

بهینه‌سازی هندسه دیوارهای ساحلی وزنی بلوکی گوزپشتی با استفاده از تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی و روش یادگیری ماشین نظارت شده

بابک ابراهیمیان* (استادیار)

امیررضا زرنوشه فراهانی (کارشناسی ارشد)

گروه مهندسی ژئوتکنیک و حمل و نقل، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط‌زیست، دانشگاه شهیدبهشتی، تهران، ایران

مهندسی عمران شریف، (بهار ۱۴۰۳)
دوره ۴۰، شماره ۱، صص. ۳۱-۱۷، (پژوهشی)

در این پژوهش، رفتار لرزه‌ای دیوارهای ساحلی وزنی بلوکی گوزپشتی مستقر بر بستر متراکم غیر روانگرا با استفاده از تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی تاریخچه زمانی به روش تناقض محدود صریح لاگرانژی مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین، هندسه بهینه برای این نوع دیوارها پیشنهاد شده است. برای این منظور، ابتدا، یک مدل عددی از دیوار ساحلی گوزپشتی ایجاد و پاسخ لرزه‌ای آن بر مبنای مشاهدات آزمایشگاهی متناظر اعتبارسنجی می‌شود. سپس، با انجام تحلیل‌های حساسیت‌سنجی بر روی زاویه گوز دیوار، زاویه اصطکاک خاکریز و نسبت ارتفاع گوز به ارتفاع دیوار، زاویه‌های گوز بهینه متناظر با تغییر مکان افقی حداقل و دوران صفر دیوار ساحلی بلوکی گوزپشتی برآورد می‌شوند. در ادامه، با استفاده از رگرسیون غیرخطی چندگانه مبتنی بر روش یادگیری ماشین نظارت شده، روابط آماری برای تخمین زاویه گوز بهینه دیوارها ارائه می‌شوند. نتایج تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی نشان می‌دهند که با تغییرات زاویه گوز، سازوکار حرکتی و الگوی تغییرشکلی دیوار و پاسخ لرزه‌ای آن به‌طور قابل توجهی تغییر می‌کنند. با افزایش زاویه گوز، دوران دیوار به سمت دریا در اثر بارگذاری لرزه‌ای کاهش می‌یابد و سازوکار حرکتی دیوار از واژگونی به سمت دریا به واژگونی به سمت خاکریز تغییر می‌کند. برای تمامی مقادیر بررسی شده نسبت ارتفاع گوز به ارتفاع دیوار و زاویه اصطکاک خاکریز، در زاویه گوزهای کمتر از ۳۵ درجه، افزایش زاویه گوز منجر به کاهش قابل توجه تغییر شکل دیوار می‌شود. در زاویه گوزهای بین ۳۵ تا ۵۰ درجه، اثر افزایش زاویه گوز بر کاهش تغییر شکل دیوار کمتر است. برای زاویه گوزهای بزرگ‌تر از ۵۰ درجه، افزایش زاویه گوز اثر معکوسی بر بهبود عملکرد لرزه‌ای دیوار ساحلی بلوکی گوزپشتی دارد و موجب افزایش تغییر شکل‌های لرزه‌ای دیوار می‌شود. علاوه بر این، در نسبت ارتفاع گوز به ارتفاع دیوار برابر با ۰/۷، با افزایش زاویه اصطکاک خاکریز از ۱۵ به ۴۵ درجه، زاویه گوز بهینه متناظر با دوران دیوار برابر صفر و حداکثر کاهش در تغییر مکان افقی دیوار به ترتیب از ۴۲/۷ به ۲۳/۹ و از ۵۳ به ۳۴/۵ کاهش می‌یابد.

واژگان کلیدی: بهینه‌سازی هندسی، تحلیل دینامیکی غیرخطی، دیوار ساحلی وزنی، هندسه پشت شکسته، یادگیری ماشین نظارت شده.

۱. مقدمه

به‌واسطه روان‌گرایی مصالح ژئوتکنیکی خاکریز یا بستر، دچار لغزش افقی، واژگونی به سمت دریا و گسیختگی‌های فراوانی شده‌اند.^[۵-۱] مطالعات عددی و آزمایشگاهی انجام شده بر روی دیوارهای ساحلی، آسیب‌پذیری لرزه‌ای بالای آن‌ها را نشان می‌دهند.^[۱۷-۶] دیوارهای ساحلی وزنی که پایداری خود را از وزنشان می‌گیرند، به

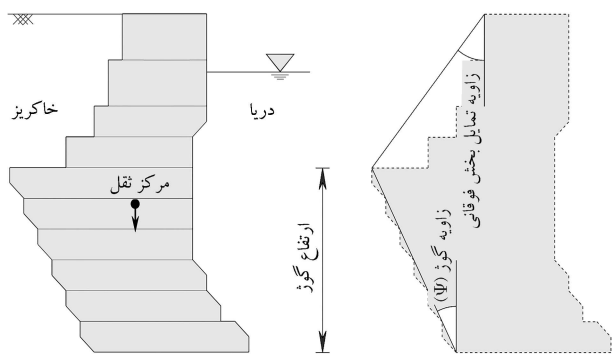
امروزه هزاران متر طول اسکله در سراسر جهان وجود دارد. در طی رویدادهای لرزه‌ای گذشته، دیوارهای ساحلی که از اجزای سازه‌ای اصلی در اسکله‌ها هستند،

* نویسنده مسئول

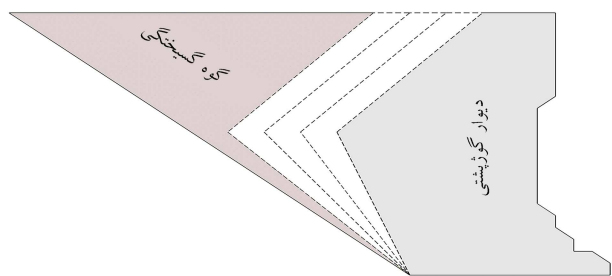
تاریخ: دریافت ۱۴۰۱/۷/۲۳، اصلاحیه ۱۴۰۱/۱۲/۲۳، پذیرش ۱۴۰۲/۲/۱۳.

استناد به این مقاله:

ابراهیمیان، بابک و زرنوشه فراهانی، امیررضا، ۱۴۰۳. بهینه‌سازی هندسه دیوارهای ساحلی وزنی بلوکی گوزپشتی با استفاده از تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی و روش یادگیری ماشین نظارت شده. مهندسی عمران شریف، ۴۰(۱)، صص. ۳۱-۱۷. DOI:10.24200/J30.2023.61126.3150



شکل ۱. هندسه دیوار ساحلی گوزپشتی به همراه پارامترهای هندسی آن.



شکل ۲. تغییر ابعاد گوه گسیختگی خاکریز با افزایش زاویه گوز دیوار ساحلی وزنی بلوکی گوزپشتی.

تخمین زاویه گوز بهینه دیوارهای ساحلی بلوکی گوزپشتی و تخمین تغییر مکان افقی و زاویه دوران بیشینه آنها پس از اعمال بارگذاری لرزه‌ای توسعه داده می‌شوند.

هدف اصلی این مطالعه، بهینه‌سازی هندسه پشت‌شکسته دیوارهای ساحلی وزنی بلوکی به‌عنوان یک سازه حائل با درجه اهمیت بالا است. این روش به دلیل کاربری گسترده‌اش و هزینه کمتر نسبت به دیگر سیستم‌های دیوارهای ساحلی، به ویژه در مناطقی با خطر زلزله بالا، بسیار مورد توجه قرار می‌گیرد. در این راستا، برای بهینه‌سازی هندسی از روش یادگیری ماشین و رگرسیون غیرخطی چندگانه به‌عنوان ابزارهای محاسباتی به‌روز و قدرتمند استفاده می‌شود که می‌تواند یکی از نوآوری‌های اصلی پژوهش حاضر باشد. همچنین، به‌عنوان یکی از نتایج مهم و کاربردی این پژوهش، الگوریتم‌های طبقه‌بندی متفاوتی در فرایند یادگیری ماشین به‌کار گرفته می‌شوند و دقت و کیفیت پیش‌بینی آنها در تخمین پاسخ سیستم مقایسه و رتبه‌بندی می‌شود.

۲. شبیه‌سازی عددی رفتار لرزه‌ای دیوار ساحلی وزنی بلوکی گوزپشتی

مبتنی بر توسعه مدل عددی پایه در این پژوهش، دیوار بلوکی گوزپشتی مطالعه شده در یک آزمون میز لرزه ۱g با مقیاس ۱ به ۲۵ است.^[۲۶] همچنین، مدل فیزیکی مقیاس شده در آزمایشگاه مربوط به دیوار ساحلی بلوکی گوزپشتی که در بندر پتروشیمی منطقه اقتصادی پارس، واقع در عسلویه در جنوب غربی ایران اجرا شده است، یکی از نمونه‌های موفق از احداث این نوع سازه‌های ساحلی در سطح بین‌المللی است.^[۲۷] هندسه و ابعاد واقعی مدل مورد بررسی همراه با موقعیت نقاط ثبت داده‌های شتاب، تغییر مکان، فشار جانبی خاک و فشار آب منفذی در شکل ۳

دلیل مزایای اجرایی و پایداری بالا، از گذشته جزو پرکاربردترین سازه‌های حائل، به‌ویژه در بسترهای متشکل از مصالح ژئوتکنیکی با تراکم متوسط تا بالا بوده‌اند.^[۱۸] دیوارهای ساحلی بلوکی احتمالاً قدیمی‌ترین نوع دیوارهای وزنی هستند.^{[۱۹]، [۲۰]} این نوع سازه‌های حائل از بلوک‌های بتنی روی یک لایه شن یا سنگ شکسته در بستر دریا ساخته می‌شوند. برای احداث دیوارهای ساحلی در مناطق با خطر لرزه‌خیزی بالا می‌توان از یک نوع خاص دیوار بلوکی به نام دیوار ساحلی پشت‌شکسته یا گوزپشتی استفاده نمود. در این نوع دیوار، شکل پشت دیوار مطابق شکل ۱ دارای دو بخش مختلف است. در بخش پایینی دیوار که فشارهای جانبی وارد بر دیوار بزرگ‌تر هستند، با تمایل شکل پشت دیوار به سمت خاکریز، فشار جانبی وارد بر دیوار از جانب خاکریز کاهش می‌یابد. در بخش بالایی دیوار که فشار جانبی خاکریز کمتر است، با تمایل دیوار به سمت دریا، وزن دیوار، هزینه ساخت و نیروی اینرسی زلزله کاهش می‌یابد.^[۲۱] علاوه بر این، در این نوع هندسه، مرکز ثقل دیوار به سمت خاکریز متمایل می‌شود و پایداری دیوار در برابر واژگونی به سمت دریا به‌طور قابل توجهی افزایش می‌یابد.^[۲۱] مطابق شکل ۱، زاویه تمایل بخش پایینی دیوار به سمت خاکریز نسبت به راستای قائم که (زاویه گوز) (Ψ) نامیده می‌شود و ارتفاع نقطه شکست یا تغییر راستای هندسه پشت دیوار نسبت به کف آن که (ارتفاع گوز) گفته می‌شود، مهم‌ترین پارامترهای هندسی دیوار ساحلی بلوکی گوزپشتی به‌شمار می‌روند. بر اساس نظریه‌های کولمب^[۲۲] و مونوبه - اوکابه^{[۲۳]، [۲۴]}، با افزایش زاویه گوز دیوار ساحلی گوزپشتی، فشار جانبی استاتیکی و شبه‌استاتیکی وارد بر بخش پایینی دیوار کاهش می‌یابد.^[۲۵] مطابق این نظریه‌ها، در شرایطی که زاویه تمایل بخش فوقانی دیوار ثابت باشد، با افزایش زاویه گوز به واسطه کوچک شدن گوه گسیختگی تشکیل شده در خاکریز، نیروی افقی وارد بر دیوار در شرایط استاتیکی و لرزه‌ای کاهش پیدا می‌کند (شکل ۲). همچنین، با افزایش زاویه گوز دیوار گوزپشتی، مرکز ثقل دیوار به سمت خاکریز متمایل می‌شود و لنگر مقاوم در برابر واژگونی به سمت دریا افزایش می‌یابد. کاهش نیروی افقی وارد بر دیوار، سبب کاهش جابه‌جایی افقی لرزه‌ای ناشی از لغزش دیوار بر روی بستر و افزایش لنگر مقاوم در برابر واژگونی سبب کاهش دوران دیوار به سمت دریا در طی زلزله می‌شود. اما سوال مهمی که وجود دارد این است که این کاهش تغییر شکل‌های دورانی و لغزشی دیوار ساحلی گوزپشتی تا چه زاویه گوزی ادامه می‌یابد و زاویه گوز بهینه که موجب حداکثر بهبود در رفتار لرزه‌ای دیوار ساحلی گوزپشتی می‌شود، چه مقدار است؟ شرایط مصالح ژئوتکنیکی خاکریز و ارتفاع گوز دیوار چه تأثیری بر زاویه گوز بهینه دیوار ساحلی بلوکی گوزپشتی دارند؟

در پژوهش حاضر، با انجام تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی تاریخچه زمانی به روش تفاضل محدود صریح لاگرانژی با به‌کارگیری نرم‌افزار FLAC دو بعدی ویرایش ۸/۱^[۲۵] و استفاده از فرایند یادگیری ماشین نظارت شده، پاسخ لرزه‌ای دیوارهای ساحلی وزنی بلوکی گوزپشتی با هندسه‌های مختلف مطالعه و هندسه بهینه برای آنها پیشنهاد می‌شود. در این خصوص، ابتدا یک مدل عددی پایه از دیوار ساحلی بلوکی گوزپشتی مستقر بر بستر دانه‌ای متراکم غیر روان‌گرا ایجاد و پاسخ لرزه‌ای آن بر اساس مشاهدات آزمایشگاهی متناظر موجود در ادبیات فنی^[۲۶] اعتبارسنجی می‌شود. سپس، با انجام تحلیل‌های حساسیت‌سنجی بر روی زاویه گوز دیوار، زاویه اصطکاک خاکریز و نسبت ارتفاع گوز به ارتفاع دیوار، اثر هر یک از این عوامل بر رفتار لرزه‌ای دیوار ساحلی بلوکی گوزپشتی و تغییرات تغییر مکان افقی و زاویه دوران دیوار برآورد می‌شود. در نهایت، با استفاده از روش یادگیری ماشین نظارت شده^[۲۷]، کتاب‌خانه یادگیری ماشین برای پایتون (سای کیت لرن^[۲۸]) و زبان برنامه‌نویسی پایتون^[۲۹]، روابط آماری برای

جدول ۱. مشخصات مصالح ژئوتکنیکی در مدل‌های عددی.

دیوار	بستر دریا		خاکریز	وزن مخصوص اشباع (کیلوگرم بر مترمکعب)
	شالوده	پنجه		
	۲۰۰۰	۲۰۰۰	۱۹۰۰	
	۳۵	۳۶	۳۰	زاویه اصطکاک (ϕ') (درجه)
	۰	۳	۰	زاویه اتساع (ψ) (درجه)
	۱۲۵	۱۷۰	۱۲۰	مدول حجمی (k) (مگاپاسکال)
	۶۰	۸۰	۵۵	مدول برشی (G) (مگاپاسکال)

$$G_{max} = \frac{e}{1+e} \left(\frac{2.17 - e}{1+e} \right)^2 (\sigma'_c)^{0.52}, \sigma'_c < 9.8 \text{ kPa}$$

$$G_{max} = \frac{e}{1+e} \left(\frac{2.17 - e}{1+e} \right)^2 (\sigma'_c)^{0.52}, \sigma'_c > 9.8 \text{ kPa} \quad (1)$$

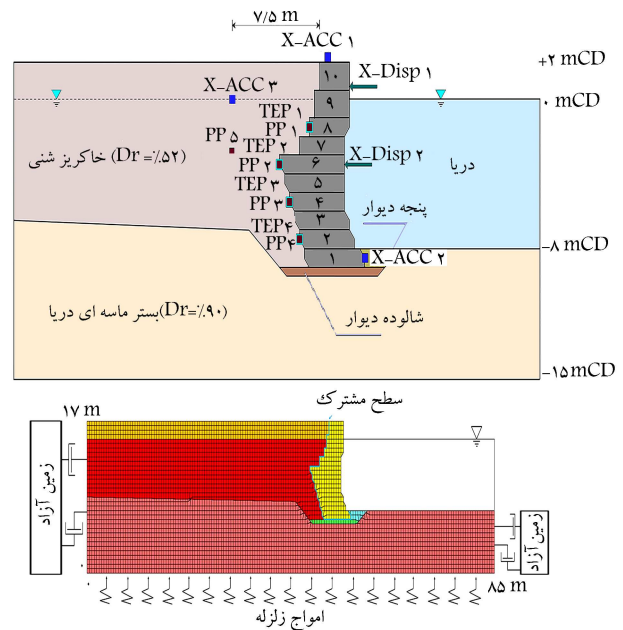
در این روابط، e خلاء و σ'_c فشار موثر متوسط همه‌جانبه (بر حسب کیلوپاسکال) است. سپس، G_{max} بر حسب مگاپاسکال حاصل می‌شود. همچنین، مدول برشی خاکریز شنی با استفاده از رابطه ۲ محاسبه می‌شود. [۳۳]

$$G_{max} = G_b e^{-1.3} \left(\frac{\sigma'_c}{\sigma'_i} \right)^n \quad (2)$$

که در آن کیلوپاسکال $\sigma'_c = 100$ مگاپاسکال $G_b = 74$ [۳۲] و $n = 0.675$ مقدار متوسط برای شن‌ها [۳۵] هستند. مدول حجمی مصالح بر اساس مدول برشی محاسبه شده از روابط فوق و نسبت پواسون $\nu = 0.3$ محاسبه شده است. زاویه اصطکاک مصالح بستر و خاکریز بر اساس نتایج آزمون‌های آزمایشگاهی به ترتیب برابر ۳۶ و ۳۰ درجه در نظر گرفته شده‌اند. [۳۱] مشخصات مورد استفاده برای مصالح ژئوتکنیکی مختلف در شبیه‌سازی‌های عددی در جدول ۱ ارائه شده‌اند.

در روش تفاضل محدود، شکل و ابعاد شبکه در دقت نتایج تأثیر زیادی دارد. [۳۶] به‌طورکلی، هر چه ابعاد زون‌های شبکه ریزتر باشند، نتایج از دقت بالاتری برخوردار خواهند بود. همچنین، به‌لحاظ هندسی، بیشترین دقت برای مدلی با زون‌های مربع‌شکل حاصل می‌شود. [۲۵] برای انتشار دقیق موج لرزه‌ای در مدل، اندازه کوچک‌ترین زون باید کوچک‌تر از $1/10$ طول موج مرتبط با بالاترین فرکانس موج ورودی که حاوی انرژی قابل ملاحظه‌ای است، در نظر گرفته شود. [۲۵] علاوه بر این، در خصوص دیوار ساحلی وزنی بلوکی گوزپشتی، به‌واسطه هندسه پیچیده و جزئیات هندسی فراوان به‌سبب ابعاد و شکل بلوک‌های بتنی و شکل پشت شکسته دیوار، باید از یک شبکه با ابعاد زون ریز استفاده شود تا بتوان هندسه دیوار را با دقتی مطلوب شبیه‌سازی نمود. بر این اساس، در پژوهش حاضر از یک شبکه با زون‌های مربعی با بعد 0.5 متر استفاده شده است تا ضمن امکان شبیه‌سازی دقیق هندسه دیوار، پاسخ لرزه‌ای مدل از دقت مطلوبی برخوردار باشد. در طی تحلیل‌های استاتیکی، مرزهای جانبی مدل عددی در راستای افقی و مرز تحتانی در هر دو راستای افقی و قائم مقید می‌شوند. در هنگام تحلیل‌های دینامیکی، برای حذف اثرات ناشی از برخورد امواج به مرزهای جانبی و انعکاس آن‌ها به داخل مدل، از مرزهای زمین آزاد^۳ برای جوانب مدل عددی استفاده می‌شود. مرزهای زمین آزاد در مدل‌سازی‌های دینامیکی شامل یک ستون خاک به عرض واحد هستند که رفتار محیط جانبی بی‌نهایت خارج از مدل را شبیه‌سازی می‌نمایند. برای شبیه‌سازی مرزهای زمین آزاد در قسمت‌های جانبی مدل از میراگرهای ویسکوز^۴ استفاده می‌شود. [۲۵]

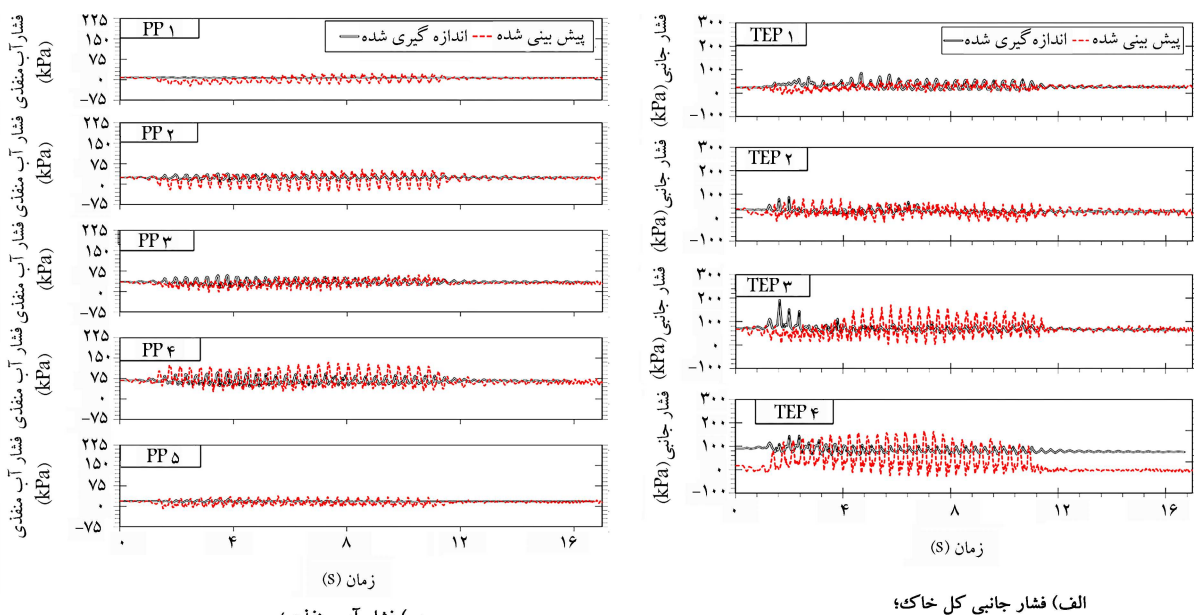
برای لحاظ نمودن اندرکنش دیوار ساحلی گوزپشتی و مصالح ژئوتکنیکی بستر و خاکریز در مدل‌سازی‌های عددی، المان سطح مشترک به کار گرفته می‌شود. برای این



شکل ۳. مشخصات هندسی و ابعاد: الف) مدل آزمایشگاهی مورد بررسی همراه با موقعیت نقاط ثبت فشار جانبی خاک (TEP)، فشار آب منفذی (PP)، شتاب افقی (X-ACC) و تغییر مکان افقی (X-Disp) و ب) شبکه بندی تفاضل محدود در مدل عددی.

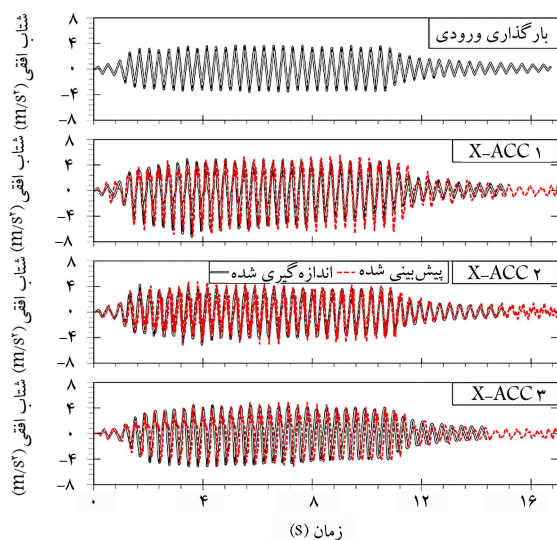
قسمت الف نشان داده شده است. مطابق این شکل، دیوار بلوکی گوزپشتی از ۱۰ عدد بلوک بتنی با هندسه‌های متفاوت تشکیل شده است. ارتفاع بلوک‌های یک تا هشت برابر ۱ متر و ارتفاع دو بلوک فوقانی نه و ۱۰ برابر ۱/۵ متر است. بر این اساس، ارتفاع کلی دیوار ۱۱ متر بوده که شامل ۱۰ متر ارتفاع آزاد و ۱ متر عمق مدفون است. همان‌گونه که در شکل ۳ قسمت الف مشاهده می‌شود، بلوک‌ها به نحوی بر روی یکدیگر چیده شده‌اند تا هندسه گوزپشتی یا پشت شکسته برای دیوار ایجاد شود.

برای شبیه‌سازی رفتار لرزه‌ای دیوار ساحلی وزنی بلوکی گوزپشتی، یک مدل عددی کرنش مسطح تفاضل محدود با استفاده از نرم‌افزار FLAC دو بعدی و برپایش $8/1$ توسعه داده شده است. [۲۵] برای حل مسئله مورد مطالعه، تعدادی کد عددی جانبی کمکی شامل کدهای محاسبه فرکانس غالب، تغییر مکان‌های افقی و قائم لرزه‌ای، کرنش برشی و فشار آب حفره‌ای اضافی سیستم به زبان برنامه‌نویسی فیش^۴ در نرم‌افزار ایجاد و پیاده‌سازی شده است. شبکه تفاضل محدود مدل عددی ساخته شده در شکل ۳ قسمت ب نشان داده شده است. در مدل عددی مورد مطالعه، بستر و خاکریز دیوار از خاک‌های دانه‌ای به ترتیب با چگالی نسبی (D_r) ۹۰ و ۵۲ درصد تشکیل شده‌اند. همچنین، مطابق با شرایط واقعی احداث دیوار، لایه‌هایی از جنس سنگریزه به ارتفاع ۱ و 0.5 متر به ترتیب در جلوی پنجه و زیر دیوار به عنوان شالوده ایجاد شده‌اند. از آنجا که مصالح خاکی تشکیل‌دهنده بخش‌های مختلف مدل عددی مورد بررسی در پژوهش حاضر از مصالح دانه‌ای غیرروان‌گرا هستند، به‌منظور توصیف رفتار آن‌ها از مدل رفتاری موهر - کولمب استفاده شده است. علاوه بر این، مدل الاستیک خطی برای شبیه‌سازی رفتار مکانیکی بلوک‌های بتنی دیوار ساحلی گوزپشتی به کار گرفته می‌شود. مدول برشی (G_{max}) بستر ماسه‌ای بر اساس توصیه مرجع [۳۱] با استفاده از روابط زیر محاسبه می‌شود. [۳۲]



(ب) فشار آب منفذی؛

(الف) فشار جانبی کل خاک؛



(ج) شتاب افقی در مدل‌های عددی مطالعه حاضر (پیش‌بینی شده) و آزمایشگاهی (اندازه‌گیری شده).

شکل ۴. تاریخچه‌های زمانی الف) فشار جانبی کل خاک و ب) فشار آب منفذی و ج) شتاب افقی در مدل‌های عددی مطالعه حاضر (پیش‌بینی شده) و آزمایشگاهی (اندازه‌گیری شده). [۲۶]

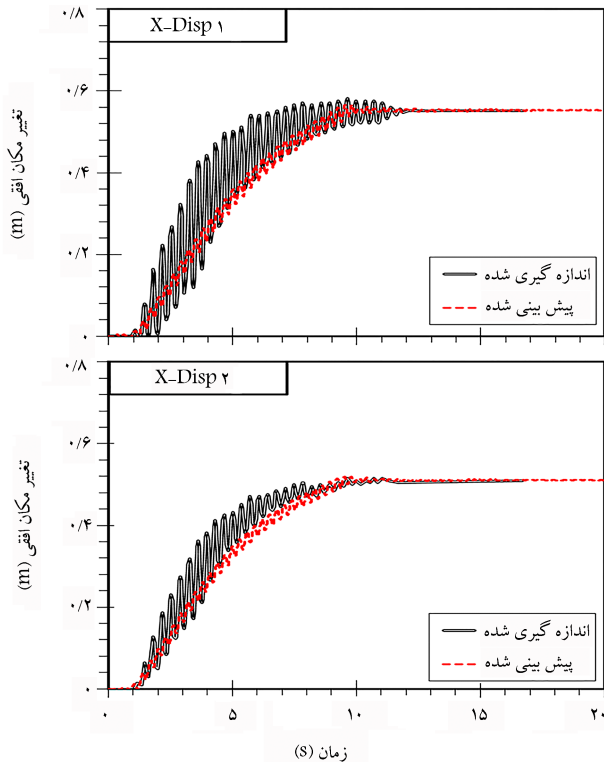
کلیدهای برشی تعبیه شده بر روی آن‌ها، تغییر شکل نسبی میان بلوک‌ها ناچیز است و می‌توان رفتار دیوار را یکپارچه در نظر گرفت. [۲۲]

منحنی میرایی - کرنش چرخه‌ای در مدل موه‌ر کولمب به صورت یک منحنی ایده‌آل با میرایی صفر در کرنش‌های نرمال کوچک‌تر از ۱ است. [۲۵] به عبارت دیگر، این مدل میرایی، مصالح را در کرنش‌های کوچک برابر صفر در نظر می‌گیرد. این در حالی است که نمودار میرایی مصالح به صورت یک نمودار غیرخطی افزایشی است و مصالح در کرنش‌های کوچک نیز دارای قابلیت استهلاک انرژی و خاصیت میرایی هستند. [۲۸] بنابراین، برای جلوگیری از نوسانات ناخواسته در تغییر شکل‌های بسیار کوچک و فرکانس‌های بالا، ۵ درصد میرایی ریلی متمرکز در فرکانس حدود ۲ هرتز (نزدیک به فرکانس پایه سیستم) در طی تحلیل‌های دینامیکی در مدل اعمال می‌شود. [۲۵]

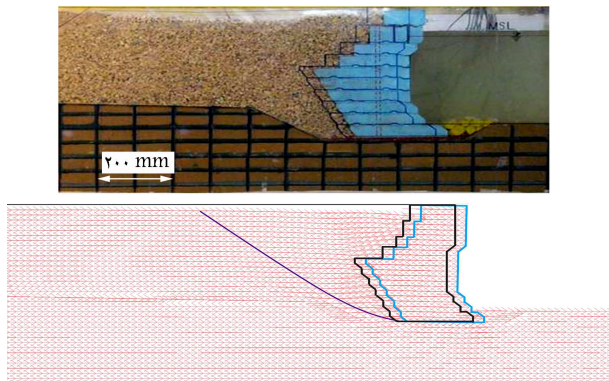
منظور، زاویه اصطکاک المان سطح مشترک مطابق با توصیه مرجع [۳۷] برابر با 0.6 زاویه اصطکاک مصالح ژئوتکنیکی در این بخش‌ها در نظر گرفته می‌شود. همچنین، سختی نرمال (k_n) و برشی (k_s) برای سطح مشترک میان دیوار و خاکریز و دیوار و بستر بر اساس معادله ۳ به ترتیب برابر با 5×10^9 و 7×10^9 منظور می‌شوند. [۲۵]

$$k_s = k_n = 10 \times \max \left[\frac{\left(K + \frac{4}{3}G \right)}{\Delta z_{\min}} \right] \quad (3)$$

که G و K به ترتیب مدول‌های حجمی و برشی و Δz_{\min} کوچک‌ترین بعد زون مجاور المان سطح مشترک در جهت نرمال هستند. در شرایطی که بستر دریا متشکل از مصالح ژئوتکنیکی متراکم باشد، به‌واسطه اصطکاک میان سطح بلوک‌های طویل بتنی تشکیل‌دهنده دیوار گزشتی وجود



شکل ۵. تاریخچه‌های زمانی تغییر مکان افقی الف) بالا و ب) وسط دیوار در مدل‌های عددی مطالعه حاضر (پیش‌بینی شده) و آزمایشگاهی (اندازه‌گیری شده). [۲۶]



شکل ۶. پیکربندی تغییر شکل دیوار پس از اعمال تحرک ورودی در مدل‌های الف) آزمایشگاهی [۲۶] و ب) عددی مطالعه حاضر.

۳. تحلیل حساسیت بر روی زاویه گوز دیوار، زاویه

اصطکاک خاکریز و نسبت ارتفاع گوز به ارتفاع دیوار

در این بخش، اثر زاویه گوز بر رفتار لرزه‌ای دیوار ساحلی گوزپشتی بررسی می‌شود. این بررسی با استفاده از تحلیل‌های حساسیت‌سنجی و در نظر گرفتن مقادیر مختلف زاویه اصطکاک خاکریز و نسبت‌های مختلف ارتفاع گوز به ارتفاع دیوار انجام می‌شود. پس از اعمال بارگذاری لرزه‌ای، تغییرات تغییر مکان افقی و دوران دیوار در هر یک از این حالات اندازه‌گیری و ثبت می‌شود. واضح است که تغییر پارامترهای هندسی و وزن دیوار ساحلی گوزپشتی بر میزان تغییر مکان افقی و دوران دیوار اثرگذار خواهد بود. بنابراین، برای بررسی اثر زاویه گوز در زاویه اصطکاک‌های مختلف خاکریز و نسبت‌های ارتفاع گوز به ارتفاع دیوار متفاوت، سایر پارامترهای هندسی

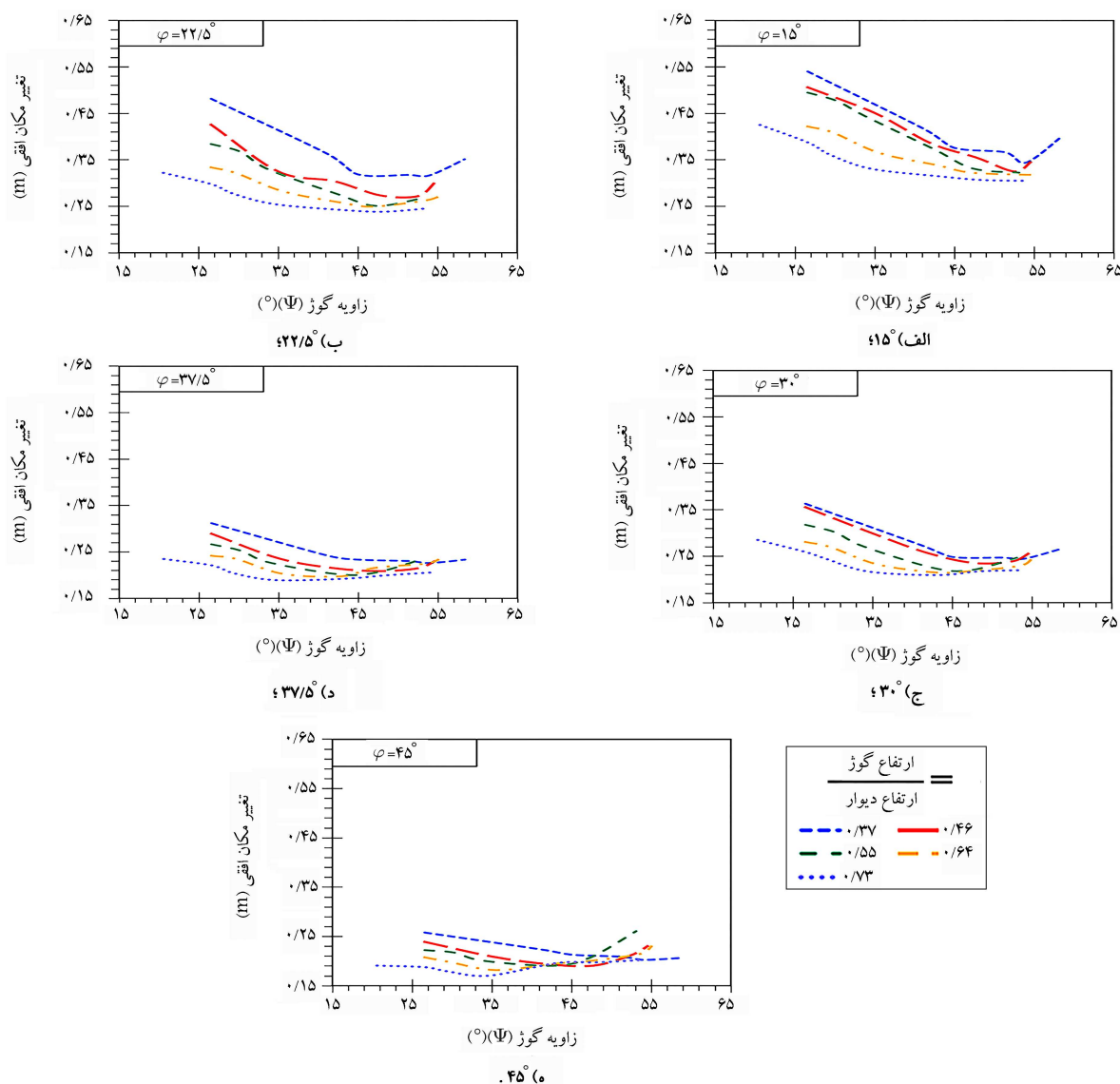
در نرم‌افزار به کار گرفته شده، بارگذاری دینامیکی وارده می‌تواند به صورت تاریخچه شتاب، سرعت، تنش، فشار یا نیرو به مدل اعمال شود. [۲۵] بر این اساس، بارگذاری ورودی مورد استفاده در تحلیل‌های دینامیکی پژوهش حاضر، متناظر با مدل آزمایشگاهی مرجع، یک تاریخچه شتاب افقی مطابق شکل ۴ قسمت ج با حداکثر شتاب $0.4g$ و فرکانس $2/8$ هرتز است که به مرز تحتانی مدل عددی اعمال شده است. پیش از انجام تحلیل‌های حساسیت‌سنجی بر روی پارامترهای هندسی تأثیرگذار دیوار، مدل عددی توسعه‌یافته با نتایج آزمایشگاهی حاصل از آزمون میز لرزه $1g$ با مقیاس 1 به 25 موجود در ادبیات فنی [۲۶] اعتبارسنجی می‌شود. برای این منظور، تاریخچه‌های زمانی فشار جانبی کل وارده از سوی خاک به دیوار، فشار آب منفذی، شتاب افقی و تغییر مکان افقی ثبت شده در نقاط مشخص شده در شکل ۳ قسمت الف با مشاهدات آزمایشگاهی متناظر [۲۶] مقایسه شده‌اند. در این خصوص، تاریخچه‌های زمانی پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده به ترتیب از تحلیل عددی و آزمون میز لرزه حاصل شده‌اند.

در شکل ۴ مشاهده می‌شود که تاریخچه‌های زمانی فشار جانبی کل وارده از سوی خاک به دیوار، فشار آب منفذی و شتاب افقی به دست آمده از تحلیل دینامیکی، از لحاظ روند و متوسط مقادیر از تطابق مناسبی با نتایج آزمایشگاهی برخوردارند. مطابق با شکل ۴ قسمت الف و ب، با توجه به سازوکار غالب تغییرشکلی دیوار در مدل‌های عددی و آزمایشگاهی که به صورت لغزش دیوار بر روی بستر متراکم و حرکت انتقالی آن به سمت دریا است، مقادیر نهایی فشار جانبی کل و فشار آب منفذی در خاکریز پشت دیوار در انتهای تحریک دینامیکی نسبت به مقادیر استاتیکی ابتدایی کاهش یافته‌اند. هرچند، در شروع بارگذاری دینامیکی، مقداری تفاوت جزئی در سازوکار حرکتی دیوار در مدل‌های عددی و آزمایشگاهی مشاهده می‌شود. به طوری که در مدل عددی، در ابتدای بارگذاری دینامیکی، دیوار به میزان جزئی (کمتر از 1 درجه) به سمت دریا دوران می‌کند. حال آنکه در مدل آزمایشگاهی، در ابتدای بارگذاری دینامیکی، دیوار به میزان جزئی (کمتر از 1 درجه) به سمت خشکی دوران می‌نماید. همین مسئله در مدل عددی سبب کاهش جزئی مقادیر اولیه فشار جانبی کل و فشار آب منفذی نسبت به مقادیر متناظر آزمایشگاهی شده است. البته در ادامه بارگذاری دینامیکی، سازوکار حرکتی دیوار بلوکی گوزپشتی در مدل‌های عددی و آزمایشگاهی منطبق بر یکدیگر بوده و به شکل حرکت انتقالی به سمت دریا و فاصله گرفتن دیوار از خاکریز است. در شکل ۴ قسمت ج ملاحظه می‌شود که تاریخچه‌های زمانی شتاب افقی در نقاط متناظر ارتفاعی در مدل‌های عددی و آزمایشگاهی بر هم منطبق هستند و روند توزیع و بزرگ‌نمایی شتاب افقی در ارتفاع این مدل‌ها هم‌خوانی مناسبی با یکدیگر دارند. در شکل ۵ مشاهده می‌شود که تاریخچه زمانی تغییر مکان افقی در بالا و میانه ارتفاع دیوار در مدل‌های عددی و آزمایشگاهی به لحاظ روند و مقادیر نهایی هم‌خوانی مناسبی با یکدیگر دارند. با بررسی مقادیر نهایی تغییر مکان افقی در هر دو موقعیت ارتفاعی دیوار که اختلاف ناچیز کم‌تر از $2/0$ درصد با یکدیگر دارند، مجدداً مشخص می‌شود الگوی تغییرشکلی دیوار با توجه به صلیبیت آن به صورت حرکت انتقالی به سمت دریا است. مطابق با شکل ۶، پیکربندی تغییرشکل یافته دیوار در هر دو مدل آزمایشگاهی و عددی نیز این سازوکار تغییرشکلی را تأیید می‌نماید. در مجموع، نتایج تحلیل اعتبارسنجی انجام شده نشان می‌دهند که مدل عددی توسعه‌یافته قادر است رفتار لرزه‌ای دیوار را از نظر کمی، سازوکار تغییر شکل و الگوی حرکتی شبیه‌سازی نماید. در ادامه، مدل عددی اعتبارسنجی شده برای تحلیل‌های حساسیت‌سنجی و بررسی اثر پارامترهای هندسی دیوار و مقاومتی خاکریز بر عملکرد لرزه‌ای و تغییر شکل دیوار به کار گرفته می‌شود.

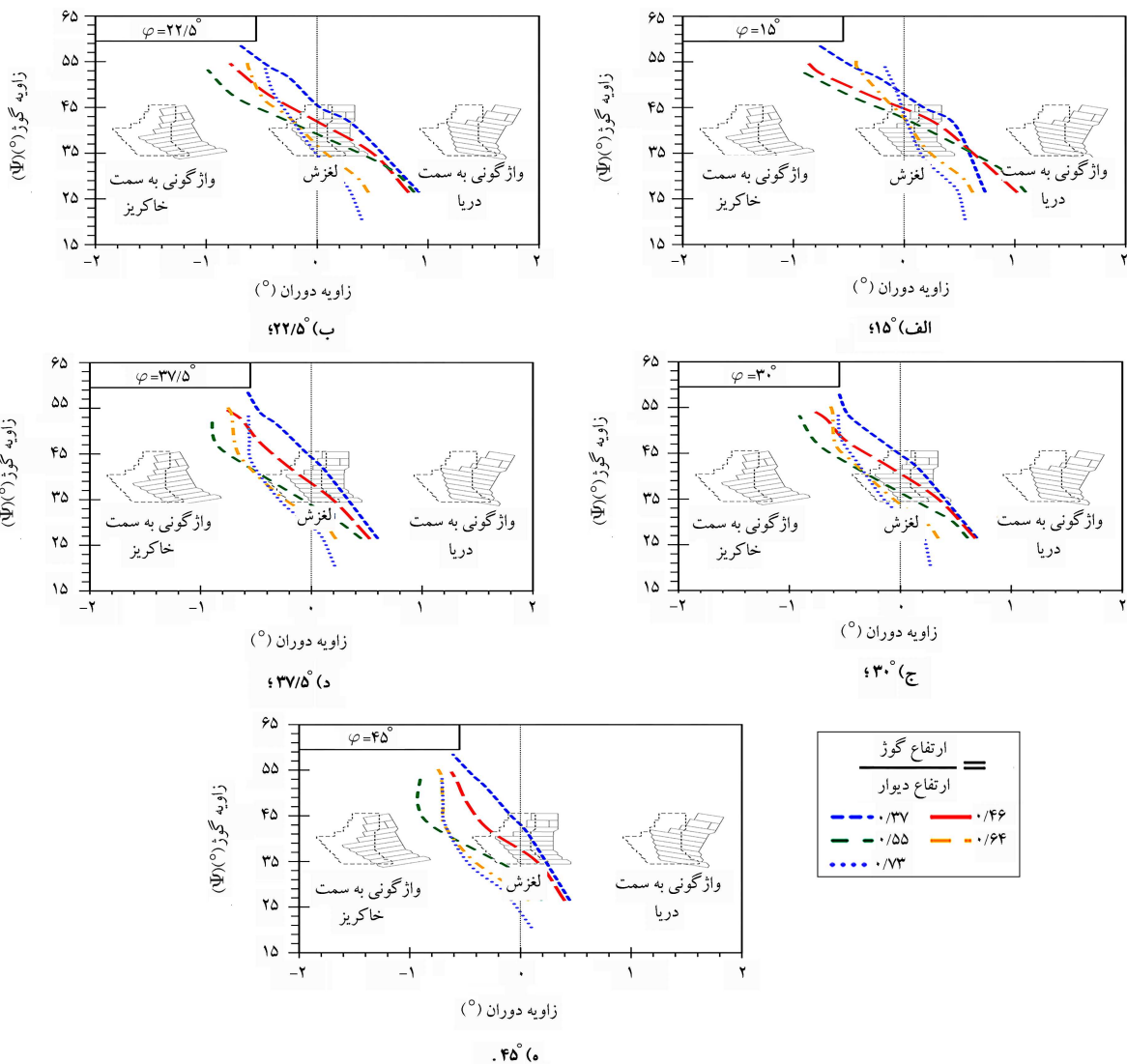
غیرفعال شدن سازوکار کاهش فشار جانبی بخش پایینی دیوار در زوایای گوتز بالا باشد. مطابق شکل ۹ قسمت الف، در زاویه گوتزهای پایین تا متوسط (حدود ۳۵ درجه)، به واسطه کوچک بودن زاویه گوتز و دوران دیوار به سمت دریا، گوتز پشت دیوار صفحه گسیختگی تشکیل شده در خاکریز را قطع نمی‌نماید و با افزایش زاویه گوتز دیوار و به دنبال آن کوچک شدن مساحت گوه گسیختگی، نیروی افقی وارد بر دیوار و تغییر مکان افقی آن کاهش می‌یابد. اما در زاویه گوتزهای بزرگ به واسطه بزرگ بودن زاویه گوتز و دوران دیوار به سمت خاکریز، گوتز پشت دیوار راستای صفحه گسیختگی اولیه تشکیل شده در خاکریز را قطع می‌نماید و صفحه گسیختگی جدیدی در پشت گوتز دیوار ایجاد می‌شود. به این ترتیب، مطابق شکل ۹ قسمت ب، بخشی از مصالح ژئوتکنیکی موجود در زیر گوتز دیوار به صورت یکپارچه با دیوار و به عنوان بخشی از آن عمل می‌نمایند و عملکرد دیوار مشابه با یک دیوار گوتزپشتی با زاویه گوتزی کوچک‌تر است. این مسئله موجب افزایش تغییر مکان افقی دیوار با افزایش زاویه گوتز می‌شود. مطابق شکل ۸، در زاویه گوتزهای کوچک، با افزایش زاویه گوتز دیوار، دوران آن

دیگر دیوار گوتزپشتی و وزن دیوار در تمامی مدل‌ها ثابت نگه داشته می‌شوند. تغییرات تغییر مکان افقی و زاویه دوران دیوار گوتزپشتی نسبت به زاویه گوتز دیوار در زاویه اصطکاک‌های مختلف خاکریز و نسبت‌های ارتفاع گوتز به ارتفاع دیوار مختلف به ترتیب در شکل‌های ۷ و ۸ ارائه شده‌اند.

مطابق شکل ۷، برای تمامی نسبت‌های ارتفاع گوتز به ارتفاع دیوار و تمامی مقادیر زاویه اصطکاک خاکریز، در زاویه گوتزهای پایین (محدوده ۲۵ تا ۳۵ درجه)، افزایش زاویه گوتز موجب کاهش قابل توجه (تا ۲۴ درصد) جابه‌جایی افقی دیوار گوتزپشتی شده است. اما در ادامه، در زاویه گوتزهای بزرگ‌تر (بزرگ‌تر از ۳۵ درجه و تا حدود ۵۰ درجه)، افزایش زاویه گوتز کاهش کمتری بر تغییر مکان افقی دیوار ایجاد کرده و شیب تغییرات تغییر مکان افقی نسبت به زاویه گوتز دیوار به سمت افقی شدن متمایل شده است. با افزایش زاویه گوتز دیوار به مقادیر بزرگ‌تر از حدود ۵۰ درجه، افزایش زاویه گوتز تأثیر معکوس بر بهبود پاسخ لرزه‌ای دیوار گوتزپشتی داشته و موجب افزایش تغییر مکان افقی دیوار شده است. این فرایند می‌تواند به علت



شکل ۷. تغییرات تغییر مکان افقی دیوار ساحلی بلوکی گوتزپشتی نسبت به زاویه گوتز دیوار برای نسبت‌های مختلف ارتفاع گوتز به ارتفاع دیوار و زاویه اصطکاک‌های متفاوت خاکریز.



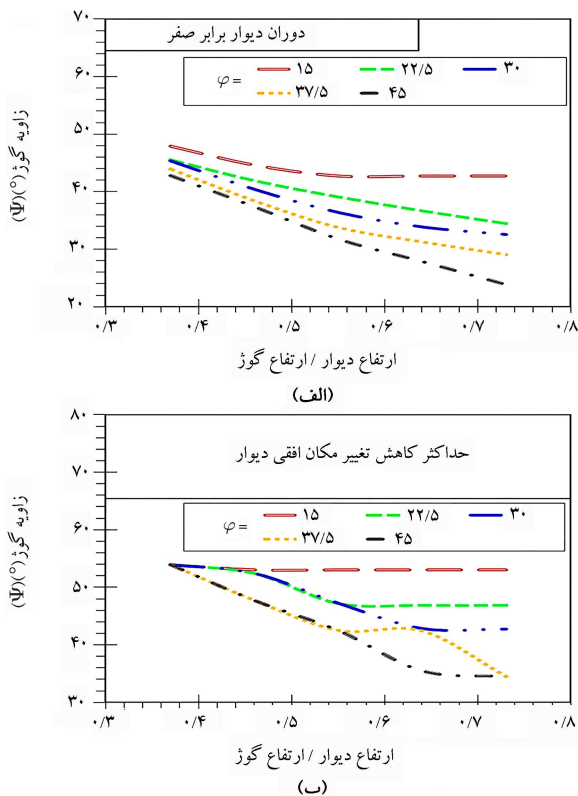
شکل ۸. تغییرات زاویه دوران دیوار ساحلی بلوکی گویشتی نسبت به زاویه گوی دیوار برای نسبت‌های مختلف ارتفاع گوی به ارتفاع دیوار و زاویه اصطکاک‌های متفاوت خاکریز.

ارتفاع گوی به ارتفاع دیوار $0.64/$ و زاویه اصطکاک خاکریز 15 درجه برابر 53 درجه است، درحالی‌که این زاویه گوی برای نسبت ارتفاع گوی به ارتفاع دیوار $0.64/$ و زاویه اصطکاک خاکریز 45 درجه برابر $35/5$ درجه است. این مسأله در خصوص زاویه گوی بهینه متناظر با زاویه دوران صفر دیوار نیز معتبر است. مطابق شکل ۸، زاویه گوی متناظر با زاویه دوران صفر دیوار، برای نسبت ارتفاع گوی به ارتفاع دیوار $0.37/$ و زاویه اصطکاک خاکریز 45 درجه، برابر $42/8$ درجه است، درحالی‌که این زاویه گوی برای نسبت ارتفاع گوی به ارتفاع دیوار $0.64/$ و زاویه اصطکاک خاکریز 45 درجه برابر $27/9$ درجه است. همچنین، زاویه گوی بهینه متناظر با زاویه دوران صفر دیوار برای نسبت ارتفاع گوی به ارتفاع دیوار $0.55/$ و زاویه اصطکاک خاکریز 15 درجه، برابر $42/7$ درجه است، درحالی‌که با افزایش زاویه اصطکاک خاکریز از 15 به 45 درجه، این زاویه گوی به $31/8$ درجه کاهش می‌یابد.

مقادیر زاویه گوی بهینه متناظر با زاویه دوران صفر دیوار و حداکثر کاهش تغییر مکان افقی دیوار برای نسبت‌های مختلف ارتفاع گوی به ارتفاع دیوار و زاویه‌های مختلف اصطکاک خاکریز در شکل ۱۰ نشان داده شده‌اند. مطابق شکل ۱۰

به سمت دریا کاهش می‌یابد. در ادامه، در زاویه گوی‌های بزرگ‌تر دوران دیوار به صفر می‌رسد و با افزایش بیشتر زاویه گوی، دیوار به سمت خاکریز دوران می‌کند. این سازوکار مبین آن است که به‌طور کلی با افزایش زاویه گوی دیوار، الگوی تغییر شکل دیوار ساحلی گویشتی از واژگونی به سمت دریا به واژگونی به سمت خاکریز متمایل می‌شود.

فرایند شرح داده شده، برای زاویه اصطکاک‌های مختلف خاکریز و نسبت‌های مختلف ارتفاع گوی به ارتفاع دیوار نیز مشابه است، اما مقدار زاویه گوی که سبب بیشترین کاهش در تغییر مکان افقی دیوار می‌شود و زاویه گوی متناظر با دوران صفر برای دیوار که زاویه‌های گوی بهینه برای دیوار گویشتی به‌شمار می‌روند، بر حسب زاویه‌های مختلف اصطکاک خاکریز و نسبت‌های مختلف ارتفاع گوی به ارتفاع دیوار متغیر هستند. به‌عنوان مثال، مطابق شکل ۷ زاویه گوی بهینه متناظر با حداکثر کاهش تغییر مکان افقی برای نسبت ارتفاع گوی به ارتفاع دیوار $0.37/$ و زاویه اصطکاک خاکریز 45 درجه، برابر $53/9$ درجه است، درحالی‌که این زاویه برای نسبت ارتفاع گوی به ارتفاع دیوار $0.73/$ و زاویه اصطکاک خاکریز 45 درجه، برابر $34/5$ درجه است. زاویه گوی بهینه متناظر با حداکثر کاهش تغییر مکان افقی، برای نسبت



شکل ۱۰. زاویه گورژ بهینه متناظر با الف) زاویه دوران صفر و ب) حداکثر کاهش تغییر مکان افقی دیوار ساحلی بلوکی گورژ پستی در نسبت‌های مختلف ارتفاع گورژ به ارتفاع دیوار و زاویه اصطکاک‌های متفاوت خاکریز.

که در آن، T نمایانگر ترانهاده^۵ است، به طوری که $x_i^T \beta$ حاصل ضرب داخلی میان x_i و β است.

در پژوهش حاضر، از یک رابطه توانی چند جمله‌ای مبتنی بر زاویه اصطکاک خاکریز دیوار (ϕ) و نسبت ارتفاع گورژ به ارتفاع دیوار (r_h) برای انجام تحلیل رگرسیون استفاده شده است. بر این اساس، روابط ۵ و ۶ برای تخمین زاویه گورژ بهینه متناظر با زاویه دوران صفر دیوار ساحلی گورژ پستی (Ψ_{ZR}) و زاویه گورژ بهینه متناظر با حداکثر کاهش تغییر مکان افقی دیوار ساحلی گورژ پستی (Ψ_{MDR}) حاصل می‌شوند:

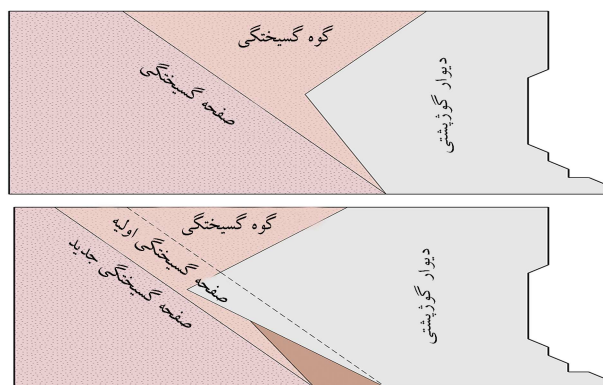
$$\Psi_{ZR} = 68 - 34.5r_h - 0.35\phi^{1.92} \quad (5)$$

$$\Psi_{MDR} = 72.5 - 33r_h - 0.35\phi^{1.92} \quad (6)$$

$$r_h = \text{ارتفاع دیوار/ارتفاع گورژ} \quad (7)$$

از آنجایی که تجاوز زاویه گورژ دیوار ساحلی گورژ پستی از مقادیر حداکثر نشان داده شده در شکل ۱۰ قسمت ب، موجب افزایش جابه‌جایی افقی و دوران دیوار می‌شود، رابطه توسعه داده شده برای تخمین زاویه گورژ بهینه متناظر با حداکثر کاهش تغییر مکان افقی دیوار (Ψ_{MDR}) به گونه‌ای تدوین شده است که زاویه گورژ بهینه را حداکثر ۲/۵ درجه بیشتر از مقادیر عددی شکل ۱۰ قسمت ب برآورد نماید. به عبارت دیگر، مقادیر عددی شکل ۱۰ قسمت ب به عنوان کران بالای زاویه گورژ بهینه متناظر با حداکثر کاهش تغییر مکان افقی دیوار (Ψ_{MSR}) در نظر گرفته شده‌اند.

در مقابل، در خصوص رابطه توسعه داده شده برای تخمین زاویه گورژ بهینه



شکل ۹. گوه گسیختگی تشکیل شده در خاکریز پشت دیوار ساحلی بلوکی گورژ پستی در حالت زاویه گورژهای کوچک تا متوسط و ب) زاویه گورژهای بزرگ.

قسمت الف و ب، روند تغییرات زاویه گورژهای بهینه متناظر با زاویه دوران صفر دیوار ساحلی بلوکی گورژ پستی و حداکثر کاهش تغییر مکان افقی آن تقریباً به صورت خطی است. واضح است که با افزایش زاویه اصطکاک خاکریز و افزایش نسبت ارتفاع گورژ به ارتفاع دیوار، زاویه‌های گورژ بهینه متناظر با زاویه دوران صفر دیوار ساحلی گورژ پستی و حداکثر کاهش تغییر مکان افقی آن کاهش می‌یابند. بنابراین، با توجه به کاهشی و شبه خطی بودن روند تغییرات این دو زاویه گورژ بهینه نسبت به تغییرات زاویه اصطکاک خاکریز و نسبت ارتفاع گورژ به ارتفاع دیوار، می‌توان روابطی برای تخمین زاویه گورژ بهینه دیوار بر اساس معیارهای زاویه دوران صفر دیوار و حداکثر کاهش تغییر مکان افقی آن به دست آورد.

۴. تخمین زاویه‌های گورژ بهینه متناظر با حداکثر کاهش

تغییر مکان افقی دیوار و زاویه دوران صفر دیوار با

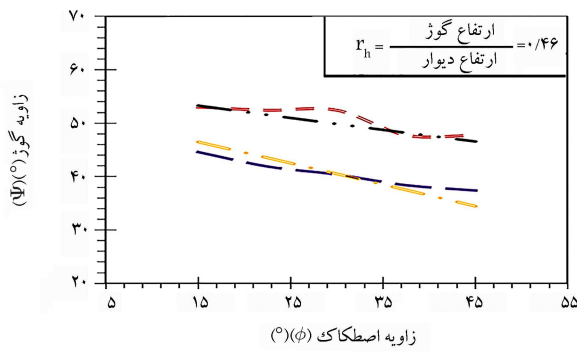
به کارگیری فرایند یادگیری ماشین نظارت شده

در این بخش، با به کارگیری نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های عددی بخش قبیل و رگرسیون چندگانه مبتنی بر فرایند یادگیری ماشین نظارت شده [۲۷، ۲۶] و به کمک برنامه نویسی به زبان پایتون [۲۸]، روابطی برای تخمین زاویه گورژ بهینه متناظر با زاویه دوران صفر دیوار ساحلی گورژ پستی و زاویه گورژ بهینه متناظر با حداکثر کاهش تغییر مکان افقی دیوار توسعه داده شده‌اند.

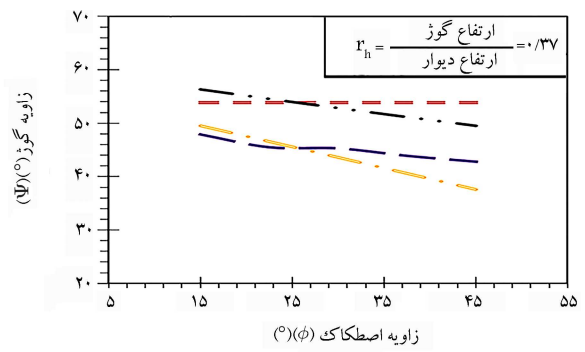
یکی از روش‌های مرسوم در تحلیل چند متغیره، روش رگرسیون چندگانه غیرخطی است که در آن یک مدل غیرخطی از رابطه بین متغیر وابسته و مجموعه‌ای از متغیرهای مستقل ارائه می‌شود. برخلاف رگرسیون خطی معمولی که محدود به تخمین مدل‌های خطی است، رگرسیون غیرخطی می‌تواند مدل‌هایی را با روابط دلخواه (مانند لگاریتمی، سهمی، معکوس، توانی مرکب و نمایی) میان متغیرهای مستقل و وابسته تخمین بزند. این تخمین با استفاده از الگوریتم‌های تخمین تکراری انجام می‌شود. [۲۹] در رگرسیون چندگانه غیرخطی، پارامترهای یک مدل به کمک یک تابع هدف و مقادیر متغیرها برآورد می‌شوند. در این روش، مدل در نظر گرفته شده، یک رابطه غیرخطی برحسب پارامترهای مدل است. به این ترتیب، برقراری یک رابطه با متغیر پاسخ y ، برای n مشاهده از متغیر مستقل p بعدی x با استفاده از مدل رگرسیون مطابق رابطه ۵ قابل انجام است. [۴۰]

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_{i1} + \dots + \beta_p x_{ip} + \varepsilon_i = x_i^T \beta + \varepsilon_i \quad (4)$$

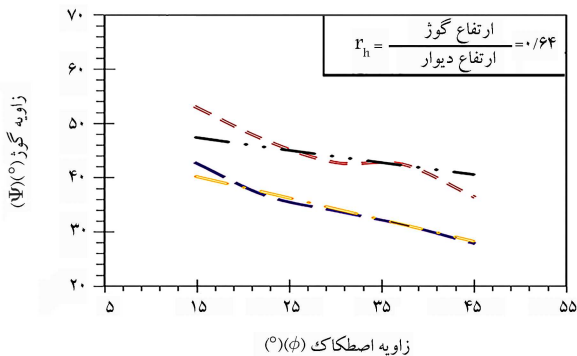
$$i = 1, \dots, n$$



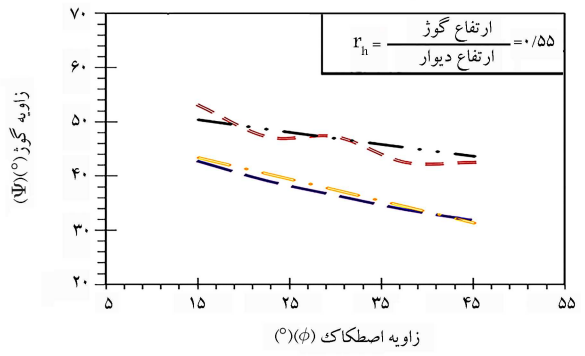
ب) ۰/۴۶



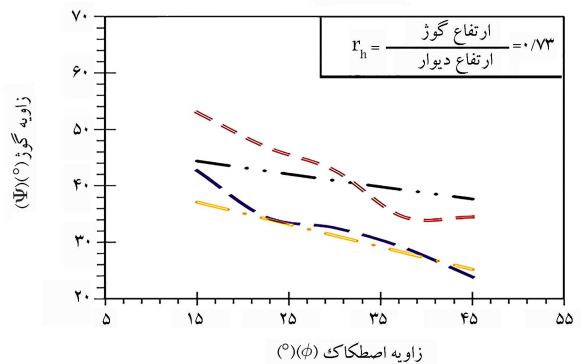
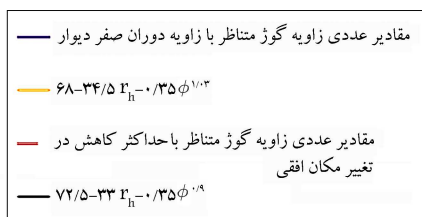
الف) ۰/۳۷



د) ۰/۶۴



ج) ۰/۵۵



ه) ۰/۷۳

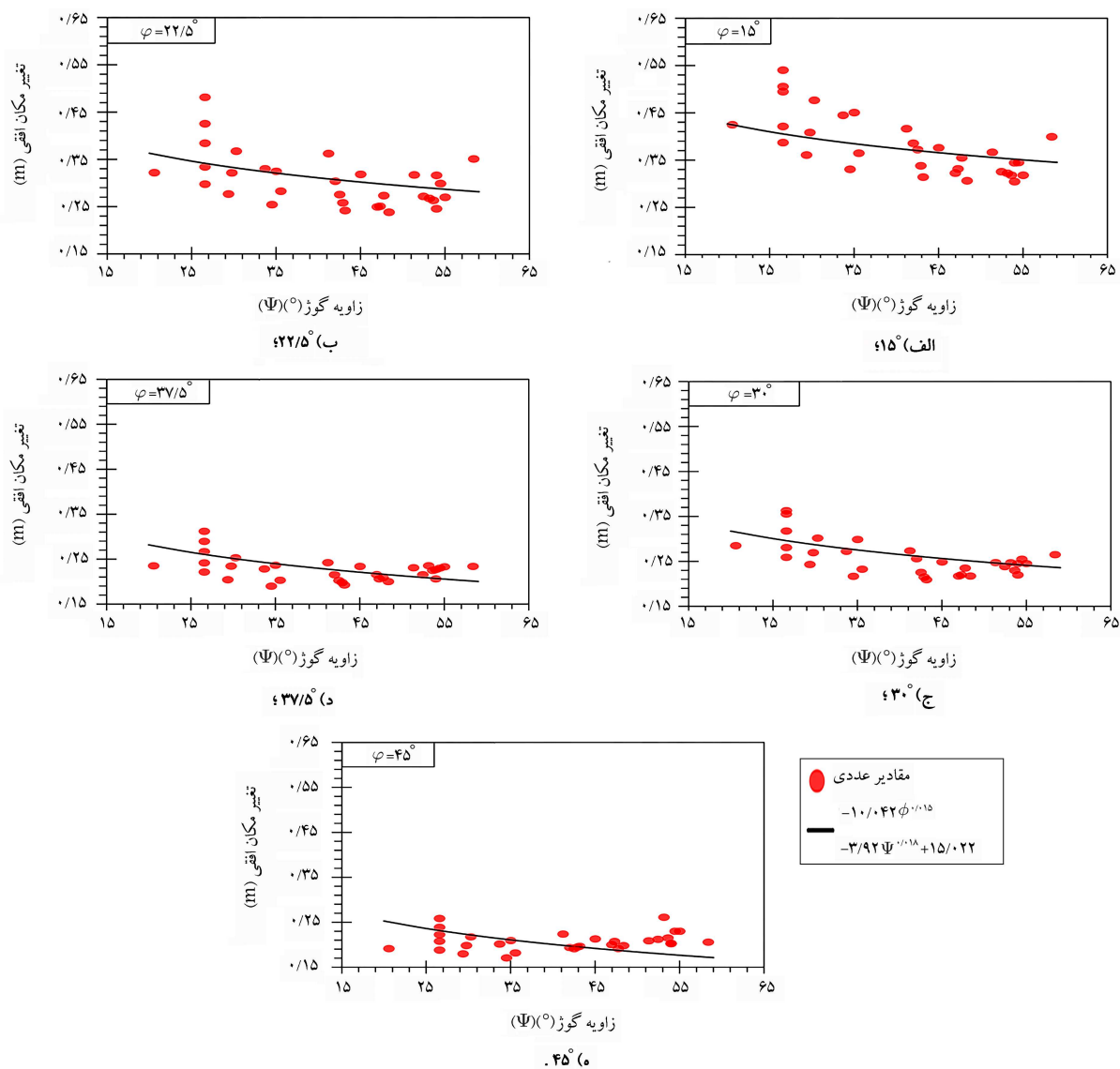
شکل ۱۱. مقادیر زاویه گوژ بهینه متناظر با حداکثر کاهش تغییر مکان افقی دیوار ساحلی بلوکی گوژپشتی (Ψ_{MDR}) و زاویه گوژ بهینه متناظر با زاویه دوران صفر دیوار ساحلی بلوکی گوژپشتی (Ψ_{ZR}) برای زاویه اصطکاک‌های متفاوت خاکریز و نسبت‌های مختلف ارتفاع گوژ به ارتفاع دیوار.

درجه بزرگ‌تر از مقادیر به دست آمده از شبیه‌سازی عددی نیست و میانگین اختلاف میان زاویه گوژهای به دست آمده از رابطه ۷ و شبیه‌سازی‌های عددی $2/3$ درجه است. همچنین، در خصوص Ψ_{ZR} ، زاویه گوژ تخمین زده شده با استفاده از رابطه ۶ در تمامی نسبت‌های ارتفاع گوژ به ارتفاع دیوار، از تطابق مناسبی با مقادیر به دست آمده از شبیه‌سازی عددی برخوردار است و میانگین اختلاف میان زاویه گوژهای رابطه ۶ و مقادیر عددی تنها $1/5$ درجه است.

رابطه توسعه داده شده برای زاویه گوژ بهینه متناظر با زاویه دوران صفر دیوار ساحلی گوژپشتی (Ψ_{ZR}) می‌تواند به عنوان یک تخمین محافظه‌کارانه از زاویه گوژ بهینه، برای دیوارهای مستقر بر روی بسترهای دریایی با تراکم متوسط تا تراکم مورد استفاده قرار گیرد. اما رابطه به دست آمده برای زاویه گوژ بهینه متناظر با حداکثر کاهش تغییر مکان افقی دیوار ساحلی گوژپشتی (Ψ_{MDR}) می‌تواند برای تخمین کران بالای زاویه گوژ بهینه دیوار در بسترهای مترکم مورد استفاده شود و به‌کارگیری آن

متناظر با زاویه دوران صفر دیوار ساحلی گوژپشتی (Ψ_{ZR})، با توجه به اینکه تجاوز از مقادیر عددی شکل ۱۰ قسمت الف (تا زاویه گوژ بهینه متناظر با حداکثر کاهش تغییر مکان افقی دیوار) نیز سبب کاهش جابه‌جایی افقی دیوار می‌شود و تأثیر مخرب قابل توجهی بر رفتار دیوار ساحلی گوژپشتی ندارد، رابطه بر اساس حداکثر تطابق با مقادیر عددی شکل ۱۰ قسمت الف توسعه داده شده است و حساسیتی برای عدم تجاوز از مقادیر عددی در خصوص این رابطه وجود ندارد.

زوایای گوژ بهینه تخمین زده شده با استفاده از روابط ۶ و ۷ و مقادیر زاویه گوژ بهینه به دست آمده از شبیه‌سازی‌های عددی در شکل ۱۱ مقایسه شده‌اند. مشاهده می‌شود که روابط پیشنهادی زاویه‌های گوژ بهینه Ψ_{MDR} و Ψ_{ZR} با دقت نسبتاً مناسبی برآورد شده‌اند. مطابق شکل ۱۱ مشاهده می‌شود که Ψ_{MDR} در هیچ یک از نسبت‌های ارتفاع گوژ به ارتفاع دیوار مورد بررسی، زاویه گوژ بهینه متناظر با حداکثر کاهش تغییر مکان افقی دیوار (Ψ_{MDR}) برآورد شده به وسیله رابطه ۷، بیشتر از



شکل ۱۲. مقایسه تغییر مکان افقی تخمین زده شده با استفاده از روش یادگیری ماشین با مقادیر عددی متناظر برای مقادیر مختلف زاویه اصطکاک خاکریز.

توانی چند جمله‌ای برای برآورد تغییر مکان افقی دیوار (HDisp_{Est}) و زاویه دوران آن (Rot_{Est}) مطابق با معادلات ۸ و ۹ استفاده می‌شود:

$$HDisp_{Est} = -10.42\phi^{0.15} - 3.92\Psi^{0.18} + 15.022 \quad (8)$$

$$Rot_{Est} = -0.761\phi^{0.225} - 0.21\Psi^{1.126} + 2.925 \quad (9)$$

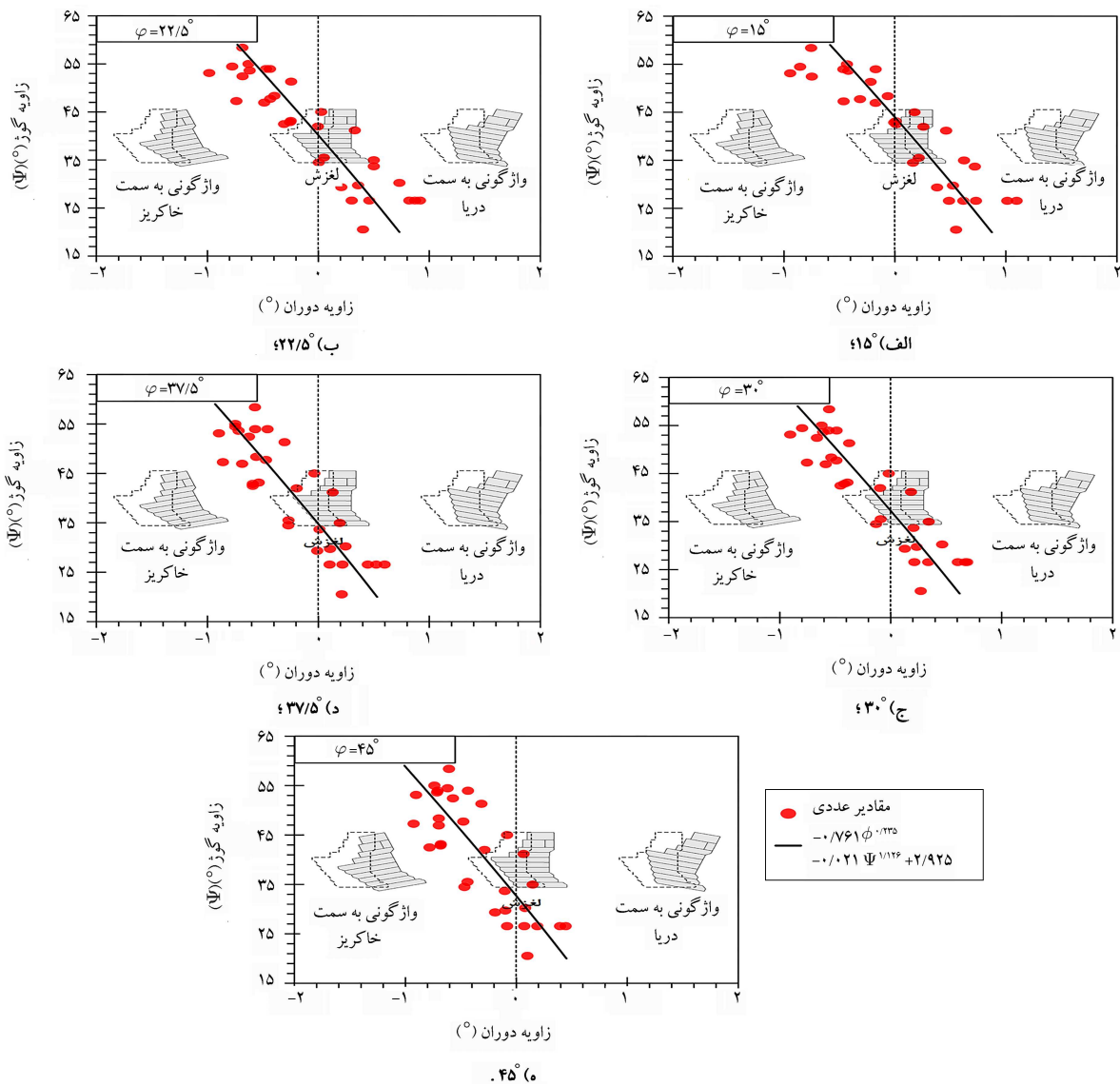
تغییر مکان‌های افقی و زاویه دوران‌های تخمینی حاصل از روابط ۹ و ۱۰ مربوط به زلزله با شتاب حداکثر $0.4g$ (بارگذاری ورودی پژوهش حاضر) است. تغییر مکان‌های افقی و زاویه دوران‌های تخمین زده شده با روابط ۹ و ۱۰ به ترتیب در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ با مقادیر عددی متناظر مقایسه شده‌اند. مطابق شکل‌های ۱۲ و ۱۳، روابط به دست آمده از تحلیل رگرسیون برای تخمین تغییر مکان افقی و زاویه دوران لرزه‌ای دیوار کوژپشتی، قادر به برآورد تغییر مکان افقی ماندگار دیوار با دقت نسبتاً مطلوبی هستند. مطابق شکل ۱۲، حداکثر و میانگین اختلاف میان تغییر مکان محاسبه شده با استفاده از رابطه ۸ و مقادیر عددی به ترتیب ۱۴ و ۳ سانتی‌متر است. این اختلاف در خصوص زاویه دوران تخمینی با استفاده از

در بستری با تراکم نسبی متوسط که دیوارها دوران بیشتری دارند، توصیه نمی‌شود.

۵. تخمین تغییر مکان افقی و زاویه دوران دیوار با استفاده از فرایند یادگیری ماشین نظارت شده

۱.۵. تحلیل رگرسیون

در عمده موارد عملی، هندسه دیوار بلوکی کوژپشتی بر مبنای شرایط اجرایی ساختگاه تعیین و سپس با استفاده از روش‌های تحلیلی، مقادیر جابه‌جایی آن برآورد می‌شود. بر این اساس، مشابه با بخش قبل، روابط آماری بر مبنای رگرسیون چند متغیره برای تخمین تغییر مکان افقی و زاویه دوران دیوار پس از اعمال بارگذاری لرزه‌ای ارائه می‌شود. روند کلی تحلیل رگرسیون شامل تعیین تابع بر اساس تغییرات پارامترها و یافتن ضرایب می‌شود. با توجه به تغییرات تغییر مکان افقی دیوار و زاویه دوران آن نسبت به زاویه و ارتفاع کوژ دیوار و همچنین زاویه اصطکاک خاکریز از روابط



شکل ۱۳. مقایسه زاویه دوران تخمین زده شده با استفاده از روش یادگیری ماشین با مقادیر عددی متناظر برای مقادیر مختلف زاویه اصطکاک خاکریز.

با دقت میلی‌متر و دهم درجه، آن‌ها را به‌عنوان مقادیر گسسته در نظر گرفت. الگوریتم‌های طبقه‌بندی متفاوتی برای حل مسائل مهندسی موجود هستند. دقت هر یک از این الگوریتم‌ها بسته به عوامل مختلف مانند ماهیت مسئله، تعداد متغیرهای مستقل، نوع متغیر وابسته (باینری یا چندحالتی) متفاوت است.^[۴۲] سازوکار مرسوم در حل مسائل به کمک روش یادگیری ماشین، پیش‌بینی متغیر وابسته با استفاده از الگوریتم‌های مختلف و مقایسه دقت الگوریتم‌ها است.^[۴۲] در پژوهش حاضر، از سه الگوریتم طبقه‌بندی درخت تصمیم^۸، K^۹ نزدیک‌ترین همسایه^۹ و ماشین بردار پشتیبان^{۱۰} برای پیش‌بینی تغییر مکان افقی و زاویه دوران دیوار ساحلی بلوکی گوژپشتی استفاده شده است.

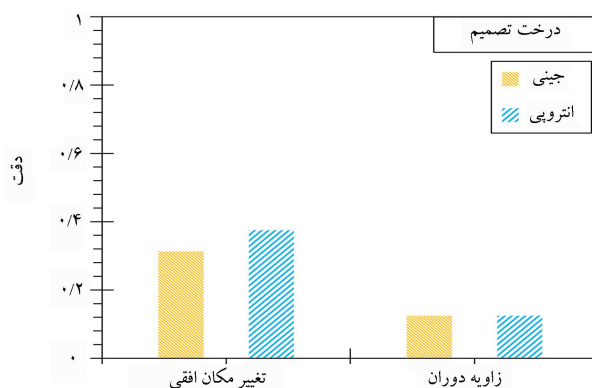
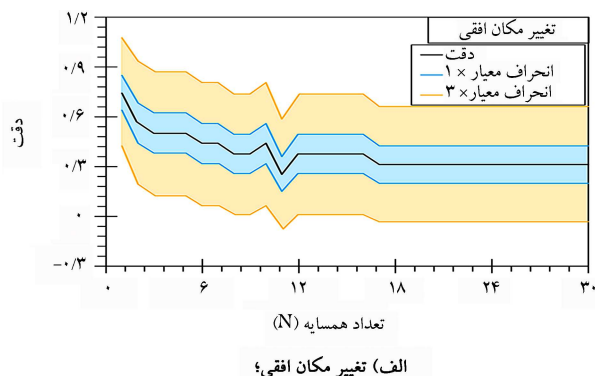
۱.۲.۵. درخت تصمیم

الگوریتم درخت تصمیم یک الگوریتم شرطی پیش‌بینی متغیرهای گسسته است که متغیرهای وابسته را بر مبنای متغیرهای مستقل و در چند مرحله از یکدیگر تفکیک می‌نماید.^[۴۲] مبنای جداسازی داده‌ها، نزدیکی و همسان شدن متغیرهای وابسته

تحلیل رگرسیون و مدل عددی ۰/۵۹ و ۰/۲ درجه است. همچنین، خطای جذر میانگین مربعات (RMSD)^۶ روابط ۸ و ۹ به ترتیب برابر ۰/۳۸ و ۰/۲۳۹ است. خطای جذر میانگین مربعات تفاوت میان مقدار پیش‌بینی شده توسط مدل یا برآوردگر آماری و مقدار واقعی است.^[۴۱] بنابراین، از روابط ارائه شده می‌توان برای برآورد اولیه تغییرشکل‌های لرزه‌ای دیوارهای بلوکی گوژپشتی در طراحی استفاده کرد.

۲.۵. الگوریتم‌های طبقه‌بندی

الگوریتم‌های طبقه‌بندی برای پیش‌بینی متغیرهای وابسته گسسته و برجسب‌گذاری شده (مانند نوع خاک) به کار می‌روند. الگوریتم‌های دسته‌بندی، دسته‌های موجود در مجموعه داده‌ها را تشخیص می‌دهند و پیش‌بینی می‌کنند.^[۴۲] در خصوص مولفه‌های رفتار سازه‌های ژئوتکنیکی نظیر تغییر مکان افقی و زاویه دوران، مقادیر پیوسته هستند اما دامنه تغییرات آن‌ها محدود است و دقت قابل قبول برای تخمین این مقادیر در حد سانتی‌متر و درجه است. بنابراین، می‌توان با گرد کردن این متغیرها

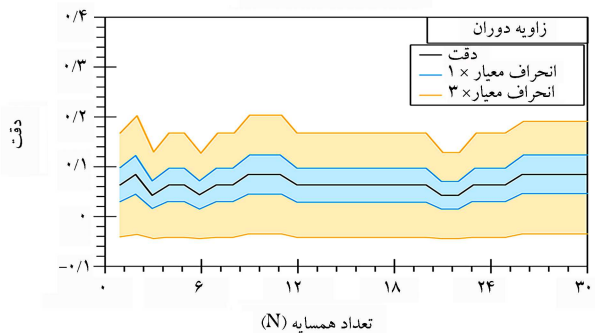


شکل ۱۴. دقت الگوریتم درخت تصمیم در پیش‌بینی تغییر مکان افقی و زاویه دوران لرزه‌ای دیوار بلوکی گوژپستی.

است. به طور دقیق‌تر سعی بر این است که در هر زیر مجموعه از داده‌ها، یک بعد از متغیرهای وابسته و یک آستانه انتخاب شوند. سپس، این داده‌ها برحسب این بعد و آستانه به دو نیم تقسیم می‌شوند، به صورتی که داده‌های موجود در هر زیرمجموعه کم‌ترین ناخالصی را داشته باشند. از توابع ناخالصی مختلفی نظیر جینی^{۱۱} و انتروپی^{۱۲} برای طبقه‌بندی داده‌ها به کمک درخت تصمیم استفاده می‌شود.^[۲۲] مشابه با تحلیل رگرسیون، متغیرهای مستقل شامل زاویه و ارتفاع گوژ دیوار و زاویه اصطکاک خاکریز هستند. به منظور ارزیابی دقت الگوریتم‌های مورد بررسی و توانایی آن‌ها در پیش‌بینی متغیرهای وابسته خارج از فضای نمونه، مقادیر تغییر مکان افقی و زاویه دوران لرزه‌ای به دست آمده از شبیه‌سازی‌های عددی بر حسب مقادیر مختلف زاویه و ارتفاع گوژ و زاویه اصطکاک خاکریز با نسبت ۹۰ به ۱۰ (۹۰ درصد برای یادگیری ماشین و ۱۰ درصد برای بررسی دقت پیش‌بینی آن)، به صورت تصادفی تفکیک می‌شوند. دقت پیش‌بینی الگوریتم درخت تصمیم برای توابع ناخالصی مختلف در شکل ۱۴ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که هیچ یک از توابع مورد استفاده قادر به پیش‌بینی تغییر مکان افقی و زاویه دوران لرزه‌ای دیوار گوژپستی با دقت بالا نیستند. مطابق شکل ۱۴، بالاترین دقت پیش‌بینی تغییر مکان افقی و زاویه دوران لرزه‌ای دیوار با استفاده از الگوریتم درخت تصمیم به ترتیب ۳۱/۰٪ و ۱۳/۰٪ (۳۱ و ۱۳ درصد) است که متناسب نیست. دقت پیش‌بینی برابر نسبت مقادیر درست پیش‌بینی شده به تعداد کل مقادیر آزمایش شده است.

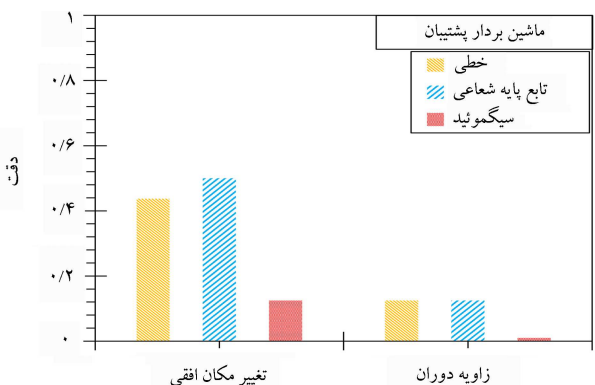
۲.۲.۵. K نزدیک‌ترین همسایه

از این الگوریتم در مسائل طبقه‌بندی و هم‌چنین رگرسیون استفاده می‌شود. در هر دو حالت K شامل نزدیک‌ترین نمونه در فضای داده‌ای است و خروجی آن بسته به نوع مورد استفاده در طبقه‌بندی و رگرسیون متغیر است. در حالت طبقه‌بندی، با توجه به مقدار مشخص شده برای K، فاصله نقطه‌ای که باید برچسب آن مشخص شود با نزدیک‌ترین نقاط محاسبه و با توجه به تعداد رای حداکثری این نقاط همسایه، در رابطه با برچسب نقطه مورد نظر تصمیم‌گیری می‌شود. در حالت رگرسیون، خروجی، میانگین مقادیر به دست آمده از K است.^[۲۲] دقت الگوریتم K نزدیک‌ترین همسایه برای مقادیر مختلف K در شکل ۱۵ نشان داده شده است. مطابق با شکل ۱۵، بالاترین دقت پیش‌بینی مربوط به K برابر ۱ است که در این حالت تغییر مکان افقی دیوار با دقتی نسبتاً قابل قبول (۷۵ درصد) پیش‌بینی می‌شود. اما در خصوص زاویه دوران، مانند الگوریتم درخت تصمیم، پیش‌بینی ماشین دقیق نیست و بالاترین دقت که مربوط به $K = 7$ است، تنها ۸/۵ درصد است.



ب) زاویه دوران بلوکی گوژپستی بر حسب K های مختلف.

شکل ۱۵. دقت الگوریتم K نزدیک‌ترین همسایه در پیش‌بینی.



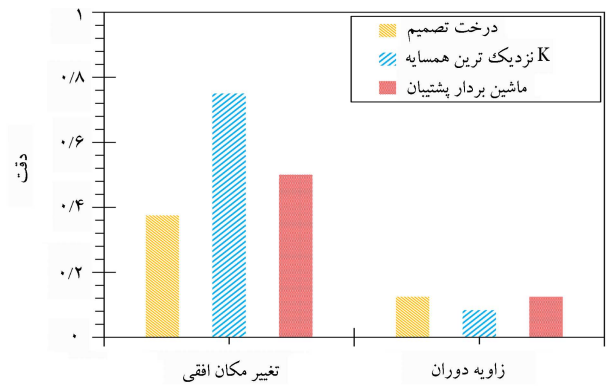
شکل ۱۶. دقت الگوریتم ماشین بردار پشتیبان در پیش‌بینی تغییر مکان افقی و زاویه دوران لرزه‌ای دیوار بلوکی گوژپستی.

۳.۲.۵. ماشین بردار پشتیبان

مبای عملکرد ماشین بردار پشتیبان، طبقه‌بندی خطی داده‌ها و یافتن ابرصفحه‌ای با بیشترین حاشیه اطمینان است. این الگوریتم در مسائل طبقه‌بندی و رگرسیون به‌کار گرفته می‌شود. حل معادله پیدا کردن خط بهینه برای داده‌ها با استفاده از روش‌های برنامه‌سازی غیرخطی، که معمولاً به‌عنوان روش‌های معتبر در حل مسائل محدودیت‌دار شناخته می‌شوند، انجام می‌شود. پیش از تقسیم خطی، به‌منظور ایجاد امکان طبقه‌بندی داده‌های پیچیده توسط ماشین، داده‌ها به‌وسیله تابع فی^{۱۳} به فضای با ابعاد بسیار بالاتر^{۱۴} برده می‌شوند. از توابع هسته مختلفی از جمله هسته‌های خطی، پایه شعاعی^{۱۵} سیگموئید می‌توان استفاده نمود.^[۲۵] دقت الگوریتم ماشین بردار پشتیبان برای توابع هسته مختلف در شکل ۱۶ ارائه شده است. مطابق با شکل ۱۶، بالاترین دقت پیش‌بینی الگوریتم ماشین بردار پشتیبان برای تغییر مکان افقی و زاویه دوران لرزه‌ای به ترتیب ۵ و ۱۲/۵ درصد است که

بردار پشتیبان در پیش‌بینی تغییر مکان افقی و زاویه دوران لرزه‌ای دیوار ارزیابی شده‌اند. نتایج حاصل نشان می‌دهند:

- در زوایای گوز کوچک‌تر از ψ_{MDR} ، با افزایش زاویه گوز، تغییر مکان افقی دیوار کاهش می‌یابد، اما در زاویه گوزهای بزرگ‌تر از ψ_{MDR} افزایش زاویه گوز سبب افزایش تغییر مکان افقی دیوار می‌شود. علاوه بر این، با افزایش زاویه گوز، زاویه دوران دیوار به سمت دریا کاهش می‌یابد و الگوی تغییر شکل دیوار ساحلی گوزپشتی از واژگونی به سمت دریا به واژگونی به سمت خاکریز متمایل می‌شود.
- با افزایش زاویه اصطکاک خاکریز و افزایش نسبت ارتفاع گوز به ارتفاع دیوار، زاویه‌های گوز بهینه متناظر با زاویه دوران صفر دیوار ساحلی گوزپشتی و حداکثر کاهش تغییر مکان افقی آن حاصل از مدل‌سازی عددی کاهش می‌یابند و روند تغییرات زاویه گوزهای بهینه متناظر با زاویه دوران صفر دیوار ساحلی گوزپشتی و حداکثر کاهش تغییر مکان افقی آن با استفاده از یک خط قابل تقریب است.
- مقایسه زاویه گوز بهینه متناظر با حداکثر کاهش تغییر مکان افقی دیوار ساحلی گوزپشتی (Ψ_{MDR}) و زاویه گوز بهینه متناظر با زاویه دوران صفر دیوار ساحلی گوزپشتی حاصل از (Ψ_{ZR}) مدل‌سازی عددی و زاویه گوزهای بهینه تخمین زده شده با استفاده از روابط ۶ و ۷ نشان می‌دهند که این روابط قادرند Ψ_{MDR} و Ψ_{ZR} را با خطای میانگین $2/3$ و $1/5$ درجه برآورد نمایند.
- Ψ_{ZR} برآورد شده با استفاده از رابطه ۶ می‌تواند به عنوان یک تخمین محافظه‌کارانه از زاویه گوز بهینه برای طراحی دیوارهای گوزپشتی مستقر بر بسترهای دریایی با تراکم متوسط تا متراکم استفاده شود، درحالی که در رابطه ۷، کران بالای زاویه گوز بهینه دیوار در بسترهای متراکم را ارائه می‌نماید.
- مقایسه تغییر مکان افقی و زاویه دوران لرزه‌ای تخمین زده شده با فرایند یادگیری ماشین نظارت شده با مقادیر عددی متناظر نشان داد که از روابط آماری به دست آمده می‌توان برای برآورد اولیه تغییر شکل‌های لرزه‌ای دیوار بلوکی گوزپشتی استفاده کرد.
- بررسی دقت الگوریتم‌های طبقه‌بندی در پیش‌بینی تغییر مکان افقی و زاویه دوران لرزه‌ای دیوار نشان می‌دهد که در خصوص تغییر مکان افقی تنها الگوریتم K نزدیک‌ترین همسایه قادر به تخمین تغییر مکان افقی با دقت نسبتاً مناسب (۷۵ درصد) است و دیگر الگوریتم‌های به کار گرفته شده فاقد دقت مناسب هستند. همچنین، در خصوص زاویه دوران، دقت پیش‌بینی تمامی الگوریتم‌های مورد بررسی کمتر از ۱۵ درصد است.
- مقایسه دقت مقادیر تغییر مکان و زاویه دوران لرزه‌ای حاصل از روابط به دست آمده از تحلیل رگرسیون با تغییر شکل‌های پیش‌بینی شده توسط الگوریتم‌های طبقه‌بندی یادگیری ماشین نظارت شده نشان می‌دهد که روابط رگرسیونی از توانایی بالاتری در تخمین تغییر شکل‌های لرزه‌ای دیوار بلوکی گوزپشتی برخوردارند.



شکل ۱۷. مقایسه دقت الگوریتم‌های درخت تصمیم، K نزدیک‌ترین همسایه و ماشین بردار پشتیبان در پیش‌بینی تغییر مکان افقی و زاویه دوران لرزه‌ای دیوار بلوکی گوزپشتی.

دقت بالایی به‌شمار نمی‌رود. بالاترین دقت به‌دست آمده از سه الگوریتم بررسی شده در شکل ۱۷ ارائه شده‌اند. بر اساس شکل ۱۷، هیچ‌یک از الگوریتم‌های مورد بررسی قادر به ارائه تخمینی دقیق از زاویه دوران دیوار بلوکی گوزپشتی پس از زلزله نیستند. همچنین، در خصوص تغییر مکان افقی نیز تنها الگوریتم K نزدیک‌ترین همسایه، تخمینی نسبتاً مناسب (با دقت ۷۵ درصد) ارائه می‌نماید. شایان توجه است که بخشی از این دقت پایین به علت محدود بودن تعداد داده‌های یادگیری و آزمون است و چنانچه داده‌های بیشتری موجود باشند، دقت پیش‌بینی الگوریتم‌های طبقه‌بندی می‌تواند افزایش یابد.

۶. نتیجه‌گیری

هدف از مطالعه حاضر، تخمین زاویه گوز بهینه دیوار ساحلی وزنی بلوکی گوزپشتی است. برای این منظور، در ابتدا یک مدل عددی تفاضل محدود از دیوار ساحلی گوزپشتی ایجاد و پاسخ لرزه‌ای آن بر مبنای مشاهدات آزمایشگاهی متناظر اعتبارسنجی شده است. در ادامه، با انجام تحلیل‌های حساسیت‌سنجی بر روی زاویه گوز دیوار، زاویه اصطکاک خاکریز و نسبت ارتفاع گوز به ارتفاع دیوار، تغییرات تغییر مکان افقی و زاویه دوران لرزه‌ای دیوار و در نهایت زاویه گوز بهینه متناظر با حداکثر کاهش تغییر مکان افقی دیوار ساحلی گوزپشتی (Ψ_{MDR}) و زاویه گوز بهینه متناظر با زاویه دوران صفر دیوار ساحلی گوزپشتی (Ψ_{ZR}) برآورد شده‌اند. در مرحله بعد، با استفاده از رگرسیون چندگانه مبتنی بر فرایند یادگیری ماشین نظارت شده، روابط آماری برای تخمین شده‌اند. سپس، با استفاده از رگرسیون چندگانه، روابطی برای تخمین تغییر مکان افقی و زاویه دوران لرزه‌ای دیوار ارائه و دقت الگوریتم‌های مختلف طبقه‌بندی یادگیری ماشین نظارت شده شامل درخت تصمیم، K نزدیک‌ترین همسایه و ماشین

پانویس‌ها

- Scikit-Learn
- Fish
- Free Field
- Viscous Dashpots
- Transpose

- Root-Mean-Square-Deviation
- Classification
- Decision Tree
- K-Nearest Neighbors (KNN)
- Support Vector Machines
- Gini
- Entropy

13. Phi
14. High Dimensional Space
15. RBF

(References) منابع

1. Valkaniotis, S., Ganas, A., Papathanassiou, G. and Papanikolaou, M., 2014. Field observations of geological effects triggered by the January-February 2014 Cephalonia (Ionian Sea, Greece) earthquakes. *Tectonophysics*, 630, pp.150-157. DOI.org/10.1016/j.tecto.2014.05.012.
2. Stemburgen, K. and Clough, R.W., 1960. Chilean Earthquakes of May, 1960: A Brief Trip Report. *In Proceedings of the 2nd World Conference on Earthquake engineering*, Tokyo and Kyoto, Japan (1960).
3. Zeng, X. and Steedman, R.S. 1993. On the behaviour of quay walls in earthquakes. *Geotechnique*, 43(3), pp.417-431. DOI.org/10.1680/geot.1993.43.3.417.
4. Alyami, M., Rouainia, M. and Wilkinson, S.M. Numerical analysis of deformation behaviour of quay walls under earthquake loading. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 29(3), pp.525-536. DOI.org/10.1016/j.soildyn.2008.06.004.
5. Scawthorn, C. and Yanev, P.I., 1995. Hyogo-ken Nambu, Japanese earthquake. *Engineering Structures*, 17(3), pp.146-157. DOI.org/10.1016/0141-0296(95)00041-5.
6. Ebrahimian, B., 2009. Seismic performance of anchored quay walls and numerical simulation techniques. *Proceeding of Performance based Design in Earthquake Geotechnical Engineering*, pp.721-729.
7. Ebrahimian, B., 2013. Numerical modelling of the seismic behaviour of gravity-type quay walls. *Engineering seismology, geotechnical and structural earthquake engineering*, 257.
8. Mostafavi Moghadam, A., Ghalandarzadeh, A., Towhata, I., Moradi, M., Ebrahimian, B. and Hajjalikhan, P., 2009. Studying the effects of deformable panels on seismic displacement of gravity quay walls. *Ocean Engineering*, 36(15-16), pp.1129-1148. DOI.org/10.1016/j.oceaneng.2009.08.006.
9. Ebrahimian, B. and Farboud, M., 2019. Seismic effective-stress analysis of caisson quay wall with liquefiable backfill. *In 8th international conference on seismology & Earthquake Engineering*.
10. Dakoulas, P., Vazouras, P., Kallioglou, P. and Gazetas, G., 2018. Effective-stress seismic analysis of a gravity multi-block quay wall. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 115, pp.378-393. DOI.org/10.1016/j.soildyn.2018.08.032.
11. Ebrahimian, B., Farahani, A.R.Z. and Noorzad, A., 2018. Seismic behavior of hunchbacked block-type gravity quay wall. *International Conference on Coasts, Ports and Marine Structures (ICOPMAS 2018)*.
12. Ebrahimian, B., Farahani, A.R.Z. and Noorzad, A., 2019. Effect of applied surcharge length on seismic behavior of broken-back wall. *8th International Conferences of Seismology and Earthquake Engineering (SEE8)*.
13. Ebrahimian, B. and Farboud, M., 2019. Seismic effective-stress analysis of caisson quay wall with liquefiable backfill. *8th International Conferences of Seismology and Earthquake Engineering (SEE8)*.
14. Ebrahimian, B. and Zarnousheh Farahani, A.R., 2022. Seismic vulnerability analysis of caisson-type gravity quay walls with improved backfill using fragility curves. *Journal of Structural and Construction Engineering*. DOI.org/10.1016/B978-0-323-88530-0.00001-5.
15. Liu, H., Zhang, J.M., Zhang, X. and Wang, R., 2020. Seismic performance of block-type quay walls with liquefiable calcareous sand backfill. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 132, pp.106092. DOI.org/10.1016/j.soildyn.2020.106092.
16. Liu, H., Wang, R., Zhang, J.M. and Zhu, T., 2012. Seismic performance of a block-type quay wall with liquefiable backfill: Comparison between centrifuge test, design code, and high-fidelity numerical modeling. *In International Conference of the International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics*, pp.629-636. Springer, Cham. DOI.org/10.1007/978-3-030-64518-2-74.
17. Kim, Y.S., Lee, M.G., Cho, G.C. and Ko, K.W. 2022. Inertial behavior of gravity-type quay wall: A case study using dynamic centrifuge test. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 155, pp.107196. DOI.org/10.1016/j.soildyn.2022.107196.
18. Zarnousheh Farahani, A.R., Ebrahimian, B., Noorzad, A., 2018. Considering the geometry effect on the seismic behavior of block type gravity quay walls. *3rd Iranian Conference on Geotechnical Engineering*.
19. Pasquali, R., Lai, C.G. and Corigliano, M., 2009. Some issues in seismic analysis and design of blockwork wharves. *Journal of Earthquake Engineering*, 14(1), pp.102-130. DOI.org/10.1080/13632460902988992.
20. De Gijt, J.G., and Broeken, M.L., 2013. Quay walls. SBRCURnet municipality rotterdam port of rotterdam SBRCURnet", Rotterdam, The Netherlands, an Imprint of the Taylor & Francis Group.
21. Sadrekarimi, A., 2011. Seismic displacement of broken-back gravity quay walls. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 137(2), pp.75-84. DOI.org/10.1061/(ASCE)WW.1943-5460.0000066.
22. Coulomb, C.A., 1776. Essai sur une application des regles des maximis et minimis a quelques problemes de statique relatifs, a la architecture. *Mem. Acad. Roy. Div. Sav*, 7, pp.343-387.
23. Okabe, S., 1924. General theory on earth pressure and seismic stability of retaining wall and dam. *Proc. Civil Engrg. Soc., Japan*. 10(6), pp.1277-1323.
24. Mononobe, N. and Matsuo, M., 1929. On the determination of earth pressures during earthquakes. *In Proceedings of the World Engineering Congress*, Tokyo, Japan. International Association for Earthquake Engineering, Japan. Vol. 9. pp.177-185.
25. Itasca Consulting Group, Inc., 2019. FLAC version 8.1: Fast lagrangian analysis of continua. User's guide. Minneapolis: Itasca Consulting Group.

26. Sadrekarimi, A., Ghalandarzadeh, A. and Sadrekarimi, J., 2008. Static and dynamic behavior of hunch-backed gravity quay walls. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 28(2), pp.99-117. DOI.org/10.1016/j.soildyn.2007.05.004.
27. Eberly, L.E., 2007. Multiple linear regression. Topics in Biostatistics. pp.165-187. DOI.org/10.1007/978-1-59745-530-5-9.
28. Pedregosa, F., Varoquaux, G., Gramfort, A., Michel, V., Thirion, B., Grisel, O. and Duchesnay, E. Scikit-learn: Machine learning in Python., 2011. *The Journal of machine Learning research*, 12, pp. 2825-2830.
29. Van Rossum, G. and Drake, F.L., 2009. Python 3 Reference Manual. Scotts Valley, CA: CreateSpace.
30. Jalili, M., Sadaee, H. and Bargi, K., 2008. Knapsack Placing of Blocks Assess on Wall Stability in Seismic Regions and Proper Section Recommendation. In Solutions to Coastal Disasters 2008, pp. 939-951. DOI.org/10.1061/40968(312)84.
31. Sadrekarimi, A., 2013. Dynamic behavior of granular soils at shallow depths from 1 g shaking table tests. *Journal of Earthquake Engineering*, 17(2), pp.227-252. DOI.org/10.1080/13632469.2012.691616.
32. Kanatani, M., Nishi, K., Touma, J.I., Ohnami, M. and Namita, H., 1991. Numerical simulation of shaking table test by nonlinear response analysis method. *International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics*, Rolla, Missouri.
33. Jamiolkowski, M., Leroueil, S. and Lo Presti, D.C., 1991. Design parameters from theory to practice. In *Int. Conf. on Geotechnical Engineering for coastal development*, 2, pp.877-917. Port & Harbour Research Institute.
34. Seed, H.B., Wong, R.T., Idriss, I.M. and Tokimatsu, K., 1986. Moduli and damping factors for dynamic analyses of cohesionless soils. *Journal of Geotechnical Engineering*, 112(11), pp.1016-1032. DOI.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1986)112:11(1016).
35. Pestana, J.M. and Salvati, L.A., 2006. Small-strain behavior of granular soils. I: Model for cemented and uncemented sands and gravels. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 132(8), pp.1071-1081. DOI.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2006)132:8(1071).
36. Asche, H.R., 2020. The choice of mesh size for accuracy in elastoplastic tunnel FLAC analyses. In *FLAC and Numerical Modeling in Geomechanics*. CRC Press, pp.293-299.
37. OCDI., 2009. Technical standards and commentaries for port and harbour facilities in Japan. OCDI, Japan.
38. Besharat, V. and Bolouri-Bazaz, J., 2014. Dynamic analysis of urban circular tunnels and the effect of environmental factors on the different behavior of these structures. *Tunneling & Underground Space Engineering (TUSE)*, 3(2), pp.173-182 (In Persian).
39. Freedman, D.A., 2009. Statistical models: Theory and practice. Cambridge University Press.
40. Rencher, A.C., 2012. Methods of Multivariate Analysis, 3rd Edition. John Wiley & Sons, Inc. Publication, 727.
41. Hyndman, R.J. and Koehler, A.B., 2006. Another look at measures of forecast accuracy. *International Journal of Forecasting*, 22(4), pp.679-688. DOI.org/10.1016/j.ijforecast.2006.03.001.
42. Hastie, T., Tibshirani, R., Friedman, J.H. and Friedman, J. H., 2009. The elements of statistical learning: Data mining, inference, and prediction. Vol. 2. New York: springer, pp.1-758.
43. Wu, T.F., Lin, C.J. and Weng, R., 2003. Probability estimates for multi-class classification by pairwise coupling. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 16.
44. Piryonesi, S.M. and El-Diraby, T.E., 2020. Role of data analytics in infrastructure asset management: Overcoming data size and quality problems. *Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements*, 146(2), pp.04020022. DOI.org/10.1061/JPEODX.0000175.
45. Zhang, T., 2001. An introduction to support vector machines and other kernel-based learning methods. *Ai Magazine*, 22(2), pp.103-103. DOI.org/10.1609/aimag.v22i2.1566.