

## مقایسه عددی عملکرد دیوار حائل وزنی با دیوار خاک مسلح در برابر بارگذاری انفجار

محمدحسن بازیار<sup>۱\*</sup>، مسعود رابطی مقدم<sup>۲</sup>، سجاد قلی پور<sup>۳</sup>

۱- استاد، ۲- دانشجوی دکتری ژئوتکنیک و ۳- کارشناس ارشد ژئوتکنیک دانشگاه علم و صنعت ایران

(دریافت: ۱۳۹۱/۰۲/۰۹، پذیرش: ۱۳۹۱/۱۰/۱۹)

### چکیده

در مقاله حاضر، دو نوع از دیوارهای حائل مرسوم در پروژه‌های عمرانی (دیوار حائل وزنی و خاک مسلح) در دو ارتفاع مختلف مدنظر قرار گرفته و میزان تغییر شکل و همچنین مدهای تغییر شکل دیوارها در اثر بارگذاری‌های مختلف انفجار به کمک تحلیل عددی توسط نرم‌افزار FLAC-2D مورد مقایسه قرار گرفته است. در تمامی تحلیل‌های انجام شده مشاهده گردید که دیوارهای خاک مسلح عملکرد به مراتب بهتری (تغییر شکل‌های کمتر) نسبت به دیوارهای وزنی نشان می‌دهند. به علاوه مدهای تغییر شکل دو نوع دیوار متفاوت از یکدیگر بوده به طوری که برای دیوارهای وزنی مد غالب تغییر شکل، مد واژگونی، و برای دیوارهای خاک مسلح، برحسب شرایط بارگذاری و ارتفاع دیوار، مدهای تغییر شکل از شکم دادگی دیوار تا واژگونی آن متغیر است. همچنین نتیجه‌گیری شد که پارامتر نسبت میرایی خاک و فاصله انفجار از دیوار به شدت تغییر شکل دیوار در اثر انفجار را تحت تأثیر قرار می‌دهند.

**کلیدواژه‌ها:** دیوار حائل وزنی، دیوار خاک مسلح، بارگذاری انفجار، مد تغییر شکل، مدل‌سازی عددی، FLAC-2D.

## Numerical Investigation of Gravity and Reinforced Soil Wall Performance under Blast Loading

M. H. Bazyar, M. Rabeti Moghadam\*, S. Gholipour

Iran University of Science and Technology

(Received: 28/04/2012; Accepted: 08/01/2013)

### Abstract

*In this paper, dynamic response of the two most common retaining walls in geotechnical engineering practices (conventional gravity retaining walls and geosynthetic reinforced soil (GRS) walls) to blast loading are investigated and compared using FLAC 2D. After large number of numerical simulations, it was concluded that performance of the GRS walls is better than conventional gravity retaining walls. Also it is observed that deformation modes of these two types of walls are different. In all analysis, dominant mode of lateral deformation for the gravity types of walls (for both 5 and 10 m) was overturning mode combination with sliding at base of wall, whereas for GRS walls in addition to sliding at base, deformation modes are start from bulging at low blast intensity loading and tends to overturning mode with increasing blast loading intensity. Therefore location of the maximum lateral displacement of gravity walls is occurred at wall crown in all the analysis, whereas in GRS walls, location of the maximum lateral displacement start from middle of the wall height in bulging mode and shift to the surface of the wall with increasing blast loading because of overturning mode domination. Also, it is concluded that soil damping and distance from blast loading adversely affected blast induced deformation of the walls.*

**Keywords:** Gravity Retaining Walls, Geosynthetic Reinforced Soil (GRS) Walls, Deformation Shape Modes, Numerical Analysis, Blast Loading, FLAC-2D.

\* Corresponding Author Email: rabetionline@yahoo.com

## ۱. مقدمه

بشر از ابتدای خلقت تاکنون برای ارتقا کیفیت زندگی خود اقدام به عمران و آبادانی زمین و محیط اطراف خود کرده است. از طرف دیگر، جنگ نیز یکی از عناصر پایدار تاریخ بشری است. ساخت و ساز، عمران و آبادانی از یک سو و تخریب سازه‌های ساخت بشر به دلیل وقوع سوانح طبیعی نظیر سیل، زلزله، زمین‌لغزش و ... یا انهدام آنها در جنگ‌ها به وسیله بمب‌ها و سلاح‌های مخرب به چرخه‌ای دائمی تبدیل گشته و همین امر موتور محرک ابداعات جدید و عامل پیشرفت علم، در زمینه‌های مختلف مهندسی از جمله مهندسی عمران و به‌ویژه شاخه ژئوتکنیک شده است.

دیوارهای حائل از جمله سازه‌هایی می‌باشند که به‌عنوان دیواره محافظ کنار جاده‌ها، تونل‌ها، پایه‌های کناری پل‌ها، مرز سواحل و رودخانه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. استفاده از دیوار حائل در زمان‌های بحران به‌عنوان پناهگاه، انبارهای زیرزمینی، استفاده به‌عنوان سنگرهای دفاعی ضرورت مطالعه مقاومت این سازه‌ها در برابر بارهای انفجاری را ایجاب می‌کند. با توجه به اینکه خرابی دیوار، خرابی سازه‌های مجاور و به‌دنبال آن زیان‌های اقتصادی و تلفات جانی زیادی را به‌دنبال خواهد داشت، بنابراین اهمیت بررسی چگونگی رفتار اینگونه سازه‌ها در اثر انفجار و با دیدگاه مهندسی پدافند غیرعامل مشخص است.

عملکرد مناسب سازه‌های دیوار حائل و خاک مسلح طی گزارش‌هایی که از عملکرد آنها حین وقوع زلزله‌های بزرگ در جهان و در برابر بارهای انفجاری توسط محققین ارائه شده، مشخص گردیده است. یکی از مزیت‌های مهم این سازه‌ها، انعطاف‌پذیری و پایداری قابل قبول در شرایط اعمال بارهای لرزه‌ای نظیر ضربه، انفجار و زلزله است. با توجه به طراحی‌های محافظه‌کارانه‌ای که امروزه انجام می‌پذیرد، به‌طور معمول نگرانی خاصی راجع به پایداری این دیوارها در برابر بارهای لرزه‌ای وجود ندارد. مهم‌ترین چالش پیش رو در رابطه با عملکرد این دیوارها، تخمین مقدار تغییر مکان و مکانیسم تغییر شکل آنها تحت این شرایط است.

با توجه به رویکرد جدید جامعه مهندسی ژئوتکنیک کشور به استفاده از دیوارهای خاک مسلح در پروژه‌های مختلف، مطالعه عملکرد این نوع دیوارها در اثر بارگذاری انفجار به‌عنوان یکی از سازه‌های پرکاربرد در بخش پدافند غیرعامل کشور از جنبه پایداری و تغییر شکل این دیوارها امری ضروری به‌نظر می‌رسد. یکی از دغدغه‌های اصلی مهندسی ژئوتکنیک، انتخاب نوع دیوار با توجه به عملکرد دیوار در پروژه مورد نظر است. در کمتر پروژه‌ای انتخاب نوع دیوار بر اساس عملکرد آن برای بارگذاری انفجار صورت گرفته است. تحقیقات صورت گرفته در این زمینه به‌نسبت محدود بوده و عمده تحقیقات به‌منظور اهداف نظامی بوده است [۳-۱]. از جمله مطالعات صورت گرفته روی عملکرد دیوارهای خاک مسلح در برابر بارگذاری انفجار مطالعه Ng و همکاران [۱] است که در آزمایش تمام مقیاسی که توسط آنها بر روی دیوار خاک مسلح ساخته شده با ژئوتکستایل

صورت گرفت، مشاهده شد که خاک مسلح قادر است مانع انتشار موج‌های فشاری انفجار شده و به‌دلیل قابلیت تغییر شکل زیاد مصالح ژئوسینتتیک، انرژی انفجار را جذب کنند. همچنین، سازه‌های خاک مسلح با مصالح ژئوسینتتیک در برابر انفجار برخلاف مصالح شکننده نظیر بتن، دچار خردگی شدگی نمی‌شوند.

هدف از این تحقیق، مطالعه و بررسی عملکرد دو نوع دیوار پرکاربرد در پروژه‌های عمرانی کشور و انتخاب مناسب‌ترین نوع دیوار به لحاظ عملکردی در برابر بارگذاری‌های انفجار ناشی از نفوذ یک پرتابه در داخل زمین است تا بتوان از آنها در سازه‌های پدافند به‌صورت کارآمدترین حالت بهره گرفت. به‌همین جهت و به‌دلیل نبود امکانات آزمایشگاهی در دسترس، مقایسه عملکردی این دو نوع دیوار به‌صورت مدل‌های عددی به‌کمک نرم‌افزار اختلاف محدود FLAC انجام گرفته است.

## ۲. انتخاب دیوارها و بررسی پایداری استاتیکی و لرزه‌ای

## آنها

از آنجا که مقایسه عملکرد دو نوع دیوار متفاوت در برابر بارگذاری انفجار موضوع مقاله حاضر است، بنابراین قبل از ورود به بررسی این موضوع، می‌بایست دو نوع دیوار، شرایط تقریباً یکسان برای سایر حالات بارگذاری از قبیل پایداری استاتیکی و دینامیکی داشته باشند. بدین منظور برای دو ارتفاع یکسان دیوارها (۵ و ۱۰ متری)، سایر پارامترها طوری انتخاب خواهد شد تا عملکرد دو نوع دیوار در برابر بارگذاری استاتیکی و دینامیکی شرایط تقریباً یکسان را تأمین کنند. لازم به‌ذکر است شرایط خاک مسئله برای هر دو نوع دیوار یکسان در نظر گرفته شده و فرض شده است شرایط آب زیرزمینی پایین‌تر از محدوده مورد بررسی مسئله حاضر باشد.

تناسبات اولیه برای دیوارهای وزنی بر اساس نشریه ۳۰۸ برنامه و بودجه (راهنمای طراحی دیوارهای حائل) [۴] انتخاب شد و سپس مشخصات دیوار خاک مسلح از قبیل طول و چیدمان لایه‌های ژئوگریدها طوری انتخاب شد تا شرایط مشابهی از لحاظ پایداری با دیوار وزنی انتخاب شده داشته باشد. در مطالعه حاضر از دو ارتفاع متفاوت برای دیوارها استفاده شد: ۵ و ۱۰ متر. مشخصات در نظر گرفته شده برای دیوارها به‌صورت زیر است:

## ۲-۱. مشخصات دیوارهای وزنی

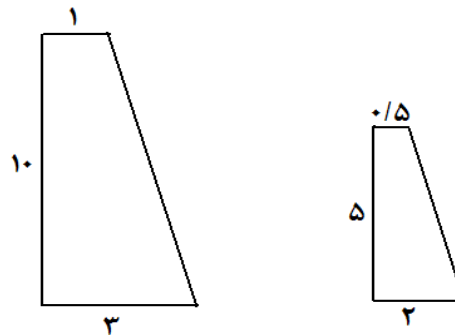
مشخصات بتن در نظر گرفته برای دیوارهای وزنی به‌شرح جدول (۱) و همچنین ابعاد این نوع دیوار که بر اساس توصیه‌های نشریه شماره ۳۰۸ انتخاب شده‌اند، در شکل (۱) [۲] قابل مشاهده است.

## ۲-۲. مشخصات خاک خاکریز و پی دیوارها

خاک در نظر گرفته شده برای خاکریز و پی یکسان فرض شده است که طبق طبقه‌بندی یونیفاید از نوع GC تلقی می‌شود. مشخصات مکانیکی این نوع خاک در جدول (۲) ارائه شده است.

است. این فزار به کمک روش‌های موجود تحلیل تعادل حدی از قبیل Spencer, Ordinary, Bishop, Janbu, Morgenstern-Price و Bishop کم‌ترین ضریب اطمینان مربوط به پایداری استاتیکی و یا شبه استاتیکی مسئله را به دست می‌دهد. بررسی پایداری دینامیکی مسئله از طریق ترکیب تحلیل شبه استاتیکی با روش تعادل حدی انجام می‌گیرد. در پایان ابعاد دیوارها، طول و مشخصات ژئوگریدها در دیوار خاک مسلح طوری انتخاب شده است که برای شرایط بارگذاری یکسان، ضریب اطمینان‌ها برای ارتفاع یکسان از دو نوع دیوار، مشابه به دست آیند. طبق توصیه FHWA ضریب شبه استاتیکی زلزله برای طراحی دیوارهای حائل آزاد در برابر تغییر مکان برابر  $0.5 A_{max}$  در نظر گرفته می‌شود که حداکثر شتاب زلزله طرح است. با فرض اینکه دیوارهای مذکور برای منطقه‌ای با ضریب حداکثر شتاب طرح  $0.3 g$  طراحی شوند، ضریب شتاب شبه استاتیکی برابر  $0.15$  به دست می‌آید که این ضریب به نرم‌افزار معرفی شده و تحلیل شبه استاتیکی انجام می‌گیرد. از تأثیر ضریب شتاب زلزله در جهت قائم در تحلیل‌ها صرف‌نظر شده است. نتایج تحلیل‌های دیوارهای وزنی در جدول (۳) آمده است.

به منظور یکسان‌سازی شرایط دیوارهای وزنی با خاک مسلح تحت بارگذاری استاتیکی و شبه استاتیکی که در جدول (۳) گزارش شده، مشخصات دیوارهای خاک مسلح با سعی و خطا حاصل شده است. مقادیر ضریب اطمینان‌های به دست آمده در شرایط مختلف بارگذاری برای دیوار خاک مسلح با در نظر گرفتن مشخصات جدول (۴) و (۵) در جدول (۳) ارائه شده است. در نرم‌افزار GEOSLOPE مشخصات فنی ژئوگرید به کار رفته جهت مدل‌سازی دیوارهای خاک مسلح به صورت جدول (۴) در نظر گرفته شده است. در نهایت توزیع ژئوگریدها در ارتفاع و طول آنها با سعی و خطا برای دیوارهای خاک مسلح ۵ و ۱۰ متری به صورت جدول (۵) حاصل شدند. همان‌طور که در جدول (۳) قابل مشاهده است، دو نوع دیوار در شرایط تقریباً یکسان از لحاظ پایداری استاتیکی و دینامیکی قرار دارند.



شکل ۱. ابعاد دیوارهای حائل وزنی ۵ و ۱۰ متری (ابعاد بر حسب متر)

جدول ۱. مشخصات بتن دیوارهای وزنی

مقدار	مشخصه بتن دیوارها
$3 \times 10^4$	مدول الاستیسیته ( پاسکال)
۲۵۰۰	وزن مخصوص (کیلوگرم بر مترمکعب)
۰/۱۵	ضریب پواسون

جدول ۲. مشخصات خاک خاکریز و پی دیوارها

مقدار	مشخصه خاک
$3 \times 10^4$	مدول الاستیسیته ( پاسکال)
۲۰۰۰	وزن مخصوص (کیلوگرم بر مترمکعب)
۰/۲۵	ضریب پواسون
۳۰	زاویه اصطکاک داخلی (درجه)
۲۰۰۰	چسبندگی (پاسکال)

### ۳-۲. بررسی پایداری استاتیکی و شبه استاتیکی دیوارها

به منظور بررسی پایداری استاتیکی و دینامیکی دیوارها از تحلیل‌های تعادل حدی به کمک نرم‌افزار GEOSLOPE (شکل ۲) استفاده شده

جدول ۳. خلاصه نتایج تحلیل‌های پایداری

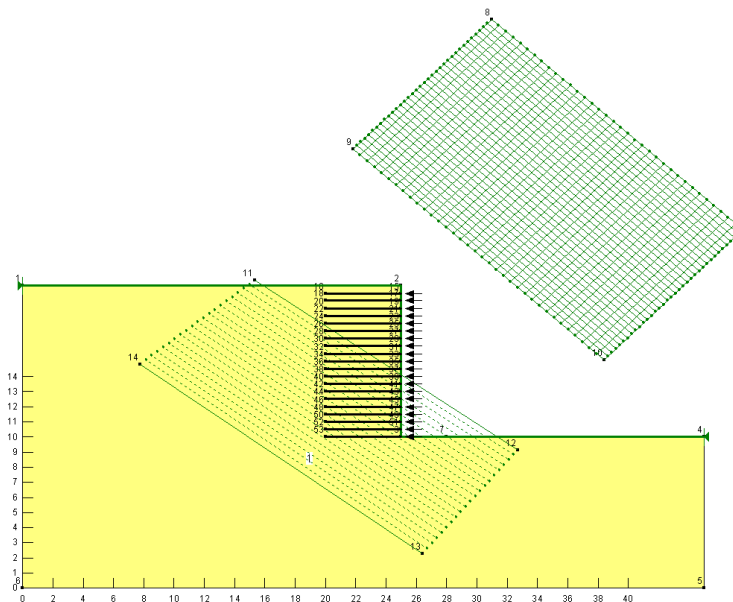
حداقل ضریب اطمینان مجاز	ضریب اطمینان (روش M-P, نرم‌افزار GEOSLOPE)				حالت بارگذاری
	دیوار ۱۰ متری		دیوار ۵ متری		
	خاک مسلح	وزنی	خاک مسلح	وزنی	
۱/۵	۱/۷۶۵	۱/۶۷۴	۲/۴۹۱	۲/۳۳۶	استاتیکی
۱	۱/۴۲۳	۱/۴۱۳	۱/۹۲۵	۱/۹۱۷	شبه استاتیکی

جدول ۴. مشخصات فنی ژئوگرید به کار رفته در دیوارهای خاک مسلح

مقدار	مشخصه ژئوگریدها
۸۰	مقاومت کششی نهایی $F_u$ (کیلو نیوتن)
۱۰	مقاومت چسبندگی $F_{Bond}$ (کیلو نیوتن بر متر)

جدول ۵. مشخصات حاصل شده دیوارهای خاک مسلح به روش سعی و خطا در نرم‌افزار GEOSLOPE

مشخصه ژئوگریدها	دیوار ۵ متری	دیوار ۱۰ متری
طول لایه‌های ژئوگرید (متر)	۳	۵
فواصل عمودی ژئوگریدها (متر)	۰/۵	۰/۵



شکل ۲. شبکه‌های ترسیم شده به منظور تعیین ضریب اطمینان پایداری (دیوار خاک مسلح ۱۰ متری) در نرم‌افزار GEOSLOPE

ایجاد خرابی در مجاورت انفجار بمب می‌شود. خصوصیات کلی بمب GP-2000 به صورت زیر است [۶-۷]:  
وزن کل ۹۵۰ کیلوگرم؛ وزن خرج ۵۰۰ کیلوگرم؛ قطر بدنه ۶۰ سانتی‌متر؛ نسبت لاغری برابر ۳؛ سرعت برخورد ۳۳۵ متر بر ثانیه.  
با توجه به آزمایش‌های میدانی انجام شده توسط Ambrosini و همکاران بر روی خاک‌های مختلف، رابطه (۱) برای قطر گودال انفجار پیشنهاد شد [۸]:

$$D[m] = 0.51(W[Kg])^{\frac{1}{3}} \pm 5\% \quad (1)$$

که W وزن TNT معادل ماده منفجره بمب است. بنابراین با توجه به مشخصات فوق، برای این بمب قطر حفره انفجاری در حدود ۴ متر است که در تحلیل‌های عددی مورد استفاده قرار خواهد گرفت.  
تأثیر انفجار یک بمب به صورت یک ضربه با فشار بسیار بالا در مرکز انفجار است که با افزایش فاصله از مرکز انفجار شدت آن کاهش می‌یابد. بارگذاری انفجاری به صورت یک پالس با تاریخچه نمایی از مرکز انفجار در نظر گرفته می‌شود که در نمودار شکل (۳) [۵] بر حسب فشار- زمان ارائه شده است. در مورد نحوه تعیین تاریخچه زمانی پالس انفجاری جهت اعمال در نرم‌افزار FLAC خواننده محترم به مقالاتی از نویسندگان مقاله حاضر [۹-۱۰] ارجاع داده می‌شود.

#### ۴-۲. نتیجه‌گیری از تحلیل‌های اولیه

از جدول (۳) نتایج زیر حاصل می‌شود:

- ۱- تمامی دیوارها تحت شرایط بارگذاری استاتیکی و شبه استاتیکی از حاشیه اطمینان مناسبی جهت پایداری برخوردارند.
  - ۲- از مقایسه ضرایب اطمینان نظیر به نظیر دیوارها ملاحظه می‌شود که دیوارهای انتخاب شده جهت مقایسه عملکرد آنها در برابر بار انفجار از شرایط تقریباً یکسانی برخوردارند.
- بنابراین در ادامه رفتار این دیوارها تحت بارگذاری انفجاری بررسی شده و در نهایت عملکرد این‌گونه دیوارها در برابر بارگذاری انفجار مورد مقایسه قرار خواهند گرفت.

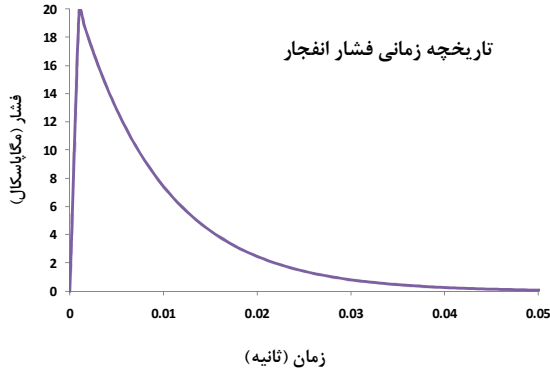
#### ۳. شبیه‌سازی اثر انفجار بر دیوار در نرم‌افزار FLAC

در این بخش نحوه مدل‌سازی اثر انفجار پرتابه‌ها بر دیوار در نرم‌افزار FLAC-2D [۵] تشریح شده و در پایان تحلیل‌های پارامتری به‌منظور مقایسه عملکرد دو نوع دیوار در برابر بارگذاری انفجار ارائه خواهد شد.

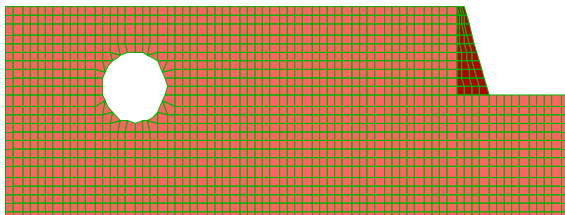
#### ۳-۱. بارگذاری انفجار

در این مطالعه بمب انفجاری با اهداف عمومی (GP-2000) برای تخریب‌های معمول ناشی از انفجار انتخاب شده است. این بمب باعث

۷. پس از اعمال تنش انفجاری در محل مورد نظر، به منظور بررسی تأثیر انفجار بر روی دیوار مدل آنالیز شد. در شکل (۵) نحوه انتشار موج انفجار در نرم افزار دیده می شود. شکل (۶) نیز تاریخچه تنش اصلی حداکثر پشت دیوار را پس از اعمال انفجار نشان می دهد.



شکل ۳. تاریخچه زمانی فشار انفجار که به صورت عمود بر اطراف حفره انفجاری وارد می شود



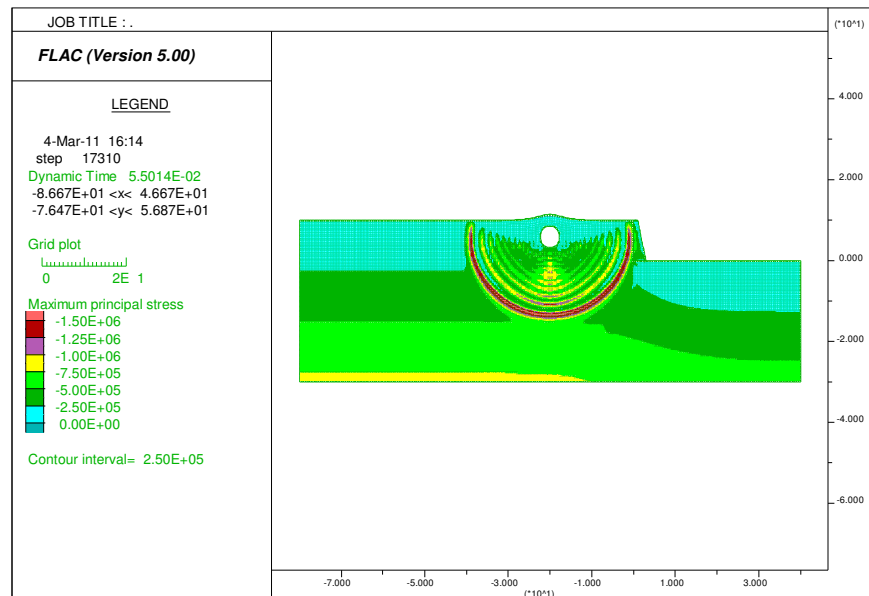
شکل ۴. موقعیت حفره انفجاری نسبت به دیوار (دیوار وزنی ۵ متری)

### ۲-۳. مراحل مدل سازی عددی اثر بارگذاری انفجار بر دیوار در نرم افزار FLAC

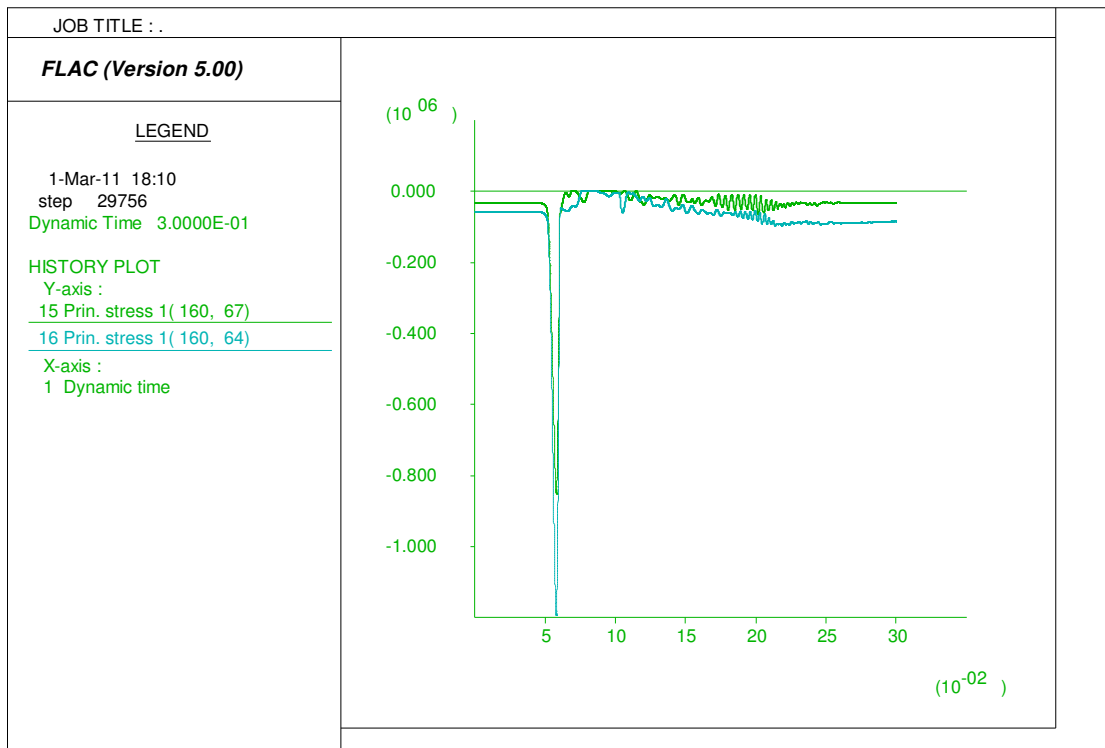
به منظور مدل سازی عددی اثر انفجار بر دیوارها از نرم افزار FLAC استفاده شده که روند مدل سازی به صورت زیر است:

۱. ابعاد مدل طوری در نظر گرفته می شود که مرزها کمترین تأثیر را در نتایج داشته باشند. به طور کلی در حل عددی مسائل دینامیکی، ابعاد شبکه بندی باید به صورتی باشد که انتقال امواج به صورت مناسبی صورت پذیرد. ابعاد شبکه ۰/۵ متر در ۰/۵ متر انتخاب شد.
۲. پس از ایجاد مدل و اعمال مرزهای گیرداری مناسب، خصوصیات خاکریز و دیوار وزنی معرفی شده در بخش قبل اعمال گردید. از مدل رفتاری موهر - کولمب جهت مدل سازی مصالح خاکریز استفاده شد. مدل موهر - کولمب یکی از مرسوم ترین مدل های رفتاری مکانیک خاک به شمار می رود. این مدل دارای ۵ پارامتر مدول الاستیسیته، ضریب پواسون (رفتار الاستیک)، چسبندگی، زاویه اصطکاک خاک و زاویه اتساع (رفتار پلاستیک) بوده و به صورت ارتجاعی خمیری کامل است. به علاوه رفتار بتن دیوار به صورت الاستیک مدل سازی شد.
۳. پس از تعریف مدل، آنالیز استاتیکی مدل صورت پذیرفت.
۴. از آنجایی که تغییر شکل های رویه دیوارها در اثر بارگذاری انفجار مد نظر است، بنابراین لازم است که همه تغییر شکل های ایجاد شده در آنالیز استاتیکی صفر شود.
۵. به منظور ایجاد شرایط واقعی انتشار موج تنش و جذب انرژی در مرزها، شرایط مرزهای ویسکوز به مرز پائینی و جانبی مدل اختصاص می یابد.

۶. تنش فشاری ناشی از انفجار در محدوده مورد نظر و بر اطراف حفره انفجاری اعمال می شود. شکل (۴) موقعیت محل انفجار را نسبت به دیوار نشان می دهد.



شکل ۵. لحظه رسیدن موج تنش انفجار به دیوار - ثانیه ۰/۰۵۵



شکل ۶. تاریخچه تنش اصلی حداکثر در پشت دیوار

#### ۴. تحلیل‌های پارامتری

میرایی مصالح خاکی و همچنین شامل تغییر در مشخصات منبع انفجاری از قبیل قدرت ماده منفجره و موقعیت انفجار خواهد بود. برای هر دو نوع دیوار با ارتفاع‌های یکسان و تحت شرایط تعریف شده برای بارگذاری و مشخصات مصالح خاکی یکسان، تحلیل‌ها صورت گرفته و خروجی‌های مربوطه استخراج خواهد شد تا مقایسه در شرایط یکسان برای دو نوع دیوار انجام گیرد. این تحلیل‌ها تحت عنوان مدل ۱ تا ۱۰ در جدول (۷) ارائه شده‌اند. یکی از تحلیل‌ها (مدل شماره ۳) به‌عنوان تحلیل مبنا انتخاب شده است (جدول ۶).

از آنجا که هدف، مقایسه عملکرد دو نوع از دیوارهای مرسوم (وزنی و خاک مسلح ژئوگریدی) در برابر انفجار است، بنابراین، در این مرحله رفتار این دو نوع دیوار در شرایط مختلف در برابر بارگذاری انفجار با یکدیگر مورد مقایسه قرار می‌گیرند. در این میان مشخصات سیستم دیوار ثابت در نظر گرفته می‌شود و فقط مشخصات منبع و مسیر انفجار تغییر داده خواهد شد. این مقایسه در قالب مطالعات پارامتری تعریف شده مطابق با جدول (۷) صورت خواهد گرفت. این تغییرات شامل تغییر در مشخصات مصالح خاک مانند مدول الاستیسیته و

جدول ۶. مدل مبنا جهت تحلیل‌های پارامتری (مدل شماره ۳)

مدل مبنا	مدول الاستیسیته (مگاپاسکال)	میرایی (درصد)	عمق نفوذ پرتابه (متر)	شدت تنش انفجاری (مگاپاسکال)	قطر حفره انفجاری (متر)	موقعیت حفره انفجاری (متر)
۳	۲۰۰	۵	۴/۵	۲۰	۴	۲۰

جدول ۷. تحلیل‌های پارامتری تعریف شده جهت مقایسه عملکرد دیوارها

شماره مدل	پارامتر متغیر	مدول الاستیسیته (مگاپاسکال)	میرایی (درصد)	شدت تنش انفجاری (مگاپاسکال)	موقعیت حفره (انفجاری متر)
۱	شدت انفجار	۲۰۰	۵	۱۰	۲۰
۲		۲۰۰	۵	۱۵	۲۰
۳ (مبنا)		۲۰۰	۵	۲۰	۲۰
۴		۲۰۰	۵	۲۵	۲۰
۵		۲۰۰	۵	۳۰	۲۰
۶	میرایی	۳۰۰	۲	۲۰	۲۰
۳		۳۰۰	۵	۲۰	۲۰
۷		۳۰۰	۱۰	۲۰	۲۰
۸	موقعیت حفره انفجاری	۲۰۰	۵	۲۰	۱۰
۳		۲۰۰	۵	۲۰	۲۰
۹		۲۰۰	۵	۲۰	۳۰
۱۰		۲۰۰	۵	۲۰	۴۰

می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، میزان تغییر شکل حداکثر دیوار خاک مسلح در همه حالات کمتر از دیوار حائل وزنی بوده است. بنابراین می‌توان برای این بخش نیز چنین نتیجه‌گیری کرد که عملکرد دیوارهای خاک مسلح در برابر بارگذاری انفجار نسبت به دیوارهای وزنی مشابه بهتر است و در عمل تغییر مکان‌های کمتری را تجربه کرده است. نکته دیگری که از شکل (۸) می‌توان نتیجه گرفت این است که افزایش نسبت میرایی در خاک باعث کاهش شدید در تغییر مکان‌های ایجاد شده در دو نوع دیوار است، به‌طوری‌که برای نسبت میرایی بیشتر از ۱۰٪ تغییر شکل دیوارها ناچیز شده که به دلیل میرا شدن موج در مسیر انتشار موج از محل انفجار تا دیوار است.

شکل (۹) میزان بیشینه تغییر مکان‌های افقی حاصله برای هر دو نوع دیوار ۵ متری تحت فواصل انفجاری مختلف را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که میزان تغییر شکل حداکثر دیوار خاک مسلح در همه حالات کمتر از دیوار حائل وزنی بوده است. بنابراین می‌توان برای این بخش نیز چنین نتیجه‌گیری کرد که عملکرد دیوارهای خاک مسلح در برابر بارگذاری انفجار نسبت به دیوارهای وزنی مشابه بهتر است. همچنین مشاهده می‌شود که با افزایش فاصله مرکز انفجار از دیوار تغییر مکان دیوار به شدت کاهش می‌یابد و برای دیوار مثال حاضر عملاً در فاصله بیش از ۳۰ متر هیچ‌گونه تنشی از انفجار به دیوار نرسیده است و کل بار موج در مسیر انتشار میرا شده است. از مقایسه سه پارامتر بررسی شده ملاحظه می‌شود که پارامتر نسبت میرایی و فاصله اهمیت بیشتری نسبت به پارامتر قدرت انفجار در تعیین تغییر شکل‌های وارده به دیوارها دارند. چرا که با زیادتر شدن قدرت بمب، تغییر مکان افقی در تمامی دیوارها رو به افزایش است، ولی سرعت این افزایش به مراتب کمتر از تأثیر پارامترهای میرایی یا فاصله انفجار بر تغییر شکل‌های دیوارها است. این مسئله می‌تواند در تعیین روش‌های کاهش اثرات انفجار بر سازه‌های خاکی مورد استفاده

## ۵. مقایسه تغییر شکل‌های دیوارهای وزنی و خاک مسلح در برابر بارگذاری انفجار

در این قسمت، عملکرد دو نوع دیوار حائل وزنی و خاک مسلح بر اساس نتایج حاصله از تحلیل‌های صورت گرفته برحسب مطالعات پارامتری تعریف شده در جدول (۷) مورد مقایسه قرار خواهد گرفت. بدین صورت که دیوارهای با ارتفاع مشابه از دو نوع دیوار در شرایط یکسان مورد مقایسه قرار گرفته و نتیجه‌گیری کلی مستقل از ارتفاع دیوارها در مورد عملکرد دو نوع سیستم ارائه خواهد شد. این نکته نیز می‌بایست ذکر شود که وقتی مقایسه از لحاظ عملکرد سازه‌ای مطرح می‌شود، موضوع اصلی تغییر شکل‌های سیستم را شامل می‌شود. بنابراین بررسی پایداری دیوارها از دیدگاه ژئوتکنیکی (میزان تغییر مکان) مدنظر بوده و به بحث سازه‌ای پرداخته نشده است. هر چند حتی‌المقدور بار انفجار در فاصله‌ای از دیوار اعمال شد تا تنش وارده باعث گسیختگی کششی در المان‌های ژئوگرید نشود.

### ۵-۱. مقایسه عملکرد دیوارها

نمودار شکل (۷) میزان بیشینه تغییر مکان‌های افقی حاصله برای هر دو نوع دیوار ۵ متری تحت شدت انفجاری مختلف را نشان می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود، میزان تغییر شکل حداکثر دیوار خاک مسلح در همه حالات کمتر از دیوار حائل وزنی بوده است. بنابراین می‌توان برای این بخش چنین نتیجه‌گیری کرد که عملکرد دیوارهای خاک مسلح در برابر بارگذاری انفجار نسبت به دیوارهای وزنی مشابه بهتر است. از طرفی از شکل (۷) می‌توان چنین نتیجه گرفت که افزایش شدت ماده منفجره (قوی‌تر شدن بمب) باعث ایجاد تغییر شکل‌های بیشتری در دیوار شده است. نمودار شکل (۸) میزان بیشینه تغییر مکان‌های افقی حاصله برای هر دو نوع دیوار ۵ متری برحسب نسبت میرایی‌های مختلف را نشان

## ۶. مقایسه مدهای تغییر شکل دیوارهای وزنی و خاک مسلح در برابر بارگذاری انفجار

مد تغییر شکل دیوارها بر پایه تابع نوع دیوار، صلبیت آنها، شرایط هندسی دیوارها، نوع بارگذاری و جنس خاک خاکریز و پی آنها است. از آنجا که تمامی شرایط دیگر به جز نوع دیوارها یکسان انتخاب شده‌اند، بنابراین مد تغییر شکل تنها تابع نوع دیوار بوده که این موضوع در این قسمت بحث می‌شود. در مورد مد تغییر شکل دیوارهای وزنی دو مد تغییر شکل به طور کامل شناخته شده‌اند: چرخش و لغزش. دیوارهای وزنی به دلیل صلبیت آنها، مکانیزم تغییر شکلی شبیه به جسم صلب دارند.

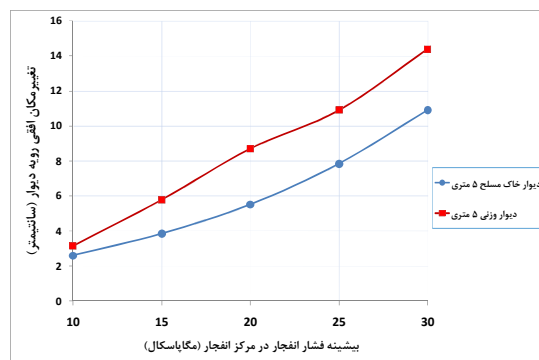
شکل (۱۰) مد تغییر شکل دیوار حائل وزنی ۱۰ متری را به ازای تغییرات فشار انفجار نشان می‌دهد. همان طور که در شکل (۱۰) دیده می‌شود، تغییر شکل دیوار ترکیبی از دو مد لغزش به علاوه چرخش است. بدین صورت که پای دیوار به میزانی لغزیده و هم‌زمان در ارتفاع دوران یافته است. نکته دیگر این که همواره محل تغییر مکان حداکثر در این نوع دیوارها در مد واژگونی به سمت خارج از خاکریز در تاج دیوار (ارتفاع ۱۰ متری) قرار دارد. همچنین مشاهده می‌شود که با زیاد شدن قدرت انفجار مد واژگونی نمایان‌تر می‌شود و انفجارهای با قدرت بالاتر می‌تواند منجر به واژگونی کامل دیوار شود.

در مورد مد تغییر شکل دیوارهای خاک مسلح به دلیل انعطاف‌پذیری این نوع دیوارها، علاوه بر دو نوع مد مرسوم دیوارها یعنی لغزش و واژگونی، مد دیگری نیز تحت عنوان شکم‌دادگی برای این دیوارها مطرح می‌باشد. در شکل (۱۱)، مدهای تغییر شکل دیوار خاک مسلح ۱۰ متری دیده می‌شود. در مورد مدهای تغییر شکل این دیوارها مشاهده می‌شود که با افزایش شدت تنش انفجاری مد واژگونی رفته رفته بر مد شکم‌دادگی غالب می‌شود. این نکته را می‌توان از محل وقوع حداکثر تغییر مکان نیز تشخیص داد. در شکل (۱۱) برای فشار تا ۲۰ مگاپاسکال موقعیت حداکثر تغییر شکل افقی در میانه‌های دیوار قرار دارد، ولی برای فشارهای بیشتر از ۲۰ مگاپاسکال مد واژگونی دیوار بر مد شکم‌دادگی غالب شده و تغییر مکان حداکثر به بالاتر و به سمت تاج دیوار منتقل شده است. لازم به ذکر است برای دو نوع دیوار وزنی و خاک مسلح پای دیوارها همواره در معرض مد تغییر شکل لغزشی می‌باشند و در ارتفاع بسته به انعطاف‌پذیری رویه دیوار سایر مدهای تغییر شکل دیده می‌شود.

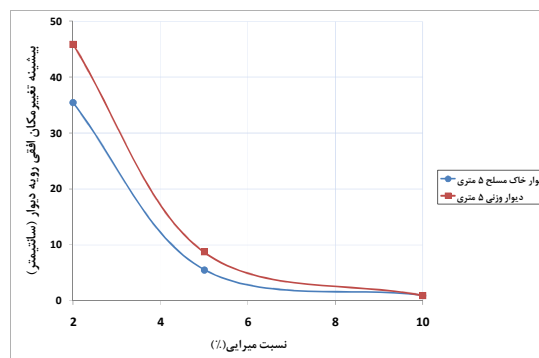
از مقایسه مدهای تغییر شکل دیوارهای خاک مسلح با دو ارتفاع متفاوت ۵ و ۱۰ متری مشاهده شد که مد تغییر شکل این نوع دیوارها از پارامتر ارتفاع تأثیر می‌پذیرد.

قرار گیرد. برای مثال استفاده از مصالح میراکننده موج در خاکریز دیوار می‌تواند بر تغییر شکل‌های دیوار در برابر امواج انفجاری مؤثر باشد.

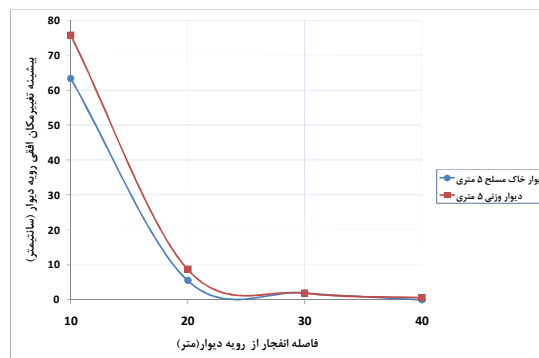
تمامی مطالعات پارامتری تعریف شده در جدول (۷) بر روی دیوارهای ۱۰ متری نیز انجام شد و نتایج مشابه با نتایج به دست آمده برای دیوارهای ۵ متری حاصل شد. بنابراین نتیجه‌گیری‌های حاصله تحت تأثیر ارتفاع دیوار قرار نمی‌گیرند.



شکل ۷. مقایسه بیشینه تغییر مکان افقی دو نوع دیوار ۵ متری در برابر بیشینه فشار انفجار



شکل ۸. مقایسه بیشینه تغییر مکان افقی دو نوع دیوار ۵ متری در برابر تغییرات نسبت میرایی



شکل ۹. مقایسه بیشینه تغییر مکان افقی دو نوع دیوار ۵ متری

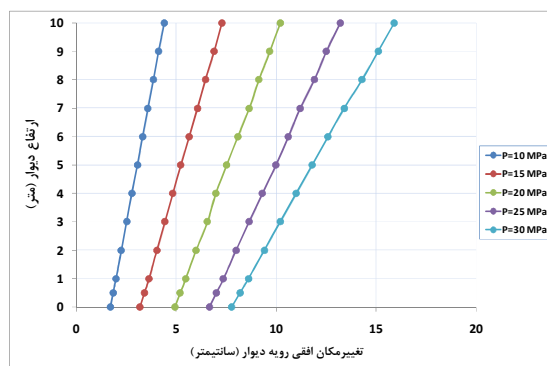


– مدهای تغییر شکل دو نوع دیوار متفاوت از یکدیگر بوده، به طوری که برای دیوارهای وزنی چه ۵ و چه ۱۰ متری مد غالب تغییر شکل واژگونی بود، در صورتی که برای دیوارهای خاک مسلح ۵ و ۱۰ متری، مدهای تغییر مکان بسته به شرایط بارگذاری و ارتفاع دیوار از شکم‌دادگی دیوار تا واژگونی آن متغیر بود. همین امر باعث می‌شد تغییر مکان حداکثر دیوار همواره در تاج اتفاق نیفتد.

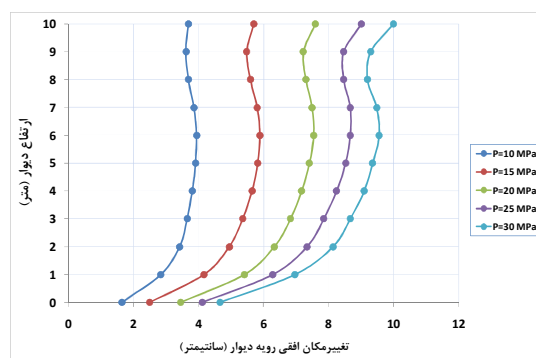
– محل تغییر مکان حداکثر در دیوارهای وزنی ۵ متری و ۱۰ متری در محل تاج دیوار قرار داشت، در صورتی که برای دیوارهای خاک مسلح بسته به شرایط بارگذاری تعریف شده و ارتفاع دیوار، تغییر مکان حداکثر در حالت مد شکم‌دادگی در میانه‌های ارتفاعی دیوار و برای حالت واژگونی موقعیت دیوار به سمت تاج دیوار متمایل می‌شد. استفاده از دیوارهای خاک مسلح به دلایلی از جمله سهولت اجرا، اقتصادی بودن و زیبایی این دیوارها نسبت به دیوارهای حائل وزنی در اولویت قرار دارند، با مطالعه صورت گرفته در مقاله حاضر عملکرد بهتر این نوع دیوارها در پدافند غیرعامل نیز مشخص شد.

## ۸. مراجع

- [1] Ng, C. C.; Chew, S. H.; Karunaratne, G. P.; Tan, S. A.; Loh, S. L.; Heng, E. C. L. "Geosynthetics Reinforced Soil Wall Subject to Blast Loading"; Geosynthetics Asia Conference, GA 2000, 29 - 31 May 2000, Kuala Lumpur, Malaysia, 2000, 2, 49-54.
- [2] Gui, M. W.; Chien, M. C. "Blast-Resistant Analysis for a Tunnel Passing Beneath Taipei Shongsan Airport – a Parametric Study"; Geotechnical and Geological Eng., 2004, 24, 227–248.
- [3] Ngo, T.; Mendis, P.; Gupta, A.; Ramsay, J. "Blast Loading and Blast Effects on Structures – An Overview", EJSE Special Issue: Loading on Structures, Univ. Melbourne, Australia, 2007, 76-91.
- [4] Publication No. 308, "Guide to Retaining Wall Design"; Management and Planning Organization (In Persian).
- [5] Itasca Consulting Group Inc. "FLAC Users Manual I, Minneapolis, MN"; 2000.
- [6] TM 5-855-1 "Fundamental of Protective Design for Conventional Weapons"; US Army Eng. Waterways Experiment Station, 1984.
- [7] TM 5-1300, "Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions"; US Army Eng. Waterways Experiment Station, 1990.
- [8] Luccioni, B.; Ambrosini, D. "Influence of the Soil Properties on Craters Produced by Explosions on the Soil Surface"; Mec'anica Computacional, 2004, XXIII, 571-590.
- [9] Mirzeinali, S. H.; Baziar, M. H.; Rabeti Moghadam, M.; Hashemi, H. R. "Determination of Maximum Free Field Explosion Pressure of Conventional Projectiles in Soil for Modeling of Blast Loading Effect on the Underground and Above Ground Structures using FLAC Software"; 1st Conf. on Passive Defence and Resistant Structures, Noshirvani Babol Univ., 2010 (In Persian).
- [10] Mirzeinali, S. H.; Baziar, M.; Hashemi, H. R.; Rabeti Moghadam M. H. "Effect of Blast Loading on Shallow Depth Tunnels using FLAC Software: Case Study of Karaj Subway"; 1st Conf. on Passive Defense and Resistant Structures, Noshirvani Babol Univ., 2010 (In Persian).



شکل ۱۰. مد تغییر شکل دیوار وزنی ۱۰ متری به ازای تغییرات فشار انفجار



شکل ۱۱. مد تغییر شکل دیوار خاک مسلح ۱۰ متری به ازای تغییرات فشار انفجار

## ۷. نتیجه‌گیری

در این مقاله عملکرد دیوارهای خاک مسلح و دیوارهای حائل وزنی بتنی در برابر بارگذاری انفجار بمب ناشی از برخورد پرتابه در نزدیکی آنها مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج زیر از مطالعات وسیعی که شامل مدل‌سازی عددی ۱۰ مدل عددی مختلف برای ۲ ارتفاع متفاوت از ۲ نوع دیوار (۴۰ عدد شبیه‌سازی عددی) می‌شد، قابل دستیابی هستند. – در تمامی تحلیل‌های صورت گرفته دیوارهای خاک مسلح دارای عملکرد بهتری نسبت به دیوارهای وزنی بودند. میزان بیشینه تغییر مکان افقی دیوارهای خاک مسلح به مراتب کمتر از دیوارهای وزنی بود. این مورد هم برای دیوارها با ارتفاع ۵ متر و هم برای دیوارهای با ارتفاع ۱۰ متر صادق بود.

– پارامتر درصد میرایی خاک و فاصله برخورد پرتابه از سازه به شدت تغییر مکان‌های افقی رویه دیوارها را چه برای دیوارهای وزنی و چه دیوارهای خاک مسلح تحت تأثیر قرار می‌داد. این مسئله می‌تواند در تعیین روش‌های کاهش اثرات انفجار بر سازه‌های خاکی مورد استفاده قرار گیرد. برای مثال استفاده از مصالح میراکننده موج در خاکریز دیوار می‌تواند از تغییر شکل‌های دیوار در برابر امواج انفجاری مؤثر باشد.

– با زیادت‌تر شدن قدرت بمب، تغییر مکان افقی در تمامی دیوارها رو به افزایش بود، ولی سرعت این افزایش به مراتب کمتر از تأثیر پارامترهای میرایی یا فاصله انفجار است.