

## بررسی اندرکنش خاک و سازه های مدفون در خاک با استفاده از مدلسازی بر اساس تحلیل المان محدود

میثم شیرزاد شهریور<sup>۱\*</sup>، امین قلی زاد<sup>۲</sup>

۱- کارشناس ارشد مهندسی سازه، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

۲- دانشیار، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

### چکیده

امروزه اهمیت بررسی اثر خاک روی رفتار سازه های مدفون یا در تماس با خاک همچون فونداسیون ها، شمع ها و دیوارهای حایل و سایر سازه های مشابه به حدی است که لحاظ نکردن اثر اندرکنش خاک و سازه از نگاه مهندسی می تواند منجر به حصول نتایج محاسباتی مغایر با واقعیت شود. در این مقاله تلاش شده مدل سازی اندرکنش خاک و سازه با استفاده از تحلیل المان محدود توسط نرم افزار ABAQUS انجام شود و نتایج حاصل از این مدل سازی در زمینه های تنش های قائم ایجاد شده در سازه و خاک، فشار آب حفره ای در دو حالت زهکشی شده و زهکشی نشده، تراز آب زیر زمینی و نحوه عملکرد سازه (شمع) در تماس با خاک، ارائه گردد. خلاصه نتایج حاکی از آن است که تاثیر فشار آب منفذی در تمام بخش های شمع یکسان نیست و مقادیر افزایش فشار منفذی المان های بالایی خاک نسبت به المان های نزدیک به نوک شمع بسیار کمتر است و علاوه بر این ثابت می شود که مقدار میانگین تنش برای کف شمع در حدود یک سوم مقدار میانگین تنش قائم در بالای شمع است و حدود ۷۰٪ باربری شمع مربوط به اصطکاک سطح تماس جدار شمع با خاک است.

کلمات کلیدی: اندرکنش خاک و سازه، ظرفیت باربری شمع، فشار آب حفره ای، تنش های وارد بر شمع، اجزاء محدود، خاک لایه ای.

\*نویسنده مسئول: میثم شیرزاد شهریور

پست الکترونیکی: meysam.shirzad.1992@gmail.com

DOI: 10.22065/jsce.2016.41241 شناسه دیجیتال

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۰۲/۱۹، تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۱۰/۰۶

http://dx.doi.org/10.22065/jsce.2016.41241

## ۱- مقدمه

امروزه بررسی اثر خاک روی رفتار سازه های مدفون یا در تماس با خاک همچون فونداسیون ها، شمع ها دیوارهای حایل و سایر این قبیل سازه ها به حدی است که لحاظ نکردن اثر آن از نگاه مهندسی عدم توجه به حاشیه ایمنی تلقی می گردد و در بسیاری موارد می تواند باعث حصول نتایج محاسباتی شود که با واقعیت تفاوت چشم گیر و غیر قابل صرف نظری دارد. به عبارتی خاک با خصوصیات مختلف، رفتاری متفاوت خواهد داشت که مستقیماً به نیروی های وارد به سازه همچون شمع یا فونداسیون تاثیر گذار خواهد بود و در طراحی سازه دخیل است [۱].

امروزه با وجود نرم افزارهای با رویکرد تحلیل اجزای محدود و قدرت مدلسازی این نرم افزارها، زمینه تحقیق و بررسی مدل های مختلف به شکل منطقی و واقع گرایانه میسر شده است. از این رو اکتفا به تحلیل های کاربردی و مرسوم مهندسی برای دستیابی به اهداف بزرگ امری منطقی نیست. در این مقاله تلاش شده مدل سازی اندرکنش خاک و سازه با استفاده از تحلیل المان محدود توسط نرم افزار ABAQUS انجام شود و نتایج حاصل از این مدل سازی در زمینه های تنش های قائم ایجاد شده در سازه و خاک و فشار آب حفره ای در دو حالت زهکشی شده و زهکشی نشده، تراز آب زیر زمینی و نحوه عملکرد سازه (شمع) در تماس با خاک، ارائه گردد.

در مهندسی ژئوتکنیک، رفتار لایه مرزی خاک-سازه نقش مهمی در بیان اندرکنش خاک-سازه ایفا می کند. لایه های مرزی به محدوده مرزی بین دو محیط گفته می شود که تنش را از محیطی به محیط دیگر منتقل می کند [۲]. شبیه سازی مورد نظر در این مطالعه نیازمند مدل سازی مناسب رفتار لایه مرزی خاک-سازه می باشد که در ادامه نحوه این مدل سازی به اختصار با ذکر مفروضات لازم شرح داده شده و سپس به تحلیل داده ها و خروجی ها و استخراج نتایج مورد نظر از آنها پرداخته شده است.

## ۲- تشریح مساله

در برخی موارد ملاحظه می شود که پی های کم عمق برای تحمل بارهای وارده کفایت نمی کند، که در برخی موارد همچون زمانی که خاک نزدیک به سطح زمین ظرفیت باربری کافی برای تحمل بارهای سازه ای را نداشته باشد و یا مواردی مشابه استفاده از شمع می تواند یک گزینه مورد بررسی باشد.

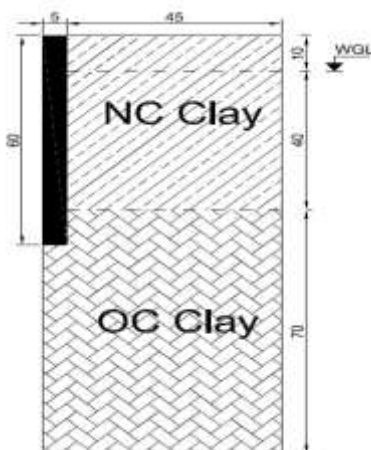
شمع ها می توانند به صورت تکی و یا گروهی اجرا شوند. اما برای تحلیل ظرفیت باربری شمع ها مکانیزم های مختلفی فرض می گردد که در موضوع مورد بحث این مطالعه لزومی به بیان آنها نیست اما به طور کلی ظرفیت باربری شمع مجموع ظرفیت باربری نوک (End Bearing Capacity) و ظرفیت باربری جداره شمع (Skin Friction Capacity) است که در تحلیل نتایج مدلسازی به مقایسه مقداری این دو خواهیم پرداخت [۳].

البته برای بسیج کردن اصطکاک جدار و مقاومت انتهای شمع، مقداری حرکت برای شمع ضروری است. آزمایشات صحرایی نشان می دهد برای بسیج کامل اصطکاک جدار در شمع های کوبیده شده، جابجایی حدود ۵ الی ۱۰ میلی متر لازم است که برای شمع های اجرا شده بعد از حفاری این مقدار به ۳۰٪ قطر شمع افزایش می یابد. در این مدلسازی در جهت اطمینان ۲۵ سانتی متر نشست به سازه بتنی (شمع) اعمال می کنیم [۴].

## ۳- مشخصات هندسی طرح

مشخصات هندسی این طرح مطابق شکل ۱ شامل مدلسازی یک سازه از جنس بتن مسلح مدفون در خاک با عملکرد مشابه شمع ولی با ابعاد متفاوت به قطر ۱۰ متر و ارتفاع ۶۰ متر که در یک پروفیل ۳ لایه ای خاک اجرا شده است. پروفیل خاک مشابه شکل ذیل متشکل از دو نوع خاک رسی عادی تحکیم یافته (NC Clay) در دولایه فوقانی و بیش تحکیم یافته (OC Clay) در لایه تحتانی می باشد. با توجه به وجود تقارن نسبت به محور Y نیمی از سیستم به صورت ۲ بعدی مدلسازی و تحلیل می شود.

مرز بین لایه فوقانی و تحتانی، محل تراز آب زیرزمینی در نظر گرفته شده است.



شکل ۱: طرح هندسی مدلسازی خاک لایه ای و سازه شمع.

#### ۴- خصوصیات مکانیکی مصالح

به عنوان فرض ساده کننده می توان شمع را با المان های صلب مدلسازی کرد که در این شرایط در نرم افزار نیاز به معرفی مصالح برای شمع نیست و فقط در بخش مشخصات الاستیک مدول یانگ  $۱۰^{۱۰} * ۲$  و ضریب پواسون  $۰/۲$  وارد شده است.

مشخصات خاک نیز در جدول های ۲ و ۱ آمده است که برای رس عادی تحکیم یافته و بیش تحکیم یافته به ترتیب دارای زاویه اصطکاک موثر ۲۳ و ۲۷ درجه و چسبندگی زهکشی نشده ۷۵ و ۱۲۱ کیلوپاسگال می باشد.

جدول ۱: خصوصیات مکانیکی خاک لایه های بالایی (NC Clay) [۴] و [۵]

Parameter	Unit	Value	Parameter	Unit	Value
<i>General</i>			<i>Cap Plasticity</i>		
$\gamma_{sat}$ (Saturated specific weight of soil)	N/m <sup>3</sup>	۱۸۰۰۰	$d'$ (Material Cohesion in Drucker Prager)	N/m <sup>2</sup>	۰/۰۰۱
K (Permeability)	m/s	$۱ * ۱۰^{-۷}$	$\beta'$ (friction Angle in Drucker-Prager)	degree	۴۱/۹۴
e (Void Ratio)	---	۱/۵	R (Cap Eccentricity)	---	۰/۴
$\gamma_f$ (Specific weight of wetting liquid)	N/m <sup>3</sup>	۱۰۰۰۰	$\epsilon_{vol}^{pl(0)}$ (Initial Yield Surface Position)	---	۰
<i>Elasticity</i>			$\alpha$ (Transition Surface Radius)	---	۰/۱
K (logarithmic bukl modulus)	---	۰/۰۲۶	K (Flow Stress Ratio)	---	۰/۷۸۸
V (Poisson Ratio)	---	۰/۳۷۹	<i>Cap hardenig</i>		
$(P_t^{el})$ Tensile limit)	N/m <sup>2</sup>	۰	Yield Stress	۱۰۰۰	۵۰۰۰۰۰
			$\epsilon_{vol}^{pl}$	۰	۰/۰۲۵

جدول ۲: خصوصیات مکانیکی خاک لایه های تحتانی (OC Clay) [۴] و [۵]

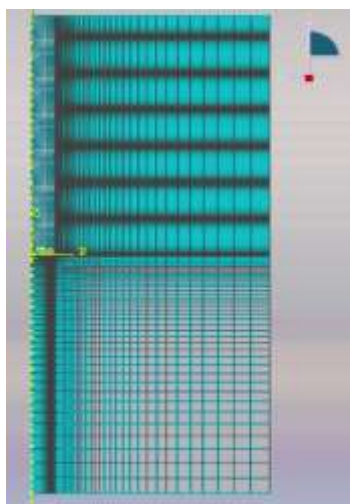
Parameter	Unit	Value	Parameter	Unit	Value
<i>General</i>			<i>Cap Plasticity</i>		
$\gamma_{sat}$ (Saturated specific weight of soil)	N/m <sup>3</sup>	۱۸۵۰۰	d' (Material Cohesion in Drucker Prager)	N/m <sup>2</sup>	۰/۰۰۰۰۱
K (Permeability)	m/s	۱*۱۰ <sup>-۸</sup>	$\beta'$ (friction Angle in Drucker-Prager)	degree	۴۶/۹۶
e (Void Ratio)	---	۱	R (Cap Eccentricity)	---	۰/۴
$\gamma_f$ (Specific weight of wetting liquid)	N/m <sup>3</sup>	۱۰۰۰۰	$\epsilon_{vol}^{Pl(0)}$ (Initial Yield Surface Position)	---	۰/۰۰۲
<i>Elasticity</i>			$\alpha$ (Transition Surface Radius)	---	۰/۱
K (logarithmic bukl modulus)	---	۰/۰۲۶	K (Flow Stress Ratio)	---	۰/۷۸۸
V (Poisson Ratio)	---	۰/۴	<i>Cap hardening</i>		
$(P_t^{el})$ Tensile limit)	N/m <sup>2</sup>	۰	Yield Stress	۱۰۰۰	۰۰۰۰۰۰
			$\epsilon_{vol}^{Pl}$	۰	۰/۰۱

## ۵- مدل سازی المان محدود

در این تحقیق برای مدل سازی سیستم از نرم افزار ABAQUS 6.13-14 استفاده شده است.

با توجه به تقارن سیستم نسبت به محور Y جهت تحلیل فقط نیمی از سیستم به صورت ۲ بعدی مدل سازی می شود. شبکه اجزاء محدود به کار رفته در مدل سازی مطابق شکل ۲، شامل شبکه هایی با المان های مکعبی می باشد که این مش بندی به طوری است که اندازه المان های خاک به طوری تدریجی تا رسیدن به سطح تماس کاهش می یابد. به عنوان یک اصل کلی اندازه المان هایی که در سطح تماس تعریف می شوند بسیار در توزیع تنش های سطح تماس تاثیر گذارند. همواره تغییر شکل سطح تماس توسط جسم سختتر کنترل می شود و جسم نرم تر ناگذیر به تبعیت از آن است [۶].

بنابراین در این مدل سازی برای برخورداری از دقت مناسب در جواب ها اندازه المانهای جسم نرم تر (خاک) کوچکتر از اندازه المانهای جسم سخت تر (سازه شمع) در نظر گرفته شده است.



شکل ۲: شبکه اجزاء محدود به کار رفته در مدل سازی.

مدل کردن سطح تماس خاک و شمع یکی از قسمت های مهم مدلسازی اندرکنش خاک - شمع می باشد. عموماً سطح تماس بین شمع و خاک به دو صورت مدل می شود، یا به صورت کاملاً به هم چسبیده و یا به شکل سطح تماس اصطکاکی که امکان لغزش بین خاک و شمع و همچنین جدا افتادگی بین آنها موجود باشد [۷]. در این مطالعه با توجه به مطالب ارائه شد در بخش های قبلی مبنی بر اعمال نشست ۲۵ سانتی متری به سازه جهت بسیج مقاومت اصطکاکی جدار شمع روش دوم استفاده شده است.

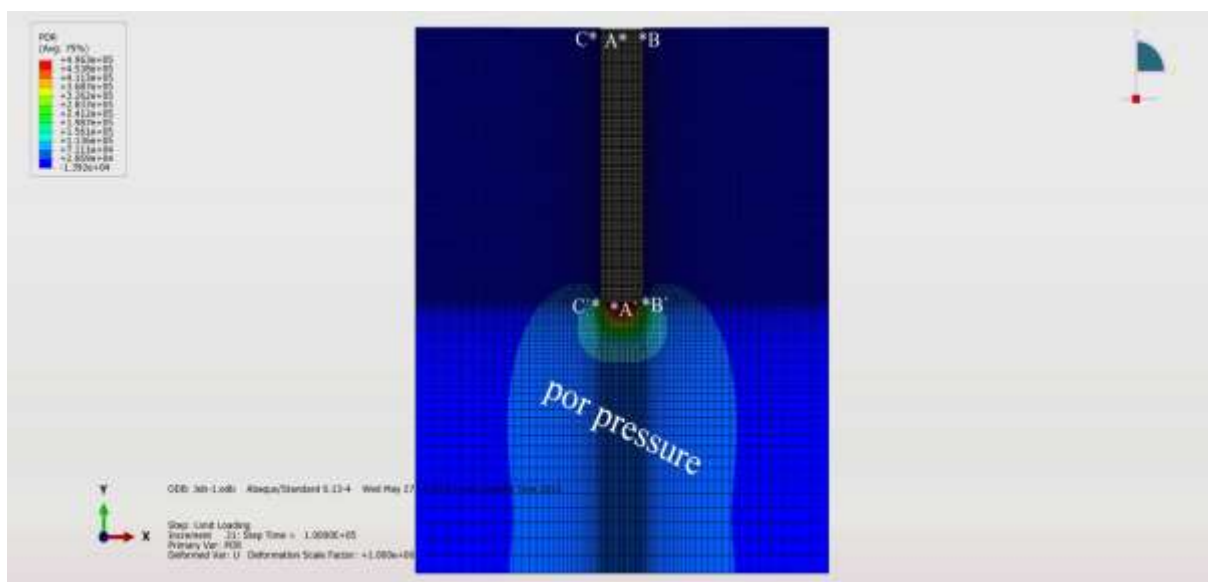
## ۶- تحلیل مساله

در تحلیل این مدلسازی در ابتدا بیان کردیم که برای بسیج اصطکاک جدار و مقاومت انتهایی شمع مقداری حرکت به اندازه ۲۵ سانتی متر با سرعت ثابت به شمع اعمال می کنیم. مقدار سرعت انتخابی و مدت زمان شرایط بارگذاری بلند مدت و کوتاه مدت را ایجاد می کند [۸]. در صورت بررسی شرایط بارگذاری بلند مدت زهکشی از سطح زمین رخ داده و در شرایط بارگذاری کوتاه مدت زهکشی رخ نمی دهد که در این مطالعه هر دو حالت مورد بررسی قرار گرفته و نمودارهای تنش قائم و فشار آب حفره ای و نمودارهای مقایسه ای دو حالت ارائه می گردد.

## ۷- بررسی خروجی ها و نتایج مدلسازی

### ۷-۱- فشار آب حفره ای در حالت زهکشی نشده

متغیر میدانی فشار آب حفره ای در شکل ۳ ارائه شده است، ملاحظه می شود که با بارگذاری از نوع زهکشی نشده، فشار آب منفذی در خاک نزدیک به نوک شمع نسبت به سایر نقاط در طول شمع افزایش قابل توجهی دارد و می توان نتیجه گرفت این فرض که در تمام طول شمع مقاومت زهکشی نشده اثر یکسانی دارد، فرض کاملاً نادرستی است چون مقادیر افزایش فشار منفذی المان های بالایی خاک نسبت به المان های نزدیک به نوک شمع بسیار کمتر است.

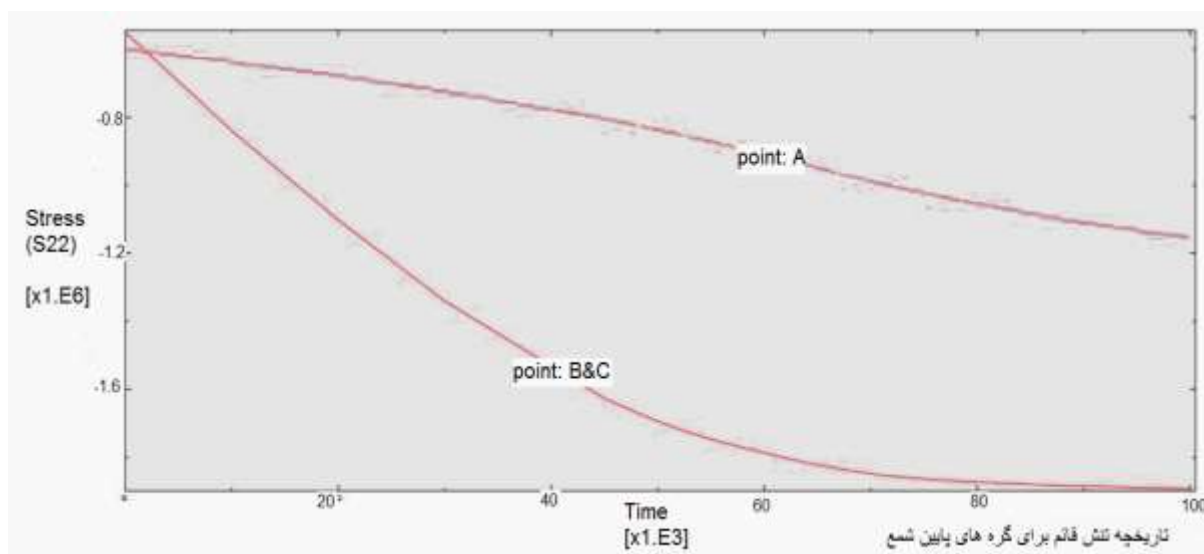


شکل ۳: فشار آب حفره ای در حالت زهکشی نشده.

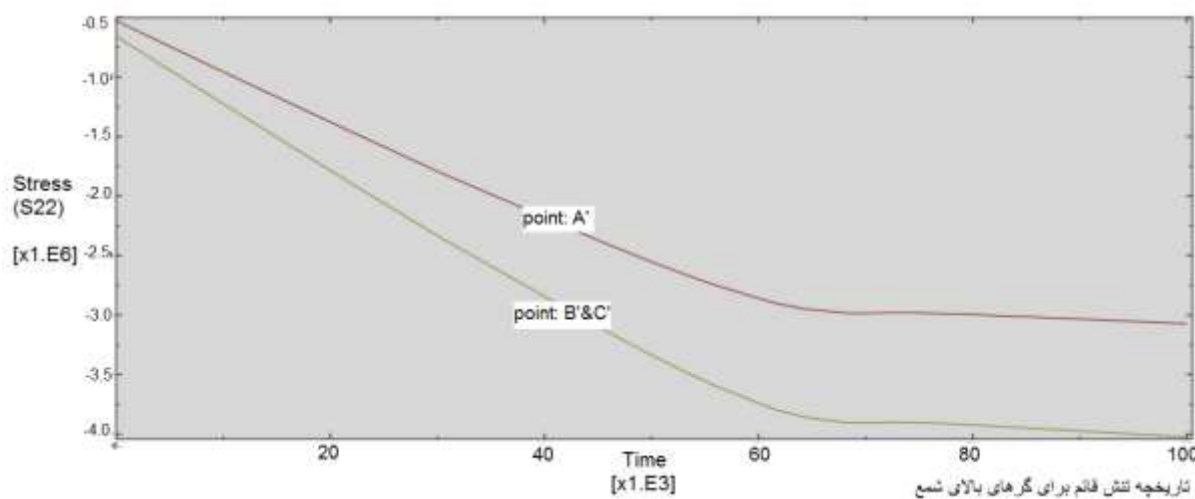
### ۷-۲- تاریخچه تنش قائم برای بالا و پایین شمع

با استفاده از نتایج خروجی های نمودار توسط نرم افزار ABAQUS نمودارهای تنش قائم برای نقاط بالا و پایین در بارگذاری کوتاه مدت (زهکشی نشده) مطابق شکل ۴ و شکل ۵ ترسیم گردید. با توجه به این ۲ نمودار مشاهده می شود که مقدار میانگین تنش برای کف

شمع در حدود یک سوم مقدار میانگین تنش قائم در بالای شمع است، با استناد به این موضوع و شکل های شماره ۳ و ۴ می توان بیان کرد که باربری شمع بیشتر ناشی از مقاومت جداره آن بوده و حدود ۷۰٪ باربری را به خود اختصاص می دهد و حدود ۳۰٪ از باربری مربوط به مقاومت و تنش های نوک شمع است.



شکل ۴: تاریخچه تنش قائم برای گره های پایین شمع.

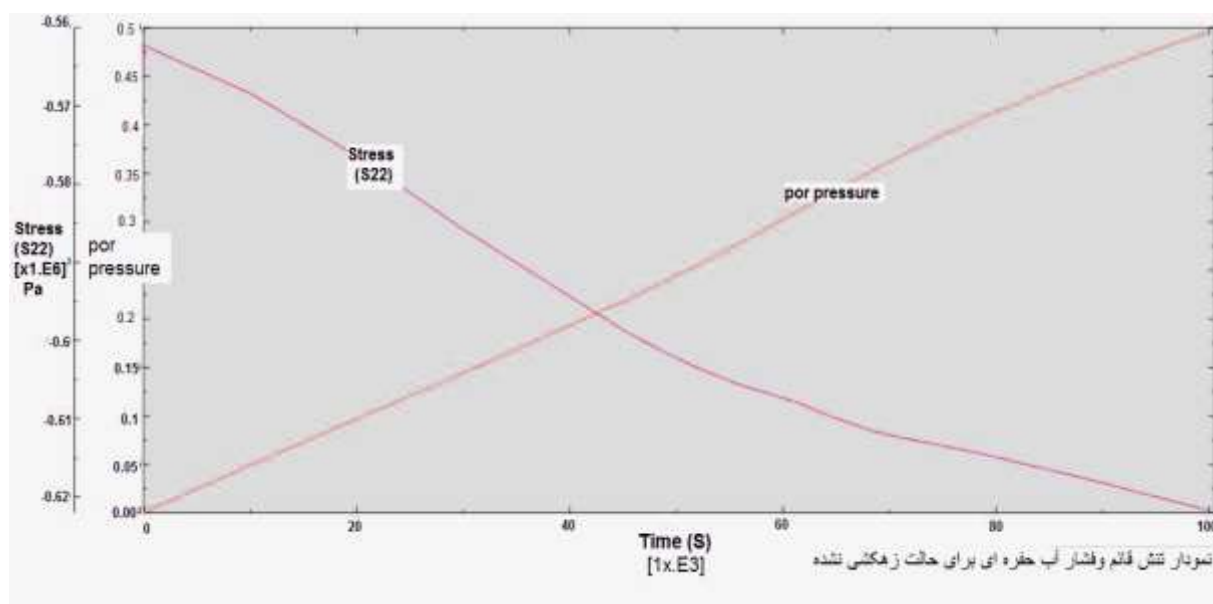


شکل ۵: تاریخچه تنش قائم برای گره های بالای شمع.

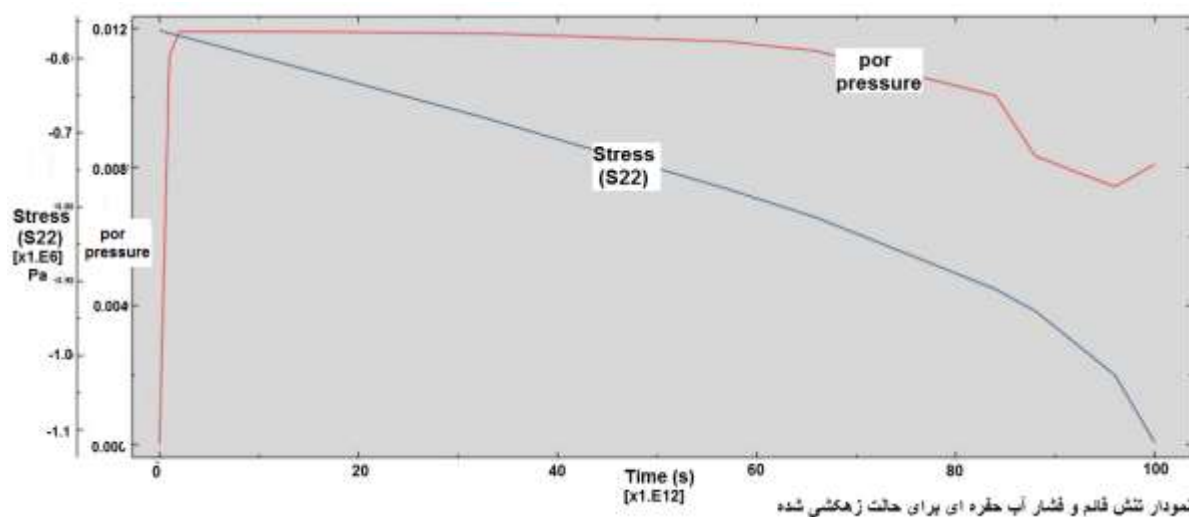
### ۷-۳- مقایسه نمودارهای تنش قائم و فشار آب حفره ای در دو حالت زهکشی شده و زهکشی نشده

باتوجه به شکل ۶ ملاحظه می شود که در حالت زهکشی نشده که کوتاه مدت است و زمان کافی برای زهکشی فشار آب اضافی نیست، نمودار فشار آب حفره ای به سرعت افزایش مقدار می دهد این در حالی است که مقدار تنش قائم افزایش قابل توجهی را نشان نمی دهد (دقت شود که شیب نزولی نمودار تنش قائم دلیلی بر کاهش تنش نیست بلکه بعد مقداری این تنش افزایش جزئی را نشان می دهد). همین موضوع کاملاً بدیهی را می توان دلیلی بر صحت مدلسازی و نتایج مذکور در این مقاله نیز دانست.

حال با توجه به شکل ۷ برای حالت زهکشی شده به علت سپری شدن زمان بیشتر و زهکشی فشار آب اضافی، بعد از سپری شدن زمان کوتاه مدت و افزایش یکباره فشار آب حفره ای، این مقدار سیر کاهش تدریجی به خود می گیرد و در مقابل مقدار تنش قائم با سرعت بیشتری نسبت به حالت زهکشی نشده افزایش می یابد.



شکل ۶: نمودار تنش قائم و فشار آب حفره ای برای حالت زهکشی نشده



شکل ۷: نمودار تنش قائم و فشار آب حفره ای برای حالت زهکشی شده

## ۸- نتیجه گیری

همان طور که مشاهده شد در بخش ۷ از این مقاله نتایج مدل سازی مذکور با استناد به خروجی ها و نمودارهای مربوطه به تفصیل ارائه گردید. نتایج عمده این مطالعه به شرح ذیل بیان می شود.

- با بارگذاری از نوع زهکشی نشده، فشار آب منفذی در خاک نزدیک به نوک شمع نسبت به سایر نقاط در طول شمع افزایش قابل توجهی دارد و می توان نتیجه گرفت که در تمام طول شمع مقاومت زهکشی نشده اثر یکسانی ندارد و مقادیر افزایش فشار منفذی المان های نزدیک به نوک شمع نسبت به المان های بالایی خاک بسیار بیشتر است.

- مقدار میانگین تنش برای کف شمع در حدود یک سوم مقدار میانگین تنش قائم در بالای شمع است، با استناد به این موضوع و مطالب ارائه شده در متن مقاله نتیجه گرفته می شود که باربری شمع بیشتر ناشی از مقاومت جداره آن بوده و حدود ۷۰٪ باربری را به خود اختصاص می دهد و حدود ۳۰٪ از باربری مربوط به مقاومت و تنش های نوک شمع است.
- در حالت زهکشی نشده که کوتاه مدت است و زمان کافی برای زهکشی فشار آب اضافی نیست، مقدار فشار آب حفره ای به سرعت افزایش مقدار می دهد این در حالی است که مقدار تنش قائم افزایش قابل توجهی را نشان نمی دهد. برای حالت زهکشی شده بعد از سپری شدن زمان کوتاه مدت و افزایش یکباره فشار آب حفره ای، این مقدار سیر کاهش تدریجی به خود می گیرد و در مقابل مقدار تنش قائم با سرعت بیشتری نسبت به حالت زهکشی نشده افزایش می یابد

## مراجع

- [1] Gennaro. V.D and Frank. R. (2002), "Elasto-plastic analysis of the intraface behaviour between granular media and structure", *Computers and Geotechnics*, Vol. 29:547-572.
- [2] Muni Budhu, *Advanced Soil Mechanics*, third Edition
- [3] Poulos HG, Davies EH. (1968). *The settlement behavior of single axially loaded incompressible piles and piers. Geotechnique*, 18:351-71.
- [4] Shahbazi, Reza. Yekrangnia, Mohammad. (1393). *ABAQUS applied manual with examples for civil engineering*. Publication of Science in Civil Engineering.
- [5] Roscoe, K. H. and Burland, J. B. (1968). *On the generalised stress-strain behaviour of "wet" clay. Engineering plasticity*, 33, pp 535-609
- [6] Braja M.Das, *Advanced Soil Mechanics*. Third Edition.
- [7] Dun-hua Lu. Shu-jun Cui. (2010). *Computer modeling for pile-soil response under the horizontal head load*. 2nd International Conference on Computer Engineering and Technology, V7:168-172.
- [8] Westgaard H. M. *Water pressure on dams during earthquakes*. Transction ASCE, Vol 98, pp 418-472, 1993.