



سازمان بنادر و دریانوردی به عنوان تنها مرجع حاکمیتی کشور در امور بندری، دریایی و کشتی‌رانی بازرگانی به منظور ایفای نقش مرجعیت دانشی خود و در راستای تحقق راهبردهای کلان نقشه جامع علمی کشور مبنی بر "حمایت از توسعه شبکه‌های تحقیقاتی و تسهیل انتقال و انتشار دانش و سامان‌دهی علمی" از طریق "استانداردسازی و اصلاح فرایندهای تولید، ثبت، داوری و سنجش و ایجاد بانک‌های اطلاعاتی یکپارچه برای نشریات، اختراعات و اکتشافات پژوهشگران"، اقدام به ارایه این اثر در سایت SID می‌نماید.



سازمان بنادر و دریانوردی





نهمین همایش بین المللی سواحل، بنادر و سازه های دریایی
ICOPMAS 2010
 10-8 آذر ماه (تهران)



مطالعه اثر Shadowing در گروه شمع تحت بارگذاری جانبی

مسعود حاجی علیلو، استادیار، دانشگاه تبریز، mhbonab@gmail.com

حبیب آذرنیا شاهگلی، کارشناس ارشد، دانشگاه تبریز، hb_azarnya@yahoo.com

بابک دادخواه، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه تبریز، babak.dadkhah@gmail.com

کلید واژه: بار جانبی، گروه شمع، مدلسازی فیزیکی، Shadowing، PIV

1- مقدمه

پی‌های شمعی بطور وسیعی در سازه‌های فرا ساحلی و ساحلی مانند سکوه‌های دریایی (سکوه‌های شابلونی، سکوه‌های وزنی و ...)، سازه‌های پهلوگیر و دولفین‌های مهاري مورد استفاده قرار می‌گیرند. بارهای وارده به شمعها از نوع محوری، جانبی و لنگر خمشی بوده که بار محوری می‌تواند از نوع کششی و 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 صرفنظر کردن می‌باشد. لیکن در مواردی شمع‌ها و گروه شمع‌ها، تحت بارهای جانبی قابل توجهی قرار می‌گیرند. به عنوان مثال، در اسکله‌ها و سازه‌های بندری، در سازه‌های نگهدارنده متکی بر شمع‌ها، در پی‌های شمعی واقع در مناطق زلزله خیز و در پایه پلهای متکی بر شمع، شمع‌ها تحت نیروهای افقی قرار می‌گیرند. برای انتقال بار سازه به خاک، شمعها در اغلب اوقات به صورت گروه به کار گرفته می‌شوند. به دلیل وجود اندرکنش بین شمعهای مجاور، رفتار شمعها در گروه بسته به موقعیت آنها تغییر می‌کند. وقتی که شمعها نزدیک یکدیگر اجرا شوند، منطقی است فرض شود که تنشهای انتقالی از طریق شمعها به زمین، یکدیگر را پوشش می‌دهند. این مسئله می‌تواند باعث کاهش ظرفیت باربری گروه شمع گردد. به طور ایده‌آل، فاصله شمعها در گروه باید طوری انتخاب شود که ظرفیت باربری گروه شمع کمتر از مجموع ظرفیت‌های باربری تک‌تک شمعها نشود. با توجه به مطالب فوق، ضروری است که رفتار گروه شمع تحت بار جانبی مطالعه شود.

تا بحال یک سری از مطالعات عددی برای بررسی رفتار گروه شمع انجام گرفته است. حال آنکه به علت هزینه‌های زیاد، آزمایشات صحرایی خیلی کمی در این زمینه صورت پذیرفته است. Brown و همکاران آزمایشات بار جانبی مختلفی را روی گروه شمع انجام دادند و به این نتیجه رسیدند که شمعهای موجود در ردیفهای عقبی گروه، مقاومت کمتری در برابر بار جانبی نسبت به شمعهای ردیف جلو دارند. این امر به سبب اندرکنش شمع-خاک-شمع است که در گروه شمع رخ می‌دهد [1]. همچنین آزمایشاتی با استفاده از دستگاه سانتریفوژ برای بررسی رفتار گروه شمع انجام شده است. McVay و همکاران برای مطالعه اثرات اندرکنش در گروه، آزمایشات بار جانبی را روی گروه شمع مدفون در ماسه انجام دادند [2]. اخیراً رفتار سه بعدی خاک اطراف شمع منفرد به طور جانبی بارگذاری شده با استفاده از مدلسازی فیزیکی و روش PIV مطالعه شده است [3].

در این مقاله رفتار خاک اطراف گروه شمع تحت بار جانبی در ماسه در آزمایشگاه روی مدلی با مقیاس کوچک با استفاده از مدلسازی فیزیکی و روش PIV (Particle Image Velocimetry) به صورت سه بعدی بررسی شده است. اثر Shadowing (اندرکنش بین شمعها) در گروه شمع نیز در این مطالعه مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. آزمایشات بار جانبی روی گروه شمع با فواصل مختلف انجام شد. در هر مرحله از بارگذاری به طور همزمان توسط دو دوربین از نماهای روبرو و بالای جعبه آزمایش از تغییر شکل گروه شمع و خاک اطراف آن عکسبرداری دیجیتال صورت گرفت. بدین منظور یکی از دوربین‌ها به صورت قائم در روبروی جعبه آزمایش و دیگری به صورت افقی در بالای آن قرار داده شده بود. به منظور ارزیابی رفتار خاک اطراف گروه شمع در هر سه بعد، پردازش تصویری عکسهای گرفته شده انجام پذیرفت. سپس داده‌های حاصل با استفاده از نرم افزار Matlab و برنامه GeoPIV تجزیه و تحلیل گردید که در این مقاله نتایج بدست آمده از آنها بحث و بررسی می‌شود.

GeoPIV یک سیستم اندازه گیری تغییرشکل بر اساس سرعت سنجی تصویری ذرات و فتوگرامتری نزدیک برد می باشد که برای استفاده در آزمایشات ژئوتکنیکی توسط White و همکاران گسترش پیدا کرده است و علاوه بر اقتصادی بودن، تطابق خوبی نیز با آزمایشات ژئوتکنیکی دارد [4].

2- مدلسازی فیزیکی

اگر مدلسازی فیزیکی در مقیاسی غیر از مقیاس واقعی انجام شود، سوالی اساسی درباره اعتبار نتایج حاصله از انجام آزمایش بر روی مدل‌های کوچک و تعمیم آنها به مقیاس واقعی مطرح می شود. بنابراین توجه به قانونهای مقیاسی مناسب و تحلیل ابعادی برای کنترل آنها ضروری است. محاسن استفاده از مدلسازی آزمایشگاهی با مقیاس کوچک عبارتند از کنترل کامل بر همه جزئیات مدل، امکان انتخاب خاک مورد آزمایش، امکان انتخاب شرایط مرزی و بارگذاری مدلها و در نتیجه افزایش دقت در نحوه اعمال بارگذاری، نیاز به خاک با مقدار کم، امکان انجام آزمایشات زیاد و تکرار مشاهدات و مطالعه تاثیر تغییر پارامترهای کلیدی، و در نهایت هزینه بسیار کمتر نسبت به آزمایشات با مقیاس واقعی [5]. اکنون به بررسی مدلسازی فیزیکی شمع تحت بارگذاری جانبی می پردازیم. معادله دیفرانسیل حاکم بر تغییرشکل شمع تحت بار جانبی به صورت زیر می باشد:

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

که در آن EI صلبیت خمشی شمع، y تغییرمکان افقی شمع، z عمق و k ضریب عکس العمل افقی بستر می باشد که متناسب با مدول برشی خاک G است $k = \beta G$. β یک ضریب ثابت است. برای نرمالایز کردن معادله (1) ضرایب بی بعدی به صورت زیر تعریف شده است:

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

که در آن، ξ عمق بی بعد، l طول شمع، λ تغییرمکان بی بعد شمع و y_0 تغییرمکان جانبی سر شمع است. بنابراین معادله (1) به صورت زیر بازنویسی می شود:

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

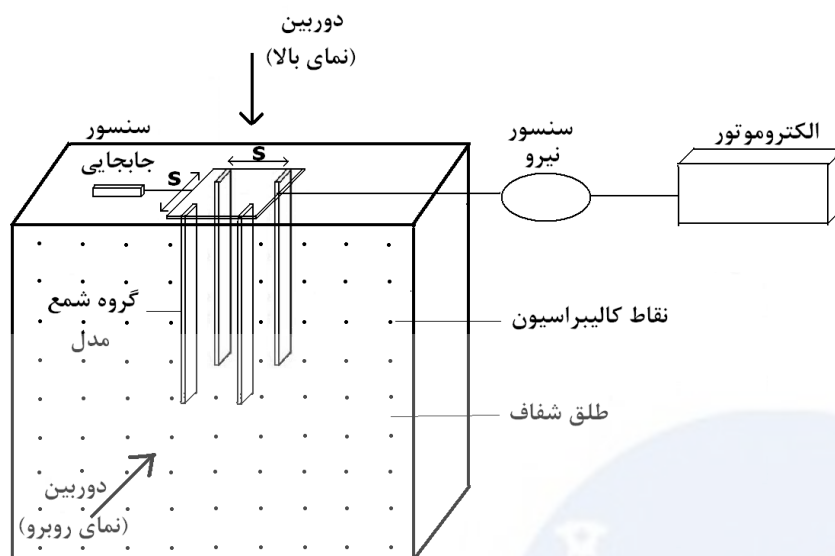
از آنجاییکه $k = \beta G$ ، بنابراین $\phi_1 = \frac{GI^4}{EI}$ پارامتر بی بعد مناسبی برای توصیف سختی نسبی شمع- خاک است. برای خاک های دانه ای ضریب عکس العمل افقی بستر با عمق رابطه خطی دارد ($k = n_h \times z$) که در این رابطه n_h مدول ثابت عکس العمل افقی بستر می باشد. پس پارامتر بی بعد بالا برای خاک های دانه ای بصورت $\phi_1 = \frac{l^5}{EI}$ تعریف می شود. بنابراین می توان فرض کرد که اگر پارامتر بی بعد ϕ_1 برای مدل و پروتوتایپ یکسان باشد، مدلسازی فیزیکی صحیح خواهد بود [5]. بعنوان مثال یک شمع فولادی با مقطع دایره ای توپر با مدول ارتجاعی 210 GPa و قطر 0/5 m و طول تقریبی 16 m، در خاک دانه ای طبق رابطه ارائه شده در فوق، بصورت یک شمع آلومینیمی با مدول ارتجاعی 70 GPa و مقطع مستطیلی به ابعاد 30 mm × 2 mm و طول 300 mm مدلسازی می شود.

3- مصالح، تجهیزات استفاده شده و شرح آزمایشات

3-1- جعبه آزمایش

یک جعبه چوبی به ابعاد 80×70×30 cm³ و ضخامت 18 mm به عنوان جعبه آزمایش مورد استفاده قرار گرفت. لازم به توضیح است که ابعاد جعبه آزمایش به قدر کافی بزرگ بوده و طوری انتخاب شده است که دیواره های جعبه آزمایش تاثیری بر روی تغییر شکل آزاد شمعها نداشته باشد. این ابعاد با در نظر گرفتن محاسبات تئوری به اضافه یک ضریب اطمینان بدست آمده است. در وجه جلویی جعبه از یک طلق

شفاف از جنس Plexiglass به ابعاد $80 \times 70 \text{ cm}^3$ و ضخامت 20 mm جهت مشاهده تغییر شکل های ایجاد شده در خاک استفاده شده است. در شکل 1 نمایی شماتیک از نحوه انجام آزمایشات نشان داده شده است.



شکل 1) نحوه انجام آزمایشات

3-2- خاک

جهت انجام آزمایشات از ماسه خشک منطقه صوفیان واقع در شمال غرب ایران استفاده شده است. نوع ماسه مورد استفاده بر اساس طبقه بندی متحد SP می باشد. سایر مشخصات ماسه در جدول 1 آمده است.

جدول 1- مشخصات ماسه مورد آزمایش

$\gamma_d \max$	$\gamma_d \min$	G_s	ϕ
$17.08 \text{ (kN/m}^3\text{)}$	$14.20 \text{ (kN/m}^3\text{)}$	2.637	28°

به منظور یکنواخت و همگن بودن خاک مورد آزمایش از سیستم بارش ماسه برای پرکردن جعبه آزمایش استفاده گردید. وزن مخصوص متوسط و دانسیته نسبی خاک داخل جعبه به ترتیب $14/80 \text{ (kN/m}^3\text{)}$ و 24% می باشد.

3-3- شمع های مدل، سیستم بارگذاری و ابزاربندی

در این تحقیق از شمع انعطاف پذیر (بلند) برای انجام آزمایشات استفاده شده است که تعریف تئوریک آن به صورت زیر است:

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

که در آن L طول مدفون شمع، T فاکتور طول، EI سختی خمشی شمع و n_h مدول ثابت عکس العمل افقی بستر می باشد [6]. در این تحقیق n_h به صورت تجربی، $2 \times 10^6 \text{ (N/m}^3\text{)}$ در نظر گرفته شده است.

به دلیل رعایت قانون تشابه و همچنین بررسی کیفی رفتار شمعها، مقطع شمعها مستطیلی و با ضخامت خیلی کم انتخاب شده است که در جهت با عرض کمتر به قسمت جلویی طلق شیشه ای تکیه داده می شود تا شمعها در جهت محور ضعیف تحت بارگذاری قرار گیرد. همچنین بدلیل کمتر بودن E آلومینیم نسبت به فولاد، شمعهای آلومینیمی مورد استفاده قرار گرفت. در این مطالعه گروه شمع 2×2 مورد آزمایش قرار گرفت که شمعها با فواصل مختلف در امتداد بارگذاری جانبی و عمود بر آن قرار داده شده و با استفاده از لولایی به کلاهدک آلومینیمی وصل می شدند. مشخصات کلی شمع های مورد استفاده در آزمایشات در جدول 2 آمده است. لازم به توضیح است که گروه شمع با فواصل مرکز به

مرکز 1B، 2B و 3B شمعها در هر دو امتداد بار جانبی و عمود بر آن تحت آزمایش بار جانبی قرار گرفت. همچنین به منظور مقایسه رفتار شمع منفرد با رفتار گروه شمع و اندرکنش شمع - خاک - شمع ایجاد شده، آزمایشی نیز بر روی شمع منفرد انجام گردید.

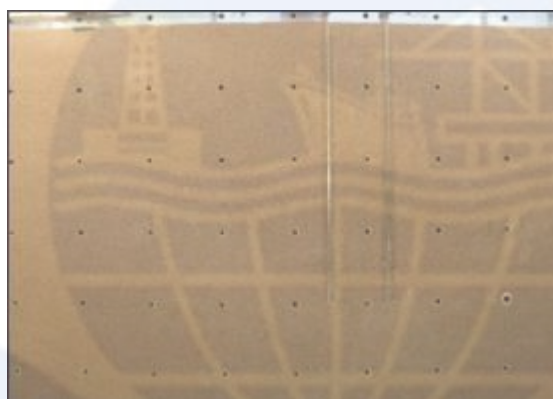
جدول 2- مشخصات شمع بلند

L(m) طول مدفون	0/3	0/3	0/3	0/3
B(m) پهنا	0/03	0/03	0/03	0/03
t(m) ضخامت	0/002	0/002	0/002	0/002
EI (N. m ²) سختی خمشی	1/4	1/4	1/4	1/4
T (m) فاکتور طول	0/059	0/059	0/059	0/059
L / T	5/11	5/11	5/11	5/11
فاصله شمعها در امتداد بار جانبی و عمود بر آن (s)	شمع منفرد	1B	2B	3B

در اشکال 2 و 3 گروه شمع مدفون در خاک به ترتیب در نماهای روبرو و بالا نشان داده شده است.



شکل 3) گروه شمع 2×2 مدفون در خاک (نمای بالا)



شکل 2) گروه شمع 2×2 مدفون در خاک (نمای روبرو)

الکتروموتوری با سرعت ثابت برای اعمال بار جانبی به کلاهک گروه شمع مورد استفاده قرار گرفت. به منظور ثبت جابجایی سر شمع ها و نیروی جانبی اعمال شده به آنها در حین انجام آزمایشات از LVDT و Load cell استفاده گردید. برای تامین نور محیط و حذف نورهای زاید، دو عدد پروژکتور 1000 وات مخصوص نور پردازی مورد استفاده قرار گرفت که با زاویه 45 درجه در تراز ارتفاعی بالاتر نسبت به محور نوری دوربین مستقر می شدند. همچنین برای عکسبرداری از یک دوربین دیجیتال Canon از نوع Power shot G6 با وضوح تصویر 7/1 مگا پیکسل (3072 × 2304) استفاده گردید. برای اینکه عکس ها در یک فاصله زمانی یکسان گرفته و ذخیره شود، از نرم افزار Remote capture استفاده می شد. در شکل 4 نمایی از محیط آزمایشگاه نشان داده شده است.



شکل 4) نمایی از محیط آزمایشگاه

3-4- عکسبرداری دیجیتال، پردازش تصویری و روش PIV

این تکنولوژی جدید با ترکیب عکاسی دیجیتال، پردازش تصویری PIV، فتوگرامتری نزدیک برد و کانون یابی، این امکان را فراهم می کند تا جابجاییهای خاک بدون نصب نقاط هدف درونی با دقتی برابر $1/150000$ میدان دید شناسایی گردند. با استفاده از دوربین دیجیتال، تصاویر متوالی از صفحه خاک در طول تغییر شکل گرفته می شود و سپس تغییر شکل خاک با استفاده از تحلیل سرعت سنجی تصویری ذرات، مابین هر جفت تصویر متوالی تعیین می شود. جهت بدست آوردن اطلاعات قابل فهم و مفید، بعد از انجام اندازه گیری در فضای تصویر، بردارهای جابجایی حاصل، با استفاده از تبدیل فتوگرامتریک، از فضای تصویر به فضای جسم منتقل می شوند. پارامترهای انتقال بر اساس مشخصات فنی دوربین، شرایط تصویر برداری و مشخصات پنجره مشاهده و با روش کانون یابی تعیین می شوند [7].

PIV مدولی از نرم افزار MatLab می باشد که قابلیت ثبت داده های مربوط به تغییر مکان ها را دارا بوده و به وسیله ردیابی حرکت ذرات خاک نسبت بهم در میان یک سری از تصاویر گرفته شده دیگر، عمل می کند. عملکرد PIV در اندازه گیری جابجاییهای محیط خاک بسیار خوب می باشد. با PIV، هزاران نقطه جابجایی می تواند در یک میدان دید مشاهده شود و علاوه بر این، مکانهایی که در پیچ های اندازه گیری قرار بگیرند، می توانند بعد از تغییر شکل خاک تعیین شوند که این روش را قادر به بهینه سازی محل پیچ ها می نماید. دقت روش PIV تابعی از بافت پیچ می باشد که بوسیله اندازه پیچ در فضای تصویر، شکل، اندازه، توزیع و تمایز رنگ ذرات خاک در فضای جسم تعیین می شود [7].

حین انجام آزمایشات، با استفاده از دوربین از تغییر شکل گروه شمع و خاک اطراف آن عکسبرداری دیجیتال انجام گردید. عکسهای گرفته شده با استفاده از PIV مورد پردازش قرار گرفت. برای این منظور ابتدا عکسها پیچ بندی شده و مختصات مرکز هر پیچ تعیین گردید. سپس با استفاده از این مختصات، جابجایی المان های خاک بدست آمد. از اختلاف بین موقعیت هر پیچ در عکس اول و آخر، جابجایی مربوط به آن پیچ تعیین شده و با استفاده از جابجایی کل پیچ ها، میدان کرنش و جابجایی برای هر آزمایش حاصل گردید. باید توجه داشت که جابجایی های حاصل، در فضای عکس (با واحد پیکسل) بوده و برای بررسی کاربردی مساله، واحد جابجایی ها را به میلیمتر یا سانتیمتر تبدیل می کنیم. این عمل با استفاده از نقاط کالیبراسیون موجود در روی طلق شفاف انجام می گردد.

4- نتایج حاصل از آزمایشات

آزمایشات انجام گرفته بر اساس فاکتور تاثیرگذار در رفتار گروه شمع تحت بارگذاری جانبی و با تغییر فاصله مرکز به مرکز شمعها انجام گرفت. بدین منظور شمع بلند با مشخصات مندرج در جدول 2 یکبار بصورت منفرد و سه بار بصورت گروه شمع 2×2 با فاصله مرکز به مرکز 1 تا 3 برابر پهنای شمع در امتداد بارگذاری جانبی و عمود بر آن، مورد آزمایش قرار گرفت. برای همه آزمایشات میزان تغییر مکان اعمال شده به سر شمع تقریباً 10 میلیمتر می باشد. لازم به توضیح است که در این تحقیق شمع ها به صورت سر آزاد تحت آزمایش بار جانبی قرار گرفتند. نیروی جانبی به صورت استاتیکی توسط دستگاه برش مستقیم به کلاهک گروه شمع و از سمت راست به چپ آن اعمال می گردد. سپس اطلاعات بدست آمده توسط نرم افزار MatLab و برنامه GeoPIV تحلیل می شود.

شایان ذکر است که در ادبیات فنی، به نزدیکترین ردیف شمع موجود در گروه به نیروی جانبی، ردیف عقب (Trail row) و به دورترین، ردیف جلو (Lead row) گفته می شود. همچنین در این تحقیق با توجه به اینکه نیروی جانبی از سمت راست به چپ اعمال می شود، لذا در اشکال زیر سمت راست هر کدام از شمعها، عقب شمع و سمت چپ آنها، جلوی شمع خواهد بود.

در اشکال 5 و 6 مختصات قرارگیری گروه شمع 2×2 با فاصله $3B$ شمعها (گروه شمع $3B$) به ترتیب در نماهای روبرو و بالا بصورت شماتیک نشان داده شده است. بدیهی است در گروه شمع $1B$ ، $(x/B = -3)$ به $(x/B = -1)$ و $(y/B = 3)$ به $(y/B = 1)$ تغییر می یابد. لازم به توضیح است که در اشکال مربوط به شمع منفرد، شمع در $(x/B = 0)$ و مماس با طلق قرار دارد.

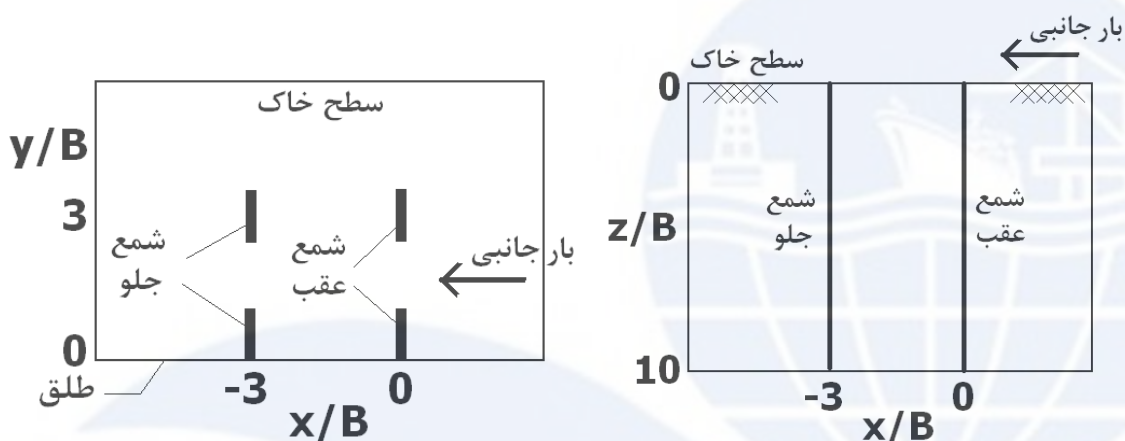
نتایج حاصل از آزمایشات به شرح زیر مورد بررسی قرار می گیرد:

1- جابجایی خاک اطراف شمع منفرد و گروه شمع

2- کرنش برشی ایجاد شده در خاک اطراف شمع منفرد و گروه شمع

در ادامه همه موارد بالا به تفصیل بحث و بررسی شده است.

لازم به توضیح است که در زیر اشکال و نتایج حاصله از تحلیل برای شمع منفرد، گروه شمع با فاصله $1B$ و $3B$ آمده است و به جهت اختصار اشکال مربوط به گروه شمع با فاصله $2B$ آورده نشده است.



شکل 6) گروه شمع $3B$ مدفون در خاک (نمای بالا)

شکل 5) گروه شمع $3B$ مدفون در خاک (نمای روبرو)

1-4- جابجایی خاک اطراف شمع منفرد و گروه شمع

برای نشان دادن الگوی تغییرشکل‌های ایجاد شده در اطراف شمع منفرد و گروه شمع و نیز مقایسه آنها از بردارهای جابجایی ایجاد شده در نقاط مختلف (اشکال 7 تا 12) استفاده می کنیم. شایان ذکر است که در این اشکال به جهت وضوح بهتر بردارهای جابجایی، این بردارها با بزرگنمایی 5 برابر ترسیم شده اند (اندازه بردارهای جابجایی 5 برابر شده است). همانطوریکه در اشکال 7 تا 12 ملاحظه می شود به سبب عدم تاثیر شمع روی دانه های خاک قرار گرفته در فواصل دور از شمع، این دانه ها جابجا نشده و در محل اولیه خود باقی می مانند. بنابراین اندازه بردارهای جابجایی مربوط به این دانه ها صفر می باشد. ولی هرچه به محل شمع نزدیکتر می شویم دانه های خاک قرار گرفته در نزدیک شمع جابجایی بیشتری از خود نشان می دهند و بنابراین اندازه بردارهای جابجایی این دانه ها بزرگتر می باشد.

با توجه به شکل 7 دیده می شود که در سمت راست (عقب) شمع به طور جانبی بارگذاری شده، بردارهای جابجایی با زاویه تند رو به پایین و در سمت چپ (جلو) شمع، بردارهای جابجایی با زاویه ملایم تری رو به بالا می باشند. همچنین شکل 8 نشان می دهد که دانه های خاک سطحی موجود در عقب شمع با زاویه تند رو به طلق و در جلوی شمع با زاویه ملایم تری رو به بیرون می باشند. بنابراین با توجه به اشکال 7 و 8 دیده می شود که بردارهای جابجایی خاک در محل شمع به یکباره تغییر جهت می دهند. همچنین از شکل 7 در می یابیم که با توجه به اینکه در جلوی شمع زاویه بردارهای جابجایی نسبت به افق کمتر از 45° است، بنابراین در جلوی شمع تحت بار جانبی مولفه افقی بردارهای جابجایی خاک بزرگتر از مولفه قائم آنها می باشد و با افزایش فاصله از سطح خاک، هر دوی جابجایی های افقی و قائم خاک رفته رفته کمتر شده و در اعماق پایین تر به صفر می رسد.

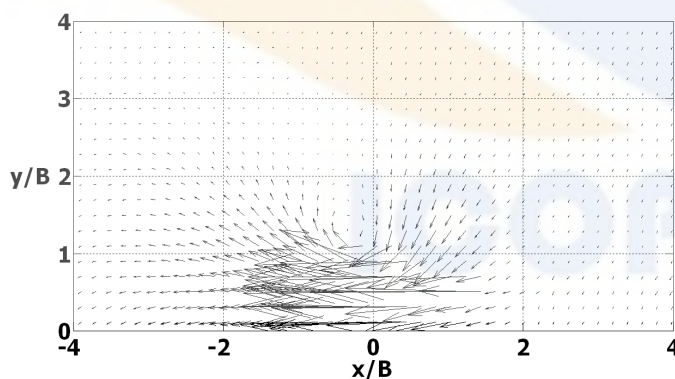
در حالت گروه شمع $1B$ ، با توجه به فاصله کم شمعها، دانه های خاک قرار گرفته در بین شمعها تقریباً به صورت افقی جابجا می شوند. این مطلب در اشکال 9 و 10 مشاهده می شود. چون در شکل 9 به دلیل کمی فاصله شمعها امکان حرکت رو به بالای دانه های موجود در مجاورت چپ شمع عقب و حرکت رو به پایین دانه های موجود در مجاورت راست شمع جلو وجود ندارد. همچنین در شکل 10 نیز به دلیل کمی

فاصله شمعها امکان حرکت رو به بیرون دانه‌های موجود در مجاورت چپ شمع عقب و حرکت رو به طلق دانه‌های موجود در مجاورت راست شمع جلو وجود ندارد. بنابراین در حالت گروه شمع 1B، خاک موجود در بین دو شمع جابجایی قائم از خود نشان نمی‌دهد و صرفاً به صورت افقی جابجا می‌شود. این امر سبب می‌شود که خاک مقاومت کمتری در برابر تغییر مکان افقی شمع از خود نشان دهد. از این رو با توجه به بزرگی اثر Shadowing (اندرکنش بین شمعها) در گروه شمع 1B، به ازای نیروی جانبی یکسان وارده، گروه شمع 1B ظرفیت باربری جانبی کمتری از گروه شمعهای با فواصل بزرگتر داشته و کارایی آن نیز کمتر است. بنابراین وقتی فاصله شمعها در گروه خیلی کم باشد، خاک بین شمعها تاثیر ناچیزی روی ظرفیت باربری جانبی گروه شمع خواهد داشت. از این رو پیشنهاد میشود که به منظور بسیج ماکزیمم ظرفیت خاک در مقابل نیروی جانبی و تغییر مکانها، فاصله شمعها در گروه از یک فاصله حداقل کمتر نگردد.

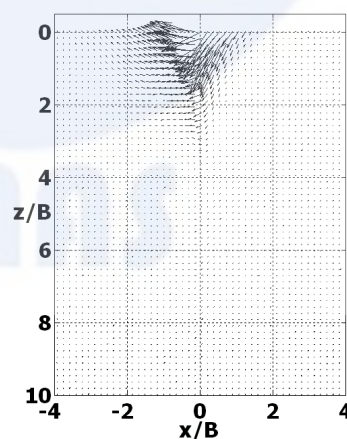
با توجه به شکل 11 دیده می‌شود که در حالت گروه شمع 3B، با توجه به فاصله بیشتر شمعها، این فرصت بوجود می‌آید که دانه‌های خاک در مجاورت چپ شمع عقب رو به بالا و در مجاورت راست شمع جلو رو به پایین حرکت کنند. از این رو جابجایی خاک اطراف گروه شمع به جابجایی خاک اطراف شمع منفرد نزدیکتر می‌شود. جابجایی قائم در خاک بین دو شمع رخ داده و این امر سبب مقاومت در برابر تغییر مکان افقی گروه شمع خواهد شد. لذا گروه شمع 3B ظرفیت باربری جانبی بیشتری از گروه شمع 1B دارد. لذا دیده می‌شود که با افزایش فاصله شمعها در گروه، اندرکنش بین شمعها کاهش می‌یابد. همچنین شکل 12 نشان می‌دهد که در امتداد عمود بر امتداد بار جانبی در فاصله 3B شمعها، اندرکنش بین شمعها تا حد زیادی از بین رفته و در نتیجه اثر Shadowing مقدار ناچیزی دارد.

بنابراین نتیجه می‌گیریم که با افزایش فاصله شمعها در گروه، اثر Shadowing کاهش یافته و رفتار شمعها به رفتار شمع منفرد نزدیکتر می‌شود. در حالت گروه شمع 3B در امتداد عمود بر بار جانبی اندرکنش بین شمعها تقریباً از بین می‌رود. این در حالی است که در امتداد بار جانبی هنوز اندرکنش وجود داشته و شمعها روی رفتار یکدیگر تاثیر می‌گذارند. شایان ذکر است که Hajjalilue و همکاران نشان دادند که در امتداد بار جانبی در فاصله 6B و بیشتر شمعها، اثر گروه (Group effect) از بین می‌رود [8].

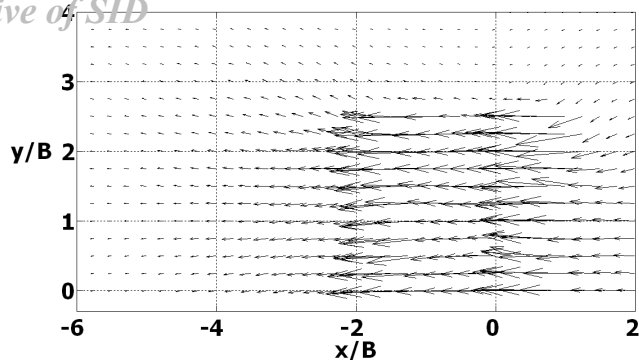
در جلوی شمع به طور جانبی بارگذاری شده هر دوی جابجایی‌های افقی و قائم رخ می‌دهد. جابجایی‌های قائم در نزدیکی سطح خاک بوجود می‌آید و از این رو تاثیر قابل توجهی روی تغییر مکان شمع دارد. بنابراین بررسی جابجایی‌های قائم در جلوی شمع اهمیت زیادی دارد. در گروه شمع با فواصل کمتر به علت نزدیک بودن شمع جلو به شمع عقب دانه‌های خاک موجود در مجاورت چپ شمع عقب امکان حرکت رو به بالا را پیدا نمی‌کنند، ولی به علت آزاد بودن دانه‌های خاک در مجاورت چپ شمع جلو از نظر جابجایی، این دانه‌ها فرصت حرکت رو به بالا را پیدا می‌کنند. بنابراین نتیجه می‌گیریم که در اثر اعمال بار جانبی به گروه شمع، مقاومت خاک اطراف شمعهای ردیف عقب کاهش بیشتری یافته که این امر ناشی از تاثیر شمعهای ردیف جلو بر روی خاک می‌باشد. حال آنکه مقاومت خاک اطراف شمعهای ردیف جلو در مقایسه با خاک اطراف شمع منفرد کاهش ناچیزی از خود نشان می‌دهد. با افزایش فاصله شمعها در گروه، خاک موجود در مجاورت چپ شمع عقب نیز امکان حرکت رو به بالا را پیدا کرده و در نتیجه مقاومت خاک اطراف شمعهای ردیف عقب کاهش کمتری می‌یابد.



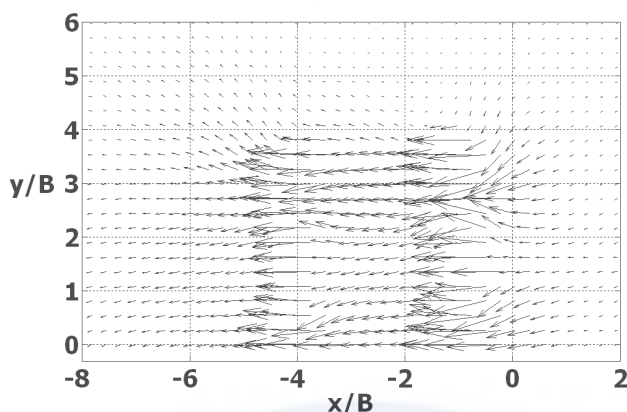
شکل 8) بردارهای جابجایی خاک اطراف شمع منفرد (نمای بالا)



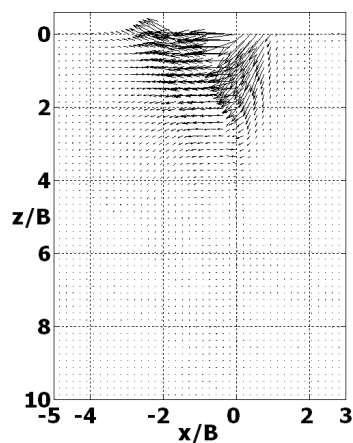
شکل 7) بردارهای جابجایی خاک اطراف شمع منفرد (نمای روبرو)



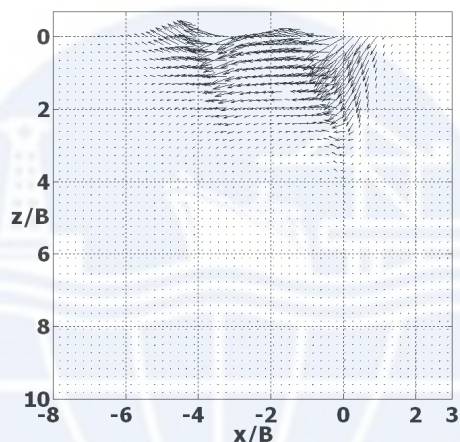
شکل 10 بردارهای جابجایی خاک اطراف گروه شمع 1B (نمای بالا)



شکل 12 بردارهای جابجایی خاک اطراف گروه شمع 3B (نمای بالا)



شکل 9 بردارهای جابجایی خاک اطراف گروه شمع 1B (نمای روبرو)



شکل 11 بردارهای جابجایی خاک اطراف گروه شمع 3B (نمای روبرو)

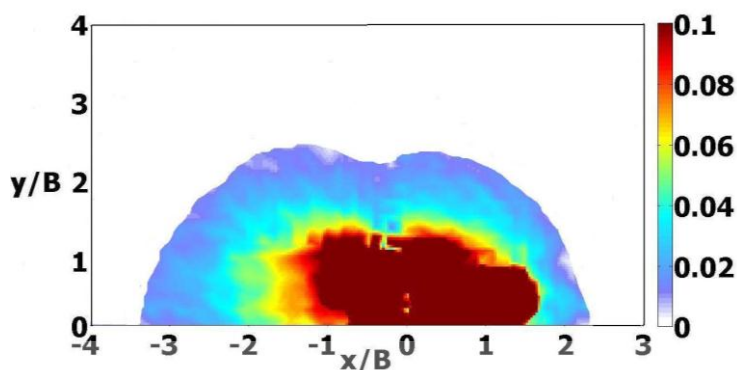
4-2- کرنش برشی ایجاد شده در خاک اطراف شمع منفرد و گروه شمع

در اشکال 13 تا 18 کرنش برشی ماکزیمم ایجاد شده در خاک اطراف شمع منفرد، گروه شمع با فاصله 1B و 3B رسم شده است. همانطوریکه ملاحظه می شود کرنش برشی خاک در محل شمع بیشترین مقدار را دارد و هرچه از محل شمع به اطراف حرکت کنیم مقدار آن کمتر می شود، تا اینکه در فواصل دورتر از شمع به صفر می رسد. با توجه به شکل 13 دیده می شود که در اثر اعمال بار جانبی، گوه کرنش مثلی در اطراف شمع بوجود می آید. به عبارت دیگر در سر شمع کرنش برشی بیشترین مقدار را دارد و هرچه از سر شمع به پایین حرکت کنیم کرنش برشی رفته رفته کمتر می شود تا اینکه در اعماق پایین تر دانه های خاک هیچ کرنش برشی از خود نشان نمی دهند. چون با توجه به رفتار انعطاف پذیر شمع بلند، شمع در اعماق پایین تر جابجا نشده و در نتیجه کرنش برشی در خاک ایجاد نمی شود. در اثر اعمال بار جانبی به شمع، محدوده مقاومی از خاک در جلوی شمع تشکیل می شود و در برابر تغییر مکان شمع مقاومت می کند. شکل این محدوده در حالت سه بعدی تقریباً مخروطی است. این مطلب را از ترکیب اشکال 13 و 14 می توان دریافت.

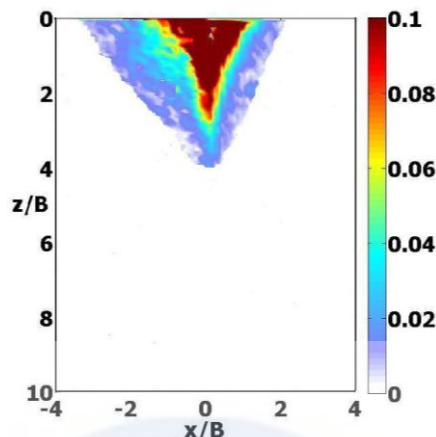
با توجه به اشکال 13 و 14 مشاهده می شود که بدلیل اعمال نیروی جانبی از راست به چپ، کرنش برشی بوجود آمده نسبت به محل شمع منفرد حالت متقارن نداشته و متمایل به سمت چپ است. ولی با این وجود مطابق شکل 14 مقدار کرنش برشی در سطح خاک عقب شمع بیشتر از جلوی آن می باشد که دلیل این امر، زاویه تندتر بردارهای جابجایی در عقب شمع و زاویه ملایم تر آنها در جلوی شمع است (این نتیجه از بخش 4-1 بدست آمده بود).

اشکال 15 تا 18 نشان می دهند که با افزایش فاصله شمعها در گروه، تداخل بین گوه های کرنش و در نتیجه اندرکنش بین شمعها کمتر شده و رفتار شمعها به رفتار شمع منفرد نزدیکتر می شود. در اشکال 15 و 16، به دلیل فاصله کم شمعها، اثر Shadowing به شدت رفتار گروه شمع را تحت تاثیر قرار می دهد. لذا می توان نتیجه گرفت که در فواصل کمتر شمعها، گروه شمع همانند یک شمع منفرد با مقطع بزرگتر عمل

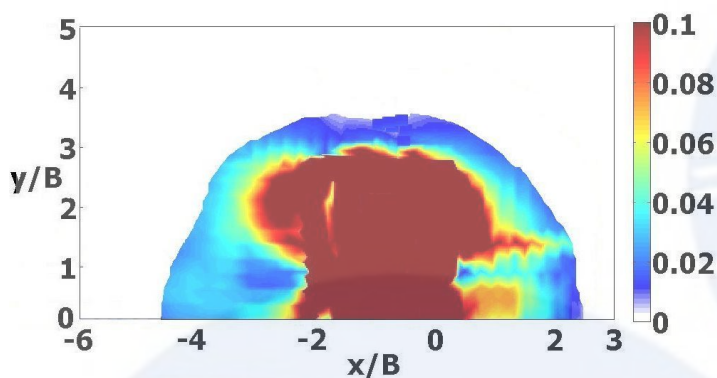
می کند. همچنین با توجه به شکل 18 درمی یابیم که در فاصله $3B$ در امتداد عمود بر بار جانبی اثر Shadowing بین شمعها تأثیر زیادی از بین می رود، لیکن شکل 17 نشان می دهد که در امتداد بار جانبی هنوز اثر گروه بر رفتار شمعها تأثیر می گذارد.



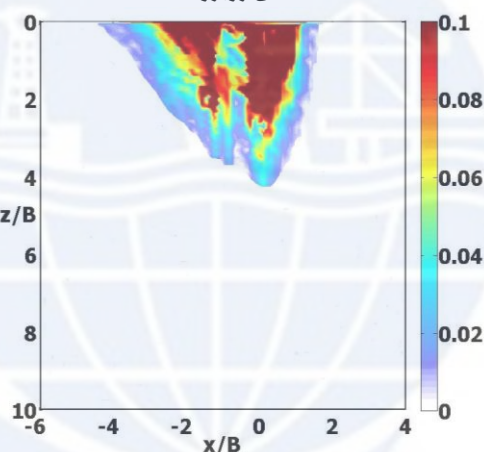
شکل 14) کرنش برشی خاک اطراف شمع منفرد (نمای بالا)



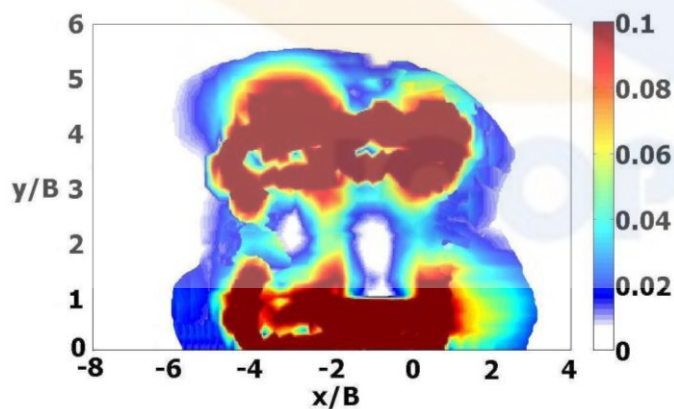
شکل 13) کرنش برشی خاک اطراف شمع منفرد (نمای روبرو)



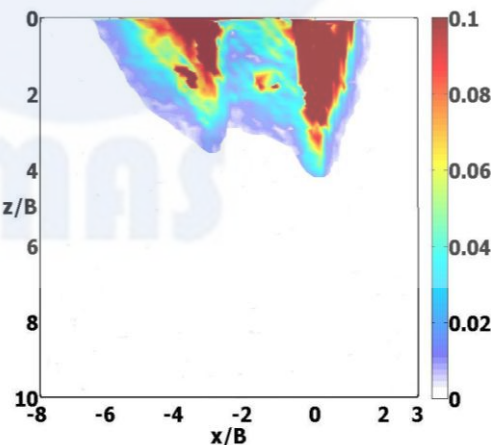
شکل 16) کرنش برشی خاک اطراف گروه شمع 1B (نمای بالا)



شکل 15) کرنش برشی خاک اطراف گروه شمع 1B (نمای روبرو)



شکل 18) کرنش برشی خاک اطراف گروه شمع 3B (نمای بالا)



شکل 17) کرنش برشی خاک اطراف گروه شمع 3B (نمای روبرو)

محققین مختلف مطالعاتی را برای بررسی اثرات Shadowing و اندرکنش در گروه شمع انجام داده اند که در اینجا به نمونه ای از آنها اشاره می شود.

Prakash نشان داد که اگر فاصله شمعها در گروه در امتداد عمود بر بارگذاری جانبی بیشتر از $2/5B$ باشد، شمعها در گروه به صورت منفرد رفتار کرده و هیچ اثری روی یکدیگر نخواهند داشت [9]. همچنین انجمن راه ژاپن (Association of Japanese Road) در حالت

s/B > 2/5 از اثر Shadowing روی شمعها صرفنظر می کند [10]. بنابراین مشاهده می شود که مطالعه صورت گرفته در این مقاله رفتار گروه شمع و خاک اطراف آن را با دقت خوبی پیش بینی می کند.

5- نتیجه گیری

با توجه به موارد مورد بررسی در این نوشتار می توان به طور خلاصه نتایج زیر را استنتاج کرد:

- با افزایش فاصله شمعها در گروه، اثر Shadowing کاهش یافته و بنابراین رفتار شمعها به رفتار شمع منفرد نزدیکتر می شود. در فاصله 3B شمعها، اندرکنش در امتداد عمود بر بار جانبی تقریباً از بین می رود ولی در امتداد بار جانبی، هنوز بین شمعها اندرکنش وجود دارد.
- با افزایش فاصله شمعها، کارایی گروه شمع تحت بار جانبی بیشتر شده و ظرفیت باربری جانبی آن افزایش می یابد.
- وقتی فاصله شمعها در گروه خیلی کم باشد، خاک بین شمعها تاثیر ناچیزی روی ظرفیت باربری جانبی گروه شمع خواهد داشت. از این رو پیشنهاد میشود که به منظور بسیج ماکزیمم ظرفیت خاک در مقابل نیروی جانبی و تغییرمکانها، فاصله شمعها در گروه از یک فاصله حداقل کمتر نگردد.
- در اثر اعمال بار جانبی به گروه شمع با فواصل کمتر، مقاومت خاک اطراف شمعهای ردیف عقب کاهش بیشتری یافته که این امر ناشی از تاثیر شمعهای ردیف جلو بر روی خاک می باشد. حال آنکه مقاومت خاک اطراف شمعهای ردیف جلو در مقایسه با خاک اطراف شمع منفرد کاهش ناچیزی از خود نشان می دهد. با افزایش فاصله شمعها در گروه، مقاومت خاک اطراف شمعهای ردیف عقب کاهش کمتری می یابد.
- در فواصل کمتر شمعها در گروه، در اثر اعمال بار جانبی، دانه های خاک بین شمعها صرفاً به صورت افقی جابجا می شوند. با افزایش فاصله شمعها الگوی تغییرشکل خاک در اطراف هر کدام از شمعها به الگوی تغییرشکل خاک اطراف شمع منفرد نزدیکتر می شود.
- در جلوی شمع تحت بار جانبی جابجایی افقی خاک بزرگتر از جابجایی قائم می باشد. با افزایش فاصله از سطح خاک، هر دوی جابجایی های افقی و قائم خاک رفته رفته کمتر شده و در اعماق پایین تر به صفر می رسد.
- جابجایی قائم خاک موجود در عقب شمعها رو به پایین و در جلوی آنها رو به بالا می باشد. همچنین جابجایی قائم در عقب شمعها بزرگتر از جلوی آنها است.

6- مراجع

- [1]- Brown, D. A., Morrison, C., Reese, L. C., (1988), Lateral loaded behavior of pile group in sand, Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 114, No. 11, 1261-1277.
- [2]- McVay, M., Zhang, L., Molnit, T., Lai, P., (1998), Centrifuge testing of large laterally loaded pile groups in sands, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 124, No. 10, 1016-1026.
- [3]- آذرینیا شاهگلی، ح.، حاجی علیلو، م.، محصل، م.ح.، (1389)، پنجمین کنگره ملی مهندسی عمران، مشهد، ایران.
- [4]- White, D.J., Take, W.A., Bolton, M.D., (2003), Soil deformation measurement using Particle Image Velocimetry (PIV), Geotechnique, Vol. 53, No. 7, 619-631.
- [5]- Wood, D.M., (2004), Geotechnical modelling, John Wiley & Sons, pp. 488.
- [6]- Reese, L. and Van Impe, W., (2001), Single piles and pile groups under lateral loading, A.A. Balkema, pp. 463.
- [7]- White, D.J. and Take, W.A., (2002). GeoPIV: Particle Image Velocimetry (PIV) software for use in geotechnical testing, University of Cambridge. pp. 14.
- [8]- Hajjalilue-Bonab, M., Azarnya-Shahgoli, H., Sarand, F. B. & Mohassel, M. H., (2010), The deformation pattern around a pile group under lateral loading in sand, 7th International Conference on Physical Modelling in Geotechnics, Zurich, Switzerland.
- [9]- Prakash, S., (1981), Soil dynamics, McGraw-Hill, Inc., New York.
- [10]- Association of Japanese Road, (1980), Manual of road bridge and its explanation, (in Japanese).