

## تأثیر فاصله بین شمع‌ها در گروه شمع تحت بارگذاری انفجار

مهدی خداپرست<sup>۱\*</sup>، سید حسن حسینی<sup>۲</sup>

۱- دانشجویار ۲- کارشناس ارشد، دانشگاه قم

(دریافت: ۹۶/۰۸/۰۳، پذیرش: ۹۷/۰۲/۲۳)

### چکیده

امروزه استفاده از گروه شمع‌ها به منظور انتقال بار سازه به لایه‌های سخت خاک یا سنگ، این سازه از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. بنابراین هرگونه آسیب به گروه شمع می‌تواند منجر به خطرات جبران‌ناپذیری شود. از سوی دیگر، اهمیت بارگذاری انفجاری و توسعه سیستم‌های پدافند غیرعامل، اتخاذ تدابیر لازم در خصوص اثرات ناشی از بارگذاری انفجار بر گروه شمع‌ها بیش از پیش ضروری است. یکی از پارامترهای مهم و اثرگذار در گروه شمع، فواصل بین شمع‌ها در گروه شمع است که در این تحقیق سعی گردیده است که اثرات فاصله بین شمع‌ها در گروه شمع تحت بارگذاری انفجار، مورد بررسی قرار گیرد. در این تحقیق تحلیل عددی گروه شمع، با استفاده از نرم‌افزار آباکوس و به وسیله روش کوپل اویلری- لاگرانژی (CEL)، انجام شده است. با توجه به نتایج اتخاذ شده مشخص گردید که افزایش فاصله عرضی یا طولی شمع‌ها در گروه شمع، موجب بهبودی وضعیت گروه شمع در برابر بارگذاری انفجار خواهد شد.

**کلیدواژه‌ها:** گروه شمع، فاصله بین شمع‌ها، بارگذاری انفجار، روش کوپل اویلری- لاگرانژی (CEL)

## Effect of Pile Space in Pile Group under Explosive Loading

M. Khodaparast\*, S. H. Hosseini

Qom University

(Received: 25/10/2017; Accepted: 13/05/2018)

### Abstract

Nowadays, using the pile group has special importance due to the transfer of structure load to hard layers of soil or rock. Therefore, any damage to the pile group can lead to irreparable risks. On the other hand, the importance of explosive loading and the development of passive defence systems require more appropriate measures concerning the effects of explosion loading on the pile groups. One of the most important parameters in pile group is pile space. In this study, the effects of pile space in the pile group under explosion loading are investigated. For this purpose, the numerical analysis of the pile group has been performed using the Abaqus software and by Coupling Eulerian-Lagrange method. According to the results, it was found that increasing the lateral or longitudinal pile space in the pile group would improve the condition of the pile group against the explosive loading.

**Keywords:** Pile Group, Pile Space, Explosion Loading, Coupling Eulerian-Lagrange Method (CEL)

## ۱. مقدمه

شمع‌ها از متداول‌ترین سازه‌های عمرانی برای ساختمان‌های بلند، پل‌ها و غیره هستند. امروزه در بسیاری از ساختمان‌ها از شمع‌ها به منظور انتقال بار سازه به عمق لایه‌های خاک و یا سنگ استفاده می‌شود در این میان استفاده از گروه شمع‌ها، با توجه به نیروی قابل توجه سازه فوقانی در زیر سازه‌های مهمی همچون تجهیزات نیروگاهی، مجتمع‌های پتروشیمی، سازه‌های دریایی، پل‌ها و سازه‌های بلند و یا عدم وجود خاک مناسب در محل احداث سازه‌ها به منظور افزایش توان باربری و کاهش نشست پی افزایش یافته است. با این وجود، شکست و گسیختگی یک شمع و یا گروه شمع می‌تواند منجر به فاجعه شده و باعث گسیختگی سازه فوقانی و سازه‌های اطراف گردد [۱]. زمانی که یک انفجار در نزدیکی سطح زمین رخ می‌دهد در این صورت شوک زمین ناشی از فشار هوا و شوک مستقیم زمین رخ خواهد داد که شوک مستقیم زمین، منجر به انتقال انرژی انفجار به سطح زمین و لایه‌های زیرین می‌شود. انفجار کوچکی در نزدیکی و مجاورت یک شمع و یا گروه شمع، ممکن است موجب گسیختگی شمع و در نهایت تمام سازه شود [۲]. با توجه به توسعه سیستم‌های پدافند غیرعامل، به خصوص اتخاذ تدابیر لازم در خصوص بارهای ایجادشده توسط انفجارات سطحی و عمقی لحاظ کردن این موارد در طراحی سازه‌ها به خصوص گروه شمع‌ها مورد نیاز است؛ بنابراین ضروری است اثرات نامساعد و مضر بارهای انفجاری بر گروه شمع‌ها که شوک زمین توسط بار انفجاری ایجاد می‌شوند، محاسبه و لحاظ گردد. یکی از پارامترهای مهم و اثرگذار در گروه شمع فواصل بین شمع‌ها در گروه شمع است که در این تحقیق سعی گردیده است که اثرات فاصله بین شمع‌ها در گروه شمع تحت بارگذاری انفجار مورد بررسی قرار گیرد.

تاکنون تحقیقات عمده‌ای در رابطه با تأثیر بارگذاری انفجار انجام گرفته است. بیشتر مطالعات در زمینه بررسی اثر انفجار بر سازه‌ها به سال‌های ۱۹۳۹ تا ۱۹۴۵ (جنگ جهانی دوم) برمی‌گردد. می‌توان گفت جنگ جهانی دوم منبعی از آزمایش‌های ارزشمند (بدون در نظر گرفتن خسارات جانی) به شمار می‌آید که از ساده‌ترین سازه‌ها مانند دیوار و پناهگاه تا سازه‌های سنگین مانند پل، تونل و پناهگاه‌های زیردرا تحت تأثیر انفجار قرار گرفتند. به همین دلیل در سال ۱۹۳۸ کمیته‌ای به نام تحقیقات دفاع ملی تشکیل شد و رمینیکو [۳] اثر انفجار بر سازه‌های مختلف را بررسی کرد و میزان خرابی‌های سازه‌ها نسبت به نوع سازه، ضخامت سطح برخورد، نوع و وزن ماده منفجره و میزان فاصله از محل انفجار را بررسی کرد.

با نگاهی به مقالات موجود در زمینه بحث‌های مرتبط با اثر انفجار بر شمع و گروه شمع مشخص می‌شود که تاکنون تحقیقات در این زمینه، بر روش‌های تحلیلی و عددی متمرکز شده است.

همچنین پیرامون مبحث اثر بارگذاری انفجار بر سازه‌های زیرزمینی تحقیقات متعددی شده است اما کمتر تلاشی برای مطالعات در زمینه اثر بارهای انفجاری ناشی از شوک زمین بر شمع‌ها و گروه شمع شده است.

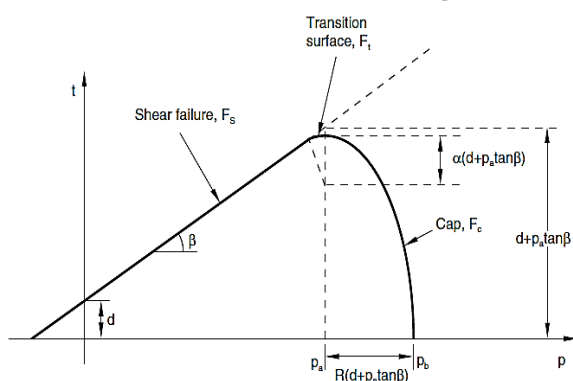
رندولف [۴] پاسخ شمع‌های انعطاف‌پذیر را تحت بار جانبی با استفاده از مدل‌سازی عددی مطالعه کرد. او خاک را به عنوان محیط پیوسته الاستیک با مدول‌های خطی متنوع فرض کرد و فرمولی جهت ارزیابی لنگر خمشی حداکثر در سر شمع یک سر آزاد ارائه نمود. پولس [۵] رفتار شمع‌ها را در برابر بارهای جانبی با استفاده از تئوری زنجیری تحلیل کرده است. او دریافت که ضرایب بزرگ مؤثر بر رفتار شمع، شامل میزان انعطاف‌پذیری آن و نسبت طول به قطر شمع برای هر دو وضعیت دوسرگیردار و یک سرگیردار و یک سر آزاد هستند. کومار و همکاران [۶] در رابطه با پاسخ سازه‌های نیمه‌مدفون در برابر بارگذاری انفجاری به صورت غیرمستقیم مطالعاتی انجام دادند. در تحقیق مذکور تحلیل عددی اجزای محدود با استفاده از نرم‌افزار Abaqus صورت گرفت. آنان به این نتیجه رسیدند که اندرکنش بین سازه و خاک نقش بسیار مهمی در تحلیل بار انفجاری دارد. همچنین دریافتند که تغییر مکان و تنش در سازه، با افزایش عمق مدفون پی کاهش می‌یابد.

رفتار شمع‌ها در خاک‌های ماسه‌ای اشباع، تحت انفجار با در نظر گرفتن اندرکنش خاک-شمع با استفاده از روش تحلیل اجزای محدود و نرم‌افزار عددی LS-Dyna توسط جایاسینگ [۷] مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین توزیع انفجار در خاک، تغییر شکل قائم شمع و تنش مؤثر در شمع نیز بررسی شده است. نتایج نشان داد که قسمت فوقانی شمع نسبت به انفجار آسیب‌پذیرتر بوده و با افزایش فاصله انفجار از شمع، تأثیر انفجار بر روی شمع کاهش می‌یابد.

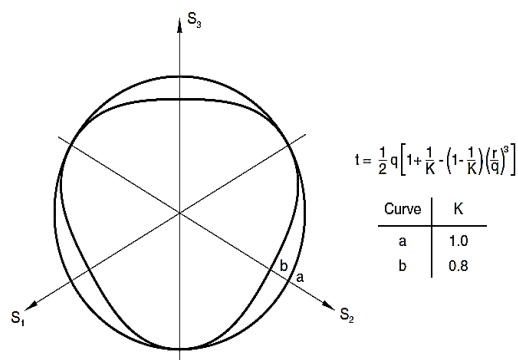
بو و همکاران [۸] تحلیل دینامیکی با استفاده از مدل‌سازی عددی توسط نرم‌افزار LS-Dyna جهت ارزیابی اندرکنش خاک-شمع-سازه تحت بارگذاری انفجار سطحی انجام داده‌اند. آنان دریافتند تنش برشی حداکثر در بالای شمع، بیشتر از نوک شمع بوده و توزیع تنش به صورت مثلث وارونه است. همچنین آنان دریافتند که حداکثر فشار تماس خاک و شمع بیشتر در بالای شمع متمرکز شده است. چاکرابورتی [۹] از نرم‌افزار آباکوس جهت تحلیل شمع‌های فولادی در معرض انفجار عمقی استفاده نمود. او در این تحلیل به این نتیجه رسید که با افزایش بار محوری، تغییر شکل جانبی سرشمع افزایش می‌یابد. او همچنین دریافت در یک خاک غیرمترکم حداکثر سرعت ذرات در خاک با کاهش در مدول الاستیک، وزن مخصوص و زاویه اصطکاک داخلی خاک، افزایش می‌یابد.

در این تحقیق تحلیل سه‌بعدی دینامیکی گروه شمع در

انحرافی است،  $p$  تنش متوسط و برابر با  $\left[\frac{(\sigma'_1 + \sigma'_2 + \sigma'_3)}{3}\right]$  است،  $r$  نیز سومین تنش انحرافی و برابر با  $r = \left(\frac{9}{2} S : S : S\right)^{\frac{1}{3}}$  است.  $K$  پارامتر اسکالری است که شکل سطح تسلیم را تعیین کرده و انحنای سطح تسلیم را در صفحه انحرافی ( $\pi$ ) حفظ می‌نماید (شکل ۲). پارامتر  $\beta$  شیب خط سطح تسلیم در صفحه تنش  $p-t$  و مربوط به زاویه اصطکاک داخلی  $\phi$  است.



شکل ۱. مدل دراگر-پراگر اصلاح شده / مدل کلاهک: سطوح تسلیم در صفحه  $p-t$  [۱۰]



شکل ۲. سطوح تسلیم/جریان مدل خطی در صفحه انحرافی [۱۰]

منحنی کلاهک<sup>۳</sup> مطابق شکل منحنی بیضی شکل با خروج از مرکز ثابت در صفحه  $p-t$  است که شامل وابستگی به سومین تنش انحرافی در صفحه انحرافی است. سطح تسلیم کلاهک به صورت رابطه (۳) تعریف می‌گردد:

$$F_c = \sqrt{[p - p_a]^2 + \left[\frac{Rt}{(1 + \alpha - \alpha / \cos \beta)}\right]^2} - R(d + p_a \tan \beta) = 0 \quad (3)$$

هم‌چنین سطح تسلیم منحنی انتقال نیز به صورت رابطه (۴) تعریف می‌گردد:

$$F_t = \sqrt{[p - p_a]^2 + \left[t - (1 - \frac{\alpha}{\cos \beta})(d + p_a \tan \beta)\right]^2} - \alpha(d + p_a \tan \beta) = 0 \quad (4)$$

معرض بارگذاری انفجار با استفاده از نرم‌افزار آباکوس انجام شده است. در این خصوص ابتدا فواصل عرضی بین شمع‌ها و سپس فواصل طولی بین آن‌ها در گروه شمع از ۱/۵ متر تا ۳ متر تغییر کرده و اثرات این تغییرات شامل تغییر مکان جانبی شمع جلو و شمع عقب، تنش فشاری در دیواره و نوک شمع‌ها و تنش جانبی ایجاد شده در سر شمع تحت بارگذاری انفجار در گروه شمع در خاک رسی بررسی شده است.

## ۲. مدل‌سازی عددی

همان‌طور که قبلاً مطرح شد، مدل‌سازی عددی گروه شمع تحت بارگذاری انفجار، با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود Abaqus ۷.13 انجام گردیده است. در این بخش مدل‌سازی اجزای محدود هر یک از عناصر تحقیق معرفی می‌شود.

### ۲-۱. مدل‌سازی اجزای محدود خاک

در این تحقیق مدل سه‌بعدی اجزای محدود خاک با استفاده از المان‌های لاگرانژی ایجاد شده است. ابعاد محیط خاک با در نظرگیری تأثیرناپذیری مرزهای محیط اجزای محدود ۳۰\*۳۰\*۳۰ متر است. پاسخ تنش-کرنش خاک رسی، با استفاده از مدل رفتاری الاستو-پلاستیک کلاهک دراگر-پراگر<sup>۱</sup> مدل‌سازی شده است [۱۰].

مدل کلاهک دراگر-پراگر تغییر شکل خمیری تحت فشار را پیش‌بینی می‌نماید. این مدل شامل دو منحنی است: منحنی گسیختگی برشی  $F_s$  و منحنی کلاهک  $F_c$  که مکانیسم غیرالاستیک سخت‌شوندگی را برای تراکم خمیری فراهم کرده و به کنترل اتساع پذیری حجم در زمانی که مصالح در برش به تسلیم می‌رسند، کمک می‌کنند. منحنی انتقال  $F_t$  منحنی ملایمی است که بین منحنی‌های گسیختگی برشی و منحنی کلاهک قرار دارد. شکل (۱) منحنی‌ها را در صفحه  $p-t$  نمایش می‌دهد [۱۰].

با استفاده از منحنی گسیختگی برشی مدل کلاهک دراگر-پراگر معیاری برای وقوع برش<sup>۲</sup> را که بستگی به چسبندگی  $d$  و زاویه اصطکاک داخلی  $\beta$  مصالح ریزدانه دارد می‌توان مطابق مدل موهر-کولمب به صورت روابط (۱ و ۲) تعریف نمود:

$$F_s = t - p \tan \beta - d = 0 \quad (1)$$

$$t = \frac{q}{2} \left[ 1 + \frac{1}{K} - \left( 1 - \frac{1}{K} \right) \left( \frac{r}{q} \right)^3 \right] \quad (2)$$

در اینجا  $q$  تنش معادل فون میسز  $\left[ \sqrt{\frac{3}{2}} S : S \right]$  که  $S$  تنش

<sup>۳</sup> Cap

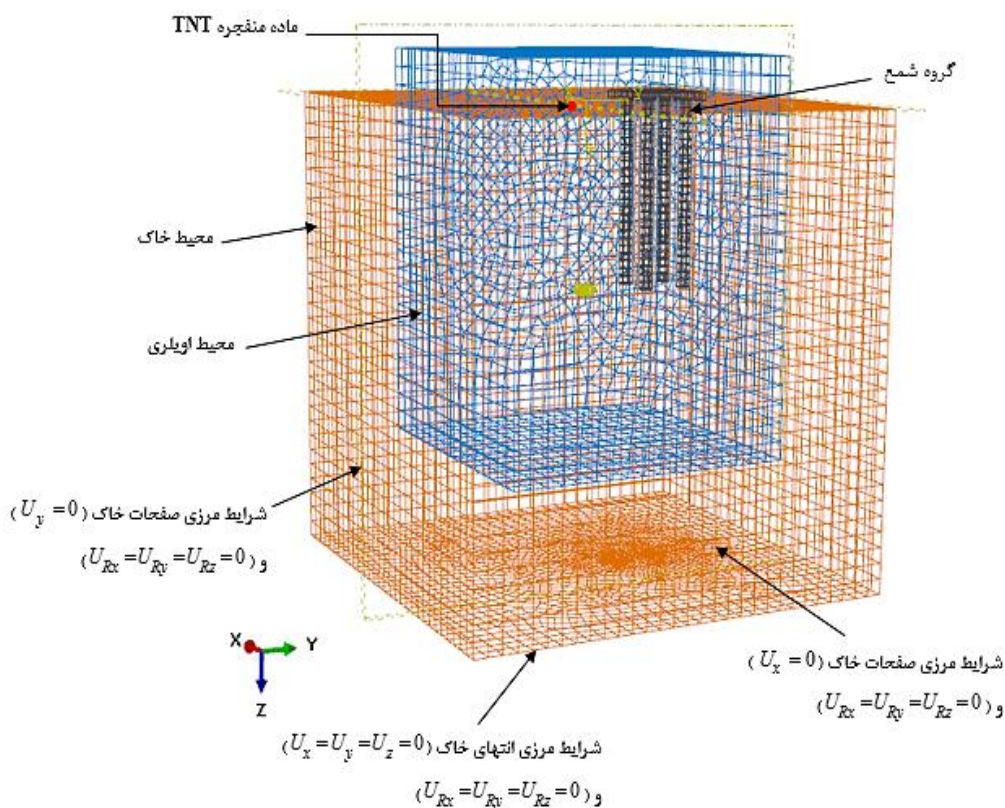
<sup>۱</sup> Elasto-Plastic Drucker-Prager Cap Model

شبکه مدل اجزای محدود خاک با استفاده از المان‌های بلوک هشت‌گرمای (C3D8R) به همراه انتگرال کاهش یافته<sup>۱</sup>، کنترل ساعت‌شنی<sup>۲</sup> ایجاد گردیده‌اند. حداقل و حداکثر اندازه المان در نزدیکی و دور از محل انفجار به ترتیب ۱۰ میلی‌متر و ۱۰ سانتی‌متر است. جهت مدل‌سازی اتصال و اندرکنش بین خاک و شمع، از گزینه تماس کلی<sup>۳</sup> در آباکوس به همراه تماس سخت<sup>۴</sup> در جهت نرمال و تماس اصطکاکی<sup>۵</sup> در جهت عمود استفاده گردیده است. شرایط مرزی مدل بدین صورت است که پایین صفحه محیط خاک و شمع، در تمامی جهت‌ها کاملاً مقید هستند. در این مدل‌سازی با توجه به موج انعکاسی انفجار، مرز محیط خاک به گونه‌ای در نظر گرفته شده است که عملاً انعکاسی وجود نخواهد داشت. همچنین صلبیت افقی و دورانی صفحات قائم و جلو و عقب محیط خاک مطابق شکل (۳) از طریق مقید کردن تغییر مکان عمود بر صفحه ( $U_x$  or  $U_y$  or  $U_z$ ) و دوران ( $U_{Rx} = U_{Ry} = U_{Rz} = 0$ ) ایجاد می‌شود. مدل اجزای محدود شبکه‌بندی شده خاک، گروه شمع مسلح و ماده منفجره در شکل (۳) نشان داده شده است.

در اینجا  $R$  و  $\alpha$  به ترتیب پارامترهای محاسبه شکل منحنی کلاهک و سطح ملایم بین منحنی گسیختگی برشی و کلاهک هستند. پارامتر تکامل است که نشان‌دهنده کرنش خمیری حجمی سخت‌شوندگی یا نرم‌شوندگی است. مشخصات خاک رسی بر اساس مدل رفتاری در نظر گرفته شده در جدول (۱) آمده است [۱۱].

جدول ۱. مشخصات و پارامترهای خاک رسی [۱۱]

پارامتر	مقدار
مدول یانگ ( $E$ )	۵۱/۷ MPa
ضریب پواسون ( $\nu$ )	۰/۴۵
چگالی ( $\rho$ )	۱۹۲۰ Kg/m <sup>3</sup>
چسبندگی ( $d$ )	۰/۰۳۶ MPa
زاویه اصطکاک داخلی ( $\phi$ )	۲۴ درجه
پارامتر خروج از مرکزیت کلاهک ( $R$ )	۰/۳
موقعیت سطح تسلیم اولیه کلاهک ( $\epsilon_V$ )	۰/۰۲
پارامتر انتقال شعاع سطح ( $\alpha$ )	۰
رفتار سخت‌شوندگی کلاهک (تنش، کرنش حجمی خمیری)	۲/۷۵ MPa
	۴/۸۳ MPa
	۵/۱۵ MPa
	۶/۲۰ MPa



شکل ۳. مدل اجزای محدود شبکه‌بندی شده خاک، شمع مسلح و ماده منفجره و شرایط مرزی خاک

<sup>1</sup> Reduced Integration

<sup>2</sup> Hourglass Control

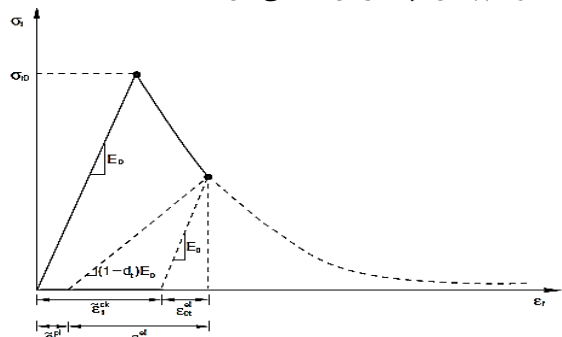
<sup>3</sup> General Contact

<sup>4</sup> Hard Contact

<sup>5</sup> Frictionless Contact

$$\tilde{\varepsilon}_t^{ck} = \varepsilon_t - \varepsilon_{ot}^{el} \quad (۶)$$

که در آن  $\varepsilon_{ot}^{el} = \sigma_t / E_0$  کرنش الاستیک مصالح آسیب ندیده است و همچنین  $\varepsilon_t$  کرنش کششی کل است.



شکل ۴. تعریف کرنش ترک‌خوردگی  $\tilde{\varepsilon}_t^{ck}$  جهت تعریف رفتار سخت‌شوندگی کششی [۱۰]

برای تعریف رفتار تنش-کرنش فشاری بتن باید مقدار تنش‌های  $\sigma_c$ ، کرنش‌های غیرالاستیک  $\tilde{\varepsilon}_c^{in}$  متناظر با مقادیر تنش و خواص آسیب‌دیدگی  $d_c$  را مطابق شکل (۵) وارد کرد. مقادیر کرنش کل با استفاده از رابطه ۷ باید تبدیل به کرنش‌های غیرالاستیک شود:

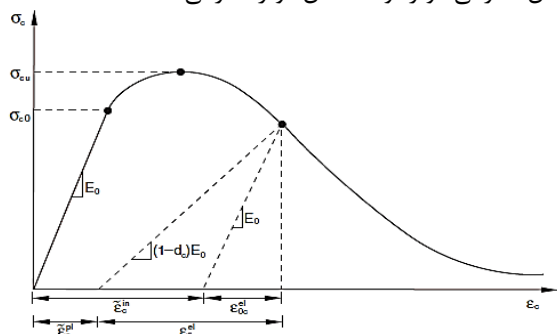
$$\tilde{\varepsilon}_c^{in} = \varepsilon_c - \varepsilon_{oc}^{el} \quad (۷)$$

که در آن،  $\varepsilon_{oc}^{el} = \sigma_c / E_0$  کرنش الاستیک متناظر با ماده آسیب‌ندیده و  $\varepsilon_c$  کرنش فشاری کل است.

در این مدل از سطح تسلیم لوبلینر و همکاران [۱۰] استفاده شده است که در آن: سطح تسلیم برحسب تنش‌های مؤثر  $\bar{\sigma}$  (مقدار تنشی که به‌وسیله قسمت سالم ماده تحمل می‌شود) به‌وسیله رابطه (۸) تعریف می‌شود:

$$F = \frac{1}{1-\alpha} (\bar{q} - 3\alpha\bar{p} + \beta(\tilde{\varepsilon}_c^{pl}) (\hat{\sigma}_{max}) - \gamma(-\hat{\sigma}_{max})) - \bar{\sigma}_c(\tilde{\varepsilon}_c^{pl}) = 0 \quad (۸)$$

در رابطه فوق،  $\hat{\sigma}_{max}$  بزرگ‌ترین تنش مؤثر اصلی،  $\tilde{\varepsilon}_c^{pl}$  کرنش خمیری فشاری،  $\bar{p}$  تنش هیدرواستاتیک مؤثر (نامتغیر تانسور تنش مؤثر)،  $\bar{q}$  تنش مؤثر معادل میسز (نامتغیر تانسور تنش انحرافی مؤثر) و  $\bar{\sigma}$  تنش مؤثر انحرافی است.



شکل ۵. تعریف کرنش فشاری غیرالاستیک  $\tilde{\varepsilon}_c^{in}$  جهت تعریف رفتار سخت‌شوندگی فشاری [۱۰]

## ۲-۲. مدل‌سازی اجزای محدود شمع‌ها و میلگردهای شمع

در این پژوهش مدل‌سازی شمع‌ها و آرماتورهای آن با استفاده از المان‌های لاگرانژی در Abaqus /CAE انجام شده است. مدل اجزای محدود شمع مسلح و میلگردها در شکل (۴) نشان داده شده است. قطر شمع‌ها در مدل‌سازی ۱ متر و طول آن ۱۲ متر است. مشخصات میلگردهای شمع مدل اصلی طولی شمع مسلح 16T25 و آرماتور عرضی T10@10cm است. جهت مدل‌سازی شمع‌ها از مدل رفتاری آسیب پلاستیک بتن<sup>۱</sup> و برای مدل‌سازی آرماتورها از مدل رفتاری سخت‌شوندگی جانسون-کوک<sup>۲</sup> استفاده شده است.

مدل رفتاری آسیب پلاستیک بتن دو فرض اصلی را در مکانیسم گسیختگی در نظر می‌گیرد که شامل ترک‌خوردگی کششی و خردشدگی فشاری است [۱۰].

معیار گسیختگی در محدوده خمیری ماده تحت تنش‌های ترکیبی بیان می‌شود. این معیار به دودسته عمده بر اساس پاسخگویی ماده به فشار هیدرواستاتیک تقسیم‌بندی می‌شود. در اکثر موارد، رفتار شکل‌پذیر با نام وابسته به فشار هیدرواستاتیک شناخته می‌شود و مواد غیرفلزی مانند خاک، سنگ و بتن از این دسته بوده و وابسته به فشار هستند.

اصول آسیب در اواسط دهه ۵۰ میلادی توسط کاجنو [۱۰] بر اساس کاهش سطوح تنش ارائه شده است. از آن زمان مکانیسم آسیب بر اساس مدل زوال‌یافتگی و هم‌اکنون با استفاده از سکانت زوال سختی در نظر گرفته می‌شود. مدل‌های زوال یافته، زوال سختی الاستیک را مجموع خرابی‌ها در نظر می‌گیرند. در مورد بتن این رفتار با توجه به درجه محصورشدگی المان تعریف می‌شود. در این خصوص هنگامی که محصورشدگی بر اثر پروسه بارگذاری کم باشد، آسیب رخ داده سریع و برگشت‌ناپذیر است؛ اما در صورتی که درجه محصورشدگی زیاد باشد، برای رخ دادن آسیب در زمان اعمال بار، زمان بیشتری لازم است.

فرمول مدل آسیب سخت‌شدگی الاستیک در بعد اسکالر به‌صورت رابطه (۵) است [۱۰]:

$$\sigma = (1-d)E_0\varepsilon = (1-d)\bar{\sigma} \quad (۵)$$

برای مدل‌سازی کامل رفتار کششی بتن در نرم‌افزار آباکوس، رفتار پس‌گسیختگی<sup>۳</sup> تنش-کرنش برای کشش در نظر گرفته می‌شود. این رفتار با سخت‌شدگی کششی، نرم‌شدگی کرنشی و اندرکنش فولاد و بتن مطابق شکل (۴) به‌دست می‌آید. برای این منظور باید مقادیر مدول یانگ  $E_0$ ، تنش  $\sigma_t$ ، کرنش ترک‌خوردگی  $\tilde{\varepsilon}_t^{ck}$  و همچنین پارامتر آسیب‌دیدگی  $d_t$  برای رده بتن موردنظر وارد شود. کرنش ترک‌خوردگی  $\tilde{\varepsilon}_t^{ck}$  از رابطه (۶) به‌دست می‌آید [۱۰]:

<sup>۱</sup> Concrete Damage Plasticity

<sup>۲</sup> Johnson-Cook

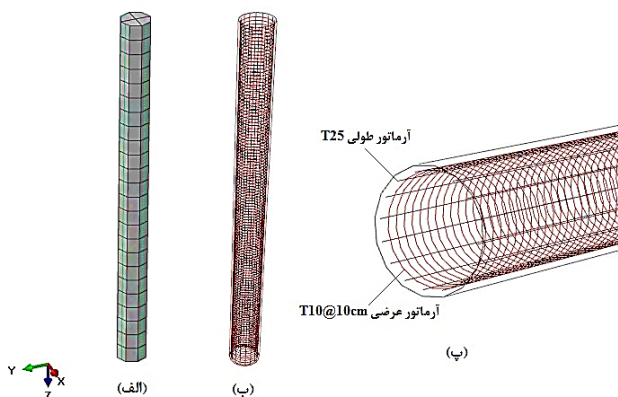
<sup>۳</sup> Postfailure

کرنش پلاستیک معادل و  $\dot{\epsilon}_0 = 1/s$  نرخ کرنش مرجع است.  $A$ ،  $B$ ،  $C$ ،  $m$  و  $n$  پارامترهای ثابت مدل هستند.  $\theta$  نیز دمای متناظر است. همچنین پارامترهای  $C$  و  $\dot{\epsilon}_0$  مربوط به نرخ کرنش وابسته هستند. در این مقاله، دمای وابسته به پاسخ تنش-کرنش مصالح در نظر گرفته نشده است. همچنین مشخصات فولاد آرماتور در مدل، در جدول (۳) مشخص شده است [۹].

شبکه‌های شمع نیز با استفاده از المان‌های (C3D8R) به همراه انتگرال کاهش یافته، کنترل ساعت‌شنی و شبکه‌های آرماتورهای طولی و عرضی با استفاده از المان دو گرهای (T3D2) ایجاد گردیده‌اند. اندازه شبکه‌های شمع به اندازه ۱۰ سانتی‌متر و شبکه‌های آرماتورها به اندازه ۱ سانتی‌متر است. همچنین جهت مدل‌سازی اندرکنش بین شمع و آرماتور از گزینه تماس کلی و همچنین جهت مدفون نمودن آرماتورها در شمع از قید ناحیه دفن شده<sup>۳</sup> در آباکوس استفاده شده است. مدل اجزای محدود شمع و آرماتورها در شکل (۷) نشان داده شده است.

جدول ۳. مشخصات و پارامترهای فولاد آرماتور [۹]

مقدار	پارامتر
۲۰۰ GPa	مدول یانگ ( $E_s$ )
۰/۳	ضریب پواسون ( $\nu$ )
۷۸۰۰ Kg/m <sup>3</sup>	چگالی ( $\rho_s$ )
۳۵۰ MPa	مقاومت تسلیم ( $f_s$ )
۳۶۰ MPa	پارامترهای سخت‌شوندگی جانسون-کوک (J-C)
A	
۶۳۵ MPa	
B	
۰/۱۱۴	n
۰/۰۷۵	C

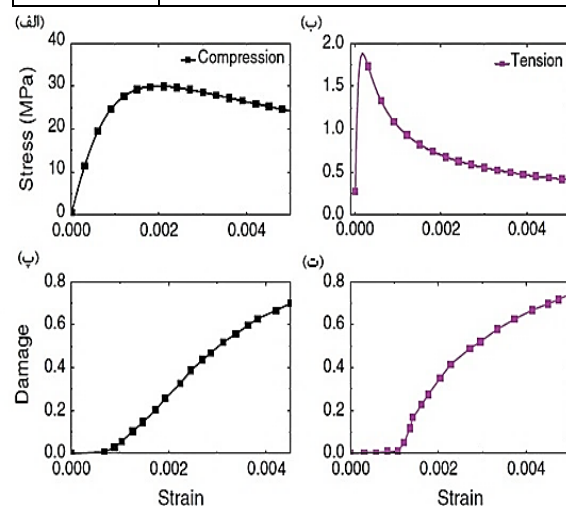


شکل ۷. مدل اجزای محدود (الف) شمع، (ب) شمع مسلح و (پ) آرماتورهای شمع

مشخصات بتن شمع مسلح مدل‌سازی شده در جدول (۲) داده شده است. همچنین منحنی‌های تنش-کرنش فشاری و کششی و منحنی‌های آسیب-کرنش فشاری و کششی در شکل (۶) نشان داده شده است [۱۲].

جدول ۲. مشخصات و پارامترهای بتن شمع [۱۲]

مقدار	پارامتر
۲۷/۴ GPa	مدول یانگ ( $E_c$ )
۰/۲	ضریب پواسون ( $\nu$ )
۲۴۰۰ Kg/m <sup>3</sup>	چگالی ( $\rho_c$ )
۰/۱	پارامتر خروج از مرکزیت پتانسیل جریان ( $\epsilon$ )
۳۶ درجه	زاویه اصطکاک ( $\beta$ )
۰/۶۶۶	$K_c$
۱/۱۶	$\sigma_{b0} / \sigma_{c0}$



شکل ۶. منحنی‌های تنش-کرنش و آسیب-کرنش: (الف) منحنی تنش-کرنش فشاری بتن، (ب) منحنی تنش-کرنش کششی بتن، (پ) منحنی آسیب-کرنش فشاری بتن، (ت) منحنی آسیب-کرنش کششی بتن [۱۲]

در این مطالعه رفتار تنش-کرنش آرماتورهای فولادی، با استفاده از مدل رفتاری خمیری سخت‌شوندگی جانسون-کوک<sup>۱</sup> (J-C) مدل‌سازی شده است [۱۰]. این مدل برای تغییر شکل با نرخ کرنش زیاد بسیاری از مواد به‌خصوص اکثر فلزات کاربرد دارد. رابطه تنش-کرنش دینامیکی مدل J-C با لحاظ نرخ کرنش وابسته<sup>۲</sup> به‌صورت رابطه (۹) داده شده است:

$$\bar{\sigma} = \left[ A + B (\bar{\epsilon}^{pl})^n \right] \left[ 1 + C \ln \epsilon^* \right] (1 - \theta^m) \quad (9)$$

در اینجا  $\bar{\sigma}$  تنش تسلیم در نرخ کرنش غیرصفر،  $\epsilon^*$  کرنش

پلاستیک بدون بعد و برابر است با  $\epsilon^* = \frac{\dot{\epsilon}^{pl}}{\dot{\epsilon}_0}$  مقدار  $\dot{\epsilon}^{pl}$

<sup>3</sup> Embedded Region

<sup>1</sup> Johnson-Cook Plasticity

<sup>2</sup> Rate dependent Strain

است. روش CEL تلاش می‌کند که مزایای هر دو روش لاگرانژی و اویلری را در آباکوس اجرا نماید [۱۳]. در تحلیل عددی با استفاده از روش CEL مواد اویلری در طول مش از طریق محاسبه حجم بخش اویلری (EVF) <sup>۶</sup> دنبال می‌شوند. هر المان اویلری یک درصدی را نشان می‌دهند. که نشان‌دهنده سهم پر بودن المان اویلری از ماده است. تماس بین ماده اویلری و لاگرانژی با استفاده از گزینه تماس کلی و بر اساس روش تماس پینالتی <sup>۷</sup> انجام می‌شود. المان‌های لاگرانژی می‌توانند تا زمانی که به یک المان اویلری پر از ماده (EVF ≠ 0) برخورد نمایند، در طول مش اویلری بدون هیچ مقاومتی حرکت کنند [۱۴]. روش تفاضل اختلاف مرکزی از یک اختلاف زمان ( $\Delta t$ ) که کوچک‌تر از محدوده زمانی فعلی است، استفاده می‌کند. اختلاف زمان به صورت  $\Delta t \leq l/c$  است که  $l$  کوچک‌ترین بعد المان و  $c$  سرعت صوت موج پخش شده در محیط است. زمان کل تحلیل ۲۵ میلی‌ثانیه در نظر گرفته شده است به طوری که موج شوک زمین بتواند در طول کل شمع پخش و منتقل شود. به منظور توزیع صحیح موج تنش فشاری ناشی از انفجار، ویسکوزیته ظاهری توده <sup>۸</sup> از طریق توابع درجه دوم و خطی نرخ کرنش حجمی با مقادیر پیش فرض ۱/۲ و ۰/۰۶ فعال می‌گردد [۱۵].

جدول ۴. مشخصات ماده منفجره TNT [۹]

پارامتر	مقدار
چگالی ( $\rho$ )	۱۶۳۰ Kg/m <sup>3</sup>
سرعت موج انفجار ( $v$ )	۶۹۳۰ m/s
A	۳۷۳۸۰۰ MPa
B	۳۷۴۷ MPa
$\omega$	۰/۳۵
R <sub>1</sub>	۴/۱۵
R <sub>2</sub>	۰/۹
انرژی درونی در واحد جرم ( $E_m$ )	۳۶۸۰ KJ/Kg

#### ۲-۵. صحت‌سنجی مدل عددی

جهت صحت‌سنجی مدل عددی، دو شمع فولادی جدار نازک مدفون در خاک تحت بارگذاری انفجار، مدل‌سازی شده است. این تحلیل توسط چاکرabortی [۹] با استفاده از نرم‌افزار آباکوس انجام شده است. در این تحلیل، شمع‌های فولادی با قطر خارجی ۴۰۰ میلی‌متر و قطر داخلی ۳۳۵ میلی‌متر و طول ۱۰ متر مدل شده‌اند. فاصله مرکز به مرکز شمع‌ها تا مرکز ماده منفجره ۴ متر است. ماده منفجره استوانه‌ای شکل به وزن ۵۰ کیلوگرم TNT در ۳۵ سانتی‌متر از سطح زمین قرار گرفته است. در این مدل از دو شمع فولادی به فاصله ۳ متر استفاده شده است. محیط سه‌بعدی

#### ۲-۳. مدل‌سازی اجزای محدود ماده منفجره TNT

در تحقیق حاضر ماده منفجره TNT با استفاده از تکنیک کوپل اویلری- لاگرانژی<sup>۱</sup> به صورت المان‌های اویلری در Abaqus/CEL مدل‌سازی شده است. در این تحلیل برای مدل‌سازی ماده منفجره از المان‌های سه‌بعدی پیوسته اویلری هشت‌گره‌ای با انتگرال کاهش‌یافته (EC3D8R) استفاده شده است [۱۰]. المان‌های اویلری شامل ماده منفجره پر از ماده منفجره بوده درحالی‌که سایر المان‌های اویلری کاملاً فضای خالی هستند. در صورتی که  $EVF = 1$  باشد در این صورت فضای اویلری پر از ماده است و درحالی‌که مقدار  $EVF = 0$  باشد در این حال فضای اویلری خالی از ماده و عملاً فضای خالی است. المان‌های اویلری و لاگرانژی نیز از طریق گزینه تماس کلی با یکدیگر در تماس هستند که بین سطوح ماده منفجره، شمع و خاک تعریف می‌گردد. شرایط مرزی جریان آزاد<sup>۲</sup> برای محیط اویلری در نظر گرفته شده است که منجر به عدم انعکاس موج انفجار به داخل محیط اویلری می‌شود. در این تحقیق ماده منفجره با استفاده از معادله حالت (JWL)<sup>۳</sup> مدل‌سازی شده است. این معادله، فشار ایجاد شده از طریق انفجار ماده منفجره شیمیایی را مدل می‌نماید. معادله حالت JWL به صورت رابطه (۱۰) نوشته می‌شود [۱۰]:

$$P = A \left( 1 - \frac{\omega \rho}{R_1 \rho_0} \right) \exp \left( -R_1 \frac{\rho_0}{\rho} \right) + B \left( 1 - \frac{\omega \rho}{R_2 \rho_0} \right) \exp \left( -R_2 \frac{\rho_0}{\rho} \right) + \omega \rho E_m \quad (10)$$

در رابطه فوق  $A$ ،  $B$ ،  $R_1$ ،  $R_2$  و  $\omega$  مقادیر ثابت ماده منفجره TNT هستند. پارامتر  $A$  و  $B$  نشان‌دهنده بزرگی فشار،  $\rho_0$  چگالی ماده منفجره،  $\rho$  چگالی انفجار ایجاد شده و  $E_m$  انرژی درونی در واحد جرم است. در معادله EOS JWL، دو قسمت اولیه در سمت راست معادله نشان‌دهنده تولید فشار زیاد در طول انفجار و آخرین قسمت از طرف راست معادله نشان‌دهنده فشار پایین با توجه به حجم بالا در اثر انفجار است. خصوصیات ماده منفجره برای معادله EOS JWL در جدول (۴) نشان داده شده است [۹]. در این تحقیق از ماده منفجره TNT ۳۰۰ کیلوگرمی در مدل‌سازی مدل اصلی به صورت مکعبی شکل در فاصله افقی ۴ متری از کلاهک گروه شمع در سطح زمین استفاده شده است.

#### ۲-۴. روش تحلیل مدل

در این تحقیق تحلیل دینامیکی صریح<sup>۴</sup> با استفاده از روش CEL و روش اختلاف تفاضل مرکزی<sup>۵</sup> در یک مرحله انجام گردیده

<sup>1</sup> Coupled Eulerian-Lagrangian Approach

<sup>2</sup> Free Outflow

<sup>3</sup> Jones-Wilkins-Lee

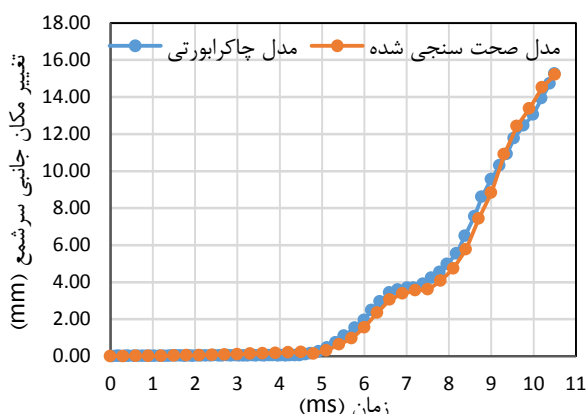
<sup>4</sup> Explicit

<sup>5</sup> Central Difference Integration

<sup>6</sup> Eulerian Volume Fraction

<sup>7</sup> Penalty

<sup>8</sup> Artificial Bulk Viscosity



شکل ۱۰. صحت‌سنجی تغییر مکان جانبی سرشمع با داده‌های مدل مقاله چاکرابورتی [۹]

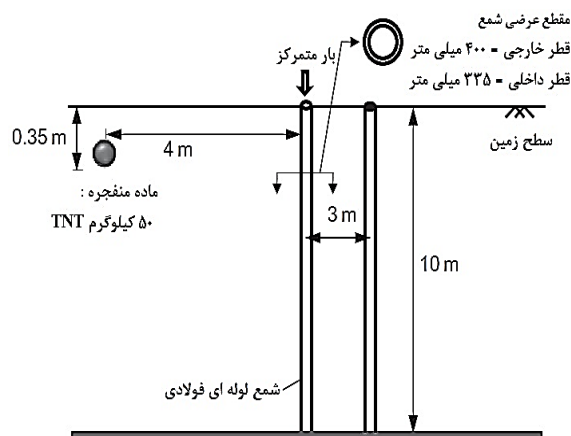
### ۳. بررسی اثر فاصله بین شمع‌ها در گروه شمع تحت بارگذاری انفجار

در این مطالعه جهت بررسی اثر فاصله بین شمع‌ها در گروه شمع از یک گروه شمع چهارتایی مطابق شکل (۱۱-الف) استفاده شده است. فاصله شمع‌ها از یکدیگر مطابق شکل (۱۱-ب) بوده و بر اساس جدول (۵) در نظر گرفته شده است. ابعاد سرشمع یا کلاهک گروه شمع با توجه به فاصله هریک از شمع‌ها از یکدیگر مطابق جدول (۵) تعیین شده است. فاصله ماده منفجره از سرشمع ۴ متر و در سطح زمین بوده و موج انفجار از سمت فاصله  $S_1$  و یا جهت  $Y$  به سمت گروه شمع می‌رود. مشخصات خاک رسی و بتن و فولاد شمع و ماده منفجره، به ترتیب در جدول‌های (۴-۱) آمده است.

همچنین ظرفیت باربری نهایی فشاری و جانبی شمع قبل از انفجار نیز توسط روش‌های میرهوف و برامز [۱۸-۱۷] برای هریک از شمع‌ها به صورت جداگانه محاسبه گردیده و در تعداد شمع‌ها ضرب شده که به ترتیب  $Q_1$  و  $Q_{I1}$  نامیده شده است. لازم به ذکر است که هنگام محاسبه ظرفیت باربری فشاری شمع، ضریب کارایی گروه شمع که مربوط به فواصل شمع‌ها و مقاومت دیواره شمع است، توسط معادله کانورس-لابر نیز محاسبه گردیده است [۱۳].

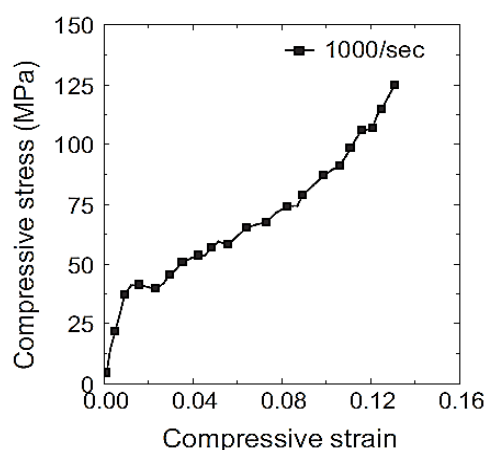
جهت محاسبه ظرفیت باربری نهایی فشاری و جانبی شمع پس از انفجار، تنش فشاری نوک و تنش جانبی هریک از شمع‌ها قرائت گردید و در نهایت با یکدیگر جمع شده و از مجموع ظرفیت باربری نهایی فشاری و جانبی قبل از انفجار کسر گردید که به ترتیب  $Q_2$  و  $Q_{I2}$  نام‌گذاری شد. بدین ترتیب مقادیر نسبت‌های  $(Q_2/Q_1)$  و  $(Q_{I2}/Q_{I1})$  به دست آمده‌اند.

خاک در نظر گرفته شده  $20 \times 20 \times 20$  متر است. همچنین شمع در معرض  $500 \text{ KN}$  بار محوری قرار دارد. موقعیت شمع‌ها و ماده منفجره در خاک در این تحلیل در شکل (۸) نشان داده شده است. مشخصات فولاد شمع در جدول (۳) و مشخصات مدل JWLL ماده منفجره TNT در جدول (۴) آمده است. همچنین ویژگی‌های خاک ماسه‌ای در نظر گرفته شده به صورت وزن مخصوص  $\rho_{soil} = 1560 \text{ kg/m}^3$ ، مدول الاستیسیته  $E_{soil} = 28 \text{ MPa}$ ، زاویه اصطکاک داخلی  $\phi = 30^\circ$ ، ضریب پواسون  $\nu = 0.2$  و زاویه اتساع  $\psi = 5^\circ$  است [۱۶]. همچنین پاسخ تنش- کرنش خاک ماسه‌ای در نرخ کرنش  $1000 \text{ /s}$  در شکل (۹) نشان داده شده است [۱۶].



شکل ۸. موقعیت شمع و ماده منفجره در خاک در مدل صحت‌سنجی شده [۹]

در این صحت‌سنجی حداکثر تغییر مکان جانبی سرشمع نسبت به زمان تحت بارگذاری انفجار با داده‌های مدل تحقیق چاکرابورتی [۹] مطابق شکل (۱۰) مقایسه شده است [۹]. با توجه به نمودار شکل (۱۰)، مشاهده می‌شود که انطباق خوبی از نتایج مدل صحت‌سنجی با نتایج چاکرابورتی وجود دارد، بنابراین، می‌توان گفت که مدل‌سازی به خوبی صحت‌سنجی شده است.



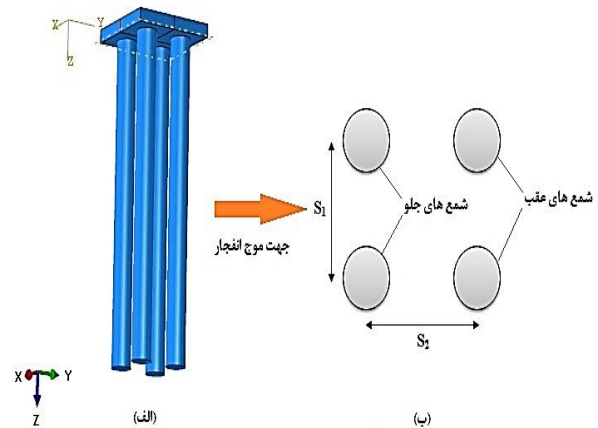
شکل ۹. منحنی و رابطه تنش-کرنش ماسه Ottawa در نرخ کرنش  $1000 \text{ /sec}$  [۱۶]



نشان داده شده است. همچنین مقادیر مجموع تنش نوک پس از انفجار و تنش جانبی سرشمع برای حالت‌هایی که تنها فاصله  $S_1$  تغییر کرده و فاصله  $S_2$  ثابت است به ترتیب در شکل‌های (۱۶) و (۱۷) و برای حالت‌هایی که تنها فاصله  $S_2$  تغییر کرده و فاصله  $S_1$  ثابت است به ترتیب در شکل‌های (۱۸) و (۱۹) نشان داده شده است. در نهایت نسبت‌های  $(Q_2/Q_1)$  و  $(QI_2/QI_1)$  برای تمامی حالات در جدول (۶) داده شده است.

با دقت در شکل‌های (۱۲) و (۱۳) مشاهده می‌گردد که مقادیر تغییر شکل جانبی حداکثر شمع‌های جلو و عقب با افزایش فاصله  $S_1$  نیز کاهش می‌یابند. به‌طور مثال تغییر مکان جانبی شمع‌های عقب در حالت‌های ۱، ۴ و ۷ از مقدار  $14/13$  به مقدار  $11/52$  رسیده است. با مقایسه این دو نمودار مشاهده می‌گردد که در همه حالت‌ها برای یک فاصله یکسان  $S_1$ ، فاصله مقادیر تغییر شکل شمع‌های عقب بیشتر از شمع‌های جلو است.

با مشاهده شکل‌های (۱۴) و (۱۵) مشخص می‌گردد که همچنین مقادیر تغییر شکل حداکثر شمع‌های جلو و عقب نیز با افزایش فاصله  $S_2$  کاهش می‌یابند. به‌طور مثال حداکثر تغییر مکان شمع‌های جلو در حالت‌های ۱، ۲ و ۳ از مقدار  $14/51$  به مقدار  $14/15$  رسیده است. در ضمن با مقایسه این دو نمودار مشاهده می‌گردد که در فاصله یکسان  $S_2$ ، فاصله مقادیر حالت‌ها برای شمع جلو، بیشتر از شمع‌های عقب است. با مقایسه شکل‌های (۱۲) تا (۱۴) نیز مشخص گردید که اثر افزایش فاصله طولی  $S_2$  بیشتر از فاصله عرضی  $S_1$  است. به‌طور مثال این مورد در مقایسه حالت‌های ۱، ۴ و ۷ با ۱، ۲ و ۳ کاملاً مشهود است. دلیل این اتفاق در این حالت‌ها می‌تواند دور شدن شمع‌ها از کانون انفجار باشد که اثر موج انفجار بر شمع‌ها در گروه کمتر شده و نتایج فوق را به همراه دارد. با توجه به شکل‌های (۱۶) و (۱۷) نیز مشاهده می‌گردد که با افزایش فاصله عرضی  $S_1$ ، مقادیر مجموع تنش فشاری در نوک شمع و مجموع تنش جانبی سرشمع کاهش یافته‌اند. به‌طور مثال در حالت ۳، ۶ و ۹ شکل (۱۷) مقدار مجموع تنش جانبی سرشمع از مقدار  $5/39$  مگاپاسکال به مقدار  $4/56$  مگاپاسکال رسیده است؛ و یا این‌که مقدار مجموع تنش فشاری در نوک شمع در حالت ۲، ۵ و ۸ شکل (۱۶) از  $5/22$  مگاپاسکال به  $4/75$  مگاپاسکال رسیده است. همچنین در هر دو شکل (۱۶) و (۱۷) مقادیر حالت‌های ۱، ۴ و ۷ از سایر حالت‌های مورد بررسی در این شکل‌های بزرگ‌تر هستند.



شکل ۱۱. گروه شمع چهارتایی، (الف) مدل هندسی گروه شمع، (ب) نحوه نام‌گذاری فاصله بین شمع‌ها در گروه شمع و جهت موج انفجار

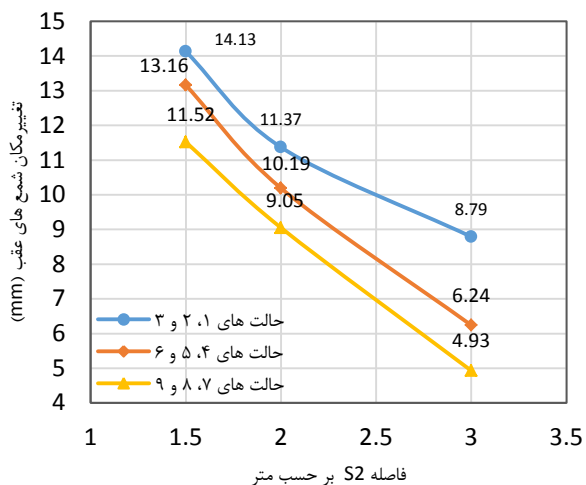
مقادیر ضریب کارآیی هر یک از حالت‌ها با توجه به فواصل میان شمع‌ها در گروه شمع با یکدیگر متفاوت است که در حالت‌های ۱ تا ۴ و ۷ برابر  $0/79$  و در حالت‌های ۵، ۶ و ۸ برابر  $0/95$  و حالت ۹ برابر ۱ محاسبه گردید.

جدول ۵. حالت‌های در نظر گرفته‌شده برای تحلیل گروه شمع

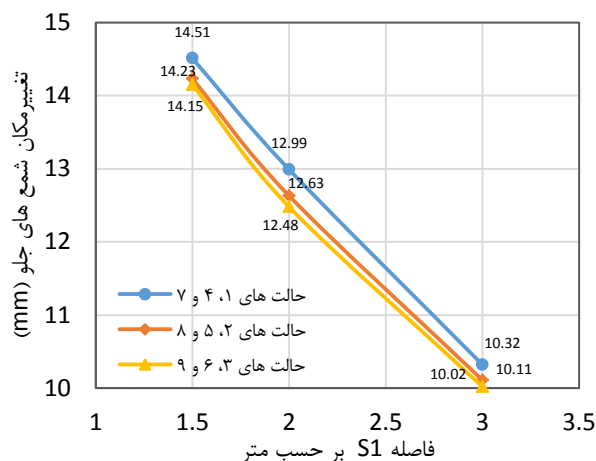
ابعاد سرشمع (کلاهک) (برحسب متر)	فاصله $S_2$ (برحسب متر)	فاصله $S_1$ (برحسب متر)	حالت‌های گروه شمع
$3/5 \times 3/5$	$1/5$	$1/5$	۱
$3/5 \times 4$	۲	$1/5$	۲
$3/5 \times 5$	۳	$1/5$	۳
$4 \times 3/5$	$1/5$	۲	۴
$4 \times 4$	۲	۲	۵
$4 \times 5$	۳	۲	۶
$5 \times 3/5$	$1/5$	۳	۷
$5 \times 4$	۲	۳	۸
$5 \times 5$	۳	۳	۹

#### ۴. نتایج و بحث

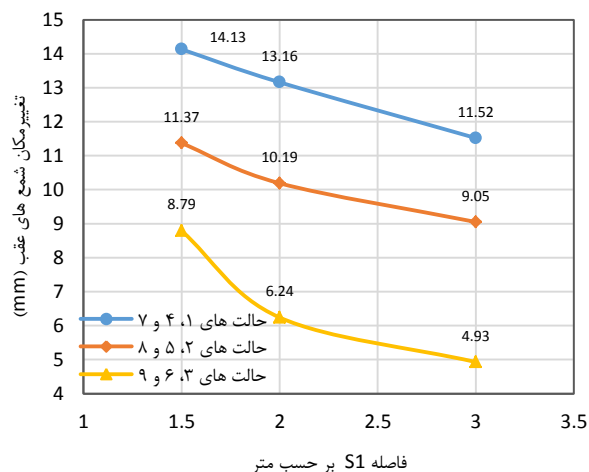
در این تحلیل نتایج تغییر شکل جانبی حداکثر شمع‌های جلو و تغییر شکل جانبی حداکثر شمع‌های عقب در گروه شمع برای حالت‌هایی که تنها فاصله  $S_1$  تغییر کرده و فاصله  $S_2$  ثابت است (مانند حالت ۱، ۴ و ۷) به ترتیب در شکل‌های (۱۲) و (۱۳) و برای حالت‌هایی که تنها فاصله  $S_2$  تغییر کرده و فاصله  $S_1$  ثابت است (مانند حالت ۱، ۲ و ۳) به ترتیب در شکل‌های (۱۴) و (۱۵)



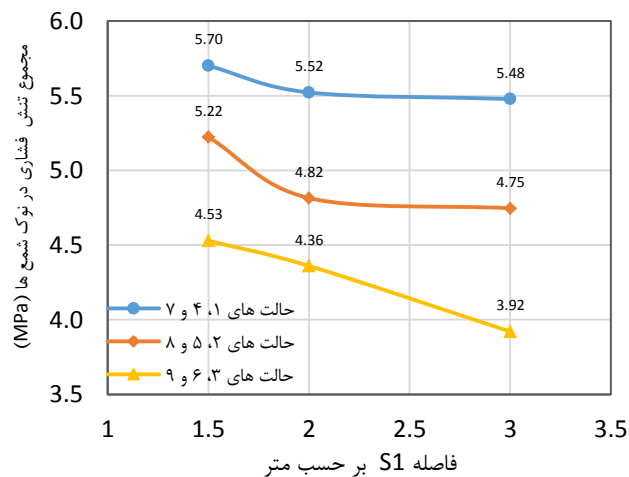
شکل ۱۵. تغییر شکل جانبی حداکثر شمع‌های عقب در گروه شمع برای حالت‌هایی که تنها فاصله S2 تغییر کرده است



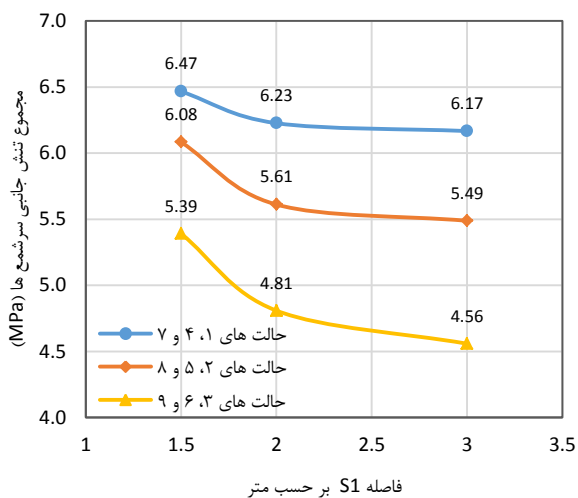
شکل ۱۲. تغییر شکل جانبی حداکثر شمع‌های جلو در گروه شمع برای حالت‌هایی که تنها فاصله S1 تغییر کرده است



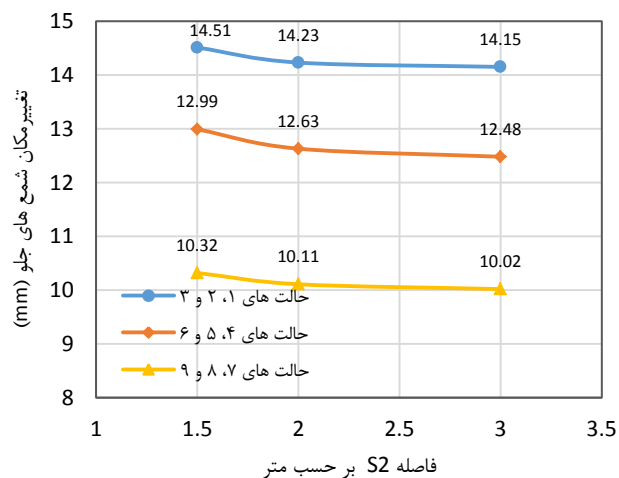
شکل ۱۶. مجموع تنش فشاری در نوک شمع‌ها برای حالت‌هایی که تنها فاصله S1 تغییر کرده است



شکل ۱۳. حداکثر تغییر شکل جانبی شمع‌های عقب در گروه شمع برای حالت‌هایی که تنها فاصله S1 تغییر کرده است



شکل ۱۷. مجموع تنش جانبی سرشمع‌ها برای حالت‌هایی که تنها فاصله S1 تغییر کرده است.



شکل ۱۴. حداکثر تغییر شکل جانبی شمع‌های جلو در گروه شمع برای حالت‌هایی که تنها فاصله S2 تغییر کرده است

می‌تواند این باشد هنگامی که فاصله عرضی ثابت است و فاصله طولی تغییر می‌کند عملاً شمع‌های عقب فاصله بیشتری را از کانون انفجار می‌گیرند؛ اما زمانی که فاصله عرضی تغییر می‌کند و فاصله طولی ثابت است، شمع‌های عقب آن چنان فاصله زیادی از مرکز و کانون انفجار نخواهند گرفت.

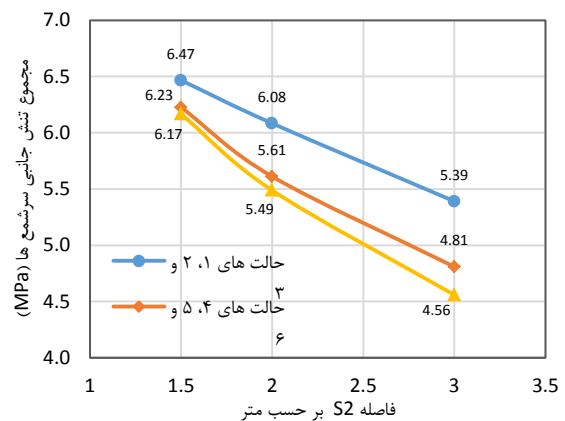
با توجه به جدول (۶) ملاحظه می‌گردد که مقدار نسبت  $(Q_2/Q_1)$  و  $(Q_{I2}/Q_{I1})$  با افزایش فاصله طولی و عرضی در اکثر موارد در حال افزایش هستند. این بدان معناست که تحت بارگذاری انفجار با افزایش فاصله، ظرفیت باربری فشاری گروه شمع و ظرفیت باربری جانبی شمع زیاد می‌شوند. با مقایسه حالت‌های ۱، ۲ و ۳ با حالت‌های ۱، ۴ و ۷ مشاهده می‌گردد که مقادیر تغییرات مربوط به فاصله طولی نیز بیشتر از تغییرات فاصله عرضی هستند. بدین ترتیب که در حالت‌های ۱، ۲ و ۳ مقدار نسبت  $(Q_2/Q_1)$  از ۰/۶۱۱ به ۰/۶۴۳ رسیده در حالی همین مقادیر در حالت‌های ۱، ۴ و ۷ از ۰/۶۱۱ به ۰/۶۱۷ رسیده است.

جدول ۶. مقادیر نسبت‌های  $(Q_2/Q_1)$  و  $(Q_{I2}/Q_{I1})$  برای تمامی حالات در نظر گرفته شده در این تحقیق

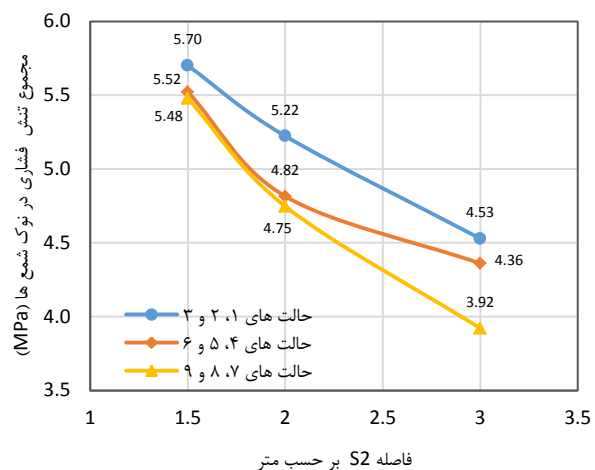
حالت‌های تحلیل گروه شمع	$Q_2/Q_1$	$Q_{I2}/Q_{I1}$
۱	۰/۶۱۱	۰/۷۶۵
۲	۰/۶۲۴	۰/۷۷۹
۳	۰/۶۴۳	۰/۸۰۴
۴	۰/۶۱۶	۰/۷۷۴
۵	۰/۶۰۷	۰/۷۹۶
۶	۰/۶۱۹	۰/۸۲۵
۷	۰/۶۱۷	۰/۷۷۶
۸	۰/۶۰۹	۰/۸۰۱
۹	۰/۶۲۲	۰/۸۳۴

## ۵. نتیجه‌گیری

در این تحقیق تحلیل سه‌بعدی دینامیکی گروه شمع در معرض بارگذاری انفجار، با استفاده از نرم‌افزار آباکوس انجام شد. در این خصوص ابتدا فواصل عرضی بین شمع‌ها و سپس فواصل طولی بین آن‌ها در گروه شمع از ۱/۵ متر تا ۳ متر تغییر کرده و اثرات این تغییرات شامل تغییر مکان جانبی حداکثر شمع‌های جلو و شمع‌های عقب، تنش فشاری ایجاد شده در نوک شمع‌ها و تنش جانبی ایجاد شده در سرشمع تحت بارگذاری انفجار در گروه شمع و نسبت‌های  $(Q_2/Q_1)$  و  $(Q_{I2}/Q_{I1})$  بررسی شده است. با توجه به جداول و نمودارهای به‌دست‌آمده در این تحقیق، نتیجه گرفته می‌شود که افزایش فاصله طولی و عرضی بین شمع‌ها در گروه شمع موجب کاهش تغییر شکل جانبی شمع‌ها و همچنین کاهش مجموع تنش نوک و تنش جانبی شمع‌ها شده است.



شکل ۱۸. مجموع تنش فشاری در نوک شمع‌ها برای حالت‌هایی که تنها فاصله  $S_2$  تغییر کرده است



شکل ۱۹. مجموع تنش جانبی سر شمع‌ها برای حالت‌هایی که تنها فاصله  $S_2$  تغییر کرده است

بر اساس شکل‌های (۱۸) و (۱۹) با افزایش فاصله طولی  $S_2$  نیز مشابه تغییر فاصله  $S_1$ ، مقادیر مجموع تنش فشاری در نوک شمع و تنش جانبی سرشمع کاهش یافته‌اند. به‌طور مثال در حالت‌های ۷، ۸ و ۹ شکل (۱۸) مقدار مجموع تنش فشاری در نوک شمع از مقدار ۵/۴۸ مگاپاسکال به مقدار ۳/۹۲ مگاپاسکال رسیده است؛ و یا اینکه مقدار مجموع تنش جانبی سرشمع در حالت‌های ۷، ۸ و ۹ شکل (۱۹) از ۶/۱۷ مگاپاسکال به ۴/۵۶ مگاپاسکال رسیده است. همچنین در هر دو شکل فوق مقادیر حالت‌های ۱، ۲ و ۳ از سایر حالت‌های مورد بررسی در این شکل‌های بزرگ‌تر هستند.

همچنین با مقایسه شکل‌های (۱۶) تا (۱۹) مشخص می‌گردد که تغییرات مقادیر مجموع تنش فشاری در نوک شمع و تنش جانبی سرشمع با تغییر فاصله طولی  $S_2$  بیشتر از تغییر فاصله عرضی  $S_1$  است. این مسئله را می‌توان به‌طور مثال با مقایسه حالت‌های ۱، ۴ و ۷ با ۱، ۲ و ۳ کاملاً فهمید. علت این مسئله

- [5] Poulos, H. G. "Behavior of Laterally Loaded Piles: I- Single Pile"; J. Soil Mech. Foundations Division 1971, 97, 711-731.
- [6] Kumar, M.; Matsagar, V. A.; Rao, K. S. "Blast Loading on Semi-Buried Structures with Soil-Structure Interaction"; Proc. Implast. Conf. Rhodelsland, USA, 2010.
- [7] 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.
- [8] Bo, H.; Quanchen, G.; Jianguo, W.; Xinzhaoh, J.; Xiaoyan, W.; Bin, J.; Wei, W. "Dynamic Analysis of Pile-Soil-Structure Interaction System under Blasting Load"; Mech. Mater. 2014, 638-640, 433-436.
- [9] Chakraborty, T. "Analysis of Hollow Steel Piles Subjected to Buried Blast Loading"; Comput. Geotech. 2016, 78, 194-202.
- [10] Abaqus V6.13. "Analysis User Guide"; Volume 3, Providence, RI, USA. Abaqus Inc. DS Simulia. 2013.
- [11] Nagy, N.; Mohamed, M.; Boot, J. C. "Nonlinear Numerical Modelling for the Effects of Surface Explosions on Buried Reinforced Concrete Structures"; Geomech. Eng. 2010, 2, 1-18.
- [12] Tiwari, R.; Chakraborty, T.; Matsagar, V. "Dynamic Analysis of Twin Tunnels Subjected to Internal Blast Loading"; Adv. Struct. Eng. 2015.
- [13] Tai, Y. S.; Chu, T. L.; Hu, H. T.; Wu, J. Y. "Dynamic Response of a Reinforced Concrete Slab Subjected to Air Blast Load"; Theor. Appl. Fract. Mec. 2011, 56, 140-147.
- [14] Qiu, G.; Henke, S.; Grabe, J. "Application of a Coupled Eulerian Lagrangian Approach on Geomechanical Problems Involving Large Deformations"; Comput. Geotech. 2011, 38, 30-39.
- [15] Abaqus/Explicit V6.13. "User Manual"; Providence, RI, USA. Abaqus Inc. DS Simulia. 2013.
- [16] Veyera, G. E.; Ross, C. A. "High Strain Rate Testing of Unsaturated Sands Using a Split Hopkinson Pressure Bar"; Proc. Third Int. Conf. Recent Adv. Geotechnical Earthquake Eng. & Soil Dynamics 1995, 31-40.
- [17] Meyerhof, G. "Bearing Capacity and Settlement of Pile Foundations"; J. Geotech. Eng. 1976, 102, 195-228.
- [18] Broms, B. B. "Lateral Resistance of Piles in Cohesionless Soils"; J. Soil Mech. Foundations Division. 1964, 90, 123-156.

مقایسه حالت‌های ۱ با ۲ و ۳ می‌توان نتیجه گرفت که با ثابت ماندن فاصله عرضی ( $S_1$ ) و افزایش فاصله طولی ( $S_2$ ) مقادیر تغییر شکل جانبی شمع‌های جلو و عقب گروه شمع کاهش یافته است. همچنین در این حالت مقدار نسبت‌های ( $Q_2/Q_1$ ) و ( $Q_{1/2}/Q_1$ ) نیز افزایش یافته‌اند. همچنین با مقایسه حالت‌های ۱ با ۴ و ۷ می‌توان دریافت که افزایش فاصله عرضی ( $S_1$ ) و ثابت ماندن فاصله طولی ( $S_2$ ) موجب کاهش مقادیر تغییر شکل جانبی شمع‌های جلو و عقب گروه شمع شده است. در این حالت هم‌مقدار نسبت‌های ( $Q_2/Q_1$ ) و ( $Q_{1/2}/Q_1$ ) نیز افزایش یافته‌اند. دلیل این اتفاق در این حالت‌ها می‌تواند دور شدن شمع‌ها از کانون انفجار باشد که اثر موج انفجار بر شمع‌ها در گروه کمتر شده و نتایج فوق را به همراه داشته است. با مقایسه هر دو حالت پیش‌آمده می‌توان نتیجه گرفت که روند کاهش تغییرهای جانبی و یا کاهش تنش‌های فشاری نوک شمع و جانبی سرشمع در هنگام تغییر فواصل عرضی ( $S_1$ ) به نسبت تغییر فواصل طولی ( $S_2$ ) کمتر بوده است. این مورد با مقایسه حالت‌های ۱، ۲ و ۳ با ۴، ۱ و ۷ کاملاً مشهود است. به‌طور مثال تغییرات تنش نوک شمع در حالت‌های ۱، ۲ و ۳ به میزان ۲۱ درصد بوده درحالی‌که همین تغییرات برای حالت‌های ۱، ۴ و ۷ به میزان ۳۲ درصد است. علت این مسئله می‌تواند این باشد هنگامی که فاصله عرضی ثابت است و فاصله طولی تغییر می‌کند عملاً شمع‌های عقب فاصله بیشتری را از کانون انفجار می‌گیرند؛ اما زمانی که فاصله عرضی تغییر می‌کند و فاصله طولی ثابت است، شمع‌های عقب آن‌چنان فاصله زیادی از مرکز و کانون انفجار نخواهند گرفت. به همین علت است که مقادیر مربوط به حالت‌های ۱، ۲ و ۳ به یکدیگر نسبتاً نزدیک هستند. بنابراین می‌توان گفت که تغییر فاصله عرضی نسبت به فاصله طولی تأثیرگذاری کمتری را بر روی پارامترهای شمع تحت انفجار داشته است. در مجموع افزایش فاصله عرضی و یا طولی شمع‌ها در گروه شمع موجب بهبودی وضعیت گروه شمع در برابر بارگذاری انفجار خواهد شد. البته تأثیر افزایش فاصله طولی نسبت به افزایش فاصله عرضی در گروه شمع جهت بهبودی وضعیت گروه شمع در برابر موج انفجار بیشتر است.

## ۶. مراجع‌ها

- [1] Liao, S.; Li, W.; Fan, Y.; Sun, X.; Shi, Z. "Model Test on Lateral Loading Performance of Secant Pile Walls"; J. Perform. Constr. Fac. 2014, 28, 391-401.
- [2] Dusenberry, D. O. "Handbook for Blast Resistant Design of Buildings"; John Wiley and Sons, 2010.
- [3] Remennikov, A. "A Review of Method for Predicting Bomb Blast Effects on Building"; J. Battlefield. Tech. 2003, 6, 5-10.
- [4] Randolph, M. F. "The Response of Flexible Piles to Lateral Loading"; Geotechnique. 1981, 31, 247-259.