

ارزیابی بارهای وارد بر پوشش تونل‌های مکانیزه با استفاده از مدلسازی فیزیکی

امیر حسن رضایی^{۱*}؛ هوشنگ کاتبی^۲؛ محمد احمدی عدلی^۳

۱- استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

۳- استادیار، گروه عمران، دانشگاه آزاد اسلامی مرند

دریافت دست‌نوشته: ۱۳۹۵/۰۵/۳۰؛ پذیرش دست‌نوشته: ۱۳۹۶/۱۲/۱۳

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22044/tuse.2018.4680.1280

واژگان کلیدی	چکیده
تونلسازی مکانیزه	با ارزیابی دقیق بارهای وارد و در نتیجه طراحی مناسب پوشش تونل می‌توان هزینه‌های ساخت تونلهای مکانیزه را کاهش داد. مدلسازی فیزیکی دارای نقش اساسی در مطالعات مربوط به حفاری تونل‌ها در زمینهای نرم بوده و علی‌رغم محدودیت در شبیه‌سازی تنش‌های بارها، مدل‌های فیزیکی تحت شتاب ثقل بطور عمده‌ای به کار برده می‌شوند. در تحقیق حاضر با ساخت مدل فیزیکی کوچک مقیاس ۱/۴۰، از بین مهمترین عوامل تاثیرگذار بر نیروهای داخلی ایجاد شده درون پوشش تونل‌های مکانیزه، تاثیر عمق تونل و میزان روباره بالای تونل، به همراه موقعیت قرارگیری و میزان بار سازه‌های سطحی بصورت مدلسازی فیزیکی مورد مطالعه قرار گرفته است. بعنوان یک الگوی کلی وجود سازه‌های سطحی متناسب با بار سازه سبب افزایش نیروهای پوشش تونل نسبت به حالت زمین آزاد می‌گردد. با این وجود، مقدار این تاثیر وابسته به ترکیب پارامترهای هندسی و مکانیکی تونل، سازه‌های سطحی و خاک پیرامون می‌باشد. برای تونلهای کم عمق این تاثیرات بیشتر بوده و با افزایش عمق میزان تاثیر کاهش می‌یابد. در کنار مطالعه الگوی کلی تاثیر پارامترهای مختلف بر میزان بارهای وارد بر پوشش، صحت سنجی و ارزش گذاری نتایج و اعتبار سنجی مدل‌های عددی نیز انجام گرفته است.

۱- مقدمه

تونلسازی مکانیزه به دلیل مزایای فراوان ژئوتکنیکی نسبت به روش‌های حفاری سنتی؛ از جمله امکان حفاری درگستره وسیعی از انواع مختلف خاک‌ها و شرایط سخت تراز آب زیرزمینی بالا، زمین‌های نرم یا عمق سربار کم و امکان کنترل نشست‌های سطحی به عنوان مهم‌ترین روش تونلسازی دهه‌های اخیر به ویژه در مناطق شهری مطرح گردیده است. در این روش برای نگهداری تونل از پوشش‌های بتنی پیش‌ساخته (قطعات سگمنت) استفاده می‌شود که از نظر اقتصادی بخش قابل توجهی از ساخت تونل‌ها را شامل می‌شوند. در صورت طراحی اقتصادی و مناسب آنها هزینه پروژه‌های تونلسازی به ویژه در تونل‌های بزرگ مقطع و تونل‌های طویل

به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد.

اساسی‌ترین بخش طراحی پوشش تونل‌ها ارزیابی دقیق بارهای وارد بر پوشش تونل و تاثیر عوامل مختلف بر میزان این بارها می‌باشد. معمولاً توزیع و مقدار بار وارد بر پوشش تونل‌ها به عوامل مختلفی از جمله مشخصات زمین و پوشش تونل، شرایط ساخت تونل و اندرکنش مابین خاک و سازه‌های موجود بستگی دارد. بارهای وارد بر پوشش تونل از حضور سازه‌های سطحی و زیرسطحی متاثر می‌شود و به ویژه پارامترهایی مانند سختی سازه‌ها، وزن، شکل و ابعاد فونداسیون و موقعیت قرارگیری آنها تاثیر زیادی در اندرکنش آنها با تونل دارد.

در فعالیت‌های مهندسی روش‌های متفاوتی شامل

و موقعیت آنها نسبت به محور تونل در نظر گرفته نشده است. به منظور ارائه روش‌های پیش‌بینی حرکات زمین و کرنشها در نتیجه تونلسازی در زمینهای نرم و ارزیابی بارهای وارد بر پوشش تونل روش‌های مختلفی توسط محققان ارائه شده که مهمترین این روش‌ها به چهار گروه روش‌های تحلیلی و تئوری، مدلسازی‌های عددی، مدلسازیهای فیزیکی و روش‌های تجربی مبتنی بر نتایج مطالعات موردی و مانیتورینگ پروژه‌های انجام یافته با مقیاس واقعی قابل تقسیم بندی می‌باشد. به دلیل محدودیت‌های روش‌های تحلیلی و روش‌های تجربی بویژه در حفاری‌های مکانیزه، مدلسازی‌های عددی و ساخت مدل‌های فیزیکی گسترش روز افزونی در مطالعات مربوط به تونلسازی مکانیزه داشته است. در کنار کاربرد مدلسازی‌های عددی یکی از مناسب‌ترین روش‌های مطالعه پاسخ زمین به تونلسازی کاربرد مدل‌های فیزیکی در مقیاس کوچک می‌باشد. استفاده از مدل‌های فیزیکی همواره برای مطالعه و بررسی پدیده‌های پیچیده و یا کامل شناخته نشده، یک ابزار مناسب و کارآمد بوده است. همچنین می‌توان از مدلسازی فیزیکی به منظور صحت سنجی نظریه‌های ارائه شده استفاده کرد. علی‌رغم محدودیت مدلسازی تنش‌های درجا مدل‌های فیزیکی ساخته شده تحت شتاب ثقل امکان مطالعه پارامترهای مختلف و تاثیر آنها را با دقت مناسب و تحت شرایط کنترل شده بررسی نموده و نتایج تحلیلهای عددی را ارزش گذاری کرد. روش‌های مختلفی توسط محققین قبلی برای مدلسازی فیزیکی فرآیند تونلسازی در زمینهای نرم و ثبت تغییر شکل‌های زمین حاصل از تونلسازی بکار برده شده است (Meguid, et al., 2008) و (Abdoliye & fazel, Emami, & Afshin, 2015)

در تحقیق حاضر سعی شده است با مدلسازی فیزیکی به مطالعه بیشتر موضوع پرداخته و تاثیر پارامترهای مهم و اثرگذار از میان فاکتورهای مؤثر در موضوع اندرکنش از قبیل وجود سازه‌های سطحی و بار موضعی ناشی از آنها، موقعیت قرارگیری در سطح و مشخصات هندسی سازه‌ها به همراه نسبت سربار به قطر تونل بر بارهای وارد بر پوشش تونل با دقت بیشتری مطالعه شود. با توجه به پارامترهای بسیار زیاد مؤثر در حفاری مکانیزه مشخصات هندسی تونل (از قبیل قطر، ابعاد و مشخصات پوشش تونل)، پارامترهای مختلف دستگاه (از قبیل قطر حفاری، میزان اضافه حفاری، مشخصات شیلد)

روش‌های تجربی، تحلیلی و عددی برای محاسبه تنش‌های پوشش تونل بکار برده می‌شود (Nunes & Meguid, 2009). در جمع‌بندی روش‌های مختلف طراحی پوشش تونل که در راهنمای چاپ شده توسط انجمن بین‌المللی تونلسازی ارائه شده است بارهای متداول در طراحی سگمنت‌ها شامل سه گروه بارهای الزامی، بارهای ثانویه و بارهای ویژه در نظر گرفته می‌شود که در خصوص تونل‌های مترویی مهم‌ترین بار طراحی فشار خاک سربار می‌باشد (ITA, 2000). در حال حاضر برای تعیین بارهای وارد بر پوشش تونل عمدتاً از روش‌های عددی و یا روابط ترزاقی و فشار کاهش یافته بر مبنای سست شدگی زمین استفاده می‌شود که بر اساس ایجاد قوس در خاکهای همگن ارائه شده است که بعنوان نمونه می‌توان به آیین‌نامه طراحی تونل‌های سپری ژاپن اشاره کرد. امروزه تکنولوژی روز ماشین‌های حفار امکان حفاری تونل را بدون سست شدگی زمین اطراف فراهم آورده است و بنابراین روابط متداول از قبیل رابطه فشار کاهش یافته ترزاقی قادر به ارزیابی دقیق بارهای اعمالی حتی در پروژه‌های اجرا شده در زمینهای همگن نمی‌باشد (Hashimoto, et al., 2002). برخی اندازه‌گیری‌های انجام شده در پروژه‌های اجرا شده نشان می‌دهد مقدار تئوری بارهای اعمالی در نظر گرفته شده در طراحی پوشش تونل‌ها حاصل از روش‌های مرسوم ممکن است بسیار بزرگتر از مقادیر واقعی باشد؛ بویژه در شرایط مناسب ژئوتکنیکی زمین (Mashimo & Ishimura, 2003).

اکثر مطالعات اندرکنش سازه‌های موجود با حرکات زمین بر روی ارزیابی آسیب‌های وارد بر سازه‌ها ناشی از تونلسازی (Mroueh & Shahrouh, 2003) و (Mair, & Taylor, & Burland, 1996) و ارائه الگوهای آسیب بوده و تاثیر آنها بر روی بارهای وارد بر پوشش تونل چندان مطالعه نگردیده و اکثراً بعنوان یک سربار سطحی در محاسبات مربوط به طراحی پوشش تونلها در نظر گرفته شده‌اند. تمرکز اکثر مطالعات در خصوص تاثیر لایه‌بندی زمین نیز بر روی پاسخ زمین به تونلسازی بر روی نشستهای ناشی از تونلسازی و پایداری زمین بالای تونل بوده است (Liang, Yao, & Li, 2009). در مورد ارزیابی بارهای وارد بر پوشش تونل نیز اکثر تحقیقات قبلی شامل مطالعات موردی و یا آنالیزهای تحلیلی و عددی می‌باشد که در اکثر آنها تاثیر وجود سازه‌های سطحی

شده مسیر پروژه در بخش مرکزی شهر (حد فاصل ایستگاه- های ۶ در خیابان نیروی هوایی و ایستگاه ۹ در ششگلان) می‌باشد که در بخشی از این ناحیه مسیر تونل از زیر سازه‌های سطحی موجود عبور کرده و در بخشی از مسیر شرایط زمین آزاد وجود دارد.

از نظر ژئوتکنیکی در بخش عمده‌ای از کل مسیر پروژه و از جمله در ناحیه مورد بررسی، تا اعماق گمانه‌های مطالعاتی حفاری شده (حدود ۴۰ متر) لایه‌های زیرسطحی عمدتاً تنابویی از خاک‌های ریزدانه رسی- سیلتی با طبقه‌بندی CL و ML و رسوبات ماسه‌ای با طبقه‌بندی SM می‌باشند. در بخشی از مسیر این ناحیه، در محدوده خروجی ایستگاه ۸، زمین اطراف تونل متشکل از رسوبات درشت‌دانه می‌باشد که این حالت بعنوان حالت مرجع در مدلسازی در نظر گرفته شده است. در مابقی مسیر زمین عمدتاً بصورت دو لایه بوده و پس از خاک دستی، رسوبات آبرفتی ریزدانه بر روی رسوبات ماسه‌ای متراکم قرار گرفته است. در شکل ۱ نمایی از پروفیل ژئوتکنیکی منطقه مورد بررسی به همراه ناحیه انتخاب شده به عنوان مدل مبنای ژئوتکنیکی نشان داده شده است.

۲-۲- پارامترهای مورد بررسی

هدف از انجام تحقیق بررسی اثر وجود ساختمان‌های سطحی و مشخصات مختلف آنها بر بارهای وارد بر پوشش تونل می‌باشد. از آنجاییکه امکان بررسی تمام پارامترهای موثر و ترکیب آنها وجود ندارد، برخی از مهمترین پارامترها برگزیده و مقادیر عددی مناسبی برای اندازه‌گیری اثرات آنها انتخاب شده است. با توجه به اینکه در این تحقیق مطالعه بر روی پروژه خط ۲ متروی تبریز صورت می‌گیرد، مشخصات ژئوتکنیکی زمین و مشخصات کلی هندسی تونل ثابت و برابر مقادیر واقعی فرض شده‌اند. بنابراین از باقیمانده فاکتورهای اثرگذار، پارامترهای عمق مرکز تونل (Z)، وزن ساختمان (W)، عرض ساختمان‌های موجود در سطح زمین (B)، عرض خیابان یا فاصله لب به لب ساختمان‌های واقع در دو طرف تونل (L)، فاصله مابین مرکز سازه تا خط مرکزی تونل (e) انتخاب و با توجه به پلان و پروفیل تونل مترو تبریز و مشاهدات محلی و عرض خیابان‌های متداول و ابعاد سازه‌های موجود محلی مقادیر منطقی برای بررسی اثر تغییرات آنها در نظر گرفته شده است.

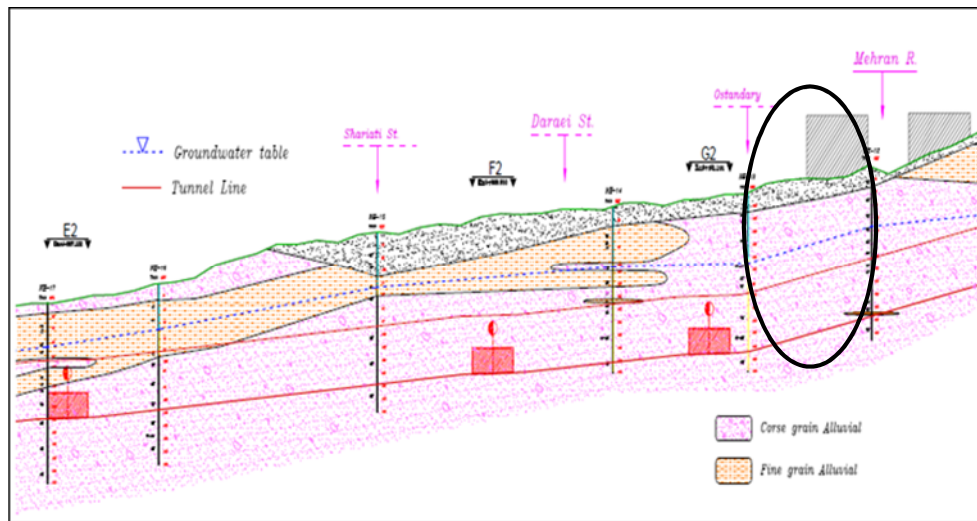
و مشخصات ژئوتکنیکی خاک پیرامون تونل از پروژه خط ۲ قطار شهری تبریز انتخاب شده است تا پارامترهای استفاده شده منطبق بر واقعیت باشد (Katebi, et al., 2014). به دلیل تعداد زیاد پارامترهای موثر و تعداد حالات بسیار زیاد حاصل از ترکیب مقادیر پارامترها و محدودیت‌های زمانی و اجرایی موجود در ساخت مدل‌های فیزیکی عملاً بررسی تمامی حالات امکان پذیر نمی‌باشد. در نتیجه برای بررسی کامل تاثیرات هر یک از پارامترها، علاوه بر ساخت مدل‌های فیزیکی از مدلسازی عددی با نرم افزار توانمند المان محدود آباکوس و مطالعات پارامتریک استفاده شده است که نتایج در مقاله جداگانه ارائه شده است (Katebi, et al., 2015). در مقاله حاضر به بیان نحوه ساخت مدل فیزیکی و نتایج حاصل پرداخته شده است که علاوه بر الگوی تاثیر هر یک از پارامترهای مورد بررسی، نتایج به دست آمده مرجع ارزشمندی برای صحت سنجی نتایج تحلیل‌های عددی فراهم آورده است.

۲- معرفی خط ۲ قطار شهری تبریز

شهر تبریز با مساحت ۱۶۰ کیلومتر مربع و جمعیتی بالغ بر ۱۶۰۰۰۰۰ نفر یکی از شهرهای بزرگ و پر جمعیت ایران در شمال غرب این کشور می‌باشد. پروژه خط ۲ قطار شهری تبریز از غرب به شرق تبریز به طول تقریبی ۲۲/۴ کیلومتر که از منطقه قراملک در غرب تبریز شروع شده و در محدوده نمایشگاه بین‌المللی تبریز در شرق خاتمه می‌یابد. طول مسیر پروژه بصورت مکانیزه توسط دو ماشین حفار سپری مکانیزه با سیستم فشار تعادلی زمین ($Earth Pressure Balance$ $TBM-EPB$) حفاری خواهد شد. بر اساس مشخصات ماشین حفار مکانیزه انتخاب شده برای حفاری فاز اول پروژه (از دپو غربی تا ایستگاه $G2$)، قطر حفاری تونل ۹/۴۹ متر، قطر خارجی پوشش بتنی تونل (سگمنتها) برابر ۹/۱۸ متر و ضخامت آنها ۳۵ سانتیمتر می‌باشد.

۲-۱- محدوده مورد مطالعه (مدل مبنا)

برای انجام مطالعات لازم است تا نقاط مناسبی از این پروژه به عنوان محل مبنا انتخاب شده و مدلسازی‌ها با مشخصات ژئوتکنیکی خاک موجود منطقه انجام شود. منطقه انتخاب



شکل ۱- پروفیل ژئوتکنیکی منطقه مورد بررسی به همراه محل انتخاب مدل مبنا

خطوط ۴ گانه قطار شهری تبریز در خاک دانه‌ای حفاری می‌گردد. بنابراین برای ساخت مدل فیزیکی از ماسه منطقه قوم تپه با مشخصات نزدیک به مشخصات خاک ساختگاه تبریز استفاده شده است. ماسه مورد استفاده بر اساس سیستم طبقه‌بندی متحد جزء دسته ماسه بد دانه‌بندی شده (*SP*) قرار می‌گیرد. مشخصات مکانیکی و فیزیکی ماسه مورد استفاده بر اساس دستورالعمل‌های استانداردهای *ASTM* و *BS* به شرح جدول ۱ می‌باشند.

جدول ۱- مشخصات فیزیکی و مهندسی خاک مورد استفاده در مدل فیزیکی مبنا

مقدار	پارامتر
۱٫۵۵	ضریب یکنواختی (<i>Cu</i>)
۳۳	زاویه اصطکاک داخلی
۳۱	زاویه اصطکاک بحرانی
۱٫۰۲	ضریب انحنای (<i>Cc</i>)
۰	چسبندگی (<i>Kg/cm2</i>)
۲٫۶۳	چگالی دانه‌ها (<i>Gs</i>)
۱۷٫۳۸	وزن مخصوص خشک ماکزیمم (KN/m^3)
۱۴٫۶	وزن مخصوص خشک مینیمم (KN/m^3)
۲۴۰	مدول الاستیسیته (کیلوگرم بر سانتی متر مربع)

۳- مدلسازی فیزیکی

در کنار پیشرفت‌های روش‌های محاسباتی مدلسازی فیزیکی دارای نقش اساسی در مطالعات مربوط به حفاری تونل‌ها در زمینهای نرم می‌باشد.

در تحقیق حاضر نیز به دلیل پیچیدگی زیاد فرآیند تونلسازی مکانیزه و همچنین در دسترس نبودن دستگاه سانتریفیوژ از مدل فیزیکی کوچک مقیاس استفاده شده است. در کنار اعتبارسنجی مدل‌های عددی، الگوی کلی تاثیر پارامترهای مختلف بر بارهای وارد بر پوشش تونلهای مکانیزه مورد مطالعه قرار گرفته است. با توجه به ابعاد انتخاب شده جعبه و سپر ماشین حفار در مدلسازی و مطابق قوانین تشابه در مدل‌های کوچک مقیاس (*Wood, 2004*) و (*Gibson, 1996*) و (*Viswanadham, 2013*)، مقیاس هندسی متوسط مدل فیزیکی ۱/۴۰ خواهد بود. بدیهی است مشابه تمامی مدلسازی‌های فیزیکی کوچک مقیاس نتایج حاصل دارای جنبه کیفی بوده و می‌توان به شناخت کاملی از نحوه و الگوی تاثیر پارامترهای مختلف موثر بر میزان بارهای وارد بر پوشش تونلهای مکانیزه دست یافت. در ادامه نحوه آماده‌سازی مدل، ابزار و تجهیزات بکار برده شده به همراه کلیات روش انجام آزمایش و نتایج حاصل ارائه شده است.

۳-۱- مصالح استفاده شده و ماسه مورد استفاده

با توجه به وضعیت ژئوتکنیکی شهر تبریز و پروفیل حفاری خطوط مترو در این شهر، بخش عمده‌ای از مسیر تونل‌های

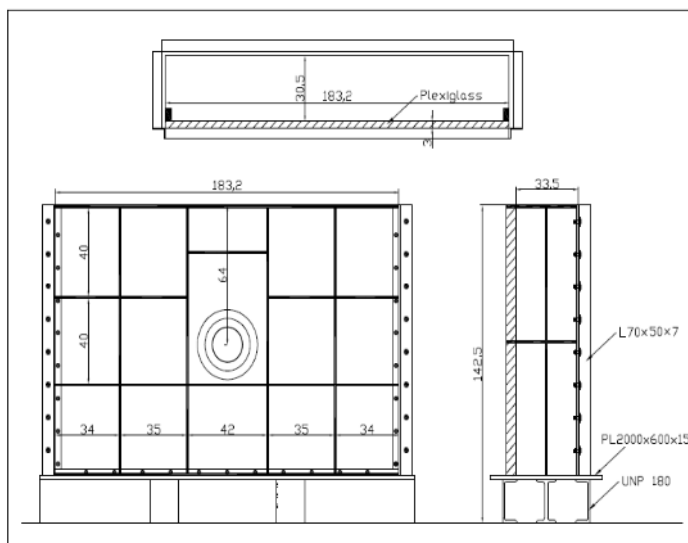
۳-۲- جعبه مدل‌سازی فیزیکی

برای ساخت مدل فیزیکی از یک جعبه مکعب مستطیل با قاب فولادی به ابعاد داخلی 30.5×183.2 و ارتفاع 123.0 میلی‌متر استفاده شد که اسکلت اصلی آن از صفحه فولادی به ضخامت 20 میلی‌متر تشکیل شده است. سه وجه جانبی جعبه ثابت بوده و در وجه چهارم به منظور مشاهده وضعیت خاک داخل مخزن، صفحه شفاف از جنس پلکسی‌گلس به ضخامت 30

میلی‌متر در وجه جلویی مخزن نصب شد. پیرامون جعبه و صفحه شفاف پلکسی‌گلس از صفحات فلزی 12 میلی‌متری سخت‌کننده استفاده شده است تا جعبه کاملاً صلب گشته و تغییر شکل جانبی ایجاد نشود. نقشه شماتیک طراحی جعبه در شکل ۲-الف و نمایی از جعبه فولادی و صفحه پلکسی‌گلس شفاف به همراه صفحات سخت‌کننده مربوطه در شکل ۲-ب نشان داده شده است.



ب



الف

شکل ۲- الف) نقشه شماتیک مدل فیزیکی؛ ب) جعبه فولادی و صفحه پلکسی‌گلس به همراه سخت‌کننده‌های مربوطه

گردیده است. چنانچه در شکل ۳ قابل مشاهده است میزان جابجایی افقی ایجاد شده در اثر اعمال فشار افقی دست بالای 2 کیلوگرم بر سانتیمتر مربع بر وجوه قائم جعبه و صفحه پلکسی‌گلس بسیار اندک و قابل صرف نظر کردن می‌باشد.

۳-۳- سیستم بارگذاری و قاب عکس‌العمل

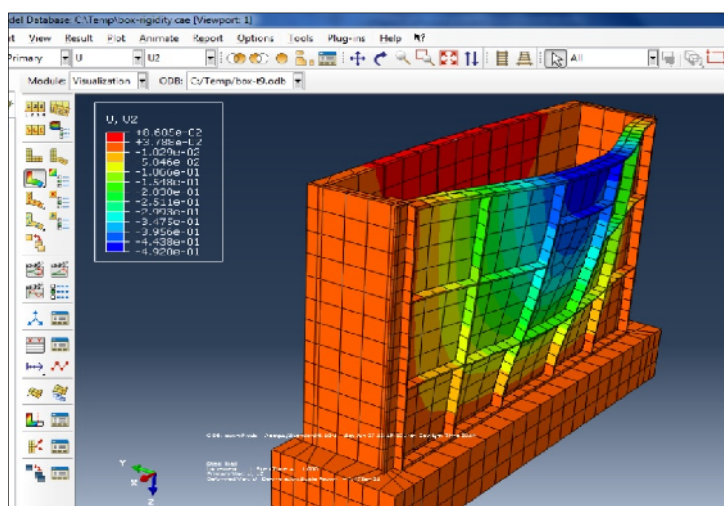
بخش سازه‌ای سیستم بارگذاری از یک قاب فولادی کاملاً صلب تشکیل شده است که جهت قراردادن جعبه فولادی، نصب سیستم بارگذاری، تامین قاب واکنش مورد نیاز و نصب ریل‌های حرکت مخزن بارش ماسه از آن استفاده شده است. ابعاد در نظر گرفته شده برای قاب صلب با منظور نمودن اندازه جعبه آزمایش و میزان کورس جابجایی جک و در نظر گرفتن فضای کافی برای ریزش ماسه $2.15 \times 2.1 \times 0.6$ متر می‌باشد. جهت تولید و اعمال بارهای استاتیکی قائم از یک سیستم

با توجه به توصیه‌های محققان قبل (Kim & Burd, 1998) و (Branque & Doan, 2006) و صعوبت‌های ناشی از ساخت مدل فیزیکی با ابعاد بزرگ، فاصله مرزهای جانبی تا مرکز تونل در حدود 4 برابر قطر تونل انتخاب شده است. در نتیجه عرض مدل ساخته شده برابر 183 سانتیمتر می‌باشد. پس از طراحی ابعاد اولیه مدل، کفایت فاصله مرزهای جانبی انتخاب شده با استفاده از مدل عددی و افزایش فاصله مرزهای جانبی مدل به 1.5 و 2 برابر میزان اولیه مورد بررسی قرار گرفت. بر اساس نتایج میزان نشست سطحی ایجاد شده در بالای محور مرکزی تونل، افزایش فاصله مرزهای جانبی تقریباً تاثیری بر نتایج نداشته و ابعاد مدل قابل قبول می‌باشد. برای بررسی صلبیت نیز جعبه مدل فیزیکی در محیط نرم افزار آباکوس مدل شده و میزان جابجایی‌های ایجاد شده محاسبه

شکل ۴-ج ابعاد، پلان و برش طولی صفحه بارگذاری ارائه شده است. به منظور فراهم کردن امکان مدل‌سازی سازه‌های سطحی در ابعاد و موقعیتهای مختلف، صفحه بارگذاری بصورت چند تکه لیثو متشکل از قطعات مکعبی با ابعاد متفاوت ساخته شده است (شکل ۴-د). هر یک از قطعات با استفاده از پیچهای پر مقاومت به سایر بخشها اتصال یافته و قابل جداسازی از صفحه بارگذاری می‌باشد. به منظور اعمال بار موضعی ناشی از سازه های سطحی در موقعیت های مختلف، قطعات اضافی از صفحه بارگذاری جدا شده و نیروی اعمالی از طرف جک به موقعیت دلخواه اعمال می شود که نمونه ای از بارگذاری موضعی در شکل ۴-و نمایش داده شده است..

پاورپک هیدرولیکی با قابلیت کنترل فشار یا نیرو استفاده شده است. به منظور تنظیم فشار اعمالی بر سطح نمونه از یک تنظیم کننده فشار حد بالا و حد پایین استفاده شده است (شکل ۴-الف). جک مورد استفاده دارای ماکزیمم ظرفیت ۱۰ تن و کورس جابجایی ۸۰۰ میلیمتر می‌باشد. برای تنظیم دقیق صفحه بارگذاری و کنترل افقی بودن صفحه در حین حرکت قائم از دو میله راهنمای فلزی به قطر ۱۰ سانتی‌متر به همراه دو عدد چرخ دنده و شانه فولادی به همراه شفت اتصالی مربوطه استفاده شده است (شکل ۴-ب).

برای انتقال نیروی جک به خاک داخل جعبه آزمایش صفحه کاملاً صلبی هم اندازه با سطح مقطع جعبه آزمایش طراحی و ساخت شده است که در حد فاصل سیلندر جک و سطح خاک قرار گرفته و می تواند درون جعبه وارد شود. در

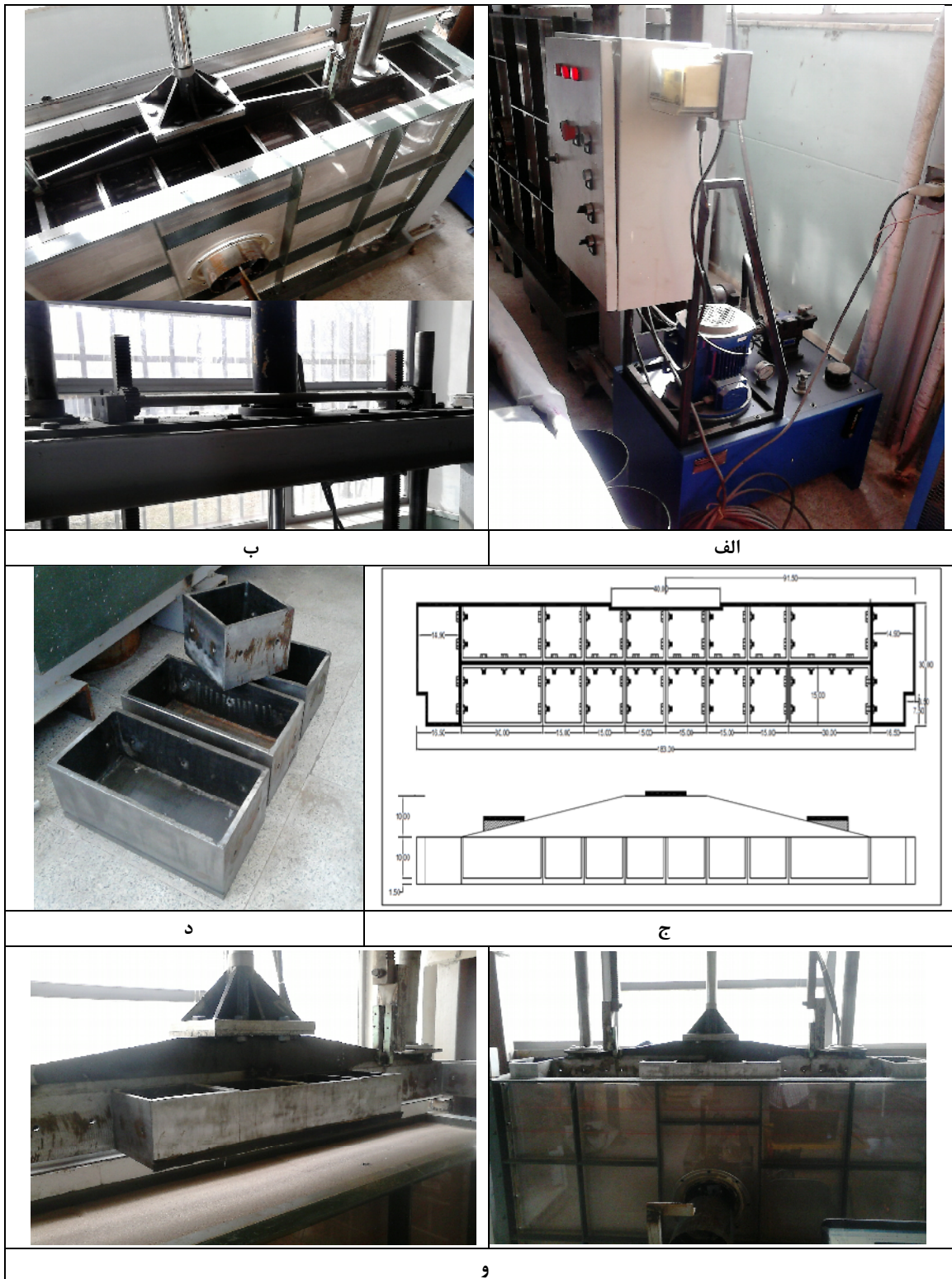


شکل ۳- میزان جابجایی‌های افقی ایجاد شده و صلبیت مناسب جعبه مدل فیزیکی و صفحات سخت کننده

۲ و ۵ در دیواره سمت چپ و کرنش سنج‌های ۴ و ۶ در دیواره سمت راست پوشش نصب شده‌اند. شمای کلی و آرایش ابزار بندی انجام شده در شکل ۵-ب نمایش داده شده است. برای کالیبراسیون با استفاده از کلیات آزمایش تیغه برزیلی که در مکانیک سنگ بکار برده می‌شود، مدل پوشش تونل تحت یک بارگذاری خطی با استفاده از یک دستگاه CBR قرار داده شد (شکل ۵-ج). در شکل ۵-د نمای کلی انجام کالیبراسیون به همراه مدل‌سازی عددی و نمودار کالیبراسیون به دست آمده برای کرنش سنج شماره ۲ به عنوان نمونه ارائه شده است.

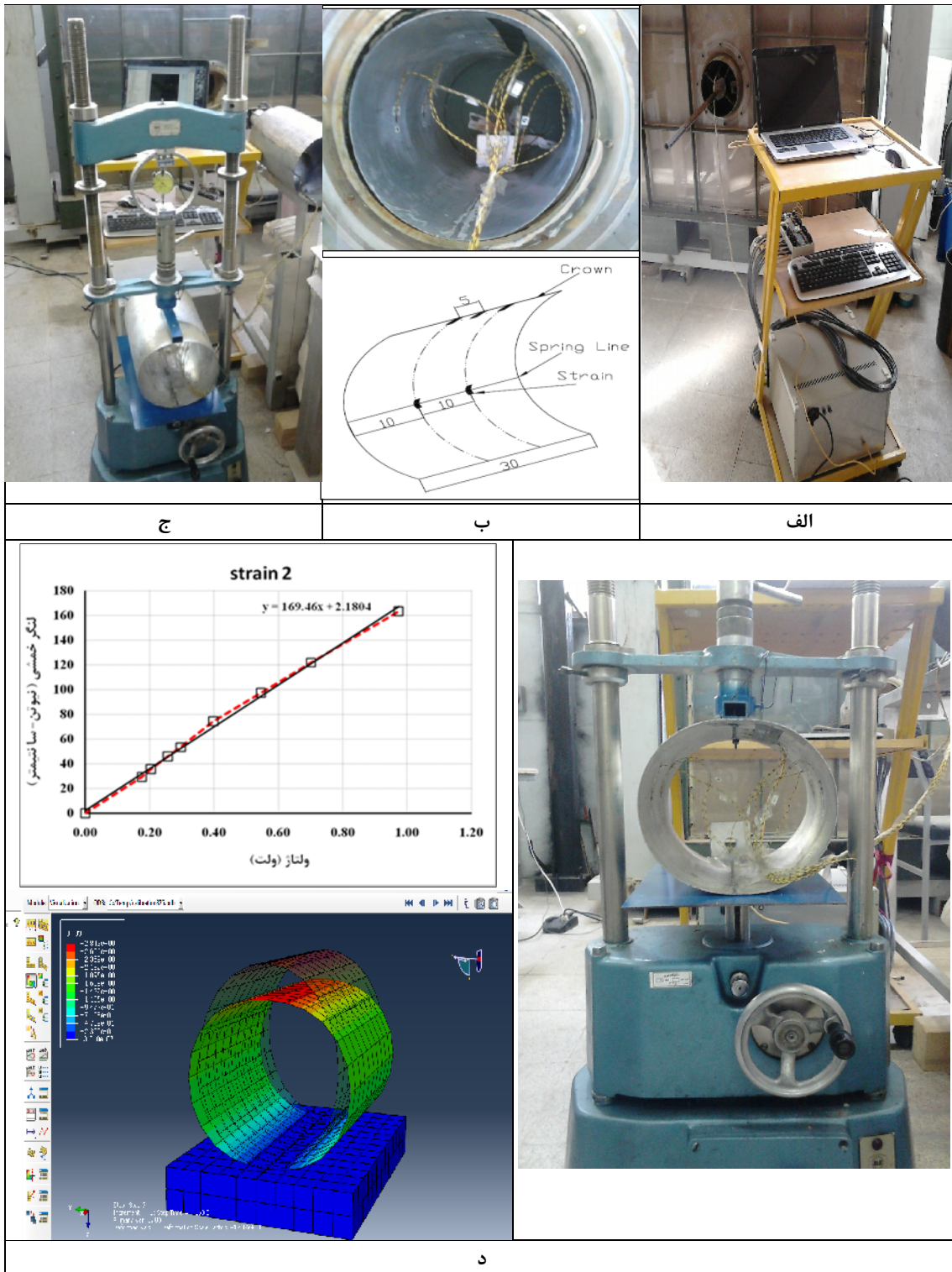
۳-۴- سیستم قرائت و ضبط داده‌ها

سیستم قرائت و ضبط داده‌ها شامل دیتالاگر ۳۲ کاناله، جعبه اتصال، رایانه و کرنش‌سنج‌ها می‌باشد که مجموعه این سیستم در شکل ۵الف نشان داده شده است. برای قرائت و ضبط داده‌ها از نرم‌افزار *National Instruments* و برای اندازه‌گیری تغییر شکل‌ها و در نتیجه لنگرهای ایجاد شده داخل پوشش تونل از ۷ عدد کرنش سنج در طول مقطع تونل بر روی سه ردیف در تاج و دیواره کناری تونل استفاده شده است. کرنش‌سنج‌های ۱، ۳ و ۷ در تاج تونل، کرنش‌سنج‌های



شکل ۴- الف) سیستم پاورپک مورد استفاده؛ ب) میله‌های راهنما و سیستم کنترل حرکت؛ ج) ابعاد، پلان و برش طولی صفحه بارگذاری؛ د) قطعات صفحه بارگذاری؛ و) نحوه اعمال بار موضعی ناشی از سازه‌های سطحی

ارزیابی بارهای وارد بر پوشش تونل‌های مکانیزه با استفاده از مدل‌سازی فیزیکی: ص ۴۹-۶۶



شکل ۵ - الف) سیستم قرائت و ضبط داده؛ ب) جانمایی ابزار بندی پوشش تونل با استفاده از کرنش سنج؛ ج) سیستم مورد استفاده برای کالیبراسیون؛ د) نحوه انجام کالیبراسیون و نمونه نمودار کالیبراسیون

۳-۵- آماده‌سازی نمونه‌ها و ساخت مدل فیزیکی

برای آماده‌سازی نمونه‌های ماسه‌ای در آزمایشگاه سه نوع روش شامل نشست در آب، ریزش خشک و تراکم مرطوب وجود دارد که به صورت گسترده از آنها استفاده می‌شود (Ishihara, 1996). در این تحقیق ترکیبی از روش‌های ریزش خشک بارش ماسه و تراکم کاهش یافته (Chan, 1985) برای آماده‌سازی خاک بکار گرفته شده است.

با توجه به ارتفاع زیاد جعبه مدل و همچنین وجود قباب صلب و سیستم بارگذاری در قسمت بالایی جعبه برای ساخت نمونه از یک سیستم بارش ماسه از یک تراز ارتفاعی ثابت استفاده شده و جهت ساخت نمونه‌های کاملاً همگن ریزش خاک بصورت مرحله‌ای و در لایه‌های با ضخامت مشخص انجام گرفته و کاهش دانسیته در اثر کاهش ارتفاع ریزش ماسه از مخزن توسط تراکم هر لایه جبران می‌شود. بدین ترتیب نمونه‌های آماده شده هم از نظر یکنواختی قابل قبول بوده و هم قابلیت تکرار مجدد را خواهند داشت.

یک جعبه فلزی قیف مانند به حجم تقریبی ۰/۱ متر مکعب و ارتفاع ۳۵ سانتیمتر به عنوان مخزن خاک بکار برده شده است. به منظور کنترل ریزش یکنواخت ماسه، در کف مخزن یک شیار به عرض ۲ میلیمتر و طول ۳۰۰ میلیمتر به همراه یک دریچه کشویی در کف مخزن تعبیه شده است. پر کردن جعبه مدل در لایه‌های ۲۰ سانتیمتری و با حرکت دادن مخزن بصورت خطی و با سرعتی یکنواخت، در سطح جعبه انجام می‌گیرد. در شکل ۶-الف جعبه مخزن ریزش ماسه و در شکل ۶-ب نحوه ریزش ماسه و پر کردن جعبه مدل نشان داده شده است. به منظور کنترل یکنواختی دانسیته مدل ظروف فلزی سبک در لایه‌های مختلف برای سنجش دانسیته هر لایه مورد استفاده قرار گرفت (شکل ۶-ج). پس از انجام پنج آزمایش کالیبراسیون ساخت مدل، دانسیته نسبی حدود ۶۰ درصد (وزن مخصوص ۱۶۲۵ کیلوگرم بر متر مکعب) برای انجام آزمایشات انتخاب گردید.

۳-۶- مدلسازی پوشش تونل و فرآیند حفاری

در مدل فیزیکی ساخته شده سپر ماشین با یک استوانه فولادی مدل گردیده و استوانه آلومینیومی که

معرف پوشش تونل می‌باشد در داخل آن نصب می‌شود. پس از آماده‌سازی مدل، پیشروی سپر ماشین به صورت بیرون کشیدن سپر فولادی با نرخ ۳۰ میلیمتر در دقیقه از داخل نمونه توسط یک سیستم پنوماتیکی شبیه‌سازی شده و فشار زمین اطراف به تدریج بر پوشش آلومینیومی اعمال می‌شود. در شکل ۶د جک بادی به همراه سپر فولادی نمایش داده شده است.

با توجه به رویکردهای مختلف در مدلسازی فیزیکی فضاهای زیرزمینی (Randolph & House, 2001) در تحقیق حاضر با توجه به وجود المان‌های سازه‌ای معرف سپر ماشین و پوشش تونل علاوه بر توده خاک و همچنین تمرکز موضوع بر ارزیابی بارهای وارد بر پوشش تونل مناسب‌ترین روش با توجه به امکانات موجود و مساله مورد بررسی، استفاده از تشابه هندسی متداول در مدل‌های فیزیکی می‌باشد. با در نظر گرفتن مقیاس ۱/۴۰ انتخاب شده و مشخصات ماشین حفار و پوشش تونل در پروژه مینا، قطر استوانه فولادی سپر و استوانه آلومینیومی پوشش تونل به ترتیب برابر ۲۴۰ و ۲۳۰ میلیمتر خواهد بود. برای مدلسازی سپر ماشین یک ورق فولادی گالوانیزه به ضخامت ۲ میلیمتر به صورت یک استوانه کامل نورد شده که دارای صلبیت کافی برای تحمل بارهای وارده باشد.

در عمده مدلسازی‌ها مینای انتخاب ضخامت پوشش تونل مقدار ضریب شکل پذیری می‌باشد که در کارهای محققان قبلی به طور متداول مقدار این ضریب مابین ۷۰ الی ۶۰۰ انتخاب شده است (Nunes & Meguid, 2009). با در نظر گرفتن مشخصات خاک اطراف تونل، میزان سربار خاکی موجود در مدل فیزیکی، ضخامت ورق‌های آلومینیومی موجود و لزوم شکل پذیر بودن پوشش به منظور امکان ایجاد تغییر شکل‌های کافی و قابل اندازه‌گیری، ضخامت ورق در آزمایشات برابر ۱/۵ میلیمتر انتخاب شده است که معادل ضریب شکل پذیری ۲۱۰ برای پوشش تونل می‌باشد. در شکل ۷ شمای کلی از بخش‌های مختلف مدل فیزیکی و تجهیزات مورد استفاده ارائه شده است.

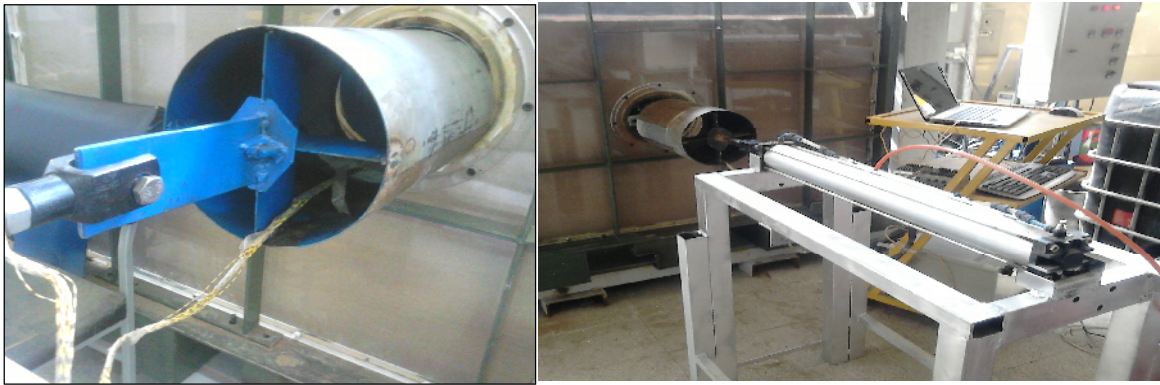
ارزیابی بارهای وارد بر پوشش تونل‌های مکانیزه با استفاده از مدلسازی فیزیکی: ص ۴۹-۶۶



ج

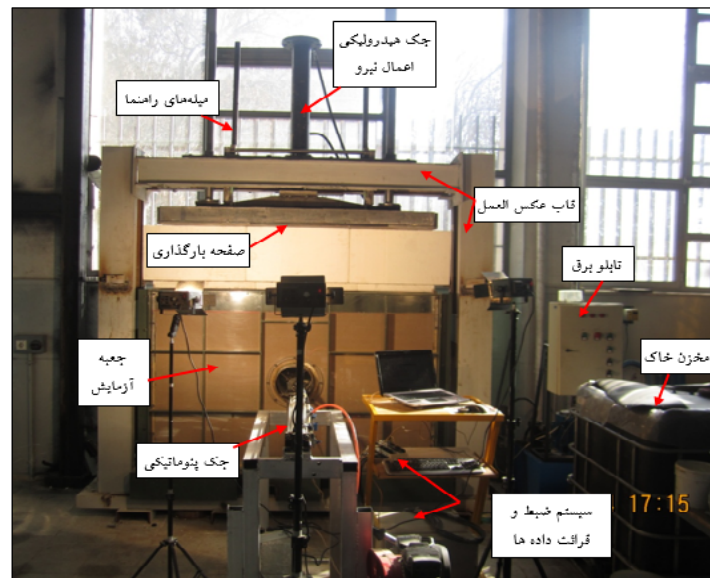
ب

الف



د

شکل ۶- الف) جعبه مخزن ریزش ماسه؛ ب) نحوه پر کردن مدل؛ ج) ظروف سنجش دانسیته لایه‌های مختلف؛ د) جک پنوماتیکی مورد استفاده به همراه سپر فولادی



شکل ۷ - شمای کلی مدل فیزیکی ساخته شده و تجهیزات مورد استفاده

۳-۷- برنامه‌ریزی انجام آزمایش‌ها و مدل‌های ساخته شده

از آنجا که هدف از تحقیق حاضر بررسی تاثیر پارامترهای موثر بر میزان بارهای وارد بر پوشش تونل به منظور طراحی اقتصادی و مناسب پوشش تونل‌های مکانیزه می‌باشد در کنار انجام مطالعه کامل پارامتریک به کمک مدلسازی عددی، برای صحت سنجی و ارزش گذاری نتایج حاصل از این تحلیل‌ها، از نتایج مدل فیزیکی کوچک مقیاس نیز استفاده شده است. در کنار این صحت سنجی سعی گردیده است تاثیر کیفی برخی از مهمترین پارامترهای مورد مطالعه نیز مورد بررسی قرار گیرد. لذا بطور کلی آزمایشات طوری برنامه ریزی شده است که مطالعه تاثیر پارامترهای عمق قرارگیری یا نسبت سربار به قطر تونل، میزان و موقعیت سربار سطحی موجود و همپنین نرخ پیشروی دستگاه امکانپذیر باشد.

مدل‌های ساخته شده شامل ۳ مقدار متفاوت نسبت سربار به قطر تونل و ۴ مقدار سربار سطحی می‌باشد که در مجموع ۱۲ مدل مختلف از ترکیب حالات فوق حاصل شده است (مدل‌های ۱ الی ۱۲). مدل شماره ۱۳ نیز دارای شرایط مشابه با مدل شماره ۵ بوده و صرفاً نرخ پیشروی یا عبارتی

بیرون کشیده شدن سپر از داخل نمونه متفاوت می‌باشد. در تمامی آزمایشات نرخ حرکت سپر ۳۰ میلیمتر در دقیقه در نظر گرفته شده و در آزمایش ۱۳ این مقدار برابر ۱۵ میلیمتر در دقیقه منظور شده است. در جدول ۲ مشخصات مدل‌های فیزیکی ساخته شده ارائه شده است.

پس از ساخت مدل‌ها مطابق

جدول ۲، با استفاده از سیستم قرائت و ضبط داده‌ها خروجی‌های حاصل از کرنش سنجهای نصب شده بر روی تاج و دیواره‌های کناری پوشش تونل در هر آزمایش قرائت گردید. با انجام کالیبراسیون کرنش سنجهای نصب شده روی پوشش تونل که در بخش ۳-۴ بیان گردید، قرائت‌های حاصل به نیروهای سازه‌ای پوشش تونل (نیروی محوری و لنگر خمشی) تبدیل شده و ماکزیمم مقدار آن پس از بیرون کشیده شدن کامل سپر فولادی، تعیین شد. با توجه به اهمیت بالا و تعیین کننده بودن میزان لنگر خمشی در طراحی پوشش تونل‌های مکانیزه نسبت به میزان نیروی محوری ایجاد شده در اثر فشار زمین و بارهای ناشی از سازه‌های سطحی، در نتایج به دست آمده عمدتاً لنگرهای خمشی مورد بررسی قرار گرفته است.

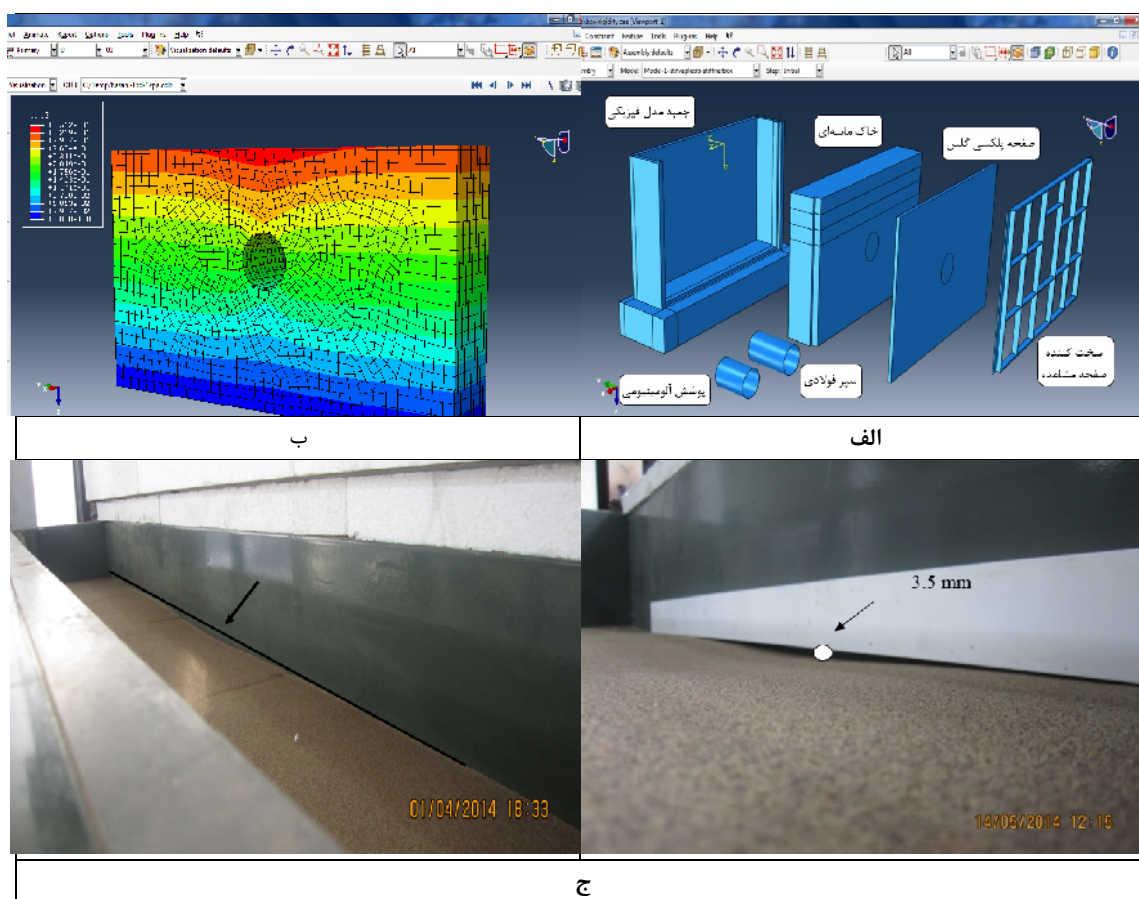
جدول ۲ - مشخصات مدل‌های فیزیکی ساخته شده و آزمایش‌های انجام یافته

شماره مدل	وزن واحد حجم (کیلوگرم بر مترمکعب)	دانسیته نسبی (%)	نسبت سربار به قطر تونل	میزان سربار سطحی (کیلوگرم بر سانتی متر مربع)
۱	۱۶۳۰	۶۱٫۲	۱	----
۲	۱۶۳۲	۶۱٫۹	۱	۰٫۵
۳	۱۶۲۳	۵۸٫۶	۱	۱
۴	۱۶۲۵	۵۹٫۴	۱	۱٫۵
۵	۱۶۲۸	۶۰٫۴	۱٫۵	---
۶	۱۶۲۰	۵۷٫۶	۱٫۵	۰٫۵
۷	۱۶۲۸	۶۰٫۴	۱٫۵	۱
۸	۱۶۲۵	۵۹٫۴	۱٫۵	۱٫۵
۹	۱۶۳۰	۶۱٫۲	۲	----
۱۰	۱۶۲۶	۵۹٫۷	۲	۰٫۵
۱۱	۱۶۱۶	۵۶٫۱	۲	۱
۱۲	۱۶۱۹	۵۷٫۲	۲	۱٫۵
۱۳	۱۶۲۵	۵۹٫۴	۱٫۵	----

در کنار انجام آزمایش‌های فیزیکی مدل فیزیکی ساخته شده با تمامی جزئیات مربوطه و ابعاد واقعی ساخته شده، در نرم افزار آباکوس به صورت کامل و سه بعدی مدلسازی شد. عملیات حفاری تونل و میزان سر بار سطحی مطابق آزمایشات فیزیکی انجام شده، در مدل شبیه سازی گردیده و در هر آزمایش میزان نیروهای داخلی ایجاد شده درون پوشش تونل در نقاط متناظر با نصب کرنش سنج ها در مدل فیزیکی تعیین شده است. با مقایسه خروجی‌های بدست آمده از تحلیل‌های عددی و نتایج حاصل از ابزاربندی مدل آلومینیومی پوشش، عملکرد مدل عددی در خصوص تعیین نیروهای داخلی پوشش تونل‌ها صحت سنجی و

ارزیابی شده است.

شکل ۸-الف نمای کلی بخش‌های مختلف مدل عددی ساخته شده را که شامل جعبه انجام آزمایش، توده خاک، صفحه شفاف پلکسی گلس، مهار کننده صفحه شفاف، سپر فولادی و پوشش آلومینیومی تونل می‌باشد؛ نمایش می‌دهد. همچنین در شکل ۸-ب و ۸-ج به عنوان نمونه، تغییر شکل‌های ایجاد در مدل عددی به همراه نشست‌های سطحی حاصل در مدل فیزیکی برای تونل با نسبت سر بار به قطر ۱/۵ و حالت زمین آزاد نمایش داده شده است. تطابق بسیار خوبی مابین مقادیر نشست سطحی و الگوی کلی تغییر شکل در مدل عددی و آزمایشات فیزیکی مشاهده می‌شود.



شکل ۸- (الف) بخش‌های مختلف در مدلسازی عددی؛ نشست سطحی ایجاد شده در (ب) مدل عددی و (ج) مدل فیزیکی

۴- نتایج مدل‌سازی فیزیکی

۴-۱- تاثیر عمق تونل (نسبت سربار به قطر)

به منظور بررسی تاثیر عمق قرارگیری تونل، سه میزان مختلف نسبت سربار به قطر تونل در مدل‌های ساخته شده در نظر گرفته شده است. مقادیر لنگر خمشی قرائت شده از ابزار بندی پس از اعمال ضرایب تبدیل مربوط به هر یک از کرنش سنج‌ها، برای مدل‌های ۱ تا ۱۲ در *Error! Not a valid bookmark self-reference.* به منظور امکان مقایسه کلی تاثیر پارامترهای عمق تونل و میزان سربار سطحی بر نیروهای داخلی پوشش جمع بندی شده است.

میزان لنگر خمشی ایجاد شده در تاج و دیواره‌های کناری تونل حاصل از قرائت ابزار دقیق و تحلیل عددی به ترتیب در شکل‌های ۹-الف و ۹-ب نمایش داده شده است. کرنش سنج شماره ۳ میزان لنگر خمشی در تاج تونل و کرنش سنج شماره ۲ میزان لنگر خمشی قرائت شده در دیواره کناری سمت چپ تونل را نشان می‌دهد.

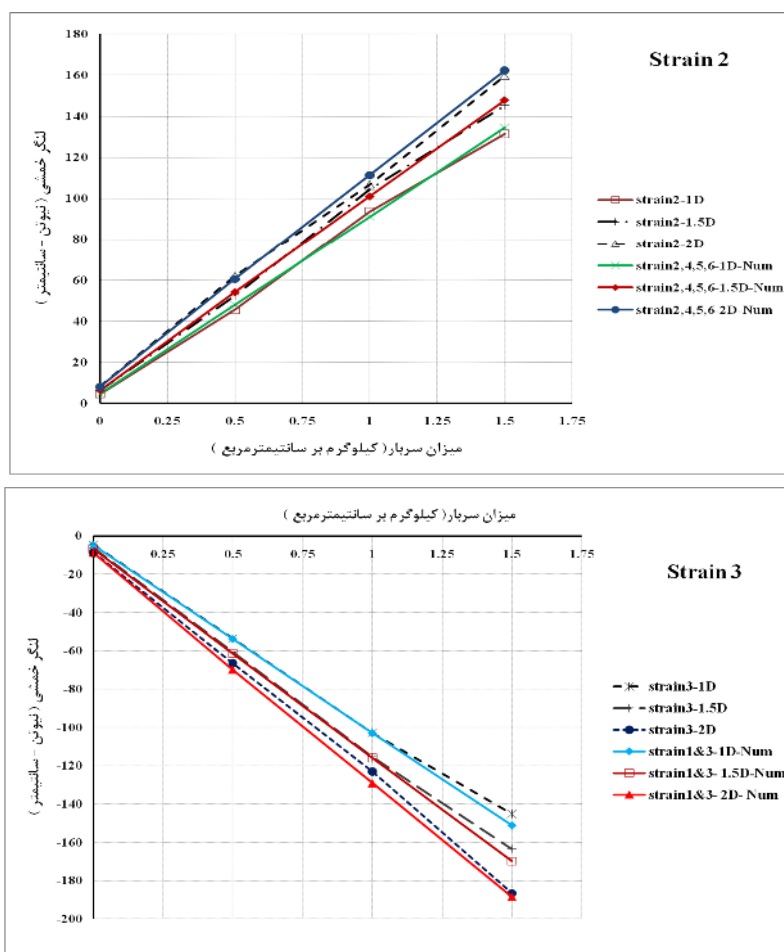
با توجه به نتایج مشاهده می‌شود که میزان لنگر خمشی ایجاد شده در طرفین تونل در دیواره سمت راست و چپ پوشش تونل حاصل از مدل عددی به دلیل تقارن موجود در مسئله یکسان می‌باشد. لنگر خمشی حاصل از قرائت کرنش

سنج‌های نصب شده در طرفین تونل (کرنش سنج‌های ۲ و ۵ در دیواره سمت چپ و کرنش سنج‌های ۴ و ۶ در دیواره سمت راست پوشش تونل) تقریباً با یکدیگر برابر می‌باشند. اختلاف لنگر خمشی قرائت شده در طرفین تونل کمتر از ۲/۴ درصد می‌باشد که نشانگر صحت و قابلیت اعتماد نتایج حاصل از قرائت ابزار دقیق می‌باشد.

در آزمایشات فیزیکی انجام یافته با افزایش عمق تونل میزان لنگر خمشی ایجاد شده درون پوشش تونل افزایش می‌یابد. میزان تاثیر عمق تونل بر افزایش لنگر خمشی در حالت زمین آزاد قابل ملاحظه می‌باشد. بعنوان مثال با افزایش نسبت سربار به قطر تونل از ۱ به ۱/۵، لنگر خمشی در تاج تونل حدود ۴۰٪ و در دیواره‌های کناری حدود ۳۶٪ درصد افزایش می‌یابد. با اعمال سربار سطحی بر سطح مدل و با بیشتر شدن میزان سربار سطحی، تاثیر عمق تونل کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر درصد افزایش نیروهای داخلی با افزایش عمق در حالت وجود سربار (و بویژه با بیشتر شدن میزان سربار) نسبت به حالت زمین آزاد کمتر می‌باشد. در مدل‌های فیزیکی به دلیل میزان بسیار ناچیز بار اعمالی ناشی از روبراه تونل در مقایسه با میزان تنش سربار سطحی، تاثیر عمق تونل در حالات اعمال سربار قابل ملاحظه نمی‌باشد.

جدول ۳- مقادیر لنگرهای خمشی قرائت شده از ابزاربندی پوشش تونل برای آزمایشات ۱ الی ۱۲

مقادیر لنگر خمشی بر حسب نیوتن - سانتیمتر						میزان سربار سطحی (Kg/cm ²)	نسبت سربار به قطر
کرنش سنج ۱	کرنش سنج ۲	کرنش سنج ۳	کرنش سنج ۴	کرنش سنج ۵	کرنش سنج ۶		
۴۷	۴۴	۴۶	۴۳	۴۹	۴۲	---	
۵۲٫۵	۴۵٫۴	۵۳٫۶	۴۹	۴۸٫۹	۴۹٫۴	۰٫۵	۱
۱۰۰	۹۳٫۷	۱۰۲٫۹	۹۳٫۹	۸۳٫۵	۹۲٫۷	۱	
۱۵۴٫۳	۱۳۱٫۵	۱۴۵٫۲	۱۳۶٫۱	۱۳۶٫۹	۱۲۸٫۶	۱٫۵	
۶۶	۶۱	۶۳	۶۵	۶	۶٫۵	---	
۶۳٫۶	۵۲٫۳	۶۰٫۶	۵۵٫۳	۵۱٫۲	۴۹٫۶	۰٫۵	۱٫۵
۱۱۸٫۳	۱۰۴٫۳	۱۱۵٫۴	۹۹٫۱	۱۰۷٫۲	۹۶٫۵	۱	
۱۶۷٫۲	۱۴۵٫۲	۱۶۳٫۵	۱۵۱٫۹	۱۴۸٫۱	۱۴۹٫۷	۱٫۵	
۸٫۹	۸٫۱	۸٫۶	۸٫۱	۷٫۹	۷٫۹	---	
۷۱٫۳	۶۱٫۹	۶۶٫۵	۶۲٫۲	۵۸٫۱	۵۸٫۹	۰٫۵	۲
۱۲۷٫۵	۱۰۶٫۹	۱۲۳٫۱	۱۱۳٫۲	۱۰۸٫۹	۱۱۰٫۳	۱	
۱۸۷٫۳	۱۵۹٫۸	۱۸۶٫۶	۱۵۶٫۷	۱۵۵٫۷	۱۶۱٫۴	۱٫۵	



شکل ۹- مقادیر لنگرهای خمشی حاصل از مدل عددی و آزمایشات فیزیکی در الف) تاج و ب) دیواره کناری تونل

۴-۲- تأثیر میزان سربار سطحی

به منظور بررسی تأثیر میزان سربار سطحی، علاوه بر انجام آزمایشات فیزیکی در حالت زمین آزاد و بدون سربار، سه میزان مختلف برای سربار سطحی در مدل‌های ساخته شده در نظر گرفته شده است. با تنظیم میزان فشار جک هیدرولیکی مورد استفاده سربارهایی برابر ۰٫۵، ۱ و ۱٫۵ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع بر سطح مدل فیزیکی اعمال گردید. در شکل ۱۰ میزان لنگر خمشی ایجاد شده در تاج و دیواره کناری تونل‌های واقع در عمق‌های مختلف حاصل از قرائت ابزار دقیق و تحلیل عددی در اثر اعمال سربارهای سطحی متفاوت نمایش داده شده است.

بر اساس نتایج حاصل مقادیر لنگرهای خمشی ایجاد شده در پوشش تونل برای حالت زمین آزاد در مقایسه با مدل‌های دارای سربار سطحی بسیار ناچیز می‌باشد که به مقدار لنگر خمشی با افزایش عمق افزوده می‌شود. با اعمال سربار، متناسب با شدت سربار میزان لنگر خمشی درون پوشش تونل افزایش می‌یابد. میزان این تأثیر برای تونل‌های کم عمق بیشتر می‌باشد بطوریکه با افزایش میزان سربار سطحی از ۰٫۵ به ۱٫۵ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع، در تونل‌های با نسبت سربار به قطر ۱، ۱٫۵ و ۲ لنگر خمشی در تاج تونل به ترتیب ۲٫۸، ۲٫۷۶ و ۲٫۶۸ برابر می‌شود.

۳-۴- صحت سنجی نتایج تحلیل‌های عددی

به منظور ارزیابی صحت عملکرد مدل عددی در تعیین میزان نیروهای سازه‌ای ایجاد شده درون پوشش، آزمایشات فیزیکی بیان شده انجام گرفته و نتایج حاصل از قرائت ابزاربندی انجام شده با نتایج تحلیل‌های عددی مقایسه شده است. در جدول ۴ مقادیر لنگر خمشی ایجاد شده در تاج و دیواره‌های کناری تونل حاصل از تحلیل‌های عددی برای مقادیر مختلف سربار سطحی و نسبت قطر به سربار ارائه شده است.

با مقایسه مقادیر لنگر خمشی به دست آمده از ابزار بندی مدل آلومینیومی پوشش تونل برای شرایط متناظر در

سنج‌های نصب شده در طرفین تونل (کرنش سنج‌های ۲ و ۵ در دیواره سمت چپ و کرنش سنج‌های ۴ و ۶ در دیواره سمت راست پوشش تونل) تقریباً با یکدیگر برابر می‌باشند. اختلاف لنگر خمشی قرائت شده در طرفین تونل کمتر از ۲/۴ درصد می‌باشد که نشانگر صحت و قابلیت اعتماد نتایج حاصل از قرائت ابزار دقیق می‌باشد.

در آزمایشات فیزیکی انجام یافته با افزایش عمق تونل میزان لنگر خمشی ایجاد شده درون پوشش تونل افزایش می‌یابد. میزان تاثیر عمق تونل بر افزایش لنگر خمشی در حالت زمین آزاد قابل ملاحظه می‌باشد. بعنوان مثال با افزایش نسبت سربار به قطر تونل از ۱ به ۱/۵، لنگر خمشی در تاج تونل حدود ۴۰٪ و در دیواره‌های کناری حدود ۳۶٪ درصد افزایش می‌یابد. با اعمال سربار سطحی بر سطح مدل و با بیشتر شدن میزان سربار سطحی، تاثیر عمق تونل کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر درصد افزایش نیروهای داخلی با افزایش عمق در حالت وجود سربار (و بویژه با بیشتر شدن میزان سربار) نسبت به حالت زمین آزاد کمتر می‌باشد. در مدل‌های فیزیکی به دلیل میزان بسیار ناچیز بار اعمالی ناشی از روبراه تونل در مقایسه با میزان تنش سربار سطحی، تاثیر عمق تونل در حالات اعمال سربار قابل ملاحظه نمی‌باشد.

مربوط به نتایج حالت زمین آزاد است که میزان نیروهای داخلی ایجاد شده درون پوشش تونل ناچیز می‌باشد. با اعمال سربار سطحی و افزایش لنگر خمشی داخلی پوشش تونل میزان درصد خطا کاهش یافته و به حدود ۴/۵ درصد تقلیل می‌یابد.

نتایج مدل‌سازی فیزیکی

۴-۴- تاثیر عمق تونل (نسبت سربار به قطر)

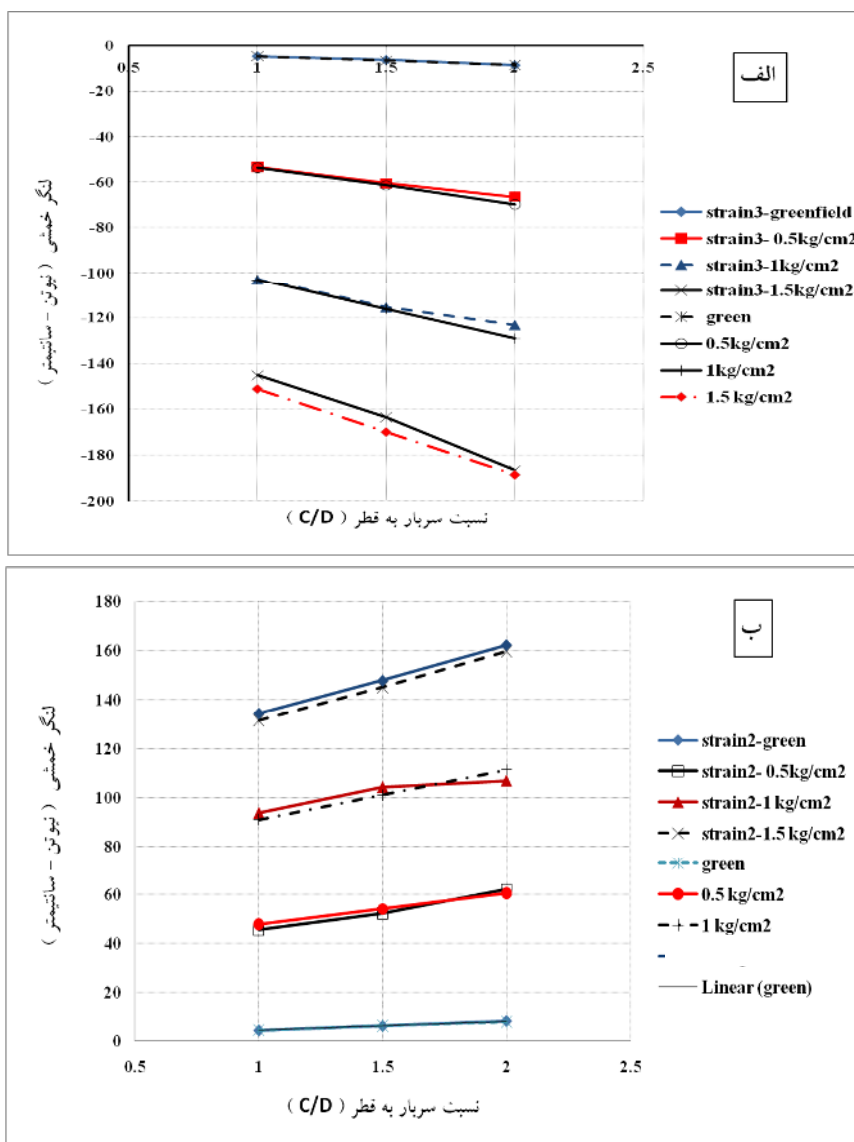
به منظور بررسی تاثیر عمق قرارگیری تونل، سه میزان مختلف نسبت سربار به قطر تونل در مدل‌های ساخته شده در نظر گرفته شده است. مقادیر لنگر خمشی قرائت شده از ابزار بندی پس از اعمال ضرایب تبدیل مربوط به هر یک از کرنش سنج‌ها، برای مدل‌های ۱ تا ۱۲ در *Error! Not a valid bookmark self-reference.* به منظور امکان مقایسه کلی تاثیر پارامترهای عمق تونل و میزان سربار سطحی بر نیروهای داخلی پوشش جمع بندی شده است.

میزان لنگر خمشی ایجاد شده در تاج و دیواره‌های کناری تونل حاصل از قرائت ابزار دقیق و تحلیل عددی به ترتیب در شکل‌های ۹-الف و ۹-ب نمایش داده شده است. کرنش سنج شماره ۳ میزان لنگر خمشی در تاج تونل و کرنش سنج شماره ۲ میزان لنگر خمشی قرائت شده در دیواره کناری سمت چپ تونل را نشان می‌دهد.

با توجه به نتایج مشاهده می‌شود که میزان لنگر خمشی ایجاد شده در طرفین تونل در دیواره سمت راست و چپ پوشش تونل حاصل از مدل عددی به دلیل تقارن موجود در مسئله یکسان می‌باشد. لنگر خمشی حاصل از قرائت کرنش

جدول ۳ با نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی مشاهده

می‌شود حداکثر میزان خطای موجود در لنگر خمشی به دست آمده از قرائت ابزار بندی و تحلیل عددی حدود ۸ درصد می‌باشد. البته لازم بذکر است که این میزان خطای ماکزیمم



شکل ۱۰- مقادیر لنگرهای خمشی حاصل از مدل عددی و آزمایشات فیزیکی الف) تاج تونل، ب) دیواره کناری سمت راست

جدول ۴- مقادیر لنگرهای خمشی حاصل از تحلیل‌های عددی در تاج و دیواره‌های کناری تونل

مقادیر لنگر خمشی بر حسب نیوتن - سانتیمتر											
نسبت سربار به قطر				۱٫۵				۱			
۲				۱٫۵				۱			
۱٫۵	۱	۰٫۵	---	۱٫۵	۱	۰٫۵	---	۱٫۵	۱	۰٫۵	---
میزان سربار سطحی											
-۱۸۸٫۵	-۱۲۹٫۱	-۶۹٫۸	-۸٫۶	-۱۶۹٫۹	-۱۱۶٫۱	-۶۱٫۵	-۶٫۷	-۱۵۱٫۲	-۱۰۳٫۱	-۵۳٫۹	-۴٫۷
تاج تونل											
۱۶۲٫۴	۱۱۱٫۴	۶۰٫۵	۷٫۹	۱۴۷٫۹	۱۰۱	۵۴	۶٫۲	۱۳۴٫۴	۹۱٫۱	۴۷٫۸	۴٫۵
دیواره کناری											

۴-۵- تاثیر نرخ حفاری تونل

برای ارزیابی تاثیر نرخ حفاری تونل یا عبارتی سرعت بیرون کشیده شده سپر فولادی در مدل فیزیکی بر میزان بارهای وارد بر پوشش تونل، دو آزمایش ۱۲ و ۱۳ با مشخصات یکسان و نرخ حرکت سپر مختلف انجام شد. بر اساس نتایج بدست آمده از قرائت‌های ابزار دقیق و تحلیل‌های عددی، تغییر نرخ حرکتی سپر فولادی به میزان ذکر شده در مشخصات آزمایش تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر نتایج حاصل نداشته و مقادیر نیروهای داخلی ایجاد شده در پوشش تونل برای هر دو آزمایش تقریباً یکسان می‌باشد.

۵- نتیجه‌گیری

در این نوشتار، شیوه‌ی نگارش و ویژگی‌های بخش گوناگون در تحقیق حاضر با استفاده از مدلسازی فیزیکی و ساخت یک مدل با مقیاس هندسی ۱/۴۰ و ابزاربندی پوشش تونل مکانیزه مدل شده، تاثیر پارامترهایی از قبیل نسبت سربار به قطر تونل (عمق تونل)، میزان سربار سطحی و نرخ حفاری تونل بر میزان بارهای وارد بر پوشش تونلهای مکانیزه مورد مطالعه قرار گرفت. بر اساس مهمترین نتایج حاصل:

- با افزایش عمق تونل میزان لنگر خمشی ایجاد شده درون پوشش تونل افزایش می‌یابد. میزان تاثیر عمق تونل بر افزایش لنگر خمشی در حالت زمین آزاد قابل ملاحظه می‌باشد. با اعمال سربار سطحی بر سطح مدل و با بیشتر شدن میزان سربار سطحی، تاثیر عمق تونل کاهش می‌یابد. مقادیر لنگرهای خمشی ایجاد شده در پوشش تونل برای حالت زمین آزاد در مقایسه با مدل‌های دارای سربار سطحی بسیار ناچیز می‌باشد که به مقدار لنگر خمشی با افزایش عمق افزوده می‌شود. با اعمال سربار، متناسب با شدت سربار میزان لنگر خمشی درون پوشش تونل افزایش می‌یابد.

- بر اساس نتایج بدست آمده از قرائت‌های ابزار دقیق، تغییر نرخ حرکتی سپر فولادی به میزان ذکر شده در مشخصات آزمایش تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر نتایج حاصل نداشته است.

- در کنار بررسی الگوی کیفی تاثیر هر یک از پارامترها بر میزان بارهای وارد بر پوشش، مقایسه نتایج حاصل از قرائت ابزاربندی انجام شده با نتایج تحلیل‌های عددی یک مرجع ارزشمند برای صحت‌سنجی و اعتبارسنجی مدلسازی عددی فراهم آورده است.

۶- مراجع

- Abdoliye fazel, A., Emami, M., & Afshin, H. (2015). Physical modeling of settlement in sandy soil due to mechanized tunnelling. *Tunneling & Underground Space Engineering*, 4 (1), 84-69.
- Branque, D., Doan, V.H., & Boutin, C. (2006). Earth pressure balanced shield method: experimental study on a large reduced scale model. *Intern. Conf. on Physical Modeling in Geomechanics*, Proceedings Rotherdam, Balkema, 1145-1150.
- Chan, C. (1985). *Instruction manual, CKC E/P cyclic loading triaxial system users manual*. Soil Engineering Equipment Company. San Francisco, CA, USA.
- Gibson, A.D. (1996). *physical scale modeling of geotechnical structures at one-G*. |Ph.D thesis, California institute of technology, California, USA.
- Hashimoto, T., Nagaya, J., Konda, T., & Tamura, T. (2002). Observation of lining pressure due to shield tunneling. *Geotechnical aspects of underground construction in soft ground*, IS-Toulouse, Kanster et al. (eds), 119-124.
- Ishihara, K. (1996). *Soil behavior in earthquake geotechnics*. Department of Civil Engineering Science, University of Tokyo.
- Katebi, H., Rezaei, A.H., Hajialilue-Bonab, M., & Tarifard, A. (2015). Assessment the influence of ground stratification, tunnel and surface buildings specifications on shield tunnel lining loads (by FEM). *Tunneling & Underground Space Technology*, 49, 67-78.

- Katebi, H., Rezaei, A.H., Hajjalilue-Bonab, M., & Tarifard, A. (2014). Feasibility of artificial surcharge usage for depth reduction of TBM entrance shaft. (Case study: west shaft of Tabriz metro Line 2). *Tunneling & Underground Space Engineering*, 3 (2), 160-171.
- Kim, S.H., Burd, H.J., & Milligan, G.W. (1998). Model testing of closely spaced tunnels in clay. *Geotechnique*, 48(3), 375-388.
- Liang, F.Y., Yao, G.S. & Li, J.P. (2009). Effects of soil stratification on the tunneling-induced ground movements. *Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground*, Ng, Huang & Liu (eds) © 2009 Taylor & Francis Group, London, 697-702.
- Mair, R.J., Taylor, R.N., & Burland, J.B. (1996). Prediction of ground movements and assessment of risk of building damage due to bored tunneling. *Proceeding of the International Symposium on Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground*, London (eds Mair and Taylor), Balkema, 713-718.
- Mashimo, H. & Ishimura, T. (2003). Evaluation of the load on shield tunnel lining in gravel. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 18, 233-241.
- Meguid, M.A., Saada, O., Nunes, M.A., et al. (2008). Physical modeling of tunnels in soft ground: a review. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 23, 185-198.
- Mroueh, H. & Shahrouh, I. (2003). A full 3-D finite element analysis of tunneling-adjacent structures Interaction. *Computers and Geotechnics*, 30, 245-253.
- Nunes, M.A., & Meguid, M. A. (2009). A study on the effects of overlying soil strata on the stresses developing in a tunnel lining. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 24, 716-722
- Official Report of the International Tunnelling Association. (2000). Guidelines for the Design of Shield Tunnel Lining. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 15(3), 303-331.
- Randolph, M.F., & House, A.R. (2001). The complementary roles of physical and computational modeling. *Int. J. of physical modeling in geotechnics.IJPMG*, 1,1-8.
- Viswanadham, B.V.S. (2013). *physical modelling in geotechnics*. Bloomsbury, ISBN 10/13: 9382563385 / 9789382563389.
- Wood, D.M. (2004). *Geotechnical modelling (applied geotechnics)*, Spon Press, 2004-09-24, ISBN 10/13: 0415343046/9780415343046.