بسم الله الرحمن الرحيم

دانشکده فنی و مهندسی

بخش مهندسی عمران

رساله برای دریافت درجه دکتری رشته مهندسی عمران گرایش خاک و پی

بهینه سازی تحلیل لرزه ای پاسخ زمین با استفاده از توابع موجکی انطباق پذیر جدید و روش HFTD ماتریسی

مؤلف :

امیر بذرافشان مقدم

استاد راهنما :

دکتر محمد حسین باقری پور

آذر ماه ۱۳۹۱

این رساله به عنوان یکی از شرایط احراز درجه دکتری به

بخش مهندسی عمران

دانشکده فنی و مهندسی

دانشگاه شهید باهنر کرمان

تسلیم شده است و هیچگونه مدرکی به عنوان فراغت از تحصیل دوره مزبور شناخته نمی شود.

دانشجو: امیر بذرافشان مقدم

استاد راهنما: دکتر محمدحسین باقری پور

داور ۱: دکتر جعفر بلوری بزاز

داور ۲: دکتر محمدمحسن توفیق

داور ۳: دکتر سید مرتضی مرندی

نماینده تحصیلات تکمیلی دانشکده در جلسه دفاع:

معاون آموزشی و پژوهشی دانشکده:

حق چاپ محفوظ و مخصوص به دانشگاه شهید باهنر کرمان است.

تقدیم به:

مادر و پدر عزیزم

که موفقیت های من مرهون زحمات ایشان بوده است

و همسرم.

تشکر و قدردانی:

حمد و سپاس به درگاه ایزد منان که توفیق داد تا مرحله دیگری از مراحل تحصیل خود را به پایان برسانم. گرچه زبان از ذکر حمایت ها و الطاف الهی قاصر است اما امیدوارم که در تمامی مراحل زندگی لطف خود را همچنان که تا به اکنون بوده شامل حالم نماید. برخود لازم می دانم از زحمات بی دریغ خانواده عزیزم بخصوص پدر و مادر بزرگوارم و همسرم و برادرانم که مشوق من در انجام این تحقیق بودند و همچنین کلیه اساتید و همکارانی که به نحوی مرا در گردآوری این مجموعه یاری کرده اند، صمیمانه تشکر و قدردانی نمایم. خصوصا از زحمات بی شائبه استاد بزرگوارم جناب آقای دکتر محمد حسین باقری پور که در طول دوره دکتری با راهنمایی های خردمندانه و مستمر خویش به من در انجام این تحقیق کمک نموده و در این راه از هیچ مساعدتی دریغ ننمودند، کمال تشکر و سپاس را دارم.

از ریاست محترم بخش عمران جناب آقای دکتر غلامعباس بارانی که در جلسه دفاعیه اینجانب حضور موثر داشتند و اساتید گرامی جناب آقایان دکتر سید مرتضی مرندی و دکتر محمدمحسن توفیق و نیز استاد ارجمند جناب آقای دکتر جعفر بلوری بزاز، که قبول زحمت نموده و از دانشگاه فردوسی مشهد تشریف آوردند، و داوری این رساله را انجام دادند کمال تشکر و قدردانی را دارم.

چکیده

تحلیل پاسخ دینامیکی لایه های زمین از اهمیت بسزایی در ژئوتکنیک لرزه ای برخوردار است. تحلیل پاسخ زمین جهت پیش بینی حرکات زمین و تدوین طیف پاسخ طرح به منظور تعیین تنش ها و کرنش های دینامیکی برای ارزیابی خطرات روانگرایی و محاسبه نیرو های ناشی از زلزله که می تواند سبب ناپایداری زمین و سازه های احداثی گردد، به کار رود. در این تحقیق روش نوینی برای تحلیل غیرخطی پاسخ زمین برای یک توده خاک چند لایه ارائه شده است. روش جدید بر اساس روش ترکیبی حوزه زمان- فرکانس بوده که روندی غیر تکراری داشته و از ریاضیات ماتریسی بهره گرفته شده است. در این روش معادله حرکت در فضای فرکانسی حل و رفتار غیرخطی خاک در فضای زمان در نظر گرفته شده است. این روش بدلیل بهره گیری از مزایای روش های بر پایه زمان و فرکانس، بسیار موثر بوده و قابلیت بکارگیری پارامتر های وابسته به زمان و فرکانس خاک را بطور همزمان دارد. روش پیشنهادی قادر به پیش بینی قابل قبول حرکات سطح زمین بوده و نتایج منطقی تری نسبت به نرم افزار های SHAKE و NERA بدست می دهد.

از دیگر روش های تحلیل پاسخ زمین، روش استفاده از توابع انتقال می باشد که این روش به دلیل استفاده صرف از تبدیل فوریه و نقایصی که تبدیل فوریه بطور ذاتی در خود دارد بطور صحیح قادر به پیش بینی حرکات زمین نمی باشد. لذا این روش توسط روش تجزیه سازی چند مرحله ای موجکی بهینه و بهبود یافته است. که نتایج این روش دارای دقت بیشتری نسبت به روش قدیمی بوده و در مقایسه با داده های اندازه گیری شده در سایت منطقی تر و قابل قبول تر می باشند.

در حال حاضر بهترین ابزار جهت تحلیل زمان- فرکانس امواج زلزله توابع موجکی می باشند اما انتخاب موجک مناسب کار ساده ای نبوده و معمولا از طریق سعی و خطا انتخاب می شود. علاوه بر این برای تحلیل زلزله های گوناگون معمولا یک موجک انتخاب می گردد و توجهی به خصوصیات و مشخصات زلزله نظیر بزرگی زلزله نمی شود. چنانچه موجکی بر اساس خصوصیات موج زلزله بکار رفته ساخته شود نتایج دقیق تر و موثر تری در روند تحلیل زمان- فرکانس بدست می آید. در این تحقیق برای هر رکورد زلزله تابع موجکی جدیدی معرفی شده است که به کمک روش تجزیه چند بعدی امواج زلزله بدست آمده است. موجک های جدید در تحلیل زمان- فرکانس امواج زلزله بسیار موثر بوده و در مقایسه با موجک های متداولی نظیر موجک دابیچیز۲ حساسیت بیشتری به فرکانس های پایین و سرعت بیشتری در تجزیه امواج دارد.

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فصل ۱ ..... ۱

۱-۱-پیشگفتار ۲

۱-۲-تاریخچه و مروری بر کارهای گذشته ۲

۱-۳-اهداف پایان نامه ۷

۱-۴-ساختار پایان نامه ۷

فصل ۲ ..... ۹

۲-۱-مقدمه ۱۰

۲-۲-تحلیل پاسخ زمین در حوزه زمان ۱۱

۲-۳-تحلیل پاسخ زمین در حوزه فرکانس ۲۰

۲-۴-روش ترکیبی حوزه زمان- فرکانس ۲۹

فصل ۳ ..... ۳۳

۳-۱-مقدمه ۳۴

۳-۲-تعریف موجک و تبدیل موجکی ۳۵

۳-۳-فیلتر کردن و تجزیه موج ۴۱

۳-۴-بازسازی موج ۴۳

۳-۵-تحلیل چند ریزه ساز موجکی ۴۴

فصل ۴ ..... ۴۷

۴-۱-مقدمه ۴۸

۴-۲-رابطه سازی روش پیشنهادی ۴۸

۴-۳-روش دوگانه حوزه زمان- فرکانس پیشنهادی ۵۱
۴-۴-معیار همگرایی ۵۴
۴-۵-تایید اعتبار روش پیشنهادی ۵۵
۴-۶-تحلیل زلزله Loma Prieta ۶۲
۴-۷-تحلیل زلزله Coyote Lake ۶۶
۴-۸-تحلیل زلزله های Parkfield ۶۸
۴-۹-مقایسه نتایج با برنامه SHAKE ۶۹
۴-۱۰-مقایسه نتایج با برنامه NERA ۷۲
۴-۱۱-نتیجه گیری ۷۵
فصل ۵ ..... ۷۷
۵-۱-مقدمه ۷۸
۵-۲-فرمول بندی روش پیشنهادی ۸۱
۵-۳-مطالعات موردی ۸۳
۵-۴-نتایج تحلیل ۸۴
۵-۵-نتیجه گیری ۹۸
فصل ۶ ..... ۱۰۰
۶-۱-مقدمه ۱۰۱
۶-۲-فرمول بندی موجک پیشنهادی ۱۰۱
۶-۳-موجک دابیچیز۲ ..... ۱۰۳
۶-۴-نتیجه گیری ۱۱۱
فصل ۷ ..... ۱۱۴
مراجع ۱۱۷
پیوست: کد برنامه های نوشته شده در محیط MATLAB ۱۲۳

فهرست علائم

a	پارامتر مقیاس
$a_{j,k}$	ضرایب مقیاس
a_m	دامنه موج ورودی
α	ضریب رایلی
α_z^*	ضریب امپدانس مختلط
$A_i(t)$	تابع تقریب
A_m	دامنه موج ورودی
b	پارامتر جابجایی در زمان
β	ضریب رایلی، پارامتر روش نیومارک
b_m	دامنه موج انعکاسی
B_m	دامنه موج انعکاسی
c	میرایی ویسکوز
$[C]$	ماتریس میرایی ویسکوز
C_ψ	شرط پذیرش
CWT	تبدیل موجکی پیوسته
$d_{j,k}$	ضرایب موجکی
$\delta(n)$	تابع دیراک دلتا
$D_i(t)$	تابع جزئیات
DWT	تبدیل موجکی گسسته
Δt	گام زمانی
Δz	گام مکانی
η	ویسکوزیته
E	دامنه موج ورودی
f_C	فرکانس مرکزی
frq	فرکانس متناظر با مقیاس
F	دامنه موج انعکاسی
FFT	تبدیل فوریه سریع
FT	تبدیل فوریه
$g_0[k]$	فیلتر پایین گذر بازسازی
$g_1[k]$	فیلتر بالاگذر بازسازی
γ	وزن مخصوص، کرنش برشی
γ_{eff}	کرنش برشی موثر
$\gamma_{\max}$	کرنش برشی ماکزیمم
G	مدول برشی
Ω	فرکانس نیکوئیست
$h_0[k]$	فیلتر پایین گذر بازسازی
$h_1[k]$	فیلتر بالاگذر بازسازی
h	نصف ضخامت لایه
H	ضخامت لایه
$HFTD$	روش ترکیبی زمان–فرکانس
k	ثابت فنر، عدد موج
ζ	ضریب میرایی
$[K]$	ماتریس سختی
λ	پارامتر روش نیومارک
m	جرم لایه
M	بزرگی زلزله
$[M]$	ماتریس جرم

n	تعداد لایه های خاک
ω	فرکانس
$\{P(t)\}$	بردار نیروی خارجی
$\phi(t)$	تابع مقیاس مادر
$\phi_{a,b}(t)$	تابع مقیاس بچه
$\psi(t)$	تابع موجک مادر
$\psi_{a,b}(t)$	تابع موجک بچه
$\hat{\psi}(\omega)$	تبدیل فوریه تابع موجک
ρ	چگالی، شعاع طیفی
R_γ	ضریب نسبت کرنش برشی
σ	ثابت تصحیح موجک LP
τ	تنش برشی، زمان
θ	پارامتر روش ویلسون
TF	تابع تبدیل
$\{u(t)\}$	بردار جابجایی
$\{\dot{u}(t)\}$	بردار سرعت
$\{\ddot{u}(t)\}$	بردار شتاب
u_r	تغییرمکان بستر سنگی
U	تغییرمکان
V_j	زیرفضای توابع تقریب
V_S	سرعت موج برشی
W_j	زیرفضای توابع جزئیات
W_ψ	ضریب تبدیل موجکی

فهرست شکل ها

شکل ۲-۱ روند انکسار که سبب انتشار امواج تقریباً عمودی به سطح زمین می شوند. [۱] ۱۰
شکل ۲-۲ a) سیستم جرم متمرکز – b) سیستم المان و گره [۶۹] ۱۱
شکل ۲-۳ مدل جرم و فنر لایه‌های افقی خاک [۶۹] ۱۳
شکل ۲-۴ روش نیومارک- β [۱۶] ۱۴
شکل ۲-۵ روش ویلسون- θ [۱۶] ۱۶
شکل ۲-۶ شماتیک لایه های محیط خاکی در فضای یک بعدی ۱۸
شکل ۲-۷ شماتیک مدل استفاده شده توسط Iwan-Mroz [۶] ۱۹
شکل ۲-۸ شماتیک خاک تک لایه بر روی بستر سنگی الاستیک [۴۰] ۲۱
شکل ۲-۹ ستون خاک چند لایه بر روی بستر سنگی الاستیک [۵۹] ۲۶
شکل ۲-۱۰ انواع حرکات ورودی زلزله [۴۱] ۲۷
شکل ۲-۱۱ شکل شماتیک تابع انتقال ۲۷
شکل ۲-۱۲ شماتیک روش استفاده از توابع انتقال [۳۲] ۲۸
شکل ۲-۱۳ تغییرات مدول برشی و نسبت میرایی به کرنش برشی [۶۵] ۲۹
شکل ۲-۱۴ سیستم خاک تک لایه بصورت جرم-فنر-میراگر ۳۱
شکل ۳-۱ مقایسه روش های مختلف تحلیل سیگنال ها [۴۷] ۳۵
شکل ۳-۲ تاثیر مقیاس بر شکل تابع موجک ۳۶
شکل ۳-۳ تاثیر اثر انتقال بر یک موجک [۴۷] ۳۶
شکل ۳-۴. فرایند بدست آوردن ضرایب موجکی ونمودارتبدیل موجکی پیوستهٔ آن و مقایسه طیف موجکی با طیف فوریه [۴۷] ۳۸
شکل ۳-۵ نمودارتجزیه کردن موج توسط فیلترها [۳۲] ۴۲
شکل ۳-۶ فرایند تجزیه سیگنال با و بدون کاهش نمونه ها [۴۷] ۴۳
شکل ۳-۷ فرایند بازسازی موج اولیه [۴۷] ۴۴
شکل ۳-۸. نمودار تحلیل چند ریزه ساز موجکی [۲۹] ۴۶
شکل ۴-۱ سیستم خاک- بستر سنگی یک بعدی تحت اثر موج برشی افقی ۴۹

شکل ۴-۲ فلوچارت روش پیشنهادی ۵۵
شکل ۴-۳ (الف) نمودار تغییرات مدول برشی و (ب) نسبت میرایی ۵۷
شکل ۴-۴ مولفه EW زلزله Loma Prieta ۵۸
شکل ۴-۵ مولفه SE زلزله Coyote Lake ۵۸
شکل ۴-۶ موقعیت جغرافیایی منطقه Turkey Flat [۶۳] ۶۰
شکل ۴-۷ موقعیت نقاط شبکه لرزه نگاری Turkey Flat [۶۳] ۶۰
شکل ۴-۸ (الف) نمودار تغییرات مدول برشی و (ب) نسبت میرایی ۶۱
شکل ۴-۹ مولفه NS زلزله Parkfield 1994 ..... ۶۲
شکل ۴-۱۰ مولفه EW زلزله Parkfield 2004 ..... ۶۲
شکل ۴-۱۱ مقایسه شتاب محاسبه شده و ثبت شده در سطح برای زلزله Loma Prieta ۶۳
شکل ۴-۱۲ مقایسه تغییرمکان های محاسبه شده و ثبت شده در سطح برای زلزله Loma Prieta ۶۳
شکل ۴-۱۳ مقایسه طیف های پاسخ شتاب برای زلزله Loma Prieta ۶۴
شکل ۴-۱۴ طیف موجکی دو بعدی زلزله Loma Prieta ۶۵
شکل ۴-۱۵تغییرات مدول برشی نسبت به زمان در لایه سطح زمین برای زلزله Loma Prieta ... ۶۵
شکل ۴-۱۶ تغییرات نسبت میرایی به زمان در لایه سطح زمین برای زلزله Loma Prieta ۶۶
شکل ۴-۱۷ مقایسه شتاب محاسبه شده و ثبت شده در سطح زمین برای Coyote Lake ۶۶
شکل ۴-۱۸ مقایسه تغییرمکان محاسبه شده و ثبت شده در سطح زمین برای Coyote Lake ۶۷
شکل ۴-۱۹ مقایسه طیف های پاسخ شتاب برای زلزله Coyote Lake ۶۷
شکل ۴-۲۰ طیف موجکی دو بعدی زلزله Coyote Lake ۶۸
شکل ۴-۲۱ مقایسه تغییرمکان محاسبه شده و ثبت شده در سطح زمین برای Parkfield 1994 .. ۶۸
شکل ۴-۲۲ مقایسه تغییرمکان محاسبه شده و ثبت شده در سطح زمین برای Parkfield 2004 .. ۶۹
شکل ۴-۲۳ مقایسه شتاب سطح محاسبه شده، ثبت شده و SHAKE برای Loma Prieta ۷۰
شکل ۴-۲۴ مقایسه شتاب سطح محاسبه شده، ثبت شده و SHAKE برای Coyote Lake ۷۱
شکل ۴-۲۵ مقایسه طیف پاسخ شتاب محاسبه شده و ثبت شده با نتایج SHAKE برای زلزله Loma Prieta ۷۱
شکل ۴-۲۶ مقایسه طیف پاسخ شتاب محاسبه شده و ثبت شده با نتایج SHAKE برای زلزله Coyote Lake ۷۲
شکل ۴-۲۷ مقایسه شتاب در سطح برای روش پیشنهادی و NERA برای زلزله Loma Prieta .. ۷۳

شکل ۴-۲۸ مقایسه شتاب در سطح برای روش پیشنهادی و NERA برای زلزله Coyote Lake ۷۳
شکل ۴-۲۹ مقایسه نتایج با نرم افزار NERA برای زلزله Loma Prieta ۷۴
شکل ۴-۳۰ مقایسه نتایج با نرم افزار NERA برای زلزله Coyote Lake ۷۴
شکل ۴-۳۱ مقایسه کرنش برشی در آخرین تکرار در لایه سطح زمین برای روش پیشنهادی و NERA برای زلزله Loma Prieta ۷۵
شکل ۵-۱ مولفه EW زلزله Loma Prieta ۷۸
شکل ۵-۲ طیف فوریه مولفه EW زلزله Loma Prieta ۷۹
شکل ۵-۳ طیف سه بعدی موجکی مولفه EW زلزله Loma Prieta ۷۹
شکل ۵-۴ زیر شتاب های تجزیه شده زلزله Loma Prieta ۸۰
شکل ۵-۵ طیف فوریه زیر شتاب های تجزیه شده زلزله Loma Prieta ۸۰
شکل ۵-۶ نمودار درختی تجزیه سازی یک سیگنال ۸۲
شکل ۵-۷ انتروپی زیر شتاب های تجزیه شده برای زلزله Loma Prieta ۸۵
شکل ۵-۸ مقایسه شتاب های بدست آمده از روش پیشنهادی، روش متداول و ایستگاه Gilroy #2 برای زلزله Loma Prieta ۸۷
شکل ۵-۹ مولفه SE زلزله Coyote Lake ۸۷
شکل ۵-۱۰ طیف فوریه مولفه SE زلزله Coyote Lake ۸۸
شکل ۵-۱۱ طیف سه بعدی موجکی مولفه SE زلزله Coyote Lake ۸۸
شکل ۵-۱۲ انتروپی زیر شتاب های تجزیه شده برای زلزله Coyote Lake ۸۸
شکل ۵-۱۳ زیر شتاب های تجزیه شده زلزله Coyote Lake ۸۹
شکل ۵-۱۴ طیف فوریه زیر شتاب های تجزیه شده زلزله Coyote Lake ۸۹
شکل ۵-۱۵ مقایسه شتاب های بدست آمده از روش پیشنهادی، روش متداول و ایستگاه Gilroy #2 برای زلزله Coyote Lake ۹۰
شکل ۵-۱۶ مولفه NS زلزله Parkfield 1994 ۹۱
شکل ۵-۱۷ طیف فوریه زلزله Parkfield 1994 ۹۲
شکل ۵-۱۸ طیف موجکی زلزله Parkfield 1994 ۹۲
شکل ۵-۱۹ انتروپی زیر شتاب های تجزیه شده برای زلزله Parkfield 1994 ۹۲
شکل ۵-۲۰ زیر شتاب های تجزیه شده زلزله Parkfield 1994 ۹۳
شکل ۵-۲۱ طیف فوریه زیر شتاب های تجزیه شده زلزله Parkfield 1994 ۹۳

شکل ۵-۲۲ مقایسه شتاب های بدست آمده از روش پیشنهادی، روش متداول و ایستگاه Turkey Flat برای زلزله Parkfield 1994 ..... ۹۴
شکل ۵-۲۳ مولفه EW زلزله Parkfield 2004 ..... ۹۵
شکل ۵-۲۴ طیف فوریه زلزله Parkfield 2004 ..... ۹۵
شکل ۵-۲۵ طیف موجکی زلزله Parkfield 2004 ..... ۹۶
شکل ۵-۲۶ انتروپی زیر شتاب های تجزیه شده برای زلزله Parkfield 2004 ..... ۹۶
شکل ۵-۲۷ زیر شتاب های تجزیه شده زلزله Parkfield 2004 ..... ۹۷
شکل ۵-۲۸ طیف فوریه زیر شتاب های تجزیه شده زلزله Parkfield 2004 ..... ۹۷
شکل ۵-۲۹ مقایسه شتاب های بدست آمده از روش پیشنهادی، روش متداول و ایستگاه Turkey Flat برای زلزله Parkfield 2004 ..... ۹۸
شکل ۶-۱ نمودار درختی تجزیه موجکی سیگنالی با ۱۰۰۰ داده ۱۰۲
شکل ۶-۲ تابع مقیاس دابیچیز۲ [۲۹] ۱۰۴
شکل ۶-۳ تابع موجک دابیچیز۲ [۲۹] ۱۰۴
شکل ۶-۴ توابع مقیاس محاسبه شده برای زلزله های انتخابی ۱۰۵
شکل ۶-۵ توابع موجکی محاسبه شده برای زلزله های انتخابی ۱۰۶
شکل ۶-۶ زلزله های اولیه و بازسازی شده توسط موجک های محاسبه شده ۱۰۷
شکل ۶-۷ مولفه های تقریب و جزئیات حاصل از تجزیه زلزله Loma Prieta توسط روش پیشنهادی ۱۰۹
شکل ۶-۸ مولفه های تقریب و جزئیات حاصل از تجزیه زلزله Loma Prieta توسط موجک دابیچیز۲ ..... ۱۰۹
شکل ۶-۹ فرکانس مرکزی برای موجک های جدید و موجک دابیچیز۲ ..... ۱۱۰
شکل ۶-۱۰ a) شتاب نگاشت، b) طیف فوریه، c) طیف CWT توسط موجک پیشنهادی و d) طیف CWT توسط موجک دابیچیز۲ زلزله Loma Prieta ۱۱۱
شکل ۶-۱۱ مقایسه طیف های موجکی حاصل از روش پیشنهادی و موجک دابیچیز۲ برای زلزله های انتخابی ۱۱۲

فهرست جداول

جدول ۴-۱ مشخصات پروفیل خاک ایستگاه Gilroy #2 [۲۵] ۵۷
جدول ۴-۲ مشخصات زلزله های ثبت شده در سایت Gilroy ۵۸
جدول ۴-۳ مشخصات لایه های خاک ایستگاه Turkey Flat #2 [۱۳] ۵۹
جدول ۴-۴ مشخصات زلزله های ثبت شده در سایت Turkey Flat ۶۱
جدول ۶-۱ ضرایب فیلترهای پایین گذر و بالا گذر موجک db2 [۲۹] ۱۰۳
جدول ۶-۲ مشخصات زلزله های انتخابی در این تحقیق ۱۰۵
جدول ۶-۳ مقادیر خطاهای ایجاد شده در روند بازسازی ۱۰۸

فصل ۱

کلیات

۱-۱- پیشگفتار

با توجه به اثرات مخرب زلزله بر روی انسان و محیط اطراف وی، تلاش برای پیدا نمودن مناسب ترین روش جهت کاهش خطرات ناشی از آن وظیفه یک مهندس زلزله و یا ژئوتکنیک می باشد. از جمله این تلاش ها، برآورد پاسخ زمین می باشد که یکی از مهمترین مسائل تحلیلی ژئوتکنیک لرزه ای می باشد. تحلیل پاسخ زمین برای پیش بینی حرکات سطح زمین، تدوین طیف پاسخ طرح، تعیین تنش و کرنش های دینامیکی برای تخمین پتانسیل روانگرایی و مسایل اندرکنش خاک- سازه به کار می رود [۴, ۵, ۷۳]. لذا برآورد دقیق تر زلزله طرح برای مهندسین زلزله و ژئوتکنیک مهم و ضروری می باشد. با آنکه امواج زلزله محتملا از میان ده‌ها کیلومتر سنگ و تا رسیدن به سطح زمین تنها کمتر از ۱۰۰ متر لایه خاکی عبور می کنند، اما بیشترین تاثیر و تغییر در ویژگی های حرکات زمین در درون لایه خاکی صورت می گیرد [۸, ۴۰]. شناخت پاسخ و رفتار مصالح خاکی تحت بارهای لرزه ای عامل مهمی در توسعه یک مدل رفتاری مناسب جهت شبیه سازی محیط خاکی می باشد. بدلیل ماهیت رفتار غیرخطی خاک، پاسخ زمین نیز ماهیتی غیرخطی داشته و این امر در بوجود آمدن روش های گوناگون تحلیل پاسخ زمین بسیار موثر بوده است. درادامه مختصری درباره تاریخچه روش های فوق پرداخته می شود.

۱-۲- تاریخچه و مروری بر کارهای گذشته

روشهای تحلیلی متعددی برای تحلیل پاسخ زمین از سال ۱۹۲۰ تاکنون بوجود آمده است که به طور کلی از نظر ابعادی به سه دسته یک بعدی، دو بعدی و سه بعدی و از نظر روش حل معادله موج به دو دسته خطی معادل و غیر خطی تقسیم می شوند.

تحلیل پاسخ زمین بصورت یک بعدی بطور گسترده ای مورد استفاده مهندسان و محققان قرار گرفته است که علت آنرا می توان بدست دادن نتایج قابل قبول، در دست بودن برنامه های تجاری زیاد بر اساس مدل های مختلف خاک جهت استفاده بر روی کامپیوترهای شخصی و آسیب ندیدن سازه های ساخته شده بر اساس این روش در طی زلزله های بزرگ گذشته دانست.

Lo Presti *et al.* (2006) نشان دادند که فرضیات بکار رفته در تحلیل یک بعدی معقول بوده و تحلیل یک بعدی جوابهای قابل قبولی بدست می دهد [۴۳]. Sun & Chung (2008) تاثیرات سایت را در حالت دو بعدی بررسی کرده و با نتایج یک بعدی مقایسه نمودند و نشان دادند که تحلیل دو بعدی تنها در نزدیکی مرزهای مدل دو بعدی، شتاب طیفی بزرگتری در پریودهای بالا

(فرکانس های پایین) بدست می دهد [۷۰]. لذا استفاده از تحلیل دو بعدی با توجه به این موارد و نیز زمان بر بودن و مشکل بودن فرآیند تحلیل، توجیه کمتری نسبت به تحلیل یک بعدی دارد [۶۲].

روش تحلیل یک بعدی می تواند به دو روش متفاوت حرکات زمین را برآورد نماید:

- روش تحلیل در حوزه فرکانس (روش خطی معادل)
- روش تحلیل در حوزه زمان (روش غیرخطی)

روش خطی معادل یکی از روش های مهم و پرکاربرد در زمینه مدل سازی غیر خطی رفتار خاک تحت اثر بارهای لرزه ای می باشد که برای تخمین واقعی پاسخ غیر خطی و غیر الاستیک خاک توسط Schnabel *et al.* (1972) پیشنهاد گردید [۶۴]. در این روش، تحلیل پاسخ زمین در حوزه فرکانس صورت گرفته و بدلیل سادگی، انعطاف پذیری و توان محاسباتی کمتر، بسیار محبوب تر و کاربردی تر از روش های حوزه زمانی بوده و قابلیت استفاده از پارامترهای خاکی وابسته به فرکانس را دارا می باشد. ولی روش حوزه فرکانسی قادر به برآورد صحیح حرکات زمین در مسائل غیرخطی نمی باشد. بخصوص در حالاتی که حرکات شدید لرزه ای در بستر سنگی وجود دارد و یا سطوح کرنش بالایی در لایه های خاکی ایجاد شده است. در این شرایط، روش خطی معادل؛ که در آن از مدول برشی (G) و نسبت میرایی (ζ) معادل خاک استفاده می شود، قادر به مدل سازی رفتار واقعی لایه های خاک حین وقوع زلزله نمی باشد. Yoshida (1994) ، Yoshida & Iai (1998) و Huang *et al.* (2001) نشان دادند که تحلیل خطی معادل مقدار شتاب ماکزیمم بیشتری نسبت به تحلیل غیر خطی بدست می دهد [۳۴, ۸۰, ۸۱]. در این حالت از روش های غیرخطی در حوزه زمان استفاده می شود و مقایسه نتایج بدست آمده از این روش با داده های ثبت شده زلزله های گوناگون نشان داده است که این روش تطابق بهتری، نسبت به روش خطی معادل، با مشاهدات ثبت شده دارد [۶۰].

روش غیرخطی توانایی شبیه سازی دقیق تر رفتار خاک را نسبت به روش خطی معادل دارا می باشد. اما نحوه استفاده و فرمولاسیون آنها در عمل بدلیل کمبود منابع راهنما و آیین نامه های مرتبط و همچنین مشکلات تعیین پارامترهای تاثیرگذار، سخت و محدود می باشد [۱۸, ۶۸]. بر خلاف روشهای حوزه فرکانسی، که زلزله ورودی در هر ترازی از لایه های خاکی می تواند اثر کند، در روش های حوزه زمانی موج ورودی باید فقط در لایه پایینی سیستم لایه ای خاک که بر اساس نظریه جرم و فنر مدل سازی شده است، اعمال گردد.

نرم افزارهای گوناگونی بر پایه این دو روش طراحی و ارائه شده اند که از بین آنها می توان به نرم افزار SHAKE که بر اساس روش خطی معادل و نرم افزار NERA که بر اساس روش غیرخطی طراحی شده اند، اشاره نمود [۶, ۶۴].

روش دوگانه زمان- فرکانس[۱] ابتدا توسط Kawamoto (1983) پیشنهاد و سپس توسط Wolf (1986) توسعه و تکمیل گردید که قابلیت استفاده در مسائل تحلیل غیرخطی سازه ها و اندرکنش خاک- سازه را دارا می باشد [۳۹, ۷۵]. با آنکه حل مسائل دینامیکی در حوزه فرکانس راحت تر از حوزه زمان می باشد اما در این حوزه تنها می توان از روش خطی معادل استفاده نمود. روش های مبتنی بر حوزه زمانی قادر به درنظر گرفتن اثرات غیرخطی می باشند ولی نقطه ضعف این روش ها، پیچیدگی و زمان بر بودن آنها می باشد. لذا می توان ساختار و فرمولاسیون روش های این دو حوزه را با یکدیگر ترکیب نمود تا یک روش بهینه مبتنی بر نکات قوت هر دو روش بدست آید. این روش ادغام شده توانایی بکار بردن پارامترهای وابسته به فرکانس و وابسته به زمان توده خاک را بطور همزمان دارد. در این روش معادلات حرکت به کمک شبه نیروها در حوزه زمان حل می شوند. روابط پایه ای که توسطKawamoto و Wolf ارائه گردید توسط محققان دیگر برای حل مسائل دینامیکی گوناگون توسعه داده شده است [۱۹, ۳۹, ۷۵-۷۷]. Mansur & Carrer (200) روش دوگانه حوزه زمان- فرکانسی (HFTD) جدیدی را برای تحلیل سیستم های سازه های غیرخطی دارای یک و چند درجه آزادی که تحت اثر نیروهای وابسته به زمان قرار دارند، پیشنهاد دادند [۴۶]. Soares & Mansur (2003) روشی را در حوزه زمان- فرکانس پیشنهاد دادند که برای تحلیل مودال مدل های غیرخطی کاربرد دارد [۶۶]. Nacivet *et al.* (2003) روش دوگانه فرکانس- زمان جدیدی را پیشنهاد دادند که به کمک آن پاسخ پایدار غیرخطی سازه های تحت اثر بارگذاری پریودیک را در حالت میرایی اصطکاکی خشک بدست می آورد [۵۲]. Obrembski *et al.* (2005) و Bernel & Youssef (1998) نیز روش دوگانه زمان- فرکانسی جدیدی را برای اندرکنش غیرخطی خاک- سازه ارائه دادند [۱۱, ۵۷]. Correa *et al.* (2010) از روش ترکیبی حوزه فرکانس- زمان برای حل مسائل دینامیکی سازه های مدل شده بصورت جرم و فنر استفاده کرده است [۱۸].

از دیگر روش های متداول برای تحلیل پاسخ زمین، روش استفاده از توابع انتقال می باشد. این توابع عبارتند از نسبت پارامترهای پاسخ سطح نظیر جابجایی، سرعت و یا شتاب به پارامترهای نظیر در بستر سنگی. روابط ریاضی این توابع شامل پارامترهای هندسی و دینامیکی خاک بوده و تشدید

---

[۱] HFTD

و تقلیل خاک در فرکانس های گوناگون را نشان می دهند. همانطور که در مطالعات اخیر نیز نشان داده شده است [۳, ۲۶, ۳۱, ۵۶, ۷۳] توابع انتقال موجود، خود وابسته به فرکانس بوده و لذا در فضای فرکانسی فرموله شده و مورد استفاده قرار می گیرند. اما نقطه ضعف روش های ارائه شده در این مطالعات، این است که آنها صرفا متکی بر تابع انتقال بوده که خود نیازمند استفاده از روش تبدیل فوریه سریع[۲] می باشند. با توجه به اینکه موج لرزه ای ورودی، نظیر تاریخچه زمانی شتاب، تابع زمان می باشد لذا جهت استفاده از توابع انتقال باید با استفاده از تبدیل فوریه سریع، موج ورودی از فضای زمان به فضای فرکانس منتقل گردد. تبدیل فوریه سریع یک نمایش منحصر به فرد از سیگنال مورد نظر در فضای فرکانس ارائه می دهد و صرفا اطلاعاتی درباره محتوی فرکانسی بدست می دهد ولی اطلاعاتی درباره زمان وقوع هر فرکانس ارائه نمی نماید. علاوه بر این، طیف فوریه تنها فرکانس غالب در هر زمان را به نمایش گذاشته و قادر به تفکیک تمامی فرکانس های رخ داده شده در یک گام زمانی خاص نمی باشد. به عبارت دیگر FFT فقط جوابگوی یک فرکانس خاص در موج ورودی و وجود و یا عدم وجود آن است و هیچگونه اطلاعاتی از زمان وقوع آن و یا تعداد دفعه های تکرار فرکانس مربوطه در طول زمان را ارائه نمی دهد که این مسئله باعث ایجاد خطای محاسباتی در نتایج نهایی می گردد. این نقیصه توسط ابزار تحلیلی جدیدی به نام تبدیل موجکی بر طرف شده است. موجک ها از مجموعه توابع پایه ای تشکیل شده اند که قادرند یک سیگنال را بطور همزمان در فضای زمان و فرکانس (مقیاس) مورد تحلیل قرار دهند؛ در حالی که تبدیل فوریه فقط در فضای فرکانسی قادر به انجام این کار می باشد. با اینکه تبدیل فوریه پنجره ای که روش بهبود یافته تبدیل فوریه است سیگنال را در فضای زمان و فرکانس تحلیل می کند اما این روش اشکالات زیادی در خود دارد [۷۴]. تبدیل موجکی یک تبدیل دو پارامتری بوده که برای یک سیگنال تابع زمان، این دو پارامتر عبارتند از زمان (t) و مقیاس (a) که پارامتر مقیاس خود با فرکانس (ω) مرتبط می باشد.

همانطور که ذکر شد موجک ها ابزار قدرتمند و پرکاربردی در تحلیل زمان- فرکانس امواج زلزله به شمار می روند. در دهه های اخیر، موجک ها بطور گسترده و موثری در مسائل مهندسی زلزله نظیر تحلیل های زمان- فرکانس [۱۰]، اندرکنش خاک- سازه [۵]، نویزگیری از سیگنال ها [۴۲, ۷۲] و ساخت شتاب نگاشت های مصنوعی [۲۱, ۲۸] بکار رفته اند. علت مقبولیت زیاد این توابع، کارایی آنها در شبیه سازی و تحلیل سیگنالهای متغیر و غیر ثابت می باشد. به دلیل آنکه کلیه سیگنال های ساخته بشر و یا موجود در طبیعت ماهیتی متغیر دارند لذا طیف وسیعی از توابع

[۲] Fast Fourier Transform (FFT)