

بررسی سازه‌ای و ژئوتکنیکی شمع بتن مسلح تحت بار انفجار با استفاده از مدل سازی عددی

محمدجواد پرماس^۱، مهدی خداپرست^{۲*}، حسین مقتدایی^۳

۱- کارشناسی ارشد، ۲- استاد، ۳- دانشجوی دکتری، دانشگاه قم

(دریافت: ۱۴۰۲/۰۲/۲۷، بازنگری: ۱۴۰۲/۰۷/۲۸، پذیرش: ۱۴۰۲/۰۸/۱۷، انتشار: ۱۴۰۲/۰۹/۱۳)

DOR: <https://dorl.net/dor/20.1001.1.26762935.1402.14.3.6.0>

چکیده

یک انفجار در نزدیکی یک شمع ممکن است موجب گسیختگی شمع و در نهایت گسیختگی سازه ساخته شده بر روی آن شود؛ بنابراین اتخاذ تدابیر لازم در خصوص بار ایجاد شده توسط انفجار، نیاز به در نظر گرفتن اثر انفجار در طراحی سازه‌ها به خصوص شمع‌ها دارد. با توجه به پژوهش‌های صورت گرفته، انجام پژوهشی که هر دو جنبه ژئوتکنیکی و سازه‌ای اثر بار انفجار بر ظرفیت باربری شمع را لحاظ نماید، حس می‌شود؛ لذا در این پژوهش مدل‌سازی عددی شمع بتن مسلح تحت بار انفجار با استفاده از روش کوپل اویلری-لاگرانژی انجام شده و حداکثر کرنش فشاری بتن شمع و فواصل ایمن سازه‌ای به دست آمد. سپس با فواصل ایمن ژئوتکنیکی به دست آمده در تحقیقات گذشته مقایسه شده و عملکرد هم‌زمان ژئوتکنیکی و سازه‌ای شمع مورد بررسی قرار گرفت. بررسی تأثیر میزان آرماتور شمع بر رفتار سازه‌ای شمع نشان داد که فواصل ایمن سازه‌ای در خاک رسی و ماسه‌ای در اکثر موارد بیشتر از فواصل ایمن ژئوتکنیکی بوده است. همچنین در این خصوص نتایج، نشان‌دهنده افزایش حداکثر کرنش فشاری بتن شمع با افزایش میزان درصد آرماتور در خاک ماسه‌ای و کاهش در خاک رسی است. علاوه بر آن نتایج این تحقیق بیانگر بیشتر بودن محدوده تأثیر در خاک رسی نسبت به خاک ماسه‌ای است.

کلیدواژه‌ها: بررسی سازه‌ای و ژئوتکنیکی، کرنش فشاری، روش کوپل اویلری-لاگرانژی (CEL)، بار انفجار

Structural and Geotechnical Investigation of Reinforced Concrete Pile Under Blast Load Using Numerical Modeling

M. J. Parmas, M. Khodaparast^{1*}, H. Moghtadae

University of Qom

(Received: 2023/05/17, Revised: 2023/10/20, Accepted: 2023/11/08, Published: 2023/12/04)

Abstract

An explosion near a pile can cause the pile to break and eventually damage the structure built upon it. Taking measures to cope with the load created by an explosion requires consideration of its effect in the design of structures, especially piles. Research must consider both geotechnical and structural aspects of the effect of a blast load on pile bearing capacity. The current study numerically modeled a reinforced concrete pile under a blast load using the coupled Eulerian-Lagrangian method to obtain the maximum compressive strain of the concrete pile and the best distances for safety devices. The results were compared with geotechnical safe distances obtained in previous research. The geotechnical and structural performance of the piles were jointly investigated. The influence of the amount of pile reinforcement on the structural behavior of the pile indicated that the safe distance for a pile in clay and sand was greater than the geotechnical safe distance in most cases. The results showed an increase in the maximum compressive strain of the concrete pile with an increase in the percentage of reinforcement in sandy soil and a decrease in the percentage of reinforcement in clay soil. The results of indicated that the range of influence was greater in clay soil than in sandy soil.

Keywords: Structural and Geotechnical Investigation, Compressive Strain, Coupled Eulerian-Lagrangian Method (CEL), Blast Load

۱. مقدمه

سوی دیگر لنگر خمشی حداکثر در شمع سر آزاد در میانه شمع و لنگر خمشی صفر در سرشمع اتفاق می‌افتد. همچنین نیروی محوری حداکثر در همه شمع‌ها در سرشمع مشاهده شد [۱۰]. در خصوص مدل‌سازی عددی در ارتباط با پاسخ شمع در ماسه اشباع تحت بار انفجار زیرزمینی نتایج نشان داد که قسمت بالای شمع آسیب‌پذیر است و پاسخ شمع بافاصله از ماده منفجره به طور چشمگیری کاهش می‌یابد [۱۱]. در پژوهشی دیگر در ارتباط با پاسخ شمع در معرض ارتعاش زمین ناشی از بار انفجار در نزدیکی سطح تماس خاک و سنگ، نتایج نشان داد که به علت بیشتر بودن سرعت موج در سنگ، تنش در نوک شمع متمرکز می‌شود [۱۲]. مطالعه عددی بر روی شمع‌های فولادی توخالی تحت بارگذاری انفجار مدفون در خاک ماسه‌ای نیز نشان داد که اوج سرعت در ذرات خاک با کاهش مدول الاستیسیته، چگالی خاک و زاویه اصطکاک خاک افزایش می‌یابد [۱۳].

در پژوهش دیگری اثر بار انفجار سطحی بر روی شمع‌ها بررسی شد. نتایج این تحقیق نشان داد که موانع دیواری می‌توانند باعث افزایش پاسخ خوب خاک در برابر بار ناشی از انفجار ماده منفجره و نیز ضخامت دیوار محافظ تأثیر قابل توجهی در محافظت شمع در برابر بار انفجار دارد [۱۴]. همچنین بررسی اثر بار انفجار بر لرزش پی شمع واقع در خاک رس نشان داد که تنش زیادی در خاک اطراف شمع ایجاد می‌شود که باعث از بین رفتن مقاومت اصطکاکی بین خاک و شمع و نشست جزئی شمع خواهد شد [۱۵].

در پژوهشی دیگر محدوده تأثیر و فاصله ایمن برای یک شمع بتن مسلح تحت بار انفجار تعیین شد. نتایج برای خاک‌های رسی و ماسه‌ای نشان داد که افزایش عمق انفجار علی‌رغم کاهش آسیب فشاری و کششی شمع، تأثیر چندانی بر فاصله ایمن ندارد. همچنین نشان داده شد که افزایش جرم و عمق انفجار، ظرفیت باربری فشاری نهایی شمع را کاهش داده و منجر به افزایش محدوده تأثیر بار انفجار برای یک شمع بتن مسلح می‌شود [۱۶].

مطالعه پژوهش‌های پیشین نشان می‌دهد که بررسی هم‌زمان عملکرد ژئوتکنیکی و سازه‌ای یک شمع بتن مسلح با در نظر گرفتن حداکثر کرنش فشاری بتن شمع مورد توجه و بررسی کافی قرار نگرفته است؛ لذا در این پژوهش با توجه به شرایط مذکور، فاصله ایمن سازه‌ای و محدوده تأثیر یک شمع بتن مسلح تحت بار انفجار به دست آمده و تأثیر طول، قطر و میزان مسلح بودن شمع‌ها و تأثیر نوع خاک بر کرنش فشاری بتن شمع با استفاده از مطالعه عددی مورد بررسی قرار گرفته است.

امروزه ساختمان‌های بلند، پل‌ها و سایر زیرساخت‌ها برای انتقال بارهای سنگین از سازه به لایه‌های عمیق تر و مقاوم تر خاک که ظرفیت کافی برای حمل این بارها را دارند، تا حد زیادی به پی‌های عمیق و شمع‌ها وابسته هستند؛ لذا هرگونه آسیب و یا گسیختگی شمع می‌تواند منجر به خطرات جبران‌ناپذیری شود؛ بنابراین لازم است شمع‌ها در برابر بارهای مختلف ایمن و پایدار باشند. یکی از بارهایی که می‌تواند آسیب‌های غیر قابل جبرانی به شمع وارد کند بار ناشی از انفجار است. این بارها می‌توانند تنش‌های فشاری و خمشی را در شمع‌ها ایجاد کرده و آسیب‌های قابل توجهی را ایجاد کنند. انفجار در مجاورت یک شمع ممکن است سبب از کار افتادن شمع و متعاقباً منجر به شکست و تخریب کل سازه شود [۱].

شناخت انفجار و ویژگی‌ها و تأثیر آن بر محیط اطراف، بسیار پیچیده و دشوار است. به طور مثال، انفجار در خاک ماسه‌ای اشباع می‌تواند منجر به روان‌گرایی شود [۲]، لذا انجام آزمایش‌های مختلف برای شناخت بیشتر از عملکرد یک انفجار ضروری است [۳] و [۴]. یکی از مواردی که لازم است مورد بررسی قرار گیرد، رفتار شمع‌ها در برابر انفجار است [۵].

در گذشته مطالعاتی در خصوص اثر انفجار بر ظرفیت باربری ژئوتکنیکی شمع انجام شده است [۶، ۷ و ۸]. لیکن ظرفیت باربری سازه‌ای شمع به خوبی بررسی نشده است. از این رو نیاز به پژوهشی که اثر بار انفجار بر هر دو جنبه ظرفیت باربری ژئوتکنیکی و سازه‌ای شمع را لحاظ نماید، حس می‌شود.

این پژوهش‌ها به روش‌های مختلفی از جمله مطالعات میدانی، آزمایشگاهی و عددی انجام شده است. یکی از پژوهش‌های انجام شده مطالعه عددی پایه پل در برابر انفجار سطحی با استفاده از روش‌های مقاوم‌سازی در نظر گرفته شده شامل تغییر آرایش میل‌گردهای موجود در سطح مقطع، افزایش میزان میل‌گرد مقطع، استفاده از میل‌گردهای FRP^۱ و افزایش و یا تغییر شکل هندسی سطح مقطع ستون است. نتایج نشان داد از بین روش‌های مقاوم‌سازی انتخابی در پژوهش، جایگزین کردن میل‌گردهای FRP به جای میل‌گردهای معمولی در ستون‌های بتنی پایه پل به عنوان مؤثرترین و بهترین روش تقویت این سازه‌ها در برابر بارهای ناشی از انفجار است [۹]. پژوهش دیگر، مطالعه میدانی در مورد پاسخ شمع به حرکت زمین ناشی از انفجار بود که در آن آزمایش‌های صحرایی اثر بار انفجار بر روی سه شمع بتنی با شرایط مختلف سر ثابت و سر آزاد شمع انجام شده است. نتایج نشان داد که لنگر خمشی حداکثر در شمع‌های سر ثابت، در سرشمع رخ می‌دهد. از

^۱ Fiber Reinforced Polymer

۲. روش تحقیق

در این پژوهش روش تحلیل دینامیکی صریح با استفاده از روش کوپل اویلری-لاگرانژی (CEL) در نرم‌افزار آباکوس مورد استفاده قرار گرفته است. روش کوپل اویلری-لاگرانژی از مزایای هر دو روش اویلری و لاگرانژی بهره می‌برد. در تحقیق حاضر اندرکنش در کل سازه از طریق گزینه تماس کلی ایجاد شد که در جهت موازی، تماس بدون اصطکاک و در جهت عمود، تماس سخت در نظر گرفته شده است. تماس سخت برای تماس کلی در Abaqus/Explicit استفاده می‌شود که برای سفت شدن مواد زیرین تحت فشار است. همچنین مدت‌زمان تحلیل بر اساس رسیدن کامل موج به کل طول شمع، ۲۵ میلی‌ثانیه انتخاب شده است.

۲-۱. مدل‌سازی خاک

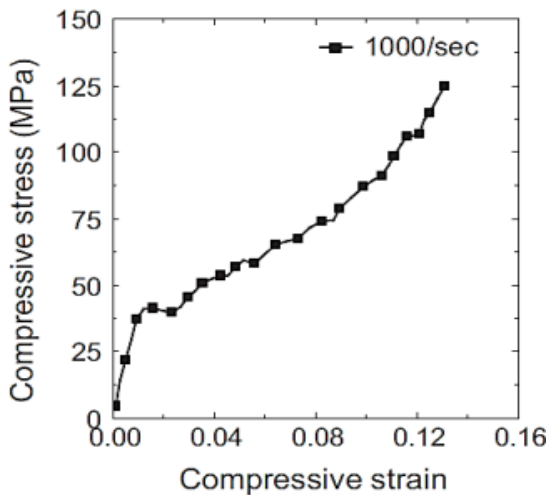
در این مطالعه مدل اجزا محدود خاک به صورت المان‌های اویلری به ابعاد ۱۲*۱۲*۱۸ متر درون فضای اویلری به ابعاد ۱۲*۱۲*۲۲ متر و در مختصات مورد نظر تعریف شده است. در مرزهای فضای اویلری شرایط مرزی موج بدون بازگشت تعریف شده تا از بازگشت موج انفجار به مرکز مدل و ایجاد فشار مضاعف بر روی شمع جلوگیری کند. بدین صورت شبیه‌سازی واقعی‌تر برای انتشار تنها یک موج فشاری حاصل از انفجار انجام می‌شود. در خاک رسی از مدل رفتاری الاستوپلاستیک کلاهدک دراکر-پراگر و در خاک ماسه‌ای از مدل رفتاری پلاستیسیته دراکر-پراگر استفاده شده است. مدل پلاستیسیته کلاهدک دراکر-پراگر اولین بار توسط دراکر و همکاران معرفی شد. این مدل در طول سال‌ها اصلاح و گسترش یافته است [۱۷]. مقادیر پارامترهای خاک برای مدل رفتاری دراکر-پراگر در جدول‌های (۱) و (۲) آورده شده است. همچنین نمودار تنش-کرنش خاک ماسه‌ای در شکل (۱) نمایش داده شده است.

جدول ۱. پارامترهای مورد استفاده برای خاک رسی [۱۶].

پارامتر	مقدار
مدول یانگ (E)	۵۱/۷ (MPa)
ضریب پواسون (ν)	۰/۴۵
چگالی (ρ)	۱۹۲۰ (kg/m ³)
چسبندگی (d)	۳۶ (KPa)
زاویه اصطکاک (β)	۲۴ (degree)
پارامتر خروج از مرکزیت کلاهدک (R)	۰/۳
موقعیت سطح تسلیم اولیه کلاهدک (ε)	۰/۰۲
پارامتر انتقال شعاع سطح (α)	۰
ضریب جریان تنش	۰/۸
کرنش	تنش
	۲/۷۵ (MPa)
	۴/۸۳ (MPa)
	۵/۱۵ (MPa)
	۶/۲۰ (MPa)

جدول ۲. پارامترهای مورد استفاده برای خاک ماسه‌ای [۱۶].

پارامتر	مقدار
مدول یانگ (E)	۲۸ (MPa)
ضریب پواسون (ν)	۰/۲
چگالی (ρ)	۱۵۶۰ (kg/m ³)
چسبندگی (d)	۰
زاویه اصطکاک (β)	۳۰ (degree)
زاویه اتساع (ψ)	۵ (degree)



شکل ۱. رفتار تنش-کرنش ماسه اتاوا [۱۲].

۲-۲. مدل‌سازی شمع و آرماتورها

در تحقیق حاضر برای مدل‌سازی بتن شمع از مدل رفتاری آسیب پلاستیک بتن و برای آرماتورها از مدل رفتاری جانسون-کوک استفاده شده و همچنین بتن شمع و آرماتورهای طولی و عرضی به صورت لاگرانژی مدل‌سازی شده است. شمع به قطر یک و طول ۱۲ متر و آرماتورهای طولی 16T25 و آرماتورهای عرضی 10cm@T10 مدل‌سازی گردید.

یکی از مدل‌های رفتاری که برای مدل‌سازی شکست کششی و فشاری بتن استفاده می‌شود، آسیب پلاستیک است. این مدل دو فرض ترک خوردگی کششی و خردشدگی فشاری را در مکانیزم گسیختگی در نظر می‌گیرد. در مورد بتن این رفتار باتوجه به درجه محصورشدگی المان تعریف می‌شود. هنگامی که محصورشدگی بر اثر پروسه بارگذاری کم باشد، آسیب رخ داده سریع و برگشت‌ناپذیر است. در صورتی که درجه محصورشدگی بالا باشد، هنگامی که بار وارد می‌شود، برای رخ دادن آسیب، زمان بیشتری لازم است [۱۸]. در جدول (۳) خصوصیات بتن استفاده شده در مدل‌سازی آورده شده است. σ_{b0}/σ_{c0} نسبت مقاومت فشاری دومیوری بتن به مقاومت فشاری تک‌محوری آن است. اغلب منابع مقدار ۱/۱۶ را به طور متوسط مبتنی بر مقاومت بتن و درجه محصورشدگی معرفی کرده‌اند.

سازی رفتار مواد منفجره، معادله حالت جونز ویلکینز لی (JWL) است. معادله حالت JWL معمولاً در مدل‌سازی مواد منفجره برای توصیف رابطه فشار-حجم-انرژی محصولات انفجار استفاده می‌شود [۲۰].

معادله JWL فشار ایجاد شده توسط انرژی شیمیایی ماده منفجره را توصیف می‌کند. پارامترهای ثابت معادله شامل A, B, R₁, R₂ و ω هستند که به صورت تجربی توسط آزمایشات متعدد تعیین شده‌اند [۲۱]. E_m انرژی ویژه درونی در واحد جرم و ρ چگالی لحظه‌ای محصولات انفجار است [۲۰]. در این مطالعه، پارامترهای JWL برای TNT در جدول (۵) آورده شده است.

جدول ۵. پارامترهای مورد استفاده در معادله حالت JWL برای ماده منفجره TNT [۱۶].

پارامتر	مقدار
چگالی (ρ)	۱۶۳۰ (kg/m ³)
A	۳۷۳۸۰۰ (Mpa)
B	۳۷۴۷ (Mpa)
ω	۰/۳۵
R ₁	۴/۱۵
R ₂	۰/۹
سرعت موج انفجار (v)	۶۹۳۰ (m/s)
انرژی درونی در واحد جرم (E _m)	۳۶۸۰ (kJ/kg)

۲-۴. مدل‌سازی هوا

در پژوهش حاضر معادله حالت گاز ایده‌آل برای مدل‌سازی هوا به ابعاد ۱۲*۱۲*۴ متر مورد استفاده قرار گرفته است. این معادله یکی از ساده‌ترین اشکال معادله حالت برای گازها است. در یک گاز ایده‌آل انرژی داخلی تابعی از دما است؛ بنابراین معادله حالت گازی که شرایط اولیه یکنواخت دارد به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$p = (\gamma - 1)\rho e$$

که در آن p فشار هیدرواستاتیک، ρ چگالی و e انرژی داخلی ویژه است. γ توان آدیباتیک است که یک ثابت است و برابر با $1 + R/c_v$ است که در آن R ثابت گاز جهانی و c_v گرمای ویژه است [۲۲]. مقادیر مورد استفاده برای معادله حالت گاز ایده‌آل هوا در جدول (۶) ارائه شده است.

جدول ۶. پارامترهای مورد استفاده برای معادله حالت گاز ایده‌آل هوا [۱۶].

پارامتر	مقدار
چگالی (ρ)	۱/۲ (kg/m ³)
ثابت گاز	۲۸۷
فشار محیط	۱۰۱۳۲۵ (Pa)
گرمای ویژه	۷۱۷/۱ (J/kg.C)
ویسکوزیته	۰/۰۰۰۰۸۲۵

جدول ۳. پارامترهای مورد استفاده برای بتن شمع [۱۶].

پارامتر	مقدار
مدول یانگ (E)	۲۷۴۰۰ (MPa)
ضریب پواسون (v)	۰/۲
چگالی (ρ)	۲۴۰۰ (kg/m ³)
زاویه اصطکاک (β)	۳۶ (degree)
پارامتر خروج از مرکزیت پتانسیل جریان (ε)	۰/۱
K _c	۰/۶۶۶
نسبت مقاومت فشاری دومیوری به مقاومت فشاری تک‌محوری (σ_{90}/σ_{01})	۱/۱۶

مدل جانسون-کوک یکی از مدل‌های نیمه‌تجربی است که رفتار پلاستیک مواد را در کرنش‌های بالا، نرخ کرنش بالا و در دماهای بالا توصیف می‌کند. با استفاده از مدل جانسون-کوک تنش جریان را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

$$\sigma = (A + B\varepsilon^n) \left[1 + C \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right] \left[1 - \left(\frac{T - T_{room}}{T_{melt} - T_{room}} \right)^m \right]$$

در رابطه فوق σ تنش تسلیم، ε کرنش پلاستیک، $\dot{\varepsilon}$ نرخ کرنش، $\dot{\varepsilon}_0$ نرخ کرنش مرجع است. T دمای ماده، T_{melt} نقطه ذوب مواد و T_{room} دمای اتاق است. همچنین A تنش تسلیم، B ضریب پیش‌نمایی، C ضریب نرخ کرنش، n توان سخت‌شدگی و m توان نرم‌شدگی دمایی است [۱۹]. مقادیر پارامترهای آرماتور شمع در جدول (۴) مشخص شده است.

جدول ۴. پارامترهای مورد استفاده برای آرماتورهای شمع [۱۶].

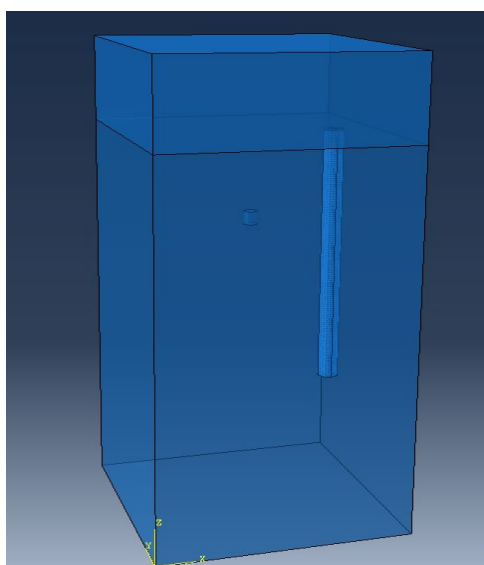
پارامتر	مقدار
مدول یانگ (E)	۲۰۰ (GPa)
ضریب پواسون (v)	۰/۳
چگالی (ρ)	۷۸۰۰ (kg/m ³)
مقاومت تسلیم (f_c)	۳۵۰ (MPa)
نرخ کرنش (ε)	۱۰۰
A	۳۶۰ (MPa)
B	۶۳۵ (MPa)
n	۰/۱۱۴
C	۰/۰۷۵

۲-۳. مدل‌سازی ماده منفجره TNT

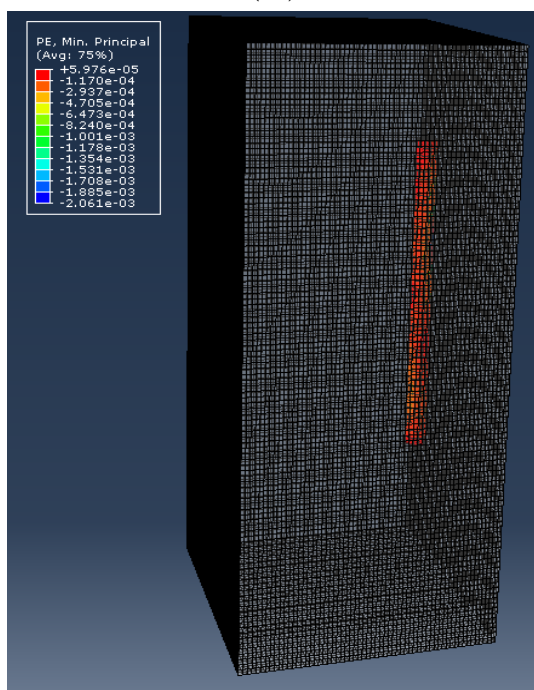
در این مطالعه عددی، مدل‌سازی ماده منفجره با استفاده از مدل رفتاری جانسون-کوک برای شبیه‌سازی فشار ماده منفجره انجام شده است. هندسه ماده منفجره به صورت استوانه‌ای در جرم‌های ۵۰، ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰، ۴۰۰ و ۵۰۰ کیلوگرم در نظر گرفته شده است. شبکه‌بندی این المان از نوع اوپلری (EC3D8R) بوده و درون فضای اوپلری و در مختصات مورد نظر جانمایی گردیده است. رفتار بارهای انفجاری بسیار پیچیده است و به شدت به خواص هر ماده منفجره بستگی دارد. یک معادله حالت پرکاربرد برای شبیه

۵-۲. مدل صحت‌سنجی

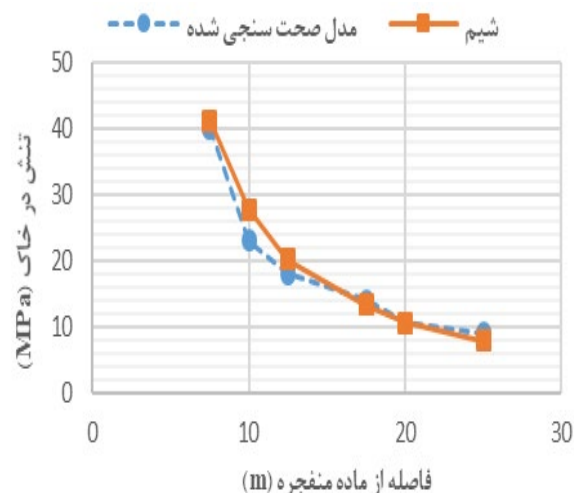
در این تحقیق برای انجام صحت‌سنجی مدل عددی، از پژوهش شیم (۱۹۹۵) استفاده شده که در آن یک شمع آلومینیومی توخالی در خاک ماسه‌ای تحت بار انفجار مدل‌سازی شده است [۲۳]. مدل‌سازی در نرم‌افزار آباکوس و به روش کوپل اوپلری-لاگرانژی انجام شده است. برای این منظور در مدل‌سازی از ماده منفجره تی‌ان‌تی استفاده‌ای به جرم ۵۰۰ کیلوگرم که در عمق ۵ متری و فاصله‌های ۵، ۷، ۱۲/۵، ۱۷/۵، ۲۰ و ۲۵ متری از شمع آلومینیومی توخالی به قطر خارجی ۴۰۰ میلی‌متر و قطر داخلی ۳۳۵ میلی‌متر و طول ۱۰ متری قرار گرفته است، استفاده شد. در مدل صحت‌سنجی تنش در خاک اطراف شمع در فاصله‌های ۵، ۷، ۱۲/۵، ۱۷/۵، ۲۰ و ۲۵ متری از ماده منفجره تی‌ان‌تی با داده‌های شیم (۱۹۹۵) مطابق شکل (۲) مقایسه شد. این بررسی نشان داد که انطباق خوبی میان نتایج به‌دست‌آمده از مدل عددی ساخته شده با نتایج شیم (۱۹۹۵) وجود دارد که نشان‌دهنده صحت سنجی بادقت قابل‌قبول در این مطالعه عددی است.



(الف)



(ب)



شکل ۲. نمودار مقایسه نتایج تنش در خاک تحت بار انفجار در مدل صحت‌سنجی و مدل شیم [۲۳].

۳. نتایج و بحث

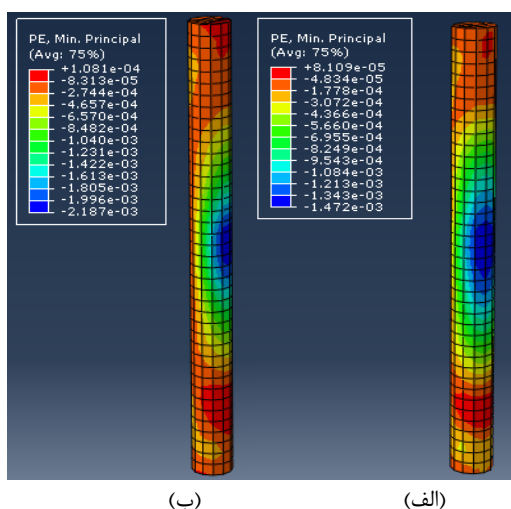
شکل ۳. مدل کامل اجزا محدود: الف) قبل از انفجار ب) بعد از انفجار.

یکی از پارامترهایی که در طراحی سازه‌های بتنی استفاده می‌شود، کرنش نهایی نظیر شکست فشاری بتن است که با ϵ_{cu} نمایش داده می‌شود. مقدار این پارامتر برای انواع بتن از ۰/۰۰۳ تا ۰/۰۰۵ است که در بسیاری از آیین‌نامه‌های طراحی مانند آیین‌نامه بتن آمریکا، به صورت محافظه‌کارانه مقدار ۰/۰۰۳ فرض می‌شود [۲۴]. در مبحث نهم مقررات ملی ساختمان ایران، برای کرنش نهایی فشاری بتن‌های معمولی، مقدار ۰/۰۰۳۵ در نظر گرفته شده که در این پژوهش نیز از این مقدار برای تعیین فاصله ایمن سازه‌های شمع از ماده منفجره استفاده شده است [۲۵]. بدین صورت که اگر کرنش نهایی فشاری بتن شمع از این مقدار تجاوز کند، شمع دچار

در این تحقیق در مدل اصلی، خاک رس به ابعاد ۱۲*۱۲*۱۸ متر و هوا به ابعاد ۴*۱۲*۱۲ متر و شمع بتن مسلح با طول ۱۲ متر و با قطر ۱ متر در معرض ماده منفجره در سطح زمین و فاصله ۳ متری، مدل‌سازی شده است. جرم TNT ۳۰۰ کیلوگرم در نظر گرفته شد. همچنین از آرما توره‌های طولی با مشخصات 16T25 و آرما توره‌های عرضی با مشخصات T10@10cm در مدل‌سازی شمع بتن مسلح استفاده گردید. در شکل (۳) مدل کامل اجزا محدود این پژوهش قبل و بعد از انفجار ارائه شده است. شکل (۴) آرما توره‌های مدل شده در نرم‌افزار را نشان می‌دهد.

۳-۱. مقایسه فاصله ایمن سازه‌ای و ژئوتکنیکی شمع

در مطالعه عددی حاضر ماده منفجره TNT با جرم‌های ۵۰، ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰، ۴۰۰ و ۵۰۰ کیلوگرمی در عمق‌های ۰، ۲، ۴، ۶ متری در خاک رسی و ماسه‌ای قرار داده شده و فاصله ایمن سازه‌ای در هر یک از حالت‌ها تعیین شد. برای نمونه کرنش فشاری بتن شمع در فاصله ایمن سازه‌ای در خاک رسی در عمق ۶ متری برای جرم ۳۰۰ و ۵۰۰ کیلوگرم در شکل (۵) نشان داده شده است. فاصله ایمن سازه‌ای و ژئوتکنیکی در خاک رسی در شکل (۶) و در خاک ماسه‌ای در شکل (۷) با هم مقایسه شده است.



شکل ۵. مقایسه حداکثر کرنش فشاری بتن شمع در فاصله ایمن سازه‌ای در خاک رسی در عمق ۶ متری برای جرم‌های: (الف) ۳۰۰ کیلوگرم، (ب) ۵۰۰ کیلوگرم.

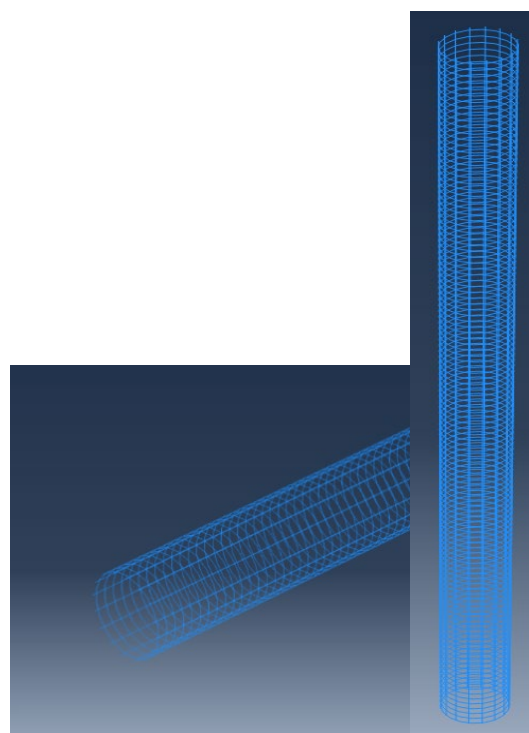
باتوجه به نتایج به دست آمده می‌توان گفت در همه حالات به‌غیر از جرم ۵۰۰ کیلوگرم در سطح زمین، فاصله ایمن سازه‌ای بزرگ‌تر یا مساوی فاصله ایمن ژئوتکنیکی است و به عنوان فاصله ایمن حداکثر در نظر گرفته می‌شود. در مواردی که فاصله ایمن سازه‌ای با فاصله ایمن ژئوتکنیکی برابر است بدین معنی است که شمع از لحاظ سازه‌ای و ژئوتکنیکی بطور هم‌زمان گسیخته شده است و تعادلی بین مقاومت سازه‌ای و ژئوتکنیکی شمع برقرار است. فاصله ایمن سازه‌ای بیشتر از فاصله ایمن ژئوتکنیکی نشان‌دهنده این موضوع است که، سازه شمع در فاصله ایمن ژئوتکنیکی گسیخته شده و لذا در فاصله بیشتری در برابر بار انفجار ایمن خواهد بود که این موضوع می‌بایست در طراحی شمع در نظر گرفته شود.

در مورد خاک ماسه‌ای می‌توان گفت که در تمام حالات، فاصله ایمن سازه‌ای بیشتر از فاصله ایمن ژئوتکنیکی بوده و در انتخاب فاصله ایمن حداکثر، تعیین‌کننده است. این بدین معناست که در خاک ماسه‌ای، سازه شمع بیشتر تحت تأثیر انفجار قرار گرفته و زودتر آسیب می‌بیند.

گسیختگی شده و کارایی ندارد؛ ولی اگر کرنش نهایی فشاری بتن شمع کمتر از این مقدار شود، شمع در فاصله ایمن سازه‌ای قرار دارد.

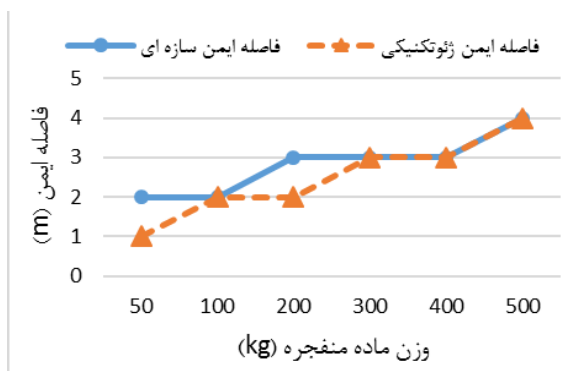
در این پژوهش منظور از فاصله ایمن، فاصله‌ای از ماده منفجره است که در آن شمع دچار گسیختگی نشود. به عبارتی نزدیک‌ترین فاصله ماده منفجره از شمع که در آن مقدار کرنش نهایی فشاری بتن شمع از مقدار $0/0.035$ تجاوز نکند، فاصله ایمن در نظر گرفته می‌شود.

برای تعیین فاصله ایمن سازه‌ای از شمع، ابتدا هر یک از جرم‌های ماده منفجره در فاصله یک‌متری از شمع مدل‌سازی شد و نتایج کرنش نهایی فشاری بتن شمع بررسی گردید. در صورت گسیختگی شمع فاصله ماده منفجره از شمع یک متر افزایش یافته و مجدداً مدل مورد تحلیل قرار گرفت. این موضوع تا رسیدن کرنش نهایی فشاری بتن به کمتر از $0/0.035$ ادامه یافته تا شمع در فاصله ایمن سازه‌ای از ماده منفجره قرار گیرد.

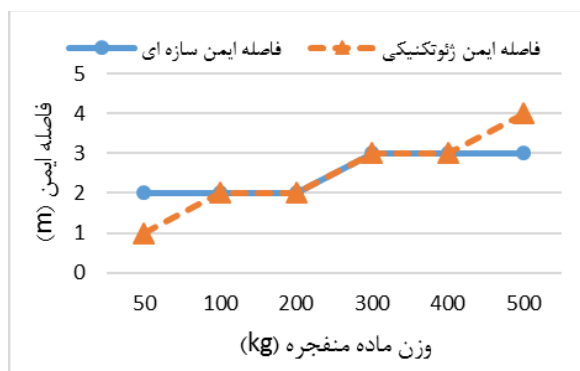


شکل ۴. مدل اجزا محدود آرماتورهای شمع.

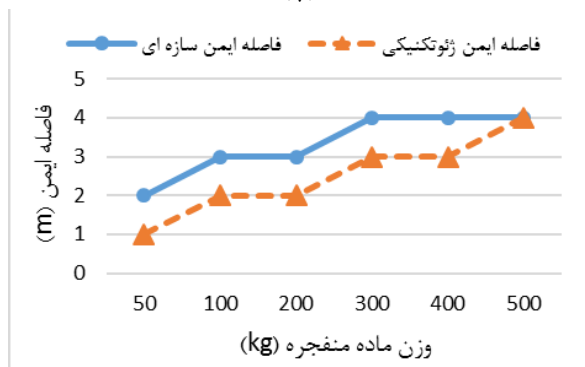
به‌منظور بررسی هم‌زمان اثر سازه‌ای و ژئوتکنیکی انفجار بر رفتار شمع، از نتایج فواصل ایمن ژئوتکنیکی به دست آمده از پژوهش خدابرست و حسینی [۵] استفاده شد و با فواصل ایمن سازه‌ای به دست آمده در این پژوهش مقایسه گردید و در نهایت فاصله ایمن حداکثر به عنوان فاصله ایمن اصلی در نظر گرفته شد. علاوه بر آن تأثیر میزان آرماتور شمع بر رفتار سازه‌ای شمع از طریق در نظر گرفتن میزان آرماتور ۱ و ۴ درصد مورد بررسی قرار گرفت.



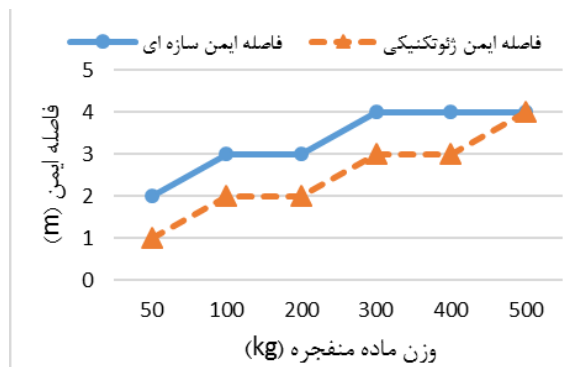
(ب)



(الف)

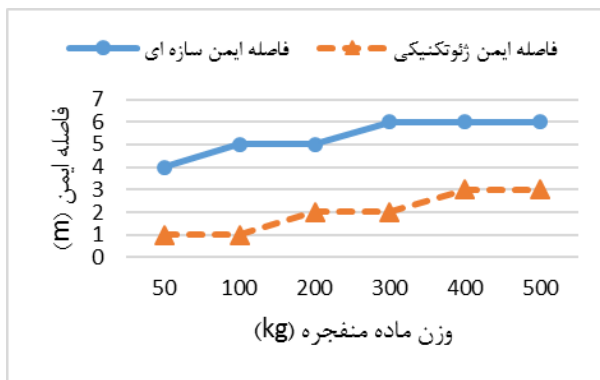


(ت)

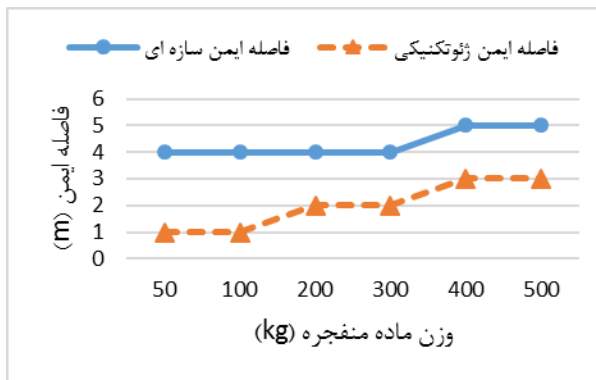


(پ)

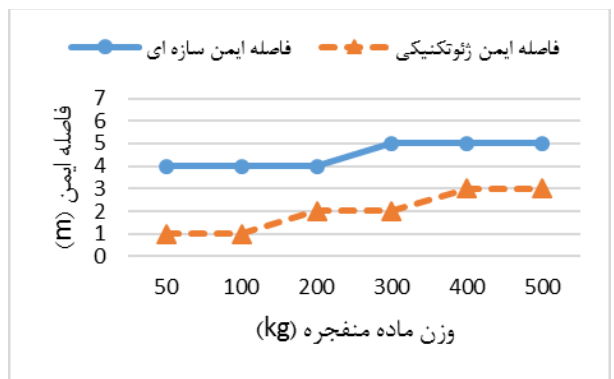
شکل ۶. مقایسه فاصله ایمن سازه‌ای و ژئوتکنیکی شمع برای هر یک از جرم‌های ماده منفجره در خاک رسی: (الف) در سطح زمین (ب) در عمق ۲ متری (پ) در عمق ۴ متری (ت) در عمق ۶ متری.



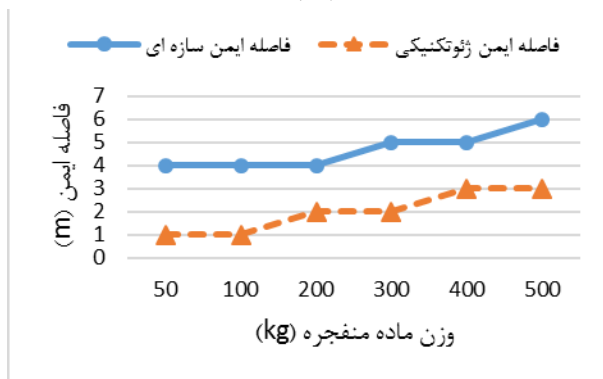
(ب)



(الف)

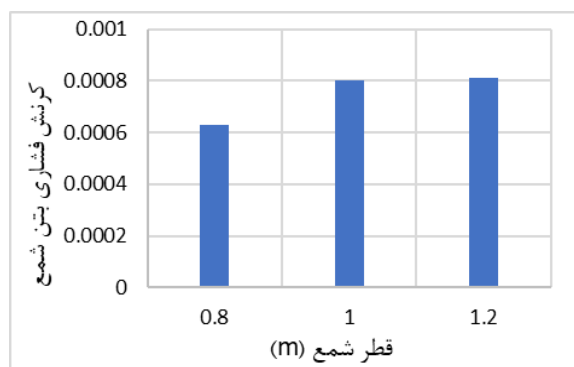


(ت)



(پ)

شکل ۷. مقایسه فاصله ایمن سازه‌ای و ژئوتکنیکی شمع برای هر یک از جرم‌های ماده منفجره در خاک ماسه‌ای: (الف) در سطح زمین (ب) در عمق ۲ متری (پ) در عمق ۴ متری (ت) در عمق ۶ متری.



شکل ۹. تغییرات حداکثر کرنش فشاری بتن شمع نسبت به قطر شمع برای ماده منفجره ۳۰۰ کیلوگرمی در سطح زمین و فاصله ۳ متری از شمع در خاک رسی.

۳-۳. تاثیر میزان آرماتورهای شمع بر رفتار سازه‌های آن

در این بخش تغییرات حداکثر کرنش فشاری بتن شمع در میزان آرماتور یک و چهار درصد برای ماده منفجره ۳۰۰ کیلوگرمی در خاک رسی و ماسه‌ای در سطح زمین و در عمق ۶ متری بررسی شده است.

باتوجه به شکل (۱۰) می‌توان دریافت که بطور کلی در خاک رسی با افزایش میزان آرماتور شمع از یک درصد به چهار درصد تغییری در فاصله ایمن سازه‌ای حاصل نشده اما حداکثر کرنش فشاری بتن شمع کاهش یافته است. به طوری که برای ماده منفجره به جرم‌های ۱۰۰، ۳۰۰ و ۵۰۰ کیلوگرم در سطح زمین به ترتیب ۱، ۱۱ و ۳ درصد و در عمق شش متری به ترتیب ۳۵، ۳۷ و ۴۲ درصد کاهش داشته است. همچنین در میزان آرماتور چهار درصد نیز همانند میزان آرماتور یک درصد با افزایش عمق ماده منفجره از سطح زمین به عمق شش متری، فاصله ایمن سازه‌ای افزایش یافته است.

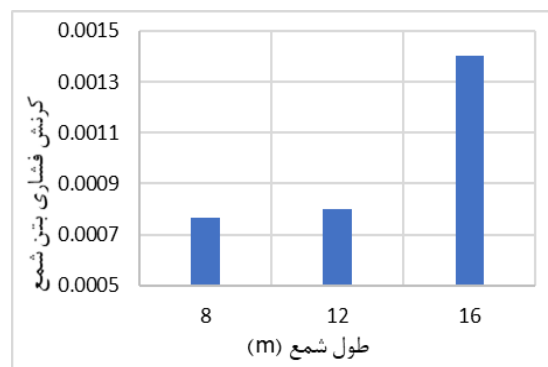
در خاک ماسه‌ای و در سطح زمین برای جرم‌های ۱۰۰ و ۵۰۰ کیلوگرم ماده منفجره با افزایش میزان آرماتور، فاصله ایمن سازه‌ای ثابت بوده است. اما در جرم ۳۰۰ کیلوگرم یک متر افزایش یافته است. همچنین در عمق شش متری با افزایش میزان آرماتور از یک درصد به چهار درصد، فاصله ایمن سازه‌ای تغییری نکرده است. لازم به ذکر است فاصله ایمن سازه‌ای در میزان آرماتور چهار درصد با افزایش عمق ثابت بوده است.

باتوجه به نتایج حاصل از شکل (۱۱) در خاک رسی و در هر یک از طول‌های ۸، ۱۲ و ۱۶ متر شمع بتن مسلح، با تغییر میزان آرماتور از یک به چهار درصد، حداکثر کرنش فشاری بتن شمع

۲-۳. تاثیر قطر و طول شمع بر رفتار سازه‌های آن

با بررسی تغییرات حداکثر کرنش فشاری بتن شمع نسبت به طول شمع برای ماده منفجره ۳۰۰ کیلوگرمی در سطح زمین و در فاصله ۳ متری از شمع در خاک رسی می‌توان دریافت که با افزایش طول شمع، حداکثر کرنش فشاری بتن شمع افزایش یافته است (شکل ۸). به طوری که در شمع به طول ۱۲ متر نسبت به طول ۸ متر، ۴ درصد و در طول ۱۶ متر نسبت به ۱۲ متر، ۷۵ درصد افزایش حداکثر کرنش فشاری بتن شمع رخ داده است. این موضوع می‌تواند به این دلیل باشد که با افزایش طول شمع، نسبت طول به قطر شمع افزایش می‌یابد که باعث کاهش سختی شمع شده و موج انفجار تأثیر مخرب بیشتری روی آن می‌گذارد. لازم به ذکر است با افزایش طول شمع میزان افزایش حداکثر کرنش فشاری بتن شمع نیز بیشتر می‌شود.

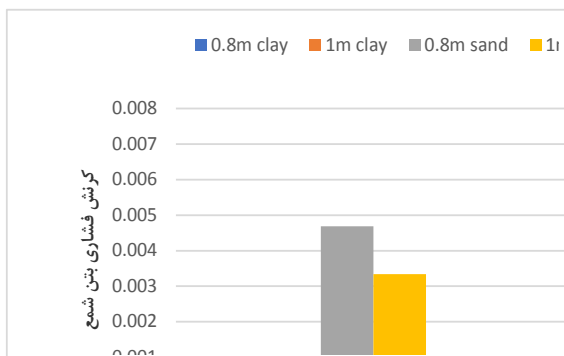
همچنین باتوجه به تغییرات حداکثر کرنش فشاری بتن شمع نسبت به قطر شمع برای ماده منفجره ۳۰۰ کیلوگرمی در سطح زمین و فاصله سه متری از شمع در خاک رسی می‌توان دریافت که با افزایش قطر شمع از ۸/۰ به یک متر، حداکثر کرنش فشاری بتن شمع به میزان ۲۷ درصد افزایش داشته است که این مقدار در قطر ۱/۲ نسبت به یک متر به یک درصد رسیده است (شکل ۹). پس می‌توان گفت با افزایش قطر شمع حداکثر کرنش فشاری بتن شمع افزایش یافته است. این موضوع می‌تواند به این دلیل باشد که با افزایش قطر شمع و ثابت ماندن میزان آرماتور شمع عملاً درصد آرماتور در شمع کاهش یافته و شمع آسیب بیشتری می‌بیند. دلیل دیگر این می‌تواند باشد که با افزایش قطر شمع و نزدیک‌تر شدن سطح جانبی شمع به ماده منفجره، شمع بیشتر از حالت با قطر کمتر تحت تاثیر موج انفجار قرار می‌گیرد.



شکل ۸. تغییرات حداکثر کرنش فشاری بتن شمع نسبت به طول شمع برای ماده منفجره ۳۰۰ کیلوگرمی در سطح زمین و در فاصله ۳ متری از شمع در خاک رسی.

نتایج حاصل شده از شکل (۱۲) نشان داد که در خاک رسی با افزایش میزان آرماتور از یک درصد به چهار درصد در قطرهای ۰/۸ و یک متر، حداکثر کرنش فشاری بتن شمع به ترتیب ۱۰ و ۱۱ درصد کاهش داشته است. لازم به ذکر است که حداکثر کرنش فشاری بتن شمع در میزان آرماتور چهار درصد نیز همانند میزان آرماتور یک درصد با افزایش قطر شمع، افزایش یافته است.

همچنین در خاک ماسه‌ای در قطرهای ۰/۸ و یک متر با افزایش میزان آرماتور، حداکثر کرنش فشاری بتن شمع افزایش یافت. بدین ترتیب که در شمع با قطر ۰/۸ متر با میزان آرماتور ۴ درصد مقدار حداکثر کرنش فشاری بتن شمع، ۵۵ درصد و در شمع با قطر یک متر ۹۴ درصد نسبت به میزان آرماتور یک درصد افزایش یافته است.



شکل ۱۲. مقایسه تغییر قطر شمع برای میزان آرماتور ۱ و ۴ درصد برای ماده منفجره ۳۰۰ کیلوگرمی در سطح زمین در خاک رسی و ماسه‌ای.

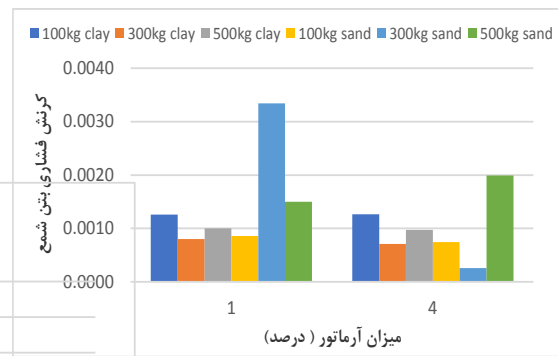
همچنین نتایج حاصل شده از بررسی محدوده تأثیر انفجار برای شمع بتن مسلح در دو خاک ماسه‌ای و رسی در جدول (۷) آورده شده است.

باتوجه به نتایج جدول (۷) می‌توان دریافت که محدوده تأثیر انفجار در خاک رسی و در سطح زمین با افزایش میزان آرماتور از یک به چهار درصد، ثابت باقی‌مانده است و در عمق شش متری به غیر از جرم ۵۰۰ کیلوگرم ماده منفجره که محدوده تأثیر انفجار یک متر افزایش یافته برای باقی جرم‌ها ثابت مانده است. این موضوع به این دلیل می‌تواند باشد که تأثیر افزایش میزان آرماتور بر حداکثر کرنش فشاری بتن شمع به اندازه‌ای نبوده که منجر به تغییر در محدوده تأثیر انفجار گردد.

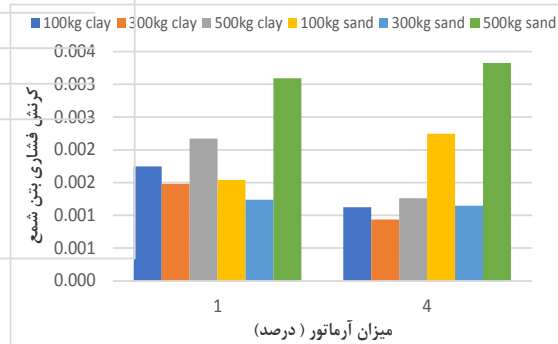
در خاک ماسه‌ای نیز برای جرم‌های ماده منفجره ۱۰۰ و ۵۰۰ کیلوگرم در سطح زمین با افزایش آرماتور از یک درصد به چهار درصد، تغییری در محدوده تأثیر بوجود نیامده است. اما برای جرم ۳۰۰ کیلوگرم محدوده تأثیر یک متر کاهش یافته است. همچنین با افزایش میزان آرماتور برای جرم‌های ۱۰۰، ۳۰۰ و ۵۰۰ کیلوگرم

کاهش یافت. به این ترتیب حداکثر کرنش فشاری بتن شمع در طول‌های ۸، ۱۲ و ۱۶ متری شمع بتن مسلح، به ترتیب ۷، ۱۱ و ۱۱ درصد کاهش پیدا کرد. همچنین در میزان آرماتور چهار درصد همانند میزان آرماتور یک درصد، با افزایش طول شمع حداکثر کرنش فشاری بتن شمع افزایش یافته است.

نتایج در خاک ماسه‌ای نشان داد با افزایش میزان آرماتور از یک به چهار درصد در طول‌های ۸، ۱۲ و ۱۶ متر، حداکثر کرنش فشاری بتن شمع به ترتیب ۷۸، ۹۴ و ۸۰ درصد افزایش یافت.

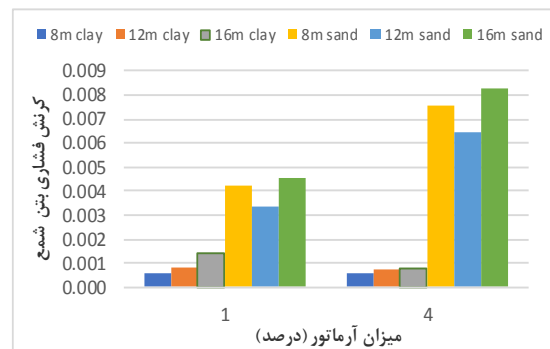


(الف)



(ب)

شکل ۱۰. تغییرات حداکثر کرنش فشاری بتن شمع در میزان آرماتور ۱ و ۴ درصد برای ماده منفجره ۳۰۰ کیلوگرمی در خاک رسی و ماسه‌ای: (الف) در سطح زمین (ب) در عمق ۶ متری.



شکل ۱۱. مقایسه تغییر طول شمع برای آرماتور ۱ و ۴ درصد برای ماده منفجره ۳۰۰ کیلوگرمی در سطح زمین در خاک رسی و ماسه‌ای.

رسی وضعیت شمع را بهبود بخشید، اما در خاک ماسه‌ای شمع آسیب بیشتری دیده است. دلیل این اتفاق می‌تواند کرنش‌های خمشی بیشتر در شمع، بر اثر تغییر شکل‌های بیشتر در خاک ماسه‌ای نسبت به خاک رسی باشد.

جدول ۷. بررسی اثر افزایش آرماتور در محدوده تأثیر برای جرم‌های ۱۰۰، ۳۰۰ و ۵۰۰ کیلوگرم در سطح زمین و عمق ۶ متری در خاک رسی و ماسه‌ای.

رسی				ماسه					
تغییرات کرنش فشاری بتن شمع	محدوده تأثیر انفجار (m)	میزان آرماتور (%)	عمق ماده منفجره (m)	جرم ماده منفجره (kg)	تغییرات کرنش فشاری بتن شمع	محدوده تأثیر انفجار (m)	میزان آرماتور (%)	عمق ماده منفجره (m)	جرم ماده منفجره (kg)
0.0012620 → 0.0003200	2 → 4	1	0	100	0.0008620 → 0.00005100	4 → 5	1	0	100
0.0012660 → 0.0002887	2 → 4	4			0.0007453 → 0.00003361	4 → 5	4		
0.0017450 → 0.0005058	3 → 5	1	6	100	0.0015420 → 0.00011700	4 → 5	1	6	100
0.0011230 → 0.0004031	3 → 5	4			0.0022450 → 0.00008666	4 → 5	4		
0.0008012 → 0.0003067	3 → 6	1	0	300	0.0033430 → 0.00001852	4 → 6	1	0	300
0.0007111 → 0.0002459	3 → 6	4			0.0002606 → 0.00001821	5 → 6	4		
0.0014810 → 0.0004789	4 → 6	1	6	300	0.0012390 → 0.00001262	5 → 6	1	6	300
0.0009363 → 0.0002075	4 → 7	4			0.0011470 → 0.00003061	5 → 6	4		
0.0009997 → 0.0001719	3 → 7	1	0	500	0.0015000 → 0.00002810	5 → 6	1	0	500
0.0009718 → 0.0001764	3 → 7	4			0.0019930 → 0.00001950	5 → 6	4		
0.0021730 → 0.0003390	4 → 7	1	6	500	0.0030950 → 0.00001800	5 → 6	1	6	500
0.0012620 → 0.0002337	4 → 7	4			0.0033260 → 0.00001073	5 → 6	4		

۴. نتیجه‌گیری

در خاک ماسه‌ای یک تا دو متر به‌دست‌آمده است؛ بنابراین محدوده تأثیر در خاک ماسه‌ای کمتر از خاک رسی بوده است. در خاک رسی با افزایش میزان آرماتور فاصله ایمن سازه‌ای تغییری نکرده است؛ اما حداکثر کرنش فشاری بتن شمع کاهش یافته است. در خاک رسی افزایش میزان آرماتور در طول‌های ۸، ۱۲ و ۱۶ متر، حداکثر کرنش فشاری بتن شمع را کاهش داد. در قطرهای ۸/۰ و یک متر در خاک رسی با افزایش میزان آرماتور حداکثر کرنش فشاری بتن شمع کاهش یافته است. محدوده تأثیر در خاک رسی به‌غیر از جرم ۳۰۰ کیلوگرم ماده منفجره در عمق شش متری، با افزایش میزان آرماتور تغییری نکرده است. در خاک ماسه‌ای با افزایش میزان آرماتور فاصله ایمن سازه‌ای به‌غیر از جرم ماده منفجره ۳۰۰ کیلوگرم در سطح زمین که یک متر افزایش یافته است، در بقیه حالات تغییری نکرده است. با افزایش میزان آرماتور در طول‌های ۸، ۱۲ و ۱۶ متر در خاک ماسه‌ای، حداکثر کرنش فشاری بتن شمع افزایش یافته است. در خاک ماسه‌ای در قطرهای ۸/۰ و یک متر با افزایش میزان آرماتور، حداکثر کرنش فشاری بتن شمع افزایش داشته است. محدوده تأثیر در خاک ماسه‌ای به‌غیر از جرم ماده منفجره ۳۰۰ کیلوگرم در سطح زمین، با افزایش میزان آرماتور تغییری نکرده است. در خاک ماسه‌ای در شمع با میزان آرماتور چهار درصد با افزایش عمق ماده منفجره، محدوده تأثیر ثابت باقی‌مانده است.

در عمق شش متری، محدوده تأثیر تغییری نکرده است. لازم به ذکر است در میزان آرماتور چهار درصد، برای هر یک از جرم‌های ماده منفجره، محدوده تأثیر در سطح زمین و در عمق شش متری به یک مقدار بوده است. به‌طور کلی افزایش میزان آرماتور در خاک

باتوجه به اهمیت و لزوم بررسی شمع‌های بتن مسلح در معرض بار انفجار، در این پژوهش با استفاده از مطالعه عددی و روش کوپل اویلری-لاگرانژی تأثیر تغییر قطر، طول و میزان آرماتور شمع بر کرنش فشاری بتن شمع تحت بار انفجار بررسی و فاصله ایمن و محدوده تأثیر بار انفجار بر یک شمع بتنی در خاک رسی و ماسه‌ای تعیین شد. نتایج این بررسی‌ها نشان داد که فاصله ایمن سازه‌ای در خاک رسی در اکثر موارد یک متر بیشتر از فاصله ایمن ژئوتکنیکی بوده و در برخی موارد برابر بوده است. لیکن در خاک ماسه‌ای فاصله ایمن سازه‌ای دو تا چهار متر بیشتر از فاصله ایمن ژئوتکنیکی بوده است. این بدین معناست که شمع در خاک رسی از منظر سازه‌ای وضعیت بهتری نسبت به خاک ماسه‌ای دارد. باتوجه به اینکه در خاک ماسه‌ای در تمام حالات فاصله ایمن سازه‌ای بیشتر از فاصله ایمن ژئوتکنیکی بوده است، می‌توان گفت در خاک ماسه‌ای شمع از نظر سازه‌ای زودتر به گسیختگی می‌رسد. با افزایش قطر شمع، حداکثر کرنش فشاری بتن شمع افزایش یافته است که علت آن می‌تواند کاهش درصد آرماتور در قطرهای بیشتر باشد. مقدار حداکثر کرنش فشاری بتن شمع با افزایش طول شمع افزایش یافته است که این موضوع، تأثیرگذاری نسبت طول به قطر شمع را تحت بارگذاری انفجار نشان می‌دهد. محدوده تأثیر در خاک رسی برای هر یک از جرم‌های ماده منفجره دو تا چهار متر و

۵. مرجع‌ها

- [14] Ibrahim, Y. E-H.; Nabil, M. "Risk of Surface Blast Load on Pile Foundations"; *Mag. Civil. Eng.* 2019, 90, 47–61. <http://doi.org/10.18720/MCE.90.5>
- [15] Ray, M. N.; Belhe, R.; Vaidya, N. R.; Ozkan, M. K. "Vibration Response in Pile Foundation Embedded in Soil Due to Underground Explosion"; *Conf. Struct. Mech. React. Tech.* 2017, BEXCO, Busan, Korea - August 20-25.
- [16] Khodaparast, M.; Hosseini, S. H.; Moghtadaei, H. "Determination of Blast Impact Range and Safe Distance for a Reinforced Concrete Pile Under Blast Loading"; *Int. J. Eng.* 2023, 36, 384-397. <http://doi.org/10.5829/IJE.2023.36.02B.17>.
- [17] Han, L. H.; Elliott, J. A.; Bentham, A. C.; Mills, V.; Amidon, G. E.; Hancock, B. C. "A Modified Drucker-Prager Cap Model for Die Compaction Simulation of Pharmaceutical Powders"; *Int. J. Solids. Struct.* 2008, 45, 3088–3106. <http://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2008.01.024>.
- [18] Lubliner, J.; Oliver, J.; Oller, S.; Onate, E. "A Plastic-Damage Model for Concrete"; *Solids Struct.* 1989, 25, 299-326. [http://doi.org/10.1016/0020-7683\(89\)90050-4](http://doi.org/10.1016/0020-7683(89)90050-4).
- [19] Jankowiak, T.; Odygowski, T. "Identification of Parameters of Concrete Damage Plasticity Constitutive Model"; *Found. Civil. Env. Eng.* 2005, 6.
- [20] Shrot, A.; Baker, M. "Determination of Johnson-Cook Parameters from Machining Simulations"; *Comput. Mat. Sci.* 2012, 52, 298–304. <http://doi.org/10.1016/j.commatsci.2011.07.035>.
- [21] Moghtadaei, H.; Khodaparast, M. "Effect of Explosive Load on the Depth Required for Geotechnical Identification"; *Civil. Infrastructure. Res.* 2022, 8, 61-76. <http://doi.org/10.22091/CER.2022.7558.1323> (In Persian).
- [22] Rigby, S. E.; Sielicki, P. W. "An Investigation of TNT Equivalence of Hemispherical PE4 Charges"; *Eng. Trans.* 2014, 62, 423–435.
- [23] Luccioni, B.; Ambrosini, D.; Nurick, G.; Snyman, I. "Craters Produced by Underground Explosions"; *Comput. Struct.* 2009, 87, 1366–1373. <http://doi.org/10.1016/j.compstruc.2009.06.002>.
- [24] Jack, P.; Gregory, M. "Building Code Requirements for Structural Concrete"; *American. Conc. Inst.* 2019 (ACI 318-19).
- [25] Topic 9 of National Building Regulations. 2012, design and implementation of reinforced concrete buildings, 4th edition, Ministry of Housing and Urban Development, Tehran, Iran Development Publishing House.
- [1] Jayasinghe, L. B.; Goh, A. T. C.; Thambiratnam, D. "Performance of Pile Groups Subjected to Surface Explosion"; 5th International Conference on Design and Analysis of Protective Structures, 2015.
- [2] Khodaparast, M.; Moghbeli, M. "Numerical Simulation of Blast Induced Soil Liquefaction"; *Adv. Defense Sci. & Technol.* 2020, 11(3), 205-210 (In Persian). <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.26762935.1399.11.2.9.0Kh>
- [3] Khodaparast, M.; Mohamad Momeni, R.; Bayesteh, H. "Numerical Simulation of Geosay Blast Reduction Using Composite Backfill"; *Geosynt. Int.* 2021, 1-46. <http://doi.org/10.1680/jgein.21.00030>.
- [4] Rasoli, A.; Khodaparast, M.; Moghtadaei, H. "The Determination of the Effective Range and Safe Distance from the Nail Wall Under Surface and Subsurface Blast Loads"; *Adv. Defense Sci. & Technol.* 2021, 4, 375-388 (In Persian). <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.26762935.1400.12.4.4.6>
- [5] Khodaparast, M.; Hosseini, S. H. "Effect of Pile Space in Pile Group under Explosive Loading"; *Adv. Defense Sci. & Technol.* 2019, 1, 393-404 (In Persian). <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.26762935.1397.9.4.2.3K>
- [6] Jayasinghe, L. B.; Zhou, H. Y.; Goh, A. T. C.; Zhao, Z. Y.; Gui, Y. L. "Pile Response Subjected to Rock Blasting Induced Ground Vibration Near Soil-Rock Interface"; *Comput. Geotech.* 2017, 82, 1–15. <http://doi.org/10.1016/j.compgeo.2016.09.015>
- [7] Ibrahim, Y. E.; Nabil, M. "Finite Element Analysis of Pile Foundations Under Surface Blast Loads"; *Spr. Natu. Sing.* 2019, 446–460. http://doi.org/10.1007/978-981-13-8331-1_32.
- [8] Jayasinghe, L. B.; Goh, A. T. C.; Zhao, Z.; Zhou, H.; Gui, Y. "Numerical Analysis of Reinforced Concrete Piles Under Blast Loads"; *Int. Conf. Civil. Eng. Res.* 2017, Indonesia. <http://doi.org/10.12962/j23546026.y2017i6.3318>.
- [9] Hasanvand, P.; Hoseini, M. "Strengthening of Reinforced Concrete Bridge Columns Against Blast Loading and Comparison of Different Methods of Strengthening"; *Pass. Def.* 2023, 14.
- [10] Jayasinghe, L. B.; Zhao, Z. Y.; Goh, A. T. C.; Zhou, H. Y.; Gui, Y. L.; Tao, M. "A Field Study on Pile Response to Blast-Induced Ground Motion"; *Soil. Dyn. Earthq. Eng.* 2018, 114, 568-575. <http://doi.org/10.1016/j.soildyn.2018.08.008>.
- [11] Jayasinghe, L. B.; Thambiratnam, D. P.; Perera, N.; Jayasooriya, J. H. A. R. "Computer Simulation of Underground Blast Response of Pile in Saturated Soil"; *Comput. Struct.* 2013, 120, 86–95. <http://doi.org/10.1016/j.compstruc.2013.02.016>.
- [12] Jayasinghe, L. B.; Zhou, H. Y.; Goh, A. T. C.; Zhao, Z. Y.; Gui, Y. L. "Pile Response Subjected to Rock Blasting Induced Ground Vibration Near Soil-Rock Interface"; *Comput. Geotech.* 2017, 82, 1–15. <http://doi.org/10.1016/j.compgeo.2016.09.015>.
- [13] Chakraborty, T. "Analysis of Hollow Steel Piles Subjected to Buried Blast Loading"; *Comput. Geotech.* 2016, 78, 194–202. <http://doi.org/10.1016/j.compgeo.2016.05.015>.