



فصل نامه علوم و مهندسی گرمسار

Journal Homepage: <https://journal.fmgarmsar.ac.ir/>



مقاله کامل پژوهشی

بررسی رفتار بیرون کشیدگی مهار صفحه‌ای بازشونده

مهرزاد شجاعی*، پژوهشگر پسادکتر، گروه ژئوتکنیک، دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

حمید اسدی قوژدی، استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده‌ی مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

سید وحید مجتهد سیستانی، پژوهشگر پسادکتر، گروه ژئوتکنیک، دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت

ایران، تهران، ایران

چکیده

سازه‌های ژئوتکنیکی نظیر دیوار شمع - سپر، اسکله‌های دریایی، پایه‌های پل‌ها، دیوارهای حائل، شیروانی‌ها، گودهای عمیق و پروژه‌های زیرزمینی در خاک سست محیط‌های شهری در معرض بارهای جانبی و بعضاً بارهای بالابرنده هستند که در اثر این بارها ممکن است ناپایدار شوند. روش‌های متعددی برای پایدارسازی سازه‌های ژئوتکنیکی وجود دارد. امروزه یکی از رایج‌ترین روش‌های پایدارسازی سازه‌های ژئوتکنیکی، روش مهارسازی (Anchorage) است. در این مطالعه، یک مهار صفحه‌ای نوین موسوم به "مهار صفحه‌ای بازشونده" معرفی شده است که در حین بیرون کشیدگی، سطح باربر آن افزایش می‌یابد. در مطالعه‌ی آزمایشگاهی حاضر، تأثیر پارامتر نسبت عمق (عمق قرارگیری مهار به عرض آن) و عرض مهار (۱۲۰، ۱۵۰، ۱۸۰ میلی‌متر) در آزمایش بیرون کشیدگی بررسی شده است. به منظور مطالعه‌ی تغییر شکل خاک اطراف مهار در لحظه‌ی حداکثر شدن نیروی بیرون کشیدگی از تکنیک پردازش تصویر به روش PIV استفاده شده است و مطابق با مشاهدات حاصل از تحلیل‌های PIV، دو سطح گسیختگی متفاوت تعریف شده است. نتایج نشان داد که افزایش نسبت عمق، سبب افزایش قابل توجه ظرفیت بیرون کشیدگی (P_u) می‌شود اما تأثیر آن بر تغییر مکان نسبی مهار در لحظه‌ی حداکثر نیرو (d_u/B) ناچیز است. افزایش عرض مهار، ظرفیت بیرون کشیدگی و تغییر مکان نسبی متناظر با لحظه‌ی حداکثر شدن نیرو را افزایش می‌دهد. نتایج پردازش تصویر نشان داد که در مهارهای سطحی، سطح گسیختگی به شکل منحنی است و سطح آزاد خاک را قطع می‌کند؛ در حالی که در مهارهای عمیق ناحیه‌ی گسیختگی شبیه به یک منشور ناقص درون خاک است.

تاریخچه مقاله:

دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۱۳

پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۲۷

کلیدواژه‌ها:

مهار صفحه‌ای بازشونده،

نسبت عمق،

ظرفیت بیرون کشیدگی،

حداکثر تغییر مکان نسبی،

PIV

عهده‌دار مکاتبات: مهرزاد شجاعی

نشانی: ایران، استان تهران، دانشگاه علم و صنعت ایران

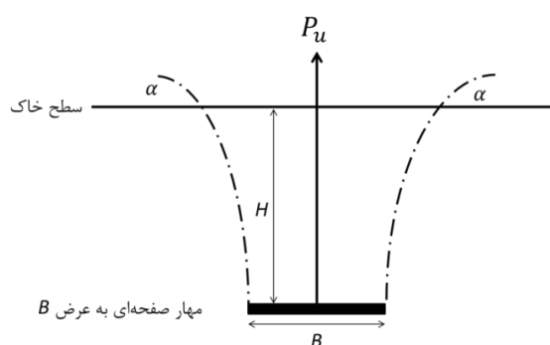
پیام نگار: me_shojaee@alumni.iust.ac.ir

۱- مقدمه

یکی از رایج ترین روش های پایدارسازی، استفاده از مهارها می باشد. مهارها برای پایدارسازی سازه ها به مدت هزاران سال است که مورد استفاده قرار می گیرند و تاکنون مطالعات گسترده ای بر روی آن ها انجام شده است [۱]. نظر به متفاوت بودن شرایط و ساختار این سازه ها، برای هم خوانی بیش تر سازه و مهار، ابداعات زیادی در قسمت های مختلف مهار صورت گرفته است [۲]. بنابراین بر مبنای کاربرد، مهارهای مختلفی ابداع شده است. به طور کلی مهارهای مورد استفاده در خاک را می توان به دو گروه اصلی تقسیم کرد: ۱- مهارهای تزریقی ۲- مهارهای مکانیکی. مهارهای مکانیکی شامل مهارهای مارپیچ، صفحه ای و جای گذاری مستقیم است [۳]. هم چنین گروه سومی از مهارها نیز وجود دارند که ترکیبی از مهارهای تزریقی و مکانیکی می باشند [۴-۸].

مهارهای صفحه ای از جمله مهارهای مکانیکی هستند که شامل صفحات فولادی، صفحات بتنی پیش ساخته، صفحات بتن ریزی شده و ... در شکل های مربعی، دایره ای، نواری یا ترکیب نوارها ساخته می شوند. مهارهای صفحه ای شامل یک المان سازه ای در داخل خاک و یک میل گرد یا کابل برای انتقال بار سازه به مهار هستند [۹]. این مهارها می توانند به صورت افقی، مایل و قائم طراحی و اجرا شوند. از جمله کاربردهای مهارهای صفحه ای می توان به تثبیت پی ها و دیوارهای حائل، پایدارسازی مخازن، سکوهای شناور، خطوط لوله مدفون در بستر دریا و پایدارسازی سازه های دریایی در برابر نیروی امواج اشاره کرد [۳]. مهارهای صفحه ای افقی در ساخت پی های تحت نیروی بالا برنده کاربرد دارند. موریس^۱ آزمایش های متعددی بر روی مهارهای صفحه ای افقی دایره ای شکل سطحی با

نسبت عمق های مختلف انجام داد و مشاهده کرد که با افزایش نسبت عمق ظرفیت بیرون کشیدگی مهار افزایش می یابد. مطالعات وی نشان داد که در مهارهای سطحی، سطوح گسیختگی خاک از لبه ی مهار آغاز می شود و تا سطح آزاد خاک ادامه می یابد [۱۰]. مطابق شکل ۱، اگر این مهار در عمقی نسبتاً کم قرار گیرد، سطح گسیختگی سطح زمین را قطع می کند. در این شکل زاویه ی α برای خاک های رسی نرم و ماسه سست در حدود ۹۰ درجه و برای خاک های رسی سفت و ماسه ای متراکم کم تر از ۴۵ درجه است [۱۱].



شکل ۱- مهار افقی سطحی [۱۱]

ظرفیت بیرون کشیدگی نهایی از جمع وزن خاک داخل ناحیه ی گسیختگی و مقاومت برشی بسیج شده در سطح گسیختگی به دست می آید [۱۰ و ۱۱]. این مسئله لزوم مشاهده ی دقیق سطح گسیختگی خاک را نشان می دهد. میرهوف^۲ و آدامز^۳ رابطه ای نیمه تحلیلی برای تخمین ظرفیت بیرون کشیدگی نهایی در مهارهای نواری، مستطیلی و دایره ای ارائه نمودند. آن ها مقدار زاویه ی بین سطح زمین و سطح گسیختگی را وابسته به دانسیته ی نسبی خاک و زاویه ی اصطکاک داخلی آن دانستند [۱۲]. موری^۴ و گدیز^۵ مجموعه ای از آزمایش های بیرون کشیدگی بر روی مهارهای دایره ای،

¹ Mors

² Meyerhof

³ Adams

⁴ Murray

⁵ Geddes

مهار قرار گرفته در خاک را تا ۴۵۰٪ افزایش دهد [۱۶]. تغییر در ساختار مهارها می‌تواند منجر به تغییر در رفتار مهار، تامین ویژگی‌های مطلوب خاص هر پروژه و همچنین کاهش معایب یک سیستم متداول شود [۱۷ و ۱۸]. در مقاله‌ی حاضر با تغییر در ساختار متداول مهار صفحه‌ای، یک مهار نوین ابداع شده و در ادامه رفتار آن مورد بررسی قرار گرفته است. این مهار، موسوم به "مهار صفحه‌ای باز شونده" از یک میله و یک جفت پره‌ی بازشونده تشکیل شده است که بر خلاف سایر مهارهای صفحه‌ای، بدون خاک‌برداری در زمین قرار می‌گیرد و پس از قرارگیری در عمق مورد نظر مکانیزم باز شدن پره‌ها فعال شده و در اثر بیرون کشیدگی، سطح باربر مهار تا رسیدن به یک مقدار مشخص افزایش می‌یابد. از این‌رو دارای مزایای متعددی از جمله سهولت و کاهش زمان اجرا، کاهش نیروی انسانی و متعاقب آن کاهش خطاهای انسانی، امکان نظارت کامل تر و ساده تر است. در این مطالعه به بررسی تاثیر پارامترهای مهمی از جمله عرض پره‌ها (B) و عمق قرارگیری مهار (H) بر رفتار مهار مذکور شامل رابطه‌ی نیروی بیرون کشیدگی - تغییر مکان مهار، حداکثر نیروی بیرون کشیدگی و تغییر مکان متناظر با آن توسط انجام آزمایش بیرون کشیدگی پرداخته شده است. در گام بعدی به کمک تکنیک پردازش تصویر، تغییر مکان میدان خاک و شکل تقریبی سطح گسیختگی مورد مطالعه قرار گرفته و شکل گسیختگی مشاهده شده است.

۲- روش تحقیق

۲-۱- مقدمه

این مطالعه در صدد بررسی تاثیر پارامترهای مهم شناخته شده تاکنون بر رفتار مهار صفحه‌ای بازشونده می‌باشد. این پارامترها عبارتند از: عمق قرارگیری مهار (H) و عرض مهار (B). پس از آن، حرکت مهار در خاک و چگونگی

مستطیلی و نواری با اندازه‌های متفاوت در خاک ماسه‌ای با دانسیته‌های مختلف انجام دادند و گزارش نمودند که در مهارهای مستطیلی و دایره‌ای با افزایش نسبت عمق (نسبت عمق مهار به عرض آن) و نسبت شکل (طول مهار مستطیلی به عرض آن)، ظرفیت بیرون کشیدگی مهار و تغییر مکان متناظر با آن افزایش می‌یابد. همچنین آن‌ها بیان کردند که در خاک ماسه‌ای متراکم افزایش اصطکاک مهار با خاک نسبت به مهار صیقلی شده، سبب افزایش ظرفیت بیرون کشیدگی مهار شده است. آن‌ها همچنین مشاهده نمودند که افزایش تراکم خاک سبب افزایش قابل توجه ظرفیت بیرون کشیدگی مهار می‌شود [۱۳]. ایلامپاروتی^۱ و همکارانش یک مطالعه‌ی آزمایشگاهی بر روی رفتار مهار صفحه‌ای دایره‌ای با اندازه‌ی نسبتاً بزرگ قرار گرفته در خاک ماسه‌ای با تراکم کم، متوسط و زیاد انجام دادند و مشاهده کردند که عرض مهار، نسبت عمق و تراکم خاک تاثیر قابل توجهی بر ظرفیت بیرون کشیدگی مهار دارند. همچنین، ایلامپاروتی و همکارانش با توجه به نمودار نیروی بیرون کشیدگی - تغییر مکان مهار، مهارها را به دو دسته‌ی سطحی و عمیق تقسیم کردند [۱۴]. باتاچاری^۲ و کومار^۳ به بررسی ظرفیت بیرون کشیدگی مهار صفحه‌ای مورب و افقی مدفون در ماسه با استفاده از روش تحلیلی پرداختند. نتایج نشان داد که با افزایش شیب افقی صفحه، مقاومت بیرون کشیدگی به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد. به علاوه تاثیر اصطکاک خاک و صفحه بر مقاومت بیرون کشیدگی قائم قابل ملاحظه بوده ولی برای مهار افقی اندک بوده است [۱۵]. چوداری^۴ و همکاران به بررسی رفتار مهار صفحه‌ای افقی قرار گرفته در خاک مسلح شده با ژئوتکستایل و ژئوسل پرداختند. نتایج ارائه شده نشان داد که افزایش عمق قرارگیری و عرض مهار سبب افزایش ظرفیت بیرون کشیدگی آن می‌شود. به علاوه، استفاده از ژئوتکستایل و ژئوسل در تسلیح خاک می‌تواند ظرفیت بیرون کشیدگی

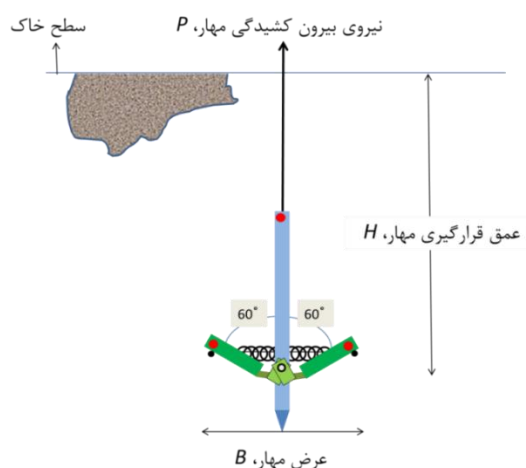
¹ Ilamparuthi

² Bhattachary

³ Kumar

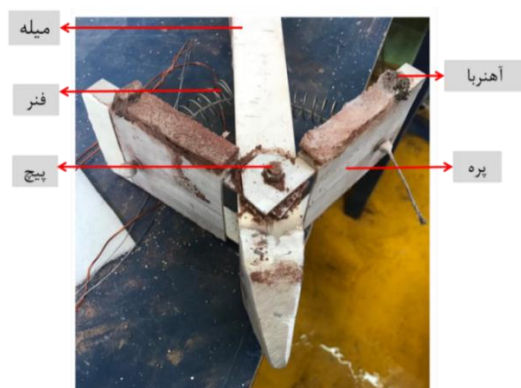
⁴ Choudhary

روی مهار صفحه‌ای بازشونده در این مطالعه، زاویه‌ی بین پره و میله‌ی مهار ۶۰ درجه بوده و حداکثر عرض بازشدگی مهار با B نشان داده و برابر با بزرگترین فاصله‌ی افقی بین دو پره است. همچنین عمق قرارگیری مهار با H نشان داده شده و فاصله‌ی قائم بین پیچ مهار تا سطح خاک می‌باشد.



شکل ۳- توصیف عرض و عمق قرارگیری مهار

شکل ۴، تصویری از مهار صفحه‌ای بازشونده را نشان می‌دهد. مطابق شکل، میله و پره‌ها از جنس آلومینیوم بوده و پیچ، مهره، فنر و کابل از جنس فولاد می‌باشند.



شکل ۴- تصویری از مهار صفحه‌ای بازشونده

الف) خاک

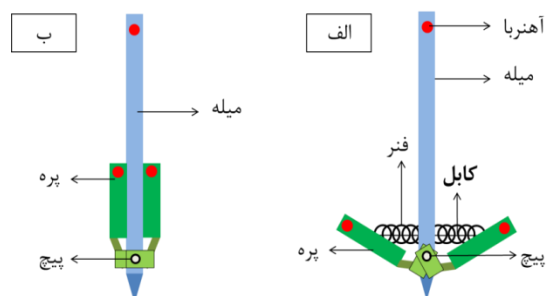
در این مطالعه از خاک ماسه‌ای شماره‌ی ۱۶۱ فیروزکوه استفاده شده است که برخی از مهم‌ترین خصوصیات آن در

شکل‌گیری سطوح گسیختگی به کمک پردازش تصویر به روش PIV مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۲-۲- ابزار و مصالح

الف) مهار صفحه‌ای بازشونده

مهار صفحه‌ای بازشونده ترکیبی از مهارهای صفحه‌ای و جای‌گذاری مستقیم می‌باشد. شکل ۲، مهار صفحه‌ای بازشونده با یک جفت پره را به صورت شماتیک به تصویر می‌کشد. مطابق با شکل ۲-الف، مهار صفحه‌ای بازشونده از یک میله، یک جفت پره، یک کابل و دو فنر و یک پیچ تشکیل شده است. به منظور ردیابی مهار در حین آزمایش بیرون کشیدگی، سه آهنربا روی میله و دو پره‌ی مهار قرار داده شده است. شکل ۲-ب، مهار صفحه‌ای بازشونده در حالت قفل شده را نشان می‌دهد. در این حالت فنر بین پره و میله جمع شده و پره‌ها به میله نزدیک می‌شوند و اصطلاحاً مهار قفل می‌گردد. مهار قفل شده می‌تواند بدون نیاز به حفاری به داخل زمین رانده یا کوبیده شود. پس از قرارگیری مهار در عمق مورد نظر، می‌توان قفل مهار را باز نمود. با باز شدن قفل، فنرها رها شده و سبب باز شدن اولیه‌ی مهار می‌شوند. در ادامه، در اثر اعمال بار بیرون کشیدگی، مهار تدریجاً باز می‌شود. به منظور کنترل میزان بازشدگی، یک کابل با طول مشخص دو پره را بهم متصل و از بازشدگی بیش از اندازه جلوگیری می‌کند.



شکل ۲- تصویر شماتیک مهار صفحه‌ای بازشونده

الف- باز شده؛ ب- قفل شده

مطابق با شکل ۳، در تمام آزمایش‌های انجام شده بر

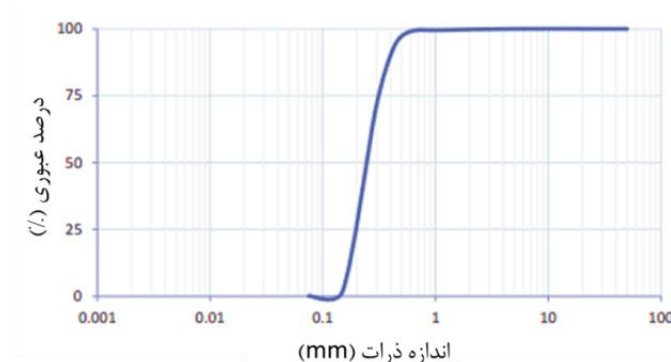
جدول ۱ بیان شده است.

می‌دهد.

شکل ۵، منحنی دانه‌بندی خاک مورد نظر را نشان

جدول ۱- خصوصیات خاک ماسه‌ای شماره‌ی ۱۶۱ فیروزکوه

ویژگی‌های خاک	خاک ماسه‌ای فیروزکوه- شماره‌ی ۱۶۱
اندازه‌ی موثر (d_{10})	۰/۱۷ میلی‌متر
d_{30}	۰/۲۷ میلی‌متر
d_{50}	۰/۳۸ میلی‌متر
d_{60}	۰/۴۴ میلی‌متر
ضریب یکنواختی (C_u)	۲/۵۸
ضریب انحنا (C_c)	۰/۹۷
نسبت تخلخل حداقل (e_{min})	۰/۶۳۷
نسبت تخلخل حداکثر (e_{max})	۰/۸۸۶
نسبت تخلخل (e)	۰/۶۸
دانسیته‌ی نسبی	٪۷۵
وزن مخصوص خشک (γ_d)	۱۵/۳۴ کیلونیوتن بر مترمکعب
زاویه‌ی اصطکاک داخلی خاک (ϕ)	۳۲°
زاویه‌ی اتساع خاک (φ)	۱۴°



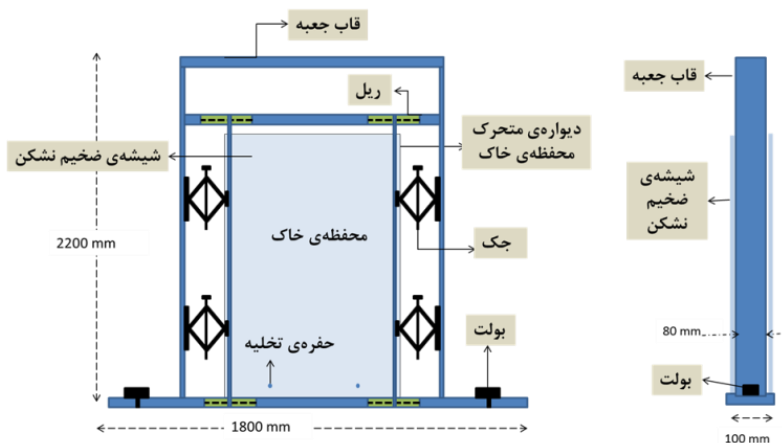
شکل ۵- منحنی دانه‌بندی خاک ماسه‌ای شماره‌ی ۱۶۱ فیروزکوه

ب- جعبه‌ی کرنش مسطح

به منظور مطالعه‌ی دقیق رفتار مهار صفحه‌ای بازشونده، یک جعبه‌ی آزمایشگاهی موسوم به جعبه‌ی کرنش مسطح ابداع و ساخته شد. شکل ۶ تصویر شماتیک جعبه‌ی آزمایش را نشان می‌دهد. جعبه به کمک چهار بولت به زمین متصل شده است و در حین آزمایش امکان جابه‌جایی

ندارد. عرض این جعبه ۱۸۰۰ میلی‌متر، ارتفاع آن ۲۲۰۰ میلی‌متر و بعد داخلی آن ۱۰۰ میلی‌متر می‌باشد. همان‌گونه که مشخص است بعد داخلی جعبه نسبت به سایر ابعاد آن کوچک است. بعد داخلی جعبه برابر با بعد داخلی مهار مورد مطالعه است. به کمک این مساله می‌توان تمام حرکات مهار در طی آزمایش بیرون کشیدگی را مشاهده نمود.

شرایط کرنش مسطح برقرار شده است. در دو طرف جعبه از چهار جک استفاده شده است. با باز و بسته کردن جک ها می توان عرض محفظه ی نگه داری از خاک را افزایش یا کاهش داد. حرکت ستون های جانبی محفظه به کمک ریل های قرار گرفته در قاب جعبه امکان پذیر است. هم چنین به کمک جک ها می توان شرایط مختلف تنش همه جانبه ی اولیه را نیز مدل نمود. در قسمت پایینی جعبه چهار سوراخ در شیشه ها برای امکان تخلیه ی سریع و آسان خاک از محفظه تعبیه شده است.



شکل ۶- تصویر شماتیک جعبه ی آزمایش

KA300 استفاده شد. این خط کش مناسب برای اندازه گیری طول های بلند تا ۳۲۰ میلی متر است و دقت آن ۰/۲۵ میلی متر می باشد.

برای مشاهده و ضبط تغییر مکان و نیروی برداشت شده توسط خط کش دیجیتال و لودسل دیتالاگر دوکاناله ی ساخته شده در شرکت ایرانی تیکا مدل TM-1022 استفاده شده است.

جهت عکس برداری در حین انجام آزمایش بیرون کشیدگی، از دوربین Canon مدل IXUS 185 استفاده شده است. این دوربین دارای رزولوشن HD و دقت موثر

بدنه ی جعبه از یک قاب فولادی و دو طرف وسیع تر جعبه از شیشه ی نشکن ضخیم به ضخامت ۱۰ میلی متر تشکیل شده است. با توجه به ضخیم بودن شیشه ها، می توان آن ها را صلب در نظر گرفت. در نتیجه از تغییر شکل شیشه به دلیل ناچیز بودن صرف نظر می شود. در نتیجه کرنش عمود بر صفحه صفر می شود. به علاوه به منظور به حداقل رساندن اصطکاک بین خاک درون محفظه ی نگه دارنده و شیشه از گریس سیلیکونی استفاده شده است. در نتیجه تنش برشی نیز در صفحه صفر می شود. در نهایت با توجه به صفر بودن کرنش عمود بر صفحه و تنش برشی در صفحه، می توان ادعا نمود که

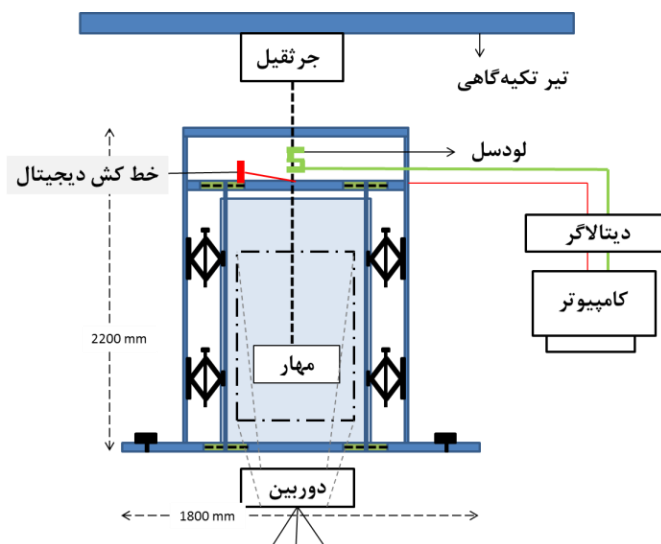
ت) ابزار اندازه گیری و ثبت داده

به منظور اندازه گیری نیروی بیرون کشیدگی مهار یا ظرفیت بیرون کشیدگی آن در این سری از مطالعات آزمایشگاهی از یک لودسل کششی S شکل مدل SS300 با ظرفیت یک تن ساخته شده توسط شرکت SEWHA استفاده شده است. این لودسل می تواند در هر دو حالت فشاری و کششی مورد استفاده قرار گیرد که در مطالعات انجام گرفته در این تحقیق از حالت کششی آن استفاده شده است.

به منظور بررسی میزان تغییر مکان مهار صفحه ای بازشونده، از خط کش دیجیتال شرکت چینی SINO سری

مهار صفحه‌ای بازشونده، جعبه‌ی کرنش مسطح، خاک ماسه‌ای و ابزار ثبت و ضبط اطلاعات در شکل ۷ نشان داده شده است.

۲۰/۵ مگاپیکسل می‌باشد. دوربین بر روی یک سه‌پایه‌ی ثابت با ارتفاع ۵۰۰ میلی‌متر و در فاصله‌ی ۷۰۰ میلی‌متری از شیشه‌ی جعبه‌ی آزمایش قرار گرفته است. در ادامه تصویر شماتیکی از سامانه‌ی آزمایش شامل



شکل ۷- تصویر شماتیک سامانه‌ی آزمایشگاهی

آهن‌رباهای ثابت شده رو مهار قرار می‌گیرند. در این صورت با جابه‌جا شدن مهار در خاک، آهن‌رباها بر روی شیشه حرکت می‌کنند و موقعیت مهار را نشان می‌دهند. شکل ۸، تصویر آهن‌رباهای قرار گرفته روی شیشه متناظر با آهن‌رباهای نصب شده بر روی مهار را نشان می‌دهد.



شکل ۸- تصویر آهن‌رباهای قرار گرفته روی شیشه متناظر با آهن‌رباهای نصب شده بر روی مهار

۲-۳- روند انجام آزمایش

به منظور انجام آزمایش در گام اول مهار قفل می‌شود. سپس لودسل و خط‌کش دیجیتال به مهار متصل و مهار قفل شده به صورت دقیق در وسط جعبه‌ی آزمایش قرار می‌گیرد.

در گام دوم، سوراخ‌های تخلیه مسدود شده و خاک‌ریزی به روش بارش خشک و با کنترل تراکم آغاز می‌شود. برای دستیابی به دانسیته‌ی نسبی ۷۵٪، وزن و حجم خاک مورد نیاز برای ساخت یک لایه‌ی ۱۱۰ میلی‌متری محاسبه، اندازه‌گیری و جدا می‌شود. سپس خاک جدا شده در یک مخزن کوچک تر قرار گرفته و به کمک یک قیف از ارتفاع مشخص رها می‌شود. پس از رسیدن تراز خاک اطراف مهار به ارتفاع ۱۱۰ میلی‌متر، یک لایه‌ی خاک رنگی به ارتفاع ۱۰ میلی‌متر ریخته می‌شود. این کار تا رسیدن ارتفاع خاک به تراز مطلوب ادامه می‌شود.

در گام سوم، به منظور کنترل هرچه بهتر موقعیت حرکت مهار در طی آزمایش، سه آهن‌ربا بر روی شیشه متناظر با

جابه جایی لحظه ای سیالات ابداع شد [۱۹]. با توجه به این که تغییر شکل های ایجاد شده به دلیل لغزش، زلزله، نفوذ شمع در خاک و... را می توان همانند حرکات آهسته ی سیالات در نظر گرفت، می توان از روش PIV برای مطالعه ی تغییر شکل های خاک در مهندسی ژئوتکنیک بهره جست [۱۹]. می توان به اختصار بیان نمود که در مطالعه ی حاضر، سیستم PIV از سه بخش تشکیل شده است: ذرات ردیاب (خاک رنگی و آهن رباها)، سیستم عکس برداری و سیستم پردازش تصویر (مقایسه ی تغییر مکان های دو عکس متوالی) [۲۰].

۲-۵- برنامه ی آزمایش ها

در این مطالعه سه سری آزمایش بیرون کشیدگی بر روی مهار صفحه ای بازشونده با عرض های ۱۲۰، ۱۵۰ و ۱۸۰ میلی متر و نسبت عمق ($R=H/B$) معادل با سه، پنج و هفت مطابق با جدول ۲ انجام شده است.

پس از آن لودسل، خط کش دیجیتالی، دیتالاگر، کامپیوتر و دوربین روشن می شوند و چک لیست نهایی کنترل می گردد. در گام چهارم، ضامن قفل مهار کشیده شده و مهار به مقدار اولیه باز می شود. اعمال بار با استفاده از جرثقیل و قرقره ی سقفی و اعمال تغییر شکل رو به بالا صورت پذیرفته است. کلیه ی آزمایش ها با توجه به اعمال نرخ ثابت تغییر شکل رو به بالا به محور مهار به صورت کنترل تغییر شکل (کنترل کرنش) انجام شده است. از محاسن آزمایش به این روش امکان مشاهده ی کامل نمودار رفتاری مهار، حتی پس از تجربه ی حداکثر نیروی بیرون کشیدگی می باشد. در حین آزمایش، مقادیر نیرو و تغییر مکان بر روی رایانه قابل ملاحظه است و از هر ثانیه از آزمایش دو فریم توسط دوربین برداشت می شود و در حافظه ی آن ذخیره می گردد.

۲-۴- پردازش تصویر به روش PIV

PIV^۱ یک تکنیک پردازش تصویر است که برای مشاهده ی

جدول ۲- برنامه ی آزمایش ها

نام آزمایش	نسبت عمق (R)	عرض مهار (B)	سری آزمایش
B12R3	3	120	سری ۱
B15R3		150	
B18R3		180	
B12R5	5	120	سری ۲
B15R5		150	
B18R5		180	
B12R7	7	120	سری ۳
B15R7		150	
B18R7		180	

۳- تحلیل نتایج آزمایش ها

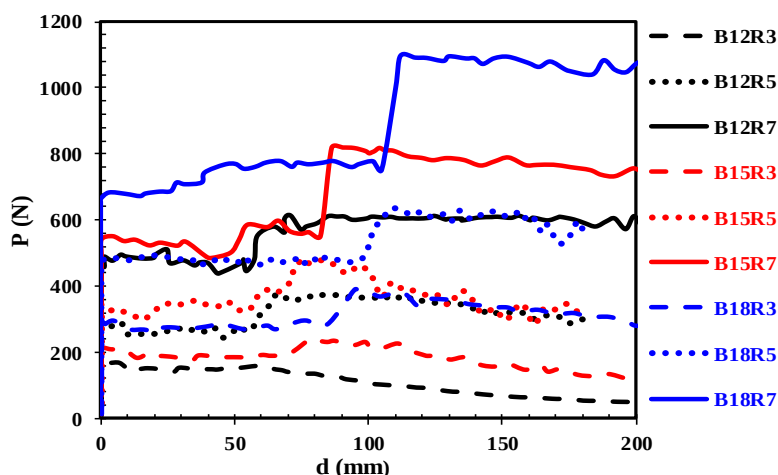
۳-۱ بررسی نمودار نیرو- تغییر مکان

شکل ۹ نشان می دهد که شکل عمومی نمودار نیرو- تغییر مکان برای تمامی آزمایش های ارائه شده تقریباً مشابه و در دو تیپ مختلف قابل دسته بندی است. براساس نسبت

عمق مهار (R)- که به صورت نسبت عمق (H) به عرض مهار (B) تعریف می شود ($R=H/B$)- می توان رفتار مهار را به دو صورت مهار سطحی و مهار عمیق تعریف نمود. در مهارهای سطحی (نسبت عمق های کوچک) یک اوج واضح در نمودار نیرو- تغییر مکان مشاهده می گردد و پس از آن، با

^۱ Particle Image Velocimetry

افزایش تغییر مکان، نیرو به شدت کاهش می‌یابد. در حالی که در مهارهای عمیق (نسبت عمق‌های زیاد)، پس از رسیدن نیروی بیرون کشیدگی به حداکثر مقدار خود، با افزایش تغییر مکان کاهش چشم‌گیری در نیرو مشاهده نمی‌شود.



شکل ۹- نمودار نیرو - تغییر مکان مهار صفحه‌ای بازشونده در آزمایش بیرون کشیدگی

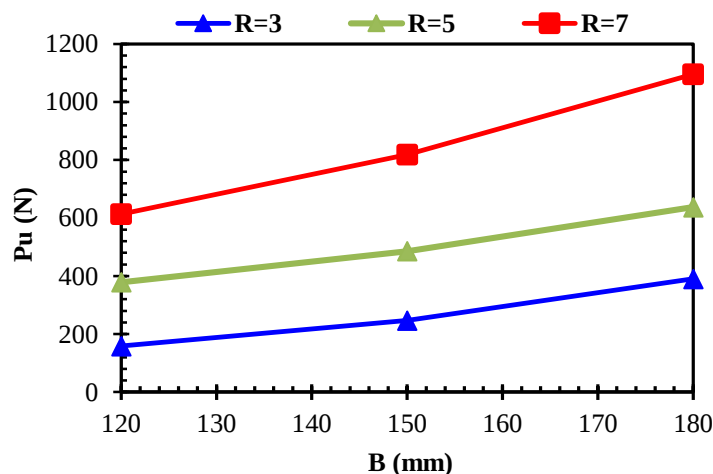
۲-۳ پارامترهای اساسی: ظرفیت بیرون کشیدگی و تغییر

مکان نهایی نسبی

الف- ظرفیت بیرون کشیدگی

در این مطالعه به حداکثر بار تحمل شده توسط مهار صفحه‌ای بازشونده، ظرفیت بیرون کشیدگی گفته شده و با P_u نشان داده می‌شود. شکل ۱۰، تغییرات ظرفیت بیرون کشیدگی با نسبت عمق (R) و عرض مهار (B) را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که در یک عرض مشخص با

افزایش نسبت عمق (R)، ظرفیت بیرون کشیدگی (P_u) افزایش می‌یابد. این مساله در مهارهای سطحی به دلیل افزایش مقدار خاک درون سطح گسیختگی و در مهارهای عمیق به دلیل افزایش نیروی برشی بسیج شده در سطوح گسیختگی در اثر افزایش عمق قرارگیری مهار است. علاوه بر این در نسبت عمق‌های یکسان، افزایش عرض مهار سبب افزایش ظرفیت بیرون کشیدگی می‌شود. این مساله به دلیل افزایش سطح باربر و افزایش مقدار خاک درون ناحیه‌ی گسیختگی می‌باشد.

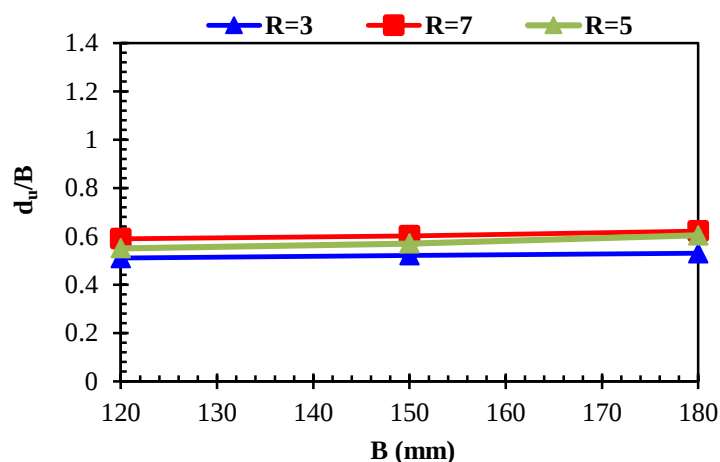


شکل ۱۰- نمودار ظرفیت بیرون کشیدگی براساس نسبت عمق برای عرض‌های مختلف مهار صفحه‌ای بازشونده

ب- تغییر مکان نهایی نسبی (d_u/B)

در این مطالعه، تغییر مکان متناظر با حداکثر نیروی بیرون کشیدگی با d_u نمایش داده شده و "تغییر مکان نهایی" نامیده می‌شود. به منظور مقایسه‌ی بهتر تغییر مکان نهایی مشاهده شده در هر آزمایش با سایر آزمایش‌ها، از پارامتر بدون بعد تغییر مکان استفاده می‌شود. پارامتر تغییر مکان نهایی نسبی (d_u/B) عبارت است از نسبت تغییر مکان

نهایی (d_u) به عرض مهار (B). شکل ۱۱ نشان می‌دهد که تغییرات تغییر مکان نهایی نسبی با افزایش نسبت عمق ناچیز است. به عبارت دیگر پارامتر تغییر مکان نهایی نسبی همواره عددی در حدود ۰/۵ تا ۰/۶ است. به عبارت دیگر پیش‌نیاز مهار صفحه‌ای بازشونده برای رسیدن به حداکثر ظرفیت باربری، باز شدن کامل پره‌ها می‌باشد که این مساله خود در تغییر مکانی در حدود ۰/۵۵ عرض مهار رخ می‌دهد.

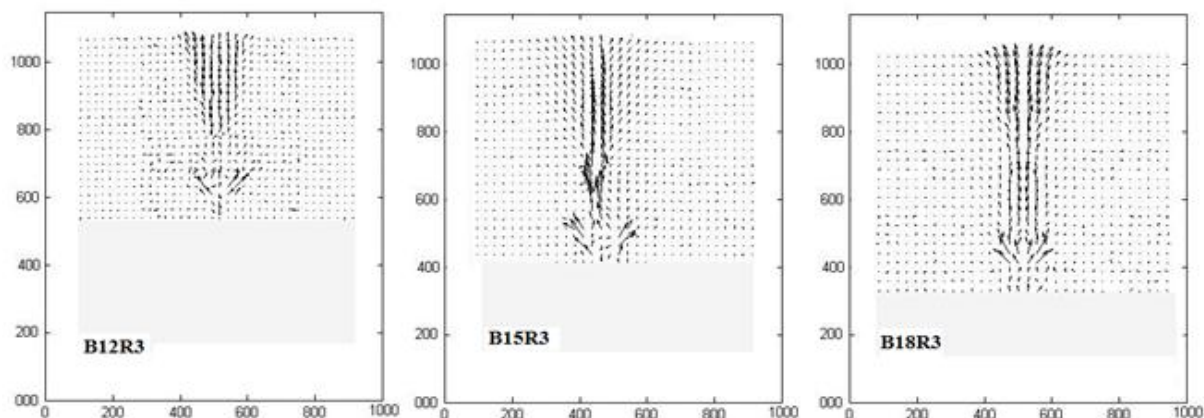


شکل ۱۱- نمودار تغییر مکان نسبی براساس نسبت عمق برای عرض‌های مختلف مهار صفحه‌ای بازشونده

۳-۳- پردازش تصویر

در این بخش به اختصار تنها میدان جابه‌جایی خاک در لحظه‌ی حداکثر شدن نیروی بیرون کشیدگی برای مهارها با

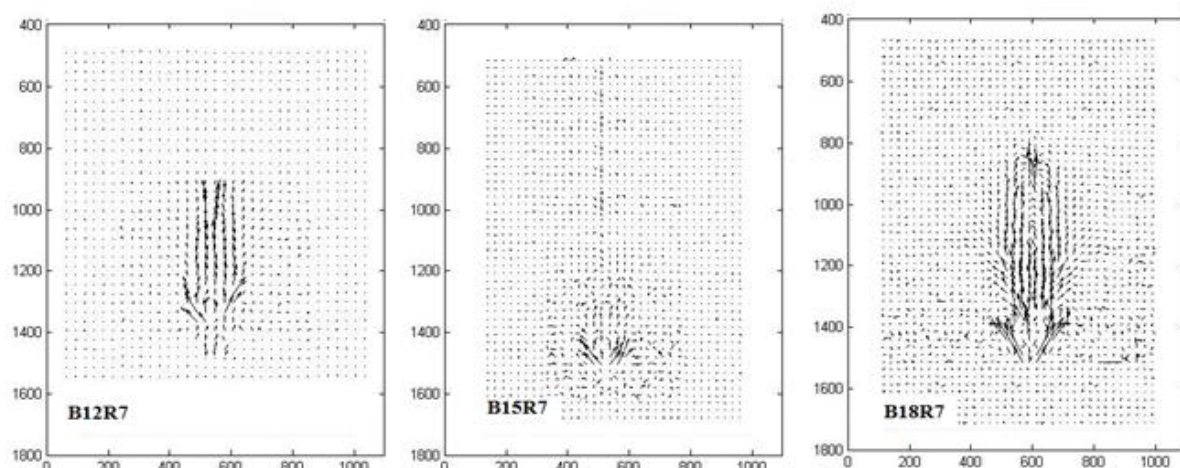
عرض مختلف (۱۲۰، ۱۵۰ و ۱۸۰ میلی‌متر) با نسبت عمق معادل با سه و هفت ترسیم شده است. مطابق با شکل ۱۲، مشاهده می‌شود که برای مهارهای سطحی ($R=3$) سطوح گسیختگی خاک، سطح آزاد خاک را قطع می‌کنند.



شکل ۱۲- میدان جابه‌جایی خاک در لحظه‌ی حداکثر شدن نیروی بیرون کشیدگی مهار صفحه‌ای بازشونده با نسبت عمق معادل با سه

عمق خاک ایجاد می‌کنند. می‌توان ملاحظه نمود که نتایج مشاهدات در تطابق با مشاهدات سایر محققین می‌باشد [۲۱ و ۲۲].

مطابق با شکل ۱۳، بر خلاف مهارهای سطحی، در مهارهای عمیق ($R=7$) سطوح گسیختگی تا سطح خاک امتداد نیافته و در ارتفاعی در حدود سه برابر عرض مهار به یکدیگر می‌رسند و یک سطح گسیختگی مانند تونل را در



شکل ۱۳- میدان جابه‌جایی خاک در لحظه‌ی حداکثر شدن نیروی بیرون کشیدگی مهار صفحه‌ای بازشونده با نسبت عمق معادل با هفت

در تمامی مهارهای صفحه‌ای بازشونده مشاهده می‌گردد که تغییر مکان متناظر با حداکثر نیروی بیرون کشیدگی در بازه‌ی ۰/۵ تا ۰/۶ برابر عرض مهار قرار می‌گیرد. به عبارت دیگر تغییر مکان نهایی نسبی در این مطالعه عددی در حدود ۰/۵۵ مشاهده شده است که این عدد توسط سایر محققین برای مهارهای صفحه‌ای رایج عددی در حدود ۰/۱ تا ۰/۲ گزارش شده بود [۱۲ و ۲۵].

مراجع

- [1] T.H. Hanna, *Foundations in tension*. McGraw-Hill Book (1982).
- [2] T. Deb, S.K. Pal, Comparative study on uplift behavior of single belled anchors in homogeneous and layered sand bed and multiple regression analyses, *International Journal of Civil Engineering and Technology*, 9(1) (2018), 90-105.

۴- نتایج

خلاصه‌ای از تمام یافته‌های حاصل از مطالعات صورت گرفته در این پژوهش در ادامه بیان شده است.

در مطالعه‌ی حاضر، رفتار مهار صفحه‌ای بازشونده با توجه به نمودار نیروی بیرون کشیدگی - تغییر مکان و تحلیل‌های PIV به دو گروه سطحی و عمیق دسته‌بندی شد. نمودار نیروی بیرون کشیدگی - تغییر مکان نشان می‌دهد که در مهارهای سطحی، نیروی بیرون کشیدگی پس از رسیدن به حداکثر مقدار خود به سرعت افت می‌کند؛ در حالی که در مهارهای عمیق، نیروی بیرون کشیدگی پس از رسیدن به حداکثر مقدار خود تقریباً ثابت باقی می‌ماند.

مطابق با یافته‌های سایر محققین، نمودار ظرفیت بیرون کشیدگی - نسبت عمق نشان می‌دهد که در کلیه‌ی مهارهای صفحه‌ای بازشونده، با افزایش نسبت عمق، ظرفیت بیرون کشیدگی مهار به شدت افزایش می‌یابد [۲۳ و ۲۴].

- [3] B.M. Das, S.K. Shukla, *Earth anchors*. J. Ross Publishing (2013).
- [4] Y. Bian, T.C. Hutchinson, D. Wilson, D. Laefer, S. Brandenburg, Experimental investigation of grouted helical piers for use in foundation rehabilitation, *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, **134**(9) (2008), 1280-1289.
- [5] D.B Raaf, *Method and apparatus for installing a helical pier with pressurized grouting*. (1996) Google Patents.
- [6] R.A Vickars, S.P. Clemence, Performance of helical piles with grouted shafts, *New technological and design developments in deep foundations* (2000), 327-341.
- [7] M.-E. Mahmoudi-Mehrizi, A. Ghanbari, M. Sabermahani, Investigating the Effect of Grout on Improving the Performance of Helical Anchors Used in Wall Stabilization. *Transportation Infrastructure Geotechnology*, (2020), 1-22.
- [8] D.F. Laefer, N.E. Menninger, W.E. Hernandez. Grouting patterns and possibilities with helical piers. in Presented at Underground Construction in Urban Environments: Specialty Seminar, *ASCE Metropolitan Section Geotechnical Group and the Geo-Institute of ASCE, May 11-12, (2005), New York City*. American Society of Civil Engineering (ASCE).
- A. Ghaly, A. Hanna, M. Hanna, Uplift behavior of screw anchors in sand. II: hydrostatic and flow conditions. *Journal of geotechnical engineering*, **117**(5) (1991), 794-808.
- [9] H. Mors, *Das verhalten von mastgruendungen bei zugbeanspruchung*. (1958), Verlag nicht ermittelbar.
- A. Balla, *The resistance to breaking-out of mushroom foundations for pylons*. in *Proc. 5th Int. Conf. on SMFE* (1961).
- [10] G. Meyerhof, J. Adams, The ultimate uplift capacity of foundations. *Canadian geotechnical journal*, **5**(4) (1968), 225-244.
- [11] E. Murray, J.D. Geddes, Uplift of anchor plates in sand. *Journal of Geotechnical Engineering*, **113**(3) (1987), 202-215.
- [12] K. Ilamparuthi, E. Dickin, K. Muthukrisnaiah, Experimental investigation of the uplift behaviour of circular plate anchors embedded in sand. *Canadian Geotechnical Journal*, **39**(3) (2002), 648-664.
- [13] P. Bhattacharya, J. Kumar, Pullout capacity of inclined plate anchors embedded in sand. *Canadian geotechnical journal*, **51**(11) (2014), 1365-1370.
- A. Choudhary, B. Pandit, G. Sivakumar Babu, Experimental and numerical study on square anchor plate groups in geogrid reinforced sand. *Geosynthetics International*, **26**(6) (2019), 657-671.
- [14] M. Jalali Moghadam, N. Dastaran, A. Zad, (2022). Introducing expandable mechanical plate anchors for onshore and offshore anchoring. *Marine Georesources & Geotechnology*, **40**(3) (2022) 329-348.
- [15] S. Abrifam, A. Zad, M. Yazdi, J. Nazariafshar, Experimental evaluation of the effect of pullout velocity on the behavior of multi-plate anchors. *Marine Georesources & Geotechnology*, (2024), 1-17.
- [16] D. White, W. Take, M. Bolton, Soil deformation measurement using particle image velocimetry (PIV) and photogrammetry. *Geotechnique*, **53**(7) (2003), 619-631.
- [17] X. Duan, Y. Wang, X. Yuan, State-of-the-art Review of Particle Image Velocimetry (PIV) in Geotechnical Engineering. *DEStech Transactions on Computer Science and Engineering*, (2018).
- [18] J. Liu, M. Liu, Z. Zhu, Sand deformation around an uplift plate anchor. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **138**(6) (2011), 728-737.
- [19] K. Tagaya, R.F. Scorr, H. Aboshi, Pullout resistance of buried anchor in sand. *Soils and Foundations*, **28**(3) (1988), 114-130.
- [20] H. Niroumand, K.A. Kassim, Experimental study of horizontal anchor plates in cohesion less soils. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, **15** (2010), 609-620.

- [21] E. Badakhshan, A. Noorzad, S. Zameni, An updating void ratio model for large deformation simulation of geogrid-granular strip anchors plates. *Computers and Geotechnics*, **94** (2018), 134-149.
- [22] L. Mariupol'skii, The bearing capacity of anchor foundations. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, **2**(1) (1965), 26-32.

