



*Research Article*

## **The suggestion of soil stiffness relationship under foundation to consider soil-structure interaction**

**Morvarid Hajian<sup>1\*</sup>, Reza Attarnejad<sup>2</sup>**

1\*- PhD. candidate, School of civil Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

2. Professor, School of civil Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

Received: 12 September 2023; Revised: 09 October 2023; Accepted: 22 October 2023; Published: 22 October 2023

### **Abstract:**

*The soil-structure interaction is one of the most important challenges in structural design that can significantly change the seismic response of structures. . During an earthquake, the behavior of the soil under the structure plays an important role in the response of the structure and affects the dynamic characteristics of the structure. Therefore, there is a need for more accurate modeling of the soil environment in special structures. In engineering applications, the soil is often not modeled and its important effects are neglected, due to the unlimited nature of the soil environment and its modeling is more complicated than the structure modeling. There are different methods for modeling the soil-structure interaction phenomenon. One of the most popular methods is the method of beam on the elastic foundation. This method is based on the Winkler model, which is widely used in the design codes, but does not accurately show the changes in soil stiffness along the length of the foundation. Therefore, in the present article, the reaction of the soil under the foundation is investigated, and finally, a suitable and simplified model is presented for modeling the soil-structure interaction in engineering applications.*

*To achieve this goal, several structures were modeled in 3D in the OpenSees environment. Then, the output of the reaction of the soil environment and the foundation of the structure has been used to estimate the hardness of the soil environment and foundation and extract simplified engineering relations.*

**Keywords:** *Soil-structure interaction, winkler model, beam on elastic foundation, strip foundation, soil stiffness*

**Cite this article as:** Hajian, M., & Attarnejad, R. (2023). The suggestion of soil stiffness relationship under foundation to consider soil-structure interaction. *Civil and Project* 5(7), 47-60.

<https://doi.org/10.22034/cpj.2023.420633.1227>

**ISSN:** 2676-511X / **Copyright:** © 2023 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/>

### پیشنهاد رابطه‌ی سختی خاک زیر پی برای در نظر گرفتن اندرکنش خاک-سازه

مروارید حاجیان<sup>۱\*</sup>، رضا عطارنژاد<sup>۲</sup>

\*۱- دانشجوی مقطع دکتری مهندسی سازه، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

۲- استاد دانشکده عمران، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

تاریخ دریافت: ۲۱ شهریور ۱۴۰۲؛ تاریخ بازنگری: ۱۷ مهر ۱۴۰۲؛ تاریخ پذیرش: ۳۰ مهر ۱۴۰۲؛ تاریخ انتشار آنلاین: ۳۰ مهر ۱۴۰۲

#### چکیده:

اندرکنش خاک و سازه از چالش‌های بسیار مهم در طراحی سازه‌ها است که می‌تواند پاسخ لرزه‌ای سازه‌ها را به طور قابل توجهی تغییر دهد. در هنگام وقوع زلزله رفتار خاک زیر سازه نقش مهمی در پاسخ سازه ایفا می‌کند و مشخصات دینامیکی سازه را تحت تأثیر قرار می‌دهد. بنابراین در سازه‌های ویژه نیاز به مدل‌سازی دقیق‌تر محیط خاک است. در کاربردهای مهندسی غالباً خاک زیر سازه مدل نمی‌شود و از تأثیرات مهم آن صرف نظر می‌گردد، زیرا به علت نامحدود بودن محیط خاک، مدل‌سازی آن پیچیدگی بیش‌تری نسبت به مدل‌سازی سازه دارد. روش‌های مختلفی برای مدل‌سازی پدیده‌ی اندرکنش خاک - سازه وجود دارند. یکی از این روش‌ها روش معروف تیر بر روی بستر الاستیک است. این روش براساس مدل وینکلر بنا شده است که در طرح آیین‌نامه‌ای به طور گسترده استفاده می‌شود ولی به طور دقیق تغییرات سختی خاک در طول پی را نشان نمی‌دهد. بنابراین در مقاله‌ی حاضر به بررسی عکس‌العمل خاک زیر پی پرداخته می‌شود و در نهایت مدل مناسب و ساده‌شده‌ای جهت مدل‌سازی اندرکنش خاک - سازه در کاربردهای مهندسی ارائه می‌شود. برای رسیدن به این هدف چند سازه به صورت سه بعدی در محیط *OpenSees* مدل شدند. سپس از خروجی عکس‌العمل محیط خاک و فونداسیون سازه برای تخمین سختی محیط خاک و فونداسیون و استخراج روابط مهندسی ساده‌شده استفاده شده است.

#### کلمات کلیدی:

اندرکنش خاک-سازه، مدل وینکلر، بستر الاستیک، بستر دوپارامتری، سختی خاک زیر پی

## ۱- مقدمه

یکی از عمومی‌ترین چالش‌هایی که مهندسين عمران در تحلیل و طراحی لرزه‌ای سازه‌ها با آن مواجه هستند، مسئله‌ی اندرکنش خاک - سازه است. درنظر گرفتن اثرات ناشی از اندرکنش خاک - سازه در تحلیل لرزه‌ای و طراحی سازه‌ها حائز اهمیت می‌باشد. تحریک لرزه‌ای تجربه شده توسط سازه‌ها تابعی از منبع زمین‌لرزه، مسیر عبور موج لرزه‌ای، محل وقوع و اثرات اندرکنش خاک - سازه می‌باشد. با درنظر گرفتن اندرکنش خاک - سازه تعداد درجات آزادی در سازه افزایش می‌یابد. در این حالت به دلیل حضور مودهای حرکت گهواره‌ای، لغزش، پیچش و استهلاك انرژی توسط آن‌ها، تقاضای لرزه‌ای سازه کاهش می‌یابد. عموماً در تحلیل سازه‌هایی که تحت تحریک ارتعاشات ناشی از زلزله قرار می‌گیرند، فرض می‌شود که سازه در پایه گیردار است و از اثر خصوصیات محلی زمین بر پاسخ سازه‌ها صرف نظر می‌شود. انعطاف‌پذیری بستر می‌تواند تغییرمکان‌های جانبی و دریافت طبقات سازه‌ها روی خاک نرم را افزایش دهد و عملکرد سازه‌ها را تغییر می‌دهد. ازین‌رو با تغییر عملکرد سازه‌ای تضمین ایمنی آن‌ها بدون درنظر گرفتن اثرات اندرکنش خاک - سازه به ویژه برای سازه‌های روی خاک نرم قابل اطمینان نیست (Kramer, 1996, Nguyen, 2017, Wolf, 1985, Widad et. al., 2019). به عبارت دیگر، مطابق با مطالعات ولتسوس و میک (Veletsos and Meek, 1974) لحاظ نمودن اثرات اندرکنش خاک - پی - سازه در مقایسه با سیستم با تکیه‌گاه ثابت، دو اثر اساسی روی پاسخ سازه‌ای دارد: ۱) سیستم اندرکنش خاک - سازه درجات آزادی بیش‌تر و درنتیجه خصوصیات دینامیکی متفاوتی دارد؛ انعطاف‌پذیری فونداسیون پربودهای طبیعی سازه را به دلیل کاهش سختی سازه‌ای افزایش می‌دهد. ۲) بخش قابل ملاحظه‌ی انرژی ارتعاشی سیستم خاک - سازه می‌تواند از طریق امواج ارتعاشی منتشر شده از سیستم سازه - پی به خاک برگردد و یا توسط میرایی هیستریزیس در خاک اتلاف گردد (NIST, 2012).

روش‌های مدل‌سازی سیستم خاک - سازه را می‌توان به دو دسته تقسیم‌بندی کرد: روش زیرسازه و روش مستقیم.

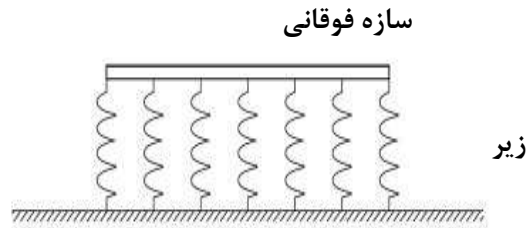
در روش مستقیم محیط خاک و سازه همزمان با هم به عنوان سیستم کامل و به صورت سه بعدی مدل و تحلیل می‌شوند. به این روش، روش محیط پیوسته نیز گفته می‌شود. در این روش هندسه‌ی خاک به صورت المان‌های اجزا محدود صلب همراه با پی و عناصر ساختاری، المان‌های مرزی و عناصر رابط در لبه‌های پی نشان داده می‌شود. از آنجایی که حل مسئله به روش مستقیم SSI به لحاظ محاسباتی دشوار است، به خصوص زمانی که سیستم از نظر هندسی پیچیده باشد یا دارای ویژگی‌های رفتاری غیرخطی در خاک یا مصالح سازه‌ای باشد، به ندرت از این روش در عمل استفاده می‌شود. محققین بسیاری مانند دسای و همکاران<sup>۱</sup> (Desai et. al., 1982)، میرهاشمیان و همکاران (Mirhasemian et. al., 2009)، طباطبایی‌فر و معصومی (Tabatabaiefar and Massumi, 2010) و گوناسمیا و دجاقابا<sup>۲</sup> (Gouasmia and Djeghaba, 2010) ازین روش برای تحلیل اندرکنش خاک - سازه استفاده کرده‌اند.

در روش زیرسازه محیط خاک با استفاده از فنرها و میراگرها و یا المان‌های غیرخطی پیچیده‌تر مدل می‌شود. خصوصیات سختی و میرایی اندرکنش خاک و پی توسط مدل‌های تابع امیدانس یا تعدادی میراگر و فنرها تعیین می‌شوند. توابع امیدانس بیان‌گر خصوصیات میرایی و سختی وابسته به فرکانس خاک و پی هستند.

کاربرد عملی روش سازه‌ای نسبت به روش محیط پیوسته به دلیل توانایی مدل‌سازی و حل آسان در نرم‌افزارهای تجاری موجود، راحت‌تر می‌باشد. یکی از روش‌های معروف زیرسازه مدل وینکلر<sup>۳</sup> (Winkler, 1867) است. در این روش پی و خاک به صورت دال یا تیر ساده‌ای بر روی فنرهای محوری با سختی ثابت مدل می‌شوند. مطابق با باولز<sup>۴</sup> (Bowels, 1996) روش وینکلر محیط خاک را با فنرهای الاستیک خطی افقی و قائم با فاصله‌ی کم از هم نشان می‌دهد که یکسان هستند اما به هم وابسته نیستند. سختی فنر در مدل وینکلر

<sup>۱</sup> Desai et al.  
<sup>۲</sup> Gouasmia and Djeghaba  
<sup>۳</sup> Winkler  
<sup>۴</sup> Bowels

رابطه‌ی خطی جبری بین تغییرمکان و فشار سطحی در جهت فنرها را نشان می‌دهد. نمایش فیزیکی پی وینکلر در شکل ۱ آورده شده است.



شکل ۱: روش وینکلر (Winkler)

سختی فنر مجزا همیشه به عنوان ارتباط بین نشست و نیروی عکس‌العمل در یک نقطه تعریف می‌شود. برای یک نقطه مدول فنرها به صورت رابطه‌ی ۱ نوشته می‌شود:

$$k(z) = \frac{p(z)}{W(z)} \quad (1)$$

که در این رابطه  $p(z)$  بیانگر عکس‌العمل خاک قائم در واحد طول شمع و  $W(z)$  نشست مطابق با آن در عمق  $z$  می‌باشند. به عنوان مدول عکس‌العمل زیرین سیستم (ضریب عکس‌العمل خاک) است و برحسب واحد نیرو در واحد طول مربع بیان می‌شود.  $k(z)$  تنها تابعی از خاک نیست و وابسته به طبیعت خاک و فونداسیون و ابعاد منطقه بارگذاری شده دارد و با عمق لایه نیز تغییر می‌کند.

طباطبایی فر (Tabatabaiefar, 2012) اثرات اندرکنش دینامیکی خاک - سازه را روی پاسخ لرزه‌ای قاب‌های خمشی بررسی کرد. در این پژوهش، از سه مدل سازه با تعداد طبقات ۵، ۱۰ و ۱۵ بر روی سه نوع خاک  $C_e$ ،  $D_e$  و  $E_e$  طبق آیین‌نامه‌ی استرالیا و نرم‌افزار روش تفاضل محدود FLAC2D استفاده شد. این محقق به این نتیجه رسید که اندرکنش دینامیکی خاک - سازه نقش مهمی در رفتار لرزه‌ای قاب‌های خمشی با ارتفاع متوسط دارد؛ هرچه خاک نرم‌تر باشد، اثرات اندرکنش خاک - سازه مهم‌تر می‌شوند و حتماً باید در مدل‌سازی در نظر گرفته شوند. رحیم و همکاران (Raheem et. al., 2015) مشاهده کردند که پی‌رود اصلی نه تنها تابعی از ارتفاع ساختمان است بلکه تابعی از اندرکنش خاک - سازه نیز می‌باشد. پی‌رود اصلی محاسبه شده‌ی یک سازه با در نظر گرفتن اندرکنش خاک - سازه بیش‌تر از حالت بدون در نظر گرفتن اندرکنش خاک - سازه می‌باشد. به عبارت دیگر تغییر در سختی خاک به طور قابل توجهی روی پی‌رود اصلی ارتعاش اثر دارد. بازان و همکاران نیز به این نتیجه رسیدند که انعطاف‌پذیری خاک باعث افزایش جابه‌جایی نسبی در پی‌رودهای کمتر از ۱،۶ ثانیه و کاهش آن برای پی‌رودهای بیش از ۱،۶ می‌شود. نگوین<sup>۵</sup> (Nguyen, 2017) اثر مشخصات پی را روی عملکرد لرزه‌ای سازه‌های با ارتفاع متوسط با در نظر گرفتن اندرکنش خاک - پی - سازه بررسی کرده است. برای این هدف از مدل‌سازی عددی توسط نرم‌افزار آباکوس استفاده کرده است. در این تحقیق هم پی‌های کم عمق و سطحی و هم شمع مورد بررسی قرار گرفته است. در ادامه نتایج هر بخش به طور خلاصه آورده شده‌اند. زمانی که ابعاد فونداسیون کاهش می‌یابد، به علت افزایش پی‌رود یک کاهش قابل ملاحظه در برش‌های پایه وجود دارد. ما و همکاران نشان داده‌اند که حرکت گهواره‌ای پی می‌تواند مود بحرانی ارتعاش پی باشد، زیرا میرایی هیستریزیس بسیار کم آن موجب ایجاد دامنه‌ی حرکت بالا، زمانی که فرکانس‌های تحریک به شرایط تشدید نزدیک باشند، می‌شود.

طبق گفته‌ی گزتاس و میلوناکیس<sup>۶</sup> (Gazetas and Mylonakis, 1998; Mylonakis and Gazetas, 2000)، محیط خاک اجازه‌ی برخی حرکات را به علت انعطاف‌پذیری خود می‌دهد و این باعث کاهش سختی کلی سازه می‌شود و ازین‌رو باعث افزایش پی‌رودهای طبیعی

<sup>۵</sup> Nguyen  
<sup>۶</sup> Gazetas and Mylonakis

سیستم می‌شود. حکم‌آبادی و همکاران (Hokmabadi et. al., 2014) مقایسه‌ای بین شرایط پی مختلف انجام دادند. نتایج عددی نشان می‌دهند که پی کم عمق تغییرشکل و دررفت بیش‌تری ایجاد می‌کند اما برش پایه و چرخش گهواره‌ای برای پی آن کم‌تر است. در مطالعه‌ی انجام شده توسط ریچودهری<sup>۷</sup> (Raychowdhury, 2008) یک مدل عددی براساس مفهوم تیر روی فونداسیون وینکلر غیرخطی برای به دست آوردن رفتار پی توسعه یافته است. در این پژوهش مشاهده شد که تقاضای دررفت حداکثر سازه در حالت فنر غیرخطی کم‌تر از حالت بستر الاستیک است. چن و همکاران<sup>۸</sup> (Chen et. al., 2010) با استفاده از مدل تیر روی پی وینکلر غیرخطی، اثرات ابعاد پی روی پاسخ لرزه‌ای قاب‌های خمشی را بررسی کرده‌اند.

هدف مقاله‌ی حاضر ارائه‌ی بررسی دقیق‌تر عکس‌العمل خاک زیر پی و ارائه‌ی رابطه‌ی مناسب و ساده‌ای برای تعیین سختی زیر پی در کاربردهای مهندسی است. بدین منظور از مدل‌سازی چند پی با ابعاد متفاوت در نرم‌افزار OpenSees استفاده شده است. در این مدل‌ها محیط خاک زیر پی به صورت محیط پیوسته و سه‌بعدی مدل شده است. از نتایج این مدل‌سازی‌ها رابطه‌ی مناسبی برای تعیین سختی خاک زیر پی استخراج شد. در ادامه جزئیات مدل‌سازی و نحوه استخراج روابط آورده شده است.

## ۲- مطالعه عددی

### ۲-۱- مشخصات سازه‌های مورد استفاده

در این تحقیق هشت پی نواری با عرض‌های ۱، ۱/۵، ۲، ۲/۵، ۳، ۳/۵، ۴، ۴/۵ متر به طول ۱۲ متر در نویسی نرم افزار المان محدود OpenSees مدل‌سازی شدند. پی‌ها بر روی یک محیط خاک سه بعدی با استفاده از عناصر محدود SSquad قرار گرفتند. عمق خاک ۳۰ متر و عرض آن ۷ برابر طول پی در نظر گرفته شد. خواص خاک به شرح زیر است: مدول برشی  $10^7 \times 33/1$  نیوتن در متر، نسبت پواسن  $0/4$  و چگالی جرمی  $1470$  کیلوگرم بر متر مکعب. بدین ترتیب هر پی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت و نتایج هر مدل‌سازی در بخش بعد آورده شده است. روابط سختی پی توسط گزتاس (Mylonakis and Gazetas, 2000) به صورت روابط زیر هستند.

سختی فنرهای قائم

$$k_z = \frac{2G_s L}{1-\nu_s} \left[ 0.73 + 1.54 \left( \frac{B}{L} \right)^{0.75} \right] \quad (2)$$

سختی فنرهای دورانی

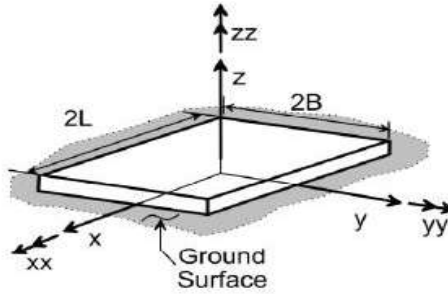
$$k_{yy} = \frac{G_s}{1-\nu_s} \left( I_y \right)^{0.75} \left[ 3 \left( \frac{L}{B} \right)^{0.15} \right] \quad (3)$$

سختی فنرهای محوری

$$k_x = \frac{2G_s L}{2-\nu_s} \left[ 2 + 2.5 \left( \frac{B}{L} \right)^{0.85} \right] - \frac{0.2}{0.75-\nu_s} G_s L \left( 1 - \frac{B}{L} \right) \quad (4)$$

<sup>۷</sup> Raychowdhury  
<sup>۸</sup> Chen et al.

در روابط فوق  $B$  و  $L$  نصف عرض و طول پی (شکل ۲)،  $G$  مدول برشی خاک،  $\nu$  نسبت پواسن خاک،  $E_p$  مدول الاستیسیته‌ی خاک، عمق خاک، و  $\gamma$  ضریبی است که نرخ کاهش تغییرمکان در عمق خاک را نشان می‌دهد که در اینجا برابر با واحد در نظر گرفته شده است.



شکل ۲: ابعاد پی سطحی طبق آیین‌نامه (2012)

## ۲-۲- مدل تیر بر روی بستر تک پارامتری (وینکلر)

همان‌طور که گفته شد در مدل وینکلر سختی خاک به کمک فنرهای قائم خطی و مستقل مدل می‌شود. این فنرها ارتباط بین تغییرمکان و نیروی وارده به پی را نشان می‌دهند. رابطه‌ی دیفرانسیل مدل تیر بر روی بستر وینکلر به صورت رابطه‌ی ۵ است:

$$E_b I_b \frac{d^4 w(x)}{dx^4} + K_w b w(x) - q(x) = 0 \quad (5)$$

در این رابطه  $E_b I_b$  سختی خمشی تیر،  $q(x)$  بارگذاری خارجی روی سازه و  $b$  عرض تیر،  $w(x)$  میدان تغییر مکان،  $K_w$  پارامتر سختی بستر تک پارامتری هستند. با استفاده از روش اجزای محدود و توابع شکل المان تیر، ماتریس‌های سختی این المان به صورت زیر به دست می‌آیند (Logan, 2002, Yokoyama, 1996):

$$[K_w] = \frac{K_w}{420} \begin{bmatrix} 156 & 22L & 54 & -13L^2 \\ & 4L^2 & 13L & -L^2 \\ & & 156 & -22L^2 \\ \text{Sym} & & & 4L^2 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$[K_{e\_beam}] = \frac{E_b I_b}{L^3} \begin{bmatrix} 12 & 6L & -12 & 6L \\ & 4L^2 & -6L & 2L^2 \\ & & 12 & -6L^2 \\ \text{Sym} & & & 4L^2 \end{bmatrix} \quad (7)$$

ماتریس سختی تیر اویلر برنولی به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\left[ K_{g\_beam} \right] = \frac{P}{30L} \begin{bmatrix} 36 & 3L & -36 & 3L \\ & 4L^2 & -3L & -L^2 \\ & & 36 & -3L^2 \\ Sym & & & 4L^2 \end{bmatrix} \quad (8)$$

و ماتریس سختی تیر بر روی بستر تک‌پارامتری به صورت  $\left[ K_w \right] + \left[ K_e + K_g \right]_{Beam}$  خواهد بود.

هدف از این مقاله محاسبه‌ی پارامتر سختی فنرها  $K_w$  است که در ادامه به آن پرداخته شده است.

### ۳- بحث و بررسی

برای بدست آوردن سختی فصل مشترک خاک و پی، نیروهای عکس‌العمل و جابجایی المان‌های پی محاسبه شدند. جداول ۱ و ۲ به ترتیب خروجی عکس‌العمل نیرویی و جابجایی نقاط المان‌های پی را نشان می‌دهند. از آنجایی که نمودار عکس‌العمل فونداسیون نسبت به محور مرکزی تیر متقارن است، خروجی‌ها تنها برای یک طرف تیر نشان داده شده‌اند. هر فونداسیون به ۱۲ المان فرعی تقسیم شد و نتایج در هر گره خوانده شد. مطابق با جدول ۳، سختی خاک - پی با استفاده از نیروها و جابجایی‌های نقاط مشترک، محاسبه می‌شود.

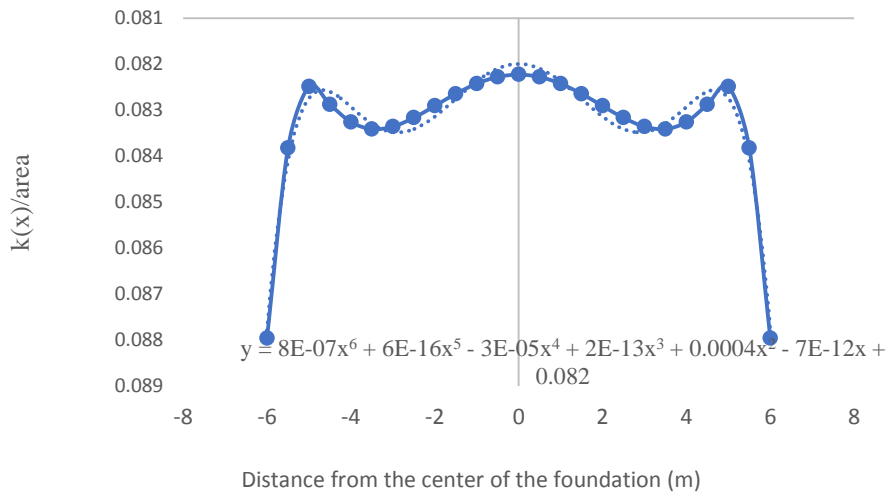
با توجه به جدول ۳، سختی خاک زیر پی با عرض واحد نسبت به سطح زیر نمودار آن به صورت رابطه‌ی ۹ به دست می‌آید. در شکل ۳ نیز این رابطه نشان داده شده است. سپس با استفاده از نتایج جدول ۳ رابطه‌ی بین سختی خاک زیر سایر پی‌ها و سختی خاک زیر پی با عرض واحد طبق رابطه‌ی ۱۰ و شکل ۴ به دست می‌آید.

(۹)

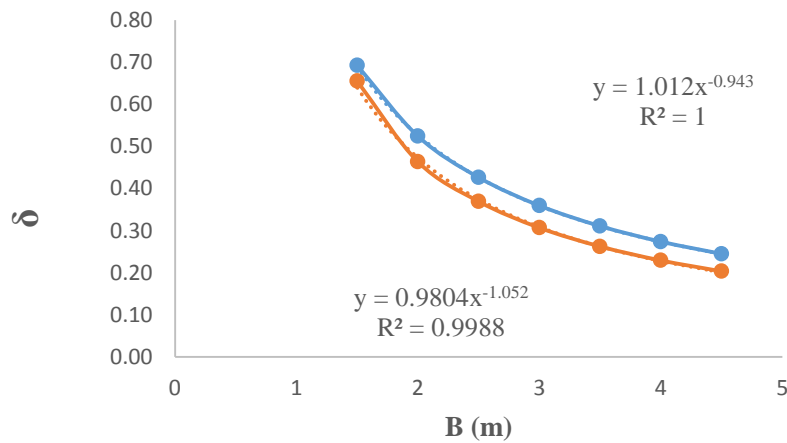
$$\frac{K(x)|(B=1)}{Area} = 8^{-7} x^6 + 6^{-16} x^5 - 3^{-5} x^4 + 2^{-13} x^3 + 4^{-4} x^2 - 87^{-12} x + 0.082$$

(۱۰)

$$K(x) = K(x)|(B=1) \times \delta = K(x)|(B=1) \times \begin{cases} \frac{1}{B^{0.94}} \\ \frac{0.98}{B^{1.05}} \end{cases}$$



شکل ۳: نمودار سختی نقاط پی با عرض واحد نسبت به سطح زیر نمودار خود



شکل ۴: رابطه‌ی بین سختی پی‌های مختلف با سختی پی با عرض واحد

که در رابطه‌ی ۹،  $x$  فاصله از مرکز پی است. چنانچه مرکز پی را مرکز مختصات در نظر بگیریم، نقاط سمت چپ پی دارای مختصات منفی و نقاط سمت راست دارای مختصات مثبت خواهند بود.  $Area$  سطح زیر نمودار است.

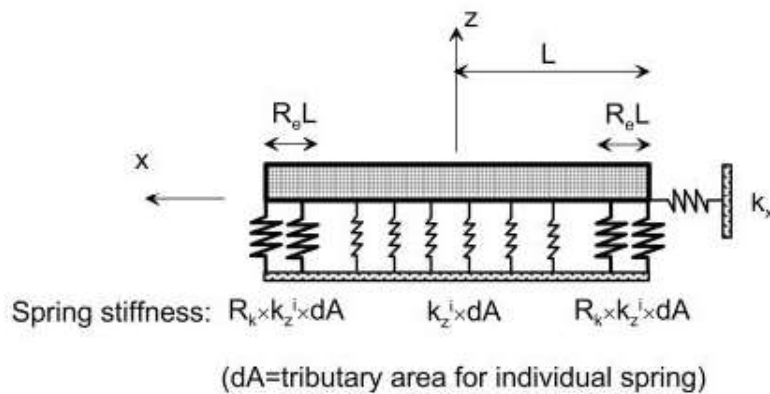
رابطه‌ی ۹ را می‌توان به دو بخش ساده کرد. بخش اول مربوط به قسمتی از پی است که عکس‌العمل خاک زیر آن حداکثر است و بخش دوم مربوط به سایر نقاط پی است. طبق آیین‌نامه‌ی NIST (2012) در گوشه‌های پی عکس‌العمل خاک نسبت به سایر نقاط پی بیش‌تر است. بنابراین سختی در دو انتهای پی در ضریب افزایش  $R_k$  ضرب می‌شود (شکل ۴). ضریب  $R_k$  برای دوران حول دو محور  $x$  و  $y$  مطابق با روابط ۱۱ و ۱۲ به دست می‌آید.



$$R_{k,yy} = \frac{\left(\frac{3k_{yy}}{4k_z^i B L^3}\right) - (1-R_e)^3}{1 - (1-R_e)^3} \quad (11)$$

$$R_{k,xx} = \frac{\left(\frac{3k_{xx}}{4k_z^i B^3 L}\right) - (1-R_e)^3}{1 - (1-R_e)^3} \quad (12)$$

در روابط ۱۱ و ۱۲ پارامتر  $R_e$  نسبت طول انتهایی پی است که در شکل ۵ مشخص شده است. این پارامتر معمولاً بین مقادیر ۰/۳ تا ۰/۵ انتخاب می‌شود.



شکل ۵: توزیع فنرهای قائم در روش آیین‌نامه‌ای [۱۸]

$$\frac{K(x)|(B=1)}{\text{area}} = \begin{cases} (0.0993(x/L) + 0.0383) & \text{for } ReL \\ \left( \begin{array}{l} -0.1022(x/L)^3 + 0.0703(x/L)^2 \\ -0.01(x/L) + 0.0826 \end{array} \right) & \text{for other parts} \end{cases} \quad (13)$$

در رابطه‌ی فوق  $L$  طول کل پی و  $x$  فاصله از مرکز پی است. رابطه‌ی فوق را می‌توان در شکل‌های ۶ و ۷ مشاهده کرد.

جدول ۱: عکس‌العمل نیرویی المان‌های فونداسیون

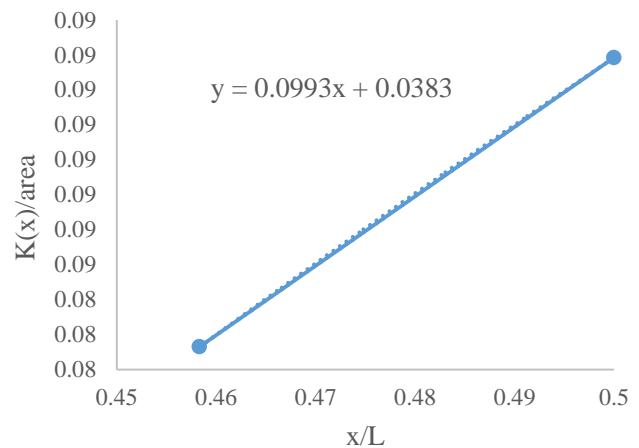
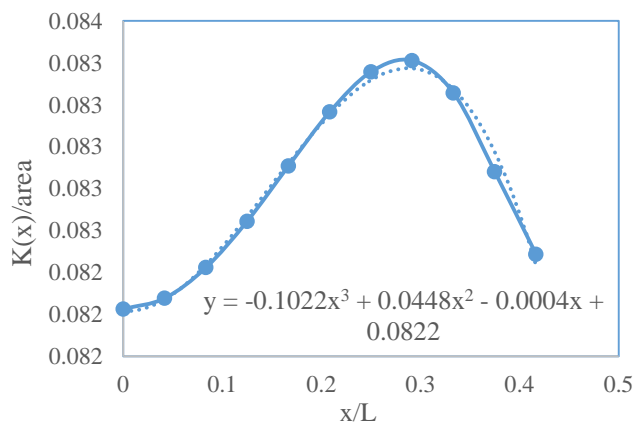
نیرو (نیوتن)												عرض پی (m)
9797	10931	12274	13742	15051	16133	16981	17616	18070	18379	18575	18682	1
14564	15152	16170	17534	18833	19967	20904	21646	22210	22618	22892	23048	1.5
19336	19401	20118	21393	22682	23854	24857	25678	26322	26802	27132	27324	2
24142	23687	24105	25293	26567	27766	28820	29702	30408	30944	31318	31538	2.5
28992	28010	28125	29221	30474	31692	32784	33715	34472	35053	35462	35706	3
33885	32367	32172	33170	34397	35624	36747	37717	38515	39134	39573	39836	3.5
38821	36756	36243	37138	38331	39562	40707	41709	42541	43191	43656	43934	4
43795	41173	40336	41122	42274	43502	44663	45690	46551	47228	47714	48006	4.5

جدول ۲: جابه‌جایی گرهی المان‌های فونداسیون

جابه‌جایی (متر) $\times 10^{-4}$												عرض پی (m)
2.15	2.87	3.49	3.93	4.20	4.35	4.39	4.35	4.20	3.93	3.49	2.87	1
2.98	3.73	4.39	4.88	5.20	5.38	5.44	5.38	5.20	4.88	4.39	3.73	1.5
3.82	4.60	5.29	5.83	6.19	6.40	6.47	6.40	6.19	5.83	5.29	4.60	2
4.66	5.48	6.20	6.78	7.18	7.41	7.48	7.41	7.18	6.78	6.20	5.48	2.5
5.51	6.36	7.12	7.73	8.16	8.41	8.49	8.41	8.16	7.73	7.12	6.36	3
6.36	7.25	8.04	8.68	9.13	9.41	9.50	9.41	9.13	8.68	8.04	7.25	3.5
7.22	8.13	8.96	9.63	10.11	10.40	10.49	10.40	10.11	9.63	8.96	8.13	4
8.09	9.03	9.88	10.58	11.08	11.38	11.49	11.38	11.08	10.58	9.88	9.03	4.5

جدول ۳: سختی گرهی المان‌های فونداسیون

عرض پی (m)													
$10^7 \times$ سختی (نیوتن بر متر)													
4.559	4.345	4.275	4.296	4.315	4.323	4.321	4.311	4.297	4.284	4.272	4.265	4.262	1
4.882	4.504	4.332	4.301	4.295	4.292	4.287	4.280	4.271	4.262	4.255	4.251	4.249	1.5
5.062	4.601	4.371	4.309	4.286	4.275	4.267	4.259	4.252	4.246	4.240	4.237	4.236	2
5.179	4.667	4.400	4.317	4.282	4.264	4.253	4.245	4.238	4.232	4.228	4.225	4.224	2.5
5.262	4.715	4.422	4.325	4.280	4.257	4.243	4.233	4.226	4.221	4.217	4.214	4.213	3
5.326	4.753	4.440	4.331	4.279	4.251	4.235	4.224	4.216	4.211	4.207	4.205	4.204	3.5
5.376	4.783	4.456	4.337	4.279	4.247	4.229	4.216	4.208	4.202	4.198	4.196	4.195	4
5.416	4.809	4.468	4.342	4.279	4.244	4.223	4.210	4.201	4.195	4.191	4.189	4.188	4.5



شکل ۷: رابطه‌ی ساده‌شده سختی خاک (بخش دوم)

استفاده از روابط فوق در کاربردهای مهندسی دشوار است. بنابراین بهتر است از رابطه‌ی ساده‌تری استفاده کرد. سختی جدول ۳ را می‌توان براساس سختی گزتاس با دو رابطه‌ی تقریبی به صورت زیر به دست آورد. رابطه‌ی ۱۴ سختی مربوط به بخش‌های میانی پی را نشان می‌دهد و رابطه‌ی ۱۶ سختی گوشه‌های پی را تخمین می‌زند. (شکل‌های ۸ و ۹)

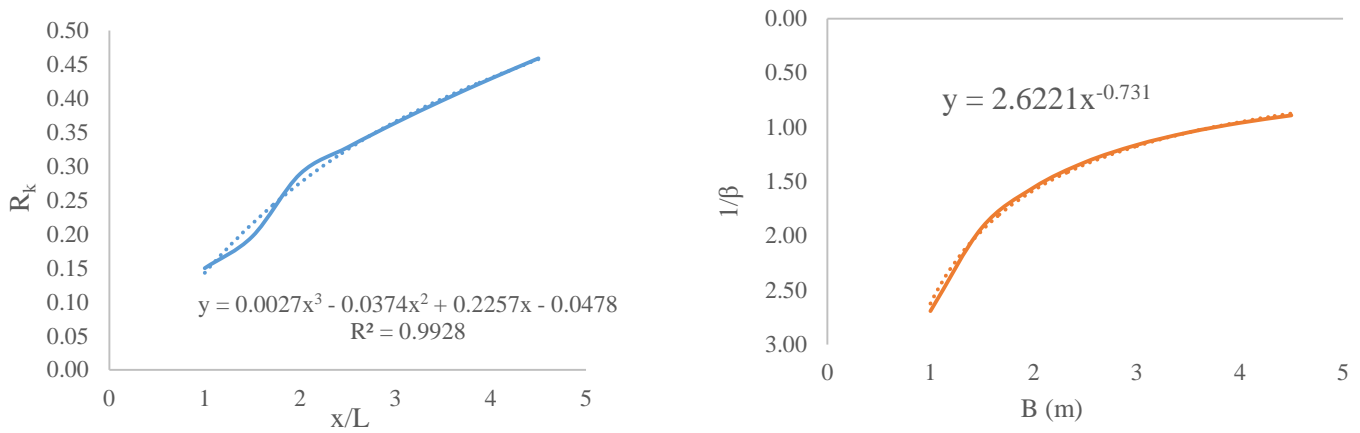
$$k_{average} = k_{gazetas} \times \beta \quad (14)$$

$$\beta = \frac{B^{0.731}}{2.6221} \quad (15)$$

$$k_{max} = k_{average} \times R_k \quad (16)$$

$$R_k = R_{k-code} \times (0.0027B^3 - 0.0374B^2 + 0.2257B - 0.0478) \quad (17)$$

همان رابطه‌ی ۱۱ است که با جایگزین کردن سختی متوسط رابطه‌ی ۱۴ به جای  $k_z^i$  به دست می‌آید.



شکل ۹. ضریب سختی  $R_k$

حال به کمک روش اجزای محدود و مدل تیر بر روی بستر الاستیک که در بخش قبل بیان شد، از رابطه‌ی به دست آمده برای سختی فنر وینکلر استفاده شد و پی‌های مختلف تحت آنالیز قرار گرفتند. در نهایت تغییرمکان نقاط پی به صورت جدول ۴ به دست می‌آیند. تغییرمکان گره‌های فونداسیون تحت مدل سه بعدی OpenSees نیز در جدول ۲ نشان داده شدند. در جدول ۵ نیز دوره تناوب اصلی تیر طبق دو مدل آورده شده است. با مشاهده این جداول می‌توان دریافت که مدل پیشنهادی تقریب دوبعدی مناسبی از یک مدل سه بعدی جامع است.

جدول ۴: تغییرمکان نقاط فونداسیون مدل پیشنهادی

جابه‌جایی (متر) $\times 10^{-4}$											عرض پی (m)	
3.13	3.07	3.19	3.26	3.33	3.39	3.45	3.50	3.54	3.56	3.58	3.59	1
4.01	3.96	4.08	4.15	4.22	4.29	4.35	4.40	4.44	4.47	4.48	4.49	1.5
5.25	5.20	5.31	5.38	5.45	5.51	5.56	5.61	5.64	5.67	5.69	5.70	2
5.92	5.87	5.99	6.06	6.14	6.21	6.27	6.33	6.37	6.39	6.41	6.42	2.5
6.67	6.61	6.74	6.82	6.90	6.97	7.04	7.10	7.15	7.18	7.19	7.20	3
7.48	7.42	7.55	7.63	7.71	7.79	7.86	7.92	7.97	8.00	8.02	8.02	3.5
8.33	8.27	8.40	8.48	8.57	8.64	8.72	8.78	8.82	8.85	8.87	8.88	4
9.20	9.15	9.28	9.36	9.44	9.51	9.58	9.64	9.68	9.71	9.73	9.74	4.5

جدول ۵: دوره‌ی تناوب اصلی سازه

دوره‌ی تناوب اصلی سازه		
T_SSI (opensees)	T_SSI (مدل پیشنهادی)	فونداسیون
0.0617	0.0590	B = 1 m
0.0568	0.0567	B = 1.5 m
0.0541	0.0423	B = 2 m
0.0525	0.0531	B = 2.5 m
0.0514	0.0510	B = 3 m
0.0506	0.0549	B = 3.5 m
0.0499	0.0634	B = 4 m
0.0495	0.0618	B = 4.5 m

#### ۴- نتیجه‌گیری

با توجه به اهمیت اندرکنش خاک و سازه در تحلیل لرزه‌ای و تأثیرات اجتناب‌ناپذیر آن بر روی پاسخ لرزه‌ای سازه‌ها، مدل‌سازی محیط خاک امری ضروری است. در طراحی‌های آیین‌نامه‌ای عموماً از مدل کردن خاک صرف‌نظر می‌شود. اما انعطاف‌پذیری خاک پارامترهای دینامیکی سازه (زمان تناوب اصلی، برش طبقه، دررفت طبقه و غیره) را به طور قابل ملاحظه‌ای تحت تأثیر قرار می‌دهد. بنابراین ضروری است تا در تحلیل‌های سازه‌ای محیط خاک و اثرات آن لحاظ شوند. استفاده از فنرهای وینکلر یکی از روش‌های ساده و کاربردی برای مدل‌سازی بستر انعطاف‌پذیر است. اما در این روش سختی خاک در طول آن ثابت در نظر گرفته شده است. بنابراین در مقاله‌ی حاضر رابطه‌ی جدیدی برای محاسبه‌ی سختی المان‌های خاک زیر پی به دست آمده است که با استفاده از آن می‌توان سختی فنرهای وینکلر را اصلاح کرد و المان تیر بر روی بستر الاستیک را توسعه داد. روابط به دست آمده متغیر بودن سختی خاک در طول فونداسیون را نشان می‌دهند. همچنین تأثیر ضخامت فونداسیون بر مقدار سختی خاک زیر پی را نیز لحاظ کرده است. به علاوه مشاهده شد که سختی خاک در گوشه‌های فونداسیون نسبت به سایر نقاط به دلیل تمرکز تنش افزایش یافته است. رابطه‌ی مجزایی برای محاسبه‌ی این افزایش سختی ارائه شد. روش مدل‌سازی خاک به صورت فنر نسبت به مدل‌سازی کامل محیط خاک به صورت محیط پیوسته، روش ساده‌تری است و مدت زمان موردنیاز برای انجام تحلیل‌های دینامیکی را نیز بسیار کاهش می‌کند. با مقایسه‌ی زمان تناوب اصلی سازه‌های مورد بررسی طبق مدل پیشنهادی و مدل محیط پیوسته در نرم‌افزار OpenSees مشاهده می‌شود که می‌توان از این مدل پیشنهادی در کاربردهای مهندسی به جای تحلیل‌های طولانی و زمان‌بر محیط پیوسته استفاده نمود.

#### ۵- اعلام تعارض منافع

نویسندگان اعلام می‌کنند که هیچ نوع تعارض منافی وجود ندارد.

## مراجع

- Bowles, J. E., 1996. Foundation analysis and design: McGraw-Hill Book Company. California Seismic Safety Commission. 1996.
- Chen, Z., Hutchinson, T.C. and Raychowdhury, P., 2010. "Effects of foundation configuration variation on seismic response of moment-frame buildings". In Structures Congress 2010: 19th Analysis and Computation Specialty Conference (pp. 105-116).
- Desai, C.S., Phan, H.V. and Perumpral, J.V., 1982. "Mechanics of three-dimensional soil-structure interaction". Journal of the Engineering Mechanics Division, 108(5), pp[32] .731-747
- Gazetas, G. and Mylonakis, G. (1998). "*Seismic soil-structure interaction: new evidence and emerging issues*". Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics III
- Gouasmia, A. and Djeghaba, K., 2010. "Direct Approach to Seismic Soil-Structure-Interaction Analysis-Building Group Case". Statybin? s Konstrukcijos ir Technologijos, 2(1), pp.22-30.
- Hokmabadi, A.S., Fatahi, B. and Samali, B., (2014). "*Physical modeling of seismic soil-pile-structure interaction for buildings on soft soils*". International Journal of Geomechanics, 15(2), p.04014046.
- Kramer, S. L. (1996). "*Geotechnical earthquake engineering*", Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ.
- Logan, D.L., 2002. "Finite element method". Brooks/Cole, CA, USA.
- Mirhashemian, P., Khaji, N. and Shakib, H., 2009. "Soil-structure interaction (SSI) analysis using a hybrid spectral element/finite element (SE/FE) approach". Journal of Seismology and Earthquake Engineering, 11(2), pp.83-95
- Mylonakis, G. and Gazetas, G., (2000). "*Seismic soil-structure interaction: beneficial or detrimental?*". Journal of Earthquake Engineering, 4(3), pp.277-301.
- National Institute of Standards and Technology (NIST), (2012). "*Soil-Structure Interaction for Building Structures*", GCR 12-917-21, Gaithersburg, Maryland.
- Nguyen, Q.V., (2017). "*Effects of foundation characteristics and building separation gap on seismic performance of mid-rise structures incorporating soil-foundation-structure-interaction*" (Doctoral dissertation).
- Nguyen, Q.V., 2017. Effects of foundation characteristics and building separation gap on seismic performance of mid-rise structures incorporating soil-foundation-structure-interaction (Doctoral dissertation).
- Raychowdhury, P., 2008. Nonlinear winkler-based shallow foundation model for performance assessment of seismically loaded structures (Doctoral dissertation, UC San Diego).
- Tabatabaiefar, H.R. and Massumi, A., 2010. "A simplified method to determine seismic responses of reinforced concrete moment resisting building frames under influence of soil-structure interaction". Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 30(11), pp.1259-1267.
- Tabatabaiefar, S.H.R., 2012. Determining seismic response of mid-rise building frames considering dynamic soil-structure interaction, Doctoral dissertation. Boudaa, S., Khalfallah, S. and Bilotta, E., (2019). "*Static interaction analysis between beam and layered soil using a two-parameter elastic foundation*". International Journal of Advanced Structural Engineering, 11(1), pp.21-30.
- Veletsos, A.S. and Meek, J.W., 1974. "Dynamic behaviour of building-foundation systems". Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 3(2), pp.121-138.
- Widad, B., Salah, K. and Souad, B., (2019). "*Soil non-homogeneity and soil-structure interaction effects on beam vibrations*". Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Structures and Buildings, pp.1-10.
- Winkler, E., (1867). "*Die Lehre von der Elasticitaet und Festigkeit: mit besonderer Rücksicht auf ihre Anwendung in der Technik für polytechnische Schulen*", Bauakademien, Ingenieur, Maschinenbauer, Architekten, etc (Vol. 1). Dominicus.
- Wolf, J.P. (1985). "*Dynamic Soil-Structure Interaction*", Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, New Jersey.
- Yokoyama, T., 1996. Vibration analysis of Timoshenko beam-columns on two-parameter elastic foundations. Computers & Structures, 61(6), pp.995-1007.