# طراحی بهینه دیوارهای خاکی میخکوبی شده برمبنای تغییر مکان تحت بارهای لرزهای

پویا نقشین، هادی شهیر<sup>®</sup>؛ دانشگاه خوارزمی، دانشکده فنی مهندسی، گروه عمران تاریخ: دریافت ۹۳/۲/۳ پذیرش ۹۶/۱/۱۸

## *چکید*ہ

میخکوبی خاک از روشهای رایج برای پایدارسازی گودبرداریها بهصورت موقت و دائم است که در صورت استفاده از آن بهصورت سازه دائم، بررسی لرزهای این سازهها اهمیت دارد. برای بررسی رفتار دیوارهای خاکی میخکوبی شده تحت بار زلزله چند مدلسازی فیزیکی انجام شده و اطلاعات محدودی موجود است. برای بررسی اثرات انواع پارامترها بر پایداری و عملکرد دیوارهای خاکی میخکوبی شده میتوان از مدلسازی عددی استفاده کرد که در پژوهش حاضر از این روش استفاده شده است. در این تحقیق، به بررسی تأثیر پارامترهای مختلفی از جمله فاصله، چیدمان و طول میخها و ارتفاع دیوار بر تغییر مکان لرزهای دیوارهای خاکی میخکوبی شده تحت شتابنگاشتهای مختلف زلزله پرداخته شده است. برای بررسی اثر چیدمان و طول میخها در عملکرد این سازهها، دو چیدمان یکنواخت و متغیر در ارتفاع استفاده شده است. برای بررسی تأثیر فاصلهٔ میخها و ارتفاع دیوار، فواصل ۲ و ۱/۵ متر، و ارتفاع ۱۲، ۲۰ و ۲۹ متر در نظر گرفته شده است. تحلیلهای لرزهای با استفاده از نرمافزار المان محدود دوبعدی Plaxis صورت گرفته است. برای محاسبهٔ طول میخها، ضریب اطمینان پایداری مدل های مختلف ثابت در نظر گرفته شده و از نرمافزار تعادل حدی GeoSlope بهره برده شده است. پس از تعیین طول میخها بر اساس ضریب اطمینان پایداری ثابت، تغییر شکل مدلها تحت شتاب نگاشتهای مختلف محاسبه شده و توصیههایی در زمینه کاهش تغيير مكان لرزهاي ديوارهاي ميخكوبي شده ارائه شده است.

**واژههای کلیدی**: دیوار خاکی میخکوبی شده، رفتار لرزهای، مدلسازی اجزای محدود، تغییر مکان لرزهای، تحلیل تاریخچه زمانی

\* نویسنده مسئول shahir@khu.ac.ir

با شتاب گرفتن ساختوساز در شهرهای بزرگ بهویژه در زمینه ساختمانهای بلند، راهآهن شهری، زیرگذرهای شهری و ... و وابسته بودن این فعالیتها به انواع گودبرداریهای عمیق و نیمهعمیق، مسئله روشهای پایدارسازی گود از جمله تسلیح و احداث سازه نگهبان و... از مسائل مهم ساختوساز شهری شده است تا هنگام عملیات خاکبرداری، از ریزش جدارههای قائم و یا نزدیک به قائم جلوگیری بهعمل آید. یکی از روشهای رایج تسلیح که برای پایدارسازی دائم و موقت ترانشهها بهکار میرود، میخکوبی خاک است. بهعلت انعطاف پذیری میخکوبی برای پایدارسازی سازههای خاکی در مناطق لرزهخیز روشی مناسب است. با توجه بهکاربرد بسیار این سیستم در کشورهای لرزهخیز و عملکرد مناسب دیوارهای خاکی میخکوبی شده در زلزلههای گذشته، بررسی رفتار لرزهای این دیوارها اهمیت دارد [1]، [7].

طی سه دههٔ اخیر پژوهش های موردی، آزمایشگاهی، تحلیلی و عددی گستردهای از دیوارهای خاکی میخ کوبی شده در حالت استاتیکی صورت گرفته است. در این پژوهش ها از مدلسازی آزمایشگاهی، مدلسازی عددی، روش های تحلیلی برای بررسی رفتار دیوارهای میخ کوبی شده از جمله تغییر مکان، مود تغییر مکان، توزیع نیرو در میخها و ضرایب اطمینان و تأثیر پارامترهای مختلف در عملکرد این سازه ها استفاده شده است. بر خلاف حالت استاتیکی، بررسی های دینامیکی محدودی روی این سازه ها صورت گرفته، که در ادامه به شرح مختصر پژوهش های دینامیکی پیشین پرداخته شده است.

ویوستیک و همکاران<sup>۱</sup> (۱۹۹۳) با انجام آزمایشهای سانتریفیوژ دینامیکی روی مدلهای خاکی میخکوبی شده، محتمل ترین مکانیزم گسیختگی و تأثیر طول و سختی خمشی میخ در مکانیسم گسیختگی را تحت لرزشهای قوی بررسی کرده و نتیجه گرفتند که گوه گسیختگی شامل دو بلوک لغزنده و سه سطح گسیختگی است [۳]، [٤]. چوکر و همکاران<sup>۲</sup> (۱۹۹۱) با استفاده از نرمافزار المان محدود ABAQUS دیواری خاکی میخکوبی شده را با بهکارگیری مدل رفتاری 1. Vucetic

<sup>2.</sup> Chokeir

دراگر پراگر با قانون سختشوندگی برای شبیهسازی خاک و مدل رفتاری موهر-کولمب برای اندرکنش خاک–میخ مدلسازی کرده و نتایج تحلیل عددی را با نتایج آزمایشگاهی مقایسه کرده و نتیجه گرفتند که روش عددی نتایج خوبی ارائه داده و روشی اقتصادی برای طراحی است [0]، [7]. ژنگ و همکاران (۱۹۹۹) بهصورت سهبعدی رفتار دینامیکی این سازهها را مطالعه کرده و از دو فنر برای شبیهسازی اندرکنش خاک-میخ استفاده کردند [۷]. ولا (۲۰۰۰) دیواری خاکی میخکوبی شده را با نرمافزار تفاضل محدود دوبعدی FLAC مدلسازی کرده و با مقایسه نتایج تحلیل عددی با آزمایشگاهی نتیجه گرفت که ناحیهای در اواسط ردیفها وجود دارد که بیشترین نیروی محوری در آن ردیف بسیج شده است که این ناحیه به تشکیل گوه گسیختگی وابسته است، همچنین نتیجه گرفت که تئوری بلوک لغزنده جابهجایی کمتری نسبت به FLAC نشان میدهد [۸]. هانگ و همکاران<sup>۲</sup> (۲۰۰۵) با استفاده از میز لرزان آزمایشهایی برای بررسی تأثیر زاویهٔ میخ، طول میخ و فرکانس لرزش بر مقاومت لرزمای و مکانیسم گسیختگی انجام دادند [۹]. بابو و سینگ<sup>۳</sup> (۲۰۰۸) دیواری خاکی میخکوبی شده را با استفاده از نرمافزار المان محدود PLAXIS و بهکارگیری مدل رفتاری سختشونده با کرنش کم در حالت دینامیکی و مدل موهر کولمب در حالت استاتیکی و شبه استاتیکی مدلسازی و تحلیل کرده و نتایج حاکی از آن است که روش شبه استاتیکی نتایج محافظه کارانهتری نسبت به تحلیل دینامیکی دارد [۱۰].

با توجه به مجاورت ساختمانها و سایر سازهها به محدودهٔ گودبرداریها، باید برآورد مناسبی از میزان تغییر شکل دیوارهای خاکی میخکوبی شده انجام شود تا مشکلی برای سازههای مجاور ایجاد نشود و از بهوجود آمدن بارهای اضافی بر سازه مجاور جلوگیری شود، در نتیجه نیاز به بررسی اثر پارامترهای مختلف دیوار بر روی تغییرمکان این سازهها تحت بارهای دینامیکی است. در پژوهشهای پیشین تغییر مکان لرزهای برای چند دیوار با مشخصات خاص بررسی شده است. در این تحقیق تأثیر پارامترهای مختلف بر تغییر مکان لرزهای مورد بررسی قرار گرفتند و طراحی بهینه دیوار میخکوبی شده به گونهای که تغییر مکان

<sup>1. &</sup>lt;u>Vela</u>

Hong et al.
Babu and Singh

لرزهای دیوار حداقل گردد، مدنظر است. پارامترهای مختلفی در تغییرمکان دیوار مؤثر است، که در این پژوهش اثر چند پارامتر مهم از جمله فاصلهٔ افقی و عمودی میخها، چیدمان مختلف و طول میخها، ارتفاع دیوار و پارامترهای مختلف لرزهای بر مقدار و نحوهٔ تغییر مکان بررسی شده است. به منظور بررسی اثر پارامترهای ذکر شده در شرایط یکسان، در مدلهای مختلف طول میخها بر اساس ضریب اطمینان یکسان برای پایداری کلی محاسبه شده است. برای این منظور توصیههای دستورالعمل FHWA مدنظر قرار گرفته و برای دیوارهای میخکوبی شده دائمی مقدار ضریب اطمینان پایداری ۱/۱ انتخاب شده است. آنالیزهای پایداری روی تمامی مدلهای مفروض، در نرمافزار تعادل حدی Geoslope صورت گرفته است. پس از تعیین طول میخها برای مدلهای بررسی شده با ضرایب اطمینان ثابت، تحلیلهای لرزهای با نرمافزار المان محدود Plaxis انجام شده است.

# معرفی مدل عددی و صحتسنجی نتایج آن

در این تحقیق برای تحلیل دینامیکی دیوار خاکی میخکوبی شده، از تحلیل تاریخچهٔ زمانی با روش اجزای محدود استفاده شده است که روشی کامل بوده است و تغییرات پاسخ دیواره در طول مدت زلزله قابل پیشبینی است. برای انجام آنالیز از نرمافزار المان محدود دوبعدی Plaxis استفاده شده است.

#### ۱. فرضیات مدلسازی

در این بررسی دیوار میخکوبی شده بهصورت کرنش صفحهای در حالت زهکشی شده مدلسازی شده است. برای دقت محاسبات بیشتر، از المانهای مثلثی ۱۵ گرهی استفاده شده است. خاک با مدلهای الاستوپلاستیک موهر-کولمب و سخت شونده و میخ و رویه با مدل الاستیک خطی مدلسازی شده است. از المان صفحه برای مدلسازی میخ و رویه استفاده شده است. با توجه به آزمایشهای بیرونکشیدگی میخ که یین<sup>۱</sup> و چو<sup>۲</sup> (۲۰۰۵) برای اندازهگیری مقاومت سطح مشترک میخ و خاک انجام دادهاند، در نظرگیری مقدار ۱ برای ضریب کاهش ۱. Yin

1. Yin 2. Chu مقاومت ( $R_{int}$ ) سطح مشترک خاک – میخ، منطقی است [۱۱]. شتاب نگاشتهای استفاده شده در تحلیل عددی با استفاده از تغییر مکان افقی با ضریب ۰/۰۱ متر به بستر هندسه مدل اعمال گردیده و برای جلوگیری از انعکاس امواج، ابعاد هندسه مدل طوری در نظر گرفته شده است که امواج ناشی از زلزله در اثر میرایی هندسی (شعاعی) زائل شده و تأثیری بر رفتار دیوار نداشته باشند. مرزهای جانبی در راستای افقی و مرز بستر در هر دو جهت افقی و عمودی محدود شده است. برای مدلسازی میرایی توده خاک علاوه بر میرایی هندسی از میرایی رایلی با ضرایب  $\alpha$  و  $\beta$  نیز استفاده شده است. که ضرایب میرایی رایلی از روابط زیر محاسبه می شوند.

$$\xi = \left(\alpha\beta\right)^{0.5} \tag{1}$$

$$\omega_{\min} = \left(\alpha / \beta\right)^{0.5} \tag{(Y)}$$

در روابط ۱ و ۲، کم میرایی خاک است و min زاویهٔ دوران حداقل است.

#### ۲. صحتسنجی نتایج مدل عددی

معمولاً در تحلیلهای عددی برای ارزیابی صحت مدلسازی از نتایج اندازهگیریهای آزمایشگاهی استفاده میشود. در این تحقیق با استفاده از دو آزمایش کوچک مقیاس سانتریفیوژ دینامیکی و میز لرزان صحت فرضیات در نظر گرفته شده و مدلسازی ارزیابی شده است.

### الف) آزمایش سانتریفیوژ دینامیکی

آزمایش سانتریفیوژ دینامیکی بررسی شده بهوسیلهٔ توفنکجیان و ویوستیک (۱۹۹۰) بر مدلهای مختلف برای بررسی گوهٔ گسیختگی محتمل صورت گرفته است. در آزمایش سانتریفیوژ مدلهای ساخته شده در معرض شتاب زاویهای با بزرگی ۰۰ برابر شتاب گرانش قرار گرفتهاند، بنابراین ضریب مقیاس ۰۰ در نظر گرفته می شود. هندسهٔ آزمایش و محل ابزار دقیق در شکل ۱ آورده شده است.



شتاب وارده به مدل، بهصورت سینوسی با ۱۰ سیکل و شتاب حداکثر g ۲۸، است. مشخصات مدل آزمایش سانتریفیوژ دینامیکی عبارتاند از: ارتفاع دیوار مدل آزمایشی ۱۵۲ میلی متر معادل با دیواری به ارتفاع ۷/۲ متر، نوع خاک ماسه لای دار، زاویهٔ اصطکاک داخلی خاک ۳۳ درجه، چسبندگی خاک ۷/۲ kPa مدول الاستیسیته خاک MPa، وزن مخصوص خاک خشک ۱۹ kN/m3، رطوبت خاک ۰/۷٪، وزن مخصوص مرطوب خاک kN/m3 کاک خشک ۱۰/۰۰۵، نسبت طول میخ به ارتفاع دیوار ۲۰/۰، ضرایب جرم و سختی میرایی رایلی بهترتیب ۱۶ و ۲۰۰۷.

آزمایش سانتریفیوژ دینامیکی با ابعاد واقعی مدلسازی و تحلیل شده است. رفتار خاک با هر دو مدل رفتاری موهر-کولمب و سخت شونده مدلسازی شده و نتایج حاصل از تحلیل عددی و آزمایش در شکل ۲ آورده شده است. در این شکل جابه جایی افقی در محل LVDT1 و LVDT1 و نشست در محل TUDT3 ارائه شده است. با توجه به شکل ۲ مشاهده می گردد که برای جابه جایی افقی در محل میخ ردیف بالا نتایج تحلیل عددی و آزمایشگاهی تقریباً در یک محدوده است ولی در محل میخ ردیف پایین نتایج تحلیل عددی بیش تر از مقادیر اندازه گیری شده است. نتایج نشست نیز تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی نشان می دهد. شونده برای شبیه سازی رفتار خاک نسبت به مدل موهر -کولمب مناسب تر است. مزیت مدل خاک سخت شونده نسبت به مدل موهر کولمب، وابستگی سختی به سطح تنش است. بدین صورت که این مدل، افزایش سختی را متناسب با میزان افزایش تنش در نظر می گیرد. با توجه به مزایای مدل سخت شونده برای خاک و تطابق بهتر این مدل رفتاری با نتایج آزمایشگاهی، در ادامه از مدل رفتاری سخت شونده استفاده شده است.



(LVDT2)

[ Downloaded from jeg.khu.ac.ir on 2024-05-02 ]



شکل ۲. الف) تغییر مکان میخهای ردیف بالا (LVDT1) ب) تغییر مکان میخهای ردیف پایین (LVDT2) ج) نشست بالای دیوار (LVDT3).

ب) آزمایش میز لرزان

دومین آزمایش دینامیکی که بهمنظور ارزیابی نتایج مدلسازی عددی استفاده شده است، آزمایش میز لرزان است. ضریب بزرگنمایی (۸) در این آزمایش برابر ۸/۵۷ است. برای ارزیابی مدلسازی، تحلیل با ابعاد واقعی دیوار انجام شده و با توجه به نتایج ارزیابیهای آزمایش سانتریفیوژ، در این مدلسازی فقط از مدل رفتاری سخت شونده استفاده شده است. در آزمایش میزلرزان از شتابنگاشت زلزله چیچی (شکل ۳) استفاده شده است. در این بررسی شتاب نگاشت زلزله چیچی به طور متوالی با شتاب حداکثر ۰/۰۹۸، ۰/۲۲۱، ۱۷۶۶ و

مشخصات مدل در آزمایش میز لرزان عبارتاند از: ارتفاع مدل m //۰ معادل با دیواری با ارتفاع T m ، وزن مخصوص خشک خاک (γ) kN/m<sup>3</sup> ، زاویهٔ اصطکاک داخلی خاک (φ) ٤١/١ درجه، مدول الاستیسیته خاک (β) MPa (E، نسبت میرایی خاک (ξ) ۷٪، سختی محوری میخها No mm و ۲۰۰۰۳، فاصلهٔ افقی و عمودی میخها بهترتیب nm ۱۱۰ و ۱۱۰ mm ضرایب میرایی رایلی α و β بهترتیب مقادیر ۳/٦٦ و ۲/۱۰۰ در نظر گرفته شده است.



شکل ۳. شتاب نگاشت زلزله چیچی بدون اعمال ضریب بزرگنمایی[۹]

نتایج تحلیل عددی و اندازه گیری تغییر مکان افقی ماندگار در ارتفاع دیوار بهازای سه مقدار شتاب ورودی در مقیاس واقعی در شکل ٤ مقایسه شده است. چنانکه در شکل ٤ ملاحظه می شود تا سطح شتاب g ٤٤٧/ روند و مقادیر پیش بینی شده برای تغییر شکل دیوار، تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارد. بهازای شتاب g ٥٤٦/ مقدار تغییر شکل در بالای دیوار به خوبی پیش بینی شده است ولی روند تغییر شکل پیش بینی شده و اندازه گیری شده در وسط دیوار متفاوت است.

پس از مدلسازی و مقایسه نتایج تحلیل عددی و اندازه گیری آزمایشگاهی دو آزمایش دینامیکی، نتیجه می شود که نتایج حاصل از تحلیل عددی مطابقت خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارد که دلیل بر صحت عملکرد مدلسازی است، همچنین با مقایسهٔ نتایج آزمایشگاهی با تحلیل عددی در آزمایش سانتریفیوژ نتیجه شده است که مدل رفتاری سخت شونده، رفتار خاک را دقیق تر از مدل موهر کولمب شبیه سازی می کند.

طراحي مدلها

در این قسمت مدل عددی تشریح شده در بخش قبل که صحت نتایج آن با دقت خوبی تأیید شد، بهمنظور تحلیل حساسیت استفاده می شود. برای این منظور تأثیر پارامترهای مختلفی 0



از قبیل فاصله، چیدمان و طول میخها و ارتفاع دیوار بر تغییر مکان لرزهای دیوار میخکوبی شده بررسی شده است.

شکل ٤. نتايج تحليل عددی و آزمايشگاهی آزمايش ميز لرزان

1

0.5

تغییر مکان ماندگار افقی (m)

به منظور بررسی پارامترهای ذکر شده در شرایط یکسان، طول میخها بر اساس حداقل ضریب اطمینان لرزهای برای پایداری کلی دیوارهای میخکوبی شده دائم که در آئیننامه FHWA مقدار ۱/۱ ذکر شده است، آنالیزهایی روی تمامی مدلهای مختلف مفروض، در نرمافزار تعادل حدی Geoslope انجام شده است. پس از تعیین طول میخها برای مدلهای بررسی شده، تحلیلهای لرزهای با نرمافزار المان محدود Plaxis انجام شده است.

#### پارامترهای متغیر مدلها

تحليل عددي a=0.447 🕶

- **فاصله میخها**: چیدمان میخها معمولاً به سه صورت مربع (مستطیل)، شطرنجی و یا نامنظم است. ولی بهطورکلی تفاوتی از نظر مدلسازی و نتایج آن، بین دو چیدمان مربعی و شطرنجی وجود ندارد. در این تحقیق چیدمان مربعی است و از شبکه m ۱/۵ m ۱/۵ و m ۲ x m ۲ استفاده شده است.
- **چیدمان و طول میخها**: انتخاب طول میخها در دیواری میخکوبی شده می تواند یکنواخت (در تمام ارتفاع دیوار از یک طول استفاده شود) یا متغیر باشد، به این معنی که در مناطق و ترازهای مختلف از طولهای متفاوتی استفاده شود. در این تحقیق چیدمان یکنواخت

g

(a) و چیدمان (b) که در شکل ۵ مشاهده می شود، بررسی شده است. طول میخها در چیدمان (b) از بالا به پایین با نسبتهای ۱، ۸۷۵، ۵/۷۰، ۲۱۵۰ و ۰/۰ کاهش می یابد.
در نرمافزار تعادل حدی GeoSlope، برای تمامی مدلها ضریب اطمینان لرزهای ۱/۱ برای پایداری کلی ملاک قرار داده شده و با توجه به تقسیم بندی طول میخها در چیدمان (a) و (b) با انجام آنالیز برای هر مدل، طول میخها به دست آمده اند.



**ارتفاع دیوار**: برای بررسی تأثیر ارتفاع دیوار در رفتار و عملکرد دیوار سه ارتفاع ۲۰،۱٤ و ۲۲ متری در آنالیزها در نظر گرفته شده است.

فرضيات مدلسازى

دیوار میخ کوبی شده به صورت دو بعدی (کرنش مسطح)، در نرم افزار Plaxis مدل سازی شده است. میخها با طول های متفاوت و زوایای ۱۵ درجه نسبت به افق هستند. در این مدل سازی قطر گمانه ایجاد شده برای نصب میخها ۱۰۰ سر نظر گرفته شده که در وسط آن میل گرد فلزی با قطر mm ۳۲ قرار می گیرد. میخهای ردیف اول و آخر در فاصلهٔ یک متری از بالا و پایین دیوار قرار گرفته اند. طبق توصیهٔ آیین نامه FHWA، ضریب اطمینان سطح تماس خاک و دوغاب برابر ۱/۵، مقدار مقاومت باند kPa ۲۰۰ و ضریب اطمینان در برابر گسیختگی کششی میخ برای بارهای دینامیکی برابر ۱/۳۵ است.

با توجه به اینکه میلگردهای فولادی مفروض قطر mm ۳۲ دارد و مقاومت تسلیم آنها ٤٠٠٠ kg/cm<sup>2</sup> است، ظرفیت کششی آرماتور فولادی ۳۲۲ kN بهدست می آید. مشخصات

		•
	پارامتر	خاک
وزن مخصوص	γ	۱۹ KN/m <sup>3</sup>
مدول الاستيسيته	Е	v KPa
نسبت پواسون	υ	•/٢
چسبندگى	с	۲٥ KPa
زاويهٔ اصطکاک	φ	۳٦°
زاوية اتساع	Ψ	1.0
		رويه شاتكريت
وزن مخصوص	γ	۲٤ KN/m <sup>3</sup>
مدول الاستيسيته	Е	ru KPa
سختي محوري	EA	۲۱۰۰۰۰ KN/m
سختى خمشى	EI	ννε KN $m^2/m$
ضخامت رويه	d	•/\ m
نسبت پواسون	υ	٠/٢
قطر مجموعه میخ و دوغاب ۱۰ cm		ميخها
قطر ميخ	d	۳۲ mm
مدول الاستيسيته ميخ		۲۰۰ GPa
مدول الاستيسيته دوغاب		rr GPa
سختي محوري	EA	moarr KN/m
سختی خمشی	EI	NAV KN m <sup>2</sup> /m
نسبت پواسون	υ	•/٢

خاک، میخها و پوشش شاتکریتی در جدول ۱ ارائه شده است. در این جدول پارامترهای EA و EI میخ بر اساس مدول الاستیسیته معادل محاسبه شده است. جدول ۱. مشخصات خاک، یوشش دیوار و میخها

با توجه به این که در تحلیلهای اجزای محدود شتاب زلزله بهصورت افقی وارد شده است، در آنالیزهای تعادل حدی نیز فقط ضریب شتاب افقی (Kh) منظور شده است. ضریب شتاب افقی با استفاده از رابطههای توصیه شده در آئیننامهٔ FHWA (رابطههای ۳ و ٤)، مقدار ۲/۰ محاسبه شده است.

 $A_m = (1.45 - a_{max}) \cdot a_{max}$  (r)  $K_h = 0.5 A_m$  (E)

پس از تعیین طول میخها، طرح مذکور در نرمافزار Plaxis مدلسازی و تغییرمکان جانبی

دیوار محاسبه می شود. با ارزیابی مدل سازی در بخش ۲ نتیجه شد که مدل رفتاری سخت شونده برای شبیه سازی رفتار خاک نسبت به مدل موهر کولمب مناسب تر است، به همین دلیل برای بررسی تأثیر پارامترها، از مدل سخت شونده استفاده شده است. مشخصات خاک، میخ و رویه در جدول ۱ آورده شده است، هم چنین مقادیر ضرایب جرم و سختی میرایی رایلی به ترتیب ۳۱٤ و ۲۰۰۳ به دست آمده است. برای انجام تحلیل های دینامیکی و تعمیم نتایج حاصل از تحلیل ها از شتاب نگاشت ۷ زلزله متفاوت دور و نزدیک استفاده شده است. مشخصات شتاب نگاشت ها در جدول ۲ آورده شده است.

	Kocaeli	Loma prieta	Chichi	Tabas	Kobe	Loma prieta	Kobe
مدت زمان زلزله <sup>ا</sup> (s)	۲۷	٤٠	1 + 0	٢٤	٤١	٣٨	٧A
شتاب حداکثر <sup>۲</sup> (m/s <sup>2</sup> )	۰/۳٥٨	• /٣٦٧	• /٣٦٤	۰/۳۲۸	• /۳۷۱	• /٢٣٦	•/\٤٨
بزرگی "	٧/٤	٦/٩	٧/٦	٧/٤	٦/٩	٦/٩	٦/٩
فركانس (Hz)	٣/٥	0	١/٥	٥	٣/٥	0/0	٦
شدت اریاس°(m/s)	١/٣٢٩	١/٣٤٨	۲/۰۳۳	1/278	1/325	1/712	١/١٥٦
فاصله تا گسل (Km)	17/V	17/V	12/93	١٧	11/1	٦٤/٤	٩٤/٢

جدول ۲. مشخصات زلزلههای استفاده شده

## نتايج تحليلها

در جدول ۳ نتایج حاصل از همه آنالیزهای انجام شده (شامل ۸٤ حالت مختلف) بهصورت نسبت تغییر مکان افقی ماندگار در بالای دیوار به ارتفاع دیوار ارائه شده و در ادامه به بررسی اثر پارامترهای مختلف پرداخته شده است.

## بررسي اثر فاصله ميخها

در همه مدلها مشاهده شد با افزایش فاصله میخها، تغییر مکان کاهش مییابد و تغییر مکان رویه در میخهایی با فاصله ۲ متر نسبت به فاصله میخ ۱/۵ متری یکنواخت تر شده است.

- 4. Frequency
- 5. Arias Intensity

<sup>1.</sup> Duration

<sup>2.</sup> Peak acceleration

<sup>3.</sup> Magnitude

مقایسهٔ یکی از مدلها در شکل ٦ آورده شده است. دلیل کاهش تغییر مکان با افزایش فاصله میخها ناشی از آن است که در طراحی طول میخها با استفاده از نرمافزار تعادل حدی با ضریب اطمینان یکسان، با افزایش فاصلهٔ میخها، طول میخها افزایش یافته و در نتیجه طول بیش تری از میخها به پشت گوه گسیختگی نفوذ کرده است. این امر به خصوص در ترازهای بالا باعث مهار بیش تر قسمت فوقانی دیوار شده و تغییر مکانها در ارتفاع دیوار یکنواخت تر نیز شده است.

δ/Η		Kobe دور	Loma	V-h-	Tabaa	Chiahi	Loma	V1	
type	S	H (m)		prieta	ندىك	Tabas	Chichi	prieta نادىك	Kocaen
	(m)	(m)		55-					
а	۲	١٤	•/••7812	•/••٦٧١	•/•• ٢٦٤	•/••7٧٧١	•/••0279	•/• ١• ٨• ٨	•/•١٢•٩
		۲۰	•/••7779	•/••\٩٥	۰/۰۰۲۷۵	•/••٣٥٤V	•/••\٩•0	•/•17٣٧٣	•/•1٤••
		۲٦	۰/۰۰۲٤۸٥	•/•١•١٥	•/••٣	•/••£٢	•/•١•٧٦٥	•/•18111	•/•12٩•
	١/٥	١٤	•/••YOVE	•/••V\£	•/••٣	•/••٣٢•٤	•/••٦٤٦٣	•/•11070	•/•1717
		۲۰	•/•• ٢٦١٨	•/••٩٣٥	•/••٣٢	•/••٣٩٦٩	•/•11•02	·/· 12TAV	•/•1207
		۲٦	•/••792٣	•/•1127	•/••٣٧٦	•/•• ٥٣٣١	•/•1£977	•/•17181	•/•١٦١١
b	۲	١٤	•/••٢١٥٦	•/••٦٣٥	•/••YOV	•/•• YV•A	•/••£٩٦٦	•/• 1 • ٣0 1	•/•112V
		۲۰	•/••٢•٩٥	•/••Vo	•/•• ۲٤	•/••٣•٣١	•/••٦٢١٩	•/•١•••٦	•/•1771
		۲٦	•/••7189	٠/٠٠٨٤٢	•/•• 727	•/••٣٤٩٢	•/••VAA	•/•١•٧١٤	•/•179٣
	١/٥	١٤	•/•• ٢٢٦٩	•/••٦٩٢	•/••٢٦	•/•• 7777	•/••0•V٣	•/••٩٧٢١	•/•117٣
		۲.	•/••٢٢٩٦	٠/٠٠٧٩	•/••YV	•/••٣٣٣٣	٠/٠٠٧٣٩٥	•/•11121	•/•1747
		۲٦	•/•• ٢٣٤٤	•/••٩	•/•• ٣٧٤	•/••٣٧٧٥	•/••9٣٣٢	•/•11977	•/•1٣٦١

جدول ۳. مقادیر نسبت تغییرمکان افقی ماندگار به ارتفاع دیوار.

## بررسی تأثیر چیدمان میخها

چنانکه در شکل ۷ بهعنوان نمونه مشاهده می شود، در همه مدلها تغییر مکان در چیدمان (b) کم تر از تغییرمکان در چیدمان (a) است. دلیل این موضوع نیز بهوضوح از نتایج حاصل برای طول میخها قابل استنتاج است. میخهای ردیفهای بالا در دیوار با چیدمان (b) طول بیش تری داشته و در پشت گوه گسیختگی قرار می گیرند ولی در چیدمان (a) ردیفهای فوقانی اکثراً داخل گوه گسیختگی قرار گرفته و نقش کمی در کاهش تغییر مکان دیوار دارند. نتایج حاصل از آنالیزهای تعادل حدی (شکل ۸ و ۹) مؤید این مطلب است. همچنین مشاهده می شود که دیوار با چیدمان (a) تغییرمکان طرهای داشته و حول میخهای پایین دوران دارد ولی دیوار با چیدمان (b)، تغییرمکان یک نواخت تری دارد و این به دلیل عملکرد مهاری میخهای ردیف بالایی است که سبب دوران کم تر دیوار می گردد.







شکل ۷. نمودار تغییرمکان در عمق تحت زلزله چیچی (دیوار ۲۰ متر با فاصله میخ ۲ متر)



شکل ۹. گوه گسیختگی دیوار ۲۰ متری با چیدمان (b) و فاصله میخ ۲ متر

بررسى تأثير ارتفاع ديوار

چنانکه بهعنوان نمونه در شکل ۱۰ مشاهده می شود، در همه مدلها یعنی در هر چیدمان و فاصله میخ، با افزایش ارتفاع دیوار، نسبت تغییرمکان به ارتفاع دیوار (δ/H) افزایش می یابد. همچنین مشاهده می شود که در همه مدلها، میزان تغییرمکان به تر تیب تحت زلزلههای کجالی، لوماپریتا، چیچی، طبس و کوبه کاهش می یابد. با توجه به شتاب نگاشتهای این زلزلهها، دلیل تفاوت تغییرمکان در زلزلههای مختلف ناشی از تعداد تکرار شتاب در محدودهٔ شتاب حداکثر است.



شکل ۱۰. نمودار تغییرمکان ماندگار نسبی نسبت به ارتفاع برای دیوارهایی با چیدمان (a) و فاصلهٔ میخ ۲ متر

بررسی اثر دانسیته میخ بر تغییر مکان افقی دیوار

در این بخش به منظور بررسی اثر دانسیته میخ بر تغییر مکان افقی ماندگار در بالای دیوار و تعیین حالت بهینه نوع چیدمان و فاصلهٔ میخ، گراف هایی برای دیوارهایی با ارتفاع ۲۰،۱۶ و ۲ متری رسم شده که نمونه ای از آن ها در شکل ۱۱ آورده شده است. در این گراف منظور از دانسیتهٔ میخ، مجموع طول میخ ها بر واحد مساحت (L/H × S<sub>h</sub>) است. در همهٔ حالات که به عنوان نمونه گراف دیوار ۲۲ متری در این مقاله آورده شده است مشاهده شده که بهینه ترین حالت، دیوار با چیدمان (b) و فاصلهٔ میخ ۲ متر است و بدترین حالت از لحاظ اقتصادی (دانسیته میخ) و تغییرمکان نسبی، دیوار با چیدمان (a) و فاصله میخ ۵/۱ متر است. هم چنین مشاهده می شود که برای هر دو نوع چیدمان با افزایش فاصله میخ دانسیته کاهش یافته و در

نتايج

مدلهای کوچک مقیاس آزمایش سانتریفیوژ و میز لرزان، با ابعاد واقعی مدلسازی شده و مقایسهٔ نتایج تحلیل نشان میدهد که نتایج حاصل از این تحلیلها با نتایج آزمایشگاهی تطابق خوبی دارد. در ارزیابی صحت مدلسازی از دو مدل رفتاری خاک استفاده شد، با مقایسهٔ نتایج



بهدست آمده از این دو مدل رفتاری نتیجه میشود که مدل رفتاری سختشونده، رفتار خاک را بهتر از مدل رفتاری موهر کولمب مدلسازی میکند.

شکل ۱۱. نمودار تغییرمکان نسبی دیوار نسبت به دانسیتهٔ میخ ( دیوار ۲۳ متری تحت زلزله کوبه) در این تحقیق برای بررسی اثر پارامترهای ارتفاع دیوار، فاصله میخها و نحوهٔ چیدمان میخها در تغییرمکان لرزهای دیوار میخکوبی شده آنالیزهای متعددی با هفت شتاب نگاشت زلزلههای مختلف انجام شد. تطابق نتایج حاصل از شتاب نگاشتهای مختلف، بر جامع بودن نتایج دلالت دارد که نتایج بدین شرح است:

- ۱. با بررسی اثر فاصله میخ در مقدار تغییرمکان مشاهده می شود با افزایش فاصله میخها، تغییرمکان دیوار کاهش می یابد که دلیل این امر زیاد شدن طول میخها با افزایش فاصله آنها و در نتیجه نفوذ بیش تر میخها به پشت گوه گسیختگی است.
- ۲. تغییر مکان دیوارهایی که طول میخها از بالا به پایین کاهش مییابد، کمتر از تغییر مکان دیوارهایی با طول میخ یکنواخت است که این امر نیز همانند بند ۱ بهدلیل زیاد شدن طول میخهای ردیف فوقانی و در نتیجه نفوذ بیشتر میخها به پشت گوه گسیختگی در دیوار با چیدمان متغیر نسبت به دیوار با چیدمان یکنواخت است.
- ۳. نحوه تغییر مکان دیوارهایی با چیدمان یکنواخت به صورت طرهای است یعنی حول میخهای ردیف پایین دوران دارند در حالی که نحوهٔ تغییر مکان دیوارهایی با چیدمان متغیر در ارتفاع یکنواخت هستند. دلیل تغییر مکان یکنواخت دیوار با چیدمان متغیر این است

- 1. "Manual for Design & Construction Monitoring of Soil Nail Walls", Federal Highway Administration, Publication No.FHWA-SA-96-069R (1998).
- 2. "Demonstration Project 103-Design and Construction Monitoring of Soil Nail Walls", 7 Federal Highway Administration, Publication No. FHWA-IF-99-026 (1999).
- 3. Vucetic M., Tufenkjian M.R., Doroudian M., "Dynamic Centrifuge Testing of Soil-Nailed Excavations", Geotechnical Testing Journal, Vol. 16, No. 2 (1993) 172-187.
- 4. Tufenkjian M.R., Vucetic M., "Seismic Stability of Soil-Nailed Excavations", Report No. ENG-97-169, Civil Engineering Department, University of California, Los Angeles (1993).
- 5. Chokeir M., "seismic Analysis of Reinforced Earth and Soil Nailed Structures", Ph.D. Thesis, New York Polytechnic University (1996).

L

- Choukeir M., Juran I., Hanna S., "Seismic Design of Reinforced- Earth and Soil-Nailed Structures", Ground Improvement, Vol. 1 (1997) 223-238.
- Zhang M., Song E., Chen Z., "Ground movement analysis of soil nailing construction by three-dimensional (3-D) finite element modeling (FEM)", Computers and Geotechnics, Vol. 25 (1999) 191-204.
- Vela J.C., "Theoretical Modeling and Field Instrumentation of an Earth Retention System for Seismic Response", Ph.D. Thesis, Washington State University (2000).
- Hong Y., Chen R, Wu C., Chen J., "Shaking Table Test and Stability Analysis of Steep Nailed Slopes, Canadian Jeotechnical Journal", Vol. 42 (2005) 1264-1279.
- Sivakumar Babu G.L., Singh V.p. "Numerical Analysis of Performance of Soil Nail Walls in Seismic Conditions", Journal of Earthquake Technology, Paper No. 496, Vol.45, No. 1-2, March-June (2008) 31-40.
- Chu L.M., Yin J.H., "Comparision of Interface Shear Strenght of Soil Nails Measured by Both Direct Shear Box Tests and Pull-out Tests", J. of Geotech and Geoenviron Eng, ASCE, Vol. 131, No. 9 (2005) 1097-1107.
- 12.Plaxis, "PLAXIS 2D: Reference Manual Version 8.0", Plaxis BV, Delft, The Netherlands (2002).