

# مطالعه آزمایشگاهی رفتار دینامیکی سازه‌های لاغر واقع بر شالوده مرکب در راستای طراحی بر مبنای عملکرد

مجید حسینی معتمد (دانشجوی دکتری)

علی کمل‌پناه\* (استاد)

دانشکده‌ی مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

مهندسی عمران شریف، زمستان ۱۴۰۲ (۳۹، شماره ۴، صص. ۳۱-۴۱، پژوهشی)

در این تحقیق، به بررسی آزمایشگاهی اندرکنش اینرسی سازه - خاک - شمع در سازه‌های لاغر واقع بر شالوده مرکب با تاکید بر مفهوم طراحی بر اساس عملکرد پرداخته شده است. بیشتر مطالعات انجام شده بر اساس عملکرد، معطوف به پی سطحی بوده است. در این نوع شالوده‌ها، حرکت گهواره‌ای شالوده سطحی به عنوان منبع اتلاف انرژی عمل کرده و از روسازه محافظت می‌کند. با این حال، توجه کمتری به شالوده سطحی ترکیب شده با شمع شده است. هدف پژوهش حاضر، بررسی رفتار گهواره‌ای شالوده‌های مرکب به عنوان شالوده سازه‌های لاغر مورد بررسی قرار گرفته است. در این راستا، با انجام یک سری آزمایش‌های ارتعاش اجباری بر روی مدل‌های فیزیکی کوچک مقیاس، تأثیر برخی ویژگی‌های شالوده مرکب مانند آرایش شمع‌ها و طول نسبی شمع‌ها بر پاسخ سازه بررسی شده است. نتایج نشان داد که در صورت بروز رفتار غیرخطی شالوده، می‌توان از مزایای آن شامل کاهش جابه‌جایی نسبی (دریفت) سازه حین بارهای دینامیکی بهره برد. بر همین اساس، رفتار دینامیکی مدل‌ها به دو فاز جداگانه تقسیم شده است. نتایج حاصل شده بیانگر موثر بودن مشخصات شالوده مرکب شامل آرایش شمع‌ها و طول شمع‌ها، بر پاسخ دینامیکی سازه می‌باشد. متمرکز شدن چیدمان شمع‌ها، رفتار دورانی شالوده را تغییر می‌دهد و به دنبال آن، تقاضای دینامیکی و دریفت روسازه را کاهش می‌دهد.

واژگان کلیدی: ارتعاش اجباری، اندرکنش خاک - شمع - سازه، پاسخ غیرخطی، شالوده مرکب، طراحی بر اساس عملکرد.

majid.motamed@modares.ac.ir  
a-panah@modares.ac.ir

## ۱. مقدمه

لرزه‌ای، باید از هر نوع آسیب پی جلوگیری شود، به طوری که اتلاف انرژی تنها در روسازه مجاز می‌باشد. پاسخ غیرخطی پی در بیشتر پروژه‌های عملی اجتناب‌ناپذیر است، زیرا لنگرهای خمشی ناشی از نیروهای اینرسی حین زلزله ممکن است از ظرفیت باربری استاتیکی پی تجاوز کند.<sup>[۱]</sup> در این حالت، اندرکنش غیرخطی خاک - شالوده محتمل است که می‌تواند منجر به کاهش تقاضای لرزه‌ای روسازه شود. کاهش تقاضای جابه‌جایی و دوران ماندگار در اجزای سازه‌ای و به طور کلی کاهش پتانسیل گسیختگی و خرابی سازه‌ها ناشی از رفتار غیرخطی خاک نزدیک شالوده، در زلزله سال ۱۹۹۵ کوبه مشاهده گردید. بنابراین، ایده بهره‌برداری از اتلاف انرژی ناشی از رفتار غیرخطی خاک نزدیک شالوده و چگونگی انتفاع روسازه از این موضوع، منجر به تحقیقات زیاد و مشاهدات آزمایشگاهی بسیاری در این زمینه

مفهوم طراحی بر اساس جابه‌جایی در دهه‌های اخیر اعتبار زیادی پیدا کرده است. بر اساس این مفهوم، آسیب‌دیدگی و خرابی سازه‌ای ساختمان‌ها به طور مستقیم با کرنش‌های ایجاد شده در اجزای سازه‌ای و به عبارت دیگر، دریفت بین طبقات مرتبط می‌باشد. این مفهوم منجر به توسعه تعداد زیادی روش طراحی لرزه‌ای بر اساس جابه‌جایی (جایگزین روش طراحی لرزه‌ای بر اساس مقاومت) می‌شود. به صورت کلی، این روش‌ها تحت عنوان روش‌های طراحی بر اساس عملکرد<sup>۱</sup> شناخته می‌شوند. با مطرح شدن این نوع فلسفه طراحی، توجه بیشتری به نقش اندرکنش سازه - شالوده - خاک در پاسخ کلی سیستم معطوف گردید.<sup>[۱-۳]</sup> بر اساس این روش‌های طراحی

\* نویسنده مسئول

تاریخ دریافت ۱۹/۹/۱۴۰۱، اصلاحیه ۲۰/۱۲/۱۴۰۱، پذیرش ۲۰/۱/۱۴۰۲.

استناد به این مقاله:

حسینی معتمد، مجید و کمل‌پناه، علی، ۱۴۰۲. مطالعه آزمایشگاهی رفتار دینامیکی سازه‌های لاغر واقع بر شالوده مرکب در راستای طراحی بر مبنای عملکرد. مهندسی عمران شریف، ۳۹(۴)، صص. ۳۱-۴۱. DOI:10.24200/J30.2023.61540.3181

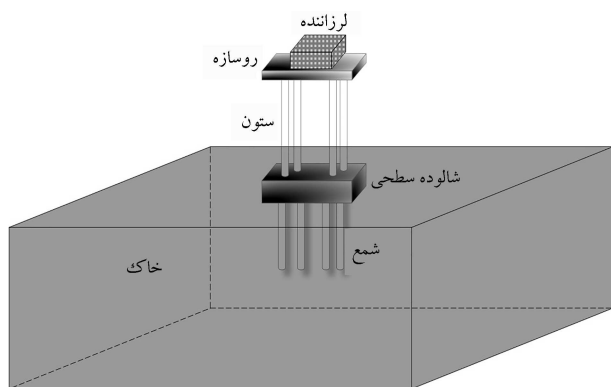
شده است. [۱۱-۵] در همین راستا، آیین‌نامه طراحی لرزه‌ای نیوزلند [۱۲] در نظر گرفتن اتلاف انرژی از طریق دوران شالوده را منوط به انجام مطالعات خاص (مانند تحلیل تاریخی زمانی) می‌کند. آناستاساپولوس و همکاران در سال ۲۰۱۰، فلسفه‌ای نوین برای طراحی لرزه‌ای ارائه دادند که از حرکت گهواره‌ای شالوده به عنوان یک مکانیزم میراکننده برای محافظت از روسازه استفاده می‌کند. آن‌ها پیشنهاد کردند که با کاهش ابعاد شالوده، می‌توان ظرفیت باربری خاک را پیش از آسیب دیدگی روسازه بسیج کرد. [۱۳] پاولوچی و همکاران در سال ۲۰۱۳، یک روش خطی معادل بر پایه سعی و خطا پیشنهاد کردند تا اثر رفتار غیرخطی خاک در روش مستقیم طراحی لرزه‌ای بر اساس جابه‌جایی<sup>۳</sup> اعمال گردد. اساس روش آن‌ها بر نمودار تجربی کاهش سختی سیستم و افزایش میرایی سیستم به‌عنوان تابعی از دوران شالوده استوار می‌باشد. از طریق این نمودارها، ویژگی‌های خطی معادل خاک مجموعه پی در قالب سختی سکانتی و ضریب میرایی اختصاص می‌یابد. [۱۴] برخی از محققین با الهام‌گیری از روش ارائه شده توسط پاولوچی و همکاران، به بررسی تأثیر رفتار غیرخطی خاک نزدیک شالوده‌های سطحی بر پاسخ سازه‌ها پرداختند. [۱۵-۱۷] در سال‌های اخیر نیز مطالعات متعددی بر روی رفتار گهواره‌ای فونداسیون سطحی ناشی از رفتار غیرخطی خاک انجام شده است. از جمله این تحقیقات می‌توان به کارهای ریجایی نوری و همکاران [۱۸]، یگانه و فتاحی [۱۹] و سجادی و همکاران [۲۰، ۲۱] اشاره کرد. برخی محققین، بهسازی خاک را با کمک المان‌هایی مانند شمع، ستون سنگی و ... با هدف کاهش نشست فونداسیون گهواره‌ای، مورد بررسی قرار داده‌اند. لولی و همکاران در سال ۲۰۱۵، عملکرد یک پایه پل که بر روی فونداسیون گهواره‌ای با مجموعه‌ای از شمع‌های غیرمتصل قرار دارد را ارزیابی کردند. نتایج نشان می‌دهد که سیستم گهواره‌ای ترکیبی استفاده شده، نشست و دوران کمتری را نسبت به فونداسیون بهسازی نشده تجربه می‌کند. با این حال، تغییر شکل‌های خمشی به مقدار قابل توجهی در پایه ستون پل افزایش می‌یابد. [۲۲] ها و همکاران در سال ۲۰۱۹، با استفاده از مدل‌سازی دینامیکی در آزمایش سانتریفیوژ به بررسی عملکرد لرزه‌ای سیستم گهواره‌ای واقع بر شمع‌های غیرمتصل پرداخته‌اند. نتایج آن‌ها نشان داد که بهسازی زمین با شمع منجر به کاهش نشست می‌گردد. [۲۳] بیشتر کارهای انجام شده بر اساس مفهوم طراحی نوین (روش طراحی بر اساس عملکرد) با تکیه بر رفتار غیرخطی خاک و به تبع آن حرکت گهواره‌ای شالوده به‌عنوان منبعی برای اتلاف انرژی، معطوف به پی‌های سطحی می‌باشد. این در حالی است که توجه کمتری به شالوده سطحی ترکیب شده با شمع (شالوده مرکب)<sup>۴</sup> به عنوان یک سیستم تکیه‌گاهی بهینه و اقتصادی برای سازه‌های بلند و سنگین شده است. در شالوده مرکب، بخش اعظم ظرفیت باری همچنان توسط شالوده سطحی تحمل می‌شود و شمع‌ها به‌عنوان المان‌های کاهنده نشست به شالوده سطحی اضافه می‌شوند. برخی محققین تأثیر ویژگی‌های مختص این نوع پی از قبیل تعداد شمع، طول شمع، نسبت سختی شالوده به خاک، ضخامت شالوده، پروفیل خاک و ... را به‌صورت پارامتریک مورد مطالعه قرار داده‌اند. کانه و همکاران در سال ۲۰۰۱، گزینه‌های طراحی برای شالوده مرکب را با تکیه بر یک مطالعه موردی مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها بیانگر وابستگی توزیع بار میان شمع‌ها به صلبیت شالوده، سختی شمع، طول نسبی شمع و سختی سازه‌ای می‌باشد. همچنین آن‌ها در راستای بهینه‌سازی مجموع طول شمع‌ها، نصب شمع‌ها زیر نواحی بارگذاری را پیشنهاد کردند. [۲۴] پولوس در سال ۲۰۰۱ پیشنهاد کرد که با افزایش ضخامت شالوده می‌توان به‌طور قابل توجهی نشست غیر یکنواخت را کاهش داد. او همچنین بیان کرد که افزایش طول شمع‌ها همیشه ضامن عملکرد موثرتر پی نیست و حد بالایی برای تعداد شمع‌ها وجود دارد که فراتر از آن، مزایای اضافه شده اندک می‌باشد. [۲۵] همچنین، طبق مطالعات پارامتریک رتول و رندولف در سال ۲۰۰۴،

عواملی همچون شرایط خاک بستر، آرایش بارگذاری و سطوح بار در تعیین طرح بهینه پی موثر هستند. آن‌ها همچنین نتیجه گرفتند که برای مجموع طول شمع‌های یکسان، نشست یکنواخت پی با شمع‌های بلندتر و تعداد کمتر، از نشست یکنواخت پی با شمع‌های کوتاه‌تر و تعداد بیشتر، کوچکتر می‌باشد. [۲۶] نگوین و همکاران در سال ۲۰۱۳، به ارزیابی عملکرد آرایش متمرکز شمع‌ها را برای کاهش نشست کل و نشست غیر یکنواخت پرداختند. نتایج آزمایش سانتریفیوژ انجام شده توسط آن‌ها نشان داد که آرایش متمرکز شمع‌ها قابلیت کاهش نشست کل و غیر یکنواخت را تا تقریباً ۳۰ الی ۴۰ درصد در مقایسه با آرایش یکنواخت شمع‌ها را دارد. [۲۷] علاوه بر موارد فوق، مطالعات زیادی در رابطه با شالوده‌های مرکب در سالیان اخیر انجام شده است که از جمله آن‌ها می‌توان به کارهای ربیعی و چوبیستی [۲۸]، بندوپادهایی و همکاران [۲۹]، بهاریا و همکاران [۳۰] و آصفا و همکاران [۳۱] اشاره کرد.

در اکثر مطالعات ذکر شده، تحقیق بر روی بار قائم استاتیکی متمرکز شده است. دلیل این امر این است که بیشتر این مطالعات مربوط به سازه‌های بلند می‌باشد که مسئله اصلی بار استاتیکی محوری روسازه است. در حالی که بار لرزه‌ای با توجه به انعطاف‌پذیری این نوع سازه‌ها بحرانی نبوده است. در سازه‌های لاغر نسبتاً بلند و سنگین که در این تحقیق مدنظر می‌باشد، حین زلزله‌های قوی، لنگر اینرسی وارد به پی قابل توجه می‌باشد. این لنگر اینرسی قابل توجه وارد به شالوده منجر به پاسخ غیرخطی خاک بستر شالوده می‌گردد. بنابراین، شناخت رفتار شالوده مرکب و چگونگی تأثیر آن بر پاسخ سازه متکی بر آن حین زلزله بر اساس فلسفه جدید طراحی (طراحی بر اساس عملکرد) می‌تواند مشرئمر باشد. از آنجایی که رفتار دینامیکی شالوده مرکب و چگونگی انتقال سازه‌های متکی بر این نوع پی از رفتار غیرخطی خاک بستر کمتر مورد بررسی قرار گرفته است، در این تحقیق سعی شده است تا با طراحی مدل‌های آزمایشگاهی، به بررسی دقیق رفتار سازه‌های لاغر متکی بر این نوع پی تحت بار دینامیکی اینرسی پرداخته شود. همچنین، عوامل موثر مانند آرایش شمع‌ها و طول نسبی شمع‌ها بر پاسخ سازه نیز مورد بررسی قرار گرفته است.

## ۲. مدل‌سازی در آزمایشگاه

تمامی اجزا اصلی تشکیل‌دهنده مدل آزمایشگاهی در تحقیق حاضر بصورت شماتیک در شکل ۱ نشان داده شده است. این اجزا عبارتند از روسازه، شالوده مرکب، دستگاه بارگذاری و خاک که در ادامه جداگانه تشریح شده‌اند. گفتنی است که مدل مذکور به‌صورت کوچک‌مقیاس و در شرایط ۱-g قرار دارد.



شکل ۱. تصویر شماتیک مدل آزمایشگاهی.



ب) آرایش یکنواخت شمع ها.



الف) آرایش متمرکز شمع ها؛

شکل ۳. انواع مدل ها با آرایش متفاوت شمع ها.



ب) طول نسبی کوتاه تر با طول ۷۵ cm.



الف) طول نسبی بلندتر با طول ۵۰ cm.

شکل ۴. انواع مدل ها با طول نسبی متفاوت شمع ها.

به عنوان شمع با آرایش  $3 \times 3$  استفاده شده است، به طوری که شمع ها به صورت گیردار به شالوده سطحی متصل شده اند. همانطور که در بخش مقدمه به آن اشاره گردید، نتایج مطالعات پیشین بیانگر اهمیت آرایش شمع ها و همچنین طول شمع ها در راستای طراحی بهینه تحت بارهای محوری استاتیکی می باشد. بنابراین، برای بررسی نقش این دو عامل تحت بارهای اینرسی، از سه مدل شالوده مرکب با آرایش متفاوت شمع ها و همچنین طول نسبی متفاوت شمع ها استفاده شده است. مشخصات این مدل ها در جدول ۲ ارائه شده است. همچنین، تصویری از مقایسه این مدل ها بر اساس نوع آرایش شمع ها و همچنین طول نسبی شمع ها به ترتیب در شکل های ۳ و ۴ ارائه شده است. گفتنی است که طراحی شالوده مرکب به نحوی انجام شده است که پارامتر نسبت فاصله بین شمع ها به قطر شمع تأثیری قابل توجهی بر نتایج نداشته باشد. در همین راستا، این نسبت بزرگتر از ۶ در نظر گرفته شد. مراجع معتبری مانند آشتو، ضریب گروه شمع را هنگامی که پارامتر نسبت فاصله بین شمع ها به قطر شمع بزرگتر از ۶ باشد برابر یک در نظر می گیرند.

#### • روند بارگذاری

بارگذاری مورد نظر در این تحقیق از نوع بارگذاری اینرسی است. از این رو، مدل های ساخته شده در آزمایشگاه تحت ارتعاش اجباری قرار می گیرند. ارتعاش اجباری توسط لرزاننده جرمی دوار به صورت یک نیروی هارمونیک یک جهته و با فرکانس مشخص به روسازه اعمال می گردد. دستگاه بارگذاری به عنوان جزئی از جرم فوقانی می باشد. نیروی اینرسی ایجاد شده توسط لرزاننده مطابق رابطه ۱ می باشد. [۳۲]

جدول ۱. مشخصات روسازه مدل آزمایشگاهی.

مقدار	مشخصه
۵°	طول شالوده (سانتی متر)
۵°	عرض شالوده (سانتی متر)
۱۱۵	ارتفاع سازه (سانتی متر)
۲۱°	جرم روسازه (کیلوگرم)



شکل ۲. نما از مدل ساخته شده در آزمایشگاه.

جدول ۲. مشخصات انواع شالوده مرکب استفاده شده در مدل ها.

شماره مدل	نوع آرایش	شمع ها	
		نسبی طول	نسبت فاصله
۱	یکنواخت	۳°	۱۳
	آرایش یکنواخت شمع های بلند		
۲	متمرکز	۳°	۶/۵
	آرایش متمرکز شمع های بلند		
۳	یکنواخت	۱۵	۱۳
	آرایش یکنواخت شمع های کوتاه		

#### • روسازه

روسازه به صورت یک سیستم یک درجه آزادی در نظر گرفته شده است. از این رو، جرم فوقانی مورد نیاز از طریق ورق های فولادی و همچنین وزن دستگاه تامین شده است که بر روی چهار ستون فولادی قرار گرفته است. اتصال جرم فوقانی به ستون ها بصورت کاملاً صلب می باشد. روسازه طراحی شده که مشخصات آن در جدول ۱ ارائه شده است، تقریباً در نقش یک سازه لاغر می باشد. مشخصات مدل آزمایشگاهی مورد نظر بر اساس سازه بلند مرتبه متکی بر شالوده مرکب بر روی ماسه سست مقیاس شده است. [۳۲] مدل کوچک مقیاس ساخته شده در آزمایشگاه، در شکل ۲ نشان داده شده است.

#### • شالوده مرکب

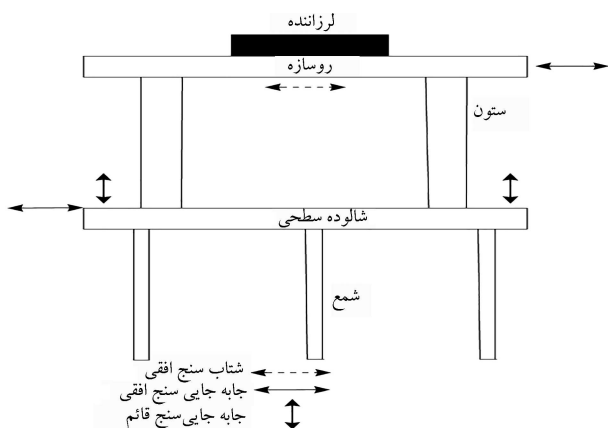
شالوده مدنظر در این تحقیق، از نوع شالوده مرکب می باشد که ترکیبی از شالوده سطحی و شمع های عمیق است. از آن جایی که یکی از اهداف اصلی این تحقیق، بررسی چگونگی انتفاع سازه های لاغر مستقر بر شالوده مرکب از غیرخطی شدن خاک می باشد، بنابراین از شمع های اصطکاکی برای بهره بردن از حرکت گهواره ای شالوده استفاده شده است. همچنین، شالوده به کار گرفته شده طوری طراحی شده است که به صورت صلب رفتار کند. بنابراین، شالوده مرکب ساخته شده در آزمایشگاه از دو صفحه فولادی به عنوان شالوده و تعداد نه لوله آلومینیومی

جدول ۳. مشخصات گام‌های بارگذاری.

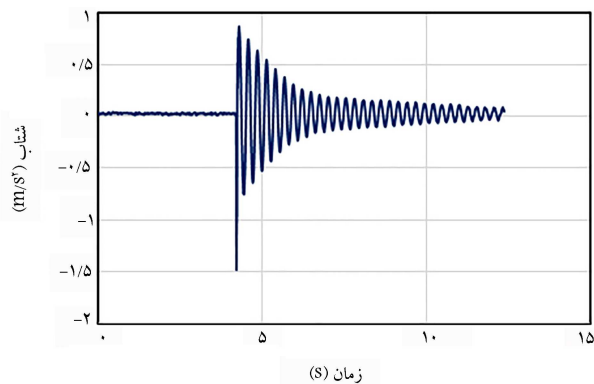
گام بارگذاری		۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱
جرم دوار (گرم)		۳۰۷۶	۱۵۷۵	۸۳۱	۴۵۸	۲۵۶	۱۶۴	۹۳
شعاع (میلی‌متر)		۹۹	۹۹	۱۰۷	۱۰۹	۸۵	۸۵	۸۵

جدول ۴. مشخصات ماسه فیروزکوه ۱۶۱.

SP	طبقه‌بندی
۳۶/۸	$\varphi(^{\circ})$
۱۸	$\gamma_{d\ max}(kN/m^3)$
۱۴/۶	$\gamma_{d\ min}(kN/m^3)$
۰/۹۴۳	$e_{max}$
۰/۵۴۸	$e_{min}$
۰/۲۷	$D_{50}$
۰/۸۸	$Cc$
۱/۸۷	$Cu$
۲/۶۵	$G_s$



شکل ۵. نحوه چیدمان حسگرها و ابزارگذاری مدل‌های فیزیکی در آزمایش‌های ارتعاش اجباری.



شکل ۶. نمودار شتاب - زمان به دست آمده از ارتعاش آزاد مدل ۱.

### ۳. نتایج آزمایش‌ها

قبل از شروع آزمایش‌های ارتعاش اجباری برای هر مدل، ابتدا آزمایش ارتعاش آزاد برای یافتن فرکانس طبیعی سیستم انجام گردید. آزمایش‌های ارتعاش آزاد با ضربه به روسازه اجرا گردید. یک نمونه از تاریخچه زمانی شتاب اندازه‌گیری شده روسازه ناشی از ضربه به روسازه در آزمایش ارتعاش آزاد برای مدل ۱ در شکل ۶ نشان داده شده است. در نهایت، با استفاده از نرم‌افزار سائزوموسیگنال، فرکانس طبیعی سیستم اندازه‌گیری می‌شود. به همین ترتیب، برای سایر مدل‌ها نیز فرکانس طبیعی مطابق جدول ۵ اندازه‌گیری شد.

$$F = m_r r \omega^r \cos \alpha + (m_r + m_b) \ddot{u} \quad (1)$$

در این رابطه،  $m_r$  جرم وزنه جرمی دوار (جرم ایجادکننده نیروی نامتعادل‌کننده)،  $r$  شعاع دوران (فاصله از مرکز دیسک‌ها تا مرکز جرمی وزنه جرمی دوار)،  $\omega$  فرکانس زاویه‌ای ارتعاش و  $\alpha$  موقعیت زاویه‌ای وزنه جرمی دوار،  $m_b$  جرم ثابت روسازه و  $\ddot{u}$  شتاب انتقالی روسازه می‌باشد. ترم اول در رابطه ۱، بیانگر نیروی نامتعادل‌کننده ایجاد شده توسط وزنه‌های جرمی دوار و ترم دوم آن بیانگر نیروی اینرسی ایجاد شده در روسازه ناشی از شتاب اینرسی ایجاد شده می‌باشد. روند بارگذاری در هر مدل شامل مجموعه‌ای از گام‌های بارگذاری می‌باشد. مشخصات این گام‌های بارگذاری در جدول ۳ ارائه شده است.

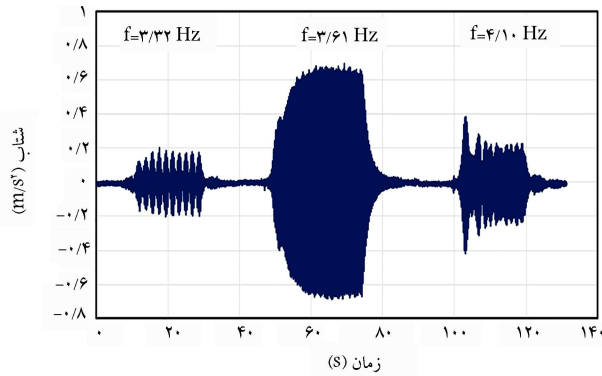
از ویژگی هر گام بارگذاری جرم وزنه دوار و شعاع دوران ثابت و فرکانس بارگذاری متغیر می‌باشد. جرم‌های دوار بصورت قطاعی از دایره در زوایای مختلف طراحی و ساخته شدند. جرم‌ها با این هدف تعیین شده‌اند که بازه بارگذاری وسیعی از دامنه بارگذاری کم تا دامنه زیاد را پوشش دهند. بطوریکه مطابق این روند، با افزایش دامنه بارگذاری ضمن حفظ پیوستگی در بارگذاری، درجه غیرخطی شدن مدل افزایش یابد. هر گام بارگذاری از یک سری آزمایش‌ها تشکیل شده است. در هر آزمایش فرکانس بارگذاری نیز ثابت می‌باشد. بدین صورت که در هر آزمایش، فرکانس ارتعاش در یک مقدار مشخص ثابت نگه داشته می‌شود تا سیستم به حالت پایدار برسد. هدف از انجام این آزمایش‌ها دستیابی به شرایط تشدید در هر گام بارگذاری می‌باشد. بنابراین هر گام بارگذاری شامل مجموعه‌ای از آزمایش‌ها با فرکانس‌های متفاوت با محوریت فرکانس تشدید می‌باشد. مدت زمان هر آزمایش در حدود  $20 \pm 2$  ثانیه بوده است.

#### • مشخصات خاک بستر

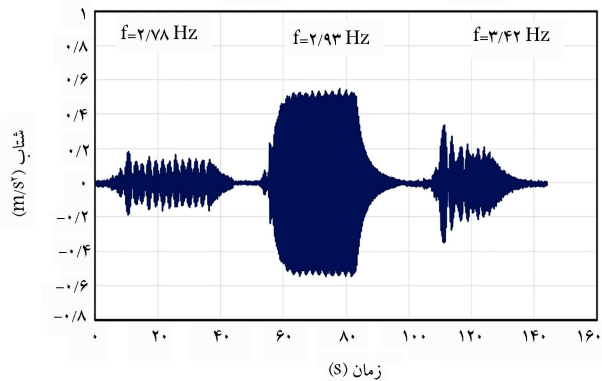
محفظه خاک با طول  $2/5$  متر، عرض  $1/2$  متر و ارتفاع  $1$  متر در آزمایشگاه ساخته شد. از ماسه ۱۶۱ فیروزکوه به‌عنوان خاک بستر پی در این محفظه استفاده شده است. این خاک به‌عنوان یک خاک استاندارد توسط محققین قبلی معرفی گردیده است و دارای دانه‌بندی یکنواخت بوده و مشابه ماسه توپورای ژاپن می‌باشد.<sup>[۲۴]</sup> در جدول ۴ مشخصات این خاک ارائه شده است. فرایند تراکم خاک به‌صورت لایه به لایه و با استفاده از کوبه‌های دستی انجام پذیرفت تا یک لایه یکنواخت با تراکم  $80\%$  درصد در سرتاسر جعبه ایجاد گردد.

#### • حسگرها

نحوه چیدمان و موقعیت حسگرها در شکل ۵ ارائه شده است. شتاب‌سنج در زیر جرم فوقانی برای اندازه‌گیری نیروی اینرسی تحت آزمایش‌های ارتعاش اجباری نصب شده است. تعداد دو جابه‌جایی سنج قائم و یک جابه‌جایی سنج افقی برای اندازه‌گیری پاسخ شالوده شامل دوران و جابه‌جایی افقی استفاده شده است. همچنین، از یک جابه‌جایی سنج افقی برای ثبت جابه‌جایی افقی روسازه استفاده شده است.

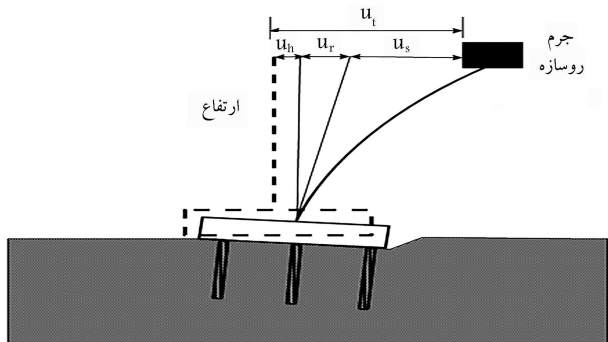


الف) برای مدل با آرایش یکنواخت؛

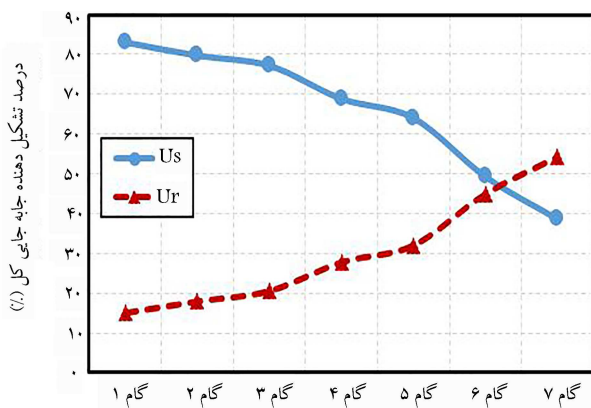


ب) برای مدل با آرایش متمرکز.

شکل ۷. شتاب ایترسی به دست آمده از بخشی از بارگذاری در گام اول.



شکل ۸. مولفه‌های تشکیل دهنده پاسخ روسازه به صورت شماتیک با فرض حرکت افقی روسازه.



شکل ۹. تغییرات مولفه‌های تشکیل دهنده پاسخ روسازه نسبت به یکدیگر.

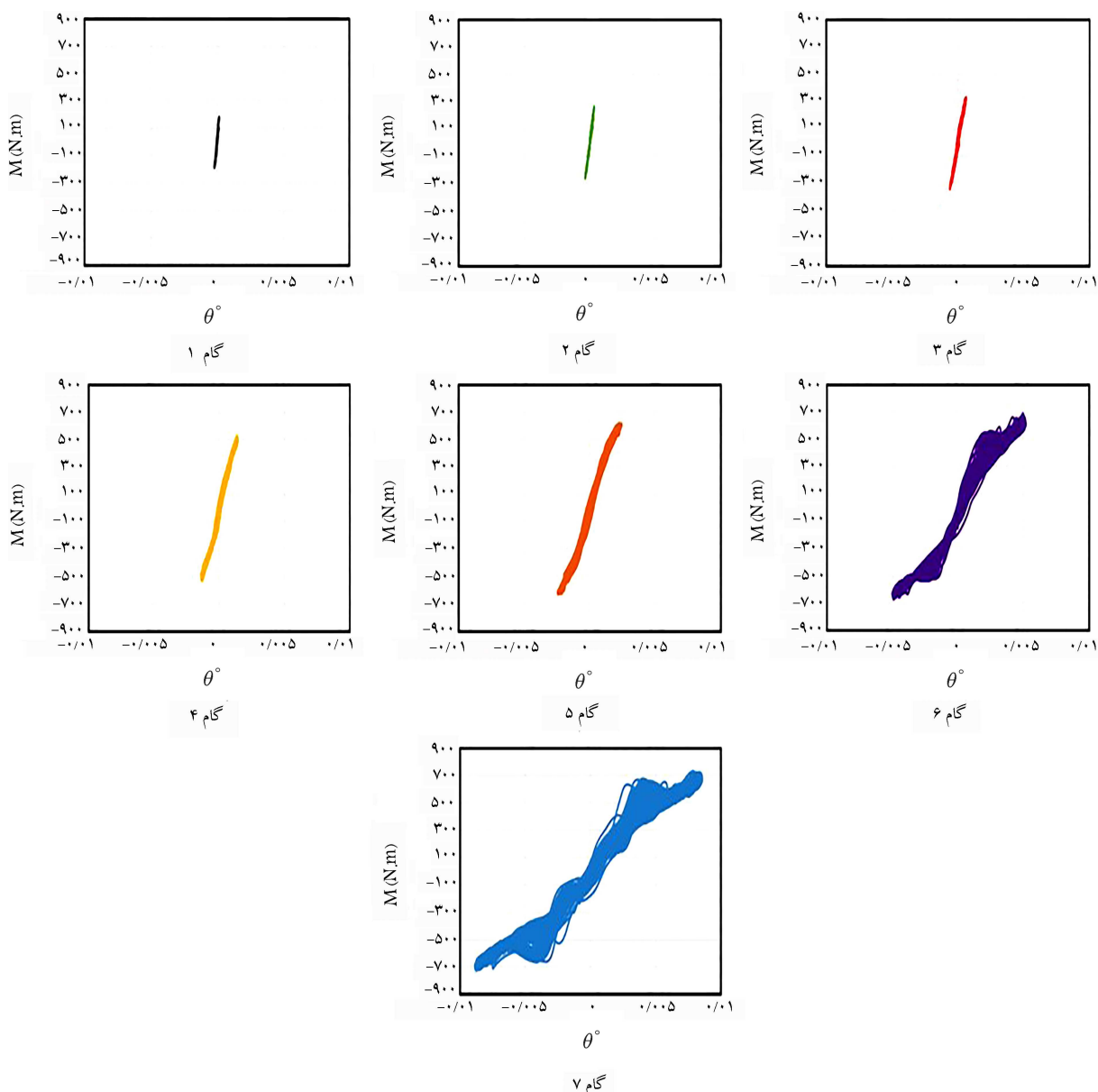
جدول ۵. فرکانس طبیعی اندازه‌گیری شده برای مدل‌های فیزیکی از طریق آزمایش ارتعاش آزاد.

مدل ۱	مدل ۲	مدل ۳
۳/۷ هرتز	۳/۰۲ هرتز	۳/۷ هرتز

بر اساس این نتایج، دو مدل با آرایش یکنواخت دارای فرکانس طبیعی یکسان می‌باشند. در حالی که مدل با آرایش متمرکز دارای فرکانس طبیعی کمتر و در نتیجه نسبت به دو مدل دیگر نرم‌تر می‌باشد. این موضوع احتمالاً ناشی از سختی دورانی کمتر مدل با آرایش متمرکز می‌باشد. بنابراین، آرایش شمع‌ها نقش تعیین‌کننده در تعیین فرکانس طبیعی سیستم‌های متکی بر شالوده مرکب دارد. همچنین، عدم وابستگی فرکانس طبیعی دو مدل با طول متفاوت شمع‌ها احتمالاً ناشی از سختی دورانی یکسان دو مدل تحت بار ضربه‌ای اعمال‌شده در آزمایش ارتعاش آزاد بوده است. به نظر می‌رسد لنگر ایترسی وارده به شالوده ناشی از ضربه در آزمایش ارتعاش آزاد به حدی نبوده است که سختی دورانی فونداسیون‌ها با طول شمع‌های متفاوت را تحت تأثیر قرار دهد. به عبارت دیگر، جابه‌جایی بسیج شده در شمع‌ها کوچک می‌باشد، به طوری‌که در آن جابه‌جایی نیروی بسیج شده در شمع‌ها با طول متفاوت، یکسان می‌باشد. پس از انجام آزمایش ارتعاش آزاد برای هر مدل فیزیکی، آزمایش ارتعاش اجباری به ترتیب از گام اول شروع و به گام هفتم ختم می‌شود. همانطور که پیش‌تر بیان شد، هر گام بارگذاری شامل چندین آزمایش با فرکانس متغیر می‌باشد. آزمایش ابتدایی باید دارای فرکانس کمتر از فرکانس تشدید باشد. سپس، آزمایش‌های بعدی با افزایش فرکانس ارتعاش جهت رسیدن به شرایط تشدید ادامه می‌یابد. برای درک بهتر این موضوع، شتاب ایترسی به دست آمده در گام اول بارگذاری برای دو مدل با آرایش متفاوت و طول یکسان در شکل ۷ ارائه شده است. در این شکل، سه آزمایش انجام شده در گام اول بارگذاری برای دو مدل با آرایش متفاوت نمایش داده شده است. همانطور که مشخص است، از میان این سه آزمایش، یک آزمایش مربوط به پیش از وقوع تشدید، یک آزمایش متناظر شرایط تشدید و یک آزمایش برای پس از وقوع تشدید می‌باشد. فرکانس ( $f$ ) هر آزمایش در شکل مشخص شده است. این روند برای هر سه مدل فیزیکی مد نظر در این تحقیق تا گام بارگذاری انتهایی که همان گام بارگذاری هفتم می‌باشد، ادامه پیدا می‌کند. اولویت این تحقیق بررسی پاسخ سیستم حین تشدید می‌باشد.

پاسخ روسازه با فرض حرکت افقی، متشکل از سه مولفه جابه‌جایی نسبی روسازه ( $u_s$ )، جابه‌جایی ناشی از دوران شالوده ( $u_r$ )، و جابه‌جایی ناشی از حرکت انتقالی شالوده ( $u_h$ ) می‌باشد که به طور شماتیک در شکل ۸ نشان داده شده است. با بررسی پاسخ روسازه برای هر سه مدل فیزیکی مشخص گردید که تأثیر مولفه جابه‌جایی ناشی از حرکت انتقالی شالوده نسبت به دو مولفه دیگر اهمیت کمتری دارد. بنابراین، طبق انتظاری که از رفتار سازه‌های لاغر وجود دارد، حرکت دورانی شالوده غالب می‌باشد و می‌توان از حرکت انتقالی صرف‌نظر کرد. در همین راستا، مولفه جابه‌جایی نسبی روسازه ( $u_s$ ) و جابه‌جایی ناشی از دوران شالوده ( $u_r$ )، دو مولفه اصلی تشکیل‌دهنده پاسخ روسازه می‌باشند. با افزایش گام بارگذاری، نیروی ایترسی بیشتری به روسازه وارد می‌گردد که به تبع آن پاسخ روسازه نیز افزایش می‌یابد. یکی از نکات مهم و قابل توجه، نسبت تغییرات دو مولفه تشکیل‌دهنده پاسخ روسازه نسبت به یکدیگر می‌باشد.

در شکل ۹ نسبت تغییرات دو مولفه بر حسب درصد تشکیل دهنده جابه‌جایی کل ( $u_t$ ) برای مدل آرایش یکنواخت شمع‌های بلند نشان داده شده است. همانطور که

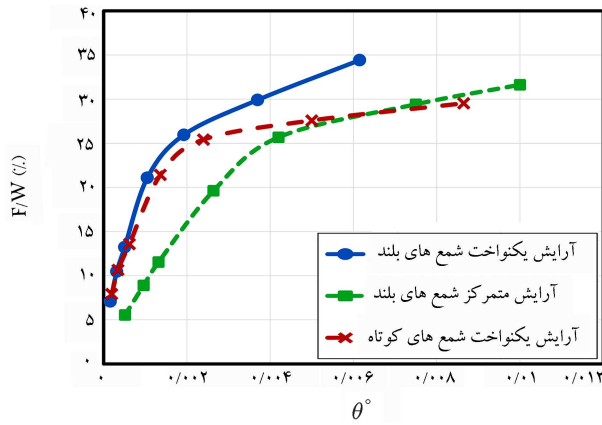


شکل ۱۰. نمودار لنگر اینرسی-دوران شالوده مدل با آرایش یکنواخت شمع‌های کوتاه‌تر برای تمامی گام‌های بارگذاری.

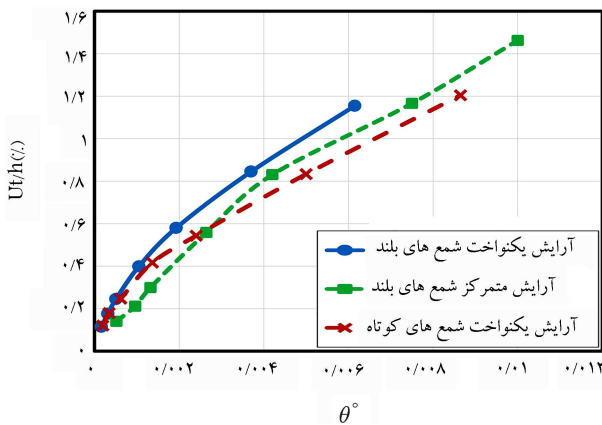
در ادامه، پاسخ سیستم سازه - شالوده مرکب - خاک اندازه‌گیری شده از نتایج آزمایشگاهی برای مدل‌های فیزیکی ساخته شده در آزمایشگاه بر حسب دوران شالوده ( $\theta$ ) که بیانگر حرکت گهواره‌ای سیستم می‌باشد، مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد. نمودار ظرفیت خمشی ( $M$ ) مدل با آرایش یکنواخت شمع‌های کوتاه‌تر به عنوان نمونه در شکل ۱۰ با واحد نیوتن متر ( $N.m$ ) ارائه شده است. طبق انتظار، با افزایش گام بارگذاری که به تبع آن نیروی اینرسی وارده به روسازه افزایش می‌یابد، سیستم رفتار غیرخطی بیشتری از خود نشان می‌دهد. برای درک بهتر این موضوع، منحنی‌های اصلی<sup>۵</sup> نمودار ظرفیت خمشی تعدادی از گام‌های بارگذاری برای هر سه مدل فیزیکی در شکل ۱۱ ارائه شده است.

با پیشروی در گام‌های بارگذاری، سختی دوران شالوده کاهش می‌یابد. در تمامی مدل‌ها و در بارگذاری‌های اولیه (تا گام بارگذاری چهارم)، منحنی اصلی نمودارهای ظرفیت خمشی به صورت تک خطی رفتار می‌کنند. در حالی که پس از گام بارگذاری

مشاهده می‌شود، در گام بارگذاری اول، مولفه جابه‌جایی نسبی روسازه بخش اصلی جابه‌جایی را تشکیل می‌دهد. با افزایش گام بارگذاری، دوران شالوده افزایش می‌یابد، به طوری که با افزایش زاویه دوران، سهم مولفه جابه‌جایی ناشی از دوران شالوده در پاسخ روسازه افزایش و سهم مولفه جابه‌جایی نسبی روسازه در پاسخ روسازه کاهش می‌یابد. تغییر نسبت این دو مولفه، در پاسخ روسازه بر رفتار دینامیکی سازه تأثیرگذار می‌باشد. جابه‌جایی نسبی روسازه یا همان دررفت میان طبقات در ساختمان موجب ایجاد تنش‌ها و کرنش‌ها در اجزای باربر سازه می‌شود، در حالی که جابه‌جایی ناشی از دوران شالوده منجر به دررفت میان طبقات نمی‌گردد. بنابراین، انتفاع پاسخ روسازه از غیرخطی شدن خاک بستری از دو عامل کاهش جابه‌جایی نسبی روسازه و همچنین میرایی ناشی از حرکت گهواره‌ای شالوده حاصل می‌شود. گفتنی است که میرایی سیستم ناشی از رفتار گهواره‌ای شالوده نیز با پیشروی در گام‌های بارگذاری افزایش می‌یابد. این میرایی حاصل رفتار غیرخطی خاک بستر می‌باشد.

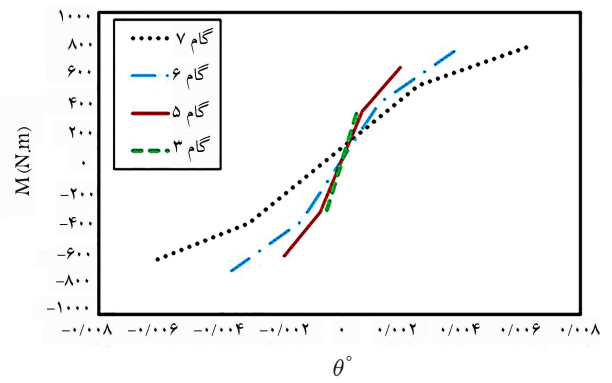


شکل ۱۲. تقاضای نیروی اینرسی در روسازه (نرمال شده با وزن سازه).

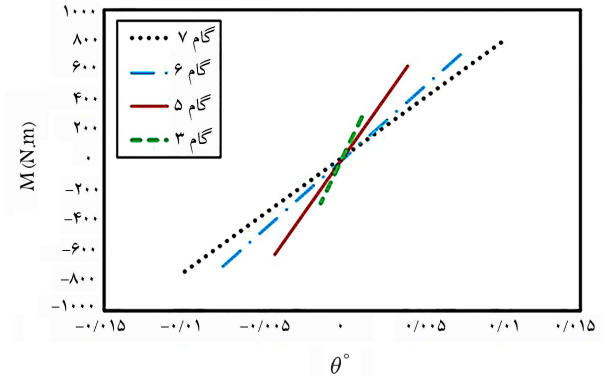


شکل ۱۳. نمودار جابه‌جایی کل روسازه نرمال شده با ارتفاع سازه.

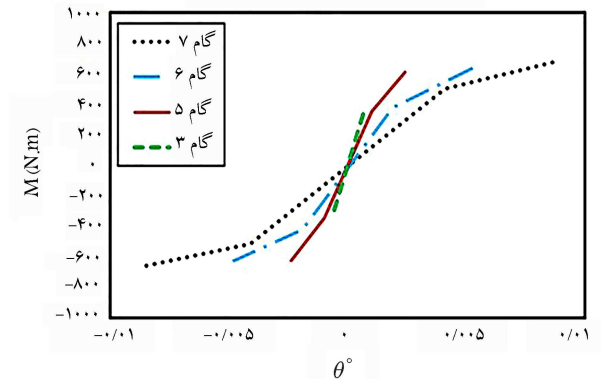
بر حسب دوران شالوده به ترتیب در شکل ۱۲، شکل ۱۳ و شکل ۱۴ ارائه شده است. نیروی اینرسی ( $F$ ) بر حسب وزن روسازه ( $W$ ) و نمودارهای جابه‌جایی بر حسب ارتفاع سازه ( $h$ ) نرمال شده‌اند. جابه‌جایی کل به دست آمده برای روسازه، وابسته به سختی دورانی مدل و همچنین میرایی مدل می‌باشد. بنظر می‌رسد با دقت در نمودارهای نیروی اینرسی و جابه‌جایی نسبی روسازه، تفسیر نتایج حاصله و همچنین مقایسه مدل‌ها با یکدیگر از طریق تفکیک رفتار مدل‌ها به دو فاز جداگانه میسر می‌گردد. این دو فاز که در یک زاویه دوران شالوده مشخص از یکدیگر جدا می‌شوند، بر حسب این دو مولفه (نیروی اینرسی و جابه‌جایی نسبی روسازه) برای هر سه مدل فیزیکی به تفکیک در شکل ۱۵ ارائه شده است. ویژگی اصلی این زاویه دوران شالوده متناظر تغییر فاز، کاهش ناگهانی سختی دورانی شالوده می‌باشد. این کاهش سختی احتمالاً بدلیل بسیج شدن بخش اعظمی از مقاومت جدار شمع‌ها (به خصوص مقاومت کششی جدار) رخ می‌دهد. گفتنی است که در شمع‌های اصطکاکی، مقاومت جدار غالب می‌باشد و مقاومت نوک قابل توجه نیست. همچنین، یکی دیگر از ویژگی‌های اصلی فاز بندی انجام شده، عدم افزایش جابه‌جایی نسبی و یا همان دررفت روسازه در فاز دوم می‌باشد. به عبارت دیگر، با ورود شالوده به فاز دوم، جابه‌جایی نسبی روسازه با افزایش نیروی اینرسی ثابت مانده و یا حتی کاهش می‌یابد. عدم افزایش یا کاهش جابه‌جایی روسازه بیانگر انتفاع روسازه از شرایط به‌وجود آمده است، زیرا تنش‌ها و کرنش‌های ایجاد شده در سازه ناشی از جابه‌جایی نسبی روسازه می‌باشد. زاویه دوران شالوده متناظر تغییر فاز برای مدل آرایش یکنواخت شمع‌های بلند برابر  $0.19^\circ$  درجه، برای مدل آرایش متمرکز شمع‌های بلند برابر  $0.04^\circ$  درجه و برای مدل آرایش



الف) مدل با آرایش یکنواخت شمع های بلند؛



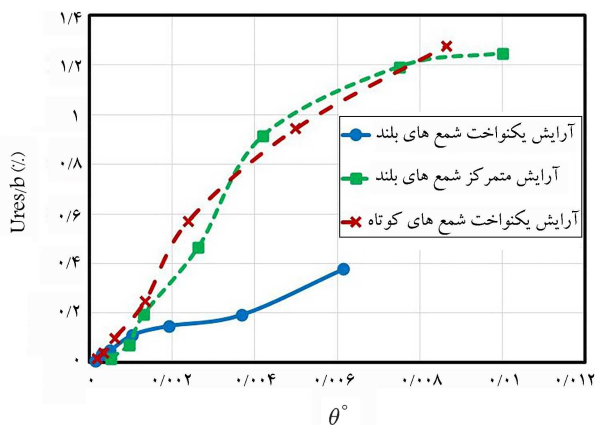
ب) مدل با آرایش متمرکز شمع های بلند؛



ج) مدل با آرایش یکنواخت شمع های کوتاه.

شکل ۱۵. منحنی اصلی نمودار لنگر اینرسی - دوران شالوده.

چهارم و بروز رفتار غیرخطی قابل توجه بی، مدل‌ها رفتار دورانی متفاوتی از خود نشان می‌دهند. اگرچه مدل با آرایش متمرکز همچنان بصورت تک خطی رفتار می‌کنند، اما مدل‌ها با آرایش یکنواخت به صورت دوخطی رفتار می‌کنند. بنابراین، تغییر در آرایش شمع‌ها ممکن است ماهیت رفتار دورانی پی را تحت تأثیر قرار دهد. در همین راستا، با تغییر مشخصات شالوده مرکب از قبیل آرایش شمع‌ها و طول شمع‌ها، شالوده چه به لحاظ ماهیت رفتاری که در اثر تغییر آرایش شمع‌ها مشاهده گردید و چه به لحاظ مقدار سختی دورانی که شامل هر سه مدل می‌گردد، رفتار دورانی متفاوت از خود نشان می‌دهد. بنابراین، این تفاوت رفتاری پی، تقاضای نیروی اینرسی در روسازه و به تبع آن پاسخ روسازه را تحت تأثیر قرار می‌دهد. مقدار تقاضای نیروی اینرسی در روسازه، جابه‌جایی کل روسازه و همچنین جابه‌جایی نسبی روسازه برای هر سه مدل فیزیکی

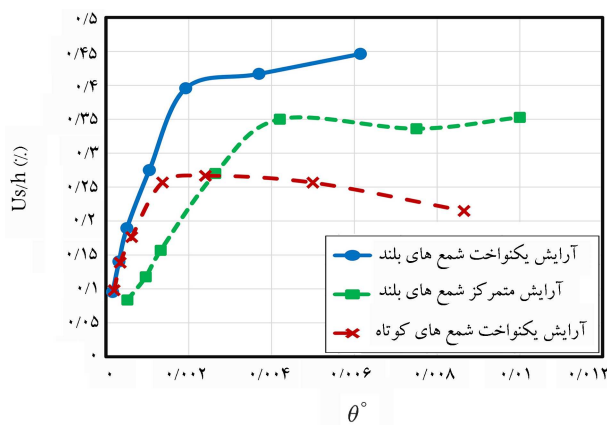


شکل ۱۶. نمودار نشست دائمی فونداسیون نرمال شده با بعد فونداسیون.

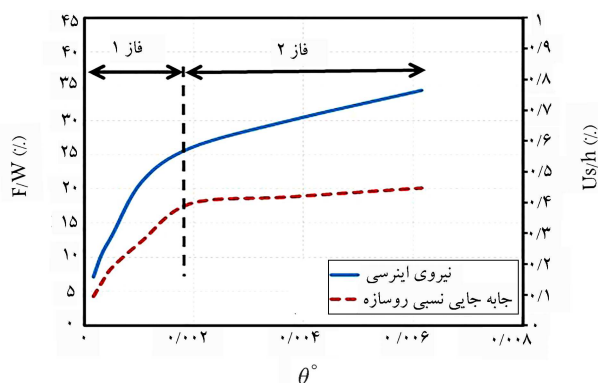
یکنواخت شمع‌های کوتاه برابر  $14^\circ$  درجه می‌باشد. بنابراین، خصوصیات شالوده مرکب از قبیل آرایش شمع‌ها و طول نسبی شمع‌ها بر زاویه دوران تغییر فاز تأثیرگذار می‌باشد. در مقایسه دو مدل با آرایش یکنواخت و طول متفاوت شمع‌ها، مشاهده می‌شود که مدل با طول شمع‌های کوتاه‌تر در زاویه دوران کمتر دچار تغییر فاز شده است. این امر احتمالاً به دلیل بسیج شدن مقاومت جدار در جابه‌جایی کمتر (ناشی از طول کمتر شمع‌ها) است. سختی دورانی دو مدل در فاز اول تقریباً یکسان می‌باشد. با ورود به فاز دوم، سختی دورانی مدل با طول شمع‌های کوتاه‌تر در مقایسه با مدل با طول شمع‌های بلندتر دچار کاهش بیشتری می‌شود. یکی از دلایل این موضوع احتمالاً ناشی از کمتر بودن مجموع مقاومت جدار شمع‌ها (چه در فشار و چه در کشش) در این مدل نسبت به مدل با طول بلندتر شمع‌ها می‌باشد. در مقایسه جابه‌جایی نسبی روسازه در دو مدل، مدل با شمع‌های کوتاه‌تر، جابه‌جایی نسبی کمتری را نشان می‌دهد. بنابراین، از این منظر این مدل ارتفاع بیشتری از رفتار غیرخطی خاک بستر می‌برد. نکته قابل توجه در این زمینه کاهش شدن جابه‌جایی نسبی در فاز دوم در مدل با طول شمع‌های کوتاه‌تر می‌باشد.

در مقایسه دو مدل با آرایش متفاوت و طول یکسان شمع‌ها، همانگونه که در شکل ۱۱ نشان داده شده است، تغییر آرایش شمع‌ها منجر به تغییر ماهیت و رفتار دورانی شالوده و مدل متناظر آن می‌گردد. به این صورت که با تمرکز آرایش شمع‌ها سختی دورانی شالوده کاهش می‌یابد و در نتیجه تغییر فاز در این مدل نیازمند زاویه دوران بیشتر می‌باشد. بنابراین، در هر دو فاز، سختی دورانی مدل با آرایش متمرکز کمتر از مدل با آرایش یکنواخت می‌باشد. همچنین، جابه‌جایی نسبی روسازه در مدل با آرایش متمرکز کمتر از مدل با آرایش یکنواخت می‌باشد. بر اساس مقایسه‌های انجام شده، به نظر می‌رسد از منظر کاهش جابه‌جایی نسبی ناشی از رفتار غیرخطی پی، مدل با آرایش یکنواخت شمع‌های بلند از دو مدل دیگر انتفاع کمتری می‌برد. در ادامه، برای تکمیل مقایسه مدل‌ها با یکدیگر، ضروری است پارامترهایی از قبیل پارامتر نشست ماندگار و همچنین کج‌شدگی ماندگار شالوده کنترل گردد. به طوری که نشست ماندگار و یا کج‌شدگی ماندگار پی نباید از مقدار مجاز تجاوز کند.

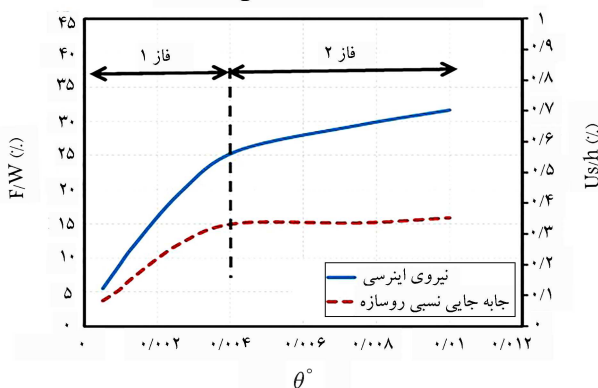
با بررسی نتایج مشخص گردید که کج‌شدگی ماندگار شالوده در هر سه مدل و در تمامی گام‌های بارگذاری ناچیز می‌باشد. از این رو، در شکل ۱۶ تنها نشست ماندگار به صورت تجمعی نرمال شده  $(U_{res}/b)$  برای هر سه مدل ارائه شده است. گفتنی است که نشست ماندگار به بعد شالوده  $(b)$  نرمال شده است. در این شکل



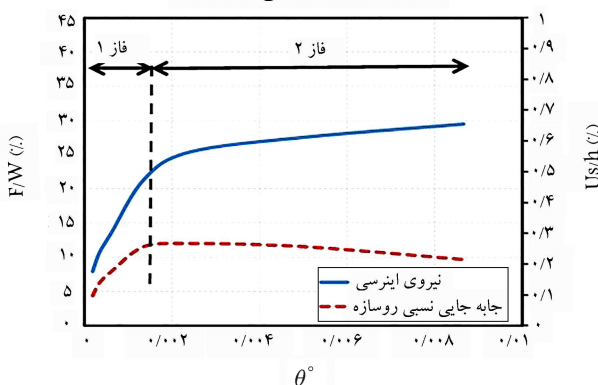
شکل ۱۴. نمودار جابه‌جایی نسبی روسازه نرمال شده با ارتفاع سازه.



الف) مدل آرایش یکنواخت شمع‌های بلند؛



ب) آرایش متمرکز شمع‌های بلند؛



ج) آرایش یکنواخت شمع‌های کوتاه.

شکل ۱۵. تقسیم‌بندی رفتار مدل‌ها به دو فاز.



می‌باشد. در حالی که دو مدل با طول متفاوت شمع‌ها و آرایش یکسان، دارای فرکانس طبیعی یکسان می‌باشند.

۲. با افزایش دوران شالوده ناشی از رفتار غیرخطی پی، مولفه جابه‌جایی نسبی روسازه کاهش می‌یابد. کاهش جابه‌جایی نسبی منجر به کاهش تنش‌ها و کرنش‌های وارده به اجزای سازه‌ای می‌شود که بیانگر انتفاع روسازه از رفتار غیرخطی پی می‌باشد.

۳. مولفه جابه‌جایی نسبی روسازه و جابه‌جایی ناشی از دوران پی، دو مولفه اصلی تشکیل‌دهنده پاسخ روسازه مدل‌ها می‌باشند. با افزایش گام بارگذاری و به تبع آن افزایش زاویه دوران شالوده، سهم مولفه جابه‌جایی نسبی روسازه از جابه‌جایی کل کاهش می‌یابد. این موضوع بیانگر انتفاع روسازه از رفتار غیرخطی پی است، زیرا تنش‌ها و کرنش‌های ایجاد شده در اجزای سازه‌ای ناشی از جابه‌جایی نسبی طبقات روسازه می‌باشد.

۴. نتایج حاصل‌شده بیانگر موثر بودن مشخصات شالوده مرکب شامل آرایش شمع‌ها و طول شمع‌ها بر پاسخ دینامیکی سازه می‌باشد. به این صورت که با تغییر چیدمان شمع‌ها، رفتار دورانی شالوده و مدل متناظر آن تغییر می‌کند. این تغییر موجب کاهش تقاضای دینامیکی و دررفت در مدل با چیدمان متمرکز شمع‌ها می‌شود.

۵. رفتار مدل‌ها برحسب نتایج حاصل‌شده برای نیروی اینرسی مورد تقاضای روسازه و جابه‌جایی نسبی روسازه به دو فاز جداگانه تقسیم شده است. کاهش قابل توجه سختی دورانی مدل و عدم افزایش محسوس جانبی نسبی روسازه از ویژگی‌های اصلی تغییر فاز از فاز اول به فاز دوم در هر مدل می‌باشد.

۶. با توجه به مقایسه‌های انجام شده میان مدل‌ها، اگرچه مدل با آرایش یکنواخت شمع‌های بلند از منظر کاهش جابه‌جایی نسبی ناشی از رفتار غیرخطی پی، از دو مدل دیگر انتفاع کمتری دارد، اما نشست ماندگار آن نسبت به دو مدل دیگر کمتر می‌باشد.

به‌وضوح تأثیر نوع آرایش شمع‌ها و طول شمع‌ها بر نشست ماندگار پی دیده می‌شود. بنابراین، مدل با طول شمع بلندتر اگرچه دارای جابه‌جایی نسبی بیشتری می‌باشد، اما نشست ماندگار آن کمتر از نشست ماندگار دو مدل دیگر می‌باشد. در مجموع از نتایج حاصل‌شده این نکته دریافت می‌گردد که آرایش شمع‌ها و طول شمع‌ها در راستای طراحی بر مبنای عملکرد از اهمیت زیادی برخوردار می‌باشند. عامل کنترل‌کننده در چنین طراحی‌هایی، بررسی نشست و یا کج‌شدگی ماندگار می‌باشد به‌طوری‌که نباید از مقدار مجاز تجاوز کند.

## ۴. نتیجه‌گیری

در این تحقیق، چگونگی تأثیر رفتار غیرخطی پی بر پاسخ دینامیکی سازه‌های لاغر واقع بر شالوده مرکب مورد ارزیابی قرار گرفت. برای این منظور، آزمایش‌های ارتعاش اجباری بر روی سه مدل فیزیکی ساخته شده در آزمایشگاه انجام شد. هر مدل از یک سازه لاغر واقع بر شالوده مرکب تشکیل شده است. شالوده مرکب ساخته شده شامل یک شالوده سطحی تقریباً صلب و شمع‌ها از نوع اصطکاکی می‌باشد که بر بستر ماسه‌ای قرار گرفته است. تفاوت اصلی مدل‌ها در نحوه چیدمان شمع‌ها و همچنین طول نسبی شمع‌های شالوده مرکب می‌باشد. بر مبنای روند بارگذاری ارائه شده در این تحقیق، اثر رفتار غیرخطی پی بر پاسخ روسازه اندازه‌گیری شده است. در این روش، بر اساس گام‌های بارگذاری، بر شدت رفتار غیرخطی شالوده مرکب افزوده شده است. رفتار غیرخطی خاک بستر و بلندشدگی شالوده، دو عامل اصلی رفتار غیرخطی پی در این تحقیق می‌باشد. مهم‌ترین دستاوردهای این تحقیق عبارتند از:

۱. آزمایش‌های ارتعاش آزاد نشان می‌دهد که فرکانس طبیعی سیستم سازه - شالوده مرکب - خاک به آرایش شمع‌ها وابسته است. به‌طوری‌که مدل با آرایش شمع‌های متمرکز، دارای فرکانس طبیعی کمتری نسبت به مدل با آرایش یکنواخت شمع‌ها

## پانویس‌ها

1. Performance-Based
2. NZS 1170.5
3. Direct Displacement-Based
4. Combined Pile-Raft Foundation (CPRF)
5. Backbone Curves

## منابع (References)

1. Martin, GR, Lam, IP., 2000. Earthquake resistant design of foundations-Retrofit of existing foundations. In: ISRM International Symposium.

2. Gajan, S, Raychowdhury, P, Hutchinson, TC, Kutter, BL, Stewart JP., 2010. Application and validation of practical tools for nonlinear soil-foundation interaction analysis. *Earthq Spectra*, 26(1), pp.111-29. <https://doi.org/10.1193/1.3263242>.
3. Moghaddasi, M, Carr, A, Cubrinovski, M, Pampanin, S, Chase, JG, Chatzigogos, CT, and et al., 2012. The effects of soil-foundation interface nonlinearity on seismic soil-structure interaction analysis. In: *New Zealand Society for Earthquake Engineering Conference*, Christchurch, New Zealand.
4. Gazetas, G, Anastasopoulos, I, Apostolou, M., 2007. Shallow and deep foundations under fault rupture or strong seismic shaking. In: *Earthquake geotechnical engineering*. Springer, p.185-215.

5. Pecker, A., 2006. Enhanced seismic design of shallow foundations: example of the Rion Antirion bridge. *4th Athenian Lect Geotech Eng*, 1.
6. Paolucci, R, Shirato, M, Yilmaz, MT., 2008. Seismic behaviour of shallow foundations: Shaking table experiments vs numerical modelling. *Earthq Eng & Struct Dyn*, 37(4), pp.577-95. <https://doi.org/10.1002/eqe.773>.
7. Gajan, S, Kutter, BL., 2008. Capacity, settlement, and energy dissipation of shallow footings subjected to rocking. *J Geotech Geoenvironmental Eng*, 134(8), pp.1129-41. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2008\)134:8\(1129\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2008)134:8(1129)).
8. Ugalde, JA, Kutter, BL, Jeremic, B, Gajan, S., 2007. Centrifuge modeling of rocking behavior of bridges on shallow foundations. In: *Proceedings of the 4th International Conference Earthquake Geotechnical Engineering Thessaloniki, Greece, Paper*, p.25-8. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2008\)134:8\(1129\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2008)134:8(1129)).
9. Deng, L, Kutter, BL, Kunnath, SK., 2012. Centrifuge modeling of bridge systems designed for rocking foundations. *J Geotech geoenvironmental Eng*, 138(3), pp.335-44. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000605](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000605).
10. Drosos, V, Georgarakos, T, Loli, M, Anastasopoulos, I, Zarzouras, O, Gazetas G., 2012. Soil-foundation-structure interaction with mobilization of bearing capacity: Experimental study on sand. *J Geotech Geoenvironmental Eng*, 138(11), pp.1369-86. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000705](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000705).
11. Anastasopoulos, I, Loli, M, Georgarakos, T, Drosos, V., 2013. Shaking table testing of rocking-isolated bridge pier on sand. *J Earthq Eng*, 17(1), pp.1-32. <https://doi.org/10.1080/13632469.2012.705225>.
12. Actions, SD. Part 5: Earthquake Actions, NZS1170. 5., 2004. New Zeal Stand.
13. Anastasopoulos, I, Gazetas, G, Loli, M, Apostolou, M, Gerolymos N., 2010. Soil failure can be used for seismic protection of structures. *Bull Earthq Eng*, 8(2), pp.309-26.
14. Paolucci, R, Figini, R, Petrini, L., 2013. Introducing dynamic nonlinear soil-foundation-structure interaction effects in displacement-based seismic design. *Earthq spectra*, 29(2), pp.475-96. <https://doi.org/10.1193/1.4000135>.
15. Deng, L, Kutter, BL, Kunnath, SK., 2014. Seismic design of rocking shallow foundations: displacement-based methodology. *J Bridg Eng*, 19(11), 4014043. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)BE.1943-5592.0000616](https://doi.org/10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0000616).
16. Pecker, A, Paolucci, R, Chatzigogos, C, Correia, AA, Figini, R., 2014. The role of non-linear dynamic soil-foundation interaction on the seismic response of structures. *Bull Earthq Eng*, 12(3), pp.1157-76.
17. Adamidis, O, Gazetas, G, Anastasopoulos, I, Argyrou C., 2014. Equivalent-linear stiffness and damping in rocking of circular and strip foundations. *Bull Earthq Eng*, 12(3), pp.1177-200.
18. Nouri, AR, Anastasopoulos, I, Vetr, MG, Kalantari, A., 2016. Efficiency of low-rise steel rocking frames founded on conventional and rocking foundations. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 84, pp.190-203. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2016.02.002>.
19. Yeganeh, N, Fatahi, B., 2019. Effects of choice of soil constitutive model on seismic performance of moment-resisting frames experiencing foundation rocking subjected to near-field earthquakes. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 121, pp.442-59. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2019.03.027>.
20. Sadjadi, M, Fadaee, M, Ghannad, MA, Jahankhah, H., 2021. Numerical study of stiff diaphragm walls used to improve the performance of rocking foundation systems. *Journal of Earthquake Engineering*, 25(13), pp.2628-50. <https://doi.org/10.1080/13632469.2019.1631233>.
21. Sadjadi, M, Fadaee, M, Ghannad, MA, Jahankhah, H., 2022. Seismic performance of deformable rocking soil-structure systems subjected to pulse-type excitations. *Journal of Earthquake Engineering*, pp.1-29. <https://doi.org/10.1080/13632469.2022.2134232>.
22. Loli, M, Knappett, JA, Brown, MJ, Anastasopoulos I, Gazetas G., 2015. Centrifuge testing of a bridge pier on a rocking isolated foundation supported on unconnected piles. In *6th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering*, p.362.
23. Ha, JG, Ko, KW, Jo, SB, Park, HJ, Kim, DS., 2019. Investigation of seismic performances of unconnected pile foundations using dynamic centrifuge tests. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 17, pp.2433-58.
24. Cunha, RP, Poulos, HG, Small, JC., 2001. Investigation of design alternatives for a piled raft case history. *J Geotech geoenvironmental Eng*, 127(8), pp.635-41.
25. Poulos, HG., 2001. Piled raft foundations: Design and applications. *Geotechnique*, 51(2), pp.95-113.
26. Reul, O, Randolph, MF., 2004. Design strategies for piled rafts subjected to nonuniform vertical loading. *J Geotech Geoenvironmental Eng*, 130(1), pp.1-13. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2004\)130:1\(1\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2004)130:1(1)).
27. Nguyen, DDC, Kim, D-S, Jo, S-B., 2014. Parametric study for optimal design of large piled raft foundations on sand. *Comput Geotech*, 55, pp.14-26. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2013.07.014>.
28. Rabiei, M, Choobbasti, AJ., 2016. Piled raft design strategies for high rise buildings. *Geotechnical and Geological Engineering*, 34(1), pp.75-85.
29. Bandyopadhyay, S, Sengupta, A, Parulekar, YM., 2020. Behavior of a combined piled raft foundation in a multi-layered soil subjected to vertical loading. *Geomech. Eng*, 21(4), pp.379-90. <http://dx.doi.org/10.12989/gae.2020.21.4.379>.
30. Bhartiya, P, Chakraborty, T, Basu, D., 2022. Load-settlement response of piled raft foundations in sand.

- Geomechanics and Geoengineering*, 17(4), pp.1260-83. <https://doi.org/10.1080/17486025.2021.1928767>.
31. Asefa, B, Assefa, E, Pantelidis, L, Sachpazis, C., 2022. Pile configuration optimization on the design of combined piled raft foundations. *Modeling Earth Systems and Environment*, 8(3), pp.3461-72.
  32. Katzenbach, R, Arslan, U, Reul, O., 2020. Soil-structure-interaction of a piled raft foundation of a 121 m high office building on loose sand in Berlin. In *Deep Foundations on Bored and Auger Piles* pp.215-221. CRC Press. <http://dx.doi.org/10.1201/9781003078517-28>.
  33. Reinert, ET, Brandenberg, SJ, Stewart, JP, Moss, RE. Dynamic field test of a model levee founded on peaty organic soil using an eccentric mass shaker.
  34. Farahmand, K, Lashkari, A, Ghalandarzadeh, A., 2016. Firoozkuh sand: introduction of a benchmark for geomechanical studies. *Iran J Sci Technol Trans Civ Eng*, 40(2), pp.133-48. <http://dx.doi.org/10.1007/s40996-016-0009-0>.