

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

بابک ابراهیمیان^{۱*}، امیررضا زرنوشه فراهانی^۲

۱- استادیار گروه مهندسی ژئوتکنیک و حمل و نقل، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

۲- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد گروه مهندسی ژئوتکنیک و حمل و نقل، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

پست الکترونیکی نویسندگان:

۱- ebrahimian.babak@gmail.com; b_brahimian@sbu.ac.ir

۲- a.zarnoosheh@mail.sbu.ac.ir

چکیده:

در پژوهش حاضر، با انجام تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی تاریخچه زمانی به روش تفاضل محدود صریح لاگرانژی، رفتار لرزه‌ای دیوارهای ساحلی وزنی بلوکی گوژپشتی مستقر بر بستر متراکم غیر روانگرا مطالعه و هندسه بهینه برای این نوع دیوارها پیشنهاد می‌شود. برای این منظور، ابتدا یک مدل عددی از دیوار ساحلی گوژپشتی ایجاد و پاسخ لرزه‌ای آن بر مبنای مشاهدات آزمایشگاهی متناظر اعتبارسنجی می‌شود. سپس، با انجام تحلیل‌های حساسیت‌سنجی بر روی زاویه گوژ دیوار، زاویه اصطکاک خاکریز و نسبت ارتفاع گوژ به ارتفاع دیوار، زاویه‌های گوژ بهینه متناظر با تغییرمکان افقی حداقل و دوران صفر دیوار ساحلی بلوکی گوژپشتی برآورد می‌شوند. متعاقباً، با استفاده از رگرسیون غیرخطی چندگانه مبتنی بر روش یادگیری ماشین نظارت شده، روابط آماری برای تخمین زاویه گوژ بهینه دیوارها ارائه می‌شوند. نتایج تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی نشان می‌دهند با تغییرات زاویه گوژ، سازوکار حرکتی و الگوی تغییرشکلی دیوار و متعاقباً پاسخ لرزه‌ای آن تغییر قابل توجه‌ای می‌یابد. بر این اساس، با افزایش زاویه گوژ، زاویه دوران دیوار به سمت دریا در اثر بارگذاری لرزه‌ای کاهش می‌یابد و سازوکار حرکتی و الگوی تغییرشکلی دیوار ساحلی گوژپشتی از واژگونی به سمت دریا به واژگونی به سمت خاکریز متمایل می‌شود. برای تمامی مقادیر بررسی شده نسبت ارتفاع گوژ به ارتفاع دیوار و زاویه اصطکاک خاکریز، در زاویه گوژهای کمتر از ۳۵ درجه، افزایش زاویه گوژ موجب کاهش قابل توجه تغییرشکل دیوار می‌شود. در زاویه گوژهای بین ۳۵ تا ۵۰ درجه، افزایش زاویه گوژ اثر کمتری بر کاهش تغییرشکل دیوار دارد. برای زاویه گوژهای بزرگ‌تر از ۵۰ درجه، افزایش زاویه گوژ اثر معکوس بر بهبود عملکرد لرزه‌ای دیوار ساحلی بلوکی گوژپشتی دارد و موجب افزایش تغییرشکل‌های لرزه‌ای آن می‌شود. علاوه بر این، در نسبت ارتفاع گوژ به ارتفاع دیوار برابر با ۰/۷، با افزایش زاویه اصطکاک خاکریز از ۱۵ به ۴۵ درجه، زاویه گوژ بهینه متناظر با دوران دیوار برابر صفر و حداکثر کاهش در تغییرمکان افقی دیوار، به ترتیب از ۴۲/۷ به ۲۳/۹ و از ۵۳ به ۳۴/۵ کاهش می‌یابند.

واژگان کلیدی:

دیوار ساحلی وزنی، هندسه پشت‌شکسته، بهینه‌سازی هندسی، تحلیل دینامیکی غیرخطی، یادگیری ماشین نظارت شده.

* بابک ابراهیمیان، استادیار دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی.
ایمیل: ebrahimian.babak@gmail.com; b_brahimian@sbu.ac.ir (نویسنده مسئول مقاله)

Optimizing the geometry of hunchbacked block-type gravity quay walls using non-linear dynamic analyses and supervised machine learning technique

B. Ebrahimian^۱, A. R. Zarnousheh Farahani^۲

۱- Assistant Professor, Geotechnical and Transportation Engineering Department, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University (SBU), Tehran, Iran.

۲- Graduate M.Sc. Student, Geotechnical and Transportation Engineering Department, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University (SBU), Tehran, Iran.

Abstract:

In the present study, the seismic behavior of hunchbacked block-type gravity quay walls rested on non-liquefiable dense seabed soil layer is investigated and the optimal geometries for these wall types are proposed by performing non-linear time history dynamic analyses using Lagrangian explicit finite difference method. For this purpose, first, a reference numerical model of the hunchbacked quay wall is developed and its seismic response is validated against the well-documented physical model tests. Then, the optimal hunch angles corresponding to the minimum horizontal displacement and zero rotation of the hunchbacked quay wall are estimated through the sensitivity analyses on the hunch angle of the wall, the friction angle of the backfill, and the ratio of hunch height to wall height. Subsequently, the statistical relationships are presented to predict the optimal hunch angle of the walls using the multiple non-linear regression based on the supervised machine learning technique. The results of non-linear dynamic analyses show that the deformation pattern, the movement mechanism, and consequently the seismic response of the hunchbacked quay wall change considerably with the variation of the hunch angle of the wall. In this regard, the rotation angle of the wall towards the seaside due to seismic loading decreases, and the deformation pattern and the movement mechanism of the hunchbacked quay wall alter from overturning towards the seaside to overturning towards the landside with an increase of the hunch angle. For all considered values of the ratio of hunch height to wall height and the backfill friction angle, increasing the hunch angle in the range of ۲۰ to ۳۰ degrees leads to a significant decrease in wall deformation. While increasing the hunch angle in the range of ۳۰ to ۵۰ degrees has less influence on reducing the wall deformation. For hunch angle values greater than ۵۰ degrees, increasing the hunch angle has the opposite effect on improving the seismic performance of the hunchbacked quay wall and its seismic-induced deformations increase. Additionally, in the ratio of hunch height to wall height equal to ۰.۷, the optimal hunch angles corresponding to the zero wall rotation and the maximum reduction in the horizontal displacement of the wall decrease from ۴۶.۷ to ۹.۲۳ degrees and from ۵۳ to ۳۴.۵ degrees, respectively, with an increase of the friction angle of the backfill soil from ۱۰ to ۴۰ degrees.

Keywords: Gravity quay wall, broken-back geometry, geometrical optimization, non-linear dynamic analysis, supervised machine learning.

امروزه هزاران متر طول اسکله در سراسر جهان ایجاد شده‌اند. در طی رویدادهای لرزه‌ای گذشته، دیوارهای ساحلی، که اجزای سازه‌ای اصلی در اسکله‌ها هستند، به‌واسطه روان‌گرا شدن مصالح ژئوتکنیکی خاکریز یا بستر، لغزش افقی و یا واژگونی به سمت دریا متحمل گسیختگی‌های فراوانی شده‌اند [۵-۱]. هم‌چنین 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 با تکیه بر وزن بالای‌شان تأمین می‌نمایند، به‌واسطه مزایای اجرایی و پایداری بالا، از گذشته جز 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 و ۲۰]. این نوع سازه‌های حائل از بر روی هم چیده‌شدن بلوک‌های بتنی بر روی یک لایه شن یا سنگ شکسته واقع 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 گوژپشتی 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 مقادیر فشار جانبی خاکریز کوچک‌ترند، با تمایل شکل پشت دیوار به سمت دریا، وزن دیوار، هزینه ساخت آن و نیروی اینرسی وارد بر دیوار در طی زلزله کاهش می‌یابد [۲۱]. علاوه بر این، در این نوع هندسه، به‌واسطه تمایل شدن مرکز ثقل دیوار به سمت خاکریز، پایداری دیوار در برابر واژگونی به سمت دریا، در مقایسه با یک دیوار پشت قائم متناظر به میزان قابل توجهی بهبود می‌یابد [۲۱].

مطابق شکل (۱)، زاویه تمایل بخش پایینی دیوار به سمت خاکریز نسبت به راستای قائم که «زاویه گوژ» (Ψ) نامیده می‌شود و ارتفاع نقطه شکست یا تغییر راستای هندسه پشت دیوار نسبت به کف آن که «ارتفاع گوژ» گفته می‌شود، مهم‌ترین پارامترهای هندسی دیوار ساحلی بلوکی گوژپشتی به‌شمار می‌روند. به‌لحاظ نظری، بر اساس نظریه‌های کولمب [۲۲] و مونوبه-اوکابه [۲۳ و ۲۴]، با

افزایش زاویه گوژ دیوار ساحلی گوژپشتی، فشار جانبی استاتیکی و شبه‌استاتیکی وارد بر بخش پایینی دیوار کاهش می‌یابد [۲۱]. مطابق این نظریه‌ها، در شرایطی که زاویه تمایل بخش فوقانی دیوار ثابت باشد، با افزایش زاویه گوژ به‌واسطه 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 گوژ دیوار گوژپشتی، 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 جابجایی 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 تغییرشکل‌های دورانی و لغزشی دیوار ساحلی گوژپشتی تا چه زاویه گوژی ادامه می‌یابد و زاویه گوژ بهینه که موجب حداکثر بهبود در رفتار لرزه‌ای دیوار ساحلی گوژپشتی می‌شود، چه مقدار است؟ شرایط مصالح ژئوتکنیکی خاکریز و ارتفاع گوژ دیوار چه تأثیری بر زاویه گوژ بهینه دیوار ساحلی بلوکی گوژپشتی دارند؟

در پژوهش حاضر، با انجام تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی تاریخچه زمانی به روش تفاضل محدود صریح لاگرانژی و به‌کارگیری نرم افزار FLAC دو بعدی ویرایش ۸/۱ [۲۵]، پاسخ لرزه‌ای دیوارهای ساحلی وزنی بلوکی گوژپشتی با هندسه‌های مختلف مطالعه و هندسه بهینه برای آن‌ها با استفاده از فرآیند یادگیری ماشین نظارت شده پیشنهاد می‌شود. در این خصوص، ابتدا یک مدل عددی پایه از دیوار ساحلی بلوکی گوژپشتی 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 گوژ دیوار، زاویه اصطکاک خاکریز و نسبت ارتفاع گوژ به ارتفاع دیوار، اثر هر یک از این عوامل بر رفتار لرزه‌ای دیوار ساحلی بلوکی گوژپشتی و تغییرات تغییرمکان افقی و زاویه دوران دیوار برآورد می‌شود. در نهایت، به‌کمک روش یادگیری ماشین نظارت شده [۲۷]، کتاب‌خانه یادگیری ماشین برای

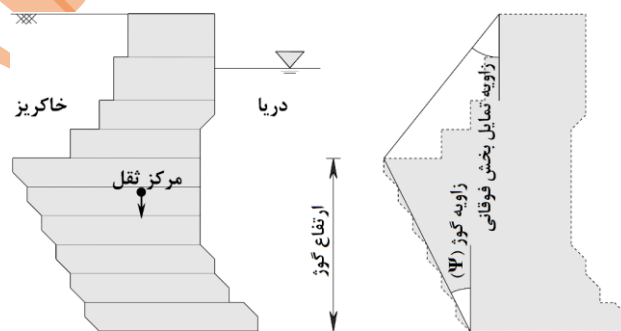
شکل ۲: تغییر ابعاد گوه گسیختگی خاکریز با افزایش زاویه گوز دیوار ساحلی وزنی بلوکی گوزپشتی.

۲- شبیه‌سازی عددی رفتار لرزه‌ای دیوار ساحلی وزنی بلوکی گوزپشتی

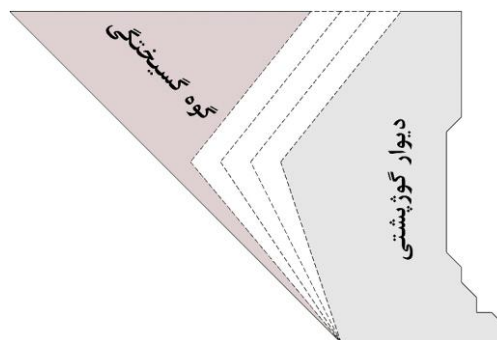
مبنای توسعه مدل عددی پایه در این پژوهش، دیوار بلوکی گوزپشتی مطالعه شده در یک آزمون میز لرزه ۱g با مقیاس ۱ به ۲۵ است [۲۶]. هم‌چنین، مدل فیزیکی مقیاس شده در آزمایشگاه مربوط به دیوار ساحلی بلوکی گوزپشتی اجرا شده در بندر پتروشیمی منطقه اقتصادی پارس واقع در عسلویه در جنوب غربی ایران بوده که یکی از نمونه‌های موفق از احداث این نوع سازه‌های ساحلی در سطح بین‌المللی است [۳۰]. هندسه و ابعاد واقعی مدل مورد بررسی همراه با موقعیت نقاط ثبت داده‌های شتاب، تغییرمکان، فشار جانبی خاک و فشار آب منفذی در شکل (۳-الف) نشان داده شده است. مطابق این شکل، دیوار بلوکی گوزپشتی متشکل از ۱۰ عدد بلوک بتنی با هندسه‌های متفاوت است. ارتفاع بلوک‌های ۱ تا ۸ برابر ۱ متر و ارتفاع دو بلوک فوقانی ۹ و ۱۰ برابر ۱/۵ متر است. بر این اساس، ارتفاع کلی دیوار ۱۱ متر شامل ۱۰ متر ارتفاع آزاد و ۱ متر عمق مدفون است. همان‌گونه که در شکل (۳-الف) مشاهده می‌شود، بلوک‌ها به نحوی بر روی یکدیگر چیده شده‌اند که 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 نرم افزار FLAC دو بعدی ویرایش ۸/۱ توسعه داده می‌شود [۲۵]. در این رابطه، برای حل مسئله مورد مطالعه، تعدادی کد عددی جانبی کمکی شامل کدهای محاسبه فرکانس غالب، تغییرمکان‌های افقی و قائم لرزه‌ای، کرنش برشی و فشار آب حفره‌ای اضافی سیستم به زبان برنامه‌نویسی فیش^۲ در نرم‌افزار ایجاد و پیاده‌سازی می‌شوند. شبکه تفاضل محدود مدل عددی ساخته شده در شکل (۳-ب) نشان داده شده است. در مدل عددی مورد مطالعه، بستر و خاکریز دیوار متشکل از خاک‌های دانه‌ای به ترتیب با چگالی نسبی (D_r) ۹۰٪ و ۵۲٪ هستند. هم‌چنین، مطابق با شرایط واقعی احداث دیوار، لایه‌هایی از جنس سنگریزه به ارتفاع ۱ و ۰/۵ متر به ترتیب در جلوی پنجه و زیر

پایتون (سای کیت‌لرن^۱) [۲۸] و زبان برنامه‌نویسی پایتون ۳ [۲۹]. روابط آماری برای تخمین زاویه گوز بهینه دیوارهای ساحلی بلوکی گوزپشتی و هم‌چنین تخمین تغییرمکان افقی و زاویه دوران بیشینه آن‌ها پس از اعمال بارگذاری لرزه‌ای توسعه داده می‌شوند. بر این اساس، هدف اصلی در مطالعه حاضر بهینه‌سازی هندسه پشت شکسته دیوارهای ساحلی وزنی بلوکی به‌عنوان یک سازه حائل با درجه اهمیت بالا، بسیار پرکاربرد و ارزان قیمت نسبت به سایر سیستم‌های دیوار ساحلی به‌ویژه برای احداث در ساختگاه‌های با خطر لرزه‌خیزی بالا است. 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. به‌علاوه، به‌عنوان یکی از نتایج مهم و کاربردی این پژوهش، الگوریتم‌های طبقه‌بندی متفاوتی در فرآیند یادگیری ماشین به‌کار گرفته می‌شوند و دقت و کیفیت پیش‌بینی آن‌ها در تخمین پاسخ سیستم مقایسه و رتبه‌بندی می‌شوند.



شکل ۱: هندسه دیوار ساحلی گوزپشتی به‌همراه پارامترهای هندسی آن.



^۲ Fish

^۱ Scikit-learn

بر اساس معادله (۳) برابر با 5×10^9 و 7×10^9 به ترتیب برای سطح مشترک بین دیوار و خاکریز و دیوار و بستر 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 K و G به ترتیب مدول‌های حجمی و برشی و Δz_{\min} کوچک‌ترین بعد زون مجاور المان سطح مشترک در جهت نرمال هستند.

جدول ۱: مشخصات مصالح ژئوتکنیکی در مدل‌های عددی.

پنجه دیوار	شالوده دیوار	بستر دریا	خاکریز	
۲۰۰۰	۲۰۰۰	۲۰۰۰	۱۹۰۰	وزن مخصوص اشباع (کیلوگرم بر مترمکعب)
۳۵	۳۶	۳۶	۳۰	زاویه اصطکاک (ϕ') (درجه)
۰	۳	۳	۰	زاویه اتساع (ψ) (درجه)
۱۲۵	۱۷۰	۱۷۵	۱۲۰	مدول حجمی (k) (مگاپاسکال)
۶۰	۸۰	۸۰	۵۵	مدول برشی (G) (مگاپاسکال)

در شرایطی که بستر دریا متشکل از مصالح ژئوتکنیکی متراکم باشد، به واسطه اصطکاک بین سطح بلوک‌های طویل بتنی تشکیل دهنده دیوار گوزپشتی و وجود کلیدهای برشی تعبیه شده بر روی آن‌ها، تغییر شکل نسبی بین بلوک‌ها ناچیز است و می‌توان رفتار دیوار را یکپارچه فرض نمود [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

در روش تفاضل محدود، شکل و ابعاد شبکه در دقت نتایج تأثیر زیادی دارد [۳۶]. به طور کلی، هر چه ابعاد زون‌های شبکه ریزتر باشند، نتایج از دقت بالاتری برخوردارند. هم‌چنین به لحاظ هندسی، بیشترین دقت برای مدلی با زون‌های مربع شکل حاصل می‌شود [۲۵]. برای انتشار دقیق موج لرزه‌ای در مدل، اندازه کوچک‌ترین زون، باید کوچک‌تر از یک دهم طول موج مرتبط با بالاترین مولفه فرکانس موج ورودی که حاوی انرژی قابل ملاحظه‌ای است، در نظر گرفته شود [۲۵]. علاوه بر این، در خصوص دیوار ساحلی وزنی بلوکی گوزپشتی، به واسطه هندسه پیچیده و جزئیات هندسی فراوان به سبب ابعاد و شکل بلوک‌های بتنی و هم‌چنین 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 ۰/۵ متر استفاده می‌شود 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 حین تحلیل‌های دینامیکی، برای حذف اثرات ناشی از برخورد امواج به مرزهای جانبی و انعکاس آن‌ها به داخل مدل، از مرزهای زمین آزاد^۱ 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^۲ 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 منظور، زاویه اصطکاک المان سطح مشترک مطابق با توصیه مرجع [۳۷] برابر با ۰/۶ زاویه اصطکاک مصالح ژئوتکنیکی در این بخش‌ها در نظر گرفته می‌شود. هم‌چنین، سختی نرمال (k_n) و برشی (k_s) المان سطح مشترک

^۲ Viscous dashpots

^۱ Free field

خاصیت میرایی هستند [۳۸]. 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].

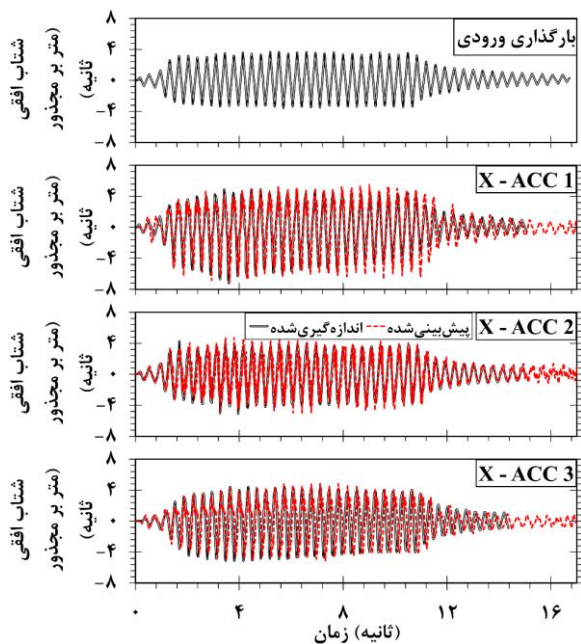
در نرم‌افزار به کار گرفته شده، بارگذاری دینامیکی وارده می‌تواند به صورت تاریخچه شتاب، سرعت، تنش، فشار یا نیرو به مدل اعمال شود [۲۵]. بر این اساس، بارگذاری ورودی مورد استفاده در تحلیل‌های دینامیکی پژوهش حاضر، متناظر با مدل آزمایشگاهی مرجع، یک تاریخچه شتاب افقی مطابق شکل (۴-ج) با حداکثر شتاب $0.4g$ و فرکانس $2/8$ هرتز است، که به مرز تحتانی مدل عددی اعمال شده است.

پیش از انجام تحلیل‌های حساسیت‌سنجی بر روی پارامترهای هندسی تأثیرگذار دیوار، مدل عددی توسعه یافته 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- 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.

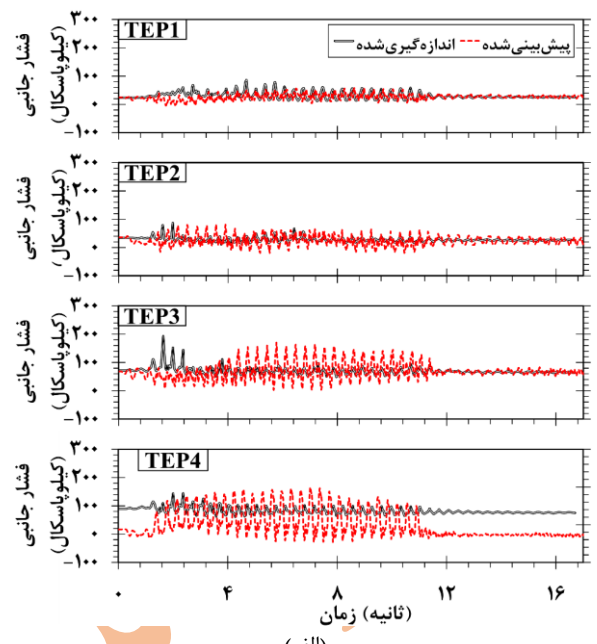
در شکل (۴) مشاهده می‌شود که تاریخچه‌های زمانی فشار جانبی کل وارده از سوی خاک به دیوار، فشار آب منفذی و شتاب افقی به دست آمده از تحلیل دینامیکی به لحاظ روند و متوسط مقادیر از تطابق مناسبی با نتایج آزمایشگاهی برخوردارند. مطابق با شکل (۱۴- الف و ب)، با توجه به سازوکار غالب تغییر شکلی دیوار در مدل‌های عددی 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 ۱ درجه) به سمت دریا دوران می‌کند، حال آن‌که در مدل آزمایشگاهی، برعکس در ابتدای بارگذاری دینامیکی، دیوار به میزان جزئی (کمتر از ۱ 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 گویشتی 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- ج) ملاحظه می‌شود که تاریخچه‌های زمانی شتاب افقی در نقاط متناظر ارتفاعی در مدل‌های عددی و آزمایشگاهی بر هم منطبقند و روند توزیع و بزرگنمایی شتاب افقی در ارتفاع این مدل‌ها هم‌خوانی مناسبی با یکدیگر دارند. در شکل (۵) مشاهده می‌شود 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 0.2 درصد با یکدیگر دارند، مجدداً مشخص می‌شود الگوی تغییر شکلی دیوار با توجه به صلبیت آن به صورت حرکت انتقالی به سمت دریا است. مطابق با شکل (۶)، پیکربندی تغییر شکل یافته دیوار در هر دو مدل آزمایشگاهی و عددی نیز این سازوکار تغییر شکلی را تأیید می‌نماید.

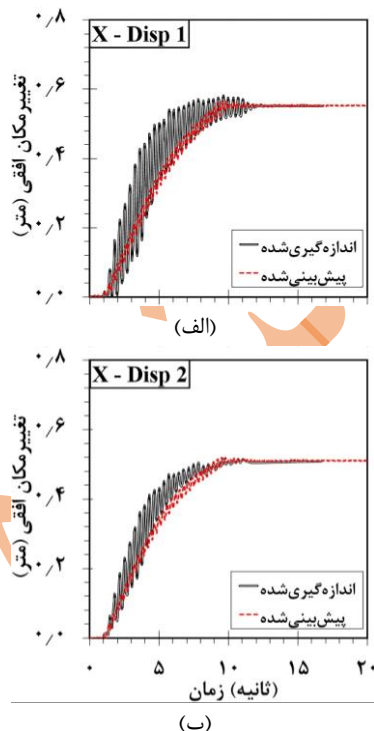
در مجموع، نتایج تحلیل اعتبارسنجی انجام شده نشان می‌دهند که مدل عددی توسعه یافته می‌تواند با دقت مطلوبی رفتار لرزه‌ای دیوار را چه به لحاظ کمی و چه به لحاظ سازوکار تغییر شکل و الگوی حرکتی شبیه‌سازی نماید. در ادامه، مدل عددی اعتبارسنجی شده برای تحلیل‌های حساسیت‌سنجی و بررسی اثر پارامترهای هندسی دیوار و مقاومتی خاکریز بر عملکرد لرزه‌ای و تغییر شکل دیوار به کار گرفته می‌شود.



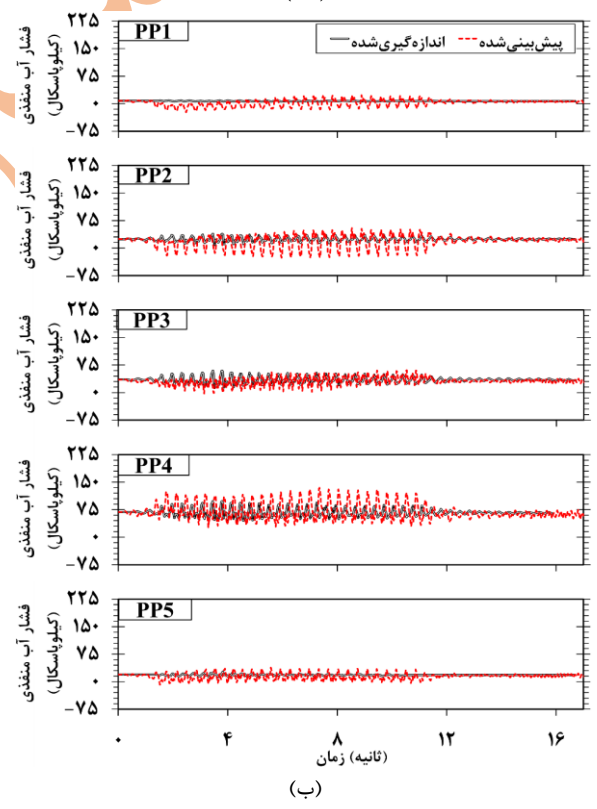
(ج) شکل ۴: (ادامه).



(الف)



(ب)

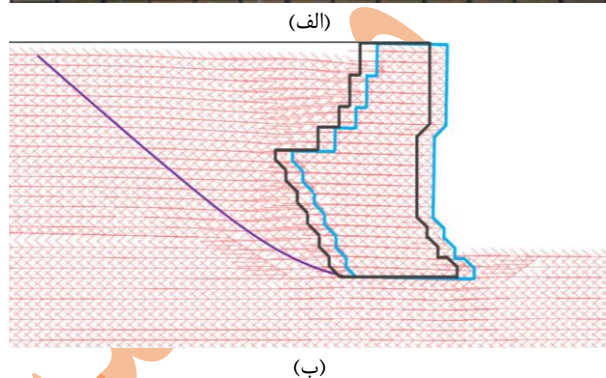


(ب)

شکل ۴: تاریخچه های زمانی: (الف) فشار جانبی کل خاک، (ب) فشار آب منفذی و (ج) شتاب افقی در مدل های عددی مطالعه حاضر (پیش بینی شده) و آزمایشگاهی (اندازه گیری شده) [۲۶].

شکل ۵: تاریخچه های زمانی تغییر مکان افقی: (الف) بالا و (ب) وسط دیوار در مدل های عددی مطالعه حاضر (پیش بینی شده) و آزمایشگاهی (اندازه گیری شده) [۲۶].

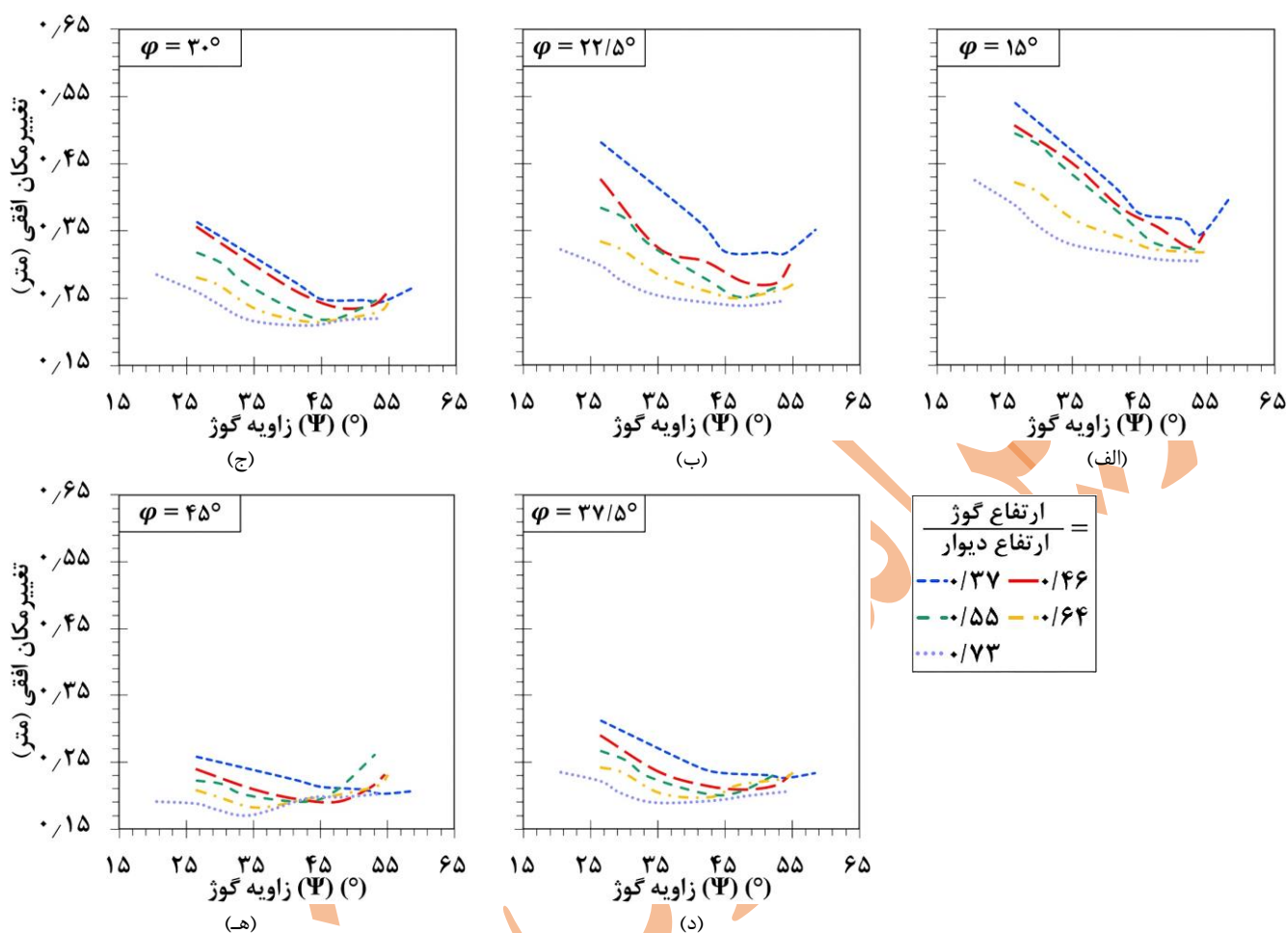
مطابق شکل (۷)، برای تمامی نسبت‌های ارتفاع گوژ به ارتفاع دیوار و تمامی مقادیر زاویه اصطکاک خاکریز، در زاویه گوژهای پایین (محدوده ۲۵ تا ۳۵ درجه)، افزایش زاویه گوژ موجب کاهش قابل توجه (تا ۲۴ درصد) جابجایی افقی دیوار گوژپشتی شده است. اما در ادامه، در زاویه گوژهای بزرگ‌تر (بزرگ‌تر از ۳۵ درجه و تا حدود ۵۰ درجه)، افزایش زاویه گوژ کاهش کم‌تری بر تغییرمکان افقی دیوار ایجاد کرده و شیب تغییرات تغییرمکان افقی نسبت به زاویه گوژ دیوار به سمت افقی شدن متمایل شده است. با افزایش زاویه گوژ دیوار به مقادیر بزرگ‌تر از حدود ۵۰ درجه، افزایش زاویه گوژ تأثیر معکوس بر بهبود پاسخ لرزه‌ای دیوار گوژپشتی داشته و موجب افزایش تغییرمکان افقی دیوار شده است. این فرآیند می‌تواند به علت غیرفعال شدن سازوکار کاهش فشار جانبی بخش پایینی دیوار در زوایای گوژ بالا باشد. مطابق شکل (۹-الف)، در زاویه گوژهای پایین تا متوسط (حدود ۳۵ درجه) به واسطه کوچک بودن زاویه گوژ و همچنین دوران دیوار به سمت دریا، گوژ پشت دیوار صفحه گسیختگی تشکیل شده در خاکریز را قطع نمی‌نماید و با افزایش زاویه گوژ دیوار و به تبع آن کوچک شدن مساحت گوه گسیختگی، نیروی افقی وارد بر دیوار و تغییرمکان افقی آن کاهش می‌یابد. اما در زاویه گوژهای بزرگ به واسطه بزرگ بودن زاویه گوژ و دوران دیوار به سمت خاکریز، گوژ پشت دیوار راستای صفحه گسیختگی جدیدی در پشت گوژ دیوار ایجاد می‌شود. به این ترتیب مطابق شکل (۹-ب)، بخشی از مصالح ژئوتکنیکی موجود در زیر گوژ دیوار به صورت یکپارچه با دیوار و به عنوان بخشی از آن عمل می‌نمایند و عملکرد دیوار مشابه با یک دیوار گوژپشتی با زاویه گوژی کوچک‌تر است. این مسئله موجب افزایش تغییرمکان افقی دیوار با افزایش زاویه گوژ می‌شود. هم‌چنین، مقایسه زاویه‌های دوران دیوار در نسبت‌های مختلف ارتفاع گوژ به ارتفاع دیوار نشان می‌دهد. مطابق شکل (۸)، در زاویه گوژهای کوچک، با افزایش زاویه گوژ دیوار، دوران آن به سمت دریا کاهش می‌یابد. در ادامه، در زاویه گوژهای بزرگ‌تر دوران دیوار به صفر می‌رسد و با افزایش بیش‌تر زاویه گوژ، دیوار به سمت خاکریز دوران می‌کند. این سازوکار مبین آن است که به‌طور کلی با افزایش زاویه گوژ دیوار، الگوی تغییرشکل دیوار ساحلی گوژپشتی از واژگونی به سمت دریا به واژگونی به سمت خاکریز متمایل می‌شود.



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

۳- تحلیل حساسیت بر روی زاویه گوژ دیوار، زاویه اصطکاک خاکریز و نسبت ارتفاع گوژ به ارتفاع دیوار

در این بخش، اثر زاویه گوژ بر رفتار لرزه‌ای دیوار ساحلی گوژپشتی در مقادیر مختلف زاویه اصطکاک خاکریز و نسبت‌های مختلف ارتفاع گوژ به ارتفاع دیوار در قالب تحلیل‌های حساسیت‌سنجی بررسی می‌شوند. تغییرات تغییرمکان افقی و دوران دیوار پس از اعمال بارگذاری لرزه‌ای نسبت به تغییرات این پارامترها حاصل می‌شوند. بدیهی است که تغییر پارامترهای هندسی و وزن دیوار ساحلی گوژپشتی سبب تغییر تغییرمکان افقی و دوران دیوار می‌شود. بنابراین، برای بررسی اثر زاویه گوژ در زاویه اصطکاک‌های مختلف خاکریز و نسبت‌های ارتفاع گوژ به ارتفاع دیوار متفاوت، سایر پارامترهای هندسی دیگر دیوار گوژپشتی و وزن دیوار در تمامی مدل‌ها ثابت نگاه‌داشته می‌شوند. تغییرات تغییرمکان افقی و زاویه دوران دیوار گوژپشتی نسبت به زاویه گوژ دیوار در زاویه اصطکاک‌های مختلف خاکریز و نسبت‌های ارتفاع گوژ به ارتفاع دیوار مختلف به ترتیب در شکل‌های (۷) و (۸) ارائه شده‌اند.



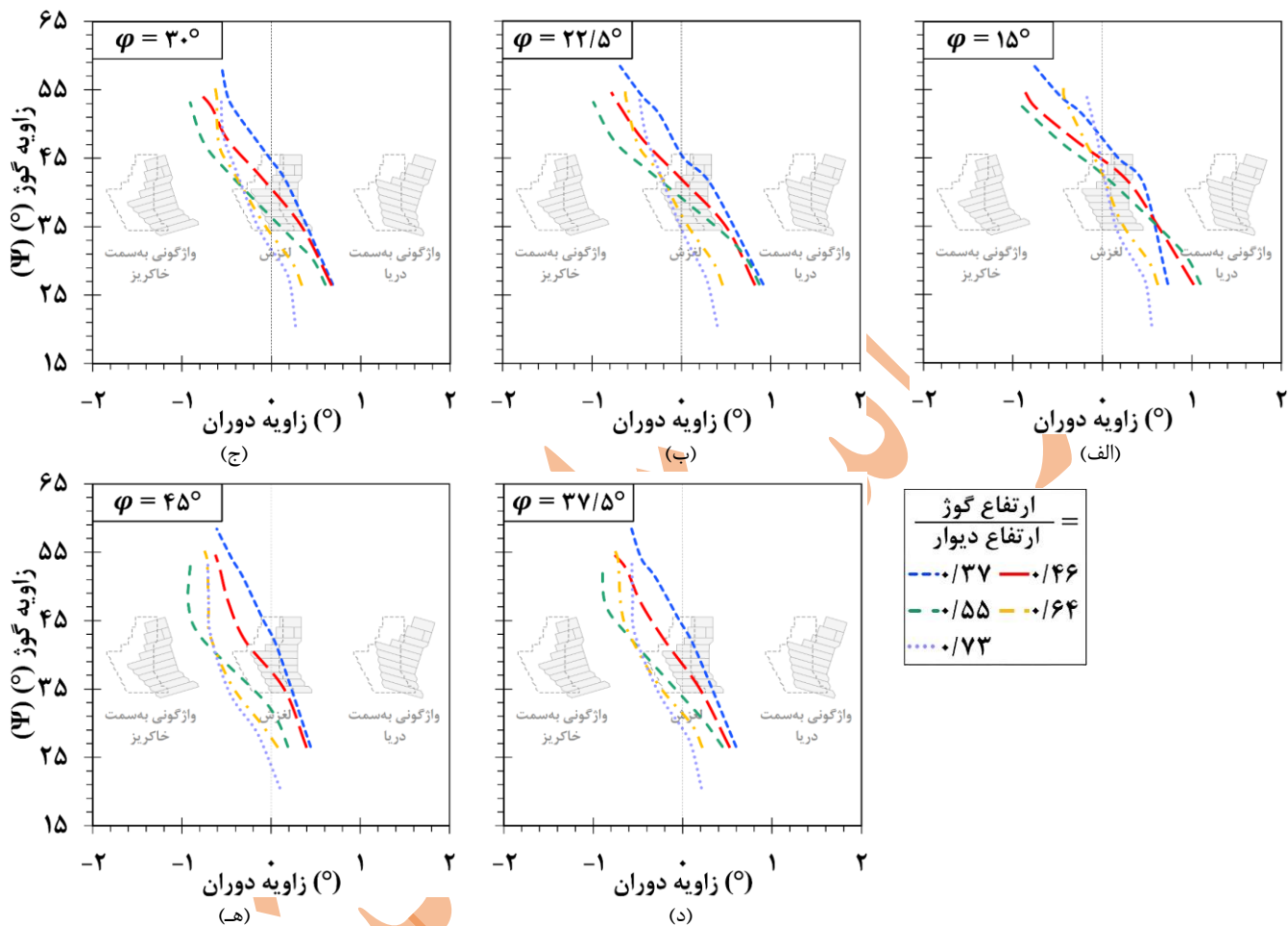
شکل ۷: تغییرات تغییرمکان افقی دیوار ساحلی بلوکی گوزپشتی نسبت به زاویه گوز دیوار برای نسبت‌های مختلف ارتفاع گوز به ارتفاع دیوار و زاویه اصطکاک‌های متفاوت خاکریز: (الف) ۱۵ درجه، (ب) ۲۲/۵، (ج) ۳۰، (د) ۳۷/۵ و (هـ) ۴۵.

درجه است. زاویه گوز بهینه متناظر با حداکثر کاهش تغییرمکان افقی، برای نسبت ارتفاع گوز به ارتفاع دیوار ۰/۶۴ و زاویه اصطکاک خاکریز ۱۵ درجه برابر ۵۳ درجه است، در حالی که این زاویه گوز برای نسبت ارتفاع گوز به ارتفاع دیوار ۰/۶۴ و زاویه اصطکاک خاکریز ۴۵ درجه برابر ۳۵/۵ درجه است. این مسأله در خصوص زاویه گوز بهینه متناظر با زاویه دوران صفر دیوار نیز معتبر است. مطابق شکل (۸)، زاویه گوز متناظر با زاویه دوران صفر دیوار، برای نسبت ارتفاع گوز به ارتفاع دیوار ۰/۳۷ و زاویه اصطکاک خاکریز ۴۵ درجه، برابر ۴۲/۸ درجه است، در حالی که این زاویه گوز برای نسبت ارتفاع گوز به ارتفاع دیوار ۰/۶۴ و زاویه اصطکاک خاکریز ۴۵ درجه، برابر ۲۷/۹ درجه است. هم‌چنین زاویه گوز بهینه متناظر با زاویه دوران صفر

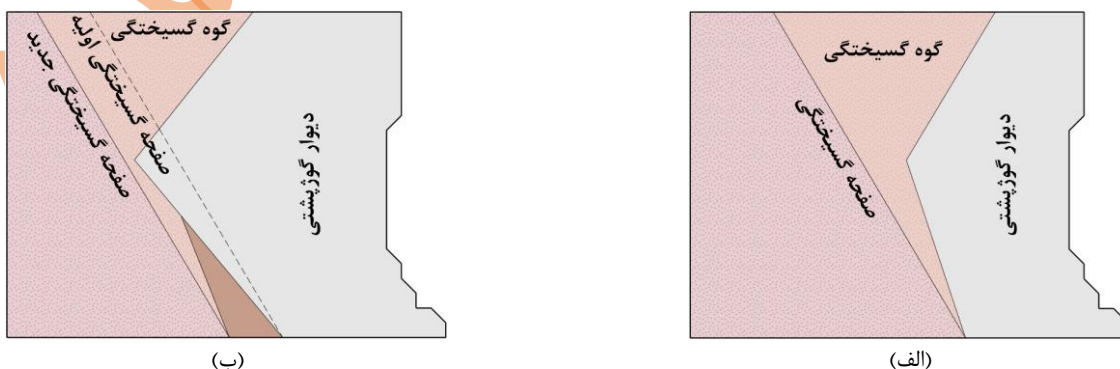
فرآیند شرح داده شده در قبل در زاویه اصطکاک‌های مختلف خاکریز و نسبت‌های مختلف ارتفاع گوز به ارتفاع دیوار نیز مشابه است. اما مقدار زاویه گوزی که سبب بیشترین کاهش در تغییرمکان افقی دیوار می‌شود و هم‌چنین زاویه گوز متناظر با دوران صفر برای دیوار، که زاویه‌های گوز بهینه برای دیوار گوزپشتی به‌شمار می‌روند، بر حسب زاویه‌های مختلف اصطکاک خاکریز و نسبت‌های مختلف ارتفاع گوز به ارتفاع دیوار متغیر هستند. برای نمونه، مطابق شکل (۷) زاویه گوز بهینه متناظر با حداکثر کاهش تغییرمکان افقی برای نسبت ارتفاع گوز به ارتفاع دیوار ۰/۳۷ و زاویه اصطکاک خاکریز ۴۵ درجه، برابر ۵۳/۹ درجه است، در حالی که این زاویه برای نسبت ارتفاع گوز به ارتفاع دیوار ۰/۷۳ و زاویه اصطکاک خاکریز ۴۵ درجه، برابر ۳۴/۵

زاویه اصطکاک خاکریز از ۱۵ به ۴۵ درجه، این زاویه گوز به ۳۱/۸ درجه کاهش می‌یابد.

دیوار برای نسبت ارتفاع گوز به ارتفاع دیوار ۰/۵۵ و زاویه اصطکاک خاکریز ۱۵ درجه، برابر ۴۲/۷ درجه است، در حالی که با افزایش



شکل ۸: تغییرات زاویه دوران دیوار ساحلی بلوکی گوزپشتی نسبت به زاویه گوز دیوار برای نسبت‌های مختلف ارتفاع گوز به ارتفاع دیوار و زاویه اصطکاک‌های متفاوت خاکریز: (الف) ۱۵ درجه، (ب) ۲۲/۵، (ج) ۳۰، (د) ۳۷/۵ و (ه) ۴۵.



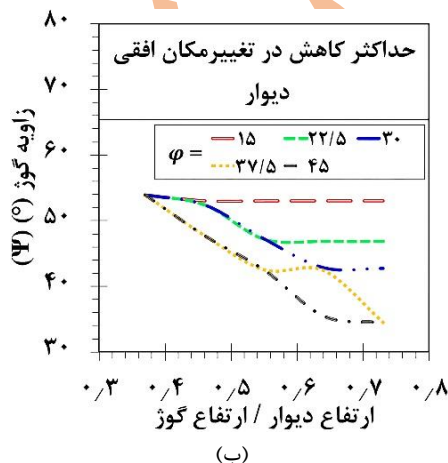
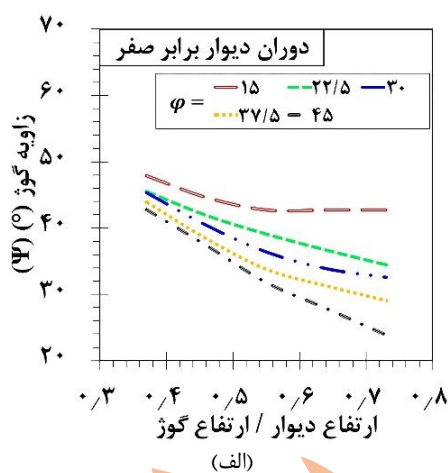
شکل ۹: گوه گسیختگی تشکیل شده در خاکریز پشت دیوار ساحلی بلوکی گوزپشتی در حالت: (الف) زاویه گوزهای کوچک تا متوسط، و (ب) زاویه گوزهای بزرگ.

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]:

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

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

که در آن، T نمایانگر ترانهاده^۱ است، به طوری که $x_i^T \beta$ حاصل ضرب داخلی بین x_i و β است.



شکل ۱۰: زاویه گور بهینه متناظر با: (الف) زاویه دوران صفر، و (ب) حداکثر کاهش تغییرمکان افقی دیوار ساحلی بلوکی گورپشتی در نسبت‌های مختلف ارتفاع گور به ارتفاع دیوار و زاویه اصطکاک‌های متفاوت خاکریز.

مقادیر زاویه گور بهینه متناظر با زاویه دوران صفر دیوار و حداکثر کاهش تغییرمکان افقی دیوار برای نسبت‌های مختلف ارتفاع گور به ارتفاع دیوار و زاویه‌های مختلف اصطکاک خاکریز در شکل (۱۰) نشان داده شده‌اند. مطابق شکل (۱۰-الف و ب)، روند تغییرات زاویه گورهای بهینه متناظر با زاویه دوران صفر دیوار ساحلی بلوکی گورپشتی و حداکثر کاهش تغییرمکان افقی آن تقریباً به صورت خطی است. به روشنی مشاهده می‌شود، با افزایش زاویه اصطکاک خاکریز و افزایش نسبت ارتفاع گور به ارتفاع دیوار، زاویه‌های گور بهینه متناظر با زاویه دوران صفر دیوار ساحلی گورپشتی و حداکثر کاهش تغییرمکان افقی آن کاهش می‌یابند. بنابراین، با توجه به کاهشی و شبه خطی بودن روند تغییرات این دو زاویه گور بهینه نسبت به تغییرات زاویه اصطکاک خاکریز و نسبت ارتفاع گور به ارتفاع دیوار، می‌توان روابطی برای تخمین زاویه گور بهینه دیوار بر اساس معیارهای زاویه دوران صفر دیوار و حداکثر کاهش تغییرمکان افقی آن به دست آورد.

۴- تخمین زاویه‌های گور بهینه متناظر با حداکثر کاهش تغییرمکان افقی دیوار و زاویه دوران صفر دیوار با به کارگیری فرآیند یادگیری ماشین نظارت شده

در این بخش، با به کارگیری نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های عددی بخش قبل و رگرسیون چندگانه مبتنی بر فرآیند یادگیری ماشین نظارت شده [۲۶ و ۲۷] و به کمک برنامه‌نویسی به زبان پایتون [۲۸]، روابطی برای تخمین زاویه گور بهینه متناظر با زاویه دوران صفر دیوار ساحلی گورپشتی و همچنین زاویه گور بهینه متناظر با حداکثر کاهش تغییرمکان افقی دیوار توسعه داده می‌شوند.

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) بین متغیرهای مستقل و وابسته تخمین بزند. این تخمین با استفاده از الگوریتم‌های تخمین تکراری انجام می‌شود [۳۹]. در رگرسیون چندگانه غیرخطی،

^۱ Transpose

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

$$\Psi_{ZR} = 68 - 34.5r_h - 0.35\phi^{1.03} \quad (5)$$

$$\Psi_{MDR} = 72.5 - 33r_h - 0.35\phi^{0.9} \quad (6)$$

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

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

در مقابل، در خصوص رابطه توسعه داده شده برای تخمین زاویه گوژ بهینه متناظر با زاویه دوران صفر دیوار ساحلی گوژپشتی (Ψ_{ZR})، با توجه به این که تجاوز از مقادیر عددی شکل (۱۰-الف) (تا زاویه گوژ بهینه متناظر با حداکثر کاهش تغییرمکان افقی دیوار) نیز سبب کاهش جابجایی افقی دیوار می‌شود و تأثیر مخرب قابل توجهی بر رفتار دیوار ساحلی گوژپشتی ندارد، رابطه بر اساس حداکثر تطابق با مقادیر عددی شکل (۱۰-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 روابط پیشنهادی زاویه‌های گوژ بهینه Ψ_{MDR} و Ψ_{ZR} را با دقت نسبتاً مناسبی برآورد می‌نمایند. مطابق شکل (۱۱)، مشاهده می‌شود Ψ_{MDR} در هیچ یک از نسبت‌های ارتفاع گوژ به ارتفاع دیوار مورد بررسی، زاویه گوژ بهینه

متناظر با حداکثر کاهش تغییرمکان افقی دیوار (Ψ_{MDR}) برآورد شده به وسیله رابطه (۷)، بیشتر از ۲/۵ درجه بزرگ‌تر از مقادیر به دست آمده از شبیه‌سازی عددی نیست و میانگین اختلاف میان زاویه‌گوژهای به دست آمده از رابطه (۷) و شبیه‌سازی‌های عددی ۲/۳ 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 زاویه‌گوژهای رابطه (۶) و مقادیر عددی تنها ۱/۵ 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 محافظه کارانه از زاویه گوژ بهینه، برای دیوارهای مستقر بر روی بسترهای دریایی با تراکم متوسط تا متراکم مورد استفاده قرار گیرد. اما رابطه به دست آمده برای زاویه گوژ بهینه متناظر با حداکثر کاهش تغییرمکان افقی دیوار ساحلی گوژپشتی (Ψ_{MDR}) می‌تواند برای تخمین کران بالای زاویه گوژ بهینه دیوار در بسترهای متراکم مورد استفاده شود و به کارگیری آن در بسترهای با تراکم نسبی متوسط که دیوارها دوران بیشتری دارند، توصیه نمی‌شود.

۵- تخمین تغییرمکان افقی و زاویه دوران دیوار با استفاده از فرآیند یادگیری ماشین نظارت شده

۵-۱- تحلیل رگرسیون

در عمده موارد عملی، هندسه دیوار بلوکی گوژپشتی بر مبنای شرایط اجرایی ساختگاه تعیین و سپس با استفاده از روش‌های تحلیلی، مقادیر جابجایی آن برآورد می‌شود. بر این اساس، مشابه با بخش قبل، در این قسمت روابط آماری بر مبنای رگرسیون چند متغیره برای تخمین تغییرمکان افقی و زاویه دوران دیوار پس از اعمال بارگذاری لرزه‌ای ارائه می‌شود. روند کلی تحلیل رگرسیون شامل تعیین تابع بر اساس تغییرات پارامترها و سپس یافتن ضرایب با انجام تحلیل است. با توجه به تغییرات تغییرمکان افقی دیوار و زاویه دوران آن نسبت به زاویه و ارتفاع گوژ دیوار و همچنین زاویه اصطکاک خاکریز، از روابط توانی چند جمله‌ای برای برآورد تغییرمکان افقی دیوار (HD_{Est}) و زاویه دوران آن (Rot_{Est}) مطابق با معادلات (۸) و (۹) استفاده می‌شود:

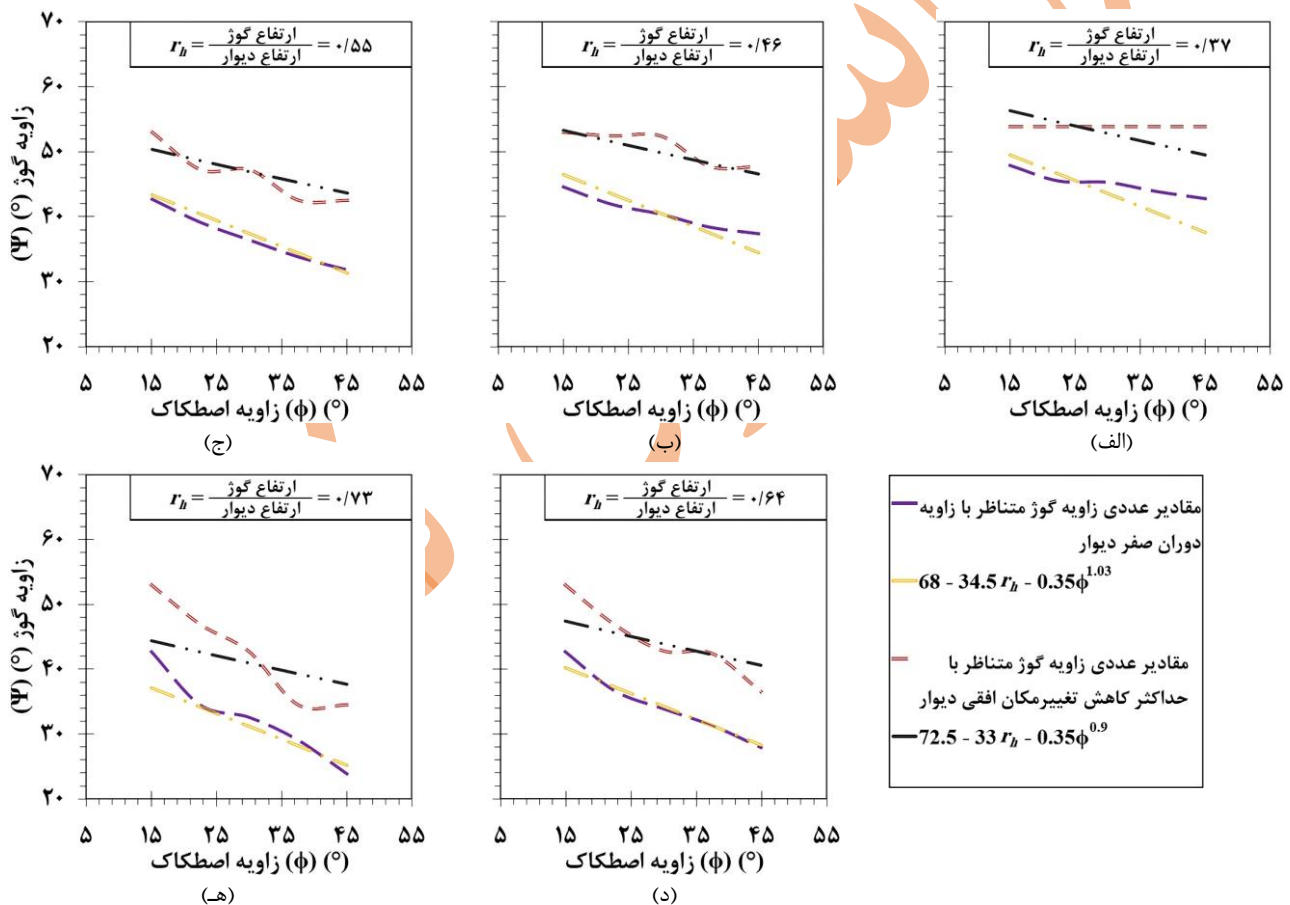
مطلوبی هستند. مطابق شکل (۱۲)، حداکثر و میانگین اختلاف میان تغییرمکان محاسبه شده با استفاده از رابطه (۸) و مقادیر عددی به ترتیب ۱۴ و ۳ سانتی متر است. این اختلاف در خصوص زاویه دوران تخمینی با استفاده از تحلیل رگرسیون و مدل عددی ۰/۵۹ و ۰/۲ درجه است. هم‌چنین خطای جذر میانگین مربعات^۱ (RMSD) روابط (۸) و (۹) به ترتیب برابر ۰/۰۳۸ 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.

$$HDisp_{Est} = -10.042\phi^{0.015} - 3.92\Psi^{0.018} + 15.022 \quad (۸)$$

$$Rot_{Est} = -0.761\phi^{0.235} - 0.021\Psi^{1.126} + 2.925 \quad (۹)$$

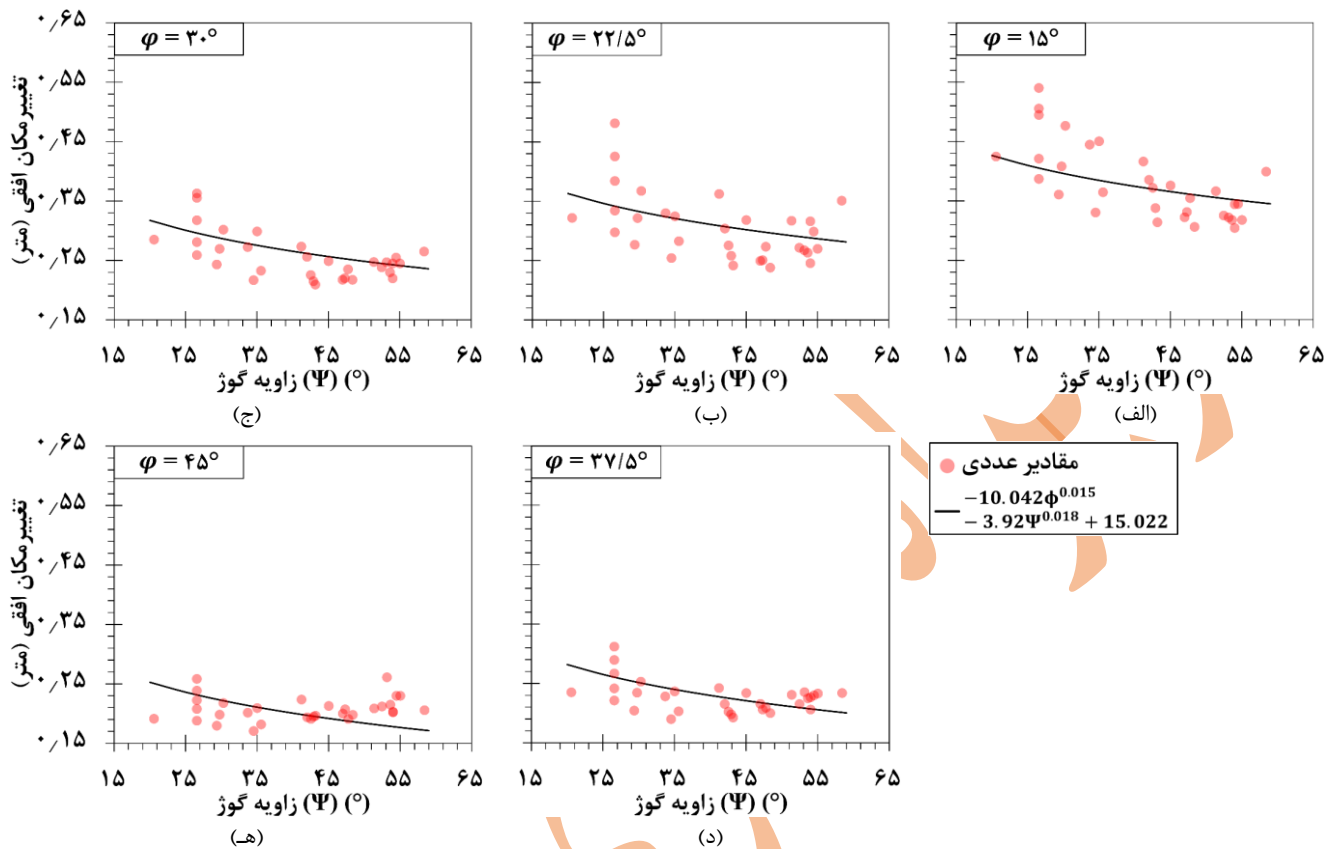
تغییرمکان‌های افقی و زاویه دوران‌های تخمینی حاصل از روابط (۹) و (۱۰) مربوط به زلزله با شتاب حداکثر ۰/۴g (بارگذاری ورودی پژوهش حاضر) است. تغییرمکان‌های افقی و زاویه دوران‌های تخمین زده شده با روابط (۹) و (۱۰) به ترتیب در شکل‌های (۱۲) و (۱۳) با مقادیر عددی متناظر مقایسه شده‌اند.

مطابق شکل‌های (۱۲) و (۱۳)، روابط به‌دست آمده از تحلیل رگرسیون برای تخمین تغییرمکان افقی و زاویه دوران لرزه‌ای دیوار گوژپشتی، قادر به برآورد تغییرمکان افقی ماندگار دیوار با دقت نسبتاً



شکل ۱۱: مقادیر زاویه گوژ بهینه متناظر با حداکثر کاهش تغییرمکان 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: (الف) ۰/۳۷، (ب) ۰/۴۶، (ج) ۰/۵۵، (د) ۰/۶۴ و (ه) ۰/۷۳.

^۱ Root-mean-square deviation



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: (الف) ۱۵، (ب) ۲۲/۵، (ج) ۳۰، (د) ۳۷/۵ و (ه) ۴۵.

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 چند حالتی) متفاوت است [۴۳]. 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^۱، K نزدیک‌ترین همسایه^۲ و ماشین بردار پشتیبان^۳ برای پیش‌بینی تغییر مکان افقی و زاویه دوران دیوار ساحلی بلوکی گوزپشتی استفاده می‌شود.

۵-۲- الگوریتم‌های طبقه‌بندی^۱

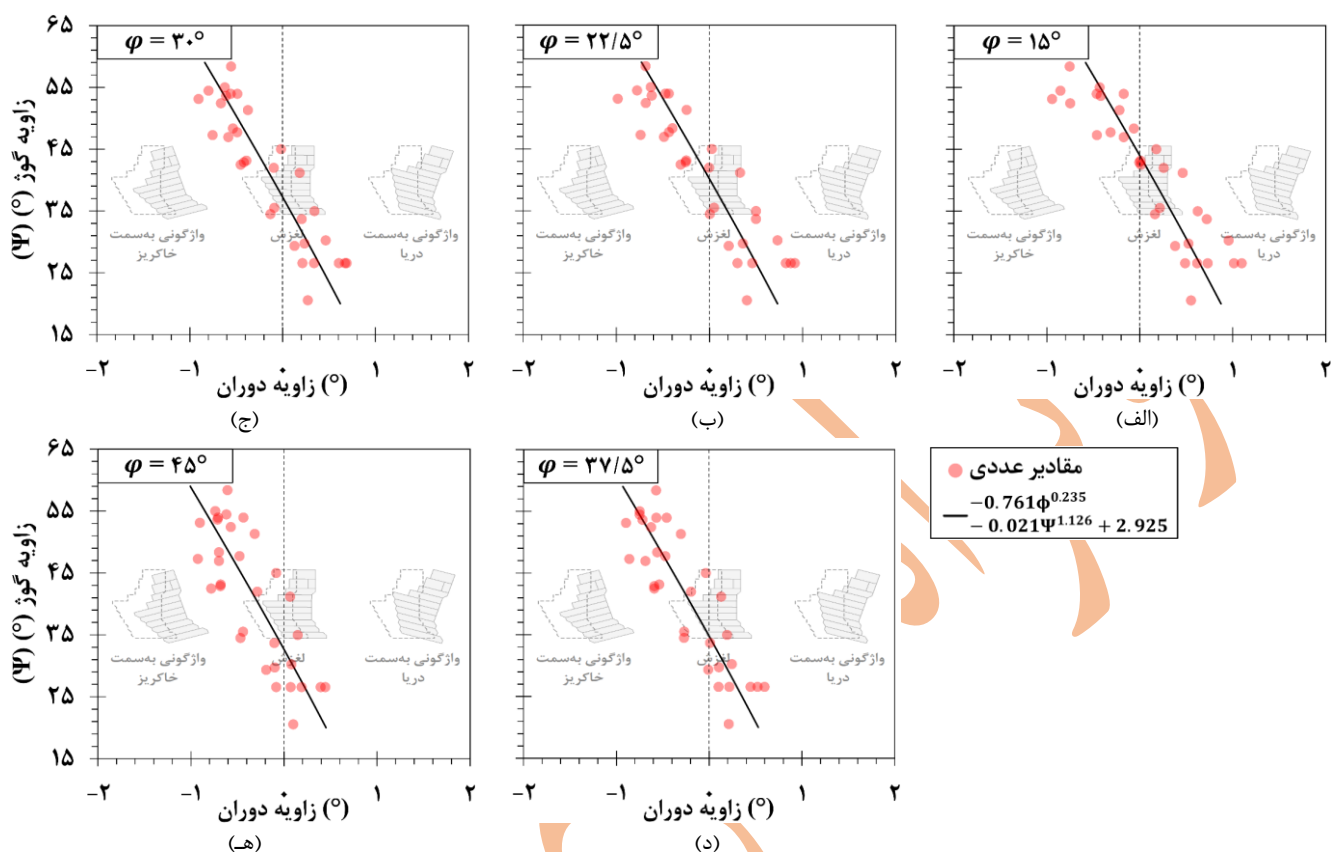
الگوریتم‌های طبقه‌بندی برای پیش‌بینی متغیرهای وابسته گسسته و برچسب‌گذاری شده (مانند نوع خاک) به کار می‌روند. الگوریتم‌های دسته‌بندی، دسته‌های موجود در مجموعه داده‌ها را تشخیص می‌دهند و پیش‌بینی می‌کنند [۴۲]. در خصوص مولفه‌های رفتار سازه‌های ژئوتکنیکی نظیر تغییر مکان افقی و زاویه دوران، مقادیر پیوسته 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 با دقت میلیمتر و دهم درجه، آن‌ها را به عنوان مقادیر گسسته در نظر گرفت.

^۱ K-nearest neighbors (KNN)

^۲ Support vector machines

^۱ Classification

^۲ Decision tree



شکل ۱۳: مقایسه زاویه دوران تخمین زده شده با استفاده از روش یادگیری ماشین با مقادیر عددی متناظر برای مقادیر مختلف زاویه اصطکاک خاکریز: (الف) ۱۵، (ب) ۲۲/۵، (ج) ۳۰، (د) ۳۷/۵ و (ه) ۴۵.

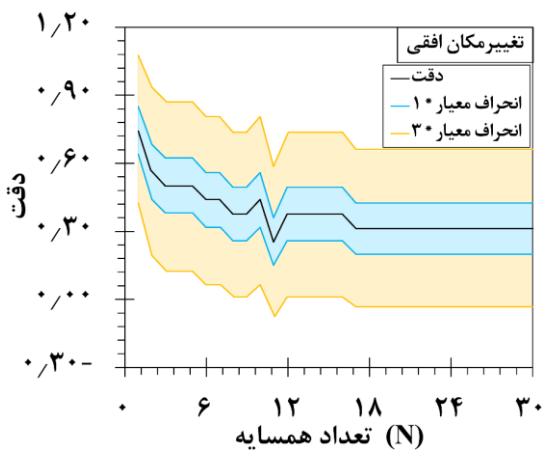
مشابه با تحلیل رگرسیون، متغیرهای مستقل شامل زاویه و ارتفاع گوز دیوار و زاویه اصطکاک خاکریز هستند. به منظور ارزیابی دقت الگوریتم‌های مورد بررسی و بررسی توانایی آن‌ها در پیش‌بینی متغیرهای وابسته خارج از فضای نمونه، مقادیر تغییرمکان افقی و زاویه دوران لرزه‌ای به دست آمده از شبیه‌سازی‌های عددی برحسب مقادیر مختلف زاویه و ارتفاع گوز 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 تغییرمکان افقی و زاویه دوران لرزه‌ای دیوار گوزپشتی با دقت بالا نیستند. مطابق شکل (۱۴)،

۱-۲-۵- درخت تصمیم

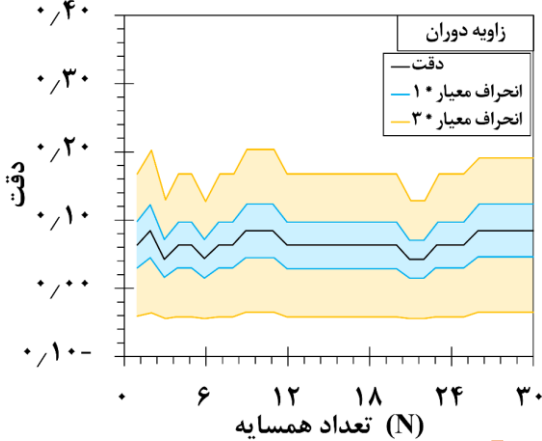
الگوریتم درخت تصمیم یک الگوریتم شرطی پیش‌بینی متغیرهای گسسته است که متغیرهای وابسته را بر مبنای متغیرهای مستقل و در چند مرحله از یکدیگر تفکیک می‌نماید [۴۲]. مبنای جداسازی داده‌ها نزدیکی و همسان شدن متغیرهای وابسته است. به طور دقیق‌تر سعی بر این است، در هر زیر مجموعه از داده‌ها، یک بُعد از متغیرهایی وابسته و یک آستانه انتخاب شوند. سپس، این داده‌ها برحسب این بُعد و آستانه به دو نیم تقسیم می‌شوند، به صورتی که داده‌های موجود در هر زیر مجموعه کم‌ترین ناخالصی را داشته باشند. از توابع ناخالصی مختلفی نظیر جینی^۱ و انتروپی^۲ برای طبقه‌بندی داده‌ها به کمک درخت تصمیم استفاده می‌شود [۴۲].

^۲ entropy

^۱ gini



(الف)



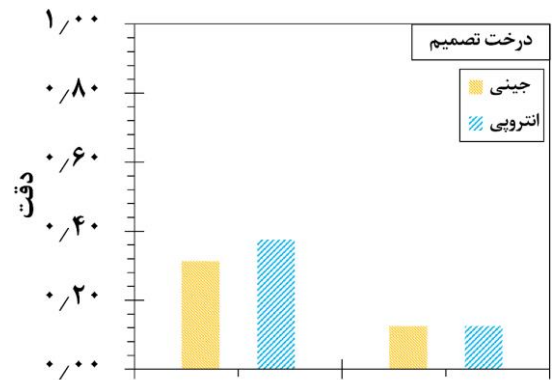
(ب)

شکل ۱۵: دقت الگوریتم K نزدیک‌ترین همسایه در پیش‌بینی: (الف) تغییر مکان افقی، و (ب) زاویه دوران لرزه‌ای دیوار بلوکی گوژپشتی بر حسب K های مختلف.

۲-۲-۵- ماشین بردار پشتیبان

مبنای عملکرد ماشین بردار پشتیبان، طبقه‌بندی خطی داده‌ها و یافتن ابرصفحه‌ای با بیشترین حاشیه اطمینان است. این الگوریتم در مسائل طبقه‌بندی و رگرسیون به کار گرفته می‌شود. حل معادله پیدا کردن خط بهینه برای داده‌ها به وسیله روش‌های برنامه‌سازی غیرخطی که روش‌های شناخته شده‌ای در حل مسائل محدودیت‌دار هستند، انجام می‌شود. پیش از تقسیم خطی، به منظور ایجاد امکان

بالاترین دقت پیش‌بینی تغییر مکان افقی و زاویه دوران لرزه‌ای دیوار با استفاده از الگوریتم درخت تصمیم به ترتیب ۰/۳۱ و ۰/۱۳ (۳۱ و ۱۳ درصد) است، که مناسب نیست. دقت پیش‌بینی برابر نسبت مقادیر درست پیش‌بینی شده به تعداد کل مقادیر آزمایش شده است.



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

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 نیز خروجی، میانگین مقادیر به دست آمده از K است [۴۴]. 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، به مانند الگوریتم درخت تصمیم پیش‌بینی ماشین دقیق نیست و بالاترین دقت که مربوط به $K = 7$ است، تنها ۸/۵ درصد است.

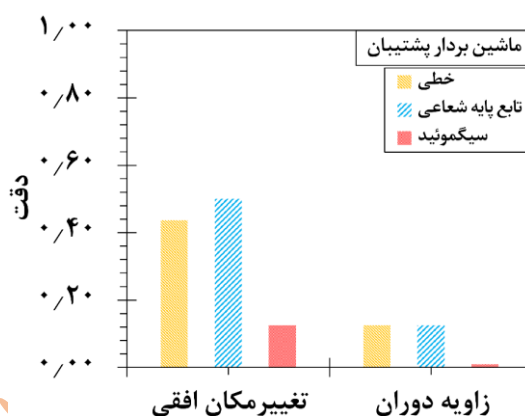
به دست آمده از سه الگوریتم بررسی شده در شکل (۱۷) ارائه شده‌اند. بر اساس شکل (۱۷)، هیچ یک از الگوریتم‌های مورد بررسی قادر به ارائه تخمینی دقیق از زاویه دوران دیوار بلوکی گوژپشتی پس از زلزله نیستند. همچنین، در خصوص تغییرمکان افقی نیز تنها الگوریتم K نزدیک‌ترین همسایه، تخمینی نسبتاً مناسب (با دقت ۷۵ درصد) 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- خلاصه و نتیجه‌گیری

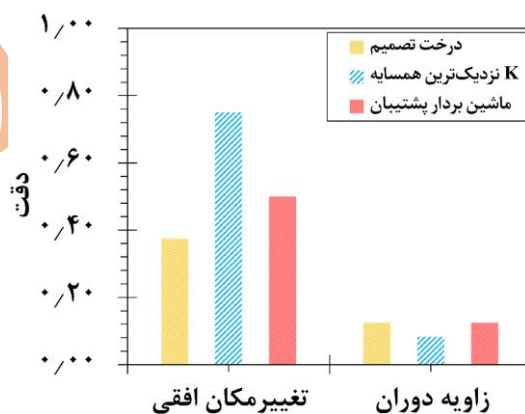
هدف از مطالعه حاضر، تخمین زاویه گوژ بهینه دیوار ساحلی وزنی بلوکی گوژپشتی است. برای این منظور، در ابتدا یک مدل عددی تفاضل محدود از دیوار ساحلی گوژپشتی ایجاد و پاسخ لرزه‌ای آن بر مبنای مشاهدات آزمایشگاهی متناظر اعتبارسنجی شده است. سپس، با انجام تحلیل‌های حساسیت‌سنجی بر روی زاویه گوژ دیوار، زاویه اصطکاک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

(۱) در زوایای گوژ کوچک‌تر از Ψ_{MDR} ، با افزایش زاویه گوژ، تغییرمکان افقی دیوار کاهش می‌یابد. اما در زاویه گوژهای بزرگ‌تر از Ψ_{MDR} ، افزایش زاویه گوژ سبب افزایش تغییرمکان افقی دیوار

طبقه‌بندی داده‌های پیچیده توسط ماشین، داده‌ها به وسیله تابع فی^۱، به فضای با ابعاد بسیار بالاتر^۲ برده می‌شوند. از توابع هسته مختلفی از جمله هسته‌های خطی، پایه شعاعی^۳ و سیگموئید می‌توان استفاده نمود [۴۵]. دقت الگوریتم ماشین بردار پشتیبان برای توابع هسته مختلف در شکل (۱۶) ارائه شده است.



شکل ۱۶: دقت الگوریتم ماشین بردار پشتیبان در پیش‌بینی تغییرمکان افقی و زاویه دوران لرزه‌ای دیوار بلوکی گوژپشتی.



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

مطابق با شکل (۱۶)، بالاترین دقت پیش‌بینی الگوریتم ماشین بردار پشتیبان برای تغییرمکان افقی و زاویه دوران لرزه‌ای به ترتیب ۵۰ و ۱۲/۵ درصد است که دقت بالایی به‌شمار نمی‌رود. بالاترین دقت

^۱ RBF

^۱ Phi

^۲ High dimensional space

نشان می‌دهد، روابط رگرسیونی از توانایی بالاتری در تخمین تغییرشکل‌های لرزه‌ای دیوار بلوکی گوژپستی برخوردارند.

۷- قدردانی

نویسنده اول از حمایت‌های معنوی دلگرم‌کننده بنیاد ملی نخبگان ایران صمیمانه سپاس‌گزاری می‌نماید.

منابع

- [۱] Valkaniotis, S., Ganas, A., Papathanassiou, G., & Papanikolaou, M. "Field observations of geological effects triggered by the January–February ۲۰۱۴ Cephalonia (Ionian Sea, Greece) earthquakes". *Tectonophysics*. ۶۳۰. pp. ۱۵۰-۱۵۷ (۲۰۱۴).
- [۲] Stemberg, K., & Clough, R. W. "Chilean Earthquakes of May, ۱۹۶۰: A Brief Trip Report". In *Proceedings of the 1st World Conference on Earthquake Engineering, Tokyo and Kyoto, Japan* (۱۹۶۰).
- [۳] Zeng, X., & Steedman, R. S. "On the behaviour of quay walls in earthquakes". *Geotechnique*, ۴۳(۳). pp. ۴۱۷-۴۳۱ (۱۹۹۳).
- [۴] Alyami, M., Rouainia, M., & Wilkinson, S. M. "Numerical analysis of deformation behaviour of quay walls under earthquake loading". *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. ۲۹(۳). pp. ۵۲۵-۵۳۶ (۲۰۰۹).
- [۵] Scawthorn, C., & Yanev, P. I. "۱۷ January ۱۹۹۵, Hyogo-ken Nambu, Japanese earthquake". *Engineering Structures*, ۱۷(۳). pp. ۱۴۶-۱۵۷ (۱۹۹۵).
- [۶] Ebrahimian, B. "Seismic performance of anchored quay walls and numerical simulation techniques". *Proceeding of Performance based Design in Earthquake Geotechnical Engineering*. pp. ۷۲۱-۷۲۹ (۲۰۰۹).
- [۷] Ebrahimian, B. "Numerical modelling of the seismic behaviour of gravity-type quay walls". *Engineering seismology, geotechnical and structural earthquake engineering*. ۲۵۷ (۲۰۱۳).
- [۸] Mostafavi Moghadam, A., Ghalandarzadeh, A., Towhata, I., Moradi, M., Ebrahimian, B., & Hajjalikhani, P.

می‌شود. علاوه بر این، با افزایش زاویه گوژ، زاویه دوران دیوار به سمت دریا کاهش می‌یابد و الگوی تغییرشکل دیوار ساحلی گوژپستی از واژگونی به سمت دریا به واژگونی به سمت خاکریز متمایل می‌شود.

(۲) با افزایش زاویه اصطکاک خاکریز و افزایش نسبت ارتفاع گوژ به ارتفاع دیوار، زاویه‌های گوژ بهینه متناظر با زاویه دوران صفر دیوار ساحلی گوژپستی و حداکثر کاهش تغییرمکان افقی آن حاصل از مدل‌سازی عددی کاهش می‌یابند و روند تغییرات زاویه گوژهای بهینه متناظر با زاویه دوران صفر دیوار ساحلی گوژپستی و حداکثر کاهش تغییرمکان افقی آن با استفاده از یک خط قابل تقریب است.

(۳) مقایسه زاویه گوژ بهینه متناظر با حداکثر کاهش تغییرمکان افقی دیوار ساحلی گوژپستی (Ψ_{MDR}) و زاویه گوژ بهینه متناظر با زاویه دوران صفر دیوار ساحلی گوژپستی (Ψ_{ZR}) حاصل از مدل‌سازی عددی و زاویه گوژهای 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.

(۴) Ψ_{ZR} برآورد شده با استفاده از رابطه (۶) می‌تواند به‌عنوان یک تخمین محافظه‌کارانه از زاویه گوژ بهینه، برای طراحی دیوارهای گوژپستی مستقر بر بسترهای دریایی با تراکم متوسط تا متراکم استفاده شود، در حالی که Ψ_{MDR} رابطه (۷)، کران بالای زاویه گوژ بهینه دیوار در بسترهای متراکم را ارائه می‌نماید.

(۵) مقایسه تغییرمکان افقی و زاویه دوران لرزه‌ای تخمین زده شده با فرآیند یادگیری ماشین نظارت شده با مقادیر عددی متناظر نشان داد که از روابط آماری به‌دست آمده می‌توان برای برآورد اولیه تغییرشکل‌های لرزه‌ای دیوار بلوکی گوژپستی استفاده کرد.

(۶) بررسی دقت الگوریتم‌های طبقه‌بندی در پیش‌بینی تغییرمکان افقی و زاویه دوران لرزه‌ای دیوار نشان می‌دهد، در خصوص تغییرمکان افقی تنها الگوریتم K نزدیک‌ترین همسایه قادر به تخمین تغییرمکان افقی با دقت نسبتاً مناسب (۷۵ درصد) است و دیگر الگوریتم‌های به‌کار گرفته شده فاقد دقت مناسب هستند. همچنین، در خصوص زاویه دوران، دقت پیش‌بینی تمامی الگوریتم‌های مورد بررسی کم‌تر از ۱۵ درصد است.

(۷) مقایسه دقت مقادیر تغییرمکان و زاویه دوران لرزه‌ای حاصل از روابط به‌دست آمده از تحلیل رگرسیون با تغییرشکل‌های پیش‌بینی شده توسط الگوریتم‌های طبقه‌بندی یادگیری ماشین نظارت شده

- Advances in Geomechanics*. pp. ۶۲۹-۶۳۶. Springer, Cham (۲۰۲۱).
- [۱۷] Kim, Y. S., Lee, M. G., Cho, G. C., & Ko, K. W. "Inertial behavior of gravity-type quay wall: A case study using dynamic centrifuge test". *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. ۱۵۵. pp. ۱۰۷۱۹۶ (۲۰۲۲).
- [۱۸] Zarnousheh Farahani, A.R., Ebrahimian, B., Noorzad, A. "Considering the geometry effect on the seismic behavior of block type gravity quay walls". *۳rd Iranian Conference on Geotechnical Engineering* (۲۰۱۸).
- [۱۹] Pasquali, R., Lai, C. G., & Corigliano, M. "Some issues in seismic analysis and design of blockwork wharves". *Journal of Earthquake Engineering*. ۱۴(۱). pp. ۱۰۲-۱۳۰ (۲۰۰۹).
- [۲۰] De Gijt, J. G., & Broeken, M. L. "*Quay walls. SBRCURnet Municipality Rotterdam Port of Rotterdam*" SBRCURnet, Rotterdam, The Netherlands, an imprint of the Taylor & Francis Group (۲۰۱۳).
- [۲۱] Sadrekarimi, A. "Seismic displacement of broken-back gravity quay walls". *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*. ۱۳۷(۲). pp. ۷۵-۸۴ (۲۰۱۱).
- [۲۲] Coulomb, C. A. "Essai sur une application des regles des maximis et minimis a quelques problemes de statique relatifs, a la architecture". *Mem. Acad. Roy. Div. Sav., vol. ۷*. pp. ۳۴۳-۳۸۷ (۱۷۷۶).
- [۲۳] Okabe, S. "General theory on earth pressure and seismic stability of retaining wall and dam". *Proc. Civil Engrg. Soc., Japan*. ۱۰(۶), pp. ۱۲۷۷-۱۳۲۳ (۱۹۲۴).
- [۲۴] Mononobe, N. and Matsuo, M. "On the determination of earth pressures during earthquakes". In *Proceedings of the World Engineering Congress, Tokyo, Japan. International Association for Earthquake Engineering, Japan. Vol. ۹*. pp. ۱۷۷-۱۸۵ (۱۹۲۹).
- [۲۵] Itasca Consulting Group, Inc. "FLAC version ۸.۱: Fast Lagrangian analysis of continua. User's guide". *Minneapolis: Itasca Consulting Group* (۲۰۱۹).
- [۲۶] Sadrekarimi, A., Ghalandarzadeh, A., & Sadrekarimi, J. "Static and dynamic behavior of hunchbacked gravity "Studying the effects of deformable panels on seismic displacement of gravity quay walls". *Ocean Engineering*. ۲۶(۱۵-۱۶). pp. ۱۱۲۹-۱۱۴۸ (۲۰۰۹).
- [۹] Ebrahimian, B., & Farboud, M. "Seismic effective-stress analysis of caisson quay wall with liquefiable backfill". In *۸th international conference on seismology & Earthquake Engineering* (۲۰۱۹).
- [۱۰] Dakoulas, P., Vazouras, P., Kallioglou, P., & Gazetas, G. "Effective-stress seismic analysis of a gravity multi-block quay wall". *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. ۱۱۵. pp. ۳۷۸-۳۹۳ (۲۰۱۸).
- [۱۱] Ebrahimian, B., Farahani, A. R. Z., & Noorzad, A. "Seismic Behavior of Hunchbacked Block-type Gravity Quay Wall". *International Conference on Coasts, Ports and Marine Structures (ICOPMAS ۲۰۱۸)* (۲۰۱۸).
- [۱۲] Ebrahimian, B., Farahani, A. R. Z., & Noorzad, A. "Effect of Applied Surcharge Length on Seismic Behavior of Broken-Back Wall". *۸th International Conferences of Seismology and Earthquake Engineering (SEE)* (۲۰۱۹).
- [۱۳] Ebrahimian, B., & Farboud, M. "Seismic Effective-Stress Analysis of Caisson Quay Wall with Liquefiable Backfill". *۸th International Conferences of Seismology and Earthquake Engineering (SEE)* (۲۰۱۹).
- [۱۴] Ebrahimian, B., & Zarnousheh Farahani, A. R. (۲۰۲۲). Seismic Vulnerability Analysis of Caisson-type Gravity Quay Walls with Improved Backfill Using Fragility Curves. *Journal of Structural and Construction Engineering*, (۲۰۲۲).
- [۱۵] Liu, H., Zhang, J. M., Zhang, X., & Wang, R. "Seismic performance of block-type quay walls with liquefiable calcareous sand backfill". *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. ۱۳۲. pp. ۱۰۶۰۹۲ (۲۰۲۰).
- [۱۶] Liu, H., Wang, R., Zhang, J. M., & Zhu, T. "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*

- [۳۶] Asche, H. R. "The choice of mesh size for accuracy in elastoplastic tunnel FLAC analyses." In *FLAC and Numerical Modeling in Geomechanics*. CRC Press, pp. ۲۹۳-۲۹۹ (۲۰۲۰).
- [۳۷] OCDI. "Technical Standards and Commentaries for Port and Harbour Facilities in Japan". *OCDI, Japan* (۲۰۰۹).
- [۳۸] Besharat, V. & Bolouri-Bazaz, J. "Dynamic analysis of urban circular tunnels and the effect of environmental factors on the different behavior of these structures." *Tunneling & Underground Space Engineering (TUSE)*, ۲(۲), pp ۱۷۳-۱۸۲ (In Persian) (۲۰۱۴).
- [۳۹] Freedman, D. A. "Statistical models: theory and practice". cambridge university press (۲۰۰۹).
- [۴۰] Rencher, A. C. "Methods of Multivariate Analysis, ۳rd Edition". John Wiley & Sons, Inc. Publication, ۷۲۷ (۲۰۱۲).
- [۴۱] Hyndman, R. J., & Koehler, A. B. "Another look at measures of forecast accuracy." *International journal of forecasting*, ۲۲(۴), pp ۶۷۹-۶۸۸ (۲۰۰۶).
- [۴۲] Hastie, T., Tibshirani, R., Friedman, J. H., & Friedman, J. H. "The elements of statistical learning: data mining, inference, and prediction" Vol. ۲. *New York: springer*, pp. ۱-۷۵۸ (۲۰۰۹).
- [۴۳] Wu, T. F., Lin, C. J., & Weng, R. "Probability estimates for multi-class classification by pairwise coupling". *Advances in Neural Information Processing Systems*, ۱۶ (۲۰۰۳).
- [۴۴] Piryonesi, S. M., & El-Diraby, T. E. "Role of data analytics in infrastructure asset management: Overcoming data size and quality problems". *Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements*, ۱۴۴(۲), pp ۰۴۰۲۰۰۲۲ (۲۰۲۰).
- [۴۵] Zhang, T. "An introduction to support vector machines and other kernel-based learning methods". *Ai Magazine*, ۲۲(۲), ۱۰۳-۱۰۳ (۲۰۰۱).
- quay walls". *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. ۲۸(۲), pp. ۹۹-۱۱۷ (۲۰۰۸).
- [۲۷] Eberly, L. E. Multiple linear regression. *Topics in Biostatistics*. pp. ۱۶۵-۱۸۷ (۲۰۰۷).
- [۲۸] Pedregosa, F., Varoquaux, G., Gramfort, A., Michel, V., Thirion, B., Grisel, O., ... & Duchesnay, E. "Scikit-learn: Machine learning in Python". *the Journal of machine Learning research*. ۱۲. pp. ۲۸۲۵-۲۸۳۰ (۲۰۱۱).
- [۲۹] Van Rossum, G., & Drake, F. L. "Python ۳ Reference Manual". Scotts Valley, CA: CreateSpace (۲۰۰۹).
- [۳۰] Jalili, M., Sadaee, H., & Bargi, K. "Knapsack Placing of Blocks Assess on Wall Stability in Seismic Regions and Proper Section Recommendation." In *Solutions to Coastal Disasters ۲۰۰۸*, pp. ۹۳۹-۹۵۱ (۲۰۰۸).
- [۳۱] Sadrekarimi, A. "Dynamic behavior of granular soils at shallow depths from ۱ g shaking table tests". *Journal of Earthquake Engineering*. ۱۷(۲). pp. ۲۲۷-۲۵۲ (۲۰۱۳).
- [۳۲] Kanatani, M., Nishi, K., Touma, J. I., Ohnami, M., & Namita, H. "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 (۱۹۹۱).
- [۳۳] Jamiolkowski, M., Leroueil, S., & Lo Presti, D. C. (۱۹۹۱). "Design parameters from theory to practice". In *Int. Conf. on Geotechnical Engineering for coastal development*. Vol. ۲. pp. ۸۷۷-۹۱۷. Port & Harbour Research Institute (۱۹۹۱).
- [۳۴] Seed, H. B., Wong, R. T., Idriss, I. M., & Tokimatsu, K. "Moduli and damping factors for dynamic analyses of cohesionless soils". *Journal of geotechnical engineering*. ۱۱۲(۱۱), pp. ۱۰۱۶-۱۰۳۲ (۱۹۸۶).
- [۳۵] Pestana, J. M., & Salvati, L. A. "Small-strain behavior of granular soils. I: Model for cemented and uncemented sands and gravels". *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*. ۱۳۲(۸). pp. ۱۰۷۱-۱۰۸۱ (۲۰۰۶).

میراث‌های نسله