



Civil and Project Journal
<http://www.cpjournals.com/>

Research Article

Introducing the ElasticFoundation element for modeling soil-structure interaction in OpenSees software

Morvarid Hajian^{1*}, Reza Attarnejad²

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

2- *Professor, School of civil Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran*

Received: 27 September 2024; Revised: 31 October 2024; Accepted: 01 November 2024; Published: 01 November 2024

Abstract:

The soil- structures interaction can alter the dynamic properties of the structures. Hence, it is essential to take into account the impacts of substrate flexibility when designing methods. As soil modeling in a continuous medium is computationally complex and time-consuming, a new two-dimensional element called ElasticFoundation was introduced in OpenSees. This element functions as a beam element and helps mitigate the impact of soil-structure inertial interaction. This component was created using the beam element on a two-parameter elastic foundation with a new suggested stiffness matrix. In order to reach this objective, the outcomes from both numerical and non-linear analysis of 25 structures were utilized, spanning buildings with 1, 3, 5, 10, and 15 stories. Using these findings, a fresh stiffness matrix was implemented to characterize the two-dimensional ElasticFoundation element.

Next, the accuracy and validity of this suggested element were verified using experimental data found in the technical literature. The findings of this study revealed that the experimental structure and the proposed model had nearly identical maximum lateral displacement of 24 mm. Moreover, the mean story drifts in the suggested model and the actual sample were 0.01 and 0.02, respectively. Therefore, the suggested soil-foundation element could accurately predict the soil-foundation behavior in comparison to complete soil continuum modeling. This element considered the impact of foundation size, foundation's vertical safety factor, soil properties, building's number of stories, and structure's frequency.

Keywords: *Soil-structure interaction, Finite Element Method, Winkler model, beam on two-parameter elastic foundation, OpenSees Software*

Cite this article as: Hajian,M. and Attarnejad,R. (2025). Introducing the ElasticFoundation element for modeling soil-structure interaction in OpenSees software. (e206958). Civil and Project, 6(11), e206958
<https://doi.org/10.22034/cpj.2024.480635.1324>

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.

*Corresponding author E-mail address: hajian.m@ut.ac.ir



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

معرفی المان ElasticFoundation جهت مدل سازی اندرکنش خاک - سازه در نرم افزار OpenSees

مروارید حاجیان^{۱*}، رضا عطارنژاد^۲

۱* - دانشجوی مقطع دکتری مهندسی سازه، دانشگاه تهران، تهران، ایران
۲- استاد دانشکده عمران، دانشگاه تهران، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۰۶ مهر ۱۴۰۳؛ تاریخ بازنگری: ۱۰ آبان ۱۴۰۳؛ تاریخ پذیرش: ۱۱ آبان ۱۴۰۳؛ تاریخ انتشار آنلاین: ۱۱ آبان ۱۴۰۳

چکیده:

اندرکنش خاک-سازه می تواند مشخصات دینامیکی سازه ها را تغییر دهد. ازین رو ضروریست تا در روش های طراحی، اثرات انعطاف پذیری بستر نیز در نظر گرفته شود. از آنجایی که مدل سازی خاک به صورت محیط پیوسته، از نظر محاسباتی پیچیده و زمان بر است، در این مطالعه المان دوبعدی جدیدی تحت عنوان ElasticFoundation در نرم افزار OpenSees پیشنهاد شده است که همانند المان تیر عمل کرده ولی می تواند اثرات اندرکنش اینرسی خاک - سازه را به سادگی در نظر بگیرد. این المان برپایه ی روش المان تیر بر روی بستر دوپارامتری با ماتریس سختی پیشنهادی، توسعه یافت. برای رسیدن به این هدف، از استخراج نتایج حاصل از تحلیل عددی و غیرخطی ۲۵ سازه شامل ساختمان های ۱، ۳، ۵، ۱۰ و ۱۵ طبقه استفاده شد. به کمک این نتایج، ماتریس سختی جدیدی برای تعریف المان دوبعدی ElasticFoundation معرفی شده است. سپس، به کمک داده های تجربی موجود در ادبیات فنی، دقت و صحت اعتبار این المان پیشنهادی بررسی گردید. نتایج این تحقیق نشان دادند که بیشینه ی جابه جایی جانبی در سازه ی تجربی و مدل پیشنهادی بسیار نزدیک بهم و حدوداً برابر با ۲۴ میلی متر بودند. همچنین متوسط جابه جایی نسبی طبقات نیز در مدل پیشنهادی و نمونه ی آزمایشی به ترتیب برابر با ۰/۱ و ۰/۲ بود. بدین ترتیب، المان خاک - فونداسیون پیشنهادی به درستی توانست رفتار خاک - فونداسیون را در مقایسه با مدل سازی پیوسته کامل خاک، تخمین بزند. این المان اثرات ابعاد پی، ضریب ایمنی قائم پی، مشخصات خاک، تعداد طبقات سازه و دوره ی تناوب سازه را در نظر می گیرد.

کلمات کلیدی:

المان خاک و پی، اندرکنش خاک و سازه (SSI)، روش اجزای محدود (FEM)، بستر وینکلر، المان تیر دو پارامتری، نرم افزار OpenSees

۱- مقدمه

اندرکنش خاک و سازه (SSI) یکی از موضوعات مهم در مهندسی زلزله است که در چند دهه‌ی اخیر مورد توجه قرار گرفته است. عموماً در تحلیل لرزه‌ای سازه‌ها، فرض بر این است که سازه بر روی بستر صلب قرار دارد و آیین‌نامه‌های لرزه‌ای اثرات اندرکنش خاک - سازه را در طراحی عمومی در نظر نمی‌گیرند. با این حال، مطالعات نشان می‌دهند که پاسخ سازه بر روی بستر نرم، می‌تواند تفاوت قابل توجهی با حالتی که بر روی بستر صلب قرار دارد، داشته باشد (Hokmabadi, et. al., 2014; Tahghighi and Rabiee, 2015; Nguyen, 2017; El Hoseny et. al, 2023 and Vicencio et. al, 2024).

در سال‌های اخیر، روش مدل‌سازی محیط خاک به کمک فنرهای مستقل از هم مورد توجه قرار گرفته است. محققین بسیاری در مطالعات خود، ازین روش برای بررسی اثرات اندرکنش خاک-سازه استفاده کردند (Raychowdhury 2011; Tahghighi and Mohammadi, 2020; Wani et. al., 2022; Siqueira et. al., 2023; Vilela and Filho, 2024 and Yosef, et. al., 2024). یکی از روش‌های معروف، روش تیر بر روی بستر الاستیک وینکلر می‌باشد، که خاک را به کمک چندین فنر قائم و مستقل از هم مدل می‌کند (Winkler, 1867; Vlasov and Leontiev, 1966; Limkatanyu et al. 2012; Hassan and Doha (2015; Ai and Cai 2016; Widad et. al., 2021; Pandey et. al., 2023).

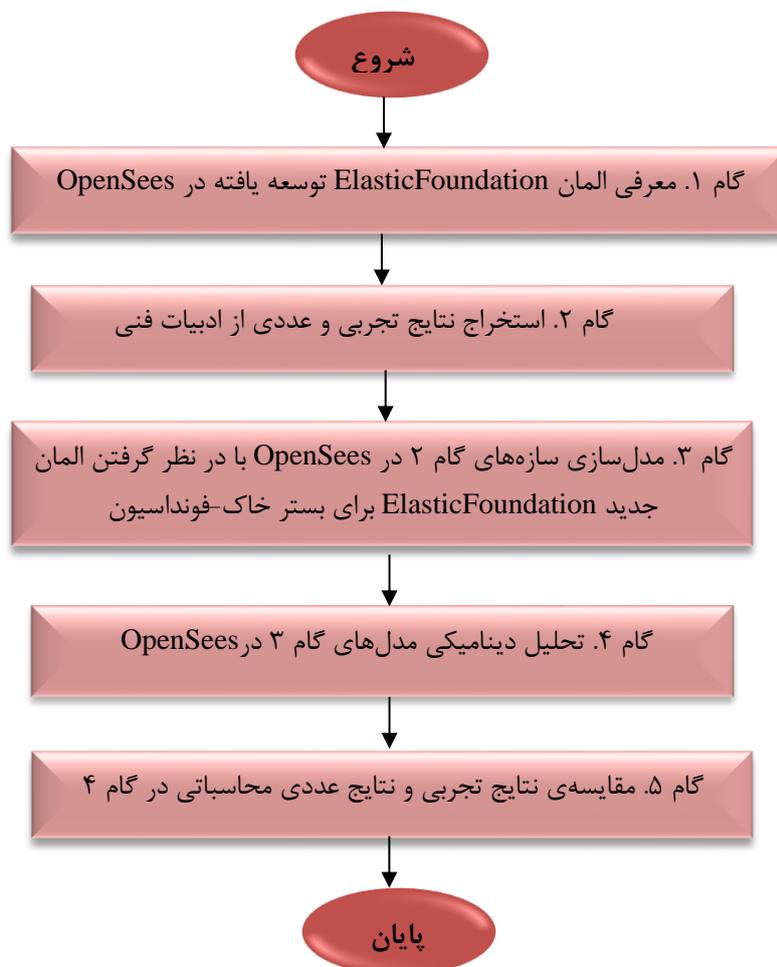
روش وینکلر توانایی مدل‌سازی رفتار برشی خاک را ندارد، به همین دلیل محققین روش‌های بستر چندپارامتری را معرفی کردند. این روش‌ها به کمک پارامترهای جدید، رفتار برشی خاک و ارتباط بین فنرهای قائم را نیز در نظر می‌گیرند. در این مطالعات به بررسی ارتعاش آزاد تیر بر روی بستر یک یا دوپارامتری پرداخته شده است (Zhu and Leung, 2009; Teodoru and Muşat, 2010; Horvath and Colasanti, 2011; Dinev 2012; Caliò and Greco, 2013; Obara, 2014; Abohadima, et. al., 2015; Froio & Rizzi; 2017; Basudhar et al., 2018; Ma et. al., 2018; Betancura and Ochoa, 2019; Boudaa, et. al., 2019; Onu, 2000 and Deng et. al., 2023). در دستورالعمل FEMA 356 (۲۰۰۰)، خاک به کمک فنرهای قائم مستقل از هم مدل می‌شود. این فنرها قادر به انتقال مقاومت برشی خاک نیستند، همچنین سختی فنرها تنها تابعی از مشخصات خاک و ابعاد فونداسیون است و اثر پی‌های نواری و دوره‌ی تناوب و تعداد طبقات سازه در آن لحاظ نشده است. بنابراین بهتر است روشی بهبودیافته جهت مدل‌سازی بستر خاک-فونداسیون ارائه گردد.

در پژوهش اخیر المان جدیدی برای مدل‌سازی بستر خاک-فونداسیون به نام ElasticFoundation را در نرم‌افزار OpenSees V2.5.0 معرفی شده است. این المان براساس روش تیر بر روی بستر دوپارامتری الاستیک توسعه یافته است. المان معرفی شده یک المان تیر-ستون دوبعدی است که ماتریس سختی آن براساس فرمولاسیون جدیدی که در این پژوهش پیشنهاد شده است، به دست می‌آید تا به درستی بتواند اثرات اندرکنش خاک - سازه را مدل کند. مجموعه‌ای از مدل‌های عددی و تجربی به‌عنوان معیاری برای اطمینان از اعتبار، دقت و عملکرد المان پیشنهادی مورد مطالعه قرار گرفت. مطابق با نتایج مشاهده شد که المان ElasticFoundation می‌تواند به طور مطمئن و کاربردی برای شبیه‌سازی اثرات اندرکنش خاک -سازه و تحلیل عددی سازه‌ها در OpenSees مورد استفاده قرار گیرد.

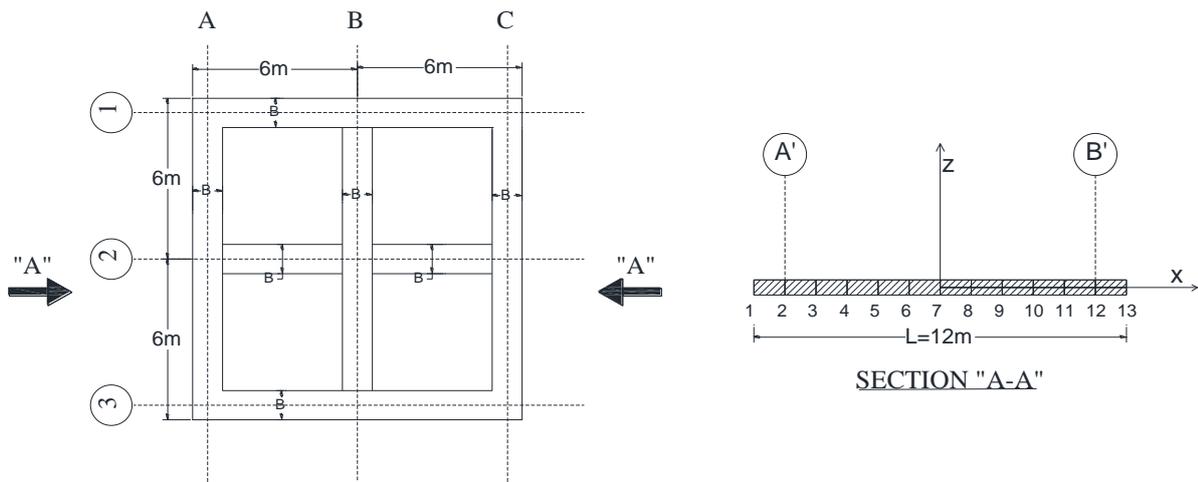
۲- روش‌شناسی پژوهش

در این مطالعه، المان فونداسیون جدیدی به نام ElasticFoundation معرفی شد که اثرات اندرکنش خاک و سازه را در نظر می‌گیرد. این المان مشخصات خاک و فونداسیون را به روش تیر بر روی بستر دو پارامتری در نظر گرفته است. برای دستیابی به این هدف، ابتدا ماتریس‌های سختی المان تیر بر روی بستر دو پارامتری به دست آمد و سپس المان نهایی در نرم‌افزار OpenSees با کمک دستورالعمل‌های راهنمای کدنویسی در نرم‌افزار (Frank McKenna, 2013) توسعه یافت. در روندنمای شکل ۱، روش صحت‌سنجی المان پیشنهادی، نشان داده شده است. در شکل ۲، هندسه‌ی پی نواری مدل‌های سازه‌ی مورد مطالعه

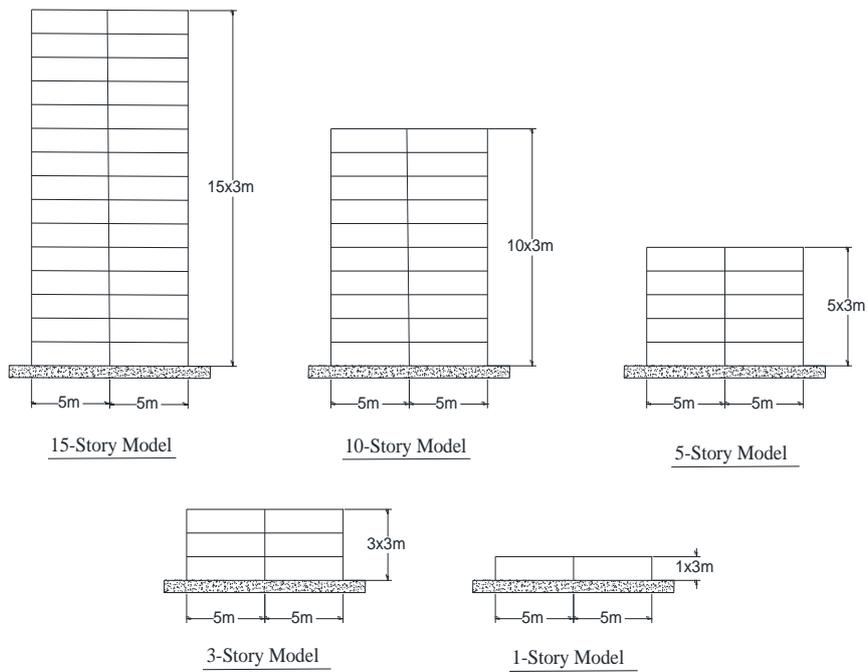
نشان داده شده است. ساختمان‌های مورد مطالعه نیز به صورت سازه‌های سه‌بعدی، ۱، ۳، ۵، ۱۰ و ۱۵ طبقه مطابق با شکل ۳ مدل شدند. از تحلیل سه‌بعدی جهت بررسی تأثیر پی‌های نواری گوشه بر روی مدول سختی بستر خاک-فونداسیون استفاده شده است. بدین صورت با اعمال تأثیر وجود پی نواری در گوشه‌ها، می‌توان یک المان دو‌بعدی با سختی اصلاح‌شده در لبه‌ها را معرفی نمود.



شکل ۱: روندنمای معرفی المان جدید ElasticFoundation



شکل ۲: هندسه‌ی پی‌های نواری مورد مطالعه



شکل ۳: مدل‌های سازه‌ای مورد مطالعه

جهت مدل سازی خاک، از المان های سه بعدی brick در نرم افزار OpenSees استفاده شده است. مشخصات خاک های مورد مطالعه در جدول ۱ خلاصه شده است.

جدول ۱: مشخصات خاک های مورد استفاده در مدل سازی

Soil Type (ASCE 7-16)	Shear Wave Velocity (m/s)	Poisson's Ratio	Soil Density (kg/m ³)	C' (kg/m ²)	ϕ (Degree)
D	200	0.4	1800	0	30
E	150	0.45	1700	5	25

۳- توسعهی المان جدید در بخش دستورات نرم افزار OpenSees

المان ElasticFoundation یک المان تیر - ستون دویبعدی است که به صورت زیر در نرم افزار OpenSees فراخوانی می شود. داده های ورودی آن در جدول ۲ نشان داده شدند.

- element ElasticFoundation \$eleTag \$iNode \$jNode \$E \$A \$Iz \$B \$Lt \$Gs \$Nu \$FSV \$T \$N \$transfTag \$maxTag <-mass \$massDens> <-cMass>

جدول ۲: داده های ورودی المان ElasticFoundation

تعریف	داده های ورودی
شماره المان	\$eleTag
گره ابتدایی	\$iNode
گره انتهایی	\$jNode
مدول الاستیسیته	\$E
سطح مقطع المان	\$A
$Iz = BL^3/12$ = ممان دوم سطح	\$Iz
عرض پی	\$B
طول پی	\$Lt
مدول برشی خاک	\$Gs
نسبت پواسن خاک	\$Nu
ضریب ایمنی قائم خاک	\$FSV
دورهی تناوب سازه در حالت بستر صلب	\$T
تعداد طبقات سازه	\$N
شناسهی تبدیل مختصات که در قبل تعریف شده است (CrdTransf)	\$transfTag
شناسهی نوع نوار پی (نوار میانی یا گوشه)	\$maxTag
جرم واحد طول المان	\$massDens
جهت تشکیل ماتریس جرم گسترده	-cMass

المان پیشنهادی براساس تئوری تیر بر روی بستر دوپارامتری پاسترناک توسعه یافته است (Pasternak, 1954). ماتریس سختی این المان مطابق با رابطه ی ۱ می باشد:

$$[K] = [K_{elastic} + K_{geometric}]_{Beam} + [K_{winkler}] + [K_{pasternak}] \quad (1)$$

در این رابطه، $[K_{elastic}]$ ، $[K_{geometric}]$ ، $[K_{winkler}]$ و $[K_{pasternak}]$ به ترتیب ماتریس سختی الاستیک، ماتریس سختی هندسی، ماتریس سختی وینکلر و ماتریس سختی پاسترناک هستند که مطابق با رابط ۲ تا ۵ محاسبه می شوند.

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

$$[K_{pasternak}] = \frac{K_{pasternak}}{30L} \begin{bmatrix} 36 & 3L & -36 & 3L \\ & 4L^2 & -3L & -L^2 \\ & & 36 & -3L^2 \\ Sym & & & 4L^2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$[K_{elastic}] = \frac{E_f I_f}{L^3} \begin{bmatrix} 12 & 6L & -12 & 6L \\ & 4L^2 & -6L & 2L^2 \\ & & 12 & -6L^2 \\ Sym & & & 4L^2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$[K_{geometric}] = \frac{P}{30L} \begin{bmatrix} 36 & 3L & -36 & 3L \\ & 4L^2 & -3L & -L^2 \\ & & 36 & -3L^2 \\ Sym & & & 4L^2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

در روابط فوق، $K_{winkler}$ ، $K_{pasternak}$ ، L ، E_f ، I_f و P به ترتیب مدول فونداسیون وینکلر، مدول فونداسیون پاسترناک، طول پی، مدول الاستیسیته، ممان اینرسی و بار محوری المان تیر فونداسیون هستند.

معادله ی متداول مورد استفاده برای تعریف پارامتر دوم پاسترناک توسط ولاسوف مطابق با رابطه ی ۶، معرفی شد (Vlasov and Leontiev, 1966). در این روش اندرکنش برشی بین فنرهای قائم، با یک لایه ی برشی تراکم ناپذی در طول پی مدل می شود.

$$k_{pasternak} = \frac{E_s B H_s}{2(1+\nu_s)} \frac{\sinh\gamma \cosh\gamma - \gamma}{2\gamma \sinh^2\gamma} \quad (6)$$

در این رابطه، B ، H_s ، E_s و ν_s به ترتیب عرض فونداسیون، عمق خاک، مدول الاستیسیته ی خاک، نسبت پواسن خاک و پارامتر میزان تغییر شکل در عمق خاک می باشند. در این پژوهش γ برابر با یک فرض می شود.

در این مطالعه، پارامتر اول بستر دوپارامتری $K_{winkler}$ ، برای در نظر گرفتن اثرات متغیرهای احتمالی بر ماتریس سختی خاک - پی توسعه یافته است. سپس ماتریس سختی المان جدید ElasticFoundation بر اساس روابط جدید به دست آمده، محاسبه شد. در بخش بعد، ابتدا پارامتر اول $K_{winkler}$ به تفصیل معرفی می‌شود و سپس در بخش انتهایی کاربرد المان ElasticFoundation و مقایسه‌ی نتایج آن با نتایج عددی و تجربی مطرح می‌شوند.

۴- مدول سختی بهبود یافته‌ی وینکلر

روابط سختی بهبود یافته پارامترهای پی وینکلر در اینجا ارائه شده است. تجزیه و تحلیل عددی برای به دست آوردن معادلات سختی خاک - پی انجام شد. این رابطه به صورت پنج عبارت بود که تابعی از ابعاد پی، خصوصیات خاک، تعداد طبقات ضریب ایمنی پی و دوره طبیعی پایه ثابت سازه بود (معادل ۷).

$$k_{winkler}^i(n) = k_z^i(1) \times k_z^i(2) \times k_z^i(3) \times k_z^i(4) \times k_z^i(5) \quad (7)$$

در این رابطه، $k_z^i(1)$ ، $k_z^i(2)$ ، $k_z^i(3)$ ، $k_z^i(4)$ و $k_z^i(5)$ به ترتیب پارامترهای مربوط به ابعاد فونداسیون، تعداد طبقات، ضریب ایمنی قائم پی، عرض پی و محل قرارگیری پی نواری هستند. این عبارت شدت سختی بر واحد طول را نشان می‌دهد. پارامتریهای فوق مطابق با روابط ۱۳-۸ محاسبه می‌شوند:

$$k_z^i(1) = \frac{K_{Gazetas}}{B \times L} \times \left(\frac{2.58}{B^{0.74}} \right) \quad (8)$$

$$k_z^i(2) = \frac{7.215}{n^{0.937}} T \quad (9)$$

$$k_z^i(3) = \frac{57.72 \frac{B}{L} - 1.8161}{FSV} \quad (10)$$

$$k_z^i(4) = 0.0198B^2 - 0.1253B + 0.748 \quad (11)$$

$$k_z^i(5) = \begin{cases} \delta & \text{corner strips} \\ 1 & \text{middle strips} \end{cases} \quad (12)$$

$$\delta = (0.014FSV + 0.977) \times (0.008n + 0.965) \quad (13)$$

پارامترهای سختی پی $k_z^i(1)$ ، $k_z^i(4)$ و $k_z^i(5)$ در دو انتهای پی مطابق با روابط ۱۸-۱۴ افزایش می‌یابد ($L_e = R_e \times L$).

$$k_z^i(1)_{\max} = k_z^i(1) \times R_k \quad (14)$$

$$R_k = R_{k-code} \times (0.0027B^3 - 0.037B^2 + 0.226B - 0.048) \quad (15)$$

$$R_{k-code} = \left(\left(12k_{yy} / k_z(1)L^2 \right) - (1 - R_e)^3 \right) / \left(1 - (1 - R_e)^3 \right) \quad (16)$$

$$k_z^i(4)_{max} = 0.001B^2 - 0.038B + 0.585 \quad (17)$$

$$\delta_{max} = (0.014FSV + 0.977) \times (0.0087n + 0.957) \quad (18)$$

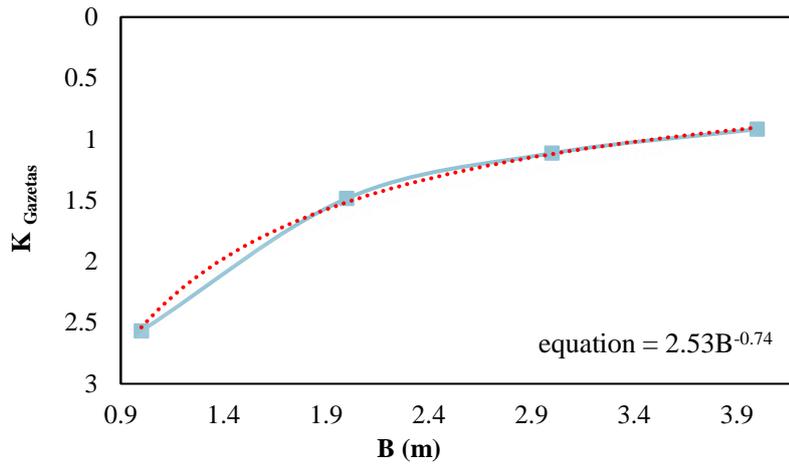
R_{k-code} مقدار سختی افزایش یافته در دو انتهای پی مطابق با NIST-GCR (۲۰۱۲) می باشد که در رابطه ی ۱۶ محاسبه می شود. در این رابطه $k_z(1) = k_z^i(1) \times (B \times L)$ بیانگر سختی کل سطح خاک-فونداسیون است.

همانطور که قبلاً ذکر شد، معادلات فوق به کمک نتایج یک سری تحلیل عددی و غیرخطی حاصل شدند که در ادامه نتایج مربوط به هر عبارت به صورت نمودار نشان داده شدند. سازه های مورد مطالعه تحت تحلیل غیرخطی قرار گرفته و عکس العمل سطح پی و خاک محاسبه شدند. سپس با بررسی این نتایج، رابطه ی پیشنهادی ۷ به دست آمد.

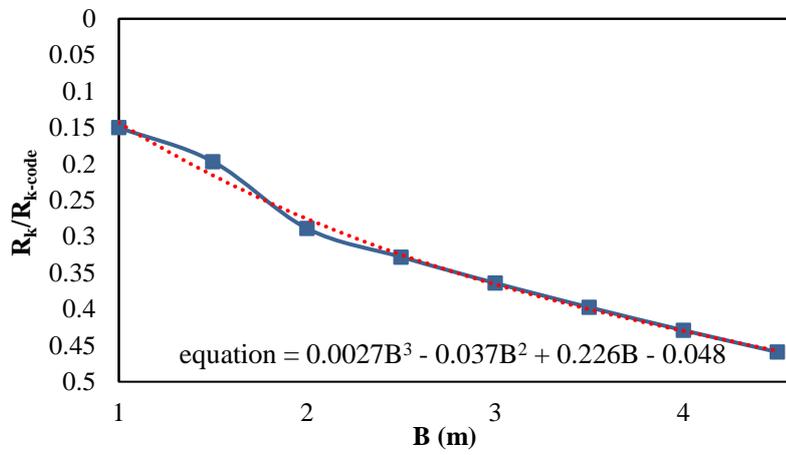
عبارت اول $k_z^i(1)$ ، رابطه ی بین سختی گازتاس و مساحت دقیق زیر منحنی سختی محاسباتی منعکس می کند که مطابق با شکل ۴ به دست آمده است. همچنین در شکل ۵، ضریب افزایشدهی سختی لبه ی پی، R_k ترسیم شده است. در شکل ۶، بخش دوم معادله $k_z^i(2)$ ترسیم شده است. در این نمودار تأثیر تعداد طبقات سازه بر مقدار سختی سطح پی و خاک نشان داده شده است. سومین عبارت سختی $k_z^i(3)$ ، پارامتر ضریب ایمنی قائم پی است که مطابق با نتایج شکل ۷ به دست آمده است.

بخش چهارم رابطه ی سختی، پارامترهای عرض فونداسیون $k_z^i(4)$ و $k_z^i(4)_{max}$ ، در شکل ۸ نمایش داده شده است.

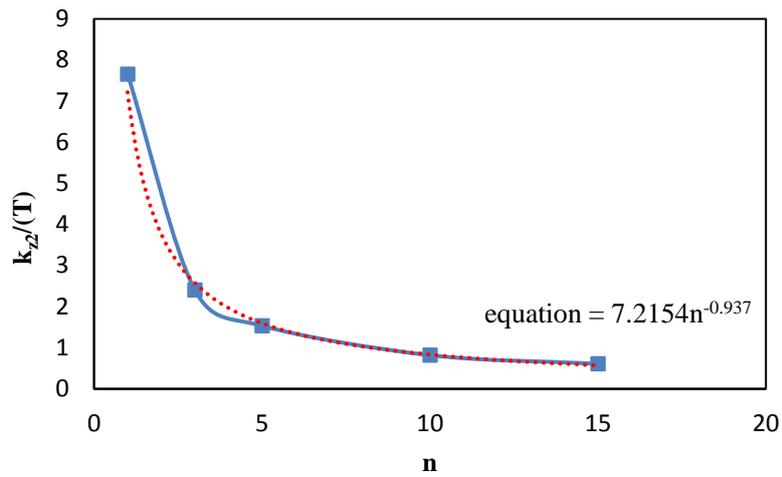
قابل ذکر است که به دلیل تقارن مدل ها، نتایج تنها نیمی از طول فونداسیون نشان داده شد. با توجه به این ارقام، قسمت پنجم معادله $k_z^i(5)$ که نشان دهنده ی موقعیت پی نواری - نوارهای وسط یا گوشه - می باشد، به دست آمد. این عبارت از تأثیر دو متغیر، FSV و تعداد طبقات سازه به دست آمده است. در شکل ۹ رابطه ی بین $k_z^i(5)$ و FSV مشاهده می شود و اشکال ۱۱-۱۰ بیانگر تأثیر تعداد طبقات در ساختمان بر $k_z^i(5)$ هستند.



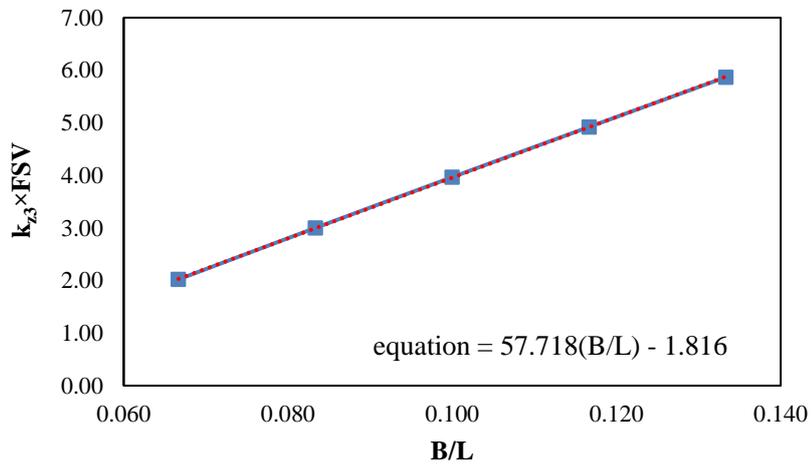
شکل ۴: رابطه‌ی بین سختی گزناس و سطح زیر منحنی



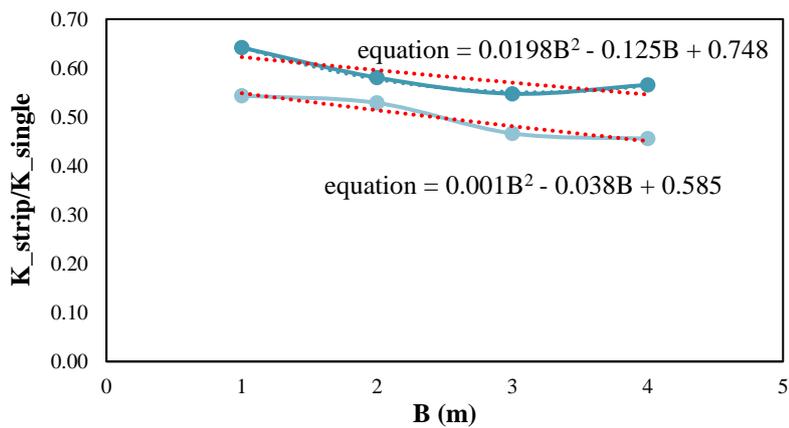
شکل ۵: ضریب اصلاحی سختی گوشه پی



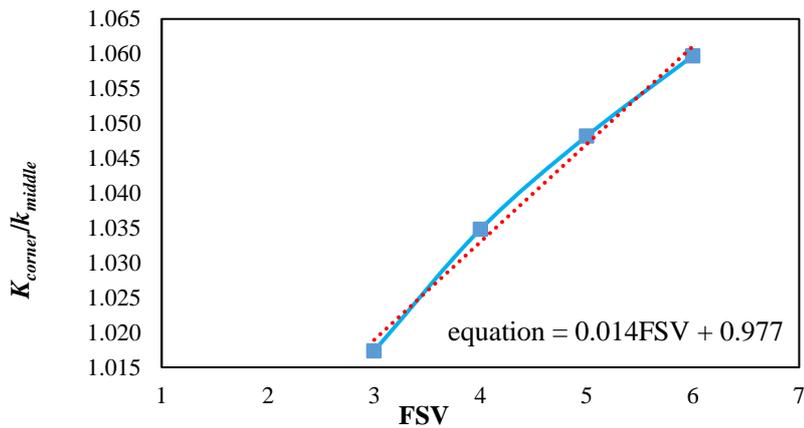
شکل ۶: ارتباط بین پارامتر سختی خاک-پی و تعداد طبقات



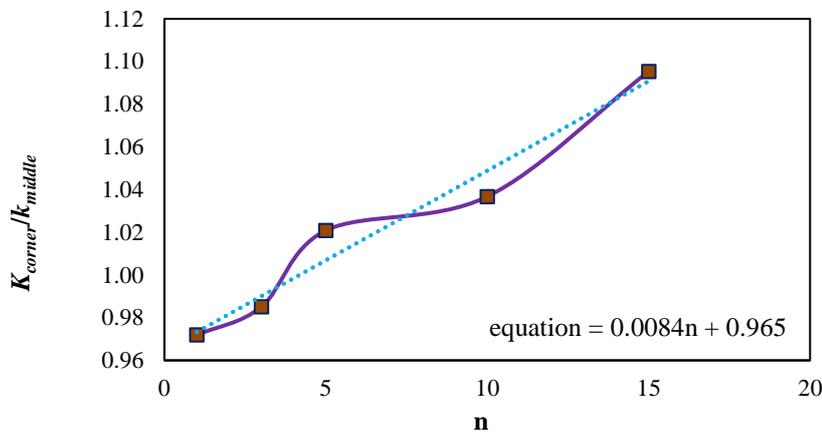
شکل ۷: ارتباط بین سختی خاک-پی با FSV



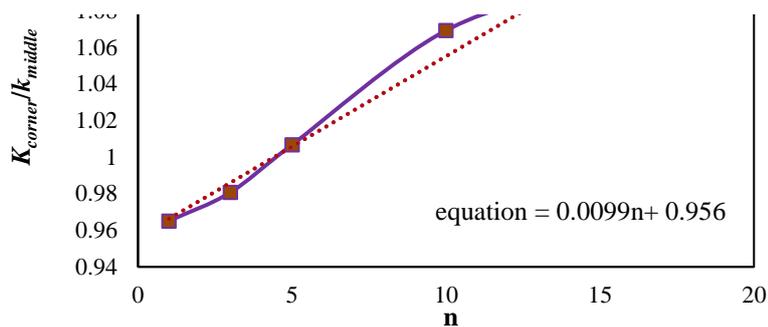
شکل ۸: نسبت سختی پی نواری به پی تکی (سازه یک طبقه)



شکل ۹: نسبت سختی نوار گوشه به نوار میانی نسبت به FSV (سازه یک طبقه)



شکل ۱۰: متوسط نسبت سختی نوار گوشه به نوار میانی در مقایسه با تعداد طبقات



شکل ۱۱: نسبت سختی نوار میانی به نوار گوشه برای FSV=2 در دو انتهای فونداسیون

۵- بحث و نتایج

از طریق نتایج فوق، پارامتر سختی وینکلر اصلاح شده بر اساس مدل های عددی به دست آمد. مقادیر سختی انتخاب شده سپس وارد ماتریس سختی تیر بر روی پایه دو پارامتری پاسترناک شدند تا عنصر پایه جدید به نام Elasticfoundation در پلت فرم OpenSees ایجاد شود. عنصر الاستیک فونداسیون می تواند اثرات مهم پدیده SSI را در مدل سازی طراحی سازه در کوتاه

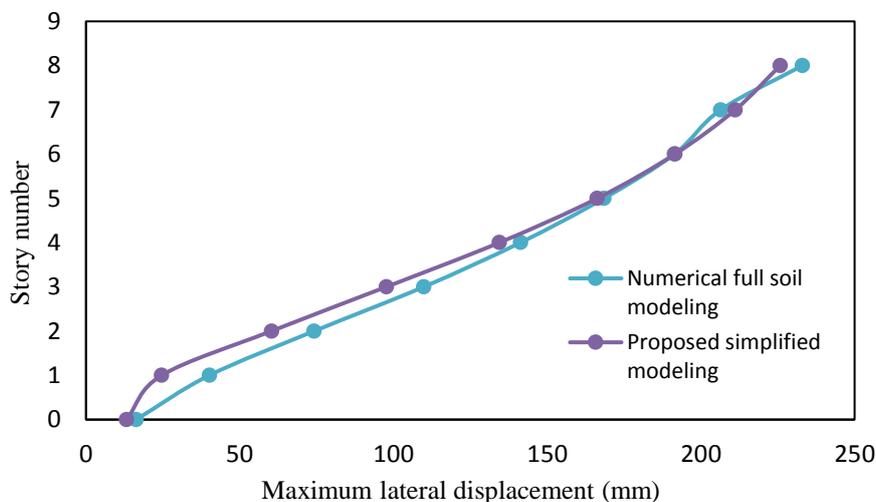
ترین زمان لازم برای اهداف عملی در نظر بگیرد. عنصر پی خاک پیشنهادی می تواند جایگزین قابل قبولی برای مدل سازی سه بعدی محیط خاک باشد. در این بخش، روایی و صحت روابط به دست آمده و پارامترهای آنها با نتایج تجربی عددی و موجود مورد بررسی قرار گرفت. در این بخش، اعتبار و دقت عنصر به دست آمده با نتایج عددی و تجربی موجود مورد بررسی قرار گرفت.

۵-۱- نتایج عددی

برای بررسی میزان عملکرد المان ارائه شده، مدلی از یک سازه‌ی اسکلت بتنی سه دهانه ۸ طبقه در نظر گرفته شد. یک مدل کامل دو بعدی از این سازه با محیط خاک در نرم افزار SAP2000 ساخته شد. سپس همین سازه با المان جدید ElasticFoundation در نرم افزار OpenSees مدل سازی شد تا نتایج آن با مدل SAP2000 مقایسه شود. جدول ۳ خصوصیات سازه ۸ طبقه را خلاصه کرده است. این مدل دارای سه دهانه ۴ متری با ارتفاع طبقات ۳ متر بود که بر روی ۶ پی نواری ۸×۱×۱۰ متر قرار داشت. شالوده بر روی بستر خاکی قرار داشت که عمق آن ۳۰ متر و عرض آن ۶۰ متر بود.

جدول ۳: مشخصات مدل سازه‌ی

Story's Number	Beams Section	Columns Section	Dead Load (kg/m ²)	Live Load (kg/m ²)
Stories 1-3	BOX 500×300	BOX 500×500	555	200
Stories 4-6	BOX 450×300	BOX 450×450	555	200
Story 7	BOX 400×300	BOX 400×400	555	200
Story 8 (roof)	BOX 400×300	BOX 400×400	540	150
Soil Type	Velocity (m/s)	Density (kg/m ³)	Poisson's Ratio	ϕ °
D	200	1800	0.4	30

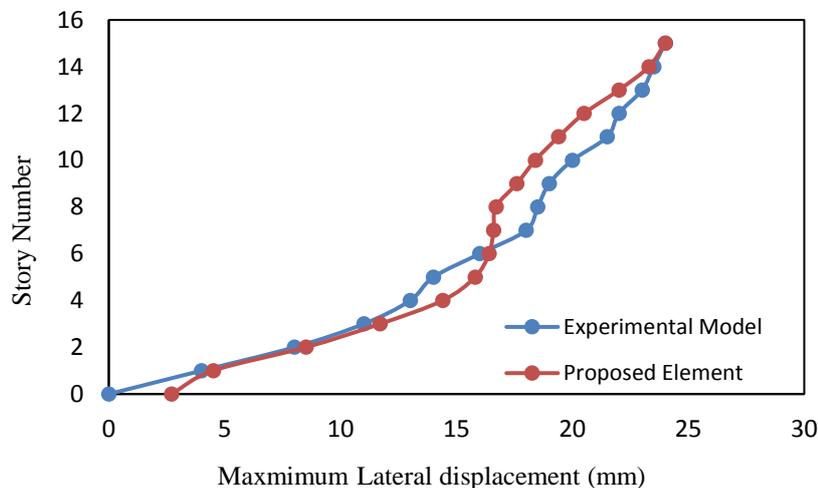


شکل ۱۲: مقایسه حداکثر جابجایی جانبی برای مدل های عددی و پیشنهادی

حداکثر جابجایی جانبی لرزه‌ای هر طبقه تحت رکوردهای شتاب زلزله ۱۹۴۰ El-Centro در شکل ۱۲ برای هر دو روش مدل سازی نشان داده شده است. مطابق با این نمودارها مشاهده شد که بیشینه‌ی جابجایی زمین لرزه‌ای جانبی هر دو روش مدل سازی ۳ درصد اختلاف داشته و تطابق قابل قبولی با هم داشتند. دوره تناوب اصلی سازه برای مدل سازی پیشنهادی و عددی به ترتیب ۱,۶۶ ثانیه و ۱,۴۶ ثانیه بود. بنابراین، می توان استنباط کرد که روش پیشنهادی جایگزین مناسبی برای مدلسازی سه بعدی عنصر خاک است.

۵-۲-صحت‌سنجی

در این بخش از نتایج تجربی طباطبایی فر (۲۰۱۲) استفاده شد. مدل آزمایشی یک سازه‌ی فولادی ۱۵ طبقه با ارتفاع ۱٫۵ متر و دهانه ۰٫۴ متر در هر جهت بود (Tabatabaiefar, 2012). این سازه توسط المان ElasticFoundation به عنوان بستر مدل‌سازی شد، سپس تحت بارگذاری لرزه‌ای ۱۹۴۰ El-Centro در نرم‌افزار OpenSees مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. در ادامه، شکل ۱۳ حداکثر جابجایی جانبی طبقه را نشان می‌دهد. همانطور که در نمودار نشان داده شده است، بیشینه‌ی جابجایی در مدل با المان پیشنهادی خاک-فونداسیون برابر با ۲۴ و در مدل تجربی برابر با ۲۳٫۳ میلی‌متر بوده است. لذا اختلاف جابجایی بیشینه در دو روش برابر با ۳ درصد می‌باشد. بدین ترتیب استفاده از المان خاک-فونداسیون دو پارامتری معرفی شده در این پژوهش، در مقایسه با مدل‌سازی تجربی می‌تواند نتایج مناسبی به همراه داشته باشد.



شکل ۱۳. مقایسه حداکثر جابجایی جانبی برای مدل‌های تجربی و پیشنهادی

۶- نتیجه‌گیری

در سال‌های اخیر، تحقیقات گسترده‌ای در زمینه‌ی نحوه‌ی تأثیر اندرکنش خاک-سازه (SSI) بر پاسخ لرزه‌ای سازه‌ها انجام گرفته است. در نظر گرفتن اندرکنش خاک - سازه به دلیل پیچیدگی و عدم درک تمام خصوصیات آن، به ندرت در پروژه‌های ساختمانی مورد استفاده قرار می‌گیرد. روش‌های متداول طراحی لرزه‌ای بر اساس شرایط پایه صلب هستند که همیشه محافظه‌کارانه یا مقرون به صرفه نیستند، به ویژه برای ساختمان‌های صلب روی خاک‌های نرم می‌تواند بر عملکرد ساختمان تأثیر بگذارد. بدین ترتیب، بررسی جامعی برای معرفی یک المان جدید تیر دوپارامتری برای مدل‌سازی محیط خاک-فونداسیون انجام شد که می‌تواند به راحتی در نرم‌افزار OpenSees مورد استفاده قرار گیرد و اثرات اندرکنش خاک - سازه را در نظر بگیرد.

در این راستا، به کمک مدل‌سازی عددی سازه‌های سه بعدی، ۱ طبقه، ۳ طبقه، ۵ طبقه، ۱۰ طبقه و ۱۵ طبقه با پایه‌های نواری در نرم افزار OpenSees، مقادیر سختی خاک-فونداسیون محاسبه شد. سپس به کمک المان بستر دوپارامتری، ماتریس سختی این المان بهبود یافت. در نهایت، المان جدید به صورت یک المان تیر-ستون با ماتریس سختی توسعه یافته در نرم‌افزار OpenSees اعمال شد. با بررسی نتایج، می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

- المان ElasticFoundation پیشنهادی می‌تواند مانند سیستم خاک - سازه واقعی به خوبی عمل کند. روابط سختی به دست آمده جهت بهبود ماتریس سختی المان خاک - پی برای مدل‌سازی SSI استفاده شد. از این رو، المان جدید ElasticFoundation می‌تواند اثرات اندرکنش خاک-سازه را با دقت خوبی مدل کند.
- مقدار سختی خاک-فونداسیون پیشنهادی بر اساس مشخصات خاک، پی و خواص روسازه متفاوت است. پارامترهای جدیدی که بر روی سختی پی وینکلر تأثیر می‌گذارند عبارتند از: ابعاد فونداسیون، ضریب ایمنی قائم پی، ویژگی‌های خاک، تعداد طبقات روسازه و دوره‌ی تناوی سازه با پایه صلب.
- سختی خاک - پی با عرض پی، FSV و تعداد طبقات رابطه معکوس داشت.
- سختی خاک - پی با دوره‌ی تناوی بستر صلب، نسبت ابعادی سازه و مدول برشی خاک، رابطه‌ی مستقیم داشت.
- المان جدید به مهندسان سازه اجازه می‌دهد تا به راحتی اثرات اندرکنش خاک - سازه را در ساختمان‌ها لحاظ کنند، بدون اینکه نیاز به انجام محاسبات ریاضی و مدل‌سازی پیچیده داشته باشند.

اعلام تعارض منافع

نویسندگان اعلام می‌کنند که هیچ نوع تعارض منافی وجود ندارد.

مراجع

- Abohadima, S., Taha, M., & Abdeen, M. A. M. (2015). General analysis of Timoshenko beams on elastic foundation. *Mathematical Problems in Engineering*.
- Ai, Z. Y., & Cai, J. B. (2016). Static interaction analysis between a Timoshenko beam and layered soils by analytical layer element/boundary element method coupling. *Applied Mathematical Modelling*, 40(21-22), 9485-9499.
- ASCE/SEI 7-16 (2016), *Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures*.
- Basudhar, P. K., Yadav, S. K., & Basudhar, A. (2018). Treatise on Winkler modulus of subgrade reaction and its estimation for improved soil-structure interaction analysis. *Geotechnical and Geological Engineering*, 36(5), 3091-3109.
- Boudaa, S., Khalfallah, S., & 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.
- Caliò, I. and Greco, A. (2013). "Free vibrations of Timoshenko beam-columns on Pasternak foundations". *Journal of Vibration and Control*, 19(5), 686-696.

- de Siqueira, D.C., Almeida, C.A.A., da Silva, R.G.L., Morandini, T.L.C., Viana, H.F., Costa, R.S. and Lavall, A.C.C. (2023). Influence of soil-structure interaction modeling on the behavior of multi-story plane steel frames with shallow footing foundations. *Research, Society and Development*, 12(1), pp. e9512139320-e9512139320.
- Deng, J., Shahroudi, M. and Liu, K. (2023). Dynamic Stability and Responses of Beams on Elastic Foundations Under a Parametric Load. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 23(02), p.2350018.
- Dinev, D. (2012). Analytical solution of beam on elastic foundation by singularity functions. *Engineering Mechanics*, 19(6), 381-392.
- dos Santos Vilela, I.P. and de Souza Sánchez Filho, E. (2024). Soil-structure interaction analysis using subgrade reaction modulus in raft design. *CONTRIBUCIONES A LAS CIENCIAS SOCIALES*, 17(2), pp. e5176-e5176.
- El Hoseny, M., Ma, J., Dawoud, W. and Forcellini, D. (2023). The role of soil structure interaction (SSI) on seismic response of tall buildings with variable embedded depths by experimental and numerical approaches. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 164, p.107583.
- FEMA, (2000). "Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings, FEMA 356", prepared by the American Society of Civil Engineers for Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C.
- Frank McKenna, (2013). *Adding your Code to OpenSees*, Sponsored by: NEES through NEEScomm Pacific Earthquake Engineering Research Center National Science Foundation.
https://opensees.berkeley.edu/wiki/index.php/Adding_your_own_Code
- Froio, D., & Rizzi, E. (2017). Analytical solution for the elastic bending of beams lying on a linearly variable Winkler support. *International Journal of Mechanical Sciences*, 128, 680-694.
- Gazetas, G., 1991. "Formulas and charts for impedances of surfaces and embedded foundation". *Journal of geotechnical engineering*, 117(9), 1363-1381.
- Hassan, M. T., & Doha, E. H. (2015). Recursive differentiation method: application to the analysis of beams on two parameter foundations. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 53.
- 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.
- Horvath, J. S., & Colasanti, R. J. (2011). Practical subgrade model for improved soil-structure interaction analysis: Model development. *International Journal of Geomechanics*, 11(1), 59-64.
- Limkatanyu, S., Kuntiyawichai, K., Spacone, E., & Kwon, M. (2012). Natural stiffness matrix for beams on Winkler foundation: exact force-based derivation. *Structural Engineering and Mechanics*, 42(1), 39-53.
- Ma, J., Liu, F., Nie, M., & Wang, J. (2018). Nonlinear free vibration of a beam on Winkler foundation with consideration of soil mass motion of finite depth. *Nonlinear Dynamics*, 92(2), 429-441.
- 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).

- Obara, P. (2014). Vibrations and stability of Bernoulli-Euler and Timoshenko beams on two-parameter elastic foundation. *Archives of Civil Engineering*, 60(4).
- Onu, G. (2000). Shear effect in beam finite element on two-parameter elastic foundation. *Journal of Structural Engineering*, 126(9), 1104-1107.
- Palacio-Betancur, A., & Aristizabal-Ochoa, J. D. (2019). Statics, stability and vibration of non-prismatic linear beam-columns with semirigid connections on elastic foundation. *Engineering Structures*, 181, 89-94.
- Pandey, G., Patel, D., Mourya, V.K., Kumar, R. and Kumar, S. (2023). A Review on Soil-Foundation-Interaction Models. *Journal of Rehabilitation in Civil Engineering*, 11(3), 158-179.
- Pasternak, P. L. (1954). On a new method of an elastic foundation by means of two foundation constants. *Gosudarstvennoe Izdatelstvo Literaturi po Stroitelstve i Arkhitekture*.
- PEER 2012, *PEER Ground Motion Database*, Pacific Earthquake Engineering Research Centre, University of California, Berkeley, CA.
- Raychowdhury, P. (2011). Seismic response of low-rise steel moment-resisting frame (SMRF) buildings incorporating nonlinear soil-structure interaction (SSI). *Engineering Structures*, 33(3), 958-967.
- Tabatabaiefar, S.H.R. (2012). *Determining seismic response of mid-rise building frames considering dynamic soil-structure interaction* (Doctoral dissertation).
- Tahghighi, H. and Rabiee, M., (2015). "Nonlinear Soil-Structure Interaction Effects on Building Frames: A Discussion on the Seismic Codes". *Journal of Seismology and Earthquake Engineering*, 17(2), 141-151.
- Teodoru, I. B., & Muşat, V. (2010). The modified Vlasov foundation model: an attractive approach for beams resting on elastic supports. *EJGE*, 15, 1-13.
- Vicencio, F., Alexander, N.A. and Málaga-Chuquitaype, C. (2024). Seismic Structure-Soil-Structure Interaction between inelastic structures. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*.
- Vlasov, V. Z. and U. N. Leontiev (1966). Beams, plates and shells on elastic foundations. *Israel Program for Scientific Translations, Jerusalem*.
- Wani, F.M., Vemuri, J. and Rajaram, C. (2022). Effect of soil structure interaction on the dynamic response of reinforced concrete structures. *Natural Hazards Research*, 2(4), 304-315.
- Widad, B., Salah, K., & Souad, B. (2021). Soil non-homogeneity and soil-structure interaction effects on beam vibrations. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Structures and Buildings*, 174(3), 215-224.
- 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.* H. Dominicus.
- Yosef, T.Y., Faller, R.K., Fang, C. and Kim, S. (2024). A State-of-the-Art Review on Computational Modeling of Dynamic Soil-Structure Interaction in Crash Test Simulations. *Geotechnics*, 4(1), 127-157.

Zhu, B. and Leung, A.Y.T. (2009). Linear and nonlinear vibration of non-uniform beams on two-parameter foundations using p-elements. *Computers and Geotechnics*, 36(5), 743-750.