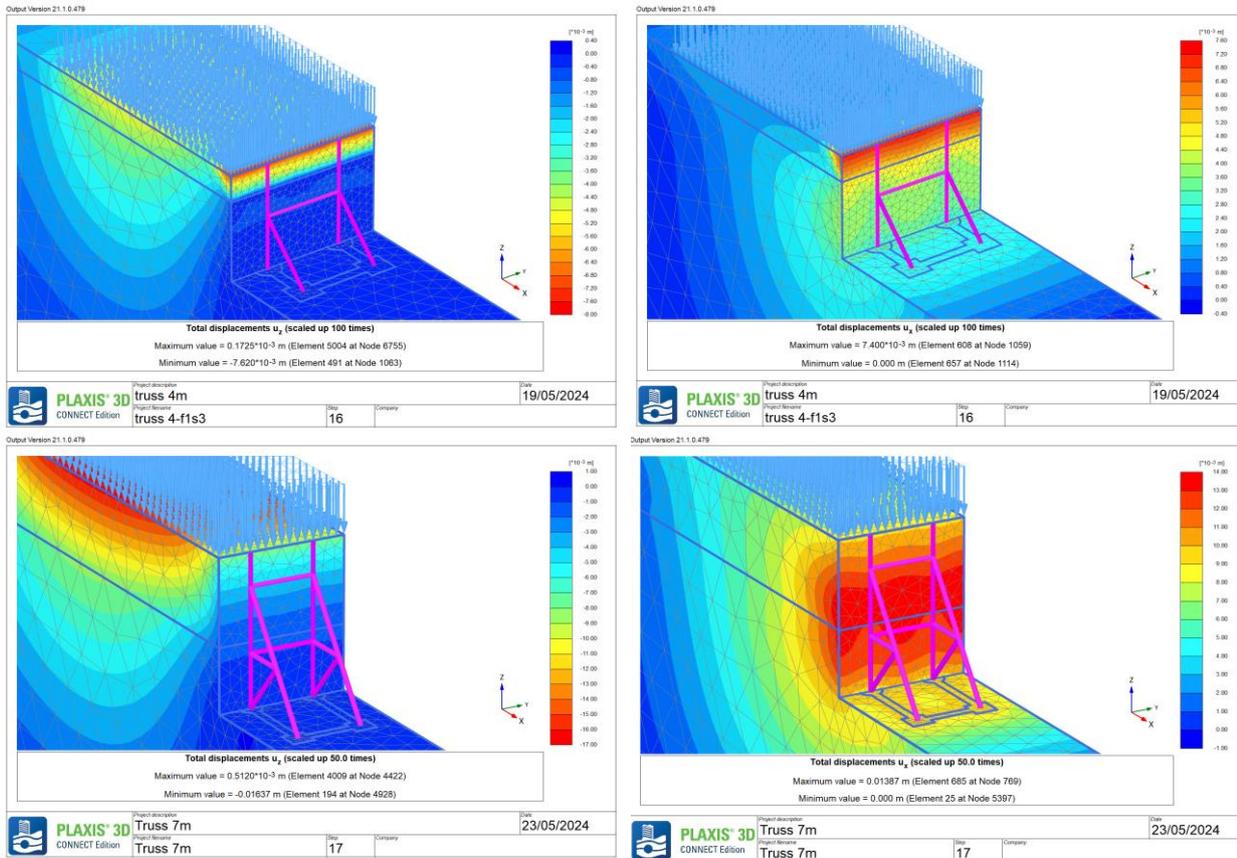
جدول ۳- نتایج طراحی اعضای سازه نگهبان در شرایط خاک دستی فوقانی و خاک ماسه‌ای زیرین

ارتفاع سازه نگهبان	شرایط خاک	پروفیل قائم	پروفیل مایل	بادبند افقی	بادبند مایل	تغییر شکل افقی Ux (mm)	تغییر شکل قائم Uz (mm)
۳ متر	حالت اصلی، دستی ۱ متر، ماسه‌ای ۲ متر	2IPE18	IPE18	---	---	7.4	7.62
	میانگین وزنی	IPE16	IPE16	---	---	---	---
	میانگین گشتاوری	2IPE18	IPE20	---	---	8.85	9.57
	میانگین حداقل	2IPE18	IPE20	---	---	8.85	9.57
۴ متر	حالت اصلی، دستی ۲ متر، ماسه‌ای ۲ متر	2IPE22	IPE20	---	---	9.86	11.05
	میانگین وزنی	2IPE14	IPE18	---	---	---	---
	میانگین گشتاوری	2IPE20	IPE22	---	---	9.30	10.27
	میانگین حداقل	2IPE20	IPE22	---	---	9.30	10.27
۳ متر	حالت اصلی، دستی ۳ متر، ماسه‌ای ۱ متر	2IPE22	IPE22	---	---	10.01	11.89
	میانگین وزنی	IPE24	IPE20	---	---	---	---
	میانگین گشتاوری	2IPE20	IPE22	---	---	10.71	12.39
	میانگین حداقل	2IPE20	IPE22	---	---	10.71	12.39
۵ متر	حالت اصلی، دستی ۲ متر، ماسه‌ای ۳ متر	2IPE20	2IPE20	2L8	L8	11.73	8.75
	میانگین وزنی	2IPE20	2IPE20	2L10	L10	13.26	9.1
	میانگین گشتاوری	2IPE24	IPE22	2L10	L10	19.73	14.39
	میانگین حداقل	2IPE24	IPE22	2L10	L10	19.73	14.39
۴ متر	حالت اصلی، دستی ۴ متر، ماسه‌ای ۳ متر	2IPE22	2IPE22	2L8	L10	13.09	10.04
	میانگین وزنی	2IPE22	2IPE20	2L10	L10	16.22	11.58
	میانگین گشتاوری	2IPE24	2IPE22	2L10	L10	20.68	15.12
	میانگین حداقل	2IPE24	2IPE22	2L10	L10	20.68	15.12
۶ متر	حالت اصلی، دستی ۶ متر، ماسه‌ای ۱ متر	2IPE24	2IPE22	2L10	L10	14.74	11.51
	میانگین وزنی	2IPE24	2IPE22	2L10	L10	21.87	16.02
	میانگین گشتاوری	2IPE24	2IPE22	2L10	L10	23.12	17.25
	میانگین حداقل	2IPE24	2IPE22	2L10	L10	23.12	17.25



شکل ۶- نمایی از بارگذاری سازه نگهبان ۴ متری در SAP2000 برای حالت اصلی (چپ) و میانگین حداقل (راست)

در مورد سازه نگهبان ۷ متری، نتایج جدول (۳) نشان می‌دهد، برای لایه‌بندی مورد بررسی، مقاطع طراحی شده با پارامترهای روش میانگین گیری وزنی، تشابه بیشتری با مقاطع حالت اصلی طراحی داشته است. همچنین میزان تغییر شکل برآورد شده توسط روش میانگین گیری وزنی، در این نوع سازه نگهبان نزدیک به حالت اصلی بوده است.



شکل ۷. مدلسازی و تغییر شکل سازه نگهبان در PLAXIS 3D، تغییر شکل افقی (راست) و تغییر شکل قائم (چپ)

#### ۴-۲- سازه نگهبان در شرایط لایه‌بندی خاک دستی فوقانی و خاک رسی زیرین

در این حالت مشخصات خاک دستی و خاک رسی مطابق جدول (۴) انتخاب شده است. ضخامت انتخاب شده برای لایه‌های خاک مشابه حالت قبل می‌باشد. میزان سربار مجاور گود در این حالت برابر با ۲۰ کیلوپاسکال و فاصله خرابها ۳ متر می‌باشد.

جدول ۴- خصوصیات لایه‌های خاک پشت سازه نگهبان در شرایط خاک دستی فوقانی و خاک رسی زیرین

ارتفاع سازه نگهبان	نام لایه خاک	ضخامت لایه خاک	$\phi^\circ$	c (kPa)	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	E (kPa)
۴ متر	خاک دستی فوقانی	1, 2, 3 (m)	25	5	16	8000
	خاک رسی زیرین	3, 2, 1 (m)	22	22	18	25000
۷ متر	خاک دستی فوقانی	2, 4, 6 (m)	25	5	16	8000
	خاک رسی زیرین	5, 3, 1 (m)	22	22	18	25000

در جدول (۵) پارامترهای محاسبه شده برای سه روش میانگین گیری که در فصل قبل شرح داده شده برای شرایط مذکور ارائه شده است. در جدول (۶) نیز نتایج طراحی مقاطع سازه خرابا و محاسبه تغییر شکل‌ها برای حالت‌های مختلف جدول (۵) مشاهده می‌شود. نتایج جدول (۶) نشان می‌دهد، در سازه نگهبان ۴ متری و در لایه‌بندی مورد بررسی، مقاطع طراحی شده با پارامترهای روش میانگین گیری حداقل، به حالت اصلی طراحی نزدیکتر بوده است. با توجه به این جدول، در این نوع سازه نگهبان، هر چه ضخامت لایه خاک دستی افزایش می‌یابد، دقت روش‌های میانگین گیری برای طراحی پروفیل قائم کاهش می‌یابد.

**جدول ۵- خصوصیات لایه معادل خاک پشت سازه نگهبان در شرایط خاک دستی فوقانی و خاک رسی زیرین**

E (kPa)	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	c (kPa)	$\phi^\circ$	روش میانگین گیری	ضخامت لایه های خاک	ارتفاع سازه نگهبان
20750	17.5	17.75	22.75	وزنی		
11923	16.46	8.92	24.31	گشتاوری	دستی ۱ متر، رسی ۳ متر	
11923	16.46	8.92	22.75	حداقل		
16500	17.0	13.5	23.5	وزنی		
11400	16.4	8.4	24.4	گشتاوری	دستی ۲ متر، رسی ۲ متر	۴ متر
11400	16.4	8.4	23.5	حداقل		
12250	16.5	9.25	24.25	وزنی		
10429	16.29	7.43	24.57	گشتاوری	دستی ۳ متر، رسی ۱ متر	
10429	16.29	7.43	24.25	حداقل		
19333	17.33	16.33	23	وزنی		
11778	16.44	8.78	24.33	گشتاوری	دستی ۲ متر، رسی ۵ متر	
11778	16.44	8.78	23	حداقل		
15286	16.86	12.29	23.71	وزنی		
11188	16.38	8.19	24.44	گشتاوری	دستی ۴ متر، رسی ۳ متر	۷ متر
11188	16.38	8.19	23.71	حداقل		
10429	16.29	7.43	24.57	وزنی		
9700	16.2	6.7	24.7	گشتاوری	دستی ۶ متر، رسی ۱ متر	
9700	16.2	6.7	24.57	حداقل		

با اینحال این روش میانگین گیری در طراحی پروفیل مایل و مشابهن آن به حالت اصلی، نسبتاً موفق بوده است. همچنین در جدول (۶)، برای سازه نگهبان ۴ متری، مقایسه تغییر شکل سازه نگهبان در حالت اصلی و حالت میانگین گیری حداقل برای حالت هایی که طراحی موفقی داشته، توسط مدل سازی المان محدود سه بعدی ارائه شده است. همانطور که مشاهده می شود میزان تغییر شکل برآورد شده توسط این روش ها با حالت اصلی اختلاف دارد. با اینحال تغییر شکل های برآورد شده با روش میانگین گیری حداقل، در جهت اطمینان و بیشتر از حالت اصلی بوده است. در مورد سازه نگهبان ۷ متری، نتایج جدول (۶) نشان می دهد، برای لایه بندی مورد بررسی، مقاطع طراحی شده با پارامترهای روش میانگین گیری وزنی، تشابه بیشتری با مقاطع حالت اصلی طراحی داشته است. همچنین در این نوع سازه نگهبان، میزان تغییر شکل برآورد شده توسط روش میانگین گیری وزنی نزدیک به حالت اصلی بوده است.

#### ۴-۳- سازه نگهبان در شرایط لایه بندی ترکیب لایه های خاک رسی و ماسه ای

در این حالت مشخصات خاک رسی و خاک ماسه ای مطابق جدول (۷) انتخاب شده است. ضخامت انتخاب شده برای لایه های خاک مشابه حالت قبل می باشد. میزان سربار مجاور گود در این حالت برابر با ۳۰ کیلو پاسکال و فاصله خرپاها ۳ متر می باشد. در جدول (۸) پارامترهای محاسبه شده برای سه روش میانگین گیری برای شرایط لایه بندی مذکور ارائه شده است. در جدول (۹) نیز نتایج طراحی مقاطع سازه خرپا و محاسبه تغییر شکل ها برای حالت های مختلف جدول (۸) مشاهده می شود. نتایج جدول (۸) نشان می دهد، در لایه بندی مورد بررسی، در سازه نگهبان ۴ متری، مقاطع طراحی شده با پارامترهای روش های میانگین گیری وزنی و میانگین گیری حداقل، به حالت اصلی طراحی نزدیکتر بوده است. روش میانگین گیری حداقل در طراحی مقاطع در این حالت، محافظه کارانه تر می باشد. با توجه به تفاوت زیاد خصوصیات لایه های رس و ماسه در شرایط مورد بررسی، در این نوع سازه نگهبان، دقت هیچکدام از روش های میانگین گیری بطور کامل مطلوب نبوده است. همچنین تغییر شکل های برآورد شده در این سازه نگهبان نشان می دهد، دقت روش میانگین گیری حداقل، نسبت به روش وزنی بالاتر بوده است. در مورد سازه نگهبان ۷ متری نیز برای لایه بندی مورد بررسی و حالت ضخامت ۲ متر لایه رسی، مقاطع طراحی شده با پارامترهای روش میانگین گیری حداقل، تشابه بیشتری با مقاطع حالت اصلی طراحی داشته است. برای ضخامت های بیشتر لایه رسی، مقاطع

طراحی شده با پارامترهای روش میانگین گیری گشتاوری، تشابه بیشتری با مقاطع حالت اصلی طراحی داشته است، همچنین در این نوع سازه نگهدارنده، میزان تغییر شکل برآورد شده توسط روش‌های میانگین گیری، نزدیک به حالت اصلی بوده است.

**جدول ۶- نتایج طراحی اعضای سازه نگهدارنده در شرایط خاک دستی فوقانی و خاک رسی زیرین**

ارتفاع سازه نگهدارنده	شرایط خاک	پروفیل قائم	پروفیل مایل	بادبند افقی	بادبند مایل	تغییر شکل افقی Ux (mm)	تغییر شکل قائم Uz (mm)
۳ متر	حالت اصلی، دستی ۱ متر، رسی ۳ متر	2IPE16	IPE14	---	---	5.46	7.89
	میانگین وزنی	IPE14	IPE14	---	---	---	---
	میانگین گشتاوری	IPE18	IPE18	---	---	---	---
	میانگین حداقل	2IPE14	IPE18	---	---	7.64	13.91
۴ متر	حالت اصلی، دستی ۲ متر، رسی ۲ متر	2IPE18	IPE18	---	---	6.78	9.26
	میانگین وزنی	IPE16	IPE14	---	---	---	---
	میانگین گشتاوری	IPE18	IPE18	---	---	---	---
	میانگین حداقل	2IPE14	IPE18	---	---	7.79	14.54
۵ متر	حالت اصلی، دستی ۳ متر، رسی ۱ متر	2IPE20	IPE20	---	---	---	---
	میانگین وزنی	IPE16	IPE14	---	---	---	---
	میانگین گشتاوری	IPE20	IPE20	---	---	---	---
	میانگین حداقل	IPE20	IPE20	---	---	---	---
۶ متر	حالت اصلی، دستی ۲ متر، رسی ۵ متر	2IPE18	2IPE18	2L8	L8	13.06	13.60
	میانگین وزنی	2IPE20	2IPE18	2L8	L10	14.68	14.75
	میانگین گشتاوری	2IPE22	2IPE20	2L10	L10	---	---
	میانگین حداقل	2IPE24	2IPE20	2L10	L10	---	---
۷ متر	حالت اصلی، دستی ۴ متر، رسی ۳ متر	2IPE22	2IPE20	2L8	L8	13.87	16.37
	میانگین وزنی	2IPE22	2IPE20	2L10	L10	16.87	18.62
	میانگین گشتاوری	2IPE22	2IPE20	2L10	L10	21.13	25.43
	میانگین حداقل	2IPE24	2IPE20	2L10	L10	21.42	25.48
۸ متر	حالت اصلی، دستی ۶ متر، رسی ۱ متر	2IPE24	2IPE22	2L10	L10	14.48	19.3
	میانگین وزنی	2IPE24	2IPE22	2L10	L10	22.2	27.31
	میانگین گشتاوری	2IPE24	2IPE22	2L10	L10	23.51	29.39
	میانگین حداقل	2IPE24	2IPE22	2L10	L10	23.58	29.4

**جدول ۷- خصوصیات لایه های خاک پشت سازه نگهدارنده در شرایط خاک رسی فوقانی و خاک ماسه‌ای زیرین**

ارتفاع سازه نگهدارنده	نام لایه خاک	ضخامت لایه خاک	$\phi^\circ$	c (kPa)	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	E (kPa)
۴ متر	خاک رسی فوقانی	1, 2, 3 (m)	20	30	18	25000
	خاک ماسه‌ای زیرین	3, 2, 1 (m)	28	5	17	20000
۷ متر	خاک رسی فوقانی	2, 4, 6 (m)	20	30	18	25000
	خاک ماسه‌ای زیرین	5, 3, 1 (m)	28	5	17	20000

**جدول ۸- خصوصیات لایه معادل خاک پشت سازه نگهدارنده در شرایط خاک رسی فوقانی و خاک ماسه‌ای زیرین**

ارتفاع سازه نگهدارنده	ضخامت لایه های خاک	روش میانگین گیری	$\phi^\circ$	c (kPa)	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	E (kPa)
۴ متر	رسی ۱ متر، ماسه‌ای ۳ متر	وزنی	26	11.25	17.25	21250
		گشتاوری	21.85	24.23	17.77	23846
		حداقل	26	11.25	17.25	21250
۴ متر	رسی ۲ متر، ماسه‌ای ۲ متر	وزنی	24	17.5	17.5	22500

E (kPa)	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	c (kPa)	$\phi^\circ$	روش میانگین گیری	ضخامت لایه های خاک	ارتفاع سازه نگهبان
24000	17.8	25	21.6	گشتاوری		
22500	17.5	17.5	21.6	حداقل		
23750	17.75	23.75	22	وزنی		
24286	17.86	26.43	21.14	گشتاوری	رسی ۳ متر، ماسه‌ای ۱ متر	
23750	17.75	23.75	21.14	حداقل		
21429	17.29	12.14	25.71	وزنی		
23864	17.77	24.32	21.82	گشتاوری	رسی ۲ متر، ماسه‌ای ۴ متر	
21429	17.29	12.14	21.82	حداقل		
22857	17.57	19.29	23.43	وزنی		
24063	17.81	25.31	21.50	گشتاوری	رسی ۴ متر، ماسه‌ای ۳ متر	۷ متر
22857	17.57	19.29	21.50	حداقل		
24286	17.86	26.43	21.14	وزنی		
24500	17.9	27.5	20.8	گشتاوری	رسی ۶ متر، ماسه‌ای ۱ متر	
24286	17.86	26.43	20.8	حداقل		

جدول ۹- نتایج طراحی اعضای سازه نگهبان به در شرایط خاک رسی فوقانی و خاک ماسه‌ای زیرین

تغییر شکل قائم Uz (mm)	تغییر شکل افقی Ux (mm)	بادبند مایل	بادبند افقی	پروفیل مایل	پروفیل قائم	شرایط خاک	ارتفاع سازه نگهبان
20.25	13.52	---	---	IPE24	2IPE18	حالت اصلی، رسی ۱ متر، ماسه‌ای ۳ متر	
19.47	8.96	---	---	IPE24	2IPE24	میانگین وزنی	
---	---	---	---	IPE16	IPE16	میانگین گشتاوری	
20.77	10.5	---	---	IPE27	2IPE27	میانگین حداقل	
19.46	11.37	---	---	IPE20	IPE22	حالت اصلی، رسی ۲ متر، ماسه‌ای ۲ متر	
18.18	7.02	---	---	IPE20	IPE20	میانگین وزنی	۴ متر
---	---	---	---	IPE16	IPE16	میانگین گشتاوری	
18.23	7.21	---	---	IPE22	IPE24	میانگین حداقل	
18.67	9.83	---	---	IPE14	IPE20	حالت اصلی، رسی ۳ متر، ماسه‌ای ۱ متر	
17.13	7.65	---	---	IPE16	IPE16	میانگین وزنی	
---	---	---	---	IPE14	IPE14	میانگین گشتاوری	
17.14	7.72	---	---	IPE16	IPE16	میانگین حداقل	
19.03	14.89	L12	2L10	2IPE20	2IPE24	حالت اصلی، رسی ۲ متر، ماسه‌ای ۵ متر	
19.42	13.51	L10	2L10	2IPE20	2IPE22	میانگین وزنی	
---	---	L8	2L8	2IPE16	2IPE20	میانگین گشتاوری	
19.55	14.56	L12	2L10	2IPE22	2IPE24	میانگین حداقل	۷ متر
18.61	16.12	L8	2L8	2IPE14	2IPE18	حالت اصلی، رسی ۴ متر، ماسه‌ای ۳ متر	
18.25	13.73	L10	2L8	2IPE18	2IPE20	میانگین وزنی	
17.33	13.6	L8	2L8	2IPE16	2IPE18	میانگین گشتاوری	
---	---	L10	2L10	2IPE18	2IPE22	میانگین حداقل	
18.22	16.42	L8	2L8	2IPE14	2IPE16	حالت اصلی، رسی ۶ متر، ماسه‌ای ۱ متر	
17.23	14.22	L8	2L8	2IPE16	2IPE18	میانگین وزنی	۷ متر
17.08	14.29	L8	2L8	2IPE14	2IPE18	میانگین گشتاوری	
17.24	14.32	L8	2L8	2IPE16	2IPE18	میانگین حداقل	

## ۵- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

بررسی چگونگی معادل‌سازی و میانگین‌گیری از خصوصیات خاک چندلایه گودبرداری شده در طراحی سازه نگهبان خریایی در این تحقیق، به نوبه خود منحصر به فرد بوده و قبلاً به این شکل برای طراحی، مدلسازی و مطالعه رفتار تغییر شکلی گودبرداری، مورد استفاده قرار نگرفته است. با انجام طراحی و مدلسازی تغییر شکل گودبرداری برای گود حفاظت شده با سازه نگهبان خریایی، در شرایط مختلف خاک چند لایه و یک لایه معادل آن با استفاده از ابزارهای طراحی ژئوتکنیک و سازه‌ای و روش اجزاء محدود سه بعدی، نتایج زیر بدست آمد:

- ۱- برای سازه نگهبان خریایی به ارتفاع ۴ متر، بطور کلی، روش میانگین‌گیری حداقل در طراحی مقاطع سازه نگهبان موفق‌تر از دو روش دیگر عمل کرده است. با اینحال مقاطع طراحی شده توسط این روش در برخی موارد محافظه کارانه بوده است.
- ۲- برای سازه نگهبان فوق‌الذکر، بطور کلی، تغییر شکل‌های محاسبه شده توسط روش میانگین‌گیری حداقل، دقت بالاتری نسبت به دو روش دیگر داشته و نزدیک به حالت اصلی خاک چندلایه بوده است.
- ۳- نتایج طراحی‌ها و محاسبات سازه نگهبان ۴ متری در شرایط وجود خاک دستی نشان می‌دهد در صورتی که ضخامت لایه خاک دستی زیاد باشد به گونه‌ای که ضخامت آن برابر یا بیش از نصف ارتفاع گود باشد، روش‌های میانگین‌گیری بررسی شده در این تحقیق برای شرایط مذکور دقت مناسبی نداشته و لازم است یا تماماً از پارامترهای لایه خاک دستی استفاده شود و یا ضریب وزنی بیشتری برای پارامترهای این لایه در میانگین‌گیری‌ها منظور گردد.
- ۴- در مورد سازه نگهبان خریایی به ارتفاع ۷ متر، برای حالتی که لایه‌بندی زمین شامل خاک دستی باشد، استفاده از روش میانگین‌گیری وزنی دقت بیشتری هم در طراحی مقاطع و هم در تخمین تغییر شکل سازه نگهبان نسبت به روش‌های دیگر میانگین‌گیری داشته است.
- ۵- برای سازه نگهبان فوق‌الذکر، در شرایطی که ترکیب لایه‌های زمین شامل خاک رسی و ماسه‌ای باشد انتخاب روش میانگین‌گیری متفاوت خواهد بود. در این شرایط و حالتی که ضخامت لایه خاک رسی کمتر از لایه ماسه‌ای باشد، روش میانگین‌گیری حداقل موفقیت بیشتری در طراحی مقاطع و مشابهت با حالت اصلی داشته است. در حالتی که ضخامت لایه خاک رسی بیشتر از لایه ماسه‌ای باشد، روش میانگین‌گیری گشتاوری عملکرد بهتری در طراحی مقاطع داشته است. دقت هر دو روش میانگین‌گیری در تخمین تغییر شکل‌ها در این شرایط مناسب بوده است.

## مراجع

- Ashrafi, H. National Building Regulations Compilation and Promotion Office (2014) "Principles and Foundations of Excavation and Guard Structures", Bahineh Publications, Tehran. (In Persian)
- Bilgin, O., and Erten, M. B. (2009). "Analysis of anchored sheet pile wall deformations." In Contemporary topics in ground modification, problem soils, and geo-support (pp. 137-144).
- Boone S.J. (1996). Ground movement related building damage. Journal of Geotechnical Engineering Vol.122 No 11.
- Das, B.M., and Sivakugan, N. (2021). Principles of Foundation Engineering. 9th Edition. Cengage Learning Publisher.
- Emamzadeh, S. S. (2022). Numerical analysis of inclined struts and truss structure in excavation stabilization based on the damage potential index (DPI). Journal of Structural and Construction Engineering, 8(Special Issue 4), 306-327. (In Persian)
- Fakher, A., (2005). The Mechanism of Inclined Struts in Conventional Excavation Adjacent to Existing Buildings, Report of Road, Housing & Urban Development Research Centre. (In Persian)
- Fakher, A., (2005). The Mechanism of Inclined Struts in Conventional Excavation Adjacent to Existing Buildings, Report of Road, Housing & Urban Development Research Centre. (In Persian).
- Finno, R. J., and Roboski, J. F. (2005). Three-dimensional responses of a tied-back excavation through clay. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 131(3), 273-282.

Hsieh, P. G., and Ou, C. Y. (1998). Shape of ground surface settlement profiles caused by excavation." *Canadian geotechnical journal*, 35(6), 1004-1017.

Juang, C.H., Shuster, M. and Ou C.Y. (2016) Fully probabilistic framework for evaluating excavation-induced damage potential of adjacent building. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. Vol.137, No2.

Khatami, S.R. (2007). Modeling of the method of diagonal beams in excavation with two-dimensional plaxis software, Ms.C Thesis, 2008. Ferdowsi University of Mashhad. (In Persian)

Mahdavi, M. (2020). Assessing the Effect of Underground Tunnel Diameter on Structure-Foundation-Soil Performance under the Kobe Earthquake. *World Academy of Science, Engineering and Technology, Open Science Index* 163, *International Journal of Civil and Environmental Engineering*, 14(7), 229 - 233.

Maleki, Mahdi and Nabizadeh, Ali. (2021). Seismic performance of deep excavation restrained by guardian truss structures system using quasi-static approach. *SN Applied Sciences*. 3. 10.1007/s42452-021-04415-9

Roboski, J., and Finno, R. J. (2006). Distributions of ground movements parallel to deep excavations in clay. *Canadian geotechnical journal*, 43(1), 43-58.

Sabzi Z, and Fakher A. (2013). A Field Investigation in to the Performance of Inclined Struts connected to Adjacent Buildings During Excavation. *Modares Civil Engineering journal*. 2013; 13 (4) :27-43. (In Persian)

Tavakoli, S., Aminfar, M.H., and Edalati, M. (2017). Investigation the Effects of Soil Excavation on Earth Moving in Urban Areas (Case Study: Ilam City), *Journal of Civil and Environmental Engineering*, Vol 47, Issue 2, 21-27. (In Persian).