



## محاسبه سختی فنرهای خاک براساس دوره تناوب سازه

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

<sup>۱</sup>\* دانشجوی مقطع دکتری مهندسی سازه، دانشگاه تهران

<sup>۲</sup> استاد دانشکده عمران، دانشگاه تهران

(hajian.m@ut.ac.ir)

(تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۰۷/۱۲، تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۱۰/۰۲)

### چکیده

در روش‌های طراحی مهندسی فرض می‌شود سازه بر روی بستر ثابتی مستقر است و عموماً از اثرات محیط خاک بر پاسخ سازه‌ای صرف‌نظر می‌شود. حال آن‌که تحقیقات نشان می‌دهند که محیط خاک و سازه می‌توانند بر روی هم اندرکنش داشته باشند. به این پدیده اثر اندرکنش خاک-سازه گفته می‌شود. بنابراین بایستی محیط خاک در تحلیل‌های سازه‌ای مدل شود. روش‌های متفاوتی برای مدل‌سازی خاک وجود دارد. یکی از روش‌های کاربردی استفاده از فنرهای مجزا برای مدل‌سازی محیط خاک است. در این مقاله به بررسی اثر تعداد طبقات و دوره تناوب سازه بر روی سختی فنرهای خاک پرداخته شده است. در این راستا سازه‌های سه بعدی با تعداد طبقات ۱، ۳، ۵ و ۱۰ در نرم‌افزار Opensees با محیط خاک پیوسته مدل شدند. سپس از نتایج تحلیل‌های سازه‌ای عکس‌العمل خاک زیر پی محاسبه شد و روابطی برای تعیین سختی خاک ارائه گردید. این روابط وابسته به دوره تناوب سازه هستند.

### کلمات کلیدی

اندرکنش خاک-سازه، مدل وینکلر، بستر الاستیک، بستر دوپارامتری، دوره تناوب سازه، سختی خاک.



# Calculation of the Soil Spring Stiffness in Relation to the Structure's Fundamental Period

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

<sup>1\*</sup> Ph.D. Candidate of Structural Engineering, School of civil engineering, University of Tehran

<sup>2</sup> Professor, School of civil engineering, university of Tehran

(hajian.m@ut.ac.ir)

(Date of received: 04/10/2023, Date of accepted: 23/12/2023)

## ABSTRACT

*In engineering design methods, it is assumed that the structure is located on a fixed base, and the effects of the soil environment on the structural response are generally ignored. However, research showed that the environment of the soil and the structure can interact with each other. This phenomenon is called soil-structure interaction effect. Therefore, the soil environment should be modeled in structural analysis. There are different methods for soil modeling. One of the practical methods is to use separate springs to model the soil environment. In this article, the effect of the number of floors and the period of the structure on the soil springs' stiffness has been investigated. In this regard, three-dimensional structures with the number of floors 1, 3, 5, 10 and 15 were modeled in Opensees software with continuous soil environment. Then, from the results of the structural analysis, the reaction of the soil under the foundation was calculated and relations were presented to determine the stiffness of the soil. These relationships are dependent on the structure's period.*

## Keywords:

*Soil-structure interaction, Winkler model, Elastic foundation, Two-parameter foundation, Period of structure, Soil stiffness.*



## ۱- مقدمه

زلزله یک خطر طبیعی است که موجب خرابی‌های گسترده خصوصاً به محیط سازه‌ای می‌شود. زلزله‌ها در طبیعت ماهیت اتفاقی و غیر قابل پیش‌بینی دارند و دستیابی به مشخصات آن‌ها طبق ملاحظات احتمالی صورت می‌گیرد. از طرف دیگر طراحی‌ها توسط انسان انجام می‌شوند و پارامترها و مصالح طراحی می‌توانند در طول عمر سازه با اثرات انسانی یا طبیعی تغییر کنند. بنابراین برای تحلیل سازه‌ها تحت زلزله نیازمند روش‌های مهندسی بهتر و ابزاری کارآمد برای طراحی اقتصادی سازه‌ها هستیم. مطالعات نشان می‌دهند که طیف پاسخ دینامیکی سازه روی پایه انعطاف‌پذیر با طیف پاسخ سازه روی پایه صلب فرق دارد [۴-۱].

معروف‌ترین مدل مورد استفاده برای مدل کردن فونداسیون برای تحلیل اندرکنش خاک - سازه مدل وینکلر<sup>۱</sup> است. در این روش محیط خاک به صورت تعدادی فنر نزدیک به هم مجزا، مستقل، خطی و الاستیک روی بستر صلب مدل می‌شود. مدل وینکلر یک مدل ساده است. و به طور دقیق خصوصیات فونداسیون‌ها را نشان نمی‌دهد. روش‌های مدل سازی سیستم خاک-سازه را می‌توان به دو دسته روش زیرسازی و روش مستقیم تقسیم کرد. با روش مستقیم، زمین و ساختار با هم به عنوان یک سیستم کلی مدل سازی و تحلیل می‌شوند. این روش بیشتر از روش‌های عددی مانند روش اجزا محدود و روش المان مرزی استفاده می‌کند. در روش پی، عناصر خاک به صورت فنر و میراگر یا عناصر غیرخطی پیچیده تر مدل می‌شوند [۵ و ۶].

با توجه به مطالعات ولف<sup>۲</sup> مشخص می‌شود که سازه‌هایی با پی‌های انعطاف‌پذیر دارای درجات آزادی بیشتری هستند و بنابراین خواص دینامیکی متفاوتی نسبت به سازه‌های روی بسترهای ثابت و صلب خواهند داشت. علاوه بر این، بخش قابل توجهی از انرژی ارتعاشی سازه‌ها به دلیل خواص میرایی محیط خاک یا میرایی مصالح پی می‌تواند از طریق انتشار امواج تلف شود. انعطاف‌پذیری خاک باعث می‌شود دوره تناوب طبیعی سیستم به دلیل کاهش کلی سختی جانبی افزایش یابد. این افزایش دوره تناوب می‌تواند بر پاسخ لرزه‌ای قاب‌های خمشی تأثیر بگذارد [۷].

روش تیر روی بستر دوپارامتری در چند دهه اخیر مورد مطالعه زیادی قرار گرفته است. در این روش از فنرهای قائم ثابتی استفاده می‌شود که به طور دقیق محیط خاک را مدل نمی‌کند. ویداد و همکاران<sup>۳</sup> در مطالعه خود اثرات غیرهمگن بودن خاک را در ارتعاش آزاد تیر اوایلر- برنولی روی بستر دوپارامتری بررسی کردند [۸]. بودا و همکاران<sup>۴</sup> مدل تیر روی بستر دوپارامتری با خاک لایه‌ای را بررسی کردند [۹]. ملاپودی<sup>۵</sup> یک فرمولاسیون جدید برای پی سطحی در مدل وینکلر را ارائه کرده است [۱۰]. اثرات ناهمگنی و بستر دوپارامتری در پاسخ تیرهای دو سر مفصل در مطالعه آکوار<sup>۶</sup> بررسی شده است [۱۱].

رحیم و همکاران<sup>۷</sup> مشاهده نمودند که پریود اصلی نه تنها تابعی از ارتفاع ساختمان است بلکه تابعی از اندرکنش خاک - سازه نیز می‌باشد. پریود 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 پریود اصلی ارتعاش اثر دارد. انعطاف‌پذیری پی و خاک تقاضاهای لرزه‌ای کل سازه را تغییر می‌دهد. مدل اندرکنش خاک - سازه با خاک نرم تقاضای تغییر مکانی بیش‌تری برای طبقه دارد. اثرات اندرکنش خاک - سازه با تعداد طبقات افزایش می‌یابد. نسبت دریافت طبقه با افزایش تعداد طبقات افزایش می‌یابد. هرچی سختی خاک کم‌تر باشد، دریافت طبقات بیش‌تر می‌شود [۱۲].

نگوین<sup>۸</sup> اثر مشخصات پی را روی عملکرد لرزه‌ای سازه‌های با ارتفاع متوسط با در نظر گرفتن اندرکنش خاک - پی - سازه بررسی کرده است. نگوین در این تحقیق به نتایج زیر رسیده است. ابعاد فونداسیون سطحی می‌تواند روی طراحی سازه تحت بار لرزه‌ای با

<sup>1</sup> Winkler

<sup>2</sup> Wolf

<sup>3</sup> Widad *et al.*

<sup>4</sup> Boudaa *et al.*

<sup>5</sup> Mullapudi

<sup>6</sup> Acvar

<sup>7</sup> Raheem *et. al.*

<sup>8</sup> Nguyen



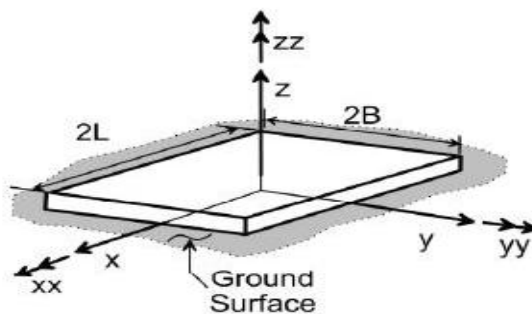
در نظر گرفتن اندرکنش خاک - سازه اثر بگذارد. فونداسیون‌های سطحی بزرگ‌تر می‌توانند دامنه‌های تغییر مکان جانبی و در نتیجه دریافت طبقات را توسط اندرکنش خاک - پی - سازه را تعدیل کنند. این می‌تواند از لحاظ هزینه برای کنترل سطح عملکرد ساختمان مناسب باشد. ابعاد فونداسیون سطحی فرکانس اصلی سیستم خاک - پی - سازه را به طور قابل ملاحظه‌ای تغییر می‌دهد، در حالی که اثر آن روی مودهای ارتعاش بالاتر ناچیز است [۱۳ و ۱۴]. طبق گفته‌ی گرتاس و میلوناکیس، محیط خاک اجازه‌ی برخی حرکات را به علت انعطاف‌پذیری خود می‌دهد و این باعث کاهش سختی کلی سازه می‌شود و ازین‌رو باعث افزایش پریودهای طبیعی سیستم می‌شود [۱۵ و ۱۶]. راکینگ سیستم خاک - سازه توسط مسائل و همکاران<sup>۹</sup> با در نظر گرفتن جداشدگی پی و پلاستیسیته‌ی خاک بررسی کردند. در این تحقیق ساختمان‌های با ارتفاع متوسط با نسبت‌های مختلف بعد روی فونداسیون کم عمق در خاک‌های سخت تا سنگ مطالعه شدند. در نظر نگرفتن اندرکنش خاک - سازه روی عملکرد لرزه‌ای سازه‌های دارای قابلیت واژگونی با پی‌های کم عمق، که اکثراً در عمل اینجوری است، موجب تخمین‌های غیردقیق برای تقاضاهای نیرویی می‌شود [۱۷]. چن و همکاران<sup>۱۰</sup> از توابع شکل درجه پنجم برای مدل‌سازی تیر روی بستر الاستیک تک پارامتری استفاده کردند [۱۸].

## ۲- روش انجام کار

در مقاله حاضر ابتدا سازه‌های ۱، ۳، ۵، ۱۰ و ۱۵ طبقه به روش اجزای محدود در نرم افزار OPENSEES به صورت سه بعدی مدل‌سازی شدند. در مدل‌ها، سیستم خاک به عنوان عناصر SSPquad و پی‌ها به عنوان عناصر تیر سه بعدی مدل‌سازی شدند. عرض فونداسیون برابر با ۱، ۱، ۲، ۳، ۴، ۵، ۶، ۷، ۸، ۹، ۱۰، ۱۱، ۱۲ متر بود. طول فونداسیون ۱۲ متر بود. ابعاد فونداسیون حصیری برابر با ۱۲\*۱۲ متر بود. مدل‌ها مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت و سختی خاک استخراج شد. سپس رابطه محاسبه سختی خاک براساس دوره تناوب و تعداد طبقات سازه به دست آمد. رابطه‌ی سختی فونداسیون از رابطه‌ی گرتاس به دست می‌آید [۱۵ و ۱۶]:

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

که در آن  $L$  و  $B$  به ترتیب طول و عرض پی هستند (شکل ۱ را ببینید).  $G_s$  مدول برشی است (برای اثرات کرنش بزرگ کاهش می‌یابد)،  $\nu_s$  نسبت پواسون است و ممان سطحی اینرسی تماس خاک و پی است.



شکل ۱: محورهای فونداسیون [۲]

<sup>9</sup> Masaeli et. al.

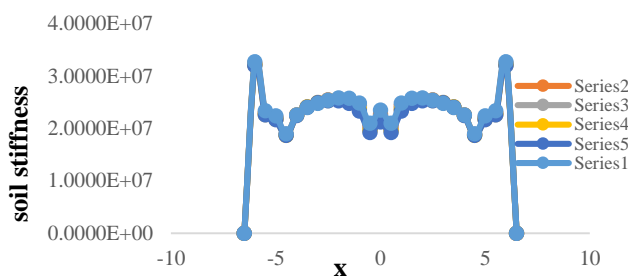
<sup>10</sup> Chen et al.



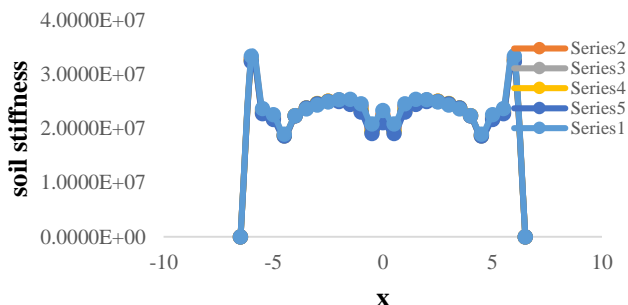
رابطه‌ی ۱ برای محاسبه سختی کل فنر زیر پی استفاده می‌شود. برای به دست آوردن سختی بر واحد سطح فونداسیون، رابطه‌ی ۱ را بر مساحت فونداسیون مطابق با رابطه‌ی ۲ تقسیم می‌کنیم:

$$k_z^i(1) = \frac{K_z 1}{B \times L} \quad (2)$$

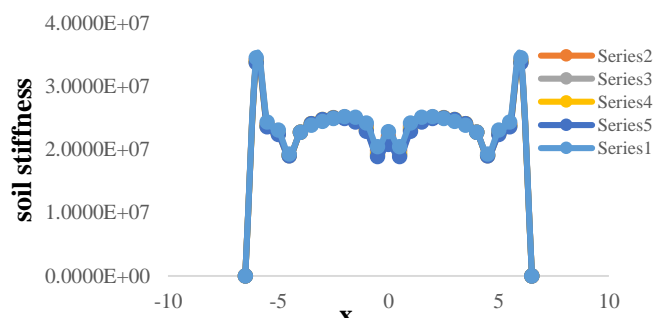
در اشکال ۳ تا ۷ سختی خاک زیر پی برای سازه‌های مدل شده نشان داده شدند. همان‌طور که مشاهده می‌شود روند تغییر سختی زیر فونداسیون مشابه هم بوده و در گوشه‌های فونداسیون سختی خاک افزایش می‌یابد. برای محاسبه تأثیر طبقات بر سختی خاک، ابتدا تمام مقادیر سختی بر مقادیر سختی سازه یک طبقه ضرب شدند. بدین ترتیب می‌توان تغییر سختی برحسب تعداد طبقات را به دست آورد. در جداول ۱ تا ۵ این مقادیر آورده شده شدند. از طرف دیگر سختی خاک را می‌توان براساس دوره تناوب سازه نیز به دست آورد. جداول ۶ تا ۱۰ مقادیر سختی خاک زیر پی در مدل‌های سازه‌ای را نسبت به دوره تناوب سازه نشان می‌دهد. بدین ترتیب در رابطه‌ی ۳ ضریبی از رابطه‌ی سختی سطحی گزتاس که تابعی از دوره تناوب سازه و تعداد طبقات سازه با درونیابی نتایج جداول ۱ تا ۱۰ به دست آمد. در شکل شماره ۶ رابطه ضریب سختی خاک نسبت به تعداد طبقات نشان داده شده است.



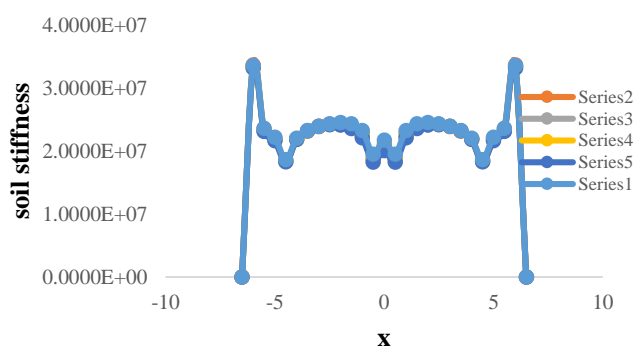
شکل ۱: نمودار سختی خاک در طول فونداسیون برای سازه یک طبقه



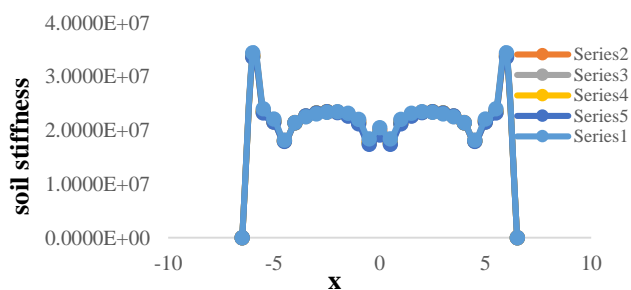
شکل ۲: نمودار سختی خاک در طول فونداسیون برای سازه سه طبقه



شکل ۳: نمودار سختی خاک در طول فونداسیون برای سازه پنج طبقه



شکل ۴: نمودار سختی خاک در طول فونداسیون برای سازه ده طبقه



شکل ۵: نمودار سختی خاک در طول فونداسیون برای سازه ۱۵ طبقه



جدول ۱: نسبت سختی خاک به سختی خاک زیر سازه یک طبقه (FSV=2).

n	Joints' distance from center of the footing												
	-0.5	-0.458	-0.417	-0.375	-0.333	-0.292	-0.25	-0.208	-0.167	-0.125	-0.083	-0.042	0
3	1.02	1.01	1.01	1.00	0.99	0.99	0.98	0.98	0.98	0.99	0.99	0.99	0.99
5	1.02	1.01	1.00	0.98	0.98	0.97	0.96	0.95	0.95	0.95	0.94	0.94	0.94
10	1.03	1.01	0.99	0.98	0.98	0.97	0.96	0.96	0.95	0.94	0.93	0.93	0.92
15	1.05	1.03	0.99	0.96	0.95	0.94	0.93	0.92	0.91	0.90	0.89	0.88	0.87

جدول ۲: نسبت سختی خاک به سختی خاک زیر سازه ۳ طبقه (FSV=3)

n	Joints' distance from center of the footing												
	-0.5	-0.458	-0.417	-0.375	-0.333	-0.292	-0.25	-0.208	-0.167	-0.125	-0.083	-0.042	0
3	1.02	1.01	1.01	1.00	0.99	0.99	0.99	0.98	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99
5	1.02	1.01	1.00	0.99	0.98	0.97	0.96	0.95	0.95	0.95	0.94	0.94	0.94
10	1.04	1.02	1.00	0.98	0.97	0.96	0.96	0.95	0.95	0.94	0.94	0.93	0.93
15	1.05	1.03	0.99	0.96	0.95	0.94	0.93	0.92	0.91	0.90	0.89	0.88	0.88

جدول ۳: نسبت سختی خاک به سختی خاک زیر سازه ۵ طبقه (FSV=4)

n	Joints' distance from center of the footing												
	-0.5	-0.458	-0.417	-0.375	-0.333	-0.292	-0.25	-0.208	-0.167	-0.125	-0.083	-0.042	0
3	1.02	1.01	1.01	1.00	0.99	0.99	0.98	0.98	0.98	0.99	0.99	0.99	0.99
5	1.02	1.01	1.00	0.98	0.98	0.97	0.96	0.95	0.95	0.95	0.94	0.94	0.94
10	1.03	1.01	0.99	0.98	0.98	0.97	0.96	0.96	0.95	0.94	0.93	0.93	0.92
15	1.05	1.03	0.99	0.96	0.95	0.94	0.93	0.92	0.91	0.90	0.89	0.88	0.87

جدول ۴: نسبت سختی خاک به سختی خاک زیر سازه ۱۰ طبقه (FSV=5)

n	Joints' distance from center of the footing												
	-0.5	-0.458	-0.417	-0.375	-0.333	-0.292	-0.25	-0.208	-0.167	-0.125	-0.083	-0.042	0
3	1.01	1.01	1.00	1.00	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99
5	1.02	1.01	1.00	0.99	0.98	0.97	0.96	0.96	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95
10	1.04	1.02	1.00	0.98	0.97	0.96	0.96	0.95	0.95	0.95	0.94	0.94	0.94
15	1.05	1.03	0.99	0.96	0.95	0.94	0.93	0.93	0.92	0.91	0.90	0.90	0.90

جدول ۵: نسبت سختی خاک به سختی خاک زیر سازه ۱۵ طبقه (FSV=6)

n	Joints' distance from center of the footing												
	-0.5	-0.458	-0.417	-0.375	-0.333	-0.292	-0.25	-0.208	-0.167	-0.125	-0.083	-0.042	0
3	1.01	1.01	1.00	1.00	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99
5	1.02	1.01	1.00	0.99	0.98	0.97	0.96	0.96	0.96	0.95	0.95	0.95	0.95
10	1.04	1.02	1.00	0.98	0.97	0.96	0.96	0.96	0.95	0.95	0.95	0.95	0.94
15	1.05	1.03	0.99	0.96	0.95	0.94	0.93	0.93	0.92	0.91	0.91	0.90	0.90



جدول ۶: نسبت سختی خاک به سختی خاک زیر سازه یک طبقه (FSV=2) و بر  $T/T_1$  تقسیم شده)

n	Joints' distance from center of the footing												
	-0.5	-0.458	-0.417	-0.375	-0.333	-0.292	-0.25	-0.208	-0.167	-0.125	-0.083	-0.042	0
3	0.323	0.321	0.318	0.316	0.314	0.312	0.311	0.310	0.311	0.312	0.312	0.313	0.314
5	0.212	0.209	0.207	0.204	0.202	0.200	0.198	0.197	0.196	0.196	0.195	0.195	0.195
10	0.114	0.112	0.110	0.109	0.108	0.107	0.107	0.106	0.105	0.104	0.103	0.103	0.102
15	0.089	0.087	0.084	0.081	0.081	0.080	0.079	0.078	0.077	0.076	0.075	0.074	0.074

جدول ۷: نسبت سختی خاک به سختی خاک زیر سازه سه طبقه (FSV=3) و بر  $T/T_1$  تقسیم شده)

n	Joints' distance from center of the footing												
	-0.5	-0.458	-0.417	-0.375	-0.333	-0.292	-0.25	-0.208	-0.167	-0.125	-0.083	-0.042	0
3	0.322	0.320	0.318	0.316	0.314	0.312	0.311	0.311	0.311	0.312	0.313	0.313	0.314
5	0.212	0.209	0.207	0.204	0.202	0.200	0.199	0.197	0.196	0.196	0.195	0.195	0.195
10	0.115	0.113	0.110	0.108	0.107	0.107	0.106	0.105	0.105	0.104	0.104	0.103	0.103
15	0.089	0.087	0.084	0.081	0.081	0.080	0.079	0.078	0.077	0.077	0.076	0.075	0.075

جدول ۸: نسبت سختی خاک به سختی خاک زیر سازه ۵ طبقه (FSV=4) و بر  $T/T_1$  تقسیم شده)

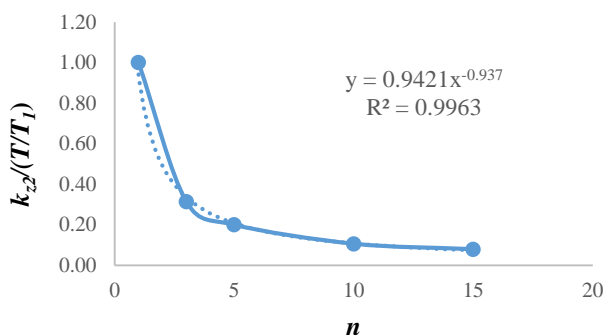
n	Joints' distance from center of the footing												
	-0.5	-0.458	-0.417	-0.375	-0.333	-0.292	-0.25	-0.208	-0.167	-0.125	-0.083	-0.042	0
3	0.321	0.319	0.317	0.315	0.314	0.313	0.312	0.312	0.312	0.312	0.313	0.313	0.314
5	0.211	0.209	0.207	0.204	0.203	0.201	0.199	0.198	0.197	0.196	0.196	0.195	0.195
10	0.115	0.113	0.110	0.108	0.107	0.107	0.106	0.105	0.105	0.104	0.104	0.103	0.103
15	0.089	0.087	0.084	0.082	0.081	0.080	0.079	0.078	0.078	0.077	0.076	0.076	0.075

جدول ۹: نسبت سختی خاک به سختی خاک زیر سازه ۱۰ طبقه (FSV=5) و بر  $T/T_1$  تقسیم شده)

n	Joints' distance from center of the footing												
	-0.5	-0.458	-0.417	-0.375	-0.333	-0.292	-0.25	-0.208	-0.167	-0.125	-0.083	-0.042	0
3	0.320	0.319	0.317	0.315	0.314	0.313	0.312	0.312	0.312	0.312	0.313	0.313	0.313
5	0.212	0.210	0.207	0.204	0.203	0.201	0.199	0.198	0.197	0.197	0.196	0.196	0.196
10	0.115	0.113	0.110	0.108	0.107	0.107	0.106	0.106	0.105	0.105	0.104	0.104	0.104
15	0.089	0.087	0.084	0.082	0.081	0.080	0.079	0.079	0.078	0.077	0.077	0.076	0.076

جدول ۱۰: نسبت سختی خاک به سختی خاک زیر سازه یک طبقه (FSV=6) و بر  $T/T_1$  تقسیم شده)

n	Joints' distance from center of the footing												
	-0.5	-0.458	-0.417	-0.375	-0.333	-0.292	-0.25	-0.208	-0.167	-0.125	-0.083	-0.042	0
3	0.320	0.319	0.317	0.315	0.314	0.313	0.312	0.312	0.312	0.312	0.313	0.313	0.313
5	0.212	0.210	0.207	0.204	0.203	0.201	0.199	0.198	0.197	0.197	0.196	0.196	0.196
10	0.115	0.113	0.110	0.108	0.107	0.107	0.106	0.106	0.105	0.105	0.104	0.104	0.104
15	0.089	0.087	0.084	0.082	0.081	0.080	0.079	0.079	0.078	0.077	0.077	0.076	0.076



شکل ۶: رابطه سختی خاک نسبت به تعداد طبقات

$$k_z^i(2) = \frac{0.9421}{n^{0.937}} \frac{T}{T_{n=1}} \xrightarrow{T_{n=1}=0.13057} k_z^i(2) = \frac{7.215}{n^{0.937}} T \quad (3)$$

### ۳- جمع بندی و نتیجه گیری

همان طور که گفته شد، اثرات انعطاف پذیری پی پاسخ لرزه‌ای سازه‌ها را دچار تغییر می‌کند. در ضوابط طراحی اخیر اثرات اندرکنش خاک - سازه به صورت دقیق لحاظ نشده‌اند. معمولاً در روابط طراحی خاک مدل نمی‌شود. اما بهتر است برای طراحی دقیق‌تر سازه خاک زیر پی نیز مدل شود تا پاسخ‌های سازه‌ای به واقعیت نزدیک شوند. مدل‌سازی سه بعدی خاک پیچیده و زمان‌بر است، بنابراین تحقیقات نشان دادند که می‌توان خاک را با فنرهایی مدل کرد. در این مقاله تأثیر تعداد طبقات و دوره تناوب سازه بر مقدار سختی خاک بررسی شده است. سرانجام با توجه به بررسی داده‌های خروجی رابطه‌ای برای محاسبه سختی خاک براساس دوره تناوب و تعداد طبقات سازه ارائه شد.

### ۴- مراجع

- 1- Stewart, J.P., Seed, R.B. and Fenves, G.L., 1999b, **Seismic soil-structure interaction in buildings. II: Empirical findings**, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 125, 1, 38-48.
- 2-Waqas, M., 2018, **Identification of an Efficient Method for Practicing Designers to Incorporate Soil-Structure Interaction Effects**, Doctoral dissertation, CAPITAL UNIVERSITY.
- 3- Kanwal, F., 2017, Evaluation of Response Modification Factor in Consideration of Soil-Structure Interaction, Master Thesis.
- 4- Winkler, E., 1867, **Die Lehre von der Elasticitaet und Festigkeit: mit besonderer Rücksicht auf ihre Anwendung in der Technik für polytechnische Schulen**, Bauakademien, Ingenieure, Maschinenbauer, Architekten, etc (Vol. 1). Dominicus.
- 5- National Institute of Standards and Technology (NIST), 2012, **Soil-Structure Interaction for Building Structures**, GCR 12-917-21, Gaithersburg, Maryland.
- 6- Wolf, J.P. 1985, **Dynamic Soil-Structure Interaction**, Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, New Jersey.



- 7- 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, 1-10.
- 8- 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, 21-30.
- 9- Mullapudi TRS, 2010, **Nonlinear finite element formulation of the soil structure interaction through two-parameter foundation model**
- 10-Avcar M, 2016, **Effect of material non-homogeneity and two-parameter elastic foundation on fundamental frequency parameters of Timoshenko beam**, Acta Phys Pol A, 130, 375-378.
- 11-Raheem, S.E.A., Ahmed, M.M. and Alazrak, T.M., 2015, **Evaluation of soil-foundation-structure interaction effects on seismic response demands of multi-story MRF buildings on raft foundations**, International Journal of Advanced Structural Engineering (IJASE), 7, 1, 11-30.
- 12-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).
- 13-Nguyen, Q.V., Fatahi, B. and Hokmabadi, A.S., 2017, **Influence of size and load-bearing mechanism of piles on seismic performance of buildings considering soil-pile-structure interaction**, International Journal of Geomechanics, 17, 7, 04017007.
- 14-Mylonakis, G. and Gazetas, G., 2000, **Seismic soil-structure interaction: beneficial or detrimental**, Journal of Earthquake Engineering, 4, 3, 277-301.
- 15-Gazetas, G. and Mylonakis, G. 1998, **Seismic soil-structure interaction: new evidence and emerging issues**, Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics III
- 16- Masaeli, H., Khoshnoudian, F. and Ziaei, R., 2015, **Rocking soil-structure systems subjected to near fault pulses**, Journal of Earthquake Engineering, 19, 3, 461-479.
- 17- Chen, J., Feng, Y. and Shu, W., 2016, **An improved solution for beam on elastic foundation using quintic displacement functions**, KSCE Journal of Civil Engineering, 20, 2, 792-802.