مجله علمی – پژوهشی مهندسی عمران مدرس دوره ۲۳، شماره ۴، سال ۱۴۰۲ صفحات ۳۵ تا ۵۲



ارزیابی عملکرد لرزهای سازه-شالوده- ستون دانهای متراکم با در نظر گرفتن اثر اندرکنش روی خاک قابل روانگرا

على عسگرى*' ، بيتا صاحبيان'، محمد كاظمى

۱. استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی و فناوری، دانشگاه مازندران ۲. دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران، دانشکده مهندسی و فناوری، دانشگاه مازندران ۳. کارشناس ارشد مهندسی عمران، دانشکده مهندسی و فناوری، دانشگاه مازندران

a.asgari@umz.ac.ir

تاریخ پذیرش ۱٤۰۱/۱۲/۱۰

تاریخ دریافت ۱٤۰۰/۰۹/۲۳

چکىدە

از جمله مسائل مهم در احداث سازههای واقع در نواحی ساحلی لرزهخیز، ارزیابی پتانسیل پدیده روانگرایی در خاکهای زیرین سازه و اثر اندرکنش بین سازه-شالوده و خاک است. پدیده روانگرایی در اثر وقوع زلزله و به دلیل نداشتن فرصت کافی برای زهکشی اضافه فشار آب حفرهای رخ میدهد. یکی از روش های موثر برای کنترل کردن پدیده روانگرایی، استفاده از ستونهای دانهای متراکم در ابعاد و فواصل مناسب میباشد. عملکرد این ستونها در کنترل پدیده روانگرایی به دو صورت است: اول از مصالحی ساخته شده که نفوذپذیری بیشتری نسبت به خاک محيط اطراف خود دارد و باعث میشود اضافه فشار آب حفرهای سريعتر زايل شود و دوم اينکه، سختی سيستم را افزايش میدهد که متناسب با آن به دلیل افزایش رفتار اتساعی، از ایجاد اضافه فشار آب حفرهای جلوگیری میکند. در این پژوهش برای ارزیابی لرزهای تاثیر ستونهای دانهای متراکم بر روی پاسخهای سازه با لحاظ کردن اثر اندرکنش بین آنها به کمک نرمافزار اجزای محدود OpenSeesSP به صورت سهبعدی مدلسازی شده است. برای پیشربینی پاسخهای دقیقتر، مدل ساختاری گروه ستونهای دانهای متراکم و خاک، از نوع دراکر-پراگر چند سطحی درنظر گرفته شد که توانایی درنظر گرفتن رفتارهای انقباضی و انبساطی خاک تحت تنشرهای برشی سیکلی در خاکهای دانهای را داراست. برای ارزیابی اثر سازه، سازههای فولادی پنج، ده و ۱۵ طبقه با رفتار خطی مدلسازی شده است. تمام مدلها تحت زلزله السنترو قرار داده شد و اثر سازه روی جابهجایی جانبی، نشست، اضافه فشار آب حفرهای، طیف شتاب، دریفت و برش طبقات مورد بررسی قرار می گیرد. نتایج این پژوهش نشان دهنده تاثیر مثبت ستونهای دانهای متراکم بر کاهش مولفههای جابهجایی جانبی خاک و سازه، نشست شالوده و اضافه فشار آب حفرهای میباشد. همچنین وجود سازه روی خاک و افزایش طبقات آن، موجب افزایش مولفههای ذکر شده به غیر از جابهجایی جانبی خاک شده است. در نظر گرفتن آثار اندرکنش اگر چه باعث افزایش جابهجاییهای افقی مطلق طبقات خواهد شد اما در سازههای کوتاهتر باعث کاهش برش پایه طبقات و همچنین کاهش دریفت خمشی طبقات خواهد شد و در مقابل، در طبقات فوقانی سازههای بلندتر ممکن است گاهی باعث افزایش برشها نیز شود که نیاز تحلیل دینامیکی را ضروری میسازد.

واژگان کلیدی: روانگرایی، گروه ستونهای دانهای متراکم، اندرکنش ، سازه، مدلسازی سهبعدی.

۱ – مقدمه

یکی از مسائل مهم در طراحی سازههای واقع در نواحی ساحلي لرزهخيز (براي نمونه مناطق شمالي كشور ايران)، وجود مسأله روانگرایی ٔ در خاکهای ماسهای اشباع است. بسیاری از سازههای موجود یا سازههای در حال ساخت در نواحی ساحلی روی خاکهای مستعد روانگرایی واقع شدهاند و به همین دلیل در معرض خرابیهای شدید قرار دارند. پدیده روانگرایی در نتیجه وقوع زلزله و بهدلیل نداشتن فرصت کافی برای زهکششدن آب حفرهای رخ میدهد. کنترل این پدیده به دليل احداث سازههاي مهم در نواحي ساحلي بسيار حائز اهمیت می باشد. به دلیل اینکه معمولا لایه های خاک ساحلی از نوع ماسهای و یا ماسه سیلتی بوده و از رسوبات دریا یا از لایروبی مصالح و رسوبات کف دریا برای به دست آوردن زمین ایجاد شده، سن بسیار کمی دارند، در نتیجه از نظر میزان تراکم چندان سخت و متراکم نیستند و مستعد روانگرایی هستند؛ بنابراین، پرداختن به عواقب این پدیده و نیروهایی که در اثر وقوع روانگرایی به سازههای ساخته شده روی آن وارد می شود دارای اهمیت زیادی است. مشاهده تخریب و شکست پیهای عمیق و در پیامد آن تخریب سازههای واقع روی این پیها در اثر روانگرایی و گسترش جانبی در زلزلههای گذشته مانند السنترو'، نيگاتا"، لوماپريتا' و كوبه [4-1] لزوم شناخت كامل آثار این پدیده را روی پیهای عمیق آشکار ساخته است. روشهای زیادی برای کنترل وقوع روانگرایی وجود دارد که یکی از روشهای کارا استفاده از ستونهای دانهای متراکم^۲ در ابعاد و فواصل مناسب مىباشد. مطالعات پاسخ لرزهاى ستونهای متراکم در خاک روانگرا و به ویژه هنگام پدیده گسترش جانبی و همچنین بهسازی خاک، یکی از موضوعات اصلی پژوهش در مهندسی ژئوتکنیک لرزمای به شمار میرود. با توجه به روش های متعدد اصلاح خاک، تنها چندین

1 Liquefaction

4 Loma-Prieta 1989

37

6 Dense Granular Columns (DGCs)

روش را می توان به عنوان بهترین و اقتصادی ترین طرح انتخاب کرد. برخی محدودیتهای اقتصادی محیطی سبب می شود که برخی از روشهای تراکم و تثبیت مناسب نباشند؛ در این شرایط استفاده از المانهای ستونی به عنوان جایگزینی مناسب برای بیشتر مواقع قابل استفاده است. با توجه به اینکه ستونهای دانهای متراکم مانند یک المان سخت عمل میکنند، مقدار تنش بیشتری را تحمل میکنند و از طرفی به صورت یک مانع در مقابل جابه جایی خاک می باشند، در نتیجه آسیب های وارد شده در اثر گسترش جانبی را کاهش میدهند[5]. یژوهشهای متعددی در مورد اثربخشی ستونهای متراکم در طول حوادث لرزه ای با استفاده از آزمایشهای میدانی در مقیاس بزرگ، آزمایشهای سانتریفیوژ و میزلرزان و مدلسازی های عددی انجام شده است که می توان به مراجع [22-6] اشاره کرد.

سید و بوکر [23] در سال ۱۹۷۷ اولین کسانی بودند که اثرستون های سنگی را در از بین بردن فشار آب مازاد حفرهای را بررسی کردند. از جمله کارهای آزمایشگاهی میتوان به آزمایش،های میزلرزان ساساکی و تانیگوچی[24] روی زهکشهای شنی در جلوگیری و کنترل روانگرایی لایههای ماسهای اشاره کرد. نتایج آزمایش های آنها نشان داد که نرخ افزایش فشار آب حفرهای طی تحریک در نزدیکی زهکش شنی کوچکتر میشود و فشار آب حفرهای بعد از پایان زلزله در صورت وجود زهکش شنی به سرعت از بین میرود.

برنان و مادابوشی[25] مدلهای سانتریفیوژی از گروه ستونهای سنگی در لایههای روانگرا را مورد مطالعه قرار دادند و نتیجه را با نتایج حاصل از تحلیل عددی به روش تفاضلات محدود مورد مقایسه قرار دادند. نتایج پژوهش ایشان حاکی از آن است که اضافه فشار آب حفرهای در داخل گروه زهکشها كمتر از اضافه فشار در خارج از گروه می باشد. همچنين مشاهده کردند نقاطی که در عمق قرار دارند، در ابتدا زهکشی میشوند و نقاط نزدیک سطح در مرحله بعدی زهکشی مى شوند.

ژو و همکاران[18] با سه آزمایش مدل سانتریفیوژ، شامل یک مدل با ماسه سست، یک مدل با ماسه متراکم و یک مدل با

DOI: 10.22034/23.4.35]

Downloaded from mcej.modares.ac.ir on 2024-05-13

² El Centro 1940 3 Niigata 1964

⁵ Kobe 1995

ماسه متراکم و ستونهای سنگی برای بررسی تأثیر تراکم و زهکشی ناشی از ستونهای سنگی بر پاسخهای لرزهای ماسه سیلتی، از جمله اضافه فشار آب حفرهای، شتاب و نشست زمین و غیره را انجام دادند. نتایج نشان داد که متراکم کردن خاک باعث افزایش ظرفیت برشی در مقابل گسیختگی خاک اطراف شده و مانع ایجاد اضافه فشار آب حفرهای در حین زلزله میشود؛ بنابراین به طور قابل توجهی پتانسیل روانگرایی و نشست پس از زلزله نیز کاهش پیدا میکند. تاثیر زهکشی در یک زمین با ستونهای سنگی عمدتا پس از تکان قوی اتفاق میافتد و سرعت اتلاف را پنج تا ده برابر خاک بدون ستونسنگی افزایش میدهد، که تا حدی به بازگرداندن سریع

برای کاهش خطرهای ناشی از روانگرایی خاک در سازه، نیاز به فهم کامل پیامدهای آن می باشد. این پیامدها به جابه جایی های دائم خاک، عملکرد سازه، مشخصات سازه، ابعاد شالوده و سازه، شرایط خاک محل سازه، نوع بارگذاری و شدت زلزله بستگی دارد. حضور سازه می تواند بر شدت روانگرایی و تنش های استاتیکی و دینامیکی خاک تأثیر می گذارد.

در بیشتر پژوهشها، وجود سازه را نادیده درنظر گرفتند و یا اثر سازه روی خاک را به صورت یک بار یا جرم معادل فرض کردند. عسگری و همکاران [26] با انجام مجموعههایی از تحلیلهای سه بعدی المان محدود، اثربخشی گروه نامحدود ستونهای سنگی و شمعها را در خاک ماسهای قابل روانگرا مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج پژوهش آنها نشان داد که افزایش تعداد طبقات تاحدودی باعث افزایش جابهجایی افقی خاک در زمینهای شیبدار می شود و در سازههای سنگین ترممکن است نتیجه معکوس داشته باشد. لازم به ذکر است که اثر سازه در آن پژوهش به صورت یک جرم متمرکز لحاظ شده است.

در برخی دیگر از پژوهش ها، نیز سازه روی شالوده به صورت معادل در نظر گرفته شده است [27] اگرچه این روش ها می توانند نشست و جابه جایی خاک را تخمین بزنند اما قادر به شناسایی تخریب های موضعی سازه ناشی از روانگرایی نیستند [28]. به عبارت دیگر، در این نوع مدل ها پاسخ اجزای

سازهای را نمی توان به صورت دقیق ارزیابی کرد؛ بنابراین برای بررسی دقیق تأثیر روانگرایی نیاز به روش و مدلی است که بتواند خاک، شالوده و سازه را به صورت کامل در نظر بگیرد تا با استفاده از آن بتوان میزان نشست، جابهجایی های افقی و نیروهای داخلی اجزای سازه را به درستی تعیین کرد.

با توجه به اینکه در پژوهشهای گذشته مدل کامل خاک قابل روانگرا-ستون دانهای متراکم-سازه به صورت عددی مورد بررسی قرار نگرفته است، پس در این پژوهش به عنوان نوآوری، آثار لرزهای اندرکنش خاک-ستون دانهای متراکم-سازه به صورت عددی مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است.

۲-جزئیات مدلسازی

در این پژوهش از برنامه المان محدود اپنسیس (OpenSees) [29, 00] برای مدلسازی سیستم سازهای و ژئوتکنیکی استفاده شده است، که توسط اعضای مؤسسه پییر ۲ توسعه داده شده است. این برنامه دارای المانهای متعدد دو بعدی و سهبعدی برای آنالیزهای دینامیکی همبسته محیط متخلخل اشباع و انواع مدل رفتاری برای المانهای سازهای و ژئوتکنیکی است. در این مطالعه با توجه به حجیم بودن و زمانبر بودن تحلیل از برنامه اجزای محدود اپنسیس اسپی(OpenSeesSP)[00] استفاده شده است. این برنامه به دلیل قابلیت محاسبات موازی و استفاده از الگوریتمهای پیشرفته برای برنامه نویسی و همچنین وجود روشهای تحلیل میعدد باعث همگرایی بهتر و کاهش چشمگیر زمان تحلیل میشود. لازم به ذکر است تمام تحلیلها در مرکز محاسبات

1-1-مدلرفتاری خاک و ستون دانهای متراکم

در روش های عددی، رفتار مصالح با استفاده از مدل های رفتاری بر حسب تنش-کرنش مشخص می شوند؛ به گونه ای که مدل های رفتاری هسته اصلی روش های عددی را تشکیل می دهند. انتخاب مدل رفتاری مناسب برای خاک از اهمیت زیادی بر خور دار است و مدل هایی که مشخصه های بیشتری از

Downloaded from mcej.modares.ac.ir on 2024-05-13]

⁷ PEER 8 High Performance Computing (HPC) Center

تغییرات فشار آب حفرهای و تغییر شکل انتقالی گرهها را در سه جهت دارند. به دلیل متقارن بودن مدل برای کاهش زمان تحلیل فقط نصف مدل شبیهسازی شده است[9, 34, 35]. شکل (۱) نمونهای از مدل ساخته شده خاک، ستون متراکم، شالوده و سازه را در این پژوهش نشان میدهد.

Parameter	Medium Sand	DGSc
	$D_r \approx 40\%$	
$_{ ho}$, Mass Density (Mg/m ³)	1.96	2.06
G _{max} (MPa)	46.2	101.9
φ , Friction angle (deg)	32	40
$\varphi_{_{PT}}$, Phase-transformation	30	26.5
angle(deg)		
c ₁ , Contraction parameter1	0.067	0.016
c ₃ , Contraction parameter3	0.27	0.14
d ₁ , Dilation parameter1	0.02	0.25
d ₃ , Dilation parameter3	0	0
<i>k</i> permeability coefficient (m/s)	1×10^{-5}	0.1

جدول ۱. مشخصات خاک و ستون متراکم استفاده شده در این پژوهش[۲۸]

 Table. 1. Soil specifications used in this research

۳-۲-مدلسازی شالوده و سازه

برای مدلسازی شالوده از المانهای حجمی StdBrick با هر گره دارای سه درجه آزادی انتقالی استفاده شده است. رفتار مصالح در تمام طول آنالیز به صورت الاستیک خطی(مطابق با مشخصات آورده شده در جدول (۲) می باشد. شالوده دارای طول و عرض ۱۷×۱۷ متر مربع و ضخامت ۱ متر است، که در عمق مدفون یک متری احداث شده است. گرههای شالوده در تراز پایین آن در تمامی جهتها (x,y,z) به گرههای مانند خاک بسته شدهاند. سازه پنج، ده و ۱۵ طبقه مورد مطالعه از نوع قاب خمشی فولادی متوسط است، که ابتدا به صورت سهبعدی توسط نرمافزار ETABS16.2.1 و بر اساس آييننامه AISC360-10 طراحی شده و سپس برای انجام تحلیل و در نظر گرفتن اندرکنش بین خاک-شالوده-سازه در نرمافزار اپنسیس مدلسازی شده است. برای مدلسازی تیرها و ستون های سازه از المان های elasticBeamColumn، استفاده شده است که هر گره در این نوع المان دارای 7 درجه آزادی (سه درجه آزادی انتقالی و سه درجه آزادی دورانی) است. ارزیابی عملکرد لرزهای سازه-شالوده- ستون دانهای متراکم با در ...

خاک را در بر دارند معمولاً قادر به پیش بینی نتایج دقیق تر در مدلسازی عددی هستند. مدل رفتاری در نظر گرفته شده در این پژوهش برای خاک و ستون دانهای متراکم از نوع مدل دراکر-پراگر چند سطحی [31, 32] است که بر پایه کارهای انجام شده توسط پريوست ([33] مى باشد. در اين مدل ساختاری از یک رویکرد چند سطحی برای شبیهسازی رفتار سیکلی و رفت و برگشتی خاک استفاده شده است. مؤلفههای اصلى اين مدل رفتارى شامل: تابع تسليم، قانون سخت شوندگی و قانون جریان میباشد. تابع تسلیم این مدل مبتنی بر يلاستيسيتهى كلاسيك است، كه در حالت الاستيك رفتار خاك را به صورت خطی و ایزوتروپ و در حالت غیرالاستیک به صورت غیرخطی و غیر ایزوتروپ در نظر می گیرد. این مدل رفتاری می تواند آثار رفتار انقباضی و انبساطی را تحت تنش برشی سیکلی در نظر بگیرد و به صورت PressureDependMultiYield02 در اینسیس تعریف شده است. برای اطلاعات بیشتر می توان به مراجع [29, 31, 23] رجوع شود.

۲-۲-مدلسازی خاک و ستون متراکم

در این پژوهش لایه خاک روانگرا به ضخامت ۱۰ متر در بالای سنگبستر مدلسازی شده است. سطح آب در تراز سطح زمین قرار دارد. برای کاهش آثار مرزی روی پاسخهای مدل، ابعاد طولی و عرضی خاک 70×97 متر مربع در نظر گرفته شد. برای کنترل روانگرایی در مدل شبیهسازی شده از ستونهای دانهای متراکم(DGCs) با ارتفاع ۹ تا ۱۰ متر، قطر یک متر و فاصله مرکز تا مرکز ۲/۵ متر استفاده شده است. مشخصات فیزیکی و مکانیکی به همراه ضرایب نفوذپذیری خاک و ستون متراکم در جدول (۱) ارائه شده است. برای مدلسازی لایههای خاک، از المانهای آجری هشت تا بیست گرهای(BrickUP)، با هر گره دارای چهار درجه آزادی (سه درجه آزادی مربوط به تغییر مکان و یک درجه آزادی مربوط به فشار آب حفرهای)

⁹ Prevost



Fig. 1. The 15-storey structure model made in this research

جدول ۳. مشخصات تیر ورقهای سازهها(mm)

Section	t _w	h ₁	\mathbf{h}_2	t ₂	t _f
name					
PLG.1	8	395	375	150	10
PLG.2	8	399	375	200	12
PLG.3	8	405	375	200	15
PLG.4	8	415	375	200	20
PLG.5	10	415	375	250	20

Table. 3. Beam sheets specifications of structures (mm) برای ایجاد اتصال صلب بین سازه و شالوده از المانهای Rigid link با سختی زیاد (۱۰۰۰۰ برابر سختی ستونهای سازه) استفاده شده است. در شکل (۱) جزئیات اتصالات ستون روی شالوده نشان داده شده است.در مرحله بارگذاری در نرمافزار اپنسیس بارهای مرده و زنده به صورت گسترده طولی و سطحی مطابق با مقادیر اشاره شده در جدول (۵) روی تیرها اختصاص داده شدهاند. جرم مدل نیز به تمام المانها لحاظ شده است. لازم به ذکر است که نرم افزار اپنسیس غیرگرافیکی بوده و قابلیت مشربندی محیط خاک را ندارد، پس در این پژوهش از نرمافزار جی آی دی۱۰ [36] که یک نرمافزار گرافیکی میرباشد برای مش بندی محیط خاک و سازه استفاده شده است. شکل (۱) نشان دهنده شکل مقاطع تیر ورق بکارگرفته شده در سازهها و جداول (۳ و ٤) به ترتیب نشان دهنده مشخصات تیر ورقها و ابعاد ستونها و تیرها مورد استفاده در این پژوهش میباشند. سازهها دارای قاب ۳ دهانهی مساوی با ارتفاع طبقات ۳ متری و دارای طول و عرض ۱۵×۱۵ متر میباشند. تمام اتصالات تیر به ستون و ستونهای طبقهی همکف به شالوده از نوع اتصال صلب میباشند.

Variable	Symbol	Amount
Steel		
Mass Density (Mg/m ³)	$ ho_{_{s}}$	7.85
Modulus of elasticity(kPa)	E_s	2×10 ⁸
Poisson's ratio	Vs	0.3
Concrete		
Mass Density (Mg/m ³)	ρ_{c}	2.4
Modulus of Elasticity(kPa)	E_c	2.×10 ⁷
Poisson's ratio	V _c	0.2

جدول ۲. مشخصات مکانیکی فولاد (تیرها و ستونها) و شالوده بتنی

 Table. 2. Specifications of steel (beams and columns) and concrete foundation

[Downloaded from mcej.modares.ac.ir on 2024-05-13

¹⁰ GiD

Storeys	5 St	oreys	10 Storeys		15	Storeys
	Beam	Column	Beam	Column	Beam	Column
1	PLG.2	Box40x1.2	PLG.4	Box45x1.5	PLG.5	Box50x2
2	PLG.2	Box40x1.2	PLG.4	Box45x1.5	PLG.5	Box50x2.5
3	PLG.2	Box35x1	PLG.4	Box45x1.5	PLG.5	Box50x2
4	PLG.1	Box35x1	PLG.4	Box45x1.5	PLG.5	Box50x2
5	PLG.1	Box35x1	PLG.4	Box40x1.2	PLG.5	Box50x2
6	-	-	PLG.4	Box40x1.2	PLG.5	Box45x1.5
7	-	-	PLG.3	Box40x1.2	PLG.5	Box45x1.5
8	-	-	PLG.3	Box40x1.2	PLG.5	Box45x1.5
9	-		PLG.3	Box35x1	PLG.5	Box40x1.2
10			PLG.3	Box35x1	PLG.5	Box40x1.2
11					PLG.3	Box40x1.2
12					PLG.3	Box40x1.2
13					PLG.3	Box35x1
14					PLG.3	Box35x1
15					PLG.3	Box35x1

ستو ن	9	تىر	مقاطع	اىعاد	ى ٤.	جدول
- 2	~	J	(•		••••

Table. 4. Dimensions of beams and columns sections

است. این شتاب نگاشتها در کف مدل و در جهت طولی اعمال شده است. علت انتخاب این شتاب نگاشت، وقوع پدیده روانگرایی به صورت گسترده و جابهجاییهای جانبی بزرگ در اثر وقوع این زلزله میباشد. در جدول(٦) و شکل(٢) به ترتیب ویژگیها و تاریخچه زمانی این شتاب نگاشت نمایش داده شده است.

ىتترو[٢٦]	لزله الس	ئىخصات ز	جدول ٦. مث
-----------	----------	----------	------------

Earthquake motion parameters	El Centro
	(USA)/N-S
Date of occurrence	18/05/1940
Recording station	117 El Centro
Moment magnitude, M_{w}	7.1
Maximum horizontal acceleration, (g)	0.314
Predominant period, T_{p} (sec)	0.5
Significant duration, D_{5-95} (sec)	23.84
PGV/PGA (sec)	
Arias intensity for scaled PGA=0.25	1.11
g (m/sec)	

Table. 6. El Centro earthquake characterization[26]





Load Type	Value	Unit
Dead Load	0.57	ton/m ²
Live Load	0.2	ton/m ²
Partition Load	0.15	ton/m ²
Roof Load	0.13	ton/m ²
Roof Dead Load	0.65	ton/m ²
Roof Live Load	0.15	ton/m ²
Liner Load External	0.8	ton/m
Walls		
Liner Load Of	0.25	ton/m
Shelter		
Wide Effective	0.075	ton/m ²
Seismic Load		
Liner Effective	0.4	ton/m
Seismic Load		

جدول ٥. بارهاى اعمال شده به سازه

Table. 5. Applied loads on the structure

٤-۲-شرایط مرزی خاک و شتاب ورودی

شرایط مرزی که برای مدلسازی خاک در نظر گرفته شده است، به صورت مرز برشی است. برای این منظور، تغییر مکانهای افقی و قائم نقاط مرز جانبی که دارای ارتفاع یکسان میباشند، با هم برابر در نظر گرفته شدهاند [9]. نقاط مربوط به کف مدل در خاک نیز بدون جابه جایی در نظر گرفته شد. مرز بالایی خاک نفوذپذیر و مرزهای جانبی و کف مدل، به صورت مرز نفوذناپذیر تعریف شدند.

در این پژوهش برای تحلیل تاریخچه زمانی از شتاب نگاشت مقیاس شده زلزله السنترو با مدت زمان ۳۱/۱۹ ثانیه و بیشترین دامنه ۰/۲۵g به عنوان تحریک ورودی استفاده شده

0-۲-مدلسازی میرایی

در این مطالعه از دو میرایی هیسترزیس و رایلی استفاده شده است. میرایی هیسترزیس با توجه به پاسخ سیکلی سیستم در مدل رفتاری دراکر-پراگر چند صفحهای به طور خودکار توسط کد متن باز اپنسیساس پی محاسبه و اعمال می شود. علاوه بر میرایی هیسترزیس یک میرایی رایلی با توجه به رابطهی (۱) به منظور کاهش نویزهای بالقوه اضافی برای تمامی مدلها در نظر گرفته شده است [34]:

$$\begin{bmatrix} C \end{bmatrix} = \alpha_{m} \begin{bmatrix} M \end{bmatrix} + \alpha_{k} \begin{bmatrix} K \end{bmatrix}, \qquad (1)$$

$$\alpha_{\rm m} = \frac{\zeta}{\omega_1 + \omega_2} \zeta, \ \alpha_{\rm k} = \frac{\zeta}{\omega_1 + \omega_2} \zeta$$
c, $\alpha_{\rm k} = \frac{\zeta}{\omega_1 + \omega_2} \zeta$

[K] ماتریس سختی، $\alpha_{k} = \alpha_{m} + \alpha_{k}$ به ترتیب ضرایب ماتریس جرم و سختی میباشند. همچنین ضریب میرایی (ک) سیستم پنج درصد در نظر گرفته شده است. α_{k} در این پژوهش برای همه مدلها برابر با ۲۰۰۳ در نظر گرفته شده است.

۲-۲-روش تحلیل

برای تحلیل مدلها، چهار مرحله در نظر گرفته شده است. در مرحله اول المانهای خاک و زهکشهای قائم با رفتار الاستیک تحت تحلیل وزنی قرار می گیرند تا شرایط طبیعی زمین به وجود آید. در مرحله دوم رفتار مصالح خاکی از حالت الاستيك به حالت الاستوپلاستيك تبديل مي شود تا امكان بررسی شرایط پلاستیک در روانگرایی به وجود آید. در مرحلهی سوم شالوده و سازه روی خاک تعریف میشوند و با اعمال بار سازه، آنالیز استاتیکی انجام می شود تا توزیع تنش و تغيير مكان در خاك در حالت وجود سازه و شالوده تعيين شود و به عنوان شرایط اولیه برای آنالیز دینامیکی آماده شود. نتایج آنالیز استاتیکی مدل های این پژوهش در جدول (۷) آورده شده است. نتایج تحلیل استاتیکی غیرخطی نشان میدهد که با افزایش تعداد طبقات نشست شالوده نیز افزایش مییابد و DGCs باعث کاهش نشست است. در مرحله آخر کل مجموعه خاک و سازه تحت بار دینامیکی قرار میگیرند. برای تحلیل معادلات حرکت در این گام از روش نیومارک استفاده شده است. پارامترهای نیومارک تأثیر زیادی روی پایداری و

کاهش نوسانات نتایج دارند، در این پژوهش همواره از پارامترهای نیومارک ۲۰۲۵- $\beta \in \Gamma$ ستفاده شده است تا پایداری تحلیل با هر گام زمانی حتی بزرگ تضمین شود. در ادامه، برای بررسی روانگرایی خاک در اثر افزایش اضافه فشار آب حفرهای از ضریب r استفاده شده است. این ضریب از تقسیم اضافه فشار آب حفرهای (Δu) به تنش مؤثر (σ) بدست می آید (رابطهی ۲). روانگرایی خاک و همچنین شدت آن با توجه به نزدیک بودن ضریب r به عدد یک، تعیین می شود، یعنی؛ هر چقدر اضافه فشار آب حفرهای از تنش مؤثر بزرگتر باشد، شدت روانگرایی بیشتر است.

 $r_u = \frac{\Delta u}{\sigma'} \tag{(Y)}$

جدول ۷. نشست سطح خاک ناشی از بارگذاری در مراحل مختلف تحلیل استاتیکی(mm)

Run step	Number	With	Without
	of stories	DGSc	DGSc
Run 1		1.58	1.77
Run 2		1.88	2.07
	5	6.52	7.06
Run 3	10	9.44	10.33
	15	12.66	19.87

Table. 7. Settlement of surface soil induced by loading in different stages of static analysis

۳-راستی آزمایی خاک و ستون دانهای متراکم
۱-۳- راستی آزمایی خاک و ستون دانهای متراکم از برای راستی آزمایی خاک و ستونهای دانهای متراکم از شبیه سازی های انجام شده در پژوهش لو و همکاران [35] استفاده شده است. خاک توسط المان آجری شکل ۸ و یا ۲۰ گرهای، با مصالح PressureDependMultiYield02 اینسیس شبیه سازی شده است. نوع خاک، ماسه نوادا با تراکم نسبی ۱۰ شبیه سازی شده است. نوع خاک، ماسه نوادا با تراکم نسبی درصد و با ضریب نفوذپذیری 5m/s m/s ماسه نوادا با تراکم نسبی درصد و با ضریب نفوذپذیری ۳/s m/s ماسی مرزی تکرار شونده مدل سازی در نظر گرفته شده است. شرایط مرزی تکرار شونده مدل سازی در نظر گرفته شده است. شرایط مرزی تکرار شونده است. برای کاهش زمان محاسبات و به دلیل تقارن، فقط نیمی از مدل شبیه سازی شده است (شکل ۳). زلزله (1987)

از مدل در مرجع [35] آورده شده است. نتایج بدست آمده برای تاریخچه زمانی جابهجایی جانبی و بیشینه جابهجایی جانبی در شکل (٤) نشان داده شده است. نتایج نشان میدهد که همخوانی مناسب با نتایج پژوهش لو و همکاران [35] دارد.

```
شکل ۳. شماتیک پلان و نمای سه بعدی مدل خاک و ستونسنگی از
یژوهش لو و همکاران[۳۵]
```



Fig. 3. Schematic plan and 3D views of SCs and soil model of Lu et.al research [35]

شکل ٤. مقایسه تاریخچه جابهجایی جانبی و بیشینه جابهجایی جانبی مدل خاک و ستونسنگی ایمن مطالعه با پژوهش لو و همکاران[۳۵]



Fig. 4. Comparison of the lateral displacement history and maximum lateral displacement of soil the obtained from the numerical simulation and Lu et al research.[35]

۲-۳- راستی آزمایی سازه

تمامی مدلهای سازه در این پژوهش با پایه صلب، با نرمافزار Etabs ورژن ۱۹٫۲٫۱[37] و با استفاده از آئیننامه AISC360-10 [38] مدلسازی و طراحی شد. نتایج حاصل از تحلیل سازه در نرمافزارهای OpenSees و Etabs با یکدیگر مقایسه شده است. به طور نمونه، نتایج دریفت و بیشینه برش طبقات سازه حاصل از تحلیل یک سازه پنج طبقه فولادی توسط نرمافزار ایتبس و نرمافزار اپنسیس در شکل (۵) نشان داده شده است که هم خوانی قابل قبولی دارد.

شکل ۵. مقایسه نتایج دریفت و بیشینه برش طبقات سازه پنج طبقه حاصل از نرم افزارهای OpenSees و Etabs



Fig. 5. Comparison of drift and total maximum levelling shear force of 5-storey structure from OpenSees and Etabs softwares

٤-بحث و نتایج در این پژوهش انواع مدلسازی به شرح زیر است: ۱- سازههای پنج، ده و۱۵ طبقه واقع بر خاک بهسازی شده با ستون دانهای متراکم ۷×۷ ۲– سازههای پنج، ده و ۱۵ طبقه واقع بر خاک قابل روانگرا بدون بهسازی ۳– سازههای پنج، ده و ۱۵ طبقه با شرایط تکیهگاهی گیردار ٤– ستون دانهای متراکم ۷×۷ در خاک قابل روانگرا بدون سازه ٥– خاک با قابلیت روانگرایی (محیط آزاد)

در مدلسازی های فوق به بررسی اثر وجود طبقات سازه در حالت اندرکنشی و آثار ستون دانه ای متراکم روی مولفه های جابه جایی جانبی خاک، نشست شالوده، دریفت طبقات، طیف پاسخ شتاب، اضافه فشار آب حفره ای و برش کل طبقات سازه پرداخته شد.

۱-٤-جابهجایی ۱-۱-٤-جابهجایی جانبی خاک

شکل (٦)، نمودار تاریخچه زمانی جابهجایی جانبی سطح خاک بهسازی شده در مرکز مدل، برای مدلهای بدون سازه و مدلهای دارای سازهی پنج، ده و ۱۵ طبقه را تحت زلزله السنترو نشان مىدهد. مقدار جابهجايي جانبي در مدل بدون سازه بیشتر از مدلهای با سازه است و در مدلهای با سازه، مقدار جابهجایی جانبی با افزایش تعداد طبقات تا ده طبقه، کاهش یافته و سپس از ده به ۱۵ طبقه کمی افزایش می یابد. توجیه اینکه، دو مکانیسم برای جابهجاییها وجود دارد: اول اینکه، با افزایش تعداد طبقات و وزن سازه، نیروی اینرسی افقی ناشی از زلزله، افزایش پیدا کرده است و انتظار میرود با افزایش نیروی اینرسی، جابهجایی افقی زیاد شود. دوم اینکه، با افزایش تعداد طبقات تنش مؤثر در خاک زیرسازه افزایش مییابد و به تناسب آن موجب افزایش اصطکاک تماسی و مقاومت برشی خاک و همچنین باعث افزایش رفتار اتساعی خاک میشود و مانع افزایش جابهجایی افقی خواهد شد. در تقابل این دو سازوکار ممکن است آثار یکی بر دیگری غالب شود. بنابراین با این توضیح، میتوان گفت که در سازههای بلندتر آثار اينرسي نسبت به افزايش تنش موثر پررنگتر است. نکته قابل ذکر دیگر این است که آثار سنیماتیکی وابسته به نوع خاک(خاک قابل روانگرا و بهسازی شده) و سختی و پریود

سازه نیز موثر است، بنابراین به طور یقین نمیتوان گفت افزایش تعداد طبقات سازه باعث افزایش یا کاهش جابهجایی افقی خاک میشود. در پایان زلزله نیز مشاهده میشود که بیشترین جابهجایی ماندگار در خاک بدون سازه رخ داده است.

شکل ٦. تاریخچه جابهجایی جانبی سطح خاک دارای ستونهای متراکم ۷×۷ در مرکز مدلهای بدون سازه و با سازه پنج، ده و ۱۵ طبقه تحت زلزله السنترو 0.25g



Fig. 6. Lateral displacement time histories of soil surface in the center of various models (without structure and five, ten and 15-storey structures on the DGSc) subjected the 0.25g El-Centro earthquake

بیشینه جابهجایی جانبی خاک بهسازی شده در عمقهای مختلف در مدلهای بدون سازه و با سازه، در شکل (۷) در مرکز مدلهای ساخته شده و نقطه دور نشان داده شده است. نتایج نشان میدهد که جابهجایی جانبی مرکز خاک در زیر سازه نسبت به نقطه دور از سازههای پنج، ده و ۱۵ طبقه کمتر است، که نشان دهنده تاثیر مثبت تعداد طبقات و ستونهای متراکم بر جابهجایی جانبی خاک زیر سازه است.

در شکل (۸) مقدار جابهجایی جانبی سطح خاک در مدلهای با DGSc و بدون بهسازی که هر دو دارای سازههای پنج، ده و ۱۰ طبقه روی خاک هستند، مورد مقایسه قرار گرفته شده است. نمودار نشان دهنده آثار وجود DGSc درکاهش جابهجایی جانبی سطح خاک نسبت به مدلهای بدون بهسازی با حضور سازه است. ذکر این مطلب لازم است که با افزایش تعداد طبقات سازه از پنج به ده طبقه، اختلاف جابهجایی جانبی بین مدلهای با بهسازی و مدلهای بدون بهسازی بیشتر شده است.

۲-۱-۲-غانشست شالوده

مقایسه بیشینه نشست شالوده در مدلهای پنج، ده و ۱۵ طبقه روی ستونهای دانهای متراکم و بدون بهسازی در شکل (٩) نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود با افزایش تعداد طبقات سازه، میزان نشستها افزایش پیدا کرده است. برای نمونه با افزایش تعداد طبقات از پنج به ده، و از پنج به ۱۵ میزان نشستها برای حالت با ستون متراکم به ترتیب ۱/۲۸ و ۱/٤٦ برابر و برای حالت بدون ستون متراکم به ترتيب ۱/۲۰ و ۱/۸۵ برابر شده است. علت این تغییرات، ناشی از افزایش وزن سازه در اثر افزایش تعداد طبقات سازه می باشد. هنگامی که تعداد طبقات سازه افزایش می یابد وزن سازه نیز بیشتر می شود. افزایش وزن سازه باعث افزایش فشار تماسی و تنشهای قائم اعمالی به خاک شده در نتیجه کرنشهای حجمی و نشست در زیر شالوده افزایش می یابند. همچنین شکل (۹) نشاندهنده تاثیر مثبت ستونهای دانهای متراکم با توجه به سختی و نفوذیذیری بالا، در کاهش مقدار نشست شالوده، در هنگام زلزله می باشند. در این پژوهش، میزان اثر بخشی در سازه ١٥ طبقه از بقيه سازهها بيشتر است. علت اين اتفاق را مي توان ناشی از افزایش تنش مؤثر در مرکز لایه روانگرا در نتیجه کاهش یتانسیل روانگرایی خاک دانست که در ادامه به آن یرداخته می شود. میزان اضافه فشار آب حفرهای تولید شده در مرکز لایه روانگرا برای تمامی مدلها در یک عمق ثابت تقریبا برابر است (شکل ۱۵). اما در اثر افزایش وزن در سازه ۱۵ طبقه، تنش مؤثر در مرکز لایه روانگرا افزایش یافته و پتانسیل روانگرایی را کاهش میدهد در نتیجه نرخ افزایش نشست نیز در زیر سازه ۱۵ طبقه کمتر شده است. در سازه ۱۰ طبقه نیز در اثر افزایش وزن سازه تنش مؤثر افزایش مییابد اما خاک در زیر سازه ۱۰ طبقه دارای پتانسیل روانگرایی بیشتری نسبت به سازه ۱۵ طبقه است و تنش های اعمالی از طرف سازه، میزان روانگرایی و نشست را تشدید میکند. بنابراین، این نکته قابل ذکر است که میزان اثر بخشی ستونهای دانهای متراکم برای سازههای کوتاه و بلند (پنج و ۱۵ طبقه) به نسبت سازههای متوسط (ده طبقه) بیشتر است. میزان این اثر بخشی(درصد کاهش در میزان نشست) برای سازه پنج، ده و ۱۵ طبقه به شکل ۷. بیشینه جابهجایی جانبی خاک دارای ستونهای دانهای متراکم ۷×۷ در مرکز و دور از مرکز مدلهای بدون سازه و مدلهای با سازه پنج تا ۱۵ طبقه تحت زلزله السنترو 0.25g



Fig. 7. Maximum lateral displacement of soil with 5×5 DGCs in the center and far from the center of without and with 5-15-storey structures subjected to the 0.25g El-Centro earthquake

شکل ۸ بیشینه جابهجایی جانبی سطح خاک در مرکز مدل.های بدون سازه با سازه پنج ، ده و ۱۵طبقه دارای ستون.های دانهای متراکم ۷×۷ و بدون بهسازی تحت زلزله السنتر و 0.25g



Fig. 8. Maximum lateral displacement of the soil surface in the center of models without structure and with 5, 10 and 15-storey structures on the 7×7 DGCs and without DGCs under 0.25g El-Centro earthquake

٤٤

مجله علمي – پژوهشي مهندسي عمران مدرس

ترتيب برابر است با ٦٦/١٪، ٥٥/٢٪ و ١١٠/٧٪ است.

شکل ۹. نشست بیشینه شالوده در مدلهای با سازههای پنج، ده و ۱۵ طبقه برروی ستونهای دانهای متراکم ۷×۷ و بدون بهسازی تحت زلزله السنترو 0.25g



Fig. 9. Maximum settlement of the foundation in the models with 5, 10 and 15-storey structures on the 7×7 DGCs and without DGCs under El-Centro earthquake 0.25g

۳-۱-۲-جابهجایی سازه و دریفت طبقات

در این بخش، به مقایسه تغییرات جابهجایی افقی سازه و دریفت طبقات مدلهای پایه صلب ومدلهای اندرکنشی سازه-خاک با ستونهای دانهای متراکم، و بدون آن پرداخته می شود.

شکل (۱۰) نشان میدهد که در حالت کلی، با افزایش تعداد طبقات، جابهجایی جانبی بیشتری در سازه رخ میدهد. همچنین در سازه پایه صلب نرخ افزایش جابهجایی جانبی، با افزایش تعداد طبقات، بطور ناچیزی کاهش پیدا میکند. ولی در مدلهای اندرکنشی نرخ افزایش جابهجایی طبقات با تغییر در تعداد طبقات، هم کاهشی و هم افزایشی است. از طرفی دیگر، در مدلهای اندرکنشی، میزان جابهجایی جانبی طبقات نسبت به مدلهای پایه ثابت بیشتر است. وجود ستونهای دانهای متراکم، باعث کاهش جابهجایی جانبی سازه شده است، اما برای سازه ده طبقه اگرچه DGCs باعث کاهش جابهجایی در سطح شالوده شده است، ولی در طبقات فوقانی افزایش

شکلهای (۸ و ۹)، زمان بیشینه جابهجایی افقی در سطح شالوده با زمان بیشینه جابهجایی افقی سازه در طول زلزله متفاوت است.

دوره بیست و سوم / شماره ٤ / سال ۱٤٠٢

شکل ۱۰. بیشینه جابهجایی جانبی طبقات سازه در مدلهای با ستونهای دانهای متراکم، بدون بهسازی و پایه صلب برای سازههای پنج، ده و ۱۵ طبقه تحت زلزله السنترو 0.25g



Fig. 10. Maximum lateral displacement of the structural floors in the models with DGCs, without DGCs and fixed base for 5, 10 and 15-storey structures under El-Centro earthquake 0.25g

شکل (۱۱) نشان دهنده مقایسه دریفت طبقات سازه در مدلهای با DGCs، بدون آن و پای صلب برای سازههای پنج، ده و ۱۵ طبقه میباشد. نتایج نشان میدهد که مقدار دریفت کل در سازهها با پایه صلب به نسبت کمتر از مدلهای اندرکنشی است. دلیل این امر اثر دوران پای سازه^{۱۱}، در مدلهای اندرکنشی است. در واقع دریفت ایجاد شده در مدلهای اندرکنشی ترکیبی از دریفت خمشی و دورانی پای ستون است که قابل تجزیه هستند. در مدلهای اندرکنشی با افزایش سختی خاک دریفتهای سازه افزایش پیدا میکند و میتوان دلیل آن را در این دانست که مدل سخت تر تقاضای لرزهای بیشتر دارد بنابراین متحمل دریفت بیشتری خواهد شد. از طرفی هرچه

¹¹ Rocking

على عسگري و همكاران

با DGCs نسبت به بدون آن به هم نزدیکتر و حتی پیشی میگیرد. دلیل این امر پررنگتر شدن اثر دوران پای سازه، در سازههای بلندتر روی خاک نرمتر است.

نکته دیگر قابل مشاهده در این شکل این است که موقعیت طبقه که بیشینه دریفت را دارد در دو حالت اندرکنشی و پایه ثابت تقریبا بدون تغییر است.

شکل ۱۱. دریفت کل طبقات در سازه پنج، ده و ۱۵ طبقه در حالتهای مختلف: پایهی گیردار، دارای ستونهای دانهای متراکم ۷×۷ DGCs (شالوده عمیق) و و مدل بدون بهسازی (شالوده سطحی) تحت زلزله الستترو 0.25g



Fig. 11. Total drift of 5, 10 and 15-storey structures in various cases such as: fixed base, supported by 7×7 DGCs (deep foundation) and without DGCs (shallow foundation) under 0.25g El Centro earthquake

۲-٤-شتاب

در شکل (۱۲) تأثیر وجود ستونهای دانهای متراکم روی پاسخهای شتاب منتقل شده به سیستم خاک-سازه-شالوده نشان داده شده است.

شکل ۱۲. طیف پاسخ شتاب در سطوح مختلف از کف زمین در سازه پنج، ده و ۱۵ طبقه بر روی ستونهای دانهای متراکم ۷×۷ DGCs (شالوده عمیق) تحت زلزله السنترو 0.25g



Fig. 12. Acceleration response spectrum at different level from ground surface for 5, 10 and 15-storey structures on the 7×7 DGCs subjected by 0.25g El Centro earthquake

با توجه به نمودارها مشاهده می شود که با وجود ستونهای دانه ی متراکم پاسخهای شتاب منتقل شده با نزدیک شدن به سطح خاک و طبقات بالای سازه افزایش پیدا کرده است. افزایش سختی خاک با وجود DGCs موجب تقویت شتابهای منتقل شده از خاک به شالوده و سازه شده در نتیجه پاسخهای شتاب بزرگتری در سطح خاک خواهیم داشت. از طرفی با توجه به شکل (۱۲) با افزایش تعداد طبقات، طیف پاسخ شتاب در شالوده تغییرات زیادی نداشته است و تقریباً در تمامی مدلها مشابه می باشند. عدم تغییرات در طیفهای پاسخ در پای سازه نشان می دهد که شتابهای منتقل شده به پای

مجله علمي – پژوهشي مهندسي عمران مدرس

سازه تقریباً باهم برابر است، اما با افزایش تعداد طبقات و به تناسب آن افزایش پریود طبیعی سازه(به ترتیب برای سازه پنج، ده و ۱۵ طبقه برابر با ۱/۹۷، ۱/۳۵ و ۱/۹۹ است) و دور شدن آن از فرکانس غالب زلزله، طیف شتاب در بالای سازه افزایش کمتری نسبت به سازه های کو تاهتر از خود نشان داده است.

۲-٤-اضافه فشار آب حفرهای در خاک

شکل (۱۳) تغییرات ضریب اضافه فشار آب حفرهای خاک در مرکز مدل بهسازی شده با ستونهای متراکم ۷×۷ (جایی که ستون متراکم واقع شده است) و نقطهای دور از مرکز مدل(محیط آزاد) برحسب عمق های مختلف نشان داده شده است. همانطور که از این شکل مشاهده می شود، مقادیر ضریب اضافه فشار آب حفرهای در جایی که ستون دانهای واقع شده است بسیار کمتر از یک است در صورتی که در محیط آزاد نشان از وقوع روانگرایی دارد. همچنین این شکل نشان میدهد که بیشینه مقادیر ضریب اضافه فشار آب حفرهای در عمق ٤ متری رخ میدهد؛ بنابراین در ادامه، برای تجزیه و تحلیل نتایج اضافه فشار آب حفرهای از همین عمق رکوردگیری شده است.

شکل (۱٤) تاریخچه تغییرات اضافه فشار آب حفرهای خاک در مرکز مدل و در عمق ٤ متری بر حسب سازههای مختلف روی DGCs را نشان میدهد. مقدار فشار آب حفرهای در شروع زلزله با افزایش تعداد طبقات، افزایش می یابد و سیس پس از اتمام دوره قوی زلزله شروع به اتلاف شدن میکند. مطابق با این شکل می توان دریافت، اتلاف اضافه فشار آب حفرهای در سازههای سنگین تر، سریع تر رخ میدهد.

شکل (۱۵) بیشینه فشار آب حفرهای در مرکز سازههای مختلف و دور از آنها در عمق ٤ مترى در حالت بهسازى شده و نشده را نشان میدهد. در این شکل مشاهده می شود که وجود DGCsدر زیر سازه موجب زائل شدن اضافه فشار آب حفرهای با سرعت بیشتری نسبت به خاک اطراف سازه شده است. دلیل این رخداد نفوذپذیری بالای DGCs است. از طرفی به دلیل سختی بالاتر DGCs نسبت به خاک محیط اطراف، رفتار اتساعى از خود نشان مىدهد كه باعث ايجاد

مکش در DGCs می شود. به موجب رفتار اتساعی، در صورت ایجاد، هرگونه افزایش اضافه فشار آب ناشی از تنش سیکلی زلزله، ستون متراكم، رخداد وقوغ روانگرایی را کنترل می کند.

دوره بیست و سوم / شماره ٤ / سال ۱٤۰۲

شکل ۱۳. پروفیل ضریب اضافه فشار آب حفرهای خاک در مرکز و دور از مدل با ستونهای دانهای متراکم DGCs ۷×۷ (بدون سازه) تحت زلزله السنترو 0.25g



Fig. 13. Profile of excess pore pressure ratio in the center and far from of the 7×7 DGCs model (without structure) under El-Centro earthquake 0.25g

شکل ۱ ٤. تاریخچه اضافه فشار اب حفرهای خاک در عمق ٤ متری در
مرکز مدلها با سازههای پنچ تا ۱۵ طبقه و بدون سازه بر روی ستونهای
دانهای متراکم V×V DGCs تحت زلزله السنترو 0.25g



Fig. 14. Excess pore pressure history at the depth of 4m in the center and far from of the models with 5, 10 and 15-storey structures and without structure on the 7×7 DGCs under El-Centro earthquake 0.25g

همچنین از شکل (۱۵) مشاهده می شود که در تمام نقاط خاک دور از سازه، مقادیر ضریب اضافه فشار آب حفرهای بیشتر از یک و به دنبال آن پتانسیل روانگرایی بالاست. در نقاط

زیر سازه با افزایش تعداد طبقات مقادیر فشار آب حفرهای چه در حالت با DGCs و چه بدون آن، افزایش مییابد. نکته قابل ذکر دیگر این است که افزایش اضافه فشار آب حفرهای در نقاط زیر سازه سنگین تر دلیلی بر افزایش پتانسیل روانگرایی خاک نیست، زیرا با افزایش طبقات تنش اضافی موثر خاک نیز ابالا میرود و در نتیجه ممکن است باعث کاهش مقادیر ضریب اضافه فشار شود. مقدار ضریب اضافه فشار آب حفرهای، اضافه فشار شود. مقدار ضریب اضافه فشار آب حفرهای، محاسبه شده است. مورد دیگر اینکه، با مقایسه بین فشار آب در نقاط دور از سازه و مدل بدون سازه می توان دریافت که سازه موجب افزایش فشار آب در نقاط دورتر نیز خواهد شد.

شکل ۱۰. بیشینه فشار آب حفرهای در مرکز سازه مختلف و دور از آن در عمق ٤ متر در حالت بهسازی شده و نشده



Fig. 15. Maximum pore pressure at the depth of 4m in the center and far from of the improved/unimproved models with 5, 10 and 15-storey structures and without structure

٤-٤-تنش-كرنش

برای بررسی دقیق تر رفتار خاک در حین تغییر شکل های برشی، منحنی چرخهای تنش-کرنش برشی خاک در اعماق مختلف زمین برای حالت آزاد و حالت دارای VXV DGCs مورد مقایسه قرار گرفته شده است. نکات زیر با توجه به نتایج حاصل از شکل (۱٦) قابل برداشت می باشد:

۱-نمودارها نشان دهنده تحمل تنشهای برشی بیشتر توسط ستونهای دانهای متراکم میباشد و کرنشهای کمتری

با وجود ستون مشاهده می شود دلیل آن عدم روانگرا شدن در نواحی DGCs شکل (۱۳) و رفتار اتساعی آن است. ۲- ظرفیت تحمل تنش برشی خاک با افزایش در عمق خاک افزایش پیدا می کند. این موضوع نشان می دهد که فشار سربار موجب افزایش مقاومت برشی خاک می شود.

این نتایج با یافتههای مراجع[10, 11] هماهنگی دارد.

٥-٤-برش سازه در طبقات

شکل (۱۷) نشان دهنده مقایسه برش سازه در طبقات برای مدلهای با سازه پنج، ده و ۱۵طبقه میباشد. نتایج نشان میدهد که مقدار برش در سازههای کوتاه و پایه صلب به طور محسوسی بیشتر از مدلهای بدون بهسازی و دارای DGCs است. از طرفی وجود DGCs نیز بدلیل سختی بیشتر نسبت به مدلهای بدون بهسازی، موجب افزایش برش پایه میشود. به بیان دیگر افزایش سختی مدل باعث افزایش تقاضای لرزهای میشود. در سازههای بلندتر، در طبقات پایین تر همچنان، برش پایه در حالت سازه با پایههای صلب تقریبا بیشتر از مدلهای اندرکنشی است ولی در طبقات فوقانی، مقدار برش در مدلهای بهسازی شده بیشتر از بقیه مدلهاست.

٥-نتيجه گيري

وجود سازه روی خاک موجب کاهش جابهجایی
 جانبی خاک در هنگام وقوع زلزله شده و با افزایش تعداد
 طبقات سازه، مقدار جابهجایی جانبی خاک با توجه به
 سازوکار غالب اشاره شده، ممکن است کاهش یا افزایش
 یابد.

 نتایج نشان میدهد که بیشینه جابهجایی جانبی مرکز خاک در زیر سازه نسبت به نقطهی دور از سازههای پنج، ده و ۱۵ طبقه کمتر میباشد، که نشان دهنده تاثیر مستقیم تعداد طبقات و ستون متراکم بر جابهجایی جانبی خاک زیر سازه میباشد.



شکل۱۲. منحنی تنش -کرنش برشی و مسیر تنش برشی خاک در حالت آزاد و حالت ستونهای دانهای متراکم ۷×۷ بدون سازه در اعماق مختلف

Fig.16. Shear stress-strain and stress path at various depths for the free field and DGCs 7×7 without structure

 نتایج بدست آمده برای جابهجایی جانبی سطح خاک و نشست شالوده در مدلهای دارای DGCsو بدون آن دارای سازههای مشابه، نشان میدهد که وجود DGCs در تمام سازهها موجب کاهش میزان نشست شالوده شده است. افزایش سختی سیستم و عملکرد DGCs در کاهش فشار آب مازاد حفرهای به دلیل قدرت زهکشی بالای آن، که موجب کاهش آثار ناشی از روانگرایی خاک می شود، از جمله دلایل کاهش نشست شالوده می باشد.

 مقدار دریفت کل در سازه ها با پایه صلب نسبت به دریفت سازه ها روی DGCs و بدون بهسازی کمتر است؛ زیرا دریفت ایجاد شده در مدل های اندرکنشی ترکیبی از اندرکنشی با افزایش سختی خاک، دریفت های سازه افزایش پیدا میکند؛ بنابراین متحمل دریفت بیشتری خواهد شد. از طرفی هرچه تعداد طبقات افزایش پیدا میکند، دریفت طبقات در مدل ها با ستون های دانه ای متراکم نسبت به بدون بهسازی به هم نزدیکتر و حتی پیشی میگیرند. دلیل این امر پررنگتر شدن اثر دوران پای سازه، در سازه های بلندتر بر روی خاک نرمتر است.

شکل ۱۷. نیروی برش کلی در طبقات مختلف سازههای پنج، ده و ۱۵ طبقه دارای شرایط تکیهگاهی صلب، با ستونهای دانهای متراکم ۷×۷ و بدون بهسازي تحت زلزله السنترو با PGA= 0.25g 1000 2000 3000 1000 2000 3000 10 10 Storey 15 Storey 15 9 14 8 13 7 12 6 11 Number of storey Number of storey 10 9 8 7 6 0 5 5 5 Storey 4 4 3 3 2 2 1 0 0 1000 1000 2000 2000 3000 3000 Shear force(kN) Shear force(kN) → With DGCs → Fixed base → Without DGCs

Fig. 17. Total maximum shear forces the 5 and 10 store s structures with fixed base, 7×7 DGCs and without DGCs under the earthquake motions of El Centro with PGA= 0.25g

[Downloaded from mcej.modares.ac.ir on 2024-05-13]

ارزیابی عملکرد لرزهای سازه-شالوده- ستون دانهای متراکم با در ...

على عسگري و همكاران

- Ashford S. A., Rollins K. M., Case Bradford V S., Weaver T. J.&Baez J. I. 2000 Liquefaction mitigation using stone columns around deep foundations: Full-scale test results. *Transportation research record.* 1736(1): p. 110-118.
- Adalier K., Elgamal A., Meneses J.&Baez J. 2003 Stone columns as liquefaction countermeasure in non-plastic silty soils. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 23(7): p. 571-584.
- Lu J., Peng J., Elgamal A., Yang Z.&Law K. H. 2004 Parallel finite element modeling of earthquake ground response and liquefaction. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*. 3(1): p. 23-37.
- Elgamal A., Lu J.&Forcellini D. 2009 Mitigation of liquefaction-induced lateral deformation in a sloping stratum: Three-dimensional numerical simulation. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*. 135(11): p. 1672-1682.
- 10. Rayamajhi D. 2014 Shear reinforcement effects of discrete columns in liquefiable soils.
- 11. Rayamajhi D., Ashford S. A., Boulanger R. W.&Elgamal A. 2016 (a) Dense granular columns in liquefiable ground. I: shear reinforcement and cyclic stress ratio reduction. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 142(7): p. 04016023.
- Rayamajhi D., Boulanger R. W., Ashford S. A.&Elgamal A. 2016 (b) Dense granular columns in liquefiable ground. II: Effects on deformations. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 142 :(^Y)p. 04016024.
- 13. Ben Salem Z., Frikha W.&Bouassida M. 2016 Effect of granular-column installation on excess pore pressure variation during soil liquefaction. *International Journal of Geomechanics*. 16(2): p. 04015046.
- 14. Tang L., Zhang X.&Ling X. 2016 Numerical simulation of centrifuge experiments on liquefaction mitigation of silty soils using stone columns. *KSCE Journal of Civil Engineering*. 20(2): p. 631-638.
- 15. urali A., Godson M., Shanmugam G. K.&Subramani N. 2022 Applicability Analysis of Stone Column Against Liquefaction Under Repeated Dynamic Events, in Ground Improvement and Reinforced Soil Structures. Springer. p. 305-315.
- 16. Kumar R.&Takahashi A. 2022 Reliability assessment of the performance of granular column in the nonuniform liquefiable ground to mitigate the liquefaction-induced ground deformation. *Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards*. 16(2): p. 376-395.
- 17. Chafale A.&Annam M. K. 2022 A Review on Ground Improvement with Surcharge in Addressing Liquefaction Mitigation. *Dynamics of Soil and Modelling of Geotechnical Problems*: p. 367-375.
- 18. Zhou Y.-G., Liu K., Sun Z.-B.&Chen Y.-M. 2021 Liquefaction mitigation mechanisms of stone column-improved ground by dynamic centrifuge

 وجود DGCs در خاک موجب افزایش سختی خاک شده و موجب تقویت شتابهای انتقالی از خاک به شالوده و سازه شده و در نتیجه پاسخهای شتاب بزرگتری در سطح خاک و طبقات بالای سازه خواهیم داشت.

وجود سازه روی خاک موجب افزایش مقدار فشار
 آب مازاد حفرهای می شود. تاثیر وجود سازه بر افزایش فشار
 آب مازاد حفرهای در زیر سازه بیشتر از نقطهای دور از
 شالوده سازه می باشد.

 مقدار برش در سازههای کوتاه و پایه صلب بیشتر از مدلهای اندرکنشی است. از طرفی وجود DGCs نیز بهدلیل سختی بیشتر نسبت به مدلهای بدون آن، موجب افزایش برش پایه میشود. در سازههای بلندتر، و در طبقات پایین تر همچنان، برش پایه در حالت سازه با پایههای صلب تقریبا بیشتر از مدلهای اندرکنشی است ولی در طبقات فوقانی بیشتر از مدلهای اندرکنشی است ولی در طبقات فوقانی برش کل در مدلهای بهسازی شده بیشتر از بقیه مدلهاست. بنابراین اگر بهسازی انجام شود در برخی از موارد ممکن است باعث افزایش برش پایه شود، اما تا حدود زیادی باعث کاهش نشست خواهد شد. بنابراین در طراحی لرزهای، ضروری است علاوه بر کنترل جابهجایی افقی سازه و برش، مواردی همچون جابهجایی افقی، نشست و دوران شالوده، بدرستی کنترل شود.

٦-مراجع

- Hamada M.&O'Rourke T. 1992 Case studies of liquefaction and lifeline performance during past earthquakes. Volume 1, Japanese Case Studies. *Technical Rep. NCEER-92.* 1: p. 1-28.
- Bray J., Cubrinovski M., Zupan J.&Taylor M. 2014 Liquefaction effects on buildings in the central business district of Christchurch. *Earthquake Spectra*. 30(1): p. 85-109.
- Cubrinovski M., Winkley A., Haskell J., Palermo A., Wotherspoon L., Robinson K., et al.Hughes M. 2014 Spreading-induced damage to short-span bridges in Christchurch, New Zealand. *Earthquake Spectra*. 30(1): p. 57-83.
- Cubrinovski M.&Ishihara K. 2004 Simplified method for analysis of piles undergoing lateral spreading in liquefied soils. *Soils and foundations*. 44(5): p. 119-133.
- 5. Priebe H.-J. The prevention of liquefaction by vibro replacement. in International conference on earthquake resistant construction and design. 1991.

Downloaded from mcej.modares.ac.ir on 2024-05-13

- 28. Karimi Z.&Dashti S. 2016 Numerical and centrifuge modeling of seismic soil-foundation-structure interaction on liquefiable ground. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 142(1): p.04015061.
- 29. McKenna F., Mazzoni S.&Fenves G. 2011 Open system for earthquake engineering simulation (OpenSees) software version 2.2. 0. University of California, Berkeley, CA. Available from http://opensees.berkeley.edu.
- 30. McKenna F.&Fenves G. L. 2008 Using the OpenSees interpreter on parallel computers. *Network for earthquake engineering simulations*.
- 31. Yang Z., Lu J.&Elgamal A. 2008 OpenSees soil models and solid-fluid fully coupled elements. User's Manual. Ver. 1: p. 27.
- 32. Yang Z., Elgamal A&.Parra E. 2003 Computational model for cyclic mobility and associated shear deformation. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 129(12): p. 1119-1127.
- 33. Prevost J. H. 1985 A simple plasticity theory for frictional cohesionless soils *International Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 4(1): p. 9-17.
- 34. He L., Ramirez J., Lu J., Tang L., Elgamal A.&Tokimatsu K. 2017 Lateral spreading near deep foundations and influence of soil permeability. *Canadian Geotechnical Journal*. 54(6): p. 846-861.
- 35. Lu J., Kamatchi P.&Elgamal A. 2019 Using stone columns to mitigate lateral deformation in uniform and stratified liquefiable soil strata. *International Journal of Geomechanics*. 19(5): p. 04019026.
- 36. Ribó R., Pasenau M., Escolano E., Ronda J.&González L. 1998 GiD reference manual. *CIMNE, Barcelona*. 27.
- 37. Csi C. 2016 Analysis reference manual for SAP2000, ETABS, and SAFE. *Computers and Structures, Berkeley, California, USA.*
- 38. AISC 2010 Specification for structural steel buildings (ANSI/AISC 360-10). American Institute of Steel Construction, Chicago-Illinois.

model tests. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 150: p. 106946.

- 19. Carlos Tiznado J., Dashti S.&Ledezma C. 2021 Probabilistic predictive model for liquefaction triggering in layered sites improved with dense granular columns. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 147(10): p. 04021100.
- 20. Rashma R., Jayalekshmi B.&Shivashankar R. Seismic performance of pervious concrete column improved ground in mitigating liquefaction. in IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2021. *IOP Publishing*.
- 21. Tang L., Liu S., Ling X., Wan Y., Li X., Cong S.&Su L. 2021 Seismic Soil Liquefaction Mitigation Using Stone Columns for Pile-supported Wharves. *Journal of Earthquake Engineering*: p. 1-28.
- 22. Meite R., Wotherspoon L.&Green R. 2022 Influence of extent of remedial ground densification on seismic site effects via 2-D site response analyses. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 152: p. 107041.
- 23.Seed H. B.&Booker J. R. 1977 Stabilization of potentially liquefiable sand deposits using gravel drains. *Journal of the geotechnical engineering division*. 103(7): p. 757-768.
- 24. Sasaki Y.&Taniguchi E. 1982 Shaking table tests on gravel drains to prevent liquefaction of sand deposits. *Soils and Foundations*. 22(3): p. 1-14.
- 25. Brennan A.&Madabhushi S. Physical and numerical modelling of drainage in liquefied soils. in Fourth International Conference on Seismology and Earthquake Engineering, Tehran, Iran. 2003.
- 26. Asgari A., Oliaei M.&Bagheri M. 2013 Numerical simulation of improvement of a liquefiable soil layer using stone column and pile-pinning techniques. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 51: p. 77-96.
- 27. Forcellini D. 2020 Soil-structure interaction analyses of shallow-founded structures on a potentialliquefiable soil deposit. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 133: p. 106108.

Seismic Response Assessment of Structure-Foundation-Dense Granular Column Considering Interaction Effect on the Liquefiable Soil

Ali Asgari^{1*}, Bita Sahebian², Mohammad Kazemi³

1- Assistant Professor of Geotechnical Engineering, Faculty of Engineering and Technology, University of Mazandaran, Babolsar, Iran.

2- M.Sc. student, Department of Engineering and Technology University of Mazandaran, Babolsar, Iran.

2- M.Sc, Department of Engineering and Technology University of Mazandaran, Babolsar, Iran.

a.asgari@umz.ac.ir

Abstract

Two of the important issues in the construction of structures located in seismic coastal areas are the study of the potential of liquefaction phenomenon in saturated sandy soils and seismic structure-foundation-soil interaction (SSFSI). Control of structure damage on the liquefiable soil and large deformations of soil due to seismic loading and, also, the other responses such as: the accelerations at top of the structure/foundation and excess pore water pressure related of this phenomenon are very important. The phenomenon of liquefaction happens due to the occurrence of an earthquake and due to the lack of sufficient opportunity for drainage of excess pore water pressure. One of the effective and useful mitigation methods to control of the liquefaction phenomenon is the usage of dense granular column (DGC) in appropriate dimensions and distances on the ground susceptible to liquefaction. The role of the DGC in controlling the liquefaction phenomenon are follow as: firstly, the DGC is made of materials that are more permeable to sandy soils and cause the excess pore water pressure to be dissipate faster, and secondly, DGC increases the stiffness of the system, which proportionally reduces the excess water pore pressure due to the dilative behavior. To reduce the risks of liquefaction, it is necessary to fully understand its consequences. These consequences depend on permanent soil displacements, structural performance, structural characteristics, foundation and structure dimensions, soil conditions of the structure site, type of loading and earthquake intensity. The presence of the structure and impact of SSFSI affects the intensity of liquefaction and static and dynamic stresses in the soil. Most prior studies (e.g., physical, numerical, or analytical models), ignore the existence of the structure or consider the effect of soil-structure interaction (SSI) on the liquefiable soil layer as an equivalent model. Hitherto, the essence and extend of these interactions are not sufficiently understood. These methods can not properly assess the damage caused by liquefaction; Therefore, these methods cannot be used in the design of structures resistant to liquefaction. Therefore, to accurately study the effect of liquefaction, a method and model is needed that can fully consider the soil, foundation, and structure so that it can be used to correctly estimate the amount of subsidence and displacement of the structure. In this study, to evaluate the seismicity and the mitigation effect of DGCs, using OpenSees finite element software, modeling of DGCs and surrounding soils without structure and models with 5, 10 and 15 storey structures were performed. The three-dimensional soil and DGCs modeled in the software are placed under different earthquakes and the effects of structural layers on the lateral displacement, excess pore water pressure, response of acceleration spectrum, drift and shear force of stories are investigated. The liquefiable soil is modelled through the pressure-dependent multi yield surface soil constitutive law (PDMY02) applied in OpenSees. The results of this study are shown the positive effect of DGC on the reduction of lateral displacement components of soil and structure, foundation subsidence and excess water pore pressure. Also, the presence of the structure on the soil and the increase of its floors have increased the mentioned components except for lateral displacement of soil.

Keywords: Liquefaction, Dense granular column group, Interaction, Structure, 3D Modeling.