

مدل سازی فیزیکی مقاومت بیرون کشیدگی میل مهار در خاک ماسه‌ای به کمک جعبه برش بزرگ مقیاس

سجاد توکلی^۱ و محمدحسین امین‌فر^{۲*}

^۱ دانشجوی دکتری ژئوتکنیک، دانشگاه تبریز

^۲ دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

(دریافت: ۹۶/۹/۱، پذیرش: ۹۷/۶/۳۱، نشر آنلاین: ۹۷/۷/۱)

چکیده

یک مطالعه آزمایشگاهی با استفاده از جعبه برش بزرگ مقیاس، برای بررسی رفتار میل مهارهایی که در خاک ماسه‌ای متراکم واقع شده‌اند، انجام شده است. در این تحقیق، با انجام آزمایش‌هایی نیروی بیرون کشیدگی حداکثر و نمودار بار-جابجایی به روش کنترل نرخ تغییر مکان، تعیین شده‌اند. در این تحقیق همچنین به بررسی آزمایشگاهی تأثیر پارامترهای طول، قطر، مشخصه‌های سطح میل مهار (زبری) و میزان سربار بر ظرفیت بیرون کشیدگی میل مهارها پرداخته شده است. در کلیه آزمایش‌های انجام شده، در هنگام اعمال نیروی کششی میزان جابجایی میل مهار و نیروی محوری قرائت شده و حداکثر نیروی محوری لازم برای بیرون کشیده شدن میل مهار از خاک و همچنین مقدار جابجایی که این نیرو در آن حاصل می‌شود، ثبت شده‌اند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که رابطه بین نیرو و تغییر مکان در کلیه آزمایش‌ها در تغییر شکل‌های کوچک به صورت خطی بوده و با افزایش تغییر مکان این رابطه از حالت خطی خارج می‌شود. همچنین با توجه به طول، قطر، نوع سطح میل مهار و سربار وارده، میل مهارها در تغییر مکان‌های مختلفی به ظرفیت بیرون کشیدگی می‌رسند که مقدار این تغییر مکان با افزایش ظرفیت بیرون کشیدگی، افزایش می‌یابد. به عبارتی هرچه ظرفیت بیرون کشیدگی میل مهارها افزایش می‌یابد، شکل پذیری سیستم سازه‌ای بالاتر می‌رود. با افزایش طول و قطر میل مهار، ظرفیت بیرون کشیدگی افزایش پیدا کرده ولی نرخ این افزایش به تناسب افزایش طول و قطر نبوده و از آن کمتر است. با زبر شدن سطح میل مهار، اندرکنش بین خاک و میل مهار افزایش یافته و باعث ایجاد نیروی محوری بیشتری در میل مهار نسبت به حالت سطح صاف شده است.

کلیدواژه‌ها: میل مهار، جعبه برش مستقیم، مقاومت برشی، ظرفیت بیرون کشیدگی، خاک میخ کوبی شده.

۱- مقدمه

از جمله پارامترهای مهم در طراحی خاک میخ کوبی شده، مقاومت بیرون کشیدگی میل مهارها بوده که تخمین آن با دقت بالا کار مشکلی است (Franzen 1998). این پارامتر اغلب توسط مهندس طراح در زمان طراحی تخمین زده شده و سپس به کمک آزمایش‌های بیرون کشیدگی در زمان ساخت، صحت سنجی می‌شود. محققان از روش‌های صحرایی و آزمایشگاهی برای انجام آزمایش‌های بیرون کشیدگی استفاده کرده‌اند. از جمله این محققان که از جعبه برش مستقیم برای بررسی رفتار خاک میخ-کوبی شده استفاده کرده‌اند، می‌توان به موارد زیر اشاره کرد: Lou و Cartier؛ ۱۹۸۳؛ Franzen؛ ۱۹۹۸؛ Jewell؛ ۱۹۹۰؛ Lou و همکاران، ۲۰۰۰؛ Schlosser؛ ۱۹۹۱؛ Su؛ ۲۰۰۶؛ Su و همکاران، ۲۰۱۰؛ Pradhan؛ ۲۰۰۳؛ Zhou؛ ۲۰۰۸؛ Tokhi و همکاران، ۲۰۱۰؛ Hong و همکاران، ۲۰۱۷.

یکی از روش‌های درجای مسلح سازی شیب‌های خاکی برای محدود کردن تغییر شکل‌ها و افزایش ایمنی آن، روش میخ کوبی خاک است که با توجه به مزیت‌های آن از جمله دوره ساخت کوتاه مدت و هزینه اجرای پایین، استفاده از این روش روز به روز افزایش می‌یابد. این روش بیشتر در خاک‌های به هم فشرده و متراکم و همچنین شیب‌هایی که دسترسی ماشین‌آلات سنگین به آنجا دشوار است، کاربرد داشته و استفاده از آن در خاک‌های سست محدود است. دلیل استفاده از این روش در خاک متراکم این است که اولاً در این نوع خاک مواد ریزدانه کم بوده و سیمان شدگی ضعیفی دارند که خود باعث ایجاد چسبندگی کمی در خاک می‌شود، ثانیاً در این خاک اندرکنش مناسب ناشی از اصطکاک بین خاک و جدار میل مهار به وجود می‌آید.

* نویسنده مسئول؛ شماره تماس: ۰۹۱۴۳۱۱۲۸۱۳

باشد، میل مهارها بایستی برای به حداکثر رساندن ظرفیت بار محوری مقطع طراحی گردند، در حالت عکس، یعنی در مواردی که بروز تغییرمکان‌های برشی بزرگ‌تر مجاز باشد، نظیر عملیات پایدارسازی شیروانی‌های خاکی وسیع، در فرایند طراحی علاوه بر نیروی محوری، نیروی برشی نیز حائز اهمیت می‌گردد. در این حالت استفاده از میل مهارهای کوتاه‌تر مانند Fired Nail مناسب و اقتصادی‌تر است. بر این اساس، در این تحقیق به بررسی آزمایشگاهی تأثیر پارامترهای طول، قطر، مشخصه‌های سطح میل-مهار (زبری) و میزان سربار بر ظرفیت بیرون کشیدگی میل مهارها پرداخته شده است.

۲- حالت‌های گسیختگی میل مهارهای واقع در خاک

میل مهارهای موجود در خاک برای مقاومت در برابر حرکت ناحیه فعال خاک و ممانعت از جدا شدن آن از ناحیه مقاوم تعبیه می‌گردند. وقوع گسیختگی در خاک مسلح یا در اثر رسیدن به مقاومت اصطکاکی حدی در طول میل مهار و یا در اثر مقاومت Passive در برابر میل مهار رخ می‌دهد. در این زمینه می‌توان به انواع گسیختگی‌های ناشی از خرابی دیواره مهاربندی شده، گسیختگی ناشی از بیرون کشیدگی میل مهار و گسیختگی ناشی از پارگی میل مهار اشاره کرد. مدل‌های رایج دیگری از گسیختگی توسط محققانی مانند Pedley (۱۹۹۰) و Aminfar (۱۹۹۸)، ارائه شده‌اند که عبارتند از: گسیختگی ناشی از بیرون کشیدگی (Pullout)، گسیختگی جسم صلب (Rigid Body)، تشکیل مفصل پلاستیک (Plastic Hinge)، گسیختگی کششی و گسیختگی برشی. در شکل (۱) این نوع گسیختگی‌ها (گسیختگی‌های داخلی) نشان داده شده‌اند.

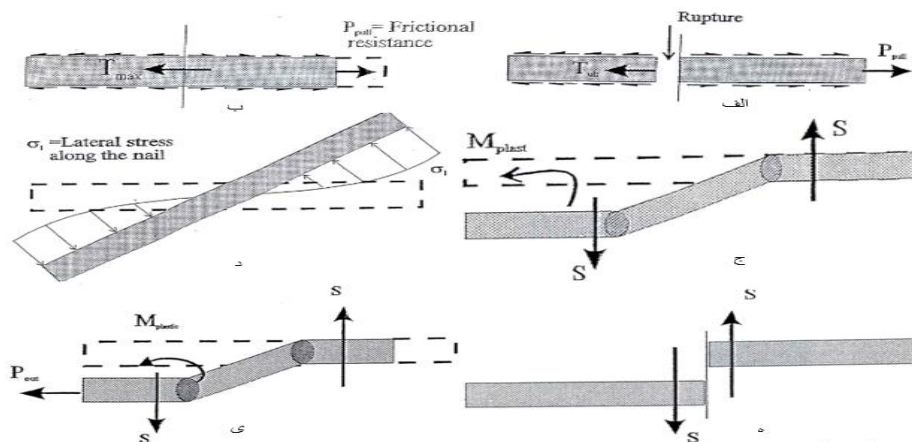
این محققان نتیجه گرفتند که مقاومت بیرون کشیدگی خاک-میل مهار به پارامترهای مختلفی مانند مقاومت برشی خاک، اتساع، فشار تزریق، روش نصب میل مهار، تنش آزاد شونده در هنگام حفاری و همچنین روش انجام آزمایش، شرایط خاک و غیره وابسته است.

Milligan و همکاران (۱۹۹۷)، نیز میل مهارها را به روش کنترل نرخ تغییرمکان تحت آزمایش قرار داده و به مطالعه تغییرات تنش با استفاده از نصب ابزار سنج‌هایی در سطح مشترک خاک و میل مهار پرداخت. روش‌های تئوری و تجربی مختلفی برای ارزیابی مقاومت بیرون کشیدگی نهایی پیشنهاد شده است که از جمله این موارد می‌توان به پیشنهادهای Schlosser (۱۹۸۲)؛ Cartier و Gigan (۱۹۸۳)؛ Jewell (۱۹۹۰)؛ Heymann و همکاران (۱۹۹۲)؛ Aminfar (۱۹۹۸) اشاره کرد.

استفاده از این روش‌ها نیازمند داشتن پارامترهایی از جمله: تنش نرمال وارد بر سطح میل مهار (σ_n)، ضریب اصطکاک بین میل مهار و خاک (μ)، چسبندگی سطحی (a) و محیط (پیرامون) میل مهار (p) است. برای دستیابی به پارامترهای مقاومتی خاک از جمله چسبندگی داخلی (C') و زاویه اصطکاک داخلی (ϕ') می‌توان از ضریب اصطکاک بین میل مهار و خاک و چسبندگی سطحی خاک-میل مهار استفاده کرد.

Potyondy (۱۹۶۱)، پیشنهاد کرد که چسبندگی سطحی و ضریب اصطکاک سطحی به ترتیب برابر $f_c c'$ و $\tan(f\phi)$ بوده و مقادیر f_c و $f\phi$ را می‌توان از آزمایش‌های جعبه برش مستقیم و با جایگزینی قسمت پایین جعبه برش با ورقه‌هایی از جنس مشابه، به دست آورد.

اهمیت نیروی برشی ایجاد شده در میل مهارها در ملاحظات طراحی، به موارد کاربرد آنها وابسته است، به طوری که اگر بسته به شرایط پروژه تغییرمکان‌های برشی بسیار کم و ناچیز مدنظر



شکل ۱- مکانیزم‌های احتمالی گسیختگی یک میل مهار: الف) گسیختگی کششی، ب) گسیختگی بیرون کشیدگی، ج) گسیختگی مفصل پلاستیک، د) گسیختگی جسم صلب، ه) گسیختگی برشی، ی) گسیختگی ناشی از بیرون کشیدگی و تشکیل مفصل پلاستیک

(Pedley, ۱۹۹۰)

۳- نیروهای ایجاد شده در میل مهار

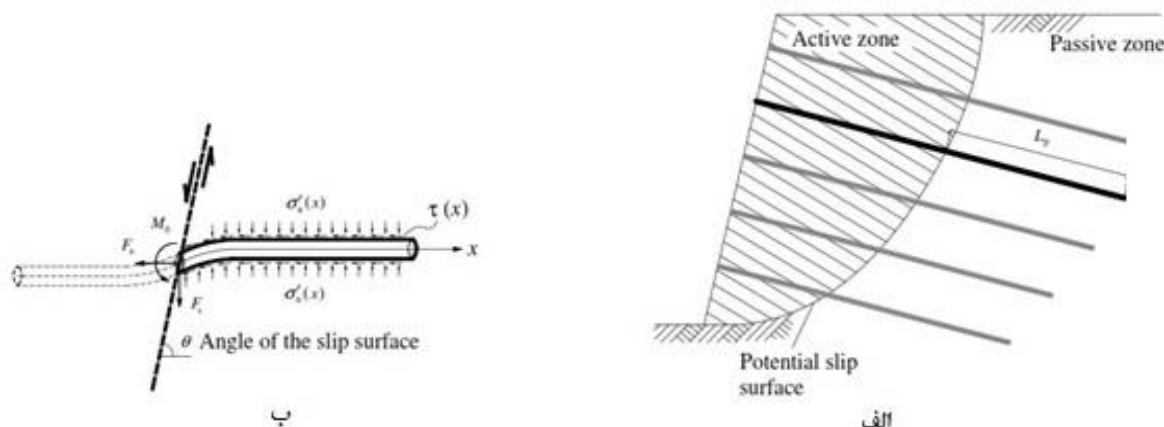
از جمله روش‌های تجزیه و تحلیل میل مهارها، روش تعادل حدی است. این روش به طول قسمتی از میل مهار که در ناحیه مقاوم (ناحیه پایدار) قرار دارد و نیروی کششی گسترش یافته در آنها وابسته است. این پارامترها پایداری شیب را هنگامی که شیب تحریک می‌شود، تأمین می‌کنند (شکل (۲-الف)). طول میل مهارها در ناحیه مقاوم گوه (L_p) به مقاومت بیرون کشیدگی (F_a)، که یکی از مهم‌ترین پارامترهای طراحی میل مهارها می‌باشد، وابسته است (شکل (۲-ب)). با ایجاد کوچک‌ترین تغییر مکان در خاک، در میل-مهار نیروهایی ایجاد می‌گردند که از جمله آنها می‌توان به نیروی محوری، نیروی برشی و لنگر خمشی اشاره کرد. مقاومت اصطکاکی جلدی بین خاک و میل مهار موجب ایجاد نیروی محوری در میل-مهار می‌گردد. حال آن که مقاومت Passive خاک در قبال میل-مهار، موجب ایجاد نیروهای برشی و خمشی به همراه تغییر شکل در میل مهار می‌گردد. در شکل (۳) نیروهای حاصل از تنش ایجاد شده در خاک و میل مهار پس از وقوع تغییر شکل برشی نشان داده شده است. در این شکل، در نقطه O واقع بر سطح گسیختگی،

میل مهار در معرض حداکثر نیروی محوری، T_{max} ، و نیروی برشی حداکثر S قرار دارد. در نقطه A، نیز میل مهار در معرض بیشترین لنگر خمشی قرار دارد.

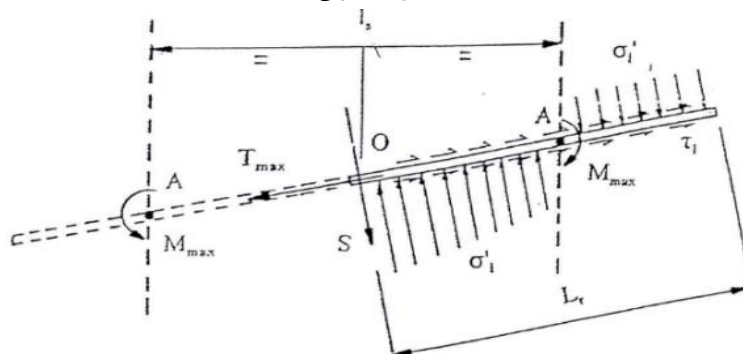
۳-۱- نیروی محوری

تمام روش‌های محاسبه نیروی محوری ایجاد شده در میل مهار بر اساس اصطکاک حدی بین خاک و میل مهار استوار می‌باشند. در نقطه عبور میل مهار از سطح گسیختگی، حداکثر نیروی محوری ایجاد شده باید با اصطکاک بسیج شده در آن قسمت از میل مهار که در ناحیه مقاوم خاک واقع شده است، L_r (شکل (۳)) در تعادل باشد. Schlosser (۱۹۹۲)، حداکثر بار محوری ایجاد شده در میل-مهار را با فرض این که تنش برشی حدی در طول L_r ثابت می‌ماند، از رابطه زیر محاسبه کرد:

$$T_{max} = \pi D L_r (\sigma_v \tan \phi_1 + C_a) \quad (1)$$



شکل ۲- گسیختگی محتمل یک شیب: الف) شیب مسلح شده به روش میخ کوبی، ب) نیروهای ایجاد شده در میل مهار بکار رفته در یک شیب (Wan و همکاران، ۲۰۰۸)



شکل ۳- طرح و الگوی فرضی تنش‌های به وجود آمده در خاک و نیروهای منتج در یک میل مهار گذرنده از یک سطح برش (Wan و همکاران، ۲۰۰۸)

گذرنده از یک سطح برش که در معرض تغییر مکان برشی قرار دارد را ابداع نموده‌اند. عمده این روابط در جدول (۱) ذکر شده‌اند. در این جدول دو روش برای محاسبه نیروی برشی حدی ذکر شده است که یکی از آنها براساس ظرفیت لنگر پلاستیک میل مهار (M_p) و دیگری براساس حداکثر تنش باربری حدی (σ'_b) می‌باشد.

در این جدول، EI سختی خمشی، D قطر میل مهار، σ'_b حداکثر تنش باربری حدی، σ_p تنش تسلیم میل مهار، α ضریب ثابتی که برای میل مهارهای مورد استفاده در خاک برابر $6/5$ می‌باشد، k_z مدول عکس‌العمل بستر، l_s پهنای برش، M_{max} بیشینه لنگر ایجاد شده در میل مهار، S نیروی برشی و M_p ظرفیت لنگر پلاستیک میل مهار می‌باشد.

اختلاف اساسی این تئوری‌ها در محاسبه عرض برش است. Schlosser (۱۹۹۷) و Bridle (۱۹۹۷)، (مرحله اول) سختی میل-مهار را با خاک مربوطه (E/k_z) مقایسه می‌کنند، در حالی که تئوری‌های Pedley و Jewell (۱۹۹۰) و Bridle (۱۹۹۷)، (مرحله سوم) مقاومت نسبی میل مهار را نسبت به خاک (σ_p/σ'_b) مقایسه می‌نمایند. تفاوت در محاسبه نیروی برشی حدی، اساساً از توزیع متفاوت بار جانبی مورد استفاده در این روابط حاصل می‌گردد. دلیل متفاوت بودن تئوری Schlosser (۱۹۹۷)، این است که اساساً این روش، یک تحلیل الاستیک است و ملاحظات پلاستیک همانند سایر روش‌ها در آن لحاظ نمی‌گردد.

۳-۳- اندرکنش بین خاک و میل مهار

به طور کلی دو نوع اندرکنش بین خاک و میل مهار (مسلح کننده) وجود دارد، مورد اول که باعث ایجاد نیروهای برشی و لنگر خمشی می‌شود مربوط به سطح اتکاء (bearing) میل مهار بوده و مورد دوم که منجر به ایجاد کشش یا فشار محوری می‌شود، مربوط به اصطکاک میل مهار می‌باشد.

که در آن C_a و ϕ_1 پارامترهای چسبندگی ($0/67C$) و اصطکاک بین خاک و میل مهار، D قطر میل مهار و σ_v تنش قائم در تراز میل مهار هستند.

Jewell (۱۹۹۰)، با بیان این مطلب که مقاومت بیرون کشیدگی میل مهار به عمق قرارگیری آن وابسته است، حداکثر بار محوری ایجاد شده در میل مهار را به صورت زیر بیان کرد:

$$T_{max} = \pi D L_r f_b (\sigma'_r \tan \phi' + C) \quad (2)$$

که در آن σ'_r تنش مؤثر شعاعی نرمال وارد بر محیط میل مهار، ϕ' زاویه اصطکاک بین خاک و میل مهار، C پارامتر چسبندگی بین خاک و میل مهار و f_b ضریبی که برای میل مهار grouted برابر یک و برای میل مهار فلزی با سطح صاف کمتر از یک ($0/2-0/4$) می‌باشد. رابطه فوق را می‌توان به شکل زیر نیز نوشت:

$$T_{max} = \pi D L_r (k \sigma_v \tan \phi + C_a) \quad (3)$$

که در آن C_a پارامتر چسبندگی بین خاک و میل مهار، k ضریبی است که مقدار آن در میل مهار تزریقی (Grouted Nail) برابر k_0 (ضریب فشار سکون خاک) و حد پایین آن برابر k_a (ضریب فشار محرک خاک برای میل مهار بدون تزریق (Non-Grouted Nail) و کوبشی) می‌باشد. برای جلوگیری از ایجاد پدیده خزش، مقدار k نباید از k_0 بیشتر شود. Bridle (۱۹۹۷)، نیز حداکثر نیروی محوری ایجاد شده در یک میل مهار را به واسطه نیروی برشی S از رابطه زیر به دست آورد:

$$T_{max} = \pi D L_r \sigma' \tan \phi' + 1.15 S \tan \phi' + \pi D L_r C_a \quad (4)$$

تمام پارامترهای این رابطه قبلاً تعریف شده‌اند.

۳-۲- نیروی برشی و لنگر خمشی

محققان روش‌های متنوعی برای تخمین و محاسبه عرض برش (LS)، نیروی برشی و لنگر خمشی به وجود آمده در یک میل مهار

جدول ۱- روابط موجود برای محاسبه عرض برش، نیروی برشی و لنگر خمشی

تئوری پارامتر	Bridle (۱۹۹۰) (Stage 3)	Bridle (۱۹۹۱) (Stage 1)	Pedley و Jewell (۱۹۹۰)	Schlosser (۱۹۹۷)
عرض برش (LS)	$(4\sigma_p D^2 / 3\sigma'_b)^{0.5}$	$4/\alpha D (EI/k_z D)^{0.4}$	$(4\sigma_p D^2 / 3\sigma'_b)^{0.5}$	$\pi/2 (4EI/k_z D)^{0.25}$
حداکثر لنگر (M_{max})	$D(\sigma'_b l_s^2)/8$	$D(\sigma'_b l_s^2)/24$	$D(\sigma'_b l_s^2)/8$	$D(\sigma'_b l_s^2)/15.4$
رابطه بین نیروی برشی (S) و حداکثر لنگر	$S = (4M_{max})/l_s$	$S = (6M_{max})/l_s$	$S = (4M_{max})/l_s$	$S = (4.9M_{max})/l_s$
نیروی برشی حدی ناشی از ظرفیت لنگر پلاستیک مقطع	$(4M_p)/l_s$	-----	$(4M_p)/l_s$	$(2.9M_p)/l_s$
نیروی برشی حدی ناشی از فشار باربری	$(D\sigma'_b l_s)/2$	$(D\sigma'_b l_s)/4$	$(D\sigma'_b l_s)/2$	$(D\sigma'_b l_s)/\pi$

۳-۴- بیرون کشیدگی (Pull Out)

از آنجایی که قسمتی از نیروهای کششی در یک خاک میخ کوبی شده (Soil Nailing)، توسط تنش‌های برشی پخش شده در سطح مشترک بین خاک و میل‌مه‌ار ایجاد می‌شوند، بنابراین، مقاومت سطح مشترک خاک- میل‌مه‌ار پارامتری کلیدی برای کنترل طراحی، تغییرشکل و سنجش پایداری ساختار خاک میخ کوبی شده می‌باشد. در شکل (۵) حالت ایده‌آلی از سطح مشترک خاک- میل‌مه‌ار نشان داده شده است.

محققان مختلفی از جمله Gigan و Cartier (۱۹۸۳)، Lou و همکاران (۲۰۰۰)، Franzen (۱۹۹۸)، Jewell (۱۹۹۰)، Su و همکاران (۲۰۰۶)، Su و همکاران (۲۰۱۰)، در زمینه بیرون کشیدگی (Pull Out) آزمایش‌های آزمایشگاهی مختلفی را برای مطالعه مقاومت سطح مشترک خاک- میل‌مه‌ار انجام داده‌اند.

این محققان نتیجه گرفتند که مقاومت بیرون کشیدگی خاک- میل‌مه‌ار به پارامترهای مختلفی مانند مقاومت برشی خاک، اتساع، فشار تزریق، روش نصب میل‌مه‌ار، تنش آزاد شونده در هنگام حفاری و غیره وابسته است.

Schlusser (۱۹۸۱) و Guilioux (۱۹۸۱)، رابطه زیر را برای محاسبه مقاومت بیرون کشیدگی نهایی میل‌مه‌ار ارائه کرده‌اند:

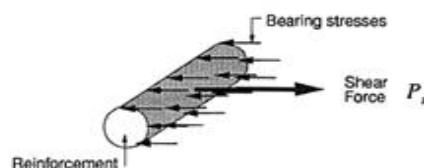
$$\tau_f = Pc' + 2D_e \sigma_v' \mu^* \quad (۶)$$

که در آن، P محیط (پیرامون) میل‌مه‌ار، c' چسبندگی مؤثر خاک، D_e پهنایی معادل نوار مسلح تخت شده، σ_v' تنش قائم در عمق متوسط مسلح کننده و μ^* ضریب اصطکاک ظاهری می‌باشد که از تقسیم تنش برشی بیشینه بر تنش قائم به دست می‌آید. در استفاده از این معادله، مقاومت بیرون کشیدگی نهایی مستقل از تنش محصور کننده (σ_m در شکل (۵-ج)) است. در شکل (۶) شکل شماتیکی از نحوه بیرون کشیدگی میل‌مه‌ار از خاک نشان داده شده است.

مقادیر نیروهای ایجاد شده در میل‌مه‌ار اساساً وابسته به سختی و مقاومت نسبی خاک- میل‌مه‌ار و تغییرشکل‌های ایجاد شده در خاک در هنگام ساخت می‌باشند. حالت ایده‌آل مکانیزم-های اندرکنش بین خاک و میل‌مه‌ار در شکل (۴) نشان داده شده است.



الف



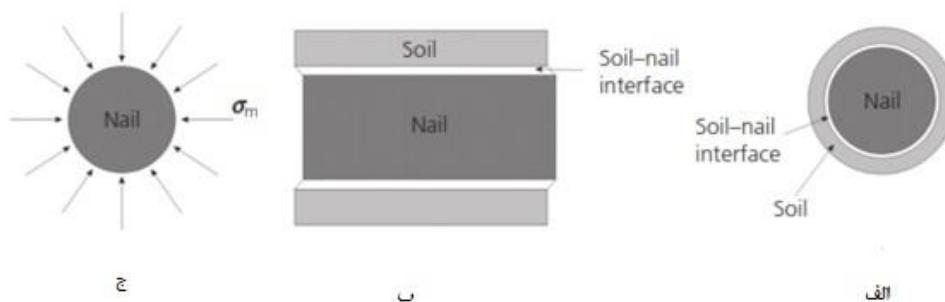
ب

شکل ۴- مکانیزم‌های اندرکنش بین خاک و میل‌مه‌ار: (الف) مکانیزم مربوط به اصطکاک، (ب) مکانیزم مربوط به سطح اتکاء (Pedley, ۱۹۹۰)

Jewell (۱۹۹۰)، فرض کرد که تنش برشی محدود شده که در تماس بین سطح میل‌مه‌ار و خاک مجاور آن بسیج می‌شود را می‌توان از رابطه زیر به دست آورد:

$$\tau / \sigma_n = f_b \tan \phi \quad (۵)$$

که در آن: τ تنش برشی، σ_n تنش نرمال، f_b ضریبی که برای میل‌مه‌ار با تزریق (Grouted Nail) برابر یک و برای میل‌مه‌ار فلزی بدون تزریق (Non-Grouted Nail) کم‌تر از یک (۰/۴-۰/۲) می‌باشد. ϕ نیز زاویه اصطکاک داخلی خاک است.



شکل ۵- (الف) سطح مشترک خاک و میل‌مه‌ار، (ب) تغییر مکان برشی نسبی بین خاک و میل‌مه‌ار، (ج) تنش محصور کننده مؤثر

(Cheng-Yu, ۲۰۱۱)

(۷) نمای کلی دستگاه نشان داده شده است. به طور کلی این دستگاه شامل سه قسمت است: جعبه که خاک و میل‌مه‌ها در آن جای دارند، جک هیدرولیکی که در کنار جعبه قرار گرفته و نیروی کششی به میل‌مه‌ها وارد می‌کند و شاسی و جک هیدرولیکی که در بالای جعبه قرار گرفته و به نمونه سربار (نیروی فشاری) وارد می‌کند.

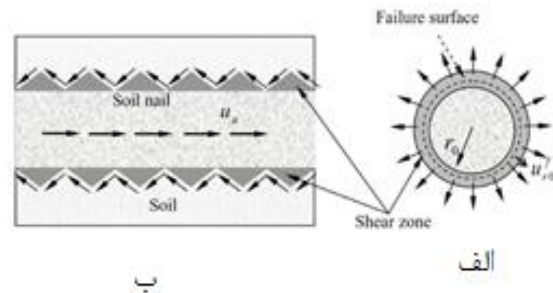
پایه و فنداسیون دستگاه متشکل از دو عدد پروفیل موازی به طول ۱/۵ متر می‌باشد که کل سیستم جعبه ثابت و گیرداری آن، سیستم جک، گیج‌ها، سیستم جعبه متحرک و مه‌های لازمه طوری طراحی و بر روی فنداسیون صلب آن اجرا گردیده‌اند که از لغزش‌ها و تغییر مکان‌های قسمت ثابت ممانعت به عمل آید. جعبه‌های ثابت و متحرک نیز از ورق‌های به ضخامت ۱۰ میلی‌متر ساخته شده‌اند. کل مجموعه بر روی صفحه‌ای به ضخامت ۱۰ میلی‌متر که خود به فنداسیون دستگاه متصل است، نصب شده است.

جدول ۲- ابعاد جعبه‌های ساخته شده توسط محققان مختلف

محقق	ابعاد	ارتفاع (cm)	عرض (cm)	طول (cm)
Jewell (۱۹۹۰)	۱۵/۲	۵/۲	۲۵/۴	
Juran (۱۹۹۱)	۴۰	۴۰	۶۰	
Pedley (۱۹۹۰)	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	
Jacobs (۱۹۹۳)	۳۰۰	۱۵۰	۱۵۰	
Tokhi (۲۰۱۶)	۱۰۰	۱۰۰	۱۵۰	
Su (۲۰۱۰)	۸۰	۶۰	۱۰۰	
Pradhan (۲۰۰۳)	۱۴۰	۱۶۰	۲۰۰	
Ti (۱۹۹۳)	۲۰	۱۵/۳	۲۵/۴	



(ب)



(ب)

شکل ۶- نحوه بیرون کشیدگی میل‌مه‌ها از خاک:
الف) مقطع عرضی، ب) مقطع طولی (Cheng-Yu, ۲۰۱۱)

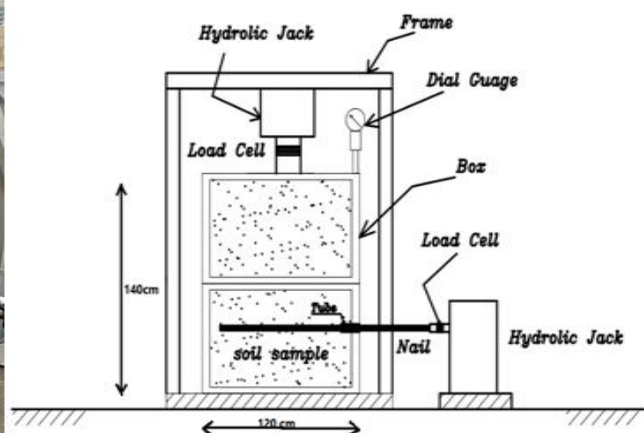
۴- مواد و روش‌ها

محققان مختلف برای انجام مطالعات خود از جعبه‌های با ابعاد مختلف استفاده کرده‌اند که در جدول (۲) به چند مورد از آنها اشاره شده است.

در این تحقیق نیز براساس مطالعات عددی انجام شده محدود ابعاد به دست آمده به منظور انجام مطالعات آزمایشگاهی، با توجه به محدودیت‌های موجود مانند کمبود فضا، آماده‌سازی نمونه‌های خاک مورد استفاده در آزمایش‌ها (حجم زیاد خاک)، زمان و هزینه و در عین حال صحت انجام و نتایج آزمایش‌ها، جعبه به ابعاد: طول ۱۲۰، عرض ۱۰۰ و ارتفاع کلی ۱۴۰ سانتی‌متر که در محدوده ابعاد استفاده شده توسط سایر محققان نیز می‌باشد، استفاده شده است.

۴-۱- جعبه برش مستقیم با سیستم بیرون کشیدگی

به منظور استفاده بیشتر از دستگاه طراحی شده در مطالعات آتی، جعبه آن از دو بخش مجزا تشکیل شده است که قسمت پایین آن ثابت و گیردار و قسمت بالایی آن متحرک است. در شکل



(الف)

شکل ۷- جعبه ساخته شده در دانشگاه تبریز: الف) شکل شماتیک، ب) شکل واقعی

جدول ۳- مشخصات میل مهارها

پارامتر	σ_p (kN/m ²)	E (kN/m ²)	M_p (N.m)	M_e (N.m)	قطر (mm)
	۳۹۳۰۰۰	۲۱۰۰۰۰	۱۴/۱۴۸	۸/۳۳۴	۶
	۳۹۳۰۰۰	۲۱۰۰۰۰	۳۳/۵۳۶	۱۹/۷۵۴	۸



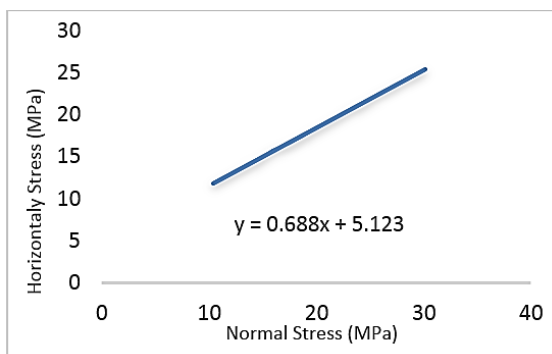
شکل ۸- نمونه‌ای از میل مهارهای تهیه شده

۳-۴- خاک

خاک مورد استفاده در این آزمایش‌ها ماسه‌ای بوده که در حالت کاملاً خشک مورد استفاده قرار گرفته است. ذرات این خاک از الک شماره ۱۶ گذشته و روی الک شماره ۱۰۰ باقی مانده‌اند. از لحاظ دانه‌بندی نیز خاک دارای ضریب خمیدگی ۰/۹۴ و ضریب یکنواختی ۱/۹۲ بوده و جزو خاک‌های یکنواخت و بد دانه‌بندی شده (SP) می‌باشد. نمودار دانه‌بندی این خاک در شکل (۹) نشان داده شده است. برای تعیین پارامترهای مقاومتی خاک از رابطه کلاسیک موهر- کلمب استفاده شده است:

$$\tau_f = C + \sigma_n \tan \phi \quad (7)$$

که در این رابطه، τ_f تنش برشی حداکثر خاک، C پارامتر مربوط به چسبندگی خاک، σ_n تنش نرمال در سطح برش و ϕ زاویه اصطکاک داخلی خاک در سطح برش است. برای یافتن مقادیر C و ϕ با توجه به سربارها و نیروهای گسیختگی برشی خاک از سه نوع سربار ۴۰، ۸۰ و ۱۰۰ کیلوگرمی در دستگاه برش مستقیم استفاده شده است. نتایج حاصل از هر آزمایش به صورت مکان هندسی گسیختگی کولمب ترسیم شده است (شکل ۱۰).



شکل ۱۰- نمودار معادله خط گسیختگی کولمب در خاک مورد آزمایش

برای مشاهده رفتار و تغییر مکان نمونه خاک و میل مهار و ثبت اندرکنش بین آنها، یکی از اضلاع جعبه‌ها از جنس ورق شیشه‌ای Perspex (پیرکس) ساخته شده است. کل مجموعه بر روی ورق صفحه‌ای که خود به فنداسیون دستگاه متصل است، نصب می‌شود. برای مطالعه بیرون کشیدگی، ابتدا جعبه‌های ثابت و متحرک به کمک پیچ و مهره نسبت به هم ثابت می‌شوند، سپس میل مهارها از طریق روزنه‌های ایجاد شده در وجه جلویی جعبه، به صورت افقی در تراز مورد نظر قرار داده می‌شود، سپس خاک مورد استفاده به روش بارش ماسه (Sand Raining) و از ارتفاع ۸۰ سانتی‌متر بالاتر از جعبه متحرک در داخل جعبه‌ها ریخته و متراکم می‌گردد. این عمل تا پر شدن جعبه برش ادامه می‌یابد و سپس به کمک جک فوقانی سربار مورد نظر بر روی صفحه‌ای که روی خاک قرار می‌گیرد، اعمال می‌شود و نمونه آماده آزمایش می‌گردد. در انجام آزمایش، ابتدا میل مهار در خاک قرار گرفته و از یک طرف به جک وصل می‌گردد و مقدار نیروی کششی مورد نیاز برای بیرون کشیدن آن و همچنین فضای پیرامون میل مهار که تحت تأثیر این نیرو قرار می‌گیرد، اندازه‌گیری می‌شود.

۲-۴- میل مهارها

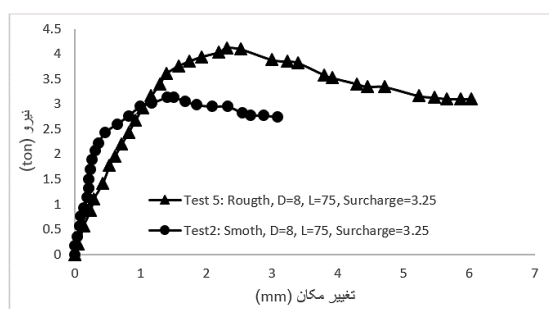
میل مهارهای انتخابی از دو نوع میل مهارهای فولادی آج‌دار (میل‌گرد) با قطرهای ۶ و ۸ میلی‌متر که مشخصات آن‌ها در جدول (۳) ارائه شده است و میل مهارهای ساخته شده از تزریق دوغاب (grouting) می‌باشند. نمونه‌ای از این میل مهارها در شکل (۸) نشان داده شده است. برای ایجاد میل مهار Grouded ابتدا یک سیم مفتول که قطر آن به کمک تحلیل ابعادی محاسبه می‌شود، را درون یک قالب لوله‌ای با قطر محاسبه شده گذاشته و اطراف آن از دوغاب سیمان پر می‌شود. برای ایجاد میل مهار با سطح زبر نیز، به کمک چسب مخصوص ذرات ماسه ریز را به سطح میل مهار چسبانده و در نهایت سطحی کاملاً زبر ایجاد شده است. که در آن، σ_p تنش تسلیم، E مدول الاستیسیته، M_p لنگر پلاستیک M_e و $M_p = \frac{D^3 \sigma_p}{6}$ و $M_e = \frac{3\pi}{16} M_p$ میل مهار است.



شکل ۹- نمودار دانه‌بندی خاک مورد استفاده

وارد انجام شده است. در این آزمایش‌ها از دو نوع میل‌مه‌ار فولادی grouted و non grouted استفاده شده است.

در شکل (۱۱) که نمونه‌ای از نتایج آزمایش‌های انجام شده می‌باشد، چگونگی بسیج شدن نیروی محوری در اثر اندرکنش میل‌مه‌ار با خاک نشان داده شده است. در این شکل مشاهده می‌شود که در مراحل اولیه آزمایش، رابطه نیروی محوری بسیج شده و تغییرمکان به صورت خطی بوده و متأثر از شرایط آزمایش مانند طول، قطر، جنس و یا نوع سطح میل‌مه‌ار نمی‌باشد. بعد از طی این مرحله نرخ افزایش تغییرمکان بیشتر می‌شود تا این که مقدار نیروی محوری بسیج شده به یک مقدار بیشینه می‌رسد، که این مقدار به عنوان ظرفیت بیرون کشیدگی در نظر گرفته می‌شود. بعد از این مرحله تغییرمکان میل‌مه‌ارها رفته رفته افزایش می‌یابد و مقدار نیروی محوری کاهش یافته تا این که بعد از افت محسوسی در یک مقدار تقریباً ثابت که مقاومت پسماند است، ثابت می‌ماند و کاهش محسوسی در آن رخ نمی‌دهد. این مقدار تغییرمکان که در آن حداکثر نیروی محوری بسیج می‌شود، متأثر از شرایط آزمایش بوده و می‌توان گفت با بالا رفتن ظرفیت بیرون کشیدگی، مقدار این تغییرمکان نیز افزایش می‌یابد و به عبارتی شکل‌پذیری سیستم بیشتر می‌شود.



شکل ۱۱- نمودار نیرو- تغییرمکان میل‌مه‌ار

۵-۱- اثر طول میل‌مه‌ار بر نیروی بیرون کشیدگی

طول میل‌مه‌ار نقش مهمی در ظرفیت بیرون کشیدگی دارد. با توجه به روابط (۱) تا (۳) مشاهده می‌شود که میزان بیرون کشیدگی رابطه مستقیم با طول میل‌مه‌ار داشته و با دو برابر شدن آن، ظرفیت بیرون کشیدگی تا سقف دو برابر نیز می‌تواند افزایش یابد. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که با افزایش ۶۶ درصدی طول، مقدار ظرفیت بیرون کشیدگی در حدود ۴۸ تا ۵۶ درصد افزایش یافته است. می‌توان گفت با افزایش طول میل‌مه‌ار، اندرکنش بیشتری (ناشی از اصطکاک) بین خاک و میل‌مه‌ار به وجود می‌آید که باعث ایجاد نیروی بیرون کشیدگی بیشتری در میل‌مه‌ار می‌گردد. همچنین با افزایش طول، مقدار کرنش میل‌مه‌ار افزایش می‌یابد و تغییرمکان دو سر میل‌مه‌ار به اندازه تغییرشکل میل‌مه‌ار

معادله $y=0.688x+5.123$ خط گسیختگی کولمب برای این خاک در نظر گرفته شده است که از این معادله $C=5.123$ kPa و $\phi=34.53$ درجه به دست آمده است.

۴-۴- آماده سازی نمونه‌ها

در هنگام آماده سازی نمونه‌ها، قبل از انجام هر آزمایش برای از بین بردن اصطکاک ما بین جدار جعبه و خاک بین آنها از ورق نازک طلق استفاده می‌شود و در صورت نیاز برای جلوگیری از پدیده قوس‌زدگی (Arching) در خاک، جداره‌های جعبه روغن-کاری شده‌اند. در ادامه و بعد از نصب میل‌مه‌ارها در ترازهای مورد نظر ماسه را درون جعبه به روش بارش ماسه‌ای و بر اساس استاندارد آن ریخته و تا رسیدن به تراکم مورد نظر، آن را متراکم می‌نماییم. میزان تراکم خاک نیز به کمک استقرار استوانه‌های استاندارد، که دارای حجم مشخصی می‌باشند، در اعماق مختلف اندازه‌گیری می‌شود (با داشتن حجم استوانه و اندازه‌گیری وزن خاک قرار گرفته در داخل آن، تراکم خاک محاسبه می‌شود). پس از اتمام فرایند آماده‌سازی، جهت انجام نشست نمونه، با استفاده از جک فوقانی سرباره‌ایی بر روی نمونه قرار گرفته و قبل از شروع انجام آزمایش این سرباره‌ها حذف شده و تنها سرباره‌های مورد نیاز بر روی نمونه قرار می‌گیرد. این سرباره‌ها برگرفته از یک پروژه واقعی بوده و اثر مقیاس با در نظرگیری آنالیز ابعادی در محاسبه و معادل‌سازی آنها لحاظ شده است.

۴-۵- نحوه انجام آزمایش و ثبت داده‌ها

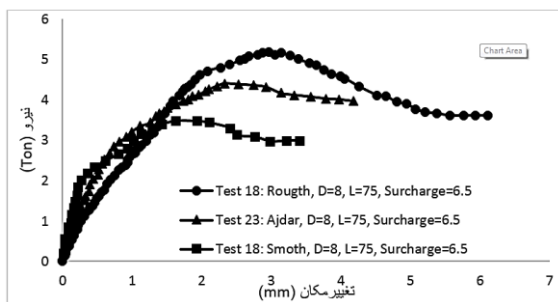
بعد از آماده‌سازی نمونه‌ها برای سنجش مقاومت بیرون کشیدگی به روش ذکر شده در قسمت‌های قبل، به کمک جک هیدرولیکی به آرامی به میل‌مه‌ارها نیروی کششی وارد کرده و هم‌زمان با رخ دادن تغییرمکان، به ازاء هر 0.1 اینچ تغییرمکان (قرائت گیج تغییرمکان)، مقدار نیروی وارده (قرائت گیج نیرو سنج) ثبت می‌شود. این روند تا رسیدن به شرایطی که در آن نیروی اعمالی رو به کاهش می‌گذارد و تغییرمکان نیز در حال افزایش است ادامه می‌یابد. در واقع مقاومت برشی خاک متناظر با نقطه‌ای است که در آن حداکثر نیرو را قرائت نموده‌ایم، این داده را مشخص کرده و با توجه به تغییرمکان مربوطه و سایر مشخصه‌های دستگاه و میزان اعمال سربار، پارامترهای مورد نظر را مطالعه می‌نماییم.

۵- اثر پارامترهای مختلف بر نیروی بیرون کشیدگی

برای بررسی اثر پارامترهای مختلف بر مقاومت بیرون کشیدگی، جمعاً ۴۴ آزمایش مختلف با پارامترهای متفاوت از جمله طول و قطر میل‌مه‌ار، زبری و صافی سطح میل‌مه‌ار و سربار

۵-۳- اثر نوع سطح (زبری و صاف بودن) بر نیروی بیرون کشیدگی

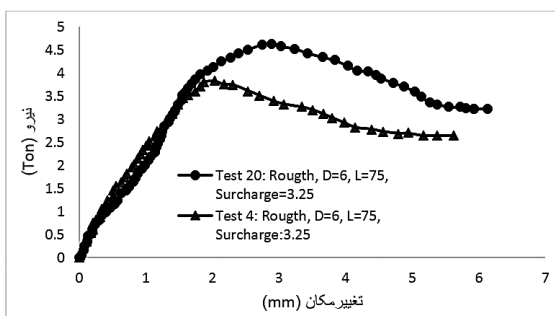
معمولاً عامل نوع سطح (زبری و صاف بودن) میل مهارها به صورت زاویه اصطکاک بین خاک و میل مهار دخیل بوده و در عمل نیز این عامل تأثیر قابل توجهی بر ظرفیت بیرون کشیدگی میل-مهار دارد. مقایسه نتایج نشان می‌دهد در میل مهارها با تبدیل سطح صاف به آجدار ظرفیت بیرون کشیدگی بسته به شرایط ۱۶ تا ۲۵ درصد و در حالت تبدیل سطح صاف به زبر در حدود ۳۴ تا ۴۶ درصد افزایش می‌یابد. نتایج نمونه‌ای از این آزمایش‌ها در شکل (۱۴) مشاهده می‌گردد.



شکل ۱۴- تأثیر نوع سطح میل مهار بر ظرفیت بیرون کشیدگی

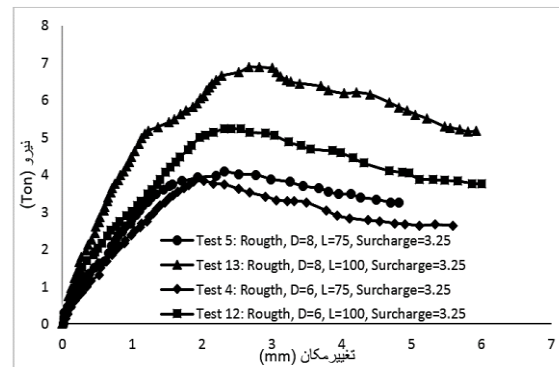
۵-۴- اثر سربار بر نیروی بیرون کشیدگی

از آنجایی که میل مهارها در پروژه‌های میخ‌کوبی در اعماق مختلف قرار می‌گیرند، بنابراین این میل مهارها تحت اثر سربار قرار دارند که همواره یکی از متغیرهای محاسباتی است. بنابراین برای بررسی اثر این پارامتر در ظرفیت بیرون کشیدگی آزمایش‌هایی انجام شده است که نمونه‌ای از نتایج این آزمایش‌ها در شکل (۱۵) نشان داده شده است. نتایج بیانگر این است که افزایش سربار رابطه خطی با افزایش ظرفیت بیرون کشیدگی ندارد. با دو برابر شدن سربار، ظرفیت بیرون کشیدگی دو برابر نشده و در میل مهار صاف ۸ درصد، در میل مهار آجدار ۱۹ درصد و در میل مهارهای زبر grouted، ۲۳ درصد افزایش یافته است.



شکل ۱۵- تأثیر میزان سربار بر ظرفیت بیرون کشیدگی

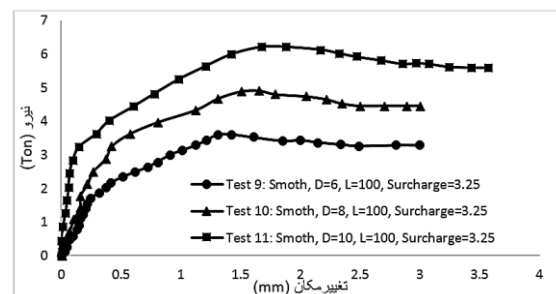
می‌باشد. افزایش ۶۶ درصدی طول میل مهار باعث شده است که نیروی بسیج شده در میل مهار صاف ۵۲ درصد و در میل مهار زبر ۵۶ درصد و در حالت آجدار ۵۳ درصد افزایش یابد. این مقدار در میل مهار grouted تقریباً ۶۴ درصد می‌باشد که علت آن بالا بودن سطح مقطع در این میل مهارها و پایین بودن تغییر طول آنها می‌باشد. نمونه‌ای از نتایج این آزمایش‌ها در شکل (۱۲) نشان داده شده است.



شکل ۱۲- تأثیر طول میل مهار بر ظرفیت بیرون کشیدگی

۵-۲- اثر قطر میل مهار بر نیروی بیرون کشیدگی

واضح است که قطر میل مهار نقش مهمی در بالا بردن ظرفیت بیرون کشیدگی دارد. مطابق شکل (۵-الف) با افزایش قطر، سطح مشترک بیشتری بین خاک و میل مهار به وجود می‌آید که باعث ایجاد مقاومت بیشتری در این سطح مشترک شده و به تبع آن تنش‌های برشی بزرگتری در سطح مشترک بین خاک و میل مهار ایجاد می‌گردد. از روابط (۱) تا (۳) مشخص است که $T_{Pullout}$ رابطه مستقیم با قطر میل مهار دارد، ولی در عمل مشاهده می‌شود که با افزایش ۳۳ درصدی قطر، در حالت فولادی ظرفیت بیرون کشیدگی ۲۰ درصد افزایش نشان می‌دهد. همچنین افزایش ۲۳ درصدی قطر در میل مهارهای grouted باعث افزایش ۳۶ درصدی ظرفیت بیرون کشیدگی می‌شود. یکی از نتایج این آزمایش‌ها در شکل (۱۳) نشان داده شده است.



شکل ۱۳- تأثیر قطر میل مهار بر ظرفیت بیرون کشیدگی

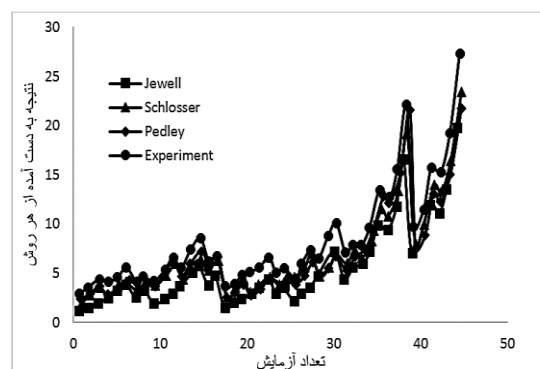
۶- مقایسه نتایج آزمایشگاهی با روابط تئوری

مقایسه‌ای بین نتایج حاصل از آزمایش‌ها آزمایشگاهی و روابط ارائه شده توسط محققان مختلف برای محاسبه نیروی بیرون کشیدگی انجام شده است (شکل ۱۶).

مقایسه نتایج نشان می‌دهد که برآوردهای حاصل از تئوری Schlosser تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی داشته و در آن روند افزایش ظرفیت بیرون کشیدگی میل مهار با تغییر طول، قطر، سربار و جنس میل مهار در آزمایشگاه بر هم منطبق می‌باشند. دلیل تفاوت جزئی بین نتایج این تئوری با روش آزمایشگاهی به ضریب ۰/۶۷ که در چسبندگی بین خاک و میل مهار اعمال می‌شود، برمی‌گردد.

در روش Jewell روند افزایش ظرفیت بیرون کشیدگی میل-مهار در حالت تئوری و آزمایشگاهی برهم منطبقند. تفاوت جزئی بین نتایج این روش و نتایج آزمایشگاهی در این است که به جای اعمال همچسبی و زاویه اصطکاک داخلی بین خاک و میل مهار، همچسبی و زاویه اصطکاک داخلی خاک قرار داده شده و سپس ظرفیت بیرون کشیدگی میل مهار توسط ضریب کاهش f_b پیدا کرده است.

در روش Pedley نتایج کمی پایین‌تر از نتایج آزمایشگاهی می‌باشد ولی در مجموع می‌توان گفت که این روش تطابق خوبی نسبت به سایر روش‌ها در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی دارد. با بررسی نتایج می‌توان مشاهده کرد که تفاوت نتایج این روش با مقادیر به دست آمده از مطالعات آزمایشگاهی در سربارهای پایین-تر، کم‌تر است که علت آن نحوه محاسبه و بسیج تنش شعاعی اطراف میل مهار می‌باشد که مقدار آن از تنش قائم کمتر بوده و با بالا رفتن مقدار سربار، مقدار این اختلاف بیشتر می‌شود.



شکل ۱۶- مقایسه نتایج به دست آمده از آزمایش‌های آزمایشگاهی و روابط ارائه شده توسط محققان مختلف

۷- نتایج

- با توجه به آزمایش‌های انجام شده مشاهده می‌شود که نیروی کششی بوجود آمده در میل‌مهاریا، به خصوص در میل-مهاریا بدون تزریق (Non-Grouted Nail)، به مراتب پایین‌تر از مقاومت محوری آنهاست. بنابراین، بهره‌گیری کامل از ظرفیت بالقوه حاصل از مقاومت محوری میل‌مهاریا، در صورت استفاده از میل‌مهاریا طویل‌تر، بخ ویژه میل‌مهاریا زبر و تحت تزریق (Grouted Nails) ترجیح داده می‌شود و در عمل هم می‌توان از این عامل استفاده بهینه کرد.

- براساس نمودارهای نیرو- تغییرمکان مشاهده می‌شود که رابطه بین نیرو و تغییرمکان در کلیه آزمایش‌ها و در تغییرشکل-های کوچک (که این مقدار نیز نسبت به شرایط آزمایشگاهی متفاوت است) به صورت خطی بوده و با افزایش تغییرمکان این رابطه از حالت خطی خارج شده و نرخ افزایش نیرو کاهش می‌یابد، تا این که نیرو به حد بیشینه خود که همان ظرفیت بیرون کشیدگی میل مهار است، برسد و سپس با افزایش تغییرمکان از مقدار نیروی محوری بسیج شده کاسته می‌شود. ولی این روند با گذشت زمان متوقف شده و مقدار نیروی محوری ثابت مانده و به همان نیروی پسماند می‌رسد.

- تغییرمکان‌هایی که در آن میل مهار به ظرفیت بیرون کشیدگی خود می‌رسد، در آزمایش‌های مختلف نسبت به طول، قطر، نوع سطح و سربار متغیر است. به طور کلی می‌توان گفت که مقدار این تغییرمکان با افزایش ظرفیت بیرون کشیدگی میل مهار افزایش می‌یابد. به عبارتی، هرچه ظرفیت بیرون کشیدگی میل-مهاریا بیشتر می‌شود شکل‌پذیری سیستم سازه‌ای بالا می‌رود.

- همچنان که انتظار می‌رود با افزایش طول میل مهار ظرفیت بیرون کشیدگی میل مهار بالا می‌رود ولی نرخ این افزایش به تناسب افزایش طول نبوده و از آن کم‌تر می‌باشد.

- با افزایش قطر میل مهار ظرفیت بیرون کشیدگی افزایش می‌یابد ولی نرخ این افزایش با بیشتر شدن قطر کاهش می‌یابد. براین اساس افزایش قطر میل مهار تا یک حدی می‌تواند راهکار اقتصادی برای افزایش ظرفیت بیرون کشیدگی باشد.

- با افزایش سطح مشترک و به تبع آن اندرکنش میان میل-مهار و خاک احاطه کننده آن (مانند میل مهار تزریقی) به علت افزایش پارامترهای اصطکاک و همچسبی بین خاک و میل مهار نیروی محوری به مراتب بیشتری نسبت به میل‌مهاریا صاف در آنها بسیج شده و معمولاً ظرفیت بیرون کشیدگی در تغییرمکان-های بزرگ‌تری حاصل می‌گردد.

- با افزایش میزان سربار در روی میل مهار، ظرفیت بیرون کشیدگی میل مهار افزایش می‌یابد ولی با بالا رفتن مقدار سربار

Wan-Huan Z, Jian-Hua Y, "A simple mathematical model for soil nail and soil interaction analysis", *Computers and Geotechnics*, 2008, 35 (3), 479-488.

Yin J, Hong C, Zhou W, "Simplified analytical method for calculating the maximum shear stress of nail-soil interface", *International Journal of Geomechanics*, 2012, 12 (3), 309-317.

Zhang LL, Zhang LM, Tang WH, "Uncertainties of field pullout resistance of soil nails", *Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2009, 135 (7), 966-972.

نرخ این افزایش رو به کاهش نهاده تا جایی که با افزایش مقدار سربار، ظرفیت بیرون کشیدگی ثابت می‌ماند.

۸- مراجع

- Aminfar MH, "Centrifuge Modelling of Stabilization of Slopes Using the technique of Soil Nailing", Ph.D. Thesis, University of Wales, College of Cardiff, UK, 1998.
- Bridel RJ, Davies MCR, "Analysis of soil nailing using tension and shear: experimental observations and assessment" *Proceed, ASCE*, 1997.
- Cheng-Yu H, "Study on the Pullout Resistance of Cement Grouted Soil Nails", Ph.D. Thesis, the Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong, 2011.
- Davies MCR, Schlosser F, "Ground Improvement System", *The 3th International Conference on Ground Improvement Systems*, London, UK, 3-5 June, 1997.
- Franzen G, "Soil nailing- a laboratory and field study of pull-out capacity", Ph.D. Thesis, Chalmers University of Technology, Goteborg, Sweden, 1998.
- Hajjalilue-Bonab M, Razavi SK, (2015) "A study of soil-nailed wall behaviour at limit states", *Ground Improvement*, 2016, 169 (1), 64-76.
- Hong CY, Liu YF, Zhang MX, Borana L, "Influence of critical parameters on the peak pullout resistance of soil nails under different testing conditions", *Geosynth and Ground Engineering*, 2017, 3, 3-17.
- Hong-Hu Zhu, Albert NL Ho, Jian-Hua Yin, Sun HW, Hua-Fu Pei, Cheng-Yu Hong, "An optical fibre monitoring system for evaluating the performance of a soil nailed slope", *Smart Structure and System*, 2012, 9 (5), 393-410.
- Jacobs C, "an investigation of soil nail reinforcement using a large direct shear box", Ph.D. Thesis, University of Wales, College of Cardiff, UK, 1993.
- Jewell RA, Pedley M, "Analysis for soil reinforcement with bending stiffness" *Proceed, ASCE*, 1990.
- Jewell RA, Pedley M, "Soil nailing design" *Proceed, ASCE*, 1990.
- Naresh G, Sai KV, Siva S, "Pull-out capacity of soil nails in unsaturated soils", *Pan-Am CGS Geotechnical Conference*, 2011.
- Pedley M, "The performance of soil reinforcement in bending and shear", Ph.D. Thesis, Wolfson College, University of Oxford, 1990.
- Pei H, Yin J, Zhu H, Hong C, "Performance monitoring of a glass fiber-reinforced polymer bar soil nail during laboratory pullout test using FBG sensing technology", *International Journal of Geomechanics*, 2013, 13 (4), 467-472.
- Pradhan B, "Study of pullout behavior of soil nails in completely decomposed granite fill", Ph.D. thesis, The University of Hong Kong, Hong Kong, 2003.
- Tokhi H, Ren G, Li J, "Laboratory study of a new screw nail and its interaction in sand", *Laboratory study of a new screw nail and its interaction in sand*, *Computers and Geotechnics*, 2016, 78, 144-154.

EXTENDED ABSTRACT

Physical Modelling of Pull-out Resistance in Sandy Soil by Using Large Shear Box

Sajad Tavakoli, Mohamad Hosein Aminfar *

Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

Received: 22 November 2017; Accepted: 22 September 2018

Keywords:

Nail, Direct Shear Box, Shear Strength, Pullout Capacity, Soil Nailing.

1. Introduction

Soil nailing is regarded as one of the cast-in-place reinforcement methods for soil slopes to limit the deformation and increase its safety the use of which is considerably increasing due to some advantages such as short-term construction and low-cost implementation. This method is commonly used in compact and dense soils, as well as slopes where heavy machinery is difficult to access, although its use is limited in loose soils. The reason for using this method in dense soil is that the fine particles are less in this type of soil and have poor cementation, which itself causes little adhesion in the soil. In addition, a proper interaction results from the friction between the soil and the nail wall in this soil.

The pull-out strength of the nails is one of the important parameters in designing nailed soil, which is difficult to estimate with high precision (Franzen, 1998). This parameter is often estimated by the design engineer when designing the nailed soil and then, verified by means of pull-out tests during construction. The researchers used field and laboratory methods to conduct pull-out tests and concluded that the pull-out strength of the soil-nail relies on various parameters such as soil shear strength, dilatation, injection pressure, nail installation method, releasing stress during drilling, as well as testing method, soil condition and the like. (Hong et al. 2017).

The significance of the shear force created in the nails depends on their applications in design considerations so that the nails should be designed to maximize the axial load capacity of the section if the shear deformations are considered to be small and negligible depending on the design conditions. In the reverse mode, in cases where the occurrence of larger shear deformations is allowed such as the stabilization operation of wide soil slopes, the shear force is very important in the design process, in addition to the axial force. In this case, the use of shorter nail, like Fired Nail, is more convenient and economical. Accordingly, the present study aimed to investigate the effect of parameters of length, diameter, characteristics of the nail surface (roughness) and the amount of surcharge on the pull-out capacity of the nails.

2. Direct shear box with the pull-out system

In order to further use the apparatus designed in future studies, the box is formed of two separate sections, the lower part of which is fixed and tight and its upper part is movable. Fig. 1. illustrates the overview of the apparatus. In general, this apparatus consists of three parts including a box with soil and its nails, a hydraulic jack which is located next to the box and insert a tensile force to the nails, and a chassis and a hydraulic jack which are located above the box and insert a compressive force to the surcharge sample.

* Corresponding Author

E-mail addresses: sajadtavakoli61@yahoo.com (Sajad Tavakoli), aminfar@tabrizu.ac.ir (Mohamad Hosein Aminfar).

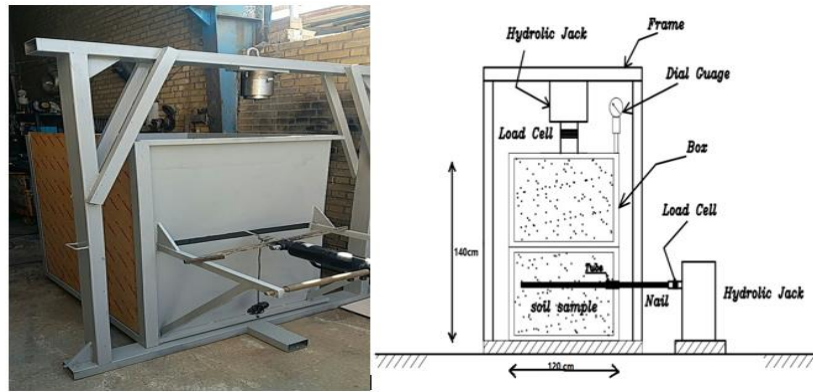


Fig 1. The Pullout Box

In order to study the pullout feature, fixed and movable boxes are first fixed. Then, the nails are horizontally aligned through the orifices on the front side of the box. In addition, the used soil is poured and compacted into the boxes by sand raining from the height of 80 cm above the moving box. This operation continues until the shear box is completed and then, the desired surcharge is applied to the top of the plate on the soil and the sample is tested. During the process, the nail is placed on the soil and connected to the jack on one side and accordingly the amount of tensile force required to pull it out and the space around the nail affected by this force are measured.

3. Nails

The selected nails are divided into two types of deformed steel nails with the diameters of 6 and 8 mm. Table 1 indicates their specifications, along with the nails made by grouting injection. In order to create a grouted nail, a wire, which its diameter is calculated by dimensional analysis, is first placed in a diameter-calculated tube frame and the around of frame is filled with the cement slurry. In order to create a nail with roughness surface, sand grains are attached to the surface of the nail by using a special adhesive, and finally, a completely rough surface is created.

Table 1. Nail Property

Parameter	M_e (N.m)	M_p (N.m)	E (kN/m ²)	σ_p (kN/m ²)
Diameter (mm)				
6	8.334	14.148	210000	393000
8	19.754	33.536	210000	393000

4. Soil

The soil used in these tests is sand which has been applied in a completely dry state. The particles of this soil are passed from mesh No. 16 and remained on the mesh No. 100. In terms of gradation, the soil has a curve coefficient of 0.94 and a uniformity coefficient of 1.92 and is classified as SP.

5. The effect of different parameters on pullout force

In order to investigate the effect of different parameters on pullout strength, 44 different tests were performed with different parameters such as length and diameter of nail, roughness and smoothness of the nail surface and the applied surcharge. In these tests, two types of grouted and non-grouted steel nails were used. In the early stages of the test, the axial force was mobilized and the displacement was linear and not affected by test conditions such as length, diameter, kind, or type of nail surface.

5.1. The effect of nail length on pullout force

The results indicated that an increase in the length by 66% increased the pullout capacity by about 48 to 56%. It is worth noting that more interaction (caused by friction) between the soil and the nail is created by increasing the nail length, which causes higher pullout force in nail. Further, an increase in length increased the amount of strain in nail and the displacement of the two ends of nail is as large as the deformation.

5.2. The effect of nail diameter on pullout force

It is evident that the diameter of the nail plays an important role in increasing the pullout capacity. As the diameter increases, a greater interface is created between the soil and the nail, leading to a greater strength at this interface, and consequently, higher shear stresses at the interface between the soil and the nail

5.3. The effect of surface type (roughness and smoothness) on pullout force

Typically, the surface type factor (roughness and smoothness) of the nails is involved as the friction angle between the soil and the nail and practically, this factor plays a significant effect on the pullout capacity. The comparison of the results indicated that by turning the smooth surface to the deformed one in nails, the capacity of pullout varies from 16 to 25% depending on the conditions, while it increases by about 34 to 46% in the case of turning a smooth to the rough surface.

5.4. The effect of surcharge on pullout force

Since nails are located at various depths in nailing projects, these tools are under the influence of surcharge, which is always regarded as one of the computational variables. Therefore, several tests were performed in order to test the effect of this parameter on the pullout capacity.

6. Conclusions

Based on the force-displacement diagrams, the relationship between force and displacement is linear in all tests and in small deformations, which is also different depending on the laboratory conditions. In addition, the relationship created from the linear mode by increasing the displacement and the rate of increasing force decreases until the force reaches its maximum limit, which is the pullout capacity, although the mobilized axial force decreases by increasing the displacement. However, this process stops over the time and the amount of axial force remains constant and returns to the same amount of residual force.

The displacements where the nail reaches its pullout capacity, varies in different tests on length, diameter, type of surface, and surcharge. In general, the amount of this displacement increases by increasing the pullout capacity of the nail. In other words, the greater pullout capacity of the nail leads to higher ductility of the structural system.

7. Reference

- Franzen G, "Soil nailing- A laboratory and field study of pull-out capacity", PhD Thesis, Chalmers University of Technology, Goteborg, Sweden, 1998.
- Hong CY, Liu YF, Zhang MX, Borana L, "Influence of critical parameters on the peak pullout resistance of soil nails under different testing conditions", *Geosynth and Ground Engineering*, 2017, 3, 3-17.