ارزیابی تأثیر پارامترهای ژئوتکنیکی مصالح مسیر تونل بر روی نشست سطح زمین در تونل مترو کرج

محمد جوادی[1]، غلامرضا سعیدی*[2]

1- دانشجوی دکتری، بخش مهندسی معدن، دانشگاه شهید باهنر کرمان

2- استادیار، بخش مهندسی معدن، دانشگاه شهید باهنر کرمان

(دریافت: خرداد 1394، پذیرش: مهر 1394)

چکیده

رشد جمعیت و کمبود فضا در شهرهای بزرگ باعث افزایش نیاز به توسعه سیستم حمل و نقل عمومی و اجرای خطوط زیرزمینی مترو در این شهرها شده است. یکی از مهم‌ترین مخاطرات حفاری تونل‌های مترو، نشست ناشی از حفاری این تونل‌ها و اثرات احتمالی آن بر روی سازه‌های سطحی است. هدف اصلی از انجام این تحقیق بررسی میزان تاثیر مهمترین پارامترهای ژئوتکنیکی مصالح آبرفتی بر روی نشست سطح زمین است. مطالعه پیشینه تحقیق نشان می‌دهد که تجزیه و تحلیل همزمان پارامترهای موثر بر رفتار مصالح دربرگیرنده تونل، کمتر مورد توجه قرار گرفته است. به منظور دستیابی به این هدف می‌توان از روش طراحی آزمایش به دلیل امکان اعمال تغییرات آگاهانه در متغیرهای ورودی (پارامترهای ژئوتکنیکی) مدل و بررسی تغییرات خروجی (نشست سطح زمین) استفاده کرد. از طرف دیگر استفاده از دانش افراد خبره در یک مدل مبتنی بر سیستم مهندسی سنگ به منظور قضاوت در خصوص سیستم‌های پیچیده همواره از کارایی بالایی برخوردار است. به همین دلیل در این مطالعه از این روش نیز به منظور دستیابی به اهداف تحقیق استفاده شده است. جهت استفاده از روش طراحی آزمایش ابتدا با استفاده از نرم‌افزار تفاضل محدود **FLAC3D**، بخشی از تونل خط دو مترو کرج مدل و نتایج مدل ساخته شده با اطلاعات رفتارنگاری مقایسه شد. بدین ترتیب از کارایی مدل عددی ساخته شده در شرایط زمین‌شناسی این محدوده اطمینان حاصل شد. در مرحله بعدی یک تحلیل دامنه‌ایی و تحلیل حساسیت با استفاده از روش تاگوچی انجام گرفت. در تحلیل دامنه‌ایی انجام گرفته پارامترهای مدول الاستیک و نسبت پواسون با محدوده **0/46** و **0/14** به ترتیب دارای بیشترین و کمترین تاثیر بر روی شاخص آزمایش و به تبع آن بر روی نشست سطح زمین هستند. همچنین خروجی‌های تحلیل انجام گرفته با استفاده از نرم‌افزار **Minitab** نشان می‌دهد که مدول الاستیسیته و نسبت پواسون به ترتیب دارای بیشترین و کمترین میزان تأثیر بر روی نشست سطح زمین هستند. نتایج مدل مبتنی بر نظرات افراد خبره نیز انطباق نسبی با نتایج روش طراحی آزمایش دارد. تحلیل مدل **RES** نشان می‌دهد که بیشترین و کمترین وزن فعالیت پارامترهای مورد بررسی به ترتیب مربوط به مدول الاستیک با وزن **28/6** و نسبت پواسون با وزن **7/1** است. بنابراین این دو پارامتر دارای بیشترین و کمترین تأثیر بر روی نشست سطح زمین هستند.

واژگان کلیدی

نشست، پارامترهای ژئوتکنیکی، طراحی آزمایش، سیستم مهندسی سنگ

ارجاع به این مقاله:

جوادی، م.، سعیدی، غ.، (1394)، ارزیابی تأثیر پارامترهای ژئوتکنیکی مصالح مسیر تونل بر روی نشست سطح زمین در تونل مترو کرج، روش‌های تحلیلی و عددی در مهندسی معدن، 5(9)، 85-97.

http://dx.medra.org/10.17383/S2251-6565(15)940918-X

* عهده دار مکاتبات: gsaeedi@uk.ac.ir

1- مقدمه

کمبود فضا در کلان شهرها و نیاز به توسعه سیستم حمل و نقل عمومی، اجرای خطوط زیرزمینی مترو در این شهرها را گریز ناپذیر نموده است. یکی از مهم‌ترین مشکلات حین اجرای این تونل‌ها، وقوع نشست و اثرات مخرب احتمالی آن بر روی سازه‌های سطحی است. از این رو تعیین مقدار نشست ناشی از حفاری‌های زیرزمینی و مقایسه آن با مقدار نشست مجاز سازه‌های سطحی امری بسیار مهم و قابل توجه است [1]. جابجایی‌های ناشی از احداث تونل در سطح زمین به فاکتورهای زیادی از جمله وضعیت زمین‌شناسی، وضعیت آب‌های زیرزمینی، هندسه و عمق تونل، روش حفاری، کیفیت و مدیریت ساخت وابسته است. آگاهی از میزان تأثیر هر کدام از پارامترهای تأثیرگذار می‌تواند باعث انجام اقدامات پیشگیرانه به منظور جلوگیری از ایجاد صدمه به ساختارهای سطحی و یا کاهش آن شود [2].

تاکنون مطالعات زیادی به منظور پیش‌بینی نشست در اثر حفر تونل در محیط‌های شهری انجام گرفته است. به طور کلی رویکردهای مختلفی که برای پیش‌بینی نشست سطح زمین مورد استفاده قرار می‌گیرند عبارتند از: مدل‌های فیزیکی، روش‌های تجربی، روش‌های تحلیلی، روش‌های عددی و روش‌های مبتنی بر هوش مصنوعی [1]. در سالیان اخیر به‌صورت بسیار گسترده از روش‌های عددی در خصوص مسائل مربوط به نشست استفاده شده است. در ادامه به عنوان نمونه به تعدادی از مطالعات انجام شده در دهه اخیر اشاره شده است.

در تحقیقی که به وسیله چاکری و همکارانش به انجام رسیده است تأثیر پارامترهایی مانند عمق، فشار روباره، ابعاد تونل و فشار سینه‌کار در حفاری مکانیزه با روش متعادل‌کننده فشار زمین بر روی کنترل نشست‌های سطحی بررسی شده است [3]. کالتر و مارتین به هنگام حفاری یک تونل که با روش جدید اتریشی انجام می‌گرفت تحقیقی بر روی میزان تأتیر جت گروتینگ بر روی نشست سطح زمین انجام دادند. در این تحقیق نشان داده شده است که استفاده از این روش منجر به کاهش پارامتر افت حجم می‌شود[4]. چن و همکاران در بررسی نشست حاصل از حفاری تونل‌های چندگانه در تایوان با استفاده از روش‌های تجربی و عددی متوجه کارایی بالاتر روش‌های عددی شدند [5]. در مطالعه‌ی دیگری که توسط مولر و ورمر در آلمان صورت گرفته، کارایی و صحت روش‌های عددی در بررسی نشست سطح زمین و هم‌چنین امکان تحلیل سیستم نگهداری با استفاده از این روش مورد تائید قرار گرفته است [6]. کاراکوس و فدرول به نتایج مطلوبی در خصوص پیش‌بینی نشست سطح زمین ناشی از حفر تونل در مصالح رسی با استفاده از نرم‌افزارهای *FLAC2D* و *ABAQUS* دست یافتند [7]. حوائج و همکاران با استفاده از مدلسازی عددی و روش‌های آماری به بررسی نشست سطح زمین ناشی از حفر تونل‌های مترو با ماشین‌های حفاری تونل از نوع متعادل‌کننده فشار زمین (*EPB TBM*)، در محیط‌های رسی اشباع پرداخته و دریافتند که پارامترهای فشار سینه‌کار، فشار تزریق، همگرایی، مدول الاستیک خاک و عمق تونل بیشترین تأثیر را بر میزان نشست دارند. در این تحقیق یک مدل آماری برای پیش‌بینی میزان نشست در محیط رسی اشباع از آب نیز ارائه شد[8]. دباغ و همکاران در مورد شبیه‌سازی نشست سطح زمین در معادن لایه‌ایی شیب‌دار با استفاده از روش المان مرزی ناپیوستگی در جابجایی، مطالعاتی انجام دادند. در این پژوهش از میان پارامترهای توده‌سنگ، تأثیر ضریب پواسون و مدول یانگ بر روی نشست سطحی بررسی شد. نتایج مطالعه انجام گرفته نشان می‌دهد که ضریب پواسون هیچ اثری بر میزان نشست ناشی از معدنکاری نداشته و ضریب یانگ بر روی میزان نشست و کرنش، اثر معکوس دارد[9]. کولیوند و شریف‌زاده در مطالعات خود دریافتند که افزایش وزن ساختمان موجب افزایش نشست سطح زمین می‌شود. از طرف دیگر نتایج مطالعه انجام گرفته نشان می‌دهد که صرف‌نظر از وزن ساختمان، به واسطه وجود پی ساختمان و صلبیت ناشی از آن، نشست در سطح کاهش می‌یابد. افزایش عرض ساختمان منجر به کاهش نشست و افزایش طول ساختمان، نشست در سطح زمین را افزایش می‌دهد. هر چند عرض ساختمان فاکتور مؤثرتری نسبت به طول ساختمان در کنترل رفتار متقابل ساختمان- تونل است[10].

در این تحقیق به بررسی میزان تأثیر مهمترین پارامترهای ژئوتکنیکی بر روی نشست سطح زمین در مناطق آبرفتی پرداخته شده است. بدین منظور تجزیه و

تحلیل همزمان روابط بین پارامترهای موثر بر رفتار توده‌سنگ که در مطالعات پیشین توجه کمتری به آن شده، مورد توجه قرار گرفته است. یکی از روش‌هایی که می‌تواند به منظور غلبه بر این مشکل و تحلیل همزمان تأثیر پارامترهای ژئوتکنیکی مورد استفاده قرار گیرد، روش طراحی آزمایش[1] است[11]. به عبارت دیگر دلیل اصلی استفاده از این روش، امکان تغییر همزمان چند پارامتر ژئوتکنیکی در یک آزمایش است. بدین منظور ابتدا با استفاده از نرم‌افزار تفاضل محدود *FLAC3D* محدوده مورد نظر مدلسازی شد. با حصول اطمینان از کارایی مدل عددی تهیه شده، یک فرآیند طراحی آزمایش با استفاده از آنالیز دامنه‌ایی[2] و روش تاگوچی[3] به انجام رسید. از طرفی به منظور قضاوت در خصوص سیستم‌های پیچیده همواره استفاده از دانش افراد خبره از کارایی بالایی برخوردار است. به همین دلیل در این مطالعه جهت بهره‌گیری از دانش افراد خبره در خصوص ارزیابی تأثیر پارامترهای ژئوتکنیکی مصالح در برگیرنده تونل بر روی نشست سطح زمین، از سیستم مهندسی سنگ نیز استفاده شده است. در نهایت نتایج به دست آمده ناشی از به کارگیری این دو روش با یکدیگر مقایسه شده است.

2- زمین شناسی و مشخصات منطقه مورد مطالعه

عملیات اجرایی به منظور احداث خط 2 قطار شهری کرج از سال 1384 آغاز شده است. بر اساس سیاست کلی، این خط به طول 26/87 کیلومتر در دو فاز طراحی گردیده است. فاز یک شامل 15 ایستگاه و 14/25 کیلومتر تونل و فاز دو شامل 9 ایستگاه و 12/35 کیلومتر تونل است[12].

به طور کلی شهر کرج بر روی رسوبات آبرفتی جوان شکل گرفته است. رسوبات آبرفتی گستره کرج حاصل فعالیت رودخانه کرج و سیلاب‌های فصلی منشاء گرفته از دره‌های موجود در ارتفاعات شمالی این منطقه می‌باشد. بر اساس بررسی‌های انجام گرفته رسوبات آبرفتی این گستره را می‌توان به گروه‌های تراس‌های رودخانه‌ایی قدیمی، پادگانه‌های رودخانه‌های جوان و مخروط افکنه‌های جوان تقسیم‌بندی نمود. مخروط افکنه کرج که در مسیر رودخانه کرج تشکیل شده، وسیع‌ترین و ژرف‌ترین مخروط افکنه منطقه است[12].

از لحاظ جنس خاک، ضعیف‌ترین نوع مصالح در سمت غربی خط 2 (شامل قطعه اول و بخشی از قطعه دوم) قرار دارد. بنابراین پیش‌بینی می‌شود بیشترین مشکل از نظر میزان نشست سطح زمین در این قسمت‌ها وجود داشته باشد. در جدول‌های شماره 1 و 2 به ترتیب مشخصات مصالح آبرفتی مسیر تونل در محدوده قطعه‌های 1 و 2 ارایه شده است.

جدول1: مشخصات ژئومکانیکی مصالح آبرفتی قطعه اول [13]

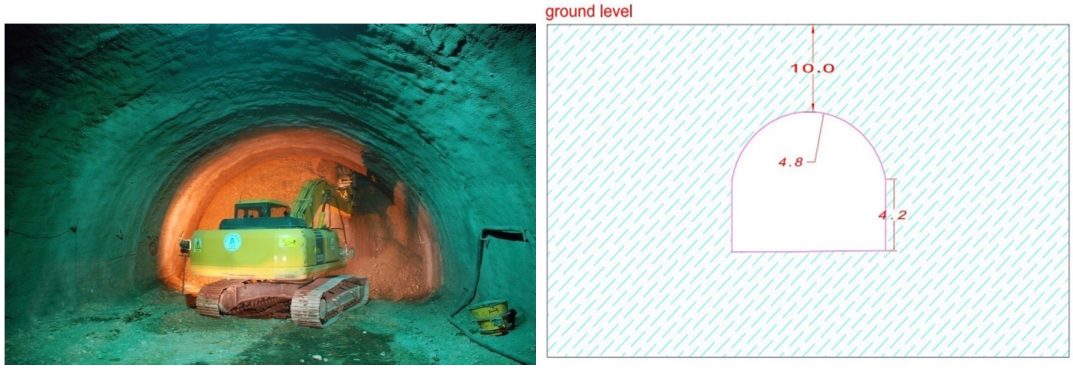
پارامتر	واحد	محدوده A تا D	محدوده D تا E
زاویه اصطکاک داخلی	درجه	30	32
چسبندگی	KPa	0/1	0
وزن مخصوص طبیعی خاک	gr/cm^3	1/95	1/95
مدول الاستیسیته	MPa	25	30
نسبت پواسون	-	0/3	0/3

جدول 2: مشخصات ژئومکانیکی مصالح آبرفتی قطعه دوم[14]

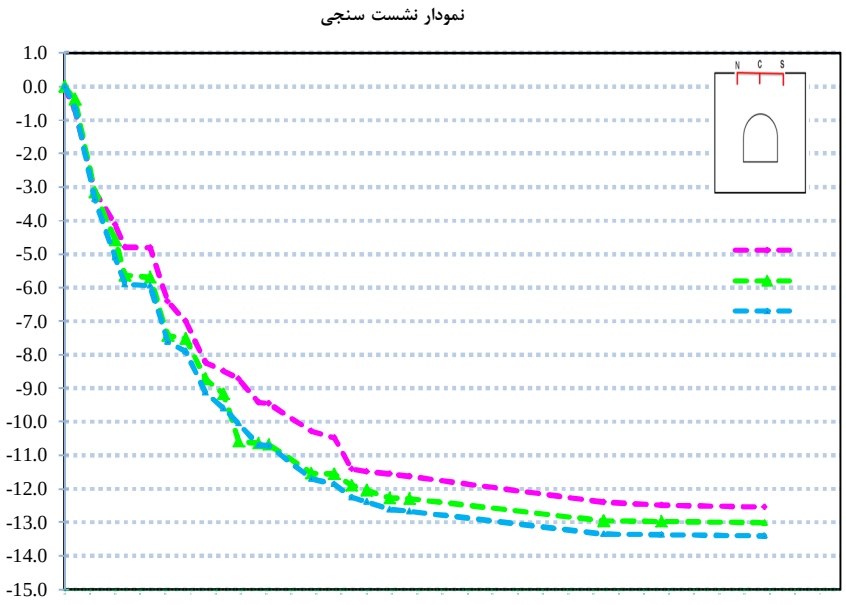
پارامتر	واحد	لایه L1	زیر لایه L2-1	زیر لایه L2-2	زیر لایه L2-3
زاویه اصطکاک داخلی	درجه	20	32	36	40
چسبندگی	KPa	50	35	25	6
وزن مخصوص طبیعی خاک	gr/cm^3	1/86	2/01	2/04	2
مدول الاستیسیته	MPa	40	50	80	100
نسبت پواسون	-	0/4	0/35	0/3	0/3

حفاری این تونل به صورت مکانیکی با استفاده از ماشین‌های حفار هیدرولیکی به روش تونلسازی جدید اتریشی (*NATM*) انجام می‌شود. نگهداری موقت تونل شامل لتیس‌گیردر (به فواصل 0/7 تا 1/5 متر) مدفون شده در 30 سانتی‌متر شاتکریت به همراه دو لایه مش به ابعاد 15x15 است. نگهداری نهایی تونل نیز از لاینینگ بتنی به ضخامت 30 سانتی‌متر تشکیل شده است. در بیشتر موارد نگهداری اصلی با فاصله زمانی زیادی بعد از نگهداری موقت نصب می‌شود. مقطع و روش حفاری تونل در شکل 1 نشان داده شده است.

عملیات رفتارنگاری این پروژه با دقت خاصی طراحی و اجرا شده است. بخش عمده‌ایی از رفتارنگاری انجام گرفته مربوط به عملیات نشست‌سنجی است. در شکل 2 نمونه‌ایی از گراف‌های رفتارنگاری نشان داده شده است.



شکل 1: مقطع و روش حفاری تونل

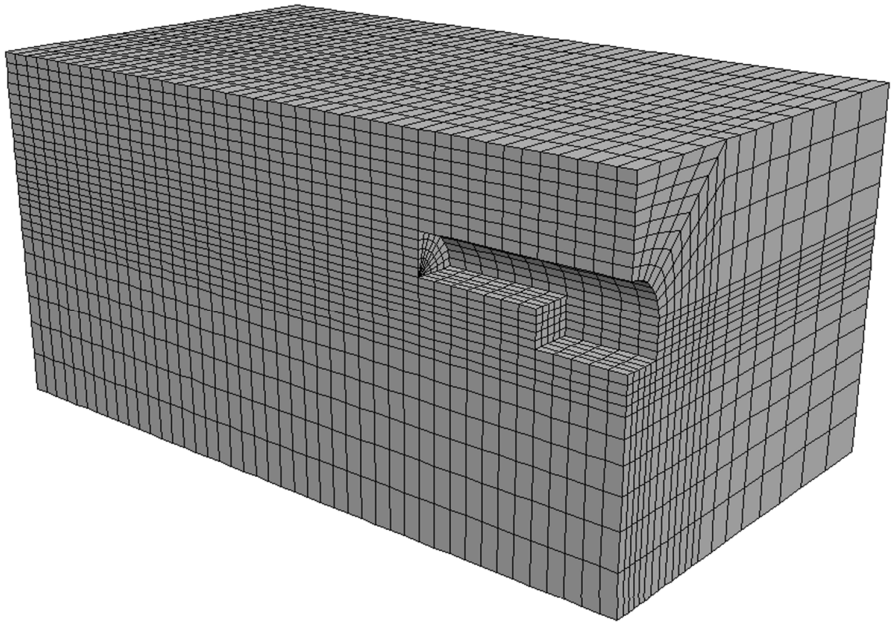


شکل 2: نمونه‌ایی از گراف‌های نشست سنجی محدوده مورد مطالعه

3- مدلسازی عددی

در این مطالعه از نرم افزار *FLAC3D* به منظور بررسی میزان تاثیر پارامترهای ژئومکانیکی بر روی نشست سطح زمین استفاده شد. این نرم افزار بر اساس روش عددی تفاضل محدود سه‌بُعدی بوده و برای حل مسائل مکانیک خاک و سنگ در محیط‌های پیوسته مورد استفاده قرار می‌گیرد.

با توجه به داده‌های ژئوتکنیکی ناحیه، ژئومتری و نحوه اجرای تونل، برای شبیه‌سازی عملیات حفاری و نگهداری، بلوکی به ابعاد 90 متر طول 50 متر عرض و 44 متر عمق در محیط نرم افزار ایجاد شد (شکل 3).



شکل 3: بلوک ساخته شده در محیط *FLAC3D*

یکی از مسائل مهمی که در مدلسازی عددی باید مدنظر قرار داشته باشد، انتخاب مدل رفتاری مناسب برای توده سنگ محدوده مورد مطالعه است. به منظور تعریف جنس مصالح در محل احداث خط 2 متروی کرج، مدل رفتاری موهر-کولمب انتخاب گردید. بدین ترتیب علاوه بر پارامترهای زاویه اصطکاک داخلی، وزن مخصوص، چسبندگی و مقاومت کششی خاک که در جدول‌های شماره 1 و 2 ارائه شده، نیاز به آگاهی از مقدار عددی پارامترهای مدول حجمی و مدول برشی مصالح مسیر است. براساس توصیه‌های نرم‌افزار برای محاسبه مدول حجمی و مدول برشی توده‌سنگ از روابط (1) و (2) استفاده شد.

$$k = \frac{E}{3(1-2\nu)} \quad (1)$$

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (2)$$

به گونه‌ایی که در این روابط K مدول حجمی، G مدول برشی، E مدول الاستیک و ν نسبت پواسون مصالح دربرگیرنده تونل است.

به منظور اعمال شرایط مرزی نیز از مرزهای استاندارد موجود در نرم افزار استفاده شده است. در این نوع شرایط مرزی، جابجایی مرزهای کناری در جهت y آزاد بوده و در جهت x ثابت می‌شوند. مرز پایین نیز در همه جهات ثابت بوده و مرز بالایی آزاد گذاشته می‌شود. پس از اعمال شرایط مرزی و شرایط اولیه، مدل ساخته شده برای رسیدن به تعادل اولیه حل گردید. در ادامه به منظور شبیه‌سازی عملیات اجرایی تونل که با استفاده از روش جدید اتریشی به انجام می‌رسد، حفاری قسمت بالایی تونل به طول 80 متر و بخش زیرین آن به طول 70/5 متر با طول گام حفاری 1/5 متر مدل شد.

تحلیل نتایج به دست آمده گام نهایی در یک فرآیند مدلسازی عددی است. در این تحقیق قبل از انجام هرگونه تحلیلی، خروجی‌های نرم افزار با مقادیر واقعی ثبت شده توسط عملیات رفتارنگاری مقایسه شد. بدین منظور در دو موقعیت مختلف با ویژگی‌های زمین‌شناسی نسبتاً متفاوت که عملیات حفاری در این مناطق نیز به اتمام رسیده، مدل ساخته شده مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج این بررسی در جدول 3 ارایه شده است. مقایسه نتایج نرم‌افزار با نتایج واقعی اندازه‌گیری شده، نشان دهنده‌ی صحت مدلسازی انجام گرفته و دقت نسبتاً قابل قبول مدل عددی ساخته شده است.

جدول 3: ارزیابی نتایج مدل‌سازی عددی در مقایسه با مقادیر نشست اندازه‌گیری شده

موقعیت	جنس مصالح	بیشینه نشست (mm)		دقت پیش‌بینی
		اندازه‌گیری شده	پیش‌بینی شده	
1	*SP-SM* و *SM*	45	37	حدود 80 درصد
2	*GM-GC* و *GM*	7	6٫3	حدود 90 درصد

4- استفاده از روش طراحی آزمایش

هدف اصلی از انجام این تحقیق بررسی میزان تأثیر مهم‌ترین پارامترهای ژئوتکنیکی مصالح مسیر تونل بر روی نشست سطح زمین در مناطق آبرفتی است. همان‌گونه که قبلاً نیز اشاره شد در مطالعات پیشین تجزیه و تحلیل همزمان روابط بین پارامترهای موثر بر رفتار توده سنگ کمتر مورد توجه قرار گرفته است. بدین منظور روش طراحی آزمایش مورد استفاده قرار گرفت. طراحی آزمایش‌ها یک راهکار علمی است که در طی آن با ایجاد تغییرات هدفمند در عوامل موثر بر یک سیستم و بررسی به وجود آمده در خروجی، درک وسیعی از چگونگی اثر این عوامل بر پاسخ به دست می‌آید. به طور کلی طراحی آزمایش‌ها به یکی از سه روش تک عاملی، فاکتوریل کامل و یا فاکتوریل جزئی انجام می‌گیرد. در روش تک عاملی یکی از عوامل تغییر داده می‌شود در حالی که سایر عوامل ثابت هستند. در صورت وجود اثر متقابل بین متغیرها، آنالیز نتایج این روش غیردقیق خواهد بود. در روش فاکتوریل کامل تمام حالت‌های ممکن در خصوص متغیرها در نظر گرفته می‌شود. این روش دارای دقت بالا و نیازمند صرف هزینه و زمان زیادی است. در روش فاکتوریل جزئی که روش آماری نیز نامیده می‌شود، تعدادی از ترکیب‌های ممکن بین متغیرها انتخاب می‌شود و پس از انجام آزمایش‌های مورد نیاز، تحلیل نتایج انجام می‌گیرد[11].

روش تاگوچی یکی از پرکاربردترین روش‌های فاکتوریل جزئی است که در این تحقیق از این ابزار استفاده شده است. به عبارت دیگر دلیل اصلی استفاده از این روش، امکان تغییر همزمان چند پارامتر ژئوتکنیکی در یک مدل عددی و تحلیل نتایج به دست آمده است.

4-1- انتخاب شاخص آزمایش[4]

هنگام استفاده از روش طراحی آزمایش و زمانی که مقادیر مربوط به آزمایشات در دسترس هستند یک متغیر تحت عنوان شاخص آزمایش می‌تواند به منظور کمک به انجام یک قضاوت صحیح مورد استفاده قرار گیرد. یک شاخص آزمایش مناسب باید اولاً نسبت به پارامترهای ورودی حساسیت داشته باشد و ثانیاً قابل اندازه‌گیری باشد[15]. در این تحقیق شاخص آزمایش به صورت رابطه (3) تعریف شده است:

$$TI = \left(\frac{S\max}{HR}\right)\times 10 \qquad (3)$$

به گونه‌ایی که در رابطه (1)، TI شاخص آزمایش، $S_{\max}$ بیشینه نشست و HR شعاع هیدرولیکی فضای زیرزمینی است. شعاع هیدرولیکی فضای زیرزمینی از رابطه (4) محاسبه می‌شود.

$$HR = \frac{A}{P} \qquad (4)$$

در این رابطه A مساحت و P محیط فضای زیرزمینی است.

4-2- آنالیز حساسیت

در این تحقیق پنج پارامتر زاویه اصطکاک داخلی (φ)، چسبندگی (C)، مدول الاستیسیته (E)، نسبت پواسون (ν) و وزن مخصوص (γ) به عنوان فاکتورهای مؤثر بر نشست در طراحی آزمایش انتخاب گردید. همان‌گونه که از جدول‌های 1 و 2 مشاهده می‌شود، مقادیر مربوط به هرکدام از پارامترهای مورد نظر برای نواحی مختلف پروژه متفاوت است. همچنین در پروژه‌های مختلف مقدار این پارامترها در یک محدوده‌ی وسیع قابل تغییر است. در ادامه رویکرد مورد استفاده به منظور بررسی میزان تأثیر هر کدام از پارامترهای مورد اشاره تشریح شده است.

آزمایش‌های هدف در این پژوهش بر اساس روش تاگوچی طراحی شده است. برای کاربرد روش طراحی آزمایش چهار سطح برای فاکتورهای آزمایش انتخاب شد. مقادیر کمی مربوط به چهار سطح تعیین شده برای فاکتورهای آزمایش در جدول 4 ارائه شده است.

جدول 4: مقادیر انتخاب شده برای چهار سطح فاکتورهای آزمایش

سطح	فاکتور آزمایش				
	ν	$E(Mpa)$	$\gamma(kg/m^3)$	$C(kpa)$	φ
1	0/3	75	1600	10	25
2	0/325	100	1700	20	30
3	0/350	125	1800	30	35
4	0/375	150	1900	40	40

در طراحی آزمایش‌ها به روش تاگوچی از جدول‌های خاصی تحت عنوان آرایه‌های متعامد[5] استفاده می‌شود. استفاده از این جدول‌ها طراحی آزمایش‌ها را بسیار آسان می‌کند. بدین منظور برای بررسی اثرات فاکتورهای آزمایش باید آرایه متعامد مناسب در نظر گرفته شود. در مرحله‌ی بعدی یک آرایه متعامد مناسب، مطابق با جدول 5 ایجاد شد. در این جدول ستون آخر مربوط به شاخص آزمایش انتخاب شده است.

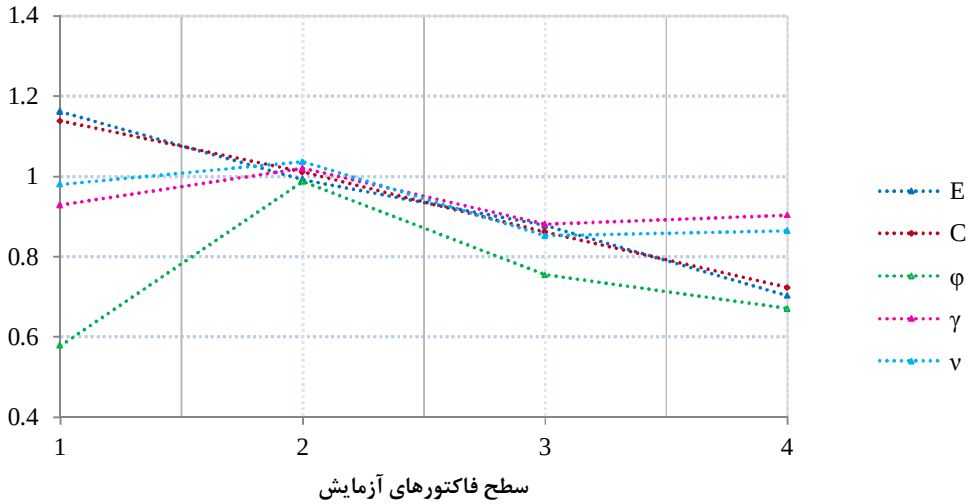
جدول 5: جدول متعامد طراحی آزمایش و نتایج طرح‌های اجرا شده

شماره آزمایش	نسبت پواسون	مدول الاستیک	وزن مخصوص	چسبندگی	زاویه اصطکاک داخلی	شاخص آزمایش
1	*I*	*I*	*I*	*I*	*I*	1/79
2	*II*	*II*	*II*	*II*	*I*	1/65
3	*III*	*III*	*III*	*III*	*I*	1/06
4	*IV*	*IV*	*IV*	*IV*	*I*	0/78
5	*IV*	*III*	*II*	*I*	*II*	1/15
6	*III*	*IV*	*I*	*II*	*II*	0/75
7	*II*	*I*	*IV*	*III*	*II*	1/22
8	*I*	*II*	*III*	*IV*	*II*	0/83
9	*II*	*IV*	*III*	*I*	*III*	0/78
10	*I*	*III*	*IV*	*II*	*III*	0/79
11	*IV*	*II*	*I*	*III*	*III*	0/67
12	*III*	*I*	*II*	*IV*	*III*	0/78
13	*III*	*II*	*IV*	*I*	*IV*	0/82
14	*IV*	*I*	*III*	*II*	*IV*	0/6
15	*I*	*IV*	*II*	*III*	*IV*	0/50
16	*II*	*III*	*I*	*IV*	*IV*	0/50

پس از تهیه جدول متعامد و محاسبه‌ی شاخص آزمایش برای تمام حالت‌های ممکن، یک آنالیز دامنه‌ای بر روی نتایج آزمایشات انجام گرفت. با استفاده از این روش ارتباط بین هر کدام از فاکتورها و شاخص آزمایش به صورت آماری مورد بررسی قرار می‌گیرد. به منظور روشن شدن روش آنالیز دامنه‌ای پارامتر E به عنوان نمونه شرح داده شده است:

- با استفاده از اطلاعات جدول 4 طرح‌هایی که مقدار E در آن‌ها در سطح یک قرار دارد انتخاب شده و میانگین شاخص آزمایش این طرح‌ها محاسبه می‌شود (برای سادگی این مقدار تحت عنوان میانگین شاخص آزمایش نامیده می‌شود).
- میانگین شاخص آزمایش تمام طرح‌ها، برای سه سطح باقیمانده نیز محاسبه می‌شود.
- تفاضل بین بیشینه و کمینه میانگین شاخص آزمایش برای چهار سطح مختلف محاسبه می‌شود. این اختلاف تحت عنوان مقدار محدوده شاخص آزمایش برای پارامتر E نامیده می‌شود.

با کاربرد گام‌های بالا برای پنج فاکتور آزمایش مورد نظر، ارتباط بین شاخص آزمایش و فاکتورهای پنج‌گانه مشخص می‌شود و مقدار محدوده تمام فاکتورهای آزمایش محاسبه می‌شود. بدین ترتیب نمودار میانگین شاخص آزمایش در مقابل سطوح آزمایش قابل دستیابی است (شکل 4). همان‌گونه که نتایج نشان می‌دهد مقدار محدوده فاکتورهای φ، C، γ، E و ν به ترتیب 0/41، 0/41، 0/18، 0/46 و 0/14 است. بدین ترتیب محدوده پارامتر E دارای بیشترین مقدار و محدوده پارامتر ν دارای کمترین مقدار است. بنابراین نتایج آنالیز دامنه‌ایی انجام گرفته نشان می‌دهد که E و ν به ترتیب دارای بیشترین و کمترین تاثیر بر روی شاخص آزمایش و به تبع آن بر روی نشست سطح زمین است.



شکل 4: میانگین شاخص آزمایش محاسبه شده برای فاکتورهای آزمایش

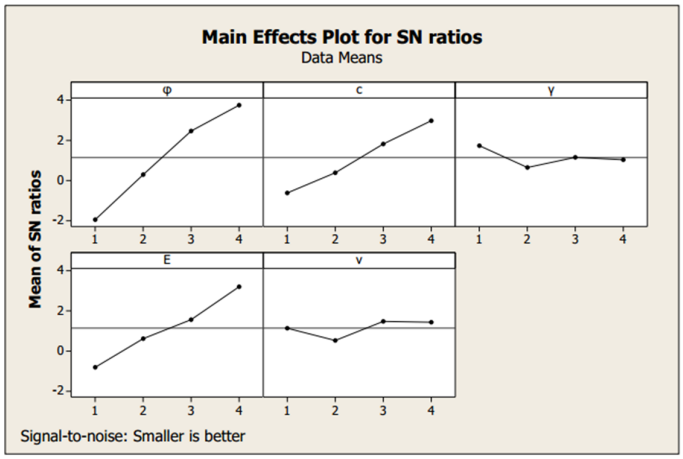
همان‌گونه که اشاره شد یکی از مزایای استفاده از تکنیک طراحی آزمایش این است که با تغییراتی آگاهانه در متغیرهای ورودی (پارامترهای ژئوتکنیکی)، می‌توان تغییرات خروجی (نشست سطح زمین) را مشاهده کرد. در این تحقیق برای تحلیل آرایه متعامد ایجاد شده از نرم افزار *Minitab* و استفاده از عبارت "هر چه کوچکتر، بهتر" به صورت رابطه (5) بهره گرفته شده است.

$$\left(\frac{S}{N}\right)i = -10\times\log\left[sum\left(Y**2\right)/n\right] \qquad (5)$$

به گونه‌ایی که در این رابطه $(S/N)i$ سیگنال به نویز آزمایش iام، Yi میزان نشست درطرح iام و n تعداد تکرار آزمایشات است. نتایج حاصل از آنالیز انجام گرفته توسط نرم افزار در شکل 5 نشان داده شده است.

همان‌گونه که نتایج نشان می‌دهد پارامترهای مدول الاستیسیته، زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی دارای تاثیر بیشتری بر روی نشست سطح زمین هستند. همچنین وزن مخصوص خاک و ضریب پواسون دارای اثر کمتری بر روی نشست سطح زمین هستند.

نمودار پراکندگی مقادیر مربوط به TI در مقابل فاکتورهای آزمایش شامل زاویه اصطکاک داخلی، چسبندگی، مدول الاستیک، ضریب پواسون و وزن مخصوص در شکل 6 نشان داده شده است.



شکل 5: اثرات اصلی پارامتر بر روی میزان نشست

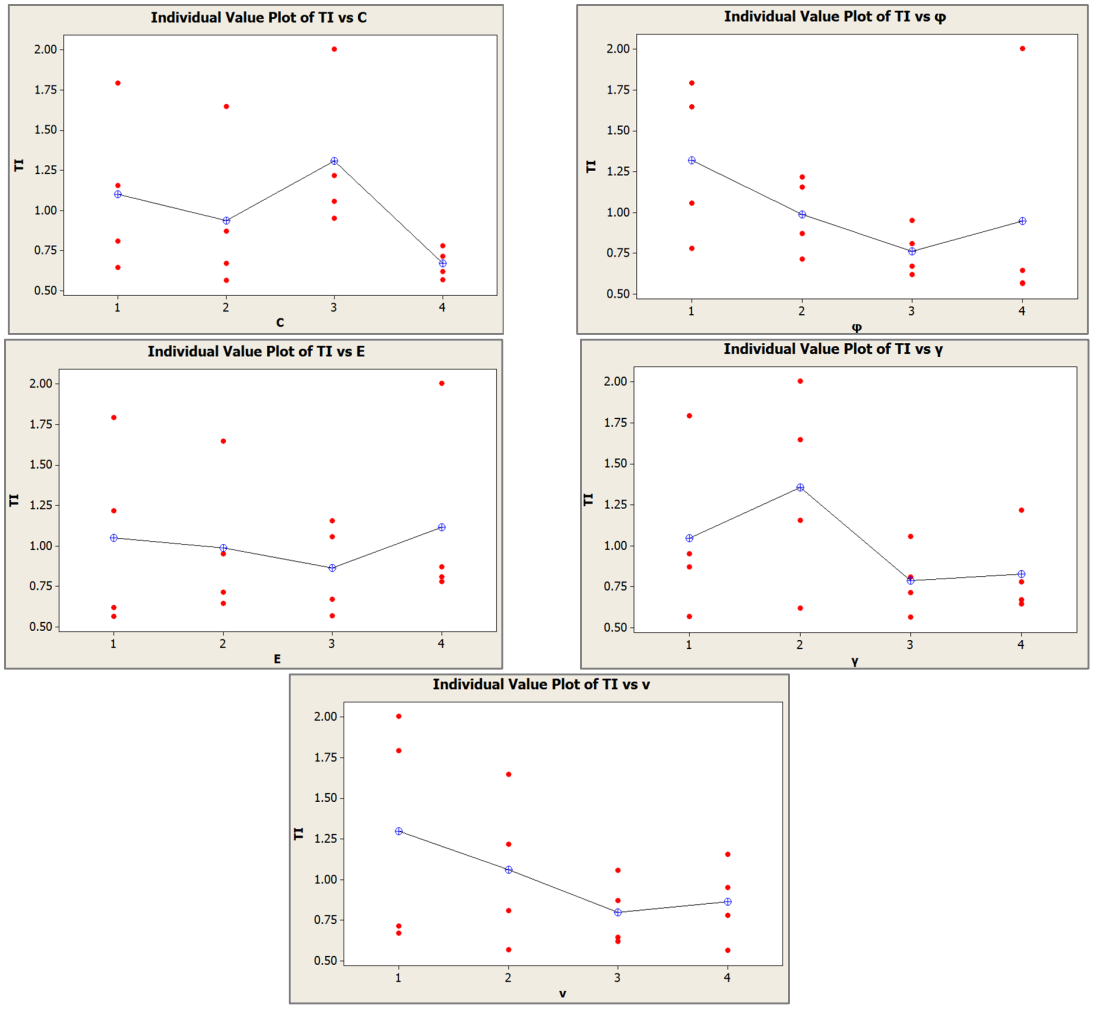
ماهیت متفاوت فاکتورهای آزمایش مورد بررسی موجب شده است که پارامترهای مختلف دارای تأثیر متفاوتی بر روی نشست سطح زمین باشند. نمودارهای ارایه شده در شکل 6 نیز نشان می‌دهد هنگامی که یک فاکتور آزمایش در سطوح پایین ثابت نگه داشته می‌شود و سایر فاکتورها تغییر می‌کند، مقدار TI در یک بازه بزرگتری تغییر می‌کند. عکس این موضوع در خصوص ثابت نگه داشتن فاکتورهای آزمایش در سطوح بالا هم صادق است.

5- سیستم مهندسی سنگ

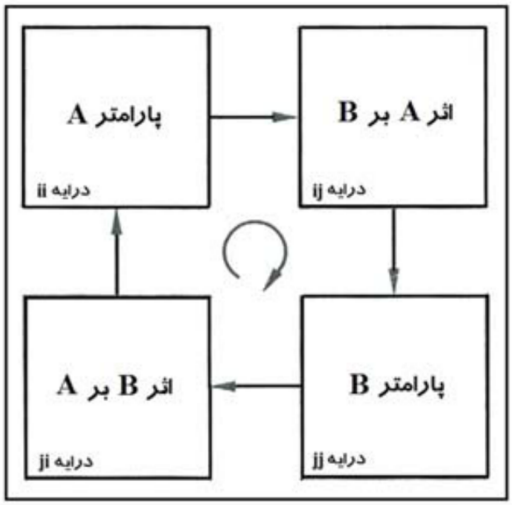
همان‌گونه که پیش‌تر نیز اشاره شد، هدف اصلی از انجام این تحقیق بررسی میزان تأثیر پنج پارامتر مدول الاستیسیته، چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی، وزن مخصوص و نسبت پواسون بر روی نشست سطح زمین در مصالح آبرفتی است. سیستم مهندسی سنگ روشی است که امکان تجزیه و تحلیل همزمان روابط بین پارامترهای موثر توده‌سنگ، ساختگاه و سازه را دارد و آثار ناشی از اندرکنش آنها را مورد بررسی قرار می‌دهد[16]. به همین دلیل در این مطالعه از این روش نیز استفاده شده است. ماتریس اندرکنش عنصر کلیدی در سیستم مهندسی سنگ است و جهت فهرست کردن پارامترهای مؤثر در یک پروژه مهندسی و نمایش اندرکنش بین آن‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. ساختار کلی یک ماتریس اندرکنش در شکل 7 نشان داده شده است. در این روش پارامترهای موثر روی قطر اصلی ماتریس قرار می‌گیرند و اندرکنش پارامترها با یکدیگر با کدگذاری در عناصر غیرقطری (Pi) ماتریس مشخص می‌شود.

روش‌های متعددی شامل روش دوتایی، روش نیمه کمی خبره (ESQ)[6] استفاده از شیب نمودار پارامترها، تطبیق از یک رویکرد سیستمی و روش صریح برای کدگذاری ماتریس اندرکنش پیشنهاد شده است. در بین روش‌های پیشنهادی، روش نیمه کمی خبره با وجود ضعف‌های آشکار تا حد زیادی موفق بوده و در بسیاری از مطالعات نیز به کار گرفته شده است.

بعد از کدگذاری ماتریس اندرکنش می‌توان مقادیر علت و اثر پارامترهای مورد استفاده را محاسبه نمود. مجموع مقادیر ردیف به عنوان علت یا اثر پارامتر iام روی سیستم و مجموع مقادیر ستون به عنوان تاثیر یا اثر سیستم روی پارامتر مورد نظر تعریف می‌شود. در شکل 8 چگونگی اثرگذاری یک پارامتر و همچنین تأثیرپذیری آن از سیستم در قالب یک دستگاه مختصات علت-اثر نشان داده شده است[16].



شکل 6: پراکندگی مقادیر *TI* در مقابل فاکتورهای آزمایش



شکل7: مفهوم کلی ماتریس اندرکنش

5-1- کاربرد سیستم مهندسی سنگ

به منظور استفاده از سیستم مهندسی سنگ در گام نخست بایستی ماتریس اندرکنش تهیه شود. ماتریس اندرکنش تهیه شده به منظور بررسی میزان تأثیر پارامترهای مورد نظر بر روی نشست سطح زمین در جدول 6 ارائه شده است. لازم به ذکر است که جهت تکمیل این ماتریس روش نیمه خبره *ESQ* به کار گرفته شده است.

پس از تکمیل ماتریس اندرکنش اثر پارامترهای مختلف در سیستم (C) و اثرپذیری آن از سایر پارامترهای سیستم (E) محاسبه شد. در شکل 9 نمودار علت-اثر مدل پیشنهادی نشان داده شده است.

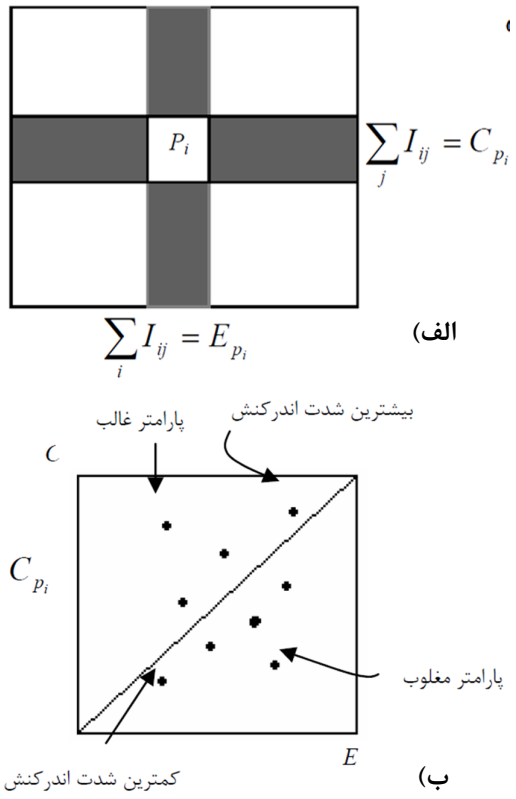
جدول 6: ماتریس اندرکنش تکمیل شده

E	1	1	1	0
2	C	0	1	1
2	1	φ	1	0
1	0	1	γ	0
0	0	0	1	v

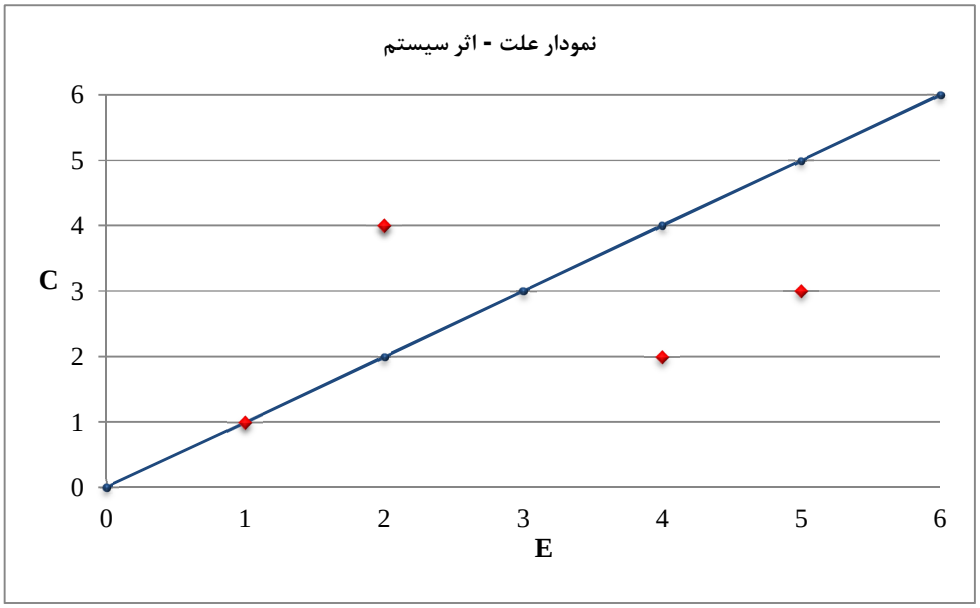
موقعیت هر نقطه در فضای C-E وضعیت اندرکنش آن پارامتر را مشخص می‌کند. بدیهی است هرچه مقدار عددی حاصل جمع $(E+C)$ پارامتر مورد نظر بیشتر باشد، شدت اندرکنش آن پارامتر با کل سیستم بیشتر است. همان‌گونه که نمودار شکل 10 نیز نشان می‌دهد، پارامتر مدول الاستیسیه دارای بیشترین مقدار اندرکنش با سایر پارامترهای مدل است. همچنین نسبت پواسون کمترین اندرکنش را در ماتریس اندرکنش دارد.

در گام بعدی وزن فعالیت پارامتر i ام از رابطه (6) محاسبه شد.

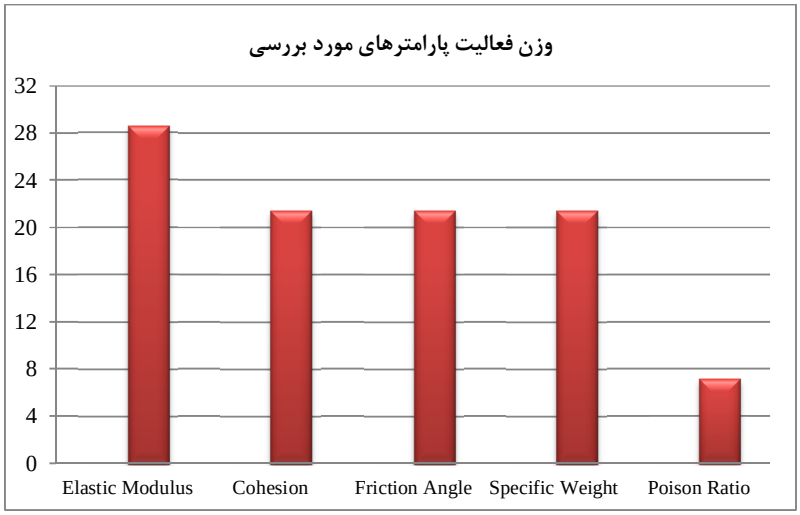
$$ai = \frac{Ci + Ei}{\sum_{i=1}^{n} Ci + Ei} \qquad (6)$$



شکل 8: الف) مفهوم اثر و تاثیر مربوط به هر یک از پارامترها در ماتریس اندرکنش، ب) نمودار علت - اثر[16]



شکل 9: نمودار علت - اثر سیستم مهندسی سنگ به کار گرفته شده



شکل 10: نمودار تأثیر وزن پارامترهای مورد بررسی بر روی نشست سطح زمین

به گونه‌ایی که در این رابطه a_i وزن فعالیت پارامتر i ام، Ei اثرپذیری پارامتر از سیستم و Ci اثر پارامتر در سیستم است. مقادیر مربوط به Ci، Ei، $Ci+Ei$ و a_i برای پارامترهای مورد بررسی در جدول 7 ارایه شده است.

جدول 7: فاکتورهای مربوط به فعالیت پارامترهای مختلف در سیستم

پارامتر	C	E	$C+E$	ai (%)
مدول الاستیک	3	5	8	28/6
چسبندگی	4	2	6	21/4
زاویه اصطکاک داخلی	4	2	6	21/4
وزن مخصوص	2	4	6	21/4
نسبت پواسون	1	1	2	7/1

نتایج مربوط به میزان فعالیت پارامترهای مورد بررسی به صورت یک نمودار میله‌ای در شکل 10 نشان داده شده است. همان‌گونه که نتایج نشان می‌دهد مدول الاستیک و نسبت پواسون به ترتیب بیشترین و کمترین تأثیر را بر روی نشست سطح زمین را دارند.

6- بحث و نتیجه‌گیری

کمبود فضا در کلان شهرها و نیاز به توسعه سیستم حمل و نقل عمومی، اجرای خطوط زیرزمینی مترو در این شهرها را موجب شده است. وقوع نشست و اثرات مخرب احتمالی آن بر روی سازه‌های سطحی یکی از مهم‌ترین مشکلات حین اجرای تونل‌سازی در محیط‌های شهری است. از این رو آگاهی از میزان تأثیر پارامترهای مختلفی مانند وضعیت زمین‌شناسی، هندسه و عمق تونل و روش حفاری موضوع مهم و قابل توجهی است. در این تحقیق به بررسی میزان تأثیر مهم‌ترین پارامترهای ژئوتکنیکی مصالح آبرفتی شامل چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی، مدول الاستیک، نسبت پواسون و وزن مخصوص مصالح دربرگیرنده بر روی نشست سطح زمین پرداخته شده است. به منظور تجزیه و تحلیل همزمان پارامترهای موثر بر رفتار مصالح دربرگیرنده تونل از دو روش طراحی آزمایش و یک مدل مبتنی بر سیستم مهندسی سنگ استفاده شد. دلیل اصلی استفاده از روش طراحی آزمایش امکان اعمال تغییرات آگاهانه در متغیرهای ورودی (پارامترهای ژئوتکنیکی) مدل و بررسی تغییرات خروجی (نشست سطح زمین) است. همچنین سیستم مهندسی سنگ به دلیل کارایی بالای استفاده از دانش افراد خبره در خصوص سیستم‌های پیچیده به کار گرفته شد. استفاده از طراحی آزمایش نیازمند شبیه‌سازی محدوده مورد مطالعه است. بدین منظور بخشی از تونل خط دو مترو کرج با استفاده از نرم‌افزار تفاضل محدود *FLAC3D*، مدل گردید. مقایسه نتایج مدل ساخته شده با اطلاعات رفتارنگاری محدوده پروژه نشان دهنده‌ی کارایی مدل عددی است. استفاده از طراحی آزمایش نیازمند تعریف یک متغیر به عنوان شاخص آزمایش جهت کمک به انجام یک قضاوت صحیح در خصوص نتایج آزمایش‌ها است. در این پژوهش از نسبت

بیشینه نشست سطح زمین به شعاع هیدرولیکی به عنوان شاخص آزمایش بهره گرفته شد. بعد از تعریف شاخص آزمایش، یک تحلیل دامنه‌ایی و تحلیل حساسیت با استفاده از روش تاگوچی بر روی نتایج انجام گرفت. در تحلیل دامنه‌ایی انجام گرفته پارامترهای مدول الاستیک و نسبت پواسون با محدوده 0/46 و 0/14 به ترتیب دارای بیشترین و کمترین تأثیر بر روی شاخص آزمایش و به تبع آن بر روی نشست سطح زمین هستند. همچنین به منظور تحلیل آرایه متعامد ایجاد شده از نرم افزار *Minitab* استفاده شد. تحلیل معیار سیگنال به نویز آزمایش‌های انجام گرفته نشان می‌دهد که پارامترهای مدول الاستیسیته، زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی دارای تاثیر بیشتری و وزن مخصوص خاک و ضریب پواسون دارای اثر کمتری بر روی نشست سطح زمین هستند. خروجی‌های مدل مبتنی بر سیستم مهندسی سنگ نیز انطباق نسبی با نتایج طراحی آزمایش دارد. خروجی‌های مدل مبتنی بر سیستم مهندسی سنگ نیز تقریباً در انطباق با نتایج طراحی آزمایش است. تحلیل ماتریس اندرکنش تکمیل شده در مدل *RES* نشان می‌دهد که بیشترین و کمترین وزن فعالیت پارامترهای مورد بررسی به ترتیب مربوط به مدول الاستیک با وزن 28/6 و نسبت پواسون با وزن 7/1 است. بنابراین از میان پارامترهای مورد بررسی این دو پارامتر به ترتیب دارای بیشترین و کمترین تأثیر بر روی نشست سطح زمین هستند.

12- مراجع

[1] Esmaeeli, M. Tavakolian, H. (2009). Analysis settlement caused by excavation of the east-west part of the line No. 7 of Tehran subway and its effects on the surface structures. The 8th iranian tunnelling conference. in Persian.

[2] Eric Leca; 2007; "Settlements induced by tunneling in Soft Ground"; Tunneling and Underground Space Technology 22.

[3] Chakeri, H., Ozcelik, Y., & Unver, B. (2013). Effects of important factors on surface settlement prediction for metro tunnel excavated by EPB. Tunnelling and Underground Space Technology, 36, 14-23.

[4] Coulter, S., & Martin, C. D. (2006). Effect of jet-grouting on surface settlements above the Aeschertunnel, Switzerland. Tunnelling and underground space technology, 21(5), 542-553.

[5] Chen, S. L., Gui, M. W., & Yang, M. C. (2012). Applicability of the principle of superposition in estimating ground surface settlement of twin-and quadruple-tube tunnels. Tunnelling and Underground Space Technology, 28, 135-149.

[6] Möller, S. C., & Vermeer, P. A. (2008). On numerical simulation of tunnel installation. Tunnelling and Underground Space Technology, 23(4), 461-475.

[7] Karakus, M., & Fowell, R. J. (2005). Back analysis for tunnelling induced ground movements and stress redistribution. Tunnelling and Underground Space Technology, 20(6), 514-524.

[8] Havaej, M. Rahmannejad, R. Ebrahimi, M.A. (2012). Assesment of surface settlement by using statistical and numerical methods in tunnelling by EPB TBM. Mining engineering journal, 15(7), 67-76. in Persian.

[9] Dabagh, A. Fatehi, M. Forghani, H. (2009). Simulation of surface subsidence in steep layer mines by using the displacement dicontinuity boundary element method Mining engineering journal, 4(7), 67-76. in Persian.

[10] Kolivand, F. Sharifzadeh, M. (2014). Study the effects of weight and the geometery of the buildings on the surface sttlement in SEM tunnelling by using fininte element method. Engineering tunnel and underground spaces journal, 2(2), 133-143. in Persian.

[11] Xu, N., Kulatilake, P. H., Tian, H., Wu, X., Nan, Y., & Wei, T. (2013). Surface subsidence prediction for the WUTONG mine using a 3-D finite difference method. Computers and Geotechnics, 48, 134-145.

[12] Hegza Compani. (2011). The progress report of the Karaj urban railway line 1 project. in Persian.

[13] Darya khak pey counsulting engineers. (2005). Geotechnical studies on the second part of the Karaj urban railway. in Persian.

[14] Zamin pazhoh Company. (2005). Geotechnical studies on the first part of the Karaj urban railway. in Persian.

[15] Taguchi G. (1987). Systems of experimental design. New York: Uni. Pub.

[16] Hudson, J. (1992). Rock engineering systems. Theory and practice.

1- Experimental Design
2- Range Analysis
3- Taguchi Method
4- Test Indicator
5- Orthogonal
6- Expert Semi Quantitative

Evaluation of Geotechnical Parameters Effect on the Surface Settlement in Karaj Subway Tunnel

M. Javadi[1], Gh. Saeedi[2]*
1- PhD. Student of Mining, Dept. of Mining, Shahid Bahonar University of Kerman, Iran
2- Assistant Professor, Dept. of Mining, Shahid Bahonar University of Kerman, Iran

* Corresponding Author: gsaeedi@uk.ac.ir
(Received: May 2015, Accepted: October 2015)

Abstract

Population growth and lack of space in some cities increased the need for public transportation and implementation of subway lines. One of the most important hazards in urban area tunneling is the possible effects of the settlement on the surface structures. In this research, the effect of the main geotechnical parameters on the surface settlement has been studied. Literature show that simultaneous analysis of the parameters that affect tunnel behavior is not considered well. For this aim experimental design can be used because of its ability to make changes in input variables (geotechnical parameters) and observe the output (settlement) changes. On the other side use the expert knowledge in a Rock Engineering System is useful in order to make judgment about complex systems. For this reason, this method was also applied in order to achieve research goal. A part of Karaj Metro tunnel Line was modeled by FLAC3D in order to use experimental design. Compare the simulation results with monitoring data indicates the efficiency of numerical model in condition like this. Next, a range and sensitivity analysis was performed by using the Taguchi method. Results show that E and ν, respectively has the highest and the lowest impact on the surface settlement. The output of the rock engineering system is also show that E and ν, respectively has the highest and lowest interaction with other parameters of the interaction matrix.

Keywords

Settlement, Geotechnical Parameters, Experimental Design, Rock Engineering System

Cite This Paper:
Javadi, M., Saeedi, Gh. (2015). "Evaluation of Geotechnical Parameters Effect on the Surface Settlement in Karaj Subway Tunnel." Journal of Analytical and Numerical Methods in Mining Engineering **5**(9): 85-97. *http://dx.medra.org/10.17383/S2251-6565(15)940918-X*