

طراحی میکروپایل

3- طراحی

3-1- مقدمه

تا تاریخ آماده سازی گزارش FHWA ، دو آیین نامه‌ی راهنمایی برای طراحی ریزشمع ها در ایالات متحده وجود دارد. اولین راهنما توسط دپارتمان تجاری سرویس اطلاعات تکنیکی ملی امریکا در سال 1997 منتشر شد. این مجموعه دارای 4 جلد است و جلد دوم آن در مورد طراحی است؛ نام این مجموعه میکروپایل های تزریق شده و حفاری شده است.

دومین مجموعه راهنما (راهنمای طراحی و ساخت میکروپایل ها) توسط اداره‌ی بزرگ راه‌های امریکا (FHWA) در سال 2000 میلادی منتشر شد. در این بخش اشاره‌ای مختصر بر طراحی میکروپایل‌ها از نقطه نظر ژئوتکنیکی با استفاده از دو منبع فوق می‌کنیم.

3-2- میکروپایل های تزریق شده و حفاری شده

Drilled and Grouted Micropiles-state of practice ;review ;volume 2:Design

در این گزارش یک ملاک طبقه بندی جدید و باریک بینانه برای ریزشمع‌ها توسعه داده شد. سیستم طبقه بندی براساس دو معیار است:

1) فلسفه ی رفتار (طراحی)

2) روش تزریق (ساخت)

با استفاده از اولین معیار، ریزشمع ها به دو نوع طبقه بندی می‌شوند یعنی نوع اول و نوع دوم. نوع اول ریزشمع ها به المان های ریزشمعی اشاره می کند (منفرد یا گروه) که به طور مستقیم بارگذاری می شوند. بار اساساً از نظر سازه ای توسط تقویت های فولادی و از نظر ژئوتکنیکی توسط ناحیه ی اتصال دوغاب زمین توسط شمع های منفرد تحمل می شود. نوع دوم ریزشمع ها المان‌هایی هستند که خاک را محدود می‌کنند و از درون خاک را تقویت می‌کنند و رفتاری مانند یک خاک مرکب تقویت شده دارند. کاربرد ریزشمع ها در ایالات متحده بیشتر از نوع اول است.

برای برآورد ظرفیت ژئو تکنیکی ریزشمع ها تحت بار قائم، جانبی، یا ترکیب بارگذاری، تعیین مناسب پارامترهای سطح مشترک دوغاب- زمین و وضعیت اولیه‌ی تنش در زمین بعد از نصب ریزشمع (عمدتاً به علت فشار تزریق) مورد احتیاج است. طراحی ژئوتکنیکی برای ریزشمع‌های منفرد تحت بار قائم بر اساس ملاک ظرفیت بار نهایی و کنترل جابجایی قائم است. به طور مشابه، ظرفیت بار نهایی و کنترل جابجایی افقی، برای ریزشمع‌هایی که تحت بار جانبی هستند، استفاده می‌شود. روش‌های طراحی از روش‌های زیر می‌تواند انتخاب شود:

- (1) روش‌های تجربی برای پیش‌بینی بار نهایی
- (2) مدل‌های فصل مشترک بار جابجایی برای تخمین تغییر مکان عمودی
- (3) آزمایش‌های بارگذاری در محل

برای طراحی شمع‌های منفرد، آیین‌نامه‌ی طراحی مشخصی برای نوع A , B , C , D ریزشمع‌ها در ایالات متحده وجود ندارد. برای نوع A ریزشمع‌ها، طراحی معمولاً بنابر خصوصیات که برای شمع‌های حفاری شده با قطر بزرگ قرار داده شده است، صورت می‌گیرد. (به عنوان مثال AASHTO 1991 ، Caltrans 1994). در ضمن آیین‌نامه‌ی انگلستان 8081 (1989)، در حالی که به کارهای Bruce and Littlejohn (1977) و آیین‌نامه فرانسه (CCTG 1993) که توسط Diox and Bustamante (1985) صورت گرفته برای نوع B , C , D ریزشمع‌ها به کار گرفته می‌شود.

به علت غیاب آیین‌نامه‌های طراحی مرتبط با ریزشمع‌ها تحت بار جانبی، طراحی معمولاً بوسیله‌ی آزمایش‌های بار جانبی که از آیین‌نامه‌های حاضر برای شمع‌های حفاری شده پیروی می‌کنند، استفاده می‌شود (به عنوان مثال : UBC 1994 ، BCNYC 1991 ، AASHTO 1992). برای طراحی مقدماتی، آیین‌نامه‌های طراحی مانند ؛ API (1988)، CCTG (1993) و Caltrans (1994) که با تحقیقاتی که توسط Matlock (1970)، Reese (1994) انجام شده است، استفاده خواهد شد.

به طور مشابه، آیین‌نامه‌های برای طراحی گروه ریزشمع و ریزشمع‌های مشبک در آمریکا وجود ندارد. مانند مورد شمع‌های منفرد، ملاک طراحی که برای گروه ریزشمع و شمع‌های مشبک استفاده می‌شود، ظرفیت بار نهایی و کنترل تغییر مکان است. ظرفیت بار نهایی و تغییر مکان تحت تاثیر فاصله‌ی شمع‌ها، شرایط خاک و محل و نوع ریزشمع‌ها و کلاهیک شمع هستند. حائز اهمیت است که ضریب باردهی گروه بستگی بسیار مهمی با تکنیک نصب شمع دارد.

مرجع خوب طراحی که بتواند برای تخمین ظرفیت باربری نهایی گروه ریزشمع و ریزشمع های مشبک استفاده شود وجود ندارد زیرا نتایج آزمایشگاهی و آزمایش های بزرگ مقیاس که توسط محققان مختلف

(Lizzi 1978 ، Plumelle 1984 ، Maleki 1995) انجام گرفته تاثیر گروه مغایری را نشان می دهد. هر چند یکی از روش های ذکر شده در گزارش AASHTO 1992 ، که کارهای Terzaghi و Peck (1994) را دنبال می کند ، برای شمع های سنتی استفاده شده است. این آیین نامه ظرفیت محوری گروه را کمتر از :

1. مجموع ظرفیت های نهایی هر شمع منفرد در گروه، یا

2. ظرفیت بار محوری بلوک خرابی گروه (یک بلوک مستطیلی)،

تخمین می زند.

شیوه های آیین نامه ی CCTG فرانسه (1993)، می تواند به عنوان یک محاسبه ی محتاطانه مقدماتی برای ضریب بازدهی گروه پذیرفته شود.

برای تخمین تغییر مکان عمودی گروه ریزشمع چندین روش پذیرفته شده است :

1. روابط تجربی که تغییر مکان عمودی گروه شمع را به یک شمع منفرد مربوط می کند (به عنوان مثال ،

Skempton 1953 ، Vesic 1969 ، Meyerhof 1976 ، Fleming 1985).

2. شیوه های الاستیک پیوسته که از معادلات Mindlin (1936) استفاده می کند

(مانند Banerjee and Butterfield 1971 ، Rendolph and Wroth 1979 ، Poulos ، Davis 1980 Yamashita ، 1987).

3. مدل های انتقال بار و روش های هیبرید (مانند ONeil 1977 ، Chow 1986 ، Lee 1993 ، Maleki 1994 and Frank

4. یک مدل واسط برشی که هیچگونه جابجایی شعاعی را نمی پذیرد و توسط Rendolph and Wroth (1979) ارائه شده است.

برای تخمین ظرفیت جانبی گروه ریزشمع ها ، مشابه ظرفیت گروه محوری ، یکی از روش ها ی زیر که کمتر از مقادیر زیر می باشد، استفاده می شود:

1. تعداد ریزشمع ها ضربدر ظرفیت باربری جانبی یک شمع منفرد در گروه، یا

2. ظرفیت باربری جانبی یک بلوک مستطیلی شامل ریزشمع ها و خاک بین آنها

برای محاسبه ی تاثیر گروه بر ظرفیت بار جانبی و خیز شمع آیین نامه های متفاوتی (به عنوان مثال 1992 AASHTO ، 1993 CCTG ، 1990 BOCA) حداقل فاصله ی بین ریزشمع ها را ، مختلف مشخص می کنند. هر چند ، هنگامی که شمع ها نزدیک به هم هستند ، اندرکنش بین آنها باید محتمل فرض شود. ضریب بازدهی گروه ، برای شمع های کنار هم در گزارش بحث شده است.

برای تخمین مقدار بار جانبی - خیز گروه شمع ، یکی از راههای معمول استفاده از منحنی های $p-y$ است (برای مثال Reese 1994 ، Brown 1987 ، Bogard and Matlock 1983). Reese (1994) پیشنهاد کردند که خردمندانه ترین روش برای تحلیل تغییر مکان- بار جانبی گروه شمع استفاده از منحنی های $p-y$ برای یک شمع منفرد اصلاح شده با استفاده از ضریب نرمی است تا تاثیرات اندرکنش گروه در نظر گرفته شود.

هیچ راهنمایی در آیین نامه های طراحی برای طراحی ریزشمع های مشبک وجود ندارد (نوع دوم ریزشمع). گسترش ریزشمع ها با ظرفیت بالا باعث شده است تا مفهوم ریزشمع های مشبک (Lizzi 1982) از لحاظ قیمت، اقتصادی نباشد ؛ بنابراین در ایالات متحده کمتر استفاده شود.

3-3- راهنمای ساخت و طراحی میکروپایل ها

Micropile Design and Construction Guideline : Implantation Manual

با توجه به بارهای محوری ، جانبی یا ترکیبی از این دو، طراحی ریزشمع ها شامل دو جنبه اساسی می باشد: [1]

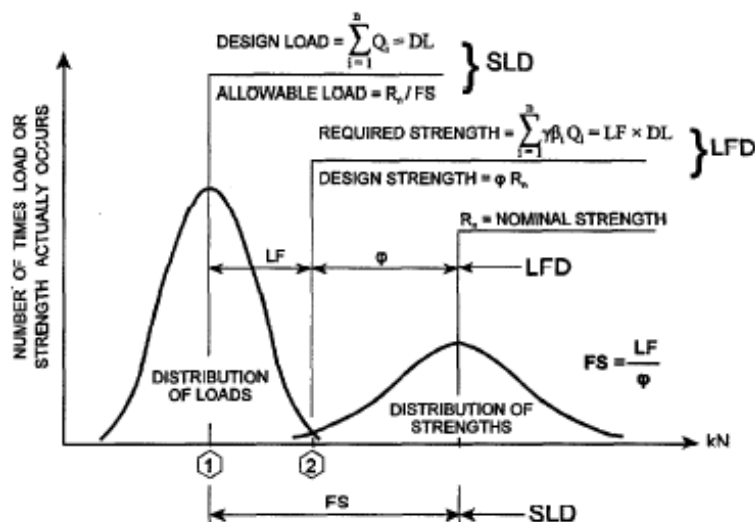
- ✓ ارزیابی ظرفیت باربری ژئوتکنیکی ریزشمع، که مستلزم تخمین های مناسب از پارامترهای بین سطحی خاک-دوغاب، و وضعیت تنش در زمین بعد از اجرای ریزشمع (تاثیر فشار تزریق) می باشد.
- ✓ عملکرد ظرفیت باربری سازه ای و سختی مقطعی از ریزشمع که عمدتاً به مساحت تقویت شده ریزشمع و مقاومت مصالح آن بخش بستگی دارد.

3-3-1- روشهای طراحی "SLD" و "LFD"

این بخش شامل روش طراحی براساس بار سرویس SLD (طراحی براساس تنش مجاز) و روش طراحی براساس ضریب بار LFD (طراحی براساس مقاومت طراحی) می باشد. در حال حاضر مهندسان از هر دو روش SLD و LFD استفاده می کنند، اما بیشتر در حال فاصله گرفتن از روش SLD و رفتن بسوی روش LFD و ویرایش های جدید آن، روش بار LRFD و طراحی ضریب مقاومت می باشند. مهندسان ژئوتکنیکی

عمدتاً از روش SLD استفاده می‌کنند، اما آنها نیز در مراحل اولیه حرکت بسمت LFD و روشهای LRFD می‌باشند.

در روش SLD، ضریب اطمینان انتخابی، براساس یک روش نسبتاً شهودی و مبتنی بر تجربه و قضاوت مهندسی است. روش SLD بارهای طراحی و مقاومت مصالح را بصورت قطع ثابت می‌گیرد. این روش مقاومت اسمی(نهایی) مصالح را تا به یک مقدار بار مجاز که نایبستی از آن تجاوز شود، کاهش می‌دهد. روش SLD متناظر با قسمت شماره 1 در شکل 3-1 می‌باشد.



شکل 3-1: شرح SLD و LFD و ارتباط بین آنها

Q_i : بار موثر ناشی از مولفه بار (بار مرده، زنده ، فشار خاک و)

ϕ : ضریب کاهش مقاومت

γ : ضریب بار گروهی(منطبق با جدول A 3.22.1 آشتو)

β_i : ضریب مولفه بار انفرادی (منطبق با جدول A 3.22.1 آشتو)

LF: ترکیب ضریب بار γ و β_i

FS: ضریب اطمینان

n: تعداد مولفه های بار

در روشهای SLD و LFD ضرایب اطمینان شامل دو مولفه می باشند. ضریب بار (LF) که بارهای طراحی را افزایش می دهد، و یک ضریب کاهش مقاومت ϕ که مقاومت اسمی مصالح را کاهش می دهد. در روشهای LFD و LRFD به همه المانهای یک سازه، احتمال گسیختگی یکسانی اختصاص داده می شود، بنابراین همه المانها به طور مساوی و یکسان کار می کنند بدون اینکه یک المان درمقایسه با سایر المانهای سازه، بیش طراحی شده یا کم طراحی شده باشد. عدم قطعیت در بارها توسط ضریب بار (LF) و عدم قطعیت در مقاومت مصالح با ضریب کاهش مقاومت (ϕ) بیان می گردد. این به ما کمک می کند تا در مورد ضرایبی که در مورد آنها اطلاعات بیشتری داریم، درجه بندی و تنظیم داشته باشیم و کیفیت بهتری به روند طراحی ببخشیم. در روش LFD لازم است که مولفه های بار، توسط ضرایب بار و ضریب گروه بندی، افزایش داده شوند. مجموع این بارهای ضریب دار (مقاومت مورد نیاز) بایستی از مقاومت طراحی که همان، مقاومت اسمی مصالح، با اعمال ضریب کاهش مقاومت ϕ است، کمتر باشد. روش LFD متناظر با موقعیت شماره 2 در شکل 3-1 می باشد.

ضریب اطمینان SLD برای مجموعه خاک-دوغاب :

ضریب اطمینان (FS) توصیه شده در این فصل برای مقادیر مجاز مجموعه خاک-دوغاب، جهت طراحی های معمول SLD برابر 2.5 می باشد.

ضرایب ϕ_G LFD برای مجموعه خاک-دوغاب :

در حال حاضر ضرایب ϕ_G برای مقاومت مجموعه خاک-دوغاب در ریزشمع ها بطور قاعده ای، آن طور که مورد نیاز تئوری احتمالات باشد، تعیین نشده است. اما تجربیات فراوانی در زمینه طراحی های SLD در ریزشمع ها و مهار زمین ها که در بسیاری از جنبه ها شبیه می باشند وجود دارد. بنابراین توصیه می شود، تعیین ضرایب ϕ_G برای مقاومت مجموعه خاک - دوغاب، با درجه بندی کردن ضریب اطمینان SLD صورت گیرد. این فرآیند یک طراحی LFD را که معادل با همان طراحی SLD برای مجموعه خاک-دوغاب خواهد بود را تامین خواهد کرد. روند ذیل نشان می دهد که چگونه ضرایب ϕ_G LFD را برای یک ضریب ایمنی SLD درجه بندی کنیم. همچنین نشان می دهد که هر گروه واحد از بارها، نیاز به یک ضریب ϕ_G متفاوت دارد.

روش SLD :

بارهای مجاز $\leq$ بارهای طراحی

$$\frac{R_n}{FS} \geq \sum_{i=1}^n Q_i \quad \text{and} \quad R_n \geq FS \times \sum_{i=1}^n Q_i$$

روش LFD :

مقاومت طراحی $\leq$ مقاومت مورد نیاز

$$\varphi_G \cdot R_n \geq \sum_{i=1}^n \gamma B_i Q_i \quad \text{and} \quad \varphi_G \geq \frac{FS \times \sum_{i=1}^n Q_i}{R_n}$$

در حالی که R_n برای SLD و LFD یکسان می باشد ، φ_G بایستی بین SLD و LFD به قرار زیر مدرج گردد.

$$\varphi_G = \frac{\sum_{i=1}^n \gamma B_i Q_i}{FS \times \sum_{i=1}^n Q_i}$$

برای گروه بار داریم که :

$$\varphi_G = \frac{\gamma(B_D Q_D + B_L Q_L + B_{CF} Q_{CF} + B_E Q_E + B_B Q_B + B_{SF} Q_{SF})}{FS \times (Q_D + Q_L + Q_{CF} + Q_E + Q_B + Q_{SF})}$$

$\gamma=1.3$ ، $B_D=1$ ، $B_L=1.67$ ، $B_{CF}=1$ ، $B_E=1.3$ برای فشار جانبی خاک ؛ $B_B=1$ ؛ $B_{SF}=1$

FS : ضریب اطمینان

Q_D : بار مرده

Q_L : بار زنده

Q_{CF} : نیروی برون مرکز

Q_E : فشار خاک

Q_B : نیروی بالابر

Q_{SF} : فشار جریان سیل

جدول 1-3 نشان می‌دهد که چگونه ϕ_G تحت ترکیبات متفاوت از بارهای مرده، زنده و فشار زمین، برای $FS=2.5$ ، تغییر می‌کند.

مقدار ϕ_G در این جدول به قرار زیر محاسبه شده است:

$$\phi_G = \frac{1.3Q_D + 2.17Q_L + 1.69Q_E}{2.5(Q_D + Q_L + Q_E)}$$

همچنین این جدول نشان می‌دهد که ضریب اطمینان $LF = \phi_G (FS)$ ترکیبی از ضرایب بار γ و β می‌باشد. این اطلاعات نشانگر آن هستند که $\phi_G = 0.6$ را می‌توان برای یک مقدار محافظه کارانه برای طراحی‌ها نوعی LFD استفاده کرد.

Q_D	Q_L	Q_E	ϕ_G	LF
1.0			0.52	1.3
0.9	0.1	0.0	0.55	1.38
	0.0	0.1	0.54	1.35
0.8	0.1	0.1	0.57	1.43
	0.2	0.0	0.59	1.48
0.7	0.1	0.2	0.59	1.48
	0.2	0.1	0.61	1.53
	0.3	0.0	0.62	1.55

0.6	0.1	0.3	0.60	1.50
	0.2	0.2	0.62	1.55
	0.3	0.1	0.64	1.60
0.5	0.1	0.4	0.62	1.55
	0.2	0.3	0.64	1.60
	0.3	0.2	0.66	1.65
	0.4	0.1	0.67	1.68
	0.5	0.0	0.69	1.73
0.4	0.1	0.5	0.63	1.58
	0.2	0.4	0.65	1.63
	0.3	0.3	0.67	1.68
	0.4	0.2	0.69	1.73
	0.5	0.1	0.71	1.78
	0.6	0.0	0.73	1.83
0.3	0.1	0.6	0.65	1.63
	0.2	0.5	0.67	1.68
	0.3	0.4	0.69	1.73
	0.4	0.3	0.71	1.78
	0.5	0.2	0.73	1.83
	0.6	0.1	0.74	1.85
	0.7	0.0	0.76	1.90
0.2	0.1	0.7	0.66	1.65
	0.2	0.6	0.68	1.70
	0.3	0.5	0.70	1.75

	0.4	0.4	0.72	1.80
	0.5	0.3	0.74	1.85
	0.6	0.2	0.76	1.90
	0.7	0.1	0.78	1.95
	0.8	0.0	0.80	2.00
0.1	0.1	0.8	0.68	1.70
	0.8	0.1	0.81	2.03

نکته: LF برای اکثر طراحی ها بین 1.3 الی 1.7 تغییر می کند .

جدول 3-1: ضرایب ϕ_G کالیبره شده LFD برای نسبت‌های متفاوت از Q_E و Q_D , Q_L

3-2- طراحی ژئوتکنیکی

ظرفیت باربری جلدی و اصطکاکی ژئوتکنیکی:

برای اهداف طراحی، به دلایل زیر فرض می شود که ریزشمع ها بارشان را از طریق اصطکاک جلدی بین خاک-دوغاب، بدون هر گونه مشارکت ظرفیت باربری نوک، به زمین انتقال می دهند:

✓ ظرفیت بالای مجموعه خاک-دوغاب که می‌تواند با اجرای متوالی مراحل ساخت ریزشمع بدست آید. این ظرفیتها می‌توانند به مقدار نهایی فراتر از 365 کیلونیوتن بر هر متر از طول پیوند در خاکهای دانه-ای متراکم و در سنگهای مستحکم از 750 کیلونیوتن بر هر متر طول پیوند، برای ریزشمع‌های با قطر معمول ناحیه پیوند (150-300 میلیمتر) برسند.

✓ مساحت موجود برای اصطکاک جلدی به طور قابل توجهی بیشتر از مساحت انتهای ریزشمع می‌باشد. برای شمعی که 200 میلیمتر قطر دارد با طولی به اندازه 6 متر، سطح موجود اصطکاک جلدی، 120 برابر بیشتر از سطح مقطع انتهای شمع می باشد.

✓ حرکت مورد نیاز شمع جهت بسیج شدن مقاومت اصطکاکی به طور قابل ملاحظه‌ای کمتر از مقدار مشابه لازم برای بسیج شدن مقاومت انتهای شمع می باشد.

وابستگی به اصطکاک جلدی منجر به ایجاد شمعی می‌شود که به لحاظ ژئوتکنیکی در کشش و فشار یکسان در نظر گرفته شده. این یک فرض طراحی رایج جهت تعیین طول پیوند در یک شمع فشاری - کششی می‌باشد.

معمولاً مقادیر در نظر گرفته شده جهت تعیین مجموعه خاک - دوغاب، چه از روی مشاهده و تجربه و چه از روی آزمایش‌های بارگذاری، مقدار میانگین تمام طول مرز دست نخورده می‌باشد. زمانی که نشست‌های مورد انتظار شمع را محاسبه می‌کنیم این مورد بیشتر مورد توجه قرار می‌گیرد. در حالی که استفاده از ریزشمع‌ها به سرعت رشد می‌کند، وضعیت رایج در نحوه طراحی ژئوتکنیکی اساساً مبتنی بر تجربیات و تحقیقات در میل چاههای حفر شده، میخکوبی خاک (soil nail)، و مهارهای Tieback است.

مقادیر α bond nominal strength در مجموعه خاک - دوغاب :

جدول 2-3 راهنمایی‌هایی جهت ارزیابی مقادیر واحد مربوط به مقاومت اسمی (نهایی) مجموعه خاک-دوغاب تدارک می‌بیند. این جدول شامل دامنه مقادیر، برای 4 روش تزریق شمع‌ها (نوع A، نوع B، نوع C و نوع D) تحت شرایط مختلف زمین می‌باشد. مقادیر مقاومت اسمی خاک-دوغاب، عموماً مبتنی بر تجارب پیمانکاران محلی یا مهندسان ژئوتکنیکی می‌باشد.

محدوده مقاومت اسمی مجموعه خاک-دوغاب (کیلوپاسکال)				تشریح سنگ / خاک
نوع D	نوع C	نوع B	نوع A	
50 – 145	50 – 120	35 – 95	35 – 70	سیلت و رس (مقداری ماسه) (نرم، حد پلاستیک متوسط)
95 – 190	95 – 190	70 – 190	50 – 120	سیلت و رس (مقداری ماسه) (سفت، متراکم تا خیلی متراکم)

95 – 240	95 – 190	70 – 190	70 – 145	ماسه (مقداری سیلت) (نرم، سست - متراکم متوسط)
145 – 385	145 – 360	120 – 360	95 – 215	ماسه (مقداری سیلت و شن) (نرم - تیز گوشه، متوسط - خیلی متراکم)
145 – 385	145 – 360	120 – 360	95 – 265	شن (مقداری ماسه) (متوسط - خیلی متراکم)
120 – 335	120 – 310	95 – 310	95 – 190	تیل‌های یخچالی (سیلت، ماسه، شن) (متوسط - خیلی متراکم، سیمانته)
موجود نیست	موجود نیست	موجود نیست	205 – 550	شیل‌های نرم (ترک خوردگی کم - متوسط، کمی هوازده)
موجود نیست	موجود نیست	موجود نیست	515 – 1380	شیل‌های سخت و تخته سنگ (ترک خوردگی کم - متوسط، کمی هوازده)
موجود نیست	موجود نیست	موجود نیست	1035 – 2070	سنگ آهک (ترک خوردگی کم - متوسط، کمی هوازده)
موجود نیست	موجود نیست	موجود نیست	520 – 1725	ماسه سنگ (ترک خوردگی کم - متوسط، کمی هوازده)
موجود نیست	موجود نیست	موجود نیست	1380 – 4200	گرانیت و بازالت (ترک خوردگی کم - متوسط، کمی هوازده)

جدول 2-3: مقادیر " α " (مقاومت اسمی مجموعه خاک-دوغاب) برای طراحی اولیه میکروپایل

نوع A - فقط تزریق وزنی

نوع B – تزریق فشاری از میان غلاف در حین بیرون کشیدن غلاف

نوع C – تزریق اولیه تحت وزن سر بار ، سپس یک تزریق تک مرحله ای دوغاب ثانویه تحت فشار

نوع D – تزریق اولیه تحت وزن سر بار، سپس تزریق یک یا چند مرحله ای دوغاب ثانویه تحت فشار

همان طور که اشاره شد این مقادیر را می توان جهت استفاده در تخمین و ارزیابی مقادیر طراحی فشاری و کششی محوری ژئوتکنیکی شمع، برای روشهای SLD و LFD بکار برد.

★ بارهای محوری کششی و فشاری مجاز برای طول پیوند ژئوتکنیکی – SLD :

$$P_{G-allowable} = \frac{\alpha_{bond nominal strength}}{FS} \times 3.14 \times DIA_{bond} \times (bond length)$$

از $FS=2.5$ برای گروه بارهای غیر لرزه ای (در خاک یا سنگ) استفاده می گردد.

★ مقاومت محوری کششی و فشاری طراحی برای طول پیوند ژئوتکنیکی – LFD :

$$P_{G-design strength} = \phi_G \times \alpha_{bond nominal strength} \times 3.14 \times DIA_{bond} \times (bond length)$$

از $\phi_G=0.6$ برای طراحی های معمول در مورد گروه بارهای غیر لرزه ای مدرج شده نسبت به SLD استفاده می گردد.

از $\phi_G=1.0$ برای گروه بارهای لرزه ای استفاده می شود.

★ ظرفیت باربری ژئوتکنیکی نوک :

ظرفیت باربری نوک ریزشمع های با بارگذاری متوسط، برای سنگها طراحی می گردند. طراحی ممکن است شبیه به باربری نوک میل چاههای حفر شده یا شمعهای جایگذاری شده و جابجایی، و یا ممکن است مبتنی بر تجربیات آزمایش های بارگذاری پیشین در ریزشمع های مشابه باشد.

3-3-3- تاثیر گروه بر ریزشمع های با بارگذاری محوری

طراحی سیستم های نگهدارنده فونداسیون با ریزشمع های ترکیبی، ممکن است نیازمند اجرای گروه هایی از شمع های کنار هم، و با فاصله نزدیک به هم باشد. با سیستم های متعارف شمع ها، بسته به نوع شمع، روش اجرا و

نصب، و شرایط خاک، ظرفیت برابری گروه شمع می‌تواند به طور قابل توجهی کمتر از ظرفیت شمع منفرد باشد و تحت میزان متوسط بار یکسان برای هر شمع در گروه، نشستهای گروه شمع بزرگتر از نشست شمع منفرد باشد.

این تاثیر برای انواع شمعها، همچون شمعهای جایگذاری شده و جابجایی که به داخل خاک رانده می‌شوند، بسیار با اهمیت‌تر است. تاثیر گروه برای انواع شمعها همچون شمع‌های اصطکاکی جابجایی یا ریزشمع‌های تزریق شده تحت فشار، از اهمیت بسیار کمتری برخوردار است، حتی می‌توان گفت، به دلیل افزایش در تنش موثر خاک، ناشی از جابجایی خاک بواسطه رانده شدن شمع، یا تراکم خاک ناشی از تزریق فشاری، سودمند نیز می‌باشد.

آزمایش‌های تمام مقیاس تحت عنوان، "تاثیر گروه" (ASCE 1987 ; Lizzi, 1982) مشخص کرد که در بارگذاری سیستم خاک-شمع، تاثیر گروه، مثبت بدست می‌آید. این تاثیر در خاکهای دانه ای نسبت به خاکهای چسبنده، برجسته‌تر است.

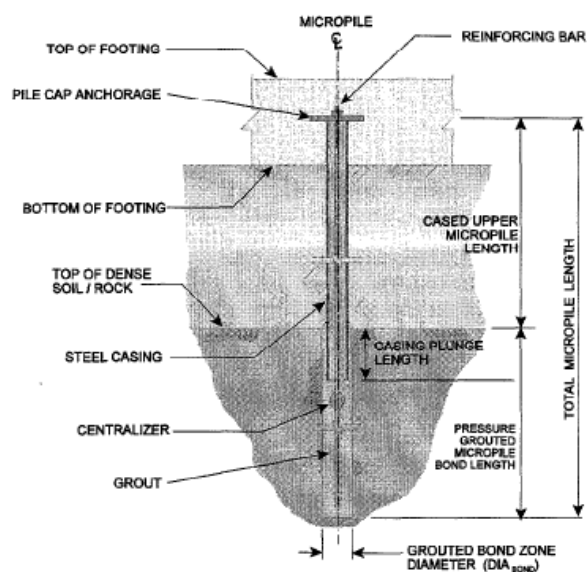
برای شمعهای کوبیده شده و رانده شده (با ارتعاش یا نیرو)، آشتو توصیه می‌کند که در ظرفیت باربری شمع‌های انفرادی برای گروه شمع، به استثنای شمع‌های اصطکاکی در خاکهای چسبنده، که یک ضریب تاثیر 0.7 برای شمعهای با فاصله مرکز به مرکز، کمتر از 3 برابر قطر شمع اعمال می‌گردد، کاهشی لحاظ نگردد. برای ریزشمع‌های تزریق شده تحت فشار (نوع B, C, D) با یک قطر معمول 200 میلیمتر و فاصله مرکز به مرکز در محدوده 0.75 تا 1 متر، تحت این معیارها، لازم نیست که ضریب کاهش گروه در نظر گرفته شود.

برای ریزشمع تزریق شده تحت نیروی ثقل (نوع A)، نوع خاک و روش تزریق، جهت تاثیر گذاری بر تنش موثر خاک اطراف شمع، و تاثیر گذاری بر گروه شمعها، بایستی مورد بررسی قرار گیرد. ممکن است، در جایی که با گروه شمع به عنوان یک شمع واحد برخورد می‌کنیم و به ازای اینکه محیط و سطح مقطع گروه شمعها، ابعاد شمع را برآورده کنند، روشی مشابه با شمعهای حفاری شده کاربردی باشد.

3-3-4 طراحی سازه ای ریزشمع ها

در این بخش، طراحی بخشهای مختلف ریزشمع ها با سیستم تقویتی ترکیبی، مورد بررسی قرار می‌گیرد و هر دو روش SLD و LFD ارائه می‌شود.

طراحی ریزشمعهای بررسی شده در این بخش، در شکل 2-3 نشان داده شده است و شامل یک طول تقویت شده فوقانی با غلاف فولادی دائمی و با یک میلگرد تقویتی مرکزی و یک طول پیوند تزریقی تحت فشار کم، که با میلگرد مرکزی تقویت شده است، می باشد.



شکل 2-3: جزئیات یک ریزشمع با سیستم تقویتی مرکب

علائم و نمادها:

C_c : ضریب لاغری ستون (SLD and LFD)

DL: بار طراحی (SLD)

E_{steel} : مدول الاستیسیته فولاد (SLD and LFD)

FS: ضریب اطمینان (SLD)

F_a : تنش محوری مجاز واحد (SLD)

F_a : تنش محوری اسمی (نهایی) فولاد (LFD)

$f'_{c-grout}$: مقاومت فشاری دوغاب (SLD and LFD)

F_y : نقطه گسیختگی حداقل فولاد (SLD and LFD)

K : ضریب طول موثر (SLD and LFD)

L : طول مهارنشده (آزاد) واقعی (SLD and LFD)

$P_{c-allowable}$: بار محوری فشاری مجاز سازه ای (SLD)

$P_{t-allowable}$: بار محوری کششی مجاز سازه ای (SLD)

$P_{c-nominal}$: مقاومت فشاری اسمی سازه ای (LFD)

$P_{t-nominal}$: مقاومت کششی اسمی سازه ای (LFD)

$P_{c-design}$: مقاومت فشاری طراحی سازه ای (LFD)

$P_{t-design}$: مقاومت کششی طراحی سازه ای (LFD)

r : شعاع چرخش (شعاع ژیراسیون) (SLD and LFD)

ϕ : ضریب کاهش مقاومت (LFD) ،

α bond nominal strength : مقاومت ژئوتکنیک واحد مجموعه خاک -دوغاب (SLD and LFD)

$P_{G-allowable}$: بار محوری مجاز طول پیوند ژئوتکنیکی (SLD)

$P_{G-design strength}$: مقاومت محوری طراحی طول پیوند ژئوتکنیکی (LFD)

$P_{transfer allowable}$: بار انتقالی مجاز طول غلاف شده پیوند (SLD)

$P_{transfer design}$: مقاومت طراحی طول غلاف شده پیوند (LFD)

3-3-4-1- ظرفیت باربری سازه ای طول غلاف شده ریزشمع

بارهای مجاز (SLD) و مقاومت طراحی مجاز (LFD) کششی و فشاری برای بخشهای فوقانی غلاف شده شمع، با معادلات ذکر شده در همین بخش می تواند تعیین گردد. از آنجایی که ممکن است بخشهای فوقانی شمع در یک خاک ضعیف فوقانی قرار داشته باشند، توجه به یک طول مهار نشده جانبی ممکن است جزئی از روند تعیین ظرفیت فشاری باشد.

بیشتر شمعهایی که با خاک احاطه می شوند، بجز در مورد شمع هایی که تا بالاتر از زمین ادامه می یابند، شمعهایی که در معرض شستگی قرار دارند، شمعهای اجرا شده در غارها و معدنها و شمعهای اجر شده در خاکهای محتمل برای روانگرایی، طول مهارنشده موثر ندارند و بنابراین کاهشی هم در کمانش ندارند، فرمول بار مجاز برای شمعهایی با طول مهار نشده در ادامه ارائه گردیده است. [1]

★ طول غلاف شده شمع (طراحی بار سرویس) :

برای سازگاری کرنش بین غلاف و میلگرد، از فولادهایی با مشخصات تنش گسیختگی زیر استفاده می گردد :

$$F_{y\text{-steel}} = \text{the minimum of } F_{y\text{-bar}} \text{ \& } F_{y\text{-casing}}$$

بار مجاز کششی :

$$P_{t\text{-allowable}} = 0.55F_{y\text{-steel}} \times (\text{Area}_{\text{bar}} + \text{Area}_{\text{casing}})$$

بار مجاز فشاری :

$$F_a = \frac{F_{y\text{-steel}}}{FS}, \quad FS=2.12$$

بار مجاز :

$$P_{c\text{-allowable}} = 0.40f'_{c\text{-grout}} \times \text{Area}_{\text{grout}} + 0.47F_{y\text{-steel}} \times (\text{Area}_{\text{bar}} + \text{Area}_{\text{casing}})$$

(مقدار 0.40 بر طبق بخش 8.15.2.1.1 آستو؛ و 0.47 نیز بر طبق آستو می باشند ، برای مثال $1/2.12=0.47$)

★ طول غلاف شده شمع (طراحی ضریب بار) :

برای ملاحظات سازگای کرنش بین غلاف و میلگرد، از فولاد با تنش گسیختگی ذیل استفاده کنید :

$$F_{y\text{-steel}} = \text{the minimum of } F_{y\text{-bar}} \text{ \& } F_{y\text{-casing}}$$

مقاومت کششی طراحی :

$$P_{t-nominal} = F_{y-steel} \times [Area_{bar} + Area_{casing}]$$

use $\phi_t = 0.90$ and with $P_{t-design} = \phi_t \times P_{t-nominal}$

$$P_{t-design} = 0.90 \times F_{y-steel} \times [Area_{bar} + Area_{casing}]$$

مقاومت فشاری طراحی :

$$P_{c-nominal} = 0.85f'_{c-grout} \times Area_{grout} + F_{y-steel} \times [Area_{bar} + Area_{casing}]$$

Use $\phi_c = 0.85$ and with $P_{c-design} = \phi_c \times P_{c-nominal}$

$$P_{c-design} = 0.85 \times 0.85f'_{c-grout} \times Area_{grout} + F_{y-steel} \times [Area_{bar} + Area_{casing}]$$

3-3-2- ظرفیت باربری سازه ای طول غلاف نشده شمع

از آنجایی که بخشهای تحتانی مهار نشده غلاف، نوعاً ضعیف ترین بخش سازه ای می باشد، یک حد مجاز، برای ظرفیت باربری ژئوتکنیکی دوغاب-خاک در امتداد بخش فوقانی غلاف شده طول پیوند (طول غوطه وری) در نظر گرفته می شود. این ظرفیت ($P_{transfer\ allowable\ for\ SLD}$ and $P_{transfer\ desing\ for\ LFD}$) ، به ظرفیت باربری سازه ای شمع غلاف نشده جهت تحمل بار طراحی (SLD) یا مقاومت مورد نیاز (LFD) اضافه می شوند. روش دیگر برای نمایش $P_{transfer}$ این است که، می توان از ظرفیت باربری مجموعه خاک-دوغاب توسعه یافته در امتداد طول غوطه وری، برای کاهش بار شمع در طراحی طول غلاف نشده شمع استفاده نمود. در فرآیند طراحی، مقدار $P_{transfer}$ نوعاً تخمین زده می شود و سپس بررسی و تایید می گردد. ممکن است در شمع های متکی بر نوک، از $P_{transfer}$ به طور محافظه کارانه ای صرف نظر گردد و این مبتنی بر $\alpha_{bond\ nominal}$ strength در طول ناحیه غوطه وری (طول غلافی که در داخل طول پیوند غوطه ور می شود) می باشد.

★ طول غلاف نشده شمع (طراحی بار سرویس) :

بار مجاز طول پیوند غلاف شده (طول غوطه وری) = $P_{transfer\ allowable}$

$$P_{transfer\ allowable} = \left[\frac{\alpha_{bond\ nominal\ strength}}{FS} \right] \times 3.14 \times DIA_{bond} \times (plunge\ length)$$

معمولاً طول غوطه وری ابتدا فرض شده و سپس صحت آن بررسی و تایید می گردد.

بار مجاز کششی :

$$P_{t\text{-allowable}} = 0.55 F_{y\text{-bar}} \text{Area}_{\text{bar}} + P_{\text{transfer allowable}}$$

بار مجاز فشاری :

$$P_{c\text{-allowable}} = 0.40 f'_{c\text{-grout}} \text{Area}_{\text{grout}} + 0.47 F_{y\text{-bar}} \text{Area}_{\text{bar}} + P_{\text{transfer allowable}}$$

(نکته : $1/2.12=0.47$).

★ طول غلاف نشده شمع (طراحی ضریب بار) :

مقاومت طراحی طول پیوند غلاف شده (طول غوطه وری) = $P_{\text{transfer design}}$

$$P_{\text{transfer design}} = \phi_G \cdot (\alpha_{\text{bond nominal strength}}) * 3.14 * \text{DIA}_{\text{bond}} * (\text{plunge length})$$

طول غوطه وری معمولاً فرض شده و سپس صحت آن بررسی و تایید می گردد. در معادله بالا، از $\phi_G=0.6$ ، در مورد گروه بارهای غیر لرزه‌ای، و از $\phi_G=1.0$ برای گروه بارهای لرزه ای در طراحی‌های معمول استفاده می گردد.

مقاومت کششی طراحی :

$$P_{t\text{-design}} = [0.90 * F_{y\text{-bar}} * \text{Area}_{\text{bar}}] + P_{\text{transfer design}}$$

(نکته : مقدار 0.90 بر طبق D1-1 , AISC LFRD انتخاب شده است).

مقاومت فشاری طراحی :

$$P_{c\text{-design}} = 0.75 * [0.85 f'_{c\text{-grout}} \text{Area}_{\text{grout}} + F_{y\text{-bar}} \cdot \text{Area}_{\text{bar}}] + P_{\text{transfer design}}$$

3-3-4-3- ظرفیت باربری مجموعه دوغاب – فولاد

پیوند بین دوغاب سیمان و فولاد تقویتی، امکان عملکرد ترکیبی در شمع، و مکانیزم انتقال بار شمع از فولاد تقویتی به زمین را فراهم می سازد. مقادیر نهایی ظرفیت پیوندی معمولاً، بین 1.0 الی 1.75 مگاپاسکال برای میلگردهای صاف و صیقلی، تا 2.0 الی 3.5 مگا پاسکال، برای میلگردهای آجدار و تغییرشکل یافته متغیر است (ACI 318).

در اکثر حالات، مجموعه دوغاب-فولاد، در طراحی شمع تعیین کننده نیست. بلکه ظرفیت باربری ژئوتکنیکی یا سازه ای شمع است که تعیین کننده می باشد.

اگر موردی با هر نوع سیستم تقویتی (آرماتور و غلاف و ...) وجود داشته باشد، شرایط سطح سیستم تقویتی، می تواند تاثیرگذار باشند. یک لایه نازک از زنگار می تواند سودمند باشد، اما حضور خارو خاشاک و آشغال و مواد روغنی و گریس یا رنگها مطلوب نمی باشند.

3-3-4- ظرفیت باربری جانبی

رفتار یک ریزشمع تحت بار جانبی، بستگی به خصوصیات ریزشمع مانند: قطر، عمق، سختی خمشی، شرایط گیرداری شمع در پی، و نیز بستگی به خصوصیات خاک احاطه کننده آن دارد. تاثیرات خاک احاطه کننده، از زمان اجرای شمع بایستی در نظر گرفته شود. این تاثیرات می توانند شامل، سست شدگی و شل شدن خاک در اثر حفاری و متراکم شدن خاک در اثر تزریق دوغاب باشد.

روشهای موجود جهت افزایش ظرفیت باربری جانبی ریزشمع ها، شامل موارد زیر می باشند:

- ★ اجرای شمع بصورت زاویه شیب دار و مورب
- ★ نصب یک غلاف با قسمت فوقانی بزرگتر، که قطر موثر شمع، پشتیبانی جانبی تامین شده توسط خاک، و مقاومت خمشی شمع را افزایش می دهد.

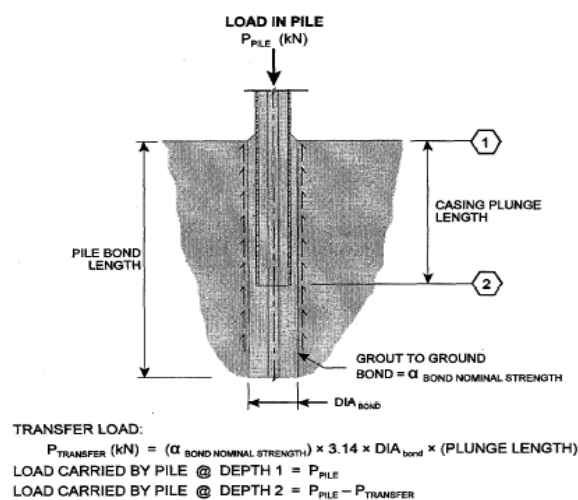
بایستی جهت ترکیب تنش ها در ریز شمع ها، به دلیل خمش القا شده توسط جابجایی جانبی و بار محوری، ملاحظات خاصی در نظر گرفته شود. و بایستی توانایی مقطع ریزشمع، جهت تحمل تنش های ترکیبی، بویژه در محل های اتصال غلاف، کنترل گردد.

سختی و ظرفیت جانبی یک ریزشمع، به دلیل قطر کوچک آن، محدود می باشد.

3-3-5- طراحی طول غوطه وری

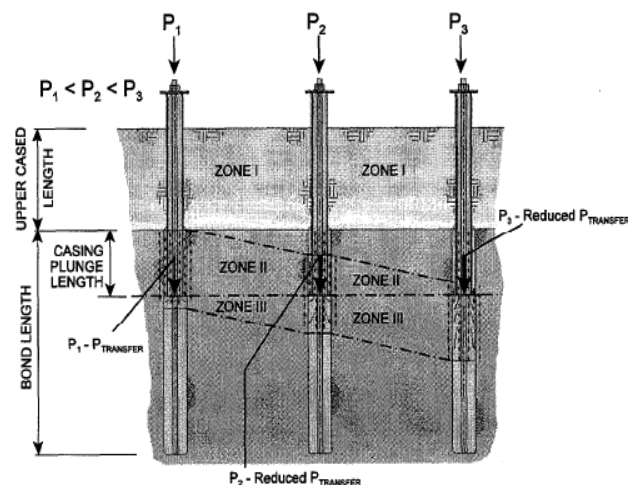
همان طور که اشاره شد، یک روش معمول جهت ساخت یک ریزشمع با سیستم تقویتی ترکیبی، بدین صورت است که، غلاف را تا بخش فوقانی طول پیوند تزریق شده، وارد می کنیم. این جزء، انتقال بین بخش فوقانی غلاف شده و بخش غلاف نشده از طول پیوند را اصلاح و تطبیق می کند. همچنین با انتقال بخشی از بار شمع به زمین، منجر به کاهش باری می شود که شمع بایستی در بخش غلاف نشده تحمل کند، که معمولاً ضعیف ترین بخش سازه ای شمع نیز می باشد.

این بار انتقالی ($P_{transfer}$) که در طول غوطه ور غلاف رخ می دهد، می تواند در محاسبات سازه ای شمع، بحساب آید. مقدار این بار که براساس نیروی یکنواخت عمل کننده واحد دوغاب با زمین است، در طول غوطه ور غلاف عمل می کند (شکل 3-3).



شکل 3-3: جزئیات انتقال بار از طریق طول غوطه ور غلاف

همچنین بایستی ملاحظات جهت کاهش در بار انتقالی، بدلیل توزیع مجموعه بین غلاف و زمین، و بین دوغاب و زمین در نظر گرفته شود. همانطور که در شکل 3-4، نشان داده شده است، زمانی که شمع تحت بارهای بزرگتر قرار می گیرد، به طور موثری طول غوطه وری و بار انتقالی کاهش می یابد. این کاهش، بواسطه آزمایشهای بارگذاری در محل برای شمعهای با بارگذاری بالا، تایید شده است. [1]



ZONE I - CASING TOTALLY DEBONDED FROM SURROUNDING GROUND
 ZONE II - CASING TRANSFERRING LOAD TO SURROUNDING GROUND ((1))
 ZONE III - CASING TRANSFERRING LOAD TO GROUT THROUGH END BEARING ((1))

شکل 3-4: تغییر در بار انتقالی از طریق طول غوطه ور غلاف در حین افزایش بار (Bruce and Gemme, 1992)

3-3-6- پایداری جانبی (کمانش)

مدلهای ریاضیاتی و آزمایشهای بارگذاری آزمایشگاهی، جهت بررسی کمانش ریزشمع ها، بکار برده شده اند. Bjerrum (1957), Mascardi (1970, 1982), and Gouvenot (1975) به این نتیجه رسیدند که، کمانش ریزشمع ها، فقط در خاکهایی با مشخصه های مکانیکی بسیار ضعیف، مانند خاک سیلت سست و رسهای نرم تحکیم نیافته (خاکهایی که مدول الاستیسیته ای کمتر از 0.5 مگاپاسکال دارند) مطرح می باشد. برنامه های آزمایش بارگذاری، یک کنترل محافظه کارانه از گرایش کمانشی ریزشمع تامین خواهد کرد. شمع بهره برداری معمولاً تحت شرایط سر گیردار با سر شمع جاسازی شده در یک پی بتنی، اجرا خواهد شد. در حالی که، آزمایش بارگذاری معمولاً تحت شرایط سر آزاد، با سر شمع تقریباً 0.5 متر بالاتر از زمین، صورت می گیرد. ملاحظه و توجه به طول مهار نشده شمع در طی مراحل طراحی، می تواند از طریق گنجاندن مقادیری برای ضریب طول موثر K و طول مهار نشده L شمع، در تعیین فشار نهایی (اسمی) یا مجاز طول فوقانی شمع، مد نظر قرار گیرد. همانطور که در بالا اشاره شد، در اغلب طراحی های شمع که شمع در خاک مدفون بوده و خاک شمع را احاطه می کند، مقدار $KL=0$ خواهد بود و بنابراین کاهش در کمانش نخواهند داشت. اما شمعهایی که در بالای سطح زمین ادامه داده شده اند و یا شمعهایی که تحت آب شستگی قرار دارند، بایستی برای کاهش کمانش، کنترل شوند.

برای شمعهای با طول مهار نشده، معادلات زیر بکار برده می شود: [1]

روش طراحی بار سرویس (SLD):

$$C_c = \left[\frac{2\pi^2 E_{\text{steel}}}{F_{y\text{-steel}}} \right]^{0.5}$$

$$\text{if: } \frac{KL}{r} = 0 \quad F_a = \frac{F_{y\text{-steel}}}{FS} \quad , \quad FS=2.12$$

$$\text{if: } 0 < \frac{KL}{r} \leq C_c \quad F_a = \frac{F_{y\text{-steel}}}{FS} \times \left[1 - \frac{(KL/r)^2 \cdot F_{y\text{-steel}}}{4\pi^2 \cdot E_{\text{steel}}} \right]$$

$$\text{if: } \frac{KL}{r} > C_c \quad F_a = \frac{\pi^2 \cdot E_{\text{steel}}}{FS \cdot [KL/r]^2}$$

بار مجاز :

$$P_{c\text{-allowable}} = \left[0.40f'_{c\text{-grout}} \cdot \text{Area}_{\text{grout}} + \frac{F_{y\text{-steel}}}{FS} (\text{Area}_{\text{bar}} + \text{Area}_{\text{casing}}) \right] \times \frac{F_a}{\frac{F_{y\text{-steel}}}{FS}}$$

روش طراحی بار سرویس ضریب دار (LFD) :

$F_{y\text{-steel}}$ = the minimum of $F_{y\text{-bar}}$ and $F_{y\text{-casing}}$

$$C_c = \left[\frac{2\pi^2 E_{\text{steel}}}{F_{y\text{-steel}}} \right]^{0.5}$$

$$\text{if: } \frac{KL}{r} = 0 \quad F_a = F_{y\text{-steel}}$$

$$\text{if: } 0 < \frac{KL}{r} \leq C_c \quad F_a = F_{y\text{-steel}} \times \left[1 - \frac{(KL/r)^2 \cdot F_{y\text{-steel}}}{4\pi^2 \cdot E_{\text{steel}}} \right]$$

$$\text{if: } \frac{KL}{r} > C_c \quad F_a = \frac{\pi^2 \cdot E_{\text{steel}}}{[KL/r]^2}$$

مقاومت طراحی :

$$P_{c-allowable} = \left[0.85f'_{c-grout} \cdot Area_{grout} + F_{y-steel} \times (Area_{bar} + Area_{casing}) \right] \times \frac{Fa}{F_{y-steel}}$$

$$\text{use } \phi_c = 0.85 \quad \text{and with} \quad P_{c-design} = \phi_c \times P_{c-nominal}$$

$$P_{c-design} = 0.85 \times \left[0.85f'_{c-grout} \cdot Area_{grout} + F_{y-steel} \times (Area_{bar} + Area_{casing}) \right] \times \frac{Fa}{F_{y-steel}}$$

3-3-7- سازگاری کرنش بین اجزاء و مولفه‌های سازه‌ای

سازگاری کرنشی بین اجزاء سازه‌ای یک ریزشمع، در طراحی سازه‌ای شمع با سیستم تقویت مرکب، بویژه زمانی که استفاده از تقویت کننده‌های با مقاومت بالا در میان باشد، بایستی در نظر گرفته شود. آرماتورهای تقویتی با تنش‌های گسیختگی بیشتر از 828 مگاپاسکال موجود می‌باشند (مقاومت نهایی 1035 مگاپاسکال). با رسیدن به 85٪ تنش گسیختگی میلگرد تحت فشار در مقاومت نهایی شمع (طراحی ضریب بار)، ممکن است کرنشها از کرنشی که دוגاب می‌تواند بدون ترک خوردگی و شکست تحمل کند فراتر رود. محدود سازی مقادیر تنش گسیختگی استفاده شده در طراحی، ممکن است جهت جلوگیری از گسیختگی دوجاب لازم باشد. بخش 8.16.2.3 آستو، حداکثر کرنش فشاری بتن مصرفی را به 0.003 محدود می‌سازد، که سازگار با حداکثر تنش فولاد به میزان 600 مگاپاسکال می‌باشد.

سازگاری کرنشی بین دوجاب و غلاف تقویتی، معمولاً بدلیل مقاومت گسیختگی پایین غلاف فولادی (معمولاً حداکثر 551 مگاپاسکال) درجه اهمیت کمتری دارد، و وضعیت محصور شده دوجاب در داخل غلاف، این امکان را فراهم می‌سازد تا، دوجاب مقادیر بالای کرنش را بدون ترک خوردگی تحمل کند.

همچنین لازم است سازگاری کرنشی بین میلگرد با مقاومت بالا و غلاف، مورد نظارت و بررسی قرار گیرد. معمولاً مساحت بخش غلاف بزرگتر از مساحت میلگرد با مقاومت بالا می‌باشد و این منجر به توزیع یک بخش عمده از بار شمع به غلاف می‌شود. با رسیدن به 85٪ تنش گسیختگی میلگرد در مقاومت نهایی شمع (طراحی ضریب بار)، ممکن است در نتیجه گسیختگی غلاف، کرنش‌هایی رخ دهد که می‌تواند تمامیت اتصالات آجدار غلاف را کاهش دهد.

به طور خلاصه، سازگاری کرنشی دلالت بر استفاده از غلاف و میلگردهای تقویتی با تنش گسیختگی پایین، در محاسبات دارد، و تحت شرایط تنش فشاری، جهت سازگاری کرنشی دوجاب برای بخش غلاف شده شمع، این

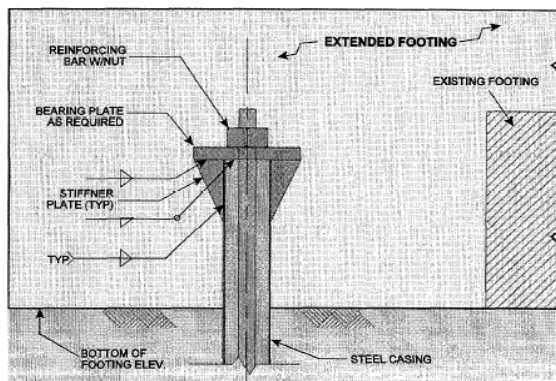
مقادیر نبایستی از 600 مگاپاسکال فراتر رود. برای بخش بدون غلاف شمع، تنش گسیختگی میلگردهای تقویتی استفاده شده در محاسبات تحت فشار، نبایستی از 600 مگاپاسکال تجاوز نماید.

3-4- انواع اتصال ریزشمع به پی

جز در مواردی که از یک ریزشمع منفرد استفاده شده باشد، کلاهک (پی) شمع، جهت پخش بارهای سازه ای و هر گونه لنگر واژگونی به تمام ریزشمع های گروهی، مورد نیاز می باشد.

اتصال بین سر ریزشمع و پی (کلاهک) بتن مسلح، می تواند بسته به ظرفیت باربری مورد نیاز در اتصال، نوع سیستم تقویتی شمع و جزئیات کلاهک شمع تغییر کند. هفت مثال از اتصال شمع به پی (کلاهک) در شکل 3-5 الی 3-11 نشان داده شده است. شکل های 3-5 الی 3-8 اتصالات نوعی را برای شمع هایی که می توانند بسته به مورد بار، دارای بارهای کششی و فشاری باشند نشان می دهند. شکل 3-9 الی 3-11 اتصالات ساده ای را برای شمع هایی که تنها تحت فشار می باشند، نشان می دهند.

شکل 3-5، اتصال یک شمع با سیستم تقویت مرکب، به یک پی جدید را نشان می دهد. بار کششی و فشاری پی، از طریق صفحه فلزی به شمع انتقال می یابد. صفحات سخت کننده، مقاومت خمشی را برای صفحه اصلی تامین می کنند، همچنین طولی اضافی برای جوش، جهت انتقال بار از صفحه اتکایی به غلاف شمع را تامین می کنند. اگر تکیه گاه صفحه فوقانی و طول مضاعف جوش مورد نیاز نباشد، صفحات سخت کننده می توانند حذف گردند.

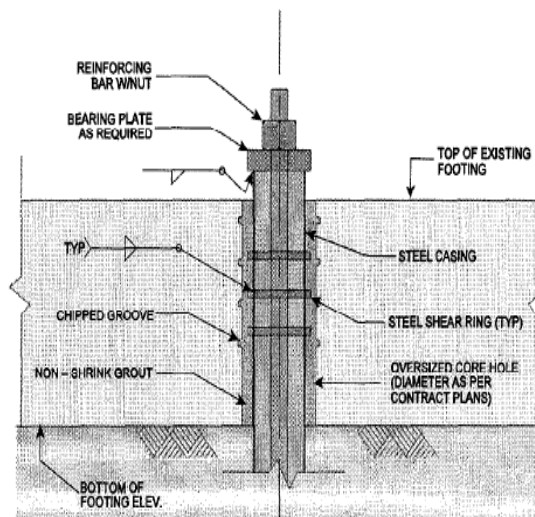


شکل 3-5: جزئیات اتصال شمع به پی (کلاهک)

شکل 3-6، اتصال یک شمع با سیستم تقویتی مرکب، به یک پی موجود را نشان می‌دهد. شمع با حفر یک گمانه بزرگتر از اندازه از میان دال یا پی موجود، اجرا و نصب می‌شود. پس از اجرای شمع، گمانه مرکزی پاکسازی شده و با دوغاب سیمان غیر انقباضی پر می‌شود. قبل از اجرا و نصب شمع، حلقه های فلزی، به بخش فوقانی غلاف جوش می‌شوند. این حلقه ها بار شمع را از غلاف به دوغاب غیر انقباضی انتقال می‌دهند. فاصله کافی بین حلقه ها، جهت اجتناب از تداخل تنش های تحمل شده در بتن و دوغاب، بایستی اعمال گردد.

ظرفیت باربری نهایی اتصال، به روش زیر کنترل می‌شود:

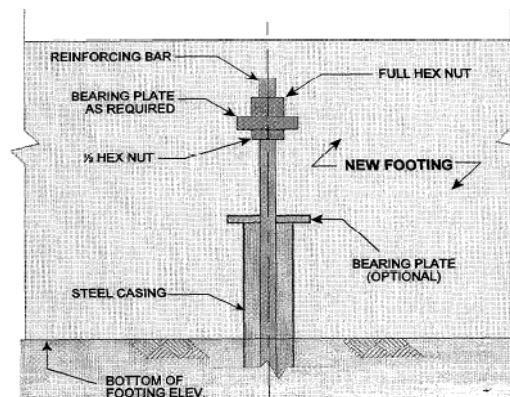
- ★ مجموع مقاومت باربری حلقه ها
- ★ ظرفیت انتقال بار، بین سطوح دوغاب غیر انقباضی و بتن موجود
- ★ ظرفیت برشی بتن موجود



شکل 3-6: جزئیات اتصال شمع به پی (کلاhek)

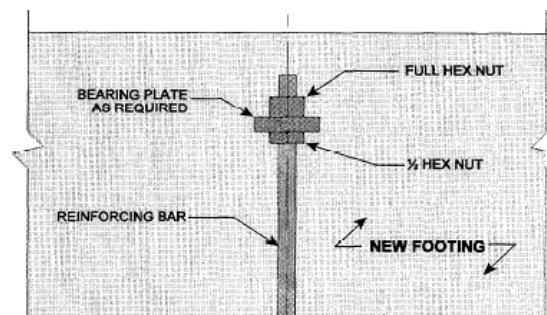
ممکن است جهت افزایش ظرفیت انتقال بار از دوغاب به بتن موجود، شیارهایی (Grooves) (ابعاد معمول = 20 میلیمتر عمق * 32 میلیمتر عرض) در داخل بدنه گمانه تراشیده شوند. همچنین، می توان جهت افزایش ظرفیت برش پانچ، حفاری هایی انجام داد و میلگردهای تقویتی قائم اندود شده با اپوکسی (epoxied) را در داخل بتن موجود و در اطراف سطح خارجی اتصال قرار داد. برای پی های موجود ضخیم، می توان حلقه های برشی و شیارها Grooves نشان داده شده در شکل 3-29 را حذف نمود.

شکل 3-7، یک شمع با سیستم تقویتی مرکبی را که به یک پی جدید الاحداث اتصال داده شده است، نشان می دهد. بار فشاری پی، از طریق تکیه گاه موجود بر روی بالای شمع و صفحه میلگردهای تقویتی، و بار کششی از طریق تکیه گاه موجود بر روی صفحه میلگردهای تقویتی، به شمع انتقال می یابند. بخشی از بار انتقال یافته از پی به شمع، ممکن است به پیوند بین غلاف شمع و بتن پی نسبت داده شود.



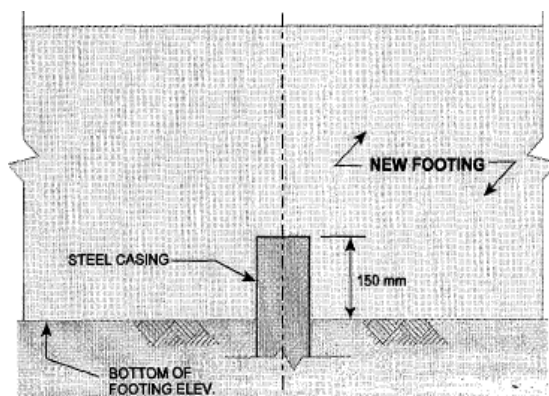
شکل 3-7: جزئیات اتصال شمع به پی (کلاhek)

شکل 3-8، یک شمع با میلگرد تقویتی اجرا شده در یک پی جدید را نشان می دهد. بارهای کششی و فشاری پی، از طریق تکیه گاه موجود بر روی صفحه میلگرد، و از طریق پیوند بین بتن پی و میلگرد تقویتی به شمع انتقال می یابند. بار فشاری اضافی، می تواند از طریق فشار پی بر روی قسمت فوقانی ستون دوغاب به شمع انتقال یابد.



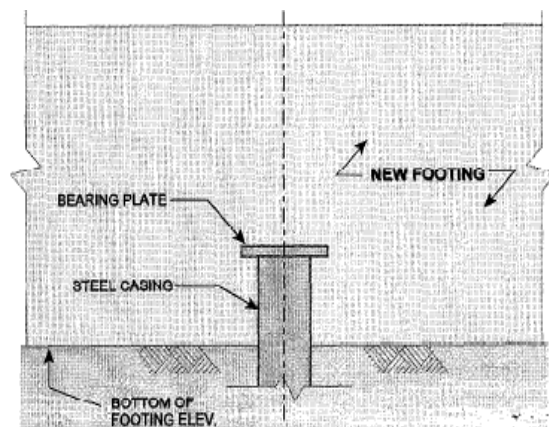
شکل 3-8: جزئیات اتصال شمع به پی (کلاهک)

شکل 3-9، یک اتصال فشاری را برای یک ریزشمع با بارگذاری معتدل نشان می‌دهد، بطوری که تنش متحمل شده بتن در بخش فوقانی شمع در محدوده مقرر AASHTO /ACI می باشد.



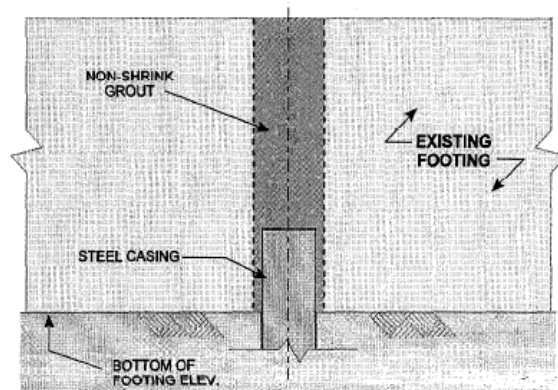
شکل 3-9: جزئیات اتصال شمع به پی جدید - بارگذاری معتدل

شکل 3-10، یک اتصال فشاری را برای یک ریزشمع با بارگذاری سنگین نشان می‌دهد، بطوری که یک صفحه تکیه گاهی، به نحوی که تنش بتن بر روی بخش فوقانی شمع در محدوده AASHTO/ACI قرار گیرد، مورد نیاز است.



شکل 3-10: جزئیات اتصال شمع به پی جدید -بارگذاری سنگین

شکل 3-11، یک اتصال فشاری را برای یک شمع، در میان یک پی موجود، نشان می دهد. پیوند دوغاب غیر انقباضی به پی، تابعی از روشهای پیشنهادی (گمانه مرکزی، گمانه با سقوط چکش down-the-hole، ...) و مصالح (دوغاب غیر انقباضی، بتن موجود، ...) می باشد.



شکل 3-11: جزئیات اتصال شمع به پی موجود -فقط بار فشاری

فصل 4

آزمایشات بارگذاری شمع

4- آزمایش بارگذاری شمع

4-1- مقدمه

در پروژه های تقویت فونداسیون با میکروپایل، استاندارد صنعتی این است که آزمایش بارگذاری را حداقل با یک میکروپایل تا بار نهایی طراحی انجام دهیم تا فرضیات طراحی و روش های نصب پیمانکاری بطور مناسبی تغییر نماید. آزمون بارگذاری، از نصب و تایید صحت آزمون بارگذاری یک یا چند شمع پیش از شروع فرآیند نصب شمع تشکیل می شود. تصدیقات اضافی ظرفیت باری شمع، در آزمون بارگذاری اصلی روی شمع های تکی آزمایش می شوند. این آزمایش ها معمولا دارای ویژگی های بارگذاری محوری افزایشی تا زمانی می باشند

که هم یک بار آزمایشی حداکثر از پیش تعیین شده و هم یک محدوده تغییر مکان محوری سازه ای از پیش تعیین شده را تحمل کنند، یا به یک آستانه خزش زمین از پیش تعیین شده برسند. با پیشروی شمع های نوع یک به ظرفیت بالاتر، خستگی به شکل کاهش ناگهانی بار و افزایش تغییر مکان مرتبط با گسیختگی سازه اتفاق می افتد. این جنبه نیازمند ملاحظات دقیق در طراحی ریزشمع با ظرفیت بالا می باشد. روش آزمون بار شرح داده شده در این بخش از AstMD1143 و D3689 در آزمایش شمع های تکی تحت بارگذاری استاتیکی کششی و فشاری می باشد

4-2- انواع و هدف آزمون بارگذاری :

میکروپایل ها برای تعیین اینکه آیا بارهای طراحی ریزشمع می توانند بدون حرکات اضافی و با ضریب ایمنی کافی برای عمر سرویس سازه تحمل شوند، تحت آزمایش قرار می گیرند. بعلاوه آزمایش برای تعیین کفایت حفاری پیمانکار ، عملیات نصب و دوغاب ریزی قبل یا حین ساخت تولید شمع استفاده می گردد. بنابراین شرایط خاک/ سنگ و نیز روش ، تجهیزات و اپراتور استفاده شده برای نصب شمع های تولیدی باید مشابه با مواردی باشد که برای آزمون شمع استفاده شده بود. اگر زمین و یا روش های نصب تغییر کند آزمون های اضافی لازم است. اگر نتایج آزمون های گسیختگی عمل ساخت را نشان دهد یا ظرفیت بار دوغاب به زمین کمتر از حد لازم باشد لازم است که پیمانکار روش های ساخت و نصب را تغییر دهد. وقتی ظرفیت پیوستگی طراحی لازم زمین- دوغاب هنوز حاصل نشده باشد طراحی مجدد لازم خواهد بود. معیار آزمایش بخشی از ویژگی ها می باشد و شامل آزمون های نهایی و تایید شده که راهنمای حصول روش های نصب و نیز تصدیق کننده تکمیل با ظرفیت باربری شمع و مقادیر پیوستگی دوغاب - زمین استفاده شده در طرح می باشد و این آزمون ها نیازمند بارگذاری تا یک بار آزمایشی حداکثر می باشند که شامل ضرایب اطمینانی هستند که در طرح پیوستگی زمین - دوغاب منجر به گسیختگی می شوند. (یعنی عدم توانایی حصول بار آزمایشی ثابت بدون حرکت اضافی ریز شمع) . تعداد آزمایشها وابسته به اندازه پروژه و اختلاف اساسی انواع زمین که میکروپایل در آن نصب می شود تغییر می کند. در پروژه های کوچک یک یا دو آزمون نهایی یا تایید کننده پیش از شروع نصب شمع انجام می شود. و یک یا دو آزمایش اضافی در هر نوع زمین مختلف که در حین فرآیند ساخت با آن مواجه می شویم انجام می گیرد. آزمون های بیشتر در پروژه های بزرگتر انجام می گیرد. این آزمون های نهایی و تایید کننده روی شمع های آزمایشی قربانی شونده انجام می گیرند. در حین فرآیند نصب ،آزمون گواه ممکن است روی درصد معینی از کل شمع ها ی نصب شده انجام گیرد. برخی از ویژگی هایی که اجازه می دهد آزمون گواه روی شمع های تولیدی انجام بگیرد در ارتباط با سازه است در حالیکه سایر ویژگی ها نیازمند شمع های قربانی اضافی هستند که به سازه وابسته نیست. از لحاظ اقتصادی اولین رویکرد قویا پیشنهاد می گردد. آزمایش

های خزش معمولاً به عنوان بخشی از آزمون های گواه ، نهایی و تصدیقی انجام می گیرند. خزش یک تغییر شکل وابسته به زمان تحت بارگذاری در طول زمان می باشد که بیشتر در خاک های آلی چسبنده رسی مورد توجه قرار می گیرد. آزمون های خزش شامل اندازه گیری حرکت شمع در یک بار ثابت در یک دوره زمانی معین است. آزمایش به این منظور انجام می گیرد که اطمینان حاصل شود بارهای طراحی شمع می توانند در عمر سرویس سازه به راحتی و بدون ایجاد حرکاتی که منجر به خرابی سازه شود تحمل گردند. (معمولاً 75-100 سال) آزمون میکروپایل با استفاده از بارگذاری افزایشی (در مواردی باربرداری) شمع و اندازه گیری حرکت سر شمع در هر افزایش بار صورت می گیرد. معمولاً هر قرائت حرکت سر شمع تنها پس از افزایش بعدی بار ثبت می گردد. زمانی که بار افزایش می یابد و با توجه به تعداد اندازه گیری ها برای هر افزایش بار ، افزایش بارها توسط نوع آزمون انجام شده تعیین می شوند. اگر نتوان آن را معین کرد، عمل پیشنهادی عبارت است از ثبت، پس از این که بار برای یک زمان معین حاصل شد. تا اطمینان حاصل شود که حرکت سرشمع در تعادل است . این روش آزمایش یک استاندارد نیست و در آیین نامه های مختلف متفاوت است. بیشتر آزمون های بارگذاری شمع بر طبق Astn D1143 ، روش آزمون سریع تکمیل شده اند.

4-2-1- آزمون نهایی:

آزمون نهایی روی میکروپایل های قربانی تولید نشده و به شرح زیر صورت میگیرد :

- تعیین ظرفیت نهایی پیوستگی دوغاب-زمین (اگر تا گسیختگی تحمل شود)
- تصدیق ضریب ایمنی طرح پیوستگی دوغاب-زمین
- تعیین بار زمانی که خزش اضافی اتفاق می افتد.

آزمون نهایی درست با استفاده از بارگذاری میکروپایل تا زمانی که گسیختگی در طول وجه مشترک دوغاب-زمین اتفاق بیفتد انجام می گیرد. عدم توانایی در برقراری بار ثابت بدون حرکت اضافی منجر به شکست می شود. حرکات اضافی اغلب در منحنی بار- تغییر مکان با شیب متجاوز از 0.15 میلیمتر بر کیلو نیوتن اتفاق می افتد. آزمون های نهایی صحیح معمولاً به عنوان بخشی از پروژه تحقیقاتی یا در پروژه های خیلی بزرگ وقتی که فاز طراحی برنامه آزمایش تصحیح شد، معین می شوند. فاز طراحی برنامه آزمایش اجازه می دهد که طرح میکروپایل بهینه شود.

4-2-2- آزمون تایید:

این آزمایشها برای این منظور انجام می گیرند که تعیین کنند آیا روش های نصبی که برای ریزشمع فراهم شده قادر به حصول ظرفیت پیوستگی معین دوغاب- زمین با ضریب ایمنی معین می باشند یا خیر. حداکثر تایید بارگذاری آزمون با استفاده از ضریب ایمنی پیوستگی دوغاب-زمین حاصل شده و ظرفیت پیوستگی

دوغاب-زمین برای طراحی انتخاب می شود. اگر ضریب ایمنی پیوستگی دوغاب-زمین 2.5 باشد حداکثر بار آزمون تا 250 درصد مقدار پیوستگی طرح تغییر می کند. آزمون های تایید به طور کلی روی میکروپایل های قربانی پیش از تولید به عنوان اولین مرحله کار پیش از ساخت شمع های تولیدی تکمیل می شوند. به علاوه آزمون تایید ممکن است در حین تولید لازم باشد تا ظرفیت های شمع در شرایط مختلف سنگ/خاک یا روش های حفاری و نصب حاصل شود. آزمون، یک سیکل چند مرحله ای سخت با بار آزمایشی در حال افزایش در طول هر سیکل بارگذاری تا زمانی می باشد که هر سیکل بارگذاری به یک بار آزمایشی حداکثر تعیین شده برسد.

4-2-3- آزمون گواه:

این آزمایش معمولاً روی تعداد معینی از تعداد کل میکروپایل های تولیدی نصب شده انجام می گیرد. آزمون، معمولاً یک بار آزمایشی تک مرحله ای می باشد که بار در حال افزایش اعمال می شود تا زمانی که یک بار آزمایشی حداکثر (167 در صد پیشنهاد میشود) از مقدار پیوستگی دوغاب- زمین طراحی حاصل شود. آزمون گواه اطلاعات لازم برای ارزیابی توانایی تولید میکروپایل ها را با توانایی حمل بار نرم در بارهای طراحی سرویس بدون حرکت سازه ای اضافی یا ترم طولانی خزش روی عمر سرویس سازه فراهم می نماید.

4-2-4- آزمون خزش :

اگر شمع ها در خاک چسبنده مستعد خزش قرار بگیرند معمولاً آزمون خزش به عنوان بخشی از آزمون خزش نهایی یا تاییدی انجام می شود. آزمون خزش در یک بار ثابت و معین با حرکات ثبت شده در بازه های زمانی معین انجام می گیرد. نتایج تغییر شکل در برابر لگاریتم زمان در یک نمودار نیمه لگاریتمی رسم شده و با معیار قبول مقالات موجود مقایسه می شود. حداکثر نرخ خزش 2 میلیمتر بر لگاریتم سیکلی زمان یک معیار متداول قابل قبول است. آزمون های خزشی بایستی از یک سلول بار تصحیح شده در طول آزمون بارگذاری افزایش یابنده خزشی استفاده نمایند تا برای تغییرات کوچک در بار که توسط جک یا سایر فاکتورها ایجاد می شوند میزان گردند.

4-3- تعیین نیازمندی های پروژه آزمون بارگذاری :

آزمون بار المانهای تکیه گاه فونداسیون ظرفیت های پیوستگی خاک زیرین ، ظرفیت طراحی سازه ای شمع و ویژگی های حرکتی خود میکروپایل را مشخص می نمایند. روش های مورد استفاده برای شمع هایی که با موفقیت آزمون شده اند قبل از تولید، روشهایی را برقرار می سازد که برای نصب شمع های تولیدی استفاده می شوند. فاکتورهایی که باید در حین تعیین نیازمندی های پروژه توجه شوند به شرح زیر است.

- تعداد کل میکروپایل های تولید شده

- مقدار و نوع بار طراحی
- حساسیت و اهمیت تکیه گاه سازه
- واریانس شرایط پروفیل خاک زیرسطحی منطقه نصب
- انواع شرایط زیر سطحی
- تجربه پیمانکار
- پروژه تعیین المان های تکیه گاهی فونداسیون بایستی شرایط زیر را داشته باشد.
- تعداد آزمون های تایید بار قبل از تولید
- تعداد آزمون های بار گواه شمع تولید شده
- مقادیر آزمون های بار
- روش اعمال بار (تکی یا چند مرحله ای)
- طول مدتی که بارهای آزمون اعمال می شوند.
- معیار قبول برای حداکثر تغییر مکان کل و حداکثر تغییر مکان خزشی در یک بار معین

4-3-1- تعداد آزمون های بار :

برای پروژه های کوچکتر شمع کوبی، آزمون بار لازم معمولاً از آزمایش حداقل یک شمع پیش از تولید با تعدادی ضریب زمان بارگذاری طرح تشکیل می شود. این شمع می تواند یک شمع قربانی (تولید نشده) یا یک شمع تولید شده باشد. بارگذاری فراتر از ظرفیت های حداقل لازم ممکن است به تلاش برای تعیین ظرفیت نهایی شمع هدایت شوند. برای پروژه های وسیع آزمون پیش از تولید اضافی و آزمون گواه شمع تولید شده معمولاً لازم است. برای مثال آزمون بار انجام گرفته برای بهبود لرزه ای ریز شمع کالترانس معمولاً از حداقل یک آزمون قبل از تولید (آزمون تایید) روی شمع تولید شده تشکیل یافته است. برای یک پروژه اقتصادی وسیع معین شامل تحت مقاومت قرار دادن فونداسیون زیر سیلو های دانه ای موجود و با 800 میکروپایل ظرفیت بالا آزمون بار لازم در ابتدا شامل سه آزمون پیش از تولید (قربانی) و 12 آزمون شمع تولید شده ، همه تا 200 درصد بار فشاری طراحی سرویس می باشد. تعداد آزمون بار لازم فراهم شده بعداً تا 6 تا پس از سازگاری و عملکرد موفقیت آمیز شمع آزمایش شده کاهش می یابد. تجهیزات آزمون هزینه های قابل ملاحظه ای رابه پروژه اضافه می نماید. آزمون های فشاری شمع قربانی شامل شمع های واکنش دهنده می توانند بین 10000 دلار و 30000 دلار در هر تست بر هزینه پروژه اضافه نمایند. انجام آزمون های بار که شامل آزمون نهایی ظرفیت بالا نباشند و جایی که شمع های مجاور ممکن است در برابر بارهای فشاری آزمون تولید واکنش نمایند بین 2000 دلار تا 10000 دلار در هر آزمون افزایش هزینه را در بر دارد. با ملاحظه این هزینه ها باید تلاش شود

تا ویژگی آزمون بار تهیه شود که تضمین نماید تمام شمعهای پروژه ظرفیت کافی دارند در حالیکه هزینه های کلی آزمایش در یک حد قابل قبولی نگه داشته شده است. مقدار حداکثر بار آزمایش ممکن است برای ایجاد آزمون شاهد شمع کاهش یافته و بنابراین هزینه کاهش یابد. انجام آزمون در بارهای کمتر می تواند با نتایج آزمون تایید پیش از تولید مقایسه گردد. آزمون شمع تولیدی ممکن است تنها شامل آزمون کشش باشد که ارزانتر است زیرا ممکن است بجای شمع ها مجاور یا عکس العمل مهار گره ای ، زمین بعنوان عکس العمل استفاده شود. اگر شرایط بار بحرانی شمع در کشش باشد یا اگر نتایج آزمون کششی شمع با نتایج آزمون کششی و فشاری پیش از تولید مرتبط باشد این موضوع معقول است. برای یک پروژه که شامل تعداد خیلی کمی شمع باشد آزمون بار ممکن است بلا تصور باشد بخصوص اگر ظرفیت های سازه ای و ژئوتکنیکی طرح به اندازه بسیار کافی نسبت به بار لازم فراهم شده باشند (ضریب ایمنی).

4-3-2- راهنمای آزمون بار میکروپایل:

این راهنما بر اساس فرضیات زیر است:

میکروپایل ها برای تکیه گاه فونداسیون سازه های پل لازم هستند (سازه های بحرانی)

ویژگی های پروژه نیازمند پیمانکارهای باکفایت میکروپایل می باشند

آزمون بار شاهد میکروپایل تنها در جهت بارگذاری بحرانی است

ضرایب اضافی وقتی در نظر گرفته می شوند که نیازمندی های آزمون پیوستگی پیش از تولید پروژه در جدول

4-2 لیست بندی شده باشد. برای تهیه تجهیزات هر پروژه فاکتور دامنه پروژه برای هر شکل را با تعداد آزمون

های داده شده جدول 4-1 ضرب کنید. تجهیزات آزمون تایید مجموع تعداد آزمون های لازم شمع جدول 4-1

بعلاوه تعداد لازم توسط جدول 4-2 بر اساس اندازه پروژه و ضرایب کاربردی هر آزمون شمع است.

Number of Piles Proposed for Project	Number of Tests	
	Pre-Production Pile Verification Testing	Production Pile Proof Testing
1 – 249	1	5 %
250 – 499	2	5 %
more than 500	3	5 %

جدول 4-1: راهنمای پیشنهادی آزمون بار

Pile Load-Testing Factor	Amplification
1. Criticality of Structure Supported	
Lifeline structure*	2.0
Non-lifeline structure	0.0
2. Micropile Ultimate (Nominal) Capacity	
1 – 1299 kN	0.0
>1300 kN	0.5
3. Subsurface Material Type (Pile Bond Zone)	
Rock	0.0
Soil sands, gravels	0.0
... clays, silts	0.5
4. Variance in Subsurface Conditions	
Little to no variance	0.0
Mild variance	0.5
Substantial variance	1.0

جدول 4-2: ضرایب اضافی میکروپایل در آزمون بار تایید

برای اقتصادی بودن تعداد آزمون های بار را به نزدیکترین عدد کامل گرد کنید. آزمون های تایید ممکن است بر روی شمع های تولید شده ای انجام بگیرند که :

شمع ها با یک ضریب ایمنی سازه ای حداقل 1/25 در بار حداکثر آزمون طراحی شوند
شمع ها در طول آزمایش بیش بارگذاری یا گسیخته نشوند

اگر شمع گسیخته شد بتواند جایگزین شود

آزمون های قبلی مالکین/ پیمانکاران میکروپایل ممکن است برای کاهش تعداد آزمون های تایید و شاهد استفاده شود و با شرایط زیر استفاده می شوند :

- مشابهت شرایط زمین
- مشابهت روشهای ساخت (دوغاب ریزی و حفاری)
- بارهای طراحی مشابه یا تنشهای پیوستگی طراحی مشابه

4-3-3- مقدار بار آزمون :

فاکتور استفاده شده برای تعیین مقدار بار آزمون معمولاً توسط ضریب ایمنی ژئوتکنیکی مطلوب کنترل می شوند. این ضریب ژئوتکنیکی معمولاً بزرگتر از ضرایب اعمال شده برای ملاحظات ظرفیت سازه ای نهایی می باشد، بنابراین ظرفیت سازه ای اضافی ممکن است برای شمع لازم باشد تا بارهای آزمون براساس ظرفیت های ژئوتکنیکی تقویت شوند. برای محاسبه مقدار آزمون بارگذاری این روند پیشنهاد می شود.

آزمون بار تایید تا 2.5 برابر بار طراحی

آزمون بار شاهد تا 1.67 برابر بار طراحی

برای آزمون مهارت کششی زمین تقویتی های اضافی گاهی مواقع به مهارت های اولیه آزمون تایید اضافه شده که باعث صرفه جویی در هزینه بعثت تقویت کمتر مهارت های تولید شده می گردد. بسیار دشوارتر است که نتایج آزمون شمع را با تغییر تقویتی مرتبط سازیم.

4-4- روش های آزمون بار میکروپایل :

4-4-1- روش کاربرد بار :

اگر میکروپایل ها برای بارهای کششی و فشاری طراحی شوند بایستی در هر نوع شرایط بارگذاری، آزمایش شوند اگر همان میکروپایل تحت هر دو آزمون کششی و فشاری قرار گرفت پیشنهاد می گردد ابتدا آزمون کششی انجام گیرد ، این کار به شمع اجازه می دهد تا در حین آزمون فشاری عوض شود، حتی وقتی حرکات باقیمانده خالص رو به بالا طی آزمون کشش اتفاق بیفتد. روش اعمال بار می تواند هم به شکل تک مرحله ای بصورت افزایش یابنده یا با ظرفیت لازم یا بصورت چند مرحله ای که بارهای افزایشی بتدريج اعمال و برداشته می شوند تا بار ماکسیمم حاصل شود تغییر نماید. اگر تلاش برای رسیدن به ظرفیت نهایی شمع باشد استفاده از سیکل چندتایی ترجیح داده می شود. تحلیل تغییر مکان های الاستیک و باقیمانده اندازه گیری شده در بارگذاری دوره ای اطلاعات قابل اندازه گیری در مورد عملکرد شمع و مود گسیختگی فراهم نموده و هزینه های اضافی حداقل می شود. معمولاً لازم نیست که آزمون بار را روی شمع مایل انجام دهیم حتی اگر پروژه شامل آنها نیز باشد در نصب شمع بصورت مایل هر اثر روی سختی ساخت و ظرفیت منتهی مخصوصاً برای شمع های نصب شده با روش چاه محبوس کوچک است. با این وجود آزمایش یک شمع مایل می تواند دشوار باشد و هزینه های آزمون را خصوصاً برای آزمون فشاری افزایش دهد.

4-4-2- مدت حفظ بار :

مدتی که بارهای اعمال شده نگه داشته می شوند یکی از ملاحظات مهم دیگر است. (آزمون خزش شمع) اگر شمع در خاک های غیر خزشی حساس نظیر ماسه ، شن یا سنگ نصب شده است حداکثر بار آزمون تنها برای 10 دقیقه نگه داشته می شود ، و اگر ملاک پذیرش حاصل شود مدت نگه داری افزایش می یابد. برای شمع هایی که در خاک مستعد خزش هستند نظیر لای، پلاستیک یا رس حداکثر مدت نگه داری بار می تواند از 100 دقیقه تا 24 ساعت وابسته به نوع و مقدار بار طراحی، طبیعت خاک و حساسیت تکیه گاه سازه تغییر کند.

4-4-3- معیار قبول آزمون بار :

مقدار و جهت باری که یک شمع باید تحمل کند در طراحی سازه مشخص می شود. حداکثر تغییر مکان یک شمع نیز حین طراحی سازه ای و ملاحظات حساسیت نسبت به حرکت یا ملاحظات تغییر مکان مجاز و چرخش های خاص پاشنه حین تحلیل لرزه ای تعیین می شود. معیار تغییر مکان های خزشی مجاز بر اساس معیار استاندارد آزمون زمین - مهار بند (Pt11996) و آزمون میخ کوب ها می باشد که بر اساس تغییر مکان مجاز دو میلیمتر بر لگاریتم زمان سیکلی بر حسب دقیقه می باشد.

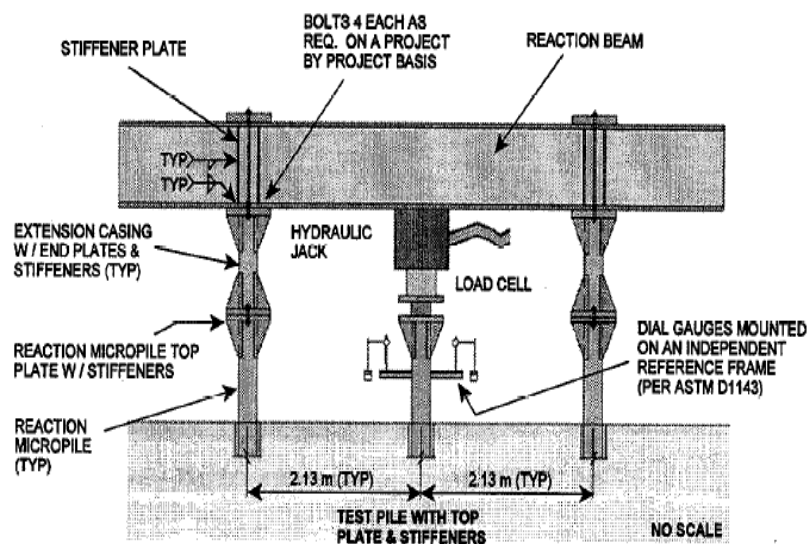
معیار قبول بار سازه معین می باشد و شامل موارد زیر است:

- آزمون تایید بار باید یک بار کششی یا فشاری معادل 250٪ بار طراحی معین حالت سرویس را بدون گسیختگی تحمل کند. (یعنی $DL \times 2.5$) آزمون شاهد شمع باید یک بار کششی یا فشاری معادل 167٪ از بارگذاری طرح معین حالت سرویس را بدون گسیختگی تحمل کند ($DL \times 1/67$) گسیختگی شمع با تغییر مکان پیوسته بالای شمع بدون افزایش بار اعمال شده تعیین می شود. برای آزمون ترکیبی کششی و فشاری تغییر مکان کل باید موقعیت نسبی بالای شمع در شروع آزمایش اولیه را تحمل کند.

- وقتی بار آزمون اعمال شده در 133٪ بار سرویس طراحی حفظ شود افزایش تغییر مکان اندازه گیری شده در بالای شمع (خزش) بین 1 دقیقه تا 10 دقیقه نباید از 1 میلیمتر تجاوز کند. اگر افزایش تغییر مکان از مقدار معیار تجاوز نمود مدت نگاه داری بار باید به 60 دقیقه یا بیشتر افزایش یابد. نرخ خزش بین 6 تا 60 دقیقه نباید از دو میلیمتر بر لگاریتم زمان بر حسب دقیقه تجاوز نماید. بهبود سازی لرزه ای اجازه تغییر مکان های بیشتر را نیز می دهد.

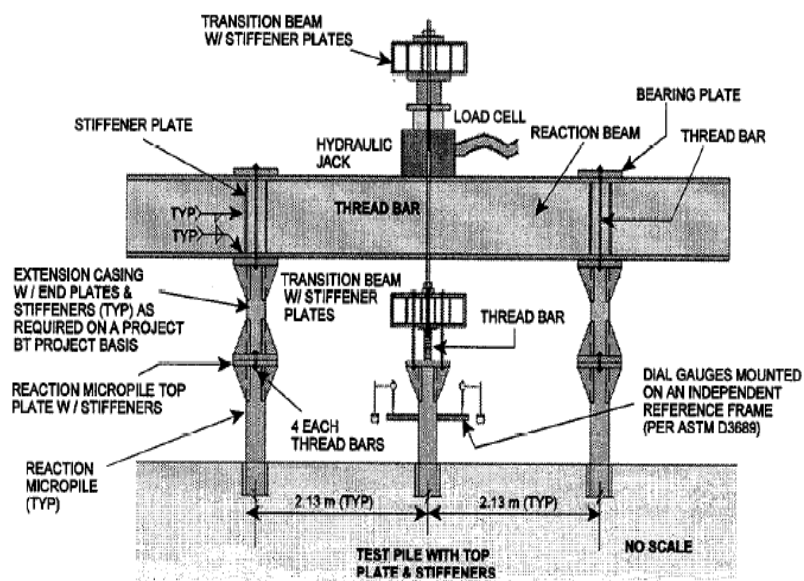
4-5- تجهیزات آزمون بار :

برای آزمون محوری و جانبی معمولترین سیستم شامل یک جک هیدرولیک و چینش عکس العمل هاست. سیستم عکس العمل ممکن است میکروپایل های مجاور، مهاری های زمین یا کفشک هایی باشد که عکس العمل ظرفیت زمین را برای آزمون کشش فراهم می نماید. چینش لوازم آزمون در اشکال 1-7 ، 2-7 ، 3-7 برای آزمون فشاری کششی و بار جانبی نشان داده شده است. بار با استفاده از جک هیدرولیک اعمال می شود. مقدار بار در همبستگی با فشار هیدرولیک تعیین شده و با استفاده از گیج نصب شده به جک قرائت می شود. این همبستگی با گیج و جک ایجاد می شود که معمولاً نیازمند 90 روز قبل از آزمون بار است.



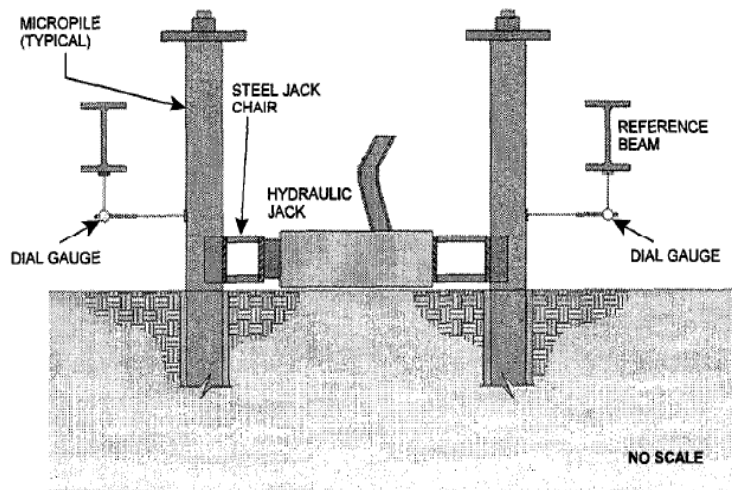
TYPICAL COMPRESSION LOAD TEST ARRANGEMENT (ASTM D1143)

شکل 4-1: آرایش آزمون بار فشاری



TYPICAL TENSION LOAD TEST ARRANGEMENT (ASTM D3689)

شکل 4-2: آرایش آزمون بار کششی



شکل 3-4: آزمون بار جانبی

- گنج های آفتابی :

تغییر مکان قائم و جانبی معمولاً با گنج های آفتابی با حساسیت قرائت 0/025 میلیمتر اندازه گیری می شود. برای آزمون بار محوری گنج ها روی تیر مرجع مستقل نصب می شوند و تکیه گاه ها حداقل در 2.13 متری شمع آزمون قرار می گیرند. متوسط قرائت سه گنج برای جبران نوع سر شمع استفاده می شوند. گنج ها در پیرامون شمع در فاصله ای برابر از مرکز شمع قرار می گیرند.

- سیم کشی با آینه و مقیاس:

تغییر مکان بالای شمع ممکن است با استفاده از یک آینه یا یک مقیاس که روی شمع نصب شده و یک سیستم که روی یک مرجع مجزا بسته شده تعیین می شود. مقیاس با استفاده از خط مجاور محل تا زمانی که خطوط سیستم انحنا می دهند قرائت می شود. این روش می تواند به عنوان یک پشتیبان سیستم گنج آفتابی باشد اما حساسیت آن کمتر است.

- روش ارزیابی :

تغییر مکان شمع ممکن است با استفاده از ابزار ارزیابی (تئودولیت) اندازه گیری شود.

- سلول بار:

سلول های بار ممکن است به عنوان یک روش پشتیبانی اضافی از اندازه گیری بار اعمال شده به شمع استفاده شوند. آنها می توانند برای حصول بار آزمون ثابت که در آن بار آزمون خزش برای شمع های آزمون تایید نگه داشته شده استفاده شوند. وقتی سلول های بار استفاده می شوند باید مراقبت صورت گیرد که مطمئن شویم سلول هم راستای محور میکروپایل و جک می باشد. سلول های بار اساساً برای آشکار سازی تغییرات کوچک بار

استفاده می شود. بعنوان مثال مهم است که 440 قرائت روی سلول بار جک های فشاری مجاور برای مدت آزمون حاصل شود.

4-6- گزارش آزمون بار :

برای هر آزمون بار بایستی گزارشی نوشته و در 24 تا 48 ساعت از تکمیل بار آزمون به مالک داده شود .
پیشنهادهای برای محتویات این گزارش به شرح زیر است:

- ✓ توصیف کلی پروژه
 - ✓ توصیف محل و شرایط زیر سطحی
 - ✓ پرسنل اصلی
 - ✓ تاریخ نصب شمع
 - ✓ نتایج آزمون بار شامل مقادیر و توصیف آنها
 - ✓ بیان نیازمندی های آزمون بار و معیار پذیرش
 - ✓ مقایسه نیازمندی های آزمون بار و معیار پذیرش
 - ✓ بیان خلاصه نتایج آزمون بار
 - ✓ گزارش تصحیح سلول بار / جک هیدرولیک
 - ✓ ویژگی های مصالح شامل آزمون مقاومت فشاری ملات
- مقادیر نصب شمع شامل اطلاعات جزئی درباره میکروپایل ، آزمایش نظیر طول شمع (با پوشش یا بدون آن) ، تعداد کیسه های سیمان ، اندازه و نوع پوسته و تقویتی ، مصالح مواجهه شده با آن در حین نصب و مقادیر ثبت شده دوغاب ریزی و حفاری واقعی می باشد. توصیف محل و شرایط زیر سطحی و شرایط پیش بینی شده زمین در موقعیت آزمون بار و مقایسه واقعی با شرایط پیش بینی شده را بیان می نماید.

4-7- گسیختگی شمع آزمون :

در واقع یک میکروپایل وقتی به معیار پذیرش معینی در طول آزمایش پیش از تولید مواجه می گردد گسیخته می شود. پیمانکار می تواند طراحی میکروپایل و یا روش ساخت آن را به منظور حصول ظرفیت لازم تغییر دهد. این تغییرات شامل تغییر روش نصب ، افزایش طول پیوستگی شمع یا تغییر نوع میکروپایل می باشد. اگر در حین آزمون بارگذاری شمع تولید شده گسیختگی رخ دهد پیمانکار بایستی روش طراحی و یا روش ساخت و یا هر دو را تغییر دهد. این اصلاحات شامل نصب میکروپایل های جایگزین شده ، اصلاح روش نصب ، افزایش طول پیوستگی یا تغییر نوع میکروپایل است.

فصل 5

مطالعه عددی عملکرد گروهی میکروپایل

5- مطالعه عددی عملکرد گروهی میکروپایل

5-1 مطالعه موردی مقاوم سازی ساختمانی در هند با استفاده از میکروپایل:

در هند، در برخی شرایط محیطی، شمعهای فلزی و شمعهای چوبی اندود شده، بعنوان گزینه های اقتصادی جهت بهبود ظرفیت باربری پی یا کاهش جابجایی ها تا حدود قابل قبول در مقاوم سازی پی ها مورد استفاده قرار می گرفتند. (Sridharan and Murthy (1993 مطالعه موردی ساختمان 10 طبقه ای را که به دلیل نشستهای غیر همگن آسیب دیده بود، با استفاده از بکارگیری میکروپایل ها توضیح دادند. ساختمانی با پلان مربعی بر روی خاک ماسه ای شل خاکریزی شده ای در شهر بزرگی در هند metropolitan city in India ساخته شده بود. محققین خاک پی را در وضعیت نسبتاً سستی تعیین کرده بودند (مقادیر SPT در بازه 6 تا 8)، و آزمایشات آزمایشگاهی، مشخصات خاک (پارامترهای تنش موثر)، مانند چسبندگی و زاویه اصطکاک و دانسیته را به ترتیب برابر صفر، 25 درجه و 17 KN/m^3 تعیین کردند. پی ها برای تحمل بارهایی در حدود KN 600 طراحی شدند. با توجه به اینکه ظرفیت باربری مجاز در حدود 120 KN/m^2 تخمین زده شده بود، پی هایی با ابعاد 2.5×2 متر پیشنهاد شد. در بالای سطح پی، خاک متراکمی با دانسیته 20 KN/m^3 جهت ایجاد اختلاف تراز خاکریزی گردید که منجر به ایجاد باری در حدود 130 KN/m^2 بر سطح پی می شد. این موضوع در طرح کلی اولیه مورد توجه قرار نگرفته بود و در نتیجه تیرهای میانقاب و شناژهای همسطح پی، در زمان تکمیل خاکریزی، ترکهای مخاطره آمیزی را نشان دادند. پی ستونها از راستای قائم خارج شده و ادامه پروژه با مشکل مواجه شد (شکل 5-1).

در ادامه، تحقیقات ژئوتکنیکی نشان دادند که ظرفیت باربری مجاز طرح، بیشتر از مقدار واقعی بوده و مقدار واقعی در حدود 70 KN/m^2 می باشد. بنابراین برای باز گرداندن پی ها و ستونها به وضعیت اولیه، میکروپایل ها جهت مقاوم سازی خاک زیر پی انتخاب شدند. اجرای عملیات مقاوم سازی، باعث شد تا کلیه ستونها و پی ها به حالت اولیه بازگشته و وضعیت رضایت بخش باشد. [5]



1) مراحل ساخت در زمان اجرای میکروپایل



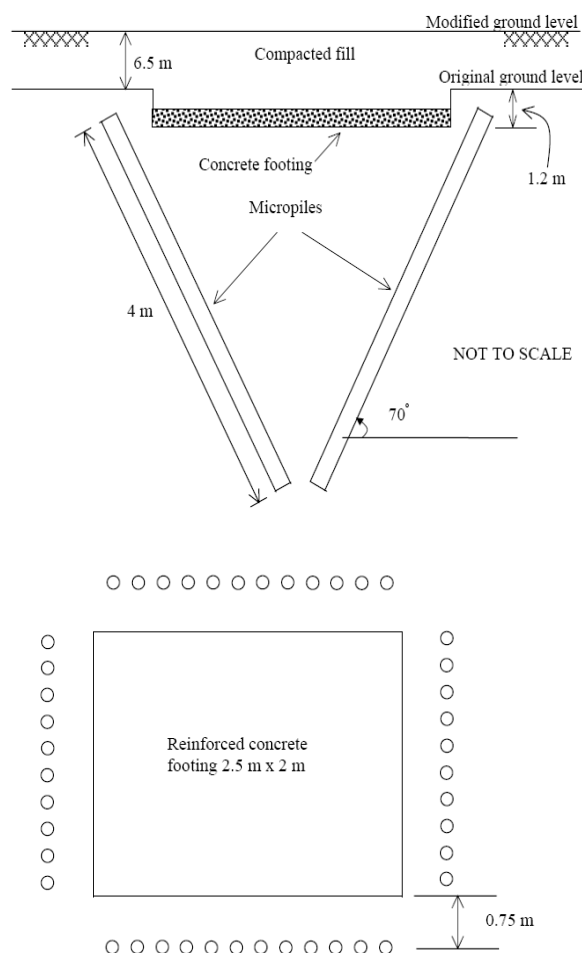
2) حفاری خاک قبل از اجرای میکروپایل



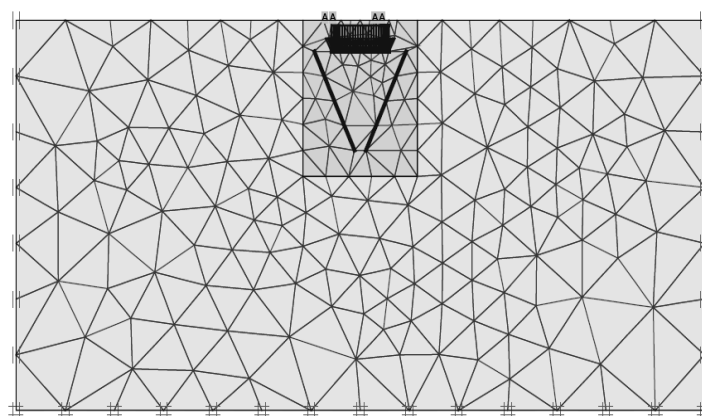
3) میکروپایل در محل
تصویر 1-5

محاسبات نشان دادند که میکروپایل های با قطر 100 میلیمتر و فاصله مرکز به مرکز 200 میلیمتر ، مقاومت اصطکاکی اضافی مورد نیاز برای سطح دلخواه ظرفیت باربری را فراهم می کنند. ، میکروپایل ها با زاویه 70 درجه نسبت به افق نصب شدند (شکل 5-1). پلان و مقطع سازه و دیاگرام شماتیک سیستم میکروپایل در شکل 5-2 نشان داده شده است.

با استفاده از برنامه PLAXIS شرایط پروژه مدل سازی گردید. پی بعنوان یک المان تیر با عرض 2.5 متر و با فرض رفتار انعطاف پذیر و کرنش مسطح تحلیل شد. خاک زیر پی مانند مصالحی با رفتار موهر کولمب مدل شد و میکروپایل ها مانند مصالح الاستیک مدل گردیدند. میکروپایل ها (شمع های فولادی با انتهای بسته) با قطر 100 میلیمتر و ضخامت جداره 6 میلیمتر بصورت یکنواخت در بعد سوم پی جایگذاری شده و در محاسبات مورد استفاده قرار گرفتند (شکل 5-3).

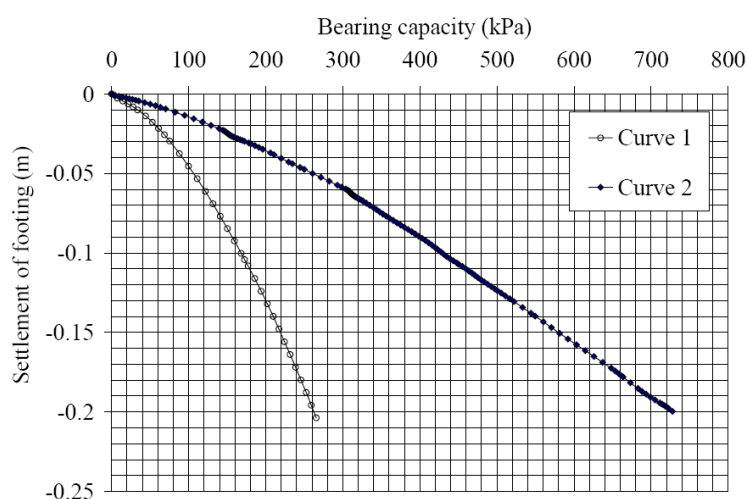


شکل 5-1 : نمایی از پلان و مقطع پی مقاوم سازی شده با سیستم میکروپایل



شکل 5-2: مش بندی المان محدود با شرایط مرزی

نمودار 5-1، واکنش بار- جابجایی بدست آمده از شبیه سازی عددی را نشان می دهد. منحنی شماره 1، منحنی بار- جابجایی بدست آمده از خاک محل می باشد. فشار قابل تحمل مجاز، متناظر با 25 میلیمتر نشست برابر 66.8 KPa می باشد که نزدیک به مقدار ظرفیت باربری مجاز در طرح اصلاح شده می باشد. ظرفیت باربری مجاز برای 50 میلیمتر نشست، متناظر با 106.3 KPa می باشد. منحنی شماره 2، منحنی بار- جابجایی متناظر میکروپایل ها می باشد. منحنی شماره 2، بهبود کلی ظرفیت باربری بدست آمده را نشان می دهد که در آن مقدار 260 KPa بدست آمده است. بنابراین، نتایج حل عددی بدست آمده، بهبود ظرفیت باربری زمین را با استفاده از میکروپایل ها تایید کرد.[5]



نمودار 5-1: منحنی بار- جابجایی، با استفاده و بدون استفاده از میکروپایل

2-5- مطالعه موردی عملکرد میکروپایل در پروژه FOREVER :

آزمایش های بزرگ مقیاس توسط محققین فرانسوی در پروژه FOREVER بر روی ماسه همگن Fontainebleau انجام شد. داده ها از گروهی شامل 4 میکروپایل با دوغاب وزنی تحت بارگذاری قائم ، انتخاب شدند. [4,6]

خصوصیات پروژه :

ماسه Fontainebleau :

دانسیته خشک : $14.4 \text{ KN/m}^3 < \gamma_d < 14.82 \text{ KN/m}^3$

شاخص دانسیته: $0.53 < I_d < 0.62$

درصد رطوبت : $7.9\% < w < 10.8\%$

میکروپایل ها:

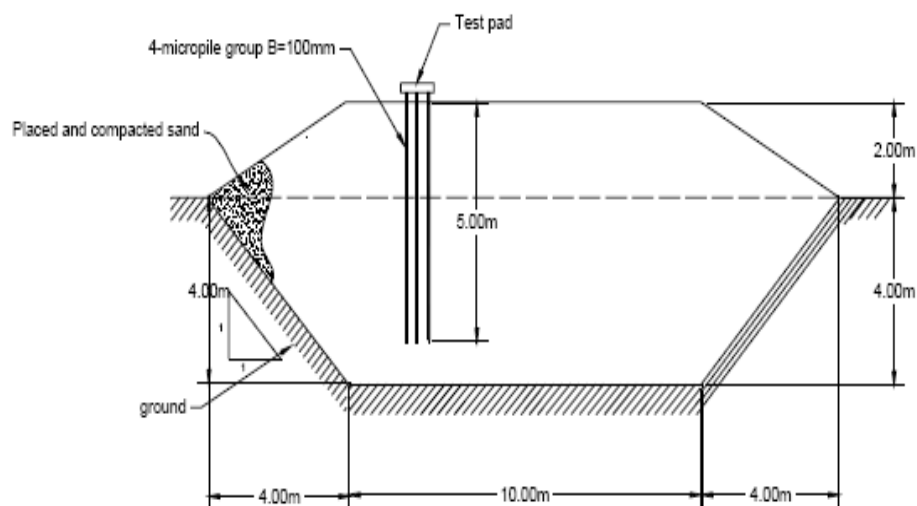
طول مهارشده : $L = 5 \text{ m}$

قطر : $B = 100 \text{ mm}$

لوله فولادی: قطر 40 / 50 mm

$E_{\text{steel}} = 2 \times 10^5 \text{ Mpa}$

$E_{\text{grout}} = 10^4 \text{ Mpa}$



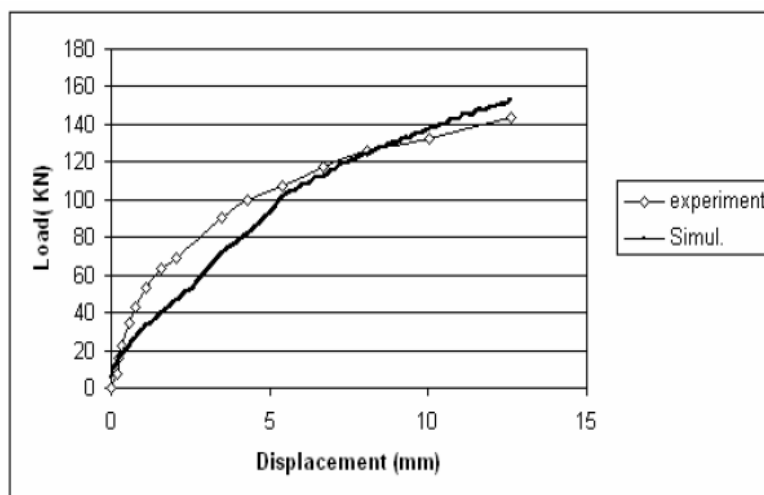
شکل 5-3: طرح آزمایش میکروپایل (FOREVER, 2002)

شبیه سازی عددی تست بار شمع با نرم افزار FLAC 3D با مدل وابسته به حالت ماسه انجام شد. مش تفاوت محدود (finite difference) شامل گروه میکروپایل 2*2 ارائه شد. میکروپایل ها از طریق المان های سازه ای شمع در برنامه FLAC 3D شبیه سازی شدند. پارامترهای میکروپایل و سطح مشترک در جدول 5-1 نشان داده شده است.

چسبندگی	زاویه اصطکاک برشی	سختی برشی (N/m^2)	سختی قائم (N/m^2)	ضریب پواسون ضریب شمع	مدول ارتجاعی شمع (Pa)
0	20	7.5×10^9	1.5×10^{10}	0.3	2.71×10^{10}

جدول 5-1: پارامترهای میکروپایل و سطح مشترک میکروپایل-خاک

رابطه بار- جابه جایی شبیه سازی شده همراه با روابط تجربی در محل در نمودار 2-5 ترسیم شده است. دیده می شود که شبیه سازی رفتار را به خوبی در بر می گیرد.[6]



نمودار 2-5: رابطه بار- جابه جایی شبیه سازی شده و تجربی شمع منفرد

5-3- آنالیز عملکرد میکروپایل: [6]

حالت ماسه اطراف میکروپایل با ترکیب دانسیته و فشار موثر متوسط تعیین شد. اگرچه در حال حاضر خواص مکانیکی ماسه در طراحی شمع فقط بر اساس دانسیته نسبی است. استفاده از این پارامتر به تنهایی در نتایج تست های بزرگ مقیاس، نمی تواند اثر مهم محصورشدگی را در بر بگیرد.

استفاده از پارامتر حالت γ که ترکیبی از دانسیته و تنش موثر است، نتایج بهتری می دهد. ماسه ها تحت بارگذاری برشی، با $\gamma < 0$ حالت اتساعی و با $\gamma > 0$ حالت انقباضی دارند. بنابراین خواص مکانیکی و توزیعشان در مقاومت شمع متفاوت خواهد بود. ماسه با $\gamma = 0$ در حالت بحرانی و با هیچ تغییری در حجم می باشد و خواص مکانیکی آن تنها با اصطکاک حالت بحرانی کنترل می شود.

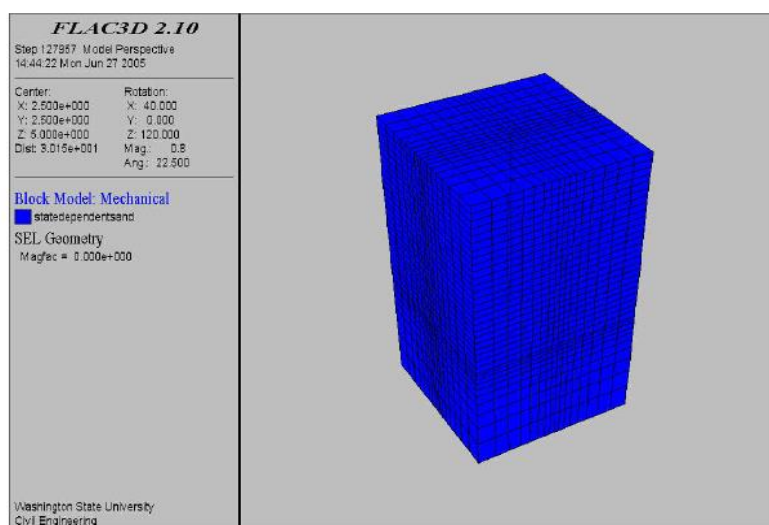
در اینجا با استفاده از مدل وابسته به حالت ماسه در برنامه FLAC3D، عملکرد میکروپایل تحت بارگذاری قائم مطالعه شد.

اولین مجموعه از آنالیز برای میکروپایل تکی انجام شد و سپس آنالیزها برای گروه و شبکه میکروپایل انجام شدند. توجه روی ظرفیت باربری خارجی که موثر از حالت ماسه است، متمرکز شد.

5-3-1- اثر حالت ماسه روی مقاومت شمع تکی:

5-3-1-1- مدل شمع تکی :

ابعاد مدل $5 \times 5 \times 10 \text{ m}^3$ انتخاب شد و مش finite difference مورد استفاده شامل 8690 المان و 10404 گره است.



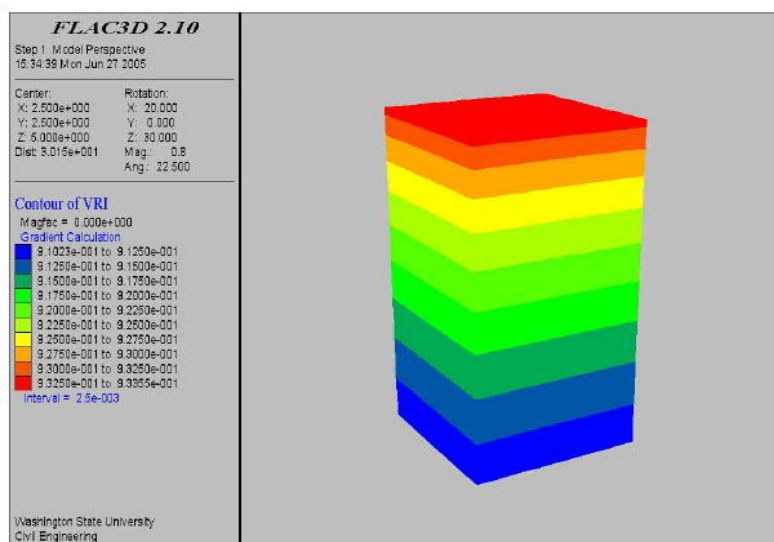
شکل 5-4: مش finite difference

فرض شد که شمع ها در یک پروفیل همگن از ماسه یکنواخت TOYOURA نصب می شوند. پارامترهای مدل ماسه TOYOURA در جدول جدول 5-2 نشان داده شده است.

پارامترهای الاستیک	پارامترهای حالت بحرانی	پارامترهای همراه با مکانیسم dr	پارامترهای همراه با مکانیسم dp	پارامترهای پیش فرض
$G_0=125$ $\nu=0.25$	$M=1.25$ $c=0.75$ $e_T=0.934$ $\lambda_c=0.019$ $\xi=0.7$	$d_1=0.41$ $m=3.5$ $h_1=3.15$ $h_2=3.05$ $h_3=2.2$ $n=1.1$	$d_2=1$ $h_4=3.5$	$a=1$ $b_1=0.005$ $b_2=2$ $b_3=0.001$

جدول 5-2: پارامترهای مدل ماسه TOYOURA

پارامتر حالت اولیه ماسه یکنواخت فرض شد، بنابراین توزیع نسبت تخلخل با عمق تغییر می کند. به عنوان مثال شکل 5-6 توزیع نسبت تخلخل برای مدل $y=0$ را نشان می دهد.



شکل 5-5: توزیع نسبت تخلخل مدل ماسه TOYOURA برای $y=0$

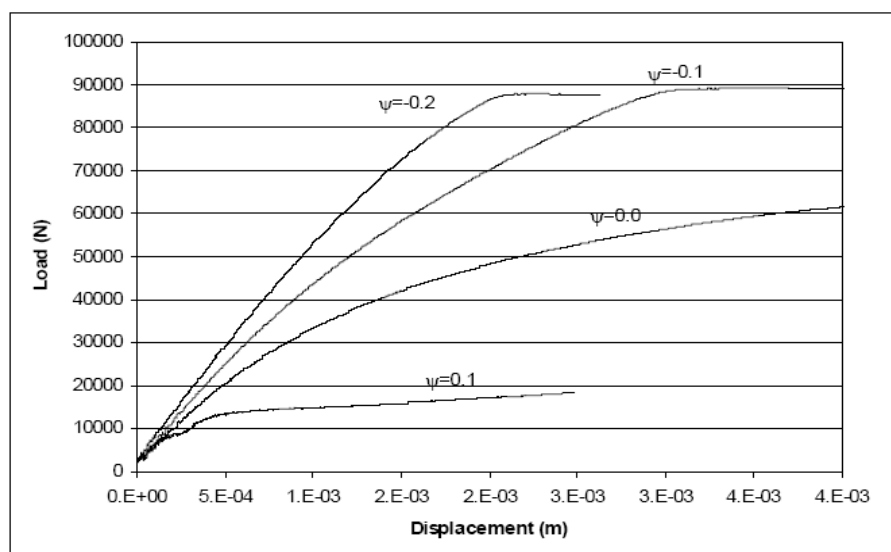
میکروپایل ها از نوع case 1 در نظر گرفته می شوند با المان های سازه ای شمع که به خاک توسط فنرهای سطح مشترک برشی و نرمال پیوند داده شده اند. طول و قطر شمع 6 m و 200 mm انتخاب شدند ($L/D=30$). روش های دوغاب ریزی و حفاری جدید برای نصب میکروپایل های کنونی استفاده می شود که چسبندگی بالای دوغاب-زمین را نتیجه می دهد.

بنابراین مقاومت و سختی برشی و عمودی سطح مشترک در مدل FLAC 3D با مقادیر بزرگ و کافی تنظیم شد تا بتوان مطمئن شد زمانی که میکروپایل تحت بارهای قائم قرار دارد، تغییر شکل و گسیختگی میکروپایل توسط خاک اطراف کنترل می شود و نه توسط سطح مشترک.

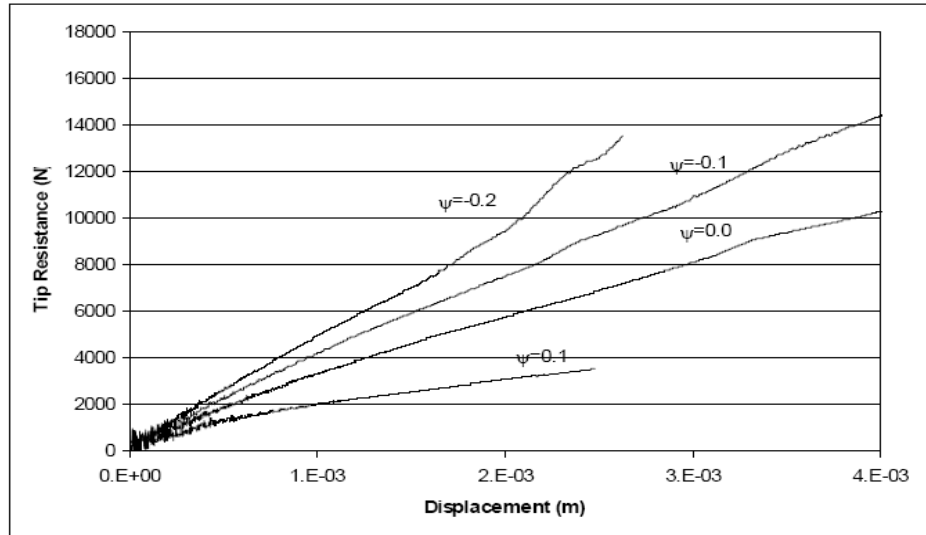
همان طور که در راهنمای نرم افزار FLAC 3D مشخص شده، بارهای قائم با کنترل جابه جایی اعمال می شوند. مقادیر کوچک جابه جایی های قائم متوالی به بالای گره شمع اعمال شدند تا مقاومت نوک و جلدی میکروپایل ها را در خاک اطراف برانگیخته کنند. توجه کنید از آن جایی که نسبت L/D میکروپایل بزرگ است سهم بزرگی از ظرفیتش از اصطکاک می باشد اگرچه این مطالعه مقاومت نوک را هم برای بررسی تغییرات اثر پارامتر حالت در نظر گرفت.

5-3-1-2- نتایج آنالیز شمع تکی :

تغییرات مقاومت جلدی و نوک شمع با جابه جایی در نمودارهای 3-5 ، 4-5 آورده شده است. مقادیر پارامتر حالت 0.1 ، 0.0 ، -0.1 ، -0.2 انتخاب شدند تا رفتار انقباضی ماسه را علاوه بر رفتار اتساعی آن نشان دهند. همان طور که مشاهده می شود مقاومت جلدی و نوک وابسته به مقادیر پارامتر حالت هستند.

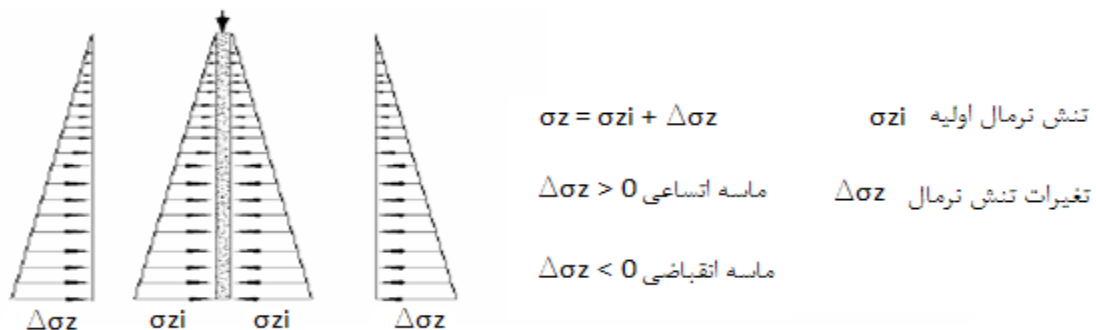


نمودار 3-5 : مقاومت جلدی شمع در برابر جابه جایی تحت حالات متفاوت ماسه



نمودار 5-4: مقاومت نوک شمع در برابر جابه جایی تحت حالات متفاوت ماسه

مقاومت جلدی شمع به وسیله تنش عمودی روی سطح مشترک بین شمع و ماسه و مقاومت حالت بحرانی ماسه تعیین می شود. مقاومت حالت بحرانی اصطکاکی است و فقط به مشخصات ذرات ماسه وابسته است و به حالت ماسه وابسته نیست، اگرچه تنش عمودی سطح مشترک وابسته به نوع اتساع در هنگام برش است. ماسه اتساعی با $\psi < 0$ تحت برش منبسط می شود اما ماسه انقباضی با $\psi > 0$ منقبض می شود. از آن جایی که شمع مجبور به حرکت در جهت قائم است حجم ماسه تغییر می یابد تا با تغییرات تنش در سطح مشترک تطبیق داده شود، بنابراین رفتار اتساعی ماسه افزایش تنش نرمال و رفتار انقباضی کاهش تنش نرمال را نتیجه می دهد. تغییرات معمول تنش نرمال در شکل نشان داده شده است.



شکل 5-6: توزیع تنش نرمال

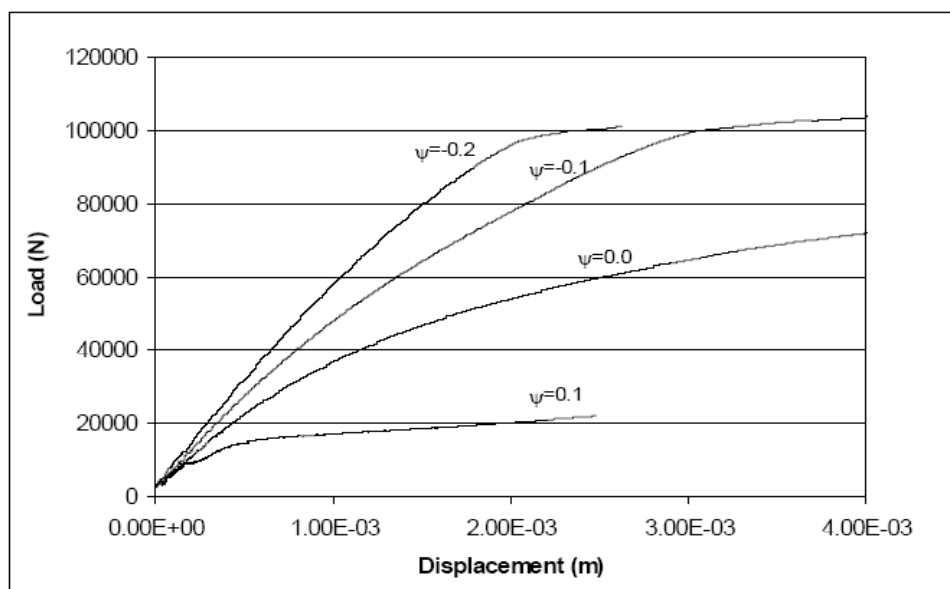
σ_{zi} تنش نرمال اولیه اعمال شده به سطح شمع و $D\sigma_z$ تغییرات تنش نرمال تولید شده توسط انقباض یا انبساط تحت برش است. در ماسه انقباضی $D\sigma_z$ منفی و در ماسه اتساعی $D\sigma_z$ مثبت است.

بر اساس بحث های بالا ، واضح است که مقاومت جلدی وابسته به پارامتر حالت است. (نمودار 3-5)

نتایج نشان می دهد هنگامی که بسته به حالت ماسه، نفوذ شمع بین 0.5-3 میلیمتر است مقاومت جلدی کاملاً بسیج می شود. برعکس تغییر شکل ماسه در نوک شمع برای همه حالات ماسه به جز برای مورد $\psi = 0.1$ الاستیک است. بنابراین مقاومت نوک در این مرحله هنوز کاملاً بسیج نشده است. (نمودار 4-5)

Juran et. al. (1999) نسبت جابه جایی برای بسیج کامل مقاومت نوک را 20-40 برابر نسبت جابه جایی برای بسیج کامل مقاومت جلدی ارائه دادند اما این مقدار بیشتر باید با مقدار L/D و خواص ماسه تغییر کند.

مشخصات مقاومت جلدی و مقاومت نوک شمع، مقاومت کل را تعیین می کنند. هر دو جزء با تغییر حالت انقباضی به اتساعی افزایش می یابند. بنابراین مقاومت کل با کاهش پارامتر حالت ، افزایش می یابد. (نمودار 5-5)



نمودار 5-5 : مقاومت کل شمع در برابر جابه جایی تحت حالات متفاوت ماسه

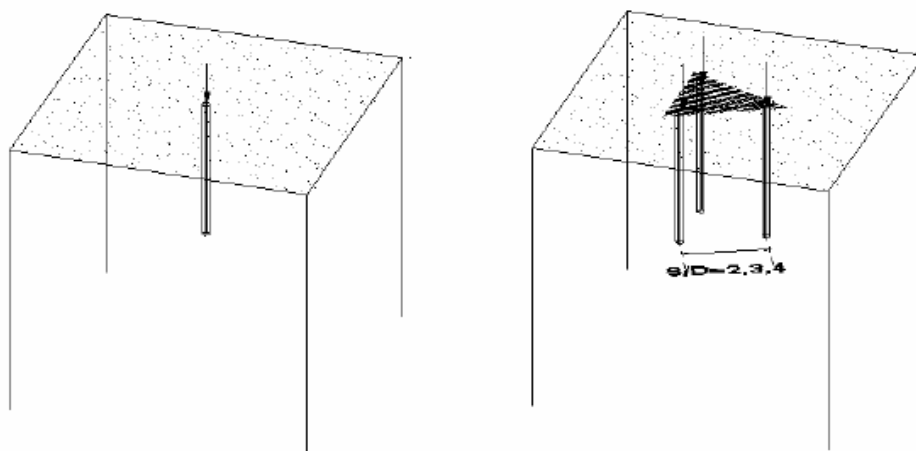
5-3-2- آنالیز رفتار گروه شمع قائم :

مطالعاتی در گذشته برای بررسی رفتار گروه شمع وریزشمع در ماسه انجام شد. اگرچه در مورد شمع تکی، بیشتر این مطالعات بر اساس دانسیته ماسه است و نه حالت ماسه. بنابراین نتایج آزمایشگاهی و آزمایش های بزرگ مقیاس که توسط محققین زیادی گزارش شد منجر به مشاهدات متناقضی در رفتار گروه و شبکه میکروپایل شد. (Lizzi, 1978; Plumelle, 1984; Maleki, 1995)

بنابراین آنالیز FLAC 3D برای بررسی اثر حالت اولیه در رفتار گروه شمع استفاده شد.

5-3-2-1- مدل گروه شمع قائم :

ابعاد مدل و ماسه مانند شمع تکی می باشد. همان طور که در شکل نشان داده شده است، یک گروه سه شمعی با قطر mm200 و طول m6 به طور قائم در مرکز نصب شدند.



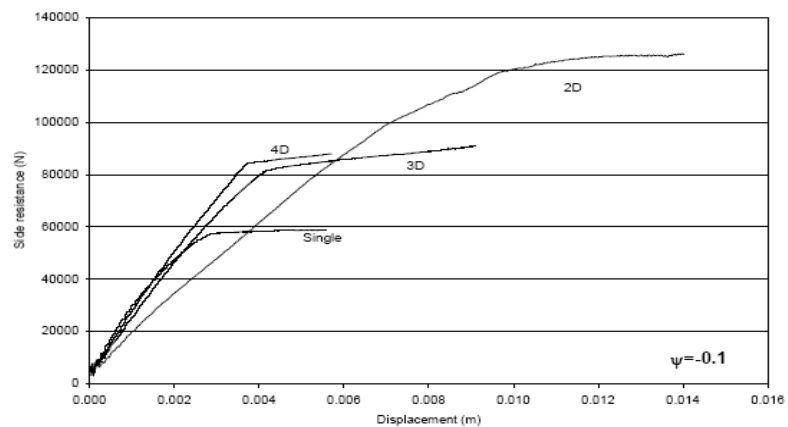
شکل 5-7: آرایش گروه شمع

مقاومت و سختی برشی و عمودی سطح مشترک بین شمع و ماسه با مقادیر بزرگ و کافی تنظیم شد تا بتوان مطمئن شد گسیختگی در ماسه اطراف رخ می دهد. با تغییر فاصله شمع ها از 2D تا 4D (D: قطر شمع) اثر فاصله در رفتار گروه برای حالت مفروض ماسه ارزیابی می شود. پارامتر حالت 0.1, 0.0, 0.1 - انتخاب شدند تا رفتار انقباضی و اتساعی ماسه را نشان دهند.

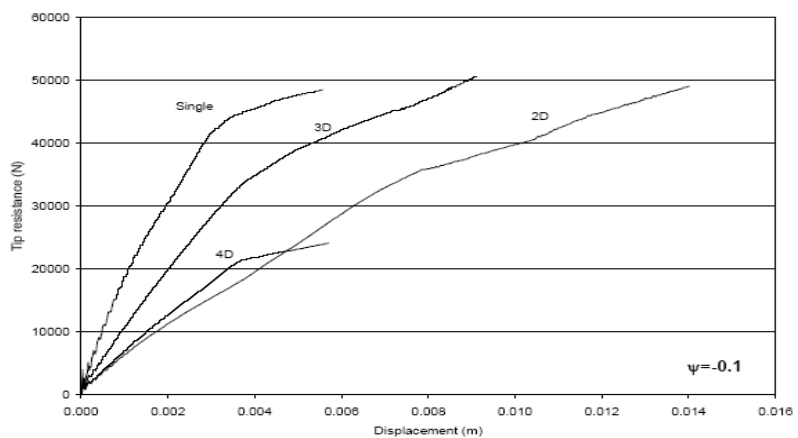
مقادیر کوچک جابه جایی های قائم متوالی به بالای گره های گروه شمع اعمال شدند تا مقاومت نوک و جلدی میکروپایل ها را در خاک اطراف برانگیخته کنند. نمودارهای مقاومت نوک و جلدی در برابر جابجایی ترسیم شد.

5-3-2- نتایج آنالیز گروه شمع قائم:

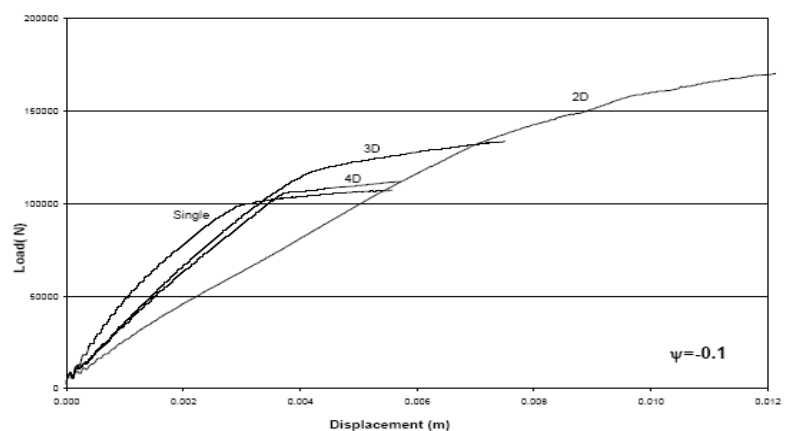
تغییرات مقاومت جلدی و نوک و کل یک شمع تکی در یک گروه برای پارامترهای حالت اولیه 0.1 , 0.0 , 0.1- به ترتیب در شکل نشان داده شده است. در همه موارد شیب اولیه مقاومت کل و جلدی گروه شمع صرف نظر از فاصله یا پارامتر حالت ، کمتر از شمع تکی است. رفتار با افزایش جابه جایی تغییر می یابد. همه منحنی های مقاومت جلدی و نوک و کل به یک مقدار نهایی که بزرگتر و یا کمتر از شمع تکی - بسته به فاصله و پارامتر حالت اولیه - می رسند. تغییرات مقاومت کل گروه شمع ثابت نبود. در بیشتر موارد مقاومت کل نهایی بزرگتر از 100% بود، اگرچه مقاومت کل نهایی گروه شمع با فاصله 2D تحت 0.1 , 0.0 y کمتر از 100% مشاهده شد. (نمودار 5-7 (c) ، 5-8 (c))



(a) تغییرات مقاومت جلدی با فاصله

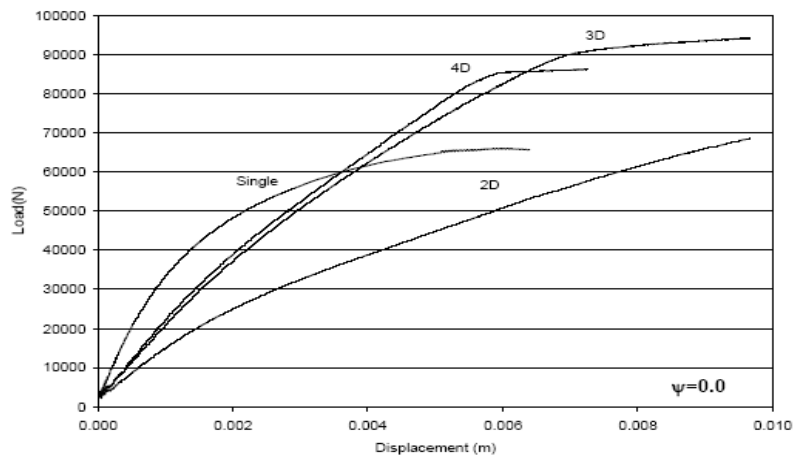


(b) تغییرات مقاومت نوک با فاصله

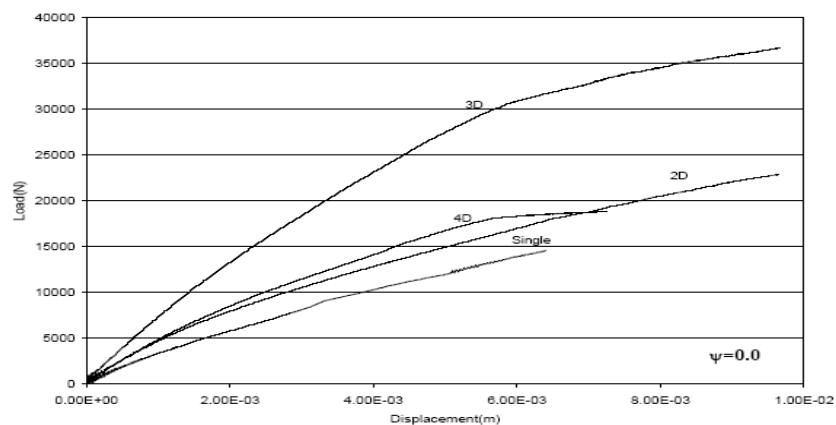


(c) تغییرات مقاومت کل با فاصله

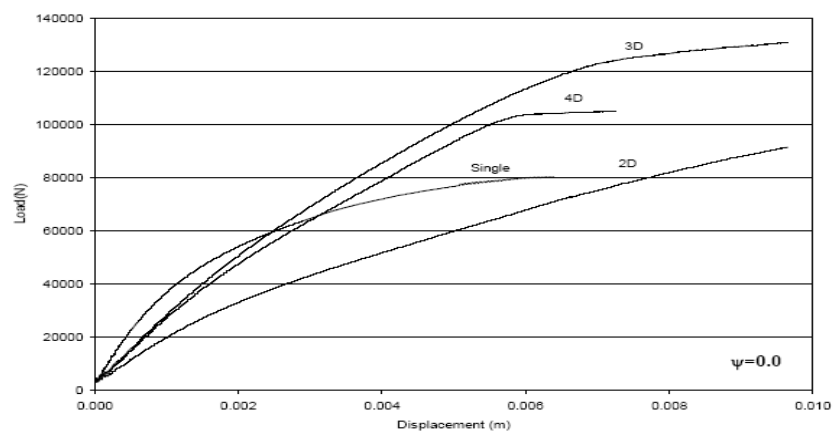
نمودار 5-6: رفتار گروه شمع ($\psi = -0.1$)



(a) تغییرات مقاومت جلدی با فاصله

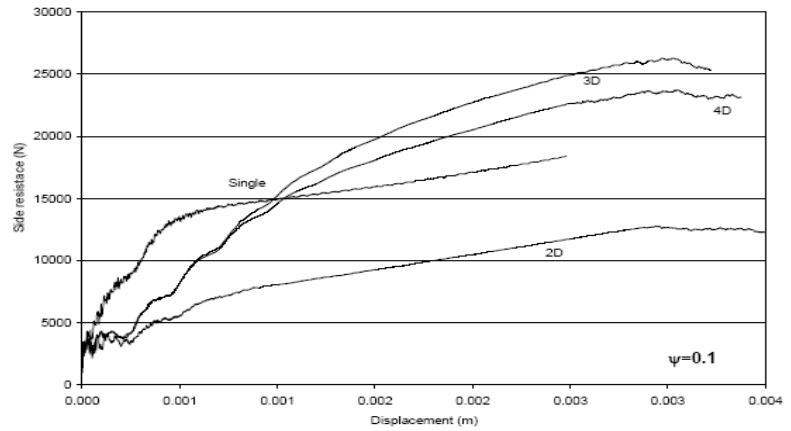


(b) تغییرات مقاومت نوک با فاصله

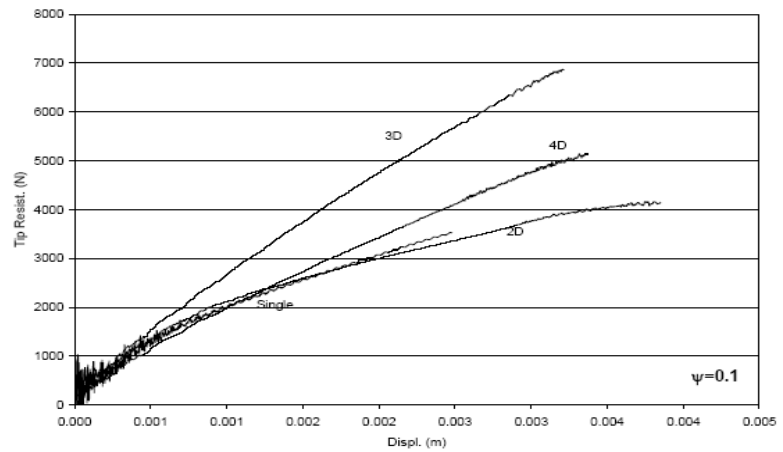


(c) تغییرات مقاومت کل با فاصله

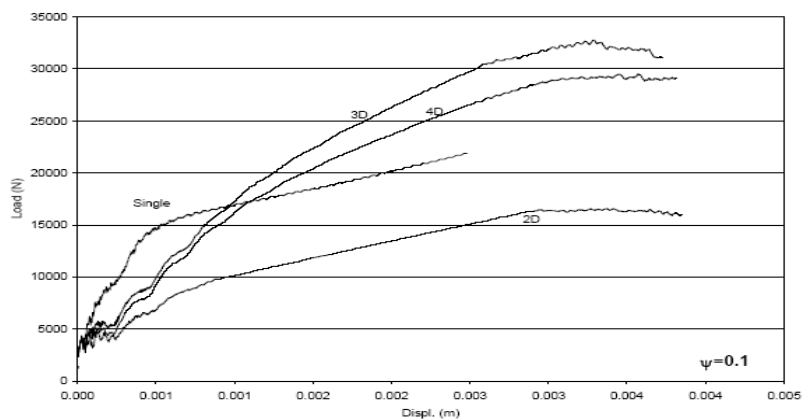
نمودار 5-7: رفتار گروه شمع ($\psi=0.0$)



(a) تغییرات مقاومت جلدی با فاصله



(b) تغییرات مقاومت نوک با فاصله



(c) تغییرات مقاومت کل با فاصله

نمودار 5-8: رفتار گروه شمع ($\psi=0.1$)

اثر گروه در مقاومت نوک در ماسه اتساعی کمتر از 100% یا یک توزیع منفی است (نمودار 5-6 (b)) و بیشتر از 100% یا یک توزیع مثبت در ماسه با 0.1 , 0.0 γ است. (نمودار 5-7 (b) ، 5-8 (b))

اثر گروه در مقاومت نهایی جلدی در ماسه اتساعی ($\gamma = -0.1$) بیشتر از 100% یا یک توزیع مثبت است (نمودار 5-6 (a) ، 5-7 (a) ، 5-8 (a)). مقاومت کل شمع تحت بارگذاری قائم، برابر با مجموع مقاومت نوک و جلدی است، بنابراین در عمل باید هر دو جزء بررسی شوند تا رفتار گروه شمع فهمیده شود. بیشتر مطالعات گذشته فقط مقاومت کل را در نظر گرفتند به جز مطالعه ای که Vesic انجام داد. (Vesic 1969).

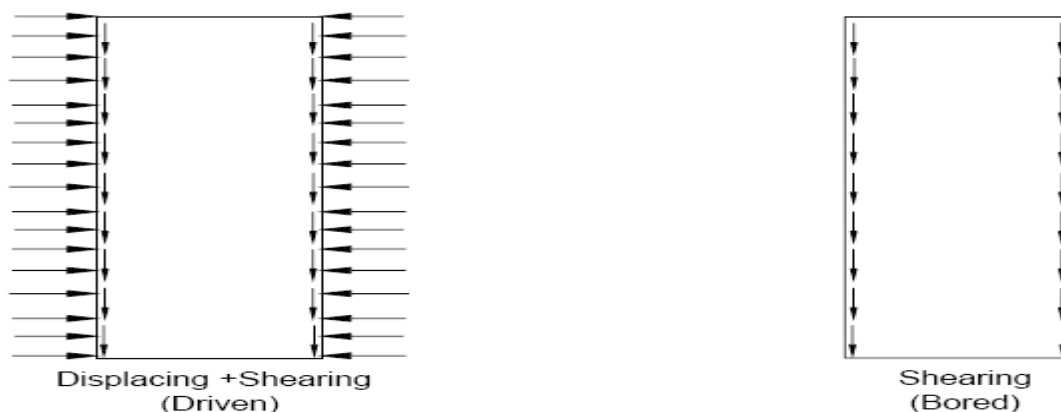
Vesic نتایج آزمایش، روی مدل گروه 4 و 9 شمعی را گزارش داد. مقاومت نوک و جلدی به طور جداگانه اندازه گیری شدند. Vesic نتیجه گرفت که وقتی ضریب کارایی شمع ها با فاصله نزدیک به هم بزرگتر از واحد بود چنین افزایشی در شفت و نه در مقاومت نوک ثبت شده است. این نتایج از نظر علمی و نیز توسط محققین بعدی تایید نشد.

5-3-2-3- مکانیسم پیشنهادی رفتار گروه شمع:

پیشنهاد می شود اثر گروه در مقاومت شمع با دو مکانیسم کنترل شود :

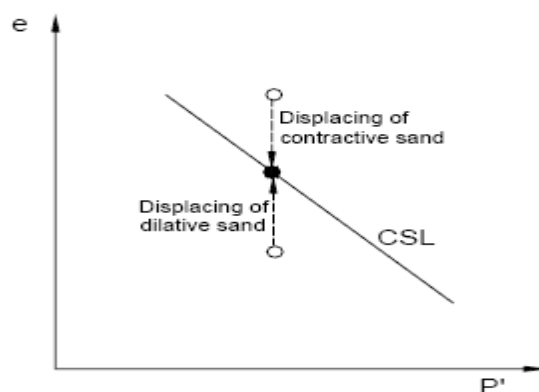
اثر تغییرات حجم یا اتساع و اثر همپوشانی تنش برشی شمع های مجاور

اثر اتساع روی رفتار گروه در شمع های کوبشی و شمع های درجا متفاوت است. در شمع های کوبشی یا جابه جاشونده، فرآیند نصب، جابه جایی قائم ماسه اطراف را نتیجه می دهد که با برش در شکل 4-9 نشان داده شده است.



شکل 5-8: طرحی از نصب شمع کوبیده شده و شمع درجا

جابه جایی اولیه باعث می شود ماسه اتساعی شل شود و به موجب آن پتانسیل ماسه برای اتساع کاهش می یابد. برعکس، جابه جایی، ماسه انقباضی را متراکم می کند و بنابراین پتانسیل آن برای کاهش بیشتر حجم، کم می شود. فرآیند جابه جایی می تواند در نمودار حالات در شکل 5-10 نشان داده شود.

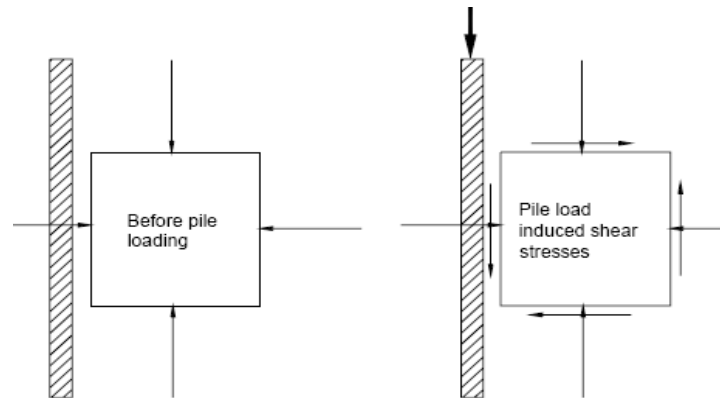


شکل 5-9: تغییرات حالت ماسه اطراف ناشی از کوبش شمع

بنابراین در جابه جایی گروه شمع، صرف نظر از حالت اولیه، برش پسین حالت ماسه را تغییر نمی دهد یا حجم خیلی زیاد تغییر می کند. بیشتر شمع های درجا با فواصل کمی در جهت قائم نصب می شوند (شکل 5-9). در اینجا شرایط مرزی شمع شبیه به شمع های درجا تحمیل می شود بنابراین در طول نصب تغییرات خیلی کمی در حالت اولیه رخ می دهد.

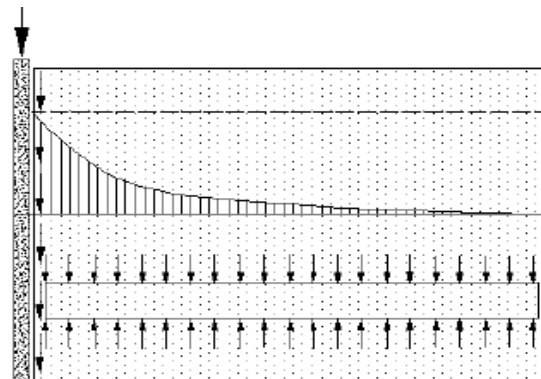
طبیعت انقباضی یا اتساعی حالت اولیه در افزایش مقاومت جلدی که در مورد شمع تکی بحث شد، اثر می گذارد. اگرچه در مورد گروه شمع با فاصله نزدیک به هم، محدودیت های هندسی اثر اتساع را از حالت شمع تکی تغییر می دهد. در مورد ماسه انقباضی، اثر گروه کاهش تنش نرمال و در نتیجه کاهش مقاومت جلدی در مقایسه با شمع تکی می باشد. خلاف این مطلب در مورد ماسه اتساعی درست خواهد بود. نتایج عددی دلالت بر این مشاهدات دارد (نمودار 5-6 (a)، 5-7 (a)، 5-8 (a)).

مکانیسم دیگر در مقاومت جلدی گروه شمع از همپوشانی تنش های برشی نتیجه می گیرد. همان طور که در شکل 5-11 نشان داده شده، بار شمع، تنش های برشی تولید می کند.



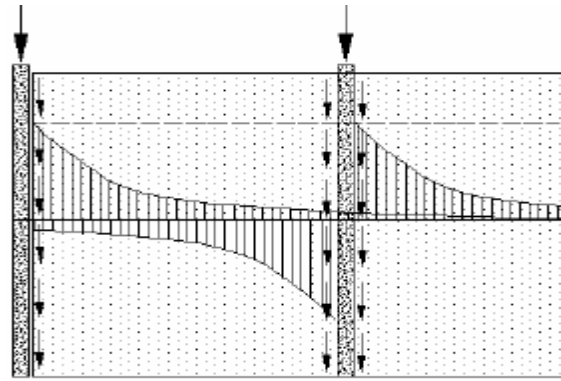
شکل 5-10: طرحی از تنش های برشی به وجود آمده از بار شمع

تغییرات تنش برشی با فاصله شعاعی در شمع تکی در شکل 5-12 نشان داده شده است. همان طور که دیده می شود تنش برشی با فاصله گرفتن از شمع تا نزدیک مقدار صفر کاهش می یابد.

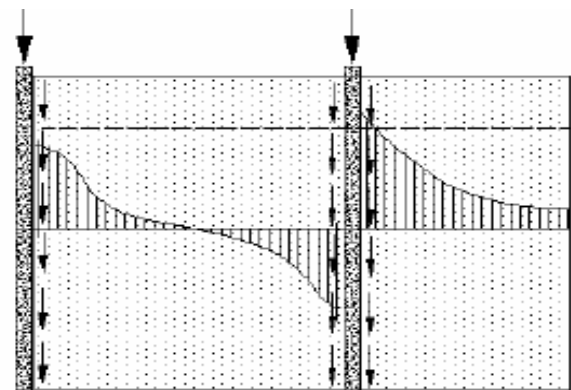


شکل 5-11: طرحی از توزیع تنش برشی شمع تکی در ماسه

تغییرات تنش برشی بطور جداگانه برای دو شمع با فاصله نزدیک به هم در شکل 5-13 (a) ترسیم شده است. مجموع این تنش های برشی جداگانه، تغییرات تنش برشی در شکل زیر را نتیجه می دهد.



(a) طرحی از تنش برشی ایجاد شده توسط دو شمع



(b) مجموع تنش برشی ایجاد شده توسط دو شمع

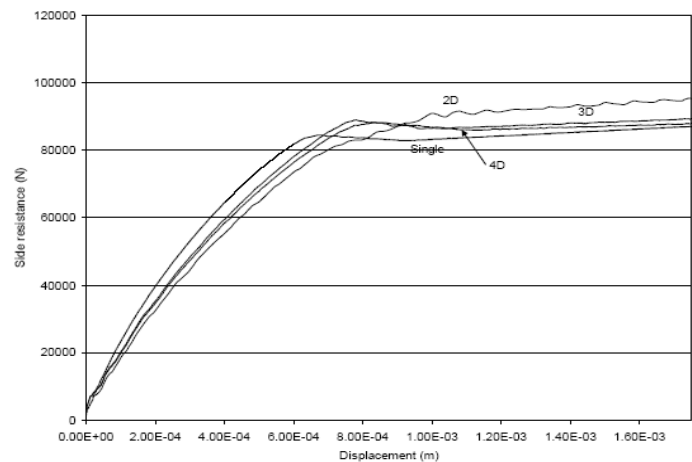
شکل 5-12: همپوشانی تنش برشی در ماسه اطراف گروه شمع

همان طور که مشاهده می شود، در قسمت مابین دو شمع، همپوشانی تنش های برشی، یکدیگر را متعادل می کنند اما در قسمت خارج از دو شمع، تنش برشی را افزایش می دهند. بنابراین همپوشانی تنش های برشی صرف نظر از حالت ماسه ممکن است افزایش مثبتی در مقاومت جلدی گروه شمع ایجاد کند.

برای بررسی مکانیسم همپوشانی توزیع تنش برشی بالا، آنالیز گروه در شمع های نصب شده در ماسه الاستیک (اثر اتساع صفر بود) انجام شد.

تغییرات مقاومت جلدی با فاصله شمع در نمودار 5-9 نشان داده شده، واضح است که گروه شمع مقاومت نهایی بالاتری نسبت به شمع تکی دارد. چون هیچ اتساعی وجود ندارد این افزایش باید ناشی از همپوشانی تنش ها

باشد. توجه شود که مقاومت نهایی در شمع های با قواصل نزدیک (2D) ، بالاترین مقدار را دارد و در شمع های با فاصله (3D),(4D) فقط افزایش متوسطی داریم. پس اثر تنش همپوشانی با افزایش فاصله شمع کم می شود.



نمودار 5-9: مقاومت جلدی ناشی از همپوشانی تنش

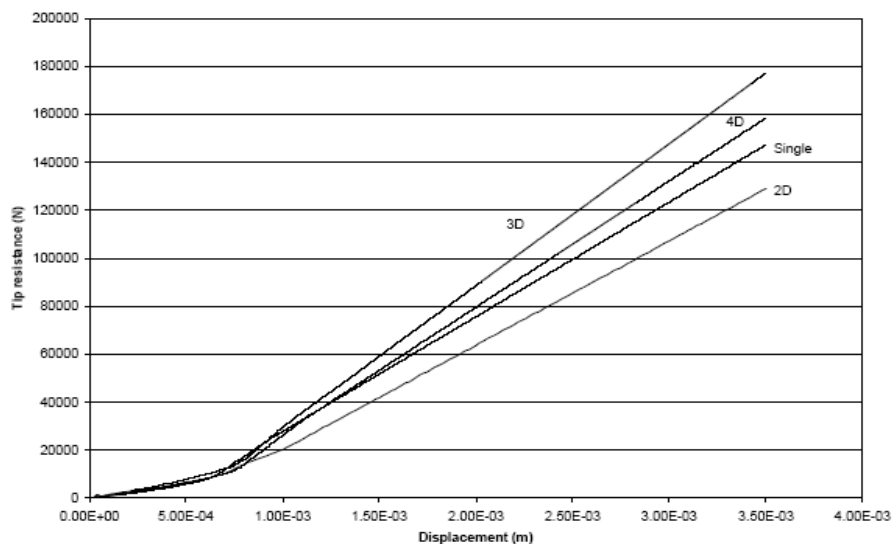
این بحث توسط آنالیزهای بالا تایید می شود و نشان می دهد مقاومت جلدی گروه شمع وابسته به اتساع (تغییر حجم) و مکانیسم همپوشانی تنش است. در مورد ماسه های اتساعی، هر دو مکانیسم اثر مثبتی دارند و مقاومت جلدی کل را افزایش می دهند (نمودار 5-6 (a)). در مورد ماسه های انقباضی افزایش و یا کاهش در مقاومت جلدی کل در گروه شمع وابسته به مکانیسم حاکم خواهد بود. باور این است که مکانیسم تغییر حجم (انقباضی) حاکم است و باعث توزیع منفی برای شمع های با فاصله نزدیک به هم (2D) می شود (نمودار 5-8 (a)). اگرچه مکانیسم همپوشانی تنش برای شمع های با فاصله (3D),(4D) حاکم است که منجر به اثر مثبت مقاومت جلدی می شود.

تغییرات مقاومت نوک گروه شمع در یک محیط نیمه الاستیک در نمودار 5-10 نشان داده شده است. با توجه به این نمودار، وقتی فقط توزیع همپوشانی تنش ها در نظر گرفته شود، مقاومت نوک در گروه شمع برای شمع های با فاصله (3D),(4D) مثبت و برای شمع های با فاصله (2D) منفی است.

حاکم بودن مکانیسم تغییر حجم یا همپوشانی تنش نیز در تغییرات مقاومت نوک کل در گروه شمع موثر است. وقتی شمع ها درون ماسه های اتساعی فشار داده می شوند، افزایش در تغییر حجم ممکن است منجر به کاهش مقاومت نوک شود. حال آنکه در مورد ماسه های انقباضی خلاف این موضوع صادق است.

در مورد مقاومت نوک در ماسه اتساعی، هر دو مکانیسم ترکیب شده و مقاومت نوک را کاهش می دهند) نمودار 5-6 (b).

(نمودار 5-7 (b) ، 5-8 (b)) نشان می دهند که اثر گروه در مقاومت نوک شمع در ماسه انقباضی بزرگتر از 100% یا نزدیک به آن است، با این وجود اگر اثر گروه توزیع شده با مکانیسم همپوشانی تنش، برای شمع های با فاصله (2D) منفی است، اثر گروه توزیع شده با مکانیسم اتساع، برای شمع ها در ماسه انقباضی مثبت است.



نمودار 5-10 : مقاومت نوک ناشی از همپوشانی تنش

3-3-5- آنالیز شبکه شمع های مایل:

شبکه میکروپایل شامل یک گروه از شمع های مایل درونی و بیرونی است.

همان طور که قبلاً گفته شد مطالعات مدل Lizzi افزایش مهمی در ظرفیت شمع ها (220%) در هنگامی که به صورت شبکه چیده شوند، نشان داد.

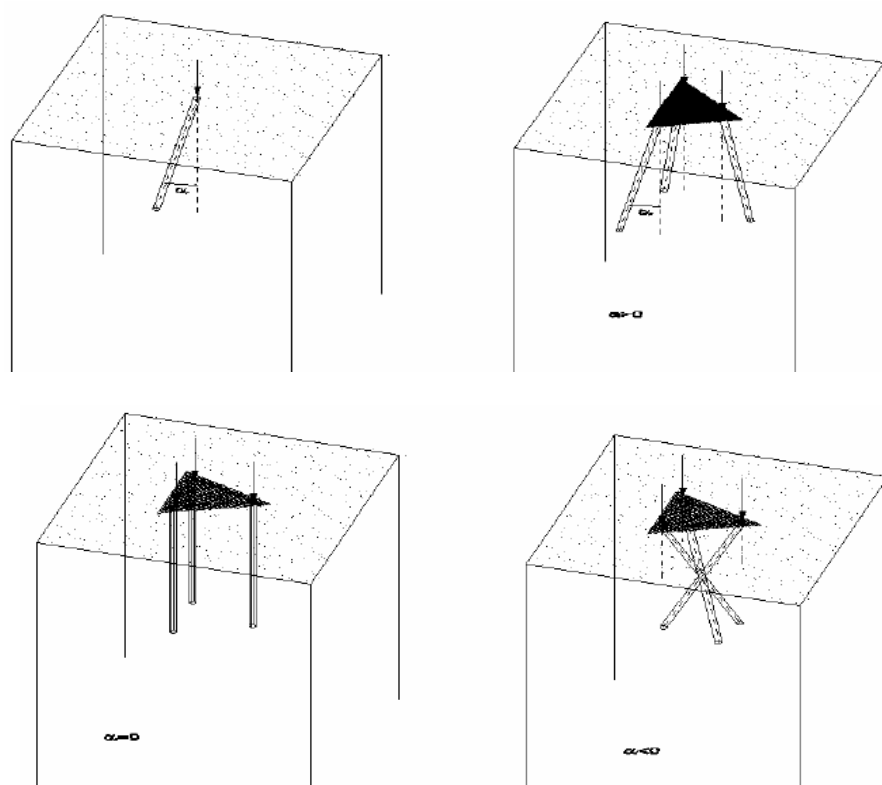
(Plumelle 1984)، اثر زاویه را در عملکرد گروه میکروپایل های رانده شده بررسی کرد و متوجه شد که انحراف میکروپایل ها منجر به اثر شبکه می شود که ظرفیت باربری نهایی را خیلی افزایش می دهد و جابه جایی گروه میکروپایل را کاهش می دهد. برعکس، آزمایش های بزرگ مقیاسی که در پروژه FOREVER انجام شد تنها افزایش متوسطی در ظرفیت باربری نشان داد.

در مورد گروه شمع های قائم، به جز آزمایش های سانتریفوژ، آزمایش های مدل و آزمایش های بزرگ مقیاس گذشته روی اثر شبکه میکروپایل، حالت ماسه را به طور صحیح در نظر نگرفتند. آزمایش های مدل روی ماسه ها تنها با تکرار دانسیته انجام شدند، چنین تکرارهایی برای بررسی حالت ماسه کافی نیست و منجر به مشاهدات متناقض شد. بنابراین در اینجا آنالیزهای عددی برای مطالعه عملکرد شبکه شمع ها در نظر گرفته شدند.

هر دو حالت شمع های مایل بیرونی و درونی بررسی شدند.

مدل شبکه:

شکل 5-14 یک شمع مایل و شبکه سه گروهی را نشان می دهد.



شکل 5-13: مدل شبکه شمع

وقتی زاویه انحراف $a=0$ است، شبکه مانند گروه قائم می باشد. $a > 0$ شامل شمع های مایل بیرونی و $a < 0$ شامل شمع های مایل درونی است. شمع ها در فاصله ثابت 400 mm در مرکز (2 برابر قطر) قرار گرفتند.

شبکه میکروپایل در عمل به عنوان میکروپایل های نوع 2 طبقه بندی می شوند با این حال در اینجا به منظور حفظ هماهنگی با مطالعات گذشته، میکروپایل های ساده نوع 1 انتخاب شدند.

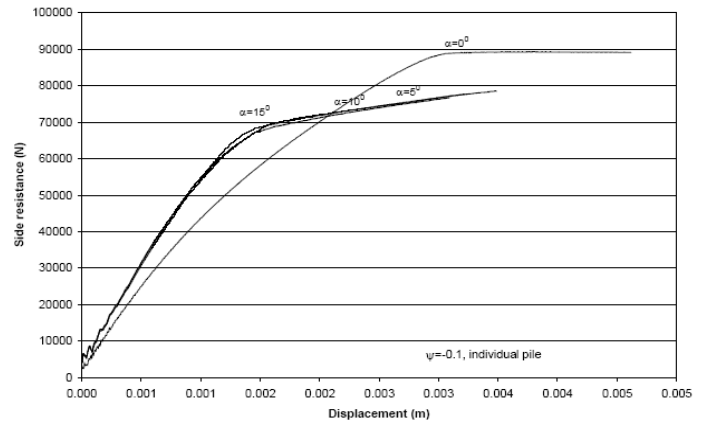
همانند موارد شمع تکی و گروه شمع، مقادیر خیلی کم سرعت های قائم متوالی (کمتر از 10^{-5}) به بالای گره های شبکه شمع اعمال شدند تا مقاومت نوک و جلدی میکروپایل در خاک اطراف برانگیخته شوند. مقاومت نوک و جلدی در برابر جابه جایی قائم ثبت شدند.

5-3-3-1- عملکرد شمع مایل تکی:

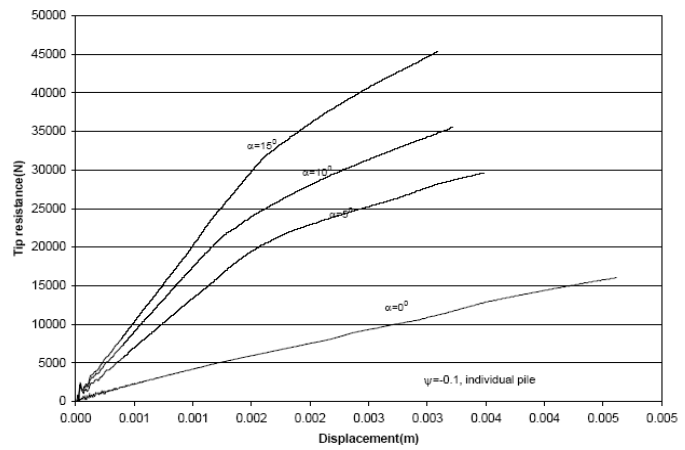
اولین آنالیز روی یک شمع مایل تکی انجام شد، زوایای انحراف $5^\circ, 10^\circ, 15^\circ$ و پارامتر حالت ماسه - 0.1 , 0.0 , 0.1 که به ترتیب متناظر با ماسه انقباضی، حالت بحرانی و اتساعی است، انتخاب شدند. تغییرات مقاومت جلدی، نوک و کل با جابه جایی در شمع های مایل در نمودارهای 5-11 تا 5-13 نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود مقاومت نهایی کل شمع تکی با افزایش زاویه انحراف در دو حالت ماسه اتساعی ($y = -0.1$) و ماسه انقباضی ($y = 0.1$) افزایش می یابد (نمودار 5-11 (c) ، 5-12 (c) ، 5-13 (c)). استثنای این رفتار برای شمع با زاویه $5^\circ, 10^\circ$ در ماسه حالت بحرانی ($y = 0$) رخ داد.

مقاومت جلدی نهایی میکروپایل مایل در ماسه اتساعی کمتر از میکروپایل قائم است (نمودار 5-11 (c)). واضح است در ماسه اتساعی، مقاومت جلدی نهایی میکروپایل مایل خیلی با زاویه انحراف تغییر نمی یابد. برعکس، مقاومت جلدی نهایی میکروپایل مایل در ماسه انقباضی بزرگتر از میکروپایل قائم است (نمودار 5-13 (c)). به علاوه فهمیده می شود مقاومت جلدی نهایی با افزایش زاویه انحراف شمع افزایش می یابد. همچنین مقاومت جلدی نهایی شمع در ماسه حالت بحرانی نیز با افزایش زاویه انحراف شمع افزایش می یابد البته به استثنای زاویه $5^\circ, 10^\circ$.

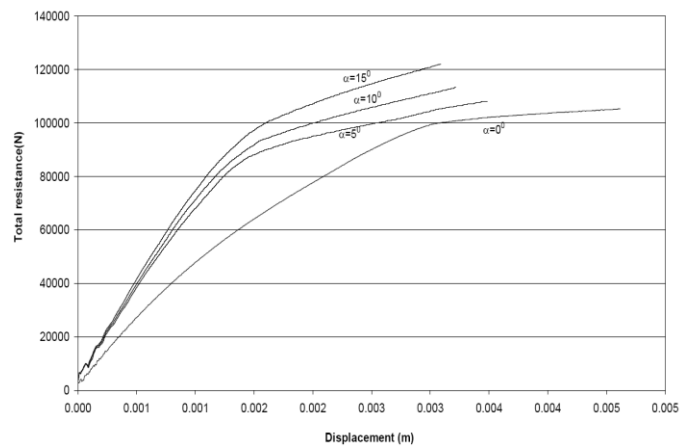
تغییرات مقاومت نوک با زاویه انحراف شمع در نمودارهای 5-11 (b) ، 5-12 (b) ، 5-13 (b) نشان داده شده اند. مقاومت نوک نهایی با زاویه انحراف شمع در همه حالات ماسه افزایش می یابد. استثنای این رفتار که قبلاً در مقاومت جلدی و کل نیز دیده شد در شمع های موجود در ماسه حالت بحرانی و با زاویه انحراف $5^\circ, 10^\circ$ می باشد.



(a) تغییرات مقاومت جلدی با زاویه انحراف شمع

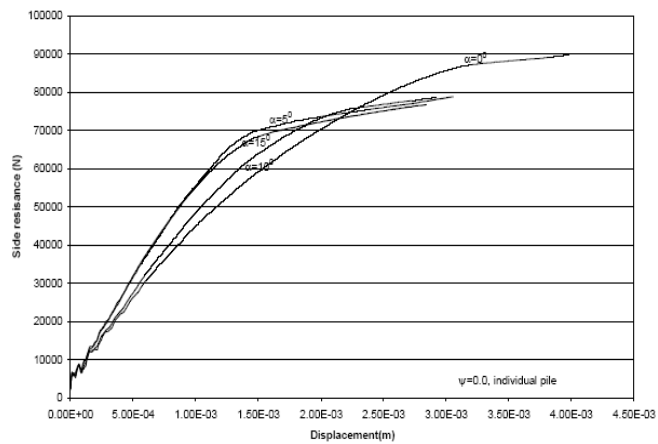


(b) تغییرات مقاومت نوک با زاویه انحراف شمع

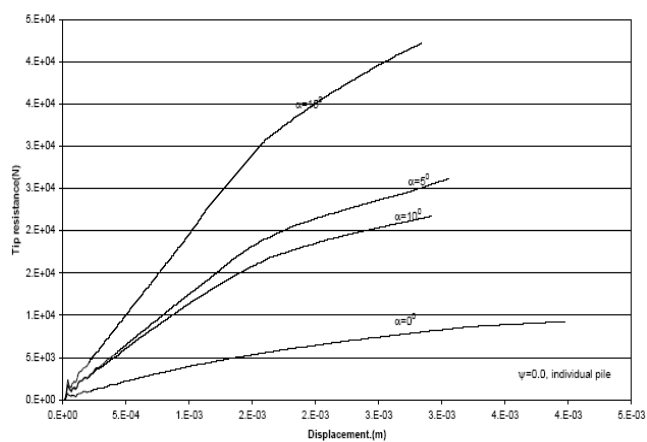


(c) تغییرات مقاومت کل با زاویه انحراف شمع

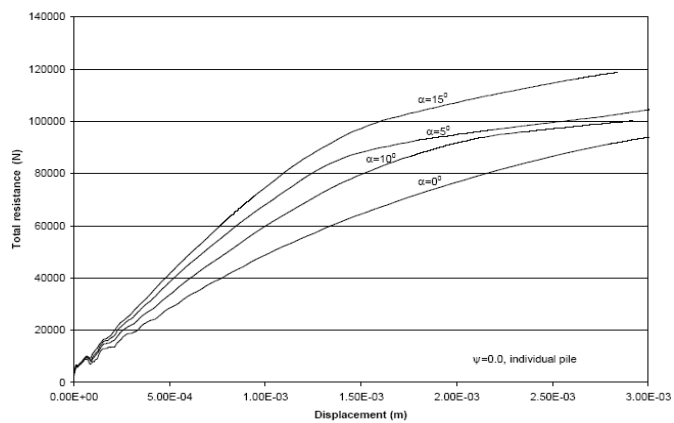
نمودار 5-11: اثر زاویه انحراف شمع تکی در حالت $\psi = -0.1$



(a) تغییرات مقاومت جلدی با زاویه انحراف شمع

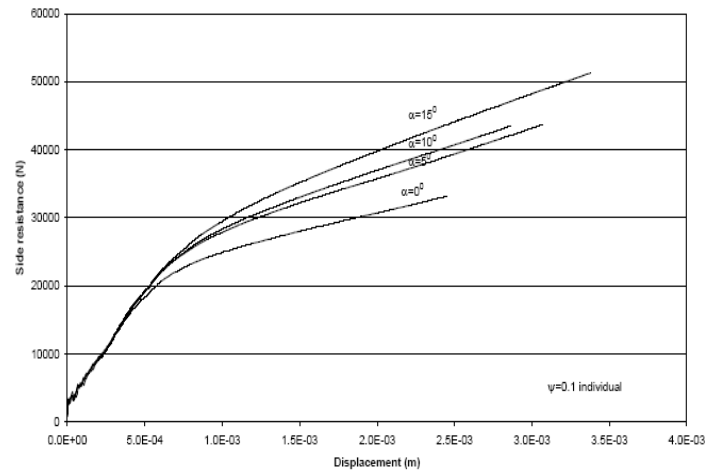


(b) تغییرات مقاومت نوک با زاویه انحراف شمع

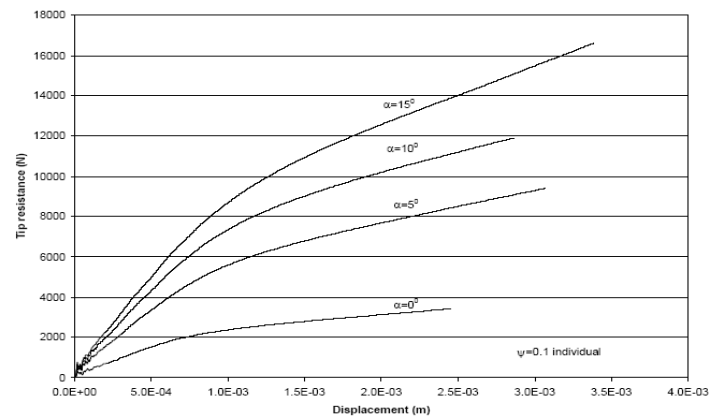


(c) تغییرات مقاومت کل با زاویه انحراف شمع

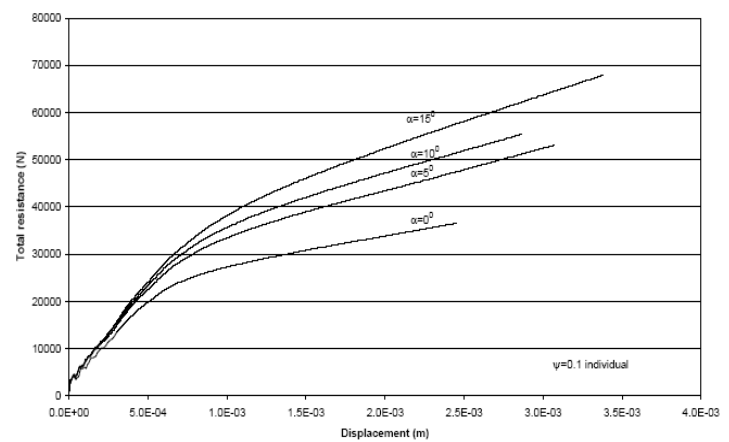
نمودار 5-12: اثر زاویه انحراف شمع تکی در حالت $\psi = 0.0$



(a) تغییرات مقاومت جلدی با زاویه انحراف شمع



(b) تغییرات مقاومت نوک با زاویه انحراف شمع



(c) تغییرات مقاومت کل با زاویه انحراف شمع

نمودار 5-13: اثر زاویه انحراف شمع تکی در حالت $\psi = 0.1$

5-3-3-2- عملکرد شبکه میکروپایل های بیرونی:

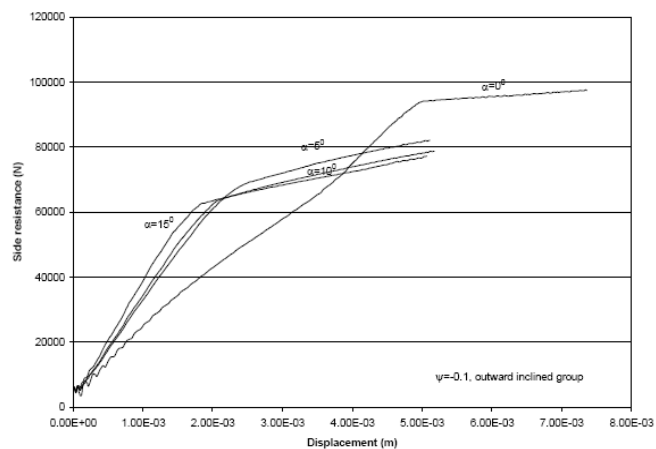
نمودارهای 14-5 تا 16-5 ، تغییرات مقاومت جلدی، نوک و کل با زاویه انحراف در شبکه میکروپایل های بیرونی را نشان می دهند.

مشاهده می شود در ماسه اتساعی،مقاومت جلدی شمع قائم ماکزیمم می باشد و با زاویه انحراف از 5° تا 15° مقدار کمی کاهش می یابد (نمودار 14-5 (a)).هر چند برای حالت ماسه یکسان همه منحنی های مقاومت کل در شبکه میکروپایل های مایل در بالای گروه میکروپایل های قائم ($a=0$) رسم شده اند.به علاوه مقاومت نهایی شمع با افزایش زاویه تا حدود 10° به مقدار بزرگتری می رسد اما افزایش بیشتر در زاویه انحراف، ظرفیت نهایی کل را کاهش می دهد(مانند مورد $a=15^{\circ}$).توجه کنید در مورد شمع تکی اینطور نبود و در همه موارد مقاومت کل با زاویه انحراف افزایش یافت.

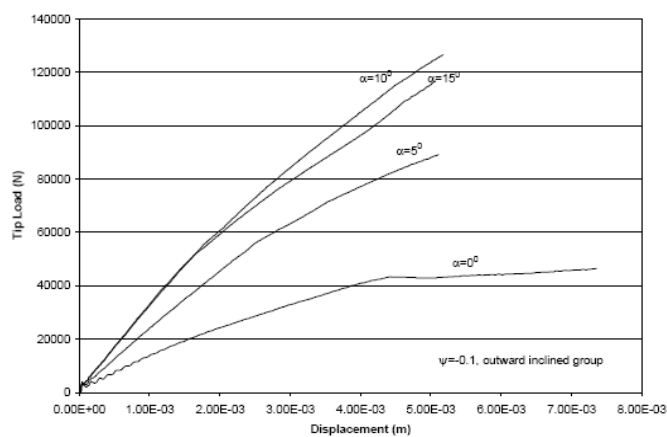
تغییرات مقاومت نوک شبیه به مقاومت کل است و ماکزیمم آن در زاویه انحراف 10° بدست آمد.

تغییرات مقاومت جلدی شمع مایل نصب شده در ماسه حالت بحرانی متفاوت از ماسه اتساعی(که در آن ماکزیمم مقاومت در زاویه انحراف 10° بدست آمده بود)می باشد(نمودار 15-5 (a)).

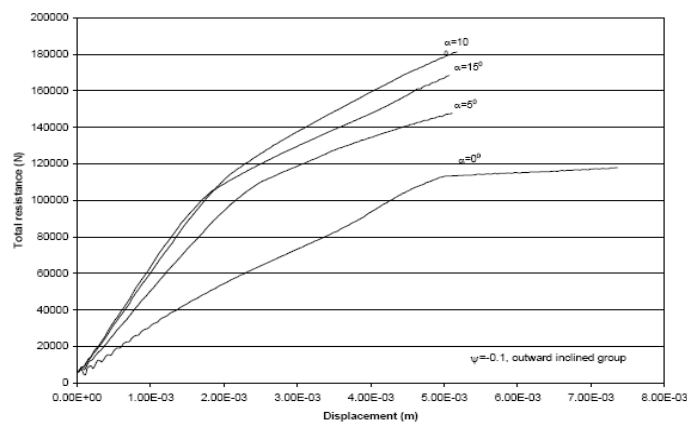
هرچند مقاومت کل و نوک شمع نصب شده در این ماسه،رفتار یکسانی با حالت ماسه اتساعی نشان می دهد.در مورد شمع های نصب شده در ماسه انقباضی،مقاومت جلدی ، نوک و کل باافزایش زاویه انحراف افزایش می یابند (نمودار 15-5(a),(b),(c)).



(a) تغییرات مقاومت جلدی با زاویه انحراف شمع

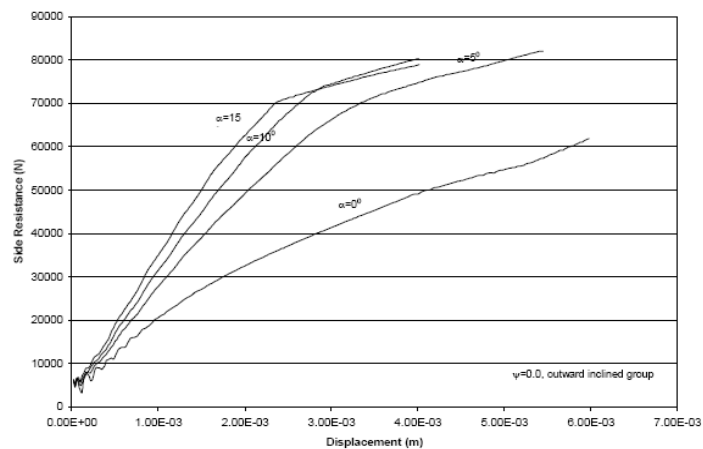


(b) تغییرات مقاومت نوک با زاویه انحراف شمع

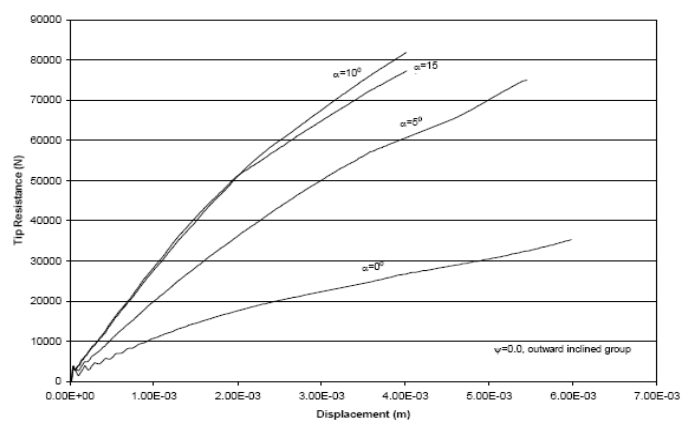


(c) تغییرات مقاومت کل با زاویه انحراف شمع

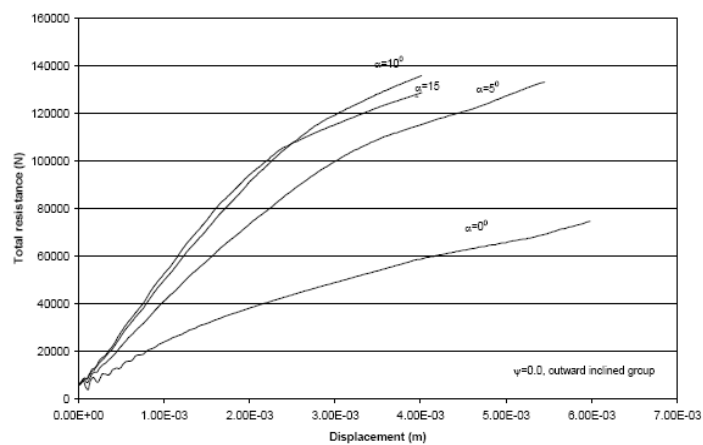
نمودار 5-14: اثر زاویه انحراف شبکه شمع مایل بیرونی در حالت $\gamma = -0.1$



(a) تغییرات مقاومت جلدی با زاویه انحراف شمع

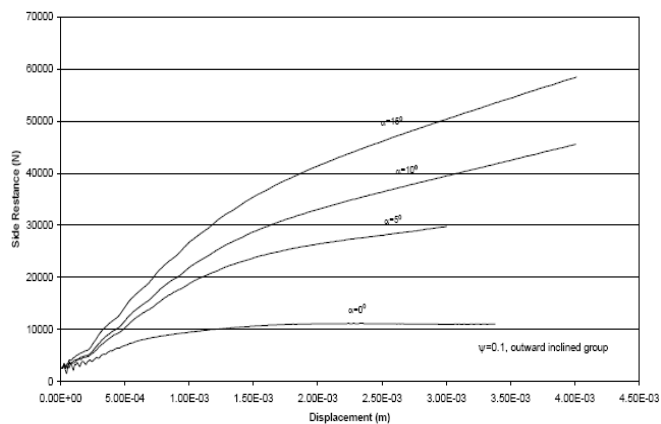


(b) تغییرات مقاومت نوک با زاویه انحراف شمع

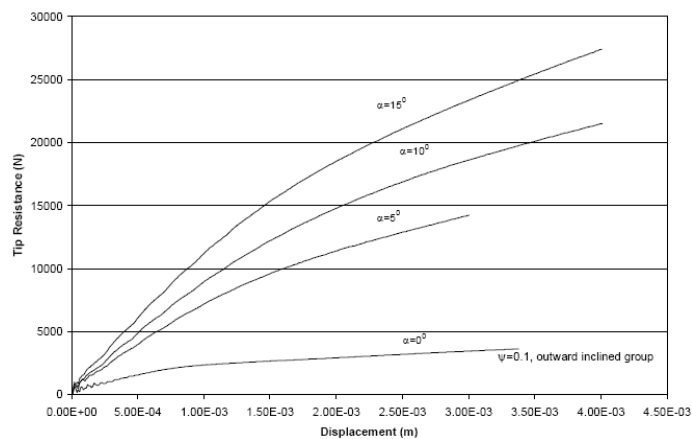


(c) تغییرات مقاومت کل با زاویه انحراف شمع

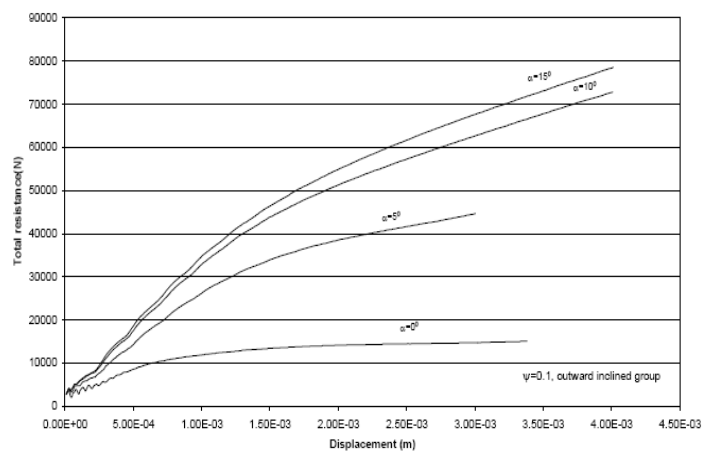
نمودار 5-15: اثر زاویه انحراف شبکه شمع مایل بیرونی در حالت $\gamma = 0.0$



(a) تغییرات مقاومت جلدی با زاویه انحراف شمع



(b) تغییرات مقاومت نوک با زاویه انحراف شمع



(c) تغییرات مقاومت کل با زاویه انحراف شمع

نمودار 5-16: اثر زاویه انحراف شبکه شمع مایل بیرونی در حالت $\gamma = 0.0$

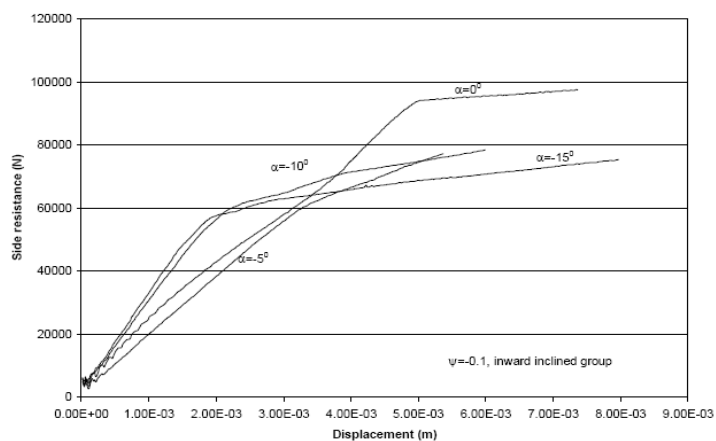
5-3-3-3- عملکرد شبکه میکروپایل های درونی:

شکل های 5-17 تا 5-19، تغییرات مقاومت جلدی، نوک و کل با زاویه انحراف در شبکه میکروپایل های درونی را نشان می دهند. همان طور که در موارد شمع تکی و شبکه میکروپایل های بیرونی مشاهده شد، مقاومت جلدی شمع قائم در میکروپایل های نصب شده در ماسه اتساعی ماکزیمم است. هرچند تغییرات مقاومت جلدی هیچ الگوی ثابتی با زاویه انحراف شمع نشان نمی دهد (نمودار 5-17 (a)).

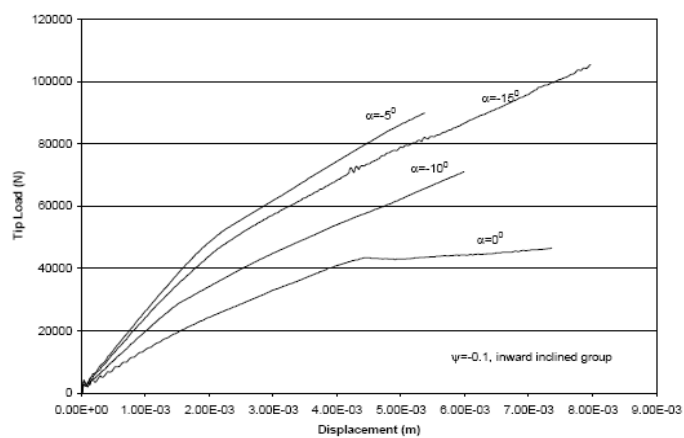
مقاومت کل شمع در ماسه اتساعی بدون تناقض با زاویه انحراف شمع افزایش یافت (نمودار 5-17 (c)). تغییرات مقاومت نوک با زاویه انحراف ثابت نبود (نمودار 5-17 (b)).

تغییرات مقاومت جلدی شمع مایل نصب شده در ماسه حالت بحرانی متفاوت از ماسه اتساعی (که در آن ماکزیمم مقاومت در زاویه انحراف 10° بدست آمده بود) می باشد (نمودار 5-18 (a)). تغییرات مقاومت نوک با زاویه انحراف در شمع های نصب شده در این ماسه ثابت نبود (نمودار 5-18 (b)).

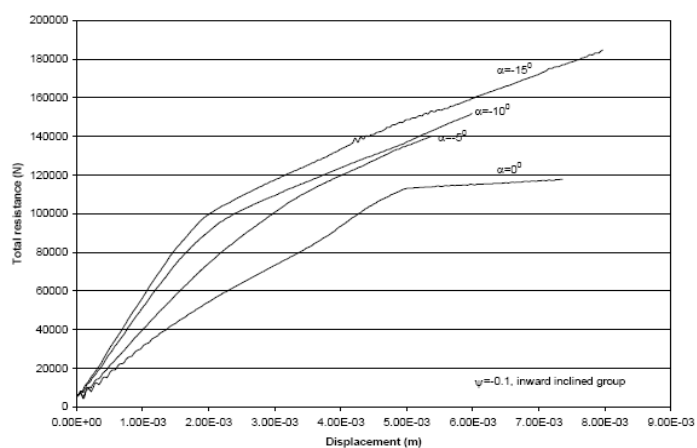
هرچند مقاومت کل شمع ها در ماسه حالت بحرانی رفتار یکسانی با ماسه اتساعی نشان داد. در مورد شمع های نصب شده در ماسه انقباضی، مقاومت جلدی، نوک و کل با افزایش زاویه انحراف افزایش یافتند (نمودار 5-17 (a), (b), (c)).



(a) تغییرات مقاومت جلدی با زاویه انحراف شمع

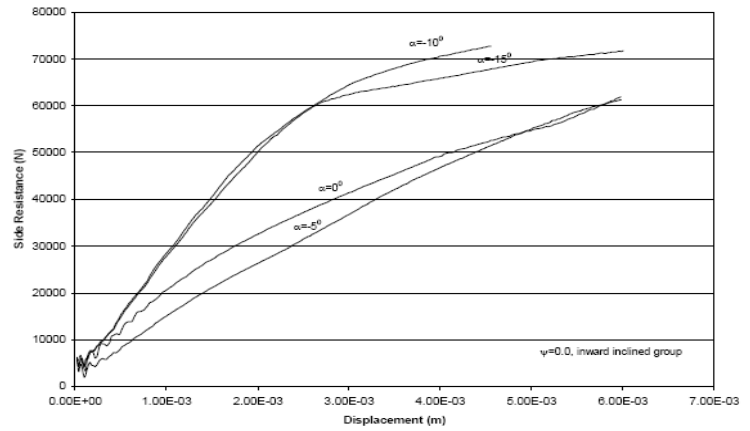


(b) تغییرات مقاومت نوک با زاویه انحراف شمع

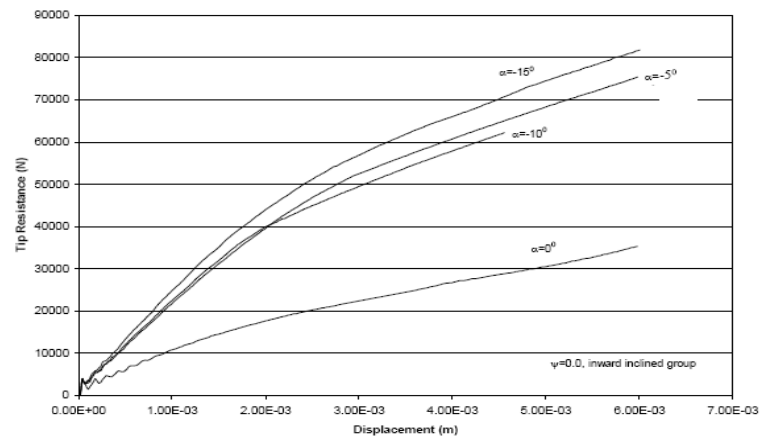


(c) تغییرات مقاومت کل با زاویه انحراف شمع

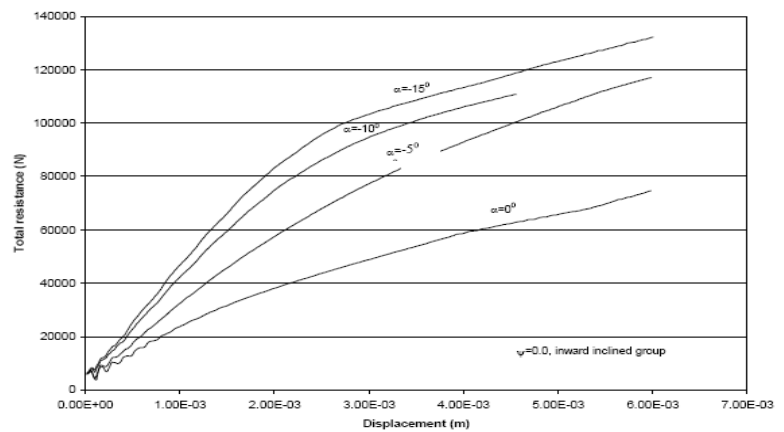
نمودار 5-17: اثر زاویه انحراف شبکه شمع مایل درونی در حالت $\psi = -0.1$



(a) تغییرات مقاومت جلدی با زاویه انحراف شمع

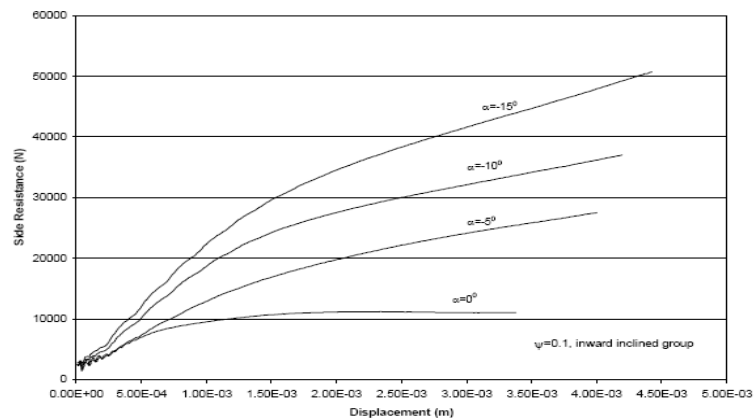


(b) تغییرات مقاومت نوک با زاویه انحراف شمع

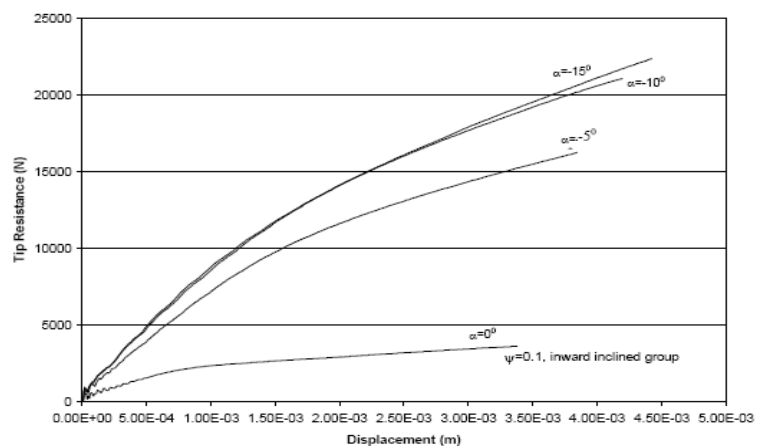


(c) تغییرات مقاومت کل با زاویه انحراف شمع

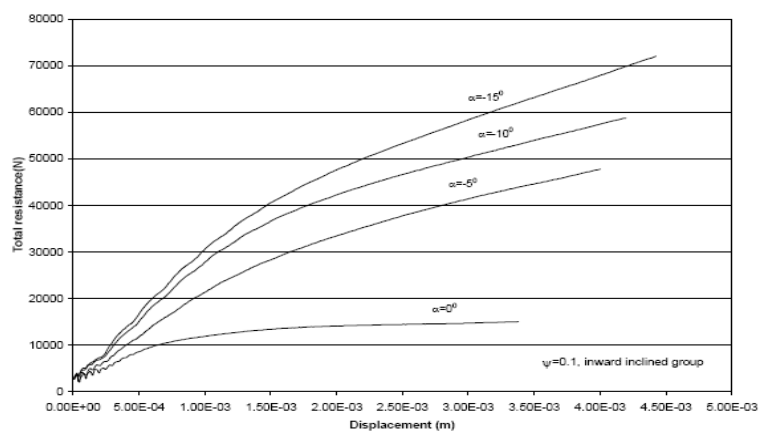
نمودار 5-18: اثر زاویه انحراف شبکه شمع مایل درونی در حالت $\psi = 0.0$



(a) تغییرات مقاومت جلدی با زاویه انحراف شمع



(b) تغییرات مقاومت نوک با زاویه انحراف شمع



(c) تغییرات مقاومت کل با زاویه انحراف شمع

نمودار 5-19: اثر زاویه انحراف شبکه شمع مایل درونی در حالت $\psi = 0.1$

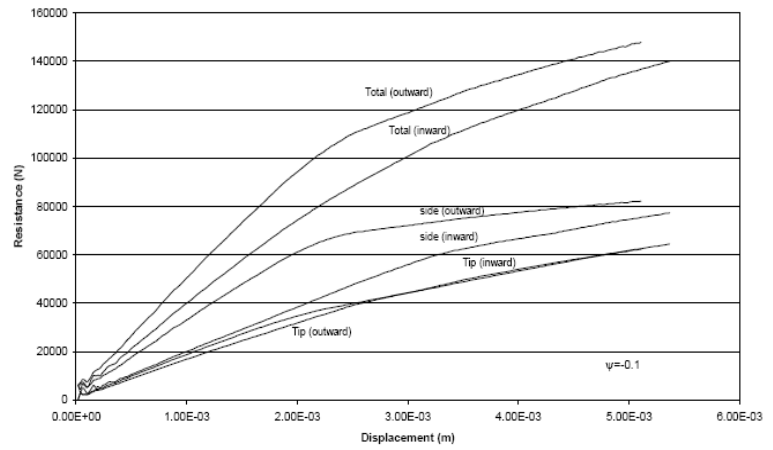
5-3-4- مقایسه عملکرد شبکه میکروپایل درونی و بیرونی:

نمودارهای 5-5، 20-5، 21-5، 22-5، مقایسه مقاومت جلدی، نوک و کل شمع های نصب شده در ماسه اتساعی، حالت بحرانی و انقباضی با زوایای انحراف یکسان و جهات شیب متفاوت در زوایای 5° ، 10° ، 15° را نشان می دهند.

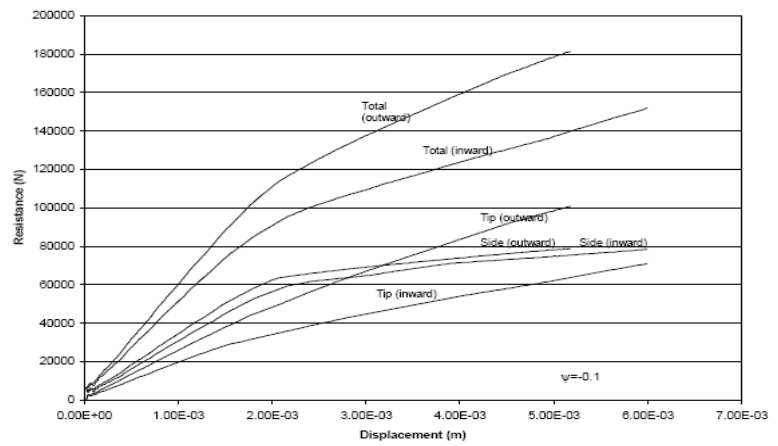
مشاهده می شود مقاومت جلدی، نوک و کل میکروپایل مایل بیرونی در همه حالات ماسه بطور اساسی بزرگتر از شبکه میکروپایل درونی می باشد.

البته حالت مقاومت جلدی شمع نصب شده در ماسه حالت بحرانی با زاویه انحراف 5° استثنا می باشد (نمودار 5-20 (a)).

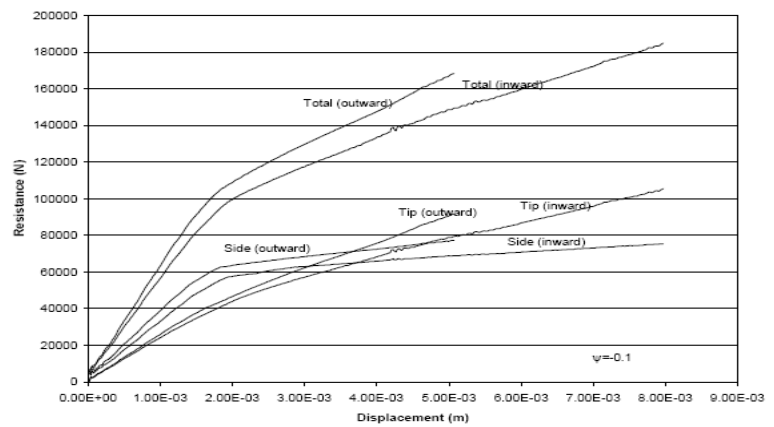
ملاحظه می شود که مقاومت نوک شمع نصب شده در ماسه انقباضی با زاویه انحراف 5° ، 15° ، 0° ماسه اتساعی با زاویه انحراف 5° و ماسه حالت بحرانی با زاویه انحراف 15° ، خیلی نزدیک به هم هستند. (نمودار 5-20 (a)، 5-21 (c)، 5-22 (a)، (c)).



(a) $a=5^\circ$

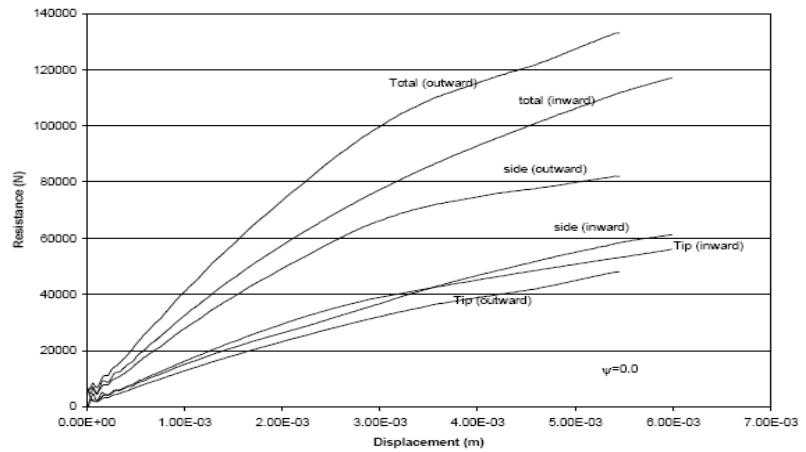


(b) $a=10^\circ$

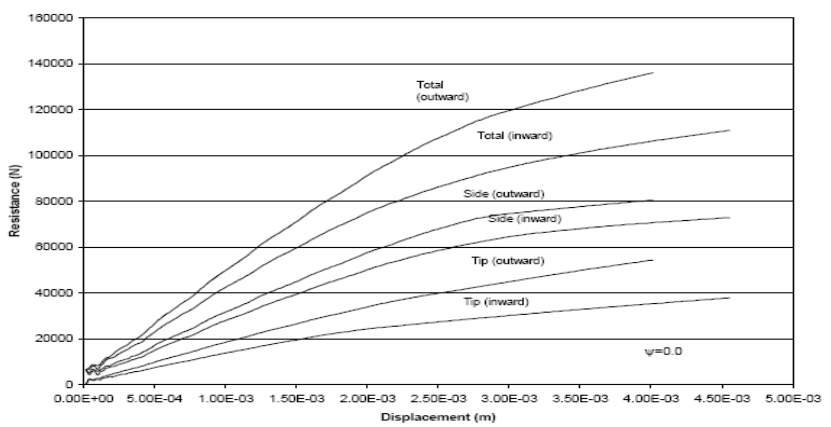


(c) $a=15^\circ$

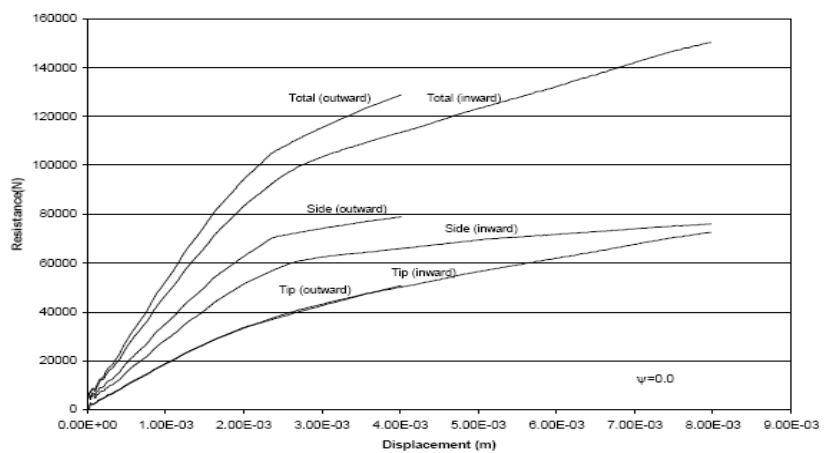
نمودار 5-20: مقایسه شبکه شمع مایل درونی و بیرونی در حالت $\psi = -0.1$



(a) $\alpha=5^\circ$

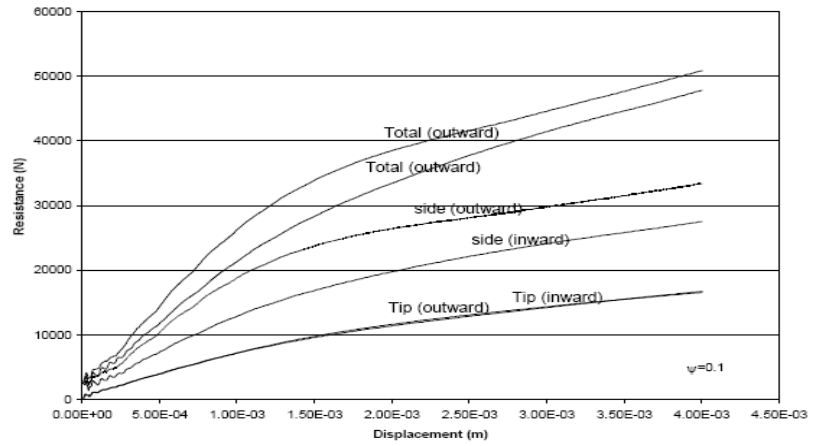


(b) $\alpha=10^\circ$

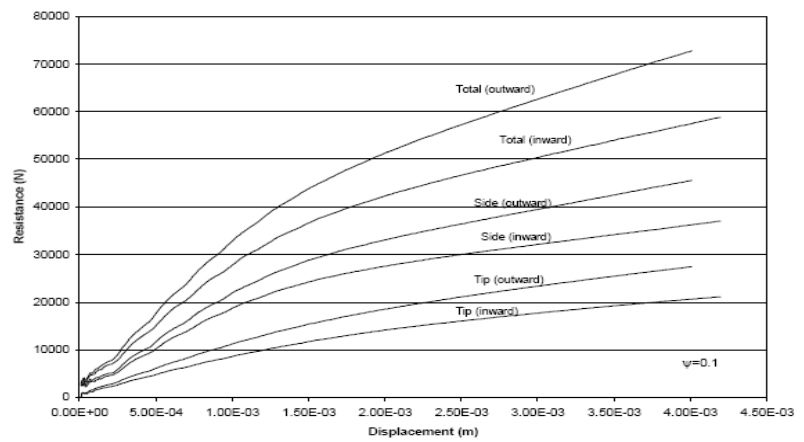


(c) $\alpha=15^\circ$

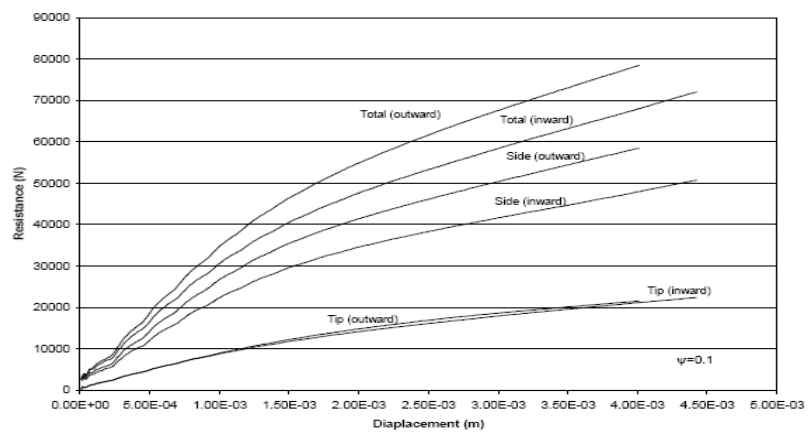
نمودار 5-21: مقایسه شبکه شمع مایل درونی و بیرونی در حالت $\psi = 0.0$



(a) $a=5^\circ$



(b) $a=10^\circ$



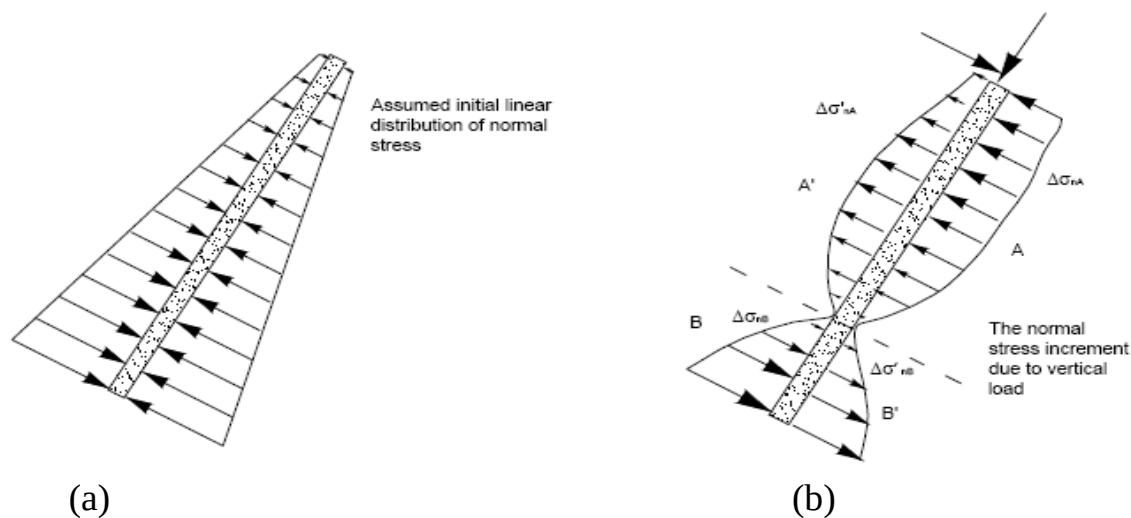
(c) $a=15^\circ$

نمودار 22-5: مقایسه شبکه شمع مایل درونی و بیرونی در حالت $\psi = 0.1$

5-3-5- مکانیسم های پیشنهادی انتقال بار در شمع های مایل و شبکه ای:

نتایج عددی یک شمع مایل و شبکه شمع نصب شده در ماسه تحت سه حالت اولیه اتساع، حالت بحرانی و انقباض منجر به بکاربردن مکانیسم های جدیدی برای توصیف انتقال بار شد.

یک بار هم مرکز قائم روی یک شمع مایل و شبکه شمع اعمال شد که می تواند به دو مولفه تجزیه شود: مولفه محوری موازی با محور شمع و مولفه جانبی عمود بر محور شمع. طرح توزیع تنش نرمال ناشی از بار محوری در شمع های مایل در شکل 5-15 (a) نشان داده شده است. برای سادگی توزیع خطی تقریب زده می شود. اعمال مولفه جانبی بار به شمع، توزیع تنش نرمال بالا را تغییر می دهد (شکل 5-15 (b)).



شکل 5-14: طرحی از توزیع تنش نرمال در یک شمع مایل ناشی از اعمال بار قائم

همان طور که در شکل 5-15 (b) مشاهده می شود، اطراف شمع به چهار ناحیه تقسیم شده است. نواحی A, B در حالت مقاوم (passive) فشار و نواحی A', B' در حالت محرک (active) هستند. توزیع تنش به علت تفاوت ضرایب فشار محرک و مقاوم زمین و گسترش درز در طول سطح مشترک متقارن نیست.

تغییر در توزیع تنش نرمال منجر به تغییرات متناظری در انتقال بار شمع می شود. ابتدا منجر به تغییر در مقاومت برشی در طول شمع خواهد شد و سپس حالت ماسه اطراف شمع را تغییر می دهد. ماسه اتساعی در ناحیه A به علت لهیده شدن، سست می شود اما در ماسه انقباضی در نواحی A, B بیشتر متراکم می شود. برعکس، هم در ماسه اتساعی و هم در ماسه انقباضی در نواحی A', B' سست می شود. تغییر حالت ماسه منجر به تغییرات اضافی در طول شمع می شود.

چون ضریب فشار مقاوم زمین خیلی بزرگتر از ضریب فشار محرک زمین است، تنش نرمال درون نواحی طبق زیر تغییر می یابد:

$$|\Delta\sigma_{nA}| : \text{قدر مطلق افزایش تنش نرمال اعمالی به شمع در ناحیه A} \quad |\Delta\sigma_{nA}| \geq |\Delta\sigma_{nA'}|$$

$$|\Delta\sigma_{nA'}| : \text{قدر مطلق افزایش تنش نرمال اعمالی به شمع در ناحیه A'} \quad |\Delta\sigma_{nB}| \geq |\Delta\sigma_{nB'}|$$

$$|\Delta\sigma_{nB}| : \text{قدر مطلق افزایش تنش نرمال اعمالی به شمع در ناحیه B}$$

$$|\Delta\sigma_{nB'}| : \text{قدر مطلق افزایش تنش نرمال اعمالی به شمع در ناحیه B'}$$

در نتیجه مقاومت جلدی ناشی از تغییرات تنش نرمال به دلیل مولفه جانبی بار، افزایش خواهد یافت. بار جانبی یک مولفه از بار قائم اعمال شده به شمع است که با زاویه انحراف کنترل می شود. افزایش در زاویه انحراف منجر به مولفه جانبی بزرگتری و کاهش متناظری در بار محوری اعمالی به شمع می شود. هر چند افزایش بزرگ در زاویه انحراف، عمق شمع را کاهش خواهد داد و نیروی قائم کل اعمال شده به شمع و مقاومت جلدی کاهش می یابد.

همچنین تغییر حالت ماسه ناشی از بار جانبی، مقاومت جلدی در طول شمع را تغییر خواهد داد. وقتی ماسه اطراف انقباضی است تنش نرمال و مقاومت جلدی کاهش می یابند و هنگامی که ماسه اطراف اتساعی است تنش نرمال و مقاومت جلدی افزایش می یابند.

نمودار 5-11 (a) نشان می دهد مقاومت جلدی شمع هنگامی که شمع بطور مایل در ماسه اتساعی نصب شده، کاهش می یابد. این کاهش به دلیل مولفه جانبی بار قائم اعمالی به شمع های مایل است که خاک اطراف را اتساعی و سست می کند. بنابراین مقاومت جلدی نهایی شبکه شمع مایل کمتر از گروه شمع قائم است. شرایط مشابهی در ماسه با $\gamma = 0.0$ رخ داد (نمودار 5-12 (a)).

در مورد ماسه انقباضی نیز، مولفه جانبی بار قائم اعمالی به شمع های مایل، ماسه را در نواحی A, B متراکم می کند. بنابراین برش و انقباض ماسه متراکم اطراف شمع مایل کمتر از برش و انقباض ماسه متراکم اطراف شمع قائم است که باعث می شود مقاومت جلدی نهایی شمع مایل بزرگتر از شمع قائم باشد (نمودار 5-13 (a)).

تغییرات مقاومت جلدی نهایی با زاویه انحراف در شبکه میکروپایل مایل بیرونی و درونی مانند شمع تکی اما با استثنای کمی در ماسه حالت بحرانی است که قبلاً ملاحظه شد. خلاصه ای از رفتار مشاهده شده در جدول 5-3 آورده شده است:

	حالت ماسه		
	$y = -0.1$	$y = 0.0$	$y = 0.1$
شمع مایل تکی	کاهش	افزایش	افزایش
شبکه شمع مایل بیرونی	کاهش	افزایش	افزایش
شبکه شمع مایل درونی	کاهش	متغیر	افزایش

جدول 5-3: تغییرات مقاومت جلدی نهایی با زاویه انحراف شمع

مقاومت نوک میکروپایل مایل با زاویه انحراف، بدون در نظر گرفتن حالت ماسه و هندسه نصب شمع، افزایش می یابد (نمودارهای 5-11، 5-12، 5-13، 5-14، 5-15، 5-16، 5-17، 5-18، 5-19 (b)).

فقط استثنای کمی در شبکه میکروپایل مایل درونی در ماسه اتساعی و در ماسه حالت بحرانی رخ می دهد (نمودار 5-14، 5-15، 5-17، 5-18 (b)).

مقاومت جلدی گروه میکروپایل بیرونی با زاویه انحراف مفروض، بدون در نظر گرفتن حالت ماسه وهندسه شمع،همیشه بزرگتر از مقاومت جلدی گروه میکروپایل درونی است (نمودارهای 5-5، 5-20، 21-22). یک مکانیسم محتمل برای این مشاهده در ادامه شرح داده شده است.

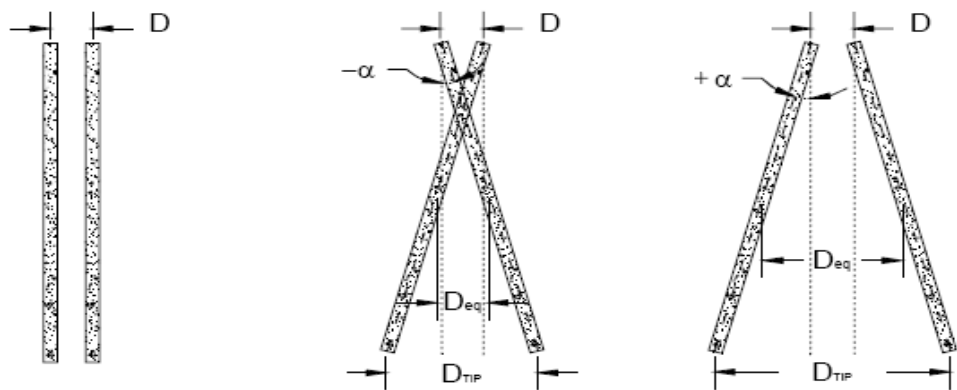
شکل 5-16 دو شمع با آرایش درونی و بیرونی را نشان می دهد.فضای بین نقاط میانی D_{min} و نوک D_{tip} شمع های مایل وابسته به فاصله D شمع های قائم است.

$$D < D_{mid}^{-\alpha} < D_{mid}^{\alpha}$$

$$D < D_{tip}^{-\alpha} < D_{tip}^{\alpha}$$

$-a$: یعنی گروه شمع با زاویه a به سمت درون مایل شده است.

$+a$: یعنی گروه شمع با زاویه a به سمت بیرون مایل شده است.



شکل 5-15 : فاصله شمع قائم و شبکه شمع های مایل درونی و بیرونی

همان طور که قبلا در مورد یک شمع مایل ذکر شد، مولفه جانبی ناشی از انحراف میکروپایل تغییراتی در تنش نرمال و حالت ماسه ایجاد می کند. در مورد ماسه اتساعی، این تغییرات اثر مفید اتساع تولید شده از برش را کاهش می دهد. چون D_{min} در گروه شمع مایل درونی کمتر است، این مقدار کاهش در گروه شمع مایل بیرونی کمتر از گروه شمع مایل درونی است. بنابراین ماسه درون گروه شمع مایل درونی نسبت به بیرونی، بعد از کاهش اثر مفید اتساع تولید شده از برش، بیشتر مستعد اتساع است.

همچنین ماسه انقباضی درون گروه شمع مایل درونی نسبت به بیرونی بیشتر مستعد تراکم است. این تراکم مقاومت جلدی نهایی را افزایش می دهد. هرچند ماسه انقباضی درون گروه شمع مایل درونی به همان اندازه مستعد انقباض ناشی از برش نیز است. انقباض مقاومت جلدی نهایی را کاهش می دهد. نهایتاً مقاومت جلدی نهایی با افزایش تولید شده از تراکم و کاهش تولید شده از انقباض، متعادل می شود. از نمودار 5-22 فهمیده می شود که مقاومت جلدی نهایی ممکن است هنوز با انقباض منجر به کاهش تنش نرمال در طول شمع در عوض متراکم شدن ماسه انقباضی که منجر به افزایش تنش نرمال و مقاومت برشی در طول شمع می شود، حکمفرما باشد. بنابراین گروه شمع مایل درونی با D_{min} کمتر، بیشتر مستعد کاهش تنش نرمال و مقاومت جلدی نهایی نسبت به گروه شمع مایل بیرونی با فاصله نقاط میانی بیشتر، می باشد.

فاصله نوک و مقدار نسبی فاصله شمع در گروه شمع مایل درونی و بیرونی وقائم مانند مورد مقاومت جلدی است. بنابراین مقاومت نوک خیلی در گروه شمع مایل درونی و بیرونی فرق نخواهد کرد.

پژوهش آینده :

در پژوهش آینده، عملکرد گروهی میکروپایل ها هم به روش تجربی و هم به روش عددی مورد بررسی قرار می گیرد. برای این منظور در یک سایت نمونه ساحلی، تست بارگذاری بر روی یک گروه شامل سه یا چهار میکروپایل طراحی و اجرا می شود و نتایج حاصل از این تست با نتایج حاصل از تحلیل های عددی مقایسه می شود و سعی می گردد علاوه بر تبیین کیفیت عملکرد گروهی میکروپایل ها در صورت امکان ضریب گروه با دقت مناسب ارائه شود.

پیوست

فهرست شکل ها :

صفحه	فصل اول
2	شکل 1-1 : مراحل اجرای میکروپایل با استفاده از غلاف
3	شکل 2-1 : آرایش کلاسیک ریشه شمع ها " root pile " برای بهسازی خاک زیر پی
5	شکل 3-1 : شبکه میکروپایل های مشبک متداول
7	شکل 4-1 : میکروپایل های نوع 1 (به طور مستقیم بارگذاری شده)
7	شکل 5-1 : میکروپایل های نوع 2 - شبکه میکروپایل های مشبک و توده خاک مسلح شده
8	شکل 6-1 : آرایش میکروپایل های نوع 1
9	شکل 7-1 : آرایش میکروپایل های نوع 2
11	شکل 8-1 : طبقه بندی میکروپایل بر اساس روش تزریق
14	شکل 9-1 : طبقه بندی کاربرد میکروپایل ها
16	شکل 10-1 : ترمیم و پایدار سازی برج بلند و باریک " Al Hadba " در شهر موصل عراق در سال 1982.
17	شکل 11-1 : میکروپایل ها جهت حفاظت پی در پروژه های حمل و نقل
18	شکل 12-1 : بهسازی پل رودخانه pocomoke در Maryland (سال 1990)
19	شکل 13-1 : آرایش میکروپایل مورب در پایدار سازی شیروانی

فصل دوم

26	شکل 1-2 : مراحل اجرای میکروپایل با استفاده از غلاف گذاری
31	شکل 2-2 : روشهای حفاری لایه های سربار (Bruce, 1988)
35	شکل 3-2 : تاثیر میزان آب بر مقاومت فشاری دوغاب و خاصیت سیالیت و کارایی آن
36	شکل 4-2 : انواع متفاوت میکسرهای کلوئیدی
37	شکل 5-2 : انواع مختلف میکسرهای پدالی
40	شکل 6-2 : اصول روش tube a manchette در پس تزریق

- 41 شکل 2-7 : استفاده از لوله آرماتور به عنوان سیستم پس تزریق tube a manchette
- 43 شکل 2-8 : تقویت با چند میلگرد به همراه جداکننده مرکزی
- 44 شکل 2-9 : جزئیات میلگرد تماماً آجدار Dywidag (DSI , 1993)
- 48 شکل 2-10 : جزئیات ریزشمع مرکب ظرفیت بالای نوع B1
- 50 شکل 2-11 : الف- شمعهای GEWI با محافظت دوغابی ، ب- محافظت خوردگی دوپل (Courtesy DSI)

فصل سوم

- 57 شکل 3-1 : شرح SLD و LFD و ارتباط بین آنها
- 67 شکل 3-2 : جزئیات یک ریزشمع با سیستم تقویتی مرکب
- 73 شکل 3-3 : جزئیات انتقال بار از طریق طول غوطه ور غلاف
- 73 شکل 3-4 : تغییر در بار انتقالی از طریق طول غوطه ور غلاف در حین افزایش بار
- 77 شکل 3-5 : جزئیات اتصال شمع به پی (کلاهک)
- 78 شکل 3-6 : جزئیات اتصال شمع به پی (کلاهک)
- 78 شکل 3-7 : جزئیات اتصال شمع به پی (کلاهک)
- 79 شکل 3-8 : جزئیات اتصال شمع به پی (کلاهک)
- 79 شکل 3-9 : جزئیات اتصال شمع به پی جدید -بارگذاری معتدل
- 80 شکل 3-10 : جزئیات اتصال شمع به پی جدید -بارگذاری سنگین
- 80 شکل 3-11 : جزئیات اتصال شمع به پی موجود -فقط بار فشاری

فصل چهارم

- 90 شکل 4-1 : آرایش آزمون بار فشاری
- 90 شکل 4-2 : آرایش آزمون بار کششی
- 91 شکل 4-3 : آزمون بار جانبی

فصل پنجم

- 96 شکل 5-1: نمایی از پلان و مقطع پی مقاوم سازی شده با سیستم میکروپایل
- 97 شکل 5-2: مش بندی المان محدود با شرایط مرزی
- 99 شکل 5-3: طرح آزمایش میکروپایل (FOREVER,2002)
- 101 شکل 5-4: مش finite difference
- 102 شکل 5-5: توزیع نسبت تخلخل مدل ماسه TOYOURA برای $y=0$
- 104 شکل 5-6: توزیع تنش نرمال
- 106 شکل 5-7: آرایش گروه شمع
- 111 شکل 5-8: طرحی از نصب شمع کوبیده شده و شمع درجا
- 112 شکل 5-9: تغییرات حالت ماسه اطراف ناشی از کوبش شمع
- 113 شکل 5-10: طرحی از تنش های برشی به وجود آمده از بار شمع
- 113 شکل 5-11: طرحی از توزیع تنش برشی شمع تکی در ماسه
- 114 شکل 5-12: همپوشانی تنش برشی در ماسه اطراف گروه شمع
- 117 شکل 5-13: مدل شبکه شمع
- 134 شکل 5-14: طرحی از توزیع تنش نرمال در یک شمع مایل ناشی از اعمال بار قائم
- 137 شکل 5-15: فاصله شمع قائم و شبکه شمع های مایل درونی و بیرونی

فهرست جداول

صفحه	جدول
13	جدول 1-1: جزئیات طبقه بندی میکروپایل ها بر اساس روش تزریق
15	جدول 1-2: رابطه بین کاربرد میکروپایل ها ، رفتار طراحی و نوع اجرا
43	جدول 1-2: ابعاد، و مقاومتهای نهایی و گسیختگی برای میلگردهای تقویتی استاندارد
46	جدول 2-2: میلگردهای تزریق از سوراخ مغزه

47	جدول 2-3: مقاومت گسیختگی و ابعاد لوله های مرسوم ریزشمع
49	جدول 2-4: مقادیر بحرانی خوردگی
61	جدول 3-1: ضرایب ϕ_G کالیبره شده LFD برای نسبتهای متفاوت از Q_L , Q_D و Q_E
63	جدول 3-2: مقادیر " α " (مقاومت اسمی مجموعه خاک-دوغاب) برای طراحی اولیه میکروپایل
87	جدول 4-1: راهنمای پیشنهادی آزمون بار
87	جدول 4-2: ضرایب اضافی میکروپایل در آزمون بار تایید
99	جدول 5-1: پارامترهای میکروپایل و سطح مشترک میکروپایل-خاک
102	جدول 5-2: پارامترهای مدل ماسه TOYOURA
136	جدول 5-3: تغییرات مقاومت جلدی نهایی با زاویه انحراف شمع

فهرست نمودارها

صفحه	نمودار
97	نمودار 5-1: منحنی بار- جابجایی، با استفاده و بدون استفاده از میکروپایل
100	نمودار 5-2: رابطه بار- جابه جایی شبیه سازی شده و تجربی شمع منفرد
103	نمودار 5-3: مقاومت جلدی شمع در برابر جابه جایی تحت حالات متفاوت ماسه
104	نمودار 5-4: مقاومت نوک شمع در برابر جابه جایی تحت حالات متفاوت ماسه
105	نمودار 5-5: مقاومت کل شمع در برابر جابه جایی تحت حالات متفاوت ماسه
108	نمودار 5-6: رفتار گروه شمع ($y=-0.1$)
109	نمودار 5-7: رفتار گروه شمع ($y=0.0$)
110	نمودار 5-8: رفتار گروه شمع ($y=0.1$)
115	نمودار 5-9: مقاومت جلدی ناشی از همپوشانی تنش
116	نمودار 5-10: مقاومت نوک ناشی از همپوشانی تنش
119	نمودار 5-11: اثر زاویه انحراف شمع تکی در حالت $y = -0.1$

120	نمودار 5-12 : اثر زاویه انحراف شمع تکی در حالت $y = 0.0$
121	نمودار 5-13 : اثر زاویه انحراف شمع تکی در حالت $y = 0.1$
123	نمودار 5-14 : اثر زاویه انحراف شبکه شمع مایل بیرونی در حالت $y = -0.1$
124	نمودار 5-15 : اثر زاویه انحراف شبکه شمع مایل بیرونی در حالت $y = 0.0$
125	نمودار 5-16 : اثر زاویه انحراف شبکه شمع مایل بیرونی در حالت $y = 0.0$
127	نمودار 5-17 : اثر زاویه انحراف شبکه شمع مایل درونی در حالت $y = -0.1$
128	نمودار 5-18 : اثر زاویه انحراف شبکه شمع مایل درونی در حالت $y = 0.0$
129	نمودار 5-19 : اثر زاویه انحراف شبکه شمع مایل درونی در حالت $y = 0.1$
131	نمودار 5-20 : مقایسه شبکه شمع مایل درونی و بیرونی در حالت $y = -0.1$
132	نمودار 5-21 : مقایسه شبکه شمع مایل درونی و بیرونی در حالت $y = 0.0$
133	نمودار 5-22 : مقایسه شبکه شمع مایل درونی و بیرونی در حالت $y = 0.1$

فهرست تصاویر

صفحه	تصویر
21	تصویر 1-1 : نصب و اجرای میکروپایل ها در ارتفاع کم
22	تصویر 1-2 : اجرای میکروپایل ها در کنار دیوار خانه
22	تصویر 1-3 : اجرای میکروپایل ها با سطح آب بالا
24	تصویر 1-4 : اجرای میکروپایل ها در کنار پایه پل
28	تصویر 2-1 : ماشین حفار هیدرولیکی در حال نصب شمع مایل
29	تصویر 2-2 : مته دورانی هیدرولیکی بزرگ نصب شده بر روی ارايه
29	تصویر 2-3 : مته دورانی هیدرولیکی کوچک نصب شده بر روی ارايه
29	تصویر 2-4 : مته دورانی هیدرولیکی کوچک نصب شده بر روی قاب
95	تصویر 5-1 : 1) مراحل ساخت در زمان اجرای ریزشمع 2) حفاری خاک قبل از اجرای ریزشمع 3) ریزشمع در محل

1. MICROPILE DESIGN AND CONSTRUCTION GUIDELINES,US Department of Transportation,No.FHWA-SA-97-070,June 2000
2. THE HISTORY OF MICROPILES IN NORTH AMERICA,Dr.Donald A.Bruce Geosystems,LP,April 2008
3. MICROPILES-AN OVERVIEW,Associated General Contractors of Iowa,Jim Sheahan,HDR Engineering,Inc,April 2009
4. FOREVER,The French National Project on Micropiles,R.Frank,May 2008
5. BEARING CAPACITY IMPROVEMENT USING MICROPILES A CASE STUDY,G.L.SivakumarBabu1,B.R.SrinivasaMurthy2,D.S.N Murthy3,M.S.Nataraj4,2004
6. SAND STATE AND PERFORMANCE ANALYSIS OF MICROPILES,Shanzhi Shu, A Thesis Submitted In Partial Fulfillment of The Requirements For The Degree of Doctor of Philosophy In Civil Engineering,December 2005
7. MICROPILES SUBJECT TO LATERAL LOADING,Dr.Jesus Gomez,April 2008