

پیشنهاد معیار گسیختگی ژئوتکنیکی ریزشمع های خودحفار بر اساس نتایج آزمایش های بارگذاری استاتیکی تمام مقیاس

محمدعلی فخارنیا، حامد بایسته*

گروه مهندسی عمران، دانشگاه قم، قم، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳-۰۷-۱۳۹۷
بازنگری: ۰۳-۰۸-۱۳۹۷
پذیرش: ۲۴-۰۹-۱۳۹۷
ارائه آنلاین: ۲۴-۰۹-۱۳۹۷

کلمات کلیدی:

ریزشمع خودحفار
بارگذاری استاتیکی
معیار گسیختگی
تمام مقیاس

خلاصه: در دهه اخیر استفاده از ریزشمع های خودحفار افزایش چشم گیری داشته است. این ریزشمع ها با توجه به روش اجرا، زمان و هزینه را کاهش داده و علاوه بر تسلیح خاک، همزمان سبب بهسازی خاک نیز می گردند. با وجود افزایش استفاده از این ریزشمع ها، مطالعات اندکی در خصوص عملکرد آن ها خصوصاً تعیین ظرفیت باربری، تدوین معیارهای گسیختگی و تفسیر آزمون های بارگذاری صورت گرفته است. در این تحقیق ۲۲ ریزشمع خودحفار با روش تزریق همزمان در طول ها و خاک های متفاوت اجرا و آزمون های بارگذاری کششی و فشاری تمام مقیاس بر روی آن ها انجام شده است. سپس با استفاده از شش معیار گسیختگی متداول در ارزیابی باربری شالوده های عمیق، به تشریح عملکرد و ظرفیت باربری این نوع ریزشمع ها پرداخته شده است. در ادامه با استفاده از روابط ریاضی و فرضیات موجود در خصوص منحنی های بارگذاری-جابجایی و همچنین با استفاده از مدل سازی عددی منحنی های بار-نشست، نتایج آزمایش میدانی تا حد گسیختگی ژئوتکنیکی توسعه داده شده است. نتایج نشان می دهد از آنجا که قطر و مقاومت باند حاصل در ریزشمع های خودحفار بیش از فرضیات تئوری می باشد، معیارهای گسیختگی موجود برای تفسیر نتایج بارگذاری ریزشمع های خودحفار مناسب نبوده و افزایش مقاومت جداره و کاهش طول الاستیک را در نظر نمی گیرند. براین اساس با استفاده از اطلاعات به دست آمده از اعمال معیارهای گسیختگی، توسعه نتایج آزمایش های بارگذاری و بررسی اثر کوتاه شدگی الاستیک در آزمون بارگذاری، رابطه ای جهت تعیین بارگسیختگی ریزشمع های خودحفار مبتنی بر روش متعارف دیویسون ارائه شده است.

۱- مقدمه

دارای خاک های نرم و ریزشی، استفاده از غلاف^۱ در هنگام حفاری امری ضروری است. هم چنین در صورت وجود مکان هایی با دسترسی محدود، اجرای حفاری و تزریق در روش ریزشمع سنتی با مشکلات و صعوبت هایی همراه است. در سال های اخیر جهت رفع مشکل فوق در خاک های ریزشی، استفاده از ریزشمع های خودحفار^۲ توسعه یافته است. در این روش از میلگردهای توخالی استفاده شده که عملیات حفاری، تزریق و تسلیح به صورت همزمان توسط یک قطعه فولادی با مقاومت بالا انجام می شود [۱]. در این روش تزریق دوغاب همزمان با حفاری انجام می شود. از مزایای این نوع ریزشمع می توان

یکی از روش های تسلیح و بهسازی برجای خاک، استفاده از المان های برابر قائم فولادی با نام ریزشمع می باشد. ریزشمع به شمع با قطر کمتر از ۳۰۰ میلی متر اطلاق شده که عموماً از یک لوله فولادی، میلگرد و دوغاب تشکیل شده است. در اجرای معمول ریزشمع، ابتدا گمانه حفاری شده و پس از جایگذاری المان تسلیح کننده درون گمانه، دوغاب به صورت ثقلی یا تحت فشار درون گمانه تزریق می شود. در این فرآیند، معمولاً حفاری و تزریق در دو مرحله صورت گرفته که باعث افزایش زمان و هزینه می گردد. از طرفی در پروژه های

1 Casing
2 Self-drill Hollow-bar Micropile

* نویسنده عهده دار مکاتبات: h.bayesteh@qom.ac.ir



الگوی تزریق هم‌زمان، عملکرد ریزشمع‌های خودحفرار-خودتزیق بهبود می‌یابد.

عموم تحقیقات فوق با انجام آزمایش بارگذاری استاتیکی ریزشمع و تعیین بار نهایی، به بررسی عملکرد ریزشمع‌های خودحفرار، خصوصاً تعیین مقاومت باند، پرداخته‌اند. بار نهایی یک ریزشمع در آزمایش بارگذاری استاتیکی، مقدار بار اعمالی بوده که موجب تغییر شکل زیاد شمع (گسیختگی) گردد [۱۵]. از آنجا که در بیشتر موارد به‌علت محدودیت‌های موجود در آزمایش بارگذاری، شمع به حالت گسیختگی و بار نهایی نمی‌رسد، بار نهایی از روی منحنی بارگذاری-جابجایی حاصل از آزمایش بارگذاری استاتیکی و به‌کارگیری معیارهای گسیختگی^۲ تخمین زده می‌شود [۱۵ و ۱۶]. معیارهای گسیختگی، روش‌های هستند که مقدار بارگسیختگی یا نهایی شمع را در یک آزمایش بارگذاری استاتیکی تفسیر و تعیین کرده و می‌توان برای اهداف طراحی از آن استفاده نمود [۱۷]. هرچند توسعه‌های زیادی در تدوین معیارهای گسیختگی بر روی شمع‌های با قطر بالا صورت گرفته‌است، لیکن تاکنون رابطه‌ای مشخص جهت تعیین بار نهایی ریزشمع‌ها، خصوصاً ریزشمع‌های خودحفرار ارائه نشده‌است. در این راستا تمامی تحقیقاتی که در راستای بررسی عملکرد ریزشمع‌های خودحفرار به آن‌ها اشاره شد، از معیارهای گسیختگی موجود در حوزه شمع‌های با قطر زیاد در جهت تفسیر نتایج آزمایش‌های بارگذاری استفاده کرده‌اند. به عنوان نمونه الهادی و النگار [۱] در راستای تعیین بار نهایی ریزشمع‌های خودحفرار، روش فولر و هوی را که در محدوده شمع‌های با قطر بالا توسعه یافته‌است را به عنوان بهترین روش برای تخمین ظرفیت باربری نهایی ریزشمع خودحفرار معرفی کردند. هم‌چنین عبدالعزیز و النگار [۹] با استفاده از مدل‌سازی عددی و اعمال چهار معیار گسیختگی ژئوتکنیکی شمع‌ها، نشان دادند روش باتلر و هوی، می‌تواند توصیف‌کننده رفتار ریزشمع خودحفرار باشد.

بررسی تحقیقات انجام شده بیان می‌دارد تاکنون مطالعه‌ای درخصوص نحوه تعیین بار نهایی ریزشمع خودحفرار از روی منحنی‌های بارگذاری-جابجایی آزمون‌های بارگذاری و تدوین معیار گسیختگی مناسب برای ریزشمع‌ها، خصوصاً ریزشمع‌های خودحفرار انجام نشده‌است. از طرفی آیین‌نامه‌های موجود در زمینه ریزشمع‌ها، معیار گسیختگی واحدی در خصوص این نوع ریزشمع‌ها ارائه نکرده‌اند که

به سهولت اجرا در خاک‌های ریزشی، بهبود تقابل مکانیکی دوغاب و خاک، افزایش مقاومت باند^۱، افزایش چشم‌گیر سرعت اجرایی، اجرای آسان در فضاهای با دسترسی محدود، عدم ارتعاش و صدای مضر حین اجرا و ایجاد کمینه دست‌خوردگی شرایط طبیعی خاک اطراف اشاره نمود [۲ و ۳].

باوجود مزایای این روش و استقبال فراوان از آن‌ها در حوزه مهندسی ژئوتکنیک، مطالعات اندکی در خصوص رفتار و عملکرد این نوع ریزشمع‌ها در مقایسه با ریزشمع‌های سنتی صورت گرفته‌است. بیشاپ و همکارانش [۴] با بررسی چندین پروژه نشان دادند ریزشمع خودحفرار، توانایی ایجاد پیونداصطکاکی قوی بین دوغاب تزریق‌شده و خاک اطراف را دارد. گومز و همکارانش [۵] با مطالعه ۲۶۰ ریزشمع خودحفرار و انجام آزمایش‌های بارگذاری تمام مقیاس، نشان دادند در صورت استفاده از این ریزشمع‌ها، علاوه بر کاهش قابل توجه زمان و هزینه ساخت، مقاومت باند نهایی در خاک‌های ریزدانه و درشت‌دانه، به طور قابل‌توجهی بیشتر از مقادیر متداول در طراحی اینگونه ریزشمع‌ها خواهد شد. در تحقیقاتی دیگر با مطالعه ریزشمع‌های خودحفرار در نهشته‌های شنی و ماسه‌ای و انجام آزمایش‌های بارگذاری ریزشمع به‌صورت کششی و فشاری، نشان داده‌شد ریزشمع خودحفرار توانایی تحمل بارهای فشاری و کششی با جابجایی بسیار کم را دارا بوده و مقاومت باند نهایی بین خاک و دوغاب به طور قابل‌توجهی بزرگ‌تر از مقدار مورد انتظار آیین‌نامه بوده‌است [۸-۶]. عبدالعزیز و النگار و نیز الهادی و النگار [۱ و ۱۲-۹] با اجرای ریزشمع‌های خودحفرار در خاک چسبنده و انجام آزمایش‌های بارگذاری تمام مقیاس محوری و جانبی، به بررسی عملکرد محوری و جانبی ریزشمع خودحفرار تحت بارگذاری‌های سیکنی و یکنواخت پرداخته و نشان دادند مقاومت باند پیشنهادشده براساس طبقه بندی آیین‌نامه (FHWA (۲۰۰۵، مقدار ظرفیت باربری را کمتر از واقعیت تخمین می‌زند. هم‌چنین هیچ‌گونه کاهش سختی و شکستن پیوند بین دوغاب و خاک بعد از ۱۵ سیکل بارگذاری در ریزشمع‌های خودحفرار مشاهده نشده‌است. لاهوتا و همکارانش [۱۳] نشان دادند تاثیر کم‌انرژی بر روی ظرفیت باربری ریزشمع خودحفرار ناچیز است. بایسته و صابرمهانی [۱۴] به بررسی اثر روش تزریق بر روی عملکرد ریزشمع‌های خودحفرار-خودتزیق پرداخته و نشان دادند که با تغییر

2 Failure criteria

1 Bond strength

نام‌گذاری می‌شود. در محدوده محل ۲ خاکریزی جهت استحصال زمین صورت گرفته‌است که درشت دانه بوده و براساس سیستم طبقه‌بندی متحد، با نام GC-GM طبقه‌بندی می‌شود. مشخصات ژئوتکنیکی هر محل به‌طور خلاصه در جدول ۱ ارائه شده‌است. در این جدول $(N_1)_{60AVE}$ متوسط عدد نفوذ استاندارد، C_u چسبندگی زهکشی نشده خاک، ϕ زاویه اصطکاک داخلی خاک، γ وزن مخصوص خاک و ν ضریب پواسون می‌باشد.

۲-۲- نحوه اجرای ریزشمع‌های آزمایشی

در این تحقیق ۲۲ ریزشمع خودحفار با روش‌های تزریق هم‌زمان متفاوت در دو محل با دو نوع شرایط ژئوتکنیکی اجرا شدند. ریزشمع‌های آزمایشی شامل ریزشمع‌های اصلی و ریزشمع‌های تکیه‌گاهی می‌باشند. از ریزشمع‌های تکیه‌گاهی به‌عنوان ریزشمع کششی جهت ارزیابی ظرفیت بسیج‌شده جدار و بررسی عملکرد کششی ریزشمع‌های خودحفار-خودتزریق استفاده شده‌است. از این پس منظور از ریزشمع‌های فشاری (C)، ریزشمع‌های آزمایشی اجرا شده و ریزشمع‌های کششی (T)، ریزشمع‌های تکیه‌گاهی می‌باشد. ریزشمع‌ها با استفاده از میله خودحفار (R۳۲S) و سرمه به قطر ۷۶ میلی‌متر به‌وسیله دستگاه حفاری دریل واگن در طول‌های ۹ و ۱۵ متری اجرا شدند. به‌عنوان نمونه در شکل ۱ آرایش هندسی ریزشمع‌های فشاری و کششی اجرا شده در محل ۱ و ۲ نشان داده شده‌است.

باتوجه به تراکم نسبتاً کم خاک در هر دو محل آزمایش، مشاهداتی مبنی بر گیرکردن سرمه و یا صعوبت اجرایی در حین اجرای ریزشمع‌های خودحفار مشاهده نگردید که نشان‌دهنده حضور لایه خاک با سختی متفاوت و انحراف ریزشمع باشد. در ریزشمع‌های خودحفار-خودتزریق عملیات حفاری و تزریق به‌صورت توأم صورت می‌پذیرد. این هم‌زمانی حفاری و تزریق توسط ابزاری در دستگاه حفاری به نام Swivel میسر می‌گردد. در تمام طول ریزشمع،

عموماً موجب سردرگمی مهندسان در پروژه‌های اجرایی شده‌است. براین اساس در تحقیق پیش رو، ۲۲ عدد ریزشمع خودحفار با روش تزریق هم‌زمان در دو نوع خاک ریزدانه و درشت دانه با طول‌های ۹ و ۱۵ متر اجرا شده‌است. به منظور تعیین بار نهایی و همچنین بررسی عملکرد این نوع ریزشمع‌ها، از آزمون‌های بارگذاری تمام مقیاس فشاری و کششی استفاده شده‌است. در ادامه با استفاده از نتایج آزمون‌های بارگذاری تمام مقیاس، تحلیل کارایی شش معیار گسیختگی منتخب، استفاده از نتایج مدل‌سازی عددی رفتار مشاهده‌شده و استفاده از رویکردهای تحلیلی موجود، معیار گسیختگی جهت تعیین بار نهایی با استفاده از منحنی‌های بار-نشست ریزشمع‌های خودحفار پیشنهاد شده‌است.

۲- روش تحقیق

اجرای ریزشمع‌های خودحفار و انجام برنامه‌ی آزمایش‌های بارگذاری تمام مقیاس، در محل فاز ۱۳ پارس جنوبی واقع در استان بوشهر و در شرایط دو نوع خاک مختلف صورت‌پذیرفت. به‌طور کلی در قسمت‌های شمالی محل محل آزمایش سازندهای ریزدانه (محدوده محل ۱) و در قسمت‌های جنوبی تر (نزدیک دریا) یک لایه‌ی درشت‌دانه مخلوط به ضخامت متغیر روی لایه‌های ریزدانه مذکور قرارگرفته (محدوده محل ۲) که این نوع خاک، جهت استحصال زمین و رسیدن به تراز پروژه خاکریزی شده‌است.

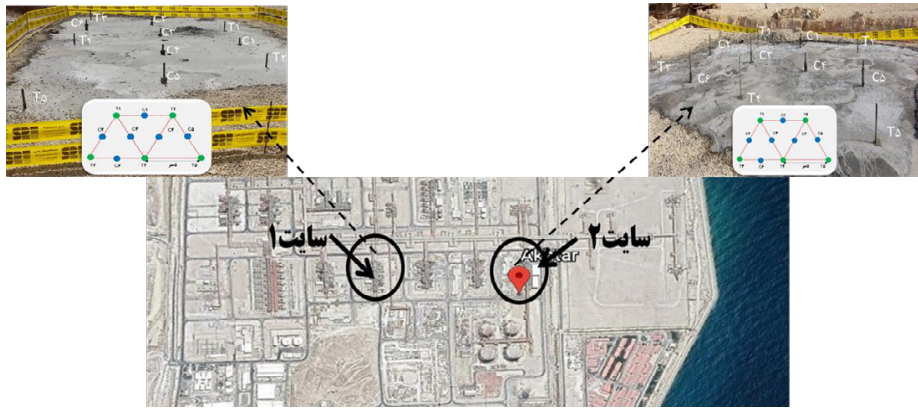
۲-۱- تعیین مشخصات ژئوتکنیکی

براساس تحقیقات صحرائی، آزمایش‌های درمحل و آزمون‌های آزمایشگاهی موجود، پارامترهای مقاومتی و تغییرشکلی جهت شناسایی و تعیین مشخصات خاک هر محل استفاده شده‌است. با نمونه‌گیری‌های انجام‌شده و بازدیدهای میدانی، خاک محدوده محل ۱ را می‌توان متشکل از رس قهوه‌ای تا خاکستری با میزان فشردگی متوسط توصیف کرد که بر اساس طبقه‌بندی متحد خاک، CL

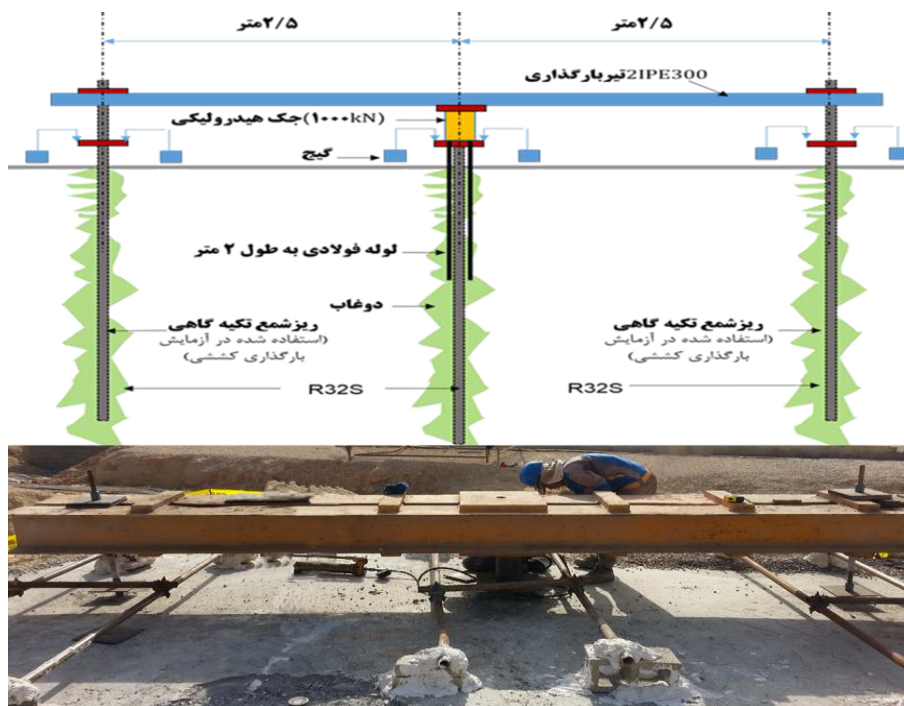
جدول ۱. مشخصات ژئوتکنیکی محل‌های منتخب

Table 1. Geotechnical parameters of the selected sites

محل	نوع خاک	عمق لایه	$(N_1)_{60AVE}$	$C_u \text{ kN/m}^2$	ϕ	$\gamma \text{ kN/m}^3$	ν
۱	CL	۰-۱۶	۱۵	۷۵	۰	۱۷/۵	۰/۴
۲	GC-GM	۰-۱۵	۳۰	۱۰	۳۵	۲۰	۰/۳۵



شکل ۱. آرایش هندسی ریزشمع‌های اجرا شده
Fig. 1. Arrangement of executed trial micropiles



شکل ۲. نحوه برپایی تجهیزات بارگذاری
Fig. 2. set up of the loading equipment

پس از ۲۸ روز از تزریق دوغاب، ۲۲ آزمایش بارگذاری کششی و فشاری بر روی آن‌ها انجام شده است. در این تحقیق ملزومات و تجهیزات انجام آزمون‌های بارگذاری مطابق استانداردهای ASTM-D1143 برای بارگذاری فشاری و ASTM-D3689 تنظیم شده برای بارگذاری کششی مهیا شده است [۱۸ و ۱۹]. شکل ۲ نحوه برپایی تجهیزات بارگذاری را نمایش می‌دهد. جهت انجام آزمایش بارگذاری ریزشمع، از تیر بارگذاری، جک هیدرولیکی و گنج‌های تغییر مکان استفاده شده است. تیر بارگذاری جهت تامین تکیه گاه جک بارگذاری و از اتصال

عملیات تزریق با فشاری در محدوده حداکثر ۷ بار توام با چرخش سرمته به صورت پیوسته انجام می‌پذیرد. روش‌های تزریق اجرا شده مطابق روش‌های تزریق ارائه شده در تحقیق بایسته و صابرمهانی [۱۴] می‌باشد. نسبت آب به سیمان دوغاب تزریقی برابر ۰/۷ و آزمون‌های بارگذاری پس از گذشت ۲۸ روز انجام شده اند.

۲-۳- نحوه انجام آزمایش‌های بارگذاری تمام مقیاس در این تحقیق به منظور ارزیابی عملکرد ریزشمع‌های خودحفر،

مانند باتلر و هوی [۲۷] و فولر و هوی [۲۸] بوده که بار نهایی، محل تلاقی یک خط با شیبی معین بامحنی بارگذاری-جابجایی، یا نقطه برخورد دو خط مماس با شیب خاص، می باشد.

در این تحقیق باتوجه به فقدان معیار گسیختگی برای ریزشمع‌های خودحفرار، از میان معیارهای گسیختگی موجود، شش معیار را که با شرایط هندسی و اجرایی این نوع ریزشمع‌ها سازگاری بیشتری داشته و مورد تاکید برخی آیین نامه‌ها بوده اند، انتخاب و از آن‌ها برای تحلیل داده‌ها و نتایج آزمایش‌های بارگذاری استاتیکی استفاده شده‌است. در جدول ۲، معیارهای گسیختگی منتخب در این تحقیق، آیین نامه‌های توصیه‌کننده و ملاک‌های تعیین بار نهایی در هر یک از این روش‌ها بیان شده‌است.

۳- نتایج آزمایش‌های تمام مقیاس

در این بخش به ارائه نتایج آزمون‌های بارگذاری ریزشمع و تحلیل آن‌ها بر اساس معیارهای گسیختگی موجود پرداخته خواهد شد. همان‌گونه که بیان شد، ۲۲ آزمایش تمام مقیاس در این تحقیق انجام شده‌است. در این بخش به‌عنوان نمونه، چهار منحنی بارگذاری-جابجایی ریزشمع‌های آزمایش شده، ارائه و نحوه استخراج بار نهایی با استفاده از برخی معیارهای گسیختگی منتخب بر روی آن‌ها بیان خواهد شد. در ادامه و از آنجا که بر اساس محدودیت صفحات مقاله امکان ارائه کلیه منحنی‌های بارگذاری فراهم نمی باشد، نتایج به‌صورت جدول ارائه خواهدگردید.

شکل ۳ منحنی‌های بارگذاری-جابجایی دو ریزشمع اجرا شده در محل ۱ (ریزدانه) را نشان می دهد که یکی از آن‌ها حاصل از آزمون‌های بارگذاری تمام مقیاس فشاری و دیگری حاصل از آزمون بارگذاری کششی می باشد. هم‌چنین در این شکل بر روی منحنی‌های بارگذاری، معیارهای گسیختگی منتخب اعمال و بار نهایی محاسبه شده‌است. همان‌گونه که مشاهده می شود، بار نهایی ریزشمع C۴ توسط معیار فولر، دیویسون و باتلر به‌ترتیب ۲۸۰، ۲۲۰ و ۲۲۸ کیلونیوتن برآورد شده‌است. بررسی‌ها نشان می‌دهد از آنجا که فرضیات پایه در معیارهای دیویسون و باتلر بر سختی محوری ثابت در طول ریزشمع می‌باشد، تعیین مقدار بار نهایی توسط این روش‌ها در ریزشمع‌ها، کمتر از واقعیت می باشد [۲۰ و ۲۹]. این درحالی است که باتوجه به روش اجرا و تزریق در ریزشمع خودحفرار،

دو پروفیل IPE۳۰۰ تشکیل شده که در بارگذاری فشاری، جک در زیر تیر و در کششی روی تیر بارگذاری قرار می‌گیرد. جک هیدرولیکی شامل پمپ هیدرولیکی با ظرفیت ۱۰۰۰ کیلونیوتن می‌باشد. از این جک هیدرولیکی جهت تامین نیروی فشاری و کششی در حین انجام آزمایش بارگذاری استفاده شده که فشار اعمالی توسط یک گیج فشار اندازه‌گیری و کنترل می‌شود. جهت اندازه‌گیری تغییرمکان و به‌منظور افزایش دقت اندازه‌گیری و کاهش خطاهای ناشی از قرائت نیروی انسانی، ابزار اندازه‌گیری و چرخش صفحه بارگذاری حین بارگذاری، از سه گیج بادقت ۰/۰۱ میلی‌متر استفاده شده‌است. در هر مرحله بارگذاری، متوسط قرائت‌های حاصل از این سه گیج به عنوان مقدار تغییرمکان ریزشمع منظور می‌گردد.

به‌منظور جلوگیری از تاثیر ریزشمع‌های تکیه‌گاهی بر ریزشمع آزمایشی، فاصله تکیه‌گاه‌ها ۱۰ برابر قطر ریزشمع منظور شده‌است [۱۱]. براین اساس و با توجه به طول ۵ متری تیر بارگذاری، ریزشمع‌ها در فاصله‌ای ۲/۵ متر نسبت به مرکز ریزشمع آزمایشی اجرا شده که از ۱۰ برابر قطر ریزشمع که حدود ۷۶ میلی‌متر می‌باشد، بیشتر می‌باشند. در این پژوهش از دو نوع آزمایش بارگذاری بر حسب توصیه آیین‌نامه (۲۰۰۵) FHWA تحت عناوین آزمایش تاییدی و آزمایش خزش استفاده و بارگذاری تا ۲ برابر بار طراحی (۳۰۰ کیلونیوتن) و در برخی موارد تا بیش از ۲ برابر بار طراحی، بارگذاری انجام شده‌است [۲۰]. روش بارگذاری در آزمایش تاییدی و خزش با روش آزمایش بارگذاری سریع که در آیین‌نامه ASTM-D۱۱۴۳ توصیه شده، مشابه می‌باشد [۲۱].

۴-۲- اصول معیارهای گسیختگی منتخب

در ادبیات فنی، معیارهای گسیختگی متنوعی در خصوص تعیین بار نهایی شمع‌های با قطر زیاد ارائه شده‌است که تعداد آن‌ها به بیش از ۱۵ نوع می‌رسد [۱۷]. معیارهای گسیختگی براساس ساختاری که بر پایه آن ایجاد شدند، به سه دسته تقسیم می‌شوند. دسته اول معیارهایی هستند که بر اساس یک مدل ریاضیاتی و تحلیلی توسعه یافتند مانند معیارهای چین-کوندرا [۲۲]، برینچ هسنن ۸۰% [۲۳] و دکارت [۲۴ و ۲۵]. دسته دوم معیارهایی مانند دیویسون [۲۶] بوده که ساختار آن بر اساس محدود کردن نرخ تغییر نشست شمع‌ها تحت آزمایش بارگذاری بوده و دسته سوم، معیارهایی با رویکرد گرافیکی

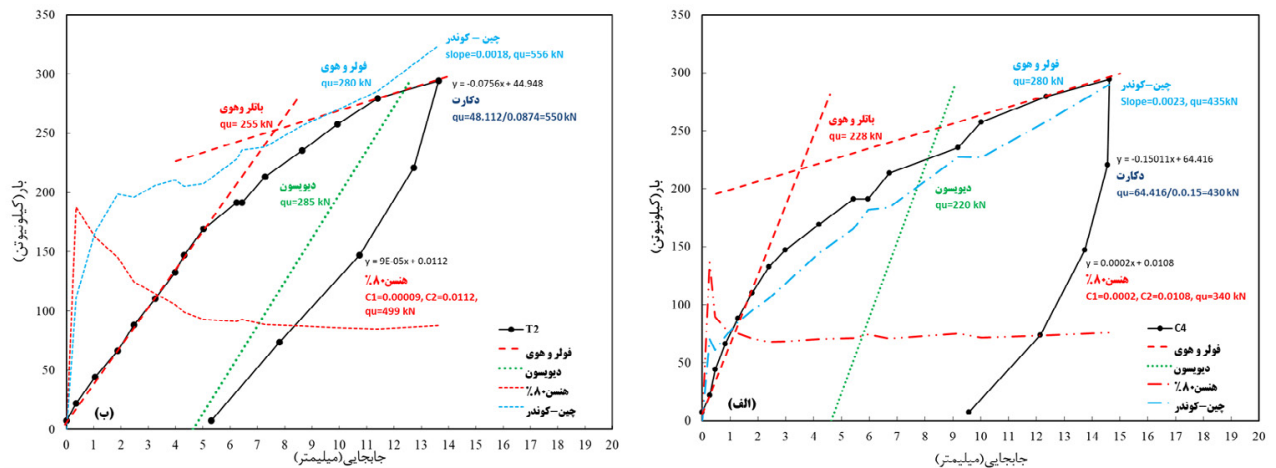
جدول ۲. معیارهای گسیختگی منتخب
Table 2. Selected failure criteria

نوع معیار	نام معیار گسیختگی	سال	نحوه تعیین بار نهایی	مرجع توصیه کننده
مدل ریاضی	برینچ هسنن ۸۰٪ (Brinch Hansen)	۱۹۶۳	بار نهایی باری است که مقدار جابجایی در آن چهار برابر مقدار جابجایی در باری معادل ۸۰٪ این بار اتفاق می افتد.	CGS (۱۹۹۵)[۳۰]
مدل ریاضی	چین-کوندنر (Chin-Kondner)	۱۹۷۰	مقدار جابجایی در محور افقی و نسبت جابجایی به بار مربوطه در محور قائم رسم می شود، نقاط انتهایی نمودار فوق تشکیل یک خط می دهند که مقدار بار نهایی با معکوس شیب این خط برابر است: $\frac{\Delta}{Q} = m\Delta + c, Q_u = \frac{1}{m}$ Q بار اعمالی، Δ مقدار جابجایی، Q_u بار نهایی، m شیب خط به دست آمده از ترسیم ثانویه و c عرض از مبدا آن می باشد.	CGS (۱۹۹۵)[۳۰]
گرافیکی	فولر و هوی (Fuler&Hoy)	۱۹۷۰	مقدار بار نهایی، برابر با بار معادل در نقطه ای از منحنی بار-نشست است که شیب آن بزرگ تر از ۰/۱۴ می باشد	FHWA (۲۰۰۵)[۲۰]
تعیین حد نشست	دیویسون (Davisson)	۱۹۷۲	تغییر مکان متناظر با بار نهایی شمع برابر است با: $\Delta = \frac{PL}{AE} + \frac{D}{120} + 4mm$ Δ مقدار جابجایی متناظر با بار نهایی، P حداکثر بار اعمالی در آزمون بارگذاری، L طول شالوده، AE سختی محوری، D قطر شالوده می باشد.	CGS(1995)[۳۰] BD(۱۹۹۷)[۳۱]
گرافیکی	باتلر و هوی (Butler&Hoy)	۱۹۷۷	بار نهایی، نقطه برخورد خط مماس بر قسمت الاستیک و خط مماس بر منحنی بارگذاری-جابجایی در نقطه ای با شیب بزرگ تر از ۰/۱۴ می باشد.	NYSDOT (۲۰۰۸)[۳۲]
مدل ریاضی	دکارت (Decourt)	۱۹۹۹ تا ۲۰۰۸	مقدار بار را در محور افقی و نسبت بار به جابجایی معادل آن در محور قائم ترسیم می شود. در سمت چپ نمودار رسم شده نقاط تشکیل یک خط را می دهند که از نسبت عرض از مبدا خط مذکور به شیب آن بار نهایی محاسبه می شود. $\frac{Q}{\Delta} = m\Delta + c, Q_u = \frac{c}{m}$ Q بار اعمالی، Δ مقدار جابجایی، Q_u بار نهایی، m شیب خط به دست آمده از ترسیم ثانویه و c عرض از مبدا آن می باشد.	-

فشاری کششی اجرا شده در محل ۲ (درشت دانه) نشان داده شده است. افزایش ظرفیت باربری در محل ۲ (درشت دانه) ناشی از افزایش خوردن دوغاب باتوجه به ماهیت خاک این محل و بهبود عملکرد ریزشمع های اجرا شده در این محل می باشد.

علت کمتر بودن تغییر مکان در ریزشمع های فشاری به سبب مقاومت نوک ریزشمع در فشار می باشد. هم چنین به سبب افزایش قطر ریزشمع در نوک آن (به سبب وجود سرمته و افزایش محدوده تزییق)، در بار فشاری تغییر مکان کمتری نسبت به بار کششی مشاهده می شود [۱۱]. در جدول ۳ بار نهایی به دست آمده براساس کلیه معیارهای گسیختگی منتخب و هم چنین متوسط بار نهایی به دست آمده از معیارها برای کلیه آزمایش ها، ارائه شده است. از اعداد

اندازه قطر و مقاومت باند در طول ریزشمع متفاوت و در نتیجه سختی محوری در تمام طول ریز شمع ثابت نمی باشد. سه معیار گسیختگی دیگر نشان داده شده بر روی منحنی بارگذاری-جابجایی ریزشمع C۴ (معیارهای هسنن، چین-کوندنر و دکارت)، همگی براساس یک مدل ریاضی تعریف شده و با استخراج پارامترهای یک معادله خط و استفاده از برون یابی، به تعیین بار نهایی می پردازند. مطابق شکل ۳ بار نهایی بر اساس روش هسنن، چین-کوندنر و دکارت به ترتیب ۳۴۰، ۴۳۵ و ۴۳۰ کیلونیوتن می باشد. مشاهده می شود که اعداد تعیین شده برای بار نهایی، بعضاً در حدود دو برابر مقادیر حاصل از معیارهای قبل می باشند. به طور مشابه در شکل ۴، منحنی های بارگذاری-جابجایی آزمایش



شکل ۳. منحنی بارگذاری-جابجایی ریزشمع‌های اجراشده در خاک ریزدانه به همراه معیارهای گسیختگی: الف) آزمایش فشاری (C)، ب) آزمایش کششی (T)

Fig. 3. Load-displacement curve of executed micropiles in fine-grained soil with failure criteria : a) Compressive test (C) b) Tensile test (T)

طی آزمایش بارگذاری بیان می‌دارند که بایستی در مقاصد طراحی با احتیاط استفاده شوند.

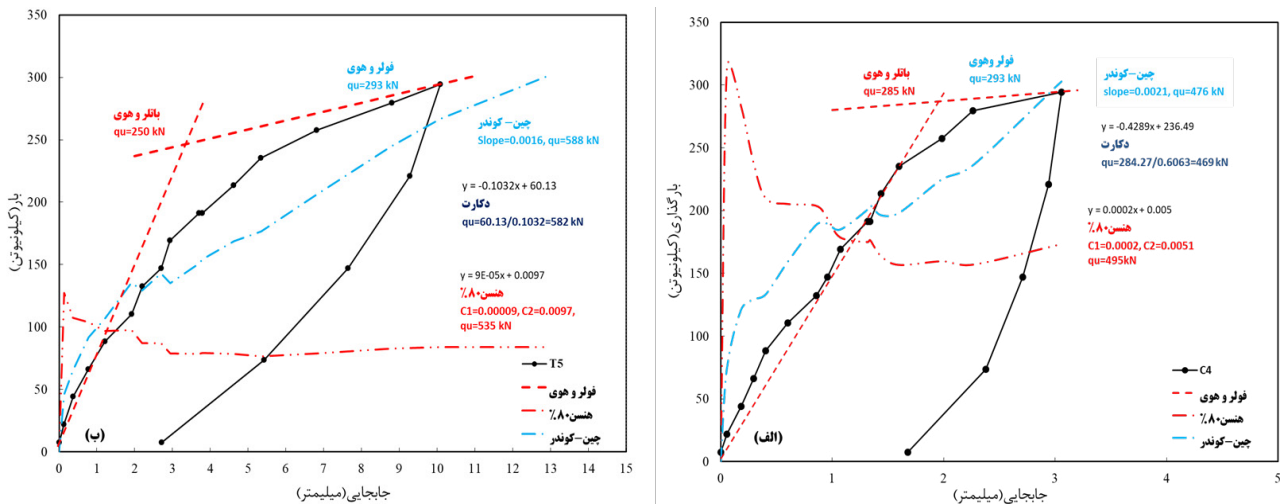
از سوی دیگر منحنی‌های برون‌یابی شده توسط روش‌های هنسِن، چین-کوندر و دکارت، تطابق خوبی با منحنی‌های به‌دست آمده از اطلاعات آزمایش‌های تمام مقیاس دارد که نشان‌دهنده فرض صحیح هیپربولیکی بودن شکل منحنی‌های بارگذاری-جابجایی ریزشمع‌های خودحفار می‌باشد.

۴- بحث و تحلیل نتایج

آنچه از نتایج حاصل از بخش قبل می‌تواند به عنوان یک رویکرد مهندسی در استفاده از معیارهای گسیختگی مدنظر قرار گیرد، متوسط اعداد بار نهایی حاصل از اعمال کلیه معیارهای گسیختگی می‌باشد که در جدول ۳ به آن‌ها اشاره شد. از طرفی باتوجه به محدودیت‌های آزمایش بارگذاری تمام مقیاس در اعمال بارهای زیاد (تا حد گسیختگی ژئوتکنیکی)، مقاومت باند بالای ریزشمع‌های خودحفار و عدم کفایت سازه‌ای مقطع ریزشمع، امکان بارگذاری بر روی ریزشمع‌های اجراشده تا رسیدن به بار نهایی (گسیختگی ژئوتکنیکی) میسر نشده‌است و لذا انتخاب بهترین معیار گسیختگی متناسب با مشاهدات میدانی در این مرحله وجود ندارد. در این بخش در راستای ارزیابی دقیق معیارهای گسیختگی موجود و پیشنهاد معیار گسیختگی برای ریزشمع‌های خودحفار، با استفاده از تابع هیپربولیکی ریاضی و مدل‌سازی عددی رفتار ریزشمع‌های خودحفار

این جدول می‌توان مشاهده کرد مقدار بار نهایی به دست آمده از روش دیویسون در ریزشمع‌های کششی، بزرگ‌تر از ریزشمع‌های فشاری بوده که علت آن، کاهش اثر سختی محوری در عملکرد کششی ریزشمع‌ها می‌باشد. هم‌چنین بارهای نهایی پیش‌بینی شده با استفاده از معیارهای چین-کوندر و دکارت، نزدیک به یکدیگر بوده که به سبب یکسان فرض کردن شکل منحنی بارگذاری-جابجایی به صورت هیپربولیکی، در هر دو روش می‌باشد [۱۶]. برای اساس می‌توان نتیجه گرفت به علت برون‌یابی انجام شده در تعیین بار نهایی در معیارهای گسیختگی با پایه مدل ریاضی، اعداد معمولاً بزرگ‌تر از حداکثر بار اعمالی در آزمون بارگذاری بوده‌است [۱۷]. خط تیره‌ها در این جدول بیانگر عدم امکان تعیین بار نهایی از معیار دیویسون در برخی آزمون‌ها می‌باشد.

آنچه مسلم است معیارهای گرافیکی ارائه شده، تابع شکل منحنی بارگذاری-جابجایی به دست آمده از اطلاعات آزمایش بارگذاری می‌باشند. برای استفاده از این معیارها، قضاوت مهندسی بسیار تاثیرگذار می‌باشد. اختلاف میان بار نهایی برآورد شده توسط معیارهای گرافیکی با معیارهای با پایه مدل ریاضی، ناشی از این موضوع است که معیارهای فولر، باتلر و دیویسون تابع حداکثر بار اعمال شده بوده، لیکن معیارهای هنسِن، چین-کوندر و دکارت، بار نهایی را با استفاده از تعیین تابع هیپربولیک منحنی بارگذاری-جابجایی برآورد می‌کنند. باتوجه به اینکه بار نهایی در هر سه معیار با استفاده از برون‌یابی برآورد می‌شود، مقادیر بیشتری را نسبت به حداکثر بار اعمال شده



شکل ۴. منحنی بارگذاری-جابجایی ریزشمع‌های اجراشده در خاک درشت‌دانه به همراه معیارهای گسیختگی: الف) آزمایش فشاری (C)، ب) آزمایش کششی (T)

Fig. 4. Load-displacement curve of executed micropiles in Coarse-grained soil soil with failure criteria : a) Compressive test (C) b) Tensile test (T)

اجراشده در محل ۱ و ۲، به ترتیب معادل ۴۷۰ و ۵۰۰ کیلو نیوتن بوده که با توجه به توسعه هیپربولیکی منحنی بارگذاری-جابجایی آزمایشگاهی، نتایج برون‌یابی شده قابل قبول می‌باشند. معیارهای دیویسون، باتلر و هوی و نیز فولر و هوی، تابع حداکثر بار عملی و شکل منحنی بارگذاری-جابجایی می‌باشند. براین اساس مقادیر متوسط بار نهایی تخمین زده شده توسط این معیارها (۲۸۰ تا ۲۹۰ کیلو نیوتن)، کمتر از بار نهایی حاصل از توسعه هیپربولیکی منحنی بار-نشست می‌باشند. از سوی دیگر به منظور رسیدن به گسیختگی ژئوتکنیکی، برخی ریزشمع‌های فشاری و کششی به ترتیب تا بار حداکثری ۴۵۰ و ۴۰۰ کیلو نیوتن بارگذاری میدانی شده اند که آثاری از گسیختگی ژئوتکنیکی مشاهده نگردید. این رویداد دلیل دیگری بر قابل قبول بودن بار نهایی برون‌یابی شده از معیارهای هنسن ۸۰٪، چین-کوندنر و دکارت می‌باشد.

تا بارهای بالاتر، نتایج آزمایش‌های میدانی تا حد گسیختگی توسعه خواهند یافت.

۴-۱ توسعه هیپربولیکی منحنی آزمایشگاهی بار-نشست

در بخش تحلیل ظرفیت باربری بیان گردید، منحنی‌های بارگذاری-جابجایی ریزشمع خودحفرار تطابق خوبی با معیارهای گسیختگی مبتنی بر منحنی‌های برون‌یابی شده دارد که نشان‌دهنده صحیح بودن فرض فرم هیپربولیکی منحنی‌های بارگذاری می‌باشد. این رویکرد پیش‌تر توسط کوله‌اوی و ماین [۳۳] و جون [۳۴] برای تخمین رفتار شمع‌های حفاری شده و ریزشمع در بارهای بالاتر از حداکثر بار اعمال شده در طول آزمایش بارگذاری معرفی و استفاده شده‌است. تابع هیپربولیک بین بارشمع و جابجایی سرشمع به صورت رابطه ۱ تعریف می‌شود:

$$P = \Delta / (a + b\Delta) \quad (1)$$

در رابطه بالا P بار اعمالی، Δ تغییرمکان سرشمع، a و b پارامترهای منطبق سازی تابع هیپربولیک با منحنی بار-نشست آزمایشگاهی می‌باشند. به عنوان نمونه در شکل ۵، تابع هیپربولیکی منطبق بر نتایج آزمایشگاهی ۴ نمونه از منحنی‌های بارگذاری-جابجایی نشان شده‌است و نتایج آزمایش‌های بارگذاری توسعه داده شده‌است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، متوسط بار نهایی برآورد شده از معیارهای هنسن ۸۰٪، چین-کوندنر و دکارت برای ریزشمع‌های

۴-۲ توسعه عددی منحنی‌های آزمایش‌های بارگذاری

در روند شبیه‌سازی عددی، در صورت کالیبراسیون منحنی‌های آزمایشگاهی بارگذاری، امکان افزایش بار تا حد گسیختگی ژئوتکنیکی و رسیدن به بار نهایی میسر است که این مهم به سبب محدودیت‌های آزمایشگاهی، در آزمون‌های بارگذاری حاصل نشده‌است. در این بخش با استفاده از مدل‌سازی عددی و کالیبراسیون آن با منحنی‌های موجود بار-نشست، بارگذاری ریزشمع‌ها تا رسیدن به بار نهایی و

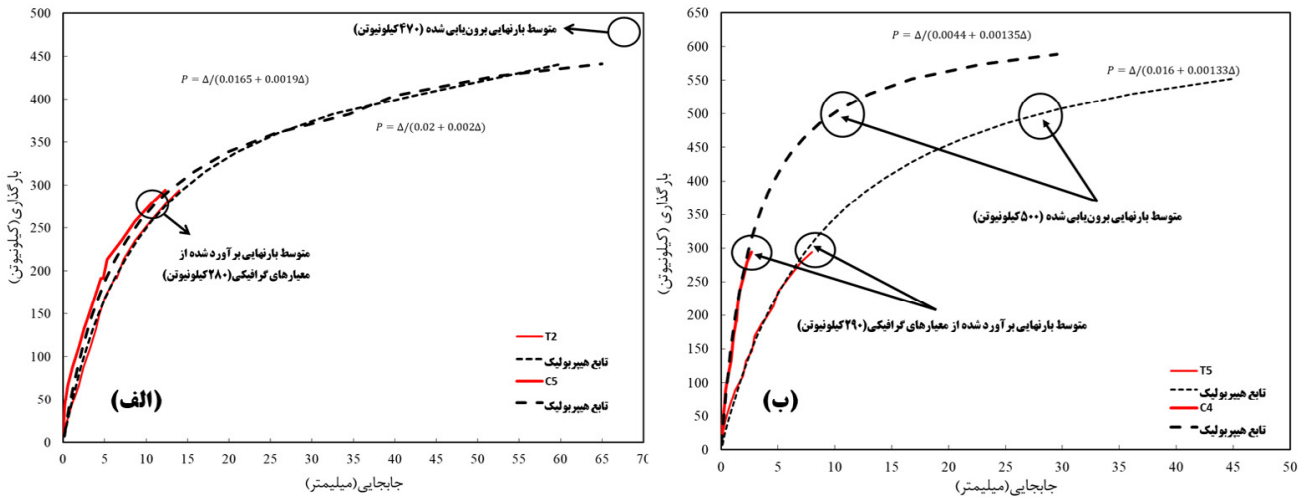
جدول ۳. مشخصات ریزشمع ها و بار نهایی به دست آمده بر اساس کلیه معیارهای گسیختگی منتخب
Table 3. Specifications of micropiles and ultimate load obtained based on all selected failure criteria

نام ریزشمع	محل اجرا	طول (متر)	بار آزمایش (کیلونیوتن)	فولر و هوی (کیلونیوتن)	باتلر و هوی (کیلونیوتن)	دیویسون (کیلونیوتن)	هنسن ۸۰٪ (کیلونیوتن)	چین-کوندنر (کیلونیوتن)	دکارت (کیلونیوتن)	متوسط بار نهایی (کیلونیوتن)
C1	محل ۱ (ریزدانه)	۱۵	۴۵۰	۲۸۵	۲۵۸	۲۷۶	۵۱۰	۴۵۴	۴۵۱	۳۷۲
C2		۹	۳۰۰	۲۹۳	۲۳۰	۲۷۵	۳۷۷	۴۱۷	۴۲۵	۳۳۶
C3		۱۵	۳۰۰	۲۹۴	۲۷۰	-	۶۸۴	۷۱۴	۷۷۴	۵۰۳
C4		۱۵	۳۰۰	۲۸۰	۲۲۸	۲۲۰	۳۴۰	۴۳۵	۴۳۰	۳۲۲
C5		۹	۳۰۰	۲۹۳	۲۱۴	۲۶۰	۴۷۷	۴۱۶	۴۱۴	۳۴۶
C6		۹	۴۵۰	۲۹۳	۲۳۰	۲۷۵	۳۷۷	۴۱۷	۴۲۱	۳۴۴
T1		۱۵	۳۷۰	۲۸۱	۲۳۵	۲۷۰	۴۸۶	۵۲۶	۵۲۴	۴۲۶
T2		۱۵	۳۹۰	۳۵۳	۲۶۷	۲۹۵	۵۲۳	۵۵۶	۵۵۵	۴۲۶
T4		۱۵	۴۰۰	۳۶۴	۳۳۰	۲۸۵	۵۲۴	۵۲۶	۵۳۵	۴۲۶
T5		۹	۳۹۰	۳۱۵	۲۵۰	۲۸۸	۳۶۹	۴۵۴	۴۴۸	۴۲۵
C1	محل ۲ (درشت‌دانه)	۱۵	۴۵۰	۲۹۴	۲۸۷	-	۵۴۰	۵۸۸	۵۷۳	۴۲۹
C2		۹	۳۰۰	۲۹۳	۲۸۸	-	۳۳۶	۳۸۵	۳۷۸	۳۲۸
C4		۱۵	۳۰۰	۲۹۰	۲۶۵	-	۵۱۳	۴۳۶	۴۳۴	۴۳۹
C5		۹	۳۰۰	۲۹۳	۲۸۸	-	۳۴۰	۴۰۰	۳۹۷	۳۳۵
C6		۹	۳۰۰	۲۹۳	۲۸۷	-	۳۰۳	۳۵۷	۳۵۸	۳۱۵
T1		۱۵	۳۷۰	۳۶۳	۳۱۰	۲۹۰	۶۸۴	۶۲۵	۶۲۵	۴۵۶
T2		۱۵	۳۰۰	۲۹۰	۲۶۵	-	۵۱۳	۴۳۶	۴۳۴	۴۳۹
T3		۹	۳۰۰	۲۹۰	۲۵۳	۲۸۷	۴۶۶	۵۲۶	۵۴۷	۴۱۵
T4		۱۵	۳۹۵	۳۶۵	۴۳۵	۳۷۳	۶۷۳	۷۱۴	۷۲۰	۶۰۰
T5		۹	۳۴۰	۳۳۰	۲۸۰	۲۹۵	۵۲۵	۵۸۸	۵۸۲	۴۳۵

هر محل مدل‌سازی شده‌است. پارامترهای خاک شنی و رسی براساس نتایج آزمایش‌های صحرایی در هر محل که قبلاً در جدول ۱ بیان شده بود، انتخاب گردیده‌اند.

به عنوان نمونه در شکل ۶، دو نمونه از منحنی‌های بارگذاری-جابجایی حاصل از مدل‌سازی عددی به همراه توسعه نتایج آزمایش میدانی نشان داده شده‌است. هم‌چنین بر روی منحنی‌های بارگذاری-جابجایی مدل‌سازی شده، معیارهای گسیختگی منتخب اعمال و بار نهایی برآورد شده نشان داده شده‌است. بار نهایی به دست آمده از این معیارها، وابستگی نتایج به حداکثر بار اعمالی و هم‌چنین نیاز قضاوت مهندسی در کاربرد آن‌ها را آشکار می‌سازد. نتایج این شکل نشان می‌دهد ریزشمع‌های نمونه، در بارهای ۴۰۵ و ۷۰۰ کیلونیوتن به گسیختگی ژئوتکنیکی رسیده‌اند که نشان‌دهنده قابل قبول بودن بارهای نهایی برون‌یابی شده می‌باشد. هم‌چنین بار نهایی به دست آمده حاصل از مدل‌سازی عددی، تخمین پایین بار نهایی این نوع ریزشمع‌ها را توسط معیارهای موجود نشان می‌دهد. این نتایج، الزام

گسیختگی ژئوتکنیکی ادامه یافته‌است. با استفاده از مشخصات ژئوتکنیکی محل انجام آزمایش‌ها، مدل عددی مبتنی بر روش اجزای محدود شبیه‌سازی شده و صحت‌سنجی مدل ساخته شده با استفاده از نتایج آزمون‌های بارگذاری انجام گردید. این رویکرد به منظور مشاهده رفتار ریزشمع خودحفرار در آستانه گسیختگی ژئوتکنیکی بوده تا بتوان بر اساس نتایج آن، به ارزیابی و توسعه معیارهای گسیختگی موجود پرداخت. سیستم ریزشمع- خاک شامل سه مصالح مختلف فولاد، دوغاب و خاک پیرامونی ریزشمع می‌باشد. میله خودحفرار فولادی با مدل رفتاری الاستیک خطی با مدول الاستیسیته برابر ۲۱۰ گیگاپاسکال و ضریب پواسون برابر ۰/۳ در نرم‌افزار المان محدود Plaxis2D مدل گردید. دوغاب نیز به صورت مصالح غیر متخلخل با مدل رفتاری الاستیک خطی مدل شده‌است. در این تحقیق با توجه به روش نوین اجرا و تزریق ریزشمع خودحفرار-خودتزیق و بهسازی خاک اطراف بدنه دوغابی ریزشمع حین اجرا، خاک پیرامونی ریزشمع به صورت دولایه شامل یک لایه خاک بهسازی و سپس خاک غالب



شکل ۵. توسعه هیپربولیکی منحنی بار-نشست چهار نمونه آزمایش میدانی در شکل (الف) دو نمونه منحنی ریزشمع فشاری (C) و کششی (T) در محل ۱ و در شکل (ب) دو نمونه منحنی ریزشمع فشاری (C) و کششی (T) در محل ۲

Fig. 5. Hyperbolic extension of the load-displacement curve of four field test specimens in Fig. (a) two specimens of compressive (C) and tensile (T) micropiles curves at site 1, and in Fig. (b) two specimens of compressive (C) micropile and tensile (T) in site 2

نهایی را با استفاده از یک رابطه مشخص تعیین کرده و پاسخی یکتا را ارائه کرده و استفاده از آن متداول تر و آسان تر از دیگر روش ها می باشد. براین اساس در این تحقیق، پیشنهاد معیار گسیختگی بر اساس الگوی معیار دیویسون مدنظر قرار گرفته است.

مطابق جدول ۲، رابطه دیویسون از سه بخش تغییرمکان ناشی از کوتاه شدگی الاستیک (PL/EA)، تغییرمکانی متناسب با بسیج شدن مقاومت نوک و بخشی متناسب با قطر شمع (D/۱۲۰) تشکیل شده است. از طرفی به علت ماهیت روش اجرای ریزشمع خودحفر با تزریق همزمان و به دنبال آن مجهول بودن قطر ریزشمع و نیز ثابت نبودن سختی محوری در طول ریزشمع، مقدار بار نهایی حاصل از رابطه دیویسون، دست پایینی می باشد که نتایج جدول ۳ این موضوع را به خوبی نشان داد [۹، ۲۰، ۲۹]. در این راستا به منظور اصلاح رابطه دیویسون، با منظور کردن اثر سختی ریزشمع بر روی پارامتر کوتاه شدگی الاستیک، به بیان مفهوم کوتاه شدگی الاستیک در ریزشمع خودحفر پرداخته خواهد شد.

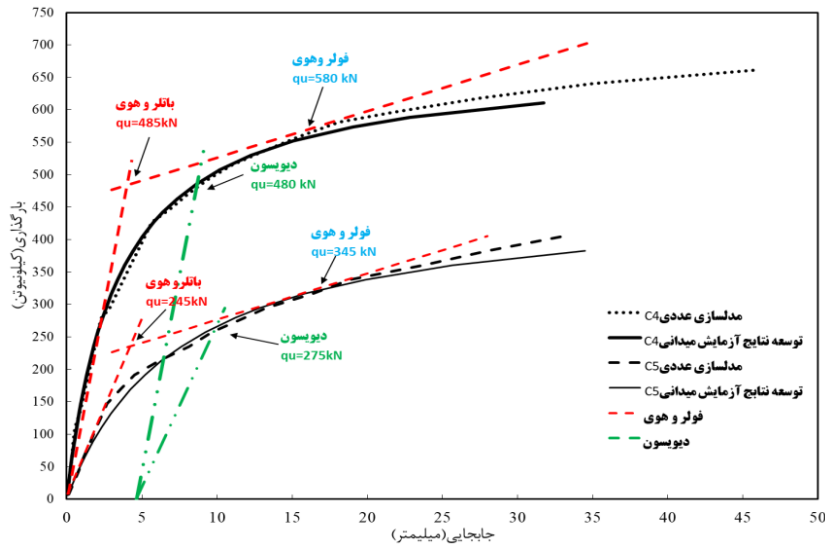
همان گونه که در شکل ۷-الف نشان داده شده است، محققین نشان دادند با درنظر گرفتن افزایش بار از مقدار صفر تا ظرفیت باربری نهایی در طول آزمایش بارگذاری ریزشمع، فرآیند انتقال بار توسط شمع مطابق تحقیقات گذشته به دو بخش مهم تقسیم می شود [۳۵]. در بخش اول (مراحل ابتدایی بارگذاری)، بار بیشتر از طریق مقاومت جدار انتقال یافته و بخش اندکی توسط مقاومت نوک تحمل

توسعه معیار گسیختگی مناسب برای ریزشمع های خودحفر را بیش از گذشته تاکید می نماید که در ادامه به آن پرداخته خواهد شد.

۳-۴- پیشنهاد معیار گسیختگی براساس عملکرد ریزشمع های خودحفر

همانگونه که نشان داده شد، معیارهای گسیختگی موجود که براساس آزمایشگاهی شمع های با قطر بالا توسعه یافته اند، مقدار ظرفیت باربری نهایی را برای ریزشمع خودحفر، دست پایینی تخمین زده که بیشتر مورد تاکید محققین نیز بوده است [۱، ۹، ۲۰ و ۳۴]. براین اساس در این تحقیق با توجه به بررسی معیارهای گسیختگی مختلف و حصول نتایج پراکنده، در راستای تکمیل مطالعات در حوزه ظرفیت باربری ریزشمع های خودحفر، به پیشنهاد معیار گسیختگی متناسب با ریزشمع های خودحفر پرداخته خواهد شد که اساس رویکرد پیشنهادی، اصلاح معیار گسیختگی دیویسون برای محاسبه بار نهایی می باشد.

از میان معیارهای گسیختگی موجود، معیار گسیختگی فولر و هوی توسط محققین پیشین و آیین نامه FHWA (۲۰۰۵) در خصوص تعیین بار نهایی ریزشمع پیشنهاد شده است [۱ و ۲۰]. این در حالی است که با توجه به گرافیکی بودن معیار فولر و هوی، استفاده از آن نیازمند قضاوت مهندسی و تجربه بوده و با افزایش میزان خطا در تعیین بار نهایی، پاسخی یکتا را به دنبال ندارد. لیکن معیار دیویسون، مقدار بار



شکل ۶. شبیه‌سازی عددی دو نمونه منحنی‌های بارگذاری-جابجایی تا حد گسیختگی ژئوتکنیکی و اعمال معیارهای گسیختگی
 Fig. 6. Numerical simulation of two specimens of load-displacement curves to achievement of geotechnical failure and application of failure criteria

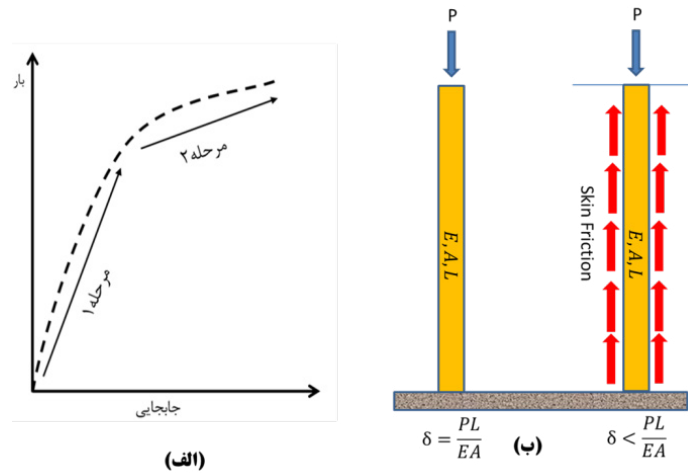
در نظر گرفتن اثر کوتاه‌شدگی الاستیک مطابق رفتار این نوع ریزشمع، می‌توان با اعمال یک ضریب کاهش بر جمله کوتاه‌شدگی الاستیک، اثر افزایش مقاومت جدار و سختی خاک پیرامون ریزشمع خودحفر را به صورت تئوری منظور نمود. برای محاسبه مقدار کوتاه‌شدگی الاستیک با استفاده از روابط تئوری، ریزشمع به‌عنوان یک ستون کوتاه بدون هیچ‌گونه اصطکاکی در جدار در نظر گرفته شده و با استفاده از رابطه ۲ به‌دست می‌آید:

$$\delta = \frac{PL}{AE} \quad (2)$$

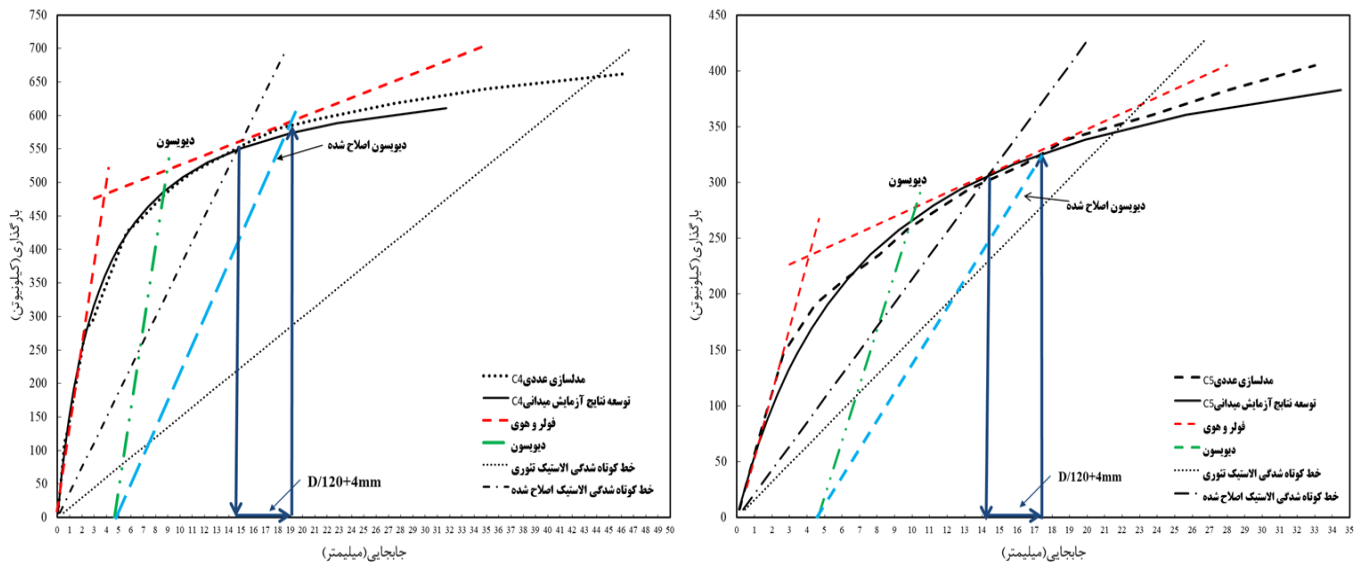
در رابطه بالا P مقدار بار اعمال شده در هر مرحله از بارگذاری، L طول ریزشمع، AE سختی محوری سازه ریزشمع می‌باشد که برای ریزشمع و در آزمون فشاری، به‌صورت ترکیب فولاد و دوجاب و در آزمون کششی صرفاً شامل سختی محوری فولاد استفاده می‌باشد. در ادامه با استفاده از ضرایب کاهش برای پارامتر کوتاه‌شدگی الاستیک، بار نهایی به‌دست آمده از روش دیویسون اصلاح گردیده تا بار نهایی برآورد شده متناسب با پیش‌بینی‌های روش فولر و هوی، مطابق توصیه آیین‌نامه‌ها، گردد. در جدول ۴، مقادیر ضرایب کاهش استفاده شده برای هر ریزشمع، مقدار بار نهایی محاسبه‌شده توسط روش دیویسون آورده شده‌است. همچنین متوسط بار نهایی برآوردشده از روش‌های موجود نسبت به بار نهایی محاسبه‌شده براساس معیار پیشنهادی به‌صورت اعمال ضریب کاهش و اصلاح

می‌شود تا حدی که با افزایش مقدار نشست، مقاومت جدار به حد نهایی خود رسد. در بخش دوم (ادامه آزمون بارگذاری)، بار از طریق مقاومت جدار و مقاومت نوک به‌صورت هم‌زمان انتقال پیدا می‌کند تا در نهایت شمع به حد نهایی ظرفیت باربری رسیده و در منحنی بار-نشست، تغییر روندی مشاهده می‌شود [۳۵]. هدف اصلی معیارهای گسیختگی، تعیین محل تغییر روند در منحنی بار-نشست می‌باشد (شکل ۷-الف). بر این اساس دو بخش انتقال بار بیان‌شده، قابل تعمیم به فرآیند انتقال بار توسط ریزشمع‌های خودحفر می‌باشد [۳۶].

از طرفی نشست ریزشمع به دو دلیل فشردگی سازه ریزشمع و نشست ریزشمع در نوک آن رخ دهد. در شرایط عادی پس از بارگذاری، مصالح ریزشمع تحت تنش قرار گرفته و در حالت الاستیک با افزایش مقدار تنش در طول ریزشمع، سازه ریزشمع فشرده می‌شود. این تغییر شکل در محدوده الاستیک سازه ریزشمع در طی مراحل بارگذاری، رابطه مستقیم با افزایش بار بوده و با استفاده از قانون هوک و روابط ریاضی موجود قابل محاسبه می‌باشد. از طرفی در مرحله ۱ بارگذاری، مقدار فشردگی الاستیک شمع کمتر از مقدار تئوریک بوده که علت آن، بسیج شدن مقاومت جدار در طول ریزشمع و سختی خاک اطراف می‌باشد. این موضوع به‌طور شماتیک در شکل ۷-ب نشان داده شده‌است. باتوجه به روش اجرای ریزشمع خودحفر و افزایش مقاومت باند در این نوع ریزشمع، میزان کوتاه‌شدگی الاستیک توسط مقاومت جدار کنترل می‌گردد. لذا به منظور اصلاح رابطه دیویسون و



شکل ۷. الف) مراحل انتقال بار در ریزشمع، ب) مفهوم کوتاه‌شدگی الاستیک
 Fig. 7. a) Stages of load transfer in micropile, b) The concept of elastic shortening



شکل ۸. دو نمونه از منحنی‌های بارگذاری-جابجایی ریزشمع خودحفرار و روند اصلاح روش دیویسون
 Fig. 8. Two specimens of self-drilling micropile load-displacement curves and the Davisson method correction process

رابطه ۲ محاسبه می‌گردد. به منظور تسهیل در استفاده از رابطه، سطح مقطع بدنه دوغابی ریزشمع باقطری معادل قطر سرتمه حفاری در نظر گرفته شده‌است. سپس باتوجه به مقدار بار نهایی برآوردشده مطابق روش فولر و هوی و اعمال یک ضریب کمتر از یک به پارامتر کوتاه‌شدگی الاستیک در رابطه دیویسون، بار نهایی برآوردشده توسط این روش به بار نهایی به‌دست آمده از روش فولر و هوی نزدیک گردید. در نهایت با میانگین‌گیری ضرایب به دست آمده در این تحقیق، رابطه دیویسون به صورت رابطه ۳ اصلاح و پیشنهاد می‌شود.

روش دیویسون نشان داده شده‌است. به صورت نمونه در شکل ۸، دو نمونه از منحنی‌های بار-نشست با منظور کردن معیار گسیختگی دیویسون و معیار پیشنهادی (دیویسون اصلاح‌شده) و روند اصلاح روش نشان داده شده‌است. برای اصلاح معیار دیویسون پیش‌تر بیان گردید، مقدار کوتاه‌شدگی الاستیک تئوری که با استفاده از رابطه ۲ محاسبه می‌شود با استفاده از یک ضریب کاهش که مقادیر آن برای ریزشمع‌های اجرا و آزمایش شده در این تحقیق در جدول ۴ آورده شده‌است، اصلاح می‌گردد. در این راستا ابتدا مقدار کوتاه‌شدگی الاستیک به صورت تئوری مطابق

جدول ۴. ضرایب اصلاح پارامتر کوتاه‌شدگی الاستیک و مقادیر بار نهایی به دست آمده مطابق روش دیویسون موجود و معیار پیشنهادی
 Table 4. Elastic shortening parameter correction coefficients and values of ultimate loads obtained according to the existing Davisson method and the proposed criterion

ریزشمع	ضریب اصلاح پارامتر کوتاه‌شدگی الاستیک ^۳	بار نهایی ^۲ با استفاده از معیار پیشنهادی (کیلو نیوتون)	بار نهایی با استفاده از معیار دیویسون ^۱ (کیلو نیوتون)	بار نهایی حاصل از متوسط روش‌ها (کیلو نیوتون)	نسبت بار نهایی حاصل از متوسط روش‌ها به بار نهایی حاصل از معیار پیشنهادی
C1	۰/۶	۴۰۵	۲۷۶	۳۷۲	۰/۹۲
C2	۰/۷	۳۲۵	۲۷۵	۳۳۶	۱/۰۳
C3	۰/۵	۴۶۵	-	۵۰۳	۱/۰۸
C4	۰/۷	۳۵۰	۲۲۰	۳۲۲	۰/۹۲
C5	۰/۷۵	۳۰۰	۲۶۰	۳۴۶	۱/۱۵
C6	۰/۷	۳۱۵	۲۹۳	۳۴۴	۱/۰۹
T1	۰/۴۱	۳۷۰	۲۹۵	۴۲۶	۱/۱۵
T2	۰/۲۸	۳۲۰	۲۷۰	۴۲۶	۱/۳۳
T4	۰/۴۱	۳۲۰	۲۸۵	۴۲۶	۱/۳۳
T5	۰/۴۱	۳۳۰	۲۸۸	۴۲۵	۱/۲۹
C1	۰/۲۵	۴۸۵	-	۴۲۹	۰/۸۸
C2	۰/۳۵	۴۵۷	-	۳۲۸	۰/۷۲
C4	۰/۴	۵۸۰	-	۴۳۹	۰/۷۶
C5	۰/۴	۵۱۰	-	۳۳۵	۰/۶۶
C6	۰/۲۵	۴۳۰	-	۳۱۵	۰/۷۳
T1	۰/۴	۴۳۰	۳۱۵	۴۵۶	۱/۰۶
T2	۰/۳	۳۴۵	-	۴۳۹	۱/۲۷
T3	۰/۵۵	۳۷۰	۲۸۷	۴۱۵	۱/۱۲
T4	۰/۴۲	۷۳۰	۳۷۳	۶۰۰	۰/۸۲
T5	۰/۵	۳۷۰	۲۹۵	۴۳۵	۱/۱۸

¹ Davisson

¹ Ultimate Load

¹ Elastic Shortening (ES)

معیار پرکاربرد و محبوب در عرصه مهندسی ژئوتکنیک و تحلیل و طراحی شالوده‌های عمیق مورد استفاده قرار می‌گیرد. همان‌طور که در تحقیقات پیشین و هم‌چنین در این تحقیق بیان شد، این معیار براساس فرضیات پایه در یکسان فرض کردن سختی در طول شالوده و عدم توجه به هندسه ریزشمع خودحفار، مقدار بار نهایی را دست پایین تخمین می‌زند. با در نظر گرفتن موارد فوق، در این تحقیق اصلاح روش دیویسون بر مبنای اصلاح جمله کوتاه‌شدگی الاستیک با منطقی مشخص، هدف قرار گرفت. نتایج گردآوری شده در جدول ۴ نشان می‌دهد نسبت متوسط بار نهایی حاصل شده از کلیه معیارهای گسیختگی منتخب به بار نهایی حاصل از معیار پیشنهادی، در محدوده مساوی قرار دارند که بیانگر نزدیک بودن بار

$$\Delta = (0.45) \frac{PL}{AE} + 4(mm) + \frac{D}{120} \quad (۳)$$

در رابطه بالا Δ تغییر مکان متناظر بار گسیختگی شمع، P بیشترین مقدار بار اعمالی، L طول ریزشمع، A سطح مقطع معادل ریزشمع و E مدول الاستیسیته مصالح ریزشمع می‌باشد که در کشش معادل مدول الاستیسیته میله فولادی و در فشار، ترکیب وزنی دوغاب و فولاد می‌باشد. در نهایت مقدار تغییر کوتاه‌شدگی الاستیک ریزشمع در حین انجام آزمایش بارگذاری با در نظر گرفتن اثر مقاومت جدار محاسبه می‌شود. در رابطه فوق D ، قطر سرمته حفاری ریزشمع بر حسب میلی‌متر می‌باشد. همان‌طور که پیش‌تر بیان شد، معیار دیویسون به‌عنوان یک

بیشترین بار نهایی توسط روش مدل ریاضی دکارت برآورد شده است. روش‌های دیویسون و باتلر مقادیر بار نهایی را کمتر از مقدار واقعی برآورد می‌کنند که دلیل آن، فرض سختی یکسان در طول ریزشمع بوده که با ماهیت اجرای ریزشمع خودحفر با تزریق هم‌زمان، تفاوت دارد. در این میان بهترین روش که توسط آیین‌نامه‌ها نیز توصیه شده است، معیار فولر و هوی است که به سبب گرافیکی بودن آن، حسب قضاوت مهندسی ممکن است منجر به جواب‌های یکتا نگردد.

• در راستای رفع مشکل فوق، در این تحقیق رابطه دیویسون با در نظر گرفتن اثر تغییرشکل الاستیک مطابق رفتار و عملکرد ریزشمع خودحفر، با اعمال یک ضریب کاهش به جمله کوتاه‌شدگی الاستیک اصلاح گردید. بر این اساس، مقادیر بار نهایی برآورد شده توسط روش دیویسون معادل مقادیر روش فولر و هوی گردید. این اصلاح مستقل از نوع خاک بوده و در مورد کلیه ۲۲ آزمایش تمام مقیاس انجام شده صادق است.

• در راستای ارائه معیار گسیختگی، مقدار متوسط ضریب کاهش به جمله کوتاه‌شدگی الاستیک ناشی از اصطکاک جداره ریزشمع، برابر $0/45$ برآورد شده است که در رابطه گسیختگی اعمال گردید.

۶- تقدیر و تشکر

از آنجاکه بخش میدانی این تحقیق، با حمایت بخش تحقیق و توسعه شرکت «خدمات بهسازی خاک سامان پی» صورت گرفته است، بدینوسیله از حمایت‌های آن شرکت محترم سپاسگزاری می‌گردد.

مراجع

- [1] O.F.E.H. Drbe, M.H. El Nagggar, Axial monotonic and cyclic compression behaviour of hollow-bar micropiles, Canadian Geotechnical Journal, 52(4) (2014) 426-441.
- [2] S.B. Mickovski, F.M. Lindsay, M.J. Smith, Construction and testing of self-drilled soil nails, Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering, 169(6) (2016) 541-553.
- [3] A. Phear, C. Dew, B. Ozsoy, N. Wharmby, J. Judge, A. Barley, Soil nailing-best practice guidance, Ciria, London, UK, (2005).

نهایی برآورد شده در این دو رویکرد است. این موضوع در ستون آخر جدول به صورت نسبت متوسط بار نهایی به بارحاصل شده از معیار پیشنهادی نیز کاملاً مشهود است و این ضریب در عموم ریزشمع‌ها نزدیک به ۱ می‌باشد. هرچند صحت رابطه پیشنهادی با توجه به نتایج ۲۲ آزمایش انجام شده در خاک‌های مختلف و با طول‌های متفاوت اثبات گردید، لیکن بدیهی است این رویکرد بایستی با آزمایش‌های متنوع دیگری در آینده اعتبارسنجی شده تا قابلیت تعمیم به کلیه شرایط را دارا شود.

۵- نتیجه‌گیری

بررسی ادبیات فنی نشان می‌دهد به منظور تعیین بار نهایی از روی آزمون‌های بارگذاری ریزشمع، معیار گسیختگی مشخصی متناسب با خواص ریزشمع‌های خودحفر، تاکنون ارائه نشده است. آیین‌نامه‌ها معیارهای گرافیکی باتلر و فولر و همچنین معیار دیویسون را جهت تعیین بار نهایی پیشنهاد داده‌اند که به سبب تبعیت از حداکثر بار اعمال شده در آزمون بارگذاری و لزوم قضاوت مهندسی، پاسخ‌های یکتایی را به دنبال ندارند. در این تحقیق با اجرای ۲۲ ریزشمع خودحفر با روش تزریق هم‌زمان در طول‌ها و شرایط ژئوتکنیکی متفاوت و انجام آزمایش بارگذاری تمام مقیاس فشاری و کششی، به ارزیابی معیارهای گسیختگی موجود پرداخته و رابطه‌ای جهت محاسبه بار نهایی از روی منحنی بار-نشست ریزشمع خودحفر پیشنهاد گردید. نتایج نشان می‌دهند:

• باتوجه به منحنی‌های برون‌یابی شده توسط مدل ریاضیاتی و کالیبراسیون عددی رفتار آزمایشگاهی مشاهده شده، فرض هیپربولیکی بودن شکل منحنی‌های بارگذاری-جایجایی برای ریزشمع خودحفر قابل پذیرش است.

• متوسط بار نهایی در ریزشمع‌های اجرا شده در محل ۱ (ریزدانه) برابر ۳۷۵ کیلونیوتن و متوسط این مقدار برای ریزشمع‌های محل (درشت‌دانه) معادل ۴۰۰ کیلونیوتن می‌باشد. تفاوت مقدار بار نهایی در دو محل ناشی از تفاوت نفوذ دوغاب و مقاومت باند متناسب با ماهیت خاک هر محل می‌باشد که برای خاک‌های درشت‌دانه، مقادیر بیشتری را به دنبال دارد.

• از میان معیارهای گسیختگی توصیه شده توسط آیین‌نامه‌ها، کمترین مقدار بار نهایی توسط روش گرافیکی باتلر و

- [14] H. Bayesteh, M. Sabermahani, Full-Scale Field Study on Effect of Grouting Methods on Bond Strength of Hollow-Bar Micropiles, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 144(12) (2018).
- [15] F. BengtH, The analysis of results from routine pile load tests, *Ground Engineering*, 13(6) (1980) 19-31.
- [16] B.H. Fellenius, Basics of foundation design, Electronic Edition, January 2017 ed., Lulu. com, (2017).
- [17] C.W. Ng, T.L. Yau, J.H. Li, W.H. Tang, New failure load criterion for large diameter bored piles in weathered geomaterials, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 127(6) (2001) 488-498.
- [18] ASTM-D1143, Standard Test Method for Piles Under Static Axial Compressive Load, in, American Society for Testing and Materials, New York, (1994), pp. 104-114.
- [19] ASTM-D3689, Standard Test Method for Individual Piles Under Static Axial Tensile Load, in, American Society for Testing and Materials, New York, (2007), pp. 416-426.
- [20] FHWA(Federal Highway Administration), Micropile design and construction—Reference manual, FHWA NHI-05-039, US Department of Transportation, McLean, VA (2005) 436.
- [21] DFI, Guide to Drafting a Specification for Micropiles, in: Deep Foundations Institute, The International Association of Foundation Drilling, New Jersey, (2004), pp. 60 pages.
- [22] F.K. Chin, Estimation of the ultimate load of piles from tests not carried to failure, in: Proc. 2nd Southeast Asian Conference on Soil Engineering, Singapore, (1970).
- [23] J. Brinch Hansen, Discussion of Hyperbolic Stress-Strain Response: Cohesive Soil. by Robert L. Kondner, *J. Soil Mech., Found. Div., ASCE*, 89(4) (1963) 241-242.
- [24] L. Decourt, Behavior of foundations under working load conditions, 11th Pan-American Conferenvce on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Foz do Iguacu, 4 (1999) 453-488.
- [25] L. Décourt, Loading tests: interpretation and prediction of their results, in: D.K.C. J.E. Laier, and M.H. Hussein (Ed.) *From Research to Practice in Geotechnical*
- [4] J. Bishop, H. Aschenbroich, B. DeBernar, Class I and II micropiles with hollow-bar reinforcement load tests and performance measurements, in: *Proceedings of the 7th International Workshop on Micropile*, Schrobhausen, Germany, (2006), pp. 3-7.
- [5] J.E. Gomez, C.J. Rodriguez, H.D. Robinson, J. Mikitka, K. L., Hollow core bar micropiles—installation, testing, and interpolation of design parameter of 260 micropiles, in: *In Proceedings of the 8th International Workshop on Micropiles*, Toronto, Ont., (2007).
- [6] J. Bennett, N. Hothem, Hollow bar micropiles for settlement control in soft clay, in: *Proceedings of the 10th International Workshop on Micropiles*, Washington, DC, (2010).
- [7] J. Bruce, N. Gursaud, Grout Flushed Micropiles Foundations for a New Rail Overpass, in: *Proceedings of the 9th International Workshop on Micropiles*, London, England, (2009).
- [8] W. Telford, M. Kokan, H. Aschenbroich, Pile load tests of Titan Injection Bored micropiles at an industrial plant in North Vancouver, in: *Proceedings of the 9th International Workshop on Micropiles*, London, UK, (2009).
- [9] A.Y. Abd Elaziz, M.H. El Naggar, Geotechnical capacity of hollow-bar micropiles in cohesive soils, *Canadian Geotechnical Journal*, 51(10) (2014) 1123-1138.
- [10] A.Y. Abd Elaziz, M.H. El Naggar, Group behaviour of hollow-bar micropiles in cohesive soils, *Canadian Geotechnical Journal*, 51(10) (2014) 1139-1150.
- [11] A.Y. Abd Elaziz, M.H. El Naggar, Performance of hollow bar micropiles under monotonic and cyclic lateral loads, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 141(5) (2015) 04015010.
- [12] A.Y. Abd Elaziz, M.H. El Naggar, Axial behaviour of hollow core micropiles under monotonic and cyclic loadings, *Geotechnical Testing Journal*, 35(2) (2012) 249-260.
- [13] H. Lahuta, J. Aldorf, E. Hrubesova, H. Rubisarova, A. Janicek, Influence of Buckling at the Rod Micropiles, *Procedia engineering*, 142 (2016) 328-333.

- [31]BOD, Pile foundations, Prac. Note for Authorised Persons and Registered Struct. Engrs., No. 66, 1997 Revision, Buildings Department, Hong Kong, (1997).
- [32](NYSDOT) State of New York Department of Transportation, Standard Specifications, Albany, New York, 12232, (2008).
- [33]F.H. Kulhawy, P.W. Mayne, Manual on estimating soil properties for foundation design, Electric Power Research Inst., Palo Alto, CA (USA); Cornell Univ., Ithaca, NY (USA). Geotechnical Engineering Group, (1990).
- [34]S.-S. Jeon, Interpretation of load tests on minipiles, Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering, 157(2) (2004) 85-90.
- [35]J.E. Bowles, Y. Guo, Foundation analysis and design, McGraw-hill New York, (1996).
- [36]H. Thilakasiri, Qualitative Interpretation of Load-Settlement Curves of Bored Piles, Engineer: Journal of the Institution of Engineers, Sri Lanka, 40(4) (2007).
- Engineering, Geotechnical Special Publication, GSP 180, (2008), pp. 452-488.
- [26]M. Davisson, High capacity piles, Proc. of Lecture Series on Innovations in Foundation Construction, 52 (1972) 81-112.
- [27]H. Butler, H. Hoy, The texas quick load test method for foundation load testing—users manual, FHWA IP-77.8, FHWA Implementation Division, Washington, DC, (1977).
- [28]F.M. Fuller, H.E. Hoy, Pile load tests including quick-load test method, conventional methods, and interpretations, Highway Research Record, (333) (1970) 74–86.
- [29]O.F. Drbe, Investigation of Hollow Bar Micropiles in Cohesive Soil, A thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree in Master of Engineering Science, Western University, (2013).
- [30]Canadian Geotechnical society (CGC), Canadian foundation engineering manual, 4th ed, Bitech Publishers, Richmond, Canada, (1995).

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M.A. Fakharnia, H. Bayesteh, A New Failure Criteria for Hollow-bar Micropile Based on Full-Scale Static Load Tests, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 52(4) (2020) 919-934.

DOI: [10.22060/ceej.2018.15093.5827](https://doi.org/10.22060/ceej.2018.15093.5827)

