

## بررسی میدانی رفتار درون صفحه دیوار آجری تحت اثر انفجار زیرسطحی

محمد ملکشاهی<sup>۱</sup>، امیر هوشنگ اخویسی<sup>۲\*</sup>

۱- دانشجوی دکتری، ۲- دانشیار، دانشگاه رازی کرمانشاه

(دریافت: ۹۷/۰۹/۰۸، پذیرش: ۹۷/۱۱/۲۷)

### چکیده

امروزه، طراحی ساختمان‌ها در مقابل بارهای ضربه‌ای ناشی از انفجار، به دلیل افزایش حملات تروریستی مورد توجه قرار گرفته است. بنابراین، شناسایی طبیعت انفجار به‌عنوان گام اول در دستیابی به این هدف مورد توجه قرار دارد. انفجار آزاد شدن سریع مقدار زیادی انرژی است که نور، حرارت، صدا و موج ضربه‌ای شامل هوای فشرده را ایجاد می‌کند. هدف مطالعه حاضر بررسی پاسخ دینامیکی غیرخطی دیوار بنایی شامل دو بازشو تحت انفجار زیرسطحی است که تولید امواجی شبیه امواج زلزله کند. سپس نتایج میدانی با نتایج ناشی از مدل‌سازی عددی مقایسه شده است. آنالیز دینامیکی با استفاده از نرم‌افزار ANSYS انجام شده است. سطح تسلیم منتری-ویلیام و دراگر-پراگر به ترتیب برای مدل کردن سازه و خاک استفاده شده است. در نهایت نتایج آنالیز مدل عددی بر اساس روش اجزای محدود با داده‌های میدانی مقایسه شد. مقایسه‌ها نشان داد که سازگاری خوبی بین نتایج عددی و داده‌های میدانی وجود دارد.

**کلیدواژه‌ها:** انفجار زیرسطحی، دیوار بنایی غیرمسلح، انفجار حوزه نزدیک، اجزا محدود

## Field Study the In-Plain Behavior of the Brick Wall under Subsurface Explosion

M. Malekshahi, A. H. Akhaveissy\*

Razi University

(Received: 29/11/2018; Accepted: 16/02/2019)

### Abstract

Nowadays, design of buildings against shock loads caused by explosion has attracted special attention, due to an increase in terrorist attacks. Thus, introducing the nature of explosion and its loads are regarded as the first step in achieving this goal. Blast is an abrupt release of big amounts of energy in which light, heat, sound, shock wave, and dense air are produced. The present study aims to examine the nonlinear dynamic response of a masonry wall including two openings by the underground explosion that employed to produce earthquake-like waves. In this study, Dynamic analysis is conducted through ANSYS software. Menetrey-Willam and Drucker-Prager are used to model the structure and soil, respectively. Finally, the results of analyzing numerical model based on finite element method were compared with the field data. The outcomes demonstrated that there is good agreement between numerical results and field data.

**Keywords:** Underground Explosion, Unreinforced Masonry Wall, Close-in Explosion, Finite Element Method

## ۱. مقدمه

مناسبتی بین نتایج میدانی و عددی وجود دارد [۲۰]. به علاوه، وارما [۲۱] یک مجموعه‌ای از داده‌های آزمایش انفجار نظیر فشار بازتابی، اثر بازتابی خسارت سطح و انحنای بیشینه ۲۷ پلن آجری با ضخامت‌های مختلف را گزارش کردند. علاوه بر این، ایمون و بایلوت و دانیل [۲۲] روی مودهای خرابی و رفتار دیوارهای بنایی بتنی تحت بار انفجار بر اساس DYN3D متمرکز شدند. هاوو و ما [۲۳] روی مدل‌سازی عددی انفجار سطحی تأکید کردند و اثرات آن را روی پاسخ سازه‌ها بررسی نمودند. ریدل [۲۴] پاسخ غیرخطی دیوارهای بنایی با بازشو تحت بار انفجاری را بررسی کردند. بارهای انفجاری شامل بمب و گاز انفجاری می‌شد. اخویسی و همکاران [۲۵] یک روش المان محدود غیرخطی را بر اساس یک مدل پلاستیسیته عمومی شده تغییر یافته برای رفتار مدل خاک با سخت‌شدگی - نرم‌شدگی پیشنهاد کردند و در این تحقیق از سطح تسلیم منفرد سلسله مراتبی (HISS) استفاده نمودند. اخویسی [۲۶-۲۷] روش پلاستیسیته عمومی شده را برای مدل‌سازی اندرکنش خاک - سازه به کار برد.

بر اساس مقایسه نتایج، یک تطابق قابل توجهی بین داده‌های تجربی و مدل عددی مشاهده شد با این حال، اندرکنش خاک و سازه بنایی تحت انفجار در مطالعات گذشته در نظر گرفته نشده است. علاوه بر این محققین بر روی شتاب سازه تحت انفجار زیرسطحی، که می‌تواند اطلاعات مفیدی برای مهندسی و محققین فراهم کند، متمرکز نشده بودند. بنابراین، با در نظر گرفتن مطالب اشاره شده در متن و اهمیت حفاظت سازه‌ها در مقابل حملات انفجاری تروریستی، مطالعه حاضر پاسخ دینامیکی سازه بنایی غیرمسلح را تحت انفجار حوزه نزدیک بررسی می‌کند. بدین منظور، مطالعه میدانی سازه بنایی با بازشو مورد بررسی قرار گرفت. در این مطالعه، روش ماکرو برای مدل‌سازی مصالح بنایی به کار گرفته شد و دیوار آجری به عنوان مصالح همگن و یکنواخت بر اساس مشخصات مکانیکی معادل در نظر گرفته شده بود. این روند مدل‌سازی ساده و حجم محاسبات به صورت قابل توجهی کمتر از مدل‌سازی میکرو است. دیوارهای بنایی غیرمسلح با ابعاد ۱ متر در ۲/۲ متر در ۰/۱ (عرض در ارتفاع در ضخامت) تحت بارهای انفجاری ناشی از ۴۵۰۰ گرم آمونیوم نیترات (ANFO)، همراه با ۴۲۸ گرم ژل - دینامیت (امولیت) (معادل ۳،۹۸ کیلوگرم TNT [۲۸]) در فاصله ۲ متری از مرکز سازه و ۱/۵ متر پایین‌تر از سطح زمین قرار گرفتند.

امروزه، با افزایش تعداد حملات تروریستی در جهان، ارزیابی عملکرد سازه در مقابل بار انفجار و اثر آن توجه زیادی به خود جلب کرده است. پس لازم است رفتار سازه‌ها در مقابل انفجار درک شوند. لذا، سازه‌ها باید در مقابل انفجار مقاوم باشند. مدل‌های عددی به طور وسیعی برای حل مسائل دینامیکی مربوط به انفجار نظیر انفجارهای گازی و به دنبال آن فشار ناشی از انتشار امواج به کار برده می‌شوند.

طی دهه گذشته، تعداد زیادی از تحقیقات بر اساس مدل‌سازی عددی انجام شده است تا جزئیات انفجار و همچنین پیش‌بینی پاسخ سازه در برابر آن درک شود [۱]. پس شناسایی پاسخ دینامیکی سازه‌ها تحت بارگذاری انفجار برای حفاظت از سازه‌ها تحت بارهای انفجاری ضروری به نظر می‌رسد [۲]. به دلیل سهولت ساخت و هزینه‌های کم، سازه بنایی معمولاً در ایران و سایر کشورها مورد استفاده قرار می‌گیرد. پس مطالعه رفتار سازه بنایی غیرمسلح تحت انفجار به نظر مهم می‌آید. اخیراً محققین یک مجموعه مطالعاتی روی پاسخ دینامیکی سازه‌های بنایی تحت انفجار انجام داده‌اند.

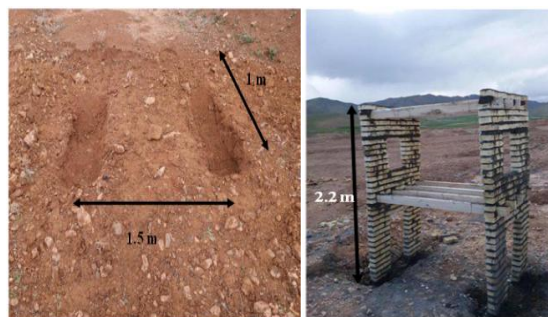
برای مثال، بعضی محققین پاسخ دینامیکی غیرخطی دیوارهای بنایی تحت انفجار را با استفاده از یک مدل سه‌بعدی که در آن آجر و ملات جداگانه مدل شده است، مورد مطالعه قرار داده‌اند [۳-۷]. این روش می‌تواند جواب‌های صحیحی را با استفاده از مدل مناسب با پارامترهای دقیق با در نظر گرفتن سطح مشترک بین آجر و ملات تولید کند. با این حال، جزییات این مدل عددی پیچیده و آنالیز آن زمان‌بر است.

بعضی محققین یک روش همگن برای مصالح بنایی که قابل استفاده در شبیه‌سازی پاسخ دینامیکی سازه بنایی تحت انفجار است، ارائه کردند [۸-۱۱]. مدل رابط [۱۲-۱۴]، مدل مقیاس متوسط و بقیه روش‌های شبیه‌سازی برای افزایش صحت و عملکرد عددی در سازه بنایی غیرمسلح تحت بارهای دینامیکی و انفجار تهیه شدند [۱۵-۱۷]. برای مثال وی و هانگ [۱۸]، تحقیق مشابهی بر اساس مدل‌سازی عددی ارائه کردند. احمد و همکاران پاسخ سازه بنایی غیرمسلح را تحت شش آزمایش میدانی انفجار در مقیاس بزرگ ارزیابی کردند [۱۹]. در یک مطالعه دیگر، کیز و کلابلی اجزای دیوار بنایی را تحت بارهای انفجاری بر اساس روش المان کاربردی (AEM) مطالعه کردند. نتایج نشان داد که تطابق

## ۲. طرح آزمایش

### ۱-۲. طرح نمونه سازه بنایی

همان‌طور که در شکل (۱) نشان داده شده است، ابعاد سازه در پلان ۱/۵ در ۱ متر است. ابعاد بازشوی پایین دارای عرض ۰/۴ متر و ارتفاع ۰/۸ متر و بازشوی بالا دارای عرض ۰/۴ متر و ارتفاع ۰/۵ متر است.



شکل ۱. روند ساخت

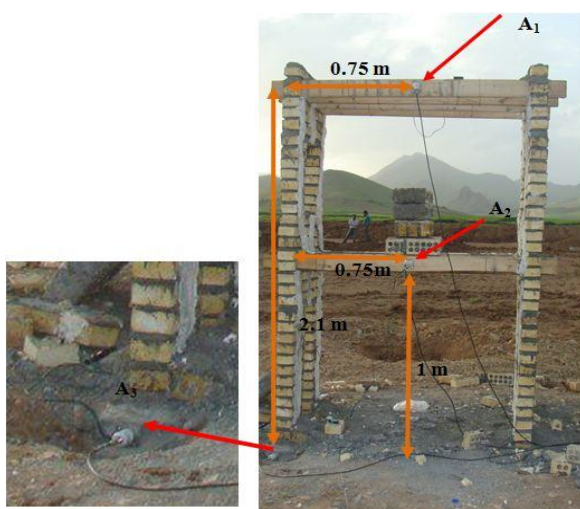
در آزمایش اول، مقادیر برش و لنگر خمشی بعد از بارگذاری نمونه در نقطه شکست محاسبه شد. بعد از تعیین تنش برشی و تنش نرمال، مقاومت کششی نمونه با استفاده از دایره موهر برابر ۰/۲۹ مگاپاسکال محاسبه شد. سپس، همان‌طور که در جدول (۱) نشان داده شده، مقاومت کششی برای نمونه‌های دیگر بعد از انجام تست‌ها و محاسبات لازم تعیین شد. بر اساس انحراف معیار استاندارد و متوسط مقاومت نمونه‌ها، مقاومت فشاری و کششی واحد بنایی به ترتیب ۴ مگاپاسکال و ۰/۳۸ مگاپاسکال تعیین شد. مدول یانگ، نسبت پواسون و وزن مخصوص سازه به ترتیب ۱۷۷۰ مگاپاسکال، ۰/۲ و ۱۸۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب در نظر گرفته شد. برای تعیین پارامترهای مقاومت برشی خاک با توجه به آیین نامه ASTM D4767، آزمایش‌های سه محوری در وضعیت CU انجام شد تا پارامترهای مقاومت به دست آید.

جدول ۱. مقاومت فشاری و کششی واحد بنایی

نمونه	مقاومت فشاری (MPa)	مقاومت کششی (MPa)	انحراف معیار	میانگین مقاومت کششی (MPa)	مقاومت کششی معیار
۱	۳/۱	۰/۲۹	۰/۴۲۷۲	۰/۳۴	۰/۰۴۹۶
۲	۳/۵	۰/۳۱			
۳	۳/۸	۰/۳۶			
۴	۴/۱	۰/۴			

### ۲-۲. ابزار و اندازه‌گیری

برای ثبت شتاب ایجاد شده در سازه شتاب‌سنج‌ها روی پایین، وسط و بالای سازه نصب شدند. شکل (۴) موقعیت‌های آن‌ها را نشان می‌دهد.



شکل ۴. موقعیت حس گرها

برای هر بام، ۴ عدد چوب با ابعاد ۱/۷ متر در ۰/۰۵ متر در ۰/۱ متر (طول در ضخامت در ارتفاع) استفاده شده بود. مدول یانگ و نسبت پواسون چوب‌ها به ترتیب ۱۱۰۰۰ مگاپاسکال و ۰/۳ است و جرم واحد حجم آن ۹۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب است. در مدل‌سازی، رفتار چوب‌ها به صورت خطی در نظر گرفته شد. دیوارهای بنایی در سایت ساخته شدند و نمونه‌ها مورد مراقبت قرار گرفتند. ضخامت ملات ۱۰ میلی‌متر است. همان‌طور که در شکل‌های (۲) و (۳) نشان داده شده است، ۴ نمونه واحد بنایی برای محاسبه مقاومت فشاری و مقاومت کششی ساخته شد. جدول (۱) نتایج آزمایش‌ها را نشان می‌دهد.

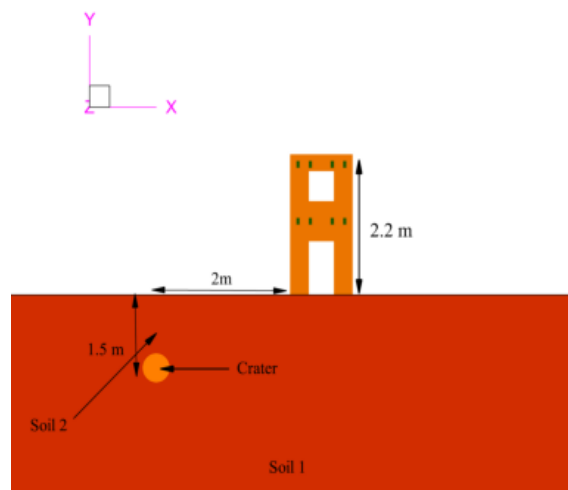


شکل ۲. آزمایش مقاومت فشاری



شکل ۳. آزمایش مقاومت کششی

مقطع عرضی سازه و موقعیت کراتر را نشان می‌دهد. خاک ۱ خاک دست‌نخورده سایت است اما برای قرار دادن مواد منفجره در عمق ۱/۵ متری باید چاله‌ای حفر شود و همین امر باعث تغییر مشخصات مکانیکی خاک روی کراتر شده که از آن به‌عنوان خاک شماره ۲ نام برده شده است.



شکل ۶. مقطع عرضی سازه و موقعیت استقرار مواد انفجاری (کراتر)

#### جدول ۲. مشخصات خاک

مقدار	واحد	عنوان	مواد
۱۸۰۰	Kg/m <sup>3</sup>	جرم حجمی	خاک ۱
۰/۰۱۵	MPa	چسبندگی	
۳۵	Degree	زاویه اصطکاک	
۳۰	Degree	زاویه اتساع ( $\psi$ )	
۱۰۰	MPa	مدول الاستیسیته	
۱۸۰۰	Kg/m <sup>3</sup>	جرم حجمی	خاک ۲
۰/۰۰۵	MPa	چسبندگی	
۳۰	Degree	زاویه اصطکاک	
۲۵	Degree	زاویه اتساع ( $\psi$ )	
۵۰	MPa	مدول الاستیسیته	

#### ۱-۳. مدل‌سازی سازه بنایی

سازه با استفاده از سطح تسلیم منتری- ویلیام مدل شده است. مدلی ساختاری بر اساس سطح تسلیم ویلیام - وارنکه به‌صورت تابعی از سه تانسور تنش مستقل است. شکل‌های (۷-الف) و (۷-ب) یک نمودار شماتیک برای فشار و کشش را به‌ترتیب نشان می‌دهد. جدول (۳)، متغیرهای لازم برای سطح تسلیم را نمایش می‌دهد.

رنج شتاب و فرکانس شتاب‌سنج‌ها به‌ترتیب برابر ۵۰g و ۵/۵ کیلو هرتز بود. سیگنال‌ها توسط یک داده‌نگار ۴ کاناله با استفاده از نرخ داده برداری ۲۵۰ میلیون سمپل در ثانیه و رزولوشن ۱۲ بیت ثبت شدند. کابل‌ها دارای طول ۴۰ متر، بدون از دست‌دادن ولتاژ بودند. ۳ عدد حس‌گر شتاب‌سنج A<sub>1</sub>، A<sub>2</sub> و A<sub>3</sub> با مشخصات ذکر شده در آزمایش استفاده شد. دو عدد از حس‌گرها در وسط تیر آخر، در طبقه اول و دوم پشت سایت انفجار و حس‌گر سوم روی پی سازه نصب شده بود. فاصله مقیاس برابر ۱/۲۶m/kg<sup>1/3</sup> بود، که نشان‌دهنده این است آزمایش‌ها در فاصله نزدیک انجام شده است. شکل (۵) روند انفجار را برای زمان‌های مختلف پس از انفجار نشان می‌دهد. زمان انفجار برابر ۰/۱ ثانیه بود و همان‌طور که در شکل (۵) نشان داده شده است، پاسخ سازه محلی و جزئی است و خسارت در حین انفجار کم است. در لحظات پایانی آزمایش، سقف طبقه دوم ناشی از اثرات امواج هوا دچار آسیب شد.



الف) زمان ۰/۰۱ ثانیه (ب) زمان ۰/۰۴ ثانیه



ج) زمان ۰/۰۷ ثانیه

شکل ۵. پروسه انفجار: الف) زمان=۰/۰۱ ثانیه، ب) زمان=۰/۰۴ ثانیه، ج) زمان=۰/۰۷ ثانیه

#### ۳. شبیه‌سازی عددی

شبیه‌سازی عددی از طریق مدل‌های محاسباتی به‌عنوان ابزاری مناسب در روند طراحی سازه مورد توجه قرار گرفته است. مقایسه بین نتایج عددی و میدانی می‌تواند روند آزمایش را بهبود بخشد. رفتار خاک برای تغییر شکل‌های کوچک خطی است در حالی که برای بارهای بزرگ از جمله بار انفجار غیرخطی می‌شود [۲۹-۳۰].

با توجه به مشخصات مربوط به مدل موهر-کولمب، این مدل برای بیان رفتار غیرخطی خاک استفاده شد [۳۱-۳۳].

جدول (۲) ویژگی‌های مرتبط با مکانیک خاک به‌دست آمده از گمانه‌های حفاری در محل مطالعه را نشان می‌دهد. شکل (۶)

$$K_{cm} = 0.003 \cdot \frac{R_c}{E} = 0.003 \cdot \frac{4}{1770} = 0.00074 \quad (1)$$

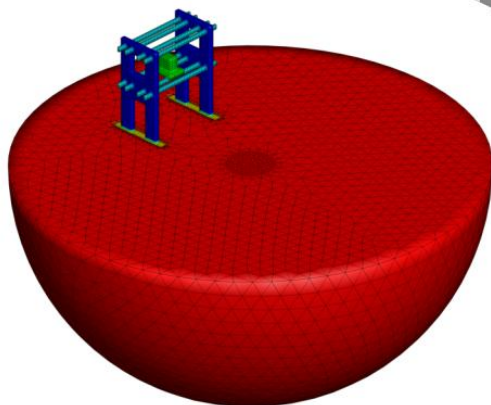
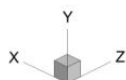
$$K_{cr} = 0.0035 \cdot \frac{R_c}{E} = 0.0035 \cdot \frac{4}{1770} = 0.00124 \quad (2)$$

حداکثر کرنش پلاستیک در تنش ۵ برابر کرنش الاستیک بوده که طبق معادله (۳) تعریف می‌شود.

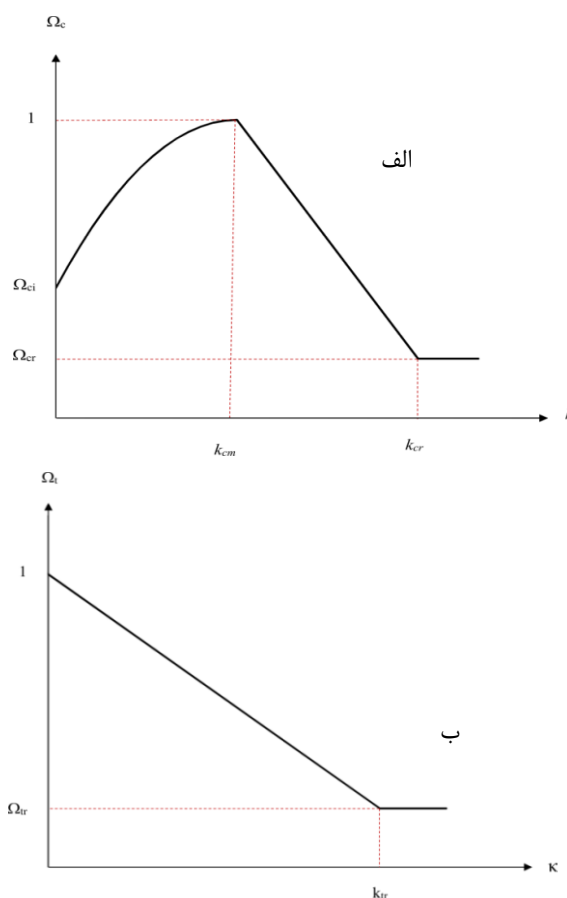
$$K_{tr} = 5 \cdot \frac{R_t}{E} = 5 \cdot \frac{0.38}{1770} = 0.00107 \quad (3)$$

سایر پارامترهای جدول (۳) با توجه به راهنمای انسیس باید اعدادی بین صفر و یک باشند که با توجه به مثال‌های موجود در انسیس مقادیر تعیین شده‌اند. برای مدل‌سازی خاک و سازه از المان solid185 استفاده شده است. پس از انجام آنالیز حساسیت، ابعاد مش برای سازه ۵۰ میلی‌متر به صورت منظم و برای خاک محیط اطراف سازه به طور متوسط ۲۰۰ میلی‌متر و برای خاک روی چاله انفجار ۶۰ میلی‌متر به صورت آزاد (free) مش زده شد. حل مساله به روش تحلیل دینامیکی غیرخطی در گام‌های زمانی ۰/۰۰۱ انجام گرفت که خطای همگرایی برابر ۰/۰۰۱ در نظر گرفته شد.

در مدل‌سازی، مرز خاک در طرفین، جلو و عقب سازه به ترتیب ۴۵۰۰ میلی‌متر، ۴۵۰۰ میلی‌متر و ۳۵۰۰ میلی‌متر در نظر گرفته شد. فاصله انتخاب شده حداقل ابعادی است که براساس تحلیل و عدم تداخل امواج ناشی از انفجار زیرزمینی تعیین شد. همان‌طور که در شکل (۸) مشاهده می‌شود، یک مدل عددی سه‌بعدی برای پیش‌بینی بهتر و صحیح‌تر پاسخ سازه تحت بار انفجاری ارائه شد. ۷۰ کیلوگرم به‌عنوان بار ثقلی طبقه اول در نظر گرفته شد.



شکل ۸. نحوه مش‌بندی مدل



شکل ۷. مدل رفتار واحد بنایی در: الف) فشار، ب) کشش

جدول ۳. مشخصات مکانیکی واحد بنایی

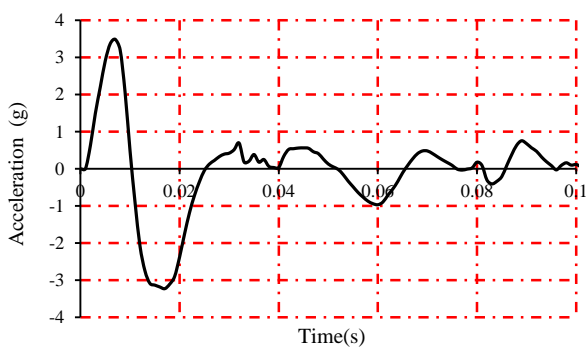
مقدار	واحد بنایی
۴	مقاومت فشاری تک‌محوره ( $R_c$ )
۰/۳۸	مقاومت کششی تک‌محوره ( $R_t$ )
۴/۸	مقاومت فشاری دو محوره ( $R_b$ )
۱۰	زاویه اتساع ( $\psi$ )
۰/۰۰۰۷۴	کرنش پلاستیک در مقاومت فشاری تک‌محوری ( $K_{cm}$ )
۰/۰۰۱۲۴	کرنش پلاستیک مؤثر نهایی در فشار ( $K_{cr}$ )
۰/۳۳	تنش نسبی در شروع سخت‌شدگی غیرخطی ( $\Omega_{ci}$ )
۰/۱	تنش نسبی باقی‌مانده فشاری ( $\Omega_{cr}$ )
۰/۰۰۱۰۷	حد کرنش پلاستیک در تنش ( $k_{tr}$ )
۰/۲	تنش نسبی کششی باقیمانده $\Omega_{tr}$

مقاومت فشاری ( $R_c$ ) و مقاومت کششی ( $R_t$ ) از طریق آزمایش تعیین شده‌اند اما برای مقاومت فشاری دو محوره ( $R_b$ ) با توجه به راهنمای انسیس مقدار آن معمولاً ۱/۲ برابر مقاومت فشاری در نظر گرفته می‌شود. کرنش پلاستیک در مقاومت فشاری تک‌محوری و کرنش پلاستیک مؤثر نهایی در فشار به صورت روابط (۱) و (۲) محاسبه می‌شوند.

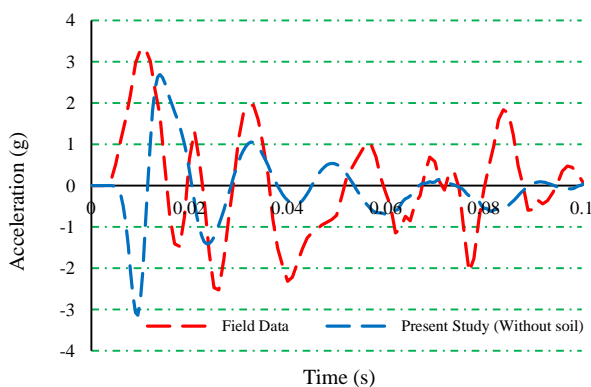
جهت حرکت ذرات قائم بر مسیر انتشار امواج است. در نزدیکی سطح زمین، ذرات خاک به صورت دایره‌ای حرکت می‌کنند که این امواج، امواج ریلی یا امواج R نامیده می‌شوند. عموماً امواج S و P نزدیک مرکز انفجار غالب هستند در حالی که امواج R به دلیل میرایی کمتر در حوزه دور، غالب هستند [۳۷].

#### ۴. مقایسه نتایج مدل عددی و داده‌های میدانی

تغییرات فشار انفجار برای شبیه‌سازی عددی از اهمیت بالایی برخوردار است. بنابراین، مطالعات میدانی نتایجی را فراهم می‌کند که باید با مقادیر عددی مقایسه شود. برای ارزیابی اثر اندرکنش بین خاک و سازه، ابتدا مدل بدون خاک در نظر گرفته شد و سازه تحت مؤلفه افقی شتاب فونداسیون ناشی از انفجار آنالیز گردید. شکل (۱۰) مؤلفه افقی شتاب فونداسیون ناشی از انفجار را نشان می‌دهد. شکل (۱۱)، مقایسه شتاب افقی طبقه اول را در حالت با و بدون خاک نشان می‌دهد. یک تفاوت قابل توجه بین نتایج مشاهده می‌شود. همان‌طور که در شکل (۱۲) نشان داده شده است، این تفاوت می‌تواند در مؤلفه شتاب افقی طبقه دوم نیز دیده شود. بر اساس نتایج، در نظر نگرفتن اندرکنش خاک و سازه در مدل‌سازی عددی انفجار زیرزمینی، منجر به خطا در نتایج می‌شود.



شکل ۱۰. مؤلفه افقی شتاب ناشی از انفجار در پی



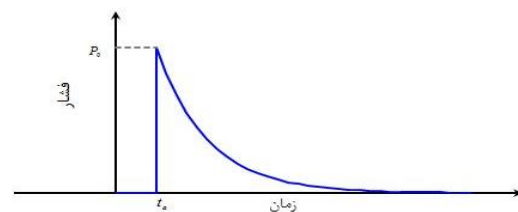
شکل ۱۱. مؤلفه افقی شتاب ناشی از انفجار در طبقه اول

#### ۲-۳. مدل‌سازی بار انفجاری

اثر انفجار بر اساس شکل یک موج ضربه، شامل شوک با فشار بالاست که از مرکز انفجار به خارج انتشار می‌یابد، و با فاصله گرفتن از مرکز انفجار شدت فشار کاهش می‌یابد [۳۴]. بار انفجاری را می‌توان به‌عنوان یک ضربه با تاریخچه زمانی به شکل نمایی تعریف کرد که به‌صورت آنی در اندازه کاهش می‌یابد [۳۵]. شکل (۹) یک منحنی فشار-زمان را نشان می‌دهد. پس لازم است تغییرات و کاهش فشار با زمان برقرار شود زیرا پاسخ سازه هم به فشار حداکثر ( $P_0$ ) و هم به تاریخچه زمانی فشار بار ضربه‌ای بستگی دارد [۳۶].

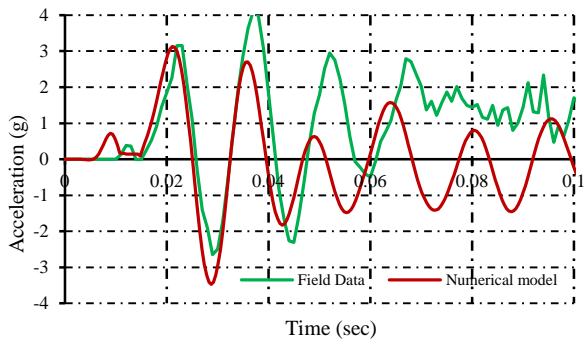
$$P_t = P_0 e^{-\frac{t}{t_a}} \quad (۴)$$

که در آن  $P_0$  نمایانگر فشار انفجار حداکثر در میدان آزاد است،  $P_t$  فشار انفجار در زمان  $t$  نشان می‌دهد، و  $t_a$  مربوط به زمان رسیدن از لحظه انفجار تا زمانی است که ضربه وارد یک نقطه مشخصی از سازه می‌شود و از رابطه  $R/C$  به دست می‌آید که  $R$  فاصله نقطه انفجار تا سازه و  $C$  میانگین سرعت موج در خاک است. در این آزمایش، موقعیت محل انفجار در یک نقطه با فاصله ۲ متر از مرکز سازه و ۱/۵ متر پایین‌تر از سطح خاک است. شکل (۹) تاریخچه زمانی بار انفجار را نشان می‌دهد. جبهه شوک به نام موج انفجار است که با یک فشار افزایش یافته تا فشار حداکثر  $P_0$  تعیین شده است. افزایش فشار به‌صورت شعاعی با جبهه شوک توزیع می‌شود و به تدریج سرعت حرکت نقطه انفجار کاهش می‌یابد. در انفجار مدفون، انرژی به شکل فشار و امواج برشی داخل زمین توزیع می‌شود و شوک‌های جدیدی را به وجود می‌آورد که می‌تواند به طرز قابل توجهی اثرات تخریبی داشته باشد. تمام انفجارهای اتفاق افتاده نزدیک سطح زمین یا در امتداد عمق با دو نوع از امواج سطحی و حجمی دنبال شده است. این موج به نام موج فشار یا موج P نامیده می‌شود وقتی که جهت ذرات خاک در امتداد انتشار موج است.



شکل ۹. منحنی تاریخچه زمانی فشار انفجار

در این حالت، ذرات خاک در امتداد موج فشرده شده و با تمایل به جدا شدن از یکدیگر دارند. در امواج برشی یا موج S،

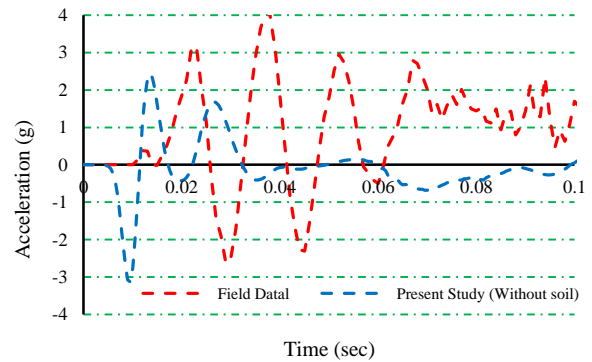


شکل ۱۵. مقایسه نمودارهای تاریخچه زمانی شتاب به‌دست‌آمده از مدل عددی و داده‌های میدانی در طبقه دوم

شکل‌های (۱۵)، دیگرام تاریخچه زمانی شتاب را برای طبقه دوم نشان می‌دهد. شتاب مثبت حداکثر برابر  $4/1$  g است که در زمان  $0/037$  ثانیه رخ می‌دهد و حداکثر شتاب منفی طبقه در زمان  $0/029$  ثانیه ثبت شد که برابر  $2/64$ g- است. همان‌طور که در شکل (۱۵) نشان داده شده است، خسارت اتفاق افتاده در بام ناشی از برخورد امواج هوا بعد از گذشت  $0/071$  ثانیه است. لازم به ذکر است که این پدیده در فرمولاسیون دیده نشده است. همان‌طور که در شکل‌های (۱۳)، (۱۴) و (۱۵) نشان داده شده است، بعد از انفجار، موج خیلی سریع‌تر از سایر حس‌گرها در حس‌گر  $A_3$  که به فونداسیون متصل است ثبت می‌شود. از آن جایی که چگالی خاک و سازه بنایی تقریباً مشابه است، موج با سرعت مشابه در سازه منتشر می‌شود و شتاب در حس‌گر  $A_2$  متصل به طبقه اول و حس‌گر  $A_1$  متصل به طبقه دوم ثبت می‌گردد. سپس بعد از  $0/071$  ثانیه، وقتی شتاب در فونداسیون و طبقه اول ثبت شد، ماهیت شتاب ثبت‌شده به دلیل برخورد موج هوا با سقف طبقه دوم تغییر می‌کند. علاوه بر این، این موضوع نشان می‌دهد که شتاب ثبت‌شده بعد از  $0/071$ ، مربوط به انفجار نیست چون موج انفجار ابتدا از داخل سازه عبور می‌کند و روی بخش‌های مختلف آن اثر می‌گذارد و به دنبال آن مولکول‌های هوا در سرعت پایین‌تری بعد از انفجار حرکت می‌کنند. همان‌طور که در شکل‌های (۱۳)، (۱۴) و (۱۵) نشان داده شده است، نتایج شبیه‌سازی عددی تطابق مناسبی با داده‌های میدانی دارد. به‌علاوه، یک افزایش در بار انفجاری منجر به یک افزایش در نیروی دینامیکی می‌شود. بار دینامیکی حداکثر  $P_0$  دریافتی از معادله نیمه تجربی ارائه‌شده توسط ارتش آمریکا به‌صورت زیر است [۳۶-۳۸].

$$P_0 = 48.8 \rho c f_c \left( \frac{2.52R}{W} \right)^{-n} \quad (5)$$

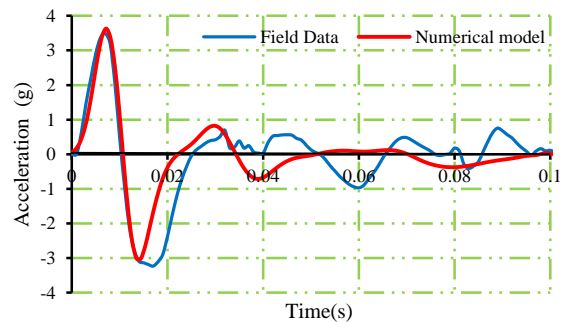
که در این رابطه  $\rho$  بیان‌گر جرم واحد حجم خاک (۱۸۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب)،  $C$  سرعت موج،  $R$  فاصله از محل انفجار



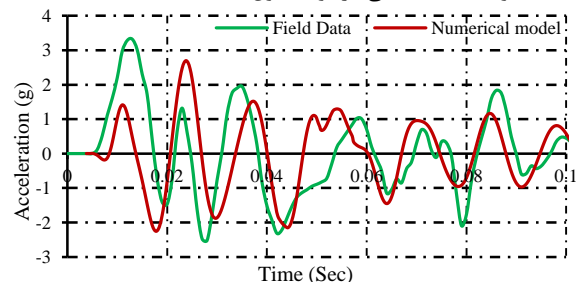
شکل ۱۲. مؤلفه افقی شتاب ناشی از انفجار در طبقه دوم

شکل‌های (۱۳-۱۵) تاریخچه زمانی شتاب به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی عددی را با داده‌های میدانی به‌دست‌آمده از انفجار زیرسطحی، مقایسه می‌کند. همان‌طور که در شکل (۱۳) نشان داده شده است، امواج فشاری در کمترین زمان به مقدار حداکثر خود می‌رسد. موج برای مدت زمان  $0/01$  ثانیه در فاز مثبت است که در این بازه، شتاب به مقدار حداکثر خود  $3/48$ g می‌رسد. سپس شتاب وارد فاز منفی می‌شود که مدت  $0/015$  ثانیه طول می‌کشد و در این فاصله به حداکثر مقدار  $3/32$ g می‌رسد.

شکل‌های (۱۴ و ۱۵) شتاب بام را در طبقات نشان می‌دهد. پس از گذشت  $0/003$  ثانیه شتاب در طبقه اول ثبت می‌شود. همان‌طور که در شکل (۱۴) مشاهده شد، حداکثر شتاب مثبت طبقه اول در زمان  $0/013$  ثانیه برابر  $3/23$ g است در حالی که حداکثر شتاب منفی برابر  $2/52$ g است که در زمان  $0/028$  ثانیه اتفاق می‌افتد. سپس، موج با گذر زمان میرا می‌شود.

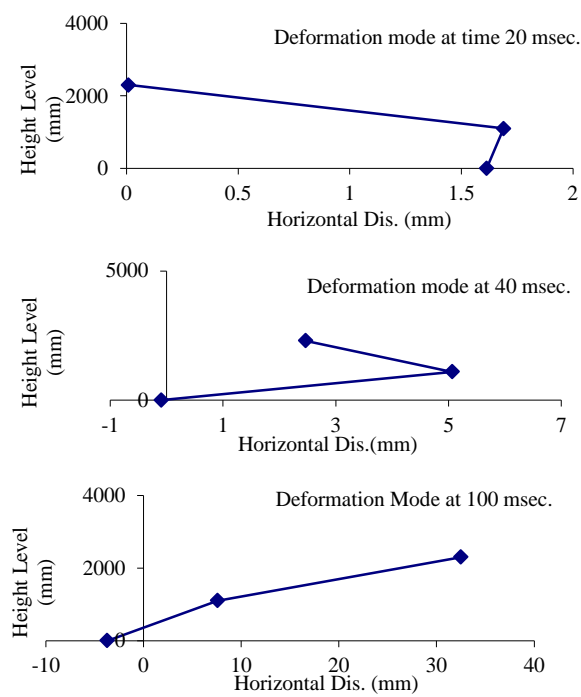


شکل ۱۳. مقایسه نمودارهای تاریخچه زمانی شتاب به‌دست‌آمده از مدل عددی و داده‌های میدانی در فونداسیون

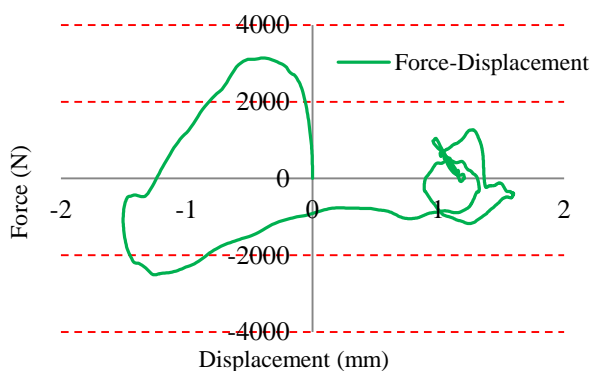


شکل ۱۴. مقایسه نمودارهای تاریخچه زمانی شتاب به‌دست‌آمده از مدل عددی و داده‌های میدانی در طبقه اول

حالت‌های تغییر شکل سازه در زمان‌های ۲۰، ۴۰ و ۱۰۰ میلی‌ثانیه و در شکل (۱۹) نمودار نیرو-جابجایی دیوار نشان داده شده است.



شکل ۱۸. حالت‌های تغییر شکل سازه در زمان‌های مختلف

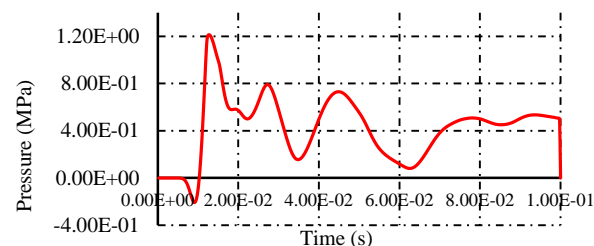


شکل ۱۹. نیرو-تغییر مکان دیوار تحت انفجار

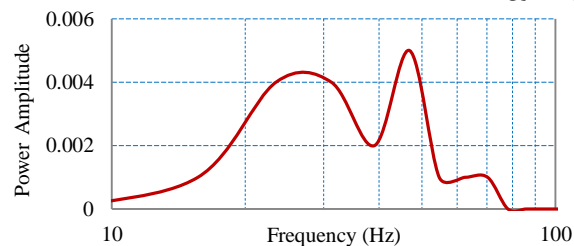
همان‌طور که در شکل‌های (۲۰ و ۲۱) نشان داده شده است، پس از رسیدن موج انفجار به پی سازه، موج به سرعت در داخل سازه گسترش یافته و منجر به شتاب، سرعت و جابجایی در بین طبقه‌ها می‌شود. دلیل افزایش سرعت و جابجایی طبقه دوم، همان‌طور که قبلاً ذکر شد، برخورد موج هوای ناشی از انفجار، موجب افتادن تیری که حسگر به آن متصل بود شده است. شکل‌های (۲۲-الف) و (۲۲-ب) نحوه انتشار موج در خاک در اواسط و انتهای مدل‌سازی عددی را نشان می‌دهد.

(۲ متر)، وزن مواد منفجره (۳/۹۸ کیلوگرم)،  $n$  ضریب میرایی است [۳۸]. بر اساس معادله (۵)، مقدار  $P_0$  برابر ۱/۱۷۵ مگا پاسکال به دست آمد. پس از تعیین تاریخچه زمانی بارگذاری انفجار، بار انفجار به صورت تابع تعریف شده و در نقطه انفجار (کراتر) در خاک که در مدل‌سازی در فاصله ۲ متری و عمق ۱/۵ قرار دارد، وارد می‌شود. مدت بارگذاری بار انفجار ۰/۱ ثانیه است که در گام‌های زمانی ۰/۰۰۱ در طی ۱۰۰ گام در نرم‌افزار تعریف می‌شود. در آزمایش انفجار، فاصله مقیاس برابر  $1/26 \text{ m/kg}^{1/3}$  و ضریب کوپل  $f_c$  برای انفجار برابر ۱ است. بر اساس نتایج حاصل‌شده در شکل (۱۶)، فشار حداکثر روی فونداسیون از مدل‌سازی عددی برابر ۱/۲۱ مگاپاسکال به دست آمده است که سازگاری خوبی با مقدار  $P_0$  به دست آمده از رابطه (۵) (۱/۱۷۵ مگاپاسکال) دارد.

شکل (۱۷) طیف فوریه شتاب فونداسیون ناشی از انفجار زیرزمینی را با استفاده از آنالیز تبدیل سریع فوریه (FFT) نشان می‌دهد.



شکل ۱۶. نمودار تاریخچه زمانی فشار به دست آمده از مدل عددی در فونداسیون



شکل ۱۷. آنالیز فرکانسی انفجار زیرسطحی

با توجه به آنالیز فرکانسی، فرکانس سازه متفاوت از مقادیری است که مربوط به شتاب ناشی از انفجار بود. باید توجه داشت در انفجار بر خلاف زلزله که کل سازه به ارتعاش می‌افتد و خسارت کلی است، پاسخ سازه جزئی بوده و خسارت کمتر است. لازم به یادآوری است با توجه به این مطلب که اثر جریان هوا در مدل‌سازی عددی در نظر گرفته نشده است، مقدار تغییر مکان در طبقه دوم بزرگتر از مقدار آن در مدل‌سازی عددی است، که دلیل آن برخورد موج هوا به سقف طبقه دوم است. در شکل (۱۸)،

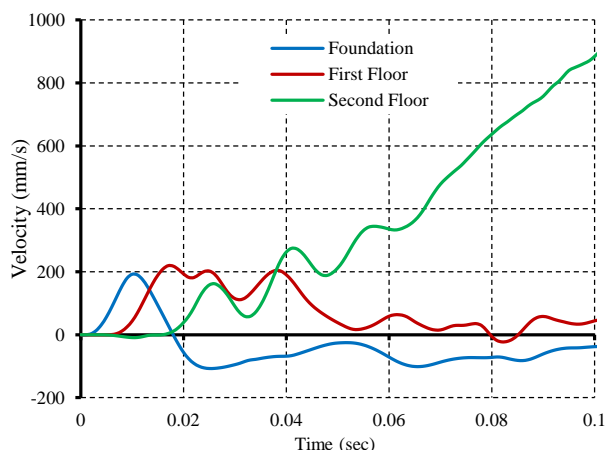


## ۵. نتیجه گیری

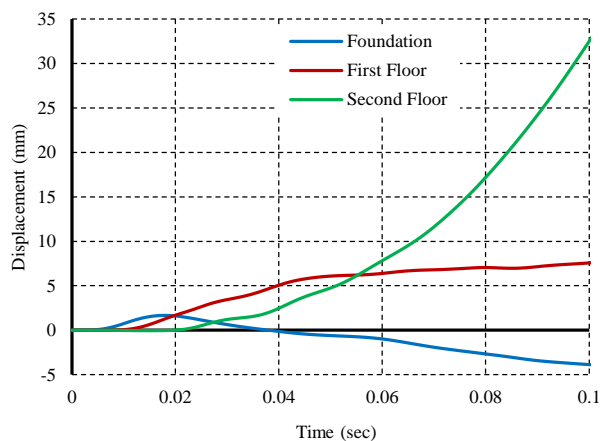
مطالعه حاضر، با هدف ارزیابی پاسخ دینامیکی غیرخطی سازه بنایی تحت انفجار زیرسطحی صورت گرفت. دیوارهای بنایی غیرمسلح با ابعاد ۱ متر در ۲/۲ متر در ۰/۱ (عرض در ارتفاع در ضخامت) تحت بار انفجاری ناشی از ۴۵۰۰ گرم آمونیوم نیترات (ANFO) همراه با ۴۲۸ گرم ژل - دینامیت (امولیت) (معادل ۳،۹۸ کیلوگرم TNT) در فاصله ۲ متری از مرکز سازه و ۱/۵ متر پایین تر از سطح زمین قرار گرفت. برای این هدف، شتاب‌ها در سازه بنایی ثبت شدند. داده میدانی برای مهندسی و تأیید آنالیزهای تئوری و عددی بعدی‌شان مناسب است. به علاوه، یک شبیه‌سازی عددی با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود جهت به دست آوردن گراف‌های توزیع شتاب در دیوار سازه بنایی انجام شد. برای این هدف، نرم‌افزار ANSYS استفاده شد. مدل منتری- ویلیام و دراگر- پراگر برای مدل کردن سازه و خاک به ترتیب استفاده شد. انفجار زیرزمینی با هدف تولید امواج شبیه زلزله صورت گرفت. هیچ پستی بلندی برای مدل‌سازی عددی در نظر گرفته نشد چون توپولوژی خاصی که بتواند پاسخ را تحت تأثیر قرار دهد در سایت آزمایش انفجار گزارش نشد. در این مطالعه، برای مدل‌سازی سازه از مدل ماکرو استفاده شد که هم روشی ساده است و هم حجم محاسبات مدل‌سازی را نسبت به حالت مدل‌سازی میکرو کاهش می‌دهد. با این حال، مطابقت مناسب نتایج عددی و میدانی می‌تواند تأییدکننده قابلیت اعتماد مدل‌سازی سازه با روش ماکرو باشد. یکی از دلایل تفاوت مشاهده شده در نتایج عددی و میدانی مدل مربوط به این واقعیت است که مصالح به صورت همگن در مدل ماکرو در نظر گرفته شده‌اند در حالی که لغزش بین ملات، آجر و چوب در مدل اصلی مشاهده می‌شود که می‌تواند نقش مهمی در این زمینه ایفا کند. همچنین در شبیه‌سازی عددی برخورد موج هوا با سازه در نظر گرفته نشده بود که این عامل نیز در تفاوت نتایج تأثیرگذار است. هر دو نتایج میدانی و عددی می‌تواند نقش کلیدی اندرکنش خاک-سازه را تأیید کند. در نهایت، نتایج مدل‌سازی عددی نشان داد که یک صحت خوبی برای مدل‌سازی انفجار وجود دارد.

## ۶. مراجع ها

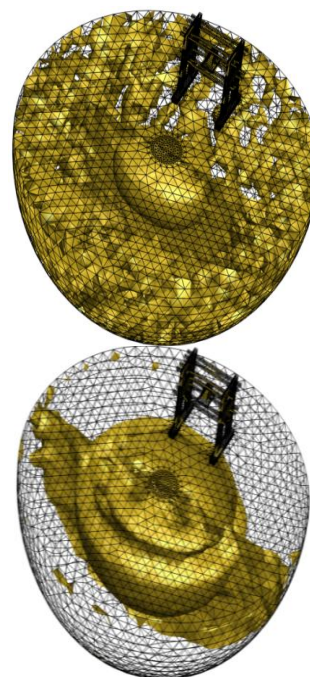
- [1] Sielicki, P. W. "Masonry Failure Under Unusual Impulse Loading"; Wydawnictwo Politechniki Poznań, Skiej, 2013.
- [2] Wu, C.; Hao, H.; Lu, Y. "Dynamic Response and Damage Analysis of Masonry Structures and Masonry Infilled RC Frames to Blast Ground Motion"; Eng. Struct. 2005, 27, 323-333.
- [3] Wei, X.; Stewart, M. G. "Model Validation and Parametric Study on the Blast Response of Unreinforced Brick Masonry Walls"; Int. J. Impact. Eng. 2010, 37, 1150-1159.



شکل ۲۰. سرعت ایجادشده در سازه ناشی از انفجار



شکل ۲۱. تغییر مکان ایجادشده در سازه ناشی از انفجار



شکل ۲۲. پروسه انفجار در مدل عددی در زمانه‌های مختلف الف. زمان ۰/۰۱ ثانیه ب. زمان ۰/۰۷ ثانیه

- [22] Eamon, C. D.; Baylot, J. T.; O'Daniel, J. L. "Modeling Concrete Masonry Walls Subjected to Explosive Loads"; *J. Eng. Mech.* 2004, 130, 1098-1106.
- [23] Hao, H.; Ma, G. "Numerical Simulation of Underground Explosions and their Effects on Surface Structures"; Technical Report, 1997.
- [24] Riedel, W.; Fischer, K.; Kranzer, C.; Erskine, J.; Cleave, R.; Hadden, D.; Romani, M. "Modeling and Validation of a Wall-Window Retrofit System Under Blast Loading"; *Eng. Struct.* 2012, 37, 235-245.
- [25] Akhaveissy, A.; Desai, C.; Sadrnejad, S.; Shakib, H. "Implementation and Comparison of a Generalized Plasticity and Disturbed State Concept for the Load-Deformation Behavior of Foundations"; *Sci. Iran. Trans. A.* 2009, 16, 189-198.
- [26] Akhaveissy, A. "Evaluation of Tunnel-Structure Interaction due to Strong ground movement"; Ph. D. Thesis, Civil Engineering Department, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran, 2007.
- [27] Akhaveissy, A. "Analysis of Tunnel and Super Structures for Excavation"; *Sci. Iran.* 2011, 18, 1-8.
- [28] Cooper, P. W. "Explosives Engineering"; VCH Pub, 1996.
- [29] Jayasinghe, L. B.; Thambiratnam, D.; Perera, N.; Jayasooriya, J. "Blast Response and Failure Analysis of Pile Foundations Subjected to Surface Explosion"; *Eng. Fail. Anal.* 2014, 39, 41-54.
- [30] Saleh, M.; Edwards, L. "Evaluation of Soil and Fluid Structure Interaction in Blast Modelling of the Flying Plate Test"; *Comput. Struct.* 2015, 151, 96-114.
- [31] Neuberger, A.; Peles, S.; Rittel, D. "Scaling the Response of Circular Plates Subjected to Large and Close-Range Spherical Explosions. Part II, Buried Charges"; *Int. J. Imp. Eng.* 2007, 34, 874-882.
- [32] Tian, L.; Li, Z. X. "Dynamic Response Analysis of a Building Structure Subjected to Ground Shock From a Tunnel Explosion"; *Int. J. Imp. Eng.* 2008, 35, 1164-1178.
- [33] Fox, D.; Huang, X.; Jung, D.; Fourney, W.; Leiste, U.; Lee, J. "The Response of Small Scale Rigid Targets to Shallow Buried Explosive Detonations"; *Int. J. Imp. Eng.* 2011, 38, 882-891.
- [34] Balsara, J. P. "Blast Loaded Buried Arches"; *J. Eng. Mech.* 1970, 96, 1-16.
- [35] Gui, M.; Chien, M. "Blast-Resistant Analysis for a Tunnel Passing Beneath Taipei Shongsan Airport – A Parametric Study"; *Geot. Geol. Eng.* 2006, 24, 227-248.
- [36] TM 5-1300, Navy NAVFAC P-397, Air Force AFR 88-22 "Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions"; 1990.
- [37] Soheyl, M. R.; Akhaveissy, A.; Mirhosseini, S. "Large-Scale Experimental and Numerical Study of Blast Acceleration Created by Close-In Buried Explosion on Underground Tunnel Lining"; *Shock Vib.* 2016, 9 Pages.
- [38] Hyde, D. "User's Guide for Microcomputer Program CONWEP, Application of TM5-855-1, Fundamentals of Protective Design for Conventional Weapons"; Instructional Rep. No. SL-88, 1992, 1.
- [4] Meyer, M. C. S. "Development of Brick and Mortar Material Parameters for Numerical Simulations"; *Proc. Soc. Exp. Mech.* 2011, 1, 351-359.
- [5] Gebbeken, N.; Linse, T.; Araújo, T. "Masonry Under Dynamic Actions - Experimental Investigations, Material Modeling and Numerical Simulations"; *Advances in Protective Structures Research*, Taylor & Francis Group, 2012.
- [6] Chen, L.; Fang, Q.; Hao, H.; Hong, J. "Calibration and Discussion of Parameters of Mat\_72Rel3 Constitutive Model on Clay Brick and Mortar Materials"; *Proc. of 15<sup>th</sup> Int. Sym. on the Interaction of the Effects of Munitions with Structures*, 2013.
- [7] Chen, L.; Fang, Q.; Fan, J.; Zhang, Y.; Hao, H.; Lio, J. "Responses of Masonry Infill Walls Retrofitted With CFRP, Steel Wire Mesh and Laminated Bars to Blast Loadings"; *Adv. Struct. Eng.* 2014, 17, 817-836.
- [8] Ma, G.; Hao, H.; Lu, Y. "Homogenization of Masonry Using Numerical Simulations"; *J. Eng. Mech.* 2001, 127, 421-431.
- [9] Wu, C.; Hao, H. "Derivation of 3D Masonry Properties Using Numerical Homogenization Technique"; *Int. J. Numer. Method. Eng.* 2006, 66, 1717-1737.
- [10] Milani, G.; Lourenço, P. B.; Tralli, A. "Homogenized Rigid-Plastic Model for Masonry Walls Subjected to Impact"; *Int. J. Solids Struc.* 2009, 46, 4133-4149.
- [11] Wei, X.; Hao, H. "Numerical Derivation of Homogenized Dynamic Masonry Material Properties with Strain Rate Effects"; *Int. J. Imp. Eng.* 2009, 36, 522-536.
- [12] Lourenço, P. B.; Hashemi, S.; Pereira, J. M. "A Constitutive Three-Dimensional Interface Model for Masonry Walls Subjected to High Strain Rates"; *12<sup>th</sup> Int. Conf. Com. Struct. Tech. Cst.* 2014, 1-15.
- [13] Rafsanjani, S. H.; Lourenço, P. B.; Peixinho, N. "Analysis of Masonry Walls Subjected to High Strain Rate Out-of-Plane loads with a Rate Dependent Interface Model"; *9<sup>th</sup> Int. Mas. Conf.* 2014.
- [14] Rafsanjani, S. H.; Lourenço, P. B.; Peixinho, N. "Dynamic Interface Model for Masonry Walls Subjected to High Strain Rate Out-of-Plane Loads"; *Int. J. Imp. Eng.* 2015, 76, 28-37.
- [15] Formica, G.; Sansalone, V.; Casciaro, R. "A Mixed Solution Strategy for the Nonlinear Analysis of Brick Masonry Walls"; *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.* 2002, 191, 5847-5876.
- [16] Hamed, E.; Rabinovitch, O. "Nonlinear Dynamic Behavior of Unreinforced Masonry Walls Subjected to Out-of-Plane Loads"; *J. Struct. Eng.* 2008, 134, 1743-1753.
- [17] Macorini, L.; Izzuddin, B. "Nonlinear Analysis of Unreinforced Masonry Walls under Blast Loading Using Mesoscale Partitioned Modeling"; *J. Struct. Eng.* 2014, 140, A4014002.
- [18] Wei, X. Y.; Huang, T.; Li, N. "Numerical Derivation of Pressure-Impulse Diagrams for Unreinforced Brick Masonry Walls"; *Adv. Mater. Res.* 2012, 1435-1439.
- [19] Ahmad, S.; Elahi, A.; Pervaiz, H.; Rahman, A.; Barbhuiya, S. "Experimental Study of Masonry Wall Exposed to Blast Loading"; *Mater. Construce.* 2014, 64, 007.
- [20] Keys, R.; Clubley, S. K. "Modelling Debris Distribution of Masonry Panels Subject to Blast Loads Using Experimental & Applied Element Methods"; *15<sup>th</sup> Int. Sym. Interaction Effects Munition*, 2013.
- [21] Varma, R.; Tomar, C. P. S.; Parkash, S.; Sethi, V. S. "Damage to Brick Masonry Panel Walls Under High Explosive Detonations"; *Session, Structures under extreme loading conditions ASME-Publications-PVP*, 1996, 351, 207-216.