

# بررسی تأثیر اسلامپ بتن در ظرفیت باربری فشاری ریزشمع بتنی درجا (مطالعه‌ی موردی ساختگاه سرخورد)

عبسی شوش‌پاشا (دانشیار)

رضا نورزاد\* (دانشیار)

محمدحسن کاشی‌پور (کارشناس ارشد)

سید جواد جلالی (دانشجوی دکتری)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

مهندسی عمران شریف، زمستان ۱۳۹۵ (۱۳۹۵-۱۲-۲)  
دوری ۲-۳، شماره ۴/۲، ص ۱۲۳-۱۲۹، (پاداشت فنی)

در مناطقی با خاک‌های سطحی که ویژگی‌های مکانیکی ضعیفی دارند، استفاده از پی‌های عمیق یکی از راه‌حل‌هاست. در این صورت، پی‌های عمیق توانایی حمل نیروهای وارده را دارند. در این راستا، پژوهشگران با انجام پژوهش‌های آزمایشگاهی به بررسی پارامترهای گوناگون تأثیرگذار در رفتار ریزشمع پرداخته‌اند. در این نوشتار، ظرفیت باربری ریزشمع‌های منفرد درجای بتنی با بررسی تأثیر اسلامپ‌های متفاوت در خاک ماسه‌یی بدانه‌بندی شده‌ی منطقه‌ی سرخورد مورد بررسی قرار گرفته است. آزمایش‌های ظرفیت باربری ریزشمع بر روی ۱۵ نمونه‌ی ریزشمع به طول  $15^\circ$  و قطر ۱۲ سانتی‌متر انجام شده است. بتن ریزشمع‌ها در ۵ گروه متفاوت با مقاومت فشاری  $21^\circ$  کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع بوده است. طبق مشاهده‌های تجربی، افزایش اسلامپ بتن تشکیل‌دهنده‌ی بدنه‌ی ریزشمع از  $1^\circ$  به  $24^\circ$  سانتی‌متر منجر به افزایشی در حدود ۲ برابر در ظرفیت باربری ریزشمع شده است. در انتهای نوشتار، ظرفیت باربری ریزشمع با روش‌های متداول مقایسه و مورد بحث قرار گرفته است.

واژگان کلیدی: ریزشمع درجا، ظرفیت باربری، اسلامپ بتن، خاک ماسه‌یی سرخورد.

## ۱. مقدمه

می‌شوند، که البته آنها نیز با ضرابی مشابه روش‌های مستقیم کالیبره می‌شوند. اساس روش‌های مستقیم، ایجاد رابطه‌ی براساس آزمون‌های درجا با ظرفیت باربری پی از قبیل: CPT، SPT، پرسیومتری، دیلاتومتری، برش پره، و بارگذاری ریزشمع است. در تحلیل استاتیکی از تحلیل‌های تئوریک رایج در مکانیک خاک و روابط حاصل با استفاده از پارامترهای مقاومت برشی خاک در حالت‌های تنش کالی و مؤثر بر مبنای فرض مدل‌های مختلف گسیختگی برای کف و چدار متناسب با اندرکنش خاک و ریزشمع استفاده می‌شود. به‌عنوان یک روش مکمل نیز می‌توان از نتایج آزمایش‌های درجا، که اطلاعات پیوسته‌یی از خاک محل در شرایط واقعی در عمق را فراهم می‌کنند، توان باربری ریزشمع‌ها را به دست آورد، که روابط ارائه‌شده در این خصوص تا حدودی تحلیلی ولی بیشتر تجربی است. با انجام آزمایش بارگذاری، ریزشمع در شرایط واقعی تحت بار استاتیکی قرار می‌گیرد و رفتار بار - تغییرمکان آن در حالت‌های مختلف مطالعه می‌شود. از مزایای عمده‌ی روش مذکور، ارزیابی مستقیم ظرفیت باربری ریزشمع است. در این پژوهش اثر اسلامپ‌های مختلف ریزشمع‌های بتنی درجا در ظرفیت باربری خاک‌های ماسه‌یی بررسی شده است.

تعیین ظرفیت باربری پی‌های عمیق همواره از دغدغه‌های مهندسان ژئوتکنیک است. از دلایل این موضوع می‌توان به پیچیدگی در رفتار ذاتی خاک، طول نسبتاً عمیق این‌گونه سیستم‌های پی‌سازی، و مواجهه با لایه‌های متعدد خاک با رفتار گوناگون اشاره کرد. همچنین با توجه به اینکه اساساً کاربرد پی‌های عمیق در خاک‌های مستله‌دار و یا بارهای بزرگ است، بنابراین اغلب در پروژه‌های حائز اهمیت از آن‌ها استفاده می‌شود. همچنین به دلیل طبیعت نسبتاً پرهزینه‌ی این‌گونه پی‌ها، که نیاز به مصالح زیاد و نیروی انسانی متخصص و ماشین‌آلات اغلب سنگین دارند، هرگونه تلاشی در جهت بهبود دقت در طراحی و اجرا در رابطه با این نوع سیستم پی‌سازی حائز اهمیت است.

به‌طورکلی روش‌های تعیین ظرفیت باربری پی‌های عمیق به ۲ دسته‌ی مستقیم و غیرمستقیم تقسیم می‌شوند. روش‌های غیرمستقیم، شامل انواع تحلیل‌های استاتیکی

\* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۳/۹/۲۵، اصلاحیه ۱۳۹۴/۲/۲۸، پذیرش ۱۳۹۴/۳/۲۶.

از آنجایی که عمده‌ی سازه‌ها با کاربری عمومی مثل هتل‌ها، اداره‌ها، و مجتمع‌های مسکونی در نوار ساحلی دریای خزر، که عمدتاً از نوع خاک‌های ماسه‌یی هستند، در چندین طبقه طراحی می‌شوند و در حالت عادی زیر فونداسیون ظرفیت باربری مناسبی به لحاظ بار وارده از سازه را ندارد، همچنین امکان رخداد پدیده‌ی روانگرایی به هنگام بارگذاری لرزه‌یی توجه متخصصان و کارشناسان این حرفه را به سمت استفاده از انواع ریزشمع‌ها فراهم کرده است، لذا استفاده‌ی روزافزون از سیستم ریزشمع‌های بتنی درجا و همچنین نحوه‌ی بتن‌ریزی و عمل‌آوری این‌گونه سازه‌ها اهمیت بسیاری دارد. در این راستا عدد اسلامپ مناسب جهت افزایش اطمینان و بهبود در روند ساخت حساسیت خاصی دارد، که به آن پرداخته شده است. هدف از انجام این پژوهش ارزیابی تأثیر اسلامپ‌های مختلف در ریزشمع‌های بتنی درجا در افزایش ظرفیت باربری در خاک‌های ماسه‌یی است. به همین منظور ریزشمع‌های با ابعاد و اندازه‌های یکسان با اسلامپ‌های مختلف مورد ارزیابی قرار گرفته است. در این پژوهش با توجه به نتایج آزمایش‌های بارگذاری بر روی ریزشمع بتنی درجا بدون جابه‌جایی براساس روش آهنگ نفوذ ثابت، نمودارهای بار - نشست ارائه شده‌اند، که با روش‌های متداول تعیین ظرفیت باربری ریزشمع‌ها مقایسه شده‌اند، تا اثرات اسلامپ بتن در ظرفیت باربری خاک‌های ماسه‌یی مشخص شود. برای این منظور، اسلامپ‌های ۱۰، ۱۲، ۱۶، ۲۰ و ۲۴ استفاده شده است. با توجه به فاصله‌ی عددی بین اسلامپ‌های انتخاب‌شده، بررسی اثر اسلامپ در ظرفیت باربری فشاری ملموس‌تر می‌شود.

## ۲. ارزیابی ظرفیت باربری ریزشمع

ظرفیت باربری نهایی فشاری ریزشمع ( $Q_{ult}$ ) به طور مرسوم شامل ۲ بخش است: بخش اول، ناشی از اصطکاک جدار ( $Q_f$ )؛ و بخش دوم، ناشی از مقاومت نوک ریزشمع ( $Q_b$ ) است، که در رابطه‌ی ۱ بیان شده است: [۱]

$$Q_{ult} = Q_f + Q_b - W \quad (1)$$

که در آن،  $w$  وزن ریزشمع، و  $Q_f$  و  $Q_b$  تابعی از تغییرمکان ریزشمع هستند و مقاومت حدی هر یک در تغییرمکان نسبی بسیار متفاوتی فعال می‌شود. مقاومت جدار یا اصطکاک، که همان مجموع مقاومت برشی بین خاک و جدار ریزشمع ( $f_s$ ) در

طول جدار ریزشمع است، از رابطه‌ی ۲ به دست می‌آید:

$$Q_f = \int_{surface} f_s(z) dz \quad (2)$$

که در آن،  $f_s$  تابعی از جنس خاک، نوع، و جنس ریزشمع و شرایط بارگذاری است. روش‌های مختلف به دست آوردن مقادیر  $f_s$  برای ریزشمع‌های حفاری شده در جدول ۱ ارائه شده است. مقاومت نوک ریزشمع از طریق رابطه‌ی ۳ محاسبه می‌شود:

$$Q_b = f_b A_t \quad (3)$$

که در آن،  $f_b$  ظرفیت نهایی نوک ریزشمع و  $A$  سطح مقطع نوک ریزشمع است، که با استفاده از روابط بیان شده در جدول ۲ قابل محاسبه است. به‌طور کلی آزمایش بارگذاری ریزشمع یکی از مهم‌ترین ابزارها برای مقابله با عدم قطعیت در طراحی و ساخت شالوده‌های ریزشمعی است. [۲] در این نوشتار، منظور از بارگذاری ریزشمع، همان بارگذاری استاتیکی ریزشمع است. برخی پژوهشگران روش‌های متفاوتی را برای انجام آزمایش بارگذاری ریزشمع، پیشنهاد کرده‌اند. [۳-۶] مشخصات آزمایش و روش انجام این آزمایش‌ها در استانداردهای مختلفی از جمله: ASTM D ۱۱۴۳، [۷] BS ۸۰۰۴، [۸] ISSMFE، [۹] و PNAP ۶۶۰ [۱۰] ارائه شده است.

برخی از عملکردها و کاربردهای آزمایش بارگذاری ریزشمع شامل: صحت‌سنجی پارامترهای طراحی، بررسی تأثیر روش‌های ساخت در ظرفیت باربری شالوده‌ها، و ارائه‌ی داده‌ها برای بهبود روش‌های طراحی مورد استفاده است. [۲] در این پژوهش با هدف بررسی تأثیر روش ساخت بتن در ریزشمع‌های درجاریز بتنی و با استفاده از دستورالعمل ارائه‌شده در استاندارد ASTM D ۱۱۴۳/D ۱۱۴۳M، [۱۱] آزمایش بارگذاری ریزشمع بر روی ریزشمع‌های بتنی انجام شده است. به‌طور کلی در استاندارد ذکرشده، آزمایش‌های مختلفی از قبیل: آزمایش سریع، ۱ آزمایش نگه‌داری شده ۲، آزمایش نگه‌داری شده با بارگذاری بیش از حد ۳، آزمایش با بازه‌ی زمانی ثابت ۴، آزمایش با نرخ نفوذ ثابت ۵، آزمایش با افزایش جابه‌جایی ثابت ۶، و آزمایش بارگذاری دوره‌یی ۷ بیان شده است. [۱۱] در این پژوهش از روش آزمایش با نرخ نفوذ ثابت به دلیل محدودیت‌های تجهیزات استفاده شده است.

جدول ۱. روش‌های مختلف ارزیابی ظرفیت باربری اصطکاک جدار برای ریزشمع‌های حفاری شده. [۲]

مرجع	توضیحات	رابطه	نوع خاک
اسکمپتون (۱۹۵۹)	$\alpha = 0.45$	$f_s = \alpha C_u$	رس
فلمنینگ و همکاران (۱۹۸۵)	$\alpha = 0.7$ برابر مقادیر مشخص برای ریزشمع کوبشی		
فلمنینگ و همکاران (۱۹۸۵)	$K$ کمتر از $k_0$ یا $k_0(1 + k_0)$	$f_s = K \cdot \tan \delta \cdot \sigma'_v$	ماسه‌ی سیلیسی
استاس و کولهاوی (۱۹۸۴)	مقدار $k/k_0$ برابر ۲/۳ تا ۱ بوده است		
میرهوف (۱۹۷۶)	$\beta = 0.1$ برای $\varphi = 33^\circ$ $\beta = 0.2$ برای $\varphi = 35^\circ$ $\beta = 0.3$ برای $\varphi = 37^\circ$	$f_s = \beta \cdot \sigma'_v$	ماسه‌ی آهکی غیرسیمانی
کرفت و لیونز (۱۹۷۴)	$\beta = 0.17 \tan(\varphi' - 0.5)$		
پلوس (۱۹۸۸)	$\beta = 0.15$ تا $\beta = 0.18$ $f_{s \lim} = 100 \text{ kPa}$ و $f_{s \lim} = 60 \text{ kPa}$	$f_s = \beta \cdot \sigma'_v$ $(f_s \leq f_{s \lim})$	

جدول ۲. روش های مختلف ارزیابی ظرفیت باربری اصطکاکی جدار. [۲]

نوع خاک	رابطه	توضیحات	مرجع
رس	$f_b = N_c \cdot C_{ub}$	$N_c = 9$ برای $L/d > 3$ $C_{ub}$ برابر مقدار $C_{ub}$ در مجاورت نوک ریزشع است	اسکمپتون (۱۹۵۹)
ماسه سیلیسی	$f_b = N_q \cdot \sigma_v \leq f_b \text{ lim}$	$N_q = 40$ رسم نمودار $N_q$ در مقابل $\varphi'$ ارتباط $N_q$ با $\varphi'$ ، چگالی نسبی و تنش مؤثر میانگین $N_q$ به عنوان تابعی از $\varphi'$ و قابلیت فشردگی حجمی	ای پی آی (۱۹۸۴) برزانتزف و همکاران (۱۹۶۱) فلمینگ و همکاران (۱۹۶۱) وسیک (۱۹۷۲)
ماسه آهکی غیرسیمانی	$f_b = N_q \cdot \sigma_v \leq f_b \text{ lim}$	$N_q = 20$ محدوده $N_q$ بین ۸ تا ۲۰ $N_q$ از مقادیر کاهش یافته $\varphi'$ محاسبه شود	داتا و همکاران (۱۹۸۰) پلوس (۱۹۸۸) دات و اینگرام (۱۹۸۴)

استاندارد SPT نیز انجام شده است. نتایج مطالعات ژئوتکنیکی در جدول های ۳ و ۴ خلاصه شده است.

### ۳. معرفی مورد مطالعاتی

جهت انجام آزمایش ها و بررسی ظرفیت فشاری ریزشع بتنی درجا با در نظر گرفتن اسلامپ های مختلف بتن، سایتی به عنوان محل آزمایش در شهر سرخورد - منطقه ی چاکسرواقع در ۸ کیلومتری شهرستان محمودآباد، که محل احداث پروژه ی ساختمانی ۱۶ طبقه است، انتخاب شده است.

#### ۳.۳. مشخصات نمونه های مورد آزمایش

نمونه ها شامل ۱۵ ریزشع بتنی درجا با سطح مقطع دایره ای به طول ۱۵۰ و قطر ۱۲ سانتی متر هستند، که در ۵ گروه سه تایی با اسلامپ های ۱۰، ۱۲، ۱۶، ۲۰ و ۲۴ سانتی متر اجرا شده اند. اجرای ریزشع ها شامل حفاری، جدارگذاری، و آرماتورگذاری به شکل اسپیرال صورت گرفته است (شکل ۲). نقشه ی ریزشع های اجرا شده در شکل ۳ نشان داده شده است.

#### ۱.۳. معرفی محل آزمایش

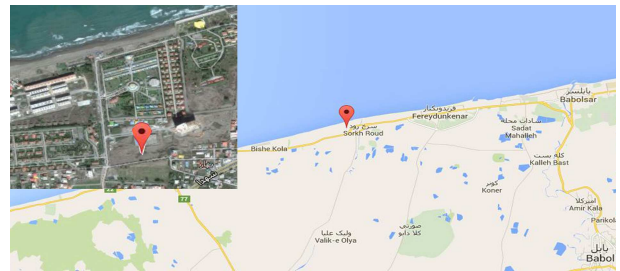
زمین محل اجرای نمونه های آزمایشی در منطقه یی در دشت ساحلی دریای خزر در ناحیه ی البرز مرکزی، در شهر سرخورد و منطقه ی ساحلی چاکسرواقع شده است (شکل ۱). از دیدگاه تقسیمات زمین شناسی ایران، منطقه ی مذکور جزء زون گرگان رشت محسوب می شود، که از نظر رسوبات زمین شناسی شامل رسوبات دوره ی پالئوژن و دوران چهارم زمین شناسی کواترنری است. این منطقه طی سالیان متمادی و در اثر عملکرد نیروهای زمین ساختمانی دامنه ی شمالی البرز و در اثر شکستگی ها و گسل های شمال و مازندران و طی تغییرات آب و هوایی و روراندگی و فرورفتگی قسمت دشتی ساحل دریای خزر به صورت فعلی در آمده است.

#### ۲.۳. پارامترهای ژئوتکنیکی ساختگاه مورد مطالعه

در همین ساختگاه برای اجرای مجتمع مسکونی پزشکان، مطالعات ژئوتکنیکی از قبل انجام شده است، که از اطلاعات آن در بررسی ظرفیت باربری ریزشع ها استفاده شده است. عملیات حفاری به صورت ماشینی بوده و در حین آزمایش، نمونه هایی از اعماق مختلف جهت انجام آزمایش های آزمایشگاهی تهیه و آزمایش های نفوذ

#### ۴.۳. نحوه ی انجام آزمایش

انجام بارگذاری روی ریزشع ها، براساس استاندارد و آیین نامه های معتبر نیاز به مقدماتی دارد. در این آزمایش ها از یک جک هیدرولیکی و گیج فشار ۱۰۰ بار، پمپ دستی اعمال فشار جهت اعمال نیروی فشاری استفاده شده است. براساس استاندارد ASTM D ۱۱۴۳-۸ متفوتی جهت بارگذاری روی ریزشع ها وجود دارد، که در این پژوهش، روش آهنگ نفوذ ثابت برای بارگذاری انتخاب شده است، که در آن بار ریزشع به طور پیوسته افزایش داده می شود، به طوری که بتواند آهنگ نفوذ ثابتی بین ۰/۷۵ تا ۲/۵ میلی متر بر دقیقه را حفظ کند.



شکل ۱. موقعیت ساختگاه مورد مطالعه.

جدول ۳. پارامترهای ژئوتکنیکی خاک.

عمق نمونه (m)	شرح نظری خاک	مشخصات خاک				حدود اتربرگ		رطوبت نمونه		وزن مخصوص در محل			پارامترهای مقاومتی	
		طبقه بندی خاک (USCS)		e	GS	PL	LL	W (%)	مرطوب $\gamma$ (g/cm <sup>3</sup> )	خشک $\gamma$ (g/cm <sup>3</sup> )	عدد نفوذ استاندارد (SPT) (N)	برش مستقیم $\phi$ (deg)	C (kg/cm <sup>2</sup> )	
		SP	MA											
۰٫۵														
۱														
۱٫۵														
۲	D ماسه بد دانه بندی شده	SP	MA	۰٫۶۳	۲٫۷۳	NP	NP	۱۹٫۲۰	۱٫۹۹	۱٫۶۷	۱۶			
۲٫۵														
۳														
۳٫۵														
۴	D ماسه بد دانه بندی شده	SP	MA	۰٫۵۹	۲٫۷۸	NP	NP	۱۴٫۴۸	۲٫۰۶	۱٫۷۵	۱۷	۰٫۰۴	۳۳	
۴٫۵														
۵														
۵٫۵														
۶	D ماسه بد دانه بندی شده	SP	MA	۰٫۵۵	۲٫۸۴	NP	NP	۱۲٫۹۳	۲٫۰۷	۱٫۸۳	۱۹	۰٫۰۴	۳۲	

جدول ۴. مشخصات دانه بندی خاک.

عمق (m)	نوع خاک	$C_u$	$C_c$	$P_{200}$ (%)	$P_4$ (%)	$D_{60}$ (mm)	$D_{50}$ (mm)	$D_{30}$ (mm)	$D_{10}$ (mm)
۲٫۰	Sp	۱٫۹۱۲	۰٫۹۷۴	۱٫۳۲	۱۰۰	۰٫۲۸۹	۰٫۲۶۱	۰٫۲۰۶	۰٫۱۵۱
۳٫۵	Sp	۱٫۷۸۷	۱٫۰۲۴	۰٫۳۲	۱۰۰	۰٫۲۴۶	۰٫۲۲۶	۰٫۱۸۶	۰٫۱۳۸
۵٫۰	Sp	۱٫۸۳۵	۱٫۰۵۳	۰٫۱۶	۱۰۰	۰٫۲۴۱	۰٫۲۲۲	۰٫۱۸۳	۰٫۱۳۱



(ب) اجرای خاموت های اسپیرال یا دورگیری؛

(الف) انجام بارگذاری روی شمع؛



(ج) حفاری داخل لوله جدار؛

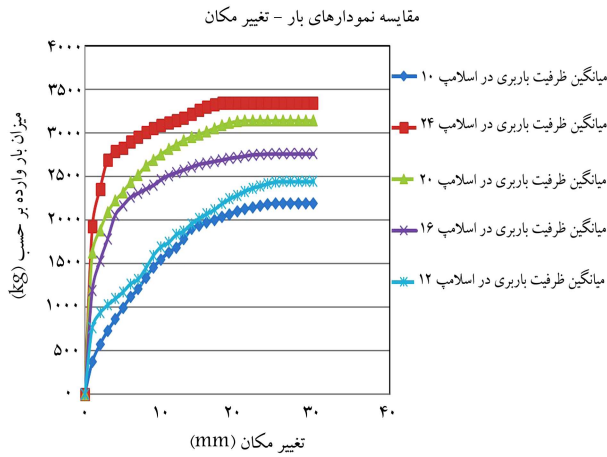
(د) آزمایش اسلامپ در حین بتن ریزی؛



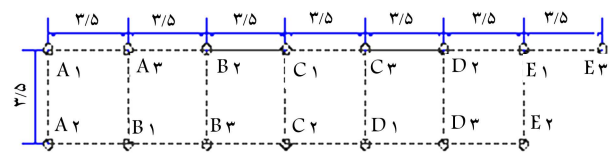
(ه) تجهیزات لازم جهت بارگذاری شمع؛

(و) نمایی از بارگذاری شمع.

شکل ۲. شمایی از نحوه ی انجام آزمایش و تجهیزات.



شکل ۳. مقایسه نمودارهای بار - تغییر مکان



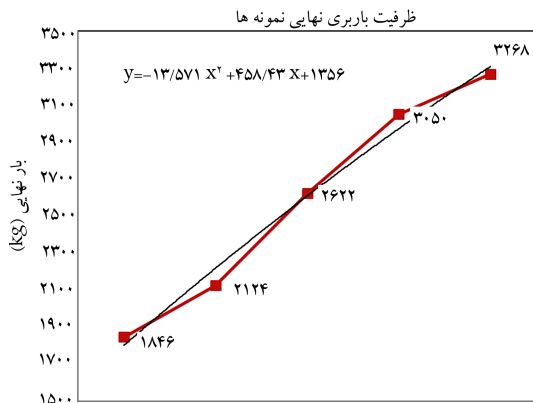
شکل ۴. نقشه‌ی ریزشمع‌های اجراشده در محل.

با توجه به انتخاب روش بارگذاری با آهنگ نفوذ ثابت، برای اینکه جک انتقال نیرو به روی ریزشمع عمود شود، سطح مقطع بالایی که در تماس با جک است، با سمباده کاملاً صاف شده است تا پستی و بلندی هنگام بتن‌ریزی از بین برود و صفحه‌ی زیر جک کاملاً با سطح مقطع ریزشمع در تماس باشد و انتقال نیرو به نحوی صورت گیرد که باعث تخریب در مقطع ریزشمع نشود. با وجود این، از صفحه‌های فلزی در زیر و روی جک در محل اتصال با ریزشمع و شاه‌تیر استفاده شده است، تا از تمرکز تنش در محل‌های مذکور جلوگیری و بارگذاری بر روی ریزشمع کاملاً توزیع شود (شکل ۲الف).

در این روش بارگذاری به صورتی انجام می‌شود که نرخ نشست در خاک‌های دانه‌ی ۱ میلی‌متر در دقیقه باشد. سپس نیرویی که منجر به چنین نشستی شده است، ثبت می‌شود. آزمایش تا رسیدن به نشستی برابر با ۱۵٪ قطر ریزشمع و یا رسیدن به یک بار ثابت ادامه داده می‌شود.

#### ۴. نتایج

طی آزمایش‌های انجام‌گرفته در ۱۵ ریزشمع بتنی با اسلامپ‌های ۱۰، ۱۲، ۱۶، ۲۰ و ۲۴ با مقطع دایره‌ی و به ترتیب با طول و قطر ۱۵۰ و ۱۲ سانتی‌متر، منحنی‌های بار - تغییرمکان در شکل ۴ و نتایج حاصل از آن در جدول ۵ ارائه شده است، که به تفصیل در این بخش مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین این تذکر لازم است که منحنی‌های بار - نشست ارائه‌شده در شکل ۴، برای هر اسلامپ مشخص، از میانگین نتایج به‌دست‌آمده از ۳ آزمایش بر روی ریزشمع‌ها به‌دست آمده است.



شکل ۵. نمودار تجمعی بار - تغییرمکان برای نمونه‌ها.

جدول ۵. ظرفیت باربری نهایی نمونه‌ها.

شماره‌ی نمونه	اسلامپ	ظرفیت نهایی	جاب‌جایی متناظر با بار
ریزشمع	شمع	باربری (kg)	باربری نهایی (mm)
A1	۱۰	۱۸۴۰	۴٫۸۰
A2	۱۰	۱۸۵۱	۴٫۸۰
A3	۱۰	۱۸۴۷	۴٫۸۰
B1	۱۲	۲۱۳۲	۳٫۹۰
B2	۱۲	۲۱۲۷	۳٫۹۰
B3	۱۲	۲۱۱۳	۳٫۹۰
C1	۱۶	۲۶۱۸	۳٫۳۰
C2	۱۶	۲۶۲۴	۳٫۳۰
C3	۱۶	۲۶۲۴	۳٫۳۰
D1	۲۰	۳۰۵۱	۲٫۸۰
D2	۲۰	۳۰۵۴	۲٫۸۰
D3	۲۰	۳۰۴۵	۲٫۸۰
E1	۲۴	۳۲۶۹	۲٫۵۰
E2	۲۴	۳۲۷۲	۲٫۵۰
E3	۲۴	۳۲۶۳	۲٫۵۰

#### ۱.۴. ظرفیت باربری نمونه‌ها

در تمام منحنی‌های بارگذاری مشاهده می‌شود که نمونه‌ها صرف‌نظر از مقدار اسلامپ در پله‌های اولیه‌ی بارگذاری، رفتار خطی نسبتاً یکسان با جابه‌جایی‌های متناظر مشابه ارائه داده‌اند. در این محدوده، جابه‌جایی‌های بسیار کوچک اتفاق افتاده است. با توجه به مشاهده‌های صورت‌گرفته از این نقطه می‌توان صرف‌نظر از مقدار اسلامپ به‌عنوان نقطه‌ی تسلیم اولیه در اندرکنش خاک و ریزشمع یاد کرد. در تمامی حالت‌های اسلامپ، بارگذاری پس از عبور از مرحله‌ی خطی وارد محدوده با شیب به نسبت تندتری شده است، که این مسیر تا رسیدن به بار مقاومت نهایی ادامه یافته است. نمونه‌ی ریزشمع، مورد آزمایش بارگذاری قرار گرفته و نتایج متوسط ظرفیت باربری برای هر اسلامپ به‌عنوان نتایج نمونه‌ی آن اسلامپ در نظر گرفته شده است.

#### ۲.۴. مقاومت نهایی باربری متوسط

در تعیین مقاومت نهایی باربری با میانگین گرفتن از ۳ نمونه‌ی مورد آزمایش در هر اسلامپ، عدد به‌دست‌آمده به‌عنوان مقاومت نهایی باربری متوسط در جدول‌های ۶ و ۷ ارائه شده است.

جدول ۶. متوسط مقاومت باربری مشاهده شده در اسلامپ‌های مختلف.

گروه ریزشمع	A	B	C	D	E
ظرفیت نهایی (kg)	۱۸۴۶	۲۱۲۴	۲۶۲۲	۳۰۵۰	۳۲۶۸

جدول ۷. وزن نمونه‌ی ریزشمع در هر اسلامپ.

A	B	C	D	E
۳۹,۷۵	۳۹,۹۵۰	۴۰,۵	۴۱,۱	۴۱,۶۵

جدول ۸. ظرفیت باربری نهایی در حالت تئوری.

$Q_u$ (kg)	$Q_s$	$Q_p$
۲۱۹۰	روش بوسن	روش کولهاوی
۲۱۶۵	روش مایرهوف با جابه‌جایی کم	روش کولهاوی
۱۳۴۸	روش بوسن	روش جانبو
۱۳۲۳	روش مایرهوف با جابه‌جایی کم	روش جانبو
۲۲۴۷	روش بوسن	روش وسیک
۲۲۲۲	روش مایرهوف با جابه‌جایی کم	روش وسیک
۳۰۲۳	روش بوسن	روش مایرهوف
۲۹۹۸	روش مایرهوف با جابه‌جایی کم	روش مایرهوف

## ۶. نتیجه‌گیری

از نتایج آزمایش‌ها مشخص می‌شود که:

- با افزایش اسلامپ، مقاومت فشاری ریزشمع افزایش می‌یابد. این نتایج نشان می‌دهند که میزان اختلاف در ظرفیت باربری ریزشمع بین بتن مصرفی با پایین‌ترین اسلامپ و بالاترین اسلامپ به  $10\%$  می‌رسد. این امر اهمیت پارامتر اسلامپ بتن در ریزشمع‌های در جاریز را مورد تأیید قرار می‌دهد.
- اختلاف مقاومت فشاری بین اسلامپ‌های پایین در مقایسه با اسلامپ‌های بالا بیشتر است و با افزایش اسلامپ این اختلاف کمتر می‌شود.
- با افزایش عدد اسلامپ به دلیل آمیخته‌شدن جداری ریزشمع با خاک اطراف در برخی از پارامترهای خاک تغییراتی به وجود می‌آید، که شکل‌پذیری را کاهش می‌دهد.
- افزایش اسلامپ در ریزشمع‌های بتنی در جاریز باعث افزایش سختی خاک اطراف ریزشمع می‌شود، که این مسئله باعث افزایش نیروهای داخلی ریزشمع می‌شود.
- منحنی‌های بار-نشست در ریزشمع‌های بتنی فشاری درجا تقریباً به شکل سهمی است.
- طبق مشاهده‌های پس از آزمایش در اسلامپ‌های بالاتر سطحی کامل و پیوسته با اتصال کامل بین خاک و ریزشمع مشاهده می‌شود. ولی در اسلامپ‌های پایین، سطوحی ناهموار با خلل و فرج زیاد و پیوستگی‌های مقطعی با خاک مشاهده شده است. این عامل نشان‌دهنده‌ی سطح درگیری بیشتر با خاک و اتصال لایه‌یی از خاک به بدنه‌ی ریزشمع است. این امر، منجر به عملکرد بهتر اصطکاکی ریزشمع می‌شود.

همان‌گونه که مشاهده می‌شود با افزایش اسلامپ، میزان مقاومت باربری بیشتری از ریزشمع‌ها مشاهده می‌شود (شکل ۵). این موضوع می‌تواند ناشی از چند پارامتر مانند: رهاشدگی بتن در هنگام اجرای ریزشمع با توجه به اسلامپ‌های بالاتر؛ ایجاد یک فشار جانبی هیدرواستاتیک جهت اتصال کامل تر سطوح خاک و ریزشمع؛ نفوذ دوغاب بتن با اسلامپ بالاتر در خاک اطراف بدنه؛ و ایجاد یک باند نازک از خاک تسلیح شده با سیمان باشد، که باعث ایجاد رفتارهای بهتر برشی در خاک می‌شود، که عملاً بدنه‌ی ریزشمع در خاک را نیز امتداد می‌دهد. البته این موضوع نیز حائز اهمیت است که افزایش اسلامپ باعث فرار دوغاب بتن و کاهش مقاومت سازه‌یی شمع می‌شود، که اثرکاهشی در مقاومت سازه‌یی در این نوشتار بررسی نشده است.

## ۵. مقادیر به دست آمده از روابط تئوری

از اهداف انجام این پژوهش، مقایسه‌ی میزان مقاومت آزمایشگاهی نمونه‌ها با میزان مقاومت پیشنهادی پژوهشگران و آیین‌نامه‌های مختلف است. در جدول ۸، میزان مقاومت برخی روابط تئوری موجود ارائه شده است. اصلی‌ترین موضوعی که در این نتایج قابل مشاهده است، اختلاف فاحش بین روش‌های مختلف است، که این مسئله گستردگی و عدم تخمین مناسب از ظرفیت ریزشمع‌ها و لزوم انجام آزمایش بارگذاری ریزشمع را نشان می‌دهد.

همان‌طور که در جدول ۸ ملاحظه می‌شود، روش‌های (جانبو  $Q_p$  + بوسن  $Q_s$ ) و (جانبو  $Q_p$  + مایرهوف با جابه‌جایی کم  $Q_s$ ) کاملاً محافظه‌کارانه عمل می‌کنند و در مقابل روش (مایرهوف  $Q_p$  + بوسن  $Q_s$ ) به لحاظ ارائه‌ی ظرفیت باربری با نتایج حاصل از آزمایش‌های بارگذاری جهت تعیین ظرفیت باربری نهایی نزدیک تر است.

## پانویس‌ها

1. quick test
2. maintained test
3. loading in excess of maintained test

4. constant time interval test
5. constant rate of penetration test
6. constant movement increment test
7. cyclic loading test

## (References) منابع

1. Ng, C.W., Simons, N.E. and Menzies, B.K., *A Short Course In Soil-Structure Engineering of Deep Foundations, Excavations and Tunnels*, Thomas Telford (2004).
2. Budhu, M., *Soil Mechanics and Foundations*, 3ed edition, John Wiley & Sons (2010).
3. Zhang, L. "Reliability verification using proof pile load tests", *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, **130**(11), pp. 1203-1213 (2004).
4. Weele, A.F. "A method of separating the bearing capacity of a test pile into skin friction and point resistance", *Proceedings, 4th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, **2**, London, England, pp. 76-80 (1957).
5. Whitaker, T. "Experiments with model piles in groups", *Geotechnique*, **7**(4), pp. 147-167 (1957).
6. Whitaker, T. and Cooke, R.W. "A new approach to pile testing", *Proceedings 5th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, **2**, Paris, France, pp. 171-176 (1961).
7. American Society for Testing and Materials, ASTM D1143, *Standard Test Method for Pile Under Static Axial Compression Load*, Annual Book of ASTM Standards, 04.08, ASTM International, West Conshohocken, PA (2005).
8. British Standards Institution (BSI), *British Standard Code of Practice For Foundations*, BS 8004, British Standards Institution, London (1986).
9. International Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering (ISSMFE) Subcommittee on Field and Laboratory Testing, "Axial pile loading test. I: Static loading", *Geotech. Test. J.*, **8**(2), pp. 79-89 (1985).
10. Buildings Department of Hong Kong (BD), *Pile Foundations- Practice Notes For Authorized Persons And Registered Structural Engineers*, PNAP66, Buildings Department, Hong Kong (2002).
11. American Society for Testing and Materials, ASTM D1143/D1143M, *Standard Test Method for Pile Under Static Axial Compression Load*, Annual Book of ASTM Standards, 04.08, ASTM International, West Conshohocken, PA (2013).