

## بررسی ظرفیت باربری و نشست حاصل از شمع یا پایه های فرو رفته در سنگ تحت بار محوری - مطالعه موردی پروژه مصلاهی مهدیه اهواز

علی رضا نعنای<sup>1</sup>، محمد سیروس پاکباز<sup>2</sup>

1- علی رضا نعنای - کارشناسی ارشد مکانیک خاک و پی، دانشگاه شهید چمران، اهواز

2- محمد سیروس پاکباز - دانشیار دانشکده مهندسی، دانشگاه شهید چمران، اهواز

[Alireza\\_nanaee@yahoo.com](mailto:Alireza_nanaee@yahoo.com)

[Pakbaz\\_m@scu.ac.ir](mailto:Pakbaz_m@scu.ac.ir)

### خلاصه

شمع های درجاریز بتنی فرو رفته در سنگ یا سوکت پایل به طور گسترده ای برای انتقال بارهای سنگین از خاک های ضعیف سطحی به سنگ بستر به کار می روند. در این مقاله با استفاده از نرم افزار پلاکسیس به مدلسازی سوکت پایل برای سایت مصلاهی مهدیه اهواز پرداخته و نتایج این نرم افزار را با روش های طراحی موجود مورد مقایسه قرار می دهیم. برای اطمینان از صحت کارکرد مدل ابتدا به مدلسازی سیستم شمع و خاک و سنگ با استفاده از مدل توده سنگ درزه دار در نرم افزار پلاکسیس پرداخته و سپس نتایج بدست آمده از مدل با نتایج عددی پیشرفته و آزمایش های بار با مقیاس کامل مقایسه می گردد تا از درستی نتایج مدل های ساخته شده اطمینان حاصل شود. نتایج این تحقیق نشان می دهد که روش های تجربی و عددی استفاده شده در این پژوهش انطباق بسیار خوبی با یکدیگر دارند ولی بنا به مزیت هایی چون سرعت، دقت و مطالعات بر روی پارامترهای موجود در طراحی استفاده از روشهای عددی ارجحیت دارد.

کلمات کلیدی: شمع، پایه، سنگ، اندرکش شمع - سنگ، پلاکسیس

### 1. مقدمه

در بسیاری موارد خاک سطحی مقاومت کافی برای تحمل بارهای سنگین سازه ای از جانب فنداسیون را ندارد، از طرفی سنگ بستر در عمق مناسبی از سطح زمین قرار دارد. راه حل مهندسی معمول؛ استفاده از شمع های درجاریز بتنی فرو رفته در سنگ یا سوکت پایل می باشد که با عبور از خاک ضعیف سطحی (بوسیله قرار دادن کیسینگ و یا گل حفاری) در سنگ بستر سوکت می شوند.

بسیاری از پژوهشگران با بیان روابطی برای مقاومت جدار، مقاومت نوک و نشست این فنداسیون راه حل های تجربی، تحلیلی و عددی بسیاری در این جهت پیشنهاد دادند. به طور کلی انواع طراحی سوکت پایل به سه دسته زیر تقسیم بندی می شوند:

طراحی الاستیک که طی آن هیچگونه لغزشی بین بتن سوکت پایل و سنگ احاطه کننده آن بوجود نیامده و سطح مشترک بصورت الاستیک رفتار می کند؛ طراحی الاستوپلاستیک که طی آن نقاط پلاستیک در سطح مشترک بتن و سنگ ایجاد شده و سطح مشترک بصورت الاستوپلاستیک رفتار می کند و طراحی غیر خطی که مقدمه ای برای روش های اجزاء محدود و تفاضل های محدود و نرم افزارهای تخصصی بر پایه منحنی های عکس العمل بار - نشست می باشد.

از میان روش های مبتنی بر طراحی های فوق، در این مقاله روش طراحی دستی رو و آرمیتاژ انتخاب شده که در برگیرنده شرایط الاستیک و لغزشی (طراحی نوع اول و دوم) بوده و از طرفی صحت آن بوسیله آزمایش های بار هروات در سال 1980 تایید شده است [1]. علاوه بر آن این روش برای بسیاری از طراحی ها و صحت سنجی ها نیز بکار رفته است. در ادامه به معرفی اجمالی این روش پرداخته و سپس با ارائه یک نرم افزار المان محدود نتایج روشهای دستی و عددی را برای سایت مصلاهی مهدیه اهواز با یکدیگر مورد مقایسه قرار می دهیم. روش طراحی حاضر در برگیرنده سه نوع روش طراحی گفته شده در قبل می باشد.

## 2. روش طراحی رو و آرمیتاج

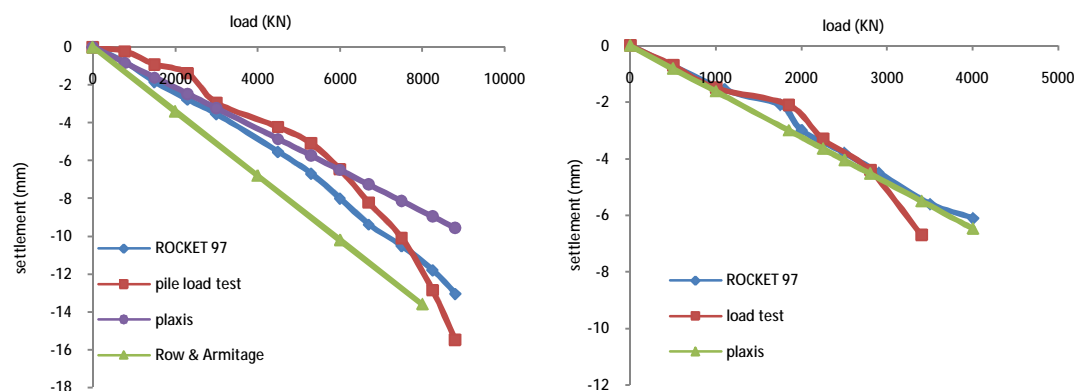
رو و آرمیتاج در سال 1986 روشی برای طراحی سوکت پایل ارائه دادند. آنها ابتدا با آزمایشهای بار تخمینی برای مقاومت جدار سوکت پایل در حالت سطح مشترک صاف و زیر بتن و سنگ، و مدول الاستیسیته سنگ پیشنهاد و سپس بوسیله نرم افزار اجزای محدود ROSOC نمودارهایی به نام نمودارهای طراحی برای حالت الاستیک و لغزشی ارائه دادند. این پژوهشگران با استفاده از روابط ارائه شده و گراف های طراحی، فلوچارتی نیز برای طراحی الاستیک و لغزشی سوکت پایل فراهم آوردند [1] و [2]. شرح کامل این روش در این تحقیق نمی گنجد.

## 3. آشنایی با نرم افزار پلاکسیس

جهت تحلیل سوکت پایل در این تحقیق از نرم افزار اجزای محدود در بعدی پلاکسیس با مدل تقارن محوری استفاده شده است. مش های این نرم افزار مثلثی شکل و 15 گرهی هستند. مرزهای این مدل در جهت موازی با سوکت پایل در برابر تغییر مکان قائم آزاد و در برابر تغییر مکان افقی گیردار می باشند، در حالی که مرز این مدل در جهت عمود بر سوکت پایل در برابر هر دو تغییر مکان گیردار است. بار به صورت گسترده به سرشمع یا پایه وارد می شود. مصالح تشکیل دهنده شمع از نوع مدل الاستیک خطی، خاک از نوع مدل موهر - کولمب و سنگ از نوع توده سنگ درزه دار می باشند. بر حسب درشتی موضعی مش بندی از خیلی درشت تا خیلی ریز متغیر می باشند که در این تحقیق از مش بسیار ریز استفاده شده است. پس از اعمال شرایط اولیه تنش و فشارحفره ای وارد مرحله محاسبات شده و با انجام یک آنالیز پلاستیک، مدل ایجاد شده را تحلیل می کنیم.

## 4. بررسی صحت کارکرد روش عددی

قبل از استفاده از نرم افزار پلاکسیس می باید به گونه ای صحت نتایج آن برای مدلسازی سوکت پایل اثبات شود. در این تحقیق خروجی نرم افزار پلاکسیس با خروجی برنامه ROCKET 97، آزمایش بار شمع و خروجی نرم افزار ROSOC مورد قیاس قرار گرفته است. این مقایسه در منحنی هایی که مربوط به منطقه ای از ایرلند است برای دو شمع به نام های 8a، 8g در شکل 1 آمده است [3].



شکل 1 - مقایسه منحنی بار - نشست نرم افزار پلاکسیس با منحنی بار - نشست آزمایش بار شمع، نرم افزار Rocket 97 و گراف های رو و آرمیتاج (نرم افزار ROSOC) برای شمع 8a (سمت چپ) و 8g (سمت راست) در ایرلند

با مقایسه نتایج نرم افزار پلاکسیس با روشهای مورد بررسی می توان نتیجه گرفت که این نرم افزار از انطباق بسیار خوبی خصوصاً با خروجی برنامه ROCKET 97 و آزمایش بار شمع برخوردار است.

## 5. معرفی سایت مصلی مهدیه اهواز

در سالهای آغازین پیروزی انقلاب اسلامی، تصمیم مسئولان نماز جمعه اهواز به منظور پاسخگویی به نیاز اولیه برگزاری نماز جمعه که نمازگزاران را از آفتاب سوزان تابستان و بارانهای زمستان محفوظ نگهدارد، منجر به احداث سقف و تاسیسات اولیه مربوط به مصلای اهواز گردید. از آنجا که این مکان در شکل اجرا شده قادر به تامین و استقرار بسیاری از کاربردهای مورد نیاز به منظور انجام فعالیتهای فرهنگی و مذهبی در زمان کنونی نمی باشد پروژه احداث مصلای مهدیه اهواز، مطابق با معماری سنتی و اسلامی اماکن مذهبی در دستور کار مسئولین محترم استان قرار گرفت. بنابراین، اقدام به انجام شناسایی تحت الارضی در این منطقه گردید. به این منظور شش گمانه اکتشافی در این منطقه حفر گردید و سپس نمونه های اخذ شده جهت بدست آوردن پارامترهای ژئوتکنیکی مورد آزمایش قرار گرفت. در این تحقیق مشخصات دو گمانه از شش گمانه مورد بررسی قرار گرفت و بر اساس مشخصات این گمانه ها طراحی سوکت پایل برای این منطقه انجام شد. سوکت پایل A بر اساس مشخصات گمانه اول و سوکت پایل B بر اساس مشخصات گمانه چهارم با استفاده از فلوچارت رو و آر میتاج طراحی شد. برای سوکت پایل A طراحی الاستیک و برای سوکت پایل B طراحی الاستوپلاستیک انجام شد. در نهایت این سوکت پایل ها در نرم افزار پلاکسیس مدل سازی و نتایج بدست آمده با روش دستی مورد مقایسه قرار گرفت.

## 6. بحث، مقایسه و مطالعات پارامتریک در مورد نتایج نرم افزار پلاکسیس

این قسمت را می توان به دو بخش اصلی تقسیم بندی کرد:

- 1- مقایسه نتایج نرم افزار پلاکسیس و روش دستی مورد بررسی
- 2- مطالعات پارامتریک

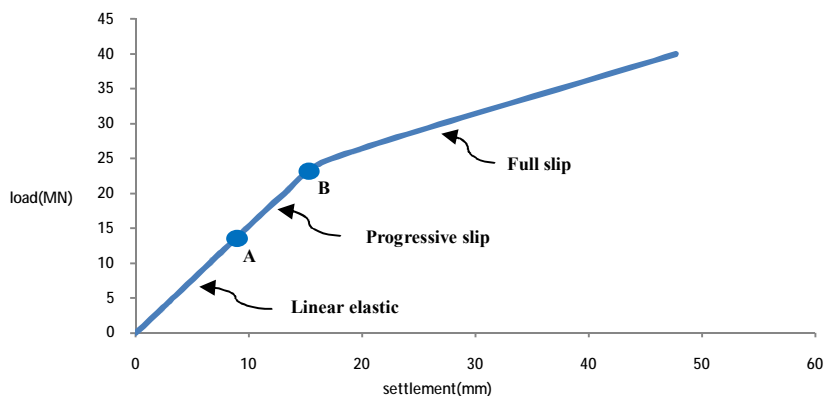
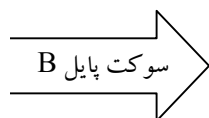
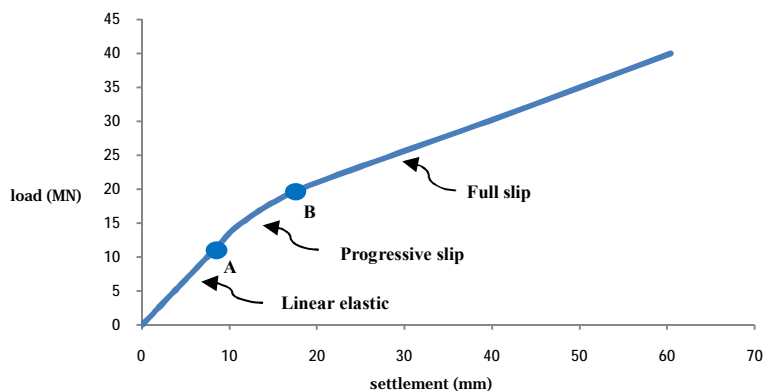
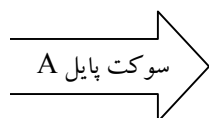
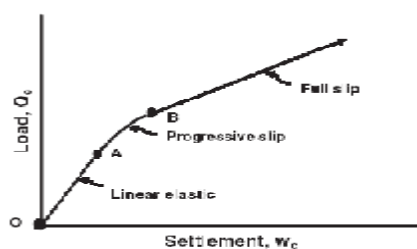
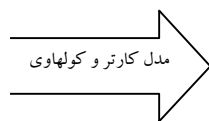
### 1.6. مقایسه نتایج نرم افزار پلاکسیس و روش دستی مورد بررسی

پس از طراحی دستی و عددی، نتایج این روشها با یکدیگر مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج در جدول 1 نشان داده شده است.

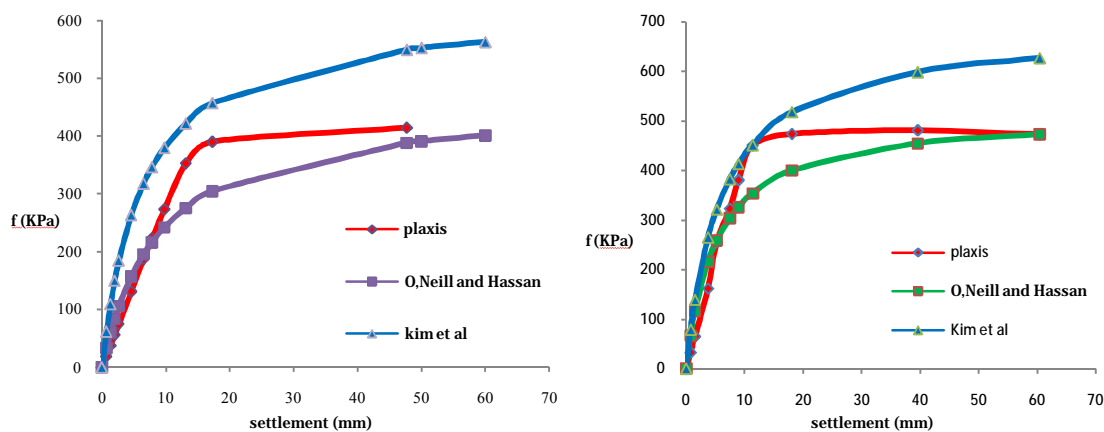
جدول 1 - مقایسه نتایج روش دستی و عددی برای سوکت پایل های A و B

سوکت پایل B		سوکت پایل A		
روش عددی	روش دستی	روش عددی	روش دستی	
8/94	نمی توان بدست آورد	7/82 mm	7/43 mm	نشست
%19	%27	%14	%13	سهم بار انتقال یافته به نوک نسبت به بار وارده
الاستوپلاستیک	الاستوپلاستیک	الاستیک	الاستیک	نوع رفتار سطح مشترک
481/6 KPa	510 KPa	414/4 KPa	460 KPa	مقاومت نهایی جدار

از طرفی نتایج انتقال بار با تغییر شکل و چگونگی رفتار سطح مشترک برای سوکت پایل های A و B رسم و نتایج با تئوری های رایج مورد مقایسه قرار گرفت. روش های انیل و حسن و کیم و همکاران از مهمترین روش های موجود برای انتقال بار سوکت پایل هستند. همچنین جهت بررسی رفتار سطح مشترک از مدل کارتر و کولهاوی استفاده شده است.



شکل 2 - مقایسه رفتار سطح مشترک در حالت الاستیک و الاستوپلاستیک با مدل کارتر و کولهاوی (به ترتیب برای سوکت پایل های A و B)



شکل 3 - انطباق بسیار خوب نتایج روش عددی منحنی انتقال بار سوکت پایل های A (سمت چپ) و B (سمت راست) با روشهای موجود

## 6.2. مطالعات پارامتریک

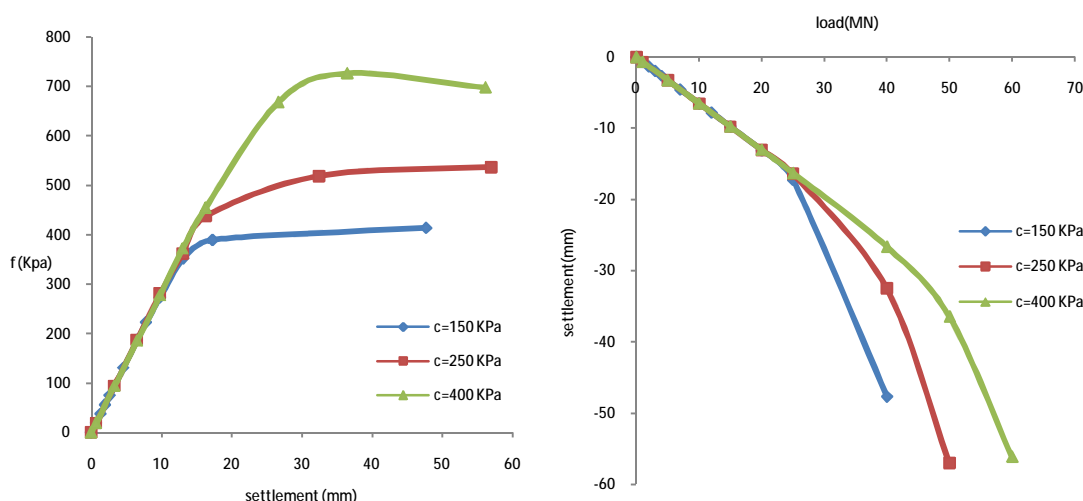
این بخش شامل بررسی اثر چهار پارامتر موثر بر روی نتایج نشست و مقاومت نهایی جدار می باشد. این پارامترها عبارتند از پارامترهای مقاومت برشی، تغییر جهت بارگذاری، قطر سوکت پایل و نسبت پواسون.

### 1.2.6. اثر پارامترهای برشی در مقاومت جدار و نشست سوکت پایل

پارامترهای مقاومت برشی جدار شامل چسبندگی ( $c$ )، زاویه اصطکاک ( $\Phi$ ) و زاویه اتساع ( $\psi$ ) می باشد. رابطه میان این پارامترها از معیار موهر-کولمب پیروی می کند [4].

$$\tau = c + \sigma_n \tan(\Phi + \psi) \quad (1)$$

این پارامترها، مادامی که سطح مشترک بین سنگ و بتن بصورت الاستیک رفتار می کند هیچگونه اثری بر مقاومت جدار ندارند، اما زمانی که سطح مشترک رفتار الاستوپلاستیک و یا پلاستیک کامل از خود نشان می دهد افزایش هر کدام از این پارامترها باعث افزایش در مقدار مقاومت برشی جدار و کاهش نشست می شود. شکل 3 مقاومت برشی جدار را برای چسبندگی های مختلف نشان می دهد. (هرچند برای پارامترهای زاویه اصطکاک و زاویه اتساع همین نتایج بدست می آید).



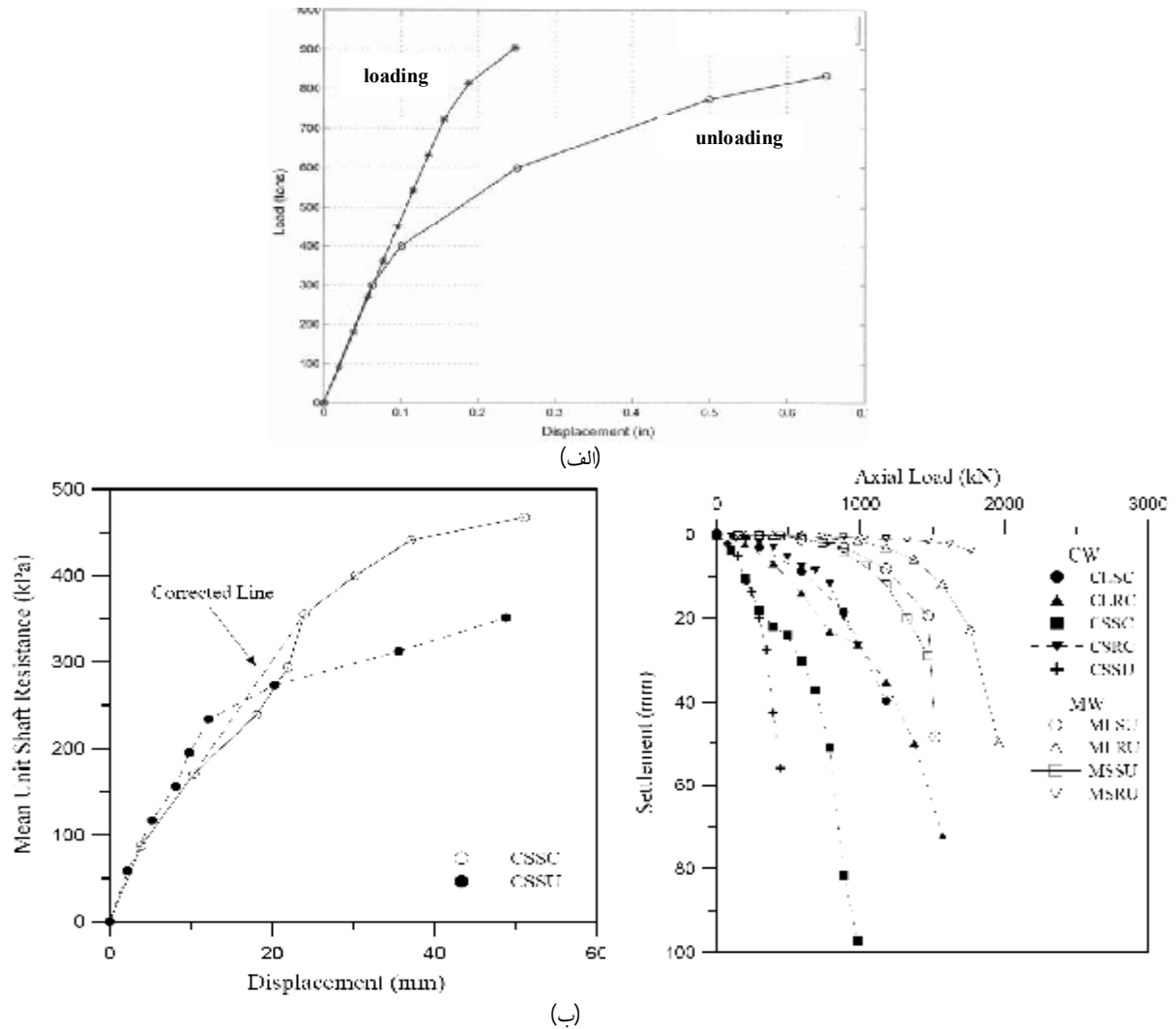
شکل 3 - تغییرات مقاومت جدار و نشست برای چسبندگی های مختلف

### 2.2.6. تغییر جهت بارگذاری (کششی یا فشاری)

تغییر جهت نیروی محوری اعمال شده به سوکت پایل موجب تغییر در مقاومت جدار و نشست در اثر بارگذاری های مختلف می گردد. برای روشن شدن موضوع در این قسمت نتایج مطالعات اجزای محدود پیکوفسکی و همکاران در سال 2004 و نتایج آزمایش بار ستول و جانگ در سال 2007 مورد بررسی قرار گرفته است [5] و [6].

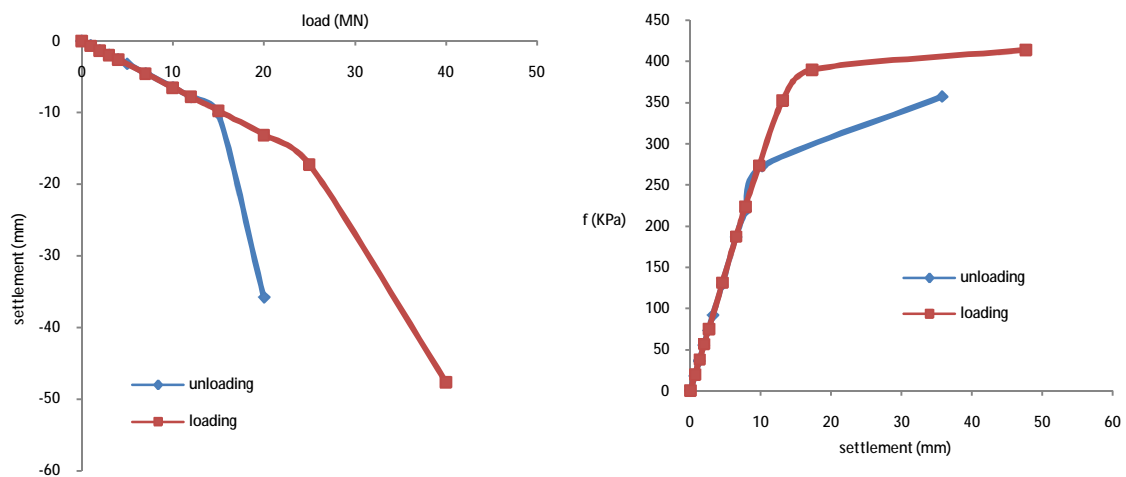
(در آزمایشهای بار انجام شده شمع های CSSU و CSSC کاملاً مشابه و تنها تفاوت آن در جهت بارگذاری می باشد؛ بطوری که شمع CSSC تحت بار فشاری و شمع CSSU تحت بار کششی قرار گرفته است [6].)

با توجه به شکل 6 می توان نتیجه گرفت زمانی که شمع تحت بار کششی قرار می گیرد مقدار مقاومت جدار و نشست به حالتی که تحت فشار می باشد به ترتیب کمتر و بیشتر خواهد بود و این موضوع به علت تغییر شرایط تنش عمودی در سطح مشترک می باشد.



شکل 6 - (الف) نتایج تحلیل های المان محدود پایکوفسکی - (ب) نتایج آزمایش بار شمع برای شمع های با جهت بارگذاری متفاوت

شکل 7 که از نرم افزار پلاکسیس بدست آمده اند به خوبی با تئوری های قبل انطباق دارند.

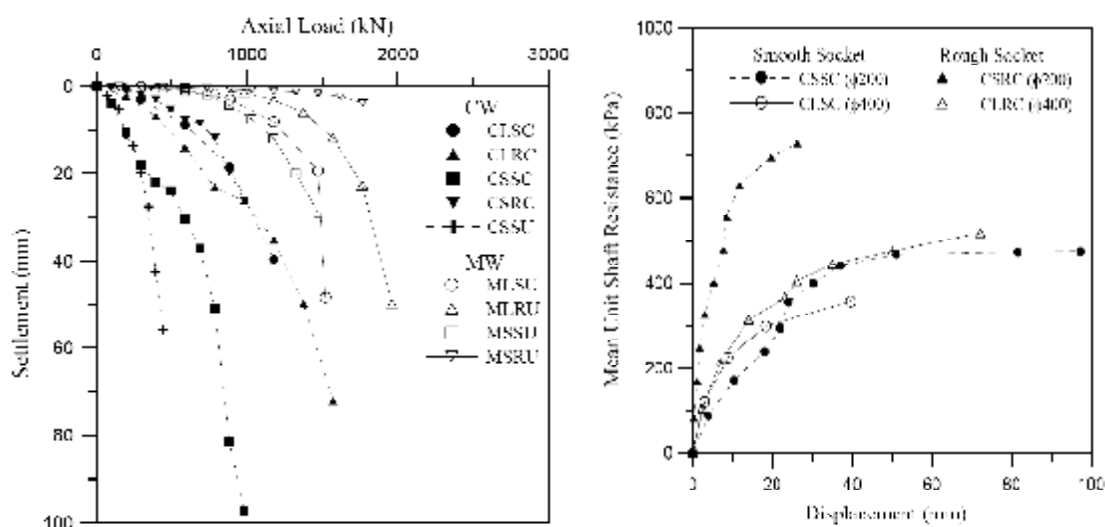


شکل 7 - نتایج نرم افزار پلاکسیس برای شمع های با جهت بارگذاری متفاوت

همانطور که مشاهده می شود مادامی که شرایط الاستیک است، تغییر جهت بار اثری بر نشست و مقاومت جدار ندارد. این موضوع در نتایج FEM پایکوفسکی، نتایج آزمایش بار و خروجی نرم افزار پلاکسیس به چشم می خورد.

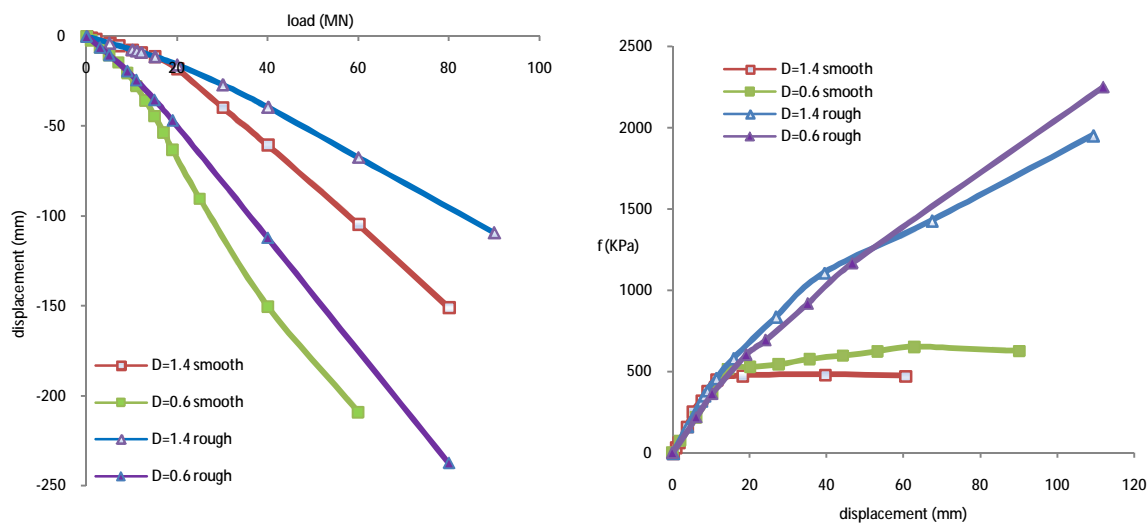
### 3.2.6. تغییر قطر سوکت پایل

تغییر قطر سوکت پایل باعث تغییر در میزان مقاومت جدار و نشست آن می شود. بگونه ای که برای دو سوکت پایل با شرایط یکسان با افزایش قطر شاهد کاهش نشست و مقاومت جدار خواهیم بود. این موضوع در شکل 8 که نشان دهنده آزمایش های بار سئول و جانگ (2007) می باشند نشان داده شده است. (سوکت های صاف CSSC و CLSC و همچنین سوکت های زبر CSRC و CLRC یکسان هستند، با این تفاوت که سوکت های CLSC و CLRC دارای قطر بیشتری می باشد [6].)



شکل 8 - نتایج آزمایش بار سئول و جانگ (2007)

شکل 9 که از نرم افزار پلاکسیس به دست آمده است بخوبی با نتایج آزمایش بار فوق تطابق دارند.



شکل 9 - نتایج نرم افزار پلاکسیس برای سئول های با قطر مختلف

#### 4.2.6. تاثیر نسبت پواسون

تغییر نسبت پواسون بر مقدار مقاومت جدار و نشست سوکت پایل تقریباً بی اثر می باشد. این موضوع توسط پژوهشگرانی چون وایلی و کالینگوود و هابر فیلد بیان شده است. بامدلسازی دو سوکت پایل یکسان در نرم افزار پلاکسیس و تغییر نسبت پواسون آنها این موضوع نتیجه شد.

#### 7. نتیجه گیری

نتایج این تحقیق نشان می دهد که روش های تجربی و عددی استفاده شده در این پژوهش انطباق بسیار خوبی با یکدیگر دارند ولی بنا به مزیت هایی چون سرعت، دقت و مطالعات بر روی پارامترهای موجود در طراحی استفاده از روشهای عددی ارجحیت دارد. همچنین با انجام مطالعات پارامتریک برای سوکت پایل نتایج زیر بدست می آید:

- 1- افزایش پارامترهای موثر در مقاومت برشی جداره شامل چسبندگی (c)، زاویه اصطکاک ( $\Phi$ ) و زاویه اتساع ( $\Psi$ ) تا زمانی که سطح مشترک رفتار الاستیک از خود نشان می دهد، هیچگونه اثری بر مقاومت جدار و نشست ندارد، در صورتی که با تشکیل نقاط پلاستیک در سطح مشترک با افزایش پارامترهای فوق مقاومت جدار و نشست سوکت پایل افزایش می یابند.
- 2- در اثر اعمال بار به صورت کششی شرایط تنش عمودی در سطح مشترک نسبت به حالتی که سوکت پایل تحت بار فشاری قرار می گیرد تغییر می کند. این تغییر مدول الاستیسیته و زاویه اصطکاک موثر را کاهش داده و در نتیجه شاهد نشست بیشتر و مقاومت جدار کمتری خواهیم بود.
- 3- با کاهش قطر سوکت پایل مقاومت نهایی جدار و نشست افزایش می یابند.
- 4- تغییر نسبت پواسون تاثیر چندانی بر مقاومت جدار و نشست سوکت پایل ندارد.

#### 8. قدردانی

بودجه این طرح از محل طرح پژوهانه شماره 2038 از معاونت پژوهشی دانشگاه چمران تامین گردیده است. بدینوسیله نویسندگان مقاله تشکر خود را در این زمینه از مسئولین مربوطه اعلام می دارد.

#### 9. مراجع

- 1) Rowe, R.K. and H.H. Armitage, "A Design Method for Drilled Piers in Soft Rock," Canadian Geotechnical Journal, Vol. 24, 1987b, pp. 126–142.
- 2) Rowe, R.K. and H.H. Armitage, "Theoretical Solutions for Axial Deformation of Drilled Shafts in Rock," Canadian Geotechnical Journal, Vol. 24, 1987a, pp. 114–125.
- 3) Michael Long, "SKIN FRICTION FOR PILES SOCKETED IN HARD ROCK", College Lecturer, University College Dublin, Earlsfort Terrace, Dublin 2, Ireland
- 4) Rock-Socketed Shafts for Highway Structure Foundations, NCHRP (NATIONAL COOPERATIVE HIGHWAY RESERCH PROGRAM), SYNTHESIS 360, TRANSPORTATION RESEARCH BOARD EXECUTIVE COMMITTEE 2006 (Membership as of April 2006)
- 5) Paikowsky, S.G., et al., Innovative Load Testing Systems, Draft Final Report NCHRP 21-08, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., 2004b.
- 6) Seol, Hoon, Jeong Sang-Seom, Shaft Resistance Characteristics of Rock-Socketed Drilled Shafts Based on Pile Load Tests, Jour. of the KGS, Vol. 23, No. 9. September 2007, pp. 51~63