

بررسی رفتار خاک اطراف گروه شمع تحت بار جانبی در ماسه

مسعود حاجی علیلوی بناب (دانشیار)

حبیب آذرنیا شاهگلی (کارشناس ارشد)

محمدحسین محصل (کارشناس ارشد)

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

رفتار گروه شمع تحت بارگذاری جانبی از وجود شمع‌های مجاور تأثیر می‌پذیرد. اندرکنش شمع - خاک - شمع بسته به فاصله‌ی مرکز به مرکز شمع‌ها الگوی تنش و تغییر شکل را در اطراف یک گروه شمع تحت تأثیر قرار می‌دهد. در این نوشتار الگوی تغییر شکل خاک اطراف گروه شمع به‌طور جانبی بارگذاری شده در ماسه در آزمایشگاه روی مدلی با مقیاس کوچک با استفاده از مدل‌سازی فیزیکی و روش سرعت‌سنجی تصویری ذرات (PIV)^۱ برای موارد مختلف مطالعه شده و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. بدین ترتیب که شمع مدل یک‌بار به‌صورت منفرد و شش‌بار به‌صورت گروه شمع دوتایی با فاصله‌ی مرکز به مرکز ۱، ۲، ۳، ۴، ۵ و ۶ برابر پهنای شمع تحت آزمایش قرار گرفت. با استفاده از روش پردازش تصویری ذرات، الگوی تغییر شکل خاک اطراف شمع منفرد و گروه شمع با فواصل مختلف و اندرکنش شمع - خاک - شمع مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. نتایج آزمایشگاهی حاصله حاکی از آن است که با افزایش فاصله‌ی شمع‌ها، اثرات اندرکنش گروه به‌طور قابل ملاحظه‌ی کاهش می‌یابد و در نتیجه رفتار شمع‌ها در گروه و الگوی تغییر شکل خاک اطراف آن‌ها به رفتار شمع منفرد و الگوی تغییر شکل خاک اطراف آن نزدیک‌تر می‌شود. در فاصله‌ی مرکز به مرکز ۶B شمع‌ها، اثر گروه^۲ از بین رفته و شمع‌ها به‌صورت منفرد رفتار می‌کنند.

واژگان کلیدی: گروه شمع، بار جانبی، الگوی تغییر شکل خاک، اندرکنش شمع، خاک، اثر گروه.

۱. مقدمه

متکی بر شمع‌ها، در پی‌های شمعی واقع در مناطق زلزله‌خیز و در پایه‌ی پل‌های متکی بر شمع، شمع‌ها تحت نیروهای افقی قرار می‌گیرند. با توجه به مطالب فوق، ضروری است که رفتار شمع‌ها تحت بار جانبی مطالعه شود.

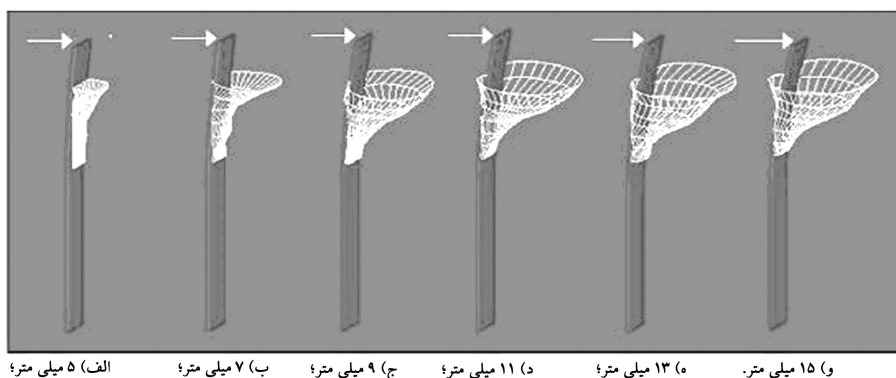
تاکنون بیشتر تحقیقات در مورد شمع تحت بار جانبی روی خود شمع، بررسی ظرفیت باربری جانبی آن، تغییر مکان جانبی، دوران و نیروهای داخلی ایجاد شده در شمع با نصب کرنش‌سنج‌هایی در طول آن انجام گرفته است. در مورد رفتار خاک اطراف و الگوی تغییر شکل آن مطالعات بسیار کمی انجام شده، که قریب به اتفاق آن‌ها در مورد شمع منفرد است. بر این اساس، انجام تحقیقاتی در مورد نحوه‌ی تغییر شکل خاک اطراف گروه شمع تحت بار جانبی و نیز بررسی اندرکنش شمع - خاک ضرورت می‌یابد. اینک به نمونه‌هایی از کارهای قبلی در مورد رفتار خاک اطراف شمع منفرد تحت بار جانبی می‌پردازیم.

در سال ۱۹۸۳ میلادی، جابه‌جایی افقی خاک در جلو شمع‌هایی که به‌طور جانبی بارگذاری شده بودند بررسی شد.^[۱] نتایج حاصله نشان می‌داد که در حالت کلی جابه‌جایی‌های افقی خاک بزرگ‌تر از جابه‌جایی‌های قائم آن است و هر دوی این جابه‌جایی‌ها با افزایش فاصله از سطح شمع به سرعت کاهش می‌یابند.

در صورت مناسب نبودن ظرفیت باربری زمین برای استفاده از شالوده‌های سطحی، از شمع‌ها برای ساخت شالوده‌های عمیق استفاده می‌شود. برای انتقال بار سازه به خاک، شمع‌ها در اغلب اوقات به‌صورت گروه به کار گرفته می‌شوند. وقتی که شمع‌ها نزدیک یکدیگر اجرا شوند، منطقی است فرض شود که تنش‌های انتقالی از طریق شمع‌ها به زمین، یکدیگر را پوشش می‌دهند. این موضوع می‌تواند باعث کاهش ظرفیت باربری شمع شود. به‌طور ایده‌آل، فاصله‌ی شمع‌ها در گروه باید چنان انتخاب شود که ظرفیت باربری گروه شمع کم‌تر از مجموع ظرفیت‌های باربری تک‌تک شمع‌ها نشود.

بارهای وارده به شمع‌ها از نوع محوری، جانبی و لنگ‌خمش‌ی است؛ بار محوری می‌تواند از نوع کششی یا فشاری باشد. تقریباً تمام شمع‌ها تحت بارهای جانبی قرار می‌گیرند. در بعضی از سازه‌ها مقدار بارهای افقی نسبت به بارهای قائم ناچیز و قابل اغماض است. اما در مواردی شمع‌ها و گروه شمع‌ها، تحت بارهای جانبی قابل توجهی قرار می‌گیرند. مثلاً در اسکله‌ها و سازه‌های بندری، در سازه‌های نگهدارنده

تاریخ: دریافت ۱۳۸۸/۶/۳۱، اصلاحیه ۱۳۸۸/۱۲/۲۲، پذیرش ۱۳۸۸/۱۲/۲۵.



شکل ۱. الگوی گسیختگی خاک اطراف شمع تحت بار جانبی برای شش جابه‌جایی مختلف.

مقیاسی مناسب و تحلیل ابعادی برای کنترل آن‌ها ضروری است. محاسن استفاده از مدل‌سازی آزمایشگاهی با مقیاس کوچک عبارت است از: کنترل کامل بر همه‌ی جزئیات مدل، امکان انتخاب خاک مورد آزمایش، امکان انتخاب شرایط مرزی و بارگذاری مدل‌ها و در نتیجه افزایش دقت در نحوه‌ی اعمال بارگذاری، نیاز به خاک با مقدار کم، امکان انجام آزمایش‌های زیاد و تکرار مشاهدات و مطالعه‌ی تأثیر تغییر پارامترهای کلیدی، و در نهایت هزینه‌ی بسیار کم‌تر نسبت به آزمایش‌ها با مقیاس واقعی.^[۵]

اکنون به بررسی مدل‌سازی فیزیکی شمع تحت بارگذاری جانبی می‌پردازیم. می‌دانیم معادله‌ی حاکم بر تغییر شکل شمع تحت بار جانبی عبارت است از:

$$EI \frac{d^4 y}{dz^4} = -ky \quad (1)$$

که در آن EI صلبیت خمشی شمع، y تغییر مکان افقی شمع، z عمق و k ضریب عکس‌العمل بستر است که متناسب با مدول برشی خاک G است: $k = \beta G$. برای به‌هنجارسازی معادله‌ی ۱ ضرایب بی‌بعدی مطابق رابطه‌ی ۲ تعریف می‌کنیم:

$$\xi = \frac{z}{l}, \quad \lambda = \frac{y}{y_0} \quad (2)$$

که در آن ξ عمق بی‌بعد، l طول شمع، λ تغییر مکان بی‌بعد شمع و y_0 تغییر مکان جانبی شمع در بالای آن است. بنابراین معادله‌ی ۱ چنین بازنویسی می‌شود:

$$\frac{EI}{l^4} \frac{d^4 \lambda}{d\xi^4} = -k\lambda \quad (3)$$

و از آنجا که $k = \beta G$ ، بنابراین $\phi_1 = \frac{Gl^3}{EI}$ پارامتر بی‌بعد مناسبی برای توصیف سختی نسبی شمع - خاک است. بنابراین می‌توان فرض کرد که اگر پارامتر بی‌بعد ϕ_1 برای مدل و اندازه‌ی واقعی یکسان باشد، مدل‌سازی فیزیکی صحیح خواهد بود.^[۵] در ادامه روند مدل‌سازی فیزیکی و تحلیل نتایج حاصله با استفاده از روش PIV بررسی می‌شود.

۲. مصالح و تجهیزات مورد استفاده

۱.۲. جعبه آزمایش

جعبه‌ی چوبی به‌ابعاد $30 \times 80 \times 70$ cm از جنس چوب هفت‌لای اندونزی و به‌ضخامت ۱۸ mm به‌عنوان جعبه‌ی آزمایش مورد استفاده قرار گرفت. دلیل انتخاب این جنس چوب صلبیت زیاد آن است. در وجه جلویی جعبه از یک طاق

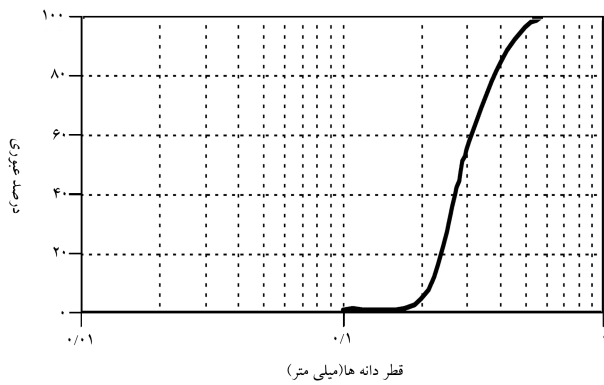
در سال ۱۹۹۸ میلادی مدل گوه کرنش به وجود آمده در جلوی یک شمع تحت بار جانبی مورد بررسی قرار گرفت.^[۱] نتیجه‌ی این مطالعه نشان داد که مدل گوه کرنش، روشی مؤثر در حل مسئله‌ی شمع‌هایی است که به‌طور جانبی بارگذاری شده‌اند.

در سال ۲۰۰۶ میلادی الگوهای گسیختگی خاک ماسه‌یی در اطراف شمع تحت بار جانبی با استفاده از مدل‌سازی فیزیکی و دستگاه CT اسکن صنعتی (عکس‌برداری با استفاده از اشعه ایکس) بررسی شد.^[۲] این آزمایش‌ها در چند تراز بارگذاری که به سر شمع اعمال می‌شد، صورت گرفت. در تحلیل این آزمایش‌ها، علاوه بر عکس‌های مقطع عرضی، تصاویر سه‌بعدی گسیختگی خاک بازسازی شد. سپس با استفاده از تحلیل پردازش تصویری^۳، CT اسکن‌ها تهیه‌شده و الگوهای گسیختگی خاک اطراف شمع‌های تحت بار جانبی بازسازی شد. در شکل ۱ نتایج حاصل از تحلیل پردازش تصویری آورده شده است؛ سطوح گسیختگی کلی در شش جابه‌جایی مختلف نشان داده شده است.^[۳]

آن‌ها به این نتیجه رسیدند که با افزایش بار جانبی اعمالی بر شمع، ناحیه‌ی گسیختگی گسترش یافته و حجم و زاویه‌ی آن زیاد می‌شود. همچنین با افزایش فاصله از سطح خاک، اندازه‌ی ناحیه‌ی گسیختگی کاهش می‌یابد. به‌اعتقاد این دانشمندان شکل ناحیه‌ی گسیختگی در حالت سه‌بعدی تقریباً مخروطی است.^[۳] توجه به تحقیق فوق نشان می‌دهد که دستگاه CT اسکن وسیله‌ی مؤثر برای بررسی مسائل ژئوتکنیکی است، ولی این روش متحمل هزینه‌های بالایی است. اما روش PIV که تا حدود زیادی مشابه این روش است، علاوه بر اقتصادی بودن، تطابق خوبی با آزمایش‌های ژئوتکنیکی دارد و می‌توان به‌جای استفاده از دستگاه CT اسکن، از روش PIV برای تحلیل نتایج استفاده کرد.

عملکرد PIV در اندازه‌گیری جابه‌جایی‌های محیط خاک بسیار خوب است و دارای دقتی در حدود یک‌پانزدهم پیکسل در فضای تصویر است. با PIV، هزاران نقطه‌ی جابه‌جایی می‌تواند در یک میدان دید مشاهده شود؛ علاوه بر این، مکان‌هایی که پیج‌های اندازه‌گیری قرار بگیرند می‌تواند بعد از تغییر شکل خاک تعیین شود که روش را قادر به بهینه‌سازی محل پیج‌ها می‌نماید. دقت روش PIV تابعی از بافت پیج است که به‌وسیله‌ی اندازه‌ی پیج در فضای تصویر، شکل، اندازه، توزیع و تمایز رنگ ذرات خاک در فضای جسم تعیین می‌شود.^[۴]

حال به‌طور اجمالی، صحت استفاده از مدل‌سازی فیزیکی با مقیاس کوچک را بررسی می‌کنیم. اگر مدل‌سازی فیزیکی در مقیاسی غیر از مقیاس واقعی انجام شود، سؤالی اساسی در باره‌ی اعتبار نتایج حاصل از انجام آزمایش بر روی مدل‌های کوچک و تعمیم آن‌ها به مقیاس واقعی مطرح می‌شود. بنابراین توجه به قانون‌های



شکل ۴. نمودار دانه بندی خاک مورد نظر.

آن مطابق رابطه‌ی ۴ است:

$$\frac{L}{T} \geq 4, \quad T = \sqrt[5]{\frac{EI}{n_h}} \quad (4)$$

در این رابطه، L طول مدفون شمع، T ضریب طول، EI سختی خمشی شمع، و n_h مدول ثابت عکس‌العمل افقی بستر است که در این پروژه به صورت تجربی، در حدود 2 Kg/cm^2 در نظر گرفته شده است. با توجه به این که شمع‌های با مقطع مستطیلی دارای ضخامت ناچیز در برابر پهنای، صلبیت کم‌تری دارند و همچنین به دلیل بررسی کیفی بهتر رفتار گروه شمع، مقطع شمع‌ها مستطیلی و با ضخامت خیلی کم انتخاب شده است که در جهت عرض کم‌تر به قسمت جلویی طلق شیشه‌یی نکیه داده می‌شود تا شمع در جهت محور ضعیف تحت بارگذاری قرار گیرد. همچنین به دلیل کم‌تر بودن E آلومینیم نسبت به فولاد، شمع‌های آلومینیمی مورد استفاده قرار گرفت. مشخصات کلی شمع‌های بلند مورد استفاده در آزمایش‌ها در جدول ۲ آمده است.

از آنجا که این نوشتار الگوی تغییر شکل خاک در اطراف گروه شمع که به طور جانبی بارگذاری شده و تأثیر فاصله‌ی شمع‌ها بر آن را بررسی می‌کند، برای دست‌یابی به این منظور از گروه شمع 1×2 که در امتداد بار جانبی با فواصل مختلف شمع‌ها قرار داده می‌شود، استفاده کردیم. بنابراین لازم بود دو شمع توسط کلاهکی به هم وصل شود که برای این منظور از کلاهک آلومینیمی با ابعاد $3 \times 24 \text{ cm}^2$ و ضخامت 2 mm استفاده کردیم. هرکدام از شمع‌ها به وسیله‌ی لولایی به کلاهک متصل می‌شد.

۳. نحوه‌ی انجام آزمایش‌ها

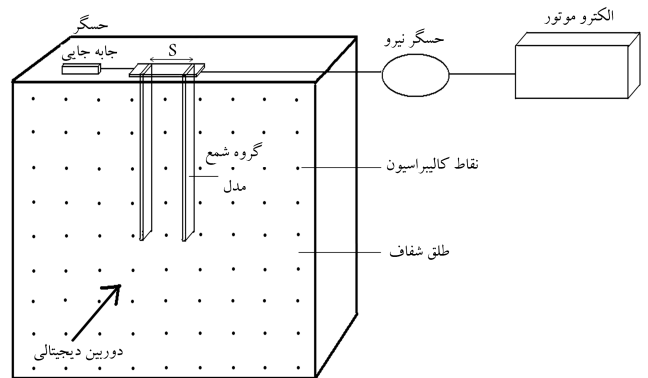
۳.۱. نحوه‌ی ریزش ماسه و جایگذاری گروه شمع

چنان که می‌دانیم فراهم کردن شرایط یکسان برای همه‌ی آزمایش‌ها یکی از نکات اساسی در ساخت مدل‌های فیزیکی است. از این رو یکی از مواردی که باید در همه‌ی آزمایش‌ها رعایت شود یکنواختی در ریزش ماسه است. برای این منظور از یک ظرف پلاستیکی استوانه‌یی با دهانه‌ی دایره‌یی و ارتفاع 35 cm و حجم 6 لیتر استفاده کردیم. بدین ترتیب که ظرف مورد نظر از ماسه پر شده و سپس از ارتفاع حدود 50 cm در روی جعبه آزمایش حرکت داده می‌شد تا در طی این فرایند، ماسه به صورت یکنواخت به داخل جعبه ریخته شود.

بعد از رسیدن سطح ماسه به ارتفاعی که باید گروه شمع جایگذاری شود، کلاهک گروه شمع به صورت مفصلی به اهرم انتقال نیرو بسته شد و هرکدام از دو شمع



شکل ۲. نمایی از محیط آزمایشگاه.



شکل ۳. سازوکار شمایی انجام آزمایش‌ها.

جدول ۱. مشخصات ماسه‌ی مورد آزمایش.

$\gamma_d \text{ max}$	$\gamma_d \text{ min}$	G_s	ϕ
$17,08 \text{ (KN/m}^3\text{)}$	$14,20 \text{ (KN/m}^3\text{)}$	$2,637$	28°

شفاف از جنس پلکسی‌گلاس به ابعاد $70 \times 80 \text{ cm}^2$ و ضخامت 20 mm به منظور مشاهده‌ی تغییر شکل‌های ایجاد شده در خاک استفاده شد. در شکل ۲ نمایی از محیط آزمایشگاه، و در شکل ۳ شمایی از سازوکار انجام آزمایش‌ها نشان داده شده است.

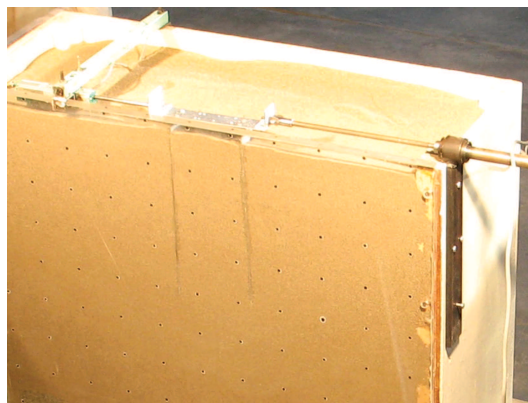
۲.۲. ماسه‌ی مورد آزمایش

به منظور انجام آزمایش‌ها از ماسه‌ی خشک منطقه‌ی صوفیان، واقع در شمال غرب ایران، استفاده شده است. شرح نتایج حاصل از آزمایش‌های لازم برای تعیین مشخصات ماسه در ادامه آمده است.

آزمایش دانه‌بندی خاک: ماسه‌ی مورد استفاده براساس طبقه‌بندی متحد که مورد تأیید استاندارد ASTM نیز هست، دانه‌بندی یکنواخت داشته و جزو ماسه‌ی بد دانه‌بندی شده SP قرار می‌گیرد. در شکل ۴ نمودار منحنی دانه‌بندی خاک، و در جدول ۱ سایر مشخصات ماسه‌ی مورد آزمایش ارائه شده است.

۳.۲. شمع‌های مورد استفاده

در این پروژه از شمع بلند برای انجام آزمایش‌ها استفاده شده است که تعریف نظری



شکل ۵. طریقه‌ی بارگذاری گروه شمع.

در طول تغییر شکل خاک، با استفاده از دوربین دیجیتال تصاویر متوالی از صفحه‌ی خاک گرفته می‌شود و سپس تغییر شکل خاک با استفاده از روش سرعت‌سنجی تصویری ذرات (PIV)، مابین هر جفت تصویر متوالی تعیین می‌شوند. برای به دست آوردن اطلاعات قابل فهم و مفید، بعد از انجام اندازه‌گیری در فضای تصویر، بردارهای جابه‌جایی حاصل با استفاده از تبدیل فتوگرامتریک، از فضای تصویر به فضای جسم منتقل می‌شوند. پارامترهای انتقال براساس مشخصات فنی دوربین، شرایط تصویربرداری و مشخصات پنجره مشاهده و با روش کانون‌یابی تعیین می‌شوند. برای عکس‌برداری از یک دوربین دیجیتال «کانون» از نوع Power shot G_۶ با وضوح تصویر ۷/۱ مگاپیکسل (۳۰۷۲ × ۲۳۰۴) استفاده شد. دوربین با قرارگرفتن روی سه پایه نسبت به سطح افق تراز شد. برای این که عکس‌ها در یک فاصله‌ی زمانی یکسان گرفته و ذخیره شود، از نرم‌افزار Remote capture استفاده شد. برای تأمین نور محیط، از دو عدد پروژکتور ۱۰۰۰ وات مخصوص نورپردازی استفاده شد که با زاویه‌ی ۴۵ درجه در تراز ارتفاعی بالاتر نسبت به محور نوری دوربین مستقر می‌شدند.

۴. نتایج حاصل از انجام آزمایش‌ها

آزمایش‌های یادشده براساس عامل تأثیرگذار در رفتارگروه شمع تحت بارگذاری جانبی و با تغییر فاصله‌ی مرکز به مرکز شمع‌ها انجام گرفت. همچنین به‌منظور مقایسه‌ی رفتار شمع منفرد با رفتارگروه شمع و اندرکنش شمع - خاک - شمع ایجادشده، آزمایشی نیز بر روی شمع منفرد انجام شد. بدین‌منظور شمع بلند با مشخصات مندرج در جدول ۲ یک‌بار به‌صورت منفرد و شش بار به‌صورت گروه شمع دوتایی با فاصله‌ی مرکز به مرکز ۱ تا ۶ برابر پهنا‌ی شمع در امتداد بارگذاری جانبی مورد آزمایش قرار گرفت. برای تمامی آزمایش‌ها میزان تغییر مکان اعمال‌شده به سر شمع تقریباً ۱۰ میلی‌متر است. لازم به توضیح است که در این پروژه شمع‌ها به‌صورت سر آزاد مورد آزمایش قرارگرفتند. نیروی جانبی به‌صورت ایستا توسط دستگاه برش مستقیم به کلاهک گروه شمع و از سمت راست به چپ آن اعمال می‌شود. سپس اطلاعات حاصله توسط نرم‌افزار «مطلب» و برنامه‌ی GeoPIV تحلیل می‌شود.

در اشکال ۶ الی ۱۷ نمودارها و نتایج حاصل از تحلیل برای شمع منفرد، گروه شمع با فاصله‌ی مرکز به مرکز ۱B، ۳B و ۶B آمده است. برای رعایت اختصار، اشکال و نمودارهای مربوط به گروه شمع با فاصله‌ی ۲B، ۴B و ۵B آورده نشده

جدول ۲. مشخصات شمع بلند.

شماره آزمایش	طول <i>L</i> (cm)	پهنا <i>B</i> (cm)	ضخامت <i>t</i> (cm)	سختی خمشی <i>EI</i> (kg.cm ^۲)	(ضریب طول) <i>T</i> (cm)	<i>L/T</i>	فاصله‌ی مرکز به مرکز شمع‌ها در امتداد بار جانبی (s)
۱	۳۰	۳	۰٫۲	۱۴۳۰	۵٫۹	۵٫۱۱	شمع منفرد
۲	۳۰	۳	۰٫۲	۱۴۳۰	۵٫۹	۵٫۱۱	۱B
۳	۳۰	۳	۰٫۲	۱۴۳۰	۵٫۹	۵٫۱۱	۲B
۴	۳۰	۳	۰٫۲	۱۴۳۰	۵٫۹	۵٫۱۱	۳B
۵	۳۰	۳	۰٫۲	۱۴۳۰	۵٫۹	۵٫۱۱	۴B
۶	۳۰	۳	۰٫۲	۱۴۳۰	۵٫۹	۵٫۱۱	۵B
۷	۳۰	۳	۰٫۲	۱۴۳۰	۵٫۹	۵٫۱۱	۶B

به‌صورت عمود بر سطح خاک قرارگرفت. بعد از قائم‌کردن گروه شمع بر سطح خاک و طلق شفاف، با استفاده از چسب آن را در چند نقطه روی طلق ثابت کردیم تا در حین ریزش ماسه از حالت قائم خارج نشود. پس از رسیدن سطح خاک به چسب، چسب برداشته شد. بعد از ریزش ماسه به‌منظور انجام آزمایش‌ها، سطح مدل مسطح و تراز شد.

۲.۳. طریقه‌ی بارگذاری گروه شمع

برای اعمال بار جانبی به گروه شمع از یک الکتروموتور با سرعت ثابت استفاده شد. نیروی مورد نیاز توسط یک اهرم به کلاهک گروه شمع وارد می‌شد. به‌دلیل وجود احتمال انحراف اهرم انتقال نیرو به هنگام آزمایش، اهرم از طرف مقابل به‌وسیله‌ی حلقه‌ی هدایت‌کننده‌ی مخصوص دستگاه برش مستقیم محدود شد. برای نصب این حلقه روی جعبه‌ی آزمایش، آن را روی تسمه‌ی فولادی جوش کرده و با پیچ به جعبه‌ی آزمایش متصل کردیم. در شکل ۵ نمایی از طریقه‌ی بارگذاری گروه شمع نشان داده شده است.

۳.۳. عکس‌برداری دیجیتال و پردازش تصویری

این فناوری جدید با ترکیب عکاسی دیجیتال، پردازش تصویری PIV، فتوگرامتری نزدیک برد و کانون‌یابی، این امکان را فراهم می‌کند تا جابه‌جایی‌های خاک بدون نصب نقاط هدف درونی و با دقتی برابر ۱/۱۵۰۰۰۰ میدان دید شناسایی شوند.

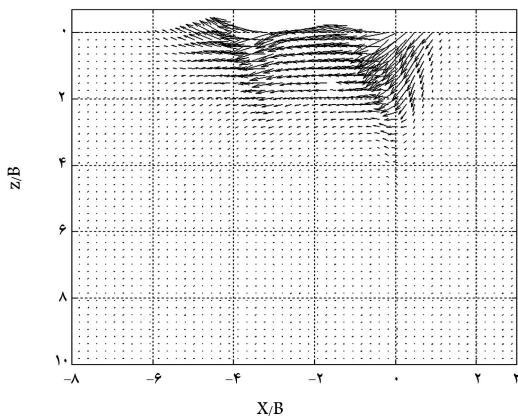
۱.۴. مقایسه‌ی بردارهای جابه‌جایی خاک اطراف شمع منفرد و گروه شمع

برای نشان‌دادن الگوی تغییر شکل‌های ایجادشده در پشت و جلوی شمع منفرد و گروه شمع، و نیز مقایسه‌ی آن‌ها، از بردارهای جابه‌جایی کل ایجادشده در نقاط مختلف (اشکال ۶ تا ۹) استفاده می‌کنیم. شایان ذکر است که در این اشکال به لحاظ وضوح بهتر بردارهای جابه‌جایی، این بردارها با بزرگ‌نمایی ۵ برابر ترسیم شده‌اند (اندازه‌ی بردارهای جابه‌جایی ۵ برابر شده است). همچنین در هر مورد زاویه‌ی بردارهای جابه‌جایی کل نسبت به افق برحسب درجه در تراز $z/B=0$ رسم شده است (شکل ۱۰). چنان‌که در شکل‌های ۶ تا ۹ ملاحظه می‌شود دانه‌های خاک قرارگرفته در فواصل دور از شمع جابه‌جا نشده و در محل اولیه‌ی خود باقی می‌مانند. بنابراین اندازه بردارهای جابه‌جایی مربوط به این دانه‌ها صفر است. اما هرچه به محل شمع نزدیک‌تر می‌شویم، دانه‌های خاک قرارگرفته در نزدیک شمع جابه‌جایی بیشتری از خود نشان می‌دهند و بنابراین اندازه بردارهای جابه‌جایی این دانه‌ها بزرگ‌تر است. همچنین با توجه به شکل‌های مذکور درمی‌یابیم که دانه‌های خاک قرارگرفته در مجاورت راست هرکدام از شمع‌ها با زاویه‌ی تند رو به پایین (زاویه‌ی منفی نسبت به افق) حرکت می‌کنند، در حالی که دانه‌های خاک موجود در مجاورت چپ آن‌ها با زاویه‌ی ملایم‌تری رو به بالا (زاویه‌ی مثبت نسبت به افق) جابه‌جا می‌شوند؛ این امر با توجه به جهت اعمال نیروی جانبی (از راست به چپ) طبیعی است. به دلیل

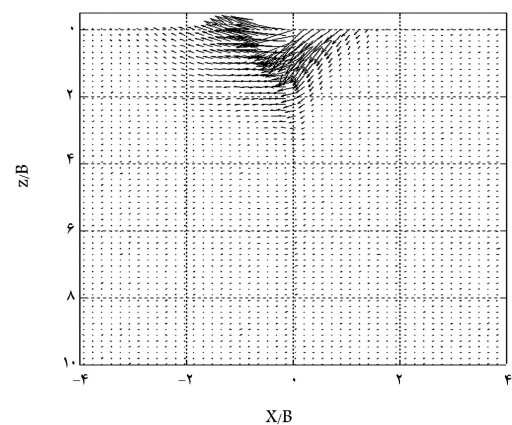
است. یادآور می‌شود که در ادبیات فنی به نزدیک‌ترین ردیف شمع موجود در گروه به نیروی جانبی «ردیف عقب»، و به دورترین ردیف شمع از نیروی جانبی «ردیف جلو» گفته می‌شود. چنان‌که پیش‌تر نیز اشاره شد، کلاً ۷ آزمایش بر روی شمع منفرد و گروه شمع انجام شد که نتایج حاصل از آن‌ها چنین مورد بررسی قرار می‌گیرد:

۱. مقایسه‌ی بردارهای جابه‌جایی خاک اطراف شمع منفرد و گروه شمع؛
۲. مقایسه‌ی کرنش - برشی ایجادشده در خاک اطراف شمع منفرد و گروه شمع؛
۳. مقایسه‌ی میدان جابه‌جایی ایجادشده و محدوددهی تأثیر آن در اطراف شمع منفرد و گروه شمع؛
۴. مقایسه‌ی منحنی‌های بار - تغییر مکان مکان شمع منفرد و گروه شمع.

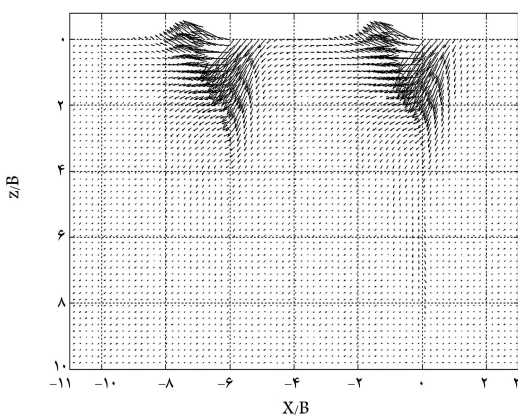
در ادامه، تمامی موارد بالا به تفصیل مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. لازم به ذکر است که در تمامی اشکال ۶ الی ۱۶ نقطه $(x/B=0)$ معرف محل قرارگیری شمع منفرد و شمع نزدیک به بار (شمع عقب) در گروه شمع است. بدیهی است که در این اشکال محل شمع دورتر از بار (شمع جلو) در $x/B=-1$ برای حالت گروه شمع با فاصله‌ی مرکز به مرکز $1B$ شمع‌ها یا $x/B=-3$ ، برای حالت گروه شمع با فاصله‌ی $3B$ شمع‌ها یا $x/B=-6$ ، برای حالت گروه شمع با فاصله $6B$ شمع‌هاست. همچنین در اشکال ۶ الی ۹ و ۱۱ الی ۱۶ مبدأ محور قائم $(z/B=0)$ به تراز سطح خاک انتقال یافته است.



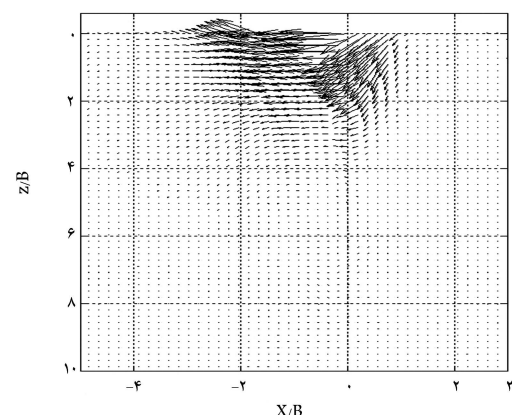
شکل ۸. بردارهای جابه‌جایی کل خاک برای گروه شمع ۳B.



شکل ۶. بردارهای جابه‌جایی کل خاک برای شمع منفرد.



شکل ۹. بردارهای جابه‌جایی کل خاک برای گروه شمع ۶B.



شکل ۷. بردارهای جابه‌جایی کل خاک برای گروه شمع ۱B.

درمی یابیم که چون در جلو شمع‌ها $\theta < 45^\circ$ است، پس $\tan \theta < 1$ خواهد بود. بنابراین با توجه به تعریف θ در شکل ۱۰ و با تعریف $\tan \theta$ به صورت نسبت مؤلفه‌های قائم بردار جابه‌جایی به مؤلفه‌ی افقی آن، به این نتیجه می‌رسیم که در جلو شمع‌های تحت بار جانبی مؤلفه‌ی افقی بردارهای جابه‌جایی خاک بزرگ‌تر از مؤلفه‌ی قائم آن‌هاست.

در شکل ۱۱ منحنی جابه‌جایی سطح خاک اطراف شمع منفرد و گروه‌های شمع با فواصل مختلف نشان داده شده است. چنان‌که در هر چهار منحنی ترسیمی در این شکل ملاحظه می‌شود، خاک‌های سطحی موجود در فواصل دور از شمع‌ها جابه‌جا نشده و در همان تراز $z/B=0$ باقی مانده‌اند. خاک‌های موجود در عقب شمع‌ها رو به پایین و خاک‌های موجود در جلو شمع‌ها رو به بالا جابه‌جا می‌شوند. همچنین در عقب شمع‌ها به دلیل زاویه‌ی تندتر بردارهای جابه‌جایی، خاک سطحی جابه‌جایی قائم بیشتری دارد. اما در جلو شمع‌ها به دلیل زاویه‌ی ملایم‌تر بردارهای جابه‌جایی، جابه‌جایی افقی خاک بیشتر از جابه‌جایی قائم آن است. این نتیجه از شکل ۱۰ نیز به دست آمده بود. به دلیل وجود اندرکنش شمع - خاک - شمع در گروه شمع ۱B، منحنی جابه‌جایی خاک سطحی مربوط به آن نه در جلو شمع عقب به بالا رفته و نه در عقب شمع جلو به پایین رفته است؛ بنابراین بین دو شمع منحنی تقریباً به صورت افقی است. با افزایش فاصله‌ی شمع‌ها در گروه، منحنی جابه‌جایی سطح خاک اطراف گروه شمع به منحنی مربوط به شمع منفرد نزدیک‌تر می‌شود تا این‌که در حالت گروه شمع ۶B -- به دلیل عدم وجود اندرکنش بین شمع‌ها --

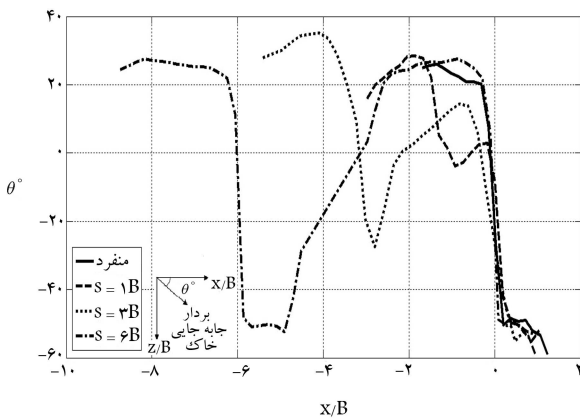
تغییر جهت ناگهانی بردارهای جابه‌جایی خاک در محل شمع‌ها، یک پرش ناگهانی در محل شمع‌ها در هر چهار منحنی ترسیم شده در شکل ۱۰ به وجود می‌آید که با توجه به این‌که این تغییر جهت در محل شمع عقب محسوس‌تر از شمع جلو است، لذا پرش رخ داده در محل شمع عقب نیز بزرگ‌تر از آن در محل شمع جلو خواهد بود. ولی در حالت فاصله‌ی ۶B شمع‌ها، تغییر جهت ناگهانی در محل شمع جلو مشابه شمع عقب است. این بدان معناست که در حالت گروه شمع ۶B اثر گروه از بین رفته و شمع‌ها به صورت منفرد رفتار می‌کنند.

نکته‌ی قابل توجه، جابه‌جایی تقریباً افقی دانه‌های خاک قرارگرفته بین دو شمع در شکل ۷ است که هم‌جهت با بار جانبی است. چنان‌که ملاحظه می‌شود، زاویه‌ی بردارها در فاصله‌ی بین دو شمع در منحنی مربوط به گروه شمع ۱B در شکل ۱۰ تقریباً صفر است. تفاوتی که در حالت گروه شمع ۳B وجود دارد، این است که در این حالت به دلیل زیادتر بودن فاصله‌ی شمع‌ها در گروه، این فرصت به وجود می‌آید که جابه‌جایی دانه‌های خاک موجود در مجاورت چپ شمع عقب رو به بالا و جابه‌جایی دانه‌های قرارگرفته در مجاورت راست شمع جلو رو به پایین باشد. این موضوع را می‌توان از شکل ۸ و منحنی مربوط به آن در شکل ۱۰ نیز دریافت. لذا دیده می‌شود که با افزایش فاصله‌ی شمع‌ها در گروه، اندرکنش بین شمع‌ها کاهش می‌یابد و رفتار شمع‌ها به رفتار شمع منفرد نزدیک‌تر می‌شود. با توجه به شکل ۹ و منحنی مربوط به آن در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود که در فاصله‌ی ۶B شمع‌ها، دانه‌های خاک در اطراف هرکدام از شمع‌ها همانند دانه‌های اطراف شمع منفرد جابه‌جا می‌شوند و شمع‌ها تأثیری بر رفتار یکدیگر ندارند.

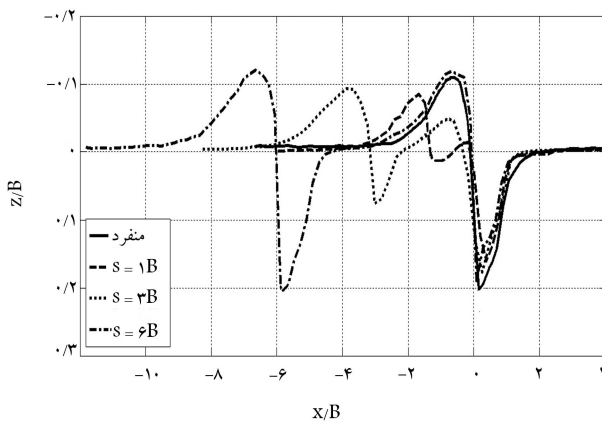
نکته‌ی دیگر این است که برآورد شدن بار جانبی به سرشمع باند، بیشترین جابه‌جایی افقی نیز در سرشمع رخ می‌دهد و این جابه‌جایی افقی در قسمت‌های پایین‌تر شمع تدریجاً کاهش می‌یابد تا این‌که از عمق حدود $z=4B$ به پایین، شمع هیچ جابه‌جایی افقی از خود نشان نمی‌دهد، لذا بردارهای جابه‌جایی دانه‌های قرارگرفته در سطح خاک نیز بیشترین اندازه را دارند و به تدریج در عمق‌های پایین‌تر، اندازه‌ی بردارها کم‌تر شده و زاویه‌ی آن‌ها نیز ملایم‌تر می‌شوند تا این‌که از عمق حدود $z=4B$ به پایین اندازه‌ی بردارهای جابه‌جایی به صفر می‌رسد (شکل‌های ۶ تا ۹).

به منظور مقایسه‌ی زوایای بردارهای جابه‌جایی ایجادشده در اطراف شمع منفرد و گروه شمع با فواصل مختلف، این زوایا در شکل ۱۰ برای تراز $z/B=0$ (سطح خاک) رسم شده است. شایان ذکر است که در این شکل محور قائم معرف زاویه‌ی مورد نظر نسبت به افق (برحسب درجه) است. همچنین در این شکل مقدار مثبت زاویه برای بردارهای جابه‌جایی رو به بالا و مقدار منفی آن برای بردارهای جابه‌جایی رو به پایین در نظر گرفته شده است. چنان‌که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود، در محل شمع‌ها یک پرش ناگهانی در زاویه‌ی بردارهای جابه‌جایی به وجود می‌آید که این پرش برای شمع عقب بزرگ‌تر از شمع جلو است. به عبارت دیگر، در محل شمع‌ها زاویه‌ی بردارهای جابه‌جایی خاک یک‌باره از منفی به مثبت تبدیل می‌شوند که این امر ناشی از رو به پایین بودن بردارهای مذکور در عقب شمع‌ها، و رو به بالا بودن آن‌ها در جلو شمع‌هاست. مشاهده می‌شود که در فاصله‌ی ۶B شمع‌ها، اثر گروه از بین رفته و پرش مذکور در محل هرکدام از شمع‌ها یکسان است. بدیهی است در فواصل بیش از ۶B نیز اثر گروه وجود نخواهد داشت.

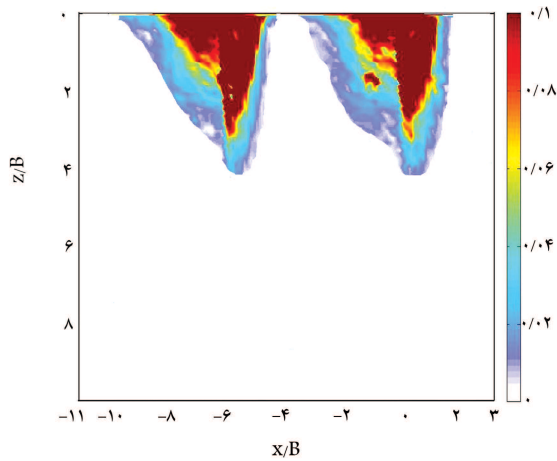
نکته‌ی دیگر این‌که با توجه به زاویه‌ی تقریباً صفر نمودار مربوط به گروه شمع ۱B در بین دو شمع، به این نتیجه می‌رسیم که در فواصل نزدیک‌تر شمع‌ها در گروه، خاک بین شمع‌ها به صورت افقی جابه‌جا شده و جابه‌جایی قائم ندارد. به عبارت دیگر رفتار دو شمع شبیه رفتار شمع منفرد خواهد بود. همچنین با توجه به شکل ۱۰



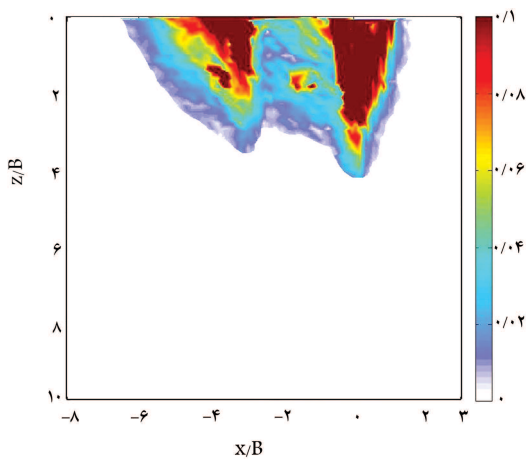
شکل ۱۰. زوایای بردارهای جابه‌جایی کل خاک در $z/B=0$.



شکل ۱۱. منحنی جابه‌جایی سطح خاک اطراف شمع منفرد و گروه شمع.



شکل ۱۴. کرنش برشی خاک برای گروه شمع ۶B.



شکل ۱۵. کرنش برشی خاک برای گروه شمع ۳B.

کرنش در این اشکال، وجود اندرکنش بین شمعا و تأثیر یک شمع روی رفتار شمع دیگر کاملاً مشهود است. همچنین با مقایسه‌ی شکل‌های مذکور می‌توان دریافت که به دلیل زیادتر بودن فاصله‌ی شمعا در شکل ۱۴، تداخل بین گوه‌های کرنش و در نتیجه اندرکنش بین شمعا کم‌تر از شکل ۱۳ است و رفتار شمعا به رفتار شمع منفرد نزدیک‌تر است. در حالت گروه شمع با فاصله‌ی ۶B (شکل ۱۵) گوه‌های کرنش هیچ تداخلی با هم ندارند و رفتار هر دو شمع یکسان و همانند رفتار شمع منفرد است.

۳.۴. مقایسه‌ی میدان جابه‌جایی ایجادشده و محدوده‌ی تأثیر آن در

اطراف شمع منفرد و گروه شمع

برای مقایسه‌ی میدان جابه‌جایی ایجادشده و محدوده‌ی تأثیر آن در اطراف شمع منفرد و گروه شمع، از شکل ۱۶ استفاده می‌کنیم که در آن، این محدوده برای کمیته جابه‌جایی ۰/۵ میلی‌متر رسم شده است.

در هر یک از منحنی‌های این شکل جابه‌جایی دانه‌های خاک موجود در داخل محدوده‌ی تأثیر، بیشتر از ۰/۵ میلی‌متر است. جابه‌جایی مرز روی منحنی ۰/۵ میلی‌متر، و جابه‌جایی ناحیه‌ی خارج از محدوده کم‌تر از ۰/۵ میلی‌متر است. در شکل ۱۶ مشاهده می‌شود که خاک‌های موجود در اطراف قسمت پایین شمع جابه‌جا

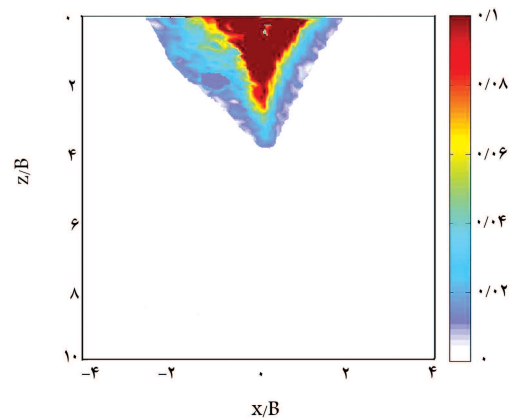
منحنی مربوطه برای هر شمع مشابه منحنی جابه‌جایی خاک سطحی اطراف شمع منفرد است.

۲.۴. مقایسه‌ی کرنش برشی ایجادشده در خاک اطراف شمع منفرد و

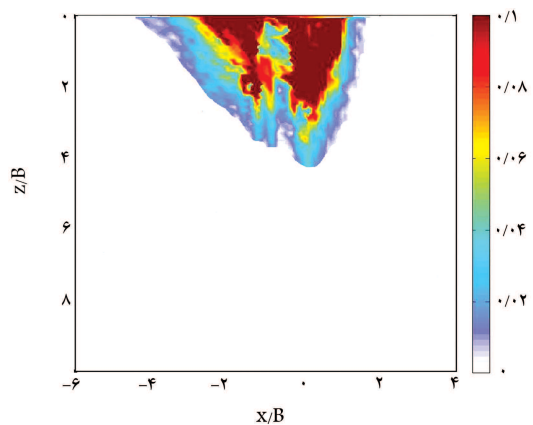
گروه شمع

در شکل‌های ۱۲ الی ۱۵ کرنش برشی ایجادشده در خاک اطراف شمع منفرد، گروه شمع با فاصله‌ی ۱B، ۳B، ۶B و ۱۵B رسم شده است. چنان‌که مشاهده می‌شود کرنش برشی خاک در محل شمع بیشترین مقدار را دارد و هرچه از محل شمع به اطراف حرکت کنیم مقدار آن کم‌تر می‌شود. همچنین با توجه به اشکال ۱۲ الی ۱۵ دیده می‌شود که در سرشمع‌ها کرنش برشی بیشترین مقدار را دارد و هرچه از سرشمع‌ها به پایین حرکت کنیم کرنش برشی تدریجاً کاهش می‌یابد تا این‌که از عمق $z=4B$ به پایین دانه‌های خاک هیچ کرنش برشی از خود نشان نمی‌دهند. با توجه به مطالب گفته‌شده، چون شمع بلند از این عمق به پایین جابه‌جا نشده کرنش برشی در خاک ایجاد نمی‌شود. با توجه به جهت نیروی اعمالی (راست به چپ)، گوه کرنش به وجود آمده متماثل به سمت چپ است. این موضوع را می‌توان در اشکال ۱۲ الی ۱۵ مشاهده کرد.

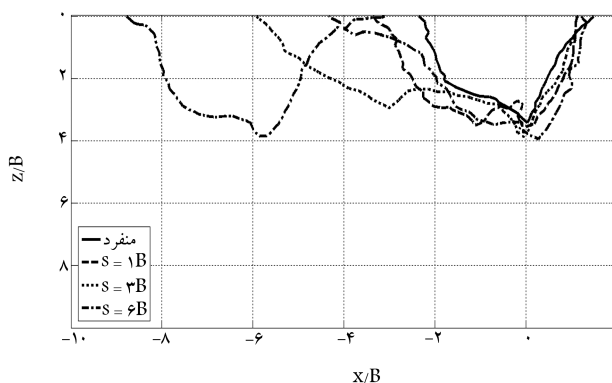
با توجه به اشکال ۱۳ و ۱۴ درمی‌یابیم که به دلیل بزرگ‌تر بودن پرش ناگهانی زاویه‌ی بردارهای جابه‌جایی در شمع عقب نسبت به شمع جلو، کرنش برشی ایجادشده در خاک اطراف شمع عقب بیشتر از شمع جلو است. با توجه به تداخل گوه‌های



شکل ۱۲. کرنش برشی خاک برای شمع منفرد.



شکل ۱۳. کرنش برشی خاک برای گروه شمع ۱B.



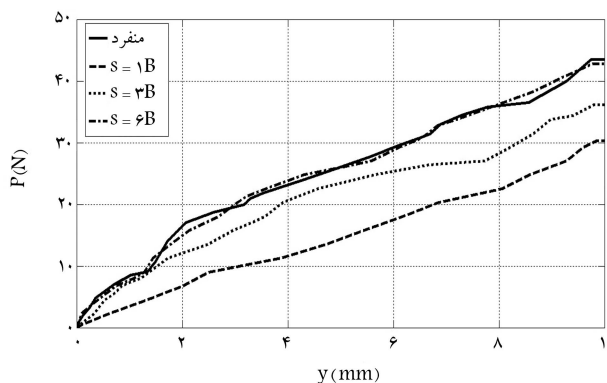
شکل ۱۶. محدوده‌ی تأثیر با کمیته جابه‌جایی ۰/۵ میلی‌متر.

نشده و در محل اولیه‌ی خود باقی می‌مانند که این ناشی از عدم جابه‌جایی شمع بلند از عمق گیرداری ($z=4B$) به پایین است.

چنان‌که در شکل ۱۶ دیده می‌شود، چه در شمع منفرد و چه در گروه شمع میدان جابه‌جایی در سمت چپ گسترش زیادتری دارد که این مسئله با جهت نیروی اعمالی (راست به چپ) مطابقت دارد. همچنین مشاهده می‌شود که هر قدر فاصله‌ی شمع‌ها در گروه بیشتر شود، تداخل تنش بین شمع‌ها و در نتیجه اندرکنش بین آن‌ها کاهش می‌یابد و در نهایت در فاصله‌ی ۶B شمع‌ها اثر گروه از بین رفته و شمع‌ها تأثیری بر رفتار یکدیگر ندارند. زیرا چنان‌که در شکل ۱۶ مشاهده می‌شود در گروه شمع با فاصله‌ی ۳B میدان جابه‌جایی در وسط دو شمع به بالا رفته و عمق کم‌تری از خاک وسط دو شمع در این حالت جابه‌جا می‌شود. همچنین در گروه شمع با فاصله‌ی ۶B میدان جابه‌جایی دو شمع دو محدوده‌ی جدا از هم است و با هم تداخلی ندارند -- مطالبی که به لحاظ نظری نیز صحیح است. (اگر فاصله‌ی شمع‌ها در گروه در امتداد بارگذاری جانبی بیشتر یا مساوی ۶B باشد، شمع‌ها در گروه به صورت منفرد رفتار کرده و هیچ اثری بر یکدیگر نخواهند داشت). [۸-۶]

۴.۴. مقایسه‌ی منحنی‌های بار - تغییر مکان در شمع منفرد و گروه شمع

در شکل ۱۷ منحنی‌های نیروی جانبی - تغییر مکان افقی برای شمع منفرد و گروه شمع رسم شده است. در این شکل محور قائم بیان‌گر نیروی جانبی اعمالی بر سر شمع منفرد و کلاهک گروه شمع برحسب نیوتن، و محور افقی بیان‌گر تغییر مکان افقی



شکل ۱۷. منحنی بار - تغییر مکان شمع منفرد و گروه شمع.

آن‌ها برحسب میلی‌متر است. یادآور می‌شود که رسم این منحنی برای گروه شمع با فرض صلب بودن کلاهک و در نتیجه تغییر مکان افقی یکسان در هر دو شمع موجود در گروه صورت گرفته است. چنان‌که در هر چهار منحنی رسم شده در شکل ۱۷ دیده می‌شود با افزایش نیروی جانبی، تغییر مکان افقی شمع‌ها نیز بیشتر می‌شود. به دلیل اندرکنش بسیار زیاد شمع‌ها در حالت گروه شمع ۱B ملاحظه می‌شود که منحنی مربوط به آن پایین‌تر از منحنی‌های دیگر است. با افزایش فاصله‌ی شمع‌ها در گروه منحنی بار - تغییر مکان تدریجاً بالاتر می‌رود تا این‌که در حالت گروه شمع ۶B به دلیل عدم وجود اندرکنش بین شمع‌ها منحنی مربوط به آن مشابه منحنی مربوط به شمع منفرد است. چرا که می‌دانیم به دلیل وجود اندرکنش شمع - خاک - شمع در گروه، به‌ازای بار جانبی یکسان وارده به هر شمع، تغییر مکان شمع در گروه بیشتر از تغییر مکان شمع منفرد است. با افزایش فاصله‌ی شمع‌ها در گروه تأثیر شمع‌ها بر یکدیگر کاهش می‌یابد و در نتیجه تغییر مکان شمع‌ها در گروه به تغییر مکان شمع منفرد نزدیک‌تر می‌شود.

۵. نتیجه‌گیری

- با افزایش فاصله مرکز به مرکز شمع‌ها در یک گروه در امتداد بارگذاری جانبی، اثرات اندرکنش شمع - خاک - شمع کم‌تر شده و رفتار شمع‌ها و خاک اطراف آن‌ها به رفتار شمع منفرد و خاک اطراف آن نزدیک‌تر می‌شود. در فاصله مرکز به مرکز ۶B شمع‌ها اثر گروه از بین رفته و شمع‌ها به صورت منفرد رفتار می‌کنند.
- در شمع‌های بلند مورد آزمایش، از عمق حدود $z=4B$ به پایین، شمع جابه‌جایی افقی از خود نشان نمی‌دهد. خاک اطراف شمع بلند نیز متناسب با تغییر مکان شمع جابه‌جا می‌شود.
- در جلو شمع‌های تحت بار جانبی، به دلیل زاویه‌ی ملایم‌تر بردارهای جابه‌جایی، جابه‌جایی افقی خاک بیشتر از جابه‌جایی قائم آن است. اما در عقب شمع‌ها به دلیل زاویه‌ی تندتر بردارهای جابه‌جایی، خاک جابه‌جایی قائم بیشتری دارد. از سطح خاک به پایین، به تدریج جابه‌جایی‌های افقی و قائم خاک کم‌تر می‌شوند.
- بر اثر اعمال بار جانبی به گروه شمع، زاویه‌ی بردارهای جابه‌جایی خاک در اطراف هر کدام از دو شمع به یک‌باره تغییر قابل توجهی پیدا می‌کند که این تغییر در محل شمع نزدیک‌تر به بار جانبی بیشتر است. بنابراین کرنش برشی ایجاد شده در خاک اطراف آن نیز بیشتر از کرنش برشی به وجود آمده در خاک اطراف شمع دورتر از بار است. با افزایش فاصله‌ی شمع‌ها در گروه، کرنش برشی ایجاد شده در خاک اطراف شمع دورتر از بار نیز بیشتر می‌شود.
- بر اثر اعمال بار جانبی به گروه شمع، خاک‌های سطحی جابه‌جایی بیشتری داشته و زاویه‌ی بردارهای جابه‌جایی نیز تندتر است. اما در عمق‌های پایین‌تر اندازه‌ی بردارهای جابه‌جایی خاک کوچک‌تر شده و زاویه‌ی آن‌ها نیز ملایم‌تر می‌شود.
- با افزایش فاصله‌ی شمع‌ها در گروه، عمق میدان جابه‌جایی خاک، مابین دو شمع به تدریج کم‌تر می‌شود، تا این‌که در فاصله‌ی ۶B و بیشتر شمع‌ها، خاک موجود در وسط دو شمع هیچ جابه‌جایی ندارد.
- در فواصل کم‌تر شمع‌ها در گروه، دانه‌های خاک مابین شمع‌ها بر اثر اعمال بار جانبی به گروه، صرفاً به صورت افقی جابه‌جا می‌شوند. با افزایش فاصله‌ی شمع‌ها الگوی تغییر شکل خاک در اطراف هر کدام از شمع‌ها به الگوی تغییر شکل خاک اطراف شمع منفرد نزدیک‌تر می‌شود.

پانوشت

1. particle image velocimetry (PIV)
2. group effect
3. image processing

منابع

1. Tominaga, K.; Yamagata, K. and Kishida, H. "Horizontal displacement of soil in front of laterally loaded piles", *Soils and Foundations*, **23**(3), pp. 80-90 (1983).
2. Ashour, M.; Norris, G. and Pilling, P. "Lateral loading of a pile in layered soil using the strain wedge model", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **124**(4), pp. 303-315 (1998).
3. Otani, J.; Pham, K.D. and Sano, J. "Investigation of failure patterns in sand due to laterally loaded pile using X-ray CT", *Soils and Foundations*, **46**(4), pp. 529-535 (2006).
4. White, D.J.; Take, W.A. and Bolton, M.D. "Soil deformation measurement using particle image velocimetry (PIV) and photogrammetry", *Geotechnique*, **53**(7), pp. 619-631 (2003).
5. Wood, D.M., *Geotechnical Modelling*, John Wiley & Sons, pp. 488 (2004).
6. Prakash, Sh. and Sharma, H., *Pile Foundations in Engineering Practice*, John Wiley & Sons, pp. 733 (1989).
7. Reese, L. and Van Impe, W., *Single Piles and pile Groups Under Lateral Loading*, A.A. Balkema, pp. 463 (2001).
8. Rollins, K.M.; Olsen, R.J.; Egbert, J.J.; Jensen, D.H.; Olsen, K.G. and Garrett, B.H. "Pile spacing effects on lateral pile group behavior: Load tests", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **132**(10), pp. 1262-1271 (2006).