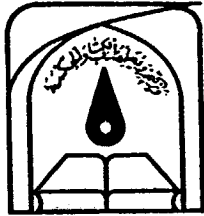


بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

۱۳۸۰ / ۷ / ۲۰

وزارت اطلاعات و آمار علمی ایران  
تیم ملی ایران

وزارت اطلاعات و آمار علمی ایران  
تیم ملی ایران



**دانشگاه تربیت مدرس**

دانشکده فنی و مهندسی

پایان نامه دکتر ادراک گرایش مهندسی سازه

**تأثیر زلزله‌های چند مؤلفه‌ای بر  
ساختمانهای نامتقارن متکی بر تکیه‌گاه  
لغزشی و فونداسیون انعطاف‌پذیر**

استاد راهنما:

جناب آقای حمزه شکیب

استاد مشاور:

جناب آقای احمد فحیمی

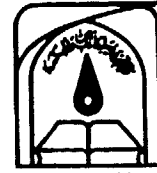
013323

توسط:

۳۹۴۰۸

اصغر فولادگر

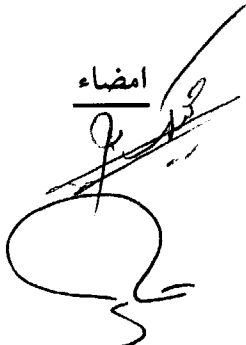

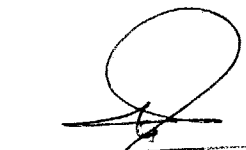





بهار ۸۰



دانشگاه تربیت مدرس

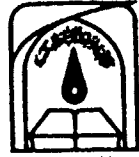
## تاییدیه هیات داوران

آقای اصغر فولادگر رساله دکتری ۲۴ واحدی خود را با عنوان تأثیر زلزله‌های چند مؤلفه‌ای بر ساختمانهای نامتقارن متکی بر تکیه گاه لغزشی و فونداسیون انعطاف پذیر در تاریخ ۱۳/۴/۸۰ ارائه کردند. اعضای هیات داوران نسخه نهائی این رساله را از نظر فرم و محتوی تایید و پذیرش آنرا برای تکمیل درجه دکتری مهندسی عمران باگرایش سازه پیشنهاد می‌کنند. ب.ع. ۲

<u>امضاء</u>	<u>نام و نام خانوادگی</u>	<u>اعضای هیات داوران</u>
	آقای دکتر شکیب	۱- استاد راهنما:
	آقای دکتر فخمی	۲- استادان مشاور:
	—	۳- استادان ممتحن:
	آقای دکتر دانشجو	
	آقای دکتر احمدی	
	آقای دکتر تهرانی زاده	
	آقای دکتر مقدم	
	آقای دکتر دانشجو	۴- مدیر گروه: (یا نماینده گروه تخصصی)

این نسخه به عنوان نسخه نهایی پایان نامه / رساله مورد تایید است.

امضای استاذ راهنما:



بسمه تعالی

## آیین‌نامه چاپ پایان‌نامه (رساله)‌های دانشجویان دانشگاه تربیت مدرس

نظر به اینکه چاپ و انتشار پایان‌نامه (رساله)‌های تحصیلی دانشجویان دانشگاه تربیت مدرس، مبین بخشی از فعالیت‌های علمی - پژوهشی دانشگاه است بنابراین به منظور آگاهی و رعایت حقوق دانشگاه، دانش‌آموختگان این دانشگاه نسبت به رعایت موارد ذیل متعهد می‌شوند:

- ماده ۱ در صورت اقدام به چاپ پایان‌نامه (رساله)‌ی خود، مراتب را قبلاً به طور کتبی به «دفتر نشر آثار علمی» دانشگاه اطلاع دهد.
- ماده ۲ در صفحه سوم کتاب (پس از برگ شناسنامه)، عبارت ذیل را چاپ کند:  
«کتاب حاضر، حاصل پایان‌نامه کارشناسی ارشد/رساله دکتری نگارنده در رشته سازه است که در سال ۱۳۸۰ (در دانشکده عمران) دانشگاه تربیت مدرس به راهنمایی سرکارخانم/جناب آقای دکتر حمزه شکیب، مشاوره سرکارخانم/جناب آقای دکتر احمد فحیمی و مشاوره سرکار خانم/جناب آقای دکتر از آن دفاع شده است.»
- ماده ۳ به منظور جبران بخشی از هزینه‌های انتشارات دانشگاه، تعداد یک درصد شمارگان کتاب (در هر نوبت چاپ) را به «دفتر نشر آثار علمی» دانشگاه اهدا کند. دانشگاه می‌تواند مازاد نیاز خود را به نفع مرکز نشر در معرض فروش قرار دهد.
- ماده ۴ در صورت عدم رعایت ماده ۳، ۵۰٪ بهای شمارگان چاپ‌شده را به عنوان خسارت به دانشگاه تربیت مدرس، تأدیه کند.
- ماده ۵ دانشجو تعهد و قبول می‌کند در صورت خودداری از پرداخت بهای خسارت، دانشگاه می‌تواند خسارت مذکور را از طریق مراجع قضایی مطالبه و وصول کند؛ به علاوه به دانشگاه حق می‌دهد به منظور استیفای حقوق خود، از طریق دادگاه، معادل وجه مذکور در ماده ۴ را از محل توقیف کتابهای عرضه‌شده نگارنده برای فروش، تأمین نماید.
- ماده ۶ اینجانب اصغر فولادگر دانشجوی رشته سازه مقطع دکتری تعهد فوق و ضمانت اجرایی آن را قبول کرده، به آن ملتزم می‌شوم.

نام و نام خانوادگی: اصغر فولادگر

تاریخ و امضا: ۸۰/۳/۱۳

تقدیم به :

همسر گرامی و دو فرزند عزیزم

## تشکر و قدردانی

پس از ممد و سپاس خداوند بزرگ، لازم می‌دانم از استاد  
راهنمای محترم

### آقای دکتر حمزه شکیب

که در انجام این تحقیق و تدوین آن همواره از توجهات و  
راهنمایی ایشان بهره‌مند بوده‌ام صمیمانه تشکر و  
قدردانی کنم. از راهنماییهای بی‌دریغ استاد مشاور محترم

### آقای دکتر احمد فخیمی

که مشاورت این پایان‌نامه را برعهده داشته‌اند نهایت  
سپاسگزاری خود را ابراز می‌دارم. از همسر عزیزم که پیوسته  
صبر، حمایتها و همدلی‌اش مشوق و همراه من در امر  
ادامه تمصیل بوده است تشکر و قدردانی بسیار دارم. از  
اعضای هیئت علمی دانشکده فنی - مهندسی دانشگاه  
تربیت مدرس تشکر می‌کنم.

## ● چکیده

هنگامی که مرکز جرم و مرکز سختی ساختمان برهم منطبق نباشند و در معرض حرکات انتقالی زمین قرار گیرند سیستم سازه‌ای علاوه بر حرکت‌های جانبی دارای حرکت پیچشی نیز خواهد شد. اثر لغزش و انعطاف پذیری فونداسیون در ساختمانهای نامتقارن در معرض زلزله‌های چند مؤلفه‌ای اخیراً مورد توجه بسیاری از محققین قرار گرفته است. در این مطالعه پاسخ لرزه‌ای یک مدل سه بُعدی با خروج از مرکزیت سختی در معرض زلزله‌های چند مؤلفه‌ای قوی متکی بر تکیه گاههای لغزشی خالص و فونداسیون انعطاف پذیر مورد بررسی قرار گرفته است.

در بکارگیری سیستم‌های لغزشی بین پایه و فونداسیون، با ارائه یک مدل اجزاء محدود شامل المان سازه فوقانی و المانهای تماسی لغزشی جهت مدل کردن لغزش و بلندشدگی پایه از فونداسیون، رفتار ساختمانهای متقارن و نامتقارن متکی بر تکیه گاههای لغزشی خالص در معرض مؤلفه‌های انتقالی و قائم زلزله مورد بررسی قرار گرفته است. ساختمان نامتقارن با جرمهای متمرکز در کف طبقه و پایه صلب با شش درجه آزادی در هر کدام از آنها مدل می‌شود. پاسخ ساختمانهای متقارن و نامتقارن و اثر مؤلفه قائم زلزله بر روی آنها در معرض تعدادی از زلزله‌های واقعی بسیار قوی با انجام یک سری مطالعات پارامتریک مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. نتایج نشان می‌دهد که مؤلفه قائم زلزله بر پاسخهای افقی سیستم‌های متقارن و نامتقارن تأثیر قابل ملاحظه‌ای دارد و ممکن است بدون در نظر گرفتن اثر مؤلفه قائم زلزله نتایج بدست آمده مخصوصاً برای پاسخ پیچشی دست پایین برآورد شود.

در پاسخ لرزه‌ای ساختمانهای نامتقارن متکی بر فونداسیون انعطاف پذیر با رفتار خطی و غیرخطی خاک با ارائه و توسعه فرمولاسیون یک المان تماسی بین پایه صلب ساختمان و المان جامد زیر آن، سازه نامتقارن متکی بر فونداسیون انعطاف پذیر به صورت سه بُعدی به روش اجزاء محدود مدل و در دامنه زمان تحلیل می‌شود. در مدل سازی با در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه به روش تلفیق اجزاء محدود، خاک و سازه به عنوان میدان نزدیک و مرزهای جاذب به عنوان میدان دور به کار خواهند رفت. مدل کولمب به عنوان مدل رفتار غیرخطی خاک انتخاب می‌شود. اثرات ساختگاه بطور مجزا بهمراه اثر اندرکنش خاک و سازه با تحلیل‌های خطی و غیرخطی در میدان آزاد و سیستم سازه - فونداسیون، با

انجام یک سری مطالعات پارامتریک شامل خروج از مرکزیت استاتیکی، نسبت فرکانس پیچشی به فرکانس جانبی غیردرگیر، پرپود سیستم غیردرگیر، نسبت سرعت موج برشی و اثر تحریک زلزله و تغییرات خواص غیرخطی خاک ( $\phi$ , C) برای بررسی اثر سرعت موج برشی و رفتار غیرخطی خاک بر روی پاسخهای ساختمان نامتقارن با توسعه یک برنامه کامپیوتری مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که صرف نظر کردن از اثر اندرکنش خاک و سازه در ساختمانهای نامتقارن همیشه محافظ کارانه نخواهد بود و ممکن است پاسخها بطور قابل توجهی افزایش یابند و پاسخ سیستم‌های نامتقارن سازه - فونداسیون بطور خیلی قوی وابسته به پارامترهای غیرخطی خاک می‌باشد و هرچه فونداسیون در معرض نیروی کمتری به حد تسلیم برسد تأثیرگذاری آن بر روی پاسخها افزایش می‌یابد.

**کلید واژه :** سازه‌های نامتقارن - اندرکنش خاک و سازه - رفتار غیرخطی - زلزله‌های چندمؤلفه‌ای - لغزشی خالص - حرکت پیچشی - فونداسیون انعطاف پذیر - المان تماسی.



# فهرست مطالب

صفحه

عنوان

## ● فصل ۱

۱	مقدمه
۱	۱-۱- کلیات
۵	۲-۱- هدف از مطالعه
۶	۳-۱- مفاد مطالعه حاضر
۷	۴-۱- فصل‌های پایان‌نامه

## ● فصل ۲

### مروری بر تحقیقات گذشته

۱۰	۱-۲- مقدمه
۱۱	۲-۲- سیستم‌های جداساز
۱۸	۳-۲- پیچش درگیر در ساختمانهای نامتقارن
۱۸	۱-۳-۲- پیچش درگیر در ساختمانهای نامتقارن با پایه‌گیردار
۲۰	۲-۳-۲- پیچش درگیر در ساختمانهای نامتقارن متکی بر سیستم‌های جداساز
۲۱	۴-۲- تأثیر مؤلفه قائم زلزله در سازه‌های متقارن و نامتقارن متکی بر سیستم‌های جداساز
۲۳	۵-۲- اثر اندرکنش خاک و سازه
۲۵	۱-۵-۲- مدل صفحه‌ای
۲۶	۲-۵-۲- مدل سه‌بعدی
۳۰	۶-۲- روشهای در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه

۳۰	۱-۶-۲- مدل فنر و کمک فنر در پایه سازه
۳۱	۲-۶-۲- مدل تیر برشی
۳۱	۳-۶-۲- مدل نیم فضای الاستیک یا ویسکوالاستیک
۳۱	۴-۶-۲- روش اجزاء محدود
۳۳	۱-۴-۶-۲- مرزهای ساده
۳۳	۲-۴-۶-۲- مرزهای ساکت
۳۶	۵-۶-۲- روش زیرسازه با استفاده از ماتریس سختی دینامیکی خاک (یکی از روشهای مخلوط)
۳۷	۷-۲- مدل اجزاء محدود در المانهای درز تماسی
۴۰	اشکال

### ● فصل ۳

#### پاسخ لرزه‌ای ساختمانهای متقارن و نامتقارن متکی بر تکیه‌گاههای

#### لغزشی خالص در معرض مؤلفه‌های همزمان افقی و قائم زلزله

۴۲	۱-۳- مقدمه
۴۴	۲-۳- پاسخ لرزه‌ای ساختمانهای متقارن متکی بر تکیه‌گاههای لغزشی از نوع خالص
۴۴	۱-۲-۳- سیستم و مدل سازه‌ای
۴۷	۱-۱-۲-۳- رفتار غیرخطی المان فنر-میراگر
۴۸	۲-۲-۳- معادلات تعادل سیستم دینامیکی
۴۹	۳-۲-۳- روش حل
۴۹	۴-۲-۳- مطالعه عددی سیستم متقارن
۵۳	۳-۳- پاسخ لرزه‌ای ساختمانهای نامتقارن متکی بر روی تکیه‌گاههای لغزشی از نوع خالص

۵۴	۱-۳-۳- سیستم و مدل سازه‌ای.....
۵۹	۱-۱-۳-۳- رفتار غیرخطی در المان تماسی لغزشی.....
۶۰	۲-۳-۳- معادلات تعادل سیستم دینامیکی.....
۶۱	۳-۳-۳- مطالعه عددی سیستم نامتقارن.....
۶۳	۱-۳-۳-۳- اثر خروج از مرکزیت $(\frac{e_y}{a})$ .....
۶۵	۲-۳-۳-۳- اثر نسبت فرکانس پیچشی به فرکانس جانبی $(\frac{\omega_\theta}{\omega_x})$ .....
۶۶	۳-۳-۳-۳- اثر پریود $(T_x)$ .....
۶۷	۴-۳-۳-۳- اثر نسبت خروج از مرکزیت‌ها $(\frac{e_x}{e_y})$ .....
۶۸	۵-۳-۳-۳- اثر نسبت پریودهای جانبی $\frac{T_y}{T_x}$ .....
۶۹	۶-۳-۳-۳- اثر نسبت پریود قائم به افقی $\frac{T_z}{T_x}$ .....
۷۰	۴-۳-۳- اثر تحریک زلزله.....
۷۲	۴-۳- کنترل نتایج بدست آمده و پاسخ سیستم نامتقارن تحت تحریک سینوسی.....
۷۳	۵-۳- نتیجه‌گیری.....
۷۳	۱-۵-۳- سیستم متقارن.....
۷۴	۲-۵-۳- سیستم نامتقارن.....
۷۶	فهرست علائم.....
۷۸	اشکال.....

## ● فصل ۴

### پاسخ لرزه‌ای ساختمانهای نامتقارن بر فونداسیون انعطاف‌پذیر خطی

۱۰۸	۱-۴- مقدمه.....
-----	-----------------

۲-۴-سیستم و مدل سازه‌ای.....	۱۱۰
۲-۴-۱-المان تماسی صلب - جامد سه‌بُعدی در حدفاصل سازه و خاک .....	۱۱۲
۲-۴-۱-۱-روش تحلیل برای رفتار غیرخطی المان تماسی صلب - جامد .....	۱۱۷
۳-۴-معادلات تعادل سیستم دینامیکی اندرکنش خاک و سازه .....	۱۱۸
۳-۴-۱-تحلیل حرکت میدان آزاد.....	۱۱۹
۲-۳-۴-ماتریس استهلاک ویسکوز .....	۱۲۰
۳-۳-۴-پارامترهای ژئومکانیکی خاک در مدل میدان آزاد و مدل اندرکنش خاک و سازه.....	۱۲۱
۴-۴-مطالعه عددی سیستم‌های نامتقارن بر فونداسیون انعطاف پذیر خطی .....	۱۲۲
۴-۴-۱-اثر نسبت خروج از مرکزیت $e_y/a$ .....	۱۲۶
۴-۴-۱-۱-ساختمانهای کوتاه .....	۱۲۷
۴-۴-۲-ساختمانهای متوسط.....	۱۲۸
۴-۴-۳-ساختمانهای متوسط بلند .....	۱۲۹
۴-۴-۴-ساختمانهای بلند .....	۱۳۱
۲-۴-۴-اثر پریود $T_x$ .....	۱۳۳
۳-۴-۴-اثر انعطاف پذیری فونداسیون .....	۱۳۵
۴-۴-۴-اثر نسبت فرکانس پیچشی به فرکانس جانبی غیردرگیر .....	۱۳۸
۵-۴-۴-اثر تحریک زلزله .....	۱۴۰
۵-۴-نتیجه گیری .....	۱۴۱
فهرست علائم .....	۱۴۴
اشکال .....	۱۴۷

## ● فصل ۵

پاسخ لرزه‌ای ساختمانهای نامتقارن متکی بر فونداسیون انعطاف‌پذیر غیرخطی

۱۸۲	۱-۵- مقدمه
۱۸۳	۲-۵- سیستم و مدل سازه‌ای
۱۸۴	۳-۵- معادلات تعادل سیستم دینامیکی اندرکنش خاک و سازه با رفتار غیرخطی خاک
۱۸۵	۴-۵- معادله تعادل سیستم دینامیکی
۱۸۵	۵-۵- مطالعه عددی
۱۸۷	۱-۵-۵- اثر نسبت خروج از مرکزیت $\frac{e_y}{a}$
۱۸۸	۲-۵-۵- تأثیر پریود $T_x$
۱۸۹	۳-۵-۵- اثر پارامترهای غیرخطی مدل کولمب
۱۹۱	۴-۵-۵- نتیجه‌گیری
۱۹۲	فهرست علائم
۱۹۴	اشکال

## ● فصل ۶

نتیجه‌گیری و پیشنهادات برای تحقیقات آینده

۲۰۳	۱-۶- نتیجه‌گیری
۲۰۴	۱-۱-۶- سیستم‌های متقارن متکی بر تکیه‌گاه لغزشی
۲۰۵	۲-۱-۶- سیستم‌های نامتقارن متکی بر تکیه‌گاه لغزشی
۲۰۶	۳-۱-۶- سیستم‌های نامتقارن متکی بر فونداسیون انعطاف‌پذیر با رفتار خطی خاک

۴-۱-۶- سیستم‌های نامتقارن متکی بر فونداسیون انعطاف پذیر با رفتار غیرخطی خاک ..... ۲۰۸

۲-۶- پیشنهادات برای تحقیقات آینده ..... ۲۰۹

● **مراجع** ..... ۲۱۰

● **پیوست A**

۱-A- مقدمه ..... ۲۲۸

۲-A- حل معادلات تعادل استاتیکی به روشهای نیوتن رافسون و نیوتن رافسون ..... ۲۲۹  
اصلاح شده

۳-A- محاسبه تنش و نیروهای داخلی در هر تکرار از حل معادلات سازه ..... ۲۳۴

۱-۳-A- روش انتگرال گیری نقطه میانی ..... ۲۳۶

۱-۱-۳-A- محاسبات برای نیم نمو ..... ۲۳۷

۲-۱-۳-A- محاسبات برای نمو کامل ..... ۲۴۶

۴-A- حل معادلات تعادل دینامیکی (انتگرال گیری عددی) ..... ۲۴۸

۵-A- کنترل همگرایی در حل معادلات ..... ۲۵۱

اشکال ..... ۲۵۳

● **پیوست B** ..... ۲۵۹

● **واژنامه فارسی به انگلیسی** ..... ۲۶۲

● **واژنامه انگلیسی به فارسی** ..... ۲۶۷

# فصل ۱

## مقدمه

### ۱-۱- کلیات

هنگام وقوع زلزله، نیروهای اینرسی در سازه‌ها ایجاد می‌شود. شدت این نیروها گذشته از خصوصیات تحریک زلزله به خواص دینامیکی سازه، خاک، حدفاصل پایه سازه و خاک و به‌طور کلی به اندرکنش خاک و سازه بستگی خواهد داشت. رفتار سازه‌های نامتقارن و نیروهای اینرسی ایجاد شده در آنها در معرض تحریک زلزله در مقایسه با سازه‌های متقارن متفاوت خواهد بود. وقتی که ساختمانهای نامتقارن در معرض تحریکات زلزله قرار می‌گیرند علاوه بر تحمل حرکات جانبی، حرکت پیچشی را نیز متحمل خواهند شد و نتیجتاً نیروها و تغییرشکل‌های ایجاد شده در المانهای مقاوم در چنین ساختمانهایی متفاوت خواهد بود. این اختلاف به میزان خروج از مرکزیت و دیگر پارامترهای مشخصه ساختمانهای نامتقارن بستگی دارد. فاصله بین مرکز جرم و مرکز سختی را خروج از مرکزیت سختی استاتیکی سازه می‌نامند. برای درک رفتار چنین ساختمانهایی در معرض تحریک زلزله، مدل‌های ساده شده سه‌بعدی از سازه‌های نامتقارن با پیچش درگیر توسط محققان مختلف به کار رفته است و رفتار خطی و غیرخطی این سازه‌ها مورد بررسی قرار گرفته است [۶۴-۶۱ و ۹۲-۷۰].

تحقیقات گذشته نشان داده است [۶۳ و ۶۴] که پاسخ الاستیک خطی یک سازه نامتقارن با پیچش درگیر و پایه گیردار بستگی به خصوصیات دینامیکی سازه نامتقارن شامل: خروج از مرکزیت، نسبت