



پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله

پایان نامه کارشناسی ارشد

مهندسی عمران - مهندسی زلزله

# ارزیابی رفتار لرزه ای تپه های دوبعدی نیم سینوسی مجاور

دانشجو

کیاوش مهدب

استاد راهنما

دکتر محسن کمالیان

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

تقدیم به

پدر و مادر عزیزم

## اعضاء هيئت داوران :

امضاء

استاد راهنما

امضاء

استاد مشاور

امضاء

استاد مدعو (خارجی)

امضاء

استاد مدعو (داخلي)

امضاء

مدیر تحصیلات تکمیلی

*In the name of God*

**Evaluating Seismic Behavior  
of  
2D semi-Sine Shaped Adjacent Hills**

**By:  
Kiavash mohazzab**

**Colleague :  
Mohsen kamalian**



**International Institute of Earthquake Engineering and Seismology**



پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله

## (پایان نامه کارشناسی ارشد)

عنوان

بررسی رفتار لرزه ای تپه های مرکب

توسط

کیاوش مهذب

این پایان نامه به عنوان بخشی از فعالیتهای علمی متدرج در ضوابط دوره های تحصیلات تکمیلی در پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله، جهت دریافت درجه کارشناسی ارشد رشته مهندسی عمران - مهندسی زلزله در تاریخ ۸۹/۶/۲۹ ارائه شده است.

امضاء کنندگان زیر، متن رساله حاضر را مطالعه نموده و آن را بر طبق ضوابط تحصیلات تکمیلی پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله، برای دریافت کارشناسی ارشد با شماره نهایی ۱۹۷۵ و درجه مورد تأیید قرار داده اند.

ردیف	مشخصات هیات داوران	نام و نام خانوادگی	رتبه علمی	دانشگاه یا موسسه	امضاء
۱	استاد راهنما	دکتر کمالیان	دانشیار	پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله	
۳	استاد مشاور	دکتر حجق شناس	استادیار	پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله	
۳	استاد مدعو	دکتر سهرابی بیدار	استادیار	دانشگاه تهران	
۴	استاد ممتحن	دکتر شفعی	استادیار	پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله	
۵	نماینده تحصیلات تکمیلی	دکتر شفعی	استادیار	پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله	
۶	مدیر تحصیلات تکمیلی	دکتر زعفرانی	استادیار	پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله	

## چکیده

تحقیقات عددی پیشین بر روی رفتار لرزه‌ای عوارض توپوگرافی عمدتاً به انواع منفرد آنها محدود بوده است. در همین حال نگاه واقع‌بینانه به طبیعت اطراف نشان می‌دهد که تنوع و پیچیدگی ناهمواری‌های سطح زمین بسیار بیشتر است و عوارض توپوگرافی غالباً به شکل مرکب ظاهر می‌شوند. هدف این بررسی ارزیابی رفتار لرزه‌ای تپه‌های دوبعدی نیم سینوسی مجاور است که در برابر امواج مهاجم قائم برشی (SV) قرار گرفته‌اند. پاسخ دادن به سؤالاتی نظیر آنکه آیا می‌توان تپه‌های مرکب را با مدل‌های منفرد معادلسازی نمود و یا اینکه نتایج بدست آمده تا چه اندازه ما را به آنچه در مشاهدات تجربی دیده می‌شود نزدیکتر خواهد کرد، ما را در رسیدن به هدف فوق یاری می‌کند. نتایج بدست آمده از مطالعات حساسیت‌سنجی عددی بیانگر آن است که الگوی کلی رفتار لرزه‌ای تپه‌های مرکب مجاور با حالت تپه منفرد مشابه است. نفوس مجاورت تپه‌ها با یکدیگر، پتانسیل بزرگ‌نمایی قله‌ها و کوچکنمایی کناره‌ها را افزایش می‌دهد. با این حال نمی‌توان تپه‌های مرکب چندگانه را با یک تپه منفرد دارای نسبت شکلی دیگر معادل‌سازی کرد. همچنین اگرچه فضای میان دو تپه به لحاظ کیفی رفتاری شبیه رفتار دره منفرد دارد، اما به لحاظ کمی نمی‌توان آن را با یک دره دارای نسبت شکل معادل شبیه‌سازی کرد. بطور کلی تپه‌های دارای نسبت شکل بزرگتر اثر بیشتری بر تپه‌های کوچکتر داشته و نحوه قرارگیری تپه‌ها در کنار یکدیگر نیز روی پتانسیل بزرگ‌نمایی اثرگذار می‌باشد. ایجاد فاصله بین تپه‌ها پتانسیل بزرگ‌نمایی و کوچکنمایی را در نقاط مختلف تپه‌ها افزایش می‌دهد. مقایسه داده‌های بدست آمده در این مطالعه با مطالعات تجربی انجام شده در ادبیات فنی نیز نشان می‌دهد که در نظر گرفتن اثر مجاورت تپه‌ها نتایج را به واقعیت نزدیکتر می‌نماید اگر چه لزوم درنظر گرفتن سایر پیچیدگی‌های طبیعی کماکان احساس می‌شود.

## واژه‌های کلیدی

تپه‌های مرکب مجاور، رفتار لرزه‌ای، پتانسیل بزرگ‌نمایی، نسبت شکل، نحوه قرارگیری، پیچیدگی‌های طبیعی.

## فهرست مطالب

صفحه	عنوان
الف.....	چکیده
ن.....	مقدمه
۱.....	فصل اول مروری بر ادبیات فنی
۲.....	۱-۱) مقدمه
۳.....	۲-۱) برآورد رفتار لرزه‌ای عوارض توپوگرافی دو بعدی
۳.....	۱-۲-۱) برآورد رفتار لرزه‌ای عوارض توپوگرافی دو بعدی به روش‌های تحلیلی
۳.....	۲-۲-۱) برآورد رفتار لرزه‌ای عوارض توپوگرافی دو بعدی به روش‌های تجربی
۱۹.....	۳-۲-۱) برآورد رفتار لرزه‌ای عوارض توپوگرافی دو بعدی به روش‌های مبتنی بر مدلسازی عددی
۲۹.....	۴-۲-۱) برآورد رفتار لرزه‌ای عوارض توپوگرافی دو بعدی به روش‌های مبتنی بر مدلسازی فیزیکی
۳۰.....	۳-۱) برآورد رفتار لرزه‌ای تپه‌های دو بعدی سینوسی شکل
۳۰.....	۱-۳-۱) برآورد رفتار لرزه‌ای تپه‌های دو بعدی سینوسی شکل منفرد
۴۱.....	۲-۳-۱) برآورد رفتار لرزه‌ای تپه‌های دو بعدی سینوسی شکل مجاور
۴۴.....	۴-۱) نتیجه‌گیری
۴۵.....	فصل دوم کاربرد روش اجزاء مرزی در تحلیل لرزه‌ای عوارض توپوگرافی
۴۶.....	۱-۲) مقدمه
۴۷.....	۲-۲) معادلات اساسی
۴۷.....	۳-۲) جداسازی زمانی و مکانی
۴۷.....	۱-۳-۲) جداسازی در زمان
۴۸.....	۲-۳-۲) جداسازی در مکان



۴۹	..... الگوریتم حل (۴-۲)
۵۱	..... مثالهای عددی (۵-۲)
۵۲	..... دره خالی با مقطع نیم دایره (۱-۵-۲)
۵۳	..... تابش قائم (۱-۱-۵-۲)
۵۳	..... تابش مایل (۲-۱-۵-۲)
۵۶	..... دره آبرفتی با مقطع نیم دایره (۲-۵-۲)
۵۷	..... حالت همگن (۱-۲-۵-۲)
۵۸	..... حالت غیر همگن (۲-۲-۵-۲)
۶۱	..... تپه با مقطع سینوسی (۳-۵-۲)
۶۳	..... نتیجه گیری (۶-۲)
۶۴	..... فصل سوم متدلوژی مطالعات
۶۵	..... مقدمه (۱-۳)
۶۵	..... متدلوژی مطالعات (۲-۳)
۶۶	..... پارامترهای درگیر در مطالعات (نسبت شکل، فرکانس و پرپود بی بعد، محدوده پرپودیک تعریف شده) (۱-۲-۳)
۶۶	..... نسبت شکل (۱-۱-۲-۳)
۶۶	..... فرکانس و پرپود بدون بعد (۲-۱-۲-۳)
۶۷	..... محدوده پرپودیک تعریف شده (۳-۱-۲-۳)
۶۷	..... تعریف موج ورودی (۲-۲-۳)
۶۸	..... مشخصات هندسی مدلها (۳-۲-۳)
۶۸	..... تپه‌های دوگانه (۱-۳-۲-۳)
۶۹	..... تپه‌های سه‌گانه (۲-۳-۲-۳)
۶۹	..... فرضیات حاکم بر مطالعات (۴-۲-۳)
۷۰	..... نتایج تحلیل (۵-۲-۳)
۷۰	..... الگوی تغییر مکان (زمان-مکان-تغییر مکان) برای کل تپه (۱-۵-۲-۳)

۷۰	۲-۳-۵) الگوی تغییر مکان (زمان- مکان- تغییر مکان) برای کل تپه
۷۰	۲-۳-۵) الگوی بزرگنمایی (فرکانس- مکان- بزرگنمایی) برای کل تپه
۷۱	۲-۳-۵) منحنی‌های بزرگنمایی در تاج تپه
۷۱	۲-۳-۴) منحنی‌های بزرگنمایی در سایر نقاط
<b>فصل چهارم رفتار تپه‌های نیم سینوسی منفرد</b>	
۷۲	۱-۴) مقدمه
۷۳	۲-۴) مشخصات مدل‌سازی (هندسه مدل، موج مهاجم، ابعاد مش بندی و طول گام زمانی در تحلیل)
۷۴	۳-۴) نتایج تحلیل
۷۵	۱-۳-۴) الگوی تغییر مکان (زمان- مکان- تغییر مکان) برای کل تپه
۷۵	۲-۳-۴) الگوی بزرگنمایی (فرکانس- مکان- بزرگنمایی) برای کل تپه
۷۸	۳-۳-۴) منحنی‌های بزرگنمایی در تاج تپه
۸۰	۴-۴) نتیجه گیری
<b>فصل پنجم رفتار تپه‌های نیم سینوسی مرکب دوگانه همسان</b>	
۸۱	۱-۵) رفتار لرزه‌ای تپه‌های مرکب دوگانه همسان
۸۲	۲-۵) مشخصات مدل‌سازی (هندسه مدل، موج مهاجم، ابعاد مش بندی و طول گام زمانی در تحلیل)
۸۳	۳-۵) نتایج تحلیل
۸۴	۱-۳-۵) الگوی تغییر مکان (زمان- مکان- تغییر مکان) برای کل تپه
۸۶	۲-۳-۵) الگوی بزرگنمایی (فرکانس- مکان- بزرگنمایی) برای کل تپه
۸۸	۳-۳-۵) منحنی‌های بزرگنمایی در تاج تپه
۹۲	۴-۵) بررسی میزان بزرگنمایی سایر نقاط در تپه‌های مرکب دوگانه همسان
۹۲	۱-۴-۵) بزرگنمایی در کناره‌های تپه‌ها (نقاط E و G)
۹۶	۲-۴-۵) بزرگنمایی در نقطه قرار گرفته میان تپه‌ها (نقطه C)

- ۳-۴-۵) مقایسه رفتار لرزه‌ای نقطه قرار گرفته میان تپه‌ها (نقطه C) و نقطه تاج (نقطه B) در تپه های مرکب همسان، با کناره و قعر دره های منفرد ..... ۹۹
- ۵-۵) نتیجه گیری ..... ۱۰۲
- فصل ششم رفتار تپه‌های نیم سینوسی مرکب دوگانه ناهمسان** ..... ۱۰۳
- ۱-۶) رفتار لرزه‌ای تپه‌های مرکب دوگانه غیر همسان ..... ۱۰۴
- ۲-۶) مشخصات مدلسازی (هندسه مدل، موج مهاجم، ابعاد مش بندی و طول گام زمانی در تحلیل) ..... ۱۰۴
- ۳-۶) نتایج تحلیل ..... ۱۰۶
- ۱-۲-۶) الگوی تغییر مکان (زمان- مکان- تغییر مکان) برای کل تپه ..... ۱۰۷
- ۲-۳-۶) الگوی بزرگنمایی (فرکانس- مکان- بزرگنمایی) برای کل تپه ..... ۱۰۹
- ۳-۳-۶) منحنی‌های بزرگنمایی در تاج تپه ..... ۱۱۱
- ۴-۶) بررسی میزان بزرگنمایی سایر نقاط در تپه های مرکب دوگانه ناهمسان ..... ۱۱۵
- ۱-۴-۶) بزرگنمایی در کناره های تپه‌ها (نقاط E و G) ..... ۱۱۵
- ۲-۴-۶) بزرگنمایی در نقطه قرار گرفته میان تپه‌ها (نقطه C) ..... ۱۱۹
- ۳-۴-۶) مقایسه رفتار لرزه‌ای نقطه قرار گرفته میان تپه‌ها (نقطه C) و نقطه تاج (نقطه B) در تپه های مرکب ناهمسان، با کناره و قعر دره های منفرد ..... ۱۲۲
- ۵-۶) نتیجه گیری ..... ۱۲۶
- فصل هفتم رفتار تپه‌های نیم سینوسی مرکب سه گانه** ..... ۱۲۷
- ۱-۷) رفتار لرزه‌ای تپه‌های مرکب سه گانه ..... ۱۲۸
- ۲-۷) مشخصات مدلسازی (هندسه مدل، موج مهاجم، ابعاد مش بندی و طول گام زمانی در تحلیل) ..... ۱۲۸
- ۳-۷) نتایج تحلیل ..... ۱۲۹
- ۲-۲-۷) الگوی تغییر مکان (زمان- مکان- تغییر مکان) برای کل تپه ..... ۱۲۹
- ۳-۲-۷) الگوی بزرگنمایی (فرکانس- مکان- بزرگنمایی) برای کل تپه ..... ۱۳۱

۱۳۲.....	منحنی‌های بزرگنمایی در تاج تپه (۳-۳-۷)
۱۳۳.....	بررسی میزان بزرگنمایی سایر نقاط در تپه‌های مرکب سه‌گانه (۴-۷)
۱۳۴.....	بزرگنمایی نقطه قرار گرفته در بین دو تپه (نقطه C) و کنار تپه‌ها (نقطه D) (۱-۴-۷)
۱۳۴.....	نتیجه‌گیری (۵-۷)
۱۳۷.....	<b>فصل هشتم بحث و بررسی</b>
۱۳۸.....	بررسی نتایج مطالعات پارامتریک تپه‌های مرکب (۱-۸)
۱۳۹.....	بررسی میزان نسبت بزرگنمایی تاج تپه مرجع به سایر نقاط (۲-۸)
۱۴۰.....	نسبت بزرگنمایی در تپه‌های مجاور دوگانه (۱-۲-۸)
۱۴۵.....	نسبت بزرگنمایی در تپه‌های مجاور سه‌گانه (۲-۲-۸)
۱۴۸.....	مقایسه نتایج با داده‌های حاصل از مشاهدات تجربی در ادبیات فنی (۳-۸)
۱۴۸.....	بررسی شرایط ساختگاه در مشاهدات تجربی موجود در ادبیات فنی (۱-۳-۸)
	مقایسه بزرگنمایی بدست آمده در مطالعه حاضر با نتایج حاصل از مشاهدات تجربی در ادبیات فنی (۲-۳-۸)
۱۵۴.....	نتیجه‌گیری (۴-۸)
۱۵۷.....	نتیجه‌گیری (۴-۸)
۱۵۸.....	<b>فصل نهم نتیجه‌گیری</b>
۱۵۹.....	نتایج کلی اثر مجاورت عوارض روی رفتار لرزه‌ای تپه‌های دوبعدی نیم سینوسی (۱-۹)
۱۵۹.....	نتایج ارزیابی برای تپه‌های منفرد (۱-۱-۹)
۱۵۹.....	نتایج ارزیابی برای تپه‌های مرکب دوگانه (۲-۱-۹)
۱۶۰.....	نتایج ارزیابی برای تپه‌های مرکب سه‌گانه (۳-۱-۹)
۱۶۱.....	مقایسه نتایج با داده‌های حاصل از مشاهدات تجربی در ادبیات فنی (۵-۱-۹)
۱۶۱.....	ارائه پیشنهادات برای مطالعات آینده (۲-۹)
۱۶۲.....	<b>مراجع</b>
۱۷۱.....	<b>چکیده انگلیسی</b>

## فهرست اشکال

### صفحه

### عنوان

- شکل (۱-۱) : وضعیت توپوگرافی، شرایط زمین شناسی و موقعیت ایستگاه‌های اندازه گیری (سمت راست)، نسبت‌های طیفی اندازه گیری شده (سمت چپ)، در کوه‌های Josephin Peak Buttler و Kagel ..... ۵
- شکل (۲-۱) : وضعیت توپوگرافی و موقعیت ایستگاه‌های اندازه گیری (سمت راست)، نسبت‌های طیفی محاسبه شده به روش Boor برای سه زاویه تابش موج مهاجم SH (سمت چپ)، در کوه‌های Powell ، Bays و Gap ..... ۷
- شکل (۳-۱) : مقایسه نتایج مشاهدات تجربی با نتایج محاسبات حل عددی در بررسی انجام شده توسط Griffith & Bollinger ..... ۸
- شکل (۴-۱) : نسبت بزرگنمایی طیفی اندازه گیری شده در بررسی انجام شده توسط Tucker et.al ..... ۹
- شکل (۵-۱) : بزرگنمایی بیشینه شتاب زمین در روی تپه‌ای در ماتسوزاکی ژاپن ..... ۱۰
- شکل (۶-۱) : وضعیت توپوگرافی، شرایط زمین شناسی و موقعیت ایستگاه‌های اندازه گیری (سمت راست)، نسبت‌های طیفی اندازه‌گیری و محاسبه شده (سمت چپ)، در کوه‌های Sourpi و St. Eynard ..... ۱۲
- شکل (۷-۱) : وضعیت توپوگرافی و موقعیت ایستگاه‌های اندازه گیری (بالا)، نسبت‌های طیفی اندازه‌گیری شده (پایین)، در کوه Epire ..... ۱۴
- شکل (۸-۱) : وضعیت توپوگرافی، شرایط زمین شناسی و موقعیت ایستگاه‌های اندازه گیری (بالا)، نگاشتهای ثبت شده در ایستگاه‌ها و نسبت‌های طیفی اندازه‌گیری شده (پایین)، در کوه Tarzana ..... ۱۵
- شکل (۹-۱) : وضعیت توپوگرافی، شرایط زمین شناسی و موقعیت ایستگاه‌های اندازه‌گیری ، نگاشتهای ثبت شده در ایستگاه‌ها ، کوه Kitherion ..... ۱۶
- شکل (۱۰-۱) : وضعیت توپوگرافی، شرایط زمین شناسی و موقعیت ایستگاه‌های اندازه گیری (سمت راست)، نسبت‌های طیفی اندازه‌گیری شده در دو راستای شمالی-جنوبی و شرقی -غربی (سمت چپ)، در کوه Matsuzaki ..... ۱۸
- شکل (۱۱-۱) : وضعیت توپوگرافی، شرایط زمین شناسی و موقعیت ایستگاه‌های اندازه گیری (بالا)، نسبت‌های طیفی اندازه گیری شده در سه ایستگاه TOP5 ، TOP6 و TOP7 (پایین)، در مرکز شهر NOCERA UMBERA در مرکز ایتالیا ..... ۲۰
- شکل (۱۲-۱) : وضعیت توپوگرافی، و موقعیت ایستگاه‌های اندازه گیری (سمت راست)، نسبت‌های طیفی اندازه‌گیری شده در ایستگاه RH6 (سمت چپ)، در تپه LITTLE RED HILLS در منطقه LAKE COLERIDGE در جنوب نیوزیلند ..... ۲۱

- شکل (۱-۱۳): وضعیت توپوگرافی، شرایط زمین شناسی و موقعیت ایستگاه‌های اندازه‌گیری (بالا)، نسبت‌های طیفی اندازه‌گیری شده در ایستگاه NRN7 (پایین)، در تپه NARNI در مرکز ایتالیا..... ۲۲
- شکل (۱-۱۴): منحنی‌های بزرگنمایی عوارض توپوگرافی به ازاء طول موج مهاجم ۵ برابر عارضه ..... ۲۳
- شکل (۱-۱۵): نتایج بدست آمده برای تپه مثلثی با نسبت شکل  $SR=1.0$  در برخورد با موج SV با زاویه تابش  $30^\circ$  ..... ۲۴
- شکل (۱-۱۶): نتایج بدست آمده برای دره نیم بیضی با نسبت شکل  $SR=3.0$  در برخورد با موج SV با زاویه تابش  $30^\circ$  ..... ۲۵
- شکل (۱-۱۷): هندسه شیب و منحنی بزرگنمایی تاج به ازاء زوایای مختلف شیب در برابر امواج مهاجم SH..... ۲۶
- شکل (۱-۱۸): منحنی‌های بزرگنمایی دره‌ها به ازاء ارتفاع و اشکال مختلف در برخورد با امواج مهاجم P و SV .. ۲۸
- شکل (۱-۱۹): مشخصات هندسی مدل تپه (بالا)، تاریخچه زمانی و طیف دامنه فوریه موج ریکر (پایین) ..... ۳۰
- شکل (۱-۲۰): مؤلفه افقی و قائم تاریخچه زمانی تغییر مکان برای ضریب پواسون  $0.33$ ..... ۳۲
- شکل (۱-۲۱): مؤلفه افقی و قائم بزرگنمایی تغییر مکان برای ضریب پواسون  $0.33$  ..... ۳۳
- شکل (۱-۲۲): منحنی بزرگنمایی نقطه تاج تپه به ازاء نسبت شکل‌های مختلف ..... ۳۴
- شکل (۱-۲۳): دسته بندی تغییرات بزرگنمایی نقاط یال تپه برحسب نسبت شکل برای ضریب پواسون  $0.33$ .... ۳۵
- شکل (۱-۲۴): محدوده پریود بدون بعد که در آن اثر تپه نیم سینوسی دوبعدی قابل صرفنظر کردن است (چپ)، بیشینه ضریب بزرگنمایی برای تاج تپه نیم سینوسی (راست)، در برابر موج مهاجم SV ..... ۳۸
- شکل (۱-۲۵): پریود مشخصه تپه نیم سینوسی در برابر موج مهاجم SV ..... ۳۸
- شکل (۱-۲۶): اثر نسبت پواسون روی منحنی‌های بزرگنمایی در تاج تپه در برابر موج مهاجم SV ..... ۳۹
- شکل (۱-۲۷): طیف پاسخ برای تپه‌های نیم سینوسی دوبعدی در ساختگاه سنگی ..... ۴۰
- شکل (۱-۲۸): اثر همسایگی عوارض در نیم فضای همگن ..... ۴۲
- شکل (۱-۲۹): اثر توپوگرافی و لایه بندی زیر سطحی روی نسبت طیفی (کناره/تاج)..... ۴۳
- شکل (۱-۲): هندسه قابل تحلیل توسط نرم‌افزار Hybrid ..... ۵۱
- شکل (۲-۲): (الف) تاریخچه زمانی و (ب) طیف دامنه فوریه موج ریکر ..... ۵۲
- شکل (۲-۳): هندسه دره خالی با مقطع نیم‌دایره ..... ۵۳
- شکل (۲-۴): بزرگنمایی حرکت سطحی به ازاء فرکانس بدون بعد  $0.5$  در تابش قائم. .... ۵۴
- شکل (۲-۵): بزرگنمایی حرکت سطحی به ازاء فرکانس بدون بعد  $1/0$  در تابش قائم..... ۵۴
- شکل (۲-۶): بزرگنمایی حرکت سطحی به ازاء فرکانس بدون بعد  $2/0$  در تابش قائم..... ۵۵
- شکل (۲-۷): بزرگنمایی حرکت سطحی به ازاء فرکانس بدون بعد  $0.5$  در تابش با زاویه  $60^\circ$  و موج مهاجم ..... ۵۵

- شکل (۸-۲) : بزرگنمایی حرکت سطحی به ازاء فرکانس بدون بعد  $1/0$  در تابش با زاویه  $60^\circ$  درجه و موج مهاجم  
 ۵۶.....P
- شکل (۹-۲) : مقایسه تاریخچه زمانی تغییر مکان نقطه  $(10/7143r)$  با حرکت میدان آزاد حاصل از تابش موج  
 ۵۶.....P با زاویه  $60^\circ$  درجه.....
- شکل (۱۰-۲) : هندسه دره پر با مقطع نیم‌دایره .....  
 ۵۷.....
- شکل (۱۱-۲) : مقایسه تاریخچه زمانی تغییر مکان نقطه A با حرکت میدان آزاد.....  
 ۵۷.....
- شکل (۱۲-۲) : تاریخچه زمانی تغییر مکان نقطه A در دو گام زمانی مختلف .....  
 ۵۸.....
- شکل (۱۳-۲) : تاریخچه زمانی تغییر مکان نقطه B در دو گام زمانی مختلف .....  
 ۵۹.....
- شکل (۱۴-۲) : بزرگنمایی حرکت سطحی به ازاء فرکانس بدون بعد  $0/5$  .....  
 ۵۹.....
- شکل (۱۵-۲) : بزرگنمایی حرکت سطحی به ازاء فرکانس بدون بعد  $0/75$  .....  
 ۶۰.....
- شکل (۱۶-۲) : مقایسه تاریخچه زمانی تغییر مکان افقی نقطه A از شکل (۱۰-۲) با استفاده از روش المان مرزی  
 و مرکب در گامهای زمانی مختلف.....  
 ۶۰.....
- شکل (۱۷-۲) : مقایسه تاریخچه زمانی تغییر مکان افقی نقطه B از شکل (۱۰-۲) با استفاده از روش المان مرزی  
 و مرکب در گامهای زمانی مختلف.....  
 ۶۱.....
- شکل (۱۸-۲) : هندسه تپه سینوسی شکل .....  
 ۶۲.....
- شکل (۱۹-۲) : منحنی‌های بزرگنمایی به دست آمده از روش اجزاء مرزی و ترکیب اجزاء مرزی با اجزاء محدود  
 به ازای فرکانس بدون بعد  $1/0$  و موج مهاجم SV.....  
 ۶۲.....
- شکل (۱-۳) : مشخصات هندسی تپه نیم سینوسی.....  
 ۶۶.....
- شکل (۲-۳) : (الف) تاریخچه زمانی و (ب) طیف دامنه فوریه موج ریکر .....  
 ۶۷.....
- شکل (۳-۳) : (الف) نحوه قرارگیری تپه‌های دوگانه همسان (ب) نحوه قرارگیری تپه‌های دوگانه ناهمسان .....  
 ۶۹.....
- شکل (۴-۳) : (الف) نحوه قرارگیری تپه‌های سه‌گانه همسان (ب) نحوه قرارگیری تپه‌های سه‌گانه ناهمسان .....  
 ۶۹.....
- شکل (۱-۴) : الگوی تغییر مکان (زمان- مکان- تغییر مکان) برای محدوده مدلسازی شده در تپه‌های منفرد .....  
 ۷۶.....
- شکل (۲-۴) : الگوی بزرگنمایی (فرکانس- مکان- بزرگنمایی) برای محدوده مدلسازی شده در تپه‌های منفرد .....  
 ۷۷.....
- شکل (۳-۴) : منحنی‌های بزرگنمایی در تاج تپه‌های منفرد.....  
 ۷۹.....
- شکل (۱-۵) : الگوی تغییر مکان (زمان- مکان- تغییر مکان) برای محدوده مدلسازی شده در تپه‌های مرکب  
 دوگانه همسان .....  
 ۸۵.....
- شکل (۲-۵) : الگوی بزرگنمایی (فرکانس- مکان- بزرگنمایی) برای محدوده مدلسازی شده در تپه‌های مرکب  
 دوگانه همسان .....  
 ۸۷.....
- شکل (۳-۵) : منحنی‌های بزرگنمایی در تاج تپه‌های مرکب دوگانه همسان .....  
 ۸۹.....
- شکل (۴-۵) : منحنی بزرگنمایی طیفی تاج تپه مرجع (نقطه B) برای تپه‌های مرکب دوگانه همسان، (راست)  
 حالت قرارگیری تپه‌ها با فاصله؛ (چپ) حالت قرارگیری تپه‌ها بدون فاصله .....  
 ۹۰.....

- شکل (۵-۵) : منحنی بزرگنمایی طیفی کناره تپه مرجع (نقطه E) برای تپه های مرکب دوگانه همسان، (راست) حالت قرارگیری تپه‌ها با فاصله؛ (چپ) حالت قرارگیری تپه‌ها بدون فاصله ..... ۹۳
- شکل (۶-۵) : منحنی بزرگنمایی طیفی کناره تپه مرجع (نقطه G) تپه های مرکب دوگانه همسان ..... ۹۵
- شکل (۷-۵) : منحنی بزرگنمایی طیفی نقطه میان تپه‌ها (نقطه C) برای تپه های مرکب دوگانه همسان، (راست) حالت قرارگیری تپه‌ها با فاصله؛ (چپ) حالت قرارگیری تپه‌ها بدون فاصله ..... ۹۷
- شکل (۸-۵) : منحنی بزرگنمایی طیفی نقطه میان تپه‌ها (نقطه C) برای تپه های مرکب دوگانه همسان و نقطه قعر در دره منفرد ..... ۱۰۰
- شکل (۹-۵) : منحنی بزرگنمایی طیفی نقطه میان تپه‌ها (نقطه B) برای تپه های مرکب دوگانه همسان و نقطه قعر در دره منفرد ..... ۱۰۱
- شکل (۱-۶) : الگوی تغییر مکان (زمان- مکان-تغییر مکان) برای محدوده مدلسازی شده در تپه‌های مرکب دوگانه ناهمسان ..... ۱۰۸
- شکل (۲-۶) : الگوی بزرگنمایی (فرکانس- مکان- بزرگنمایی) برای محدوده مدلسازی شده در تپه‌های مرکب دوگانه همسان ..... ۱۱۰
- شکل (۳-۶) : منحنی‌های بزرگنمایی در تاج تپه‌های مرکب دوگانه ناهمسان ..... ۱۱۲
- شکل (۴-۶) : منحنی بزرگنمایی طیفی تاج تپه مرجع (نقطه B) تپه های مرکب دوگانه ناهمسان برای حالت قرارگیری تپه‌ها بدون فاصله ..... ۱۱۳
- شکل (۵-۶) : منحنی بزرگنمایی طیفی کناره تپه مرجع (نقطه E) تپه های مرکب دوگانه ناهمسان برای حالت قرارگیری تپه‌ها بدون فاصله ..... ۱۱۶
- شکل (۶-۶) : منحنی بزرگنمایی طیفی تاج تپه مرجع (نقطه G) تپه های مرکب دوگانه ناهمسان ..... ۱۱۸
- شکل (۷-۶) : منحنی بزرگنمایی طیفی کناره تپه مرجع (نقطه C) تپه های مرکب دوگانه ناهمسان برای حالت قرارگیری تپه‌ها بدون فاصله ..... ۱۲۰
- شکل (۸-۶) : منحنی بزرگنمایی طیفی نقطه میان تپه‌ها (نقطه C) برای تپه های مرکب دوگانه ناهمسان و نقطه قعر در دره منفرد، ..... ۱۲۳
- شکل (۱-۷) : الگوی تغییر مکان (زمان- مکان-تغییر مکان) برای محدوده مدلسازی شده در تپه‌های مرکب سه‌گانه ..... ۱۳۰
- شکل (۲-۷) : الگوی بزرگنمایی (فرکانس- مکان- بزرگنمایی) برای محدوده مدلسازی شده در تپه‌های مرکب سه‌گانه ..... ۱۳۱
- شکل (۳-۷) : منحنی بزرگنمایی طیفی نقاط تاج تپه مرجع برای تپه های مرکب سه‌گانه در مقایسه با نقاط مشابه در تپه های منفرد ..... ۱۳۲
- شکل (۴-۷) : منحنی‌های بزرگنمایی در تاج تپه‌های مرکب سه‌گانه ..... ۱۳۳



- شکل (۵-۷) : منحنی بزرگنمایی طیفی نقطه میانی تپه‌ها (نقطه C) برای تپه های مرکب سه‌گانه در مقایسه با نقاط مشابه در تپه های منفرد ..... ۱۳۴
- شکل (۶-۷) : منحنی بزرگنمایی طیفی نقطه کناری تپه‌ها (نقطه D) برای تپه های مرکب سه‌گانه در مقایسه با کناره‌های تپه‌های منفرد ..... ۱۳۵
- شکل (۱-۸) : نسبت بزرگنمایی در تاج تپه مرجع به نقطه میانی تپه‌ها (نقطه C / نقطه B) در تپه‌های مرکب دوگانه ناهمسان برای حالت قرارگیری بدون فاصله ..... ۱۴۱
- شکل (۲-۸) : نسبت بزرگنمایی در تاج تپه مرجع به نقطه کناری خودش (نقطه E / نقطه B) در تپه‌های مرکب دوگانه ناهمسان برای حالت قرارگیری بدون فاصله ..... ۱۴۲
- شکل (۳-۸) : نسبت بزرگنمایی در تاج تپه مرجع به نقطه کناری خودش (نقطه E / نقطه B) در تپه‌های مرکب دوگانه ناهمسان برای حالت قرارگیری با فاصله ..... ۱۴۳
- شکل (۴-۸) : نسبت بزرگنمایی در تاج تپه مرجع به نقطه کناری خودش (نقطه G / نقطه B) در تپه‌های مرکب دوگانه ناهمسان برای حالت قرارگیری با فاصله ..... ۱۴۴
- شکل (۵-۸) : نسبت بزرگنمایی در تاج تپه مرجع به نقطه میانی تپه‌ها (نقطه C / نقطه B) در تپه‌های مرکب سه‌گانه ..... ۱۴۶
- شکل (۶-۸) : نسبت بزرگنمایی در تاج تپه مرجع به نقطه کناری تپه مجاور (نقطه D / نقطه B) در تپه‌های مرکب سه‌گانه ..... ۱۴۷
- شکل (۷-۸) : وضعیت توپوگرافی در محدوده تپه‌های Kagel, Josephin peak و Butler ، کالیفرنیا، ایالات متحده آمریکا ..... ۱۵۰
- شکل (۸-۸) : وضعیت توپوگرافی در محدوده تپه Canal Beagle ، در شهر Vina del mar ، شیلی ..... ۱۵۱
- شکل (۹-۸) : وضعیت توپوگرافی در محدوده تپه Robinwood ، سن خوزه، ایالات متحده آمریکا ..... ۱۵۲
- شکل (۱۰-۸) : وضعیت توپوگرافی در محدوده تپه Tarzana ، در شهر Los Angeles ، ایالات متحده آمریکا .. ۱۵۲
- شکل (۱۱-۸) : وضعیت توپوگرافی در محدوده تپه Ushibara در نزدیکی شهر Matsuzaki ، ژاپن ..... ۱۵۲
- شکل (۱۲-۸) : وضعیت توپوگرافی در محدوده تپه Kitherion ، در نزدیکی شهر Corinth ، یونان ..... ۱۵۳
- شکل (۱۳-۸) : مقایسه بزرگنمایی بدست آمده در مطالعه حاضر با نتایج حاصل از مشاهدات تجربی در ادبیات فنی ..... ۱۵۶

## فهرست جداول

### صفحه

### عنوان

- جدول (۱-۱): زلزله‌های بزرگ ثبت شده بین سالهای ۱۹۸۵-۱۹۹۰ در شبکه آرایه قرار گرفته درماتسوزاکی ژاپن..... ۱۷
- جدول (۲-۱): ضرایب تأثیرتوپوگرافی در پریودهای بلند و کوتاه در تپه‌های دوبعدی با سرعت موج برشی ۱۰۰۰ متر بر ثانیه..... ۴۰
- جدول (۱-۴): مشخصات مدلها در تپه‌های منفرد..... ۷۴
- جدول (۱-۵): مشخصات مدلها در تپه‌های مرکب دوگانه همسان..... ۸۳
- جدول (۱-۶): مشخصات مدلها در تپه‌های مرکب دوگانه ناهمسان..... ۱۰۵
- جدول (۱-۷): مشخصات هندسی مدلها در تپه‌های مرکب سه‌گانه..... ۱۲۸
- جدول (۱-۸): مشخصات کلی ساختگاه و نتایج گزارش شده در مشاهدات تجربی موجود در ادبیات فنی..... ۱۵۴

یکی از مهمترین عواملی که بر روی پاسخ لرزه ای سطح زمین تأثیر قابل توجهی دارد شرایط ساختگاه می باشد. بطور کلی رفتار لرزه ای سطح زمین متأثر از سه عامل می باشد که از آنها تحت عناوین اثر چشمه (Source Effect)، اثر مسیر انتشار (Path Effect) و اثر ساختگاه (Site Effect) یاد می شود. یکی از اثرات ساختگاهی شناخته شده، اثرات ناشی از توپوگرافی و ناهمواریهای سطحی زمین است. مشاهدات انجام شده توسط Trifunac & Hudson و Boore طی زمین لرزه سن فرناندو (۱۹۷۱) در سد پاکوما [۱] [۲] و Lee و دیگران پس از زمین لرزه نورتریج (۱۹۹۴) در تپه تارزانا [۳]، نقطه آغاز بررسیها بود و پس از آن مطالعات گسترده عددی و تحلیلی بسیاری جهت برآورد رفتار لرزه ای ناهمواریها و روشن ساختن اثر آنها روی پاسخ لرزه ای سطح زمین انجام شد. علیرغم سازگاری کلی نتایج در برخی موارد، میزان بزرگنمایی زلزله با نتایج حاصل از مشاهدات تجربی همخوانی کافی و مناسبی نداشت و تفاوت مشاهده شده ناشی از ساده بودن مدلها و فرضیات در نظر گرفته شده بنظر می آمد. بدون شک عواملی نظیر لایه بندی زیرسطحی زمین و ناهمواریهای سطحی که هر کدام تنوع و پیچیدگیهای زیادی در طبیعت دارند روی نتایج مطالعات و رسیدن به مقادیر دقیقتر تأثیر زیادی داشته و حضور هر یک از این پیچیدگیها می تواند راه را به سوی برآورد رفتار لرزه ای عوارض توپوگرافی هموارتر سازد. با گذشت ۴۰ سال از آغاز مطالعات، روشهای عددی و تحلیلی گوناگونی برای بررسی تأثیر ناهمواریها بر رفتار لرزه ای سطح زمین بکار گرفته شده و تنوع روشها و نیز فرضیات ساده کننده، منجر به عدم همگرایی نتایج بررسیها شده و رسیدن به نتیجه ای مشترک را دشوارتر نموده است. در میان فرضیات ساده کننده ای که در بررسیها دیده می شود تلاشهایی برای حذف برخی از آنها و پیچیده ساختن مدلها صورت گرفته است که می توان به در نظر گرفتن محیط با رفتار غیر خطی، لایه لایه فرض کردن محیط و نیز حضور ناهمواریها در کنار یکدیگر اشاره نمود.

شکل هندسی عوارض توپوگرافی یکی از مهمترین پارامترها در برآورد پاسخ لرزه ای سطح زمین می باشد و تا به امروز بر روی این پارامتر مطالعات گسترده ای انجام شده است. اشکال ساده هندسی نظیر نیم بیضی، نیم دایره، نیم سینوس، گوه ای شکل و ذوزنقه ای در بررسیها دیده شده و همانطور که در اکثر مطالعات مشاهده می شود شکل نیم سینوس برای عارضه تپه ای شکل مناسبتر بنظر رسیده و با واقعیت تطابق بیشتری دارد. به همین سبب در این مطالعه تپه های نیم سینوسی مورد توجه قرار داده شده اند. علاوه بر این در تمامی مطالعات، عوارض (تپه ها) بصورت منفرد حضور داشته و به جز تنها در یک مورد در باقی موارد اثر همسایگی با عارضه ای دیگر مشاهده و بررسی نشده است. در این میان اثر مجاورت تنها در بخشی از مطالعات Geli و همکاران [۴] در سال ۱۹۸۸ مورد توجه قرار گرفته است. نتایج این بررسی حکایت از اثر قابل توجه همسایگی بر رفتار لرزه ای سطح زمین داشته و علاقه را برای بررسی دقیقتر و روشنتر ساختن موضوع دوچندان می کند.

با مقدمه کوتاهی که به گوشه ای از ابعاد مسئله اشاره داشت، می توان هدف مطالعه و بررسی حاضر را تبیین نمود. در این بررسی سعی شده است با انجام مطالعات گسترده حساسیت سنجی با استفاده از روش عددی اجزا

مرزی، رفتار لرزه ای تپه‌های نیم سینوسی مجاور مورد ارزیابی قرار گیرد تا میزان اثر مجاورت عوارض (تپه‌ها) بر روی نتایج بدست آورده شود و همچنین با مقایسه نتایج با مشاهدات تجربی میزان سازگاری آنها سنجیده شود. این پایان نامه دارای ۹ فصل به شرح زیر می‌باشد:

#### (۱) فصل اول : مروری بر ادبیات فنی

در این فصل به مرور مطالعات و بررسیهای انجام شده در زمینه اثر توپوگرافی بر پاسخ لرزه ای سطح زمین پرداخته شده و در جمع بندی مطالب برای شروع مطالعات حاضر بسیار سودمند بوده است. در انتهای بررسی نیز با استفاده از اطلاعات موجود در این بخش مقایسه ای با نتایج بدست آمده انجام شده است.

#### (۲) فصل دوم : کاربرد روش اجزاء مرزی در تحلیل لرزه ای عوارض توپوگرافی

در فصل دوم به معادلات حاکم در محیط و نحوه استخراج آنها پرداخته و در ادامه مثالهای عددی حل شده با استفاده از روش اجزاء مرزی آورده شده است. با مقایسه نتایج حاصل از این روش و سایر روشها، اعتبار آن برای بررسی اثر توپوگرافی مورد سنجش قرار داده شده است.

#### (۳) فصل سوم: متدلوژی مطالعات

پس از بررسی ابعاد مسئله و نیز انتخاب روش مناسب برای ارزیابی رفتار لرزه ای عوارض توپوگرافی، به روند کلی مطالعات گسترده حساسیت سنجی برنامه ریزی شده در این بخش اشاره می‌شود و نیز نحوه نمایش نتایج و پارامترهای مورد نیاز در فرایند مطالعه شرح داده خواهد شد.

#### (۴) فصل چهارم : رفتار تپه‌های نیم سینوسی منفرد

مشخصات هندسی، پارامترهای مدلسازی و نیز نتایج اولیه بررسی برای تپه‌های نیم سینوسی منفرد در فصل چهارم مورد بررسی قرار داده شده است.

#### (۵) فصل پنجم: رفتار تپه‌های نیم سینوسی مرکب دوگانه همسان

گام اول بررسی‌ها بر روی تپه‌های مجاور، مدلسازی تپه های با نسبت شکل یکسان می باشد. تپه‌های نیم سینوسی مرکب دوگانه همسان در ترکیبهای مختلف در مجاورت یکدیگر قرار داده شده‌اند و نتایج مطالعه در این فصل گنجانده شده است.

#### (۶) فصل ششم: رفتار تپه‌های نیم سینوسی مرکب دوگانه ناهمسان

پس از بررسی رفتار تپه‌های نیم سینوسی مرکب دوگانه همسان در فصل پنجم، به مطالعه رفتار لرزه‌ای تپه‌ها در حالت ناهمسان پرداخته شده و روند مدلسازی و پارامترها، مشخصات هندسی و نتایج تحلیلیها نشان داده شده است.

#### (۷) فصل هفتم: رفتار تپه‌های نیم سینوسی مرکب سه گانه

در پایان مسیر مطالعات، بررسی بر روی تپه‌های نیم سینوسی مرکب سه گانه انجام شده و مشخصات هندسی، سایر پارامترهای مدلسازی و نیز نتایج اولیه بررسی در فصل هفتم مورد بررسی قرار داده شده است.