

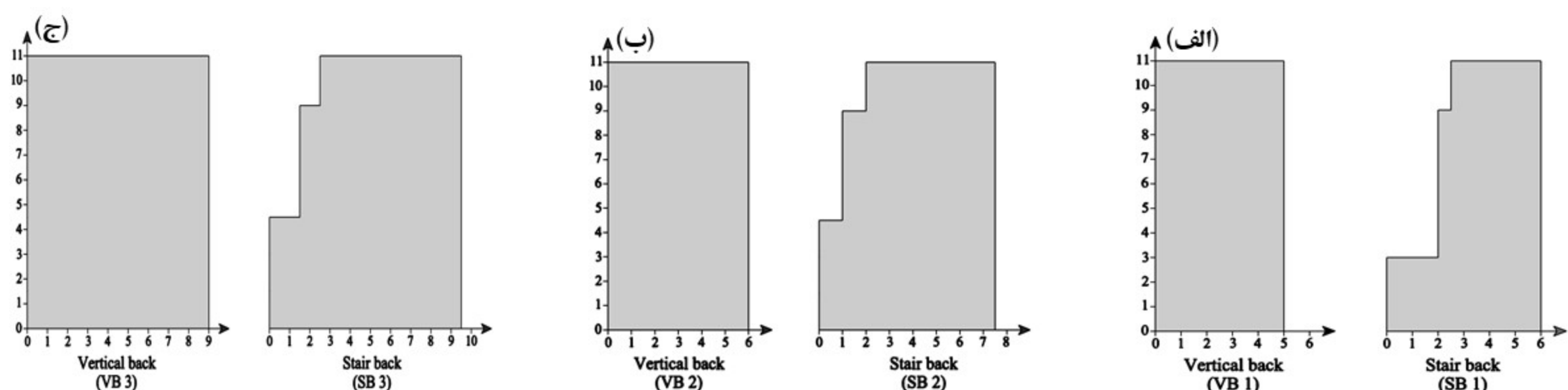
ارزیابی رفتار لرزه‌ای دیوارهای وزنی به روش عددی

امیررضا زرنوشه‌فراهانی

دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندس عمران - ژئوتکنیک، دانشگاه شهید بهشتی

بابک ابراهیمیان

استادیار، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی



شکل ۳: دیوارهای پشت قائم و پشت پلکانی طراحی شده بر مبنای ضریب شتاب افقی (K_h): (الف) ۰/۱۲، (ب) ۰/۱۸، (ج) ۰/۲۴.

۴- شبیه‌سازی عددی

جهت شبیه‌سازی رفتار لرزه‌ای دیوارهای ساحلی، تحلیل دینامیکی غیرخطی تاریخچه زمانی در فضای تنش موثر انجام می‌شود. در ابتدا یک تحلیل استاتیکی به منظور ایجاد تنش‌های استاتیکی و لحاظ نمودن اثر گراش پیش از بارگذاری لرزه‌ای صورت می‌پذیرد. آب موجود در داخل خاک به صورت مستقیم مدل می‌گردد و در طی تحلیل استاتیکی اجازه داده می‌شود آب در داخل خاک جریان یابد. پس از انجام تحلیل استاتیکی و ایجاد حالت تنش اولیه در مدل، تاریخچه شتاب ورودی به گرهای کف مدل اعمال می‌گردد و تحلیل دینامیکی تنش موثر آغاز می‌شود. در مدل‌های با بستر متراکم به‌موجب عدم وجود مصالح روان‌گرا در مدل مورد مطالعه، مدل ساختاری الاستیک-پلاستیک کامل موهر-کولمب برای مدل‌سازی رفتار مصالح ژئوتکنیکی در تحلیل استاتیکی و دینامیکی مورد استفاده قرار می‌گیرد و دیوار بتنی با مصالح الاستیک مدل می‌شود. در مدل‌های با بستر روان‌گرا رفتار بخش‌های متشکل از مصالح غیر روان‌گرا، شامل خاکریز، فونداسیون و پنجه دیوار با استفاده از مدل موهر-کولمب و بستر روان‌گرا با استفاده از مدل UBC-Sand شبیه‌سازی می‌شود. به‌منظور شبیه‌سازی اندرکنش خاک و سازه، المان سطح مشترک در سطح تماس دیوار و خاک تعریف می‌شود. جهت انتشار صحیح امواج در داخل مدل عددی، ابعاد زون‌های شبکه تقاضا محدود ۰/۵ متر در ۰/۵ متر لحاظ می‌گردد. فشار آب موجود در جلوی دیوار و بر بستر دریا با اعمال فشار هیدرواستاتیکی شبیه‌سازی می‌شود. جهت جلوگیری از انعکاس امواج به داخل مدل در طی تحلیل دینامیکی، شرایط زمین آزاد بر روی مرزهای جانبی مدل اعمال می‌گردد [۷]. به‌منظور جلوگیری از نوسانات ناخواسته در تغییر شکل‌های بسیار کوچک و فرکانس بالا حرکت، ۵ درصد میرایی ریلی متمرکز در فرکانس حدود ۲ هرتز (نزدیک به فرکانس پایه سیستم) در تحلیل‌های دینامیکی در نظر گرفته می‌شود. مشخصات مصالح ژئوتکنیکی مورد استفاده در تحلیل دینامیکی در جدول‌های ۲ و ۳ ارائه شده‌اند.

جدول ۲: مشخصات مصالح ژئوتکنیکی مدل با بستر متراکم.

موقعیت	مدل ساختاری	وزن مخصوص اشباع (kg/m ³) (γ _{sat})	زاویه اصطکاک داخلی (φ) (°)	نسبت پواسون (ν)	مدول الاستیسیته (MPa) (E)	چسبندگی (MPa) (C)
بستر	موهر-کولمب	۱۹۷۵	۳۶	۰/۳	۲۰۶/۶	۰
		۱۸۹۵	۲۷		۱۴۴	۰
خاکریز	موهر-کولمب	۱۹۰۰	۳۰	۰/۳	۱۰۰	۰
		۱۹۷۵	۳۶		۲۰۶/۶	۰

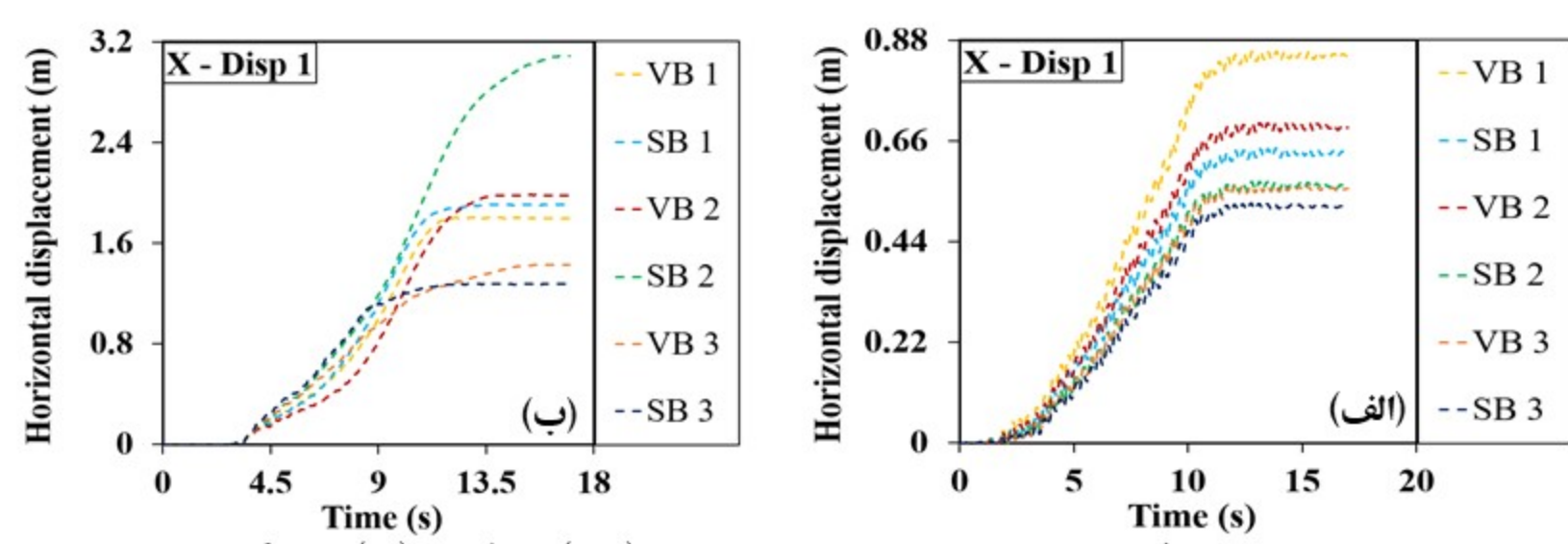
جدول ۳: مشخصات مصالح ژئوتکنیکی مدل با بستر روان‌گرا.

موقعیت	مدل ساختاری	وزن مخصوص اشباع (kg/m ³) (γ _{sat})	زاویه اصطکاک داخلی (φ _{cv}) (°)	فشاراتمسفر (kPa) (P _a)	عدد نفوذ استاندارد اصلاح شده (N ₆₀) (N)
بستر	UBC-Sand	۱۸۶۴	۲۶	۱۰	۳

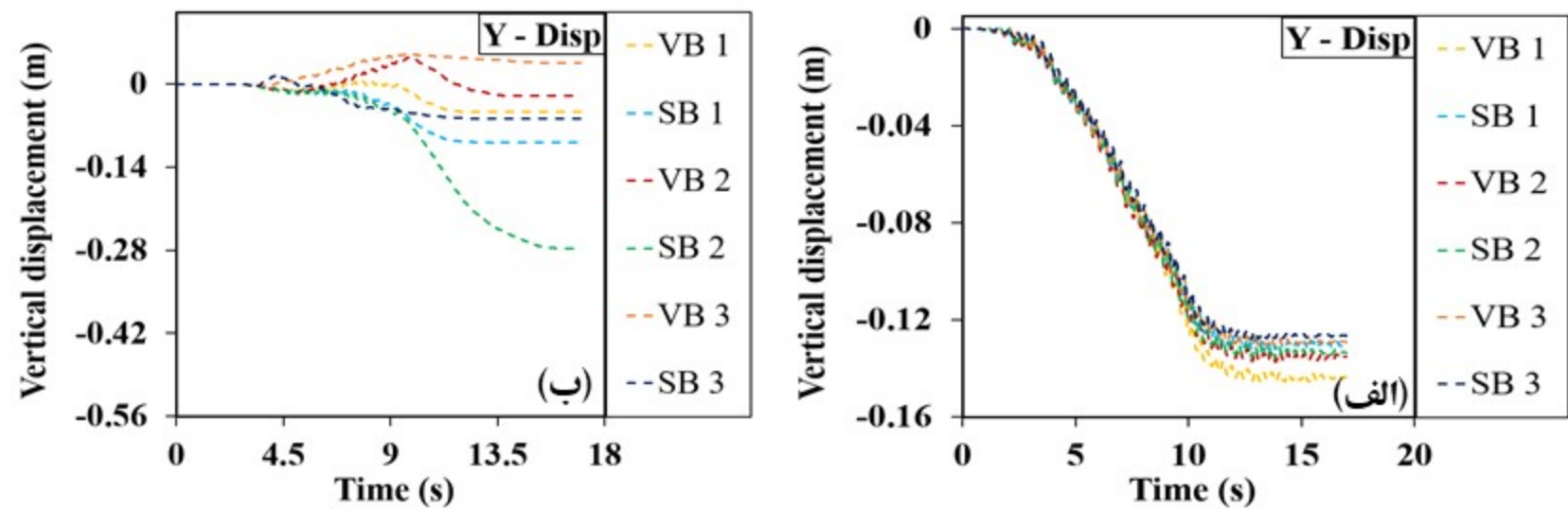
مشخصات سایر بخش‌های مدل با بستر روان مشابه مدل با بستر متراکم است.

۵- نتایج حاصل از تحلیل دینامیکی

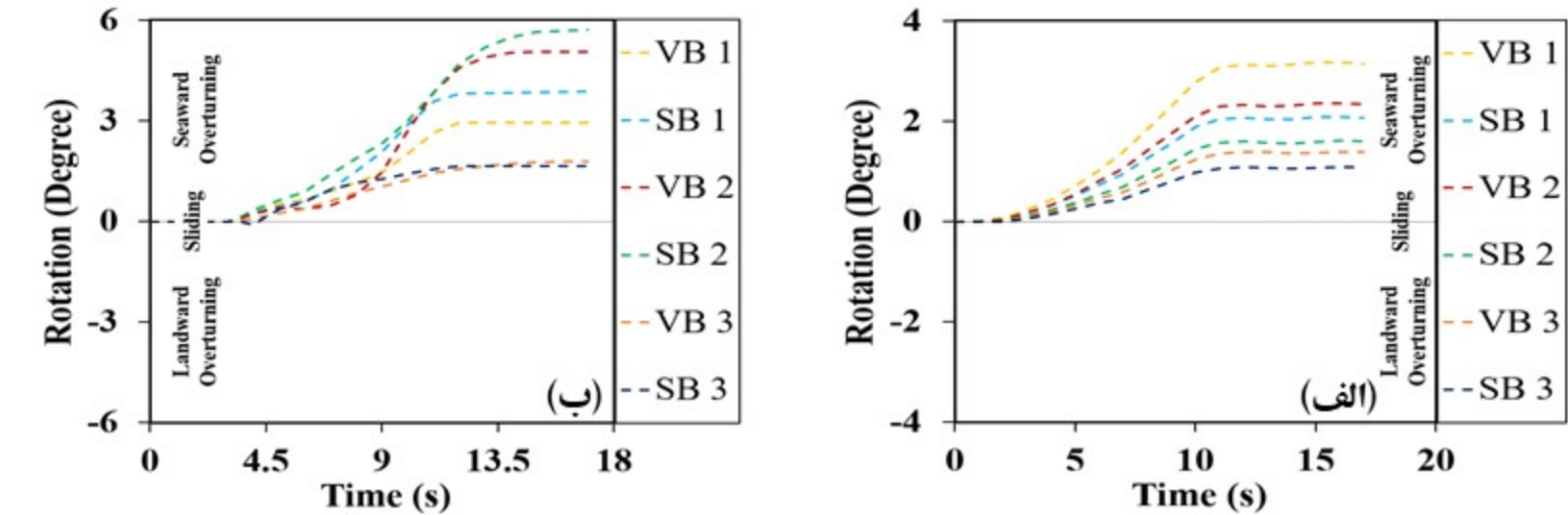
تغییر مکان افقی و قائم بالای دیوارهای طراحی شده و زاویه دوران آن‌ها در بسترهای متراکم و روان‌گرا در شکل‌های ۴ تا ۶ نشان داده شده‌اند.



شکل ۴: تغییر مکان افقی بالای دیوار در مدل‌های با بستر: (الف) متراکم و (ب) روان‌گرا.



شکل ۵: تغییر مکان قائم بالای دیوار در مدل‌های با بستر: (الف) متراکم و (ب) روان‌گرا.



شکل ۶: زاویه دوران دیوار در مدل‌های با بستر: (الف) متراکم و (ب) روان‌گرا.

در خصوص دیوارهای پشت پلکانی، مکانیزم رفتاری دیوار در هر دو بستر یکسان می‌باشد و سمت یا متراکم بودن بستر صرفاً در میزان جابجایی دیوار موثر است. دیوارهای پشت پلکانی دیوار از ابتدای زلزله به سمت دریا دوران می‌کنند و این دوران تا انتهای زلزله ادامه دارد. در این میان دیوار SB3 در ابتدای زلزله به‌صورت لحظه‌ای به میزان بسیار اندک به سمت خاکریز دوران می‌کند که با گذشت زمانی کم‌تر از نیم ثانیه، مجدداً دیوار به سمت دریا واژگون می‌شود. تنها مسأله‌ای که عملکرد دیوارهای پشت پلکانی را در دو بستر متراکم و سمت متمایز می‌نماید، خاک موجود بر روی قسمت طرمانی دیوار می‌باشد. به‌طور کلی شکل پلکانی دیوار سبب افزایش فشار وارد بر دیوار، در بخش بالایی آن می‌شود. از سوی دیگر، در بستر متراکم، به علت کوچک بودن جابجایی دیوار، خاک موجود بر روی قسمت طرمانی دیوار موجب افزایش وزن مقاوم دیوار می‌شود و در برابر واژگونی دیوار به سمت دریا نیز مقاومت می‌نماید. از این رو در این بستر، شکل پلکانی دیوار سبب بهبود اندک عملکرد آن می‌شود. به‌عنوان مثال، تغییر مکان افقی دیوار SB3 در این شرایط، ۷ درصد کمتر از تغییر مکان افقی دیوار VB3 است. اما در بستر سمت به علت زیاد بودن جابجایی دیوار، حجم انبوهی از خاک موجود بر بخش طرمانی دیوار از این بخش جابجایی می‌گردد و تاثیر مثبت این توده کاسته می‌شود. این مسأله به‌وضوح در مقایسه دیوارهای SB2 و VB2 قابل ملاحظه است. تغییر مکان افقی دیوار پشت پلکانی SB2، ۵۶ درصد بیشتر از دیوار پشت عمودی VB2 می‌باشد. شایان توجه است که میزان جابجایی دیوار در این حالت وابستگی زیادی به وزن آن دارد. برای نمونه دیوار SB3 به علت برخورداری از وزن بالا جابجایی پائینی دارد که این مسأله در کنار برخورداری این دیوار از طول طره مورد نیاز سبب می‌شود که توده خاک قرار گرفته در بخش طرمانی دیوار مشارکت بیشتری در تأمین پایداری دیوار داشته باشد. از این رو جابجایی این دیوار ۱۱/۲ درصد کوچک‌تر از دیوار VB3 است. بنابراین در خصوص دیوارهای دارای وزن پایین در بستر سمت، عملکرد دیوار پشت عمودی بهتر از دیوار پشت پلکانی متناظر می‌باشد که با افزایش وزن و کاهش جابجایی، عملکرد دیوارهای پشت پلکانی بهبود می‌یابد، تا جایی که در دیوارهای با وزن بالا عملکرد دیوار پشت پلکانی بهتر از دیوار پشت عمودی متناظر است. در خصوص دیوارهای پشت عمودی نیز مکانیزم رفتاری در هر دو بستر متراکم و سمت ثابت می‌باشد. در این دیوارها، مشابه دیوارهای پشت پلکانی دیوار در ابتدای زلزله به سمت دریا واژگون می‌شود و این حالت تا پایان ادامه می‌یابد. میزان دوران و جابجایی نیز بر اساس وزن دیوار و عرض دیوار تغییر می‌کند.

چکیده

از دیرباز بنادر جزء مهم‌ترین زیرساخت‌ها در تجارت کالا و سوخت میان کشورهای مختلف جهان بوده‌اند. دیوارهای ساحلی مهم‌ترین المان‌های سازه‌ای تسهیلات بندری به‌شمار می‌روند و وظیفه تأمین سطح لازم برای پهلوگیری شناورها و حفظ پایداری خود و تجهیزات مستقر برای روی خاکریزشان در طی شرایط بحرانی نظیر زلزله را بر عهده دارند. دیوارهای ساحلی وزنی یکی از قدیمی‌ترین سیستم‌های دیوار ساحلی هستند که پایداری خود را به‌واسطه وزن بالای خود تأمین می‌نمایند. در مطالعه حاضر، رفتار لرزه‌ای دو هندسه متفاوت از دیوار ساحلی وزنی در دو بستر متراکم و روان‌گرا مورد بررسی قرار گرفته است. مقایسه رفتار لرزه‌ای دیوارهای پشت قائم و پشت پلکانی، رفتار لرزه‌ای مطلوب‌تر دیوارهای پشت پلکانی و مقادیر جابجایی افقی کم‌تر این دیوارها را نسبت به دیوارهای پشت قائم متناظر نشان می‌دهد.

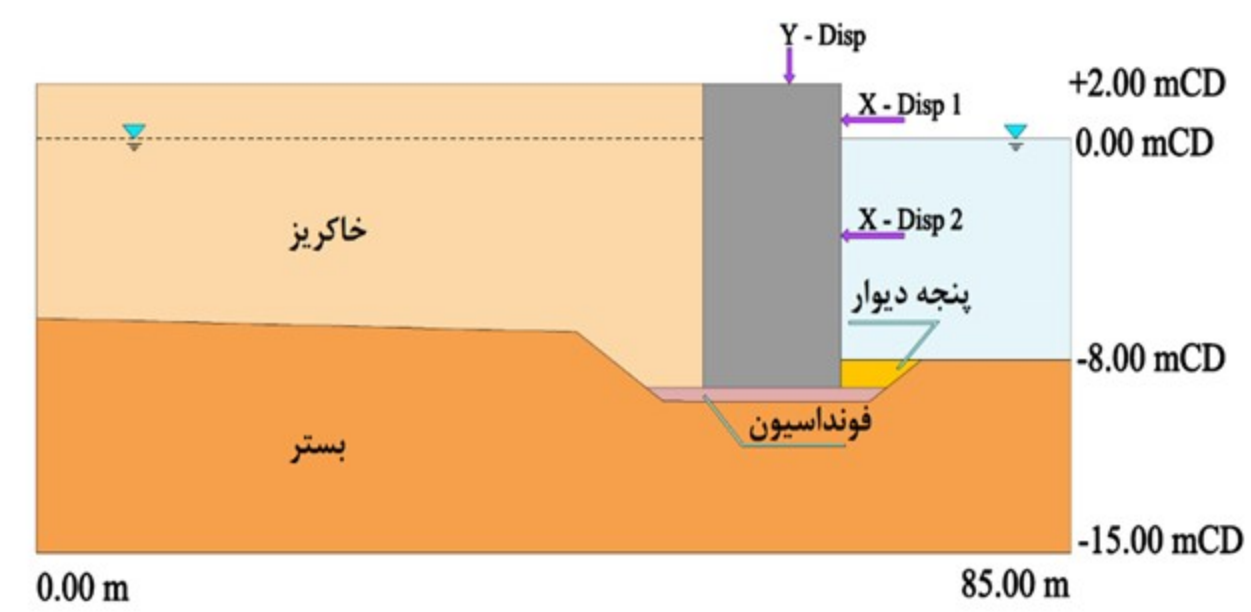
۱- مقدمه

امروزه بنادر تسهیلات شاهرهای چند منظوره‌اند که شامل طیف گسترده‌ای از تجهیزات عملیات حمل و نقل و مسافربری، پارگیری محموله و ابزار کالا هستند. دیوارهای ساحلی یکی از عناصر کلیدی بنادر و لنگرگاه‌ها می‌باشند. این دیوارها به عنوان المان‌های سازه‌ای اسکله، وظیفه تأمین سطح لازم برای پهلوگیری شناورها و حفظ پایداری خود و تجهیزات مستقر برای روی خاکریزشان را بر عهده دارند. به دلیل حجم وسیع مبادلات، استقرار تجهیزات و محموله‌های گرانقیمت بر روی خاکریز این دیوارها و همچنین هزینه بالای بازسازی دیوارهای ساحلی به لحاظ زمان و هزینه اقتصادی، ورود آسیب و اختلال در عملکرد این دیوارها خسارات اقتصادی سنگینی را در پی خواهد داشت. از این رو حفظ عملکرد این سازه‌ها پس از شرایط بحرانی مانند زلزله و سونامی از اهمیت بسیار بالایی برخوردار می‌باشد. با این وجود، خسارات وارد بر دیوارهای ساحلی در طی رویدادهای لرزه‌ای گذشته آسیب‌پذیری بالای این سازه‌ها در برابر لرزه‌ها را نشان می‌دهد [۱].

دیوارهای ساحلی وزنی یکی از قدیمی‌ترین و متداول‌ترین سیستم‌های دیوار ساحلی هستند که پایداری خود را به‌واسطه وزن بالای خود تأمین می‌نمایند. این دیوارهای دارای مزایای فراوانی نظیر دایره وسیع کاربرد، پایداری بالا، سهولت ساخت و قابلیت کاربرد برای احداث اسکله‌های با عمق آب‌خور بالا است [۱]. از این رو اصلی‌ترین گزینه برای احداث اسکله در ساختگاه‌های دارای مصالح ژئوتکنیکی غیرچسبنده به‌شمار می‌روند. دیوارهای وزنی در هندسه‌های مختلف از جمله پشت قائم، پشت پلکانی و I شکل طراحی و اجرا می‌شوند. در مطالعه حاضر، رفتار لرزه‌ای دو نوع دیوار ساحلی وزنی، شامل دیوارهای پشت قائم و پشت پلکانی در دو بستر متراکم و روان‌گرا مورد بررسی قرار گرفته است. به‌این منظور ابتدا ۳ سری دیوار براساس سطوح لرزه‌ای مختلف، با استفاده از روش شبه‌استاتیکی طراحی می‌شوند. سپس با انجام تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی غیرخطی با استفاده از روش تقاضا محدود صریح، رفتار لرزه‌ای این دیوارها در دو بستر متراکم و روان‌گرا مورد بررسی و مقایسه قرار می‌گیرد.

۲- مشخصات مدل مورد مطالعه

مطابق شکل ۱، مدل مورد مطالعه در مطالعه حاضر شامل یک دیوار با ارتفاع آزاد ۱۰ متر، به همراه ۱ متر عمق مدفون (مجموعاً ۱۱ متر است. مصالح ژئوتکنیکی بستر از نوع ماسه و مصالح خاکریز از نوع شن آهکی خرد شده هستند. مطابق شکل ۲ تاریخچه زمانی بارگذاری ورودی برای مدل با بستر متراکم و روان‌گرا، تاریخچه شتاب با حداکثر شتاب افقی (a_{max}) به ترتیب ۰/۳۵ g و ۰/۲۴ g است.



شکل ۱: هندسه مدل دیوار ساحلی مورد مطالعه و نقاط ثبت تاریخچه‌های تغییر مکان‌های افقی و قائم.

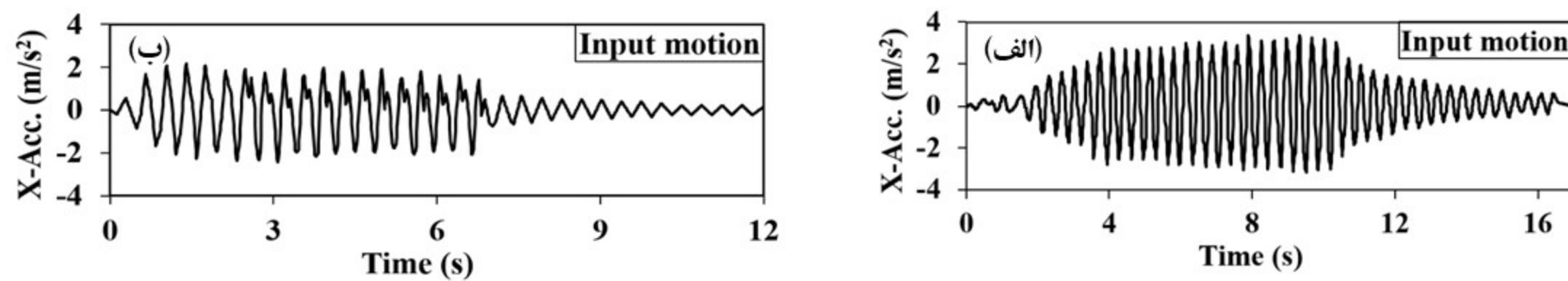
۳- طراحی دیوارها

به منظور طراحی دیوارها از روش شبه‌استاتیکی استفاده می‌شود. مطابق توصیه آیین‌نامه کارهای دریایی ژاپن (۲۰۰۲)، مهم‌ترین معیارها برای طراحی دیوارهای ساحلی وزنی لغزش، واژگونی، ظرفیت باربری شالوده، پایداری کلی و نشست دیوار می‌باشند [۲].

برای تحلیل و طراحی دیوارهای حامل روش مونوتوپه اولیه به‌طور گسترده در آیین‌نامه‌های ساختمانی و دستورالعمل‌ها مورد استفاده است و روش اصلی برای طراحی لرزه‌ای سازه‌های نگهدارنده به‌شمار می‌رود [۳]. مطابق توصیه آیین‌نامه کارهای دریایی ژاپن [۲] و دستورالعمل طراحی لرزه‌ای سازه‌های بندری [۴] ضریب شتاب قائم معادل زلزله (K_p) برای تحلیل و طراحی دیوارهای ساحلی برابر صفر بوده و ضریب شتاب افقی معادل زلزله (K_h) نیز به‌صورت زیر تعیین می‌گردد:

$$K_h = \alpha/g \quad \text{for } \alpha \leq 0/2g \quad (1)$$

$$K_h = \frac{1}{3}(\alpha/g)^{1/3} \quad \text{for } \alpha > 0/2g \quad (2)$$



شکل ۲: تاریخچه زمانی شتاب وارد بر مدل با بستر: (الف) متراکم و (ب) روان‌گرا.

لغزش

مطابق توصیه آیین‌نامه کارهای دریایی ژاپن [۲] ضریب اطمینان دیوار در برابر لغزش به‌صورت زیر تعیین می‌شود:

$$F_s \leq \frac{f W}{P} \quad (3)$$

که W برآیند نیروی قائم وارد بر دیوار، P برآیند نیرو افقی وارد بر دیوار، f ضریب اصطکاک بین زیر دیوار و خاک فونداسیون و F_s ضریب اطمینان هستند.

واژگونی دیوار

مطابق توصیه آیین‌نامه کارهای دریایی ژاپن [۲] ضریب اطمینان دیوار در برابر واژگونی به‌صورت زیر تعیین می‌شود:

$$F_s \leq \frac{W t}{P h} \quad (4)$$

که W برآیند نیروی قائم وارد بر دیوار، P برآیند نیرو افقی وارد بر دیوار، F_s ضریب اطمینان، t فاصله بین نقطه اعمال برآیند نیروی عمودی تا پنجه جلوی دیوار و h ارتفاع نقطه اعمال برآیند نیروی افقی تا پنجه دیوار هستند.

ظرفیت باربری فونداسیون

مطابق روش وسیک (۱۹۷۵) که یکی از مرسوم‌ترین روش‌های تعیین ظرفیت باربری بی‌سطحی است، ظرفیت باربری و ضریب اطمینان ظرفیت باربری برای دیوارهای ساحلی وزنی به‌صورت زیر قابل تعیین است:

$$q_{ult} = C N_c S_c d_c i_c + \bar{q} N_q S_q d_q i_q + 0/5 \gamma B' N_\gamma S_\gamma d_\gamma i_\gamma \quad (5)$$

$$q_{ult} = q_{ult} B' \quad (6)$$

$$F_s = \frac{q_{ult}}{\gamma} \quad (7)$$

که q_{ult} فشار باربری، q_{ult} ظرفیت باربری فونداسیون، C چسبندگی خاک فونداسیون، q̄ فشار سربار در تراز کف فونداسیون، γ وزن مخصوص موثر بالای تراز کف فونداسیون، γ وزن مخصوص موثر خاک زیر کف فونداسیون، D_f عمق فونداسیون، N_c, N_q, N_γ ضرایب ظرفیت باربری، B عرض فونداسیون، B' عرض موثر فونداسیون با توجه به خروج از مرکزیت بارها، S_c, S_q, S_γ ضرایب شکل، d_c, d_q, d_γ ضرایب عمق، i_c, i_q, i_γ ضرایب انحراف بار، γ برآیند نیروی قائم وارد بر فونداسیون و F_s ضریب اطمینان است.

مقادیر مجاز ضرایب اطمینان برای ضوابط فوق به‌همراه مرجع ارائه دهنده در جدول ۱ ارائه شده است. در پژوهش حاضر براساس ضوابط فوق ۳ سری دو تایی دیوار در دو هندسه پشت قائم و پشت پلکانی مطابق شکل ۳ بر مبنای ضریب شتاب افقی (K_h) ۰/۱۸، ۰/۲۴ و ۰/۳۵ طراحی شده است.

جدول ۱: مقادیر مجاز ضرایب اطمینان.

موقعیت	شرایط استاتیکی	شرایط شبه‌استاتیکی	مرجع
لغزش	۱/۲	۱	[۲]
واژگونی	۱/۲	۱/۱	[۲]
ظرفیت باربری	۳	۲	[۶]