

[Determination of Soil-Anchor Interaction Parameters for Numerical Modeling Based on Field Data]

N. Yeganeh¹, A. Akhtarpour², J. Bolouri Bazaz³

1- M.Sc. in Civil Engineering-Geotechnical Major, Ferdowsi University of Mashhad

2- Assistant Professor of Engineering Faculty, Department of Civil Engineering, Ferdowsi University of Mashhad

3- Associate Professor of Engineering Faculty, Department of Civil Engineering, Ferdowsi University of Mashhad

bolouri@um.ac.ir

Abstract:

The anchored walls consist of nongravity cantilevered walls with one or more levels of ground anchors. Nongravity cantilevered walls employ either discrete (e.g., soldier beam) or continuous (e.g., sheet-pile) vertical elements that are either driven or drilled to depths below the finished excavation grade. For nongravity cantilevered walls, support is provided through the shear and bending stiffness of the vertical wall elements and passive resistance from the soil below the finished excavation level. Anchored wall support relies on these components as well as lateral resistance provided by the ground anchors to resist horizontal pressures (e.g., earth, water, seismic, etc) acting on the wall. A prestressed grouted ground anchor is a structural element installed in soil or rock that is utilized to transmit an applied tensile load into the ground. The basic components of a grouted ground anchor include the anchorage, free stressing (unbonded) length, and bond length. It is of note that the anchor bond length should be located behind the critical failure surface. The first use of ground anchors in the US was for temporary support of excavation systems. The use of permanent ground anchors for public sector projects in the US did not become prevalent until the late 1970s and today, represent a common technique for earth retention and slope stabilization. Anchors play a vital role in geotechnical structures such as excavations. The anchor section in soil is generally divided into five areas including reinforcement element, grout, grout and surrounding soil mixture, shear zone and soil media. Most of the common geotechnical software such as PLAXIS utilizes limited parameters in order to model the complex behavior of anchors; contrarily, modeling the soil-anchor interaction by means of FLAC yields conspicuous accuracy due to considering over ten various parameters. The main objective of the present research is to determine the soil-anchor interaction parameters for numerical modeling of anchored walls using FLAC^{2D} software. Fundamentally, the main challenging issue in estimation of the anchor force is to determine the injection area diameter. According to the proposed method, the diameter of the injection area is determined based on the injection pressure, grout volume, porosity and shear zone thickness. It is demonstrated that the diameter of the injection area in soil medium is approximately 40% greater than the drilling diameter; nonetheless, that of the injection area in rock media is equal to the drilling diameter. The other parameters are determined by equalization of rock media formulas for soil media. In order to ensure the validity of the proposed methodology, the pull-out test was numerically simulated in FLAC^{2D}, besides the numerical results have been then verified with anchor tension data in a field excavation project. The results indicate that the ultimate load of the anchor calculated from the numerical model is in fair agreement with equations postulated by many of former researchers. Correspondingly, there is a negligible difference between the displacement value obtained in the numerical simulation and the field pull-out test results. Henceforth, this method can be utilized in numerical modeling of anchored walls in soil media with high precision.

Keywords: Excavation, Numerical modeling, Soil-anchor interaction, Finite difference method, FLAC^{2D}.

تعیین پارامترهای اندرکنشی خاک-مهاری برای مدل‌سازی عددی براساس داده‌های میدانی

نوید یگانه^۱، علی اخترپور^۲، جعفر بلوری بزاز^{۳*}

۱- کارشناس ارشد مهندسی عمران-ژئوتکنیک، دانشگاه فردوسی مشهد

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

۳- دانشیار دانشکده مهندسی، گروه عمران، دانشگاه فردوسی مشهد

bolouri@um.ac.ir

تاریخ پذیرش: [۱۳۹۴/۵/۲۴]

تاریخ دریافت: [۱۳۹۳/۶/۶]

چکیده - مهاری‌ها در سازه‌های ژئوتکنیکی مانند گودبرداری‌ها نقش ویژه‌ای دارند. بطور کلی مقطع مهاری در خاک به پنج ناحیه عنصر مسلح‌کننده، دوغاب، مخلوط دوغاب و خاک اطراف، ناحیه برشی و محیط خاکی تقسیم‌بندی می‌شود. هدف اصلی این پژوهش تعیین پارامترهای اندرکنشی خاک-مهاری برای مدل‌سازی عددی گودبرداری به روش مهارسازی با نرم‌افزار FLAC^{2D} است. اصولاً تعیین قطر ناحیه تزریق چالش اساسی برای برآورد نیروی مهاری است. قطر ناحیه تزریق شده طبق روش پیشنهادی این پژوهش براساس فشار تزریق، حجم دوغاب، پوکی و ضخامت ناحیه برشی تعیین می‌شود. این قطر حدود ۴۰ درصد نسبت به قطر حاصل از حفاری افزایش نشان می‌دهد. این در حالی است که در محیط سنگی قطر ناحیه تزریق برابر قطر حفاری است. سایر پارامترها با معادل‌سازی روابط محیط سنگی برای محیط خاکی تعیین شده‌اند. برای اطمینان از صحت روابط و روش ارائه شده در این پژوهش اقدام به شبیه‌سازی آزمون کشش در نرم‌افزار FLAC شده و با استفاده از نتایج کشش مهار در یک پروژه گودبرداری راست‌آزمایی صورت گرفته است. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که ظرفیت باربری نهایی مهاری محاسبه شده از مدل عددی اختلاف قابل قبولی با رابطه پیشنهادی پژوهشگران دارد. همچنین اختلاف تغییر مکان حاصل از شبیه‌سازی عددی و نتایج کشش مهار در اجرا نیز ناچیز است. بنابراین می‌توان از این شیوه در مدل‌سازی‌های عددی گودبرداری با سیستم مهاری در محیط‌های خاکی با دقت بالا بهره جست.

واژگان کلیدی: گودبرداری، مدل‌سازی عددی، اندرکنش خاک-مهاری، روش تفاضلات محدود، نرم‌افزار FLAC^{2D}.

۱ - مقدمه

سختی برشی و خمشی اجزای قائم دیوار و همچنین نیروی مقاوم ناشی از وجود خاک در زیر سطح تمام شده گودبرداری فراهم می‌شود. علاوه بر آن مقاومت جانبی مهار موجود در خاک برای مقابله با فشارهای افقی مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱]. همواره درستی نتایج نرم‌افزارها ارتباط مستقیمی با صحت پارامترهای تعیین شده و روش مدل‌سازی دارد. بسیاری از نرم‌افزارهای ژئوتکنیکی متداول مانند PLAXIS از تعداد محدودی پارامتر برای مدل‌سازی رفتار

یکی از روش‌های متداول اجرای گودبرداری‌ها، استفاده از سیستم مهاری^۱ با نیروی پس‌کشیدگی است. دیوارهای مهارشده شامل دیوار طره‌ای غیروزی با یک یا چند ردیف مهار است. دیوار طره‌ای غیروزی می‌تواند از اعضای مجزا (منقطع) مانند شمع و یا پیوسته مانند سپری تشکیل شده باشد، به گونه‌ای که این اعضا مقداری تا زیر تراز کف گود ادامه می‌یابند. در این نوع از دیوارها، پایداری به وسیله

کاربردی برای مدل‌سازی مهاری در محیط خاکی به وسیله‌ی نرم‌افزار FLAC است. مبنای اثبات درستی تعریف پارامترها و روش مدل‌سازی این پژوهش تطبیق نتایج مدل عددی آزمایش کشش (بیرون کشیدگی)^۴ با اجرا است.

از نتایج پژوهش‌های پیشین در زمینه مدل‌های آزمایشگاهی و عددی آزمون کشش می‌توان به افزایش ظرفیت رفتار بالابرنده (برکنش)^۵ مهاری به همراه ورق انتهایی با افزایش عمق دفن-شدگی و تراکم خاک تحت آزمون سانتریفوژ^[۸]، اهمیت خصوصیات تغییرشکلی ژئوگریدها در نتایج آزمون کشش و خصوصیات سطح مشترک عنصر مسلح‌کننده و محیط اطراف در شبیه‌سازی عددی این مجموعه [۹] و تاثیرپذیری مقاومت برشی سطح تماس میخ و خاک از تنش قائم، درجه اشباع خاک و شرایط زبری سطح عنصر مسلح‌کننده [۱۰] اشاره نمود.

۲- پروژه مورد مطالعه

پروژه مدنظر برای تحلیل و بررسی، مرکز بین‌المللی مالی اقتصادی مشهد واقع در میدان جانباز، روبروی مجتمع تجاری پروما است. این پروژه با هدف احداث اولین مرکز مالی کشور مجموعاً با زیربنای ۱۲۹۳۱۳ مترمربع در مراحل پایانی اجرا قرار دارد [۱۱].

۳- مشخصات اجرایی مهاری‌ها

به شکل خلاصه مراحل پایدارسازی گود به روش اجرای مهاری شامل حفاری، قرار دادن کابل، تزریق انتها و سپس کشیدن مهار است. در ادامه مشخصات مهارهای اجرا شده در دیواره شمالی گود مجاور برج (ساختمان بتنی ۱۷ طبقه) بیان می‌شود. لازم به ذکر است که در این دیواره از شمع بتنی با قطر ۸۰ سانتی‌متر و طول ۱۸ متر به همراه مهاری با نیروی پس-کشیدگی به عنوان سازه نگهبان گودبرداری استفاده شده است.

۳-۱- حفاری گمانه

برای حفاری گمانه‌ها، به دلیل ریزشی بودن محیط خاکی اطراف از سیستم حفاری ODEX-115 استفاده شده است [۲۱].

پیچیده مهاری‌ها استفاده می‌نمایند، در حالیکه نرم‌افزار^۱ FLAC با در نظر گرفتن بیش از ده پارامتر به مدل‌سازی اندرکنش مهاری با محیط اطراف با دقت بالا می‌پردازد. مبنای این پژوهش، نرم‌افزار^{2D} FLAC است. این نرم‌افزار یک برنامه تفاضل محدود صریح است که در محاسبات مهندسی ژئوتکنیک به کار می‌رود. در صورت عدم اهمیت آثار خمش، می‌توان از عنصر کابل^۲ برای مدل‌سازی مهاری در نرم‌افزار FLAC استفاده نمود. در این شرایط پارامترهای مورد نیاز به دو دسته کلی پارامترهای مربوط به عنصر مسلح‌کننده و پارامترهای طول‌گیری تقسیم‌بندی می‌شود. مبنای راهنمای نرم‌افزار FLAC، مدل‌سازی مهاری در محیط سنگی است و توصیه‌های بسیار کلی براساس پژوهش‌های پیشین در زمینه پیچ سنگ‌ها^۳ [۲] در آن ارائه شده است. متأسفانه در راهنمای این نرم‌افزار اشاره‌ای به چگونگی تعریف پارامترهای عنصر کابل برای مدل‌سازی عددی در محیط‌های خاکی نشده است. البته در برخی پژوهش‌ها برای تحلیل عددی گودبرداری با مهار در محیط خاکی به وسیله‌ی نرم‌افزار FLAC از روابط محیط سنگی بدون توجه به تفاوت رفتار مهاری‌ها در این دو محیط استفاده شده است که منجر به نتایج غیرقابل اعتمادی می‌شود [۳] و [۴]. بدیهی است استفاده از روابط و پارامترهای مختص محیط سنگی در محیط‌های خاکی در جهت اطمینان نیست. همچنین با توجه به آنکه بیشتر پژوهشگران و مهندسين طراح داخل کشور به دلیل سادگی با نرم‌افزار PLAXIS آشنایی دارند، از ضریب ارتجاعی معادل مجموعه عضو مسلح‌کننده و دوغاب که در مدل‌سازی با این نرم‌افزار مطرح است برای طول‌گیری مهاری در نرم‌افزار FLAC نیز استفاده می‌نمایند [۵] و [۶] و [۷]. اما قابل توجه است که در نرم‌افزار FLAC، تنها ضریب ارتجاعی عنصر مسلح‌کننده برای هر دو طول آزاد و طول پیوند مورد نیاز است.

با توجه به ایرادات بیان شده و کمبود مطالعات لازم در این زمینه، این پژوهش کوششی برای ارائه روشی منطقی، آسان و

1 Fast Lagrangian Analysis of Continua

2 Cable Element

3 Rockbolts

4 Pull-out Test

5 Uplift

۴-۲- پارامترهای طول گیرداری

منظور از طول گیرداری یا پیوند، اندرکنش عنصر مسلح‌کننده-دوغاب-محیط اطراف است که مهمترین بخش مدل‌سازی عنصر کابل در نرم‌افزار FLAC است.

۴-۲-۱- محیط و قطر ناحیه تزریق شده

نکته بسیار مهم و کاربردی در محاسبه محیط گیرداری، توجه به روش تزریق دوغاب است. فشار مورد استفاده در عملیات تزریق می‌تواند بر شعاع موثر تزریق در سنگ یا خاک تاثیر بگذارد و به تبع آن محیط گیرداری تغییر یابد. مقدار فشار تزریق به میزان سربار بستگی دارد و در سنگ دارای درز و ترک می‌تواند تا بیشینه ۳ مگا پاسکال افزایش یابد، در حالی که در محیط‌های خاکی مقادیر در حد ۰/۳ تا ۰/۷ مگا پاسکال است [۱۶].

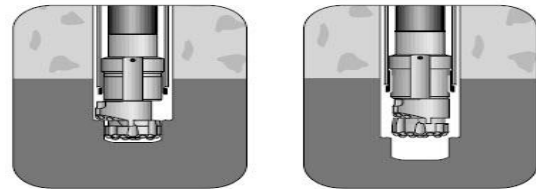
جدول (۱) پارامترهای عنصر مسلح‌کننده

مقاومت جاری شدگی (kN)	مقاومت تسلیم (MPa) [15]	ضریب ارتجاعی (GPa) [16]	مساحت (mm ²)
۱۱۶۹	۱۶۷۰	۱۹۵-۲۰۰	۷۰۰

در پروژه مطالعه شده از مقدار متداول فشار تزریق ۰/۲ مگا پاسکال استفاده شده است [۱۲]. چنانچه تزریق با فشار کمتر از ۱ مگا پاسکال اجرا شود، محدوده تزریق شده مشابه شکل (۲) تقریباً به صورت یک استوانه در راستای عنصر مسلح‌کننده خواهد بود [۱۶]. برای تعیین قطر محدوده استوانه‌ای مورد بحث با استفاده از روابط (۱) تا (۳) ابتدا باید پارامترهای زیر تعیین شود.

- ۱- میزان سیمان مصرفی برای تزریق گمانه‌ها، که براساس گزارش‌های شرکت مجری پروژه گودبرداری تعیین شده و در قالب پارامتر α در جدول (۳) آورده شده است.
- ۲- نسبت وزنی آب به سیمان در دوغاب مصرفی.
- ۳- جرم مخصوص سیمان پرتلند (برابر ۳/۱۵ کیلوگرم بر لیتر [۱۷]).

قطر سر مته این مدل برابر ۱۱۵ میلی‌متر است که با توجه به عملکرد جدار تراش آن مطابق شکل (۱)، قطر نهایی برابر ۱۵۲ میلی‌متر حاصل می‌شود [۱۳].



شکل (۱) نمایش قطر حفاری سر مته و جدار تراش در سیستم حفاری ODEX [13]

۴-۳- عنصر مسلح‌کننده (استرند)

استرند عبارت است از کابلی که از ۷ رشته سیم بهم تابیده تشکیل شده است، به گونه‌ای که ۶ سیم به دور یک سیم مرکزی بافته می‌شوند. کابل‌های فلزی به دو دسته کلی با وادادگی کم^۱ و با وادادگی نرمال^۲ تقسیم‌بندی می‌شود [۱۴]. برای هر مهار می‌توان تعداد متفاوتی از کابل‌ها را در یک گمانه جای داد. در این دیواره برای مهارهای ردیف اول با نیروی پس‌کشیدگی ۷۵ تن از ۵ کابل با وادادگی کم (رده^۳ ۲۷۰) به قطر ۱۵/۲۴ میلی‌متر استفاده شده است [۱۲].

۴-۳-۳- دوغاب

نوع سیمان برای دوغاب محیطی تیپ I یا II و نسبت آب به سیمان برابر ۰/۴ است [۱۲].

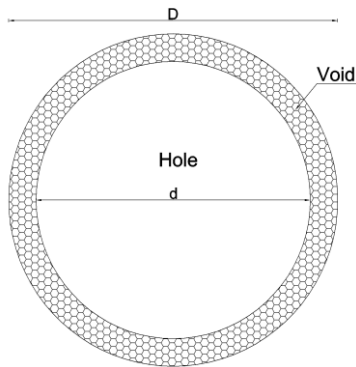
۴-۴- مدل‌سازی عددی مهار

پارامترهای مدل‌سازی مهار به دو دسته کلی پارامترهای عنصر مسلح‌کننده و پارامترهای طول گیرداری قابل تقسیم است.

۴-۴-۱- پارامترهای عنصر مسلح‌کننده

به شکل کلی عبارت عنصر مسلح‌کننده برای میلگرد در پروژه-های میخ‌کوبی و کابل در اجرای مهارها کاربرد دارد. ویژگی‌های عنصر مسلح‌کننده برای مهارهای ردیف اول پروژه یاد شده به شرح جدول (۱) است.

- 1 Low-Relaxation
- 2 Normal-Relaxation
- 3 Grade



شکل (۳) پارامترهای d و D مرتبط با محاسبات قطر ناحیه گیرداری

با توجه به شکل (۳) برای تعیین سطح مقطع محدوده دوغاب نفوذی به فضای خالی و حفرات موجود در خاک اطراف گمانه باید مطابق رابطه (۴) قطر حاصل از حفاری گمانه به وسیله‌ی دستگاه حفار را از پارامتر D کسر نمود. البته علت اضافه شدن سطح مقطع کابل در این رابطه، چشم‌پوشی نمودن از وجود کابل در محاسبات تعیین قطر معادل براساس حجم دوغاب است.

$$A_v = \frac{\pi}{4}(D^2 - d^2) + x \quad (4)$$

در این رابطه

A_v = سطح مقطع فضای خالی و حفرات.

d = قطر حاصل از حفاری گمانه، برابر ۱۵۲ میلی‌متر.

x = سطح مقطع کابل.

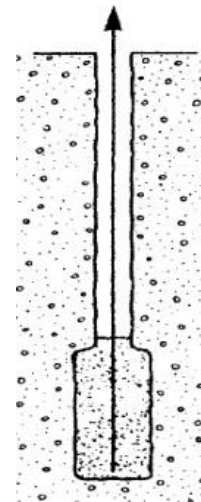
برای تعیین محدوده مخلوط خاک و دوغاب در اطراف حفره از تعریف پوکی^۱ استفاده می‌شود. نسبت تخلخل^۲ براساس آزمایش‌ها تحکیم برای لایه‌ای که اولین ردیف مهاری‌ها در آن واقع شده‌اند برابر ۰/۵۷ است، بنابراین مقدار پوکی برابر ۰/۳۶۳ واقع شده است. به دست می‌آید [18]. با در اختیار داشتن مقادیر پوکی و سطح مقطع فضای خالی، سطح مقطع کل برای محاسبه در واحد طول مهاری مطابق رابطه (۵) و به شرح جدول (۴) تعیین شده است.

$$n = \frac{A_v}{A} \quad (5)$$

در این رابطه

A = سطح مقطع کل، شامل حفرات به همراه مخلوط خاک و

دوغاب اطراف آن.



شکل (۲) ایجاد ناحیه استوانه‌ای شکل در اثر تزریق دوغاب [۱۶]

$$V = \left(\frac{\alpha}{\lambda} \right) + \left(\alpha \times \frac{(w/c)}{\rho} \right) \quad (1)$$

$$\beta = \frac{V}{L_b} \quad (2)$$

$$D = \sqrt{\left(\frac{4 \times \beta}{\pi} \right)} \quad (3)$$

در این روابط

V = حجم دوغاب معادل سیمان مصرفی در گمانه، برحسب لیتر.

α = سیمان مصرفی، برحسب کیلوگرم.

λ = جرم مخصوص سیمان مصرفی، برحسب کیلوگرم بر لیتر.

w/c = نسبت آب به سیمان.

ρ = جرم مخصوص آب برابر یک کیلوگرم بر لیتر.

β = دوغاب مصرفی طول گیرداری.

L_b = طول گیرداری دوغاب و عنصر مسلح‌کننده.

D = قطر محدوده تزریق شده به شرح جدول (۳) (بدون در نظر گرفتن کابل و همچنین دانه‌های خاک در محیط مخلوط خاک و دوغاب اطراف طول گیرداری، مطابق شکل (۳)).

جدول (۳) قطر محدوده تزریق شده در ناحیه گیرداری براساس حجم

دوغاب مصرفی

D (mm)	β (lit/m)	V (lit)	α (kg)	ردیف مهاری
۱۷۳	۲۳/۶۰	۲۱۲/۳۷	۲۹۶	۱

1 Porosity

2 Void Ratio

با توجه به رابطه (۷) و تعیین قطر معادل ۲۱۹ میلی‌متر، در نهایت پارامتر محیط برای مهاری مورد نظر برابر ۶۸۸ میلی‌متر به دست آمده است.

۴-۲-۲- سختی برشی، مقاومت چسبندگی و مقاومت اصطکاکی دوغاب

عضو مسلح‌کننده بر طبق شکل (۵) در فرآیند محاسبات داخلی نرم‌افزار FLAC به صورت تعدادی فنر که معادل سختی محوری آن عضو می‌باشند و همچنین تعدادی از نقاط گره‌ای در نظر گرفته می‌شود. رفتار برشی دوغاب محیطی در حین جابه‌جایی نسبی سطح مشترک عنصر مسلح‌کننده-دوغاب و سطح مشترک دوغاب-محیط اطراف براساس سختی برشی دوغاب به صورت رابطه (۸) تعریف می‌شود [21].

$$\frac{F_s}{L} = K_{bond} (u_c - u_m) \quad (8)$$

در این رابطه

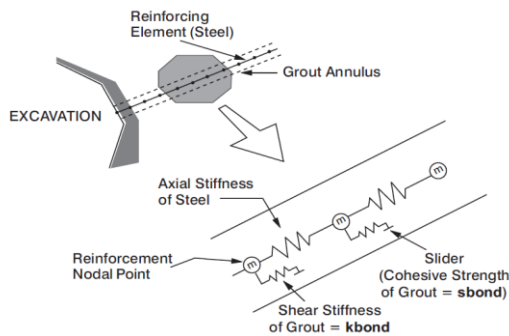
F_s = نیروی برشی ایجاد شده در دوغاب.

L = طول ناحیه گیرداری.

K_{bond} = سختی برشی دوغاب.

u_c = جابه‌جایی محوری عنصر کابل.

u_m = جابه‌جایی محوری محیط خاک و یا سنگ.



شکل (۵) اندرکنش عنصر کابل با دوغاب محیطی [21]

بیشینه نیروی برشی که در دوغاب ایجاد می‌شود بر طبق رابطه (۹) تابعی از مقاومت چسبندگی و اصطکاکی آن است [21].

$$\frac{F_s}{L} = S_{bond} + \sigma_c' \tan (S_{friction}), \text{perimeter} \quad (9)$$

در این رابطه

S_{bond} = مقاومت چسبندگی دوغاب.

جدول (۴) سطح مقطع کل (A) براساس رابطه پوکی

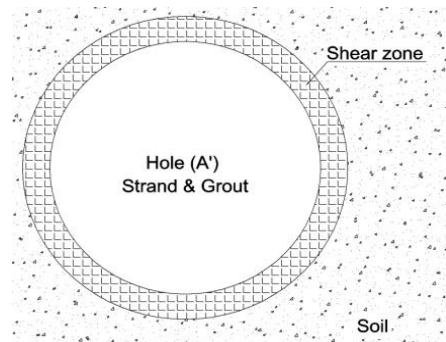
A_v (mm ²)	n	A (mm ²)
۶۰۶۰	۰٫۳۶۳	۱۶۶۹۴/۲۱

مطابق شکل (۴) با جمع سطح مقطع کل براساس پوکی (A) با سطح مقطع حاصل از حفاری (A') و با استفاده از رابطه (۶)، اقدام به محاسبه قطر نهایی طول گیرداری کابل-دوغاب-خاک می‌شود (جدول ۵).

$$D_{Total} = \sqrt{\left[\left(\frac{4}{\pi} \right) \times (A + A') \right]} \quad (6)$$

جدول (۵) تعیین D_{Total}

A (mm ²)	A' (mm ²)	D_{Total} (mm)
۱۶۶۹۴/۲۱	۱۸۱۴۵/۸۴	۲۱۱



شکل (۴) نمایی از سطح مقطع طول گیرداری بعد از تزریق دوغاب

مقاومت برشی در طول مهاری به وسیله خواص دوغاب ایجاد می‌شود. بنابراین رفتار برشی سطح مشترک دوغاب و محیط خاک اطراف آن طبق شکل (۴) به وسیله ناحیه برشی^۱ قابل تعریف است. ضخامت ناحیه برشی به عنوان یک لایه نازک اطراف عنصر کابل حدود ۴ میلی‌متر پیشنهاد می‌شود [۱۹] و [۲۰]. بنابراین قطر معادل مطابق رابطه (۷) تعیین می‌شود.

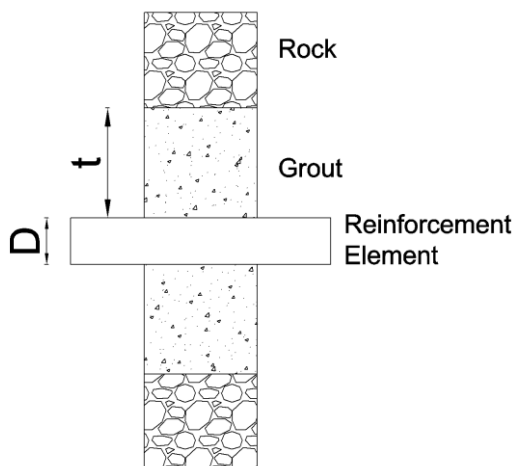
$$D_{eq} = D_{Total} + 2t \quad (7)$$

در این رابطه

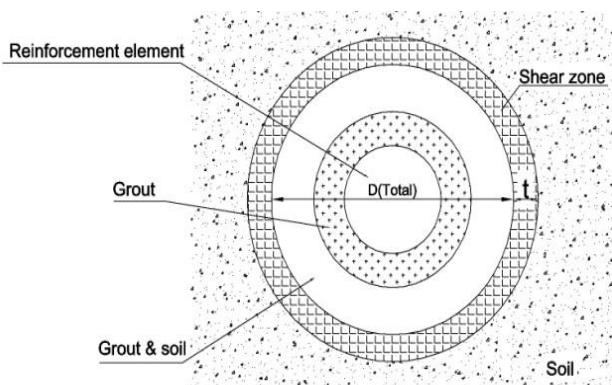
D_{eq} = قطر معادل مربوط به ناحیه تزریق شده با در نظر گرفتن

اثر ناحیه برشی.

t = ضخامت ناحیه برشی.



شکل (۶) پارامترهای t و D در محیط سنگی



شکل (۷) پارامترهای t و D در محیط خاکی

$$\tau_{peak} = \tau_l Q_B \quad (13)$$

$$S_{bond} = \alpha \tau_{peak} \quad (14)$$

در این روابط

τ_{peak} = مقاومت برشی بیشینه.

τ_l = حدود نصف مقاومت فشاری تک محوری سنگ و یا

دوغاب، هر کدام کمتر باشد.

Q_B = براساس کیفیت شرایط پیوستگی دوغاب و سنگ تعیین

می‌شود. برای اتصال و پیوستگی کامل برابر واحد در نظر گرفته می‌شود.

α = پارامتر محیط براساس محل رخداد گسیختگی، آنکه در سطح مشترک عنصر مسلح‌کننده-دوغاب باشد و یا دوغاب-محیط اطراف.

σ'_c = تنش همه‌جانبه موثر.

$S_{friction}$ = مقاومت اصطکاکی دوغاب که برابر زاویه اصطکاک

داخلی خاک پیشنهاد می‌شود [۱۹].

perimeter = محیط خارجی مقطع.

اگرچه بهترین روش تعیین سختی برشی برداشت مستقیم از نتایج آزمون کشش است، اما می‌توان با استفاده از تنش برشی در سطح مشترک دوغاب و سنگ مطابق رابطه (۱۰) [۲] نیز این پارامتر را محاسبه نمود.

$$\tau_G = \frac{G}{\left(\frac{D}{2} + t\right)} \frac{\Delta u}{\ln\left(1 + \frac{2t}{D}\right)} \quad (10)$$

بر همین اساس رابطه (۱۱) به عنوان راهکاری برای برآورد منطقی سختی برشی ارائه شده است [۲۱]. چگونگی تعریف پارامترهای این رابطه برای محیط خاکی و یا سنگی متفاوت است و به شرح جدول (۶) است.

$$K_{bond} \approx \frac{2\pi G}{10 \ln\left(1 + \frac{2t}{D}\right)} \quad (11)$$

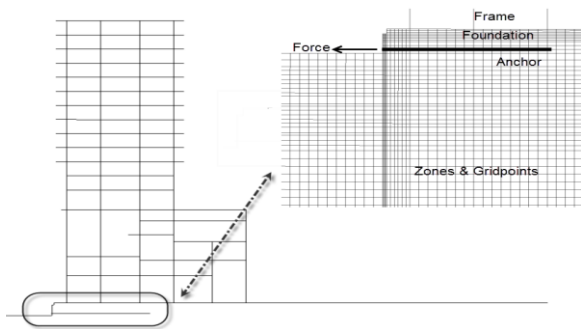
$$G = \frac{E_{soil}}{2(1 + \nu_{soil})} \quad (12)$$

جدول (۶) پارامترهای مورد نیاز تعیین K_{bond} در محیط خاک و سنگ

محیط	سنگ	خاک
ناحیه برشی	عدم ایجاد	ایجاد
ضریب برشی	دوغاب	رابطه (۱۲)
t	ضخامت دوغاب (شکل (۶))	ضخامت ناحیه برشی (۴ میلی‌متر، شکل (۷))
D	قطر عضو مسلح‌کننده (شکل (۶))	قطر نهایی (D_{Total} ، شکل (۷))

در صورت عدم دسترس بودن نتایج آزمون کشش می‌توان نسبت بیشینه نیروی برشی به طول را به صورت تقریبی براساس مقاومت برشی بیشینه که به وسیله‌ی رابطه (۱۳) [۲] برای محیط سنگی پیشنهاد شده است، تعیین نمود. بنابراین با چشم‌پوشی از محصورشدگی اصطکاکی (جمله دوم در سمت راست رابطه (۹)، مقاومت چسبندگی به صورت رابطه (۱۴) و با توجه به جدول (۷) قابل محاسبه است.

ناحیه خاک‌برداری باید در جهت افقی (جهت سرعت اعمالی) ثابت شود.



شکل (۸) مدل‌سازی مهارى در راستای افق (شبیه‌سازی آزمون کشش)

۵-۱- نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی

براساس نمودار نیرو-جابجایی مطابق شکل (۹)، ظرفیت نهایی مهارى در تغییر مکانی حدود ۸ سانتی‌متر معادل ۸۳ تن حاصل می‌شود. این عدد از مقاومت جاری شدگی کششی کابل که برابر ۱۱۶۹ کیلونیوتن (۱۱۹ تن) است، بسیار کمتر است و بنابراین مرتبط با مقاومت طول گیرداری مهارى در خاک است. یکی از کنترل‌های مهم در مبحث مهارى‌ها اطمینان از آن موضوع است که انتقال نیرو به خاک تنها در طول گیرداری رخ دهد و طول آزاد سهمی در این انتقال نداشته باشد. بنابراین مطابق رابطه (۱۵) باید جابجایی گره ابتدایی مهارى برحسب میلی‌متر بیشتر از ۸۰ درصد تغییر شکل ارتجاعی تئوری طول آزاد باشد [22]. برای تغییر مکان ۸ سانتی‌متر پارامتر Δ_{min} برابر $46/3$ میلی‌متر تعیین شده است.

$$\Delta_{min} = \frac{0.8 \times (P \cdot UL) \times 10^6}{A \cdot E}, \Delta > \Delta_{min} \quad (15)$$

در این رابطه

Δ = جابجایی اعمالی به گره ابتدایی مهارى در مدل عددی، برحسب میلی‌متر.

P = بار اعمالی، برحسب کیلونیوتن.

UL = طول آزاد، برحسب متر.

A = سطح مقطع عنصر مسلح‌کننده، برحسب میلی‌متر مربع.

E = ضریب ارتجاعی مسلح‌کننده، برحسب مگا پاسکال.

جدول (۷) پارامترهای مورد نیاز تعیین S_{bond} در محیط خاک و سنگ

محیط	سنگ	خاک
S_{bond}	$S_{bond} = \alpha \tau_{peak}$	$S_{bond} = \alpha C$
α	$\alpha = \pi D$	$\alpha = \pi (D_{total} + 2t) = \pi D_{eq}$
	شکل (۶)	شکل (۷)
محل احتمالی رخداد گسیختگی	در سطح تماس مسلح‌کننده-دوغاب	در سطح تماس دوغاب-خاک
	رابطه (۱۳) τ_{peak}	چسبندگی خاک C

چسبندگی و زاویه اصطکاک لایه‌ای که مهارى مورد نظر در آن قرار گرفته است به ترتیب برابر $0/2$ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع و 34 درجه است [۱۸]. بنابراین پارامترهای طول گیرداری به شرح جدول (۸) محاسبه شده‌اند.

جدول (۸) سختی برشی، مقاومت اصطکاکى و مقاومت چسبندگی دوغاب

S_{bond} (N/m)	$S_{friction}$ (Deg)	K_{bond} (N/m/m)
۱۳۴۹۹	۳۴	$9/78 \times 10^8$

۵- شبیه‌سازی عددی آزمون کشش

بعد از گذشت مراحل مدل‌سازی شبکه تفاضلات محدود خاک، خاکبرداری و اجرای فونداسیون برج، احداث طبقه به طبقه قاب ساختمانی در انتها مطابق شرایط اجرایی اقدام به برداشت اولین لایه خاک برای نصب مهارى شده است. برای شبیه‌سازی آزمون کشش در نرم‌افزار $FLAC^{2D}$ گره ابتدایی عنصر کابل در سطح دیواره گودبرداری با یک سرعت ثابت برابر 1×10^{-6} متر بر ثانیه [21] کشیده می‌شود. میزان جابجایی به کار گرفته شده در ابتدای مهارى با توجه به سرعت اعمال تغییر مکان و تعداد گام محاسباتی قابل تعیین است. اگرچه مهارى‌های این پروژه با زاویه 10 درجه نسبت به افق اجرا شده‌اند، اما مهارى مورد نظر در این شبیه‌سازی عددی مطابق شکل (۸) به صورت افقی مدل می‌شود. زیرا در این نرم‌افزار، اعمال سرعت بر عنصر کابل تنها در جهت محوری امکان‌پذیر است [۲۱]. به منظور حفظ پایداری دیواره گود در طی آزمون کشش، نقاط گره‌ای طول

چسبندگی خاک اطراف توصیه می‌شود.

γ = وزن مخصوص خاک در طول گیرداری.

Z = متوسط عمق طول گیرداری مهاری.

k = ضریب فشار خاک (اگر عمل تزریق تحت فشار انجام شود پارامتر k را می‌توان مساوی ضریب فشار خاک در حالت سکون (k_0) در نظر گرفت. حد پایین این پارامتر، ضریب فشار محرک رانکین است [۲۴]. البته به دلیل آثار اتساع و فشار تزریق ممکن است این ضریب حتی بیشتر از k_0 نیز باشد [۲۵].

δ = ضریب اصطکاک خاک و دوغاب، که برابر زاویه اصطکاک داخلی خاک توصیه می‌شود.

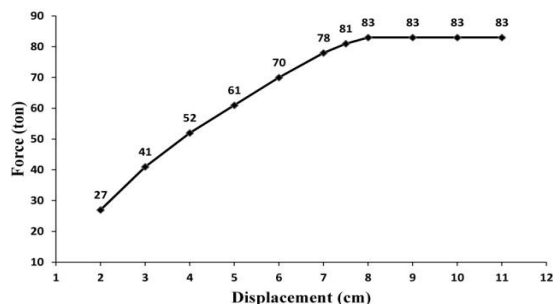
پیشنهاد شده است در محاسبات از متوسط تنش استفاده شود [26]. بنابراین رابطه تعیین مقاومت نهایی مهاری به صورت رابطه (۱۷) تغییر می‌نماید.

$$P_{ult} = \pi dl \left[c_a + \left(\frac{1+k_0}{2} \sigma_v \right) \cdot \tan(\delta) \right] \quad (17)$$

پارامترهای c_a ، δ و k_0 براساس زاویه اصطکاک و چسبندگی خاک ارائه شده در بخش ۴-۲-۲ به ترتیب برابر ۱۹۶۲۰ پاسکال، ۳۴ درجه و ۰/۴۴۰۸ تعیین می‌شود. طول گیرداری اولین ردیف مهاری اجرا شده برابر ۹ متر است. در این رابطه، پارامتر d معادل پارامتر D_{eq} برگرفته از رابطه (۷) است که برابر ۰/۲۱۹ متر است. تنش قائم (سربار) آخرین پارامتر مورد نیاز برای استفاده از رابطه (۱۷) است. در تعیین سربار علاوه بر خاک موجود روی مهاری، بار ناشی از برج مجاور گود (سازه بتنی ۱۷ طبقه) نیز در نظر گرفته می‌شود. مجموع بار ناشی از وزن خاک و ساختمان بتنی، تنش قائم‌ای برابر ۲۲۳/۶ کیلو پاسکال را نتیجه می‌دهد. بنابراین با استفاده از رابطه (۱۷)، مقاومت نهایی مهاری برابر ۷۹۴۲۰۳ نیوتن (۸۱ تن) به دست آمده است.

۵-۲- تصحیح تغییر مکان به دلیل جابه‌جایی شمع

در مرحله ایجاد نیروی پس‌کشیدگی در مهاری‌ها، جک کشش روی شمع نصب می‌شود. بنابراین عکس‌العمل نیروی کششی مهاری بر شمع به عنوان تکیه‌گاه جک وارد می‌شود و بدنه شمع تغییر شکل جزئی خواهد داشت. مطابق شکل (۱۱) در



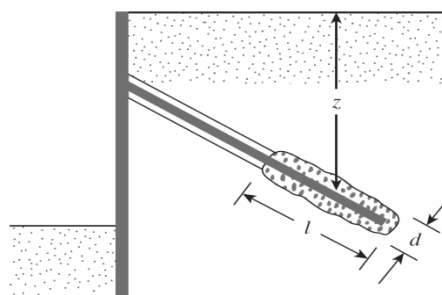
شکل (۹) نمودار نیرو-جابه‌جایی مهاری مورد نظر، برگرفته از نتایج آزمون کشش در نرم‌افزار FLAC

جدول (۹) خلاصه مشخصات اولین ردیف مهاری

UL (m)	A (mm ²)	E (MPa)
۹/۵	۷۰۰	۱۹۵۰۰۰

نیروی پس‌کشیدگی این مهاری در اجرا برابر ۷۵ تن است. بنابراین اقدام به تعیین میزان جابه‌جایی متناظر با این نیرو در مدل عددی شده که پاسخی برابر ۶/۴۷ سانتی‌متر به دست آمده است.

برای کنترل مقدار ظرفیت نهایی مهاری حاصل از مدل عددی می‌توان از روابط پیشنهادی در مراجع مختلف ژئوتکنیک استفاده نمود. مقاومت نهایی مهاری با توجه به پارامترهای تعریف شده در شکل (۱۰) و رابطه (۱۶) [۲۳] قابل محاسبه است.



شکل (۱۰) پارامترهای مورد نیاز برای تعیین مقاومت نهایی مهاری [۲۴]

$$P_{ult} = \pi dl [c_a + \gamma zk \cdot \tan(\delta)] \quad (16)$$

در این رابطه

P_{ult} = مقاومت نهایی مهاری.

d = متوسط قطر مقطع در طول گیرداری.

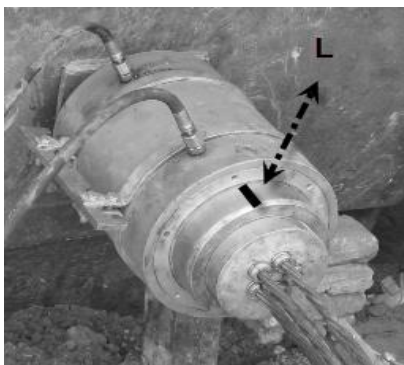
l = طول گیرداری مهاری.

c_a = چسبندگی ناحیه گیرداری، که معادل ۰/۷ تا ۱ برابر

محاسبات دستی به ترتیب برابر ۸۳ و ۸۱ تن حاصل شده است. اختلاف اندکی در حدود ۲ تن مشاهده می‌شود. دلیل این اختلاف آن است که در محاسبات براساس رابطه پیشنهادی پژوهشگران از تنش قائم بهره گرفته شده است اما در محاسبات نرم‌افزار FLAC از تنش همه‌جانبه موثر استفاده می‌شود.

۶- اگرچه نمودار نیرو-جاب‌جایی آزمون کشش در اجرا موجود نیست اما با توجه به نتیجه شماره ۵ و همچنین صحت سنجی براساس معیار کنترل انتقال کشش مهار به محیط اطراف تنها در طول گیرداری مشخص می‌شود که شیب ابتدا و مشخصات لحظه گسیختگی نمودار نیرو-جاب‌جایی برگرفته از شبیه‌سازی آزمون کشش در نرم‌افزار FLAC دارای دقت مطلوبی است.

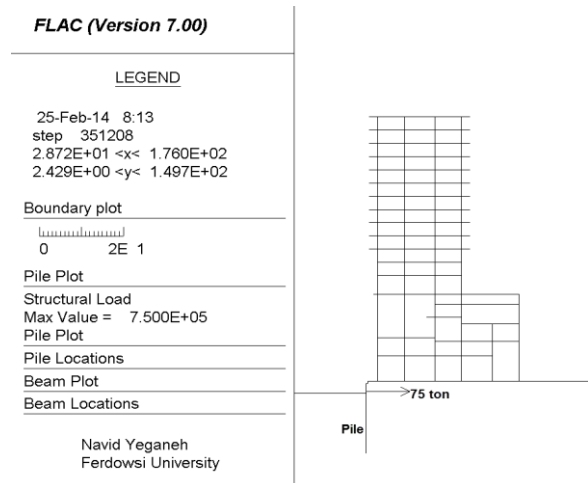
۷- با توجه به اینکه تغییر شکل ثبت شده در اجرا شامل میزان بیرون کشیدگی مهار به همراه تغییر مکان شمع تحت نیروی عکس‌العمل جک کشش است، بنابراین پارامتر تصحیح تغییر مکان شمع باید به عدد مربوط به جاب‌جایی سر مهار حاصل از مدل عددی آزمون کشش اضافه شود. میزان جاب‌جایی برای نیروی پس کشیدگی ۷۵ تن براساس نمودار نیرو-جاب‌جایی شبیه‌سازی آزمون کشش برابر ۶/۴۷ سانتی‌متر به دست آمده است که با اضافه نمودن پارامتری تحت عنوان تصحیح تغییر مکان شمع با مقدار ۰/۷۲ سانتی‌متر به عدد یاد شده، جاب‌جایی حاصل از مدل عددی برابر ۷/۱۹ سانتی‌متر تعیین می‌شود. اختلاف نتیجه مدل عددی و میزان بیرون آمدگی جک در اجرا که برابر ۷/۵۸ سانتی‌متر [۱۲] (پارامتر L) مطابق شکل (۱۲)) است، بسیار ناچیز و در حدود ۳/۹ میلی‌متر است که نشان دهنده دقت و صحت مناسب مدل عددی است.



شکل (۱۲) محل مورد نظر برای اندازه‌گیری بیرون آمدگی جک در

حین کشش مهار

مدلی فقط شامل شمع و بدون مهار با اعمال نیروی محوری ۷۵ تن به گره‌ای از شمع که متناظر با محل نصب مهار مورد نظر است، جاب‌جایی برابر ۰/۷۲ سانتی‌متر به سمت راست به دست آمده است.



شکل (۱۱) برداشت جاب‌جایی ناشی از اعمال بار ۷۵ تن بر بدنه شمع

۶- ارائه نتایج

براساس مقایسه نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی با داده‌های میدانی، محاسبات دستی و روابط پیشنهادی پژوهشگران نکات زیر قابل بیان است.

۱- جبرای مدل‌سازی مهارها در نرم‌افزار FLAC پارامترهای سطح مقطع، جرم مخصوص، ضریب ارتجاعی و مقاومت جاری شدگی کششی و فشاری تنها مختص به عنصر مسلح-کننده است.

۲- قطر ناحیه تزریق شده طبق روش پیشنهادی این پژوهش براساس فشار تزریق، حجم دوغاب، پوکی و ضخامت ناحیه برشی تعیین می‌شود. این قطر حدود ۴۰ درصد نسبت به قطر حاصل از حفاری افزایش نشان می‌دهد.

۳- رفتار برشی سطح مشترک دوغاب و محیط خاک اطراف به وسیله‌ی ناحیه برشی تعریف می‌شود. ضخامت این ناحیه حدود ۴ میلی‌متر پیشنهاد شده است.

۴- چگونگی تعریف پارامترهای روابط تعیین سختی برشی و مقاومت چسبندگی دوغاب برای مدل‌سازی عددی مهارها در محیط‌های خاکی و سنگی متفاوت است.

۵- ظرفیت نهایی مهار به دست آمده از مدل عددی و

۷- نتیجه‌گیری

با توجه به تاثیر قابل توجه مقادیر پارامترهای اندرکنشی خاک-مهاری در نتایج تحلیل‌های عددی پروژه‌های گودبرداری، لزوم انتخاب دقیق آن‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. اگرچه بهترین روش تعیین اکثر پارامترهای مربوط به طول گیرداری مهاری‌ها استفاده از آزمون کشش است، اما متأسفانه کمتر به آن توجه می‌شود. البته حتی با فرض انجام آزمایش کشش (که مربوط به دوران ساخت می‌باشد) تعیین این پارامترها برای طراحی اولیه مورد نیاز است. در حال حاضر یک فرآیند استاندارد آزمایشگاهی خاص نیز برای تعیین موارد یاد شده وجود ندارد. بنابراین استفاده از روشی جایگزین برای تعیین پارامترهای مورد نظر به شکلی که نتایج به دست آمده از مدل‌سازی عددی براساس آن قابل اعتماد باشد، به شدت احساس می‌شود.

در بین نرم‌افزارهای ژئوتکنیکی برنامه FLAC با استفاده از عنصر سازه‌ای کابل قابلیت بالایی برای مدل‌سازی مهاری‌ها دارد، هرچند نیازمند داده‌های ورودی نسبتاً زیادی است. با تعیین دقیق آن‌ها برای محیط‌های خاکی که حاصل این پژوهش است، می‌توان نتایج قابل اعتمادی را در مدل‌سازی و تحلیل گودبرداری مهارشده به دست آورد. تاکنون از روابط مهاری در سنگ و یا روابط خاص سایر نرم‌افزارها مانند PLAXIS برای مدل‌سازی عددی مهاری در محیط خاکی به وسیله‌ی نرم‌افزار FLAC استفاده شده است. با مشاهده کاربرد این روش‌ها که منجر به نتایج غیرقابل اعتمادی می‌شود و برای ارتقا دانش مهندسين طراح پروژه‌های گودبرداری سطح کشور، در این پژوهش روش دقیق مدل‌سازی مهاری در محیط خاکی با استفاده از نرم‌افزار FLAC ارائه شده است.

با مدل‌سازی اولین ردیف مهاری در دیواره گودبرداری مجاور برج پروژه مورد مطالعه، شبیه‌سازی عددی آزمون کشش و در نهایت انطباق مطلوب نتایج با داده‌های اجرایی نکات زیر به دست آمده است.

۱- دقت مطلوب نرم‌افزار FLAC^{2D} در مدل‌سازی مهاری با نیروی پس کشیدگی به وسیله‌ی عنصر کابل.

۲- دقت بالای روش پیشنهادی تعیین پارامترهای اندرکنشی

مهاری در محیط خاکی، شامل روش تخمین قطر مقطع تزریق شده و همچنین چگونگی معادل‌سازی روابط محیط سنگی برای محیط خاکی.

۳- امکان استفاده از روش ارائه شده در این پژوهش به عنوان یک شیوه کارآمد و مطمئن برای مدل‌سازی‌های عددی گودبرداری‌ها با سیستم مهاری در محیط‌های خاکی به وسیله‌ی نرم‌افزار FLAC^{2D}.

۸- قدردانی

در انتها لازم است از مدیریت هماهنگی پروژه مرکز بین‌المللی مالی اقتصادی مشهد جناب آقای مهندس بدخشان، شرکت بناگستران هشتم توس، شرکت خدمات مهندسی مکانیک خاک (SES) و همچنین جناب آقای مهندس چنارانی مسئول دفتر فنی شرکت SES به عنوان مجری عملیات گودبرداری پروژه یاد شده به خاطر همکاری صمیمانه برای در اختیار گذاشتن اطلاعات مورد نیاز تشکر و قدردانی شود.

۹- مراجع

[1] Sabatini P.J., Pass D.J., Bachus R.C; Geotechnical Engineering Circular NO. 4: Ground Anchors and Anchored Systems; Washington D.C., Federal Highway Administration, 1999.

[2] St John C. M., Van Dillen D. E.; "Rockbolts: A New Numerical Representation and Its Application in Tunnel Design"; in Rock Mechanics - Theory - Experiment - Practice (Proceedings of The 24th U.S. Symposium on Rock Mechanics); Texas, 1983, pp. 13-26.

[۳] صبا ح.ر.، ضمیران س.؛ "بهبود سازی دیوارهای میخکوبی شده با استفاده از تحلیل عددی"؛ در سومین کنفرانس ملی عمران شهری؛ سنج، ۱۳۹۰، ص ۱-۷.

[۴] ضمیران س.، صبا ح.ر.؛ "بررسی رفتار سه بعدی بارگذاری بر روی دیوارهای میخکوبی شده"؛ در اولین کنفرانس ملی عمران و توسعه؛ زیباکنار، ۱۳۹۰، ص ۱-۸.

[۵] ضمیران س.؛ مدلسازی و تحلیل سازه‌های خاکی و سنگی در FLAC؛ تهران، نوآور-پارسیا، ۱۳۹۱.

[6] Akhlaghi T., Salehi Alamdar N., Hamidi P.; "Numerical Investigation of Dynamic Response of Reinforced Soil Retaining Walls"; in The 4th International Conference on Geotechnical Engineering and Soil Mechanics; Tehran, 2010, pp. 1-8.

- [16] Xanthakos P.P.; Ground Anchors and Anchored Structures; Toronto, John Wiley & Sons, 1991.
- [17] ASTM C204-00; Standard Test Method for Fineness of Hydraulic Cement by Air-Permeability Apparatus; Pennsylvania, ASTM International, 2000.
- [۱۸] اداره کل آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک استان خراسان رضوی؛ گزارش مطالعات ژئوتکنیک پروژه بین المللی مالی اقتصادی مشهد؛ مشهد، ۱۳۸۶.
- [19] Wei W.B., Cheng Y.M.; "Soil Nailed Slope by Strength Reduction and Limit Equilibrium Methods"; Computers and Geotechnics; vol. 37, 2010, pp. 602-618.
- [20] Su L.J., Yin J.H., Zhou W.H.; "Influences of Overburden Pressure and Soil Dilation on Soil Nail Pull-Out Resistance"; Computers and Geotechnics; vol. 37, 2010, pp. 555-564.
- [21] Itasca; User's Manual FLAC2D: Fast Lagrangian Analysis of Continua, Version 7.0; Minneapolis, Itasca Consulting Group, 2011.
- [22] Porterfield J.A., Cotton D.M., Byrne R.J.; Soil Nailing Field Inspectors Manual-Soil Nail Walls; Washington D.C., Federal Highway Administration, 1994.
- [23] Bowles J.E.; Foundation Analysis and Design; Singapore, McGraw-Hill Companies, 1997.
- [24] Das B.M; Principles of Foundation Engineering; Stamford, Cengage Learning, 2011.
- [25] Kim N.K.; "Performance of Tension and Compression Anchors in Weathered Soil"; Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering; vol. 12, 2003, pp. 1138-1150.
- [26] Milligan G.W., Tei K.; "The Pull-out Resistance of Model Soil Nails"; Soils and Foundations; vol. 38, 1998, pp. 179-190.
- [7] Heidari M., Hassanlou Rad M.; "Static and Dynamic Behavior Analysis of Neka Dry Dock Walls, A Case Study"; in The 14th World Conference on Earthquake Engineering; Beijing, 2008, pp. 1-8.
- [8] Dickin E. A.; "Uplift Behavior of Horizontal Anchor Plates in Sand"; Journal of Geotechnical Engineering; vol. 114, no. 11, 1988, pp. 1300-1317.
- [9] Sugimoto M., Alagiyawanna A. M. N.; "Pullout Behavior of Geogrid by Test and Numerical Analysis"; Journal of Geotechnical and Geoenvironmental; vol. 129, no. 4, 2003, pp. 361-371.
- [10] Chu L. M., Yin J. H. ; "A Laboratory Device to Test the Pull-Out Behavior of Soil Nails"; Geotechnical Testing Journal; vol. 28, no. 5, 2005, pp. 1-15.
- [۱۱] خدمات مدیریت ایرانیان، مهندسین مشاور گنو؛ گزارش تجمعی پروژه مرکز بین المللی مالی مشهد؛ مشهد، ۱۳۸۶.
- [۱۲] شرکت خدمات مهندسی مکانیک خاک SES؛ مجموعه گزارشات عملیات گودبرداری و سازه نگهدارنده بین المللی مرکز مالی اقتصادی مشهد؛ تهران، ۱۳۸۷-۱۳۸۸.
- [13] Atlas Copco.; Odex Overburden Drilling Systems; Stockholm, Atlas Copco Ground Engineering Products, 2006.
- [14] ASTM A416/A416M-12a.; Standard Specification for Steel Strand, Uncoated Seven-Wire for Prestressed Concrete; Pennsylvania, ASTM International, 2012.
- [15] Hewson N. R.; Prestressed Concrete Bridges: Design and Construction; London, Thomas Telford Publishing, 2006.

