مطالعهٔ عددی عملکرد شمع‌های غیرمتصل به کلاهک و شمع‌های معمولی

مهدی خداپرست؛ دانشگاه قم، گروه مهندسی ژئوتکنیک
علی‌محمد رجبی*؛ دانشگاه تهران، گروه زمین‌شناسی مهندسی
مسعود شکری؛ دانشگاه قم، گروه مهندسی ژئوتکنیک

تاریخ: دریافت ۹۵/۵/۲۳ **پذیرش** ۹۵/۱۱/۲۶

چکیده

در این پژوهش با استفاده از روش اجزاء محدود و به‌کارگیری نرم‌افزار ABAQUS/CAE V6.13-1 رفتار شمع‌های متصل و غیرمتصل به کلاهک بررسی شده است و شرایط تنش، نشست و بار در خاک و شمع با یک‌دیگر مقایسه شده است. در حالت معمول استفاده از شمع ضمن کاهش مقدار بار انتقالی به خاک سطحی، منجر به کاهش نشست می‌شود. در حالی که در شمع‌های متصل به کلاهک در صورت وارد کردن یک لایه تغییرشکل‌پذیر بین دال و سرشمع توزیع فشار یک‌نواخت‌تری در قسمت زیرین دال ایجاد می‌شود و عکس العمل‌های تکیه‌گاهی بین دال و سرشمع کاهش می‌یابند. در این بررسی با لحاظ کردن خاک زیرین و لایه میانی به‌ترتیب از نوع ماسه و ماسه سیلیسی وضعیت نشست و تنش در خاک و مقدار بار شمع در حالت‌های تک و گروه شمع، در دو حالت متصل و غیرمتصل به کلاهک بحث و بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد با افزایش تعداد شمع، کاهش نشست در حالت متصل بیش‌تر از حالت غیرمتصل است. هم‌چنین اصطکاک جداری منفی در شمع‌های غیرمتصل بر خلاف شمع‌های متصل که در تمام طول شمع وجود دارد، در قسمتی از میانه طول شمع ایجاد می‌شود که دلیل آن نابرابر بودن نشست دال، شمع و خاک سطحی است. نیروی سرشمع‌ها نیز در حالت متصل بیش‌تر از حالت غیرمتصل است که نشان‌دهندهٔ تأثیر مثبت اجرای لایهٔ میانی در کاهش بار و مقطع طراحی کوچک‌تر برای شمع است. به‌طورکلی نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد

* نویسنده مسئول amrajabi@ut.ac.ir

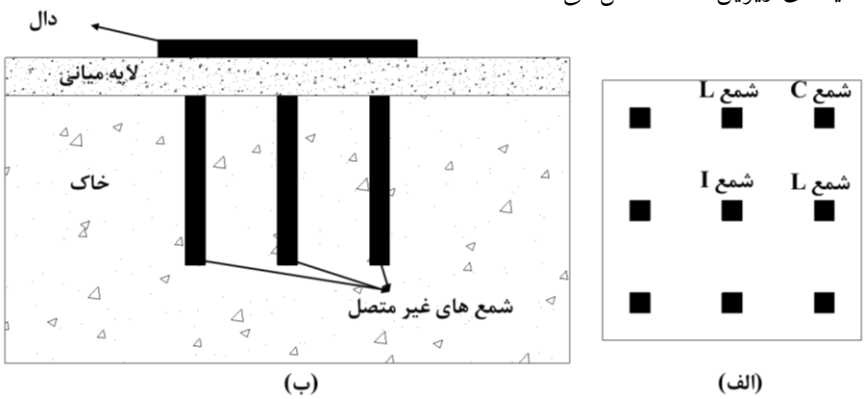
[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.2.4.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.2.175]

عملکرد شمع‌های غیرمتصل به کلاهک از نظر نشست و باربری بهتر از نوع شمع‌های متصل است. هم‌چنین در این تحقیق بررسی پارامتری در سیستم شمع غیرمتصل برای بهینه‌یابی ابعادی انجام شد که در نتیجه آن ضخامت ۱ متر برای لایه میانی، ضخامت ۱/۶ متر برای دال و قطر ۰/۵ متر و طول ۱۹ متر برای شمع به‌صورت بهینه به‌دست آمد.

واژه‌های کلیدی: شمع‌های غیرمتصل، شمع‌های متصل، نشست، باربری شمع، ABAQUS\CAE

مقدمه

در خاک‌های سست و با باربری کم، انتقال بار به اعماق خاک با استفاده از شمع‌ها انجام می‌شود. در این شرایط نقش لایه‌های بالایی خاک در تحمل بار ناچیز است. در این شرایط با ایجاد یک لایهٔ پرکننده میانی (شکل ۱) که شمع را از دال جدا می‌کند عکس‌العمل‌های تکیه‌گاهی بین دال و سرشمع کاهش یافته و نقش خاک سطحی در تحمل بار بیش‌تر از حالت شمع‌های متصل می‌شود. شمع‌های غیرمتصل به دال، بار را از سازهٔ بالایی در حالتی غیرمستقیم به لایه‌های زیرین خاک منتقل می‌کنند.



شکل ۱. شماتیک سیستم دال و شمع مجزا با لایه میانی الف) پلان ب) دید جانبی

در حالت معمول سرشمع و لایه خاک سطحی دارای نشستی برابر با دال هستند. از این‌رو، نشست نسبی شمع و خاک در سرشمع برابر با صفر و در ته شمع حداکثری بوده است و اصطکاک بدنه به‌سمت بالا بسیج می‌شود. هم‌چنین بخشی از بار به‌وسیلهٔ لایهٔ خاک سطحی و

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.2.4.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.2.175]

بخشی از آن به‌وسیلهٔ سرشمع تحمل شده و به لایه‌های خاک عمیق‌تر منتقل می‌شود. وارد کردن یک لایه تغییر شکل‌پذیر بین دال و سرشمع منجر به جابه‌جایی نسبی خاک و شمع به سمت پایین شده و باعث ایجاد اصطکاک منفی در قسمت بالایی بدنه می‌شود. این مکانیزم با ضخامت و سختی لایه میانی و هم‌چنین سختی خاک زیرین کنترل می‌شود.

در حالت غیرمتصل با تشکیل یک لایهٔ خاک سخت‌تر که دال روی آن قرار دارد پارامترهای مکانیکی خاک بهبود می‌یابد. در حالی که در حالت متصل با کاهش مقدار بار انتقالی به خاک سطحی، نشست کاهش می‌یابد. بار انتقالی به سطح زمین باعث افزایش تنش‌های افقی و قائم خاک احاطه کننده شمع و در نتیجه افزایش ظرفیت باربری بدنه شمع می‌شود.

تاریخچهٔ پژوهش‌ها

بررسی اثر جدا بودن شمع و کلاهک، موضوع نسبتاً جدیدی است از این رو، تاریخچهٔ زیادی در این زمینه وجود ندارد، به‌طوری‌که یکی از اولین پژوهش‌ها در این زمینه را فیوراوانته و گیرتی (۲۰۱۰) انجام داده‌اند. آن‌ها به‌منظور بررسی مکانیزم انتقال بار بین دال و گروه شمع‌ها در ماسه خشک، ضمن انجام آزمایش‌های سانتریفیوژ در دو حالت تماس مستقیم با دال و مجزا از آن با لایه دانه‌ای میانی نشان دادند که شمع تماسی با توزیع بار اعمالی سرشمع در توده عمیق‌تر خاک منجر به کاهش نشست می‌شود. در حالی‌که شمع غیرمتصل بار را در سطحی گسترده‌تر و در نتیجه با شدت کم‌تر به شمع‌ها و خاک زیرین انتقال داده و هم‌چنین خاک سطحی زیر دال را نیز در تحمل بار درگیر می‌کند [۱]، [۲]. اسلامی و ویس‌کرمی (۱۳۹۰) با مدل‌سازی عددی شمع‌های متصل و غیرمتصل مشاهده کردند شمع‌ها در حالت غیرمتصل نیروی بسیار کم‌تری از حالت متصل تحمل می‌کنند و ضخامت دال نقش عمده‌ای در نشست متوسط آن ندارد. هرچند نشست موضعی و لنگر خمشی دال در نتیجه تغییر ضخامت و سختی خمشی تحت تأثیر قرار می‌گیرد. هم‌چنین افزایش طول شمع نیز تأثیر عمده‌ای در نشست ماکزیمم دارد [۳]. اسلامی و صالحی (۱۳۸۹) با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS\CAE V6.13-1 تحلیل‌های نرم‌افزاری روی شمع‌های متصل و غیرمتصل به دال را با چند بررسی

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.2.4.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.2.175]

موردی مقایسه کرده و دریافتند که شمع‌های غیرمتصل به‌عنوان سخت‌کنندهٔ خاک زیرین عمل می‌کنند و فشار تماسی در خاک زیرین در این حالت بیش‌تر است. هم‌چنین آن‌ها دریافتند که تنش محوری در شمع‌های غیرمتصل کم‌تر از شمع‌های متصل بوده است و سختی کم‌تر لایه میانی، عمق بیش‌تر اصطکاک منفی را نتیجه می‌دهد [٤]. سعیدی و بازیار (۱۳۹۱) در پژوهش خود تعدادی آزمایش سانتریفیوژ روی شمع‌های متصل و غیرمتصل به دال انجام داده و نتیجه گرفتند هنگامی‌که شمع به‌عنوان کاهنده نشست عمل می‌کند لایهٔ میانی تأثیر مثبتی در کاهش نشست داشته و هنگامی‌که شمع نقش عمده‌ای در افزایش ظرفیت باربری سیستم دارد وجود لایهٔ میانی منجر به افزایش نشست می‌شود [۵]. فیوراوانته (۲۰۱۱) با آزمایش‌های سانتریفیوژ روی شمع‌های متصل و غیرمتصل به دال با لایهٔ میانی درشت‌دانه نتیجه گرفت که بخش بالایی بدنه شمع اصطکاک جداری منفی دارد در نتیجه بخشی از بار از سوی سرشمع و بخشی دیگر به‌صورت اصطکاک جداری منفی به شمع می‌رسد [٦]. اتا (۲۰۱۵) با تحلیل عددی شمع‌های غیرمتصل به دال نتیجه گرفت که نیروی محوری ماکزیمم شمع‌های متصل در بالای شمع اتفاق افتاده و در طول شمع کاهش می‌یابد در حالی‌که برای شمع‌های غیرمتصل، نیرو در جایی پایین‌تر از بالای شمع ماکزیمم خواهد بود. هم‌چنین با افزایش ضخامت لایه میانی، بار انتقالی به شمع‌ها کاهش می‌یابد. از سوی دیگر مدول الاستیسیته لایه میانی نیز روی بار انتقالی به شمع‌ها مؤثر است به‌گونه‌ای که وقتی این پارامتر کاهش می‌یابد و با مدول خاک برابر می‌گردد، محل ماکزیمم بار در جایی پایین‌تر از سرشمع است، اما با افزایش آن تا حد مدول بتن، محل بار ماکزیمم به نزدیکی سرشمع انتقال می‌یابد که معادل حالت متصل است [۷]. شارما (۲۰۱۳) نوع جدیدی از شمع‌های غیرمتصل به‌نام شمع‌های مرکب غیرمتصل[1] که در آن شمع‌ها دارای دو طول کوتاه و بلند هستند را معرفی کرد که در آن شمع‌های کوتاه که از مصالح انعطاف‌پذیر ساخته می‌شوند برای تقویت خاک‌های سطحی تر در باربری به‌کار می‌روند و شمع‌های بلند که از مصالح نسبتاً صلب ساخته می‌شوند برای کاهش نشست استفاده می‌شوند. هم‌چنین لایهٔ میانی برای بازتوزیع و تعدیل تنش رسیده از دال استفاده می‌شود [۸].

1. Composite piled raft foundation with intermediate cushion

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.2.4.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.2.175]

مواد و روش‌ها

در این پژوهش با روش اجزاء محدود و استفاده از نرم‌افزار ABAQUS\CAE V6.13-1 یک بررسی پارامتری روی شمع‌های متصل و غیرمتصل به کلاهک انجام شده و نتایج آن با هم مقایسه شده است [۹]. در این پژوهش برای هر کدام از شمع‌های متصل و غیرمتصل، در حالت‌های بدون شمع، ۱، ٤ و ۹ شمع مدل‌سازی (جمعاً ۸ مدل) انجام شده است. هم‌چنین ۲ مدل به‌منظور بررسی اندازهٔ بهینه مش و ۱۲ مدل برای بررسی‌های پارامتری روی پارامترهای طول و قطر شمع، ضخامت دال و لایهٔ میانی انجام شده است. هم‌چنین برای صحت‌سنجی پژوهش‌ها نیز از یک مدل استفاده شده است. از این رو، در پژوهش حاضر در مجموع ۲۳ مدل تهیه شده است (جدول ۱) که در ادامه مفروضات و فرآیند مدل‌سازی‌ها تشریح می‌شود.

جدول ۱. حالات مختلف مدل‌سازی در پژوهش حاضر

پارامتر	شمع متصل	شمع غیرمتصل	اندازهٔ مش	بررسی‌های پارامتری	صحت‌سنجی
تعداد مدل‌سازی	٤	٤	۲	۱۲	۱

۱. مدل‌سازی عددی

در پژوهش حاضر با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS/CAE V6.13-1 مدل‌های سه‌بعدی تک، چهار و نه شمع با طول ۱۹ متر مدل شده است. مدل‌ها در دو حالت متصل و غیرمتصل به دال با یک لایهٔ میانی یک متری در نظر گرفته شده‌اند. عرض (B) و ضخامت دال (t) به‌ترتیب ۷/۵ و ۱/٦ متر انتخاب شده است. ابعاد تودهٔ خاک استفاده شده در مدل نیز دارای عمق و عرض به‌ترتیب ۳۲ و ۲٦ متر در نظر گرفته شده و در نتیجه فاصلهٔ ته شمع از پایین توده خاک ۱۳ متر است. در تمامی موارد قطر شمع‌ها ۰/۵ متر و هم‌چنین فاصله شمع‌ها در حالت ٤ و ۹ شمع به‌ترتیب ۵ و ۲/۵ متر در نظر گرفته شده است. ترکیب‌ها و ابعاد استفاده شده در مدل‌سازی با توجه به پژوهش‌های فیوراوانته و گیرتی (۲۰۱۰) انتخاب شده‌اند، زیرا نتایج حاصل از بررسی حاضر با نتایج حاصل از پژوهش مذکور مقایسه شده‌اند. بخشی از این مقایسه در قسمت صحت‌سنجی ارائه شده است. در این بررسی نمادهای NC و PR به‌ترتیب بیان‌گر شمع‌های غیرمتصل و متصل به دال بوده است و اعداد بعد از حروف نشان‌دهندهٔ تعداد

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.2.4.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.2.175]

شمع‌ها است.

برای تودهٔ خاک و لایهٔ میانی به‌ترتیب از ماسه و ماسه سیلیسی تک سایز با مشخصات مندرج در جدول ۲ استفاده شده است. از آن‌جا که معیار دراکر-پراگر نسبت به معیارهای دیگر توانایی بهتری برای بیان رفتار حالت تسلیم خاک‌های درشت دانه دارد [۱۰]، از این رو، به‌منظور انجام فرایند مدل‌سازی از این معیار استفاده شده است.

جدول ۲. مشخصات خاک‌های استفاده شده در پژوهش حاضر [۱]

نوع خاک	محتوای رس (٪)	وزن مخصوص خشک حداقل (کیلونیوتن بر مترمکعب)	وزن مخصوص خشک حداکثر (کیلونیوتن بر مترمکعب)	قطر درصد عبوری ۵۰ (میلی‌متر)	ضریب یک‌نواختی	زاویهٔ اصطکاک داخلی	زاویهٔ اتساع	مدول الاستیسیته (مگاپاسکال)	نسبت پواسون
ماسه	۱۵	۱۳/۰۸	۱۶/۵	۰/۱۸	۳/۳۳	۳۵	۵	۱۱۵	۰/۲
ماسه سیلیسی	–	۱۳/۶۵	۱۶/۶۷	۰/۵۸	۱/۷۹	۳۵	۵	۱۱۵	۰/۲

هدف از این پژوهش، بررسی تأثیر لایهٔ میانی جداکننده شمع از دال روی پارامترهای باربری و نشست شمع بوده است. بر این اساس، به‌منظور سادگی فرایند مدل‌سازی، پارامترهای تودهٔ خاک اصلی و لایهٔ میانی تا حدود زیادی مشابه در نظر گرفته شده است. شمع و دال از جنس بتن با مدول الاستیسیته و نسبت پواسون به‌ترتیب ۲۱۰۰۰ مگاپاسکال و ۰/۲ و چگالی ۲۳۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب انتخاب شده‌اند. برای بیان رفتار شکست بتن از تحلیل رشد ترک استفاده شده است [۶]، [۱۰]، [۱۱]، [۱۳].

در این پژوهش از تماس سطح با سطح و از نوع تماس سخت با امکان لغزش محدود استفاده شده است. تماس از نوع سخت امکان نفوذ سطح فرعی به داخل سطح اصلی را به حداقل می‌رساند و اجازه انتقال کشش در سطح تماس را نمی‌دهد، به‌علاوه این‌که وقتی سطوح در تماس با هم قرار می‌گیرند فشار تماسی بین آن‌ها منتقل می‌شود. اگر این فشار تماسی به صفر برسد سطوح از یک‌دیگر جدا می‌شوند. سطوح جدا شده بار دیگر در تماس با هم قرار می‌گیرند [۱۴]. به این معنی که در این نوع تماس، هیچ‌گونه کششی بین سطوح منتقل نمی‌شود. در پژوهش حاضر برای اعمال اندرکنش بین مصالح مختلف دو نوع تماس اصطکاکی و عمودی بین سطوح در نظر گرفته شده است. در تماس اصطکاکی از فرمولاسیون

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.2.4.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.2.175]

پنالتی با ضریب اصطکاک ثابت tanδ استفاده شده که در آن δ زاویهٔ اصطکاک بین مصالح است. هم‌چنین در تماس عمودی بین دو سطح نیز از فرمولاسیون پنالتی و تماس سخت استفاده شده است. اندرکنش‌های در نظر گرفته شده در مدل‌سازی شامل اندرکش بین دال-تودهٔ خاک، دال-لایه میانی، دال-شمع، لایه میانی-تودهٔ خاک، لایه میانی-شمع و خاک-شمع است. برای محاسبه ضریب اندرکنش اصطکاکی خاک‌ها و بتن از رابطهٔ (۱) استفاده شد [۱۲]:

$$k = tan^{-1}\delta = \frac{sin\emptyset.cos\emptyset}{1+sin^2\emptyset} \quad (۱)$$

که در آن δ زاویهٔ اصطکاک بین خاک و دیوار است. برای اندرکنش اصطکاکی خاک‌ها با یک‌دیگر به‌دلیل برابر بودن زاویهٔ اصطکاک داخلی خاک‌ها ضریب ۰/۷ که برابر تانژانت ۳۵ درجه است در نظر گرفته شده است.

برای ایجاد حالت تنش در شرایط حقیقی برجا در سیستم خاک- شمع، استفاده از شرایط بارگذاری اولیه قبل از اعمال بار به مدل الزامی است. این تنش‌ها در راستای قائم همان تنش‌های ژئواستاتیک هستند که با اعمال نیروی شتاب ثقل در جهت پایین برای ایجاد حالت تنش افزاینده با عمق به مدل اعمال می‌شوند. در راستای افقی نیز فشار افزاینده خطی با عمق به اطراف مدل اعمال شده تا تنش‌های افقی حقیقی را شبیه‌سازی کند. ضریب فشار جانبی خاک استفاده شده در این تحقیق از نوع .k و برابر با ۰/۶۵ است که در بسیاری از شرایط ژئوتکنیکی برقرار است [۱۳].

بار اعمالی به شمع در مدل‌سازی برابر با ۵۰۰ کیلوپاسکال بوده است که به‌صورت قائم و با شدت یک‌نواخت روی دال در نظر گرفته شده است و برای دریافت نتایج در هر جزء زمانی اعمال بار، این مقدار به‌صورت جزئی ۵ کیلوپاسکال در هر افزایش زمانی اعمال شد. در بررسی حاضر برای تسریع در فرایند تحلیل و به‌دلیل تقارن همهٔ مدل‌ها در دو راستای X و Y از تکنیک ساخت ربع مدل استفاده شده است، به‌گونه‌ای که در مرزهای تقارن اجازه جابه‌جایی در راستای عمود بر صفحه و چرخش حول محورهای عمود بر هم داده نمی‌شود. مرزهای کناری مدل‌ها به‌علت دور شدن کافی از شمع‌ها به‌صورتی در نظر گرفته شد که اجازه جابه‌جایی جانبی و چرخش حول محور قائم را ندارد. هم‌چنین کف توده خاک به‌دلیل فاصلهٔ گرفتن کافی از پای

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.2.4.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.2.175]

شمع به‌صورت گیردار کامل در نظر گرفته شده است.

۲. آنالیز حساسیت ابعاد مش و صحت‌سنجی

در این پژوهش به‌منظور بهینه‌یابی سایز المان‌ها برای کاهش زمان تحلیل به‌همراه دقت کافی و هم‌چنین اعتبارسنجی روش تحلیل عددی، آنالیز حساسیت و صحت‌سنجی انجام شده است. در پژوهش‌های عددی کاهش سایز مش‌بندی، هر چند باعث افزایش دقت نتایج می‌شود، اما باعث افزایش زمان مدل‌سازی نیز می‌شود. بنابراین باید بین زمان و دقت تحلیل در سایزهای مختلف مش‌بندی یک بهینه‌یابی انجام شود. هم‌چنین در این گونه پژوهش‌ها، اندازهٔ المان‌ها در برخی نقاط که پاسخ سیستم در آن نقاط اهمیت بیش‌تری دارد باید کوچک‌تر از سایر نقاط در نظر گرفته شود. به‌عنوان مثال در مدل‌سازی حاضر، دریافت نتایج شامل تنش‌ها و نشست‌ها در خاک کنار شمع‌ها انجام می‌شود و نتایج تنش و نشست در خاک کناره‌های مدل (دور از شمع‌ها) بدون اهمیت یا کم اهمیت است. به این دلیل دقت نتایج در خاک کنار شمع‌ها باید بیش‌تر باشد، از این رو، در این قسمت‌ها سایز مش‌بندی باید ریزتر از سایر نقاط باشد. در این پژوهش به‌منظور بررسی تأثیر سایز المان‌ها، دو مقدار ۰/۲۵ و ۰/۵ متر برای المان‌های خاک نزدیک به شمع‌ها در نظر گرفته شده است. برای شبکه بندی مدل از تکنیک شبکه منظم استفاده شده است که در این نوع شبکه بندی علاوه بر ایجاد شبکه منظم‌تر برای پردازش‌های بعدی، زمان مدل‌سازی نیز کاهش می‌یابد.

مطابق با جدول ۳ با کاهش اندازه المان، تنش‌ها ۷/۱٪ تغییر می‌کنند که بیان‌گر مناسب بودن اندازهٔ ۰/۵ متر برای المان‌ها است. تغییر تنش در خاک زیر شمع به مراتب کم‌تر از تنش خاک سطحی است و در حدود ۱/۷٪ است که تقریباً نشان‌دهندهٔ بی‌تأثیر بودن اندازه المان بر تنش خاک زیرین است.

با انتخاب مقدار ۰/۲۵ متر برای ابعاد المان‌ها، نشست دال تنها دارای ۳/۷٪ اختلاف با حالت المان با اندازهٔ ۰/۵ متر است که بیان‌گر مناسب بودن مقدار ۰/۵ متر برای ابعاد المان‌هاست. هم‌چنین حداکثر تغییر نیروی سرشمع در اثر تغییر اندازه المان ۲ درصد است. نتیجه این‌که تغییر اندازهٔ المان‌ها از ۰/۲۵ به ۰/۵ متر روی نتایج تأثیر چندانی نداشته و فقط باعث افزایش زمان

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.2.4.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.2.175]

تحلیل می‌شود، از این رو، مقدار ۰/۵ متر برای المان‌ها برای ادامه روند مدل‌سازی استفاده می‌شود.

برای اندازه المان‌ها در قسمت‌های کناری مدل که نتایج در آن قسمت‌ها اهمیت خاصی ندارند از المان‌های با اندازه بیش‌تر (۳ متر) استفاده شد. هم‌چنین در راستای قائم اندازه المان‌ها یک‌سان و به مقدار ۰/۵ متر انتخاب شده است.

جدول ۳. نتایج حاصل از تحلیل عددی در اندازه‌های مختلف شبکه‌بندی

سایز شبکه‌بندی (متر)	نشست دال (سانتی‌متر)	تنش (مگاپاسکال)		نیروی سرشمع (کیلونیوتن)
		خاک سطحی	خاک زیر شمع	
۰/۲۵	۲/۸۵	۰/۳۹	۰/۵٦	۷۸۱
۰/۵	۲/۹٦	۰/٤۲	۰/۵۷	۷٦٦

برای صحت‌سنجی مدل، از نتایج پژوهش پولوس و همکاران (۱۹۹۷) در حالت شمع‌های غیرمتصل استفاده شد [١٤]. بر اساس تحقیق مذکور ۹ شمع با قطر ۰/۵ و طول۱۰ متر به‌همراه دال به ابعاد ۱۰ در ٦ متر و ضخامت ۰/۵ متر و لایه میانی با ضخامت ۰/۲۵ متر مدل شد. برای ایجاد شرایط یک‌سان، تمام این پارامترها در این بخش از پژوهش حاضر کاملاً یک‌سان با بررسی پولوس و همکاران (۱۹۹۷) در نظر گرفته شد که در نتیجه این مدل‌سازی، نتایج تنش محوری حداکثر در شمع‌ها به‌صورت ارائه شده در شکل ۲ به‌دست آمد. با توجه به شکل ۲ اختلاف نتیجهٔ پژوهش حاضر با بررسی پولوس و همکاران ۲/۹٪ است که این اختلاف در عمق ٤ متری شمع به مقدار حداکثر ۱۱/۲٪ می‌رسد و سپس در ته شمع به مقدار حداقل ۲/۲٪ نزول می‌یابد. این مقادیر اختلاف در تحلیل‌های نرم‌افزاری تقریب قابل قبولی است [۱۵].

نتایج و بحث

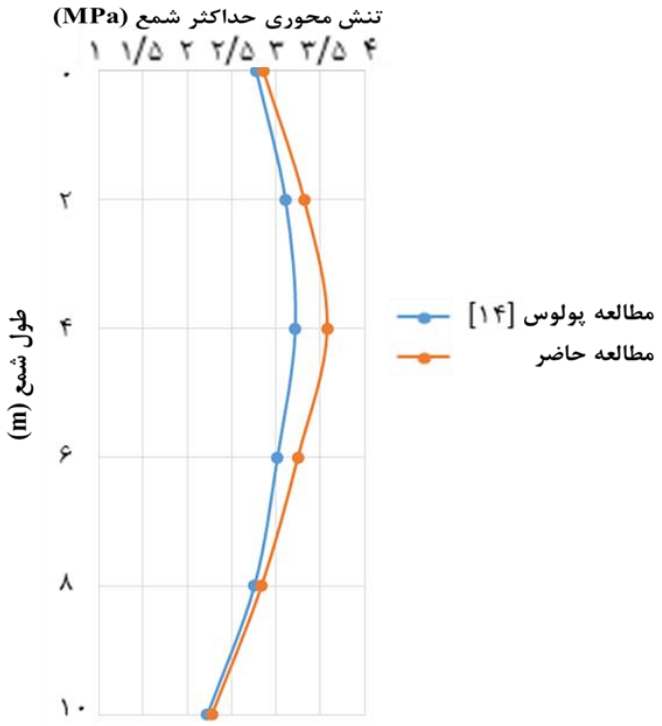
۱. منحنی بار- نشست دال

در شکل‌های ۳ و ٤ منحنی‌های بار- نشست ناشی از تحلیل‌های صورت گرفته در دو حالت شمع‌های متصل و غیرمتصل به دال نشان داده شده است. مطابق با شکل ۳ در شمع‌های متصل به دال، در حالت بدون شمع منحنی بار- نشست تقریباً خطی است در حالی‌که برای حالت با تعداد شمع ۱، ٤ و ۹، رفتار منحنی غیرخطی است. مقادیر سختی سیستم در نشست‌های کوچک بستگی به تعداد شمع‌ها دارد. در حالت ۱، ٤ و ۹ شمع به‌ترتیب تسلیم در نشست ۰/٤۵، ۰/۹ و

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.2.4.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.2.175]

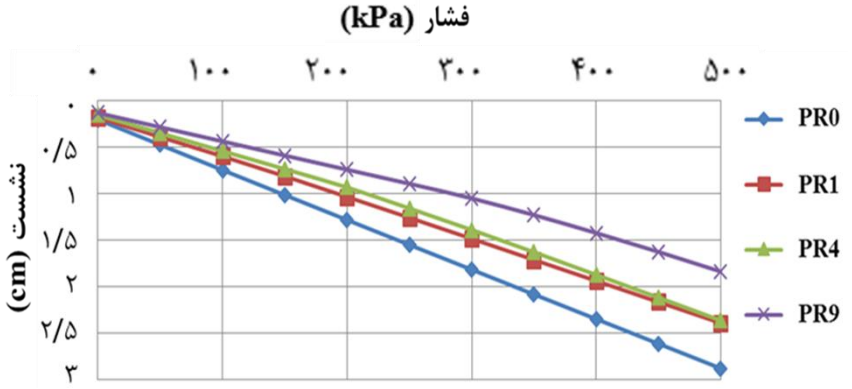
۱/۲ سانتیمتر اتفاق می‌افتد که موجب کاهش سختی می‌شود. در نشست‌های بالاتر سختی به حالت پایدار می‌رسد و برای تمامی حالات مشابه حالت بدون شمع می‌شود (شکل ۳).

در شمع‌های غیرمتصل به دال، تمامی منحنی‌ها به‌علت تأثیر لایهٔ میانی در تعدیل فشار، تقریباً خطی هستند. منحنی حالت بدون شمع به‌دلیل تأثیر بیش‌تر سربار لایهٔ میانی در خاک سطحی دارای شیب بیش‌تری است. هم‌چنین با توجه به شکل به‌دلیل عدم تغییر شیب زیاد در منحنی، سیستم دچار تسلیم نمی‌شود و سختی سیستم با افزایش تعداد شمع‌ها افزایش می‌یابد (شکل ٤).

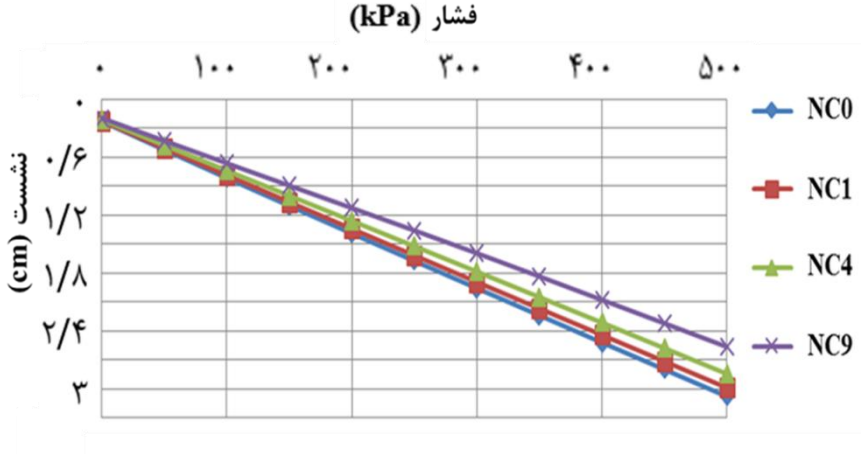


شکل ۲. تنش محوری در طول شمع در بررسی صحت‌سنجی در پژوهش پولوس و پژوهش حاضر

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.2.4.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.2.175]



شکل ۳. منحنی‌های بار- نشست دال در حالت شمع‌های متصل (نماد PR به‌معنای شمع متصل و اعداد بعد از آن نشان‌دهندهٔ تعداد شمع است)



شکل ٤. منحنی‌های بار- نشست دال در حالت شمع‌های غیرمتصل (نماد NC به‌معنای شمع غیرمتصل و اعداد بعد از آن نشان‌دهندهٔ تعداد شمع است)

چنان‌که در شکل‌های ۳ و ٤ دیده می‌شود اختلاف نشست‌ها در حالت غیرمتصل از ۱ تا ۹ شمع ۱۳٪ و برای حالت متصل ۲٤٪ است که نشان‌دهندهٔ تأثیر کم‌تر افزایش شمع‌ها در حالت غیرمتصل و به‌عبارتی دیگر کارکرد بهتر شمع‌های غیرمتصل است، از این رو، در شرایط غیرمتصل نیاز به تعداد شمع‌های کم‌تری است.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.2.4.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.2.175]

۲. تنش در خاک

۲-۱. تنش در خاک سطحی زیر گوشه دال

در حالت غیرمتصل با توجه به توزیع بار در لایه میانی، سهم خاک سطحی از بار قائم بیش‌تر از حالت متصل است. در حالی‌که در حالت متصل با کاهش مقدار بار انتقالی به خاک سطحی، نشست کاهش می‌یابد. بار انتقالی به سطح زمین، تنش‌های افقی و قائم خاک احاطه‌کننده شمع و در نتیجه ظرفیت باربری بدنه شمع را افزایش می‌دهد. در شکل ۵ مقادیر تنش در خاک سطحی زیر دال و در خاک زیر شمع‌ها نشان داده شده است. چنان‌که مشاهده می‌شود در شمع‌های غیرمتصل با افزایش تعداد شمع‌ها از ۱ به ٤ و از ۱ به ۹، مقادیر تنش خاک سطحی به‌ترتیب ٤۱٪ و ٤۹٪ کاهش یافته که نشان‌دهندهٔ مناسب بودن حالت ٤ شمع و تأثیر کم افزایش آن (۸٪) تا ۹ شمع است. در شمع‌های متصل با افزایش تعداد شمع‌ها از ۱ به ٤ و از ۱ به ۹، تنش خاک سطحی به‌ترتیب ۲٪ و ۵۸٪ کاهش یافته که نشان‌دهنده تأثیر کم اجرای ٤ شمع در کاهش تنش خاک سطحی و تأثیر بیش‌تر اجرای ۹ شمع است. از این رو، در حالت متصل به تعداد شمع بیش‌تری برای کاهش تنش خاک سطحی نیاز است.

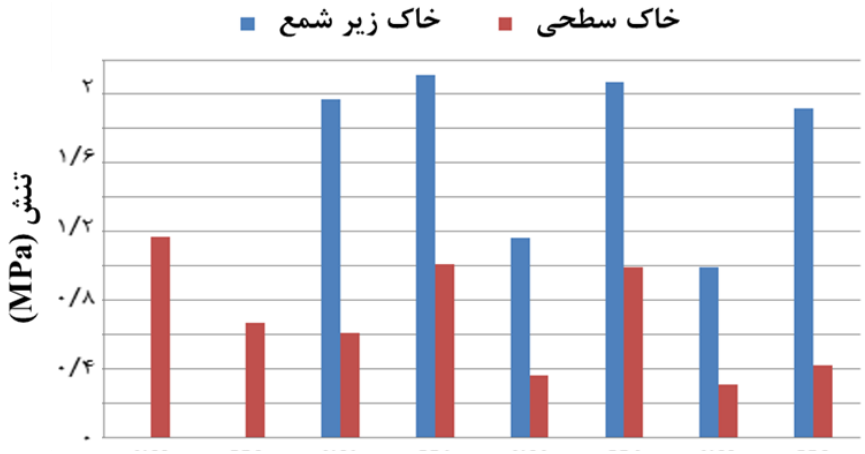
به‌طورکلی در حالت غیرمتصل به‌علت این‌که دال به‌طور مستقیم با خاک تماس ندارد تنش خاک سطحی کم‌تر است. این اختلاف در حالات ۱، ٤ و ۹ شمع به‌ترتیب ٤۰٪، ٦٤٪ و ۲٦٪ است که در تعداد شمع‌های بیش‌تر به‌علت تأثیر بیش‌تر شمع در تحمل بار این مقدار کاهش می‌یابد. در حالی‌که برای حالت ٤ شمع اختلاف بیش‌تری نسبت به حالت ۱ شمع وجود دارد و آن را می‌توان به اختلاف نحوهٔ آرایش شمع‌ها نسبت داد به‌طوری‌که شمع منفرد در وسط و ٤ شمع در کناره‌ها قرار می‌گیرند (شکل ۵). در حالت بدون شمع نیز تنش خاک سطحی در حالت غیرمتصل نسبت به‌حالت متصل افزایش یافته که دلیل آن به‌وضوح قرار داشتن لایهٔ میانی در حالت غیرمتصل است که سرباری اضافه را به خاک زیرین اعمال می‌کند.

۲-۲. تنش در خاک زیر شمع

مطابق با شکل ۵، تنش در خاک زیر شمع‌ها به‌مراتب بیش‌تر از تنش در خاک سطحی است که نشان‌دهندهٔ تحمل عمدهٔ بارها به‌وسیلهٔ شمع و انتقال آن به خاک زیرین و کارکرد درست

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.2.4.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.2.175]

هر دو سیستم شمع‌های متصل و غیرمتصل است. در حالت متصل با افزایش تعداد شمع‌ها از ۱ به ٤ و از ۱ به ۹، تنش خاک زیر شمع به‌ترتیب ۲٪ و ۹٪ کاهش می‌یابد و دلیل آن کاهش سهم بار هر شمع در اثر اجرای شمع‌های بیش‌تر بوده است و تأثیر ناچیز افزایش تعداد شمع‌ها را نشان می‌دهد. در حالت غیرمتصل با افزایش تعداد شمع‌ها از ۱ به ٤ و از ۱ به ۹، تنش خاک زیر شمع به‌ترتیب ٤۱٪ و ۵۰٪ کاهش یافته که دلیل آن مشابه حالت متصل است و هم‌چنین نشان‌دهندهٔ تأثیر چشم‌گیر اجرای ٤ شمع و تأثیر کم‌تر اجرای ۹ شمع نسبت به ٤ شمع است (شکل ۵). بر این اساس اجرای ٤ شمع در حالت غیرمتصل بهینه است.



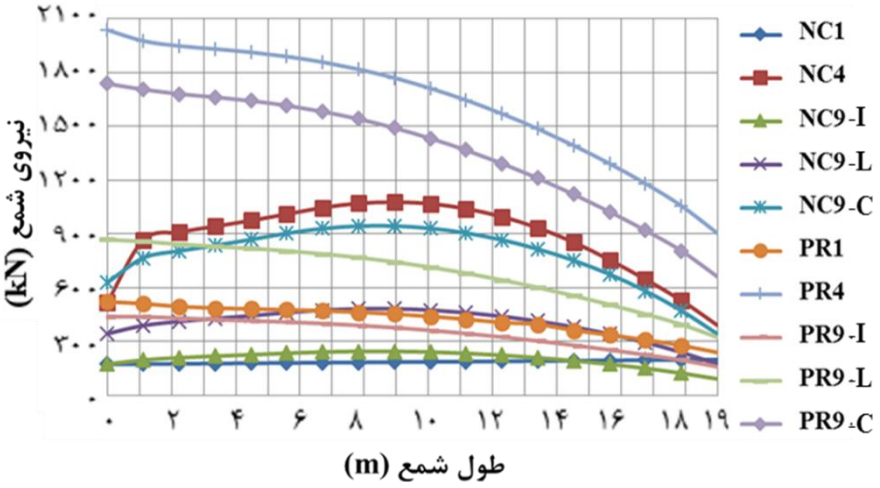
شکل ۵. تنش در خاک سطحی بلافاصله زیر دال (در بین شمع‌ها) و در خاک قرار گرفته در زیر شمع‌ها

۳. نیروی شمع‌ها

مطابق با شکل ٦ در تمام شمع‌های متصل نیروی شمع‌ها با عمق شمع کاهش می‌یابد که نشان‌دهنده تأثیر اصطکاک مثبت بدنه در تحمل بار است، به‌گونه‌ای که در تمامی موارد نیروی سرشمع‌ها در حدود ۵۵٪ تا ٦۵٪ بیش‌تر از نیروی پای شمع‌ها است که این افزایش با تعداد بیش‌تر شمع‌ها سیر صعودی دارد. لیکن در حالت غیرمتصل ٤ و ۹ شمعی، در تمامی شمع‌ها نیرو از سرشمع تا میانه آن افزایش و سپس تا پای شمع کاهش می‌یابد که دلیل آن ایجاد اصطکاک منفی جداری شمع‌ها در اثر تراکم لایهٔ میانی و هم‌چنین تراکم خاک احاطه‌کنندهٔ قسمت‌های بالایی شمع است. نیروی پای شمع‌ها نیز در حالت ٤ شمع ۲۵٪ و در حالت ۹

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.2.4.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.2.175]

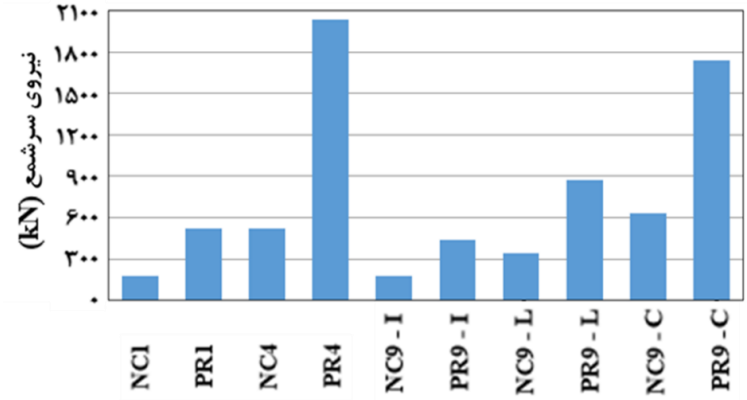
شمع حدود ۵۰٪ کم‌تر از نیروی سرشمع است. در حالت ۱ شمع نیروی شمع در عمق به مقدار ۱۵٪ افزایش یافته است که دلیل آن تأثیر تراکم لایهٔ میانی و تودهٔ خاک در اعماق بیش‌تر به‌علت کم بودن تعداد شمع یا تأثیر کم‌تر شمع در تحمل بار است که باعث ایجاد اصطکاک جداری منفی در تمام طول شمع شده است (شکل ٦). در حالت غیرمتصل و برای ٤ شمع اصطکاک منفی و مثبت در قسمت میانی شمع از یک‌دیگر قابل تشخیص است و از این رو، برای ۹ شمع انتظار می‌رود محل جدایی اصطکاک منفی و مثبت در جایی بالاتر از میانه شمع باشد. اما آن هم در وسط طول شمع قرار دارد که دلیلی بر کافی بودن ٤ شمع در این حالت است (شکل ٦).



شکل ٦. منحنی تغییرات نیروی شمع‌ها بر حسب طول آن در حالت‌های مختلف (نماد PR و NC به‌ترتیب به معنای شمع متصل و غیرمتصل و اعداد بعد از آن نشان‌دهندهٔ تعداد شمع است)

نیروی سرشمع در حالت ۱ و ٤ شمع در حالت متصل نسبت به‌حالت غیرمتصل به‌ترتیب حدود ۳ و ٤ برابر است. این نسبت در حالت ۹ شمع برای شمع گوشه‌ای، کناری و وسطی به‌ترتیب ۲/۸، ۲/۵ و ۲/۵ برابر است. نتایج مزبور اولاً نشان‌دهندهٔ تأثیر چشم‌گیر اجرای لایه میانی در کاهش بار شمع و در نتیجه طراحی مقطع کوچک‌تری برای شمع است، ثانیاً نسبت نیروی سرشمع‌های متصل به بار شمع‌های غیرمتصل نظیر برای حالت ٤ شمع بیش‌تر از حالت ۹ شمع است که نشان‌دهندهٔ کافی بودن ٤ شمع در بار مورد نظر است (شکل ۷).

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.2.4.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.2.175]



شکل ۷. نیروی سرشمع‌ها در حالت‌های مختلف (نماد PR و NC به‌ترتیب به‌معنای شمع متصل و غیرمتصل و اعداد بعد از آن نشان‌دهندهٔ تعداد شمع است)

٤. بررسی‌های پارامتری هندسی روی سیستم شمع غیرمتصل

برای انجام مطالعه پارامتریک و بررسی اثر تغییر یک پارامتر روی پاسخ سیستم، مقادیر مختلفی برای آن پارامتر در نظر گرفته شده و سایر پارامترها ثابت می‌مانند. در این بخش بررسی‌ها روی مدل NC4 صورت گرفته است که عبارت از ضخامت لایهٔ میانی، ضخامت دال، قطر و طول شمع است. در جدول ٤ مقادیر مختلفی که برای این پارامترها در نظر گرفته شده ارائه شده است.

جدول ٤. مقادیر در نظر گرفته شده برای پارامترها در بررسی‌های پارامتری

پارامتر	ضخامت لایهٔ میانی	ضخامت دال	قطر شمع	طول شمع
مقدار (متر)	۰/۵	۱	۰/۲۵	۱۰
	۱	۱/٦	۰/۵	۱۹
	۱/۵	۲	۱	۲۵

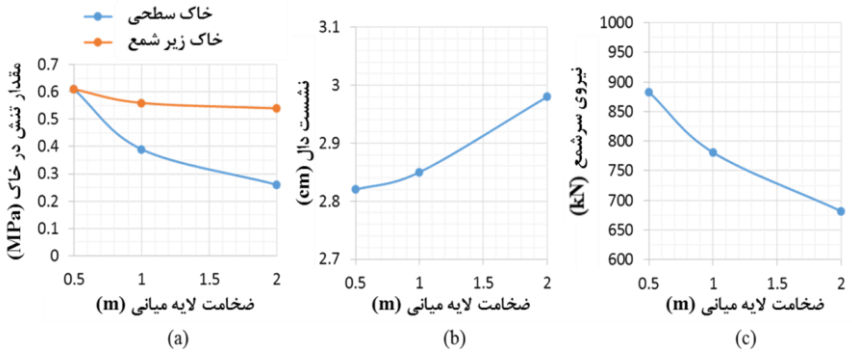
٤-۱. اثر تغییر ضخامت لایه میانی در پاسخ سیستم شمع غیر متصل

برای بررسی اثر تغییر ضخامت لایهٔ میانی در پاسخ سیستم شمع غیرمتصل، سه ضخامت ۰/۵، ۱ و ۱/۵ متر در نظر گرفته شده است (شکل۸). نتایج مدل‌سازی نشان می‌دهد با افزایش ضخامت لایهٔ میانی، توزیع تنش بیش‌تر شده و بار کم‌تری به خاک سطحی زیر دال می‌رسد. با توجه به شکل ۸ a مشاهده می‌شود که با افزایش ضخامت لایهٔ میانی به ۱ متر تأثیر بیش‌تری

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.2.4.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.2.175]

بر تنش خاک سطحی نسبت به افزایش مجدد ضخامت لایهٔ میانی و انتخاب مقدار ۲ متر برای آن وجود دارد که نشان‌دهندهٔ مناسب بودن ضخامت ۱ متر برای لایهٔ میانی است و نیاز به افزایش بیش‌تر ضخامت وجود ندارد. با تفسیری مشابه، وضعیت تنش در خاک زیر شمع نیز مانند خاک سطحی است. لازم به ذکر است که برابری میزان تنش سطحی و تنش خاک زیر شمع در حالت ضخامت ۰/۵ متر لایهٔ میانی، نشان‌دهندهٔ ناکافی بودن این ضخامت در توزیع تنش است. به این معنی که ضخامت لایهٔ میانی به اندازه‌ای کم است که توانایی کاهش تنش خاک سطحی را ندارد و در واقع وجود آن تأثیری در پخش تنش قائم ندارد.

با توجه به شکل ۸ b مشاهده می‌شود که با افزایش ضخامت لایهٔ میانی از ۰/۵ تا ۱ متر نشست دچار افزایش ناچیزی (حدود ۰/۳ میلی‌متر) می‌گردد که با افزایش بیش‌تر ضخامت تا ۲ متر، حدود ۱۳ میلی‌متر نشست افزایش می‌یابد که دلیل آن تراکم لایهٔ میانی ناشی از بار قائم است و این نشان‌دهندهٔ مناسب بودن ضخامت ۱ متر برای لایهٔ میانی است. نیروی سرشمع نیز در اثر افزایش ضخامت لایهٔ میانی به‌دلیل گسترش بیش‌تر تنش کاهش می‌یابد. در شکل ۸ c مشاهده می‌شود که با افزایش ضخامت لایهٔ میانی از ۰/۵ تا ۱ متر، شیب تغییر نیروی سرشمع بیش‌تر از حالت تغییر ضخامت لایهٔ میانی از ۱ تا ۲ متر است به‌گونه‌ای که در نیم‌متر اول تغییر ضخامت لایهٔ میانی، کاهش نیروی سرشمع حدود ۱۰۰ کیلونیوتن است و در دو نیم‌متر کاهش بعدی ضخامت، هر کدام ۵۰ کیلو نیوتن کاهش در نیروی سرشمع اتفاق می‌افتد. از این رو، مناسب بودن ضخامت ۱ متر برای لایه میانی، از این قسمت نیز قابل نتیجه‌گیری است.



شکل ۸. اثر تغییر ضخامت لایه میانی در a. تنش در خاک، b. نشست دال و c. نیروی سرشمع

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.2.4.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.2.175]

با توجه به بررسی مجموعه نتایج این قسمت مشخص می‌شود که مقدار ضخامت ۱ متر برای لایهٔ میانی مناسب بوده است و اثر مطلوبی در توزیع تنش و سهیم کردن خاک سطحی در تحمل تنش دارد.

٤-۲. اثر تغییر ضخامت دال در پاسخ سیستم شمع غیرمتصل

برای بررسی اثر تغییر ضخامت دال در پاسخ سیستم شمع غیرمتصل، سه مقدار ۱، ۱/٦ و ۲ متر برای آن در نظر گرفته شده و نتایج مطابق شکل ۹ به‌دست آمده است.

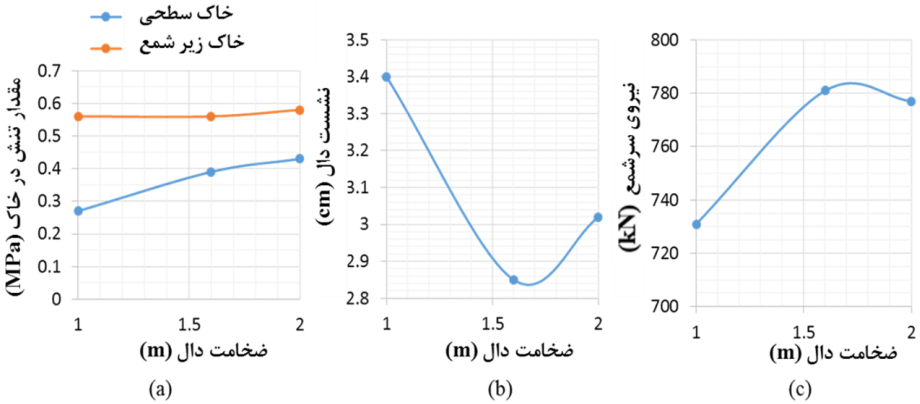
با افزایش ضخامت دال، بار بیش‌تری روی لایهٔ میانی و به‌تبع آن روی خاک و شمع اثر می‌کند که در نتیجه آن تنش در خاک سطحی افزایش می‌یابد. به‌گونه‌ای که در شکل ۹ a دیده می‌شود با افزایش ضخامت دال از ۱ تا ۱/٦ متر، میزان تغییر تنش (افزایش از ۰/۲۷ تا ۰/۳۹ مگاپاسکال) بسیار بیش‌تر از حالت افزایش از ۱/٦ تا ۲ متر (افزایش از ۰/۳۹ تا ۰/٤۳ مگاپاسکال) و در حدود ۳ برابر آن است که نشان‌دهندهٔ مناسب بودن این ضخامت برای دال است. هم‌چنین با توجه به شکل۹ a مشاهده می‌شود که با افزایش ضخامت دال تغییر چندانی در تنش خاک زیر شمع اتفاق نمی‌افتد که نشان می‌دهد بخش عمده‌ای از افزایش تنش ناشی از افزایش ضخامت دال به‌وسیلهٔ خاک و لایه میانی تحمل می‌شود.

افزایش ضخامت دال بتنی از ۱ تا ۱/٦ متر باعث کاهش نشست دال شده است (شکل ۹ b) که به‌نظر می‌رسد دلیل آن افزایش سختی خمشی دال در ضخامت بیش‌تر باشد. اما با افزایش ضخامت از ۱/٦ تا ۲ متر مشاهده می‌شود که نشست مجدداً افزایش یافته که دلیل آن‌را می‌توان به افزایش بار ناشی از ضخامت بیش‌تر مربوط دانست. در واقع پدیدهٔ افزایش صلبیت تا ضخامت ۱/٦ متر به حداکثر خود می‌رسد و بعد از آن در ضخامت‌های بیش‌تر ثابت می‌ماند.

نیروی سرشمع با افزایش ضخامت دال افزایش می‌یابد. در شکل ۹ c مشاهده می‌شود که نیروی سرشمع از ضخامت ۱ تا ۱/٦ متر افزایش می‌یابد و بعد از آن تقریباً ثابت می‌ماند. در واقع تا ضخامت ۱/٦ متر اثر افزایش بار قائم غالب‌تر است و باعث افزایش نیروی سرشمع می‌شود. از ضخامت ۱/٦ تا ۲ متر سختی دال به حداکثر خود می‌رسد و اثر آن از اثر افزایش بار قائم بیش‌تر می‌شود.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.2.4.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.2.175]

نهایتاً با توجه به کم‌تر شدن روند تغییر هرسه پارامتر در حالت افزایش ضخامت دال از ۱ به ۱/٦ متر نسبت به حالت افزایش ضخامت دال از ۱/٦ به ۲ متر نتیجه گرفته می‌شود که ضخامت ۱/٦ متر برای دال مناسب است.



شکل ۹. اثر تغییر ضخامت دال در a. تنش در خاک، b. نشست دال و c. نیروی سرشمع

٤-۳. اثر تغییر قطر شمع در پاسخ سیستم شمع غیرمتصل

با افزایش قطر شمع به‌دلیل سطح تماس بیش‌تر نوک و بدنه شمع با خاک، مقاومت اتکایی و اصطکاکی آن افزایش می‌یابد. سه مقدار ۰/۲۵، ۰/۵ و ۱ متر برای بررسی روی اثر قطر شمع در نظر گرفته شد و نتایج مطابق شکل ۱۰ به‌دست آمده است.

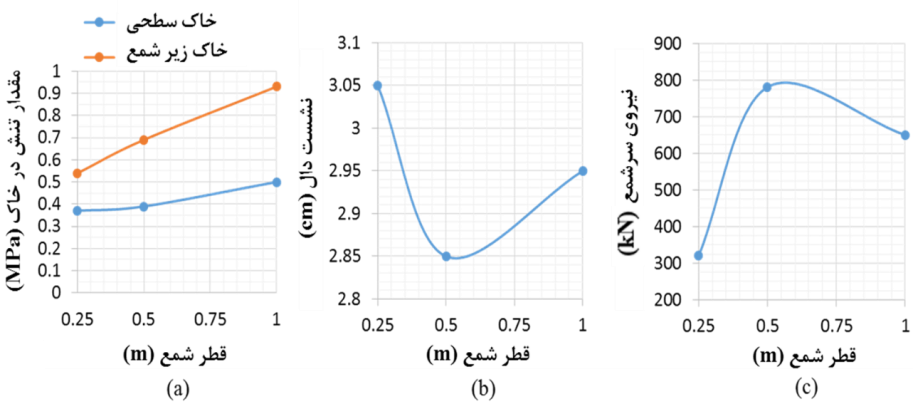
تنش در خاک سطحی تحت تأثیر اصطکاک جدار شمع و خاک قرار دارد. به‌گونه‌ای که با افزایش قطر در شمع‌های غیر متصل، به‌دلیل افزایش اصطکاک منفی در بخش بالایی، تنش‌های سطحی افزایش می‌یابد. مطابق با بررسی‌های انجام شده با توجه به شکل ۱۰ a با افزایش قطر شمع از ۰/۲۵ تا ۰/۵ متر، تأثیر بر مقدار تنش خاک سطحی کم‌تر بوده است (در حدود ۵٪ افزایش تنش) و با افزایش قطر از ۰/۵ تا ۱ متر، این تأثیر کاملا مشهود و در حدود ۲۸٪ است. هم‌چنین با افزایش قطر شمع، به‌دلیل افزایش وزن آن و علاوه بر آن به‌دلیل دریافت بار قائم بیش‌تر از سطح، تنش انتقالی به خاک زیر شمع افزوده می‌شود به‌گونه‌ای که با افزایش قطر از ۰/۲۵ تا ۰/۵ متر و از ۰/۵ تا ۱ متر، تنش خاک زیر شمع به‌ترتیب ۲۸٪ و ۳۵٪ افزایش می‌یابد.

بر اساس شکل ۱۰ b با افزایش قطر شمع از ۰/۲۵ تا ۰/۵ متر به‌دلیل اصطکاک بیش‌تر

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.2.4.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.2.175]

شمع با خاک، نشست حدود ۲ میلی‌متر کاهش می‌یابد. در حالی‌که با افزایش بیش‌تر قطر تا ۱ متر افزایش نشست اتفاق می‌افتد که دلیل آن افزایش وزن شمع است. هم‌چنین مطابق با شکل ۱۰ c با افزایش قطر شمع از ۰/۲۵ تا ۰/۵ متر به‌دلیل سهم بیش‌تر شمع در بارگیری از نیروی قائم، نیروی سرشمع دچار افزایش چشم‌گیری شده و از ۳۲۰ به ۷۸۰ کیلونیوتن می‌رسد. در حالی‌که با افزایش بیش‌تر قطر شمع تا ۱ متر، به‌دلیل اصطکاک بسیار بیش‌تر بدنه شمع با خاک، قدری از این نیرو کاسته شده و به حدود ٦٥٠ کیلونیوتن می‌رسد.

نهایتاً با توجه به کم‌تر شدن روند تغییر هرسه پارامتر در حالت افزایش قطر شمع از ۰/۲۵ تا ۰/۵ متر نسبت به‌حالت افزایش قطر شمع از ۰/۵ به ۱ متر، قطر ۰/۵ متر برای شمع مناسب است.



شکل ۱۰. اثر تغییر قطر شمع در a. تنش در خاک، b. نشست دال و c. نیروی سرشمع

٤-٤. اثر تغییر طول شمع در پاسخ سیستم شمع غیرمتصل

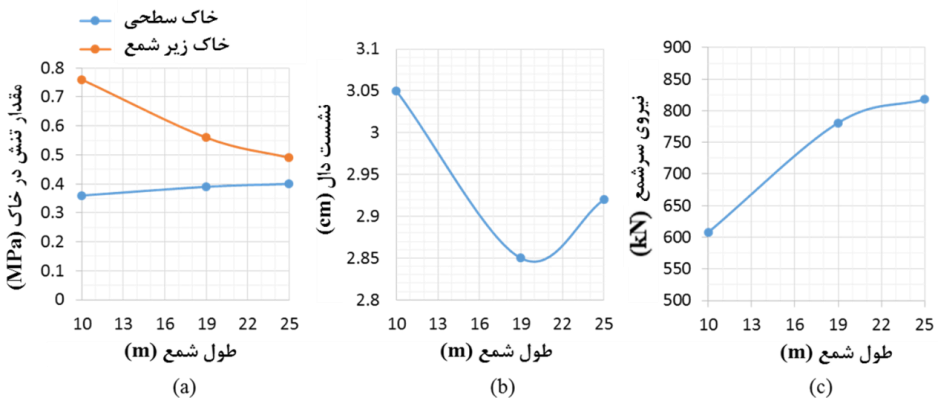
با افزایش طول شمع، باربری آن به‌دلیل سطح تماس بیش‌تر با خاک افزایش می‌یابد. در این پژوهش سه مقدار ۱۰، ۱۹ و ۲۵ متر برای بررسی اثر طول شمع در نظر گرفته شد که نتایج در شکل ۱۱ ارائه شده است.

با افزایش طول شمع، سهم بیش‌تری از نیرو به خاک جدار آن می‌رسد که باعث کاهش سهم خاک زیرین در تحمل نیرو می‌شود (شکل ۱۱ a). با افزایش طول شمع از ۱۰ تا ۱۹ متر حدود ۲۰۰ کیلوپاسکال کاهش تنش در خاک سطحی اتفاق می‌افتد که این کاهش با افزایش طول شمع از ۱۹ تا ۲۵ متر به مقدار ۷۰ کیلوپاسکال می‌رسد. از این رو، کاهش تنش کم‌تر از

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.2.4.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.2.175]

طول ۱۹ تا ۲۵ متر نشان‌دهندهٔ مناسب بودن طول ۱۹ متر برای شمع است. چنان‌که از شکل ۱۱ a دیده می‌شود تغییر تنش خاک زیر شمع از حالت طول ۱۰ تا ۱۹ متر و از ۱۹ تا ۲۵ متر به‌ترتیب باعث ۱۰ و ۳ درصد افزایش می‌شود که مؤید کاهش روند تغییر از طول ۱۹ تا ۲۵ متر است و از این منظر نیز نشان‌دهندهٔ مناسب بودن طول ۱۹ متر برای شمع است.

با افزایش طول شمع از ۱۰ تا ۱۹ متر، نشست دال در حدود ۷٪ کاهش یافته است که دلیل آن صلبیت بیش‌تر سیستم شمع و خاک است. در حالی‌که با افزایش طول شمع از ۱۹ تا ۲۵ متر نشست افزایش می‌یابد و دلیل آن افزایش نیروی وزن شمع است که به همان خاک وارد می‌شود و نشست را افزایش می‌دهد (شکل ۱۱ b). در واقع اثر افزایش صلبیت تا طول ۱۹ متر مؤثر است و از آن به بعد اثر افزایش وزن بر آن غالب می‌شود و نشست افزایش می‌یابد. هم‌چنین با افزایش طول شمع از ۱۰ تا ۱۹ متر و از ۱۹ تا ۲۵ متر، نیروی سرشمع به‌ترتیب ۲۲٪ و ٤٪ افزایش می‌یابد که نشان‌دهندهٔ افزایش باربری شمع‌ها در طول بیش‌تر و هم‌چنین کفایت طول ۱۹ متر برای شمع است (شکل ۱۱ c).



شکل ۱۱. اثر تغییر طول شمع در a. تنش در خاک، b. نشست دال و c. نیروی سرشمع

خلاصه نتایج نیروی شمع‌ها و تنش در خاک‌ها و هم‌چنین مطالعات پارامتری به‌ترتیب در جدول‌های ۵ و ٦ آمده است.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.2.4.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.2.175]

جدول ۵. خلاصه نتایج نیروی شمع‌ها و تنش در خاک‌ها در حالت‌های مختلف (نماد PR و NC به‌ترتیب به‌معنای شمع متصل و غیرمتصل و اعداد بعد از آن نشان‌دهندهٔ تعداد شمع است)

نوع شمع	تنش (کیلوپاسکال)		نیروی سرشمع (کیلونیوتن)
	خاک سطحی	خاک زیر شمع	
NC0	۱/۱۷	۰	۱۷٤
PR0	۰/٦۷	۰	۵۲۳
NC1	۰/٦۱	۱/۹۷	۵۲۱
PR1	۱/۰۱	۲/۱۱	۲۰۳۷
NC4	۰/۳٦	۱/۱٦	۱۷٦
PR4	۰/۹۹	۲/۰۷	٤٤۰
NC9-I	۰/۳۱	۰/۹۹	۱۷٦
NC9-L			۳٤۵
NC9-C			٦۳۰
PR9-I	۰/٤۲	۱/۹۲	٤٤۰
PR9-L			۸٦۹
PR9-C			۱۷۳۸

جدول ٦. خلاصه نتایج بررسی‌های پارامتری در سیستم شمع غیرمتصل (نماد PR و NC به‌ترتیب به معنای شمع متصل و غیرمتصل و اعداد بعد از آن نشان‌دهنده تعداد شمع است)

بررسی	پارامتر											
	تنش خاک سطحی (مگاپاسکال)			تنش در خاک زیر شمع (مگاپاسکال)			نشست دال (سانتی‌متر)			نیروی سرشمع (کیلونیوتن)		
ضخامت لایه میانی	۰/۵	۱	۲	۰/۵	۱	۲	۰/۵	۱	۲	۰/۵	۱	۲
مقدار پارامتر	۰/٦۱	۰/۳۹	۰/۲٦	۰/٦۱	۰/۵٦	۰/۵٤	۲/۸۲	۲/۸۵	۲/۹۸	۸۸۳	۷۸۱	۱۸۲
ضخامت دال	۱	۱/٦	۲	۱	۱/٦	۲	۱	۱/٦	۲	۱	۱/٦	۲
مقدار پارامتر	۰/۲۷	۰/۳۹	۰/٤۳	۰/۵٦	۰/۵٦	۰/۵۸	۳/٤	۲/۸۵	۳/۰۲	۷۳۱	۷۸۱	۷۷۷
قطر شمع	۰/۲۵	۰/۵	۱	۰/۲۵	۰/۵	۱	۰/۲۵	۰/۵	۱	۰/۲۵	۰/۵	۱
مقدار پارامتر	۰/۳۷	۰/۳۹	۰/۵	۰/۵٤	۰/٦۹	۰/۹۳	۳/۰۵	۲/۸۵	۲/۹۵	۳۲۰	۷۸۱	٦۵۰
طول شمع	۱۰	۱۹	۲۵	۱۰	۱۹	۲۵	۱۰	۱۹	۲۵	۱۰	۱۹	۲۵
مقدار پارامتر	۰/۳٦	۰/۳۹	۰/٤	۰/۷٦	۰/۵٦	۰/٤۹	۳/۰۵	۲/۸۵	۲/۹۲	٦۰۸	۷۸۱	۸۱۸

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.2.4.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.2.175]

نتیجه‌گیری

شمع‌ها عمل انتقال بار سطحی روی دال را به خاک‌های زیرین انجام می‌دهند که در نتیجه آن نقش لایه‌های بالایی خاک در تحمل بارها ناچیز است. بر این اساس در این پژوهش روی نوع جدیدی از شمع‌ها موسوم به شمع‌های غیرمتصل به دال بررسی شده است. بدین‌منظور تعدادی مدل عددی شامل شمع‌های متصل و غیرمتصل ساخته شده و با مقایسه پارامتری این دو حالت، نوع مناسب تر به لحاظ کارکرد بهینه شناسایی شده است. بررسی‌های انجام شده نشان داد:

۱. با افزایش از ۱ تا ۹ شمع، نشست در حالت متصل بیش‌تر از حالت غیرمتصل کاهش می‌یابد که نشان‌دهندهٔ تأثیر بیش‌تر اجرای ۹ شمع در حالت متصل و در نتیجه نیاز به تعداد شمع بیش‌تر در این حالت است.

۲. اختلاف تنش در خاک سطحی در حالت غیرمتصل از ٤ شمع تا ۹ شمع بسیار کم‌تر از حالت متصل (تقریباً ۱/۷ برابر آن) است که نشان‌دهندهٔ نیاز به اجرای شمع‌های بیش‌تر در حالت متصل است.

۳. تغییر تنش در خاک زیر شمع در حالت غیرمتصل با اضافه کردن شمع‌ها از ۱ به ٤ بسیار بیش‌تر از حالت اضافه کردن از ٤ به ۹ شمع است که نشان‌دهندهٔ کافی بودن اجرای ٤ شمع در حالت غیرمتصل است، در حالی که در حالت متصل، میزان تغییر تنش در خاک زیر شمع در هر دو حالت تغییر از ۱ به ٤ شمع و از ٤ به ۹ شمع قابل توجه است که لازم بودن اجرای شمع نهم را نشان می‌دهد.

٤. اصطکاک جدار منفی در حالت غیرمتصل و ۱ شمع بر خلاف حالت ٤ و ۹ شمع، در تمام طول شمع ایجاد شده که دلیل آن‌را می‌توان کم بودن تعداد شمع‌ها و تأثیر تراکم لایه میانی و توده خاک در اعماق بیش‌تر به‌علت تأثیر کم‌تر شمع در تحمل بار دانست. محل جدایش اصطکاک جدار منفی و مثبت در حالت ٤ شمع در میانه قرار دارد و انتظار می‌رود برای ۹ شمع بالاتر از آن باشد، در حالی‌که در این حالت نیز در میانه قرار گرفت و نشان‌دهندهٔ بی‌تأثیر بودن اجرای ۹ شمع نسبت به ٤ شمع است.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.2.4.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.2.175]

۵. نسبت نیروی سرشمع‌ها در حالت متصل به‌حالت غیرمتصل حدودا ۲/۵ تا ٤ است که نشان‌دهندهٔ تأثیر مثبت اجرای لایهٔ میانی در کاهش بار و مقطع طراحی کوچک‌تر برای شمع است. هم‌چنین نسبت نیروی سرشمع‌های متصل به غیرمتصل نظیر برای حالت ٤ شمع بیش‌تر از حالت ۹ شمع است که نشان‌دهندهٔ کافی بودن ٤ شمع در بار مورد نظر است.

٦. بررسی‌های پارامتری هندسی در سیستم شمع غیرمتصل به نتایج زیر منجر شد:

الف) از بین سه مقدار ۰/۵، ۱ و ۱/۵ متر برای ضخامت لایهٔ میانی، مقدار ضخامت ۱ متر مناسب است و اثر مطلوبی در پخش تنش و سهیم کردن خاک سطحی در تحمل تنش قائم دارد.

ب) مقدار ضخامت ۱/٦ متر برای دال در میان سه مقدار ۱، ۱/٦ و ۲ متر مناسب‌تر است به گونه‌ای که در این ضخامت، برآیند اثر افزایش بار قائم (وزن دال) و اثر افزایش صلبیت دال ناشی از افزایش ضخامت در شرایطی است که تنش‌ها و نشست‌ها در محدوده منطقی باقی می‌مانند.

پ) با توجه به افزایش اصطکاک جدار با افزایش قطر شمع، از بین سه مقدار ۰/۲۵، ۰/۵ و ۱ متر برای قطر شمع مقدار قطر بهینه ۰/۵ متر به‌دست آمد که ضمن باربری بیش‌تر، با نشست کم‌تری نیز توام خواهد بود.

ت) از بین سه طول ۱۰، ۱۹ و ۲۵ متر برای شمع، مناسب ترین طول به مقدار ۱۹ متر به‌دست آمد به‌گونه‌ای که با افزایش بیش‌تر این طول، تنش‌ها و نشست‌ها دچار تغییر محسوسی نمی‌شوند.

در مجموع بر اساس نتایج این پژوهش در شرایط برابر، عمل‌کرد شمع‌های غیرمتصل به کلاهک در مقایسه با شمع‌های متصل بهتر ارزیابی می‌شود.

لازم به‌ذکر است هدف از این پژوهش، بررسی اندرکنش بین خاک، شمع و دال با وجود لایه‌ای میانی بین سرشمع و دال بوده است. پیشنهاد می‌شود در پژوهشی مشابه، تأثیر تغییر مشخصات لایهٔ میانی شامل دانه‌بندی، زاویهٔ اصطکاک، مدول یانگ و... و هم‌چنین اثر وجود

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.2.4.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.2.175]

لایهٔ میانی در شرایطی که شمع تحت بار جانبی باشد بررسی شود.

منابع

1. Fioravante V., Giretti D., "Contact versus noncontact piled raft foundations", Can. Geotech. J. 47 (2010) 1271-1287.
2. Giretti D., "Modelling of Piled Raft Foundations in Sand", thesis document, Settore Scientifico Disciplinare ICAR (2009).
3. Eslami A., Veiskarami M., "Study on optimized piled-raft foundations (PRF) performance with connected and non-connected piles-three case histories", International Journal of Civil Engineering, Vol. 10, No. 2 (2012) 100-111.
4. Eslami A., Salehi S., "Analysis of non-connected piled raft foundations (NCPRF) with cushion by finite element method", Comp. Meth. Civil Eng., Vol. 2 (2011) 153-168.
5. Saeedi A., Baziar M., "Centrifuge Modeling of Non-Connected Piled Raft System", EJGE 228 (2013).
6. Fioravante V., "Load transfer from a raft to a pile with an interposed layer", Geotechnique 61, No. 2 (2011) 121-132.
7. Ata A., "Numerical analysis of unconnected piled raft with cushion", Ain Shams Engineering Journal 6 (2015) 421-428.
8. Sharma V.J., "Composite piled raft foundation with intermediate cushion in layered soil under seismic forces", Comp. Meth. Civil Eng., Vol. 3 (2012) 15-28.
9. ABAQUSCAE Program V 6.13-1.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.2.4.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.2.175]

10. Saba H., "Verification of nonlinear condition of anchored walls in various loading", Thesis document of Amirkabir University of Tehran, Iran (2003).
11. Dastani H., Shariati M., "Numerical and experimental analysis of controlling of crack propagation route in a plane under cyclic uniaxial loading by creating openness", Thesis document of Shahrood Industrial University of Shahrood, Iran (2014).
12. Randolph M. F., Wroth C. P., "Application of the failure state in undrained simple shear to the shaft capacity of driven piles", Geotechnique, Vol. 31 (1981) 143-157.
13. Mottaghi A., "3Dstatic and dynamic analysis of pile group with considering soil - pile interaction", 6th congress of civil engineering, Iran, Semnan, (2012).
14. Poulos H. G., Small J. C., Ta L. D., Sinha J., Chen L., "Comparison of some methods for analysis of piled rafts", Proc. 14th Int. Conf. Soil Mech. Found. Engng, Hamburg, Balkema, Rotterdam, Vol. 2 (1997) 1119-1124.
15. Hadad H., Seyedi S. E., "Verification of simplified computational methods of analyzing pile foundation systems", 10th international congress of civil engineering, Tabriz, Iran (2015).
16. Siegel T. C., "Simplified Settlement Model for a Shallow Foundation on Composite Ground with Rigid Piles", The Journal of the Deep Foundations Institute (DFI), Vol. 5, No. 1 (2011).
17. Garhy B. E., "Behavior of raft on settlement reducing piles: Experimental model study Basuony", Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering 5 (2013) 389-399.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.2.4.3]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.2.175]

18. Wong I. H., Chang M. F., Cao X. D., "Raft foundation with disconnected settlement-reducing piles", google book, 469-486.

19. ABAQUS user's manual, ABAQUS/CAE User's Manual. ABAQUS Online Documentation: Version 6.13-1.

20. Jendele L., "On the choice between discrete or smeared approach in practical structural FE analyses of concrete structures", University of Colorado at Boulder, U.S.A.

21. Mirzaee H., "Verification of two fracture criteria base on stress concentration factors and stress components for predicting direction of crack propagation in", Iranian Journal of Mining Engineering (IRJME), Vol. 4, No. 8 (2010)1-12.

22. Chow C. M., Fong F. S., "Design of disconnected piled foundation for 6m high inlet structure", The 17th Southeast Asian Geotechnical Conference, Taipei, Taiwan (2010).

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1396.11.2.4.3]

[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.11.2.175]