بسم الله الرحمن الرحيم

دانشگاه شهید چمران اهواز
دانشکده‌ی فنی و مهندسی
گروه عمران

پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد

(گرایش سازه های هیدرولیکی)

عنوان:

بررسی میزان تاثیر اعمال غیر همزمان شتاب نگاشت زلزله بر پاسخ دینامیکی سد های بتنی

نگارش:

اسماعیل مهری دهنو

استاد راهنما:

دکتر حمید رضا غفوری

استاد مشاور:

دکتر حسین محمد ولی سامانی

دی ماه ۱۳۸۷

تقدیم به اولین معلمان زندگی ...

پدر و مادر

تقدیر و تشکر

با سپاس و تشکر فراوان از جناب آقای دکتر حمید رضا غفوری که در طی مراحل این تحقیق، روشن‌گر راه بودند و با صبر و حوصله‌ی خود، ما را در پیمودن این مسیر تشویق کردند و جناب آقای دکتر حسین محمد ولی سامانی که با گفتار خویش، نیروی پیمایش این راه را در ما بوجود آوردند.

در نهایت، از همه‌ی دوستانی که حقیر را در اتمام این مهم یاری نمودند، کمال سپاسگزاری را دارم.

اسماعیل مهری دهنو

چکیده پایان‌نامه

نام خانوادگی: مهری دهنو	**نام:** اسماعیل
عنوان پایان نامه: بررسی میزان تأثیر اعمال غیر همزمان شتاب نگاشت زلزله بر پاسخ دینامیکی سد های بتنی	
استاد راهنما: دکتر حمید رضا غفوری	
درجه تحصیلی: کارشناسی ارشد	**رشته:** عمران **گرایش:** سازه های هیدرولیکی
محل تحصیل (دانشگاه): شهید چمران اهواز	**دانشکده:** مهندسی
تاریخ فارغ التحصیلی:۱۰/۲۸/ ۱۳۸۷	**تعداد صفحه:** ۱۲۴

کلید واژه‌ها: تغییرات مکانی حرکات زمین لرزه، شتاب نگاشت های غیر یکنواخت و غیر همزمان، تحریک های چند تکیه گاهی، تابع همبستگی، آنالیز تاریخچه زمانی، سد های بتنی

چکیده:

در آنالیز دینامیکی سازه ها به منظور تعیین نیروها و جابجایی های ناشی از بارهای دینامیکی نظیر زلزله، معمول آن است که فرض می شود تمامی نقاط اتصال سازه با زمین، شتاب زلزله را به طور همزمان و یکنواخت دریافت می کنند. این چنین فرضی مستلزم پذیرفتن دو شرط است: الف) سرعت انتشار امواج زلزله بینهایت در نظر گرفته شود. ب) انتشار امواج زلزله در طول مسیر انتشار، به صورت یکنواخت و بدون تغییر در نظر گرفته شود. خطای در نظر گرفتن دو فرض یاد شده برای آنالیز سازه های کوچک و متوسط، محدود و قابل چشم پوشی می باشد. ولی برای سازه های بزرگ، دو فرض یاد شده می تواند خطاهای بزرگی در میزان جابجایی ها و تنش های محاسبه شده ایجاد نماید. در این پایان نامه، با معرفی تغییرات مکانی حرکات زمین لرزه و روش های مختلف محاسبه آن، شتاب نگاشت های غیر همزمان و غیر یکنواخت حرکت زمین در فواصل مختلف، با استفاده از یک روش احتمالاتی تولید شده اند. سپس از این شتاب نگاشت ها برای آنالیز دینامیکی سد های بتنی با منظور کردن انتشار غیر همزمان و غیر یکنواخت امواج زلزله استفاده شده است. بدین منظور سد وزنی رودبار و سد قوسی بختیاری به عنوان دو نمونه از سد های وزنی و قوسی مدل شدند و رفتار آن ها در سه حالت تحریک غیر همزمان و یکنواخت، تحریک همزمان و غیر یکنواخت و تحریک غیر همزمان و غیر یکنواخت بررسی شده و با نتایج تحلیل دینامیکی معمولی مقایسه شده اند. در این کار از روش عددی اجزای محدود و نرم افزار ANSYS استفاده شده است و آنالیز ها به صورت تاریخچه زمانی انجام شده اند. نتایج حاصله حاکی از آن است که دو فرض معمول، باعث کاهش تنش های بدست آمده از آنالیز دینامیکی گردیده و بنابراین در آنالیز سازه های با طول تکیه گاهی زیاد، بایستی به مساله انتشار غیر همزمان و غیر یکنواخت امواج زلزله توجه شود.

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فصل اول/ مقدمه

۱-۱- مقدمه ۱۷

۱-۲- تاریخچه ۱۸

۱-۲-۱- تغییرات مکانی حرکت زمین لرزه..... ۱۸

۱-۲-۲- اثر تغییرات مکانی حرکت زمین لرزه بر روی پاسخ سازه ها ۲۱

۱-۳- اهداف پایان نامه ۲۲

۱-۴- ساختار پایان نامه ۲۳

فصل دوم / تغییرات مکانی حرکات زمین لرزه و روش های محاسبه آن

۲-۱- مقدمه ۲۵

۲-۲- تغییرات مکانی حرکات زمین لرزه و اهمیت آن ۲۵

۲-۳- عوامل موثر در تغییرات مکانی حرکات زمین لرزه ۲۶

۲-۴- اندازه گیری تغییرات مکانی حرکات زمین لرزه ۲۸

۲-۵- روش های محاسبه تغییرات مکانی حرکات زمین لرزه ۳۰

۲-۶- روش های احتمالاتی ۳۲

۲-۶-۱ تعریف مفاهیم پایه ۳۲

۲-۶-۲- مدل های احتمالاتی تغییرات مکانی حرکات زمین لرزه ۳۴

۲-۶-۳- شبیه سازی تغییرات مکانی حرکات زمین لرزه ۳۵

۲-۶-۳-۱- توصیف مختصری از روش های MLP و CPDF ۳۶

۲-۶-۳-۲- شرح روش شبیه سازی مورد استفاده در پایان نامه ۴۱

۲-۶-۳-۳-تخمین تاریخچه زمانی های جابجایی از شتاب نگاشت های شبیه سازی شده ۴۴

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فصل سوم / روش های آنالیز دینامیکی سازه ها

۳-۱- مقدمه ۵۴

۳-۲- روش ارتعاشات تصادفی ۵۴

۳-۲-۱- روش تابع تبدیل مستقیم..... ۵۵

۳-۲-۲- روش تجزیه مودال ۵۵

۳-۳- روش طیف پاسخ ۵۷

۳-۴- روش آنالیز دینامیکی تاریخچه زمانی ۵۸

فصل چهارم / روش آنالیز دینامیکی تاریخچه زمانی

۴-۱- مقدمه ۶۰

۴-۲- معادله حرکت سد (سد با مخزن خالی) ۶۰

۴- ۳- معادله حرکت آب مخزن ۶۱

۴-۳-۱- شرایط مرزی مخزن ۶۲

۴-۳-۲- معادله تعادل دینامیکی مخزن ۶۴

۴-۴- معادله همبسته سد و آب مخزن ۶۵

۴-۵- تکنیک های حل معادله دینامیکی حرکت ۶۶

فصل چهارم / بررسی اثر تحریک چند تکیه گاهی بر پاسخ سد وزنی

۵-۱- مقدمه ۷۱

۵-۲ تعریف مسئله ۷۱

۵-۲-۱ هندسه و فرضیات ۷۲

۵-۲-۲- مشخصات سد رودبار ۷۲

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

۵-۳- حالت های مختلف آنالیز ۷۳

۵-۴- استهلاک (میرایی) سد ۷۴

۵-۵- روند انجام آنالیز ها ۷۴

۵-۵-۱- ساخت مدل المان محدود ۷۴

۵-۵-۲- شرایط مرزی ۷۶

۵-۵-۳- حل مسئله ۷۷

۵-۶- مقایسه نتایج ۷۷

۵ -۶-۱- تنش ها ۷۷

۵-۶-۲- جابجایی ها ۹۵

۵-۶-۳ فشار هیدرودینامیکی ۹۵

فصل پنجم / بررسی اثر تحریک چند تکیه گاهی بر پاسخ سد قوسی

۶-۱-مقدمه ۱۰۱

۶-۲-هندسه و فرضیات ۱۰۱

۶-۳-مشخصات سد بختیاری ۱۰۱

۶-۴-مشخصات مصالح ۱۰۱

۶-۵-حالت های مختلف آنالیز ۱۰۲

۶-۶-استهلاک (میرایی) سد ۱۰۲

۶-۷-ساخت مدل ۱۰۲

۶-۸-شرایط مرزی ۱۰۵

۶-۹-حل مسئله ۱۰۵

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

۶-۱۰- مقایسه نتایج ۱۰۶

۶-۱۰-۱- تنش ها ۱۰۶

۶-۱۰-۲- جابجایی ها ۱۲۰

۶-۱۰-۳- فشار هیدرودینامیکی ۱۲۰

فصل هفتم / نتیجه گیری و پیشنهادات

۷-۱- نتیجه گیری ۱۲۶

۷-۲- پیشنهادات ۱۲۸

ضمیمه ۱ ..... ۱۲۹

ضمیمه ۲ ..... ۱۳۳

واژه نامه ۱۳۹

مراجع ۱۴۵

فهرست جداول

عنوان **صفحه**

جدول(۵-۱): مشخصات هیدرولیکی مخزن ۷۳

جدول(۵-۲): مشخصات مصالح ۷۳

جدول (۵-۳): المان های به کار رفته در مدل ۷۵

جدول (۵-۴): تعداد المان های به کار رفته در اجزای مدل ۷۶

جدول ۵-۵ : مقایسه تنش های حداکثر مطلق در پاشنه سد ۸۳

جدول ۵-۶ : مقایسه تنش های حداکثر مطلق در پنجه سد ۸۳

جدول ۵-۷:مقایسه جابجایی های حداکثر مطلق در تاج سد ۹۵

جدول ۵-۸: مقایسه فشار هیدرودینامیکی حداکثر در پاشنه ۹۶

جدول (۶-۱): مشخصات آب مخزن وخصوصیات الاستیک مصالح ۱۰۲

جدول (۶-۲): المان های به کار رفته در مدل ۱۰۴

جدول (۶-۳) تعداد المان های به کار رفته در اجزای مدل ۱۰۴

جدول ۶-۴ : مقایسه تنش های حداکثر مطلق در نقطه ۱ ..... ۱۰۹

جدول ۶-۵: مقایسه جابجایی های حداکثر مطلق در تاج سد ۱۲۰

فهرست اشکال

عنوان **صفحه**

شکل ۲-۱..... ۲۶

شکل ۲-۲ ..... ۲۷

شکل ۲-۳ ..... ۲۸

شکل ۲-۴ ..... ۲۸

شکل ۲-۵: شبکه لرزه نگاری SMART 1 ..... ۲۹

شکل ۲-۶ : دسته بندی روش های مختلف محاسبه تغییرات مکانی حرکات زمین لرزه ۳۰

شکل ۲-۷ : تابع همبستگی مطلق هموار شده برای مولفه های شعاعی دو رویداد ثبت شده
از شبکه SMART 1 ..... ۳۴

شکل ۲-۸: فلوچارت روشCPDF ۴۰

شکل ۲-۹ ..... ۴۵

شکل ۲-۱۰: فیلتر پنجره ای ۴۷

شکل ۲-۱۱: شتاب نگاشت افقی زلزله کوینا ۴۸

شکل ۲-۱۲: طیف فوریه شتاب نگاشت زلزله کوینا ۴۸

شکل ۲-۱۳: شتاب نگاشت شبیه سازی شده زلزله کوینا ۴۹

شکل ۲-۱۴: تاریخچه زمانی های جابجایی زلزله کوینا A: اصلاح نشده B: اصلاح شده ۵۰

شکل۲-۱۵: طیف فوریه جابجایی زلزله کوینا (اصلاح شده) ۵۰

شکل ۲-۱۶: تاریخچه زمانی جابجایی زلزله کوینا (اصلاح شده نهایی) ۵۱

شکل ۲-۱۷: تاریخچه زمانی های جابجایی شبیه سازی شده زلزله کوینا ۵۲

شکل ۴-۱ : شماره گذاری شرایط مرزی دریاچه سد ۶۳

شکل ۵-۱: سد رودبار لرستان ۷۲

فهرست اشکال

عنوان **صفحه**

شکل (۵-۲) ۷۶

شکل ۵-۳ ..... ۷۸

شکل ۵-۴: مقایسه تغییرات ماکزیمم مطلق تنش ها در حالات ۴ گانه (مقطع A-A) ۷۹

شکل ۵-۵: مقایسه تغییرات ماکزیمم مطلق تنش ها در حالات ۴ گانه (مقطع B-B) ۸۰

شکل ۵-۶ افزایش تنش های افقی با کاهش سرعت انتشار امواج زلزله در مقطع A-A ۸۱

شکل ۵-۷ افزایش تنش های افقی با کاهش سرعت انتشار امواج زلزله در مقطع B-B ۸۲

شکل ۵-۸ : تاریخچه زمانی تنش افقی در پاشنه (حالت ۱) ۸۴

شکل ۵-۹: تاریخچه زمانی تنش افقی در پاشنه (حالت ۲) ۸۴

شکل ۵-۱۰ : تاریخچه زمانی تنش افقی در پاشنه (حالت ۳) ۸۵

شکل ۵-۱۱ : تاریخچه زمانی تنش افقی در پاشنه (حالت ۴) ۸۵

شکل ۵-۱۲ : تاریخچه زمانی تنش قائم در پاشنه (حالت ۱) ۸۶

شکل ۵-۱۳: تاریخچه زمانی تنش قائم در پاشنه (حالت ۲) ۸۶

شکل ۵-۱۴ : تاریخچه زمانی تنش قائم در پاشنه (حالت ۳) ۸۷

شکل ۵-۱۵: تاریخچه زمانی تنش قائم در پاشنه (حالت ۴) ۸۷

شکل ۵- ۱۶: تاریخچه زمانی تنش برشی در پاشنه (حالت ۱) ۸۸

شکل ۵-۱۷ : تاریخچه زمانی تنش برشی در پاشنه (حالت ۲) ۸۸

شکل ۵-۱۸ : تاریخچه زمانی تنش برشی در پاشنه (حالت ۳) ۸۹

شکل ۵- ۱۹: تاریخچه زمانی تنش برشی در پاشنه (حالت ۴) ۸۹

شکل ۵-۲۰: تاریخچه زمانی تنش افقی در پنجه (حالت ۱) ۹۰

شکل ۵-۲۱ : تاریخچه زمانی تنش افقی در پنجه (حالت ۲) ۹۰

فهرست اشکال

عنوان **صفحه**

شکل ۵-۲۲ : تاریخچه زمانی تنش افقی در پنجه (حالت ۳) ۹۱

شکل ۵-۲۳: تاریخچه زمانی تنش افقی در پنجه (حالت ۴) ۹۱

شکل ۵-۲۴ : تاریخچه زمانی تنش قائم در پنجه (حالت ۱) ۹۲

شکل ۵-۲۵: تاریخچه زمانی تنش قائم در پنجه (حالت ۲) ۹۲

شکل ۵- ۲۶ : تاریخچه زمانی تنش قائم در پنجه (حالت ۳) ۹۳

شکل ۵-۲۷ : تاریخچه زمانی تنش قائم در پنجه (حالت ۴) ۹۳

شکل ۵-۲۸ : تاریخچه زمانی تنش برشی در پنجه (حالت ۱) ۹۴

شکل ۵-۲۹: تاریخچه زمانی تنش برشی در پنجه (حالت ۲) ۹۴

شکل ۵-۳۰: تاریخچه زمانی تنش برشی در پنجه (حالت ۳) ۹۵

شکل ۵-۳۱ : تاریخچه زمانی تنش برشی در پنجه (حالت ۴) ۹۵

شکل ۵-۳۲: تغییرات فشار هیدرودینامیکی ماکزیمم وارد بر بدنه سد در بالادست ۹۷

شکل ۵-۳۳ : تاریخچه زمانی فشار هیدرودینامیکی پاشنه (حالت ۱) ۹۸

شکل ۵-۳۴ : تاریخچه زمانی فشار هیدرودینامیکی در پاشنه (حالت ۲) ۹۸

شکل ۵-۳۵: تاریخچه زمانی فشار هیدرودینامیکی در پاشنه (حالت ۳) ۹۹

شکل ۵-۳۶ : تاریخچه زمانی فشار هیدرودینامیکی در گره پاشنه (حالت ۴) ۹۹

شکل (۶-۱) ۱۰۴

شکل ۶-۲ ..... ۱۰۶

شکل ۶-۳: مقایسه تغییرات ماکزیمم مطلق تنش های نرمال در حالات ۴ گانه ۱۰۷

شکل۶-۴: مقایسه مطلق تنش های برشی در حالات ۴ گانه ۱۰۸

شکل ۶-۵: تغییرات تنش ها در تحلیل ۲ بر اساس سرعت های مختلف انتشار امواج زلزله ۱۱۰

فهرست اشکال

عنوان **صفحه**

شکل۶-۶: تغییرات تنش ها در تحلیل ۴ بر اساس سرعت های مختلف انتشار امواج زلزله ۱۱۱

شکل ۶-۷: تاریخچه زمانی تنش نرمال جهت X در نقطه۱ (حالت ۱) ۱۱۲

شکل ۶-۸ : تاریخچه زمانی تنش نرمال جهت X در نقطه۱ (حالت ۲) ۱۱۲

شکل ۶-۹: تاریخچه زمانی تنش افقی نرمال جهت X در نقطه۱ (حالت ۳) ۱۱۳

شکل ۶-۱۰: تاریخچه زمانی تنش نرمال جهت X در نقطه۱ (حالت ۴) ۱۱۳

شکل ۶-۱۱: تاریخچه زمانی تنش نرمال جهت Y در نقطه۱ (حالت ۱) ۱۱۴

شکل ۶-۱۲: تاریخچه زمانی تنش نرمال جهت Y در نقطه۱ (حالت ۲) ۱۱۴

شکل ۶-۱۳ : تاریخچه زمانی تنش نرمال جهت Y در نقطه۱ (حالت ۳) ۱۱۵

شکل ۶-۱۴ : تاریخچه زمانی تنش نرمال جهت Y در نقطه۱ (حالت ۴) ۱۱۵

شکل ۶-۱۵: تاریخچه زمانی تنش نرمال جهت Z در نقطه۱ (حالت ۱) ۱۱۶

شکل ۶-۱۶ : تاریخچه زمانی تنش نرمال جهت Z در نقطه۱ (حالت ۲) ۱۱۶

شکل ۶-۱۷: تاریخچه زمانی تنش نرمال جهت Z در نقطه۱ (حالت ۳) ۱۱۷

شکل ۶-۱۸ : تاریخچه زمانی تنش نرمال جهت Z در نقطه۱ (حالت ۴) ۱۱۷

شکل ۶-۱۹ : تاریخچه زمانی تنش برشی σ_{zx} در نقطه۱ (حالت ۱) ۱۱۸

شکل ۶-۲۰ : تاریخچه زمانی تنش برشی σ_{zx} در نقطه۱ (حالت ۲) ۱۱۸

شکل ۶-۲۱ : تاریخچه زمانی تنش برشی σ_{zx} در نقطه۱ (حالت ۳) ۱۱۹

شکل ۶-۲۲ : تاریخچه زمانی تنش برشی σ_{zx} در نقطه۱ (حالت۴) ۱۱۹

شکل ۶-۲۳: مقایسه تنش های نرمال ایجاد شده در فونداسیون در حالات ۴ گانه ۱۲۱

شکل۶-۲۴: مقایسه تنش های برشی ایجاد شده در فونداسیون در حالات ۴ گانه ۱۲۲

شکل ۶-۲۵: تغییرات تنش های نرمال در آنالیز ۲ بر اساس سرعت های مختلف ۱۲۳

فهرست اشکال

عنوان **صفحه**

شکل ۶-۲۶: تغییرات تنش های برشی در آنالیز ۲ بر اساس سرعت های مختلف ۱۲۴
شکل ۶-۲۷ تغییرات فشار هیدرودینامیکی ماکزیمم وارد بر بدنه سد در بالادست ۱۲۵

فصل اول

مقدمه

۱-۱- مقدمه

بررسی زلزله های ثبت شده در ایستگاه های نزدیک به هم نشان می دهد که امواج مربوط به یک زلزله حتی در فواصل نزدیک به هم نظیر پایه های یک سازه مهندسی، یکسان نیستند و تفاوت هایی در امواج ثبت شده، موجود است که باعث می شود تکیه گاه های یک سازه به طور یکسان تحریک نشوند. مطالعه بیشتر حرکت زمین، وجود دو عامل مهم را در تحریک پایه های یک سازه نشان می دهد: ۱) دریافت امواج زلزله در پایه های یک سازه، با تأخیر زمانی صورت می گیرد که این مسأله ناشی از محدود بودن سرعت انتشار امواج زلزله می باشد. به این عامل، تأثیر عبور موج[1] گفته می شود. ۲) امواج زلزله در طول مسیر انتشار خود در اثر عبور از لایه های مختلف، دچار شکستگی های متعدد می گردند. این مسأله باعث می شود که امواج دریافت شده در موقعیت های مختلف، لزوماً با هم برابر نباشند. به این عامل، کاهش همبستگی[2] گفته می شود. وجود این دو عامل مهم در انتشار امواج باعث می شود که تحریک زلزله در پایه های یک سازه، یکنواخت و یکسان نباشد. به این مسأله، تحریک چند تکیه گاهی گفته می شود.

در صورتی که در آنالیز دینامیکی سازه ها تنها اثر عامل اول در نظر گرفته شود به این نوع آنالیز اصطلاحاً آنالیز دینامیکی یکنواخت[3] و غیر همزمان[4] اطلاق می شود. به آنالیزی که فقط با در نظر گرفتن اثر عامل دوم صورت می گیرد، آنالیز دینامیکی غیر یکنواخت و همزمان گفته می شود. آنالیز دینامیکی با منظور کردن اثر هر دو عامل فوق، آنالیز دینامیکی غیر یکنواخت و غیر همزمان نامیده می شود.

در آنالیز دینامیکی متداول سازه ها، به منظور محاسبه تغییر مکان ها و نیروهای ایجاد شده در سازه در اثر تحریک لرزه ای، معمولاً فرض می شود که تکیه گاه، تحریک وارده را به طور یکنواخت و همزمان دریافت می کند. به عبارت دیگر تحریک زمین در تمام نقاط اتصال سازه با زمین، بدون تغییر و به طور همزمان دریافت می شود و سازه نسبت به این تحریک یکنواخت و همزمان پاسخ می دهد. اما با توجه به ماهیت انتشار امواج در زمین که تابع زمان و مسیر انتشار می باشد، این فرض در مورد سازه هایی مانند سدها، پل ها، لوله های مدفون در خاک و دکل های انتقال نیرو که دارای سطح تماس نسبتاً طولانی با زمین هستند، ممکن است منجر به نتایج غیر واقعی گردد.

1- Wave passage effect
2- Loss of coherency
3- Uniform
4- Asynchronous

بنابراین لازم است در به کار گرفتن یک شتاب نگاشت منفرد در آنالیز دینامیکی این گونه سازه ها تجدید نظر شود.

در مطالعه حاضر، با معرفی تغییرات مکانی حرکات زمین لرزه و روش های مختلف محاسبه آن، شتاب نگاشت های غیر همزمان و غیر یکنواخت حرکت زمین در فواصل مختلف، با استفاده از روش احتمالاتی تولید شده اند. سپس از این شتاب نگاشت ها برای انجام آنالیز دینامیکی سدهای بتنی با منظور کردن انتشار غیر همزمان و غیر یکنواخت امواج زلزله استفاده شده است. به این منظور سد وزنی رودبار و سد قوسی بختیاری به عنوان نمونه ای از سد های وزنی و قوسی مدل سازی شده اند و رفتار آن ها در سه حالت تحریک غیر همزمان و یکنواخت، تحریک همزمان و غیر یکنواخت تحریک غیر همزمان و غیر یکنواخت بررسی شده و با نتایج آنالیز دینامیکی معمولی مقایسه شده است.

۱-۲- تاریخچه

۱-۲-۱- تغییرات مکانی حرکات زمین لرزه

تغییرات مکانی حرکات زمین لرزه، بعد از نصب اولین شبکه لرزه سنجی در سال ۱۹۶۵مورد توجه محققین قرار گرفت. تا قبل از نصب این شبکه، تغییرات مکانی حرکات زمین لرزه، به انتشار امواج زلزله روی سطح زمین نسبت داده می شد. به این معنی که تصور می شد که تفاوت در حرکات زمین در نقاط مختلف، از تأخیر زمانی در رسیدن امواج زلزله به نقاط دورتر ناشی می شود. اما داده های ثبت شده از شبکه های لرزه سنجی نشان می داد که حرکات زمین در نقاط مختلف علاوه بر تفاوت درفاز، از نظر دامنه نیز دچار تغییرات می گردند. آنالیز این داده ها، احتمال وجود یک الگوی همبستگی بین دامنه و فاز حرکات را در ایستگاه های مختلف نشان می داد. با در دسترس قرار گرفتن داده های ثبت شده از شبکه های لرزه سنجی، تعداد زیادی مدل تجربی تغییرات مکانی حرکات زمین لرزه لرزه توسط محققین مختلف ارائه شد. این مدل ها که عموماً به فرم مدل همبستگی[۵] بودند، بر اساس تخمین طیفی از داده های ثبت شده گسترش یافتند. به طور کلی مدل های همبستگی، توابع نمایی برحسب فرکانس و فاصله هستند که بیانگر تشابه بین حرکات زمین در نقاط مختلف می باشند. نخستین مدل همبستگی تجربی در سال ۱۹۷۹ توسط هندی و نواک

1- Coherency model

در مهندسی زلزله ارائه شد [۱]. به دلیل متفاوت بودن داده های ثبت شده در مکان ها و رویداد های مختلف و نیز تفاوت در روشی که محققین مختلف برای پردازش داده های ثبت شده مورد استفاده قرار می دادند، مدل های زیادی برای تغییرات مکانی حرکات زمین لرزه لرزه ارائه شد. تعدادی از این مدل ها در ضمیمه۱ ارائه شده است. ضعف این مدل ها در وابسته بودن آن ها به مکان ها و رویدادهای زلزله خاص می باشد. به این معنی که از آن ها نمی توان به طور مطمئن در هر مکان و رویدادی استفاده کرد. برای غلبه بر این ضعف در مدل های تجربی، محققین بتدریج به مدل های تحلیلی یا نیمه تجربی روی آوردند. مدل های همبستگی تحلیلی برای تغییرات مکانی حرکت زمین، توابعی هستند که فرم آن ها بر اساس ملاحظات تحلیلی و پارامتر های آن ها بر اساس داده های ثبت شده از شبکه های لرزه سنجی تعیین می شود. سامرویل یک مدل تحلیلی با در نظر گرفتن تاثیر انتشار امواج، اثر منبع محدود و نیز تاثیر شکستگی امواج زلزله در مسیر انتشار آن ها از منبع به سایت ارائه داد [۲]. آبراهامسون از روی آنالیز هایی که بر روی ۱۵رویداد ثبت شده از شبکه لرزه سنجی LLST انجام داد، به این نتیجه رسید که هیچ رابطه مشخصی برای وابسته کردن همبستگی به بزرگی زلزله و ویژگی های گسل وجود ندارد [۳]. شاید بهترین بیان برای همبستگی تحلیلی توسط لوکو و ونگ ارائه شد. مدل آن ها بر اساس آنالیز انتشار امواج برشی در یک محیط تصادفی به دست آمد [۴]. زروا، با این فرض که تحریک در منبع، می تواند به وسیله یک فرایند تصادفی تقریب زده شود، یک مدل تحلیلی برای همبستگی مکانی حرکات زمین به دست آورد. وی برای تبدیل تحریک های منبع به سطح زمین از توابع تبدیل فرکانسی استفاده کرد. این توابع تبدیل فرکانسی از تبدیل فوریه توابع پاسخ لحظه ای حاصل می شدند. وی مدل خود را برای داده های ثبت شده از رویداد شماره ۵ شبکه لرزه سنجی SMART 1 به کار برد و نشان داد که مدل ارائه شده با وجود در نظر نگرفتن اثر شرایط محلی، به خوبی با این داده ها مطابقت دارد [۵]. در ضمیمه ۱ تعدادی از این مدل ها نیز ارائه شده است. سؤالی که در اینجا مطرح می شد این بود که کدام یک از مدل های همبستگی موجود باید مورد استفاده قرار گیرد. از یک طرف مدل های تجربی لزوماً مربوط به یک مکان یا رویداد خاص هستند و از طرف دیگر مدل های تحلیلی بر اساس یک سری فرضیات ساده کننده هستند که ممکن است همیشه با واقعیت مطابقت نداشته باشند. مشکل ذکر شده در تشکیل یک مدل همبستگی مناسب برای هر مکان و رویداد، این بود که همبستگی به عنوان یک اندازه آماری خالص، با پارامترهای فیزیکی مرتبط نیست.

استفاده مستقیم از مدل های همبستگی تجربی یا تحلیلی به عنوان تحریک تکیه گاهی در آنالیزهای ارتعاشات تصادفی[۶] یا طیف پاسخ[۷] برای به دست آوردن پاسخ خطی سازه های ساده به راحتی امکان پذیر خواهد بود[۶ و۷]. این در حالیست که برای انجام آنالیز تاریخچه زمانی برای سازه های پیچیده تر و نیز آنالیز غیر خطی این گونه سازه ها، نیاز به تولید تاریخچه زمانی های مصنوعی است. برای تولید این حرکات مصنوعی، محققین به شبیه سازی[۸] حرکات لرزه ای زمین متوسل شدند. شبیه سازی تغییرات مکانی حرکات زمین لرزه، این امکان را فراهم می کرد تا از یک یا چند تاریخچه زمانی معلوم، برای تولید تاریخچه زمانی های نامشخص در نقاط مورد نیاز استفاده شود. ونمارک و فنتون در سال ۱۹۹۱روش کریجینگ[۹] که نخستین بار در سال ۱۹۶۶ در حل مسائل زمین آماری به کار رفته بود را برای شبیه سازی حرکات لرزه ای زمین به کار بردند [۸]. بعداً ونمارک و فنتون با معرفی روش پیش بینی خطی چند متغیره[۱۰]، روش کریجینگ را اصلاح کرد [۹]. هوشیا با محاسبه خطای تخمین شبیه سازی، روش کریجینگ معمولی را بهبود بخشید [۱۰].کامدا و موریکاوا با استفاده از تابع چگالی احتمال شرطی، توانستند تغییرات مکانی حرکات زمین لرزه را شبیه سازی کنند. [۱۱]

روش های فوق به دلیل اینکه شبیه سازی حرکات زمین را به شرط یک تاریخچه زمانی معلوم انجام می دهند به روش های شبیه سازی شرطی معروف شدند. علاوه بر روش های شبیه سازی شرطی، دسته ی دیگری از روش های شبیه سازی، به نام روش های شبیه سازی غیر شرطی نیز بر اساس استفاده مستقیم از روابط همبستگی که در قسمت های قبل به آن ها اشاره شد، گسترش یافتند. در این روش ها از هیچ قید و شرطی برای تولید تاریخچه زمانی های مصنوعی استفاده نمی شود. شینوزوکا روش بیان طیفی را برای شبیه سازی شتاب نگاشت های حرکت زمین به کار برد. وی در این روش طیف فرکانس- عدد موج را که از تبدیل فوریه تابع چگالی طیفی توان بین نقطه ای به دست می آمد، برای شبیه سازی شتاب نگاشت ها به کار برد [۱۲]. زروا از روش تجزیه ماتریس کواریانس برای شبیه سازی شتاب نگاشت های حرکت زمین استفاده کرد. در این روش، تاریخچه زمانی های شتاب به صورت مجموع تعدادی از توابع مثلثاتی با ضرایب تصادفی وابسته به مکان شبیه سازی می شوند. تعداد این توابع مثلثاتی برابر تعداد نقاطیست که شبیه سازی در آن ها

1-Random vibration
2-Response spectrum
3-Simulation
4-Kriging method
5- Multivariate linear prediction