

## بررسی رفتار شمع‌های مایل در اسکله‌ها تحت بار قائم و جانبی به روش عددی

حسن امیدعلی\*\*\*

دانشجوی کارشناسی ارشد عمران، گرایش خاک و پی دانشکده فنی، دانشگاه تهران

سهیل محمدی\*

دانشیار دانشکده عمران، دانشگاه تهران

علی فاخر\*\*

دانشیار دانشکده عمران، دانشگاه تهران

### چکیده

در این مقاله به بررسی رفتار شمع‌های مایل در گروه شمع متدوال در اسکله‌ها و سایر سازه‌های دریایی پرداخته شده است. تحقیق و مطالعه به روش عددی و با استفاده از نرم‌افزار FLAC3D انجام گرفته است، این نرم‌افزار بر اساس روش عددی تفاضل‌های محدود FD استوار است. خاک به صورت محیط پیوسته و با مدل رفتاری موهر-کولمب در نظر گرفته شده و شمع‌ها و سرشمع از جنس بتن و با مدل رفتاری الاستیک فرض شده‌اند. به منظور صحت سنجی نتایج، یک شمع مدل گردیده و نتایج به دست آمده با نتایج ارائه شده توسط سایر محققین و روابط موجود مقایسه شده است. در این مقاله 4 آرایش مختلف برای قرارگیری شمع‌ها در یک اسکله شامل 4 شمع تحت اثر بارهای قائم و جانبی تحلیل شده و در نهایت مقادیر نیروها و تغییرمکان سرشمع برای این آرایش‌ها با هم مقایسه شده است. از مقایسه این نتایج می‌توان رفتار شمع‌های مایل قرار گرفته در گروه‌های شمع را بهتر درک کرد و از آن جهت بهینه‌سازی طراحی‌ها استفاده نمود.

**کلمات کلیدی:** شمع مایل، گروه شمع، تمرکز تنش، تغییرمکان، FLAC3D.

### مقدمه

گروه شمع، بطور گسترده در سازه‌های دریایی، فراساحلی، ساحلی و پهلوگیری‌های دولفینی مورد استفاده قرار می‌گیرد. نیروهای این سازه‌ها، نیروهای ثقلی وزن سازه‌ها و جرثقیل‌ها و ماشین‌آلات قرار گرفته روی آنها می‌باشد، نیروهای سیکلیک زلزله، امواج دریا و نیروهای ضربه کشتی‌ها نیز، نیروهای جانبی هستند که به این سازه‌ها وارد می‌شود. به علت تفاوت این نیروها در قسمت‌های مختلف این سازه‌ها، برای افزایش بازدهی کلی از شمع‌های مایل و قائم در این سازه‌ها استفاده می‌شود.

شمع‌های مایل بسته به نوع گسیختگی خاک به دو دسته شمع‌های مایل مثبت (لغزش گوه گسیختگی به سمت بالای شمع) و شمع‌های مایل منفی (لغزش گوه گسیختگی به سمت پایین شمع) تقسیم می‌شوند. [1] از شمع‌های مایل منفی به دلیل مقاومت بالا در مقابل بارهای جانبی استاتیکی و سیکلیک به طور گسترده استفاده می‌شود. رفتار شمع‌های مایل یک مسأله اندرکنش خاک-سازه است و مسأله مهمی در آنالیز و طراحی می‌باشد. به دلیل پیچیدگی این مسأله ضروری است که پدیده اندرکنش تحت اثر بارهای استاتیکی و سیکلیک بررسی شود. تاکنون چندین تحقیق انجام شده است که در آنها رفتار شمع‌های مایل در آزمایشگاه و در مطالعات مختلف بررسی شده است. چپوتاریف [1] در سال 1953 با انجام تست‌های مدل، سطح لغزش را در پائین شمع‌های مایل منفی گزارش کرد. پراکاش و سابرامانیام [2] بر روی شمع‌های مایل، تست مدل انجام دادند و نشان دادند که مقاومت شمع‌های مایل منفی تحت اثر بارهای جانبی بیشتر از مقاومت شمع‌های مایل مثبت می‌باشد. بررسی تئوریک شمع‌های مایل منفی تحت اثر بارهای جانبی به وسیله علیزاده و دیویسون [3] انجام گرفته است، پولوس و مدهاو [4] در

تهران، خیابان 16 آذر، دانشگاه تهران، دانشکده مهندسی عمران، تلفن: 61112258، فکس: 66403808

\*Email : [smoham@ut.ac.ir](mailto:smoham@ut.ac.ir)

\*\*Email : [afakher@ut.ac.ir](mailto:afakher@ut.ac.ir)

\*\*\*Email : [afakher@ut.ac.ir](mailto:afakher@ut.ac.ir)

سال 1971 رفتار شمع‌های مایل تحت اثر بارهای استاتیکی جانبی را بررسی کردند و نشان دادند که تغییر مکان جانبی به زاویه شمع مایل بستگی دارد. مایر هوف و رنجان [5] ظرفیت جانبی شمع‌های مایل مثبت و منفی را در خاک‌های دانه‌ای بررسی کردند. همچنین مطالعات آزمایشگاهی بر روی شمع‌های مایل تکی و گروه شمع‌های مایل انجام دادند و نشان دادند که مقاومت شمع‌های مایل منفی بیشتر از شمع‌های مایل مثبت می‌باشد. آنها همچنین دریافته‌اند، تغییر مکان جانبی گروه شمع شامل یک شمع قائم و مایل (چه مثبت و چه منفی) از تغییر مکان گروه شمع شامل دو شمع قائم کمتر است. مایر هوف و یالسین [6] برای مطالعه رفتار شمع‌های مایل انعطاف‌پذیر تحت اثر بارهای زاویه‌دار یک سری آزمایش مدل انجام دادند.

در سال 2001 راجاشیری و سیتهارام [7] مدلی بر اساس روش اجزاء محدود برای مطالعه رفتار غیرخطی شمع‌های مایل ارائه کردند. در این مدل برای مطالعه مقاومت شمع‌های مایل و تغییر مکان جانبی به وجود آمده تحت اثر بارهای جانبی استاتیکی و سیکلیک یک سری توابع P-Y ارائه شده است. در این تحقیق، خاک به صورت محیط پیوسته مدل نشده است، بلکه برای مدل کردن خاک از تعدادی فنر استفاده شده است.

### باربری شمع تکی و گروه شمع

ظرفیت خالص باربری  $P_u$  شمع تک برابر مقدار زیر می‌باشد:

$$P_u = P_{su} + P_{bu} - W \quad (1)$$

که در این رابطه  $P_{su}$  مقاومت نهایی اصطکاکی،  $P_{bu}$  مقاومت نهایی نوک و  $W$  وزن شمع می‌باشد.

برای مطالعه باربری گروه شمع ضروری است بین دو نوع گروه تمایز قائل شد:

1- گروه شمع در شرایطی که سرشمع در تماس با خاک نیست.

2- شالوده‌های شمع که سرشمع در تماس با خاک است.

برای هر دو دسته ضروری است تا رابطه بین ظرفیت باربری نهایی یک شمع و گروه شمع مشخص شود. برای این منظور ضریب بازدهی گروه شمع چنین تعریف می‌شود:

$$\eta = \frac{\text{ظرفیت باربری نهایی گروه شمع}}{\text{ظرفیت باربری نهایی یک شمع}} \quad (2)$$

در گروه شمع ممکن است دو نوع گسیختگی اتفاق بیفتد، یکی گسیختگی کلی که در صورت گسیخته شدن و نشست کل گروه اتفاق می‌افتد و دیگری گسیختگی منفرد که در صورت گسیخته شدن یک یا چند شمع از گروه اتفاق می‌افتد، نوع گسیختگی به عوامل زیادی بستگی دارد ولی مهم‌ترین این عوامل فاصله مرکز به مرکز شمع‌های گروه و نوع خاک می‌باشد.

در گروه شمع در خاک رس، چه برای شمع اتکایی و چه برای شمع اصطکاکی بازده گروه برای فاصله‌های بزرگ برابر 1 می‌باشد و با کاهش فاصله شمع کاهش می‌یابد. برای این گروه‌ها توصیه می‌شود که حتی در صورت وجود دو نوع باربری نوک و اصطکاکی، برای تعیین ظرفیت باربری نهایی گروه فقط از باربری اصطکاکی استفاده شود.

اگرچه اطلاعات کمتری برای محاسبه بازده گروه شمع در خاک‌های دانه‌ای نسبت به خاک‌های رسی وجود دارد ولی نکته مثبت در مورد گروه شمع در ماسه این است که معمولاً بازده گروه شمع در ماسه بزرگ‌تر از 1 می‌باشد.

### تخمین نشست

برای تخمین مقدار نشست شمع با توجه به بار وارده روابط متنوعی ارائه شده است، که بسیاری از آنها از دقت خوبی برخوردار نیستند، بعضی از این روابط تجربی هستند و بعضی بر اساس روش انتقال بار استوار هستند. یکی از روابط تخمین نشست که برای به دست آوردن نمودار بار-تغییر مکان استفاده می‌شود به شرح زیر است:

$$\rho = \frac{PI}{E_s d} \quad (3)$$

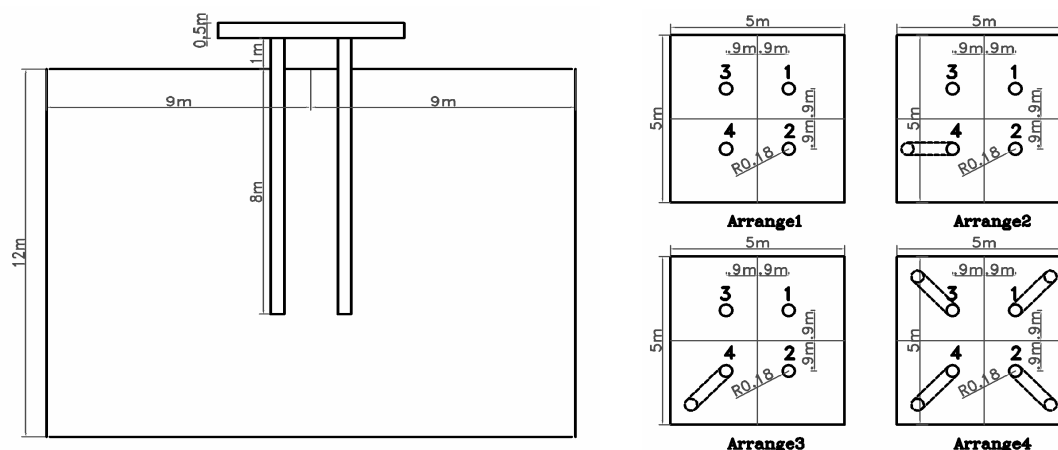
$$I = I_0 R_k R_h R_v \quad (4)$$

$\rho$  مقدار نشست بالای شمع،  $P$  نیروی محوری وارده،  $I_0$  فاکتور تاثیر نشست برای شمع تراکم‌ناپذیر در محیط نیمه‌بی‌نهایت برای ضریب پواسون  $\nu_s = 0.5$  در شرایط زهشکی نشده،  $R_k$  ضریب تصحیح برای فشردگی شمع،  $R_h$  ضریب تصحیح برای عمق محدود لایه بر روی

سنگ بستر،  $R_v$  ضریب تصحیح برای نسبت پواسون خاک و  $h$  عمق کل لایه خاکی می باشد. مقادیر  $R_v, R_h, R_k, I_0$  از گراف های ارائه شده در مرجع [8] به دست می آیند.

### مدل سازی عددی

برای بررسی و مقایسه رفتار شمعی های مایل، 4 آرایش مطابق شکل 1 برای قرارگیری شمعی های گروه در نظر گرفته شده است. در این تحقیق 4 آرایش مختلف قرارگیری شمعی ها با هم مقایسه می شوند. همه گروه ها شامل 4 شمعی می باشند. آرایش شماره 1 شامل 4 شمعی قائم، آرایش شماره 2 و 3 شامل 3 شمعی قائم و 1 شمعی مایل و آرایش شماره 4 شامل 4 شمعی مایل می باشد.



شکل 1- ابعاد محیط مدل شده و آرایش های مورد مطالعه

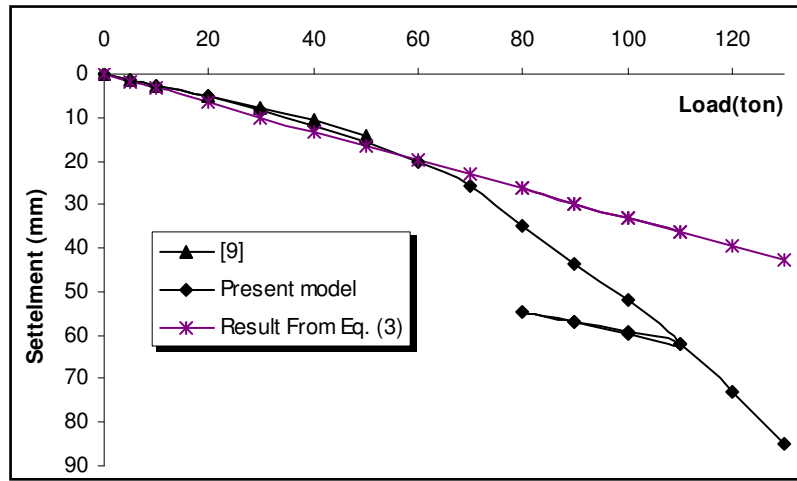
در شکل 1 محیط در نظر گرفته شده برای تحلیل گروه شمعی نشان داده شده است. این محیط 14 متر طول و 14 متر عرض و 12 متر عمق دارد. تکیه گاه های غلتکی در راستای Z برای قسمت پایین مدل و در راستای X و Y برای طرفین مدل به کار گرفته شده است. طول همه شمعی ها 8 متر و قطر آنها 0/36 متر است، زاویه شمعی های مایل نسبت به راستای قائم 30 درجه می باشد. سرشمعی 5 متر طول و 5 متر عرض و 0/5 متر ضخامت دارد. فاصله شمعی ها برابر 5D در نظر گرفته شده است. مشخصات مورد استفاده در تحلیل مدل ها به شرح زیر می باشد:

جدول 1- مشخصات مکانیکی خاک و شمعی در مدل های عددی مورد استفاده

شمعی	خاک	خصوصیات مکانیکی
الاستیک $E=22\text{GPa}$ $\nu=0.3$ - -	موهر کولمب $E=90\text{MPa}$ $\nu=0.48$ $C=400\text{kPa}$ $\phi=0$	مدل رفتاری مدول الاستیسیته ضریب پواسون چسبندگی خاک زاویه اصطکاک داخلی

### صحت سنجی مدل

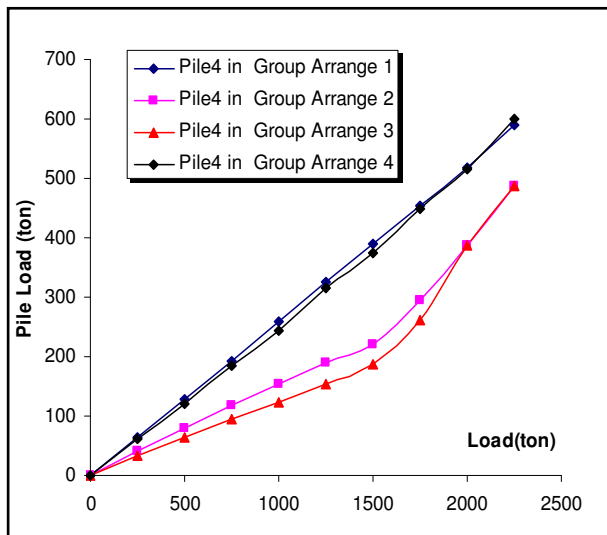
برای اطمینان از صحت نتایج به دست آمده، یک شمعی مدل شده و نتایج به دست آمده با نتایج رابطه (3) و دیگر مدل سازی های عددی مقایسه شده است. شمعی مورد مطالعه به طول 8 متر و قطر 0/36 متر در محیط خاک با مشخصات معلوم مدل گردیده و نتایج آن در شکل 2 ارائه شده است. در شکل 2 نتایج تحلیل حاضر، نتایج تحلیل های عددی گزارش شده توسط مؤمن [9] و نتایج به دست آمده از رابطه (3) مشاهده می شود. می توان نتیجه گرفت که نتایج تطابق خوبی با نتایج روابط و دیگر تحلیل ها دارند.



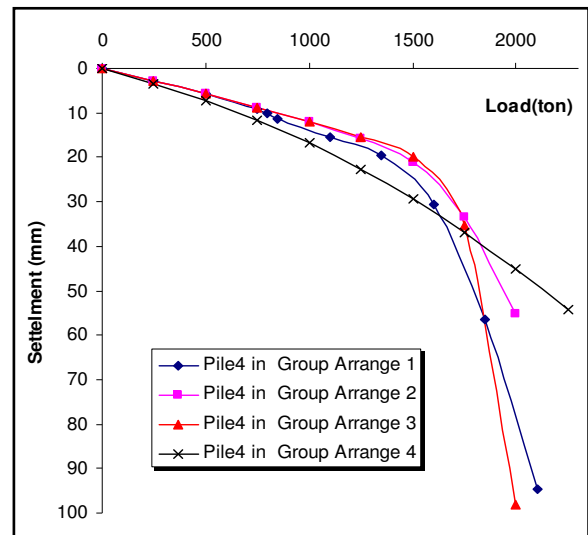
شکل 2- نمودار بار- تغییر مکان برای شمع جهت صحت سنجی نتایج

### رفتار گروه شمع تحت اثر بارهای قائم

برای مقایسه رفتار شمع‌های گروه در آرایش‌های مورد بحث، بار قائم بر روی سر شمع قرار داده شده است، این بار به صورت یک تنش قائم یکنواخت بر روی سطح سر شمع در نظر گرفته شده است. بار به صورت پله‌ای افزایش می‌یابد و نتایج خروجی ثبت می‌شود.



شکل 4- نمودار توزیع بار قائم بین گروه شمع و برای شمع 4



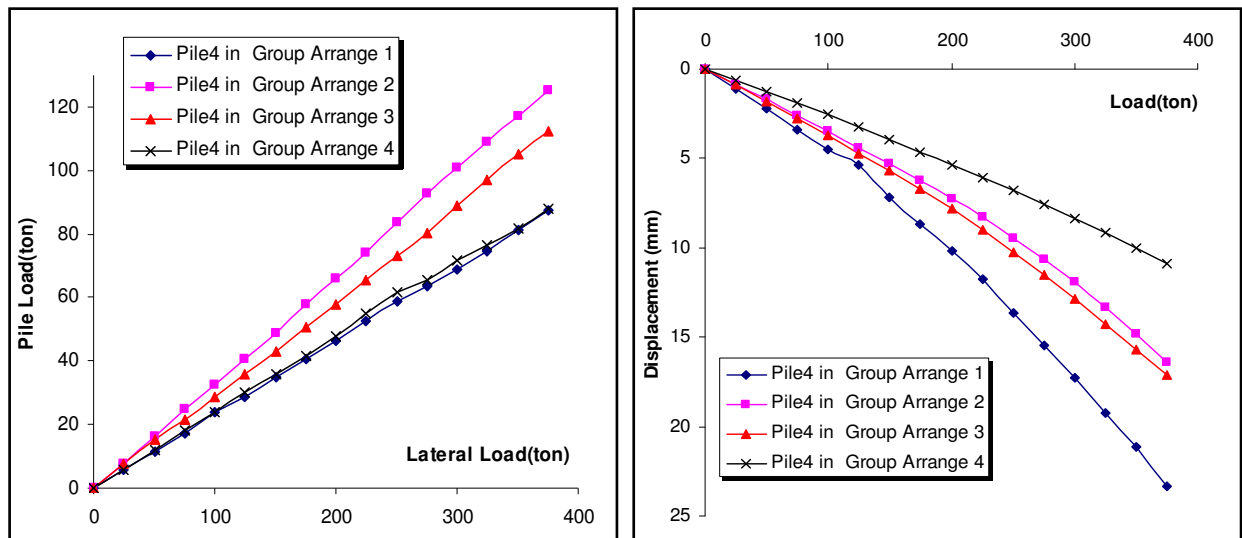
شکل 3- نمودار بار قائم- نشست برای سر شمع 4 در آرایش‌های مختلف

در آرایش‌های مختلف

با بررسی آرایش 4 در نمودار شکل 3 مشاهده می‌شود، در محدوده بارهای کوچک، نشست گروه تحت اثر بارهای قائم بیشتر از نشست دیگر آرایش‌هاست ولی در محدوده بارهای بزرگ کاهش قابل ملاحظه‌ای در نشست گروه تحت اثر بارهای قائم اتفاق می‌افتد. در آرایش شماره 4 تغییر شیب نمودار بار-نشست که نشان دهنده گسیختگی می‌باشد در محدوده بارهای وارد شده اتفاق نیفتاده است، پس می‌توان نتیجه گرفت که در این آرایش ظرفیت باربری قائم گروه افزایش یافته است. در نمودار شکل 4 مشاهده می‌شود که در صورت استفاده از شمع مایل و قائم در یک گروه، سهم شمع‌های مایل از باربری قائم کمتر از سهم شمع‌های قائم می‌باشد. (آرایش 2 و 3) ولی در آرایش شماره 1 که همه شمع‌ها قائم هستند و در آرایش شماره 4 که همه شمع‌ها مایل هستند کل بار به صورت مساوی بین همه شمع‌ها تقسیم می‌شود.

## رفتار گروه شمع تحت اثر بارهای جانبی

برای بررسی رفتار گروه‌های شمع تحت اثر بارهای جانبی، بار جانبی به صورت یک تنش در راستای X وارد می‌شود، بار به صورت پله‌ای افزایش داده می‌شود و نیروی برشی در محل اتصال شمع به سرشمع مانیتور می‌گردد. بار جانبی در شرایطی اعمال می‌شود که بار قائم وارد شده به سرشمع برابر 750 ton می‌باشد.



شکل 5- نمودار بار جانبی- تغییر مکان برای سرشمع 4 در آرایش‌های مختلف شکل 6- نمودار توزیع بار جانبی بین گروه شمع 4

در آرایش‌های مختلف

در نمودار شکل 5 به خوبی مشاهده می‌شود که در صورت استفاده از شمع مایل تغییر مکان جانبی گروه شمع تحت اثر بارهای جانبی کاهش می‌یابد. تغییر مکان جانبی آرایش 1 که شامل 4 شمع قائم است، بیشترین مقدار می‌باشد و تغییر مکان جانبی آرایش شماره 4 که شامل 4 شمع مایل است، کمترین مقدار می‌باشد و تغییر مکان جانبی آرایش‌های شماره 2 و 3 مقداری مابین دو مقدار قبل می‌باشد. در نمودار شکل 6 مشاهده می‌شود که برای توزیع بار جانبی بین شمع‌های یک گروه، سهم شمع مایل بیشتر از سایر شمع‌های گروه می‌باشد. در آرایش شماره 1 و 4 مقدار بار جانبی به نسبت مساوی بین شمع‌ها تقسیم شده است که دلیل آن تقارن کامل شمع‌ها در گروه می‌باشد ولی در آرایش‌های شماره 2 و 3 شمع مایل مقدار بار جانبی بیشتری به خود جذب می‌کند.

## نتیجه‌گیری

- با توجه به تحلیل‌های انجام شده، می‌توان نتیجه گرفت که:
  - الف) گروه‌های دارای شمع مایل و قائم تحت اثر بارهای قائم از نظر نشست قائم تفاوت چندانی با گروه‌های شمع‌های قائم ندارند.
  - ب) جهت توزیع بار قائم بین شمع‌های مایل و قائم قرار گرفته در یک گروه، سهم شمع‌های مایل کمتر از شمع‌های قائم می‌باشد.
  - ج) در صورت وارد شدن بار جانبی بر گروه، در محل اتصال شمع به سرشمع تمرکز تنش برشی داریم که این تمرکز در مورد شمع‌های مایل بیشتر از شمع‌های قائم می‌باشد.
  - د) در صورتی که همه شمع‌های به کار رفته قائم یا مایل باشند (آرایش شماره 1 یا 4) این تمرکز به نسبت مساوی بین شمع‌ها تقسیم می‌شود که به کارگیری این آرایش‌ها مانع به وجود آمدن تمرکز تنش بسیار بالا در محل اتصال یک یا تعدادی از شمع‌ها به سرشمع می‌گردد.

- [1] Tschebotarioff, G. P. (1953). " *The resistance to lateral loading of single piles and pile group.*" Spec. Publ. No 154, ASTM, West Conshohocken. Pa., 38-48
- [2] Prakash, S., and Subramanyam, G. (1965). " *Behavior of battered piles under lateral loads.*" J. Indian Nat. Soc of Soil Mech. And Found. Eng., New Delhi, 4, 177-196
- [3] Alizadeh, M., and Davisson, M. T. (1970). " *Lateral Load test on piles-Arkansas River Project.*" J. Soil Mech. and Found. Div., ASCE, 96, 1583-1603
- [4] Poulos, H. G., and Madhav, M. R. (1971). " *Analysis of movement of battered piles.*" Res. Rep. No. R173, University of Sydney, Sydney, Australia, 1-18
- [5] Meyerhof, G. G., and Ranjan, G. (1973). " *The bearing capacity of rigid piles under inclined loads in sand II: batter piles.*" Can. Geotech. J., Ottawa, 10, 71-85
- [6] Meyerhof, G. G., and Yalcin, A. S. (1992). " *Behavior of flexible batter piles under inclined loads in layered soil.*" Can. Geotech. J., 30, 247-256
- [7] Rajashree, S. S., and Sitharam, T. G. (2001). " *Nonlinear finite element method of batter piles under lateral load.*" J. Geotech. Eng., 127(7), 604-612
- [8] Poulos, H. G., and Davis, E. H. (1980). " *Pile foundation analysis and design.*" Wiley, New York
- [9] مؤمن، م. (1384) " *آنالیز دینامیکی پی‌های شمعی با استفاده از روش‌های عددی.*" پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران.