

تحلیل شمع‌های تکی و گروه شمع تحت بار جانبی

شهره علاالدینی¹، احمدرضا محبوبی اردکانی²

1-دانشجوی کارشناسی مهندسی عمران، دانشگاه صنعت آب و برق شهید عباسپور، تهران

2-دانشیار، دانشگاه صنعت آب و برق شهید عباسپور، تهران

Shohreh_89@yahoo.com

خلاصه

علاوه بر تحمل نیروی محوری، شمع قادر به مقاومت در برابر بار جانبی نیز می‌باشد. شمع‌های دارای بارگذاری جانبی در بعضی از سازه‌های ساحلی و نیز پل‌ها وجود دارند. تحت بار جانبی شمع دچار تغییر شکل جانبی شده و این امر سبب اعمال نیروهای فشاری از طرف خاک احاطه کننده به شمع خواهد شد. در این مقاله ابتدا با استفاده از روش دستی حداکثر ظرفیت باربری شمع منفرد و گروه شمع بدست آمده و سپس با استفاده از روش اجزاء محدود و تیر بر بستر ارتجاعی شمع‌های تحت بارگذاری جانبی و درجا در خاک‌های رسی مورد تحلیل قرار گرفت. برای مدلسازی شمع به صورت دو بعدی از نرم افزار اجزاء محدود PLAXIS نسخه 8,2 و در حالت سه بعدی از نرم افزار PLAXIS 3D Foundation و از نرم افزار تیر بر بستر ارتجاعی ALLPILE استفاده شده است. برای مدلسازی خاک مدل موهر - کلمب به کار رفته است. در مدل بار استاتیکی بر سر شمع اعمال شده است و نتایج حاصله برای نیروی برشی و لنگر خمشی در طول شمع بدست آمده است. در نهایت نتایج حاصله از روش‌های مختلف برای شمع‌های منفرد و گروه شمع مقایسه گردید.

کلمات کلیدی: شمع، بار جانبی، رفتار الاستو-پلاستیک، روش اجزاء محدود، روش تیر بر بستر ارتجاعی.

1. مقدمه

شمع‌ها اغلب اوقات علاوه بر بار قائم تحت اثر نیروهای جانبی و لنگر خمشی قرار دارند. برای مثال در سازه اسکله‌ها و در جایی که نیروی حاصل از پهلوگیری و ضربه کشتی به شمع‌های نگهدارنده آن وارد می‌شود. در سازه‌های فرا ساحل که تحت اثر نیروی امواج و جریان‌های دریایی قرار دارند، در سازه‌های حائل که توسط شمع‌ها نگهداری می‌شوند، در سازه‌های بلند که نیروی باد به آنها وارد می‌شود و سازه‌های مستقر بر شمع‌ها در مناطق زلزله خیز نیز نیروی جانبی می‌تواند تعیین کننده طراحی باشد.

چنانچه نسبت نیروهای جانبی به نیروهای قائم اعمال شده به شمع کوچک باشد از نیروی جانبی صرف نظر می‌شود در غیر این صورت تحلیل شمع تحت اثر بار جانبی الزامی بوده و بایستی با روش‌های مناسب اثر بار جانبی بر رفتار شمع تحلیل شود [1]. شمع‌های تحت بار جانبی در حالت کلی سازه‌های نامعینی هستند که حل تحلیلی امکان پذیر نیست و یا باید از روش‌های تقریبی که با ساده سازی‌هایی همراه هست استفاده کرد یا از روش‌های عددی برای حل استفاده کرد. هر چه مدل اندر کنش شمع و خاک پیچیده تر باشد نیاز به استفاده از روش‌های عددی پیچیده تری می‌باشد [1]. در این مقاله درصددیم تا به بررسی روش‌های تحلیلی دستی و کامپیوتری شمع ای منفرد (تکی) و گروه شمع‌ها در مقابل بار جانبی بردازیم و بطور نمونه مواردی از تحلیل‌ها را انجام داده و روش‌های تحلیلی (تحلیل دستی) و شبیه سازی‌های عددی را با هم مقایسه می‌کنیم.

2. متغیرهای مورد استفاده در مدل برای تک شمع

برای مدلسازی شمع منفرد بلند را در نظر می‌گیریم. از اطلاعات نشان داده شده در جدول 1 استفاده گردید و شمعی بتنی درجا با طول 6 متر و به قطر 1متر فرض شد.

جدول 1- پارامترهای ورودی برای رس و شمع.

مصالح	وزن مخصوص (kN/m^3)	مدول یانگ (MPa)	نسبت پواسون	C_u (kN/m^2)
خاک (رس)	20	20	0/35	120
شمع	24	26000	0/15	-

3. تحلیل به روش عددی برای تک شمع

1.3 - روش هنسن

برای تحلیل به روش دستی ابتدا باید نوع شمع از لحاظ کوتاهی یا بلندی بررسی شود. برای شرایط کاربرد سریع با استفاده از مقاومت برشی زهکشی نشده از برای $C_u = 120 kNm^{-2}$ مدول خاک K_1 برابر $25 Mnm^{-3}$ می باشد [5-1].

$$R = \sqrt[4]{(EI)/(KB)} = 2,97 \text{ m}$$

$$K = k_i/1,5$$

$$B = 1 \text{ m}$$

از آنجا که L برابر 6 متر فقط کمی از $2R$ بزرگتر است شمع به عنوان یک واحد صلب کوتاه عمل می کند. ضرایب هنسن با استفاده از اشکال موجود در مرجع [5] در جدول 2 آمده است. به عنوان یک آزمون نقطه چرخش x در 4,5 متری زیر سطح زمین فرض می گردد [5-1].

جدول 2- ضرایب هنسن برای تحلیل دستی شمع.

Z_m	0	1	2	3	4	5	6
Z/B	0	1	2	3	4	5	6
K_C	2,2	5,5	6,2	6,7	7	7,2	7,3
$C_u K_C$	264	660	744	804	840	864	876

حال برای بدست آوردن ظرفیت شمع حول نقطه $x=4,5$ لنگر می گیریم [1].

$$H_u(e+x) = \square P_z l/nB(x-z) + \square P_z l/nB(z-x)$$

$$H_u = 1646 \quad kN$$

$$M = 768,13 \text{ kN.m}$$

در نتیجه لنگر خمشی وارده به سر شمع با توجه به نیروی بدست آمده از روش هنسن برابر خواهد بود با:

$$\frac{4H(1 + \frac{1.5e}{L})}{kDL} Y =$$

و تغییر شکل در سر شمع از فرمول مقابل برای بار نهایی 0/07 متر در می آید:

2.3 - روش برومز

برای بارگذاری کوتاه مدت در خاک های یکنواخت چسبنده ($\phi=0$) روش برومز هم سریع و هم مناسب است. H_u را می توان با استفاده از منحنی های برومز موجود در مرجع [5] بدست آورد که عبارتند از:

$$L/B=6, \quad e/B=0 \quad \rightarrow \quad H_u/B^2 C_u = 12$$

$$H_u = 12 \times 120 \times 1^2 = 1440 \text{ kN}$$

$$M = 826,66 \text{ kN.m}$$

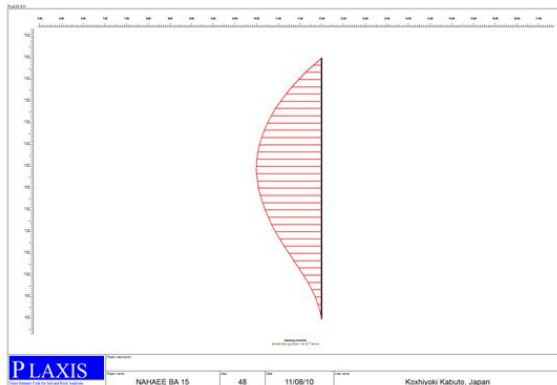
$$Y.KBL/H = 4,1$$

$$Y = 0,06 \text{ m}$$

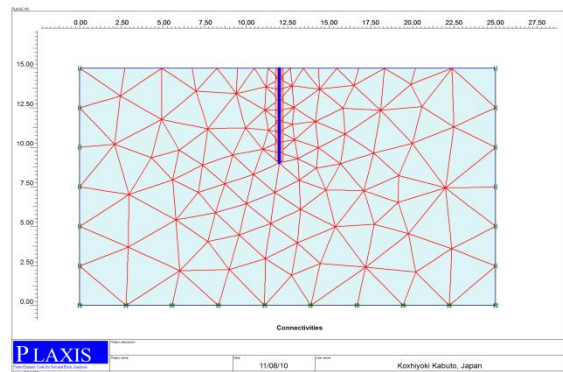
4. نتایج بدست آمده از مدلسازی با نرم افزار PLAXIS 2D برای تک شمع

برنامه اجزا محدود PLAXIS 2D برای مدلسازی تک شمع استفاده شده است. خاک با یک لایه رس یکنواخت و در حالت زهکشی نشده فرض شده است. هدف عمده در آنالیز دو بعدی بدست آوردن حداکثر ظرفیت شمع می باشد. برای مدلسازی شمع منفرد از اجزا صفحه که از اجزا تیر با دو درجه آزادی انتقالی و یک درجه آزادی چرخشی تشکیل شده است [6-2]. اطلاعات مورد استفاده در مدل در جدول 1 آمده است. مدلسازی شمع در شکل 1

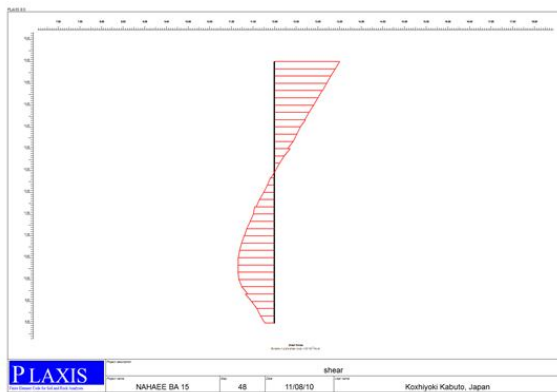
آمده است. برای شمع با قطر یک متر $EA=2041000 \text{ kN/m}$ و $EI=1276600 \text{ kNm}^2/\text{m}$ فرض گردید و خاک با مدل موهر-کولمب و شمع با مدل الاستیک مدلسازی گردید که نتایج حاصل در خصوص نیروی قابل تحمل و تغییر شکل و لنگر خمشی در اشکال 2 الی 4 آمده است.



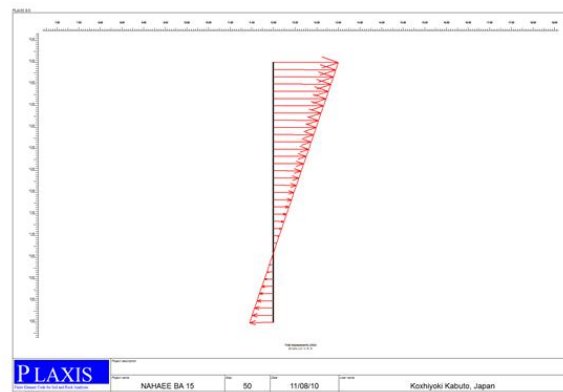
شکل 2- نمودار لنگر خمشی در طول شمع به طول 1 متر



شکل 1- مش دو بعدی کرنش مسطح شمع به قطر 1 متر



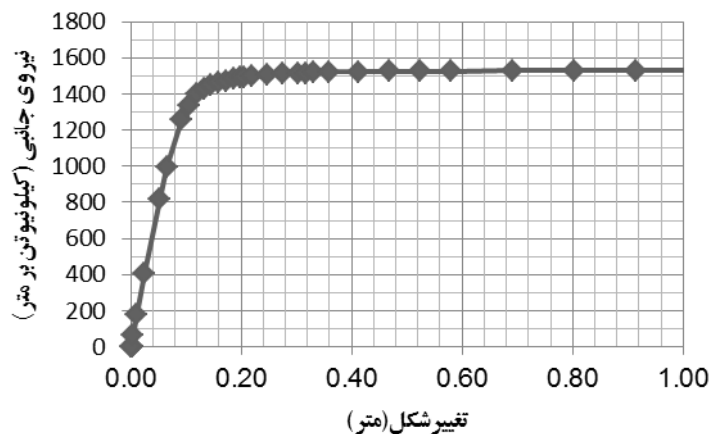
شکل 4- نمودار نیروی برشی در طول شمع به طول 1 متر



شکل 3- نمودار جا به جایی در طول شمع به قطر 1 متر

$$H_{ii} = 1490,1 \text{ kN}$$

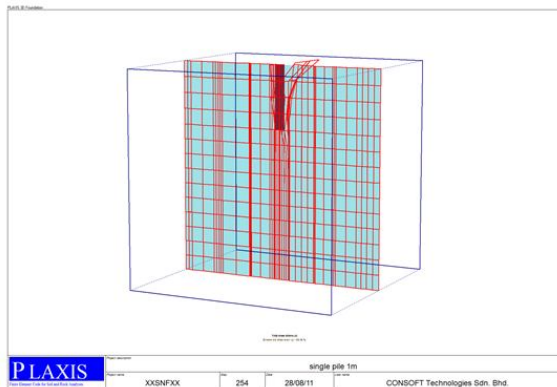
و در نهایت از تحلیل شمع منحنی حداکثر ظرفیت باربری - تغییر شکل (نمودار 1) بدست می آید که برابر است با:



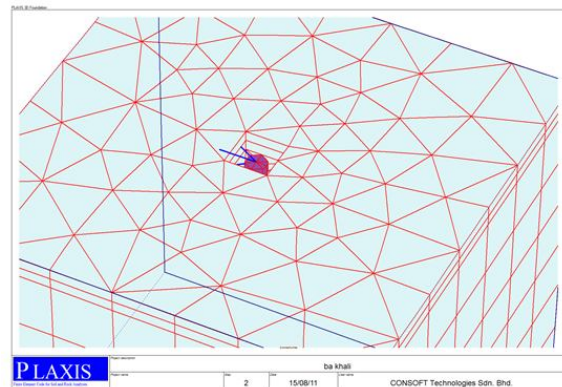
نمودار 1- تغییر شکل-نیروی وارده به شمع با قطر 1 متر تحت بار جانبی.

۵. نتایج بدست آمده از مدلسازی با نرم افزار PLAXIS 3D Foundation برای تک شمع

برنامه اجزا محدود PLAXIS 3D برای مدلسازی تک شمع استفاده شده است. در این حالت همانند دو بعدی از مدل موهر-کولمب برای خاک استفاده شد و از مدل الاستیک خطی برای محیط داخل شمع نیز استفاده شد [3]. در شکل 5 مش بندی مدل انجام شده نشان داده شده است.

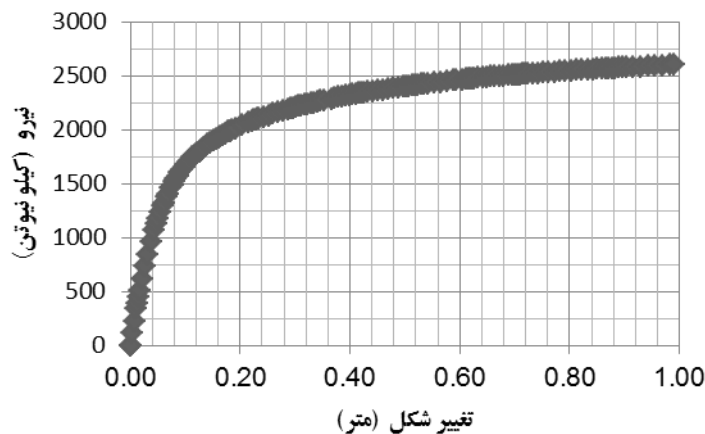


شکل 6- کرنش برشی در طول شمع به قطر 1 متر



شکل 5- مش بندی سه بعدی مدل تک شمع به قطر 1 متر

در نهایت از نتایج حاصل شده منحنی نیرو - تغییر مکان در نمودار 2 رسم شد و حداکثر ظرفیت باربری 1625 کیلو نیوتن بدست آمد.



نمودار 2- تغییر شکل - نیرو در تک شمع با قطر 1 متر.

6. نتایج بدست آمده از مدلسازی با نرم افزار ALLPILE برای تک شمع

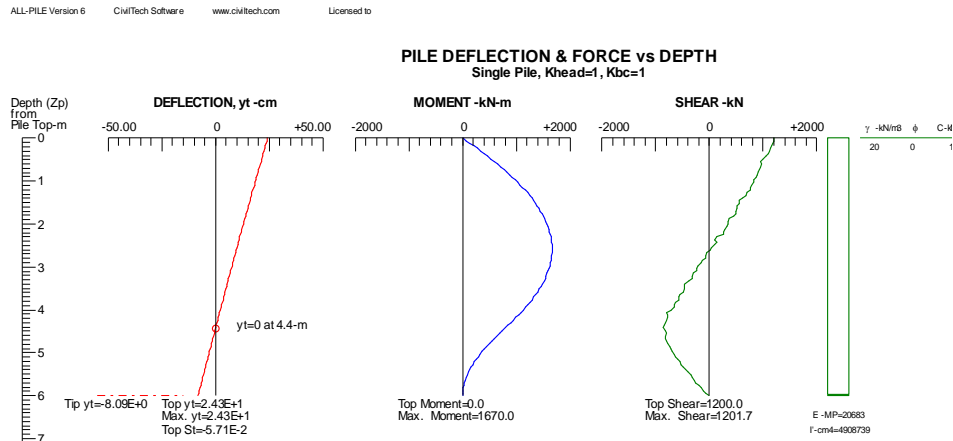
برای مدلسازی ورژن 6,5 نرم افزار ALLPILE استفاده شده است. دو پارامتر مهم در این نرم افزار مدول واکنش بستر k و کرنش خاک E_{50} برای تحلیل شمع تحت بار جانبی می باشد. مدول واکنش بستر در معادله آنالیز $E_s = k \cdot x$ در $com624s$ (مبتنی بر تئوری تیر بر بستر ارتجاعی) استفاده می شود، که E_s مدول سکانت در منحنی $p-y$ و x عمق در زیر سطح زمین می باشد. مقدار k افزایش E_s در عمق را نشان می دهد. باید توجه داشت که مقدار k مساوی ضریب واکنش بستر قائم برای محاسبه نشست الاستیک پی های سطحی نمی باشد. مقدار k متفاوت از ضریب واکنش جانبی بستر در تحلیل الاستیک شمع ها تحت بار جانبی می باشد. علاوه بر آن، پارامتر کرنش خاک E_{50} تنها برای خاکهای رسی قابل کاربرد است و توسط تست های آزمایشگاهی یا روابط بین پارامترها بدست می آید. مقدار ورودی E_{50} نماینده کرنش محوری در مقاومت برشی زهکشی نشده 50% آزمایش فشاری می باشد [4]. در جدول 3 مدول واکنش بستر k و کرنش خاک آمده است.

جدول 3- مدول واکنش بستر k و کرنش خاک E_{50} و N_{SPT} در خاک رس.

	نماد	واحد	نوع خاک				
			نرم	متوسط	سفت	خیلی سفت	سخت
SPT	N_{SPT}	-	2-4	4-8	8-16	16-32	32<
مقاومت برشی	C_u	kPa	12-24	24-48	48-96	96-192	192-383
MSR	K	kN/m^3	8150	27150	136000	271000	543000
کرنش خاک	E_{50}	%	2	1	0,7	0,5	0,4

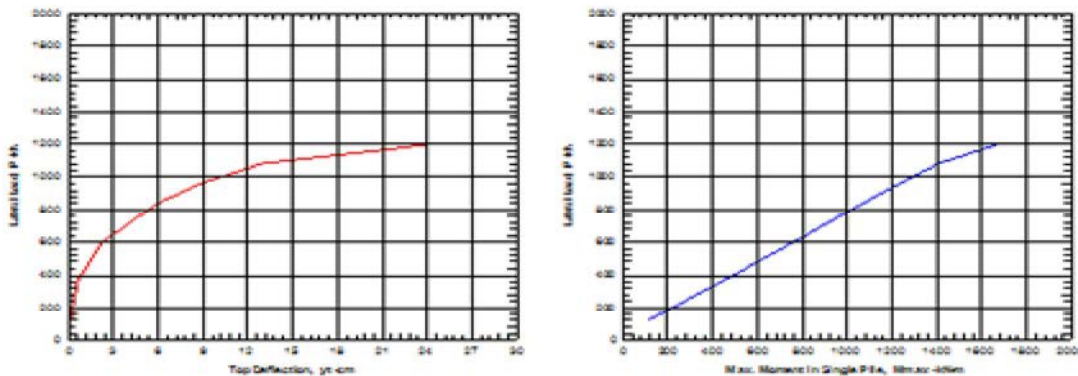
با توجه به فرضیات مدل در جدول 1 و با توجه به جدول 3 مدلسازی انجام می گیرد. خروجی های نرم افزار اعم از منحنی تغییر شکل - عمق، لنگر خمشی - عمق، نیروی برشی - عمق، تغییر شکل - بار جانبی و لنگر - بار جانبی برای شمع به قطر 1 متر در شکل 7 و 8 نشان داده شده است که عبارتند از:

$$H_{II} = 1201,7 \text{ kN}$$



شکل 7- منحنی تغییر شکل - عمق، لنگر خمشی - عمق، نیروی برشی - عمق در تک شمع تحت بار جانبی با قطر 1 متر.

LATERAL LOAD vs DEFLECTION & MAX. MOMENT



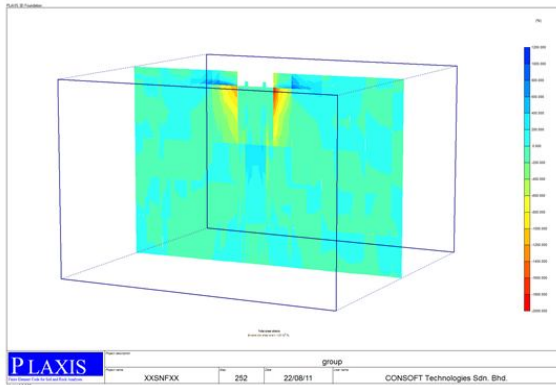
شکل 8- منحنی تغییر شکل - بار جانبی و لنگر - بار جانبی در تک شمع تحت بار جانبی با قطر 1 متر.

7. متغیرهای مورد استفاده در مدل برای گروه شمع

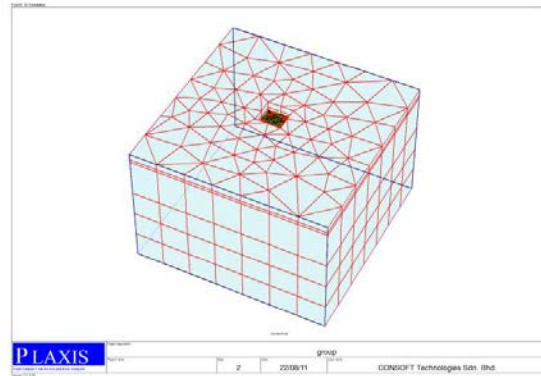
مدل عبارت از یک کلاهک همراه با چهار شمع بتنی که در هر ردیف دو شمع قرار گرفته است و همچنین مشخصات شمعها بدین صورت می باشد که هر شمع بتنی در جا به طول 6 متر و به بعد 0/35 متر فرض شده اند. برای مدلسازی از اطلاعات نشان داده شده در جدول شماره 1 استفاده گردید.

8. نتایج بدست آمده از مدلسازی با نرم افزار PLAXIS 3D Foundation برای گروه شمع

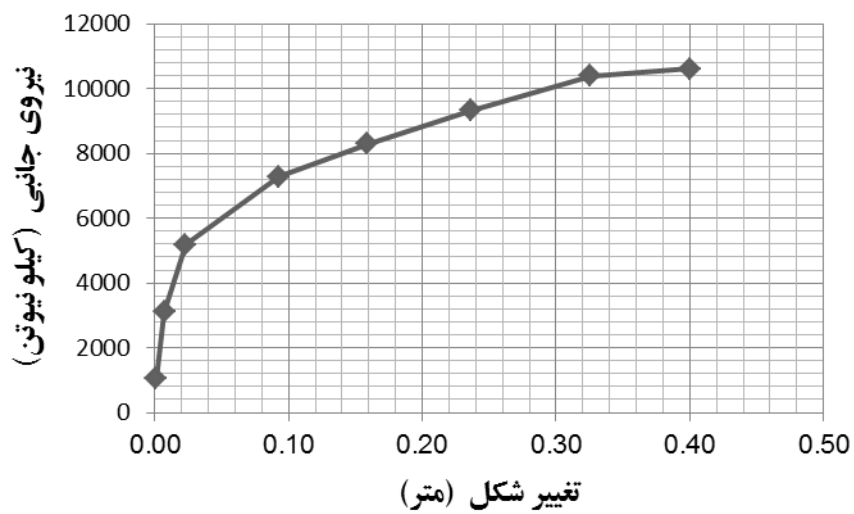
برنامه اجزا محدود PLAXIS 3D نسخه 1,1 برای مدلسازی تک شمع استفاده شده است. در این حالت برای ایجاد کلاهک از المان دال استفاده شده و فاصله ی شمعها در هر ردیف 2 متر تعریف شده است [3]. در اشکال 9 و 10 مش بندی و کرنش برشی نشان داده شده اند. در نهایت از نتایج حاصل شده منحنی نیرو - تغییر مکان در نمودار 3 رسم شد.



شکل 10- کرنش برشی در گروه شمع



شکل 9- مش بندی گروه شمع

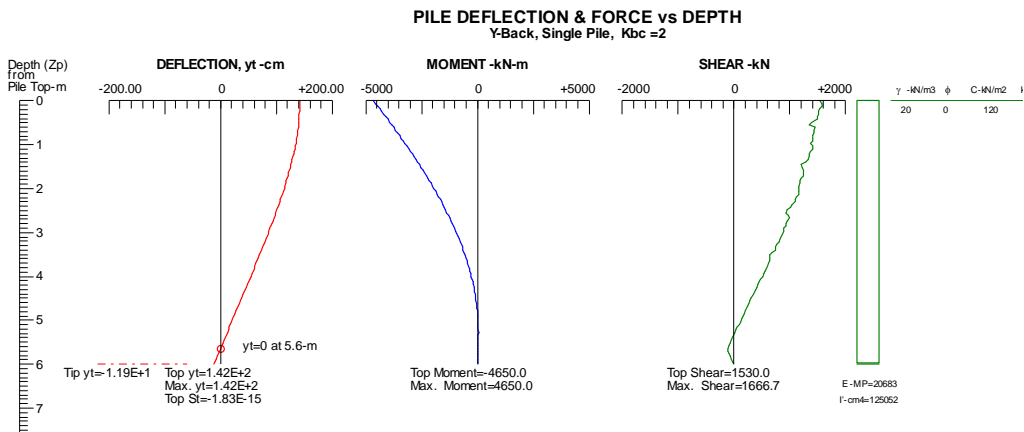


نمودار 3- نیرو - تغییر شکل برای گروه شمع.

در نهایت حداکثر ظرفیت باربری گروه شمع 8300 کیلو نیوتن حاصل شد.

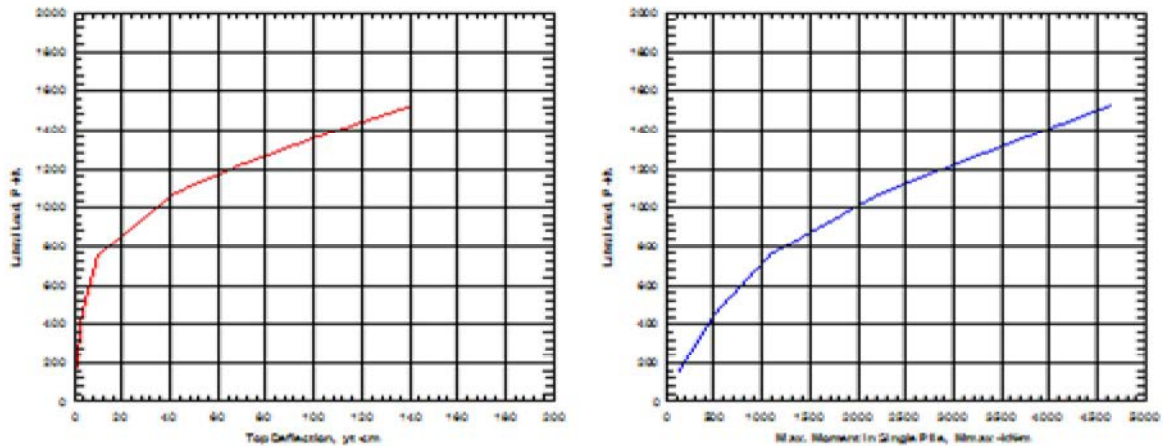
9. نتایج بدست آمده از مدلسازی با نرم افزار ALLPILE برای گروه شمع

لازم به ذکر است که تعداد شمع‌های ستون و ردیف هر کدام 2 و فاصله ی بین آنها نیز 2متر در نظر گرفته شد. خروجی های نرم افزار اعم از منحنی تغییر شکل -عمق، لنگر خمشی -عمق، نیروی برشی - عمق، تغییر شکل -بار جانبی و لنگر - بار جانبی برای یک شمع در گروه شمع (برای سایر شمع‌ها نیز همانند این شمع می‌باشد) در اشکال 11 و 12 نشان داده شده است.



شکل 11- منحنی تغییر شکل -عمق، لنگر خمشی -عمق، نیروی برشی -عمق در گروه شمع تحت بار جانبی.

LATERAL LOAD vs DEFLECTION & MAX. MOMENT



شکل 12- منحنی تغییر شکل -بار جانبی و لنگر - بار جانبی در گروه شمع تحت بار جانبی.

در نهایت از نتایج حاصله نیروی هر شمع 1667,7 کیلو نیوتن بدست آمد.

10. نتیجه گیری

در این مقاله رفتار شمع منفرد و گروه شمع درجا در خاکهای با رفتار الاستو - پلاستیک در دو حالت سه بعدی و دو بعدی به روش اجزاء محدود و حالت رفتار تیر بر بستر ارتجاعی مورد مطالعه قرار گرفت و با نتایج حاصل شده از روش دستی مقایسه گردید. در جدول 4 مقایسه ای بین مزایا و معایب نرم افزارهای مورد استفاده و روش دستی انجام گرفته است.

جدول 4- مقایسه بین روش ها

روش	تعداد پارامترهای ورودی	مزایا	معایب
روش PLAXIS 2D	23	تحلیل نسبتاً دقیق و سریع	<ul style="list-style-type: none"> ▪ در نظر گرفتن شمع همانند دیوار با طول بی نهایت ▪ قابلیت نرم افزاری پائین برای مدلسازی خاک ▪ پارامترهای ورودی بیشتر

<ul style="list-style-type: none"> ▪ تحلیل دقیق ▪ در نظر گرفتن شرایط طبیعی ▪ قابلیت نرم افزاری بالا 	30	PLAXIS 3D	<ul style="list-style-type: none"> ▪ وقت گیر بودن تحلیل ▪ پیچیده بودن نرم افزار ▪ مقرون به صرفه نبودن ▪ پارامترهای ورودی بیشتر
<ul style="list-style-type: none"> ▪ تحلیل سریع و دقیق 	14	ALLPILE	<ul style="list-style-type: none"> ▪ احتیاج به پارامترهای زیاد که نیاز به تست آزمایشگاهی دارد.
<ul style="list-style-type: none"> ▪ تحلیل سریع و با دقت مناسب ▪ برای برآورد اولیه ▪ پارامترهای ورودی اولیه کم 	5	دستی	<ul style="list-style-type: none"> ▪ در نظر نگرفتن شرایط طبیعی خاک ▪ تقریبی بودن روش

نتایج بدست آمده از سه نرم افزار و روش های تحلیل دستی به منظور مقایسه ی بهتر با ضریب اطمینان 3 در جدول 5 شمع منفرد دایره ای و جدول 6 برای گروه شمع آورده شده است.

جدول 5- نتایج حاصله برای شمع به قطر 1 متر

روش	H (کیلو نیوتن)	تغییر شکل برای H_{II} (متر)
PLAXIS 2D	496/7	0/15
PLAXIS 3D	541/7	0/09
ALLPILE	400/6	-
دستی هسن	548/7	0/07
دستی برومز	480	0/06

- با توجه به نتایج حاصله می توان گفت که H از نظر رتبه بندی در روش دستی هسن از همه بیشتر و در روش ALLPILE از سایر روش ها کمتر حاصل شده است. همانطور که مشخص است مقدار H در نرم افزار سه بعدی از حالت دو بعدی بیشتر و مقدار تغییر شکل در حالت سه بعدی از حالت دوبعدی کمتر حاصل شد که با توجه به اینکه در حالت سه بعدی علاوه بر مقاومت خاک تنش برشی هم در نظر گرفته می شود و در حالت سه بعدی در دو جهت سختی داریم قابل توجیه است.
- مدلسازی در نرم افزار PLAXIS 2D برای شمع در واقع یک دیوار با طول بی نهایت متصور شده است ولی در مقایسه جواب با تئوری به نظر می رسد که جواب منطقی است و می توان از این نرم افزار برای مدلسازی شمع منفرد استفاده کرد.
- همانطور که گفته شد آنالیز اجزا محدود یک روش مناسب برای مدلسازی شمع تحت بار جانبی و مطالعه اندر کنش شمع - خاک می باشد. از آنجائیکه در مدل دو بعدی تک شمع به عنوان یک دیوار طویل مدلسازی می گردد، جریان برشی خاک اطراف شمع در نظر گرفته نمی شود لازم است شمع در محیط سه بعدی نیز مدل گردد.
- نقطه چرخش برای شمع به قطر 1 متر در دو نرم افزار، PLAXIS 2D, ALLPILE یک عدد بدست آمد و تفاوت اندکی با روش دستی دارد که 4/4 متر با نرم افزار بدست آمد که 4/5 متر به روش دستی گرفته شد.
- با توجه به نمایش کرنش برشی در خاک دیده شد که در اثر اعمال بار جانبی به شمع دانه های خاک موجود در عقب شمع با زاویه تند رو به پائین و دانه های قرار گرفته در جلوی شمع با زاویه ملایم تری رو به بالا حرکت می کنند. لذا مقدار کرنش برشی ایجاد شده در سطح خاک بیشتر از جلوی شمع می باشد.

جدول 6- نتایج حاصله برای گروه شمع به ابعاد 2x2

روش	H (کیلو نیوتن)
PLAXIS 3D	2766/67
ALLPILE با کلاهک صلب	2222/27

• همانطور که از نتایج مشخص است اعداد بدست آمده از روش‌های دستی و PLAXIS 3D و ALLPILE تفاوت قابل ملاحظه‌ای دارند که با توجه به اینکه روش دستی مناسبی برای محاسبه رفتار گروه شمع‌ها موجود نیست و همانند تک شمع بدون اثر گروهی ظرفیت محاسبه شده است قابل توجیه است.

با توجه به نتایج حاصله می‌توان گفت که در کارهایی که نیاز به برآورد اولیه می‌باشد استفاده از جوابهای دستی مناسب می‌باشد ولی برای کارهای طراحی بهتر است از نتایج دو نرم افزار ALLPILE , PLAXIS 2D استفاده نمود و در مواقعی که به تحلیل دقیق تر نیاز می‌باشد و طراحی از اهمیت بالاتری برخوردار است استفاده از نرم افزار PLAXIS 3D توصیه می‌گردد.

11. مراجع

1. Reese, Lymon C., & Van Impe, W.F., (2001), Single Piles and Pile Groups under Lateral Loading, A.Balkema, Rotterdam, Netherlands.
2. Kok, S.T., & Bujang, B., (2008), Numerical Modeling of Laterally Loaded Piles, American Journal of Applied Science, 5(10)1403-1408.
3. PLAXIS 3D FOUNDATION, User's Manual, Civil Tech Software.
4. ALLPILE User's Manual, Version 7, (2007), Civil Tech Software.
5. صادقی، کبیر، (1380)، مهندسی سواحل، بنادر و سازه‌های دریایی، دانشگاه صنعت آب و برق (شهید عباسپور)، تهران.
6. نیرومند، حامد، نیرومند، بهمن، (1386)، راهنمای PLAXIS 2D، انتشارات شرکت ناقوس اندیشه، تهران.