

تعیین تنش افقی زمین با استفاده از آزمایش نفوذ مخروط: رویکرد پایگاه داده‌ها

محمد مهدی احمدی* (دانشیار)

پویا کریم بخش (کارشناس ارشد)

علی اکبر گلستانی (دانشجوی دکتری)

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

پایگاه داده‌هایی از نتایج محفظه‌ی کالیبراسیون آزمایش مقاومت نوک مخروط جمع‌آوری شده است. از این پایگاه داده استفاده شده و اثر پارامترها و شرایط خاک (شامل: چگالی نسبی، تنش قائم، تنش افقی، مدول محدود شده و نسبت بیش‌تحکیمی) در مقاومت نوک مخروط مورد بررسی قرار گرفته است. با استفاده از این بررسی‌ها، چگالی نسبی و تنش افقی به عنوان پارامترهای اصلی انتخاب و رابطه‌ی بین آنها و مقاومت نوک مخروط پیشنهاد شده است. این رابطه با محاسبه‌ی معکوس می‌تواند جهت تعیین تنش افقی خاک بر اساس مقاومت نوک مخروط مورد استفاده قرار گیرد. میزان دقت معادله با استفاده از پایگاه داده‌ی آزمایش‌های کالیبراسیون مخروط صحت‌سنجی می‌شود. همچنین کارایی آن با دو معادله‌ی موجود پیشنهاد شده‌ی سایر پژوهشگران مورد مقایسه قرار می‌گیرد. همچنین علت کار بودن و دلایل انتخاب پارامترهای مورد استفاده بررسی و تحلیل می‌شود.

مهندسی عمران شریف، بهار ۱۳۹۳ (ص. ۹۵-۱۰۶)
دوری ۲-۳، شماره ۱/۲، ص. ۹۵-۱۰۶

mmahmadi@sharif.ir
pooya_karimbakhsh@yahoo.com
ali.akbar_golestani@yahoo.com

واژگان کلیدی: آزمون CPT، آزمایش محفظه‌ی کالیبراسیون، مقاومت نوک مخروط، چگالی نسبی، تنش افقی.

۱. مقدمه

آن به دست آورد. بر پایه‌ی این تفسیرها تاکنون کاربردهای فراوانی برای این آزمایش پیشنهاد شده است.

یکی از کاربردهای CPT به دست آوردن فشار جانبی خاک است. پایه‌ی نظری این کاربرد بر اساس اظهار نظر بسیاری از پژوهشگران است که بر اساس آن شرایط تنش و به خصوص تنش افقی خاک اثری مهم در نتیجه‌ی آزمایش نفوذ مخروط دارد. [۶-۱] در این مورد برخی روابط پیشنهاد شده است. از جمله رابطه‌ی که در سال ۱۹۹۸ ارائه شده است: [۱]

$$\log_{10} \frac{(q_c - \sigma_h)}{\sigma'_h} = 1.51 + 1.23 D_r \quad (1)$$

در این رابطه، q_c مقاومت نوک مخروط، σ_h تنش افقی خاک، σ'_h تنش افقی مؤثر خاک، و D_r چگالی نسبی خاک است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در این رابطه اثر بیش‌تحکیمی دیده نمی‌شود. به این دلیل که مطالعات بر روی اتساع سنجی مارکتی در ماسه نشان می‌دهد که تأثیر تنش افقی خاک، بسیار بیشتر از نسبت بیش‌تحکیمی است؛ و تفاوت‌هایی که در داده‌های محفظه‌ی کالیبراسیون در مقادیر نسبت بیش‌تحکیمی (OCR) مختلف دیده می‌شود، بیشتر به دلیل تفاوت در تنش افقی است تا نسبت بیش‌تحکیمی. [۷]

همچنین بر اساس رابطه‌ی پیشنهادی محققان، [۸] رابطه‌ی ۲ ارائه شده است که اگر چه از تنش میانگین برای رابطه‌ی ۲ استفاده شده است؛ اما در واقع در قالب

آزمایش نفوذ مخروط (CPT) پس از آزمایش نفوذ استاندارد (SPT) پرکاربردترین آزمایش صحرایی در مهندسی ژئوتکنیک است. در این آزمایش، مخروطی فلزی با سرعت ثابت به درون زمین نفوذ می‌کند و بر اساس حسگرهای مورد استفاده در این وسیله، اطلاعات مختلفی را می‌توان ثبت کرد. از جمله معمول‌ترین این اطلاعات می‌توان به فشار وارده از جانب خاک بر نوک مخروط (مقاومت نوک مخروط، q_c)، تنش اصطکاکی وارد بر جداره‌ی دستگاه (اصطکاک جداره، f_s) و فشار آب منفذی خاک (u_1 و u_2) اشاره کرد. همچنین حسگرهای دیگری نیز در دستگاه مورد استفاده قرار می‌گیرند که اطلاعاتی همچون سرعت موج برشی در خاک، غلظت برخی مواد شیمیایی موجود در خاک و سایر موارد را ثبت می‌کنند.

آزمایش CPT اطلاعات را به صورت پیوسته ضبط می‌کند که این پیوستگی از مهم‌ترین مزایای این آزمایش نسبت به بسیاری از آزمایش‌های صحرایی دیگر مانند: آزمون‌های نفوذ استاندارد (SPT)، اتساع سنجی (DMT)، و فشارسنجی (PMT) است.

داده‌های خام به دست آمده از آزمایش CPT مورد تفسیر قرار می‌گیرند و بر اساس آن می‌توان اطلاعات گوناگونی در مورد شرایط خاک و پارامترهای مکانیکی

* نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۹۱/۵/۲۱، اصلاحیه ۹۱/۸/۲۱، پذیرش: ۹۱/۹/۸.

همین پارامتر، تنش افقی خاک در مقاومت نوک مخروط مؤثر است:^[۲۱]

$$q_c = C_0 P_a \left(\frac{\sigma'_m}{P_a} \right)^{C_1} \exp(C_2 D_r) \quad (2)$$

در این رابطه، P_a ثابتی برابر با فشار اتمسفر و برابر با 1 kg/cm^2 یا 98.1 kPa ، σ'_m تنش میانگین مؤثر خاک (در حالت کلی یک مؤلفه‌ی تنش مؤثر ژئواستاتیک یا یک ثابت تنش)، و C_0 ، C_1 و C_2 مقادیر ثابت و به ترتیب برابر با 0.46 ، $0.24/94$ و 2.96 هستند.

علاوه بر شرایط تنش و چگالی نسبی، پژوهشگران پارامترهای دیگری را نیز در مقاومت نوک مخروط مؤثر می‌دانند. از جمله در پژوهشی در سال ۱۹۹۱، نسبت بیش‌تحکیمی از پارامترهای مؤثر برشمرده شده و روابطی بین این نسبت و مقاومت نوک مخروط ارائه شده است.^[۹]

از سوی دیگر در برخی از پژوهش‌ها تأثیر مدول محدودشده در نتایج آزمایش نفوذ مخروط مورد توجه قرار گرفته است.^[۱۲-۱۰]

پارامتر دیگری که تأثیر آن در مقاومت نوک مخروط همواره مورد بحث بوده، تنش قائم خاک است. برخی پژوهشگران از این پارامتر به صورت مستقیم در معادلات خود استفاده کرده‌اند،^[۸] و برخی دیگر آن را در قالب تنش میانگین و به صورت ضمنی به‌کار برده‌اند.^[۲۳]

برای رسیدن به معادله‌ی مناسب جهت تعیین تنش افقی خاک از مقاومت نوک مخروط، باید ابتدا بررسی شود که چه پارامترهایی در مقاومت نوک مخروط اثرگذارند. به همین دلیل باید تأثیر کلیه‌ی پارامترهایی که تاکنون ذکر شده‌اند، واکاوی شوند، که در ادامه‌ی نوشتار به آن پرداخته شده است.

۲. محفظه‌ی کالیبراسیون و شرایط مرزی

همان‌طور که اشاره شد، نتایج آزمایش CPT نیازمند تفسیر هستند، بدین معنی که داده‌های به‌دست‌آمده باید از طریق یک سری روابط به شرایط اولیه و پارامترهای خاک مورد آزمایش مرتبط شوند و به عبارتی، تحلیل معکوس انجام شود. بنابراین، باید شرایط و پارامترهای خاک از پیش معلوم باشند. اولین راهی که در این مورد به نظر می‌رسد، انجام آزمایش CPT بر روی خاک، تهیه‌ی نمونه‌ی دست‌نخورده از خاک همان منطقه‌ی مورد آزمایش به طور هم‌زمان، انجام آزمایش‌های آزمایشگاهی بر روی این نمونه، تعیین پارامترها، و سپس ارائه‌ی رابطه بین نتایج آزمایش CPT و پارامترهای تعیین‌شده است. این روش تا حدودی در خاک‌های چسبنده ممکن است؛ اما در خاک‌های غیرچسبنده مانند ماسه، معمولاً دشواری بیشتری به علت هزینه‌ی زیاد تهیه‌ی نمونه‌ی دست‌نخورده وجود دارد.

برای جبران این کاستی، از محفظه‌های کالیبراسیون استفاده می‌شود، که در آنها نمونه‌ی از خاک غیرچسبنده با شرایط تنش و پارامترهای مقاومتی و تغییرشکلی مشخص آماده می‌شود. سپس آزمایش در محل (مثلاً CPT) بر روی آن انجام و نتایج به پارامترهای اولیه با قابلیت اعتماد بالا مرتبط می‌شوند.

استفاده از محفظه‌ی کالیبراسیون مقبولیت نسبتاً گسترده‌ی دارد و تاکنون در ایالات متحده،^[۱۳] استرالیا،^[۱۵] بریتانیا،^[۱۶] نروژ^[۱۷] و ایتالیا^[۱۸] استفاده شده است.^[۱۹-۲۱] مقبولیت این روش می‌تواند با مزایای محفظه‌ی کالیبراسیون به این شرح توجیه شود:

۱. امکان بازساخت نمونه‌ها که، تا حدودی در ساختار، مشابه خاک طبیعی ناشی از رسوب‌گذاری است؛

۲. همگنی و امکان تکرار نمونه‌ها در دامنه‌ی گسترده‌ی از چگالی‌های نسبی؛

۳. امکان کنترل دقیق تنش‌های افقی و قائم اعمال‌شده به نمونه‌ها؛

۴. امکان شبیه‌سازی تاریخچه‌ی تنش و کرنش نمونه‌ها.

اما مهم‌ترین نقص این روش، محدودیت ابعاد محفظه است که باعث می‌شود هنگام تفسیر نتایج، تأثیر شرایط مرزی محفظه در نتایج آزمایش به اجبار مد نظر قرار گیرد. در مورد تأثیر شرایط مرزی در نتایج آزمایش نفوذ مخروط تاکنون پژوهش‌های زیادی انجام شده است.^[۲۴-۲۲،۶]

در راستای بررسی مکانیزم آزمایش نفوذ مخروط و پارامترهای تأثیرگذار در نتایج آن و امکان استفاده از نتایج آزمایش برای تعیین برخی پارامترهای اولیه‌ی خاک، یک پایگاه داده از آزمایش‌های محفظه‌ی کالیبراسیون نفوذ مخروط از منابع مختلف جمع‌آوری شده است.^[۲۶،۲۵،۲۱] مشخصات آماری این پایگاه داده در جدول‌های ۱ و ۲ آمده است.

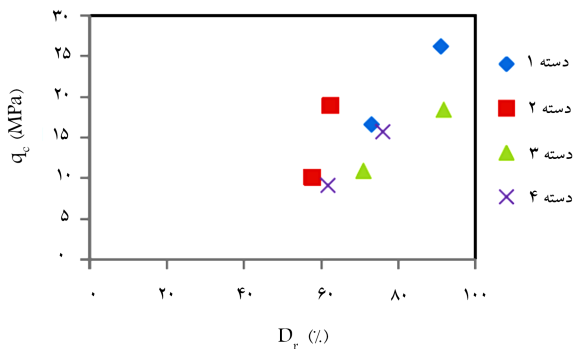
با استفاده از داده‌های جمع‌آوری‌شده، گراف‌های دیگری علاوه بر موارد ارائه‌شده در این نوشتار به‌دست آمده‌اند که می‌توان آنها را در برخی پژوهش‌های دیگر،^[۲۷،۶]

جدول ۱. اطلاعات کلی پایگاه داده.

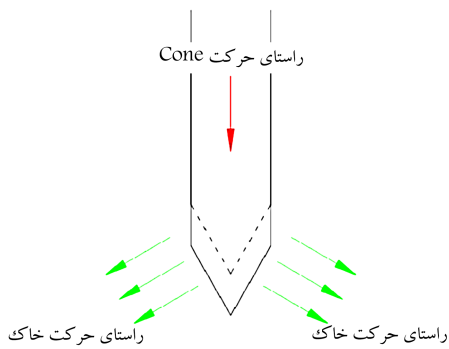
شرح	تعداد	درصد	
شرایط مرزی	BC۱	۴۱۷	۶۶٫۱
	BC۲	۲۷	۴٫۳
	BC۳	۱۳۹	۲۲٫۰
	BC۴	۴۸	۷٫۶
شرایط پیش‌تحکیم یا فتگی	NC	۴۲۸	۶۷٫۸
	OC	۲۰۲	۳۲٫۰
مکان آزمایش	Berkley ^[۲۵،۱]	۶۱	۹٫۷
	ENEL CRIS ^[۲۶،۲۵،۱]	۱۶۲	۲۵٫۷
	ISMES ^[۲۶،۲۵،۱]	۲۴۷	۳۹٫۱
	NGI ^[۲۶،۲۵،۱]	۲۶	۴٫۱
	Oxford ^[۲]	۵۷	۹٫۰
	Southampton ^[۲۶،۲۵،۱]	۶۰	۹٫۵
Tokyo ^[۲۵،۱]	۱۸	۲٫۹	
کل آزمایش‌ها	۶۳۱		

جدول ۲. مقادیر کمیته، بیشینه و میانگین پارامترها (انجام اندازه‌گیری پارامترها در عمق میانی محفظه).

پارامتر	مقدار کمیته	مقدار بیشینه	مقدار میانگین
γ_d (kN/m ^۳)	۱۳٫۶۹۴	۱۷٫۱۱۱	۱۵٫۵۶۳
D_r (%)	۵	۹۸	۶۵٫۳
σ'_v (kPa)	۲۹٫۱	۷۱۵٫۸	۱۴۰٫۴
K_c	۰٫۲۲۹	۲٫۷۰۲	۰٫۶۸۸
OCR	۱	۱۵٫۱۳	۲٫۹۲
M (MPa)	۱۱٫۴	۳۱۲٫۹	۱۱۸٫۲
q_c (MPa)	۱٫۲	۵۶٫۷	۱۷٫۰
f_s (kPa)	۰	۴۴۱٫۱	۹۳٫۱
σ'_h (kPa)	۱۷٫۰	۳۵۶٫۵	۸۷٫۵
σ'_m (kPa)	۲۵٫۴	۴۷۳٫۵	۱۰۵٫۱



شکل ۲. تأثیر چگالی نسبی در مقاومت نوک مخروط (BC۳).



شکل ۳. مکانیزم عملکرد CPT.

آزمایش‌ها تقریباً ثابت‌اند. به جز دسته‌ی ۲، که نسبت قطر محفظه به قطر مخروط آن (RD) برابر ۴۷ است، در سایر دسته‌ها این نسبت برابر ۳۴ است. با توجه به این شکل ملاحظه می‌شود که همانند شکل ۱، افزایش چگالی نسبی مستقل از دیگر فاکتورها، متناظر با افزایش مقاومت نوک مخروط است. به عبارت دیگر، رابطه‌ی بین چگالی نسبی و مقاومت نوک مخروط مستقیم است. البته چگونگی این رابطه، از نظر خطی یا غیر خطی بودن، فعلاً قابل بررسی نیست و در ادامه‌ی بحث به آن پرداخته شده است.

تأثیر پذیری آشکار آزمایش نفوذ مخروط از چگالی نسبی خاک، به مکانیزم این آزمایش بستگی دارد. این مکانیزم را می‌توان با استفاده از شکل شماتیک شکل ۳ بیشتر توضیح داد. چنان که در این شکل دیده می‌شود، مخروط برای فرورفتن در خاک نیاز به بازکردن فضای کافی برای خود دارد. بنابراین دانه‌های خاک مجاور مخروط باید جابه‌جا شوند و در نتیجه، محدوده‌ی اطراف مخروط متراکم‌تر شود. چنانچه خاک این محدوده شل و با چگالی نسبی کم باشد و به عبارتی فضای خالی بین دانه‌های خاک زیاد باشد، آرایش مجدد دانه‌ها، متراکم شدن خاک و ایجاد فضای لازم برای مخروط آسان‌تر و با صرف نیرو و انرژی کمتری صورت می‌گیرد. اما اگر خاک متراکم باشد، فضای بین دانه‌ها کم است و بنابراین آرایش مجدد دانه‌های اطراف مخروط و متراکم‌تر شدن خاک این منطقه نیاز به صرف انرژی بیشتری دارد. بنابراین، در شرایط ثابت، مقاومت نوک مخروط در خاک شل کمتر و در خاک متراکم بیشتر خواهد بود.

این مسئله همچنین خود را در نتایج مدل‌سازی عددی به صورت وسعت محدوده‌ی خمیری اطراف مخروط نشان می‌دهد. در خاک‌های متراکم، این محدوده وسیع‌تر از خاک‌های شل است. این نکته همچنین می‌تواند علت تأثیر شرایط مرزی و نسبت قطر محفظه به قطر مخروط در نتایج آزمایش نفوذ مخروط را توضیح دهد.

مشاهده کرد. در بررسی‌های انجام شده با استفاده از این پایگاه داده دقت شده است که کلیه داده‌ها در هر گروه از مقایسه‌ها دارای جنس ماسه، شرایط مرزی و نسبت محفظه به مخروط یکسان باشند، تا نتیجه‌ی بررسی‌ها تحت تأثیر شرایط دیگر مانند شرایط مرزی و دیگر پارامترها قرار نگیرد.

۳. بررسی پارامترها

۱.۳. چگالی نسبی

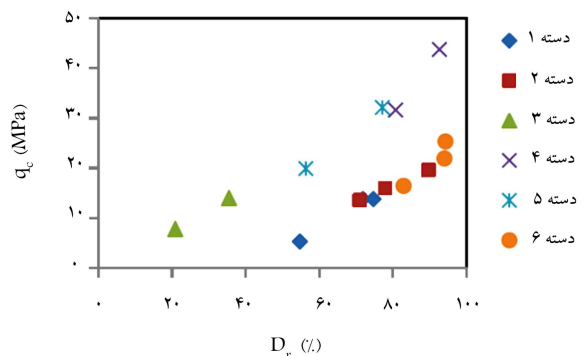
در متون فنی، بسیاری از پژوهشگران چگالی نسبی را از مهم‌ترین پارامترهای مؤثر در مقاومت نوک مخروط دانسته‌اند. برخی آن را مستقیماً در معادلات و روابط پیشنهادی خود وارد کرده‌اند.^[۳۰،۳۱] در حالی که برخی دیگر تأثیر آن را به طور ضمنی و در قالب پارامتر حالت نشان داده‌اند.^[۲۸] به دلیل کثرت اشاره به این پارامتر، پیش از سایر عوامل، پارامتر چگالی نسبی بررسی می‌شود.

انواع شرایط مرزی مورد استفاده در آزمایش‌های محفظه‌ی کالیبراسیون به ۴ دسته تقسیم می‌شوند (BC۱ تا BC۴)، که در جدول ۳ ارائه شده است.^[۲۹] داده‌های شکل ۱، همگی تحت شرایط مرزی BC۱ هستند (جدول ۴). نسبت قطر محفظه به قطر مخروط (RD) برای سه دسته از داده‌ها برابر ۳۴ و در یک دسته ۴۷ است. در هر دسته، چنان‌که پیش از این اشاره شد، جنس ماسه‌ی تحت بررسی یکسان است. تمامی پارامترهای اولیه تقریباً ثابت (در محدوده‌ی با تغییرات قابل چشم‌پوشی و معمولاً کمتر از ۱۰٪) است و فقط چگالی نسبی تغییر می‌کند. به جز دسته‌ی ۲، در همه‌ی دسته‌ها مرکز انجام دهنده‌ی آزمایش‌ها یکسان است. ملاحظه می‌شود که در شکل ۱ در همه‌ی دسته‌ها، بدون استثناء با افزایش چگالی نسبی، مقاومت نوک مخروط نیز، مستقل از شرایط اولیه، افزایش می‌یابد.

در شکل ۲ نیز دسته‌های مختلفی از داده‌ها، که تحت شرایط مرزی BC۳ آزمایش شده‌اند، انتخاب می‌شوند (جدول ۵). در هر دسته فاکتورهای اولیه، کلیه‌ی

جدول ۳. انواع شرایط مرزی در آزمایش‌های محفظه‌ی کالیبراسیون.

نوع شرایط مرزی	شرایط مرزی جانبی	شرایط مرزی تحتانی
BC۱	تنش افقی: ثابت	تنش قائم: ثابت
BC۲	کرنش افقی: صفر	کرنش قائم: صفر
BC۳	کرنش افقی: صفر	تنش قائم: ثابت
BC۴	تنش افقی: ثابت	کرنش قائم: صفر



شکل ۱. تأثیر چگالی نسبی در مقاومت نوک مخروط (BC۱).

جدول ۴. داده‌های مربوط به شکل ۱.

Chamber/ Cone ratio	BC	q_c (MPa)	D_r (%)	Sand	Test no.	Test done by	Set No.
۳۴	۱	۱۳٫۸	۷۱٫۹	TS	۱۸۹	ISMES	
۳۴	۱	۱۳٫۸	۷۴٫۸	TS	۱۶۸	ISMES	۱
۳۴	۱	۵٫۳	۵۴٫۸	TS	۶۲	ISMES	
۳۴	۱	۱۳٫۶	۷۱٫۰	TS	۱۵	ISMES	
۳۴	۱	۱۹٫۶	۸۹٫۷	TS	۱۰	ISMES	۲
۳۴	۱	۱۶٫۰	۷۷٫۹	TS	۱۱۵	ENEL CRIS	
۳۴	۱	۱۴٫۰	۳۵٫۵	TS	۵۹	ISMES	۳
۳۴	۱	۷٫۸	۲۰٫۹	TS	۳۲	ISMES	
۳۴	۱	۳۱٫۶	۸۰٫۸	TS	۷۰	ENEL CRIS	۴
۳۴	۱	۴۳٫۷	۹۲٫۷	TS	۶۱	ENEL CRIS	
۳۴	۱	۳۲٫۱	۷۷٫۲	TS	۸۲	ENEL CRIS	۵
۳۴	۱	۱۹٫۹	۵۶٫۴	TS	۷۵	ENEL CRIS	
۴۷	۱	۱۶٫۴	۸۳٫۰	TS	۱۴۶	ENEL CRIS	
۴۷	۱	۲۱٫۹	۹۴٫۱	TS	۱۵۳	ENEL CRIS	۶
۴۷	۱	۲۵٫۳	۹۴٫۴	TS	۱۶۱	ENEL CRIS	

جدول ۵. داده‌های مربوط به شکل ۲.

Chamber/ Cone ratio	BC	q_c (MPa)	D_r (%)	Sand	Test no.	Test done by	Set No.
۳۴	۳	۱۶٫۶	۷۳٫۱	TS	۸۱	ISMES	۱
۳۴	۳	۲۶٫۲	۹۱٫۱	TS	۷۷	ISMES	
۴۷	۳	۱۰٫۱	۵۷٫۷	TS	۱۶۶	ISMES	۲
۴۷	۳	۱۸٫۹	۶۲٫۴	TS	۱۸۸	ISMES	
۳۴	۳	۱۰٫۹	۷۱٫۰	TS	۵۰	ISMES	۳
۳۴	۳	۱۸٫۴	۹۱٫۸	TS	۳۴	ENEL CRIS	
۳۴	۳	۱۵٫۷	۷۶٫۰	TS	۱۶۹	ISMES	۴
۳۴	۳	۹٫۱	۶۱٫۸	TS	۳۳	ENEL CRIS	

در همین ارتباط با استفاده از پایگاه داده (جدول‌های ۶ و ۷)، با ثابت نگه داشتن سایر پارامترها اثر تنش قائم در مقاومت نوک مخروط بررسی شده است که نتیجه در شکل‌های ۴ و ۵ نشان داده شده است.

در شکل ۴ نتایج شش سری آزمایش تحت شرایط مرزی BC۱ و نسبت قطر محفظه به قطر مخروط، ۳۰ نشان داده شده است. در هر سری، کلیه پارامترها و شرایط اولیه به جز تنش قائم [تقریباً] ثابت هستند. در سری ۱، افزایش تنش قائم با کاهش مقاومت نوک مخروط همراه است. در حالی که در سری‌های ۲، ۴ و ۶ علی‌رغم افزایش تنش قائم، مقاومت نوک مخروط تقریباً ثابت باقی مانده است. اما در سری‌های ۳ و ۵، افزایش تنش قائم منجر به افزایش مقاومت نوک مخروط شده است. همچنین در شکل ۵، سه سری آزمایش تحت شرایط مرزی BC۱، اما با نسبت

۲.۳. تنش قائم

برخی پژوهشگران میزان تنش قائم را در مقاومت نوک مخروط مؤثر می‌دانند.^[۸] و برخی دیگر نیز این پارامتر را در کنار تنش افقی برای پیش‌بینی مقاومت نوک مخروط مورد استفاده قرار می‌دهند.^[۱] همچنین معادلاتی نیز که از تنش میانگین برای پیش‌بینی مقاومت نوک مخروط استفاده می‌کنند، به طور ضمنی این پارامتر را به دلیل رابطه‌ی ۳ مد نظر دارند:^[۴]

$$\sigma_m = \frac{[\sigma_v (1 + 2K_0)]}{3} = \frac{(\sigma_v + 2\sigma_h)}{3} \quad (3)$$

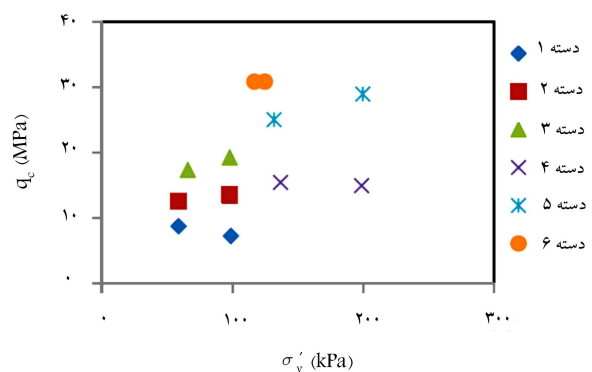
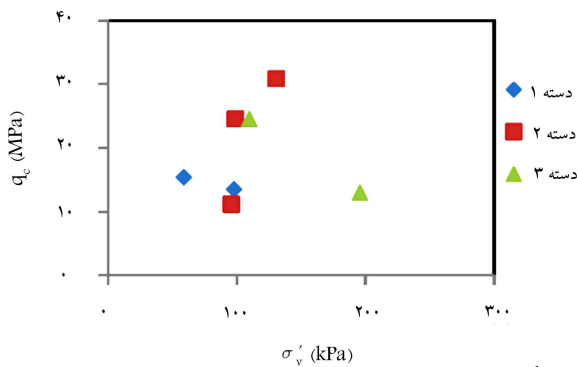
در این رابطه، K_0 ضریب فشار جانبی زمین در حالت سکون است.

جدول ۶. داده‌های مربوط به شکل ۴.

Chamber/ Cone ratio	BC	q_c (MPa)	σ'_v (kPa)	Sand	Test no.	Test done by	Set No.
۳۰	۱	۷٫۲	۹۹٫۰	M	۱۰	Berkeley	۱
۳۰	۱	۸٫۷	۵۹٫۰	M	۱۲	Berkeley	۱
۳۰	۱	۱۲٫۵	۵۹٫۰	M	۷C	Berkeley	۲
۳۰	۱	۱۳٫۵	۹۸٫۰	M	۶C	Berkeley	۲
۳۰	۱	۱۷٫۳	۶۶٫۰	M	۵	Berkeley	۳
۳۰	۱	۱۹٫۲	۹۸٫۰	M	۳	Berkeley	۳
۳۰	۱	۱۴٫۹	۱۹۸٫۹	M	۹	Berkeley	۴
۳۰	۱	۱۵٫۴	۱۳۶٫۹	M	۱۷	Berkeley	۴
۳۰	۱	۲۵٫۰	۱۳۱٫۹	M	۱۵	Berkeley	۵
۳۰	۱	۲۸٫۹	۱۹۹٫۹	M	۷	Berkeley	۵
۳۰	۱	۳۰٫۸	۱۲۴٫۹	M	۶	Berkeley	۶
۳۰	۱	۳۰٫۸	۱۱۷٫۰	M	۱۶	Berkeley	۶

جدول ۷. داده‌های مربوط به شکل ۵.

Chamber/ Cone ratio	BC	q_c (MPa)	σ'_v (kPa)	Sand	Test no.	Test done by	Set No.
۵۴	۱	۱۵٫۴	۵۹٫۰	M	۷	Berkeley	۱
۵۴	۱	۱۳٫۵	۹۸٫۰	M	۶	Berkeley	۱
۵۴	۱	۲۴٫۵	۹۹٫۰	M	۲	Berkeley	۲
۵۴	۱	۱۱٫۱	۹۶٫۰	M	۵	Berkeley	۲
۵۴	۱	۳۰٫۸	۱۳۰٫۹	M	۱۶	Berkeley	۲
۵۴	۱	۱۳٫۰	۱۹۵٫۹	M	۱	Berkeley	۳
۵۴	۱	۲۴٫۵	۱۱۰٫۰	M	۸	Berkeley	۳

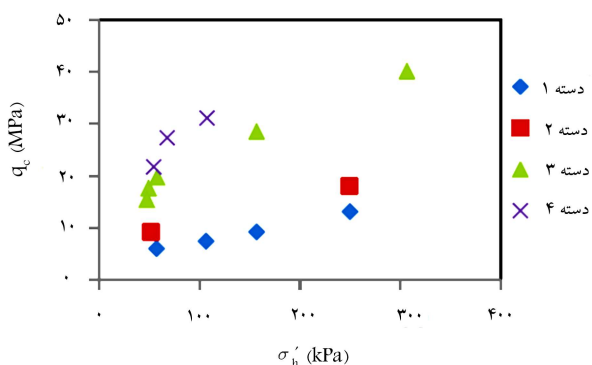


شکل ۵. تاثیر تنش مؤثر قائم در مقاومت نوک مخروط (BC=۱ و RD=۵۴).

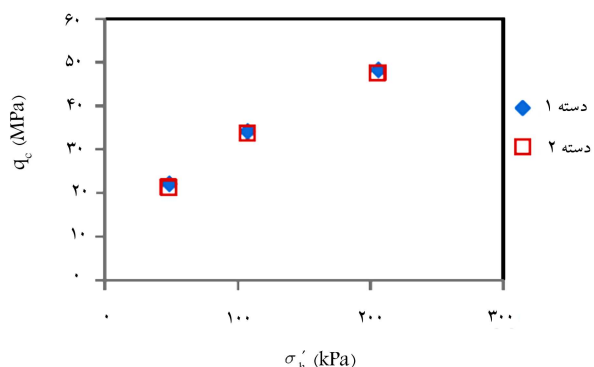
شکل ۴. تاثیر تنش مؤثر قائم در مقاومت نوک مخروط (BC=۱ و RD=۳۰).

حتی نمی‌توان برای دامنه‌ی خاصی از تنش قائم اظهار نظر کرد، چرا که برای مثال در شکل ۴، در محدوده‌ی تنش قائم ۱۰۰-۵۰ kPa، هر سه حالت کاهش، ثبات، و افزایش مقاومت نوک مخروط در مقابل افزایش تنش قائم مشاهده می‌شود. همچنین در محدوده‌ی تنش قائم ۲۰۰-۱۲۰ kPa، هم افزایش و هم ثابت ماندن مقاومت نوک مخروط همراه با افزایش تنش قائم مشاهده می‌شود. این عدم وجود رابطه‌ی مشخص با یافته‌های پژوهشگران^[۲] نیز همخوانی دارد.

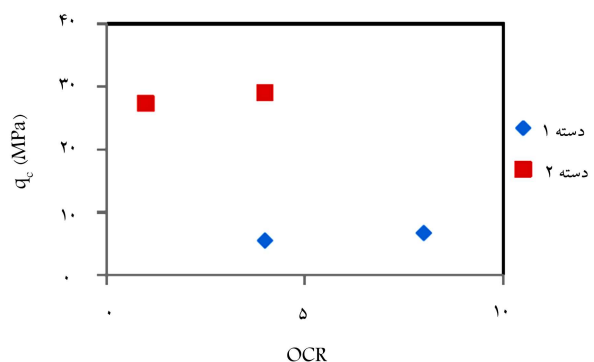
قطر محفظه به قطر مخروط ۵۴ نشان داده شده است. در سری ۱، با افزایش تنش قائم، کاهش نسبی و در سری ۳ کاهش شدید مقاومت نوک مخروط مشاهده می‌شود. با این حال در سری ۲ با افزایش تنش قائم، مقاومت نوک مخروط نیز اضافه شده است. براساس شکل‌های ۴ و ۵ می‌توان گفت که اعلام رابطه‌ی خاص و روند مشخص بین تنش قائم و مقاومت نوک، دست‌کم براساس داده‌های موجود، غیرممکن است.



شکل ۶. تأثیر تنش مؤثر افقی در مقاومت نوک مخروط (BC۱ و BC۴) ($R_D = ۳۴$).



شکل ۷. تأثیر تنش مؤثر افقی در مقاومت نوک مخروط ($R_D = ۱۰۶$).



شکل ۸. تأثیر نسبت پیش تحکیمی در مقاومت نوک مخروط (BC۱ و BC۴) ($R_D = ۳۴$).

۴.۳. نسبت بیش تحکیمی

نسبت بیش تحکیمی یکی دیگر از پارامترهایی است که امکان دارد در مقاومت نوک مخروط مؤثر باشد. برخی پژوهشگران، روابطی بین این دو پارامتر برقرار کرده‌اند.^[۹] مانند گذشته، با ثابت نگه داشتن سایر پارامترها، اثر نسبت بیش تحکیمی در مقاومت نوک مخروط بررسی می‌شود (جدول‌های ۱۰ الی ۱۲).

شکل ۸ نشان می‌دهد که در دسته ۱، با دو برابر شدن نسبت بیش تحکیمی، مقاومت نوک مخروط به اندازه‌ی ۱٫۲ مگاپاسکال یعنی حدود ۲۲٪ افزایش می‌یابد. در دسته ۲، با چهار برابر شدن نسبت بیش تحکیمی، میزان افزایش در مقاومت نوک مخروط برابر با ۱٫۷ مگاپاسکال و معادل ۶٪ است.

در شکل ۹ و در دسته ۱، با افزایش ۲۷ درصدی نسبت بیش تحکیمی،

پژوهشگران دیگری نیز با تحلیل عددی افزایش کم مقاومت نوک مخروط بر حسب تنش قائم را گزارش کرده‌اند.^[۵] اگرچه همچنان بر اثرگذاری شایان تنش قائم در مقاومت نوک مخروط اذعان شده است.^[۳۰]

۳.۳. تنش افقی

پارامتر دیگری که در متون فنی از آن به‌عنوان پارامتری مؤثر در مقدار مقاومت نوک مخروط یاد شده، تنش افقی خاک است. این پارامتر در کنار تنش قائم و چگالی نسبی، با تأثیری بیشتر از تنش قائم که به‌صورت توانی بزرگ‌تر نشان داده شده است [به کار برده و بیشتر از تنش قائم [که به‌صورت توانی بزرگ‌تر نشان داده شده است] به کار رفته و رابطه‌ی ۴ ارائه شده است:^[۱]

$$D_r = \left(\frac{1}{C_r} \right) \ln \left(\frac{q_c}{C_r \sigma'_v C_1} \right) \quad (۴)$$

در این رابطه، C_r ، C_1 و C_2 ثابت‌های تجربی هستند. این معادله برای ماسه‌های بیش تحکیم یافته (OC) قابل استفاده نیست. دلیل این امر آن است که q_c تقریباً به کلی تحت تأثیر تنش مؤثر افقی σ'_h است و این معادله تنش افقی را در بر ندارد. همچنین در پژوهشی دیگر از آن فقط در کنار تراکم نسبی خاک استفاده شده و رابطه‌ی ۵ برای گستره‌ی مختلف چگالی نسبی ارائه شده است:^[۲]

$$\frac{q_c}{P_a} = A \left(\frac{\sigma'_h}{P_a} \right)^{r_f} \quad (۵)$$

در این رابطه، A مقداری ثابت، و σ'_h تنش مؤثر افقی خاک در حال سکون است. برخی پژوهشگران نیز (مشابه رابطه ۲ با تفاوت در مقادیر C_r ، C_1 و C_2)، اثر آن را در تنش میانگین نشان داده‌اند.^[۳۱،۳۲] همچنین علت استفاده از تنش میانگین دشواری تعیین تنش افقی بیان شده است.^[۴]

چنانکه در شکل ۶ دیده می‌شود، در حالتی که همه‌ی پارامترها ثابت هستند، در تمامی دسته‌ها افزایش تنش افقی متناظر با افزایش مقاومت نوک مخروط است. همچنین می‌بینیم که در دسته‌های ۳ و ۴ که چگالی نسبی بالاتر و حدوداً ۸۶٪ است، میزان افزایش مقاومت نوک مخروط به ازاء افزایش واحد در تنش افقی، بیشتر از دسته‌های ۱ و ۲ است؛ که چگالی نسبی پایین‌تر و حدود ۴۲٪ و ۵۵٪ دارند (جدول ۸). این مسئله، نشان‌دهنده‌ی تأثیر توأمان تنش افقی و چگالی نسبی در مقاومت نوک مخروط است و با بحث پیشین در مورد چگالی نسبی همخوانی دارد. شکل ۷ نیز که نشان‌دهنده‌ی آزمایش‌هایی با نسبت قطر محفظه به مخروط مساوی ۱۰۶ و انجام شده در شرایط مرزی BC۱ و BC۳ است، نشانگر تأثیر مستقیم و آشکار تنش افقی در مقاومت نوک مخروط در صورت ثابت ماندن سایر عوامل است (جدول ۹). از نکات قابل تأمل این شکل، برابری تقریبی مقادیر مقاومت نوک مخروط در دو حالت مختلف شرایط مرزی است. علت این مسئله، بزرگی نسبت قطر محفظه‌ی کالیبراسیون به قطر مخروط است. در مقادیر بزرگ نسبت قطر محفظه به قطر مخروط، تأثیر شرایط مرزی کم و به مرور قابل چشم‌پوشی می‌شود. تأثیر شرایط مرزی در حالت BC۲، بیشتر از سایر موارد است و برای از بین بردن این تأثیر نیاز به R_D بزرگ‌تری خواهد بود.^[۳۳]

تأثیر تنش افقی در کنار چگالی نسبی در مقاومت نوک مخروط را می‌توان مانند قبل، براساس مکانیزم عملکرد آزمایش نفوذ مخروط، و بحث لزوم کنارزدن و جابه‌جایی دانه‌های خاک اطراف مخروط (با استفاده از شکل ۳) توضیح داد. در شرایط مشابه و تراکم نسبی ثابت، هر چه فشار جانبی [تنش افقی] بیشتر باشد، فشار لازم برای جابه‌جا کردن و کنارزدن دانه‌ها به‌وسیله‌ی مخروط بیشتر می‌شود.

جدول ۸. داده‌های مربوط به شکل ۶.

Chamber/ Cone ratio	BC	q_c (MPa)	σ'_h (kPa)	Sand	Test no.	Test done by	Set No.
۳۴	۱	۶,۰	۷۵,۲	TY	۳۸۹	ISMES	۱
۳۴	۱	۷,۴	۱۰۶,۵	TY	۳۸۹	ISMES	
۳۴	۱	۹,۲	۱۵۶,۹	TY	۳۹۶	ISMES	
۳۴	۱	۱۳,۱	۲۴۹,۷	TY	۳۹۶	ISMES	
۳۴	۱	۹,۲	۵۱,۸	TY	۳۸۸	ISMES	۲
۳۴	۱	۱۸,۰	۲۴۹,۵	TY	۳۸۸	ISMES	
۳۴	۱	۱۷,۶	۴۹,۲	TY	۳۱۱	ISMES	۳
۳۴	۱	۲۸,۵	۱۵۶,۹	TY	۴۰۱	ISMES	
۳۴	۱	۴۰,۱	۳۰۶,۶	TY	۴۰۱	ISMES	
۳۴	۱	۱۹,۷	۵۷,۸	TY	۳۹۶	ISMES	
۳۴	۱	۱۵,۴	۴۷,۴	TY	۳۸۷	ISMES	۴
۳۴	۱	۲۷,۳	۶۷,۸	HS	۱۲	SU	
۳۴	۱	۲۱,۷	۵۴,۴	HS	۱۷۴	ENEL CRIS	
۳۴	۱	۳۱,۱	۱۰۷,۴	HS	۱۳	SU	

جدول ۹. داده‌های مربوط به شکل ۷.

Chamber/ Cone ratio	BC	q_c (MPa)	σ'_h (kPa)	Sand	Test no.	Test done by	Set No.
۱۰۶	۱	۲۲,۱	۴۸,۷	TY	۴۰۷	ISMES	۱
۱۰۶	۱	۳۴,۱	۱۰۷,۶	TY	۴۰۷	ISMES	
۱۰۶	۱	۴۸,۲	۲۰۶,۱	TY	۴۰۷	ISMES	
۱۰۶	۳	۲۱,۳	۴۸,۰	TY	۴۰۹	ISMES	۲
۱۰۶	۳	۳۳,۷	۱۰۷,۵	TY	۴۰۹	ISMES	
۱۰۶	۳	۴۷,۵	۲۰۵,۶	TY	۴۰۹	ISMES	

جدول ۱۰. داده‌های مربوط به شکل ۸.

Chamber/ Cone ratio	BC	q_c (MPa)	OCR	Sand	Test no.	Test done by	Set No.
۳۴	۱	۵,۵	۴,۰۰	HS	۵۳	SU	۱
۳۴	۱	۶,۷	۸,۰۰	HS	۵۲	SU	
۳۴	۱	۲۹,۰	۴,۰۰	HS	۱۷	SU	۲
۳۴	۱	۲۷,۳	۱	HS	۱۲	SU	

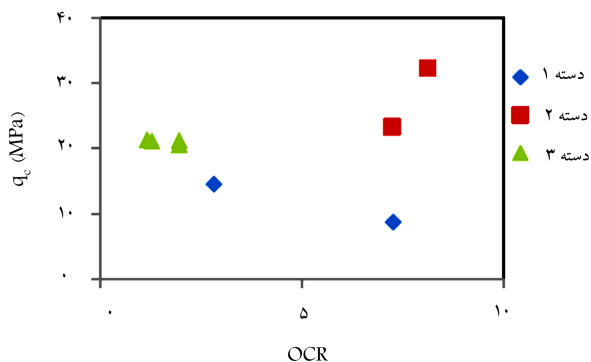
مقاومت نوک مخروط به طور متوسط ۱٪ افزایش می‌یابد (این مقدار، میانگین افزایش ۴ درصدی و کاهش ۱٫۷ درصدی است). در دسته‌ی ۲، افزایش نسبت بیش‌تحکیمی تقریباً در مقاومت نوک مخروط بی‌تأثیر است. در دسته‌ی سوم، افزایش نسبت بیش‌تحکیمی از ۶٫۳۸ به ۷٫۳۱ (معادل ۱۵٪)، منجر به کاهش مقاومت نوک مخروط به میزان ۱ مگاپاسکال معادل ۱۰٪، و افزایش آن از ۶٫۳۶ به ۷٫۳۱ منجر به افزایش ۲ مگاپاسکالی مقاومت نوک مخروط (معادل ۲۷٪) شده است. در دسته‌ی سوم، افزایش نسبت بیش‌تحکیمی از ۵٫۵۷ به ۶٫۳۱ و سپس به ۸٫۱۳ ابتدا با کاهش مقاومت نوک از ۲۳٫۶ به ۲۰٫۸ و سپس با افزایش به ۲۵٫۶ همراه است. در شکل ۱۰، افزایش نسبت بیش‌تحکیمی در دسته‌های ۱ الی ۳ به ترتیب به مقدار ۱۵۸٪، ۱۲٪ و ۶۱٪، با کاهش ۶۷٪، افزایش ۳۹٪ و ثابت ماندن مقاومت نوک مخروط همراه است.

جدول ۱۱. داده‌های مربوط به شکل ۹.

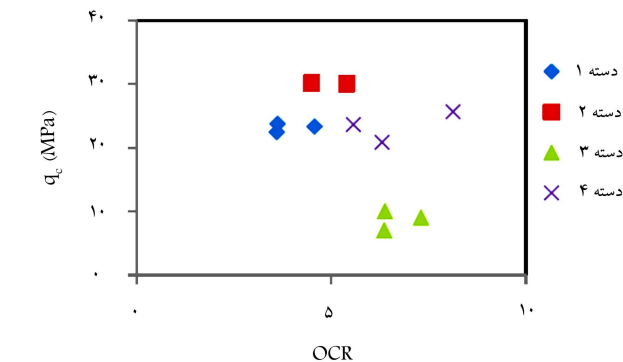
Chamber/ Cone ratio	BC	q_c (MPa)	OCR	Sand	Test no.	Test done by	Set No.
۳۴	۱	۲۲٫۴	۳٫۶۰	TS	۸۹	ENEL CRIS	
۳۴	۱	۲۳٫۳	۴٫۴۷	TS	۲۸۹	ISMES	۱
۳۴	۱	۲۳٫۷	۳٫۶۲	TS	۸۸	ENEL CRIS	
۳۴	۱	۳۰٫۱	۴٫۵۰	TS	۹۴	ENEL CRIS	
۳۴	۱	۳۰٫۰	۵٫۴	TS	۹۷	ENEL CRIS	۲
۳۴	۱	۱۰٫۰	۶٫۳۸	TS	۱۰۹	ENEL CRIS	
۳۴	۱	۷٫۰	۶٫۳۶	TS	۱۳۵	ENEL CRIS	۳
۳۴	۱	۹٫۰	۷٫۳۱	TS	۱۰۳	ENEL CRIS	
۳۴	۱	۲۵٫۶	۸٫۱۳	TS	۲۹۳	ISMES	
۳۴	۱	۲۳٫۶	۵٫۵۷	TS	۶۸	ENEL CRIS	۴
۳۴	۱	۲۰٫۸	۶٫۳۱	TS	۶۶	ENEL CRIS	

جدول ۱۲. داده‌های مربوط به شکل ۱۰.

Chamber/ Cone ratio	BC	q_c (MPa)	OCR	Sand	Test no.	Test done by	Set No.
۶۰	۱	۸٫۷	۷٫۲۷	TS	۲۰۲	ISMES	۱
۶۰	۱	۱۴٫۵	۲٫۸۲	TS	۹۱	ISMES	
۶۰	۱	۲۳٫۳	۷٫۲۴	TS	۱۹۵	ISMES	۲
۶۰	۱	۳۲٫۳	۸٫۱۲	TS	۲۹۴	ISMES	
۶۰	۱	۲۱٫۱	۱٫۲۸	TS	۲۸۱	ISMES	
۶۰	۱	۲۰٫۵	۱٫۹۶	TS	۲۸۳	ISMES	
۶۰	۱	۲۱٫۲	۱٫۹۶	TS	۲۷۶	ISMES	۳
۶۰	۱	۲۱٫۳	۱٫۱۶	TS	۲۸۰	ISMES	



شکل ۱۰. تأثیر نسبت پیش‌تحکیمی در مقاومت نوک مخروط ($BC=1$ و $RD=60$).



شکل ۹. تأثیر نسبت پیش‌تحکیمی در مقاومت نوک مخروط ($BC=1$ و $RD=34$).

می‌شود (رابطه‌ی ۶):

$$K_s = (1 - \sin \phi) \cdot OCR^{\sin \phi} \quad (6)$$

در این رابطه، ϕ زاویه‌ی اصطکاک داخلی خاک است. اما در محفظه‌ی کالیبراسیون تنش افقی و نسبت پیش‌تحکیمی به طور مصنوعی تولید می‌شوند و این رابطه بین آنها وجود ندارد. بنابراین ملاحظه می‌شود که با ثابت ماندن سایر پارامترها از جمله

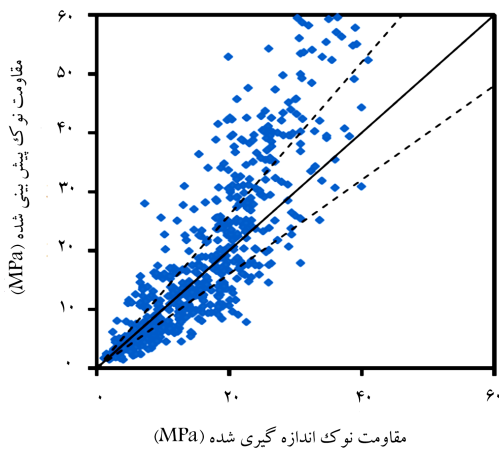
با توجه به جمیع موارد مطرح شده می‌توان گفت که رابطه‌ی نسبت پیش‌تحکیمی با مقاومت نوک مخروط، رابطه‌ی یگانه نیست و همه‌ی حالت‌ها (مستقیم، معکوس، و بی‌تأثیری) در موارد مذکور مشاهده شده است. به طور متوسط نیز تغییرات در مقاومت نوک بر اساس تغییرات نسبت پیش‌تحکیمی حدود ۲٪ است. باور این است که در حالت طبیعی، نسبت پیش‌تحکیمی و تنش افقی مرتبط هستند.^[۳۲،۳۳] این نکته در معادلات تعیین K_s در خاک‌های پیش‌تحکیم مشاهده

معادله‌ی ۷ هستند (جدول ۱). تعداد آزمایش‌های انجام‌شده در این دو شرایط مرزی، ۸۸٪ کل آزمایش‌ها هستند.

این خط‌ها در محدوده‌ی بسیار خوبی قرار دارند. برای نشان دادن اینکه دقت این معادله در این محدوده‌ی خط‌ها بسیار خوب است، با دو معادله‌ی دیگر در دو پژوهش^[۷،۴] مقایسه می‌شود.

جدول ۱۵ نشان می‌دهد که عدد رگرسیون معادله‌ی ۸ در این پژوهش، با معادله‌ی سایر پژوهش‌ها^[۷،۴] برای کلیه‌ی شرایط مرزی به ترتیب ۰٫۸۱، ۰٫۸۴ و ۰٫۷۴ است. میانگین درصد خطا برای معادلات مذکور به ترتیب ۳۳، ۲۳ و ۳۹ درصد است. همچنین معادله‌ی ارائه‌شده در این پژوهش در مورد تمامی شرایط مرزی عملکردی بهتر از دو معادله‌ی دیگر نشان می‌دهد. فقط در مورد شرایط مرزی BC۳، عدد رگرسیون در معادله‌ی ۸ برابر با ۰٫۸۴ و در معادله‌ی دیگر^[۷] برابر با ۰٫۸۵ است؛ که حتی در این مورد هم درصد خطای معادله‌ی ۸، کمتر از معادله‌ی دیگر است (۲۶٪ در مقابل ۳۳٪).

مقایسه‌ی معادله‌ی ارائه‌شده در این نوشتار با دو معادله‌ی دیگر از طریق مقایسه‌ی شکل‌های ۱۱ تا ۱۳ نیز میسر است. در این شکل‌ها مقاومت نوک مخروط پیش‌بینی‌شده توسط روابط مذکور در مقابل مقاومت نوک مخروط اندازه‌گیری‌شده ترسیم شده است. خط پر مرکزی با شیب ۱ (زاویه‌ی ۴۵ درجه)، نشانگر برابری دو مقاومت اندازه‌گیری‌شده و پیش‌بینی‌شده توسط معادلات است و در واقع هر چه داده‌ها به این خط نزدیک‌تر باشند، به معنی تخمین بهتر مقاومت نوک مخروط، توسط معادله‌ی موردنظر است. نقاط بالای این خط تخمین دست بالای^۱ معادلات، و نقاط زیر این خط، تخمین دست پایین^۲ را نشان می‌دهد. دو خط چین، ۳۰٪ خطا و انحراف از خط مرکزی نسبت به مقدار اندازه‌گیری‌شده را نشان می‌دهند.



شکل ۱۱. معادله‌ی ارائه‌شده در پژوهشی در سال ۱۹۹۸.^[۴]

جدول ۱۴. میزان خطای معادله‌های ۷ و ۸.

Overall	BC۴	BC۳	BC۲	BC۱	
۰٫۸۴	۰٫۹۱	۰٫۸۴	۰٫۹۵	۰٫۸۵	R ^۲
۲۲	۱۴	۲۵	۱۸	۲۳	درصد خطا
[[q _{c,predicted} - q _{c,measured}]/q _{c,measured}]					
۰٫۸۴	۰٫۹۱	۰٫۸۴	۰٫۹۱	۰٫۸۴	R ^۲
۲۳	۱۵	۲۶	۱۷	۲۳	درصد خطا
[[q _{c,predicted} - q _{c,measured}]/q _{c,measured}]					

تنش افقی خاک، مقدار نسبت بیش‌تحکیمی (OCR) تغییر کرده است و این تغییر در مقاومت نوک مخروط تأثیری یگانه باقی نمی‌گذارد.

۴. ارائه‌ی معادله

با توجه به جمیع مباحث مطرح‌شده نتیجه گرفته می‌شود که اصلی‌ترین پارامترهای خاک که در مقاومت نوک مخروط مؤثرند، تنش افقی و چگالی نسبی هستند. جهت ارائه‌ی معادله، به ازاء چگالی‌های نسبی متفاوت در شرایط مرزی مختلف، نمودار مقاومت نوک مخروط نرمال‌شده نسبت به فشار اتمسفر بر اساس تنش مؤثر افقی نرمال‌شده نسبت به فشار اتمسفر ترسیم و ملاحظه شده است که بیشتر برآزش‌ها به صورت توانی از تنش افقی هستند. سپس نمودارهای جدید با استفاده از ضرایب به دست آمده از مرحله‌ی قبل، این بار برای چگالی نسبی در هر یک از شرایط مرزی ترسیم و برآزش مناسب داده شد. بدین ترتیب با تعیین بهترین ضریب و توان برای تنش افقی و چگالی نسبی در هر کدام از شرایط مرزی، رابطه‌ی ۷ به دست آمد:

$$q_c = 30 \cdot P_a \left(\frac{\sigma'_h}{P_a} \right)^{C_1} D_r^{C_2} \quad (7)$$

در این رابطه، q_c مقاومت نوک مخروط (kg/cm^2 یا MPa)، P_a فشار اتمسفر (kg/cm^2 یا 98 MPa)، σ'_h تنش افقی خاک (kg/cm^2 یا MPa)، D_r چگالی نسبی (به صورت اعشاری) هستند. C_1 و C_2 ضرایبی هستند که مقدار آنها در جدول ۱۳ آورده شده است.

به منظور سهولت و استفاده از فقط یک معادله با ضرایب ثابت، معادله‌ی ۷ به صورت رابطه‌ی ۸ بازنویسی شده است:

$$q_c = 30 \cdot P_a \left(\frac{\sigma'_h}{P_a} \right)^{0.5} D_r^{0.5} \quad (8)$$

در اینجا میزان دقت معادله‌ی پیشنهادی مورد بررسی قرار گرفته است. در جدول ۱۴ میزان خطای معادله‌های ۷ و ۸ ارائه شده است. ملاحظه می‌شود که عدد رگرسیون ۰٫۸۴، و میانگین خطای نسبی برای معادله‌ی ۷، ۲۲٪ و برای معادله‌ی ۸، ۲۳٪ است.

علت ثابت ماندن تقریبی دقت معادله با وجود تغییر ثابت‌ها این است که توان‌های معادله‌ی ۸ تقریباً برابر با توان‌های پیشنهادی برای شرایط مرزی BC۱ و BC۳ در

جدول ۱۳. مقادیر ضرایب معادله‌ی ۷.

Total	BC۴	BC۳	BC۲	BC۱	
۰٫۷۵	۰٫۴۵	۰٫۴۵	۰٫۲۵	۰٫۷۵	C _۱
۱٫۷۵	۱٫۳	۱٫۷۵	۱٫۱	۱٫۷۵	C _۲

جدول ۱۵. مقایسه‌ی رابطه‌ی ۸ با سایر روابط.

Overall	BC۴	BC۳	BC۲	BC۱		
۰٫۸۴	۰٫۹۱	۰٫۸۴	۰٫۹۱	۰٫۸۴	R^2	پژوهش حاضر
۲۳	۱۵	۲۶	۱۷	۲۳	درصد خطا	رابطه‌ی ۸
$(q_{c,predicted} - q_{c,measured})/q_{c,measured}$						
۰٫۸۱	۰٫۸۳	۰٫۸۵	۰٫۸۹	۰٫۷۹	R^2	[۴]
۳۳	۲۶	۳۳	۱۸	۳۹	درصد خطا	رابطه‌ی ۲
$(q_{c,predicted} - q_{c,measured})/q_{c,measured}$						
۰٫۷۴	۰٫۸۴	۰٫۷۵	۰٫۷۴	۰٫۷۵	R^2	[۷]
۳۹	۲۳	۴۱	۳۲	۴۱	درصد خطا	رابطه‌ی ۱
$(q_{c,predicted} - q_{c,measured})/q_{c,measured}$						

و دقت عملکرد بالایی است و توانایی پیش‌بینی مقاومت نوک مخروط را با دقت بالایی دارد.

این قابلیت معادله‌ی ۸، استفاده از آن برای تعیین تنش افقی خاک با استفاده از مقاومت نوک مخروط اندازه‌گیری شده توسط آزمایش واقعی CPT را قابل قبول می‌سازد؛ و به عبارت دیگر، این رابطه توانایی خوبی در برقراری ارتباط بین فشار جانبی خاک و چگالی نسبی با مقاومت نوک مخروط دارد.

۵. محدودیت کاربرد رابطه

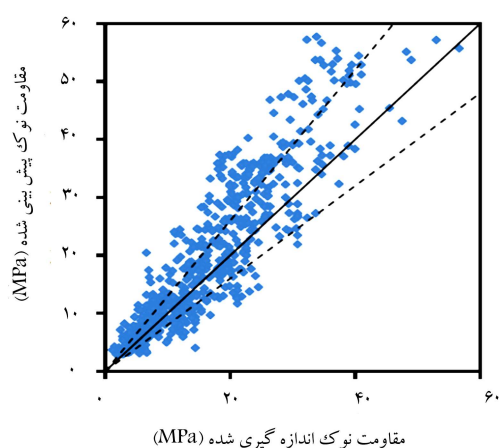
با وجود قابلیت مناسب رابطه‌ی پیشنهادی باید توجه داشت که داده‌های مورد استفاده برای ارائه‌ی این رابطه، مربوط به آزمایش‌های کالیبراسیون است؛ که در آنها خاک ماسه‌بی استفاده شده: تمیز، یکنواخت، و یک‌دست بوده است. الزامی وجود ندارد که زمین طبیعی هم چنین شرایطی داشته باشد. از آنجا که خاک مورد استفاده در آزمایش‌های مذکور دارای دانه‌بندی خاص، فاقد ذرات ریزدانه، و سیمانی نشده است و همچنین تحت شرایط و تاریخچه‌ی تنش مصنوعی قرار دارد، رابطه‌ی حاکم بر آن ممکن است الزاماً برای زمین طبیعی صادق نباشد و باید در هنگام اعمال آن به شرایط زمین طبیعی دقت کافی کرد.

۶. نتیجه‌گیری

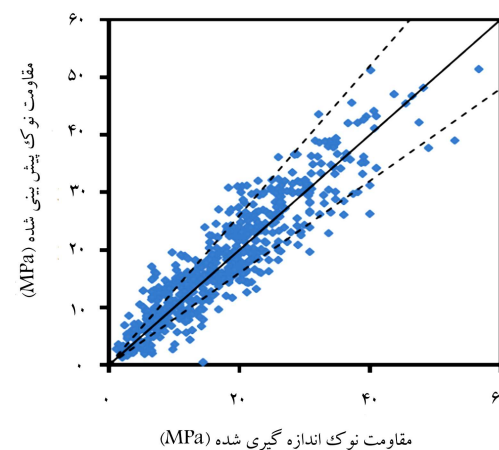
پایگاه داده‌ی آزمایش‌های کالیبراسیون CPT جمع‌آوری شده است. این داده‌ها برای بیان تأثیر پارامترهای مختلف شامل: چگالی نسبی، تنش قائم، تنش افقی، سختی خاک (مدول محدود شده) و نسبت بیش‌تحکیمی بر مقاومت نوک مخروط مورد بررسی قرار گرفته‌اند. نتیجه‌ی این بررسی‌ها، تأثیرگذاری شایان توجه چگالی نسبی و تنش افقی و عدم تأثیرگذاری یا تأثیرگذاری کم سایر پارامترها در مقاومت نفوذ مخروط بوده است.

در نتیجه‌ی بررسی‌ها، دو پارامتر چگالی نسبی و تنش افقی انتخاب، و رابطه‌ی بین آنها و مقاومت نوک مخروط ارائه شده است. این رابطه بر پایگاه داده اعمال و میزان دقت آن در پیش‌بینی مقاومت نوک مخروط بررسی شده است، که نشان از کیفیت خوب معادله‌ی پیشنهادی در این مطالعه دارد.

همچنین معادله‌ی پیشنهادی در این پژوهش با دو معادله‌ی ارائه‌شده‌ی دیگر



شکل ۱۲. معادله‌ی ارائه‌شده در پژوهشی در سال ۲۰۰۳ [۷]



شکل ۱۳. معادله‌ی ارائه‌شده در این پژوهش.

دو خط مذکور با توجه به عدم قطعیت‌های موجود در نتایج آزمایش‌های محفظه‌ی کالیبراسیون انتخاب شده است. [۲۵] با نگاهی ساده به این شکل‌ها ملاحظه می‌شود که هر دو معادله تا حدودی مقاومت نوک مخروط را دست بالا تخمین می‌زنند. [۷۲] همچنین میزان نقاط خارج از محدوده‌ی خطای ۳۰٪ برای معادله‌ی Housby [۴] بیشترین، و برای معادله‌ی ۸، کمترین است. این بررسی نشان می‌دهد که معادله‌ی ارائه‌شده در این پژوهش دارای کارایی

- بررسی رابطه‌ی مقاومت نوک مخروط و سختی خاک به صورت کلی (بدون ثابت نگه‌داشتن سایر پارامترها)؛
- بررسی رابطه‌ی بین تنش میانگین و مقاومت نوک مخروط؛
- بررسی اثر شرایط مرزی و نسبت قطر محفظه به قطر مخروط در نتایج آزمایش.

(توسط دیگر پژوهشگران) مقایسه و نشان داده شده است که دارای توانایی، دقت، و کارایی بالاتری نسبت به دو معادله‌ی دیگر است.

پایگاه داده‌ی جمع‌آوری‌شده، دارای داده‌هایی با کیفیت بالا بوده است و از آن می‌توان در موارد دیگری نیز استفاده کرد:

پانویسها

1. overestimate
2. underestimate

منابع (References)

1. Baldi, G., Bellotti, R., Ghionna, V., Jamiolkowski, M. and Pasqualini, E. "Interpretations of CPTs and CP-TUs, 2nd part: Drained penetration of sands", 4th International Conference on Field Instrumentation, and In-situ Measurements, Singapore, pp. 143-156 (1986).
2. Houlsby, G.T. and Hitchman, R.C. "Calibration chamber tests of a cone penetrometers in sand", *Geotechnique*, **38**(1), pp. 39-44 (1988).
3. Hsu, H.H. and Huang A.B. "Calibration of cone penetration test in sand", *Proceedings, National Science Council, ROC, Part A, Physical Science and Engineering*, **23**(5), pp. 579 -590 (1999).
4. Jamiolkowski, M.B., Lo Presti, D.C.F. and Manassero, M. "Evaluation of relative density and shear strength of sands from CPT and DMT", *Soil Behavior and Soft Ground Construction*, ASCE, GSP 119, pp. 201-238 (2003).
5. Ahmadi, M.M., Byrne, P.M. and Campanella, R.G. "Cone tip resistance in sand: Modeling, verification, and applications", *Canadian Geotechnical Journal*, **42**(4), pp. 977-993 (2005).
6. Karambakhsh, P. "Determination of lateral pressure of sandy soil using results of calibration of cone penetration test", MSc thesis, Sharif University of Technology, Iran (2008).
7. Houlsby, G.T. "Advanced interpretation of field tests", *Geotechnical Site Characterization*, Balkema, Rotterdam, pp. 99-112 (1998).
8. Schmertmann, J.H., *An updated Correlation Between Relative Density D_r and Fugro-Type Electric Cone Bearing QC*, DACW 39-76 M6646, Waterways Experiment Station, USA (1976).
9. Mayne, P.W. and Kulhawy, F.H. "Calibration chamber data base and boundary effects correction for CPT data", 1st International Symposium on Calibration Chamber Testing, Potsdam, New York, pp. 257-264 (1991).
10. Mitchell, J. and Gardner, W. "In-situ measurement of volume change characteristics", *In Situ Measurement of Soil Properties, II*, Raleigh, NC, ASCE, pp. 279-345 (1975).
11. Lunne, T. and Christoffersen, H. "Interpretation of cone penetrometer for offshore sands", *Norwegian Geotechnical Institute*, No. 156, Oslo, pp. 1-11 (1985).
12. Mayne, P. "Law engineering testing co. report for moduli for settlement calculations", *Dynamic Compaction Program*, Haii Al Bathna and Haii Al Oyoum, Yanbu, Saudi Arabia (1986).
13. Holden, J., *Research on Performance of Soil Penetrometers*, University of Florida Dept. of Civil Engineering Internal Report, CE-SM-71-1 (1971).
14. Villet, W.C.B. and Mitchell, J.K. "Cone resistance, relative density and friction angle", *ASCE Symposium on Cone Penetration Testing and Experience*, St. Louis, US, (1981).
15. Chapman, G.A. "A calibration chamber for field test equipment", 1st European Symposium on Penetration Testing, Stockholm 2.2, pp. 59-65 (1974).
16. Fahey, M. "A study of pressuremeter test in dense sand", PhD. Thesis, University of Cambridge (1980).
17. Parkin, A.K. and Lunne, T. "Boundary effects in the laboratory calibration of a cone penetrometer for sand", 2nd European Symposium on Penetration Testing, Amsterdam, pp. 761-768 (1982).
18. Bellotti, R.; Bizzi, G. and Ghionna, V. "Design, construction and use of a calibration chamber", *2nd European Symposium on Penetration Testing*, Amsterdam, **2**, pp. 439-446 (1982).
19. Pournaghiazar, M., Russell, A.R. and Khalili, N. "CPT in unsaturated soils using a new calibration chamber", 2nd International Symposium on Cone Penetration Testing, CPT10 Conference, Huntington Beach, California (2010).
20. Ha, T.G., Kim, J.Y., Kim, J.H. and Chung, C.K. "Experimental estimation of distribution of excess pore pressure by cone penetration", 2nd International Symposium on Cone Penetration Testing, CPT10 Conference, Huntington Beach, California (2010).
21. Kim, K., Prezzi, M., Salgado, R. and Lee, W. "Penetration rate effects on cone resistance measured in a

- calibration chamber”, 2nd International Symposium on Cone Penetration Testing, CPT10 Conference, Huntington Beach, California (2010).
22. Ahmadi, M.M. and Robertson, P.K. “A numerical study of chamber size and boundary effects on CPT tip resistance in nc sand”, *Scientia Iranica*, **15**(5), pp. 541-553 (2008).
 23. Parkin, A.K. “The calibration of cone penetrometers”, *1st International Symposium on Penetration Testing (ISOPT)*, **1**, pp. 221-243 (1988).
 24. Salgado, R., Mitchell, J.K. and Jamiolkowski, M. “Cavity expansion and penetration resistance in sand”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, **123**(4), pp. 344-354 (1997).
 25. Salgado, R. “Analysis of penetration resistance in sands”, PhD. thesis, University of California, Berkeley, California (1993).
 26. Lunne, T., Robertson, P.K. and Powell, J.M., *Cone Penetration Testing in Geotechnical Practice*, Blackie Academic & Professional, London, UK (1997).
 27. Ahmadi, M.M. and Karambakhsh, P.K. “Determination of sand using CPT calibration chamber”, 2nd International Symposium on Cone Penetration Testing, CPT10 Conference, Huntington Beach, California (2010).
 28. Jefferies, M.G., Jönsson, L. and Been, K. “Experience with measurement of horizontal geostatic stress in sand during cone penetration test profiling”, *Géotechnique*, **37**(4), pp. 483-498 (1987).
 29. Butlanska, J., Arroyo, M. and Gens, A., *Size Effects on a Virtual Calibration Chamber*, Numerical Methods in Geotechnical Engineering, Taylor & Francis Group, pp. 225-230 (2010).
 30. Huang, W., Sheng, D., Sloan, S.W. and Yu, H.S. “Finite element analysis of cone penetration in cohesionless soil”, *Comput. Geotech.*, **31**(7), pp. 517-528 (2004).
 31. Jamiolkowski, M., Ghionna, V.N., Lancellotta, R. and Pasqualini, E., *New Correlations of Penetration Tests for Design Practice*, 1st International Symposium on Penetration Testing (ISOPT-1), Orlando, FL, USA (1988).
 32. Schmidt, B. “Earth pressures at rest related to stress history”, *Canadian Geotechnical Journal*, **34**, pp. 239-242 (1966).
 33. Duncan, J.M. and Seed, R.B. “Compaction-induced earth pressure under K0-conditions”, *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, **112**(1), pp. 1-22 (1986).