

بررسی اندرکنش خاک - دیوار غیر مسلح زیرزمین

رضا پورحسینی* (استادیار)
دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه یزد
نوید سلطانی (دانشجوی دکتری)
دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه شهید باهنر کرمان

مهندسی عمران شریف، (تابستان ۱۳۹۴)
دوری ۲ - ۳۱، شماره ۲/۲، ص. ۸۶-۷۹، (پادداشت فنی)

پایداری سازه‌های با مصالح بنایی به اندرکنش خاک - دیوار زیرزمین وابسته است. استفاده از روش متداول شبه استاتیکی مونونوبه - اوکابه در تحلیل لرزه‌ی دیوارهای حائل دقت کافی ندارد. در این مطالعه اندرکنش خاک - دیوار بنایی زیرزمین در حالت دوبعدی کرنش صفحه‌یی و شرایط ژئوتکنیکی آن به روش اجزاء محدود مدل‌سازی و رفتار دینامیکی دیوار حائل زیرزمین بررسی شده است. لنگر خمشی بیشینه‌ی دیوار به‌عنوان ملاک عملکرد دیوار انتخاب و اثر بسامد تحریک لرزه‌یی، نوع خاک، ارتفاع و ضخامت دیوار برآورد شده است. براساس نتایج عددی، سرعت موج برشی خاک و بسامد تحریک در تحلیل دینامیکی دیوار نگهدارنده زیرزمین نقش به‌سزایی دارد، هر چند که این مشخصات در روش مونونوبه - اوکابه به حساب نیامده و به علت تعدد ساده‌سازی‌ها، نتایج این روش در مواردی بسیار محافظه‌کارانه یا غیرایمن است. لذا برای طراحی دیوار نگهدارنده زیرزمین، رویکرد اندرکنش خاک - دیوار ضروری به نظر می‌رسد.

واژگان کلیدی: اندرکنش خاک - دیوار، دیوار زیرزمین، مصالح بنایی غیرمسلح، تحلیل عددی.

r_porhoseini@yazd.ac.ir
nvd.soltani@gmail.com

۱. مقدمه

از دیوار بررسی شد که بر پایه‌ی نتایج حاصل، لحاظ کردن اثر طبیعت سیکلی بار در طراحی دیوار حائل ضروری تشخیص داده شد.^{[۱][۱۰]}

مبحث هفتم مقررات ملی ساختمان برای دیوارهای نگهدارنده زیرزمین که انتهای آنها به سازه‌ی سقف اتکا دارد، اضافه فشار در شرایط لرزه‌یی را قابل صرف‌نظر می‌داند.^[۱۲] بر خلاف انتظار، در این حالت برای ارتفاع دیوار زیرزمین هیچ محدودیتی لحاظ نشده و میبانی محاسباتی لازم نیز متناسب با سطح خطر زلزله ارائه نشده است. مبحث هفتم از مقررات ملی ساختمان در شرایطی که دیوار نگهدارنده زیرزمین از بالا آزاد باشد، رویه‌ی متداول محاسباتی دیوارهای نگهدارنده را پیشنهاد می‌کند.

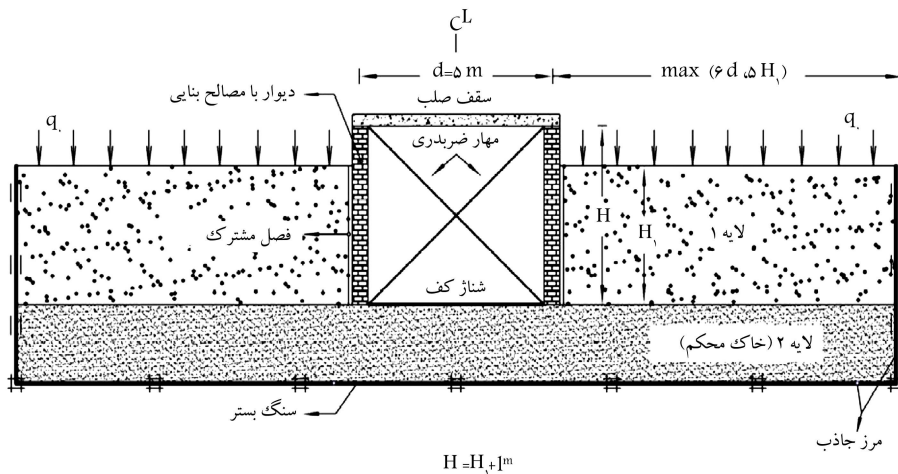
در این مطالعه، با مدل‌سازی هم‌زمان دیوارهای نگهدارنده زیرزمین، با ارتفاع یک طبقه در وضعیت دوبعدی کرنش صفحه‌یی در نرم‌افزار اجزاء محدود ژئوتکنیکی PLAXIS ۸٫۲، رانش دینامیکی خاک بررسی و ملاک شدت اندرکنش بین خاک - دیوار بنایی لنگر خمشی بیشینه در دیوار انتخاب شده است. دستیابی به درک جامعی از عملکرد دیوار نگهدارنده زیرزمین با شرایط مختلف هندسی دیوار، نوع خاک پشت و بسامد بارگذاری دینامیکی و نیز تعیین کفایت و دقت روش پیشنهاد شده در مقررات ملی ساختمان و روش مرسوم مونونوبه - اوکابه برای طراحی دیوار با اتکا به نتایج مدل‌های عددی از اهداف این مطالعه است. لازم به تذکر است که نتایج به‌دست‌آمده از این مدل‌ها به دیوارهای میان‌قابلی هم قابل تعمیم است.

درصد قابل توجهی از ساخت و سازها در ایران به سازه‌های مصالح بنایی غیرمسلح اختصاص دارد. بررسی عملکرد لرزه‌یی سازه‌ها بیان‌گر خرابی بیشتر در سازه‌های با مصالح بنایی غیرمسلح است.^[۱] در ساختمان‌های مصالح بنایی، اعضای سازه‌یی مقاوم در برابر نیروهای جانبی، دیوارها هستند. پژوهش‌های انجام‌شده بیشتر حول محور عملکرد درون‌صفحه‌یی دیوارهای آجری است،^[۲-۶] و کمتر به رفتار خارج از صفحه‌ی آن مانند دیوارهای نگهدارنده زیرزمین توجه شده است.

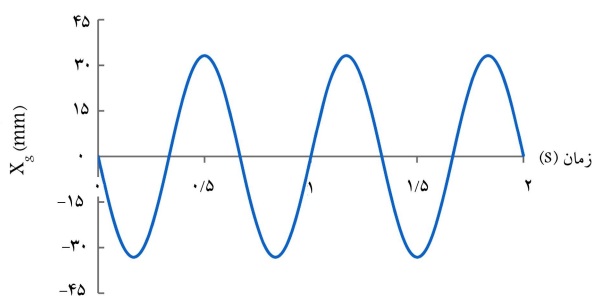
در پژوهشی در سال ۲۰۱۰ اندرکنش عمودی خاک - دیوار با فنر غیرخطی مدل‌سازی و کوله‌ی پل‌ها و دیوارهای حائل به روش اجزاء محدود تحت شتاب‌نگاشت‌های زلزله تحلیل شد.^[۷] در مطالعه‌ی دیگری (۲۰۱۱) نیز اندرکنش خاک دیوار حائل بتن مسلح زیرزمین با مدل نرم‌افزاری فلک (FLAC-۲D) مطالعه و براساس نتایج به‌دست‌آمده از مدل‌های عددی، به اثر سطح خطر زلزله در طراحی این دیوارها توجه شده است.^[۸] همچنین پژوهشگران دیگری (۲۰۱۰) با هدف برآورد مقدار و توزیع فشار جانبی لرزه‌یی وارد بر دیوار حائل طره‌یی به کار آزمایشگاهی سانتریفیوژ و نیز مدل‌سازی اجزاء محدود غیرخطی اقدام کردند و روش‌های رایج را محافظه‌کارانه تشخیص دادند.^[۹] در دو پژوهش دیگر نیز با مطالعه‌ی مدل کوچک‌مقیاس دیواره‌ی صلب محدودشده، تأثیر بارگذاری سیکلی در سطح خاکریز پشت دیوار با تغییر فاصله

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۲۸/۱۳۹۲، اصلاحیه ۸/۱۳۹۲، پذیرش ۲۱/۱۰/۱۳۹۲.



شکل ۲. نمای دوبعدی از مشخصات مدل (بدون مقیاس).



شکل ۳. تحریک اعمالی به سنگ بستر با بسامد ۱/۷۵ HZ.

المان‌ها سبب افزایش سرعت محاسبات به ویژه در حالت دینامیکی می‌شود. هر چه ابعاد مدل کوچک‌تر شود، اثر شرایط مرزی مهم‌تر می‌شود. در یک تحلیل دینامیکی، شبیه‌سازی میرایی شعاعی اهمیت خاصی خواهد داشت. در مدل‌های دینامیکی با تعریف مرز جاذب^۵ انعکاس امواج حذف می‌شود، تا اثر مرزهای نامتناهی برای عبور ارتعاشات و عدم بازتاب امواج به داخل مدل شبیه‌سازی شود. مدل دوبعدی دینامیکی اندرکنش خاک و سازه در شکل ۲ نشان داده شده است.

در اینجا مرزهای قائم طرفین در جهت قائم آزاد و در جهت افق مقید هستند. نقاط مرزی واقع بر سنگ بستر افقی در پایین مدل، در دو جهت x و y مقید شده‌اند. توپوگرافی منطقه، مشخصات پروفیل خاک و همچنین شیب بستر سنگی تأثیر قابل ملاحظه‌یی در تقویت^۶ و یا تضعیف^۷ امواج لرزه‌یی دارند. در صورت وجود توپوگرافی‌های ناهمگون، رسوبات محلی، و یا شیب بستر سنگی، اثرات ساخت‌گاهی یادشده باید در مدل‌سازی وارد شوند. [۱۶، ۱۵]

امواج تحریک زلزله را می‌توان به ترکیبی از چندین موج هارمونیک تبدیل کرد. در مدل‌سازی زلزله با امواج هارمونیک و بسامد غالب زلزله، مقدار جابجایی محاسباتی نسبت به تحریک زلزله‌یی معادل، اندکی بیشتر است که این به دلیل اثر خود التیامی^۸ تحریک زلزله است. [۱۸، ۱۷] بنابراین موج هارمونیک می‌تواند برای تحلیل مشخصات حرکت زمین مورد استفاده قرار گیرد و اثر بسامد تحریک بر اندرکنش خاک - سازه قابل بررسی است. در این مطالعه تحریک اعمالی از نوع موج SV و به صورت سینوسی با شتاب بیشینه (PGA) برابر با $0.3g$ در 0.3 ثانیه نظر گرفته شده است. با دو بار انتگرال‌گیری از شتاب، جابجایی بستر تعیین و این تحریک به صورت جابجایی از پیش تعیین شده به سنگ بستر اعمال شده است. با توجه به ابعاد مدل و زمان لازم برای استهلاک جواب‌های گذرا (مزاحم) و نیز هماهنگی با اثر شتاب‌نگاشت زلزله، تعداد سیکل‌های تحریک وارده برابر با ۳ انتخاب شده است. نتایج عددی به دست آمده در تحلیل رفتار دیوار، کیفیت تعداد ۳ سیکل در محدوده‌ی بسامد مورد بررسی را نشان داده است، به طوری که با در نظر گرفتن تعداد سیکل بیشتر در مقدار تغییر شکل و لنگر خمشی دیوار تفاوت قابل ملاحظه‌یی ایجاد نشده است. ضمناً در مطالعه‌یی بر روی دیوار حائل‌ها، [۱۹] اثر ۳ سیکل تحریک لرزه‌یی سینوسی استفاده شده است. به عنوان نمونه در شکل ۳ تحریک لرزه‌یی اعمالی به سنگ بستر با بسامد ۱/۷۵ HZ نشان داده شده است.

۵. مشخصات مصالح

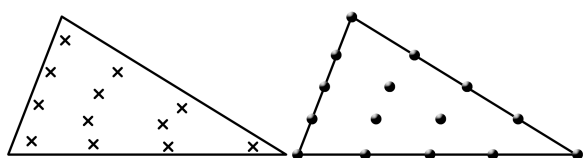
در اغلب مسائل دینامیکی، مدل‌سازی خاک پشت دیوار بدون چسبندگی ($c \approx 0$) و تحلیل رفتار غیرخطی آن با مدل کشسان خمیری موهر-کولمب انجام شده است. با توجه به وابستگی مدول برشی و میرایی خاک به سطح کرنش و نرخ کرنش استفاده از مدل ویسکو-کشسان خمیری با وضعیت کشسان غیرخطی ارجح است، اما به علت پیچیدگی و افزایش زمان محاسبات در مسائل دینامیکی به حالت کشسان خمیری بسنده شده است. مشخصات ژئومکانیکی زمین در دو لایه طبقه‌بندی و در جدول ۱ ارائه شده است. رفتار غیرخطی خاک پشت دیوار با استفاده از مدل موهر-کولمب و به حالت خمیری هم‌ساز^۹ شبیه‌سازی شده است. لایه ۲ از مصالح بسیار فشرده و کشسان است، که با هدف انتشار بهتر امواج تحریک لرزه‌یی، به عنوان سنگ بستر با ضخامت ۲ متر مدل‌سازی شده است. در جدول ۱، مدول کشسانی دینامیکی، γ وزن مخصوص خاک، ν نسبت پواسون، ν_s سرعت موج برشی، c و φ به ترتیب مقاومت چسبندگی و زاویه‌ی اصطکاک داخلی خاک هستند.

قبل از انهدام دیوار، مدول کشسانی دینامیکی دیوار با مصالح بنایی غیرمسلح (E') را می‌توان از آزمایش ارتعاش آزاد جانبی ستون طره‌یی از مصالح بنایی تعیین کرد. اگر A سطح مقطع عرضی، I ممان اینرسی خمشی مقطع، γ جرم مخصوص مصالح مصرفی، و N بسامد طبیعی ارتعاش آزاد برای ستونی به طول L باشد، مدول کشسانی دینامیکی از رابطه‌ی ۶ تعیین می‌شود:

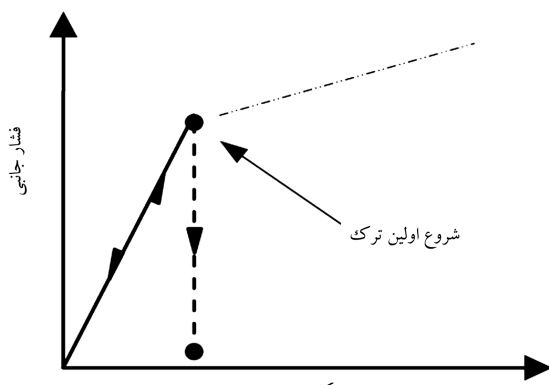
$$E' = 3,7204 N^2 \frac{L^3 A \gamma}{I g} \quad (6)$$

جدول ۱. مشخصات لایه‌های خاک.

لایه	نوع خاک	مدل مصالح	E (kPa)	ν	γ (kN/m ³)	v_s (m/s)	c (kPa)	φ°
۱	S۱	موهر - کولمب	$1,7 \times 10^6$	۰,۳۳	۱۸	۶۰۰	۵	۳۲
	S۲		10^6	۰,۳۳	۱۸	۴۵۰	۵	۳۲
	S۳		4×10^5	۰,۳۳	۱۶	۳۰۰	۵	۲۸
	S۴		10^5	۰,۳۳	۱۵	۱۵۰	۵	۲۸
۲	سنگ بستر	کشسان	5×10^6	۰,۳۳	۲۰	۶۰۰	-	-



شکل ۴. معرفی المان ۱۵ گره بی مورد استفاده در تحلیل.



شکل ۵. مدل‌سازی رفتار عمود بر صفحه‌ی دیوار آجری غیرمسلح.

آن درگیری کامل برشی در نظر گرفته شده است ($R_{intr} = 1$). به طوری که اعمال این شرایط باعث افزایش رانش افقی وارد بر دیوار و طراحی دیوار محافظه‌کارانه خواهد شد.

تأثیر سازه‌ی مجاور با اعمال سربار q_0 در سطح خاک و به شدت 10 kPa معادل سازه‌ی یک طبقه لحاظ شده است. همچنین بر روی شناژ کف، $0,5 \text{ m}$ خاک با مشخصات لایه‌ی ۱ مدل شده است. این تدابیر از ایجاد نقاط تکیه در مدل رفتاری موهر - کولمب جلوگیری می‌کنند.

با توجه به عرض کم شالوده در سازه‌های با مصالح بنایی از یک سو و شکل (مود) گسیختگی غالب دیوار زیرزمین که از نوع انتقالی است. از سوی دیگر، بررسی اندرکنش بین پی و دیوار اهمیت ندارد و در نتایج مؤثر نیست. از این رو به منظور افزایش کارایی محاسباتی مدل شرایط تکیه‌گاهی دیوار به صورت غلتکی مدل شده است. در این مطالعه از روان‌گرایی و دیگر گسیختگی‌های موضعی و گهواره‌ی در پی صرف‌نظر شده است.

اثر سقف صلب و شناژبندی کف با المان مهار افقی و سختی برشی درون صفحه‌ی دیوارهای نسبی زیرزمین در جهت زلزله، با مهاربندهای ضرب‌دری

که در آن، g شتاب جاذبه‌ی زمین است. بر پایه‌ی نتایج آزمایشگاهی، مقدار مدول کشسانی دینامیکی مصالح بنایی از مدول کشسانی استاتیکی آن بیشتر است، که این خاصیت در مورد بتن نیز شناخته شده است.^[۲۰]

مشخصات مکانیکی دیوار آجری به عوامل متعددی مانند: ابعاد و مقاومت آجر، نحوه‌ی آجرچینی و مشخصات ملات بستگی دارد. در تحلیل‌های انجام‌شده، مدول کشسانی دینامیکی و نسبت پواسون دیوار آجری به ترتیب $2 \times 10^6 \text{ kPa}$ و $0,3$ در نظر گرفته شده است. وزن مخصوص دیوار با احتساب وزن لایه‌های سازه‌ی و غیرسازه‌ی نسبت به حجم بخش سازه‌ی، 30 kN/m^3 منظور شده است. سطح مقطع و ممان اینرسی دیوار نیز بر مبنای ضخامت بخش سازه‌ی برای هر مدل محاسبه شده است.

۶. مدل‌سازی اندرکنش دینامیکی خاک و دیوار زیرزمین

اعتبار نتایج تحلیل دینامیکی نرم‌افزار PLAXIS ۸/۲ در مقایسه با روش کویل المان محدود - نامحدود،^[۲۱] تأیید شده است. در این مطالعه اندرکنش دینامیکی خاک - دیوار حائل زیرزمین در محیط این نرم‌افزار در حالت کرنش صفحه‌ی 1° مدل‌سازی و تحلیل شده است. محیط خاک با استفاده از المان‌های ۱۵ گره‌ی به دلیل دقت بالاتر در محاسبات، شبکه‌بندی شده است. مطابق شکل ۴، المان‌های مذکور دارای دو درجه‌ی آزادی در هر گره و با ۱۲ نقطه‌ی گوس هستند. برای حفظ دقت محاسبات دینامیکی، ابعاد المان‌ها به یک هشتم تا یک دهم طول موج محدود شده است تا امواج فیلتر نشوند.^[۲۲]

دیوار با مصالح بنایی غیرمسلح، رفتار ترد و شکننده دارد. رفتار دیوار آجری غیرمسلح در برابر فشار جانبی مطابق شکل ۵ است و تا قبل از ترک خوردگی در تحلیل‌ها به صورت کشسان مدل‌سازی شده است. مدل‌سازی رفتار عمود بر صفحه‌ی دیوار آجری با استفاده از المان پوسته - ورق^[۲۳] انجام شده است. این المان در وضعیت دوبعدی همانند تیر با مشخصات صلبیت خمشی و صلبیت محوری، $(EI, EA)_w$ در واحد طول تعریف می‌شود.

اتصال برشی خاک - دیوار و خاک - شالوده (شناژ کف) به طور واضحی در اندرکنش دینامیکی خاک - دیوار مؤثر است. به منظور مدل‌سازی اتصال خاک و دیوار از المان فصل مشترک استفاده شده است. این المان‌ها شرایط متفاوت اتصال برشی بین دو جزء را با پارامتر R_{intr} شبیه‌سازی می‌کنند.

مقدار این پارامتر بین 1 تا $0,1$ به ترتیب برای حالت درگیری کامل و بدون درگیری برشی انتخاب شده است. مقدار R_{intr} در مدل‌سازی فصل مشترک خاک با دیوار زیرزمین برابر با $0,1$ در نظر گرفته شده است، که شرایط لغزش بدون زاویه‌ی اصطکاک ($\delta = 0$) بین آن دو را شبیه‌سازی می‌کند و بین شناژ کف و خاک زیر

مرحله بندی گودبرداری و فعال سازی دیوار لحاظ شده است. در زمان شروع تحریک دینامیکی، تغییر شکل های استاتیکی مجموعه به صفر تنظیم شده است.

۷. اثر بسامد تحریک لرزه‌یی

در روش شبه استاتیکی M-O اثر بسامد بارگذاری در نظر گرفته نمی شود، لذا این بخش از این مطالعه به بررسی تأثیر بسامدهای مختلف در عملکرد دیوار زیر زمین اختصاص یافته است. در این بررسی، ارتفاع دیوار (H): ۴٫۵ m و ضخامت سازه‌یی (t): ۰٫۴۵ m، نوع خاک S۳ و ضرایب میرایی رایلی (α_R و β_R) به ترتیب ۰٫۰۱ و ۰٫۰۱ و منظور شده است. در مدل های مورد بررسی بسامد طبیعی خاک - دیوار مقدار بسیار بیشتری از بسامد بارهای زلزله دارند و هیچ گاه وضعیت تشدید رخ نمی دهد.

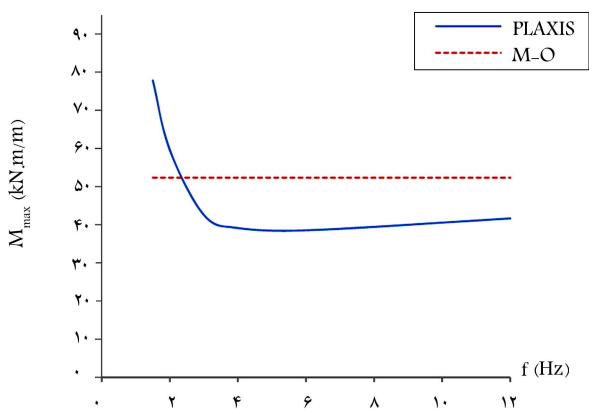
تأثیر بسامد تحریک در مقدار M_{max} در شکل ۷ نشان داده شده است. به منظور مقایسه‌ی نتایج عددی با روش تحلیل شبه استاتیکی M-O، مقدار ضریب شتاب افقی (k_h) از رابطه‌ی ۷ و برابر با ۰٫۲۲ تعیین شده است. این رابطه با بررسی و اندازه گیری محلی ۱۲۹ دیوار وزنی طی ۱۲ زلزله توسط نودا^{۱۲} و همکاران (۱۹۷۵) به دست آمده است.^[۲۲]

$$\begin{cases} k_h = \frac{PGA}{g} & PGA \leq 0.2g \\ k_h = \frac{1}{4} \left(\frac{PGA}{g} \right)^{\frac{1}{2}} & PGA > 0.2g \end{cases} \quad (7)$$

مطابق رابطه‌ی ۷، روش M-O در بارگذاری با بسامدهای کم، نتایجی غیرایمن و در بسامدهای زیاد نتایجی محافظه کارانه ارائه می دهد. در این بررسی تفاوت بین نتایج حاصل از دو روش نسبت به روش M-O به ۵۰٪ نیز می رسد و این تفاوت با افزایش بسامد کاهش می یابد.

در ادامه، اثر بسامد تحریک در خیز وسط یا به عبارتی تغییر مکان نسبی دیوار بررسی شده است. تأثیر بسامد در خیز وسط دیوار، با تعداد سیکل های بارگذاری در شکل ۸ ارائه شده است. نتایج سیکل اول به علت تداخل جواب های گذرا، دقت کافی ندارند.

مطابق شکل ۸، پاسخ دینامیکی دیوار به بسامد تحریک وابسته است و با افزایش زمان تداوم بارگذاری تغییر شکل نسبی دیوار زیاد شده است. همچنین در حوزه‌ی بسامدی مورد بررسی، انتخاب تعداد ۳ سیکل برای مطالعه‌ی دیوار زیر زمین کافی به نظر می رسد.



شکل ۷. تغییرات لنگر خمشی بیشینه‌ی دیوار با بسامد تحریک.

(×) اعمال شده است. المان مهار بدون صلبیت خمشی است و به منظور تأمین صلبیت جانبی سازه، مقدار EA مساوی $10^6 \times 25$ در نظر گرفته شده است.

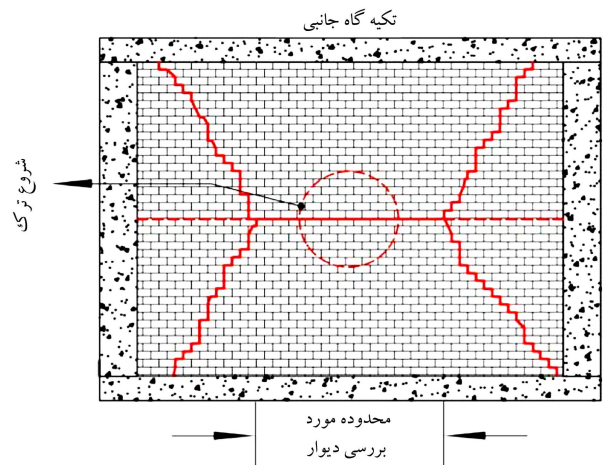
کالیبره بودن مدل با مطالعات پارامتری^{۱۲} مورد بررسی و تأیید قرار گرفته است. این بررسی ها بر روی پارامترهای مقاومت چسبندگی، زاویه‌ی اصطکاک داخلی و مدول کشسانی خاک، صلبیت خمشی و صلبیت محوری دیوار، (EA , EI) انجام شده است. با توجه به نتایج عددی افزایش $(EI)_w$ به طور قابل ملاحظه M_{max} را افزایش می دهد، اما تأثیر $(EA)_w$ در M_{max} قابل چشم پوشی است. همچنین با افزایش پارامترهای مقاومت چسبندگی، زاویه‌ی اصطکاک داخلی و مدول کشسانی خاک (M_{max}) آهنگ کاهش دارند. براساس نتایج عددی در این بخش، با افزایش R_{intr} بین خاک و شالوده و یا کاهش آن بین خاک و دیوار، رانش دینامیکی افقی وارد بر دیوار و M_{max} افزایش نشان می دهند.

با توجه به اینکه مقدار M_{max} در طراحی دیوار تعیین کننده و نیز به نحوی در برگزیده‌ی توزیع فشار جانبی دینامیکی خاک است، این عامل برای بررسی اندرکنش خاک - دیوار انتخاب شده است. پس از اطمینان از کالیبره بودن مدل، تأثیر بسامد تحریک اعمالی، ارتفاع، و ضخامت دیوار و همچنین مشخصات خاک پشت دیوار در M_{max} بررسی شده است. الگوی ترک خوردگی دیواری با وجود تکیه گاه در تمام کناره ها تحت نیروی عمود بر صفحه در شکل ۶ نشان داده شده است.

از آنجا که بررسی اندرکنش دینامیکی بین خاک و دیوار با استفاده از مدل دوبعدی کرنش صفحه‌یی انجام شده است، نتایج ارائه شده در محدوده‌ی نشان داده شده در شکل ۶ معتبر است. در خارج از این محدوده استفاده از مدل های سه بعدی ضروری است.

در مدل سازی های انجام شده، اثر صلبیت جانبی قسمت بالا و پایین دیوار به دلیل درگیری با سقف و شناژ کف با المان های مهار بند افقی لحاظ شده است. همچنین با توجه به اینکه ارتفاع دیوار حائل زیر زمین در ساختمان های متعارف کوتاه تر از ۶ متر و ۱۵ برابر ضخامت آن است، مقدار لنگرهای مضاعف (مرتب‌ی دوم) بسیار ناچیز است، از این رو اثر سازه‌ی فوقانی^{۱۳} در تحلیل ها وارد نشده است.

شرایط ژئوتکنیکی دیوار حائل زیر زمین و اعمال تنش های اولیه در خاک با



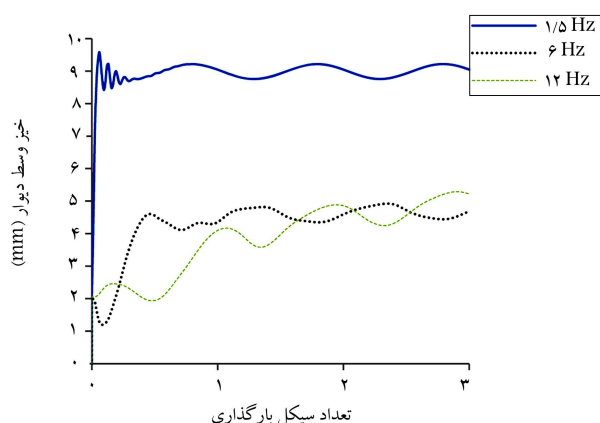
شکل ۶. الگوی شکست دیوار بر اثر بارگذاری عمود بر صفحه.

و فضای خالی پشت دیوار خاکریزی شده است. این خاکریز به عرض ۱ متر از خاک نوع S۳ بین دیوار و زمین مجاور مدل‌سازی و زمین مجاور از نوع خاک S۱ و S۲ در نظر گرفته شده است. به لحاظ شرایط اجرا، با مقایسه‌ی نتایج عددی و لنگر خمشی بیشینه‌ی دیوار، در حالتی که زمین ساختگاه از نوع خاک S۱ و یا S۲ است، به ترتیب از نتایج مدل همگن خاک پشت دیوار در یک رده پایین‌تر (S۲ و S۳) استفاده شده است.

۹. اثر ارتفاع دیوار

اثر ارتفاع دیوار آجری زیرزمین در لنگر خمشی بیشینه‌ی آن برای ارتفاع‌های m ۵/۵، ۴/۵، ۳/۵، ۳، ۲/۵، $H = 10^\circ$ و با $H/t = 10^\circ$ و نوع خاک S۳ مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به شرایط مرزی دیوار، وضعیت عملکرد آن به سکون نزدیک است. به منظور بررسی تأثیر جابجایی نسبی بین خاک و دیوار، دو وضعیت حدی سکون و رانش محرک M-O مورد توجه قرار گرفته است.

در شکل ۱۰، نتایج عددی حاصل از مدل محاسباتی با روش M-O و وضعیت سکون (k_o) مقایسه شده است. مقدار k_o از رابطه‌ی $k_o = 1 - \sin \varphi$ برای محاسبات انتخاب شده است. همان‌گونه که پیش‌بینی می‌شد، ارتفاع دیوار آجری تأثیر قابل ملاحظه‌ی در لنگر خمشی بیشینه‌ی دیوار دارد. با بررسی این شکل مشخص می‌شود که در بسامد تحریک بیش از ۳ Hz، نتایج اندرکنش بین خاک و دیوار به لحاظ طراحی تفاوت معناداری ندارد، که این موضوع در شکل ۷ نیز مشخص است. در بسامد تحریک ۱/۵ Hz در تمامی ارتفاع‌های مورد بررسی روش M-O نتایجی غیرایمن ارائه داده است. در بسامدهای تحریک بیشتر یا مساوی ۳ Hz، نتایج روش M-O در دیوارهایی با ارتفاع کمتر از ۵ متر محافظه‌کارانه و با ارتفاع‌های بیشتر غیرایمن است. نتایج نشان می‌دهد که فقط در دیوارهایی با ارتفاع کمتر از ۴/۵ متر و بسامد تحریک بیشتر یا مساوی از ۳ Hz، اثر رانش دینامیکی خاک قابل چشم‌پوشی و استفاده از نتایج تحلیل استاتیکی در طراحی قابل اعتماد است. به منظور استفاده از نتایج تحلیل استاتیکی در طراحی دیوار حائل زیرزمین لازم است محدودیت‌هایی در ارتفاع دیوار و بسامد بارگذاری قائل شد. با تغییر سطح خطر زلزله، شتاب اعمالی به سنگ بستر و نتایج تحلیل دینامیکی متناسباً تغییر می‌یابند، لذا دامنه‌ی اعتبار رانش استاتیکی در طراحی دینامیکی دیوار نگهدارنده زیرزمین به سطح خطر زلزله نیز وابسته است.



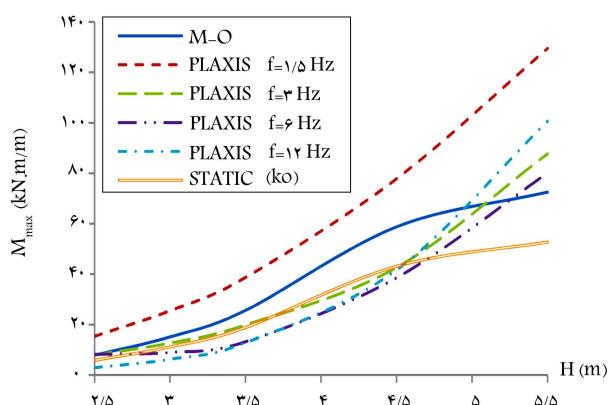
شکل ۸. اثر بسامد تحریک و تعداد سیکل در خیز وسط دیوار.

۸. اثر نوع خاک

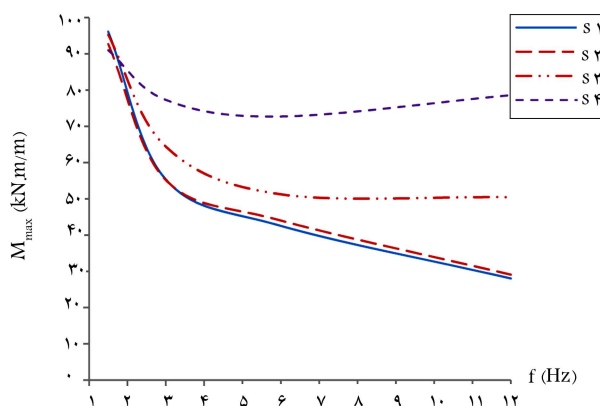
در این مرحله اثر مشخصات خاک پشت دیوار در اندرکنش این دو با در نظر گرفتن نوع خاک (S۱-S۴) مطابق با جدول ۱ بررسی شده است. محدوده‌ی سرعت موج برشی خاک‌ها براساس طبقه‌بندی نوع زمین در استاندارد ۲۸۰۰ انتخاب شده است. مشخصات هندسی دیوار با ارتفاع (H) ۴/۵ m و ضخامت سازه‌ی (t) ۰/۴۵ m است. در شکل ۹، نتایج عددی حاصل از مدل اجزاء محدود در بررسی انواع خاک ارائه شده است، که مطابق آن خاک‌های S۱ و S۲ رفتاری تقریباً مشابه در بسامدهای مختلف بارگذاری نشان داده‌اند؛ در حالی که با تغییر نوع خاک از S۲ به S۳ و از S۳ به S۴ افزایش قابل ملاحظه‌ی در پاسخ دینامیکی دیوار به تحریک لرزه‌یی به وجود آمده است. با ضعیف شدن خاک پشت دیوار انرژی کمتری توسط خاک جذب شده و بنابراین لنگر خمشی دیوار افزایش یافته است. نکته‌ی قابل توجه اینکه در بسامدهای نزدیک به ۱/۵ Hz این ۴ نوع خاک تأثیر تقریباً یکسانی در دیوار دارند. همچنین مقدار اختلاف بین نتایج برای خاک‌های مختلف با افزایش محتوای بسامدی تحریک افزایش یافته است. فقط در این بخش به منظور مقایسه‌ی اثر نوع خاک، مصالح بدون میرایی و αR و βR مساوی با صفر در نظر گرفته شده است.

۱.۸. اثر شرایط اجرایی

به لحاظ مسائل ساخت و آب‌بندی دیوار ابعاد گود زیرزمین مقداری بزرگ‌تر اجرا



شکل ۱۰. اثر ارتفاع دیوار در لنگر خمشی بیشینه‌ی آن در تحلیل دینامیکی و استاتیکی.



شکل ۹. تأثیر نوع خاک در لنگر خمشی بیشینه‌ی دیوار.

۱۱. نتیجه‌گیری

در بررسی پایداری سازه‌های با مصالح بنایی غیرمسلح، مطالعه‌ی اندرکنش دینامیکی خاک و دیوار نگهبان زیرزمین اهمیت دارد. اندرکنش دینامیکی خاک - دیوار آجری زیرزمین یک طبقه به روش اجزاء محدود و با تحریک لرزه‌یی سینوسی بستر مدل سازی شده است. با حصول اطمینان از اعتبار مدل، اثر بسامد تحریک، نوع خاک، ارتفاع دیوار، و سختی دیوار بررسی شده است. با توجه به نتایج به دست آمده می‌توان گفت:

-- تغییر بسامد تحریک در محدوده‌ی کمتر از ۳ HZ به طور واضح در پاسخ دینامیکی دیوار تأثیرگذار است و با افزایش بسامد خیز دیوار و لنگر خمشی بیشینه‌ی آن (M_{max}) کاهش می‌یابد.

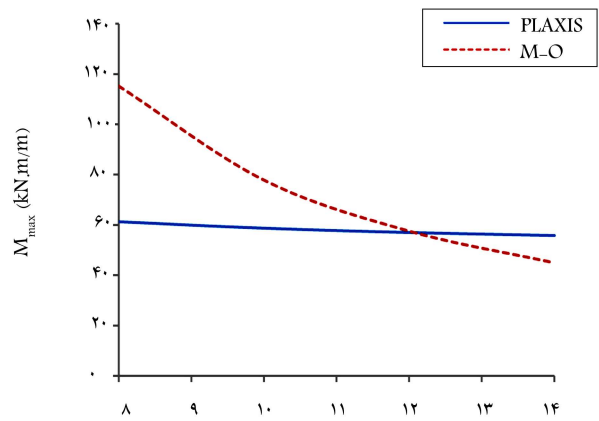
-- بسامدهای تحریک بزرگ‌تر از ۳ HZ به لحاظ محاسباتی تفاوت معناداری در پاسخ دینامیکی دیوار ایجاد نمی‌کند.

-- تغییر سرعت موج برشی خاک از 150 m/s (S_4) به 450 m/s (S_2) سبب کاهش قابل ملاحظه‌یی در M_{max} می‌شود، در حالی که با افزایش سرعت موج برشی به بیش از 450 m/s تغییرات M_{max} ناچیز است. این بیان‌گر وجود محدوده‌یی برای تأثیرگذاری فشردگی خاک در پاسخ دینامیکی دیوار است.

-- افزایش ارتفاع و نسبت ارتفاع به ضخامت دیوار مقدار M_{max} را به ترتیب به طور مضاعفی تشدید و کاهش می‌دهد.

-- نتایج روش مونونوبه - اوکابه، برای بسامدهای تحریک زیاد (بیش از ۱/۵ HZ) و ارتفاع دیوار کمتر از ۵ متر در طراحی دیوار زیرزمین می‌تواند محافظه‌کارانه باشد. از این رو در تحلیل دینامیکی دیوار زیرزمین نمی‌توان فقط به نتایج این روش بسنده کرد.

-- استفاده از وضعیت بارگذاری استاتیکی (k_o) برای طراحی دیوارهای نگهبان زیرزمین که به سقف اتکا دارند، با محدودیت ارتفاع، بسامد بارگذاری و سطح خطر زلزله قابل بررسی است.



شکل ۱۱. تغییرات لنگر خمشی بیشینه‌ی دیوار با ضخامت آن (t).

۱۰. اثر ضخامت دیوار

اثر ضخامت دیوار آجری در شرایط $H = 4.5 \text{ m}$ و با نسبت ارتفاع به ضخامت $H/t = 8, 10, 12, 14$ و خاک نوع S۳ بررسی شده است. در این مرحله، بسامد بار ورودی ۱/۵ HZ منظور شده است.

تغییرات لنگر خمشی بیشینه‌ی دیوار با ضخامت آن با توجه به نتایج عددی مدل‌ها به همراه نتایج روش مونونوبه - اوکابه در شکل ۱۱ ارائه شده است.

با افزایش ضخامت دیوار، کاهش H/t ، نیروی اینرسی تعلق‌گرفته به دیوار آجری، و لنگر خمشی به وجودآمده در دیوار از روش M-O افزایش یافته است. از این رو در شکل ۱۱ تغییرات M_{max} با افزایش H/t روند کاهشی دارد. با کاهش H/t ، لنگر بیشینه‌ی دیوار حاصل از مدل‌سازی عددی افزایش قابل ملاحظه‌یی را نشان می‌دهد، که حاکی از جذب بیشتر انرژی توسط دیوار در این حالت است.

پانویس‌ها

1. Matsuo
2. Okabe
3. Seed
4. Whitman
5. absorbing boundaries
6. amplification
7. attenuation
8. self healing
9. associated flow rule
10. plane strain
11. plate
12. parameter study
13. super structure
14. Noda

منابع (References)

1. Moghadam, H., *Seismic Design of Masonry Structures*, Sharif University Press, Tehran (2008) (in Persian).
2. Larbi, A. and Harris, H.G. "Seismic performance of low aspect ratio reinforced block masonry shear walls", *Proceedings of 4th U.S. National Conference on Earthquake Engineering*, **2** (20-24 May 1990).
3. Magenes, G. and Calvi, G.M. "Cyclic behavior of brick masonry walls", *Proceedings of the 10th WCEE*, Madrid, Spain (19-24 July 1992).
4. Jankolovski, E. and Parsanejad, S. "Earthquake resistance of unreinforced clay brick masonry walls", *Proceedings of the 2nd International Conference of Seismology*

- and *Earthquake Engineering*, Tehran, Iran (15-17 May 1995).
5. Giordano, A., Mele, E. and De Luca, A. "Modeling of historical Masonry structures: Comparison of different approaches through a case study", *Engineering Structures*, **24**(8), pp. 1057-1069 (2002).
 6. Padovani, C. "Numerical modeling of the structural behavior of Butis bell tower", *Journal of Cultural Heritage*, **5**, pp. 371-378 (2004).
 7. Maleki, S. and Mahjoubi, S. "A new approach for estimating the seismic soil pressure on the retaining walls", *SCIENTIA IRANICA, Sharif University of Technology*, **17**(4), pp. 273-284 (2010).
 8. Taiebat, M., Ahmadnia, A., Finn, W.D., Ventura, C.E. and Naesgaard, E. "Seismic assessment of basement walls for different design criteria", CGS Geotechnical Conference, Pan-Am (2011).
 9. Al Atik, L. and Sitar, N. "Seismic earth pressure on cantilever retaining structures", *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, **136**(10), pp. 1324-1333 (2010).
 10. Nikkhah, M. and Mir Mohammad Hosseini, S.M. "A new physical model to study the earth pressure under monotonic and cyclic surcharges", *J. Eng. Fac.*, Tehran University, **37**(1), pp. 47-66 (2005).
 11. Kargar, M. and Mir Mohammad Hosseini, S.M. "Earth pressure distribution behind rigid non-yielding walls under the effect of repeated loading on backfill", *Arab. J. Geosci.* (Online publication: 14 Nov. 2013).
 12. Iranian National Building Regulations (INBR), *Article 7th: Foundation Engineering*, Building and Housing Research Center (2009).
 13. Lew, M., Sitar, N., Al Atik, L., Pourzanjani, M. and Hudson M. "Seismic earth pressures on deep building basements", *SEAOC Convention Proceedings*, pp. 1-12 (2010).
 14. Brinkgreve, R.B.J. "PLAXIS V8.2: Finite element code for soil and rock analyses", Delft University of Technology & PLAXIS B. V., The Netherlands (2002).
 15. Soltani, N. "The effect of topographic irregularities on seismic ground response", M.S thesis, Faculty of Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman (2010) (in Persian).
 16. Bazyar, M.H., Siavoshnia, M. and Sadeghpour, N. "Effect of a soil sample from the standard no. 2800 on earthquake amplification", Building and Housing Research Center (2005) (in Persian).
 17. Zhao, C. and Valliappan, S. "Incident P and SV wave scattering effects under different canyon topographic and geological conditions", *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, **17**(2), pp. 73-94 (1993).
 18. Weihua, L. and Chenggang, Z. "Scattering of plane SV waves by cylindrical canyons in saturated porous medium", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **25**(12), pp. 981-995 (2005).
 19. Bhattacharjee, A. and Muralikrishna, A. "Behavior of gravity retaining walls subjected to seismic excitation using FLAC 3D", *International Journal of Earth Sciences and Engineering*, pp. 71-74 (2011).
 20. Nategh Elahi, F. and Zand Parsa, K. "Computer modeling of masonry buildings", International Institute of Earthquake Engineering and Seismology (1996) (in Persian).
 21. Bagheripour, M.H. and Marandi, S.M. "A numerical model for unbounded soil domain in earthquake SSI analysis using periodic infinite elements", *International Journal of Civil Engineering*, **3**(2), pp. 96-111 (2005).
 22. Towhata, I., *Geotechnical Earthquake Engineering*, Springer (2008).