



Research paper

(Received 25 Sep. 2025

Accepted 10 Nov. 2025)

## **Investigation of the seismic behavior of gabion retaining walls in the surrounding environment of urban solid waste landfills**

Amirhossein Mashayekhi Mazar<sup>1</sup>, Fazlollah Soltani<sup>\*2</sup>

<sup>1</sup> Master's student, Faculty of Civil Engineering, Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran.

<sup>2</sup> Associate Professor, Faculty of Civil Engineering, Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran.

### **Abstract**

In the world, great dangers caused by earthquakes cause landfills to rupture. A rupture in a sanitary landfill will lead to catastrophic environmental pollution, such as the contamination of the soil and the vast underground water table. Therefore, in this research, it is suggested to use a reinforced gabion wall in the surrounding environment of sanitary landfills. The implementation of this wall leads to a significant reduction in lateral movements of the landfill and finally a significant reduction in the rupture phenomenon in the landfill.

Also, the behavior of the retaining wall under dynamic load is a less well-known matter. In this study, using ABAQUS software, a number of finite element modeling has been done on a gabion retaining wall reinforced by geogrid. It has been used to perform parametric studies on the performance of retaining wall with gabion cover and geogrid network under different loads from zero to 120 kPa. Due to the similar mechanical behavior between waste and soil, researchers often use the proposed soil models to model the behavior of waste. The influential behavioral parameters of urban solid waste, equivalent to similar soil parameters including density, modulus of elasticity, Poisson's ratio and soil friction angle, are considered as the main variables. According to the obtained results, it was found that the Poisson's ratio parameter of the soil in low overburdens and the soil friction angle in higher overburdens are the factors that lead to more stress changes in the crown of the wall.

**Keywords:** landfill, urban solid waste, retaining wall, gabion wall, geogrid, dynamic analysis.

---

\* Corresponding Author: Fazlollah Soltani  
Email: [soltanifazlollah1967@gmail.com](mailto:soltanifazlollah1967@gmail.com)  
Phone: 09131406758



مقاله پژوهشی

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۱۹

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۷/۰۳

## بررسی رفتار لرزه ای دیوار حائل گابیونی در محیط پیرامونی لندفیل های دفن بهداشتی پسماند جامد شهری

امیرحسین مشایخی مزار<sup>۱</sup>، فضل اله سلطانی\*<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران و نقشه برداری، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، ماهان، کرمان، ایران.

<sup>۲</sup> دانشیار، دانشکده مهندسی عمران و نقشه برداری، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، ماهان، کرمان، ایران.

### چکیده

در دنیا خطرات بزرگی ناشی از زلزله لندفیل ها را دچار بحران گسیختگی می کند. گسیختگی در یک لندفیل بهداشتی منجر به آلودگی های زیست محیطی فاجعه باری، همچون آلودگی خاک و سفره آب زیرزمینی گسترده ایی خواهد شد. لذا در این تحقیق پیشنهاد گردیده که در این گونه لندفیل ها از دیوار گابیونی مسلح شده در محیط پیرامونی لندفیل بهداشتی استفاده گردد. اجرای این دیوار منجر به کاهش چشمگیر حرکات جانبی لندفیل و در نهایت کاهش قابل توجه پدیده گسیختگی در لندفیل می گردد. هم چنین رفتار دیوار حائل تحت بار دینامیکی یک امر کمتر شناخته شده است. در این مطالعه، با استفاده از نرم افزار ABAQUS تعدادی مدل سازی اجزا محدود بر یک دیوار حائل گابیونی مسلح شده توسط ژئوگرید انجام شده است. برای انجام مطالعات پارامتری در زمینه عملکرد دیوار حائل با روکش گابیون و شبکه ژئوگرید، تحت سربارهای مختلف از صفر تا ۱۲۰ کیلوپاسکال استفاده شده است. باتوجه به رفتار مکانیکی مشابه بین پسماند و خاک، لذا محققین جهت مدلسازی رفتاری پسماند از مدل های پیشنهادی خاک، غالباً استفاده می نمایند. پارامترهای رفتاری تاثیرگذار پسماند جامد شهری، معادل پارامترهای خاک مشابهی شامل دانسیته، مدول الاستیسیته، نسبت پواسون و زاویه اصطکاک خاک به عنوان متغیرهای اصلی در نظر گرفته شده اند. با توجه به نتایج به دست آمده، مشخص شد که پارامتر نسبت پواسون خاک در سربارهای کم و زاویه اصطکاک خاک در سربارهای بیشتر عواملی هستند که منجر به ایجاد تغییرات تنش بیشتر در تاج دیوار می شوند.

**کلمات کلیدی:** لندفیل، پسماند جامد شهری، دیوار حائل، دیوار گابیونی، ژئوگرید، تحلیل دینامیکی.

## ۱- مقدمه

در مهندسی عمران دیوار حائل عموماً برای نگهداری پای خاک‌ریزهای کنار جاده یا پایدارسازی سواحل و یا پایدارسازی گود برای جلوگیری از ریزش مورداستفاده قرار می‌گیرد. دیوارهای حائل، یک نوع سازه برای مهندسان ژئوتکنیک هستند که ساخت‌وساز در امتداد شیب‌ها و یا مکان‌هایی با فضای محدود در شهرها را امکان‌پذیر می‌کند.

از آنجایی که امروزه دیوارهای حائل به یکی از اصلی‌ترین و پرکاربردترین سازه‌ها در حوزه راه و ساختمان تبدیل شده‌اند علاوه بر مورد گفته شده، دیوارهای حائل معمولاً برای کنار جاده‌ها، نزدیک ساحل دریا و دامنه‌های کوه نیز طراحی می‌شوند. دیوارهای حائل با توجه به کاربرد دیوار، شرایط محیطی، اقتصادی، طول عمر مفید پروژه و سایر موارد در انواع مختلفی ساخته می‌شوند.

بطور کلی لندفیل‌های دفن بهداشتی پسماند جامد شهری سیستم‌های مسلحی نمی‌باشند و در اثر حرکات جانبی ناشی از بارهای دینامیکی از جمله زلزله دچار خرابی می‌شوند. خرابی اینگونه لندفیل‌ها با توجه به نگهداری حجم عظیمی از پسماند جامد شهری خطرات زیست محیطی زیادی بوجود می‌آورد.

در این تحقیق با توجه به رفتار تقریباً مشابه خاک و پسماند جامد شهری و در نظر گرفتن مدل گسیختگی مشابه لذا فشار جانبی خاک و پسماند معادل در نظر گرفته شده است و در طراحی فشار جانبی پسماند به دیوار را مشابه فشار جانبی خاک در نظر گرفته می‌شود. ویژگی اساسی دیوار حائل این است که بتواند به‌طور پایدار در برابر فشارات جانبی که از سوی مصالح پشت دیوار به وجود می‌آیند، مقاومت کند. از این دیوارها به منظور نگه‌داشتن و کنترل مصالح (خاک‌ریز) در یک سمت دیوار طراحی می‌شوند و از فروریختن، لغزش، یا فرسایش مصالح خاک‌ریز جلوگیری می‌کنند. سازه‌های حائل خاک نظیر دیوارهای حائل، دیوارهای زیرزمین و دیوارهای ساحلی که در مهندسی پی برای حفاظت جداره شیروانی‌های خاکی مورد استفاده قرار می‌گیرند، تحت تأثیر فشارهای رانشی خاک قرار دارند. طرح صحیح این دیوارها ایجاب می‌کند که شناخت دقیقی از فشار جانبی ایجادشده بین خاک و سازه وجود داشته باشد. به‌طور کلی سه نوع فشار جانبی در خاک وجود دارد:

- فشار خاک در حالت سکون: به موقعیتی اشاره دارد که در آن دیوار حائل هیچ‌گونه جابجایی با خاک پشت خود نداشته و سازه

هیچ حرکت مهمی پس از ساخت تجربه نکرده است. این حالت به معنای عدم وجود کرنش ناشی از تنش اضافی است.

- فشار محرک خاک: زمانی که دیوار حرکتی در جهت نیروی وارد از طرف خاک پشت آن داشته باشد، فشار محرک خاک ایجاد

می‌گردد. در این حالت دیوار از خاک پشتش فاصله گرفته و دور شده و فشار در پشت دیوار نسبت به حالت سکون کاهش می‌یابد.

- فشار مقاوم خاک: اگر دیوار برعکس حالت محرک به داخل خاک‌ریز حرکت کند، فشار مقاوم در خاک ایجاد می‌شود. در این

حالت با نزدیک شدن دیوار به توده خاک، فشار خاک در پشت دیوار نسبت به حالت سکون افزایش می‌یابد.

به علت وجود تنش‌های قائم اضافی در خاک و به دنبال آن افزایش فشار جانبی خاک، احتمال اینکه یک دیوار خاک غیرمسلح فرو

بریزد، وجود دارد و در صورتی که از تسلیح‌کننده‌ها استفاده شود، مقداری از تنش‌های اضافی ایجاد شده در خاک در جهت تسلیح بسیج

شده و باعث افزایش مقاومت برشی خاک و پایداری آن می‌گردند. در حال حاضر برای کنترل پایداری دیوارهای خاکی مستعد گسیختگی

و لغزش آن‌ها روش‌های متعددی وجود دارد که یکی از راه‌حل‌های اقتصادی برای جلوگیری از فروپاشی دیوارهای خاکی و پایدارسازی

آن‌ها، استفاده از ژئوسنتتیک‌ها یا ژئوگریدها هم‌زمان با نصب گابیون برای تسلیح شیروانی است که با توجه به ذخایر نفتی عظیم کشور،

امکان تولید انبوه و ارزان فرآورده‌های پلیمری (ژئوسنتتیک‌ها و ژئوگریدها) وجود دارد و در نتیجه یک گزینه مناسب برای پایدارسازی

شیروانی‌های کشورمان است.

دیوارهای گابیونی اغلب به‌عنوان دیوارهای حائل یا دیوارهای بلند و عمودی در محیط‌های صنعتی مانند پل‌ها، خاک‌ریزها و دیوارهای

دریایی استفاده می‌شوند. اجرای دیوارهای گابیونی اغلب به صورت پلکانی یا سراسیمه است تا خاک پشت خود را بهتر حفظ کنند و در

محیط‌های مسکونی، دیوارهای گابیونی به‌عنوان حصار حریم خصوصی یا یک عنصر تزئینی برای محوطه‌سازی در یک باغ یا حیاط ظاهر

می‌شوند بنابراین دیوارهای گابیونی عمدتاً به‌منظور تثبیت خاک در پشت دیوار اجرا می‌شوند، اما می‌توان آن را به‌عنوان دیوار پوششی

نیز اجرا کرد. این دیوار از قفس‌های فولادی پر شده از سنگ رودخانه‌ای یا معدنی ساخته شده است که بسته به ارتفاع دیوار در یک یا

چند ردیف روی هم چیده شده‌اند (شکل ۱). این قفس‌ها به‌صورت یک شبکه شش‌ضلعی گالوانیزه‌ای هستند. این نوع از دیوارهای حائل

از روی هم چیدن قفس‌های گابیونی شکل می‌گیرند و جایگزین مناسبی برای سازه‌های بتنی در زمینه تثبیت خاک ارائه می‌دهند.

دیوارهای حائل گابیونی دارای یک ویژگی ارزشمند هستند که همانند سازه‌های هیدرولیکی جهت احیای زمین، مقدار زیادی آب را از خود عبور می‌دهند و باعث می‌شود تا فشار هیدرواستاتیک هرگز در پشت یا زیر سازه ایجاد نگردد تا باعث ویرانی کل سازه شود در حقیقت قفس‌های گابیون، سازه‌هایی با زهکش آزاد هستند که می‌توانند فشار هیدرواستاتیکی را به شدت کاهش دهند. همچنین حضور جریان آب، باعث ایجاد پوشش گیاهی متنوع در بالای دیوارها می‌شود که با توجه به سازگاری محیط زیستی این دیوارهای سنگی نسبت به بتن، در خاک‌ریزهای رودخانه‌ای که نیاز به یک محیط طبیعی با پتانسیل بالای رشد برای پوشش‌های گیاهی و زندگی اکولوژیکی است، از محبوبیت بیشتری برخوردار هستند.



شکل ۱- نمونه‌ای از دیوار حائل گابیونی

یانگ و همکاران (۲۰۰۹) با نظارت در طول ساخت یک دیوار حائل خاک مسلح در خط راه‌آهن در چین به این نتایج رسیدند که فشار عمودی فونداسیون دیوار خاک مسلح در طول تقویت‌کننده غیرخطی است و مقدار حداکثر در میانه طول تقویت‌کننده است. علاوه بر این مقدار به تدریج در بالا و پایین کاهش می‌یابد و هم چنین فشار جانبی زمین در دیوار خاک مسلح در طول ارتفاع غیرخطی است و مقدار آن کم‌تر از فشار جانبی فعال زمین است [۱]. محی‌الدین و همکاران در اواخر دهه ۲۰۱۳ به بررسی رفتار دیوار با گابیون‌های شش‌ضلعی و مستطیلی پرداختند و دریافتند که میانگین انحرافات بین هر دو دیوار نشان می‌دهد که دیوار با گابیون شش‌ضلعی در مقایسه با نمونه مستطیلی خود تحت نتایج کنترل شده‌تری تغییر شکل می‌دهد. [۲]. وانگ و همکاران نیز در سال ۲۰۱۵ به منظور مطالعه عملکرد دینامیکی دیوار حائل صلب مسلح شده با ژئوگرید با خاک‌ریز ماسه اشباع، مدل‌های تست میز لرزان را در مقیاس ساختند که شامل دیوار حائل صلب مسلح شده با ژئوگرید و دیوار حائل خاکی غیرمسلح بود. مقایسه نتایج مدل‌های تست نشان داد که امواج دینامیکی با مقادیر شتاب بالا و بلندمدت از میدان دور اثرات بیشتری بر رفتار دینامیکی دیوار حائل تقویت‌شده نسبت به میدان نزدیک دارد و ژئوگرید هنوز هم می‌تواند به‌طور مؤثری تغییر شکل دینامیکی دیوار حائل صلب اشباع‌شده را بهبود بخشد [۳].

مکزینگ و همکاران (۲۰۱۷) مدل‌های عددی را توصیف کرده‌اند که برای شبیه‌سازی عملکرد دو دیوار تثبیت‌شده مکانیکی ساخته شده در از میر ترکیه ایجاد شده‌اند. این دیوارها با روکش گابیون با لایه‌های تقویت‌کننده مختلف بر روی یک پایه صلب ساخته شده‌اند که لایه‌های تقویت‌کننده شامل تقویت‌کننده اولیه (ژئوگرید) و تقویت‌کننده ثانویه (توری‌های سیمی) است [۴]. با بررسی‌های ژئو (۲۰۲۰) در زمینه مهندسی ژئوتکنیک، رویکرد نوینی در مدل‌سازی چندمرحله‌ای گریز از مرکز برای تحلیل دیوارهای نگهدارنده خاک معرفی شد. این تکنیک این امکان را می‌دهد که با دقت بالاتری تأثیرات مراحل مختلف ساخت‌وساز را بر استحكام و پایداری دیوارهای خاکی مورد بررسی قرار گیرد. نتایج حاصل از این مطالعات نشان می‌دهند که مدل‌های ساخته شده با این روش، عملکرد بهتری در مقایسه با داده‌های واقعی دارند و می‌توانند در برابر بارهای شدید، مانند نیروهای ناشی از زلزله، مقاومت کنند. این پیشرفت‌ها گامی مهم در افزایش ایمنی و طراحی بهینه‌ی دیوارهای نگهدارنده خاک به شمار می‌روند [۵].

<sup>1</sup> Yang et al.

<sup>2</sup> Liyan et al

<sup>3</sup>Meixiang et al

<sup>4</sup> Xu

دوان<sup>۱</sup> و همکاران نیز در سال ۲۰۲۱ به بررسی دیوار حائل خاک مسلح با یک کیسه زیست‌محیطی پیچیده شده با ژئوگرید انعطاف‌پذیر پرداختند. این مقاله یک مطالعه میدانی از دیوار خاک مسلح با ژئوگرید را ارائه می‌دهد که در آن کرنش ژئوگرید در جداره دیوار که در اکثر مطالعات قبلی نادیده گرفته شده بودند، در طول فرآیند ساخت را بررسی کردند [۶]. در پژوهشی که در سال ۲۰۲۱ توسط آقای لی<sup>۲</sup> و همکارانش انجام شد، تمرکز بر بررسی رفتار دینامیکی دیوارهای حائل خاکی تقویت‌شده با بلوک‌های مدولار بود. این تحقیق که از طریق آزمایش‌های میز دینامیکی اجرا شد، به درک عمیق‌تر از جابجایی‌های جانبی و حالت‌های شکست دیوارها تحت بارگذاری‌های دینامیکی پرداخت. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که دیوارها هم حرکت‌های انتقالی و هم چرخش را تجربه می‌کنند و این حرکت‌ها با افزایش شتاب زمینی حداکثر افزایش می‌یابد [۷].

در مطالعات انجام‌شده توسط وانگ<sup>۳</sup> (۲۰۲۱)، تمرکز بر بهینه‌سازی و تقویت پایداری شیب‌ها در منطقه جنوب گیسلند، ویکتوریا، استرالیا است. این پژوهش، با استفاده از سیستم‌های ترکیبی شامل دیوارهای حفاظتی تقویت‌شده با ژئوگرید رویه‌دار گابیون و سازه‌های حفاظتی شمع، به ارزیابی روش‌های نوین در این حوزه می‌پردازد. رویکرد این مطالعه بر اساس تحلیل‌های المان محدود غیرخطی سه‌بعدی است و به بررسی اثربخشی این سیستم‌ها در تثبیت شیب‌ها می‌پردازد [۸]. شیائو<sup>۴</sup> و همکاران در سال ۲۰۲۳ به بررسی تغییرات شکل جانبی و پایداری دیوارهای خاک مسلح با ژئوسنتتیک طبقه‌ای که عمدتاً در مناطق کوهستانی استفاده می‌شوند، پرداختند [۹]. در این تحقیق پیشنهاد گردیده است دیوارهای حائل در محیط پیرامونی لندفیل‌های دفن بهداشتی پسماند جامد شهری استفاده شود و این موضوع باعث پایداری بیشتر لندفیل در زلزله‌های احتمالی می‌گردد.

## ۲- مدل‌سازی

### ۲-۱- مشخصات مصالح مورد استفاده

برای مدل‌سازی از داده‌های پژوهش ژو (۲۰۲۰) [۵] و کمک پناه و همکاران (۲۰۱۵) [۱۰] استفاده شده است. در تحلیل رفتار بلوک‌های گابیون، مدل مور کولمب به کار رفته است که در حوزه مکانیک خاک به عنوان یک مدل معتبر شناخته می‌شود. به علت ساختار و مواد تشکیل‌دهنده‌ی سخت‌تر گابیون‌ها نسبت به خاک ریزدانه برای توصیف رفتار تنش-کرنش گابیون‌ها از مدل الاستوپلاستیک استفاده شده است. پارامترهای مرتبط با این مدل، از جمله مدول الاستیسیته، نسبت پواسون، چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی در جدول (۱) آورده شده‌اند. تقویت‌کننده‌های مورد استفاده در این پژوهش شامل تقویت‌کننده اولیه (ژئوگرید) و تقویت‌کننده ثانویه (روکش گابیون) در نرم‌افزار ABAQUS به صورت Beam و المان‌های میله‌ای مدل‌سازی شده‌اند. سطح مقطع ژئوگرید  $1 \times 0.024$  متر (به ترتیب عرض و ضخامت) و سطح مقطع روکش گابیون  $1 \times 0.027$  متر (به ترتیب عرض و ضخامت) است. همچنین جدول ۲ خصوصیات تقویت‌کننده‌های مورد استفاده را نشان می‌دهد. برای مدل‌سازی خاک‌ریز و فونداسیون، از مدل دراگر پراگر به‌عنوان یک مدل الاستوپلاستیک استفاده شده است. خصوصیات خاک‌ریز در جدول ۳ نشان داده شده است.

جدول ۱- مشخصات بلوک‌های گابیون [۱۰]

پارامتر	مقدار
Density, $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	2000
Young's modulus, E (MPa)	20
Poisson's ratio, $\nu$	3/0
Friction angle, $\phi$ (°)	45
Cohesion, c (kPa)	560

<sup>1</sup> Duan et al.

<sup>2</sup> Li et al.

<sup>3</sup> Wang et al.

<sup>4</sup>Xiao et al.

جدول ۲- مشخصات مصالح تقویت کننده اولیه و ثانویه [۱۰]

پارامترها	Geogrid	Gabion Tail
(m)Length	5/17	2
(cm)Thickness	24/0	27/0
(MPa) Young's modulus, E	2600	3700
Poisson's Ratio, $\nu$	1/0	1/0

جدول ۳- مشخصات ماسه نوادا [۱۰]

پارامترها	مقدار
Relative density, $D_r$ (%)	90
Mass density, $\rho$ ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	7/1687
Young's modulus, E (MPa)	30
Shear Modulus, G (MPa)	7/11
Poisson's ratio, $\nu$	28/0
Friction angle, $\phi$ ( $^\circ$ )	40
Dilation angle, $\psi$ ( $^\circ$ )	8
Cohesion, c (kPa)	1

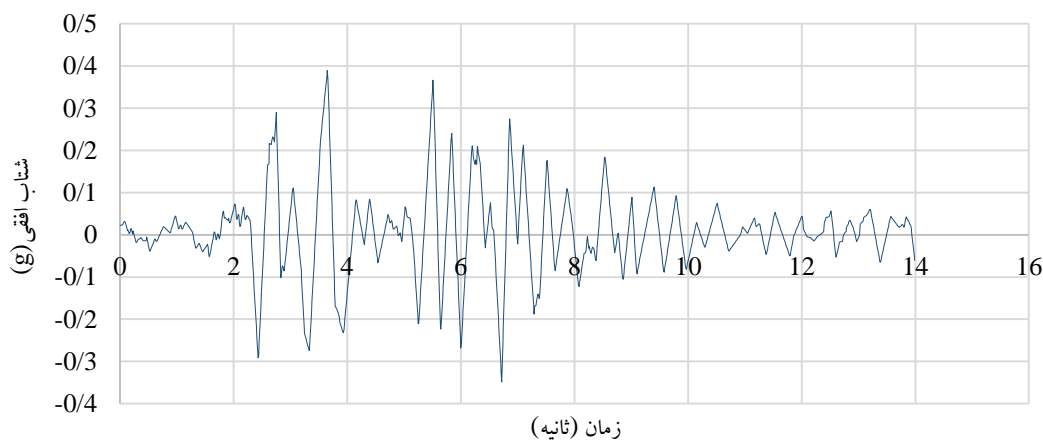
## ۲-۲- فصل مشترک مصالح

در این قسمت اندرکنش بین سطوح خاک و بلوک‌های گابیون و همچنین ارتباط بلوک‌ها با یکدیگر مورد بررسی قرار گرفته است. این اندرکنش‌ها از طریق مکانیزم‌های تماسی نرم‌افزار ABAQUS مدل‌سازی شده‌اند. برای رفتار اندرکنش عمودی (Normal Behavior) از مدل تماس سخت یا Hard contact استفاده شده است. در این مدل، نفوذ بین سطوح تماسی به حداقل می‌رسد و هیچ‌گونه امکان برای انتقال تنش‌های کششی وجود ندارد. به عبارتی دیگر، با نزدیک شدن دو سطح به یکدیگر فشاری بین آن‌ها ایجاد می‌شود که با افزایش نفوذ، این فشار نیز افزایش می‌یابد و پس از آن با کاهش فشار به صفر، نرم‌افزار ABAQUS، جدایش بین سطوح را تشخیص می‌دهد. در قسمت تماس مماسی (Tangential Behavior)، از مکانیزم Penalty در نرم‌افزار ABAQUS استفاده شده است. این روش، با ایجاد نیروهای جریمه در نقاط تماسی که نفوذ وجود دارد، به شبیه‌سازی اندرکنش می‌پردازد. نیروی معکوس ایجاد شده تلاش می‌کند نفوذ را کاهش دهد یا کاملاً از بین ببرد. همچنین، این نیرو به مقدار اصطکاک بین سطوح وابسته است. برای تعیین ضریب اصطکاک، از فرمول  $\mu = \tan(\delta)$  استفاده شده است که در آن  $\delta$  زاویه اصطکاک بوده و برای بلوک‌های گابیون به مقدار ۳۵ درجه تعیین شده است.

در این پژوهش، لایه‌های اولیه مسلح‌کننده یا ژئوگرید به عنوان بخشی مدفون در میان خاک و بلوک‌های گابیون در نظر گرفته شده‌است. این روش که به‌عنوان تکنیک ناحیه مدفون در نرم‌افزار ABAQUS شناخته می‌شود، برای مواقعی استفاده می‌شود که نیاز به مدفون کردن المان‌هایی، مانند تقویت‌کننده‌ها، در المان میزبانی چون خاک وجود دارد. به منظور ارتقاء دقت مدل‌سازی، لایه‌های ثانویه تقویت‌کننده یا Gabion Tail نیز در خاک قرار گرفته و به بلوک‌های گابیون مقید می‌شوند. مدل Unifind sand که توسط ژو (۲۰۲۰) استفاده شده، بر اساس مفاهیم حالت بحرانی و پلاستیسیته یکپارچه برای تحلیل رفتار شن و ماسه طراحی شده است. این مدل قادر به شبیه‌سازی رفتار فشار-تغییر شکل ماسه‌هایی با دانسیته و فشارهای مختلف در شرایط بارگذاری یکنواخت و دوره‌ای می‌باشد و از مفهوم وضعیت بحرانی و پارامتر وضعیت برای توصیف رفتار ماسه استفاده می‌کند. درحالی‌که مدل دراگر-پراگر یک مدل پلاستیک از رفتار خاک است که از دو خط صاف و یک خط بحرانی برای توصیف فضای تنش استفاده می‌کند.

## ۲-۳-صحت سنجی

در این بخش از مطالعه، به صحت سنجی نتایج مدل‌های ساخته شده پرداخته شده است. تحلیل دینامیکی می‌تواند رفتار دقیق‌تری از سازه را در طول زمان و در حین وقوع زلزله نشان دهد و اطلاعات حیاتی را در اختیار مهندسين طراح قرار دهد. به جهت اعمال بار دینامیکی، زلزله کوبه سال ۱۹۹۵ به عنوان زلزله ورودی برای مدل‌سازی به نرم‌افزار اعمال شد. این لرزش با استفاده از ۷۰۰۰ گام با فواصل زمانی ۰/۰۰۲ ثانیه به مدل‌ها اعمال شده است. شکل ۲ حرکت ورودی مورد استفاده در این تحقیق را نمایش می‌دهد که بیشینه شتاب آن به مقدار ۰/۴g بود. به منظور در نظر گرفتن میرایی سیستمی، میرایی رایلی استفاده شده است. میرایی رایلی به‌عنوان یکی از متداول‌ترین روش‌های میرایی مکانیکی در تحلیل‌های دینامیکی شناخته شده است و به‌طور گسترده‌ای در مطالعات مرتبط با پاسخ سازه‌ها و محیط‌های الاستیک به تحریک‌های دینامیکی مورد استفاده قرار می‌گیرد. این نوع میرایی به‌ویژه در مدل‌هایی که در حوزه زمانی عمل می‌کنند و نیازمند میرایی نسبتاً مستقل از فرکانس هستند، اهمیت دارد. علی‌رغم اینکه میرایی رایلی به‌طور تعریفی وابسته به فرکانس است، امکان تنظیم پارامترهای آن به‌گونه‌ای نیز وجود دارد که اثرات وابستگی به فرکانس تا حد امکان کاهش یابد.



شکل ۲- تاریخچه شتاب-زمان زلزله کوبه اعمال شده به مدل‌ها

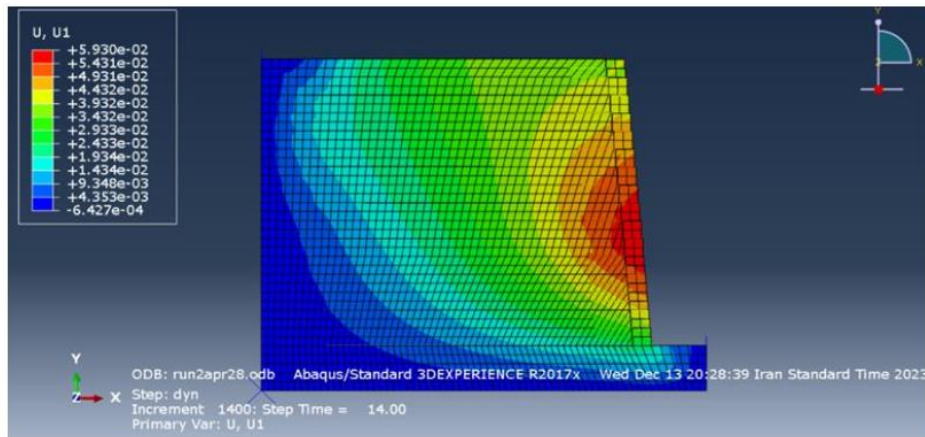
میرایی رایلی ( $\xi$ ) با استفاده از ضریب متناسب با جرم ( $\alpha$ ) و ضریب متناسب با سختی ( $\beta$ ) به همراه سرعت زاویه‌ای ( $\omega$ ) به صورت زیر تعریف شده است [۱۱]:

$$\xi = \frac{\alpha}{2\omega} + \frac{\omega\beta}{2} \quad (1)$$

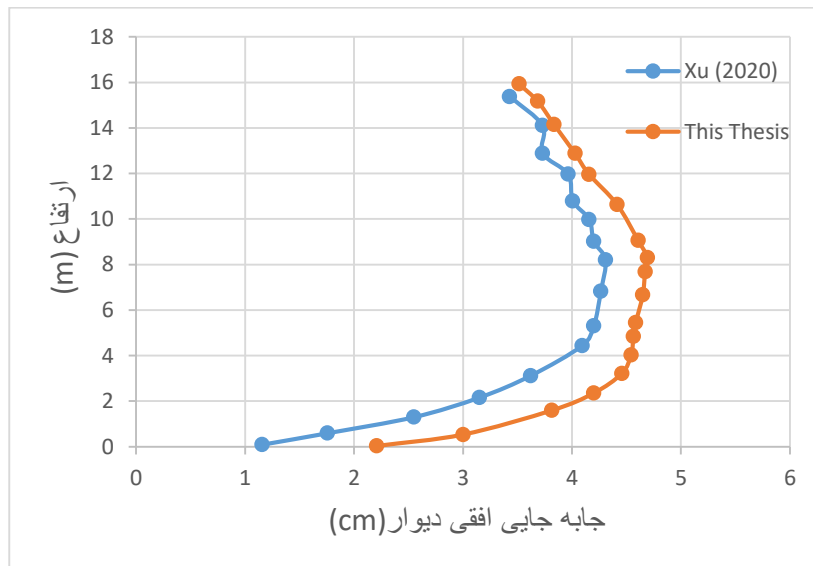
بر اساس نتایج مطالعات پیشین، از جمله تحقیقات انجام‌شده توسط لینگ و همکاران در سال ۲۰۱۰، اعمال میرایی رایلی در محدوده ۵٪ تا ۱۵٪، نتایج قابل قبولی را در آزمایش‌های میز دینامیکی نشان داده است [۱۲]؛ به همین علت، در این پژوهش، استفاده از میرایی به میزان ۱۵٪ در نظر گرفته شده است.

در نرم‌افزار ABAQUS برای مدل‌سازی‌های انجام شده، با توجه به استفاده از مواد تعریف شده توسط کاربر، نیاز است که ضریب متناسب با سختی ( $\beta$ ) به صفر تنظیم شود. بدین جهت، مقدار ورودی برای ضریب متناسب با جرم ( $\alpha$ ) در تمامی شبیه‌سازی‌ها برابر با ۱۳/۶۶ در نظر گرفته شده است.

بر اساس نتایج مطالعه ژو (۲۰۲۰) [۵] حداکثر جابجایی دینامیکی در تراز ارتفاعی ۸ متر از پایه دیوار و مقداری معادل ۴/۳ سانتی‌متر رخ داده است. بر اساس تحلیل‌های دینامیکی انجام شده در این پژوهش مطابق شکل ۴ مشاهده می‌شود، حداکثر جابجایی در تراز ارتفاع تقریباً ۷ متری از پایه دیوار، به اندازه ۵/۳ سانتی‌متر اتفاق افتاده است. این میزان اختلاف می‌تواند به علت استفاده از مدل رفتاری متفاوت باشد اما در عین حال از دقت مناسب و کافی برخوردار هست و نتایج قابل اعتمادی را ارائه می‌کند. در شکل ۳ نیز نمایی از دیوار ساخته شده در نرم‌افزار و کانتور جابجایی افقی دیوار تغییر شکل یافته با گابیون و ژئوگرید به فاصله ۲ متری در تحلیل دینامیکی نشان داده شده است. در شکل ۴ صحت سنجی مدل مشاهده شد.



شکل ۳- کانتور جابجایی افقی دیوار تغییر شکل یافته با گابیون و ژئوگرید به فاصله ۲ متری در تحلیل دینامیکی



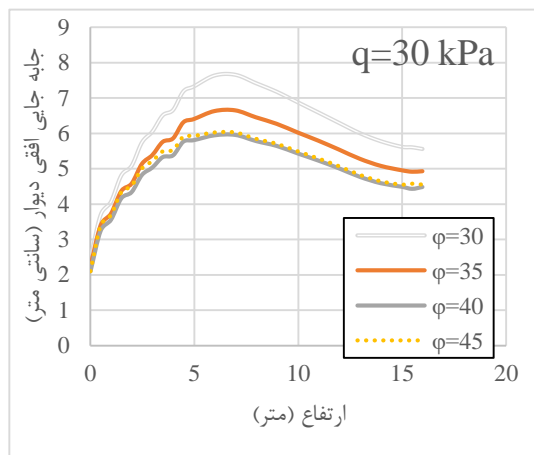
شکل ۴- نمودار جابه‌جایی افقی دیوار در ترازهای ارتفاعی مختلف و صحت سنجی

### ۳- تحلیل و ارزیابی رفتار لرزه‌ای دیوار

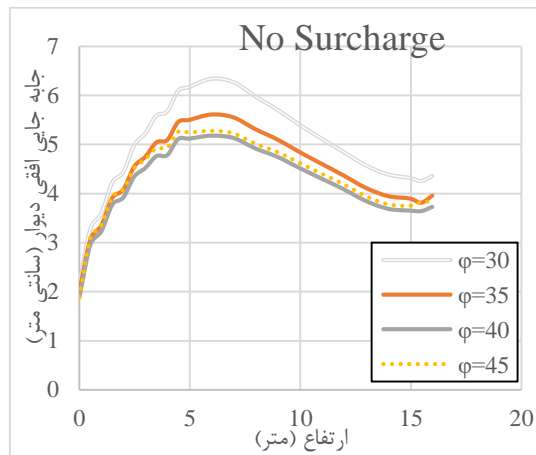
با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS، شبیه‌سازی‌ها در محدوده تنش‌های سربار صفر تا ۱۲۰ کیلوپاسکال با گام‌های ۳۰ کیلوپاسکال انجام گرفته‌است. در نهایت، این بررسی این امکان را می‌دهد که رفتار جداره‌های دیوار مسلح در شرایط واقعی‌تر و متنوع‌تری تحلیل شود و درک بهتری از اثرات پارامترهای ژئوتکنیکی خاک‌ریز بر رفتار جداره دیوار مسلح ارائه دهد.

#### ۳-۱- تأثیر زاویه اصطکاک خاک بر پایداری دینامیکی دیوار

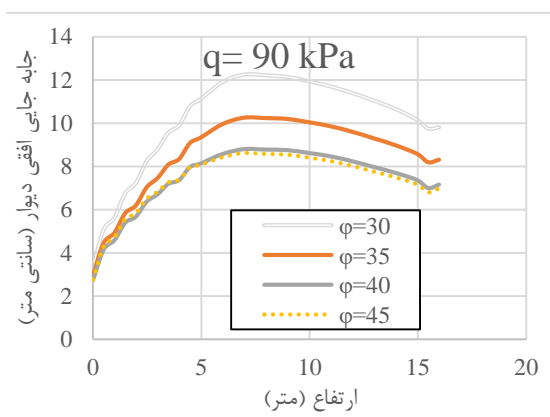
در این قسمت میزان تاثیر‌گذاری تغییر در زاویه اصطکاک داخلی خاک در بارگذاری‌های متفاوت بررسی شده است. همان‌گونه که در نمودارهای شکل ۵ مشاهده می‌شود میزان جابجایی دیوار با کاهش زاویه اصطکاک خاک به‌طور قابل‌توجهی افزایش می‌یابد. نمودارها نشان می‌دهد که در زوایای اصطکاک پایین‌تر، تغییر شکل دیوار به تغییرات تنش حساس‌تر است. مطالعه این پارامتر در سایر پژوهش‌ها کمتر دیده شده است و سعی بر آن شده در این پژوهش دقیقاً تاثیر پارامتر زاویه اصطکاک داخلی خاک مشخص شود که مقادیر اعلام شده در این نمودارها (۳۵،۳۰) یا (۴۵،۴۰) که  $\phi$  یا زاویه اصطکاک داخلی خاک برحسب درجه می‌باشد.



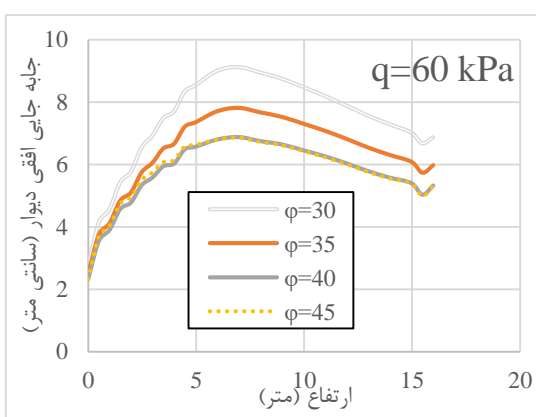
ب



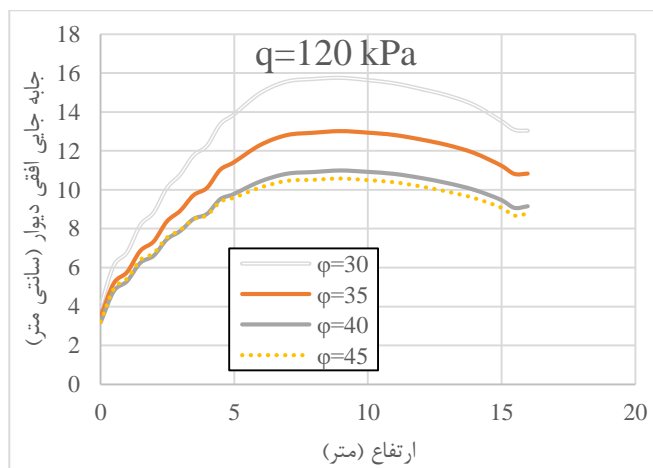
الف



د



ج



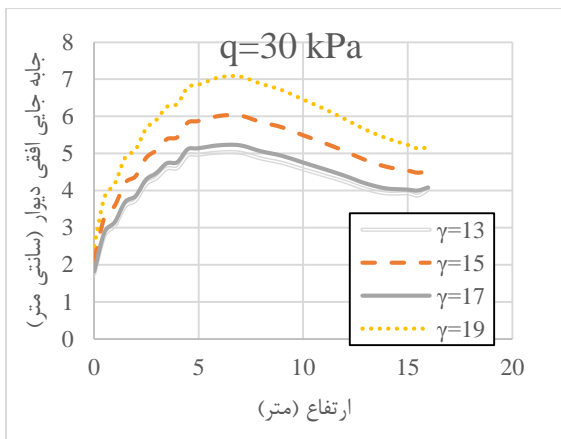
ه

شکل ۵- نمودار تغییر شکل دیوار (متر) در ترازهای مختلف دیوار (متر) در زوایای مختلف اصطکاک خاک برحسب درجه ( $\phi$ ) در تحلیل دینامیکی برای تنش های سربار متفاوت: الف)  $q=0$ ، ب)  $q=30$  kPa، ج)  $q=60$  kPa، د)  $q=90$  kPa و ه)  $q=120$  kPa

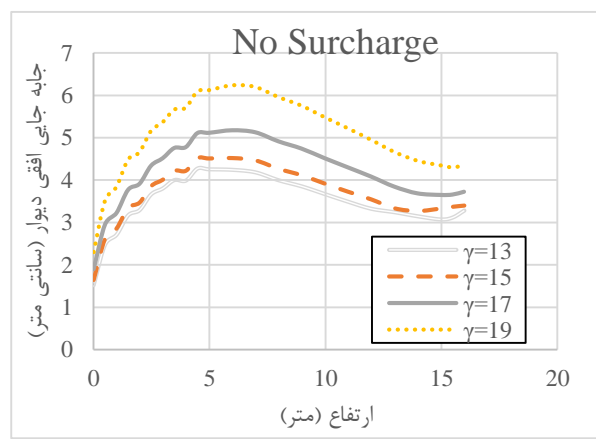
همانگونه که در نمودارها دیده می‌شود افزایش تنش سربار باعث افزایش جابجایی افقی دیوار می‌شود. بر اساس تحلیل‌های انجام‌شده، می‌توان استنباط کرد که اضافه کردن ۳۰ کیلوپاسکال به تنش سربار می‌تواند منجر به افزایش تقریبی ۲۲٪ در حداکثر جابجایی افقی دیوار شود. تحلیل داده‌های ارائه شده در نمودار ۵ حکایت از این دارد که با افزایش تنش سربار، درصد ماکزیمم افزایش جابجایی افقی و تغییر شکل دیوار ناشی از تغییر زاویه اصطکاک خاک نیز افزایش می‌یابد. همچنین افزایش تنش سربار باعث خمیده‌تر شدن منحنی یا در واقع کاهش شیب منحنی‌ها شده که نشان از جابجایی‌های تدریجی می‌باشد. همانگونه که در شکل ۵ مشاهده می‌شود اختلاف زاویه اصطکاک داخلی ۴۰ و ۴۵ درجه بسیار اندک است.

### ۳-۲- تأثیر تغییر دانسیته ی خاک بر پایداری دینامیکی

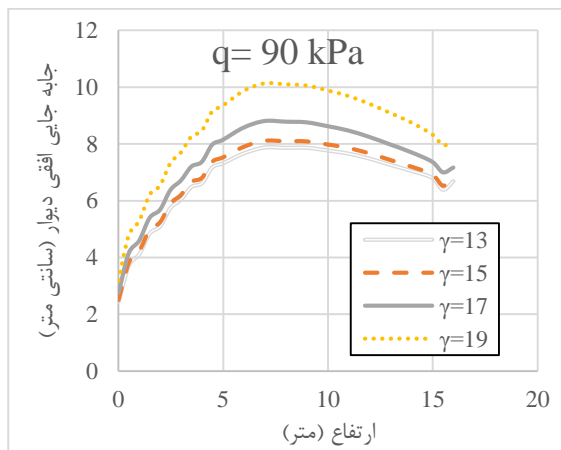
نمودار شکل ۶ که از بررسی رفتار دیوارهای حائل تحت تنش‌های سربار متفاوت به دست آمده، تأثیر تنش‌های سربار و دانسیته خاک را بر جابجایی افقی دیوار نشان می‌دهد. همان‌گونه که از نمودارهای شکل ۶ مشاهده می‌شود با افزایش دانسیته، جابجایی افقی دیوار افزایش می‌یابد که این امر می‌تواند به علت افزایش سختی خاک و افزایش فشار محرک جانبی از سمت خاک باشد که مقادیر اعلام شده در این نمودارها (۱۹، ۱۷، ۱۵، ۱۳) که  $\gamma$  یا دانسیته خاک برحسب کیلونیوتن بر متر مکعب می‌باشد.



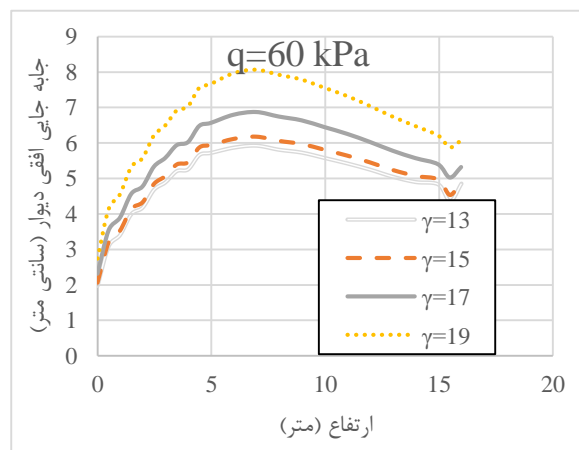
ب



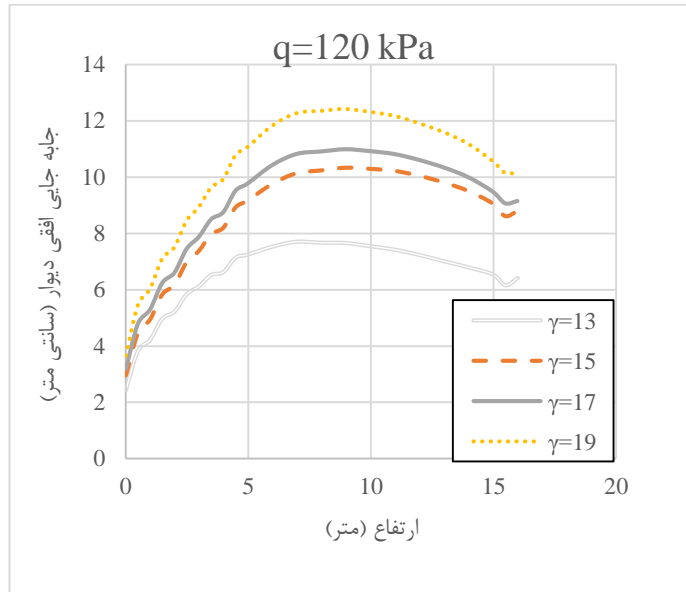
الف



د



ج



ه

شکل ۶- نمودارهای تغییر شکل دیوار (متر) در ترازهای مختلف دیوار (متر) برای مقادیر مختلف دانسیته خاک برحسب کیلونیوتن بر متر مکعب ( $3\gamma$  (kN/m<sup>3</sup>)) در تحلیل دینامیکی برای تنش های سربار متفاوت: الف) بدون سربار، ب)  $q=30$  kPa، ج)  $q=60$  kPa، د)  $q=90$  kPa و ه)  $q=120$  kPa

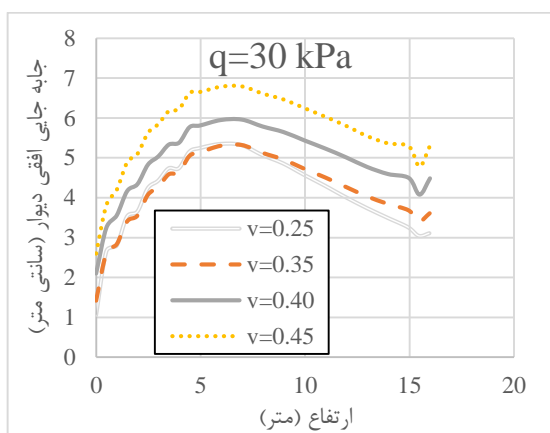
تحلیل نمودار ۶ نشان می‌دهد که با افزایش تنش سربار و تأثیر افزایش دانسیته خاک منجر به کاهش جابجایی افقی و تغییر شکل‌ها شده است اما این نرخ کاهشی در سطوح تنش های سربار با شدت بالا، کمتر شده است. با افزودن هر ۳۰ کیلوپاسکال به تنش های سربار در تحلیل دینامیکی، افزایشی در حدود ۲۶ درصد در جابجایی ها قابل مشاهده است. همچنین افزایش تنش سربار باعث خمیده تر شدن منحنی یا در واقع کاهش شیب منحنی‌ها شده که نشان از جابجایی‌های تدریجی می‌باشد. همانگونه که در شکل ۶ مشاهده می‌شود تأثیر تغییر دانسیته ۱۹ و ۱۷ کیلوگرم بر مترمکعب بسیار اندک است.

### ۳-۳- تأثیر نسبت پواسون خاک بر پایداری دینامیکی دیوار گابیونی در شرایط تنشهای سربار متفاوت

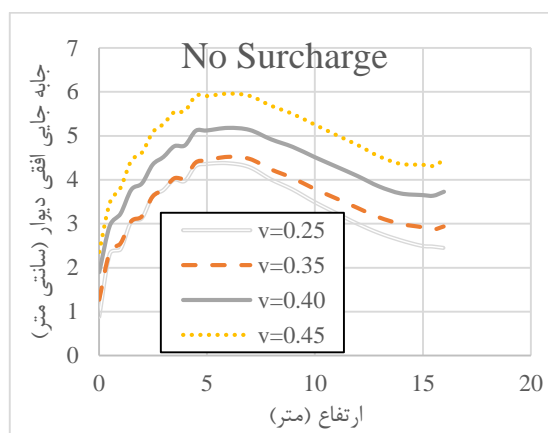
در نمودارهای شکل ۷ تأثیر این تغییرات بر جابجایی دیوار نشان داده شده است. با تحلیل داده‌های موجود در نمودارهای شکل ۷، میتوان استنباط کرد که با افزایش نسبت پواسون خاک، جابجایی افقی دیوارهای حائل، به‌خصوص در تاج، افزایش می‌یابد. این افزایش عمدتاً به دلیل تغییرات حجمی خاک ناشی از فشار جانبی است که با بالا رفتن نسبت پواسون تشدید می‌شود. همچنین مشاهده می‌شود که با افزایش تنش سربار از صفر تا ۱۲۰ کیلوپاسکال، تغییر نسبت پواسون خاک در تحلیل دینامیکی منجر به کاهش جابجایی افقی دیوار از حدود ۳۱٪ به ۱۰٪ می‌شود. همچنین با افزایش هر ۳۰ کیلوپاسکال در تنش سربار باعث افزایش میانگین حدوداً ۲۱ درصد در جابجایی‌های تحلیل دینامیکی می‌شود. با این حال، این افزایش با بالا رفتن تنش سربار کاهش می‌یابد که ممکن است به دلیل افزایش تنش‌های وارده بر دیوار و تغییر خواص خاک باشد.

بررسی شیب در نمودار شکل ۷ نشان می‌دهد تأثیر افزایش نسبت پواسون خاک بر کاهش درصد اختلاف جابجایی افقی دیوار یا تغییر شکل جداره است. این کاهش در تنش سربار با شدت بالا با سرعتی کمتر از تنش سربار با شدت پایین رخ می‌دهد که نشان می‌دهد تأثیر افزایش نسبت پواسون بر کاهش جابجایی‌های جداره دیوار در شرایط تنش‌های سربار بالا به‌طور نسبی محدودتر است. همچنین افزایش تنش سربار باعث خمیده تر شدن منحنی یا در واقع کاهش شیب منحنی‌ها شده که نشان از جابجایی‌های تدریجی می‌باشد. در نمودارهای شکل ۷ نسبت به نمودارهای پیشین شیب تندتری مشاهده می‌شود که این شیب تندتر نشان‌دهنده حساسیت بیشتر ماکزیمم

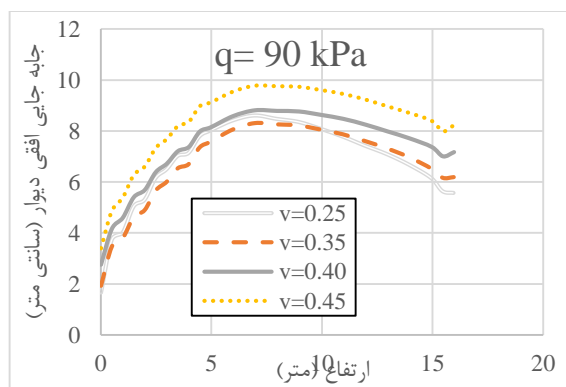
جابجایی جداره به نسبت پواسون‌های بالاتر است. همانگونه که در نمودارهای موجود در شکل ۷ مشاهده می‌شود تاثیر تغییر نسبت پواسون از ۰/۳۵ به ۰/۴۵ بسیار اندک است.



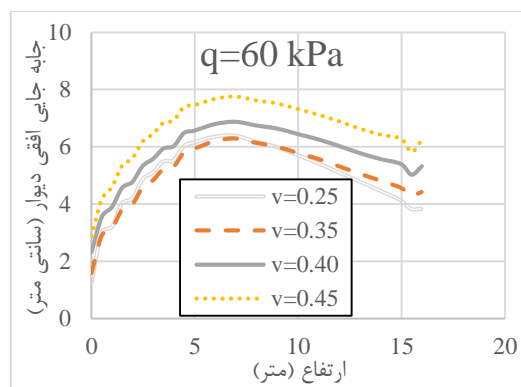
ب



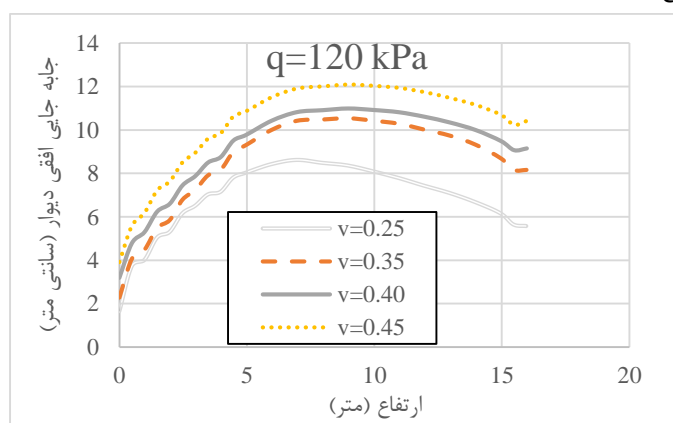
الف



د



ج

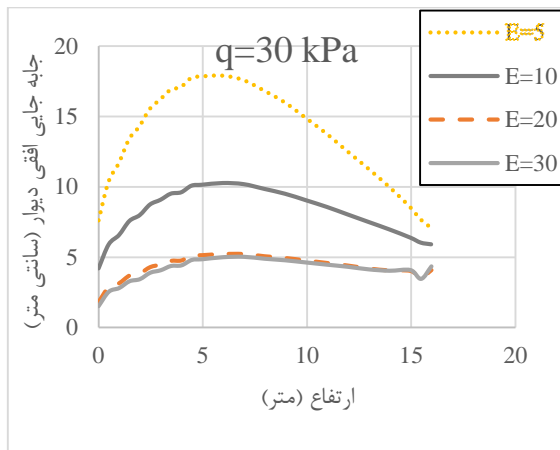


ه

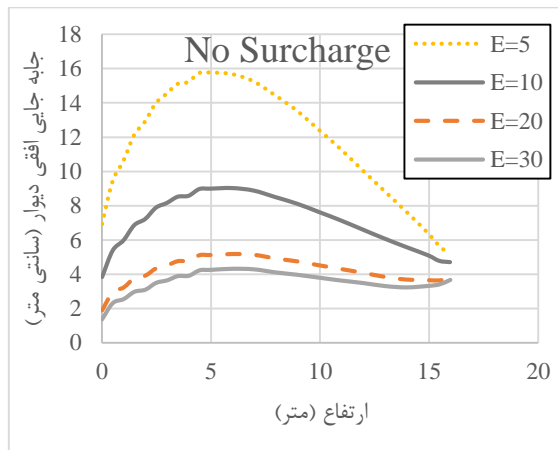
شکل ۷- نمودارهای تغییر شکل دیوار (متر) در ترازهای مختلف دیوار (متر) برای مقادیر مختلف نسبت پواسون خاک (v) در تحلیل دینامیکی و تنش های سربار متفاوت: الف) بدون سربار، ب)  $q=30 \text{ kPa}$ ، ج)  $q=60 \text{ kPa}$ ، د)  $q=90 \text{ kPa}$  و ه)  $q=120 \text{ kPa}$

### ۳-۴- تأثیر مدول الاستیسیته خاک بر پایداری دینامیکی دیوار مسلح به ژئوگرید و گابیون تحت تنش های سربار متفاوت

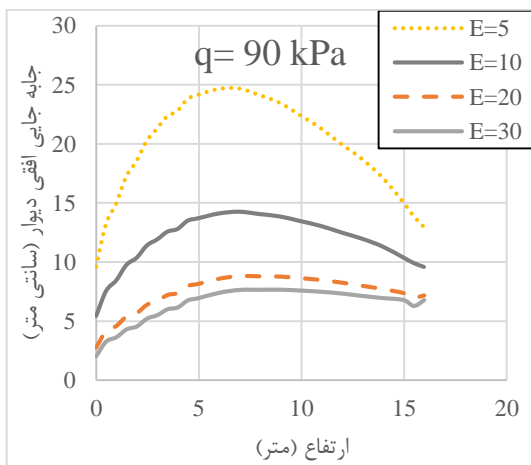
با توجه به تحلیل نمودارهای شکل ۸ مشاهده می شود که در تمامی تحلیل ها با افزایش مدول الاستیسیته خاک، میزان جابجایی افقی دیوار کاهش می یابد. این اتفاق می تواند به این علت باشد که مصالح با سختی بیشتر (مشخص شده با مقدار بالاتر  $E$ )، مقاومت بیشتری در برابر تغییر شکل از خود نشان می دهند. نمودار ۸ نشان می دهد که در تحلیل لرزه ای رابطه بین مدول الاستیسیته خاک و بیشینه جابجایی دیوار غیرخطی است و همچنین، در خاک با مدول الاستیسیته پایین تر، تغییرات نسبتاً کوچک در مدول می تواند منجر به تغییرات قابل توجهی در جابجایی جداره شود به معنای دیگر نرخ کاهش جابجایی جداره در مدول الاستیسیته های پایین خاک، بیشتر است و با افزایش مدول الاستیسیته خاک این نرخ کاهش جابجایی جداره نیز کاهش می یابد. در تنش های بالاتر اثر تغییر مدول الاستیسیته مشهودتر است. همان گونه که از شکل ۸ مشخص است در شرایط بدون تنش سربار، افزایش ۲۷۴٪ در تغییر جابجایی دیوار مشاهده می شود که با افزایش تنش سربار تغییر شکل دیوار روند کاهشی دارد و تا تنش سربار ۱۲۰ کیلوپاسکال ۶۴٪ کاهش یافته است در حالی که هیچ نقطه اوجی در شرایط تنش سربار ۳۰ کیلوپاسکال در نمودار دیده نمی شود. همچنین مشاهده می شود که افزایش هر ۳۰ کیلوپاسکال در تنش سربار باعث افزایش میانگین ۱۹/۵ درصدی در جابجایی افقی جداره دیوار می شود. همانگونه که در شکل ۸ مشاهده می شود تأثیر تغییر مدول الاستیسیته از ۲۰ به ۳۰ بسیار اندک است که مقادیر اعلام شده در این نمودار ها (۵، ۱۰، ۲۰، ۳۰) که مدول الاستیسیته خاک (e) برحسب مگاپاسکال می باشد.



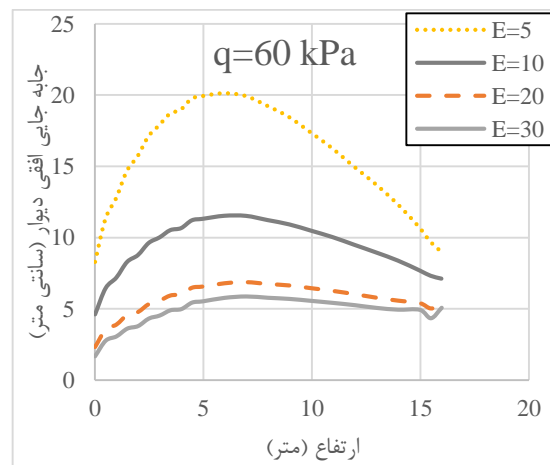
ب



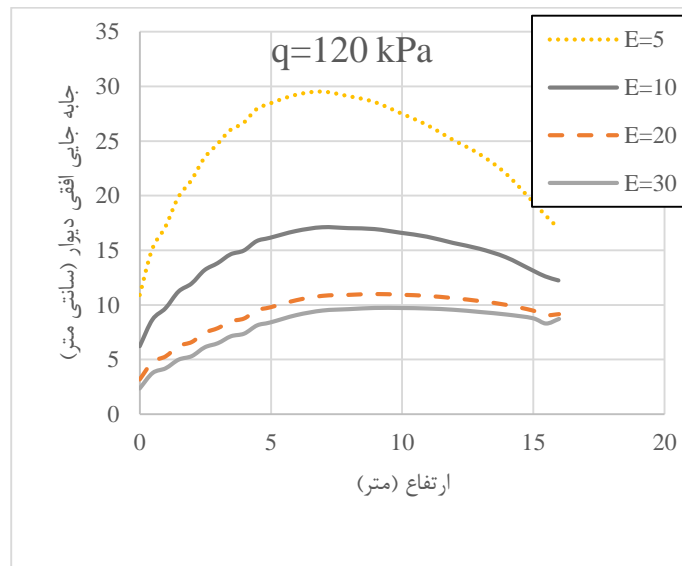
الف



د



ج

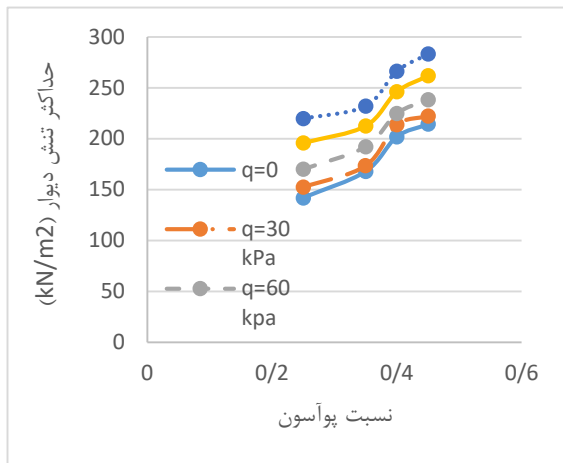


ه

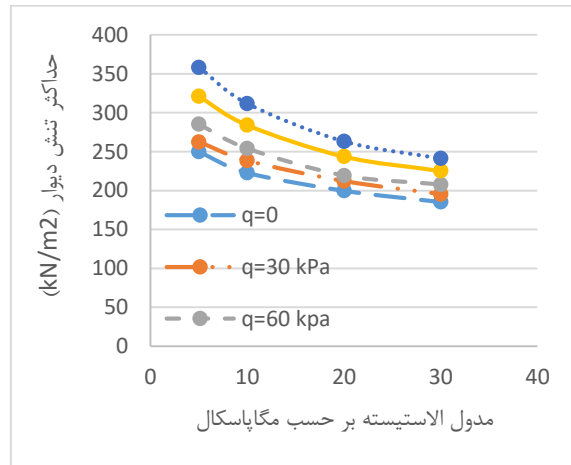
شکل ۸- نمودارهای تغییر شکل دیوار در ترازهای مختلف دیوار برای مقادیر مختلف مدول الاستیسیته خاک (Mpa) در تحلیل دینامیکی و تنش های سربار متفاوت: الف) بدون سربار، ب)  $q=30$  kPa، ج)  $q=60$  kPa، د)  $q=90$  kPa و ه)  $q=120$  kPa

### ۳-۵- تأثیر پارامترهای اساسی خاک بر تنش دیوار گابیونی

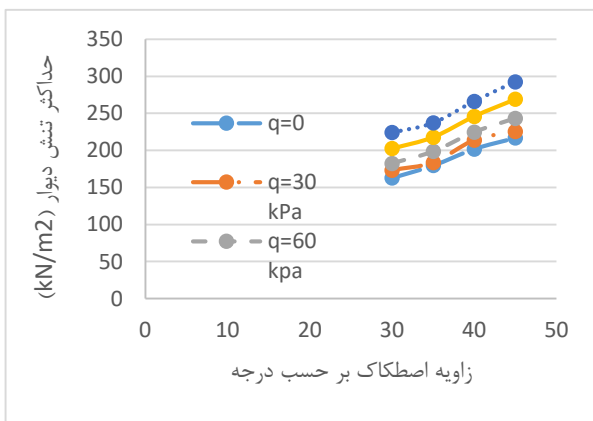
در این بخش از پژوهش به بررسی و تحلیل ماکزیمم تنش وارد بر جداره دیوارهای مسلح به ژئوگرید و گابیون پرداخته می‌شود. درک محل وقوع بیشترین تنش در دیوارهای حائل از اهمیت بالایی برخوردار است چرا که این نقاط می‌تواند به عنوان نقطه ضعف دیوار در برابر فشارهای خاک باشند و ممکن است از همین نقاط تخریب شروع شود. بر اساس مدل‌سازی‌های انجام شده، مشاهده می‌شود که تنش ماکزیمم در جداره‌های دیوار حائل عموماً در نزدیکی پایه دیوار رخ می‌دهد. بر اساس شکل ۹ افزایش دانسیته خاک، افزایش زاویه اصطکاک داخلی خاک و افزایش نسبت پواسون و کاهش مدول الاستیسیته با افزایش تنش وارد بر پایه دیوار مرتبط است. همچنین می‌توان دید که اثر تغییر تنش سربار در هر گام ۳۰ کیلوپاسکالی تا حد ۶۰ کیلوپاسکال تغییرات کمتری ایجاد کرده است اما از ۶۰ کیلوپاسکال به ۹۰ کیلوپاسکال و همچنین از ۹۰ کیلوپاسکال به ۱۲۰ کیلوپاسکال تغییرات بیشتری دیده می‌شود. با بررسی نمودارهای شکل ۹ میتوان دریافت که با افزایش تنش سربار از صفر تا ۱۲۰ کیلوپاسکال، تغییر مدول الاستیسیته منجر به افزایش تنش افقی پای دیوار از حدود ۳۵ درصد به ۴۸ درصد افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش تنش سربار از صفر تا ۱۲۰ کیلوپاسکال، تغییر نسبت پواسون خاک منجر به از حدود ۵۲ درصد به ۲۸ درصد کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش تنش سربار از صفر تا ۱۲۰ کیلوپاسکال، تغییر دانسیته خاک منجر به کاهش از حدود ۲۱٪ به ۱۴٪ کاهش می‌شود. تغییر زاویه اصطکاک خاک منجر به افزایش از ۲۹٪ به ۳۲٪ است که نشان می‌دهد تغییر زاویه اصطکاک در تنش‌های متفاوت تأثیر یکسانی دارد. در نهایت، طبق نتایج به دست آمده از تنش افقی دیوار در پژوهش حاضر، پارامتر نسبت پواسون خاک در بارهای کم و زاویه اصطکاک در بارهای زیاد باعث ایجاد تغییرات بیشتر در تنش پایه دیوار می‌شوند. همچنین مدول الاستیسیته کمترین تأثیر را بر روی تنش دیوار دارد. با بررسی داده‌های ارائه شده در شکل ۹ با افزایش تنش سربار تأثیر افزایش نسبت پواسون خاک (از ۰/۲۵ به ۰/۴۵) بر تغییر تنش افقی پایه دیوار با نرخ کمی کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش تنش سربار، تأثیر کاهش مدول الاستیسیته خاک (از ۳۰ Mpa به ۵ Mpa) بر تنش‌های افقی افزایش می‌یابد اما از سربار ۴۰ کیلوپاسکال بالاتر با نرخ ثابتی پیش می‌رود. از سوی دیگر، با افزایش تنش سربار تأثیر افزایش دانسیته (از ۱۳ kN/m<sup>3</sup> به ۱۹ kN/m<sup>3</sup>) بر تغییر تنش های افقی افزایش می‌یابد. در نهایت، مشاهده می‌شود که با افزایش تنش سربار تأثیر افزایش زاویه اصطکاک داخلی خاک (از ۳۰ درجه به ۴۵ درجه) با یک روند ثابت باعث افزایش تنش حداکثر می‌شود. همانگونه که از شکل ۹ مشاهده می‌شود رشد تغییرات در سربارهای کم بسیار اندک و در سربارهای بیشتر محسوس‌تر است.



ب



الف



د



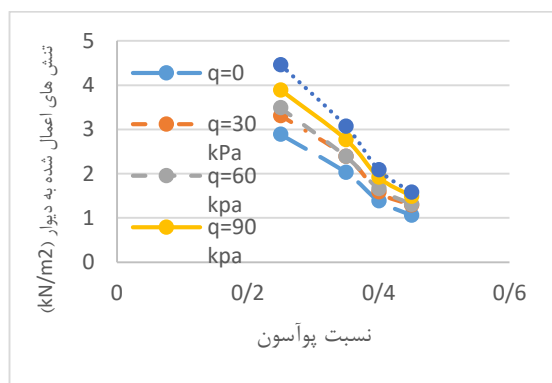
ج

شکل ۹- تنش حداکثر در پایه دیوار ناشی از تنش‌های سربار متفاوت در تحلیل دینامیکی و متأثر از تغییر در پارامترهای خاک: الف) مدول-الاستیسیته، ب) نسبت پواسون، ج) دانسیته ی خاک و د) زاویه اصطکاک

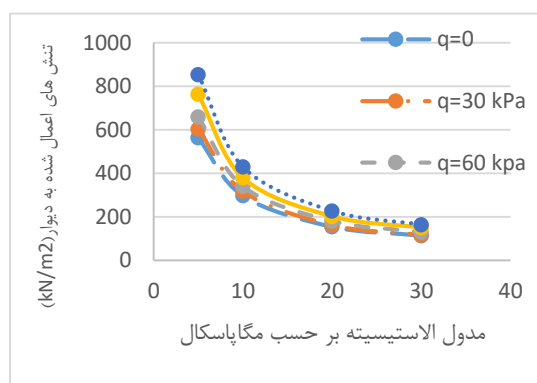
### ۳-۶- تأثیر پارامترهای اساسی خاک بر نشست پایه دیوار گابیونی در شرایط تنش سربار متفاوت تحت تحلیل

#### دینامیکی

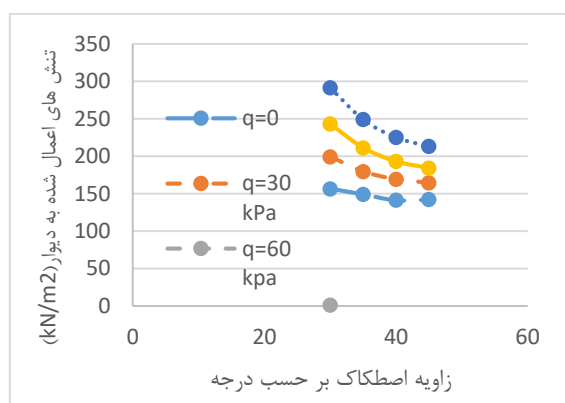
در این بخش بررسی دقیق ماکزیمم نشست در پای دیوار پس از وقوع زلزله انجام شده است. نشست دینامیکی که عمدتاً نتیجه بارگذاری‌های دینامیکی مانند زلزله است، می‌تواند تغییرات ناگهانی و شدیدی در تنش‌های خاک ایجاد کند که ایمنی سازه را تحت تأثیر قرار می‌دهد. همان‌گونه که در شکل ۱۰ دیده می‌شود افزایش دانسیته خاک و کاهش زاویه اصطکاک داخلی خاک، مدول الاستیسیته و نسبت پواسون با افزایش نشست پای دیوار مرتبط است. همان‌گونه که از شکل ۱۰ مشاهده می‌شود رشد تغییرات در سربارهای کم بسیار اندک و در سربارهای بیشتر محسوس‌تر است.



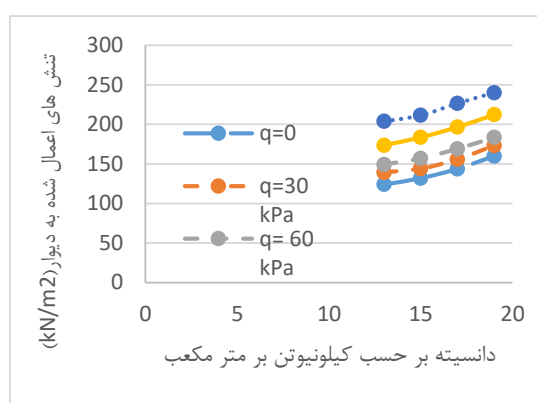
ب



الف



د



ج

شکل ۱۰- نشست پای دیوار ناشی از تنشهای سربار متفاوت در تحلیل دینامیکی و متأثر از تغییر در پارامترهای خاک: الف) مدول الاستیسیته، ب) نسبت پوآسون، ج) دانسیته ی خاک و د) زاویه اصطکاک

همان گونه که از شکل ۱۰ مشاهده می شود با افزایش تنش از صفر تا ۳۰ کیلوپاسکال نشست پای دیوار از ۴۵۳٪ به ۴۱۰٪ کاهش می یابد. با افزایش تنش از صفر تا ۱۲۰ کیلوپاسکال نشست پایه دیوار از ۱۶۱٪ در تنش ۴۰ کیلوپاسکال به نقطه اوج خود ۱۶۵٪ می رسد و سپس تا ۱۶۲٪ کاهش می یابد. همچنین افزایش دانسیته منجر به کاهش از ۲۸٪ به ۱۹٪ کاهش زاویه اصطکاک داخلی خاک نشست پای دیوار از ۱۱٪ به ۳۷٪ افزایش می یابد. طبق نتایج به دست آمده از تحلیل های دینامیکی نشست پای دیوار پارامتر نسبت پوآسون خاک بیشترین تأثیر و زاویه اصطکاک داخلی خاک کمترین تأثیر را بر نشست دارد.

#### ۴- نتیجه گیری

اهداف تحقیق در مرحله اول شامل بررسی پایداری دیوار حائل به همراه گابیون و آرماتور تقویتی ثانویه و تعیین مؤثرترین پارامترهای خاک در پایداری دیوار گابیونی تحت بار دینامیکی است.

در این بخش نتایج به دست آمده از این پژوهش خلاصه شده و نتیجه گیری ارائه می شود.

- جابجایی افقی جداره دیوار دارای ارتباط مستقیمی با سربار روی دیوار است و با افزایش مقدار سربار، افزایش جابجایی افقی نیز قابل مشاهده است. طبق نتایج به دست آمده از جابجایی افقی جداره دیوار در این پژوهش پارامتر مدول الاستیسیته خاک بیشترین تأثیر و در مقابل، زاویه اصطکاک داخلی خاک کمترین تأثیر را بر جابجایی جداره دیوار دارد.
- افزایش تنش سربار باعث افزایش جابجایی افقی دیوار می شود. بر اساس تحلیل های انجام شده، می توان استنباط کرد که اضافه کردن ۳۰ کیلوپاسکال به تنش سربار می تواند منجر به افزایش تقریبی ۲۲٪ در حداکثر جابجایی افقی دیوار شود. که ناشی از تاثیر تغییر پارامترهای رفتاری خاک تحت سربارهای متفاوت می باشد.

- افزایش تنش سربار باعث خمیده‌تر شدن منحنی یا در واقع کاهش شیب منحنی‌ها شده که نشان از جابجایی‌های تدریجی می‌باشد.
- با افزایش دانسیته، جابجایی افقی دیوار افزایش می‌یابد که این امر می‌تواند به علت افزایش سختی خاک و افزایش فشار- محرک جانبی از سمت خاک باشد.
- با افزایش تنش سربار و تأثیر افزایش دانسیته خاک منجر به کاهش جابجایی افقی و تغییر شکل‌ها شده است اما این نرخ کاهشی در سطوح تنش‌های سربار با شدت بالا، کمتر شده است. با افزودن هر ۳۰ کیلوپاسکال به تنش‌های سربار در تحلیل دینامیکی، افزایشی در حدود ۲۶ درصد در جابجایی‌ها که ناشی از تأثیر تغییر دانسیته خاک تحت سربارهای متفاوت قابل مشاهده است. همچنین (اشکال ۵،۶،۷،۸) افزایش تنش سربار باعث خمیده‌تر شدن منحنی یا در واقع کاهش شیب منحنی‌ها شده که نشان از جابجایی‌های تدریجی می‌باشد.
- با افزایش تنش سربار از صفر تا ۱۲۰ کیلوپاسکال، تغییر نسبت پواسون خاک در تحلیل دینامیکی منجر به کاهش جابجایی افقی دیوار از حدود ۳۱٪ به ۱۰٪ می‌شود. افزایش هر ۳۰ کیلوپاسکال در تنش سربار باعث افزایش میانگین حدوداً ۲۱ درصد در جابجایی‌های تحلیل دینامیکی می‌شود. با این حال، این افزایش با بالا رفتن تنش سربار کاهش می‌یابد که ممکن است به دلیل افزایش تنش‌های وارده بر دیوار و تغییر خواص خاک باشد.
- نتایج نشان می‌دهد که در تحلیل لرزه‌ای رابطه بین مدول الاستیسیته خاک و بیشینه جابجایی دیوار غیرخطی است و همچنین، در خاک با مدول الاستیسیته پایین‌تر، تغییرات نسبتاً کوچک در مدول می‌تواند منجر به تغییرات قابل توجهی در جابجایی جداره شود به معنای دیگر نرخ کاهش جابجایی جداره در مدول الاستیسیته‌های پایین خاک، بیشتر است و با افزایش مدول الاستیسیته خاک این نرخ کاهش جابجایی جداره نیز کاهش می‌یابد. در تنش‌های بالاتر اثر تغییر مدول الاستیسیته مشهودتر است.
- در شرایط بدون تنش سربار، افزایش ۲۷۴٪ در تغییر جابجایی دیوار مشاهده می‌شود که با افزایش تنش سربار تغییر شکل دیوار روند کاهشی دارد و تا تنش سربار ۱۲۰ کیلوپاسکال ۶۴٪ کاهش یافته است درحالی‌که هیچ نقطه اوجی در شرایط تنش سربار ۳۰ کیلوپاسکال در نمودار دیده نمی‌شود. همچنین مشاهده می‌شود که افزایش هر ۳۰ کیلوپاسکال در تنش سربار باعث افزایش میانگین ۱۹/۵ درصدی در جابجایی افقی جداره دیوار می‌شود.
- با افزایش تنش سربار از صفر تا ۱۲۰ کیلوپاسکال، تغییر مدول الاستیسیته منجر به افزایش تنش افقی پای دیوار از حدود ۳۵ درصد به ۴۸ درصد افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش تنش سربار از صفر تا ۱۲۰ کیلوپاسکال، تغییر نسبت پواسون خاک منجر به از حدود ۵۲ درصد به ۲۸ درصد کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش تنش سربار از صفر تا ۱۲۰ کیلوپاسکال، تغییر دانسیته خاک منجر به کاهش از حدود ۲۱٪ به ۱۴٪ کاهش می‌شود. تغییر زاویه اصطکاک خاک منجر به افزایش از ۲۹٪ به ۳۲٪ است که نشان می‌دهد تغییر زاویه اصطکاک در تنش‌های متفاوت تأثیر یکسانی دارد.
- طبق نتایج به دست آمده از تنش افقی دیوار در پژوهش حاضر، پارامتر نسبت پواسون خاک در بارهای کم و زاویه اصطکاک در بارهای زیاد باعث ایجاد تغییرات بیشتر در تنش پایه دیوار می‌شوند. همچنین مدول الاستیسیته کمترین تأثیر را بر روی تنش دیوار دارد. با افزایش تنش سربار تأثیر افزایش نسبت پواسون خاک (از ۰/۲۵ به ۰/۴۵) بر تغییر تنش افقی پایه دیوار با نرخ کمی کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش تنش سربار، تأثیر کاهش مدول الاستیسیته خاک (از ۳۰ Mpa به ۵ Mpa) بر تنش‌های افقی افزایش می‌یابد اما از سربار ۴۰ کیلوپاسکال بالاتر با نرخ ثابتی پیش می‌رود. از سوی دیگر، با افزایش تنش سربار تأثیر افزایش دانسیته (  $13 \text{ kN/m}^3$  به  $19 \text{ kN/m}^3$ ) بر تغییر تنش‌های افقی افزایش می‌یابد. در نهایت، مشاهده می‌شود که با افزایش تنش سربار تأثیر افزایش زاویه اصطکاک داخلی خاک (از ۳۰ درجه به ۴۵ درجه) با یک روند ثابت باعث افزایش تنش حداکثر می‌شود.
- با افزایش تنش از صفر تا ۳۰ کیلوپاسکال نشست پای دیوار از ۴۵٪ به ۴۱٪ کاهش می‌یابد. با افزایش تنش از صفر تا ۱۲۰ کیلوپاسکال نشست پایه دیوار از ۱۶۱٪ در تنش ۴۰ کیلوپاسکال به نقطه اوج خود ۱۶۵٪ میرسد و سپس تا ۱۶۲٪ کاهش می‌یابد. همچنین افزایش دانسیته منجر به کاهش از ۲۸٪ به ۱۹٪ کاهش می‌یابد. کاهش زاویه اصطکاک داخلی خاک نشست پای دیوار از ۱۱٪ به ۳۷٪ افزایش می‌یابد.

- طبق نتایج به دست آمده از تحلیل های دینامیکی نشست پای دیوار پارامتر نسبت پواسون خاک بیشترین تأثیر و زاویه اصطکاک داخلی خاک کمترین تأثیر را بر نشست دارد.

#### ۵- منابع

1. Yang, G., Zhang, B., Lv, P., Zhou, Q., (2009) "Behavior of geogrid reinforced soil retaining wall with concrete-rigid facing." *Geotextiles and Geomembranes*, 27(5): 350-356.
2. Ramli, M., Karasu, T., Eethar Thanon. D., (2013) "The stability of gabion walls for earth retaining structures." *Alexandria Engineering Journal*, 52(4): 705-710.
3. Wang, L., Chen, G., Chen, S., (2015) "Experimental study on seismic response of geogrid reinforced rigid retaining walls with saturated backfill sand." *Geotextiles and Geomembranes*, 43(1): 35-45
4. Gu, M., Collin, J.G., Han, J., Zhang, Z., Tanyu, B.F., Leshchinsky, D., Ling, H.I., Rimoldi, P., (2017) "Numerical analysis of instrumented mechanically stabilized gabion walls with large vertical reinforcement spacing." *Geotext. Geomembranes* 45(4), 294 -306.
5. Xu, L., (2020) "Centrifuge Modeling and Numerical Analysis of Geosynthetic- Reinforced Soil Retaining Walls Having Different Facings", Doctoral Dissertation, Columbia University, Graduate school of art and science.
6. Duan, J., Yang, G., Lin, Y., Cheng, X., Dai, Z. (2021) "Experimental investigation of a reinforced soil retaining wall with a flexible geogrid-wrapped ecological bag facing", *Geotextiles and Geomembranes*, 49(1): 19-31
7. Shen, Ch., Fan, K., Liu, S., Wang, L., Lai, Zh., Yuan, W. (2021) "A simple unified stress-strain model for geotextile-wrapped soils", *Geotextiles and Geomembranes*, 49(3), 297-706
8. wang, Y., Smith, J., Nazem, M., (2021) "Optimization of a Slope-Stabilization System Combining Gabion-Faced Geogrid-Reinforced Retaining Wall with Embedded Piles". *KSCE Journal of Civil Engineering*, 25(1): 4535-4551
9. Xiao, Ch., Gao, Sh., Han, J., Ding, L., (2023) "Lateral facing deformation versus factor of safety for geosynthetic-reinforced soil walls in a tiered configuration", *Transportation Geotechnics*, 41: 101018.
10. Komak Panah, A., Yazdi, M., Ghalandarzadeh, A. (2015) "Shaking table tests on soil retaining walls reinforced by polymeric strips", *Geotextiles and Geomembranes*, 43(2): 148-165.
11. Clough, R. W., Penzien, J., (1975), *Dynamics of structures*, McGrawHill, New York
12. Ling, I., Yang, S., Leshchinsky, D., Liu, H., Burke, C., (2010) "Finite-element simulations of full-scale modular-block reinforced soil retaining walls under earthquake loading", *Journal of Engineering Mechanics*., 136(5): 653-661