

# Effect of soil-structure interaction and flexibility of base on reduction of shear base by BNWF method

Iman Hakamian

M.Sc., School of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

\*Corresponding author's email address:

imanhakamian@alumni.iust.ac.ir

## How to cite this article:

Iman Hakamian, Effect of soil-structure interaction and flexibility of base on reduction of shear base by BNWF method, *Journal of Engineering and Construction Management (JECM)*, 2024; 9(1):61-65.

# تأثیر اندرکنش خاک - سازه و انعطاف پذیری بستر بر کاهش برش پایه به روش BNWF

ایمان حکمیان

کارشناس ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۲/۰۳، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۶/۲۶

## ارجاع به مقاله:

ایمان حکمیان، تأثیر اندرکنش خاک - سازه و انعطاف پذیری بستر بر کاهش برش پایه به روش BNWF، مهندسی و مدیریت ساخت، ۱۴۰۳، ۹ (۱): ۶۱-۶۵

## Abstract

The effects of Soil-Structure Interaction and base flexibility on reduction of base shear has been investigated using BNWF method in this article. Investigating the effects of soil-structure interaction on the seismic behavior of the structure is depended on the soil stiffness, foundation and structure rigidity in a way that increasing or decreasing any of them will affect the base shear directly. The effects of fixed or flexible soil and foundation in changing the base shear has been investigated in this article separately. In this article three concrete moment resisting frames 7,10 and 15 story with 22.2m, 31.8m and 41.8m are investigate that their bay is 5.5m in all of cases. In these models, first the main period, then shear base are calculated. Considering to the period of the structures, the shear base decrease in every model. But the rates of reduction are different. With increases of base flexibility the rate of reduction of shear base increased. To model the flexible foundation, Beam Nonlinear Winkler Foundation (BNWF) method is used. In this method, linear inelastic springs were used in vertical and horizontal directions. In addition, inelastic base with sliding allowed is used to increase the flexibility effect of foundation and to maximize the soil-structure interaction effect.

## Keywords

Soil-structure interaction, flexible foundation, winkler beam

## چکیده

چکیده- در این مقاله تأثیر اندرکنش خاک- سازه و انعطاف پذیری بستر در میزان کاهش ضریب پایه به روش BNWF بررسی شده است. بررسی تأثیر اندرکنش خاک- سازه بر رفتار لرزه‌ای سازه، به سختی خاک، پی و سازه بستگی دارد. به نحوی که افزایش و کاهش هر یک در مقدار برش پایه مستقیماً تأثیرگذار خواهد بود. بنابراین در این مقاله تأثیر گیردار و انعطاف پذیر بودن پی و خاک به طور جداگانه بر تغییر مقدار برش پایه بررسی شده است. برای این منظور سه ساختمان بتنی قاب خمشی متوسط با تعداد طبقات ۷ و ۱۰ و ۱۵ مورد بررسی قرار گرفته است که به ترتیب دارای ارتفاع ۲۲ متر، ۳۱/۸ متر و ۴۱/۸ متر و دهانه ۵/۵ متر می‌باشند. بعد از محاسبه زمان تناوب برای هر یک از سازه‌ها، ضریب برش پایه محاسبه شده است. با توجه به زمان تناوب‌های به دست آمده در سازه‌های مورد مطالعه، در همه موارد کاهش مقدار برش پایه اتفاق افتاد. اما مقدار کاهش در حالت‌های مختلف بستر متفاوت بوده است. به نحوی که با افزایش انعطاف پذیری بستر که ناشی از نرمی پی و خاک زیر آن است، مقدار کاهش برش پایه افزایش داشته است. در این تحقیق برای مدلسازی پی انعطاف پذیر از روش تیر وینکلر استفاده شده است. در این مدل از یک شبکه از فنرهای غیرالاستیک غیرخطی در هر دو جهت قائم و افقی استفاده شده است. همچنین از بستر غیرالاستیک با جابجایی آزاد استفاده شده است تا هم تأثیر انعطاف پذیری پی مشاهده شود و هم تأثیر اندرکنش خاک- سازه حداکثر شود.

## کلمات کلیدی

اندرکنش خاک - سازه، پی انعطاف پذیر، تیر وینکلر

آمدن تغییر شکل در آن‌ها می‌شود. حتی وجود یک سازه نحوه ارتعاش زمین اطراف خود را نسبت به حالتی که سازه‌ای وجود ندارد، تغییر می‌دهد [۲]. بنابراین با در نظر گرفتن خاک زیر پی پاسخ سازه به زلزله نیز تغییر خواهد کرد. لذا با توجه به این موضوع، باید سازه، پی و خاک را به عنوان یک سیستم واحد در نظر گرفت که ویژگی‌های یکدیگر را تحت تأثیر گذاشته و روی هم اثر متقابل دارند. در علم مهندسی زلزله به این برهم کنش بین خاک و سازه، اندرکنش خاک- سازه می‌گویند. این شاخه از مهندسی تفاوت بین پاسخ واقعی و

## ۱- مقدمه

در طراحی و مدلسازی فونداسیون در حالت عادی فرض می‌کنیم که تکیه‌گاه سازه گیردار است، بدین معنی که از انعطاف پذیری پی و خاک زیر آن صرف نظر شده است. در این صورت نیروهای وارد بر سازه در تکیه‌گاه آن تغییر شکل و دوران به وجود نمی‌آورند و ویژگی‌های خاک بر سازه تأثیری نمی‌گذارد [۱]. اما بارهای انتقال یافته از سازه به بستر، بر پی و خاک زیر و اطراف آن اثر می‌گذارد و باعث به وجود



9 (1) , 2024

دوره ۹، شماره ۱

تابستان ۱۴۰۳

دوفصلنامه پژوهشی



تئوری سازه را نشان می‌دهد و سعی می‌کند تأثیر عوامل بالا را به‌طور همزمان در تحلیل و طراحی لحاظ کند [۳].

اثرات پدیده اندرکنش خاک-سازه به دو قسمت اندرکنش اینرسی و اندرکنش سینماتیکی تقسیم می‌شود. اندرکنش اینرسی به جابجایی و دوران سطح پی یک سازه اشاره دارد که ناشی از نیروهای اینرسی مانند برش پایه و ممان است. اندرکنش اینرسی عامل مهمی در انعطاف‌پذیری و مستهلک شدن انرژی در سیستم خاک-سازه است [۳]. در واقع در حالت دینامیکی، به دلیل نیروهای اینرسی وارد بر سازه و ارتعاش سازه در هنگام زلزله، نیروهای متفاوتی نسبت به حالت استاتیکی در پایه سازه به‌وجود می‌آید. وجود این نیروها باعث می‌شود تا در پی و خاک زیر آن جابجایی و دوران ایجاد شود که می‌تواند روی رفتار کل سیستم خاک-پی-سازه تأثیر گذارد، به این پدیده اصطلاحاً اندرکنش اینرسی می‌گویند. اندرکنش اینرسی باعث تغییر پارامترهای دینامیکی از قبیل زمان تناوب و میرایی مؤثر سیستم می‌شود [۲]. اندرکنش سینماتیکی به دلیل حضور پی سخت روی خاک یا درون آن رخ می‌دهد که موجب می‌شود حرکات پی متفاوت از حالت حرکت زمین آزاد باشد. به عبارت دیگر به دلیل سختی زیاد پی در مقایسه با خاک زیر آن، شالوده قادر نخواهد بود تا با خاک زیر خود به‌صورت هماهنگ حرکت کند. لذا به تغییرات تحریک اعمالی به پایه‌ی سازه، اصطلاحاً اندرکنش سینماتیکی می‌گویند. در این مقاله صرفاً اثر اندرکنش اینرسی مدنظر قرار گرفته است [۲، ۳].

نتایج بررسی آیین‌نامه‌ها نشان می‌دهد که توزیع نیرو در ارتفاع در این آیین‌نامه‌ها در سیستم قاب خمشی منظم بسیار به هم شباهت دارد [۴]. این شباهت به این دلیل است که همه آیین‌نامه‌ها زمان تناوب غالب سازه (مود اول) را ملاک عمل قرار داده‌اند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که توزیع برش در طبقات بر اساس تحلیل‌های دینامیکی انجام شده متفاوت از توزیع پیشنهاد شده در آیین‌نامه UBC97 و IBC2006 است. این اختلاف توزیع برش در طبقات میانی بیشتر مشاهده می‌شود [۵].

نتایج بررسی تأثیر اندرکنش خاک-سازه در پاسخ لرزه‌ای سازه‌های قاب خمشی نشان می‌دهد که مقدار برش پایه و جابجایی نسبی درون طبقه در سازه با تکیه‌گاه گیردار و انعطاف‌پذیر بر روی ۳ نوع خاک متفاوت مقایسه شده است. نسبت برش پایه بستر انعطاف‌پذیر به برش پایه تکیه‌گاه گیردار کوچک‌تر از یک به دست آمده است که با نتایج آیین‌نامه NEHRP سازگار است [۶].

بررسی پاسخ دینامیکی ۱۰ سازه بتنی با سیستم قاب خمشی و دیوار برشی در دو تیپ خاک متفاوت با در نظر گرفتن اندرکنش خاک-سازه نشان می‌دهد که پارامترهای مورد بررسی در این مقاله حداکثر برش پایه، جابجایی نسبی طبقات و دوران مفصل‌های پلاستیک است. یکی از نتایج، کاهش برش پایه با در نظر گرفتن اندرکنش نسبت به بستر صلب است [۷].

مطابق روابط ارائه شده در آیین‌نامه ASCE-07 برای در نظر گرفتن اندرکنش خاک-سازه، مقدار تأثیر این پدیده در کاهش برش پایه به ۳۰ درصد محدود شده است، اما این موضوع به این معنی نیست که تأثیر اندرکنش خاک-سازه در واقع کمتر از این مقدار است، لذا برای بررسی بیشتر، سه سازه قاب خمشی بتنی متوسط ۷ و ۱۰ و ۱۵ طبقه با المان‌های خطی و غیرخطی بر روی بستر گیردار و

انعطاف‌پذیر مورد مطالعه قرار گرفته‌اند تا میزان تأثیر اندرکنش خاک-سازه به‌دست آید.

در ویرایش چهارم آیین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله، موضوع اندرکنش خاک-سازه مطابق با ASCE-07 مطرح شده است. در این آیین‌نامه‌ها برای ساده‌سازی تحلیل و طراحی روابطی ارائه شده است که در شرایط خاصی می‌توان از آن‌ها استفاده کرد. یکی از این شرایط این است که روش ارائه شده زمانی می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد که در هنگام مدلسازی و تحلیل سازه از فرض تکیه‌گاه ثابت استفاده شده باشد. به عبارت دیگر چنانچه در مدلسازی سازه اثر انعطاف‌پذیری پی لحاظ شده باشد، استفاده از روابط این آیین‌نامه‌ها مجاز نیست [۸]. در این‌جا به‌منظور بررسی مستقیم اثر اندرکنش خاک-سازه از پی انعطاف‌پذیر در مدلسازی استفاده شده است، که در ادامه توضیح داده خواهد شد.

## ۲- مدل‌سازی

### ۲-۱- مدل سازه

در این مقاله سه قاب خمشی بتنی متوسط سه دهانه ۷ و ۱۰ و ۱۵ طبقه با المان‌های خطی و غیرخطی مورد بررسی قرار گرفته است. ارتفاع طبقه اول در هر سازه ۳ متر و طبقات بالاتر ۳/۲ متر است. فاصله دهانه‌ها برابر ۵،۵ متر است. هر سازه به‌طور جداگانه بر روی تکیه‌گاه ثابت، خاک انعطاف‌پذیر و پی صلب، خاک و پی انعطاف‌پذیر قرار گرفته است تا تأثیر سختی و انعطاف‌پذیری سازه و بستر بهتر مشاهده شود.

### ۲-۲- مشخصات مصالح

برای ستون‌ها و تیرها و پی در سازه خطی، از بتن و فولاد با مشخصات زیر استفاده شده است.

جدول ۱ مشخصات بتن

مدول الاستیسیته	$E = 2.5 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$
مقاومت مشخصه	$f_c = 300 \text{ kg/cm}^2$
ضریب پواسن	$\nu = 0.2$

جدول ۲ مشخصات فولاد ST37

مدول الاستیسیته	$E = 2 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$
تنش تسلیم	$F_y = 4000 \text{ kg/cm}^2$
ضریب پواسن	$\nu = 0.3$

در سازه با المان‌های غیرخطی از مشخصات مصالح به‌صورت غیرخطی بهره گرفته شده است. در نرم افزار opensees از مصالح concrete01 و steel01 برای بتن و فولاد استفاده شده است. مشخصات رفتاری این مصالح در شکل (۱) آمده است.



9 (1), 2024

دوره ۹، شماره ۱

تابستان ۱۴۰۳

دوفصلنامه پژوهشی



۱۳ و ۱۱ و ۱۰	۴۰×۴۰	۱۶ ϕ ۱۸mm	۳۰×۴۵
۱۵ و ۱۴ و ۱۳	۳۵×۳۵	۱۶ ϕ ۱۶mm	۳۰×۴۰

#### ۲-۴- مشخصات خاک و پی

در این مطالعه، بمنظور ارزیابی تأثیر سختی خاک زیر شالوده بر پرامترهای لرزه‌ای سازه، از خاک رس استفاده شده است. مقادیر مربوط به پارامترهای طراحی خاک در جدول (۶) آورده شده است.

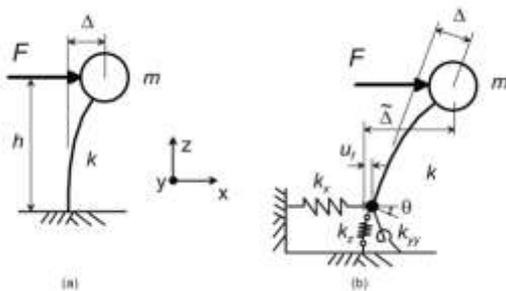
جدول ۶ مشخصات خاک مورد استفاده

نوع خاک	رس
طبقه‌بندی خاک	نوع ۳
چسبندگی (c)	۷۰۰ Kg/cm <sup>2</sup>
زاویه اصطکاک داخلی (φ)	۰
وزن مخصوص (γ)	۱۶۰۰ Kg/m <sup>3</sup>
مدول برشی (G)	۲×۱۰ <sup>۷</sup> Kg/cm <sup>2</sup>
نسبت میرایی (ζ)	۰/۰۵

#### ۲-۳ رفتار سیستم خاک-سازه

وقتی صحبت از تکیه‌گاه گیردار می‌شود یعنی خاک و پی که در زیر سازه قرار دارد سختی بی‌نهایت داشته باشند. تکیه‌گاه گیردار برای یک سازه ترکیب همزمان هردو این مورد است یعنی پی صلب روی خاک قرار بگیرد. درمقابل پایه انعطاف‌پذیر حاصل قرار گرفتن پی منعطف روی خاک نرم است.

شکل ۳ (الف) یک سازه یک درجه آزادی را با سختی K و جرم M نشان می‌دهد که بر روی پایه‌ی گیردار قرار گرفته است. با اضافه کردن فنرهای قائم، افقی و چرخشی در پایه سازه می‌توان اثر انعطاف‌پذیری را نیز لحاظ کرد. فنر قائم در راستای Z با Kz، فنر افقی در راستای X با Kx، و فنر پیچشی با Kyy دوران حول محور y-y در شکل ۳ (ب) نشان داده شده است.

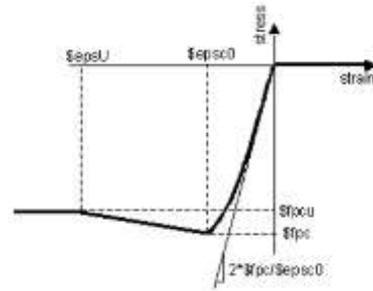


شکل ۳ مدلسازی شماتیک سازه

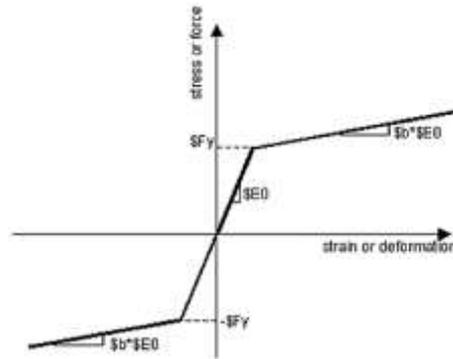
(الف) سازه با تکیه‌گاه گیردار (ب) سازه با تکیه‌گاه انعطاف‌پذیر

#### ۴- مدل پی انعطاف‌پذیر

مدلسازی یک پی انعطاف‌پذیر باید حرکت افقی و قائم و همچنین دوران آن مدنظر قرار گیرد اما مدل کردن پاسخ راکینک، لغزشی و نشست یک پی سطحی کار پیچیده و زمان‌بری است. برای مدلسازی این نوع پی از مدل تیر وینکلر استفاده شده است که به اختصار BNWF نامیده می‌شود [۹]. در این روش از یک المان تیر-ستون برای مدلسازی رفتار پی استفاده شده است و برای در نظر گرفتن تأثیر خاک از فنر استفاده شده است. این روش برای تحلیل‌های دوبعدی



شکل ۱ منحنی تنش-کرنش concrete01



شکل ۲ منحنی تنش-کرنش steel01

المان‌های تیر و ستون و دیوار استفاده شده در نرم‌افزار از نوع المان برمبنای جابجایی و با پلاستیسیته گسترده همراه با شش نقطه انتگرال‌گیری بر اساس قانون گوس-لوباتو مدل شده‌اند. تیرهای موجود در ناحیه‌ای که داخل دیوار برشی محسوب می‌شود به صورت المان‌های صلب در نظر گرفته شده‌اند و تغییر مکان و دوران آن‌ها کاملاً مقید به تغییر مکان و دوران گره‌های متناظر در المان دیوار می‌باشد که در شکل ۱ نشان داده شده‌اند.

#### ۲-۳ مشخصات المان‌های سازه‌ای

ابعاد تیر و ستون‌های سازه‌های مورد مطالعه، مطابق جدول (۳) و (۴) و (۵) است.

جدول ۳ ابعاد تیر و ستون سازه ۷ طبقه

طبقات	ابعاد ستون (cm <sup>2</sup> )	آرما تورها	ابعاد تیر (cm <sup>2</sup> )
۱ و ۲	۵۵×۵۵	۲۴ ϕ ۱۶mm	۴۰×۵۵
۳ و ۴ و ۵	۵۰×۵۰	۲۲ ϕ ۱۶mm	۳۰×۵۰
۶ و ۷	۴۰×۴۰	۱۸ ϕ ۱۶mm	۲۵×۴۰

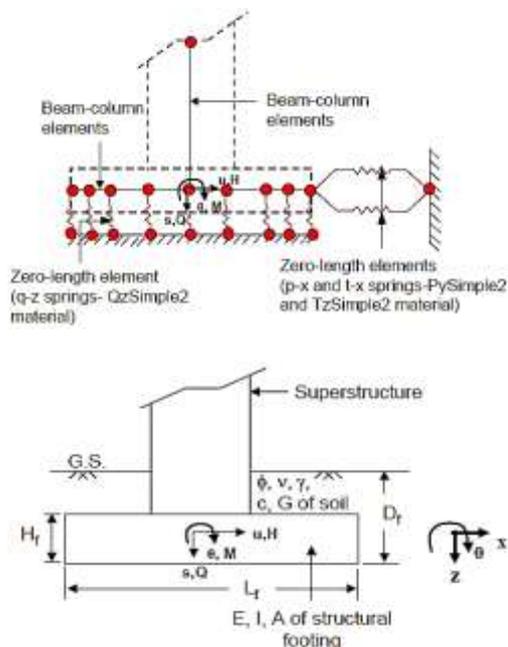
جدول ۴ ابعاد تیر و ستون سازه ۱۰ طبقه

طبقات	ابعاد ستون (cm <sup>2</sup> )	آرما تورها	ابعاد تیر (cm <sup>2</sup> )
۱ و ۲ و ۳	۶۰×۶۰	۲۶ ϕ ۱۶mm	۴۰×۶۰
۴ و ۵ و ۶ و ۷	۵۰×۵۰	۲۲ ϕ ۱۶mm	۳۵×۵۰
۸ و ۹ و ۱۰	۴۰×۴۰	۱۸ ϕ ۱۶mm	۳۰×۴۰

جدول ۵ ابعاد تیر و ستون سازه ۱۵ طبقه

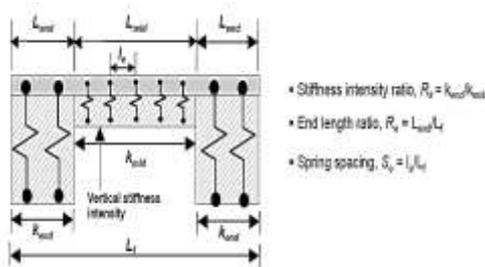
طبقات	ابعاد ستون (cm <sup>2</sup> )	آرما تورها	ابعاد تیر (cm <sup>2</sup> )
۱ و ۲ و ۳	۶۰×۶۰	۱۶ ϕ ۲۶mm	۴۰×۶۰
۴ و ۵ و ۶	۵۵×۵۵	۱۶ ϕ ۲۴mm	۳۵×۵۵
۷ و ۸ و ۹	۴۵×۴۵	۱۶ ϕ ۲۰mm	۳۰×۵۰

کاربرد دارد. بنابراین سه درجه آزادی حرکت افقی و قائم و حرکت دورانی لحاظ می‌شود که برای شبیه سازی رفتار پی دوعبدهی مناسب می باشد [۱۰]. شکل شماتیک تیر وینکلر در شکل های (۴) نشان داده شده است.



شکل ۴ شکل شماتیک تیر وینکلر

سختی قائم و جانبی و همین طور سختی دورانی پی با احتساب تغییرات جابجایی های فنرهای عمودی محاسبه می‌شود. آیین نامه ATC-40 پیشنهاد می‌دهد که در نواحی انتهایی پی فنرهای با سختی بیشتر قرار گیرد. تا عکس العمل های وارد شده در انتهای پی بیشتر باشند تا موجب به بوجود آمدن حرکت گهواره‌ای پی زیر بارهای جانبی شود. مطابق شکل (۶) ناحیه انتهایی Lend به عنوان طولی از قسمت لبه پی که عکس العمل بیشتری دارد، تعریف شده است. مطابق آیین نامه ATC-40 این ناحیه به طول B/6 از هر انتهای پی ادامه یابد [۳].



شکل ۶ جانمایی فنرهای تیر وینکلر برای پی انعطاف پذیر

##### ۵- نتایج تغییر برش پایه

برای محاسبه مقدار برش پایه از روابط استاندارد ۲۸۰۰ (ویرایش چهارم) استفاده شده است، که نیاز است ابتدا مقدار زمان تناوب و دیگر پارامترهای مورد نیاز مانند نسبت شتاب مبنای طرح، ضریب بازتاب ساختمان، ضریب اهمیت و ضریب رفتار سازه محاسبه شود. از

آنجا که در استاندارد ۲۸۰۰ ذکر شده است که روابط موجود مختص سازه با تکیه‌گاه گیردار است و در این مقاله از پی انعطاف پذیر استفاده شده است، مقایسه بین تکیه‌گاه گیردار و انعطاف پذیر به کمک روابط مربوط به تحلیل استاتیکی معادل انجام شده است. از آنجا که مقادیر مربوط به مقدار برش پایه با ضریب زلزله (C) نسبت مستقیم دارد برای مقایسه نتایج از ضریب زلزله استفاده شده است. نتایج حاصل از بررسی سازه‌ها با فرض  $A=0/35$  و  $I=1$  و  $R=5$  در جدول ۷ الی ۱۲ آمده است.

جدول ۷ سازه ۷ طبقه با المان خطی

نوع سازه	ضریب زلزله	درصد کاهش نسبت به تکیه‌گاه گیردار
تکیه‌گاه گیردار	۰/۱۰۵۰۷	۰
پی صلب- خاک انعطاف پذیر	۰/۰۸۴۷۷	۱۹/۳
پی انعطاف پذیر- خاک انعطاف پذیر	۰/۰۵۹۹۹	۴۲/۹

جدول ۸ سازه ۷ طبقه با المان غیرخطی

نوع سازه	ضریب زلزله	درصد کاهش نسبت به تکیه‌گاه گیردار
تکیه‌گاه گیردار	۰/۱۱۱۸۶	۰
پی صلب- خاک انعطاف پذیر	۰/۰۸۶۳۴	۲۲/۹
پی انعطاف پذیر- خاک انعطاف پذیر	۰/۰۶۰۵۲	۴۵/۹

جدول ۹ سازه ۱۰ طبقه با المان خطی

نوع سازه	ضریب زلزله	درصد کاهش نسبت به تکیه‌گاه گیردار
تکیه‌گاه گیردار	۰/۰۸۱۲	۰
پی صلب- خاک انعطاف پذیر	۰/۰۶۹۳۷	۱۴/۵
پی انعطاف پذیر- خاک انعطاف پذیر	۰/۰۵۴۶	۳۲/۷

جدول ۱۰ سازه ۱۰ طبقه با المان غیرخطی

نوع سازه	ضریب زلزله	درصد کاهش نسبت به تکیه‌گاه گیردار
تکیه‌گاه گیردار	۰/۰۸۴۴۹	۰
پی صلب- خاک انعطاف پذیر	۰/۰۶۸۵۳	۱۸/۹
پی انعطاف پذیر- خاک انعطاف پذیر	۰/۰۵۳۷۴	۳۶/۴

جدول ۱۱ سازه ۱۵ طبقه با المان خطی

نوع سازه	ضریب زلزله	درصد کاهش نسبت به تکیه‌گاه گیردار
تکیه‌گاه گیردار	۰/۰۵۶۹۱	۰
پی صلب- خاک انعطاف پذیر	۰/۰۵۲۴۳	۷/۹
پی انعطاف پذیر- خاک انعطاف پذیر	۰/۰۴۶۴۱	۱۸/۵

جدول ۱۲ سازه ۱۵ طبقه با المان غیرخطی

نوع سازه	ضریب زلزله	درصد کاهش نسبت به تکیه‌گاه گیردار
تکیه‌گاه گیردار	۰/۰۵۷۹۶	۰
پی صلب- خاک انعطاف پذیر	۰/۰۵۱۵۲	۱۱/۱
پی انعطاف پذیر- خاک انعطاف پذیر	۰/۰۴۵۱۵	۲۲/۱



## ۶- نتیجه‌گیری

- این مقاله به بررسی تأثیر اندرکنش خاک-سازه بر پارامترهای لرزه‌ای ساختمان‌های چند طبقه قاب خمشی بتنی متوسط واقع بر شالوده سطحی انعطاف پذیر پرداخته است. نتایج حاکی از افزایش دوره تناوب طبیعی سیستم نسبت به حالت تکیه‌گاه گیردار می‌باشد که منجر به کاهش ضریب زلزله و در نتیجه کاهش برش پایه می‌شود. این تغییرات در همه مدل‌ها دیده می‌شود. با توجه به نتایج ارائه شده در جداول می‌توان این‌گونه نتیجه‌گیری نمود که:
۱. با افزایش نسبت سختی سازه به خاک میزان کاهش برش پایه افزایش می‌یابد. به‌گونه‌ای که در سازه با پی صلب و خاک انعطاف‌پذیر شاهد کاهش برش پایه نسبت به تکیه‌گاه گیردار هستیم اما این کاهش در سازه با پی و خاک انعطاف‌پذیر که نشان‌دهنده انعطاف‌پذیری کامل تکیه‌گاه می‌باشد، بیشتر است. در واقع با افزایش نرمی خاک و پی، تأثیر اندرکنش خاک - سازه بیشتر می‌شود.
  ۲. در سازه با طبقات مختلف میزان کاهش برش پایه در تکیه‌گاه انعطاف‌پذیر متفاوت است. به‌نحوی که نرخ کاهش برش پایه با افزایش ارتفاع کاهش می‌یابد. همان‌طور که نتایج نشان می‌دهد، در سازه ۱۵ طبقه کمترین میزان کاهش و در سازه ۷ طبقه بیشترین میزان کاهش به‌دست آمده است.
  ۳. در مقایسه کاهش برش پایه در سازه با المان خطی و غیرخطی، این نتیجه حاصل شده که سازه با المان غیرخطی به دلیل افزایش نسبت سختی سازه به خاک نسبت به المان خطی، کاهش بیشتری در برش پایه را تجربه کرده است.

## ۷- تعارض منافع

نویسندگان هیچ گونه تضاد منافی ندارند.

## ۸- حمایت مالی

این تحقیق از هیچ‌گونه حمایت مالی‌ای برخوردار نبوده است.

## ۹- مراجع

- [1] M. Mehrpoor and M. M. Memarpour, "Study of the Heterogeneous Bed Soil: Effect of Bed Soil Stiffness on the Seismic Capacity," Available at SSRN 4522737.
- [2] M. Mahsuli and M. Ghannad, "The effect of foundation embedment on inelastic behavior of structures," in 9th Canadian Conference on Earthquake Engineering, Ottawa, Ontario, Canada, 2007, pp. 26-29.
- [3] I. S. Safety, "NEHRP recommended provisions for seismic regulations for new buildings and other structures (FEMA 450)," Building Seismic Safety Council, National Institute of Building Sciences: Washington, DC, USA, 2004.
- [4] M. Shayanfar, M.M. Memarpour, M.A. Barkhordari, I. Hakamian, " Comparison of static and dynamic analysis in earthquake lateral force distribution in reinforced concrete structures considering soil-structure interaction," presented at the second

## COPYRIGHTS

©2024 by the authors. Published by **Journal of Engineering & Construction Management (JECM)**. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



9 (1), 2024

دوره ۹، شماره ۱

تابستان ۱۴۰۳

دوفصلنامه پژوهشی

