



بررسی اثرات اندرکنش تونلهای شهری بر یکدیگر

جلیل هادی^{*}، محمد کشاورز بخشایش^۲

^{*} دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران- ژئوتکنیک، واحد زنجان، دانشگاه آزاد اسلامی، زنجان، ایران

^۲ استادیار، گروه علوم پایه، دانشگاه پیام نور، واحد زنجان

(jalilhadi127@yahoo.com)

(تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۰۸/۲۹، تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۱۱/۱۱)

چکیده

با گسترش تکنولوژی و شهرنشینی، پروژه های گسترده و وسیعی طراحی و اجرا می شوند که بعضی از این پروژه ها باید در شرایط نامطلوب ژئوتکنیکی اجرا شود. در هنگام وقوع زلزله در چنین شرایطی، اثرات متقابل خاک سازه حائز اهمیت می باشد و رفتار سیستم سازه ها را به مقدار قابل توجهی تحت تاثیر قرار می دهد. اثرات اندرکنش خاک سازه اختلافات پاسخ سازه در حالتی که این پاسخ با فرض برابر بودن حرکت پی سازه با حرکت میدان آزاد زمین محاسبه شده است را نسبت به پاسخ سازه با در نظر گرفتن حرکت اصلاح شده یا واقعی پی، نشان می دهد و این اختلافات به مشخصه های حرکت میدان آزاد زمین بعلاوه خواص سازه و تکیه گاه انعطاف پذیر (خاک مجاور و زیر پی) بستگی دارد. یکی از اصلی ترین مباحث در طراحی سازه های سنگین و سخت با پی های عمیق مثل سکوهاى ساحلى، ساختمان های بلند و نیروگاه های هسته ای مساله اندرکنش خاک و سازه می باشد. با این وجود، در تحلیل دینامیکی سازه ها اغلب فرض می شود که خاک زیر شالوده صلب است و از اثرات اندرکنشی میان خاک و سازه صرف می شود. در این حالت پاسخ سازه تنها متاثر از خواص دینامیکی خود سازه است و انعطاف پذیری خاک، تاثیری در پاسخ سازه ندارد. در این واقعیت، پاسخ سازه متاثر از خواص دینامیکی خاک، فونداسیون و سازه می باشد که با فرض صلب بودن خاک زیر شالوده در تناقض است.

کلمات کلیدی

اندرکنش خاک - سازه، روش های تحلیل اندرکنش، پاسخ لرزه ای.



Investigating the Interaction Effects of Urban Tunnels

Jalil Hadi ^{1*}, Mohamad Keshavarz Bakhshaesh ²

^{*1} Ms.c. of Geotechnical Engineering, Department of Civil Engineering, Zanjan Branch, Islamic Azad University, Zanjan, Iran

² Assistant Professor, Department of Basic Sciences, Payam Nour University, Zanjan Branch

(jalilhadi127@yahoo.com)

(Date of received: 20/11/2023, Date of accepted: 31/01/2024)

ABSTRACT

With the development of technology and urbanization, extensive projects are designed and implemented, and some of these projects must be implemented in unfavorable geotechnical conditions. When an earthquake occurs in such conditions, the mutual effects of the soil and the structure are important and the behavior of the system is important. It affects structures significantly. The effects of the soil interaction of the structure show the differences in the response of the structure in the case where this response is calculated assuming that the movement of the foundation is equal to the movement of the free field of the earth, compared to the response of the structure considering the modified or real movement of the foundation, and these differences are characteristic. The movement of the free field of the ground depends on the properties of the structure and the flexible support (adjacent soil and under the foundation). One of the main topics in the design of heavy and hard structures with deep foundations, such as coastal platforms, tall buildings, and nuclear power plants, is the interaction between the soil and the structure. However, in the dynamic analysis of structures, it is often assumed that the soil under the foundation is rigid and the interaction effects between the soil and the structure are used. In this case, the response of the structure is only affected by the dynamic properties of the structure itself, and the flexibility of the soil has no effect on the response of the structure. In this fact, the response of the structure is affected by the dynamic properties of the soil, foundation and structure, which contradicts the assumption that the soil under the foundation is rigid. Soil-structure interaction occurs as a result of earthquake waves passing through the soil-structure system.

Keywords:

Soil-structure interaction, Interaction analysis methods, Seismic response.



۱- مقدمه

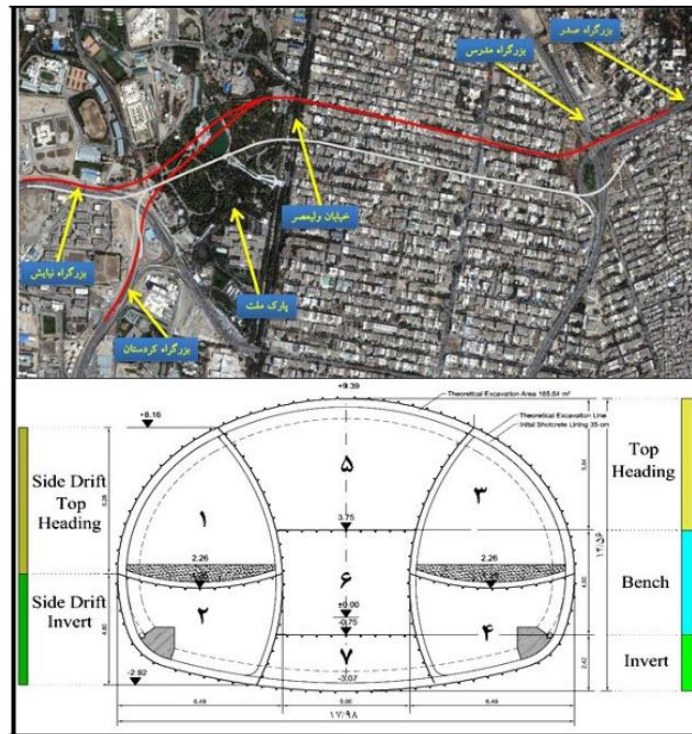
رشد جمعیت در اکثر شهرها باعث افزایش نیاز به اجرای زیرساختهای سطحی و زیرسطحی شده است. هرچه که محیطهای شهری شلوغ تر و فضای سطحی محدودتر می شود، نیاز به سازه های زیر-سطحی مانند تونلها برای تأمین این زیرساختها، بیشتر احساس می شود. احداث تونل در زمینهای سست شهری، باعث نشست و جابجایی محیط اطراف تونل می شود. عوامل متعددی بر جابجایی های زمین در اثر ساخت تونل تأثیرگذار هستند. شرایط زمین شناسی و ژئوتکنیکی، روش تونلسازی، وجود یا عدم وجود ساختمانهای سطحی یا زیرسطحی، ترتیب مراحل حفاری در روشهای ساخت چند مرحلهای، هندسه تونل، عمق تونل، عوامل اجرایی، شرایط آب زیرزمینی و غیره، همگی از عواملی هستند که بر میزان نشست سطح زمین در حین ساخت تونل تأثیر دارند. تونلسازی باعث تغییر شکل در ساختمانهای سطحی و زیرسطحی شده، از طرفی وجود این ساختمانها نیز بر جابجایی زمین در اثر تونلسازی تأثیر گذارند [۱]. از اینرو بررسی اندرکنش بین تونل وسازه های سطحی از نظر تأثیری که سازه های سطحی بر میزان تغییرشکلهای ناشی از تونلسازی دارند، دارای اهمیت ویژه ای است. طی چند دهه گذشته محققین متعددی از جمله کاترباخ و برث (۱۹۳۱)، لی و روه (۱۹۸۱)، دساری و همکاران (۱۹۸۱)، آوگارد و همکاران (۱۹۸۳)، کومیا و همکاران (۱۹۸۸)، بورد و همکاران (۲۰۰۰)، تانگ و همکاران (۲۰۰۰)، دیاس و همکاران (۲۰۰۰)، گودز و سانتوس پیرا (۲۰۰۰)، لی و ان جی (۲۰۰۸)، ورمر و همکاران (۲۰۰۸) مطالعات فراوانی در مورد نشست ناشی از تونلسازی در محیط شهری و عوامل موثر بر آن انجام داده اند. اکثر محققین با تمرکز بر عواملی از قبیل نوع خاک، خصوصیات زمین-شناسی، شرایط تنش اولیه، تأثیر ضریب فشار جانبی (K)، آبیزوتربی خاک و روش تونلسازی، بیشتر در ارزیابی تأثیر حفاری تونل بر آسیب های وارده بر ساختمان تالش نموده و کمتر به بررسی تأثیر وجود ساختمانها و عوامل مرتبط با آن، بر منحنی نشست سطح زمین پرداخته اند [۸-۱۶]. شریفزاده و همکاران (۲۰۱۱)، مطالعاتی در خصوص تأثیر هندسه ساختمانها بر نشست ناشی از تونلسازی مرحله ای انجام داده اند. در این مطالعات تأثیر پارامترهای هندسی به طور جداگانه مورد ارزیابی قرار گرفته است [۱۵]. به همین دلیل در این مقاله سعی شده است تا از میان پارامترهای هندسی سازه ها، به بررسی تأثیر نسبت فاصله مرکز ثقل سازه از محور مرکزی تونل به قطر تونل بر منحنی های نشست و جابجایی سطح زمین در اثر حفر تونل پرداخته شود. بدین منظور از روش عددی اجزاء محدود با استفاده از کد محاسباتی *Plaxis 3D Tunnel* استفاده شده است. در ادامه پس از معرفی پروژه تونل نیایش و تشریح خصوصیات زمین شناسی و پارامترهای ژئوتکنیکی اجرایی پروژه، به ارزیابی تأثیر تغییر پارامتر نسبت فاصله مرکز ثقل سازه از محور مرکزی تونل به قطر تونل بر منحنیهای نشست و جابجایی های افقی سطح زمین پرداخته شده، و در نهایت با ارائه نتایج، بحث و نتیجه گیری انجام گرفته است.

۲- معرفی پروژه تونل نیایش

تونل نیایش در بخش شمالی شهر تهران و حد فاصل بزرگراه نیایش و بزرگراه کردستان در غرب و بزرگراه صدر در شرق احداث شده است. تونل نیایش با سطح مقطع حفاری حدود ۸۰۰ متر مربع و طول بیش از ۱/۷ کیلومتر، در زمره بلندترین تونلهای شهری جهان محسوب می شود. مقطع اصلی تونلها دارای عرض حدود ۱۳ متر و ارتفاع ۱۸/۴ متر می باشد. این تونل با توجه به سطح مقطع نسبتاً بزرگ و خصوصیات لایه های مختلف خاکی با استفاده از روش تونلسازی گالری های کناری حفاری شده است. هر کدام از گالریهای کناری در دو مرحله پیشانی و کف، و گالری میانی در سه مرحله پیشانی، پله و کف حفاری شده است (شکل ۱). به منظور شناسایی لایه های زیرسطحی، تعیین پارامترهای ژئوتکنیکی و ارزیابی سطح آب زیرزمینی، و نیز با توجه به احداث تونل در زیر محدوده پر جمعیت شهری و عبور تونل از زیر بزرگراهها، خیابانها و دریاچه پارکملت، مطالعات زمینشناسی و ژئوتکنیکی گستردهای در این پروژه انجام گرفته است. بر این اساس تعداد ۸۰ گمانه با عمق ۸۴ تا ۵۴ متر و تعداد ۸۵ چاهک به عمق ۱۰ تا ۸۰ متر برای مطالعه شرایط زیرسطحی حفاری شده است. در گمانه های حفاری شده آزمایش نفوذ مخروط استاندارد (SPT) و آزمایش پرسیمتر انجام شده و همچنین نمونه های مورد نیاز جهت انجام آزمایشهای آزمایشگاهی اخذ گردیده است. آزمایشهای دانسیته برجا و بارگذاری صفحههای و برش مستقیم در چاهکها انجام شده اند. آزمایشهای آزمایشگاهی انجام شده در این مطالعات شامل آزمایش دانه بندی، حدود اتربرگ، دانسیته، آزمایش برش مستقیم،



آزمایش سه محوری و نفوذپذیری می باشند. با توجه به نتایج آزمایشها، بطور کلی خاک منطقه از شن ماسه‌های متراکم و ماسه‌های متراکم تشکیل شده است که هر دوی آنها دارای مقداری سیلت و رس هستند (GC, GM, SC, SM). بر اساس تقسیم بندی ترزاقی، خاکهای ریزدانه پروژه حاضر در محدوده خاکهای بسیار سخت قرار دارند. در حالی که خاکهای درشت دانه در محدوده خاکهای خیلی متراکم قرار میگیرند [۱۵]. در شکل (۱) موقعیت پروژه، مشخصات هندسی و نمایی از مقطع تونل نیایش نمایش داده شده است. خصوصیات ژئوتکنیکی لایه های خاک در جدول (۱) ارائه شده است.



شکل ۱: پلان مسیر تونل نیایش، مقطع تونل و ترتیب مراحل حفاری.

جدول ۱: پارامترهای ژئوتکنیکی لایه های خاکی مدلسازی شده.

پارامتر	واحد	عمق ۰-۱۵ متر	عمق >۱۵ متر
وزن مخصوص غیر اشباع	(kN/m^3)	۱۶	۱۸
وزن مخصوص اشباع	(kN/m^3)	۱۷	۱۶
مدول الاستیسیته باریرداری	(kN/m^2)	$2/423 \times 10^5$	$2/827 \times 10^5$
مدول الاستیسیته سکانتی	(kN/m^2)	$8/077 \times 10^4$	$9/423 \times 10^4$
مدول الاستیسیته ادنومتر	(kN/m^2)	$8/077 \times 10^4$	$9/423 \times 10^4$
ضریب پواسون	---	۰/۲	۰/۲
چسبندگی	(kN/m^2)	۳۰	۴۰
زاویه اصطکاک داخلی	درجه	۳۴	۳۶
ضریب فشار جانبی	---	۰/۴۴	۰/۴۱



۳- نحوه مدلسازی اجزاء محدود تونل

نرم افزار *Plaxis 3D* که براساس روش اجزاء محدود پایه گذاری شده است، برای تحلیل تغییرات تنش-تغییر شکل در محیطهای پیوسته خاکی و مسائل برهمکنش بین سازه ها در چنین محیطهایی، مورد استفاده قرار می گیرد. دلیل انتخاب این نرم افزار توانایی بالا همچنین تحلیل مسائل پیچیده برهمکنش سازه های سطحی خاک سازههای زیرسطحی، بوده است. بمنظور مدلسازی این مسئله یک شبکه اجزاء محدود با استفاده از المانهای ایزوپارامتریک ۱۵ گره ای در نظر گرفته شده است. برای اجتناب از تأثیر مرزهای مدل بر نتایج تحلیل، با توجه به عرض نسبتاً زیاد تونل (۱۸ متر)، از یک شبکه اجزاء محدود با عرض ۱۳۰ متر، طول ۱۰۰ متر و ارتفاع ۶۳ متر استفاده شده است. برای اعمال شرایط مرزی نیز از مرزهای استاندارد استفاده شده است. در این نوع شرایط مرزی، جابجایی مرزهای کناری در جهت *y* آزاد بوده و در جهت *x* ثابت می شوند. مرز پائین نیز در همه جهات ثابت، و مرز بالایی آزاد گذاشته می شود (شکل ۲). بمنظور مدلسازی رفتار خاک نیز از مدل رفتاری خاک سخت شونده استفاده شده است [۱۶]. جهت مدلسازی پوشش اولیه تونل از المانهای الاستیک صفحه‌ای (*Plate*) با ضخامت ۸۰ سانتیمتر استفاده شده که خصوصیات آن در جدول ۲ ارائه شده است. مدلسازی حفاری قسمتهای مختلف تونل با غیر فعال کردن المانهای خاک قسمت مورد نظر و مدلسازی سیستم نگهداری تونل با فعال کردن المانهای تعریف شده برای پوشش، انجام گرفته است.

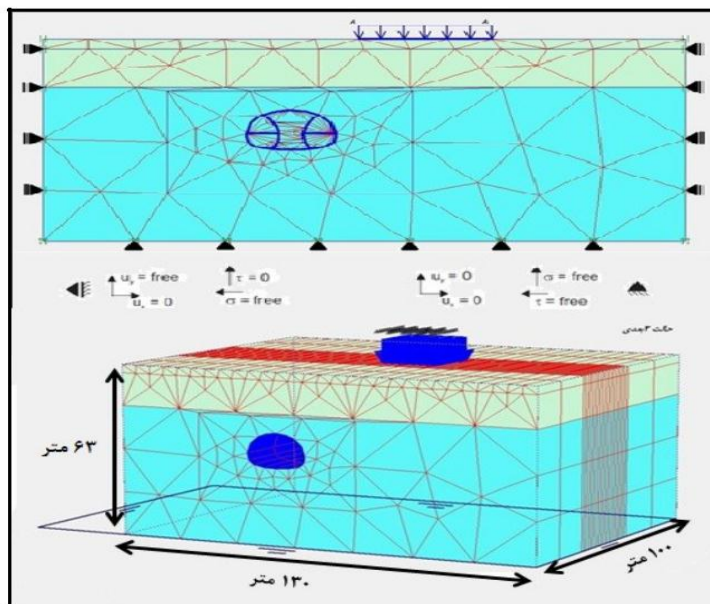
جدول ۲: پارامترهای پوشش اولیه تونل استفاده شده به منظور مدلسازی عددی.

ضریب ضربه	وزن حجمی W (kN/m/m)	ضخامت معادل d (m)	نوع المان	سختی خمشی EI (kNm ² /m)	سختی محوری EA (kN/m)
۰/۲	۷/۵	۰/۳	Elastic	$۴/۰۵ \times ۱۰^۴$	$۵/۴ \times ۱۰^۴$
<i>Eshotcrete = 18 GPa</i>					

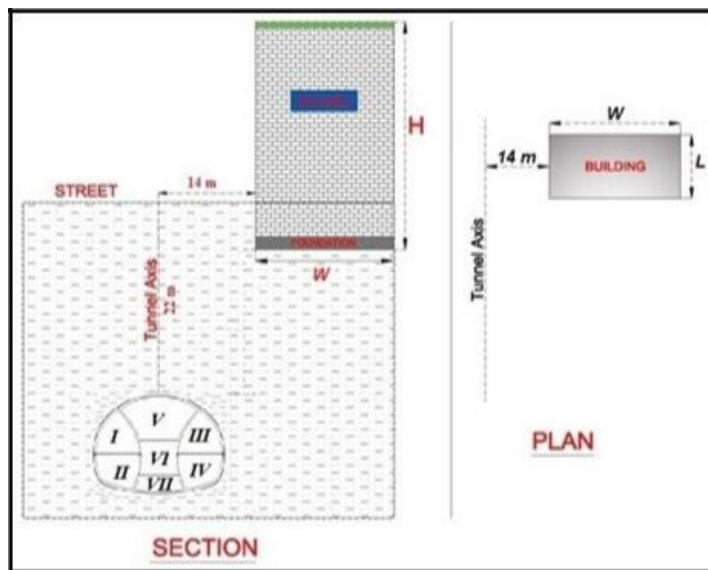
به منظور بررسی تأثیر نسبت فاصله مرکز ثقل سازه از محور مرکزی تونل به قطر تونل، در مدلسازی صورت گرفته، مشابه مقطع مورد مطالعه از پروژه مورد نظر، تونل در عمق ۲۲ متری از سطح زمین قرار دارد. بالای تاج تونل سازه‌های وجود ندارد و فاصله افقی سازه های سطحی از محور تونل ۱۵ متر است (شکل ۳). سازه های ۲، ۴ و ۸ طبقه در مدلسازی در نظر گرفته شده است. البته با توجه به اینکه در نرم افزار *Plaxis* نمی توان ارتفاع سازه را مدل کرد از بار معادل به جای ارتفاع سازه ها استفاده شده است. برای هر طبقه با ارتفاع ۸ متر، بار معادل ۱۰ کیلوپاسکال در نظر گرفته شده است. همچنین با توجه به نوع سازه های محل پروژه، پی سازه ها گسترده در نظر گرفته شده است (جدول ۳).

جدول ۳: پارامترهای پی ساختمان استفاده شده در مدلسازی عددی.

نوع طبقات	تعداد طبقات	ضخامت پی d (m)	سختی محوری EA (kN/m)	سختی خمشی EI (kNm ² /m)	وزن طبقات (بار گسترده) (kN)	ضریب ضربه پواسو
Elastic	۲	۰/۵	$۱/۰۵ \times ۱۰^۷$	$۲/۱۸۷ \times ۱۰^۵$	۲۰	۰/۲
Elastic	۴	۰/۸	$۱/۶۸ \times ۱۰^۷$	$۸/۹۶ \times ۱۰^۵$	۴۰	۰/۲
Elastic	۸	۱/۵	$۳/۱۵ \times ۱۰^۷$	$۵/۹ \times ۱۰^۶$	۸۰	۰/۲



شکل ۲: شبکه اجزاء محدود و شرایط مرزی اعمالی.



شکل ۳: پلان مربوط به وضعیت تونل نیایش و سازه ها نسبت به یکدیگر.

۴- نسبت فاصله مرکز ثقل سازه از محور مرکزی تونل به قطر تونل

با توجه با اینکه فاصله سازه نسبت به محور تونل، بر اندرکنش تونل و سازه تاثیر قابل توجهی دارد این پارامتر برای ارزش گذاری سازه ها مورد توجه قرار گرفته است. اما این پارامتر متأثر از قطر تونل نیز می باشد بنابراین در ارزش گذاری سازه بهتر است این دو پارامتر با یکدیگر بررسی شوند. در این قسمت به بررسی پارامتر نسبت فاصله مرکز ثقل سازه تا محور مرکزی تونل (X) به قطر تونل (D) می پردازیم.

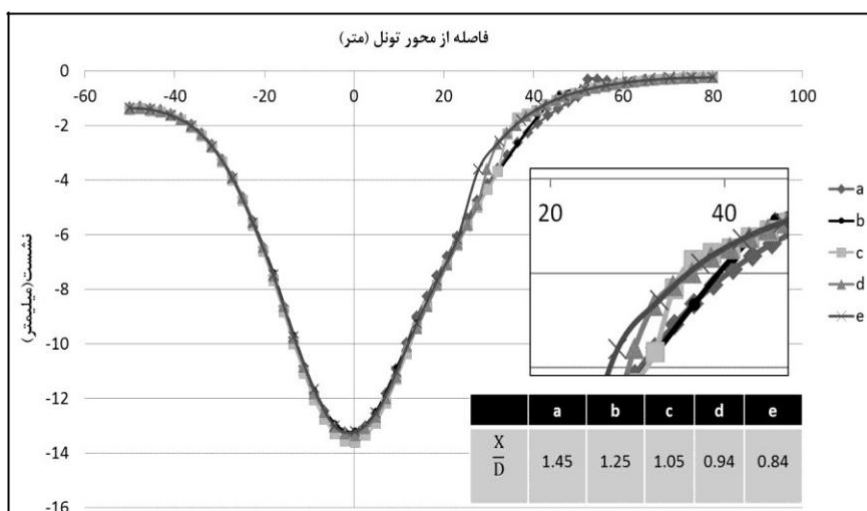


۴-۱- تاثیر تغییر نسبت X/D بر نشست عرضی

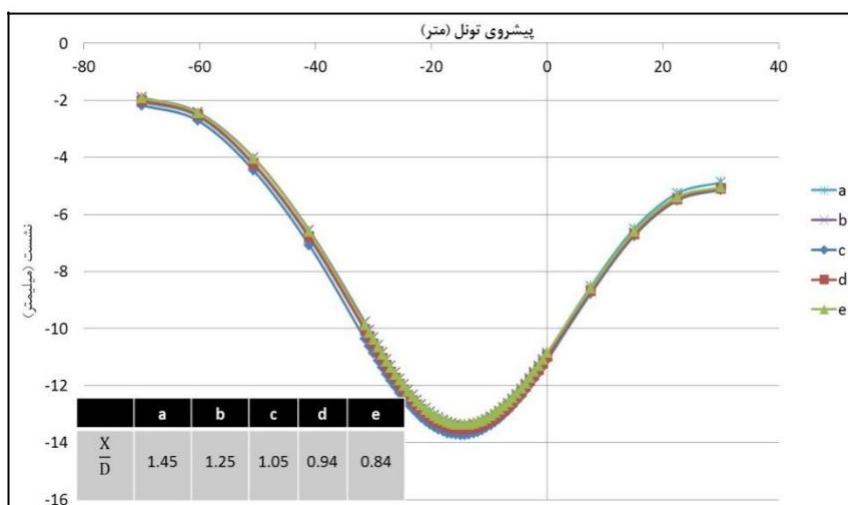
بررسی منحنی های نشست عرضی در شکل ۴ نشان می دهد با کاهش نسبت X/D ، از میزان نشست عرضی کاسته شده است. همچنین مشاهده می شود که با کاهش این نسبت نقطه عطف منحنی نشست، از فاصله ۳۸ متری به فاصله ۲۸ متری از محور تونل کاهش یافته است، که معنی کاهش محدوده تأثیر نشست نیز می باشد. با توجه به فاصلهای که سازه ها از محور تونل دارند، این تغییرات تأثیر زیادی بر میزان نشست حداکثر نخواهد داشت.

۴-۲- تاثیر تغییر نسبت X/D بر نشست طولی

در شکل ۵ و ۶ منحنیهای تغییرات نشست طولی، بالای محور تونل و در زیر مرکز ثقل سازه نشان داده شده است. در شکل ۴ مشاهده میشود که تغییرات نسبت X/D ، تأثیر زیادی بر منحنی نشست طولی در بالای محور تونل ندارد که به دلیل فاصله ای است که سازه ها از محور مرکزی تونل دارند.



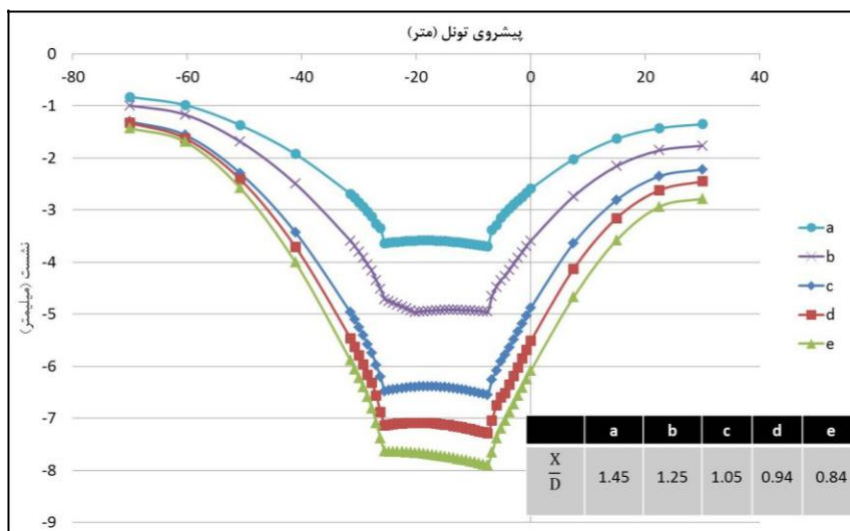
شکل ۴: تغییرات منحنی نشست عرضی به ازای تغییر نسبت X/D .



شکل ۵: تغییرات منحنی نشست طولی به ازای تغییر نسبت X/D و در بالای محور تونل.



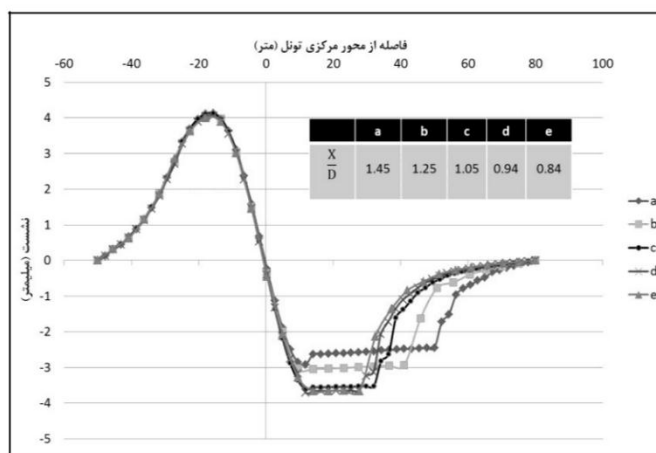
در شکل ۶، با کاهش نسبت X/D در زیر مرکز ثقل سازه، میزان حداکثر نشست طولی افزایش می یابد به طوری که میزان حداکثر نشست به ازای نسبت $1/45$ برابر $3/5$ میلیمتر است که با این مقدار به ازای نسبت $0/84$ به 8 میلیمتر افزایش می یابد.



شکل ۶: تغییرات منحنی نشست طولی به ازای تغییر نسبت X/D و در زیر مرکز ثقل سازه.

۴-۳- تاثیر تغییر نسبت X/D بر جابجایی افقی

همانطور که در شکل ۷ مشاهده می شود میزان جابجاییهای افقی با تغییر در نسبت X/D ، تغییر می کنند. شکل ۷ نشان میدهد که میزان حداکثر جابجایی افقی به ازای نسبت $1/45$ در حدود $2/5$ میلیمتر می باشد که با کاهش نسبت X/D به $0/84$ مقدار جابجایی ها به $3/5$ میلیمتر می رسد. این روند نشان می دهد که با کاهش نسبت X/D ، بر میزان جابجایی های افقی افزوده خواهد شد. از بررسی این پارامتر نتیجه می گیریم که تغییرات X/D ، از فاکتورهای مهم و موثر در اندرکنش بین تونل و سازه بوده و در ارزیابی ها و ارزش گذاری سازه این پارامتر باید مورد توجه قرار گیرد. هرچند در جدول ارزشگذاری سازه ها تاثیر پارامتر X و D به طور مجزا بررسی شده است اما با توجه به اینکه X/D ، یک پارامتر بی بعد است و تاثیر همزمان این دو پارامتر را باهم در نظر می گیرد لذا در ارزش گذاری ها بهتر است از این پارامتر استفاده شود.

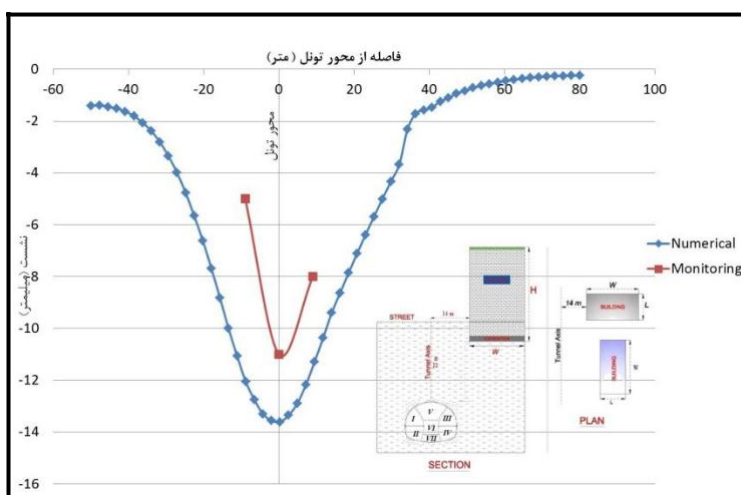


شکل ۷: تغییرات منحنی جابجایی افقی به ازای تغییر نسبت X/D .



۵- جمع بندی و نتیجه گیری

در این تحقیق تأثیر تغییر در پارامتر نسبت فاصله مرکز ثقل سازه از محور مرکزی تونل به قطر تونل که در تحقیقات پیشین محققین کمتر مورد توجه قرار گرفته بود، مورد ارزیابی قرار گرفت. جهت اعتبار سنجی مدلسازی عددی، نتایج بدست آمده با نتایج حاصل از ابزاربندی، مقایسه و ارزیابی گردید که در شکل ۸ نمایش داده شده است. از مقایسه این نتایج با نتایج مدلسازی عددی مشاهده می شود که شکل منحنی نشست و روند تغییرات هر دو از تطابق خوبی با یکدیگر برخوردارند و یکدیگر را تایید می-کنند. نتایج بدست آمده نشان می دهد با کاهش نسبت X/D ، از میزان نشست کاسته شده است. همچنین مشاهده می شود که با کاهش این نسبت نقطه عطف منحنی نشست، از فاصله ۳۸ متری به فاصله ۲۸ متری از محور تونل کاهش یافته است، که معنی کاهش محدوده تأثیر نشست نیز می باشد. تغییرات نسبت X/D ، تأثیر زیادی بر منحنی نشست طولی در بالای محور تونل ندارد که این به دلیل فاصلهای است که سازه-ها از محور مرکزی تونل دارند. با کاهش نسبت X/D در زیر مرکز ثقل سازه، میزان حداکثر نشست طولی افزایش می یابد به طوری که میزان حداکثر نشست به ازای نسبت $1/45$ برابر $3/5$ میلیمتر است که با این مقدار به ازای نسبت $0/84$ به ۸ میلیمتر افزایش می یابد. با کاهش نسبت X/D ، بر میزان جابجاییهای افقی افزوده خواهد شد. با توجه به نتایج بدست آمده از این تحقیق، تأثیر تغییرات این پارامتر در اندرکنش بین تونل و سازه را بیش از پیش باید مورد توجه و ارزیابی قرار گیرد چراکه در برخی موارد این تغییرات سبب بروز خسارات جبران ناپذیری به سازهها و یا حتی تونل خواهد شد.



شکل ۸: مقایسه نتایج حاصل از مدلسازی عددی و نتایج ابزاربندی

۶- مراجع

- 1-Jan Nikolas Franzius, 2003, **Behavior of building due to tunnel induced settlement**, PHD thesis, Imperial College of Science, Technology and Medicine, 2003.
- 2-Augarde, C. E., Burd, H. J., & Houlsby, G. T., 2008, **Some experience of modelling tunneling in soft ground using three-dimensional finite elements**, of: 4th European, 603-612
- 3-Desari, G. R., Rawlings, C. G., & Bolton, M. D., Burd, H. J., Houlsby, G. T., Augarde, C. E., & Liu, G., 2000, **Modelling tunnelling-induced settlement of masonry buildings**. Proc. Instn. Civ. Engrs. Geotech. Engineering, 143, 17-29.
- 4-Desari, G. R., Rawlings, C. G., & Bolton, M. D., 1996, **Numerical modelling of a NATM tunnel construction in London clay**, Proc. of the International Symposium on Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground. Balkema, Rotterdam, 491-496.
- 5-Dias, D., Kastner, R., & Maghazi, M., 2000, **Three dimensional simulation of slurry shield in tunnelling**, Proc. of the International Symposium on Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground. Balkema, Rotterdam, 351-356.



- 6- Guedes, P. F. M., & Santos Pereira, C., 2000, **The role of the soil K0 value in numerical analysis of shallow tunnels**, Proc. of the International Symposium on Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground. Balkema, Rotterdam, 379-384
- 7- Katzenbach, R., & Breth, H., 1981, **Nonlinear 3d analysis for NATM in Frankfurt Clay**, Proc. 10th Int. Conf. Soil Mech. and Found. Eng., vol. 1. Balkema Rotterdam, 315-318 .
- 8- Kimura, T., & Mair, R. J., 1981, **Centrifugal testing of model tunnels in soft clay**, Proc. 10th Int. Conf. Soil Mech. and Found. Eng., 319-322.
- 10- Lee, G. T. K., & Ng, C. W. W., 2002, **Three-dimensional analysis of ground settlements due to tunnelling: Role of K0 and stiffness anisotropy**, Proc. of the International Symposium on Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground. Specifique, Lyon, 617-622.
- 11- Lee, K. M., & Rowe, R. K., 1991, **An analysis of three-dimensional ground movements: the Thunder Bay tunnel**, Canadian Geotechnical Journal, 28, 25-41.
- 12-Tang, D. K. W., Lee, K. M., & Ng , C. W. W., 2000, **Stress paths around a 3 -D numerically simulated NATM tunnel in stiff clay**, Proc. of the International Symposium on Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground. Balkema, 443-449.
- 13-Vermeer, P. A., Bonnier, P. G., & MÅoller, S. C., 2002, **On a smart use of 3D-FEM in tunnelling**. Proceedings of the 8th international symposium on numerical models in geomechanics, NUMOG VIII. Balkema, Rotterdam, 361-366.
- ۱۴- شریفزاده، م، کولیوند، ف، قربانی، م، ۲۰۱۱، ارزیابی تأثیر هندسه و وزن ساختمان بر نشست سطح زمین ناشی از تونلسازی مرحله‌ای با استفاده از روش عددی اجزاء محدود، مطالعه موردی پروژه تونل نیایش، نخستین همایش آسیایی و نهمین همایش ملی تونل، تهران
- ۱۵- شرکت مهندسی مشاور عمران راهوار، ۲۰۱۶، گزارش مطالعات ژئوتکنیک و مهندسی پی پروژه تونل صدر- نیایش.
- 16-R.B. J. Brinkgreve & P.A. Vermeer, 2001, **PLAXIS 3D TUNNEL user manual**, Tokyo, A.A. Balkema.