Advanced Modeling in Civil Engineering
Website : https://amcen.razi.ac.ir
Online ISSN : 3060-7620
Razi University

# Investigation of group effect in configurations of batter pile groups under lateral load in sand

**Masoud Hajialilue Bonab[1]✉, Mehran Hassanzadeh[2]**

1. Corresponding Author, Geotechnical Department, Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran. E-mail: mhbonab@gmail.com
2. Geotechnical Department, Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran. E-mail: mehran.hassanzadeh@gmail.com

## Article Info

**Article type:**
Research Article

**Article history:**
**Received**
2025-02-09
**Received in revised form**
2025-04-22
**Accepted**
2025-06-14
**Available online**
2025-06-23

***Keywords***:
pile groups,
batter pile,
lateral displacement,
PIV,
soil-pile interaction

## ABSTRACT

Piles are usually used in groups under the foundation of structures; therefore, the study of the effect of pile-pile interaction and its overall influence on the bearing capacity of each pile and pile group settlement is of great importance. In this paper, several models were chosen to investigate the soil deformation pattern, in which the batter of piles with respect to the vertical was considered as a variable. Pile groups consisting of four Aluminum piles with rectangular cross sections were experimentally studied. Deformations were obtained using the analysis of sequential digital images and the measurement of soil particle movements. Experience shows that batter piles in pile groups under lateral loading changes the deformation pattern compared to the case when the piles are vertical in the group pile. The results of the conducted research indicate that the existence of batter piles beside the vertical ones, on the one hand increases the bearing capacity of pile group, and on the other hand the experimental data shows that shadow effect impacts the soil-pile interaction and bearing capacity of batter pile group considering the configuration and the position of piles does not increase; despite what is expected.

**Cite this article:** Hajialilue Bonab, Masoud., & Hassanzadeh, Mehran. (2025). Investigation of group effect in configurations of batter pile groups under lateral load in sand. *Advanced Modeling in Civil Engineering,* 2(1), 81-94.

DOI: 10.22126/amcen.2025.11223.1021

© The Author(s).
DOI: 10.22126/amcen.2025.11223.1021
Publisher: Razi University

## Introduction

Predicting the displacement of pile groups under the influence of applied loads is a very complex issue, requiring careful consideration of the soil-pile interaction and the mechanical properties of different layers of the earth, and consideration of soil deformation coefficients in calculations. As has been shown from previous observations, the front pile in a group of piles can withstand a greater static load than the piles behind it. For piles that are perpendicular to the loading direction, the load distribution between the piles is symmetrical about the center line, and the middle pile always carries the smallest amount of load. For transient loads and for harmonic loads with higher frequencies, the force distribution between the piles can be considered uniform. Various researchers have shown that the shadow effect in the pile group is very important in the design of piles under lateral load. This study investigates the effect of the angle of inclination of inclined piles in pile groups using advanced experimental methods such as soil particle motion tracking. Also, this study investigates the phenomenon of "shadow effect" in the interaction of soil and inclined piles.

## Method

In this study, four aluminum piles with a length of 30 cm, a width of 3 cm, and a thickness of 2 mm were used to model the pile group. In which the angle of inclination of the pile relative to the vertical axis is considered as a variable. The pile group consisting of four aluminum piles with rectangular cross-sections has been studied from an experimental point of view. The deformations have been obtained using the method of sequential photo analysis and measurement of soil grain movement. A strain gauge was used to find the moment and strain created in the piles.

## Results

Experience shows that inclined piles in a pile group under lateral loading cause displacement changes compared to the case of a group of vertical piles. The results of the studies show that the presence of inclined piles next to vertical piles, on the one hand, increases the bearing capacity of the pile group, and on the other hand, experimental data shows that the shadow effect affects the soil-pile interaction mechanism and the bearing capacity of the inclined pile group does not increase as expected.

## Conclusions

Due to the pile-pile interaction in the group, the behavior of each of them will be different from the behavior of an equivalent single pile under lateral loads. The small distance between the piles in the group causes the group effect (shadow effect) between the piles and affects the bearing capacity and deformations. The amount of soil settlement behind a positive inclined pile is greater than that of a vertical pile, and the amount of soil settlement behind a vertical pile is greater than that of a negative inclined pile. In examining the soil displacements around the pile group, it can be concluded that the soil in front of the middle and rear piles did not have the opportunity to slide upward and fell into the depression in the soil behind the piles and filled it. The effect of the inclination of the pile is greater than the effect of the location of the pile in the group for vertical deformations. The front pile in the pile group bears the

highest pressure and bending moment, and also the depth of fixation in it is less than that of the rear piles.

## Author Contributions

All authors participated in writing and revising the article.

## Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.

مدل‌سازی پیشرفته در مهندسی عمران
وبگاه نشریه : https://amcen.razi.ac.ir
شاپا الکترونیکی : ۷۶۲۰-۳۰۶۰
دانشگاه رازی

# بررسی اثر گروه در ترکیب گروه شمع‌های مایل تحت بارهای جانبی در خاک ماسه‌ای

مسعود حاجی علیلوی بناب[۱]✉، مهران حسن‌زاده[۲]

۱. نویسنده مسئول، گروه ژئوتکنیک دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران. رایانامه: mhbonab@gmail.com

۲. گروه ژئوتکنیک دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران، رایانامه:mehran.hassanzadeh@gmail.com

**اطلاعات مقاله**

**نوع مقاله:**
مقاله پژوهشی

**تاریخ دریافت:**
۱۴۰۳/۱۱/۲۱

**تاریخ بازنگری:**
۱۴۰۴/۰۲/۰۲

**تاریخ پذیرش:**
۱۴۰۴/۰۳/۲۴

**تاریخ انتشار:**
۱۴۰۴/۰۴/۰۲

**کلیدواژه‌ها:**
گروه شمع‌ها،
شمع مایل،
جابجایی افقی،
PIV،
اندرکنش خاک و شمع

**چکیده**

شمع‌ها معمولا بصورت گروهی در پی سازه‌ها بکار برده می‌شوند، بنابراین بررسی تاثیر متقابل شمع‌ها بر یکدیگر و اثرات کلی آن بر باربری هر شمع و نشست گروه شمع‌ها از اهمیت به سزایی برخوردار است. در این مقاله چند مدل برای بررسی الگوی تغییر شکل خاک انتخاب شده است که در آن‌ها پارامتر زاویه تمایل شمع نسبت به محور قائم بعنوان متغیر لحاظ می‌گردد. گروه شمع‌ها مشتمل بر چهار شمع از جنس آلومینیوم با مقطع مستطیلی از دیدگاه تجربی مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. تغییر شکل‌ها با استفاده از روش تحلیل عکس‌های متوالی و اندازه‌گیری حرکت دانه‌های خاک، بدست آمده‌اند. تجربه نشان می‌دهد که شمع‌های مایل در گروه شمع‌های تحت بارگذاری جانبی موجب تغییر جابجایی‌ها در مقایسه با حالت گروه شمع‌های قائم می‌گردند. نتایج بررسی‌های به عمل آمده گویای آن است که وجود شمع مایل در کنار شمع‌های قائم از یک سو موجب افزایش ظرفیت باربری گروه شمع‌ها گردیده و از سوی دیگر داده‌های تجربی نشان می‌دهد که اثر سایه در مکانیسم اندرکنش خاک – شمع تاثیر گذاشته و ظرفیت باربری گروه شمع مایل بر خلاف انتظار افزایش نمی‌یابد.

**استناد:** حاجی علیلوی بناب، مسعود؛ حسن‌زاده، مهران. (۱۴۰۴). بررسی اثر گروه در ترکیب گروه شمع‌های مایل تحت بارهای جانبی در خاک ماسه‌ای. *مجله مدل‌سازی پیشرفته در مهندسی عمران*، ۲(۱)،۹۴-۸۱. DOI: 10.22126/amcen.2025.11223.1021

ناشر: دانشگاه رازی.

© نویسندگان.

CC BY NC

## ۱. مقدمه

پیش‌بینی تغییر مکان‌های گروه شمع تحت اثر بارهای وارده موضوع بسیار پیچیده است که لازم است اندرکنش خاک – شمع و مشخصات مکانیکی لایه‌های مختلف زمین با دقت فراوان مورد بررسی قرار گرفته و ضرایب تغییر شکل خاک در محاسبات مورد توجه قرار گیرد. همانطور که از مشاهدات پیشین مشخص شده است شمع جلویی در گروه شمع‌ها می‌تواند بار استاتیکی بیشتری را نسبت به شمع‌های پشت خود تحمل کند. برای شمع‌هایی که با جهت بارگذاری زاویه عمودی دارند، توزیع بار بین شمع‌ها نسبت به خط مرکز متقارن است و شمع وسط همیشه کوچکترین مقدار بار را به خود می‌گیرد. برای بارهای گذرا و برای بارهای هارمونیک که فرکانس بالاتری دارند می‌توان توزیع نیرو بین شمع‌ها را یکنواخت در نظر گرفت. محققین مختلف نشان داده‌اند که اثر سایه در گروه شمع‌ها در طراحی شمع تحت بار جانبی بسیار حائز اهمیت هستند[۲،۳،۴،۵،۶].

مک وی و همکاران (۱۹۹۵) [۸] با انجام آزمایش سانتری فیوژ بر روی گروه شمع ۲×۲ با فاصله شمع‌ها به اندازه دو برابر قطر شمع، نسبت توزیع بار بین شمع جلو و عقب به ترتیب ۶۰٪ و ۴۰٪ را تبیین کرد. مطالعات بعدی آن‌ها (۱۹۹۸) [۹] نشان داد که جهت قرارگیری شمع‌ها و فاصله بین آن‌ها عوامل اساسی در توزیع نیرو بین شمع‌ها می‌باشد. ژنگ (۱۹۹۹) [۱۰] با تحلیل مدل سه بعدی المان محدود این مشاهدات را تایید کرد. با استفاده از رساله مورس و اینگارد (۱۹۶۸) [۱۱] در مورد مدل مجانب-وار موج استوانه ای و مدل اندر کنش پیشنهادی کی نیا و کاسل (۱۹۸۶) [۱۲] برای دو شمع با بارگذاری جانبی، دابری و گازتاس (۱۹۸۸) [۱۳] فاکتور ساده شده دینامیکی اندر کنش شمع- شمع تحت بارگذاری مداوم را پیشنهاد کرده‌اند. ویرش (۱۹۹۶) [۱۴] با استفاده از مدل‌سازی فیزیکی آزمایشاتی را بر روی شمع‌های مایل تحت بارهای چرخه ای افقی انجام داد و مشاهده کرد که در شمع‌های مایل مثبت و شمع قائم، خاک پشت شمع تحت بار چرخه‌ای حالت خود را از دست داده و یک شکاف بین خاک و شمع ایجاد می‌گردد. این در حالی است که گوه‌ی گسیختگی خاک در پشت شمع مایل منفی به داخل شکاف حرکت کرده و شکاف را پر می‌کند و مقاومت خاک را بهبود می‌بخشد. نتایج آزمایشات روی شمع‌ها با مقیاس واقعی و آزمایشات مدل سانتری فیوژ [۱۵،۱۶] نشان می‌دهد که گروه شمع‌ها به ازای بار ثابت وارده متحمل جابجایی قابل توجهی نسبت به شمع منفرد می‌گردد. هوانگ و همکاران (۲۰۰۱) [۱۷] آزمایشات و تحلیل بارگذاری بر روی گروهی از شمع‌های کوبیده شده و همچنین گروهی از شمع‌های نصب شده به روش حفاری را انجام دادند و چنین استنتاج نمودند که اثرات نصب شمع‌ها می‌تواند بر روی اندرکنش گروه شمع‌ها تاثیر چشمگیری داشته باشند. اندرکنش شمع- خاک – شمع ناشی از تاثیر بار جانبی وارد بر یک گروه شمع در داخل ماسه توسط رولینز و همکاران (۲۰۰۵) [۱۸] مورد بررسی قرار گرفته است. مقایسه نتایج رفتار شمع منفرد با گروه شمع حاکی از آن است که اثرات گروه بطور محسوسی مقاومت جانبی کلیه شمع های یک ردیف گروه را نسبت به رفتار شمع منفرد کاهش می دهد. در سال ۲۰۰۶ میلادی، اوتانی، فام و سانو [۱۹] الگوهای گسیختگی خاک را در اطراف شمع‌ها با استفاده از دستگاه CT اسکن صنعتی (عکسبرداری با استفاده از اشعه ایکس) بررسی کردند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که دستگاه CT اسکن یک وسیله مفید و موثر برای بررسی مسائل ژئوتکنیکی می‌باشد. ولی این روش متحمل هزینه‌های بالایی است. لیکن روش PIV که تا حدود زیادی مشابه این روش می‌باشد، علاوه بر اقتصادی بودن، تطابق خوبی با آزمایش‌های ژئوتکنیکی دارد و می‌توان به جای استفاده از دستگاه CT اسکن، از روش PIV برای تحلیل نتایج استفاده کرد.

حسن زاده و حاجی علیلو (۱۳۹۰) [۲۰] اثر آرایش شمع‌های مایل و قائم در گروه شمع تحت بارگذاری جانبی را با استفاده از مدل‌سازی فیزیکی و روش PIV بررسی نموده و نشان دادند که در آرایش گروه شمع‌ها، شمع مایل باعث تغییر شکل و نشست بیشتر خاک اطراف شمع شده و ظرفیت باربری گروه شمع‌ها را نیز تحت تاثیر قرار می‌دهد.

حاجی علیلو و همکاران (۲۰۱۱) [۲۱] با استفاده از مدل‌سازی فیزیکی و مقایسه آن‌ها با نتایج روش‌های تئوری، تغییر شکل‌های اطراف شمع‌ها و شکل گوه گسیختگی خاک در مقابل شمع منفرد قائم را بدست آورده و نشان داده‌اند که گوه گسیختگی خاک بصورت مخروطی شکل در مقابل آن تشکیل می‌شود. آن‌ها با استفاده از روش تعادل حدی مشخصات این گوه را تعیین کرده و روابطی برای بدست آوردن ظرفیت باربری و میزان تغییر شکل‌های شمع‌های تحت بارگذاری جانبی پیشنهاد نموده‌اند. در این تحقیق به بررسی تأثیر زاویه تمایل شمع‌های مایل در گروه‌های شمع با استفاده از روش‌های تجربی پیشرفته مانند ردیابی حرکت ذرات خاک پرداخته شده است.

همچنین، این مطالعه به بررسی پدیده "اثر سایه "در اندرکنش خاک و شمع‌های مایل پرداخته است.

## ۲. مدل‌سازی فیزیکی

در این تحقیق برای مدل‌سازی گروه شمع، از چهار شمع با جنس آلومینیوم به طول 30cm، عرض 3cm و ضخامت 2mm استفاده شده است.

شمع‌های استفاده شده در این تحقیق بصورت شمع بلند بوده و تعریف تئوریک آن به صورت زیر است:

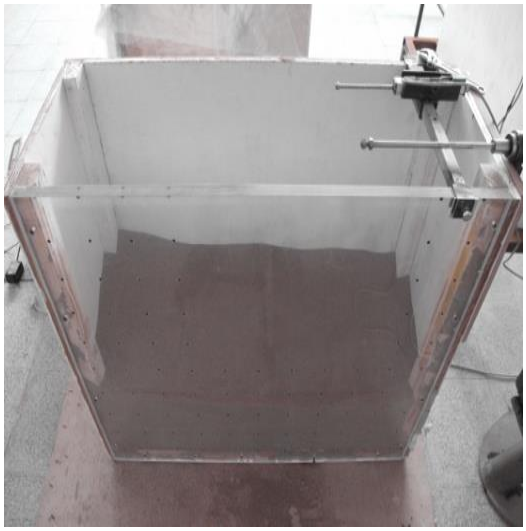
$$\frac{L}{T} \geq 4 \quad \text{و} \quad T = \sqrt[5]{\frac{EI}{n_h}} \qquad (۱)$$

که در آن L طول شمع، T فاکتور طول، EI سختی خمشی شمع و $n_h$ مدول ثابت عکس العمل افقی بستر می‌باشد که در این پروژه به صورت تجربی، در حدود $0.2\ (kg/cm^3)$ در نظر گرفته شده است.

سختی خمشی، فاکتور طول و نسبت L/T هر یک از شمع ها به ترتیب $1400\frac{kg}{cm^2}$، 5.87cm و 5.11 می‌باشد که مقدار نسبت L/T نشانگر انعطاف پذیر بودن شمع‌ها می‌باشد. شمع‌ها در یک ردیف با فاصله سه برابر عرض شمع یعنی 9cm از یکدیگر بصورت مفصلی به سر شمع متصل شدند. گروه شمع‌های چهارتایی با حالت قرارگیری شمع‌ها مطابق شکل ۱ می‌باشد. شمع‌های مایل موجود در گروه، هر یک با زاویه ۱۵+ یا ۱۵- درجه نسبت به محور قائم قرار گرفته‌اند. همچنین در آزمایشات برای مقایسه بهتر نحوه عملکرد شمع‌ها در گروه یک آزمایش بر روی شمع منفرد نیز انجام گرفته است.

برای قرار دادن مدل فیزیکی شمع‌ها در محلی که بتوان از آن عکس دیجیتال دریافت کرد نیاز به جعبه‌ای است که یک جدار آن شفاف باشد. در این تحقیق از جعبه‌ی آزمایش مطابق شکل ۲ استفاده شده که دارای ابعاد 80*70*30cm با ضخامت جدارهای جانبی و پشت 1.8cm می‌باشد.

نحوه انجام آزمایشات بصورت شماتیک در شکل ۳ نشان داده شده است. کلاهک شمع توسط یک شفت به گیج اندازه‌گیری نیرو و از طریق آن به الکتروموتور متصل شده است. همچنین سمت دیگر کلاهک شمع ها به LVDT جهت اندازه‌گیری جابجایی‌ها وصل گردیده است. لازم به ذکر است که با طی روند بارگذاری، از بازه‌های زمانی مشخص (۴۰ ثانیه) از وجه مقابل جعبه آزمایش عکس‌برداری شده و نتایج حاصل از آن با استفاده از PIV تحلیل گردیده است.

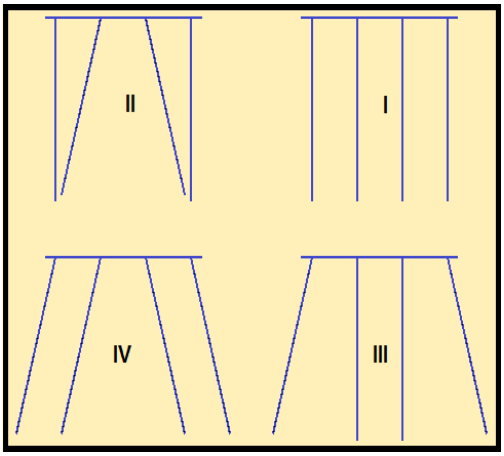


**شکل ۱. جعبه آزمایش**

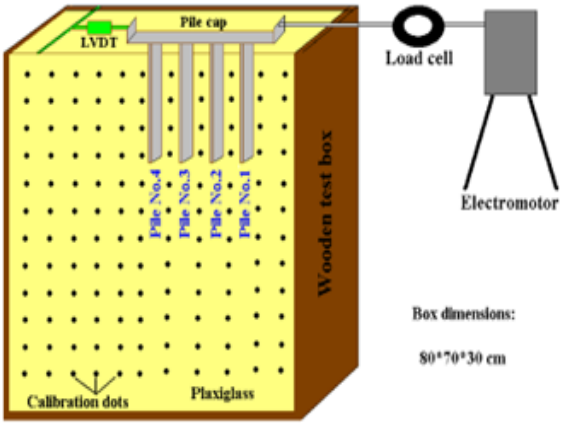
**جدول ۱. مشخصات خاک مورد آزمایش**

| $\gamma_{d\ max}$ (kN/m$^3$) | $\gamma_{d\ min}$ (kN/m$^3$) | Gs | φ (ultimate) |
|---|---|---|---|
| 17.08 | 14.2 | 2.637 | 28° |

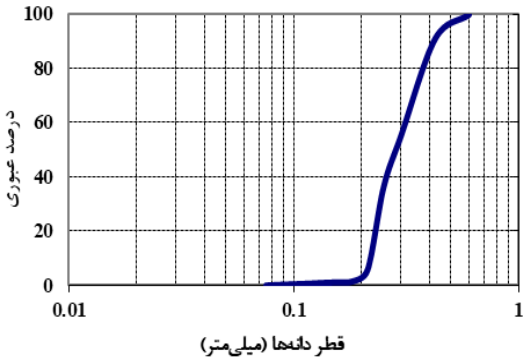
در این تحقیق برای یافتن لنگر و کرنش ایجاد شده در شمع‌ها از کرنش سنج استفاده شده است. این کرنش سنج‌ها بصورت طولی بر روی یکی از شمع‌ها به تعداد ۶ عدد نصب جهت انجام آزمایشات از ماسه خشک منطقه صوفیان واقع در شمال غرب ایران استفاده شده است. آزمایشات لازم برای تعیین دانه‌بندی و مشخصات ماسه انجام گردید که نتایج حاصل از آن‌ها در شکل ۴ و جدول ۱ ارائه شده است. شایان ذکر است که ماسه مورد استفاده بر اساس طبقه بندی متحد، دانه‌بندی یکنواخت داشته و جزو خاک‌های بد دانه‌بندی شده SP قرار می‌گیرد.




شکل ۲. نمایش آرایش‌های گروه شمع‌ها




شکل ۳. شکل شماتیک نحوه آزمایشات




شکل ۴. نمودار دانه‌بندی خاک مورد آزمایش

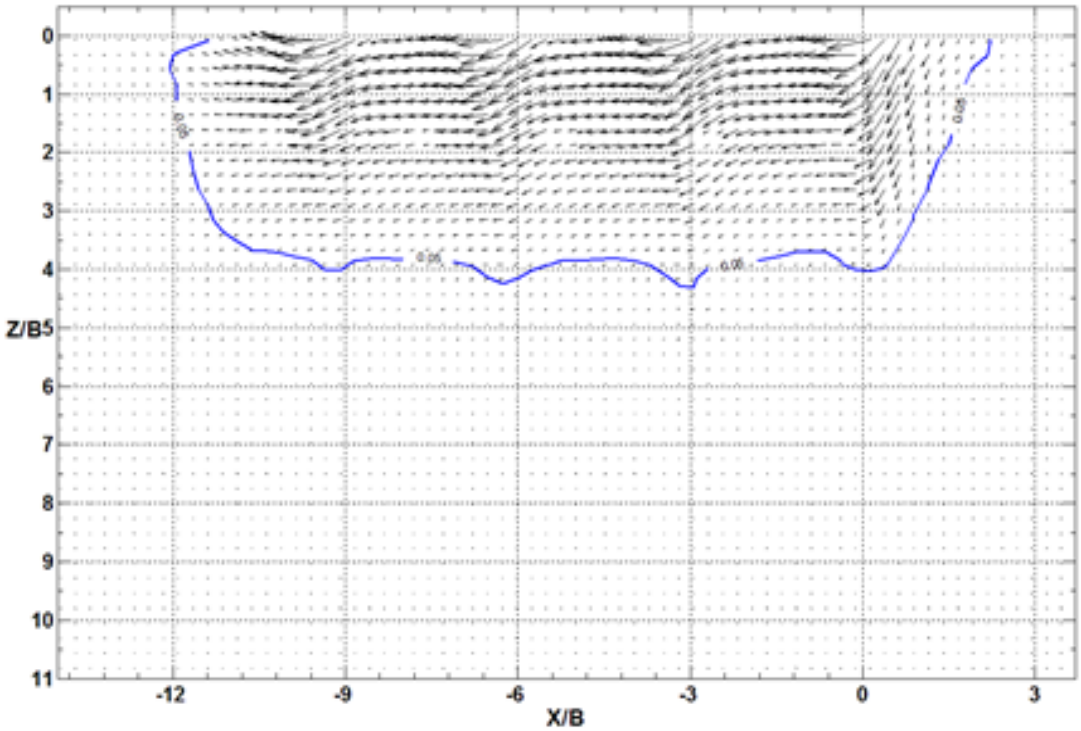
در جدول ۲ ترتیب و فاصله‌ی کرنش سنج‌ها مشخص شده است.

جدول ۲. جانمایی و تعداد کرنش‌های نصب شده روی شمع

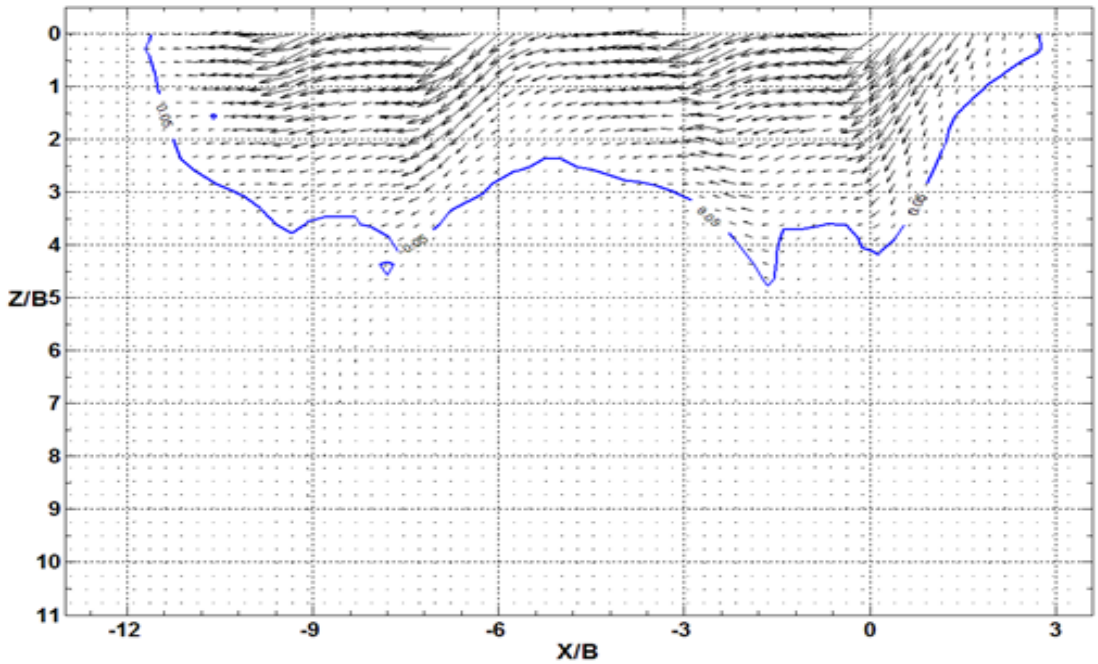
| فاصله از سر شمع (cm) | شماره کرنش سنج |
|---|---|
| ۱۲.۲ | ۱ |
| ۹.۹ | ۲ |
| ۷.۶ | ۳ |
| ۶.۱ | ۴ |
| ۴.۶ | ۵ |
| ۳.۱ | ۶ |

## ۳. بحث و نتایج

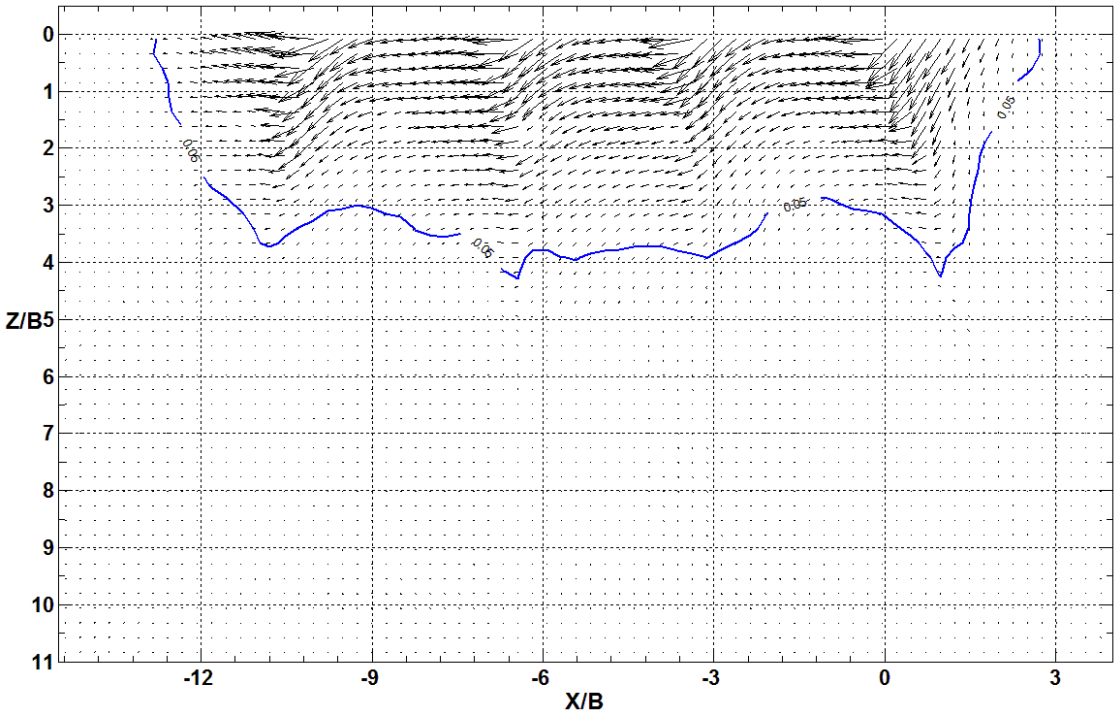
در این تحقیق، برای بدست آوردن تغییر شکل‌های ایجاد شده در شمع‌ها و خاک اطراف آن‌ها از تحلیل عکس‌های دیجیتال استفاده شده است. پس از تحلیل عکس‌ها بردارهای جابجایی، کرنش‌های ایجاد شده و زوایای حرکت دانه‌های خاک مشخص گردیده است. در شکل‌های ۵ تا ۱۴ موقعیت مکانی عمق Z و مختصات افقی X نسبت به عرض شمع B به صورت بی‌بعد نشان داده شده‌اند. منحنی‌هایی که در شکل‌های ۵ تا ۹ رسم شده است ناحیه تغییر شکل‌هایی را نشان می‌دهد که برابر 0.5mm می‌باشند. ناحیه بالای منحنی، تغییر شکل‌های بزرگ‌تر و پایین آن، تغییر شکل‌های کوچکتر از 0.5mm را شامل می‌شود. از بررسی نتایج چنین استنباط می شود که خاک موجود در اطراف قسمت پایین شمع جابجا نشده و در محل اولیه خود باقی می‌مانند و این موضوع به دلیل عدم جابجایی شمع بلند از عمق گیرداری ($Z = 4B$) به پایین می‌باشد. همچنین ملاحظه می‌شود که هم در شمع منفرد و هم در گروه شمع‌ها، میدان جابجایی در سمت چپ گسترش زیادتری دارد که این مساله با جهت نیروی اعمالی راست به چپ مطابقت دارد. استفاده از شمع‌های مایل باعث پایین تر بردن جابجایی‌ها شده است که این مسئله ناشی از ایجاد کشش یا فشار در شمع‌های مایل می‌باشد. همچنین این اثر باعث نشست بیشتر در خاک اطراف شمع‌ها شده است. با توجه بیشتر می‌توان دید که در آرایش های ۳ و ۴ بدلیل وجود شمع‌های مایل در کناره‌های گروه، میدان تغییر شکل گسترده‌تر از دیگر حالات می‌باشد.



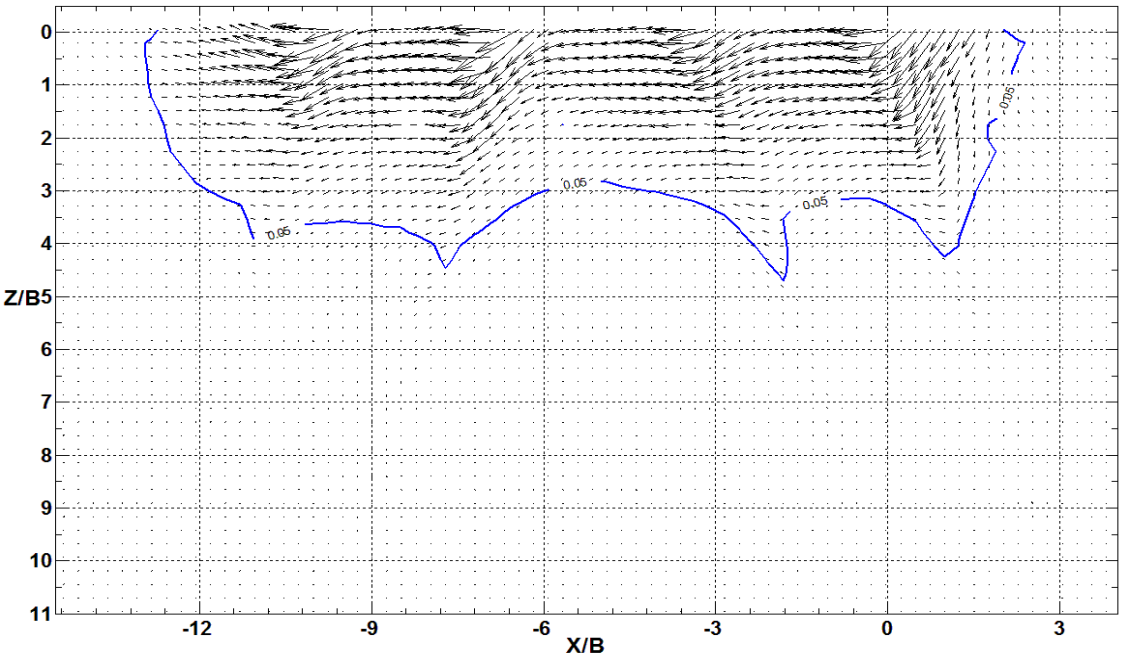

شکل ۵. بردارهای جابجایی و محدوده تاثیر آرایش گروه شمع۱



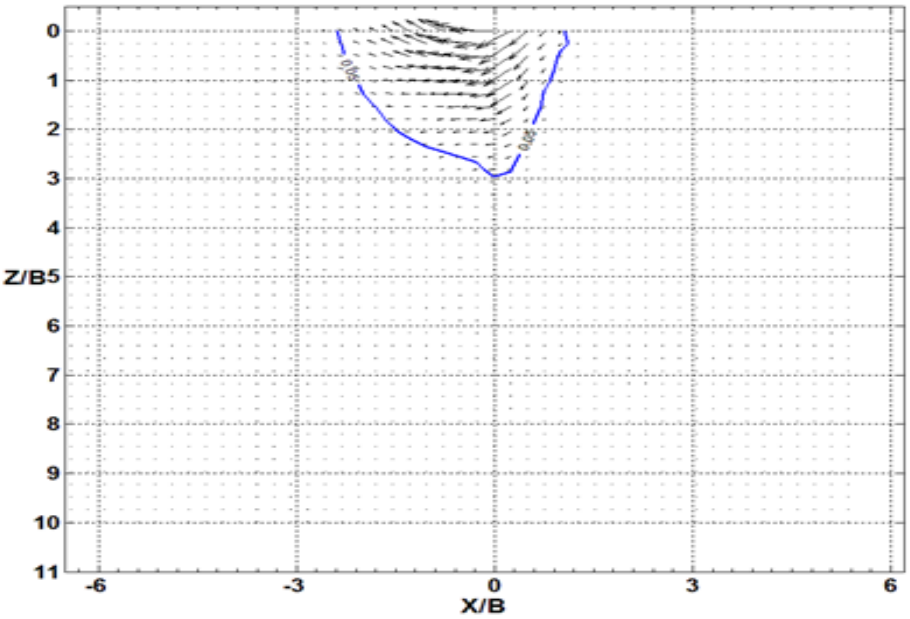

شکل ۶. بردارهای جابجایی و محدوده تاثیر آرایش گروه شمع ۲




شکل ۷. بردارهای جابجایی و محدوده تاثیر آرایش گروه شمع۳

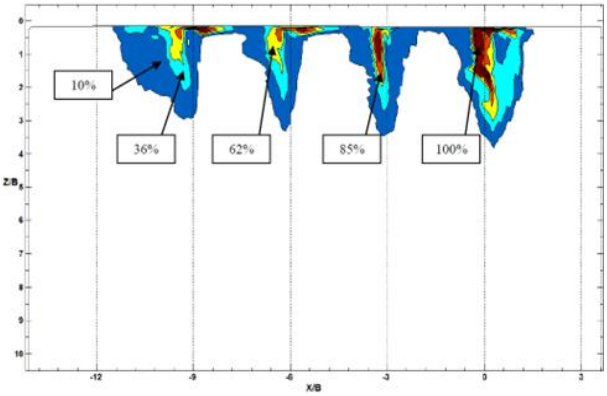



شکل ۸. بردارهای جابجایی و محدوده تاثیر آرایش گروه شمع ۴

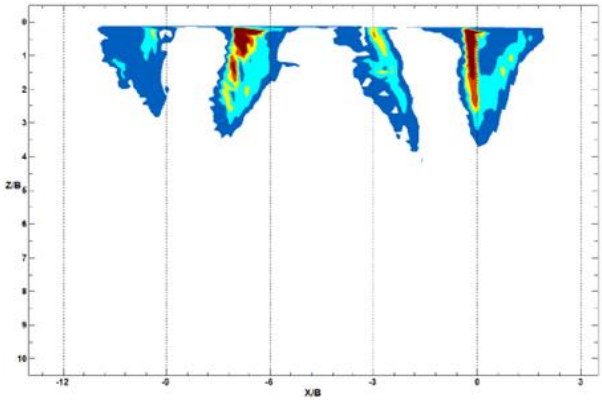



**شکل ۹. بردارهای جابجایی و محدوده تاثیر تک شمع**

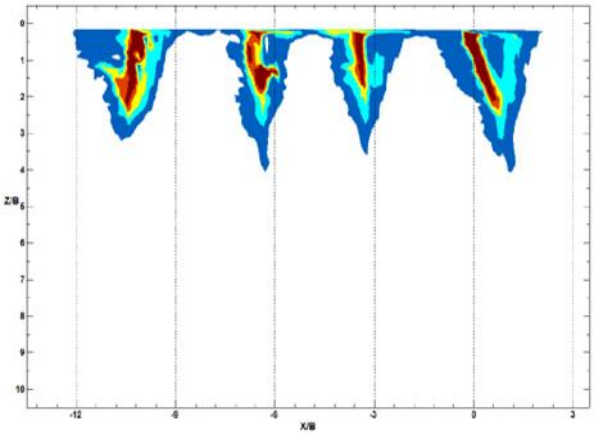
کرنش برشی خاک اطراف گروه شمع‌های آرایش‌های ۱ تا ۴ و شمع منفرد در اشکال ۱۰ تا ۱۴ ترسیم گردیده است. نواحی مشخص شده بر روی شکل ۱۰ درصدی از کرنش برشی حداکثر موجود در خاک اطراف شمع‌ها (100% کرنش برشی) را نشان می‌دهد. همچنین این شکل‌ها تغییر شکل‌های خاک اطراف شمع‌ها را مشخص می‌نمایند. ناحیه سفید رنگ شکل‌ها مربوط به کرنش برشی صفر درصد می‌باشد. این درصدها برای شدت رنگ‌ها در شکل‌های ۱۱ تا ۱۴ نیز صادق می‌باشد. گوه پایا و پویا به ترتیب در مقابل شمع جلو و پشت شمع عقب دیده می‌شود. گوه‌های پویا در آرایش‌های ۳ و ۴ که مربوط به شمع‌های مایل می‌باشند بزرگ‌تر و کامل‌تر از بقیه حالات بوده و نشانگر نشست بیشتر خاک در پشت این نوع شمع‌ها می‌باشد. همچنین گوه گسیختگی پایای خاک در مقابل شمع‌های جلویی آرایش‌های ۳ و ۴ (شکل ۱۲ و ۱۳) نیز بزرگ‌تر و کامل‌تر از حالات دیگر می‌باشند. اتصال قسمت رنگی بین شمع‌ها نیز اثر سایه بوجود آمده را نشان می‌دهد.



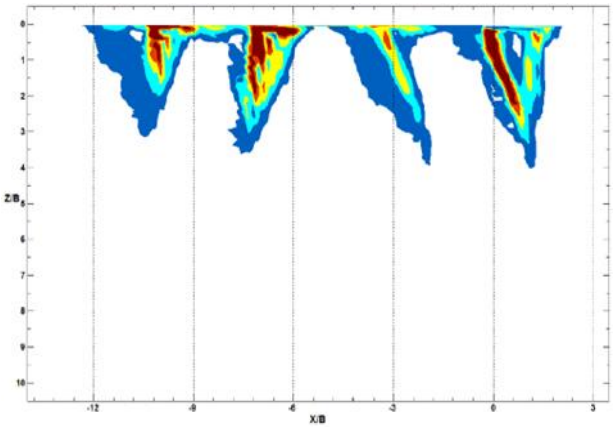

**شکل ۱۰. کرنش برشی خاک اطراف آرایش ۱**



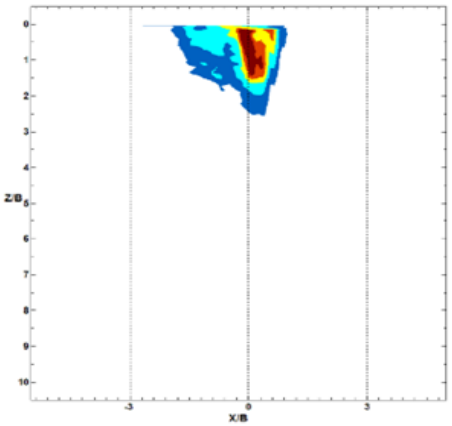
**شکل ۱۱. کرنش برشی خاک اطراف آرایش ۲**



شکل ۱۲. کرنش برشی خاک اطراف آرایش۳



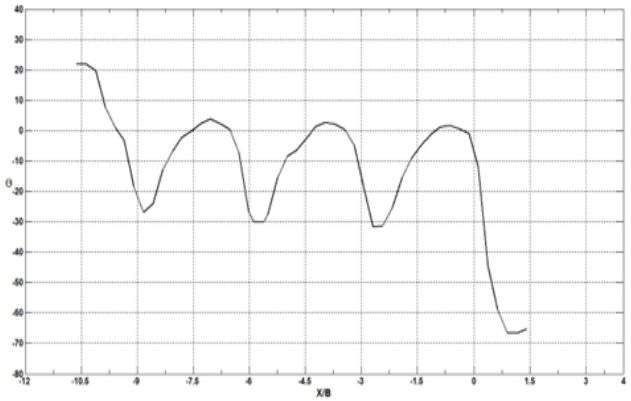
شکل ۱۳. کرنش برشی خاک اطراف آرایش ۴



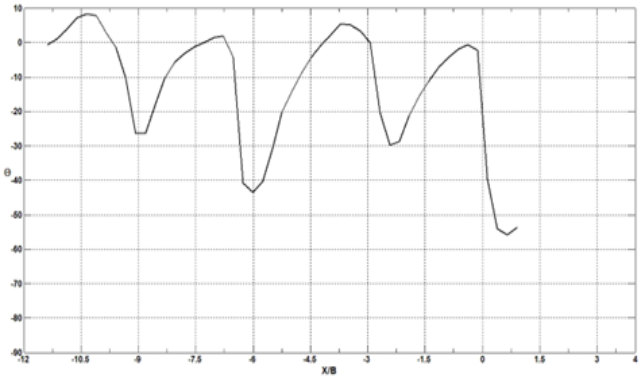
شکل ۱۴. کرنش برشی خاک اطراف تک شمع

شکل‌های ۱۵ تا ۱۹ زاویه بردارهای جابجایی سطح خاک را نسبت به تغییر مکان نسبی نشان می‌دهد. در این شکل‌ها محور قائم زاویه بردارهای جابجایی را بر حسب درجه و محور افقی نسبت موقعیت مکانی بر عرض شمع را مشخص می‌کند. این نمودارها برای بردارهایی که اندازه آن‌ها 0.05cm و بیشتر از این مقدار می‌باشد، رسم شده است. شایان ذکر است که زاویه مشخص شده نسبت به محور افقی می‌باشد. با توجه به شکل ۱۹ مربوط به حالت تک شمع، مشاهده می‌شود که بردارهای جابجایی پشت شمع در X/B=0.75، با زاویه‌ای برابر $-60^{\circ}$ و بردارهای جابجایی مقابل شمع در X/B=-2، با زاویه‌ای برابر $43^{\circ}$ نسبت به افق قرار گرفته‌اند. با در نظر داشتن این مسئله انتظار می‌رود در گروه شمع‌ها بدون وجود اثر سایه، بردارهای جابجایی اطراف شمع‌ها طبق الگوی تک شمع قرار بگیرند. ولی همانطوری که در شکل‌های ۱۵ تا ۱۸ دیده می‌شود، بردارهای جابجایی خاک پشت شمع‌ها با زاویه‌ای تندتر نسبت به افق رو به پایین قرار گرفته‌اند در حالی که بردارهای جابجایی خاک مقابل شمع‌ها با وجود اثر سایه نتوانسته‌اند الگوی تغییر شکل موجود در خاک مقابل تک شمع را ایجاد کنند. زاویه بردارهای جابجایی خاک مقابل شمع‌های وسط در آرایش ۱ با زاویه‌ای اندک و مثبت رو به بالا قرار گرفته‌اند. این مسئله در آرایش ۲ و ۴ تکرار می‌شود. ولی در آرایش ۳ با تعامل شمع مایل منفی مستقر در شمع اول و شمع قائم مستقر در موقعیت شمع دوم، زاویه بردارهای جابجایی خاک پشت شمع دوم منفی شده است.

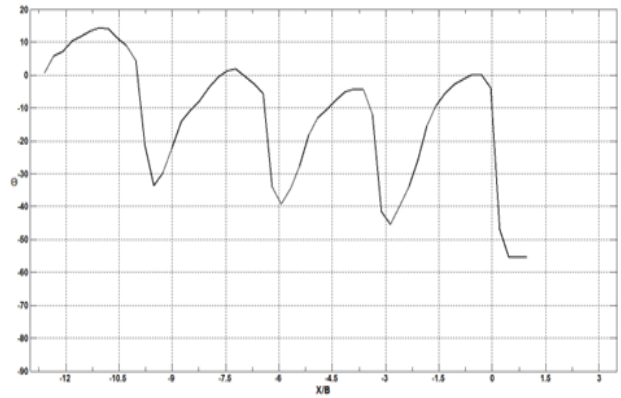
اثر موقعیت شمع در گروه باعث شده است که زاویه بردارهای جابجایی خاک پشت شمع‌ها در آرایش ۱ با کاهش اثر بار طی تغییر موقعیت از شمع اول تا چهارم کاهش یابد. در گروه شمع‌هایی که در آن‌ها از شمع مایل مثبت استفاده شده است، بردارهای جابجایی خاک در محل استقرار این شمع‌ها با زاویه‌ای تندتر نسبت به افق رو به پایین قرار گرفته‌اند. یعنی اثر زاویه شمع بیشتر از اثر موقعیت قرارگیری شمع در گروه می‌باشد. این موضوع در مورد شمع‌های سوم آرایش‌های ۲ و ۴ چشمگیرتر است. در تمامی حالات گروه شمع‌ها بردارهای جابجایی واقع در پشت شمع جلویی کمترین زاویه منفی را دارند. این مسئله با توجه به اثر موقعیت قرارگیری شمع در گروه صورت می‌گیرد.



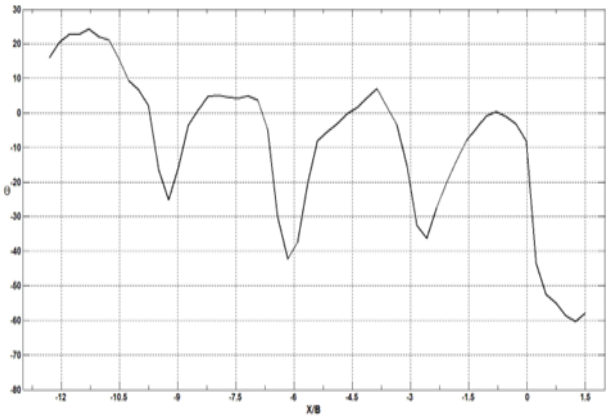

**شکل ۱۵. تغییرات زاویه بردارهای جابجایی سطح خاک نسبت به موقعیت مکانی نسبی برای آرایش ۱**



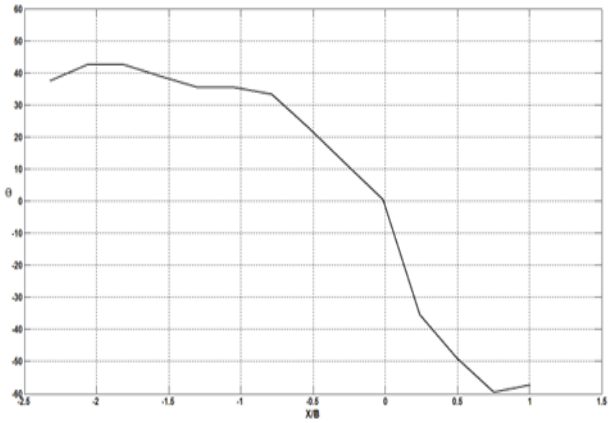

**شکل ۱۶. تغییرات زاویه بردارهای جابجایی سطح خاک نسبت به موقعیت مکانی نسبی برای آرایش ۲**




**شکل ۱۷. تغییرات زاویه بردارهای جابجایی سطح خاک نسبت به موقعیت مکانی نسبی برای آرایش ۳**



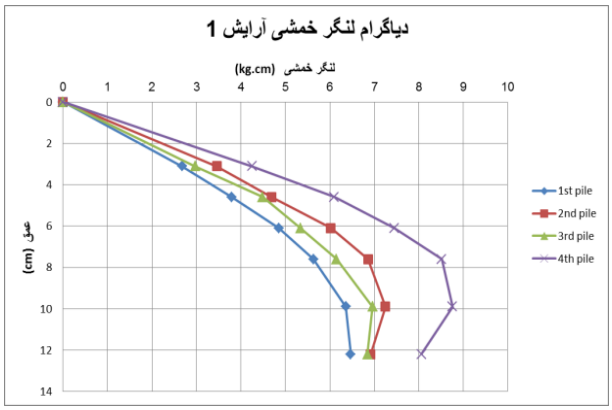

**شکل ۱۸. تغییرات زاویه بردارهای جابجایی سطح خاک نسبت به موقعیت مکانی نسبی برای آرایش ۴**



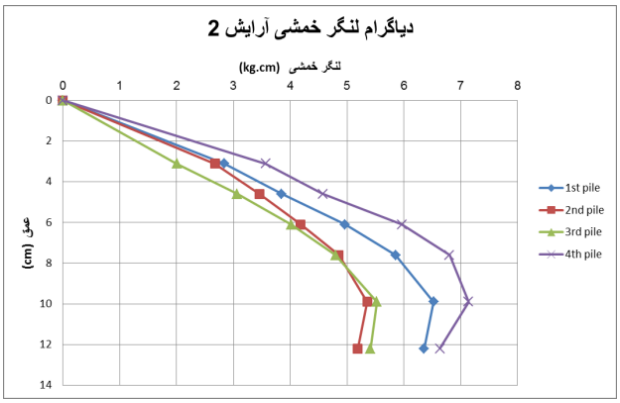

**شکل ۱۹. تغییرات زاویه بردارهای جابجایی سطح خاک نسبت به موقعیت مکانی نسبی برای تک شمع**

اشکال ۲۰ تا ۲۳ نمودارهای لنگر خمشی شمع‌ها را نشان می‌دهند. محور قائم در این نمودارها نشانگر عمق از محل اتصال شمع‌ها به کلاهک شمع و محور افقی، لنگر خمشی را بر حسب kg.cm نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود شمع‌های جلو در گروه، متحمل لنگر خمشی بیشتری نسبت به شمع‌های پشت خود می‌شوند (به استثناء آرایش گروه شمع ۲). همانطور که گفته شد، با توجه به نزدیک بودن شمع‌ها در گروه و ایجاد اثر سایه در آن، خاک مقابل شمع‌ها به جای بالا آمدگی، به فرورفتگی پشت شمع جلویی خود ریزش کرده و آن را پر می‌کند. لذا فشار پایای گوه ایجاد شده در مقابل شمع‌های پشتی به مراتب کمتر می‌گردد و در نتیجه مقادیر لنگر خمشی ایجاد

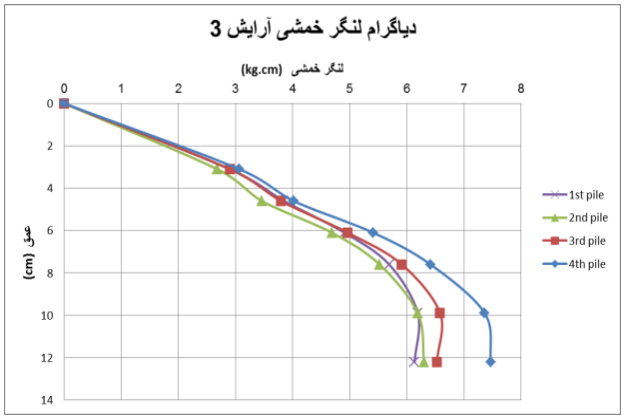
شده در شمع‌های پشتی کمتر گردیده است. بالعکس در شمع جلویی (شمع چهار) که اثر سایه در مقابل آن وجود ندارد موجب ایجاد فشار پایا و لنگر خمشی بیشتری شده است.



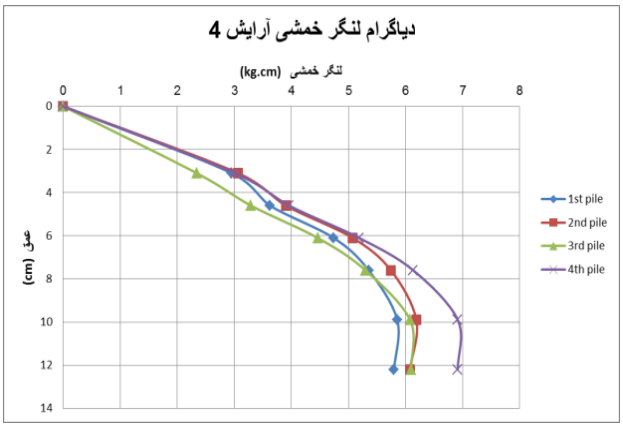

شکل ۲۰. نمودارهای لنگر خمشی آرایش گروه شمع ۱




شکل ۲۱. نمودارهای لنگر خمشی آرایش گروه شمع ۲




شکل ۲۲. نمودارهای لنگر خمشی آرایش گروه شمع ۳




شکل ۲۳. نمودار های لنگر خمشی آرایش گروه شمع ۴

## ۴. نتیجه گیری

۱- با توجه به اندرکنش متقابل شمع - شمع در گروه، رفتار هر یک از آن‌ها با رفتار شمع منفرد معادل، تحت بارهای جانبی متفاوت خواهد بود.

۲- فاصله کم بین شمع‌های گروه باعث بوجود آمدن اثر گروه (اثر سایه) بین شمع‌ها گشته و ظرفیت باربری و تغییر شکل‌ها را تحت تاثیر قرار می‌دهد.

۳- میزان نشست خاک پشت شمع مایل مثبت بیشتر از شمع قائم و میزان نشست خاک پشت شمع قائم بیشتر از شمع مایل منفی می‌باشد.

۴- در بررسی جابجایی‌های خاک اطراف گروه شمع‌ها، در می‌توان نتیجه گرفت که خاک مقابل شمع‌های وسط و عقب فرصت لغزش به سمت بالا را پیدا نکرده و در فرورفتگی خاک پشت شمع‌ها ریزش کرده و آن را پر می‌کند.

۵- تاثیر مایل بودن شمع نسبت به تاثیر مکان استقرار شمع در گروه برای تغییر شکل‌های قائم بیشتر است.

۶- شمع جلو در گروه شمع‌ها متحمل بیشترین فشار و لنگر خمشی می‌گردد و همچنین عمق گیرداری در آن نسبت به شمع‌های عقب کمتر است.

## ۶. منابع


[1] Bowles, J. E., (1996). "Foundation analysis and design." McGraw-Hill Companies, Inc.

[2] Ng, C.W.W., Zhang L.M. and Dora C.N.N. (2001). "Response of laterally loaded large-diameter bored pile groups". Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE. 127.

[3] Chae, K. S., Ugai, K., and Wakai, A., (2004). "Lateral resistance of short single and pile groups located near slopes". International Journal of Geomechanics 4. No. 1: 93-103.

[4] Ilyas, T., Leung C.F. and Budi S.S., (2004). "Centrifuge model study of laterally loaded pile groups in clay". Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE. 130. No.3: 274-283.

[5] Rollins, K.M., Peterson K.T. and Weaver T.J., (1998). "Lateral load behavior of full-scale pile group in clay". Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE. 124. No.6: 468-478.

[6] Rollins, K. M., Lane, J. D., and Gerber, T. M., (2005). "Measured and computed lateral response of a pile group in sand.", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE.

[7] Brown, D. A., Morrison, C., and Reese, L. C., (1988). "Lateral load behavior of a pile group in sand." J. Geotech. Eng., 113(11), 1326-1343.

[8] McVay, M., Casper, R. and Shang, T. (1995). " Laterally response of three-row groups in loose to dense sands at 3D and 5D pile spacing". Journal of Geotechnical Engineering, ASCE. 124. No.10: 1016-1026.

[9] McVay, M., Zhang, L.M., Molnit, T. and Lai, P. (1998). "Centrifuge testing of large laterally loaded pile groups in sands". Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE. 121. No.5: 436-441.

[10] Zhang, L.M., McVay, M.C. and Lai, P., (1999). "Numerical analysis of laterally loaded 3×3 to 7×3 pile groups in sands". Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE. 125. No.11: 936-946.

[11] Morse, P.M. and Ingard, K.U., (1968). "Theoretical Acoustics". New York, McGraw-Hill.

[12] Kaynia, A.M. and Kausel, E., (1982). "Dynamic stiffness and seismic response of pile groups". Res. Rep. No. R82-03, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Mass.

[13] Dobry, R. and Gazetas, G., (1988). "Simple method for dynamic stiffness and damping of floating pile groups". Geotechnique 38, No.4: 557-574.

[14] Veeresh, C. (1996). "Behaviour of batter piles in marine clays." PhD thesis. Indian Institute of Technology, Madras, India.

[15] Remaud, D., Garnier, J., and Frank, R. (1998). "Laterally loaded piles in dense sand: Group effects". Proc., Int. Conf. Centrifuge 98, T. Kimura, O. Kusakabe, and J. Takemura, eds., Balkema, Rotterdam, The Netherlands, 533–538.

[16] McVay, M., Zhang, L.M., Molnit, T. and Lai, P. (1998). "Centrifuge testing of large laterally loaded pile groups in sands". Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE. 121. No.5: 436-441.

[17] Huang, A.B., Hsueh, C.K., O'Neill, M.W., Chern, S., and Chen, C. (2001). "Effects of construction on laterally loaded pile groups". ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol.127, No. 5, 385-397.

[18] Rollins, K. M., Lane, J. D., and Gerber, T. M. (2005). "Measured and computed lateral response of a pile group in sand.", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE.

[19] Otani, J., Pham, K.D. & Sano, J., (2006). "Investigation of failure patterns in sand due to laterally loaded pile using X-Ray CT". Soils and Foundations, 46(4): 529-535.

[20]حسن زاده، م.، حاجی علیلوی بناب، م.، (۱۳۹۰). "بررسی اثر آرایش شمع‌های مایل و قائم در گروه شمع تحت بارگذاری جانبی". اولین کنفرانس بین المللی ساخت ساز شهری در مجاورت گسل‌های فعال، تبریز، ایران.

[21] Hajialilue-Bonab, M., Sojoudi, Y., and Puppala, A. J. (2011). " Study of strain wedge parameters for laterally loaded piles.", International Journal of Geomechanics, ASCE.