پژوهه باستان‌سنجی ۱۴۰۱؛ ۸(۲): ۳۵-۴۶

پژوهه باستان‌سنجی

DOI: 10.52547/jra.8.2.35

URL: http://jra-tabriziau.ir/

مقاله پژوهشی

تحلیل پایداری فضاهای زیرزمینی دستکند باستانی (مطالعهٔ موردی: شهر زیرزمینی نوش‌آباد)

مجتبی خدایی جوشقانی [۱]، مجید نوریان بیدگلی [۲*]

۱. کارشناسی ارشد مهندسی معدن، گروه مهندسی معدن، دانشکدهٔ مهندسی، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران.

۲. استادیار، گروه مهندسی معدن، دانشکدهٔ مهندسی، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۳/۱۴ **تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۸/۱۱**

چکیده

شهرهای زیرزمینی باستانی مجموعه‌ای از فضاهای حفرشده به‌صورت سُنتی در خاک و سنگ است که به دلیل قدمتشان ارزش فرهنگی و تاریخی بالایی دارند، لذا بررسی پایداری و حفظ و نگهداری آن‌ها بسیار مهم و ضروری است. هدف از انجام این پژوهش بررسی پایداری شهر زیرزمینی اُویی نوش‌آباد به‌عنوان یکی از بزرگ‌ترین شهرهای دستکند باستانی در جهان و از مراکز معروف گردشگری ایران است. بدین منظور، در مرحلهٔ اول با نمونه‌برداری و انجام آزمون‌های آزمایشگاهی، جنس مواد دربرگیرندهٔ حفریه‌ها تعیین و سپس ویژگی‌های ژئوتکنیکی و رفتار مکانیکی آن‌ها مشخص شده است. در مرحلهٔ دوم، بر اساس روش عددی اجزای محدود و استفاده از نرم‌افزار Plaxis2D، با مدل‌سازی بخشی از فضاهای قابل دسترسی برداشت‌شده در این منطقه (سه مقطع عرضی در طول راهروی اصلی)، تحلیل استاتیکی تنش-جابه‌جایی انجام شده و در نهایت فاکتور ایمنی بررسی شده است. نتایج آزمایشگاهی این مطالعه نشان می‌دهد که جنس خاکِ دربرگیرندهٔ شهر زیرزمینی از نوع رُس غیرآلی با خاصیت خمیری است. همچنین نتایج مدل‌سازی نشان می‌دهد که اگرچه افزایش سطح مقطع حفریه، باعث کاهش فاکتور ایمنی و افزایش مقادیر تنش و جابه‌جایی اطراف حفریه شده است، با توجه به مقادیر خیلی کم، میزان جابه‌جایی به‌دست‌آمدهٔ حفریه‌ها (در حد چند میلی‌متر) و فاکتور ایمنی بزرگ‌تر از یک، در شرایط فعلی راهروهای اصلی از پایداری نسبتاً مناسبی برخوردار است. توجه به دستاوردهای این پژوهش می‌تواند گامی موثر در راستای تأمین ایمنی بازدیدکنندگان از این مکان و توسعهٔ پایدار منطقه باشد.

واژگان کلیدی: فضای زیرزمینی دستکند، تحلیل پایداری، مدل‌سازیِ عددی، روش اجزای محدود، نرم‌افزار Plaxis، شهر زیرزمینی نوش‌آباد.

* نویسنده مسئول مکاتبات: کیلومتر شش بلوار قطب راوندی، دانشگاه کاشان، دانشکدهٔ مهندسی، گروه مهندسی معدن، کد پستی: ۸۷۳۱۷۵۳۱۵۳

پست الکترونیکی: noriyan@kashanu.ac.ir

[Downloaded from jra-tabriziau.ir on 2023-07-17]

[DOI: 10.52547/jra.8.2.35]

۱. مقدمه

از دیرباز تا کنون، استفاده از فضاهای زیرزمینی برای رفع نیازهای متنوع زندگی بشری مورد توجه بوده و روزبه‌روز بر آن افزوده شده است، به‌طوری‌که امروزه استفاده از آن‌ها به‌عنوان یکی از شاخصه‌های توسعه‌یافتگی و از مهم‌ترین راهکارهای تعامل با محیط زیست در توسعهٔ زیرساخت‌های جوامع مدرن محسوب می‌شود. لذا پیش‌بینی رفتار مقاومتی و تغییر شکل‌پذیری و ارزیابی پایداری آن‌ها، یکی از مسائل مهم در مهندسی فضاهای زیرزمینی است.

شهرهای زیرزمینی به‌صورت شبکه‌ای از فضاهای زیرزمینی مرتبط به هم، از گذشتهٔ دور به‌منظور سکونت و پناهگاه امن در زمان خطر و به تعبیری نمونه‌ای بی‌نظیر از سازه‌های پدافند غیرعامل، کاربرد گسترده‌ای داشته‌اند. اغلب این شهرها به‌صورت دستکند در خارج از شهرهای اصلی و در دل کوه و صخره‌ها و یا در زیر شهرها و نواحی مسکونی در عمق زمین حفر شده‌اند. در حال حاضر، این فضاهای زیرزمینی با توجه به قدمتشان به‌عنوان آثار باستانی و میراث فرهنگی هر کشور محسوب می‌گردد، به‌طوری‌که اغلب آن‌ها به‌عنوان یک اثر با ارزش در سازمان یونسکو ثبت و ضبط می‌گردد. به دلیل اینکه در اغلب موارد عمر زیادی از ایجاد این نوع سازه‌های مهندسی سپری شده، لذا برای حفظ و نگهداری آن‌ها و تأمین امنیت بازدیدکنندگان، مطالعهٔ علمی وضعیت پایداری و تغییرشکل‌پذیری فضاهای موجود بسیار ضروری است [1].

ایران به دلیل داشتن تمدنی کهن و برجسته در جهان، دارای نمونه‌هایی از این نوع فضاهای زیرزمینی با قدمت بسیار است، به‌طوری‌که طی سال‌های گذشته کوشش شده در نقاط مختلف کشور کشف و شناسایی شوند [2]. شهرها و سازه‌های زیرزمینی اُویی نوش‌آباد [3]، سامن ملایر [4]، کاریز کیش [5]، میمند کرمان [6] و کندوان تبریز [7] نمونه‌هایی از این مناطق ارزشمند و منحصربه‌فرد در نقاط مختلف ایران است. بنابراین، لازم است به منظور تأمین ایمنی بازدیدکنندگان این آثار، که نقش بسزایی در رونق صنعت توریست و جذب گردشگر دارد، مطالعه‌های علمی و اصولی انجام گیرد. مسلماً با شناسایی نقاط مستعد ریزش در مناطق مذکور می‌توان با اقدام‌های پیشگیرانه از تخریب و ازبین‌رفتن آن‌ها جلوگیری کرد. علاوه‌بر ایران، کشورهایی دیگر نظیر ترکیه، ایتالیا و لهستان هم دارای این نوع فضاهای زیرزمینی باارزش هستند که پژوهش‌های متعددی به‌ویژه در ترکیه انجام شده است. برای مثال، در شهر زیرزمینی Cappadocia ترکیه، پژوهش‌های گسترده‌ای با هدف بررسی پایداری کوتاه و بلندمدت این منطقه انجام شده است. نتایج این مطالعه‌ها نشان داده است که علاوه‌بر وضعیت زمین‌شناسی و ساختاریِ منطقه، علت ناپایداری در این منطقه تغییر شدید آب‌وهوایی و چرخهٔ سردشدن، انجماد، ذوب و تبخیر نزولات فصلی تعیین شده است [8-14]. تحقیق‌های مشابهی در مناطق دیگر ترکیه نظیر Zelve [15-16]، Derinkuyu [17]، Gümüşler [18]، Tatlarin [19-20] و Afyon-Kütahya [21] انجام شده است. همچنین تحلیل پایداری فضاهای زیرزمینی فرهنگی به کمک روش‌های عددی در مناطقی در Wieliczka لهستان [22-23] و Marsala ایتالیا [24] نیز انجام شده که نشان از توجه ویژه به‌منظور حفاظت و نگهداری این نوع سازه‌های زیرزمینی قدیمی است. لذا لازم است در ایران نیز این نوع کارهای پژوهشی به‌صورت دقیق و جامع انجام گیرد.

شهر زیرزمینی اُویی نوش‌آباد به‌عنوان یکی از بزرگ‌ترین دستکندهای قدیمی در جهان، طی سالیان اخیر کشف و مورد بهره‌برداری قرار گرفته است. هدف اصلی این پژوهش علاوه‌بر تعیین جنس و ویژگی‌های ژئوتکنیکی مواد دربرگیرندهٔ فضاهای زیرزمینی منطقهٔ مذکور، تحلیل پایداری استاتیکی بخشی از مناطق بحرانی و قابل دسترس این منطقه است. لذا در اولین بخش از این پژوهش با نمونه‌برداری و انجام آزمون‌های آزمایشگاهی، پارامترهای مکانیکی مواد تعیین شده است. در ادامه، تلاش شده است با ساخت مدل‌های هندسی بخشی از فضاهای زیرزمینی برداشت شده، تحلیل عددی تنش–جابه‌جایی انجام گیرد و مناطق دارای پتانسیل احتمالی ریزش در مقاطع مورد بررسی شناسایی و فاکتور ایمنی

[Downloaded from jra-tabriziau.ir on 2023-07-17]

[DOI: 10.52547/jra.8.2.35]

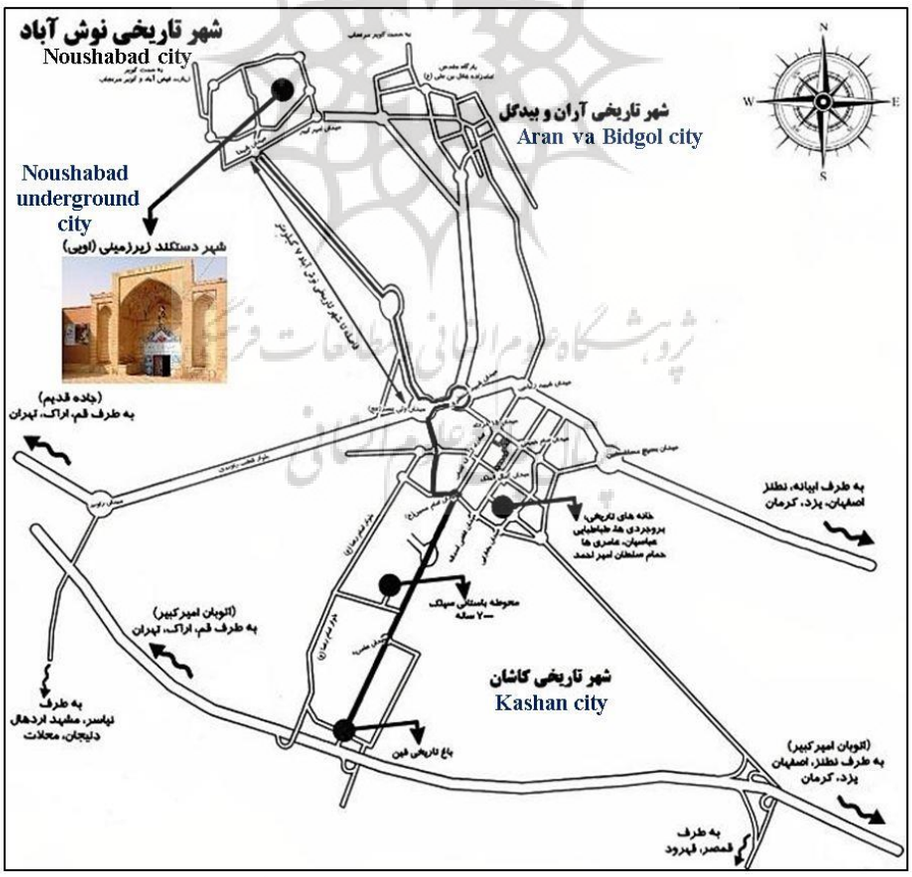
تعیین گردد. بدین منظور، از نسخه دوبُعدی نرم‌افزار Plaxis که بر پایهٔ روش عددی اجزای محدود بوده، استفاده شده است.

۲. شهر زیرزمینی اُویی نوش‌آباد

شهر تاریخی و کویری نوش‌آباد با طول جغرافیایی ۵۱ درجه و ۲۹ دقیقه و عرض ۳۴ درجه و ۴۶ دقیقه، در ارتفاع نهصد متری از سطح دریا قرار دارد. این شهر با وسعتی بالغ بر ۱۷۰ هکتار از توابع شهرستان آران و بیدگل بوده و در استان اصفهان در مرکز ایران واقع شده است. نوش‌آباد از شرق به آران و بیدگل، از جنوب به کاشان، از غرب به سفیدشهر و از شمال به کویر مرکزی ایران ارتباط دارد.

این منطقه با آب‌وهوایی گرم‌وخشک در حاشیهٔ دشت کویر و در محیطی بیابانی قرار گرفته و شهری تقریباً مسطح است که گرادیان شیب توپوگرافی این منطقه از جنوب به‌سمت شمال کاهش می‌یابد. از نظر زمین‌شناسی این منطقه بخشی از دشت کاشان است که سنگ کف آبرفت‌های آن در طبقه‌های غیرقابل نفوذ پلیوسن و میوسن قرار دارد. آبرفت‌ها از جنس رس، شن و ماسه هستند. عوارض بیابانی همچون دشت بزرگ رسی-نمکی، تَل‌ماسه‌های بادی شمال و شرق و غلبهٔ سیستم فرسایش بادی از ویژگی‌های زمین‌شناسی و ژئومورفولوژی این ناحیه است.

شهر زیرزمینی نوش‌آباد که به زبان محلی به نام اُویی گفته می‌شود، به‌عنوان یکی از بزرگ‌ترین و زیباترین شهرهای دستکند زیرزمینی جهان، در زیر بافت اصلی شهر نوش‌آباد قرار گرفته است. وسعت این شهر به دلیل ارتباط میان محله‌ها و حفاظت از جان و مال مردم در مواقع ناامنی زیاد بوده و در دو سطح افقی و عمودی تا سطح کنونی شهر نوش‌آباد گسترش یافته است. موقعیت قرارگیری و نحوهٔ دسترسی به این منطقه در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱: موقعیت قرارگیری و نحوهٔ دسترسی به شهر زیرزمینی اُویی نوش‌آباد

Fig. 1: Location and access to the Noushabad underground city

[Downloaded from jra-tabriziau.ir on 2023-07-17]

[DOI: 10.52547/jra.8.2.35]

کشف این شهر در سال ۱۳۸۵ به‌صورت اتفاقی، توسط فردی که قصد حفر چاه در منزل خود داشته، انجام شده است. قدمت این شهر به هزاروپانصد سال پیش و دورهٔ ساسانی (صدر اسلام تا دورهٔ صفوی) بازمی‌گردد. این اثر در تاریخ ۸ مرداد ۱۳۸۵ با شماره ثبت ۱۵۸۱۶ به‌عنوان یکی از آثار ملی ایران به ثبت رسیده است. به‌علت قدمت تاریخی آن، این مکان از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، به‌طوری‌که طی سالیان گذشته به‌عنوان یکی از مراکز معروف توریستی و گردشگری در ایران شناخته شده و بسیار پُربازدید بوده است.

این شهر دارای ساختاری متراکم، پیچیده و گسترده‌ای است که شامل اتاق‌های کوچک، راهروهای باریک پیچ درپیچ و تعدادی چاه است. اتاق‌ها به شکل تودرتو و با راهروهای زاویه‌دار که دید مستقیم را با فضای بَعدی از بین می‌بَرد، ساخته شده است. عمق این شهر بین ۴ تا ۱۶متر است که وسعت آن به قول اهالی بومی منطقه، تا بیرون از حصار تاریخی شهر گسترده شده و تا ۴ کیلومتر تخمین زده شده است. غیر از ورودی اصلی، ارتفاع تمام قسمت‌های این شهر به‌اندازهٔ قد یک انسان، بین ۱۷۰ تا ۱۹۰ سانتیمتر است. لازم به ذکر است که به دلیل پیدانشدن ورودی اصلی، در حال حاضر برای ورود به آن از آب‌انباری که مجاور این شهر است، استفاده می‌شود. در شکل ۲، بخشی از راهروها (سمت چپ) و دهانهٔ ورودی (سمت راست) شهر زیرزمینی مذکور نشان داده شده است.

شهر زیرزمینی نوش‌آباد در سه طبقه روی همدیگر قرار گرفته است. طبقهٔ اول در حقیقت کوره‌راه‌ها و دالآن‌هایی است که در گذشته برای گمراه‌کردن تعقیب‌کنندگان احتمالی در زمان جنگ و حملهٔ اشرار به شهر استفاده می‌شده است. طبقهٔ دوم و سوم محل پناه‌گرفتن اهالی شهر و زندگی در مواقع خطر و ذخیرهٔ آذوقه و غذا بوده است. راه ورودی به طبقه‌ها طوری حفاری شده که هرکس قصد ورود به فضا را دارد، ناگزیر باید از پایین به بالا حرکت کند. این ساختار دفاعی به گونه‌ای طراحی شده که قدرت دفاعی افراد مهاجم را به صفر می‌رسانَد و تسلط کافی را برای مقابله با دشمن فراهم می‌نماید.

این منطقهٔ باستانی در واقع نمونه‌ای بی‌نظیر از سازه‌های زیرزمینی پدافند غیرعامل در گذشته بوده که مهم‌ترین هدف سازندگان آن ایجاد پناهگاهی امن و مخفی در برابر حملهٔ اشرار به منطقه بوده است. به همین دلیل، این شهر به دلیل قدمت و معماری خاصش دارای ارزش فرهنگی و تاریخی بی‌نظیر بوده و جزو میراث گرانبهای کشور است که باید برای حفظ و حفاظت آن تلاش شود.

شکل ۲: دهانهٔ ورودی (سمت راست) و بخشی از راهروهای اصلی (سمت چپ) شهر زیرزمینی اُویی نوش‌آباد

Fig. 2: The entrance (left side) and a part of the main corridors (right side) of the Noushabad underground city

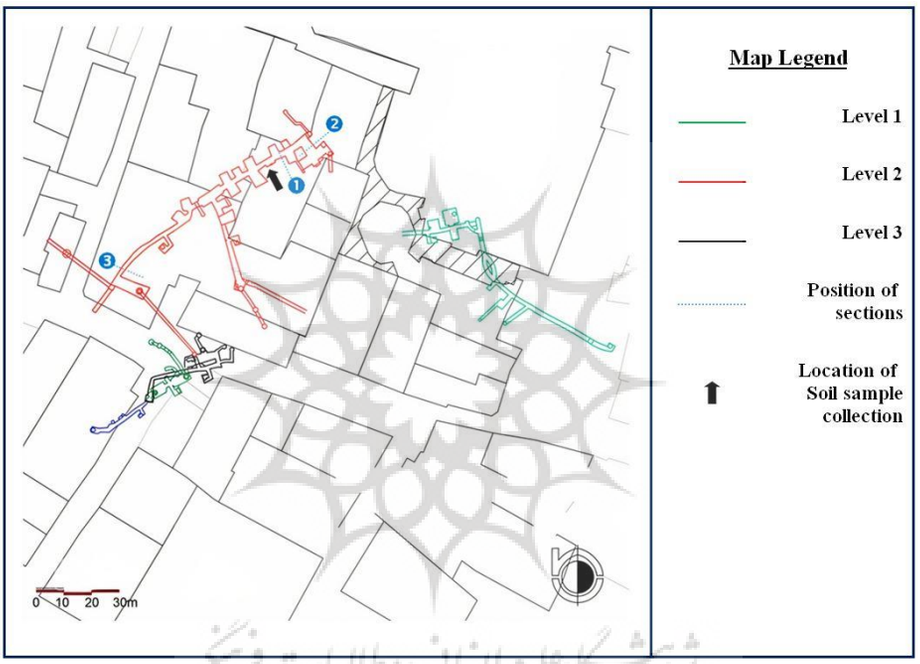
[Downloaded from jra-tabriziau.ir on 2023-07-17]

[DOI: 10.52547/jra.8.2.35]

۳. تعیین پارامترهای ژئوتکنیکی منطقه

به‌منظور تحلیل پایداری هر نوع سازهٔ خاکی و سنگی، ویژگی‌های مقاومتی و تغییر شکل‌پذیریِ ژئوتکنیکی و ژئومکانیکی مواد دربرگیرندهٔ سازه مورد نیاز است. لذا در اولین مرحله از این پژوهش، با انجام مطالعه‌های میدانی و نمونه‌برداری، مقادیر کیفی و کمّی پارامترهای مورد نیاز در آزمایشگاه تعیین گردید.

در این مرحله با توجه به تاریخی‌بودن سازه و محدودیت برداشت نمونه، با هماهنگی و همکاری ادارهٔ میراث فرهنگی، از طبقهٔ دوم شهر زیرزمینی (طبقهٔ فعال و قابل دسترسی) مقدار صد کیلوگرم خاک نمونه‌گیری شد و به آزمایشگاه مهندسی عمران و معدن دانشگاه کاشان انتقال داده شد. در شکل ۳، محل برداشت نمونه‌های خاک (با علامت فلش مشکی‌رنگ) روی نقشهٔ پلان شهر زیرزمینی نوش‌آباد (منطقه قرمزرنگ) مشخص شده است. در این شکل، محل قرارگیری تقریبی طبقات مختلف شهر نسبت‌به همدیگر، به رنگ‌های مختلف مشخص شده است.



شکل ۳: نقشهٔ پلان شهر زیرزمینی نوش‌آباد و محل نمونه‌برداری در طبقهٔ دوم (فلش مشکی)

Fig. 3: Plan map of the Noushabad underground city along with the location of three selected sections and the soil sample collection on the second level

جدول ۱: پارامترهای مکانیکی خاک شهر زیرزمینی نوش‌آباد

Table 1. Mechanical parameters of soil obtained in the Noushabad underground city

Parameters	Unit	value
Dry density	KN/m³	16.6
Saturated density	KN/m³	18.8
Modulus of elasticity	KPa	55500
Friction angle	Degree	33
Cohesion	KPa	21
Poisson's ratio	-	0.3
Uniaxial compressive strength (UCS)	KPa	161.8

[Downloaded from jra-tabriziau.ir on 2023-07-17]

[DOI: 10.52547/jra.8.2.35]

در مرحلهٔ بعد در آزمایشگاه، طی چندمرحله آزمایش‌های جامعی نظیر دانه‌بندی، حدود اتربرگ، وزن مخصوص و مقاومت فشاری تک‌محوری و مقاومت بُرشی خاک روی نمونه‌های انجام شده است. لازم به ذکر است برای تعیین وزن مخصوص خاک، آزمایش دانسیته در محل انجام گرفته شده است. در نهایت، جنس خاک دربرگیرندهٔ فضاهای زیرزمینی منطقهٔ مورد مطالعه، رُس غیرآلی با خاصیت خمیری کم (رس با پلاستیسیتهٔ کم) تعیین گردید. در جدول ۱، پارامترهای ژئوتکنیکی اندازه‌گیری‌شدهٔ خاک مورد نظر آورده شده است.

٤. تحلیل پایداری فضاهای زیرزمینی منطقه

مدل‌سازی عددی روشی است که می‌توان توسط آن ارزیابی دقیقی از مقادیر تنش و جابه‌جایی‌های اطراف حفریه‌های زیرزمینی، مکانیزم ناپایداری‌های محتمل و در نتیجه میزان پایداری بر اساس ضریب ایمنی داشت. لذا در این مرحله از پژوهش با کامل‌شدن داده‌های ژئوتکنیکی خاک دربرگیرنده، پایداری بخشی از فضاهای شهر زیرزمینی تعیین شده است. بدین منظور، با توجه به نوع مصالح، از نرم‌افزار اجزای محدود Plaxis 2D استفاده شده است.

معمولاً اولین مرحلهٔ مدل‌سازی عددی، ساخت هندسهٔ مدل است. بدین منظور، برای تحلیل پایداری فضاهای زیرزمینی در حالت دوبُعدی نیاز به ابعاد، شکل و سطح مقطع حفریه‌ها در مقاطع قائم مسیر حفر است. لذا در این مرحله از تحقیق، پس از انتخاب سه ناحیه در مسیر راهروهای طبقهٔ دوم شهر زیرزمینی، برداشت سطح مقطع انجام گردید. موقعیت قرارگیری این نواحی با شمارهٔ ۱ تا ۳ در شکل ۳ نشان داده شده است. دلیل انتخاب این مناطق، قابلیت دسترسی به آن‌ها بوده، همچنین سعی شده است نقاط طوری انتخاب گردد که اولاً، در طول مسیرِ بازدیدکنندگان و پراکنده باشد؛ ثانیاً، سطح مقطع حفریه (از کوچک تا بزرگ) متفاوت باشد. برای برداشت ابعاد و سطح مقطع حفریه‌ها در سه موقعیت مورد اشاره، از روش مترکشی استفاده شده است. بدین منظور، به کمک متر و نقاله، مجموعه‌ای از طول خطوط واصل از مرکز کف مقطع حفریه به دیواره و سقف آن در زوایای مختلف اندازه‌گیری و در مرحلهٔ بعد مقادیر وارد نرم‌افزار AutoCAD شده است. در شکل ۴، سه مقطع برداشت‌شدهٔ راهروها به روش مذکور و ترسیم آن توسط نرم‌افزار اتوکد نشان داده شده است. همچنین در شکل ۵ نیز تصویر واقعی حفریه (شکل سمت راست) و مشخصات هندسی آن در دو بُعد (شکل سمت چپ) در سه مقطع برداشت‌شده نشان داده شده است.

پس از تعیین شکل و سطح مقطع حفریه‌ها، مدل هندسیِ هر مقطع در نرم‌افزار Plaxis ساخته شده است. برای تحلیل تنش–کرنش مقاطع دوبُعدی راهروها، حالت کرنش صفحه‌ای (Plan strain) انتخاب شده است. در ساخت مدل‌های عددی، ارتفاع بارسنگ در تمام مقاطع برابر با ۱۲ متر که در حقیقت برابر با عمق متوسط طبقهٔ دوم است، در نظر گرفته شده است. بر این اساس، وزن بارسنگ روی حفریه به‌عنوان بار استاتیکی و معادل با تنش قائم برجای ناشی از شتاب ثقل به‌سمت پایین فرض شده است. در واقع، محاسبه و اعمال تنش‌های برجا در مدل بر اساس روش ثقلی انجام شده است. همچنین با توجه به اینکه سطح آب زیرزمینی پایین‌تر از تراز مقاطع مورد بررسی در پژوهش است، لذا فشار آب وجود ندارد و مسئله با وضعیت زِه‌کشی خاک حل شده که در آن فشار آب حفره‌ای در حین بارگذاری برابر با صفر است.

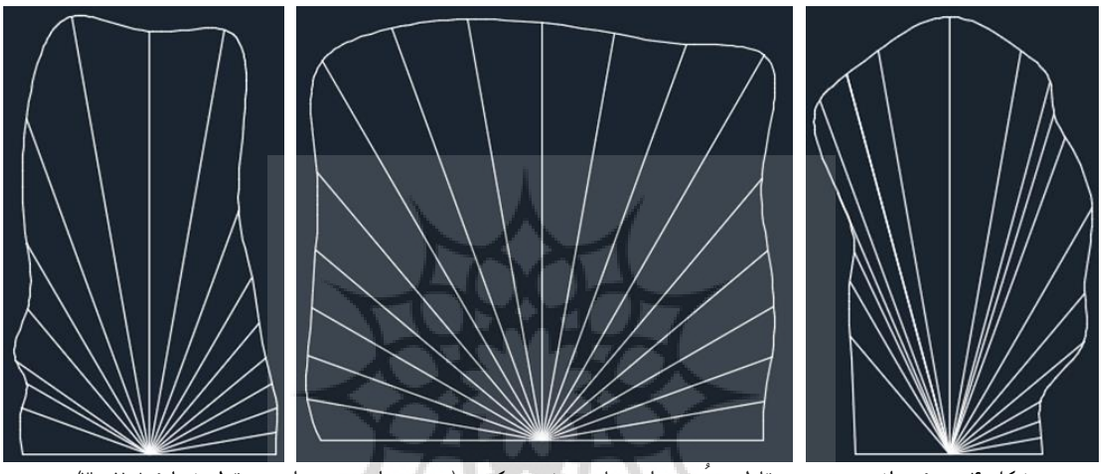
به‌منظور بررسی دقیق میزان تنش‌های القایی و جابه‌جایی‌های ایجادشده در اطراف حفریه، محدودهٔ مدل چهارگوش، و به‌اندازهٔ کافی بزرگ انتخاب شده است. بدین منظور، ارتفاع بالای سقف حفریه برابر با مقدار بارسنگ و فاصلهٔ دیواره‌ها و کف حفریه نسبت‌به مرز مدل برابر با پنج برابر بیشترین ابعاد مقطع در هر حالت انتخاب شده است. همچنین ازآنجاکه در مدل‌سازی معمولاً شرایط مرزی مدل باید به گونه‌ای تعیین شود که دقیقاً منطبق یا نزدیک با شرایط واقعی باشد، در این پژوهش از شرایط مرزی استاندارد استفاده شده است. بدین منظور، مرزهای دو طرف راست و چپ مدل برای حرکت در راستای افق محدود ولی در راستای قائم آزاد بوده است. همچنین برخلاف مرز بالای مدل که سطح زمین آزاد فرض شده، مرز پایین مدل در تمام جهت‌ها کاملاً ثابت و مقیّد فرض شده است.

[Downloaded from jra-tabriziau.ir on 2023-07-17]

[DOI: 10.52547/jra.8.2.35]

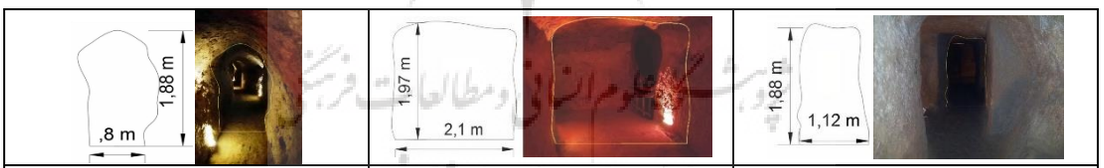
برای تکمیل مدل برای تحلیل تنش–جابه‌جایی فضاهای زیرزمینی مدل‌سازی‌شده، با توجه به نوع خاک و پارامترهای ارائه‌شده در جدول ۱، در این پژوهش از مدل رفتاری موهر–کلمب استفاده شده است. همچنین برای افزایش دقت محاسبه، گسسته‌سازی مدل با ایجاد اِلمان‌هایی از طریق مش‌بندی مثلثی ۱۵ گِرهیِ ریز برای کل مدل و یک درجه ریزتر در اطراف حفریه انجام شده است.

همچنین با توجه به اینکه شهرهای زیرزمینی قدیمی به‌طور کامل حفر شده‌اند، لذا برای حل مدل مراحل حفر در نظر گرفته نشده است. بنابراین، اجرای مدل طی دو مرحله انجام شده است. در مرحلهٔ اول مدل بدون حفریه اجرا شده تا به تعادل برسد و در مرحلهٔ بعد حفریه طی یک مرحله ایجاد و مجدداً مدل اجرا شده است. در اجرای تمام مدل‌های ساخته‌شده، برای درنظرگرفتن تغییر شکل‌های الاستو–پلاستیک که تغییر فشار آب حفره‌ای در آن‌ها لحاظ نمی شود، از تحلیل پلاستیک استفاده شده است.



شکل ۴: نحوهٔ برداشت و ترسیم مقاطع دوبُعدی راهروها به روش مترکشی (به‌ترتیب از چپ به راست، مقطع شمارهٔ ۱، ۲ و ۳)

Fig. 4: Mapping and drawing the two-dimensional sections of the corridors using the metering method (Section number 1, 2 and 3 from left to right, respectively)



(a) Section 1 (b) Section 2 (c) Section 3

شکل ۵: تصاویر راهروهای شهر زیرزمینی نوش‌آباد (سمت راست) و مشخصات هندسی آن (سمت چپ) در سه مقطع انتخابی

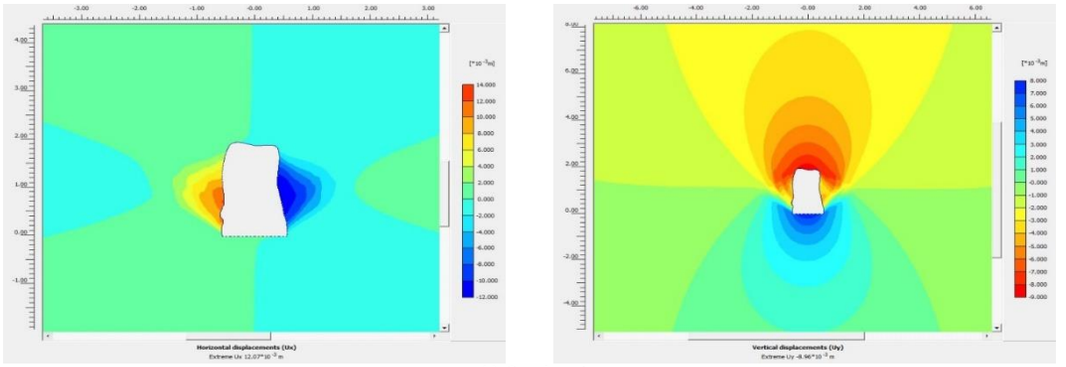
Fig. 5: Pictures of the corridors of the Noushabad underground city (right side) and its shape and geometric characteristics (left side) in three selected sections

۵. تحلیل و تفسیر نتایج

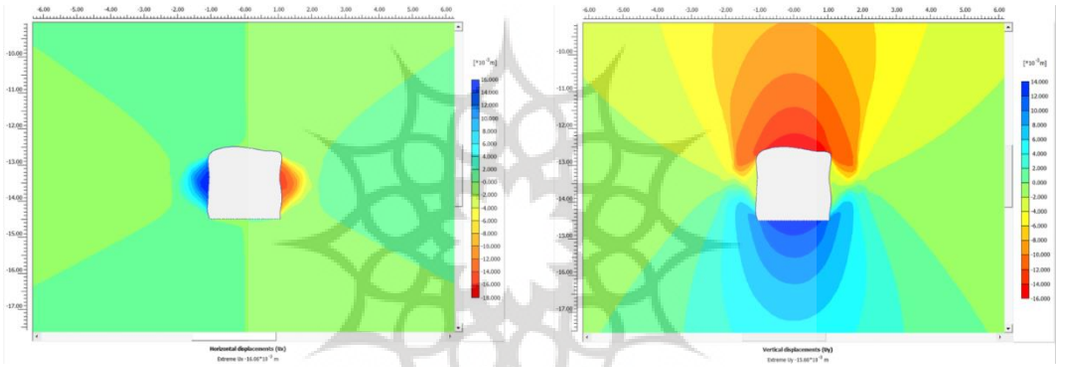
این بخش شامل نتایج به‌دست‌آمده از تحلیل تنش–جابه‌جایی در سه مقطع مورد مطالعه است. در شکل ۶، منحنی‌های هم‌تراز مقادیر جابه‌جایی‌های افقی و قائم به‌دست‌آمدهٔ اطراف حفریه‌ها را نشان می‌دهد. مقایسهٔ این نتایج نشان می‌دهد که در تمام مقاطع بررسی‌شده، میزان جابه‌جایی‌ها در دیوارهٔ حفریه (در راستای افقی) نسبت‌به سقف حفریه (در راستای قائم) بیشتر است. این به دلیل آن است که معمولاً در سازه‌های نزدیک به سطح زمین میزان تنش افقی بیشتر از قائم است، لذا در این حالت میزان جابه‌جایی افقی نیز از قائم بیشتر خواهد بود. همچنین منطقهٔ پلاستیک (نقاط قرمز در شکل سمت راست) و وضعیت بردار تنش‌های کل اطراف حفریه‌ها در شکل ۷ نشان داده شده است.

[Downloaded from jra-tabriziau.ir on 2023-07-17]

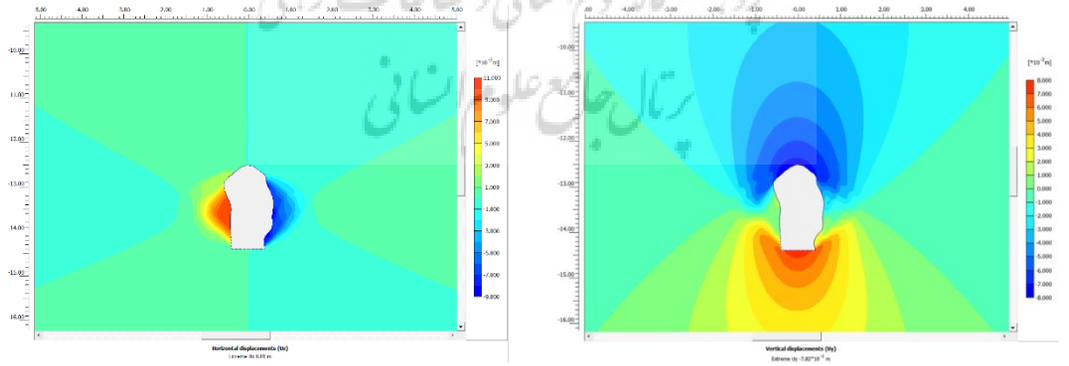
[DOI: 10.52547/jra.8.2.35]



(a) Section 1



(b) Section 2



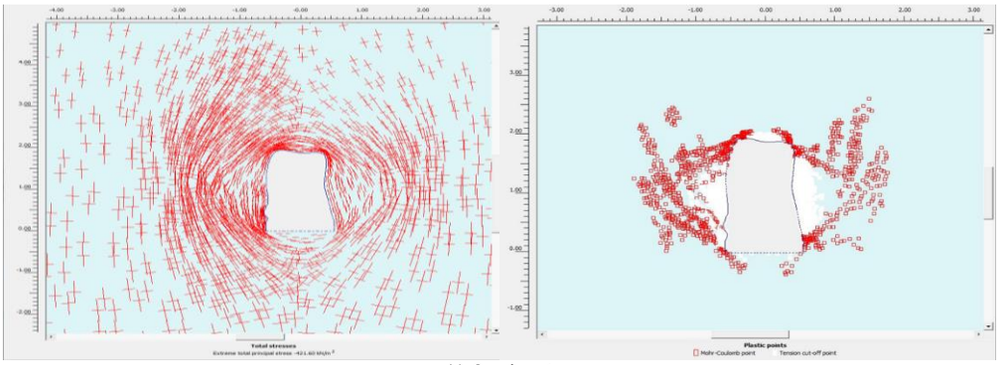
(c) Section 3

شکل ۶: وضعیت جابه‌جایی‌های اطراف حفریه در راستای قائم (شکل سمت راست) و افقی (شکل سمت چپ) در سه مقطع مورد مطالعه

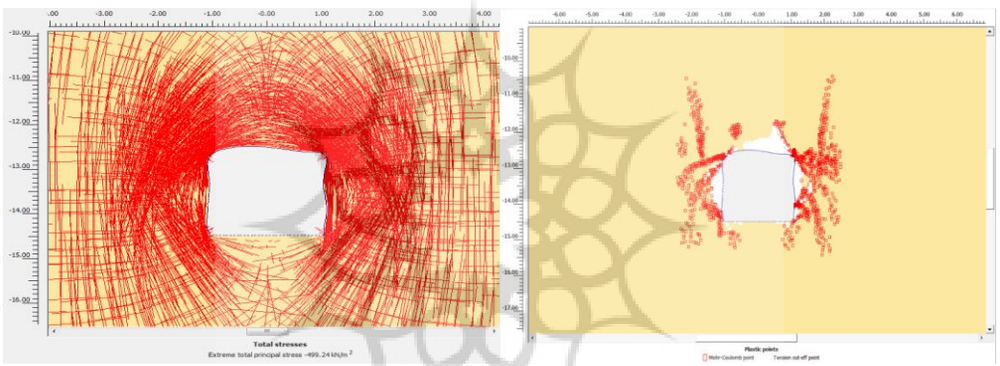
Fig. 6: Displacements around the excavation in the vertical (right side) and horizontal (left side) direction in three selected sections

[Downloaded from jra-tabriziau.ir on 2023-07-17]

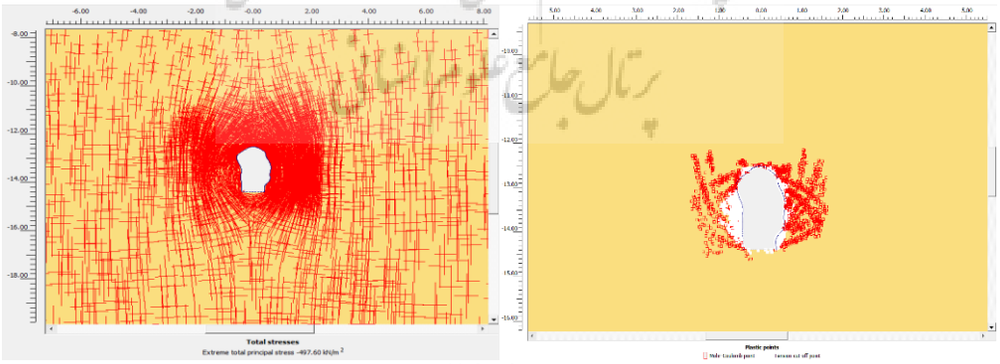
[DOI: 10.52547/jra.8.2.35]



(a) Section 1



(b) Section 2



(c) Section 3

شکل ۷: مناطق پلاستیک (شکل سمت راست) و بردار تنش کل (شکل سمت چپ) اطراف حفریه در سه مقطع مورد مطالعه

Fig. 7: Plastic zones (right figure) and total stress vector (left figure) around the excavation in three studied sections

[Downloaded from jra-tabriziau.ir on 2023-07-17]

[DOI: 10.52547/jra.8.2.35]

بررسی نتایج مذکور نشان می‌دهد که با افزایش سطح مقطع حفریه، میزان جابه‌جایی و تنش کل افزایش می‌یابد. در این خصوص، حفریه شمارهٔ ۲ با بیشترین سطح مقطع، دارای بیشترین مقدار تنش و جابه‌جایی و در مقابل آن، حفریه شماره ۳ با کمترین سطح مقطع، دارای کمترین مقدار تنش و جابه‌جایی است.

همچنین بررسی نحوهٔ توزیع نقاط پلاستیک اطراف حفریه‌ها نشان می‌دهد که با توجه به نحوهٔ توزیع تنش، تقریباً در تمام موارد تعداد نقاط پلاستیک در دیواره‌ها بیشتر از سقف حفریه است. همچنین به دلیل تقارن‌نداشتن سطح مقطع و حفاری غیریکنواخت، گوشه‌های تیز در مرز حفریه زیاد بوده و در نتیجه تمرکز نقاط پلاستیک به دلیل تمرکز تنش در این نواحی بیشتر شده است. لذا به دلیل اینکه معمولاً احتمال شکست و ریزش در این مناطق بیشتر است و باید توجه ویژه‌ای برای کنترل و پایدارسازی این مناطق انجام گیرد.

در ادامه نیز برای بررسی میزان پایداری، فاکتور ایمنی مقاطع مورد بررسی محاسبه شده‌اند. اساساً، فاکتور ایمنی میزان پایداری یک سازه در مقابل بارهای اعمال‌شده را نشان می‌دهد. معمولاً اگر مقدار فاکتور ایمنی از یک بزرگ‌تر باشد، سازه پایدار خواهد بود و البته هرچه این مقدار بیشتر باشد، سازه پایدارتر خواهد بود. در این پژوهش برای تعیین فاکتور ایمنی، از روش کاهش چسبندگی–زاویهٔ اصطکاک داخلی (Phi-c) استفاده شده است. در این روش پارامترهای مقاومتی خاک (چسبندگی و زاویهٔ اصطکاک داخلی) به‌طور خودکار و پی‌درپی تا زمانی‌که شکست در سازه رخ دهد، کاهش داده می‌شوند و در پایان فرآیند، فاکتور ایمنی محاسبه می‌گردد. در جدول ۲، علاوه‌بر مقادیر حداکثر جابه‌جایی افقی، قائم و کل و حداکثر تنش اصلی، فاکتور ایمنیِ به‌دست‌آمده در سه مقطع مورد مطالعه نشان داده شده است. همان‌طورکه مشخص است در تمام مقاطع بررسی‌شده فاکتور ایمنی از یک بیشتر است، لذا در این حالت هرسه حفریه پایدار است. در این حالت با افزایش سطح مقطع حفریه، میزان فاکتور ایمنی کاهش می‌یابد. در این خصوص حفریهٔ شمارهٔ ۲ با بیشترین سطح مقطع، دارای کمترین فاکتور ایمنی و در مقابل آن، حفریهٔ شمارهٔ ۳ با کمترین سطح مقطع، دارای بیشترین فاکتور ایمنی است.

جدول ۲– مقادیر فاکتور ایمنی و حداکثر مقدار جابه‌جایی و تنش اطراف حفریه در سه مقطع مورد مطالعه

Table 2. Values of safety factor and maximum displacement and principal stress around the excavation in three studied sections

Sections	Geometric characteristics of excavation		Maximum displacement (mm)			Maximum principal stress (KPa)	Safety factor
	Width (m)	Height (m)	Horizontal	Vertical	Total		
1	1.12	1.88	12.07	8.96	12.85	421.6	1.85
2	2.1	1.97	16.06	15.66	16.24	499.24	1.764
3	0.8	1.88	10	7.82	10.02	497.7	1.875

٤. نتیجه‌گیری

هدف اصلی این پژوهش، تحلیل پایداری و تعیین رفتار تغییرشکل‌پذیری شهر زیرزمینی نوش‌آباد به‌عنوان فضاهای زیرزمینی دستکند باستانی است. بدین منظور، در مرحلهٔ اول، با انجام آزمایش‌های ژئوتکنیکی روی نمونه‌های برداشت‌شده از منطقهٔ مورد مطالعه، پارامترهای مکانیکی خاکِ دربرگیرنده تعیین شده است. نتایج این بخش از پژوهش نشان داده که جنس مصالح منطقهٔ مورد نظر، خاک رُس غیرآلی با خاصیت خمیری کم است. در مرحلهٔ دوم نیز بر اساس روش عددی اجزای محدود و به کمک نرم‌افزار Plaxis2D، تحلیل تنش–جابه‌جایی بخشی از راهروهای اصلی این شهر زیرزمینی با سطح مقطع مختلف انجام شده است. تحلیل استاتیکی انجام‌شده نشان می‌دهد به دلیل اینکه که میزان جابه‌جایی محاسبه‌شدهٔ اطراف حفریه‌ها در حد چند میلی‌متر است، در حال حاضر راهروهای مذکور در مقاطع مورد مطالعه از

[Downloaded from jra-tabriziau.ir on 2023-07-17]

[DOI: 10.52547/jra.8.2.35]

پایداری نسبتاً مطلوبی برخوردارند. همچنین هرچند که با افزایش سطح مقطع حفریه‌ها فاکتور ایمنی کاهش یافته است، فاکتور ایمنی در کلیهٔ مقاطع مورد بررسی بیشتر از یک است که دلیلی بر پایداریِ فضاهای زیرزمینیِ موجود است. تحلیل پلاستیک اطراف حفریه نیز نشان می‌دهد که به‌طور کلی، وضعیت پایداری در سقف نسبت‌به دیوارهٔ حفریه بهتر است. در این حالت بیشترین ناپایداری در گوشه‌های تیز حفریه به‌وجود آمده است، لذا این مناطق به کنترل بیشتر و پایدارسازی موضعی در مناطق ریزشی نیاز دارند. بدین منظور، پیشنهاد می‌گردد برای ثبت مقادیر تنش و کرنش در طول زمان با نصب ابزار دقیق، رفتارسنجی فضاهای زیرزمینی در طول سال انجام گردد تا بدین ترتیب با نظارت دقیق از بروز ریزش و تخریب جلوگیری گردد. همچنین با توجه به زلزله‌خیزبودنِ ایران، تحلیل پایداری دینامیکی شهر زیرزمینی مذکور در دست بررسی است که نتایج آن در آینده ارائه خواهد گردید.

References

[1] Cakir, O., Evren, S., Tören, E., & Kozak, N. (2018), "Utilizing the sustainable livelihoods approach to evaluate tourism development from the rural host communities' point of view: The case of Cappadocia (Turkey)." GeoJournal of Tourism and Geosites, 21(1), 7-25.

[2] Montazerolhodjah, M., Pourjafar, M., & Taghvaee, A. (2015), "Urban underground development an overview of historical underground cities in Iran." Iran University of Science and Technology, 25(1), 53-60.

[3] Salehi, M., Abdolhoseyni, J., & Armaghani, A. (2016), "Investigation of underground architecture of Ouyi city (Noushabad)." In the first national conference of architectural and urban planning approaches ahead, Kermanshah, Iran. (In Persian).

[4] Mohamadifar, Y., hemati Azandaryai, E., Khaksar, A., & Fooruzanfar, F. (2015), "A Study on the Subterranean Burials of the Sāmen (Malayer) rocky Architectural Complex." Journal of archaeological studies, 7(2), 117-129. (In Persian).

[5] Shariatmadari, N., & Fazelian, A. F. (2008), "Investigating the stability of underground spaces in the Kish karez project. In 3rd International Conference on Geotechnical Engineering and Soil Mechanics." Iranian Geotechnical Society. Tehran.

[6] Hashemi, M., Basmenj, A. K., & Banikheir, M. (2018), "Engineering geological and geoenvironmental evaluation of UNESCO World Heritage Site of Meymand rock-hewn village, Iran." Environmental earth sciences, 77(1), 3.

[7] Kaljahi, E. A., & Birami, F. A. (2015), "Engineering geological properties of the pyroclastic cone-shaped rocky houses of Kandovan, Iran." Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 74(3), 959-969.

[8] Ulusay, R., Akagi, T., Ito, T., Seiki, T., Yuzer, E., & Aydan, O. (1999), "Long term mechanical characteristics of Cappadocia tuff." In 9th ISRM Congress. International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering. OnePetro.

[9] Aydan, O., & Ulusay, R. (2003), "Geotechnical and geoenvironmental characteristics of man-made underground structures in Cappadocia, Turkey." Engineering Geology, 69(3-4), 245-272.

[10] Ulusay, R., Aydan, O., Genis, M., & Tano, H. (2011), "The stability of an underground congress center in soft tuffs through an integrated in-situ monitoring, experimental, analytical and numerical methods (Cappadocia, Turkey)." In 12th ISRM Congress. International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering.

[11] Aydan, O., & Ulusay, R. (2016), "Rock engineering evaluation of antique rock structures in Cappadocia Region of Turkey. In ISRM International Symposium-EUROCK 2016."

[Downloaded from jra-tabriziau.ir on 2023-07-17]

[DOI: 10.52547/jra.8.2.35]

International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering.

[12] Matsubara, H., & Aydan, O. (2016), "The effect of biological degradation of tuffs of Cappadocia, Turkey." In ISRM International Symposium-EUROCK 2016. International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering.

[13] Ito, T., Akagi, T., Aydan, O., Ulusay, R., & Seiki, T. (2016), "Time-dependent properties of tuffs of Cappadocia, Turkey." In ISRM International Symposium-EUROCK 2016. International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering.

[14] Tano, H., Aydan, O., Ulusay, R., & Tanaka, T. (2016), "Geomechanical investigations and pioneering monitoring attempts in Cappadocia, Turkey." In ISRM International Symposium-EUROCK 2016. International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering.

[15] Ito, T., Aydan, O., Ulusay, R., & Kasmer, O. (2008), "Creep characteristics of tuff in the vicinity of Zelve antique settlement in Cappadocia Region of Turkey." In ISRM International Symposium, 5th Asian Rock Mechanics Symposium. International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering.

[16] Kasmer, O., Ulusay, R., & Geniş, M. (2013), "Assessments on the stability of natural slopes prone to toe erosion, and man-made historical semi-underground openings carved in soft tuffs at Zelve Open-Air Museum (Cappadocia, Turkey)." Engineering geology, 158, 135-158.

[17] Aydan, O., & Ulusay, R. (2013), "Geomechanical evaluation of Derinkuyu antique underground city and its implications in geoengineering." Rock mechanics and rock engineering, 46(4), 731-754.

[18] Korkanc, M., Tuğrul, A., Savran, A., & Ozgur, F. Z. (2015), "Structural–geological problems in Gümüşler archeological site and monastery." Environmental Earth Sciences, 73(8), 4525-4540.

[19] Dincer, I., Orhan, A., Frattini, P., & Crosta, G. B. (2015), "Rock mass instabilities in Tatlarin Underground City (Cappadocia-Turkey)." In Engineering Geology for Society and Territory-Volume 8 (pp. 361-365). Springer, Cham.

[20] Dincer, I., Orhan, A., Frattini, P., & Crosta, G. B. (2016), "Rockfall at the heritage site of the Tatlarin Underground City (Cappadocia, Turkey)." Natural Hazards, 82(2), 1075-1098.

[21] Aydan, O., & Kumsar, H. (2016), "A geoengineering evaluation of antique underground rock settlements in Frig (Phrygian) Valley in the Afyon-Kütahya region of Turkey." In ISRM International Symposium-EUROCK 2016. International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering.

[22] Perski, Z., Hanssen, R., Wojcik, A., & Wojciechowski, T. (2009), "InSAR analyses of terrain deformation near the Wieliczka Salt Mine, Poland." Engineering Geology, 106(1-2), 58-67.

[23] Cała, M., Stopkowicz, A., Kowalski, M., Blajer, M., Cyran, K., & D'obyrn, K. (2016), "Stability analysis of underground mining openings with complex geometry." Studia Geotechnica et Mechanica, 38(1), 25-32.

[24] Margherita, Z., Claudio, C., Laura, E., & Alessandra, N. (2018), "A risk assessment proposal for underground cavities in Hard Soils-Soft Rocks." International journal of rock mechanics and mining sciences, 103, 43-54.

[Downloaded from jra-tabriziau.ir on 2023-07-17]

[DOI: 10.52547/jra.8.2.35]