تعیین نمودار ظرفیت باربری ریزشمع با روش‌های عددی و تحلیلی

پیمان میانجی[۱]، سید احسان سیدی حسینی نیا[۲]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مکانیک خاک و مهندسی پی، پردیس دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

۲- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

peyman.mianji@gmail.com
esyedi@um.ac.ir

خلاصه

در سال‌های اخیر، برای ترسیم نمودار ظرفیت باربری پی‌های عمیق روابط مختلفی توسط محققان ارائه شده است، که هر کدام با توجه به تفاوت در نوع پارامترهای مورد استفاده و شرایط خاک مورد نیاز، جواب‌های متفاوت و گاهی با اختلاف زیادی را ارائه می‌دهند. این اختلافات بین نتایج بدست آمده از روابط مختلف لزوم بررسی دقیق‌تر را نشان می‌دهد ؛ امروزه صحت‌سنجی و دقت این روابط با وجود نرم‌افزارهای دقیق عددی به راحتی امکان پذیر است. در این پژوهش یک ریزشمع تک به طول ۱۰ متر در خاک ماسه‌ای خشک با استفاده از نرم‌افزار PLAXIS 3D Foundation مدل گردیده و با نمودار ظرفیت باربری بدست آمده از روابط روش‌های تحلیلی مورد مقایسه قرار گرفته شده است.

کلمات کلیدی: ریزشمع، نمودار ظرفیت باربری، روش تحلیلی، مدل‌سازی عددی، PLAXIS 3D Foundation

۱. مقدمه:

ریزشمع‌ها در اوایل دهه ۱۹۵۰ در ایتالیا و در پاسخ به یک روش ابتکاری و ابداعی جهت پی‌بندی و مقاوم‌سازی آثار تاریخی که در گذشت زمان و بویژه در طی جنگ جهانی دوم در معرض آسیب یا تخریب قرار گرفته بودند، ظهور کردند. ریزشمع‌ها به شمع‌های با قطر کوچک (کمتر از ۳۰۰ میلیمتر) اتلاق می‌گردد که غالباً با تسلیح فولادی سبک و تزریق دوغاب سیمان همراه می‌باشند. ریزشمع‌ها، علاوه بر آن که به عنوان یک المان باربر مقاوم در برابر نشست عمل می‌کنند به دلیل تزریق دوغاب سیمان، سبب بهبود مشخصات مکانیکی(مقاومتی و رفتاری) خاک اطراف نیز می‌گردد [1]. ریزشمع‌ها با توجه شرایط زیرسطحی محل اجرا می‌توانند به صورت ساده یا همراه با غلاف اجرا شوند، ذکر این نکته ضروری است که ظرفیت باربری غلاف در محاسبه ظرفیت باربری ریزشمع لحاظ می‌گردد. برای محاسبه ظرفیت سازه‌ای، ژئوتکنیکی و همچنین نحوه ساخت واجرای ریزشمع‌ها آیین نامه FHWA که توسط اداره بزرگراههای وزارت راه کشور آمریکا متنشر شده، که مورد استفاده مهندسان قرار می‌گیرد [1].

برای محاسبه ظرفیت باربری و نشست ریزشمع تک، تاکنون روابطی ارائه نشده و تمامی روابط ذکر شده در مراجع، مربوط به گروه ریزشمع می‌باشد، اما روابط مختلفی برای محاسبه ظرفیت باربری و نشست شمع تک موجود است. با توجه به استفاده از ریزشمع نوع A در این پژوهش(اجرای ریزشمع بدون تزریق گروت و به صورت وزنی) با در نظرگیری چندین فاکتور می توان از روابط شمع برای ریزشمع نیز استفاده نمود. از جمله محقیقین، می‌توان به Meyerhof [2]، Vesic [3] و Coyle and Castello [4] اشاره نمود که مطالعات متعددی برای تعیین مقادیر ظرفیت باربری نوک و جدار انجام داده‌اند.

روش‌های عددی مشابه اجزای محدود و یا اختلاف محدود، می‌توانند حل دقیقی را ارائه کنند. این روش‌ها دارای محدودیت هایی هستند. نیاز

---

[۱] دانشجوی کارشناسی ارشد مکانیک خاک و مهندسی پی، پردیس دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

[۲] استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

به زمان نسبتا طولانی و نیاز به سیستم کامپیوتری برای محاسبات از جمله این محدودیت‌هاست. گاهی به علت نیاز به تخمین سریع‌تر و قابل قبول، نیاز به استفاده از روابط تحلیلی با دقت مورد قبول، می‌باشد. مقایسه روابط تحلیلی با روش عددی و یافتن یک دید روشن از مقدار خطا و توانایی هریک از این روش‌ها، دلیل انجام شدن این پژوهش است.

در مقاله‌ی پیش رو یک ریزشمع ۱۰ متری در خاک ماسه‌ای مدل سازی شده است و بار وارد شده به صورت گسترده بر سطح مقطع ریز شمع اعمال گردیده و در انتها، نمودار ظرفیت باربری بدست آمده با نتایج حاصل از روابط تحلیلی مورد مقایسه قرار گرفته است. به این منظور از نرم افزار ژئوتکنیکی PLAXIS 3D FOUNDATION استفاده شده است که محاسبات را بر پایه‌ی روش عددی اجزای محدود انجام می‌دهد.

۲. مدل سازی عددی یک ریزشمع

۱.۲. مدل رفتاری و مشخصات ریزشمع و خاک:

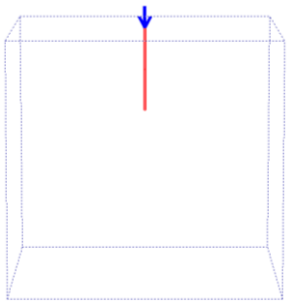
در تحلیل انجام گرفته در این پژوهش که توسط نرم افزار PLAXIS 3D Foundation بوده، از مدل رفتاری مور-کلمب برای خاک و مدل الاستیک برای ریزشمع استفاده شده است. ریزشمع به قطر ۲۵۰ میلیمتر در دو نوع خاک ماسه‌ای همگن خشک مختلف قرار دارد، مشخصات خاک و گروت را در جدول ۱ ارائه شده است. در ادامه باید یادآور شد که سطح مشترک میان خاک و ریزشمع به علت پیوند قوی ایجاد شده در اثر اجرای گروت، به صورت صلب در نظر گرفته شده و در نرم افزار مقدار ۱ به آن اختصاص داده شده است ($R_{inter=1}$).

جدول ۱- مشخصات خاک و گروت

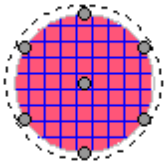
مشخصه	گروت	خاک با تراکم کم	خاک با تراکم زیاد
وزن مخصوص (γ)	۲۲ کیلونیوتن بر متر مکعب	۱۷ کیلونیوتن بر متر مکعب	۱۷ کیلونیوتن بر متر مکعب
مدول کشسانی(E)	۳۰ گیگاپاسکال	۲۰ مگاپاسکال	۴۰ مگاپاسکال
نسبت پواسون (ν)	۰/۲	۰/۳	۰/۳
زاویه اصطکاک داخلی (φ)	---	۳۰ درجه	۳۵ درجه
چسبندگی (C)	---	۱۰ کیلوپاسکال	۱۰ کیلوپاسکال

۲.۲. هندسه مدل:

در این بررسی یک ریزشمع ۱۰ متری به قطر ۲۵۰ میلیمتر در یک محیط همگن با ابعاد ۳۰×۳۰ و به ارتفاع ۳۰ متر مدل شده است و بار ۱۲۰ تن به صورت گسترده بر روی سطح مقطع ریزشمع قرار گرفته است. در شکل‌های (۱- الف) و (۱- ب) به ترتیب ریزشمع و بار روی آن در محیط نرم افزار و مقطع ریزشمع، نشان داده شده است. لازم به ذکر است که در شکل (۱- ب) بار گسترده به صورت شبکه آبی رنگ بر مقطع ریزشمع نشان داده شده است.



الف) ریزشمع و بار گسترده وارده در محیط نرم افزار

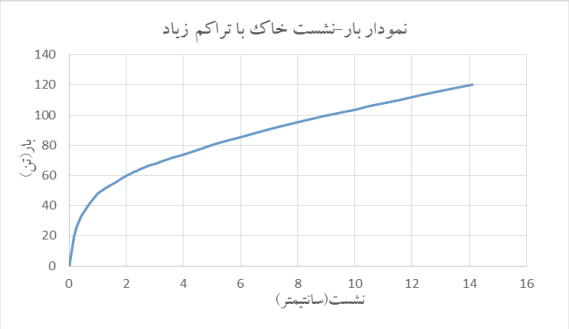


ب) مقطع ریزشمع و بار به صورت شبکه بر روی آن

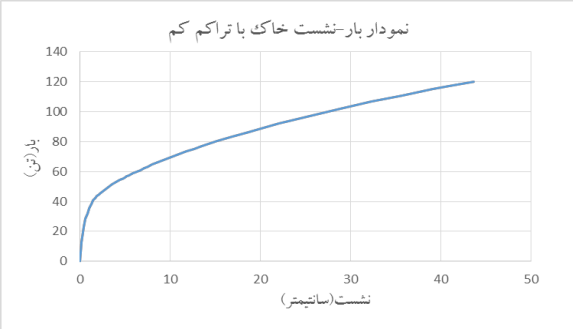
شکل ۱- ریزشمع مدل شده در محیط نرم افزار

۳.۲. تحلیل و خروجی نرم افزار:

پس از مدل‌سازی ریزشمع در محیط نرم افزار و اعمال بار ۱۲۰ تن به صورت بار گسترده بر مقطع شمع و تحلیل آن، نتایج بدست آمده به صورت نمودار بار- نشست برای خاک با تراکم متفاوت در شکل ۲ نشان داده شده است. شکل (۲- الف) مربوط به خاک با تراکم زیاد و (۲- ب) خاک با تراکم زیاد می‌باشد. همچنین در شکل ۳ مقطع ریزشمع مدل شده در محیط خاک را بعد ازتحلیل، می‌توان مشاهده نمود.

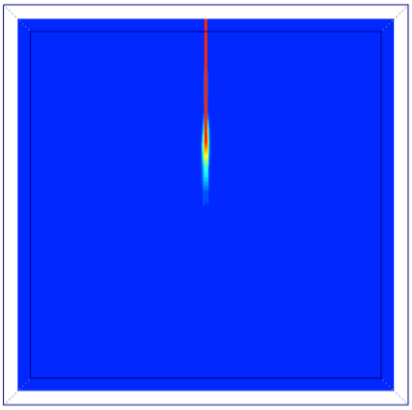


(الف) خاک با تراکم زیاد



(ب) خاک با تراکم کم

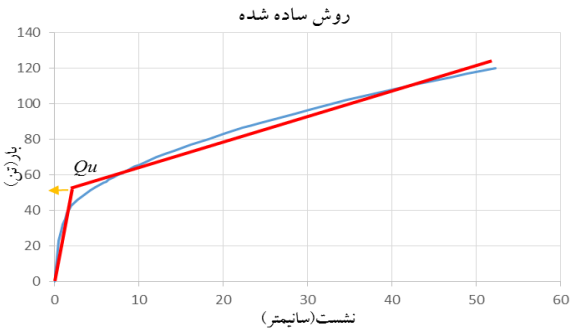
شکل۲- نمودار بار-نشست بدست آمده از تحلیل به کمک نرم افزار



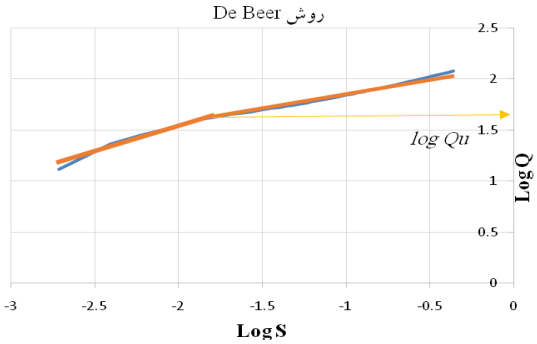
شکل۳ - مقطع محیط و ریزشمع بعد از تحلیل

۴.۲. تخمین ظرفیت باربری نهایی ریزشمع از نمودار ظرفیت باربری:

در این بخش، با استفاده از معیارهای تجربی، ظرفیت باربری نهایی ریزشمع مدل شده با نرم افزار تخمین زده می‌شود. در ادامه دو روش مورد استفاده در این پژوهش توضیح داده شده و در انتها نتایج حاصل از این روش‌ها در جدولی آورده شده است [5].



(الف) روش ساده شده



De Beer **(ب)**

شکل٤- روش محاسبه ظرفیت باربری نهایی از نمودار ظرفیت باربری

در سال ۱۹۶۷، De Beer [5] با رسم لگاریتمی نمودار ظرفیت باربری، بیان کرد که محل تغییر شیب منحنی ظرفیت باربری، همان ظرفیت باربری نهایی شمع می‌باشد. روش دیگری که از آن بدین منظور استفاده می‌شود، روش ساده شده [5] است، در این روش، محل تلاقی دو خط مماس بر نمودار ظرفیت باربری، به عنوان ظرفیت باربری نهایی در نظر گرفته می‌شود. در شکل (۴- الف) و (۴- ب)، دو روش ساده شده و روش De Beer به عنوان نمونه برای تخمین ظرفیت باربری ریزشمع در خاک با تراکم کم نشان داده شده است.

نتایج استفاده از دو روش ساده شده [5] و De Beer [5] برای خاک با تراکم کم و زیاد و همچنین میانگین این دو روش برای مقایسه با نتایج روش تحلیلی در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۲- ظرفیت باربری ریزشمع از روی نمودار ظرفیت باربری

نوع خاک/روش	روش De Beer	روش ساده شده	میانگین دو روش
شمع در خاک با تراکم کم	۴۵/۸۸ تن	۵۵/۶۲ تن	۵۰/۷۵ تن
شمع در خاک با تراکم زیاد	۶۰/۳ تن	۶۹ تن	۶۴/۶۵ تن

۳. مروری بر ظرفیت باربری و نشست ریزشمع:

۱.۳. روابط تخمین ظرفیت باربری:

همانطور که در ابتدای این مقاله ذکر شد، روابطی برای تخمین ظرفیت باربری ریزشمع تک موجود نیست و روابط موجود همگی مربوط به گروه ریزشمع هستند. از طرفی به علت نوع ریزشمع مورد بررسی در این پژوهش(ریزشمع نوع A) می توان با در نظر گیری چندین فاکتور روابط موجود برای شمع را برای تخمین ظرفیت باربری ریزشمع نیز مورد استفاده قرار داد. لازم به ذکر است که روابط مربوط به تخمین ظرفیت باربری شامل دو بخش تخمین ظرفیت نوک و جدار شمع می‌شوند. در ادامه تعدادی از روابط معتبر که در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته است بررسی گردیده است.

۱.۱.۳. تخمین ظرفیت باربری نوک:

رابطه ارائه شده توسط Meyerhof [2] در سال ۱۹۷۷ جزو اولین روابطی بود که برای تخمین ظرفیت باربری نوک شمع تک ارائه شد.

$$Q_p = A_p q_p = A_p q' N_q^* \quad (۱)$$

که مقدار Q_p نباید از مقدار حدی $A_p\ q_1$ تجاوز کند. بنابراین:

$$Q_p = A_p q' N_q^* \le A_p q_1 \quad (۲)$$

مقدار حدی ظرفیت باربری نوک را می‌توان از رابطه زیر محاسبه نمود:

$$q_1\ \ kN/m^2\ = 50 N_q^* \tan\phi \quad (۳)$$

که در روابط بالا A_p سطح مقطع نوک شمع، q' تنش موثر قائم در تراز نوک شمع، که در این پژوهش با در نظر گیری وزن مخصوص خشک خاک (۱۷ کیلونیوتن بر متر مکعب) مقدار ۱۷۰ کیلونیوتن بر متر مربع در روابط لحاظ شده است. N_q^* ضریب ظرفیت باربری می باشد که مقدار آن وابسته به زاویه اصکاک داخلی خاک (φ) است. مقدار ضریب ظرفیت باربری برای هر دو خاک از نمودار ارائه شده توسط Meyerhof [2] برداشت شده است.

در سال ۱۹۷۷، Vesic [3] نیز رابطه‌ای را به همین منظور ارائه کرد:

$$Q_p = A_p\, Q_p = A_p\ \ cN_c^* + \sigma_0' N_\sigma^* \quad (۴)$$

که در آن C ضریب چسبندگی خاک و σ'_0 تنش نرمال متوسط زمین (موثر) در تراز نوک شمع است که از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\sigma'_0 = \left(\frac{1+2K_0}{3}\right) q' \quad (۵)$$

K_0 ضریب فشار جانبی خاک در حالت سکون می‌باشد که برابر است با:

$$K_0 = 1 - \sin\phi \quad (۶)$$

مقادیر ضرایب N^*_c و N^*_σ را با محاسبه مقدار I_r و زاویه اصطکاک داخلی خاک (φ) می‌توان از جدول مربوطه برداشت نمود. مقدار I_r را می‌توان از رابطه زیر محاسبه نمود:

$$I_r = \frac{E_s}{2\ 1+\mu_s\ (c+q'\tan\phi)} \quad (۷)$$

که در رابطه بالا μ_s ضریب پواسون خاک، φ زاویه اصطکاک داخلی خاک و E_s ضریب الاستیسیته خاک می‌باشد.

Janbu [6] نیز در سال ۱۹۷۶ رابطه‌ای برای محاسبه ظرفیت باربری نوک ارائه داد که در زیر آمده است:

$$Q_p = A_p\ cN^*_c + q'N^*_q \quad (۸)$$

که مقدار ضرایب N_c^* و N_q^* را می‌توان با داشتن زاویه اصطکاک داخلی خاک و زاویه η' که از ۷۰ درجه برای رس نرم تا ۱۰۵ درجه در ماسه متراکم تغییر می‌کند، از نمودار مربوطه برداشت نمود. در این پژوهش در محاسبه ظرفیت باربری، محاسبات با دو زاویه ۹۰ و ۱۰۵ درجه برای η' انجام شده است و نتایج در جدولی در ادامه آمده است.

Coyle and Castello [4] در سال ۱۹۸۱ رابطه‌ی زیر را برای ظرفیت باربری نوک شمع ارائه کردند:

$$Q_p = q'N^*_q A_p \quad (۹)$$

که در رابطه بالا q' تنش موثر قائم در تراز نوک شمع (مقدارآن ۱۷۰ کیلونیوتن بر متر مربع) و N_q^* ضریب ظرفیت باربری می‌باشد. مقدار N_q^* را می‌توان با داشتن نسبت طول به قطر شمع (L/D) و زاویه اصطکاک داخلی خاک (φ) از نمودار ارائه شده برداشت نمود.

۲.۱.۳. تخمین ظرفیت باربری جدار:

برای تخمین ظرفیت باربری جدار شمع دو رابطه معتبر مورد استفاده در این پژوهش، در ادامه ذکر گردیده است.

یکی از روابط موجود با نام مقاومت اصطکاکی در ماسه [7]، رابطه زیر را برای این منظور ارائه کرده است:

$$Q_s = pLf \quad (۱۰)$$

که در آن p محیط مقطع شمع و L طول شمع می باشد. f را می‌توان از رابطه زیر محاسبه نمود:

$$f = K\sigma'_v \tan\delta \quad (۱۱)$$

که مقدار δ در بازه 0.5φ تا 0.8φ قرار دارد و برای انتخاب مقدار آن نیاز به قضاوت مهندسی می‌باشد. مقدار δ درواقع فاکتوری است که کیفیت سطح مشترک میان خاک و ریزشمع را تعریف می‌کند، به علت اینکه ریزشمع از نوع شمع های درجاریز می‌باشد، بیشترین چسبندگی بین ریزشمع و خاک رخ می‌دهد و مقدار 0.8φ برای آن در این پژوهش لحاظ شده است (همین پارامتر در نرم افزار با متغیر R_{inter} تعریف می‌شود). K ضریب فشار جانبی خاک و برای شمع‌های حفاری شده از رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$K = K_0 = 1 - \sin\varphi \quad (۱۲)$$

رابطه دیگر توسط Coyle and Castello [4] در سال ۱۹۸۱ برای تخمین ظرفیت باربری جدار شمع به صورت زیر ارائه گردید:

$$f = K\bar{\sigma}'_v \tan\delta \quad (۱۳)$$

که K ضریب فشار جانبی خاک است که با توجه به نسبت طول به قطر شمع(L/D) و زاویه اصطکاک داخلی خاک (φ)، از نمودار مربوطه برداشت می‌گردد. لازم به ذکر است که مقدار δ، 0.8φ در نظر گرفته می‌شود و نمودار ارائه شده توسط Coyle and Castello بر پایه همین فرض بوده است.

۲.۲. روابط مربوط به تخمین نشست:

پس از تخمین ظرفیت باربری شمع و به طور مجزا برای جدار و نوک می‌توان با استفاده از روش‌های ارائه شده نشست الاستیک شمع، نشست ریزشمع را محاسبه نمود. در ادامه روابط استفاده شده در این پژوهش ذکر گردیده است:

نشست یک شمع را می‌توان حاصل جمع سه فاکتور نشست در نظر گرفت و به صورت زیر تعریف نمود:

$$S = S_1 + S_2 + S_3 \tag{۱۴}$$

که S_1 مربوط به نشست به علت تغییر شکل الاستیک تنه شمع، S_2 مربوط نشست الاستیک خاک در نوک شمع و S_3 نشست الاستیک خاک اطراف تنه شمع می‌باشد. با استفاده از اصول مکانیک، تغییر شکل الاستیک تنه شمع طبق رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$S_1 = \frac{Q_{wp} + \xi Q_{ws}\ L}{A_p E_p} \tag{۱۵}$$

در رابطه بالا Q_{wp} بار حمل شده توسط نوک تحت بار بهره برداری، Q_{ws} بار حمل شده توسط مقاومت اصطکاکی جدار تحت بار بهره برداری و مقدار ضریب ξ وابسته به نوع تغییرات نیروی مقاومت اصطکاکی در ارتفاع شمع است که در این پژوهش مقدار ۰/۶۷ منظور شده است. لازم به ذکر است برای تبدیل بار نهایی به بهره برداری از ضریب اطمینان ۲/۵ استفاده شده است. Vesic [3] در سال ۱۹۷۷ رابطه S_2 را به صورت زیر تعریف نمود:

$$S_2 = \frac{q_{wp} D}{E_s}(1-\mu_s^2) I_{wp} \tag{۱۶}$$

در رابطه بالا q_{wp} بار نوک شمع بر واحد سطح است که از تقسیم Q_{ws} بر سطح مقطع شمع بدست می‌آید، E_s مدول الاستیک خاک، μ_s ضریب پواسون خاک و I_{wp} پارامتر ضریب تاثیر است که مقدار ۰/۸۸ برای شمع‌های دایره‌ای پیشنهاد شده است در این محاسبات از آن استفاده شده است. رابطه نشست الاستیک خاک اطراف تنه شمع نیز توسط Vesic [3] در سال ۱۹۷۷ به صورت زیر ارائه شد:

$$S_3 = \left(\frac{Q_{ws}}{pL}\right)\frac{D}{E_s}\,(1-\mu_s^2) I_{ws} \tag{۱۷}$$

I_{ws} نیز ضریب تاثیر است که از رابطه زیر استفاده می‌گردد.

$$I_{ws} = 2 + 0.35\sqrt{\frac{L}{D}} \tag{۱۸}$$

در رابطه بالا D قطر شمع و L طول آن می باشد.

از دیگر روابط موجود برای تخمین نشست شمع‌ها می‌توان به رابطه زیر اشاره نمود [8]:

$$\rho_{es} = \frac{Q_{af}}{E_s L} I \tag{۱۹}$$

که در آن Q_{af} ظرفیت باربری نهایی جدار شمع می باشد و I ضریب تاثیر می‌باشد که از رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$I = 0.5 + \log\left(\frac{L}{D}\right) \tag{۲۰}$$

Polous [9] نیز در سال ۱۹۸۹ رابطه‌ای را بدین منظور ارائه کرد:

$$\rho_{es} = \frac{Q_{af}}{E_s D} I_p \tag{۲۱}$$

که در رابطه بالا I_p فاکتور تاثیر است و با داشتن نسبت L/D و نسبت مدول الاستیسیته شمع به مدول الاستیسیته خاک (E_p/E_S) که در این پژوهش مقدار آن برای خاک با تراکم کم و تراکم زیاد به ترتیب مقدار ۰/۹ و ۱/۱۵ از نمودار ارائه شده توسط Polous برداشت شده است.

رابطه دیگری به همین منظور توسط Timoshenko and Goodier [10] در سال ۱۹۸۰ ارائه گردید، به صورت زیر می‌باشد:

$$\rho_{es} = \frac{Q_{ab}}{r_b E_{sb}}\left(\frac{1-\nu^2}{2}\right) \tag{۲۲}$$

که در رابطه بالا Q_{ab} ظرفیت نهایی نوک شمع، r_b شعاع شمع و E_{sb} مدول الاستیک خاک در نوک شمع می‌باشد.

۳.۳. نتایج استفاده از روابط تحلیلی:

در این بخش نتایج مربوط به تخمین ظرفیت باربری و تخمین نشست ریزشمع با استفاده از روابط ذکر شده، برای خاک نوع اول و دوم ارائه شده است.در جداول ۳ و ۴ به ترتیب ظرفیت ریزشمع در خاک نوع اول و خاک نوع دوم ارائه گردیده است.

جدول ۳-ظرفیت باربری ریزشمع در خاک با تراکم کم

ظرفیت نوک (Q_p)			ظرفیت جدار(Q_s)		ظرفیت نهایی ریزشمع(Q_u)	
روش Meyerhof		۴۹/۲ تن	روش Coyle-Casttelo	روش مقاومت اصطکاکی	۵۶/۰۴ تن	۷۸/۹۲ تن
روش Janbu	η'=90	۱۸/۱۶ تن	۶/۸۴ تن	۲۹/۷۲ تن	۲۵ تن	۴۷/۸۸ تن
	η'=105	۲۰/۷۸ تن			۲۷/۶۲ تن	۵۰/۵ تن
روش Coyle-Casttelo		۲۵/۰۳ تن			۳۱/۸۷ تن	۵۴/۷۵ تن
روش Vesic		۲۷/۷۷ تن			۳۴/۶۱ تن	۵۷/۴۹

جدول ٤- ظرفیت باربری ریزشمع در خاک نوع زیاد

ظرفیت نوک (Q_p)			ظرفیت جدار(Q_s)		ظرفیت نهایی ریزشمع(Q_u)	
روش Meyerhof		۱۰۰/۱تن	روش Coyle-Casttelo	روش مقاومت اصطکاکی	۱۲۴/۹۵ تن	۱۳۵/۵۵ تن
روش Janbu	η'=90	۳۳ تن	۲۴/۸۵ تن	۳۵/۴۵ تن	۵۷/۸۵	۶۸/۴۵
	η'=105	۴۱ تن			۶۵/۸۵	۷۶/۴۵
روش Coyle-Casttelo		۳۶/۷۲ تن			۶۱/۵۷	۷۲/۱۷
روش Vesic		۵۶/۶۱ تن			۸۱/۴۶	۹۲/۰۶

با مقایسه ظرفیت بدست آمده از نمودار ظرفیت باربری نرم افزار و نتایج روش تحلیلی مشاهده می‌گردد که مقاومت نهایی بدست آمده از مجموع مقادیر روش Janbu [6] و مقاومت اصطکاکی در ماسه[7] نزدیکترین جواب را بدست می‌دهد. در جدول ۵ مقادیر نشست بدست آمده با روابط ذکر شده در قبل را برای خاک نوع اول و دوم محاسبه گردیده و ارائه شده است.

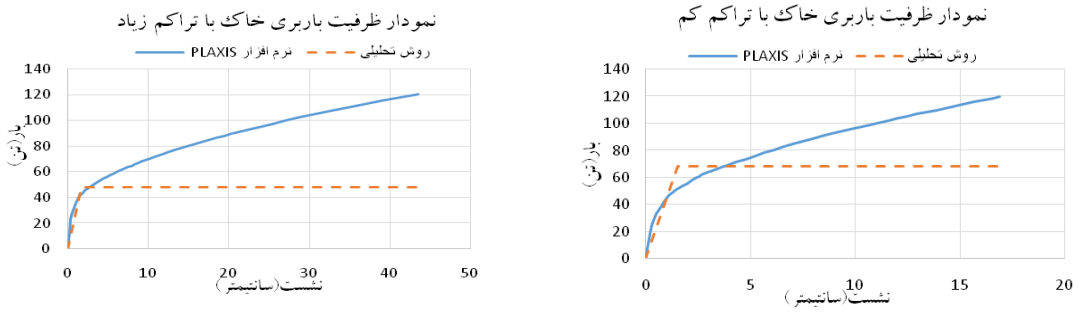
جدول شماره ۵-نشست ریزشمع با روابط مختلف

نوع خاک	رابطه (۱۴)	رابطه (۱۹)	رابطه Polous	رابطه Tim-goodier
خاک نوع اول	۱۶ میلیمتر	۳ میلیمتر	۵۳ میلیمتر	۳۳ میلیمتر
خاک نوع دوم	۱۵ میلیمتر	۲ میلیمتر	۴۰ میلیمتر	۳۰ میلیمتر

۴. مقایسه نتایج:

حال با ترسیم نتایج بدست آمده از روش تحلیلی (مقدار ظرفیت باربری و مقدار نشست) و نمودار ظرفیت باربری در یک نمودار می‌توان دقت روابط مورد استفاده را مشاهده نمود. لازم به ذکر است که بهترین تطبیق مربوط به ظرفیت باربری بدست آمده از مجموع ظرفیت روش Janbu [6] برای η'=۹۰ درجه و مقاومت اصطکاکی در ماسه [7] و نشست بدست آمده از رابطه (۱۴) می‌باشد. در شکل‌های (۵- الف) و (۵ – ب) نتایج بدست آمده از تحلیل به کمک نرم افزار عددی PLAXIS 3D و تخمین‌های بدست آمده با روابط تحلیلی برای خاک با تراکم کم و تراکم زیاد در یک نمودار ترسیم شده‌اند.

با مشاهده نتایج در شکل ۵ می‌توان دید که بین نتایج نرم افزار و روابط تحلیلی تطابق خوبی وجود دارد. این مقدار اختلاف مشاهده شده را شاید بتوان به نوع روابط که مربوط شمع بوده نه ریزشمع و نیز وجود خطا در نتایج روابط تحلیلی دانست.



الف) خاک با تراکم کم

ب) خاک با تراکم زیاد

شکل۵- مقایسه نتایج نرم افزار عددی و روابط تحلیلی

۵. جمع بندی:

با توجه به بررسی انجام شده و نتایج پژوهش را می‌توان به صورت زیر خلاصه نمود:

۱. میانگین ظرفیت تخمین زده شده از روش‌های De Beer و روش ساده شده از روی نمودار ظرفیت باربری، تطابق خوبی با ظرفیت بدست آمده از روابط تحلیلی نشان می‌دهد و بهترین تطبیق مربوط به ظرفیت باربری بدست آمده از مجموع ظرفیت روش Janbu برای η'=۹۰ درجه و مقاومت اصطکاکی در ماسه است.

۲. با پذیرش اختلافی در حدود ۱۰ درصد، ظرفیت باربری بدست آمده از مجموع روش Coyle-Casttelo و مقاومت اصطکاکی در ماسه و همچنین مجموع روش Janbu برای η'=۱۰۵ درجه و مقاومت اصطکاکی در ماسه، نتایج قابل قبولی را ارائه می‌دهند.

۳. روابط مورد بررسی برای تخمین نشست ریزشمع، تفاوت زیادی با یکدیگر دارند و رابطه (۱۴) بهترین تطبیق را با نتایج روش عددی دارد.

۴. نشست محاسبه شده با استفاده از روابط Polous و رابطه (۱۹) به ترتیب بیشترین و کمترین مقادیر را ارائه می‌کنند.

۵. با توجه به نتایج بدست آمده، برای محاسبه ظرفیت باربری و نشست ریزشمع‌ها می‌توان از روابط موجود برای شمع‌ها با درصد اطمینان بالایی استفاده نمود.

۶. مراجع:

[1] FHWA, Micropile Design and Construction, Dallas: U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, 2005.

[2] Meyerhof, G. G. (1976). “Bearing capacity and settlement of pile foundations.” *Journal of the Geotechnical Engineering Division.*, American Society of Civil Engineering, Vol. 102, GT3 , pp. 197-228.

[3] Vesic, A. S. (1977). Design of pile foundations, National Cooperative Highway Research Program Synthesis of Practice No. 42, Transportation Research Board, Washington, D.C.

[4] Coyle, H. M., and Castello, R. R. (1981). “New Design Correlations for Piles in Sand,” *journal of Geotechnical Engineering Division*, American Society of Civil Engineering, Vol. 107, No. GT7, pp.965-986.

[5] Abdelrahman, G. E. Prediction of Ultimate Pile load from Axial Load Tests and Penetration Tests, Cairo University-Fayoum Branch.

[6] Janbu, N. (1976). “Static Bearing Capacity of Friction Piles,” *Proceedings*, Sixth European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 1.2, pp. 479-482.

[7] ب. ا. داس و ش. طاحونی، *اصول مهندسی ژئوتکنیک*، موسسه انتشارات پارس آیین.

[8] Budhu, M. (2007). *Foundations and Earth retaining structures.* the University of California: John Wiley & Sons

[9] Poulos, HG. (1989). “Prediction of Axial Behaviour of Piles,” *Journal of the Geotechnical Engineering Division.*, American Society of Civil Engineering, Vol. 115, GT6 , pp. 836-852.

[10] Timoshenko, S. P. and J. N. Goodier. (1970). “Theory of elasticity”. New York: McGraw-Hill.