نشریه‌ی مهندسی تونل و فضاهای زیرزمینی
Tunneling & Underground Space Engineering (TUSE)
tuse.shahroodut.ac.ir
دوره‌ی ۹- شماره‌ی ۴/زمستان ۱۳۹۹

مقایسه استفاده از بولت فولادی یا داول پلاستیکی در اتصالات طولی و شعاعی سگمنت‌ها (مطالعه موردی: پروژه تونل خط A متروی قم)

پژوهشی

عماد معینی[۱]، سید محمد صابری زاده[۲]، ابراهیم زمانی بیدختی[۳*]

۱- کارشناس ارشد؛ استخراج معدن، دانشگاه بین‌المللی قزوین، emad_moini@yahoo.com

۲- کارشناس ارشد؛ سازه دانشگاه فردوسی مشهد، saberizade.m@gmail.com

۳- استادیار؛ دانشگاه صنعتی شاهرود، Zamani.eb@shahroodut.ac.ir

دریافت دست‌نوشته: ۱۳۹۹/۱۲/۰۲؛ پذیرش دست‌نوشته: ۱۴۰۰/۰۶/۱۷

شماره صفحات: ۳۸۳ تا ۳۹۶

شناسه دیجیتال (DOR): 20.1001.1.23223111.1399.9.4.4.3

واژگان کلیدی

تونل مکانیزه

فاصله‌داری

پله‌داری

بولت فولادی

داول پلاستیکی

سگمنت پیش ساخته

چکیده

مطالعه حاضر به بررسی و مقایسه کیفیت و سرعت نصب رینگ‌های سگمنتی در تونل مکانیزه با دو نوع مختلف اتصالات می‌پردازد. یکی از مشکلات متداول موجود در پروژه‌های تونل‌های مکانیزه، ایجاد فاصله و پله مابین سگمنت‌های با اتصالات بولتی و در نتیجه نفوذ آب به داخل تونل و ظاهر نامناسب است. در تونل مکانیزه پروژه خط A متروی قم برای جبران این مشکلات، بهینه‌سازی هندسی در یکی از قالب‌های سگمنتی جهت تبدیل آن از تیپ بولتی به داولی صورت گرفت و سپس سگمنت‌های تولیدی آن در تونل نصب گردید. بررسی‌های انجام شده روی سگمنت‌های نصب شده نشان دهنده آن است که میزان رواداری و فاصله‌داری رینگ‌ها در تیپ داولی کاهش قابل توجهی داشت و میزان شکستگی در گوشه‌های رینگ‌های نصب شده نیز کاهش ۷۵ درصدی نشان داد؛ همچنین متوسط سطح شکستگی کاهش ۵۰ درصدی را نشان داده و متوسط زمان نصب رینگ در سگمنت‌های نوع داولی نیز حدود ۱۱ درصد کاهش یافت. بررسی پارامترهای آماری کنترل کیفی نصب، نشان از بالا رفتن کیفیت کار در بخش‌های پله شدگی و بازشدگی و درنتیجه فشردگی گسکت‌ها جهت کاهش نفوذ آب، کاهش حجم و میزان شکستگی و بالتبع کاهش هزینه مصرف مواد ترمیمی و کاهش مدت زمان نصب گردید. در مجموع مطابق بررسی آماری در پروژه، تغییر استفاده از داول پلاستیکی به جای بولت‌های فولادی در سگمنت با توجه به هزینه خرید پایین تر و افزایش کیفیت کار در پروژه‌های تونل مکانیزه پیشنهاد می‌شود.

۱- مقدمه

حفر تونل‌ها با روش‌های مختلفی قابل انجام است. یکی از روش‌های جدید که در دهه‌های اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته است، حفاری با استفاده از دستگاه TBM بر گرفته از نام کامل Tunnel Boring Machine است که در کشور ایران نیز در تونل‌های انتقال آب و تونل‌های مربوط به قطارهای شهری و متروها و ... در سطح وسیعی مورد استفاده واقع شده است. در خصوص سیستم تحکیم تونل‌ها نیز با توجه به پروسه زمان بر اجرای بتن تحکیم به صورت درجا از جمله آرماتوربندی، قالب‌بندی، پمپاژ بتن پشت قالب ها، ویبره کردن بتن، عدم امکان کنترل کیفیت و عمل‌آوری مناسب، نیاز به نیروی انسانی زیاد جهت اجرای عملیات فوق

* سمنان؛ شاهرود؛ دانشگاه صنعتی شاهرود؛ کدپستی ۳۶۱۹۹۹۵۱۶۱؛ صندوق پستی: ۳۱۶؛ شماره تلفن: ۳۲۳۰۰۲۴-۰۲۳

الذکر و عدم امکان تهویه مناسب داخل تونل، رویکرد کلی به استفاده از قطعات بتنی پیش ساخته است. در حفاری تونل های مکانیزه با دستگاه TBM، جهت نگهداری دائم تونل از سگمنت‌های پیش ساخته بصورت رینگ کامل استفاده می گردد. یکی از مباحث مورد مناقشه در طراحی سگمنت‌ها، دو گزینه استفاده از بولت فولادی و یا داول پلاستیکی جهت اتصال رینگ‌ها و سگمنت‌ها است. در اکثریت پروژه‌های تونلی از بولت‌های فولادی یا خمیده برای اتصال سگمنت‌ها استفاده شده است. امروزه استفاده از رینگ‌های سگمنتی تیپ داولی (اتصال سگمنتی داولی) در تونل‌های مکانیزه به دلیل راحتی و قابلیت هدایت نصب رینگ در مقایسه با رینگ‌های سگمنتی تیپ بولتی کاربرد بیشتری پیدا کرده است (Gruebl, 2006).

اولین قطعات سگمنتی در سال ۱۸۶۹ و در متروی لندن از جنس چدن و با اتصالات بندانگشتی تولید و نصب گردید. این نوع از اتصال توزیع بار بین اجزای فشاری را به صورت یکنواخت تر فراهم می‌آورد (Koyama, 2003).

در سیستم نگهداری تونل‌ها از بولت یا داول برای نگهداری سگمنت‌ها در کنار هم استفاده می‌شود. این قطعات حاوی یکسری حفرات کوچک برای جایگیری سیستم اتصالات شامل بولت و داول و غیره می‌باشند. در اکثر پروژه های تونلی از بولت‌های فولادی یا خمیده برای اتصال سگمنت‌ها استفاده شده است. مقالات خیلی کمی وجود دارد که در آنها از توضیحاتی درباره نصب موفق سگمنت‌ها و رینگ‌ها در حفاری مکانیزه بدون استفاده از بولت‌ها آورده شده باشد. به همین دلیل کارفرمایان، طراحان و پیمانکاران به نصب سگمنت‌ها بدون استفاده از بولت‌ها تمایل چندانی ندارند. اگر چه امروزه در اکثر پروژه‌ها برای اتصال رینگ‌ها، از داولها با فشار چفت‌شونده استفاده می‌شود، اما در بسیاری از آن پروژه‌ها بولت‌های فولادی همچنان برای اتصالات سگمنتی داخل رینگ و رینگ به رینگ استفاده می‌شود؛ بنابراین شناخت کلی عملکرد بولت‌ها دیدگاه خوبی را نسبت به استفاده از آن‌ها ارائه می‌دهد. وظایف اصلی اتصالات سگمنت را می‌توان در موارد زیر خلاصه کرد (Nishikawa, 2003):

- برآورده نمودن دقت نصب و جلوگیری از بیرون زدگی سگمنت و باز شدگی در درزه‌های لاینینگ
- حفظ نیروهای فشاری اعمال شده به نوارهای آب‌بند خصوصاً در نزدیکی دهانه‌های خروجی تونل
- برآورده نمودن پایداری سگمنت حتی در مواقعی که جک‌های حرکتی ماشین حفاری تونل، نیروئی به سگمنت اعمال نمی‌کند.
- جایگیر نمودن سگمنت ها در موقعیت خود

بولت‌ها: میله‌های فولادی پیچ دار هستند که از درون حفرات ایجاد شده در سمت داخلی لاینینگ در موقعیت خود جاگذاری می‌شوند. این بولت‌ها به دو حفره نیاز دارند که در دو طرف درزه‌های ما بین دو سگمنت و روی سطح داخلی سگمنت ایجاد می‌شود. این حفره‌ها، باید به اندازه کافی برای جا دادن بولت‌ها بزرگ باشند.

داول‌ها: به منظور ایجاد یک سطح داخلی صاف در لاینینگ تونل، نیاز به پر کردن سوراخ بولت‌ها است. شرکت-های متعددی، اتصالات غیر آهنی را که از ضخامت میان سگمنت عبور می‌کنند (Connex Dowels)، برای غلبه بر این مشکل توسعه داده‌اند. غالب این داول‌ها از پلاستیک ساخته شده‌اند؛ همچنین زمان نصب داول‌ها برخلاف بولت‌ها حین نصب سگمنت است؛ ولی بولت‌ها بعد از نصب بوسط اپراتور و در محل خود فیکس می‌گردند که خود عامل پله شدگی رینگ سگمنتی است. هدف از این مطالعه بررسی کیفیت نصب و سرعت اجرای تحکیم و در نهایت بهره‌وری بالاتر در تونل‌های مکانیزه سگمنتی است تا با انتخاب سیستم بهینه، هزینه کلی پروژه کاهش یافته و کیفیت کار افزایش یابد.

۲- نقش بولت‌ها در اتصالات سگمنتی

به‌طور کلی انجمن‌های مرتبط با تونل‌سازی کشورهای مختلف مواردی غیر از نقش سازه‌ای بولت‌ها در استفاده از آنها ذکر کرده‌اند. برای مثال انجمن‌های تونل‌زنی آلمان و انگلستان به نقش کمکی بولت در نصب دقیق سگمنت‌ها اشاره کرده‌اند، اما انجمن تونل‌زنی فرانسه علاوه بر نقش بولت در بسته نگه داشتن گسگت به برخی عملکرد دیگر آن اشاره کرده‌اند، از قبیل:

- کمک به پایداری سگمنت در صورت اعمال نیروی پیش‌بینی نشده و ناگهانی در طی نصب
- کمک به حفظ شکل رینگ قبل از آنکه فشار زمین

روی رینگ وارد گردد

- فراهم نمودن مقاومت در برابر فشارهای داخلی در تونل‌های تحت فشار

انجمن بزرگراهی فدرال آمریکا تنها به نقش بسته نگه داشتن گسگت اشاره کرده و خاطر نشان می‌کند که در صورت تأمین نیروی مورد نیاز آن توسط جک‌های سگمنتی، نیازی به استفاده از بولت‌ها وجود ندارد. انجمن مهندسین عمران ژاپن روش‌هایی را در طراحی درزه‌ها و بولت‌ها جهت اطمینان از تأمین مقاومت گشتاوری در درزه‌ها و همچنین راه‌هایی برای سیستم‌های غیربولتی پیشنهاد می‌دهد (No & Association, 2000).

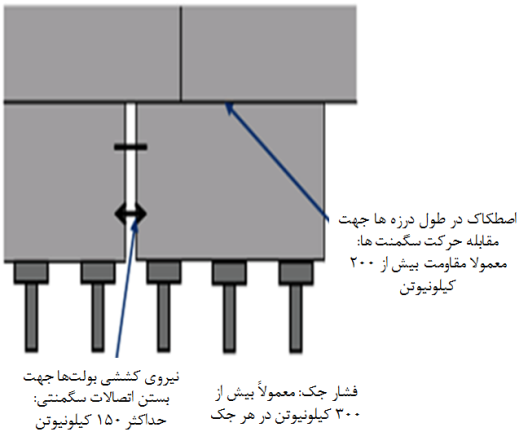
طی نظرسنجی که بین کارفرماها، مشاوران و پیمانکاران در سطح جهان نسبت به عملکرد بولت‌ها در توانایی یا عدم توانایی آن صورت گرفت موارد زیر توسط اغلب آن‌ها مورد تأیید بود:

- نگهداری سگمنت‌ها نسبت به همدیگر
- جلوگیری از آزادسازی سگمنت در انتهای شیلد حفاری هنگام بازشدن جک‌های نیرو و اعمال نیروی فشاری گسگت‌ها به سمت بیرون که باعث رهاشدن سگمنت‌ها می‌شود.
- بسته نگه داشتن گسگت‌ها که در حالت فشرده نیروی معادل 30-50 KN به سمت بیرون وارد می کند. جابجایی‌های نامناسب این نیرو می‌تواند باعث چرخش در سگمنت‌ها شود.

همه این موارد برای حالتی است که تزریق پشت سگمنتی صورت نگرفته و رینگ‌ها در جای خود محکم نشده‌اند و کوچک‌ترین نیرویی باعث ایجاد جابجایی‌های قابل توجهی می‌شوند (Kramer, et al., 2003).

بررسی انجام شده بر تونل‌های ریزش کرده نشان می دهد که بولت‌های فولادی رفتار سازه‌ای درازمدت از خود نشان نمی‌دهند. بنابراین در طراحی‌ها معمولاً رفتار سازه‌ای بولت در نظر گرفته نمی‌شود(Johnson, 2003). از جمله موارد مرتبط با رفتار سازه‌ای بولت‌ها، عبارتند از:

الف) کشش لازم در بستن اتصالات سگمنتی: بولت‌ها معمولاً نیروی کششی لازم جهت بستن اتصالات سگمنت را ندارد و فقط برای بسته نگهداشتن گسگت‌های فشرده شده استفاده می‌شود. **شکل ۱**، نشان می‌دهد که اصطکاک تولید شده توسط نیروی جک از حداکثر نیروی کششی بولت‌ها جهت بستن اتصالات سگمنتی خیلی بیشتر است.



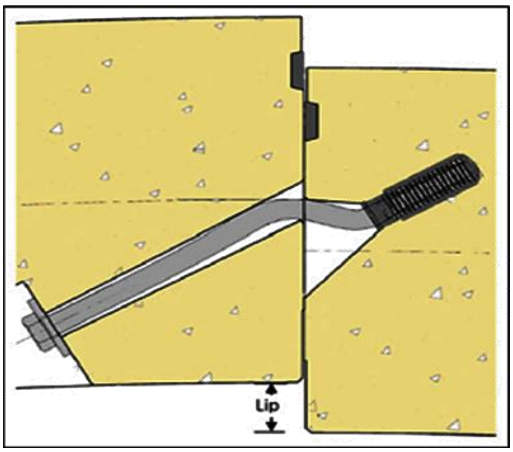
شکل ۱- بسته نگه داشتن اتصالات

(Harding, et al., 2014)

ب) محدود کردن جابجایی‌های چرخشی در حین تعمیر و نگهداری: با در نظرگرفتن ضخامت معمول سگمنت‌ها (300 mm) سطح تماس سگمنت‌ها در محل تماس حدود 170 mm خواهد بود، بنابراین حداکثر طول بازوی اهرمی لازم جهت ایجاد گشتاورها در بولت‌ها به کمتر از 100 mm محدود خواهد شد. با در نظر گرفتن ظرفیت نهایی بولت‌ها (100 KN) حداکثر ظرفیت گشتاوری آن کمتر از 10 KN خواهد داد که کمتر از گشتاور لازم جهت جلوگیری از جابجایی بزرگ یا بستن اتصالات باز در اکثر شرایط است؛ بنابراین طراحان بایستی خیلی مراقب باشند که از بولت‌ها در طراحی مقاومت گشتاوری استفاده نکنند.

پ) پیشگیری از جابجایی‌ها برشی در حین تعمیر و نگهداری: بولت‌ها به دو دلیل نمی‌توانند در طراحی کنترل پله‌داری سگمنت‌ها استفاده گردد؛ اول اینکه بارهای وارده جهت اتصال سگمنت به سگمنت به‌طور معمول در کمترین مقدار 1000 KN/m است؛ بنابراین نیروی لازم برای غلبه بر اصطکاک ناشی از این نیرو چند برابر بزرگ‌تر از مقاومت بولت خواهد بود. دوم اینکه با توجه به طول زیاد بولت، هرگونه جابجایی‌های برشی سگمنت‌ها به بیش از ۵ میلی‌متر باعث ایجاد خمش در طول بولت خواهد شد. برای جابجایی های بزرگ‌تر، گشتاور خمشی افزایش پیدا می‌کند و باعث

می‌شود که بولت‌ها زودتر به تغییر شکل پلاستیکی خود نزدیک شوند. بررسی‌ها نشان داده است که این جابجایی‌های پلاستیکی در ۱۵ تا ۳۰ درصد ظرفیت برشی بولت‌ها اتفاق می‌افتند. در جابجایی‌های بیش از ۵۰ میلی‌متر (**شکل ۲**)، بولت‌ها به حد نهایی ظرفیت برشی خود می‌رسند و پایداری خود را از دست می‌دهند (Harding, et al., 2014).



شکل ۲- تغییر شکل بولت (Harding et al., 2014)

۳- معرفی پروژه

۳-۱- کلیات پروژه متروی قم

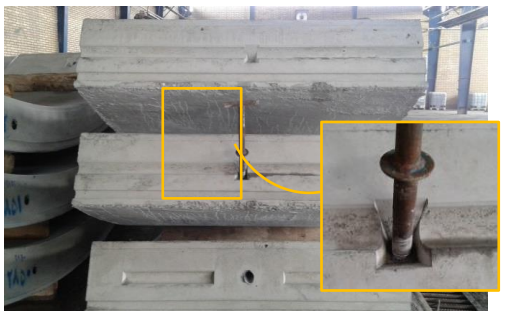
خط A قطار شهری قم با طول حدود ۱۴۷۰۰ متر از ایستگاه مسجد جمکران شروع شده و با طی ۱۴ ایستگاه در مسیر به قلعه کامکار ختم می‌شود. حد فاصل ایستگاه‌های A1 تا A3 به روش سنتی و مابقی مسیر با استفاده از یک دستگاه EPB به قطر ۹/۳۵ متر حفاری خواهد شد (Sahel Consultant Engineers, 2016).

۳-۲- سگمنت‌های تولیدی متروی قم

سگمنت‌های موجود در خط A مترو قم شامل دو تیپ A و B است. عرض متوسط سگمنت هر دو تیپ برابر ۱/۵ متر، قطر داخلی ۸/۴۳ متر و قطر خارجی آنها ۹/۰۷ متر است. قالب‌های تیپ A (قالب‌های بولتی) شامل پنج سری قالب سگمنت که هر کدام شامل شش قطعه سگمنت (A1 تا A4، B و C) به همراه سگمنت کلید (K) است. نمونه‌ای از قالب تیپ A و سگمنت تولید شده توسط آن به‌ترتیب در **شکل ۳** و **شکل ۴**، نشان داده شده است. نحوه اتصال مابین سگمنت‌ها توسط بولت‌های فولادی صورت می‌گیرد.

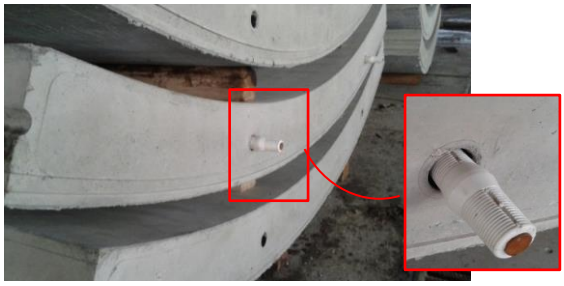
قالب‌های تیپ B (قالب‌های داول پلاستیکی) شامل دو سری قالب سگمنت که هر کدام شامل شش قطعه سگمنت (A1 تا A4، B و C) به همراه سگمنت کلید (K) است. نمونه‌ای از قالب تیپ B و سگمنت تولید شده توسط آن به‌ترتیب در **شکل ۵** و **شکل ۶**، نشان داده شده است. نحوه اتصال آن‌ها داخل رینگ از طریق بولت و رینگ به رینگ از طریق داول پلاستیکی با فشار چفت شونده صورت می‌گیرد.

شکل ۳-یک نمونه قالب سگمنت تیپ A (بولت)



شکل ۴- سگمنت‌های تولید شده تیپ A (بولت)

شکل ۵-یک نمونه قالب سگمنت تیپ B (داول)

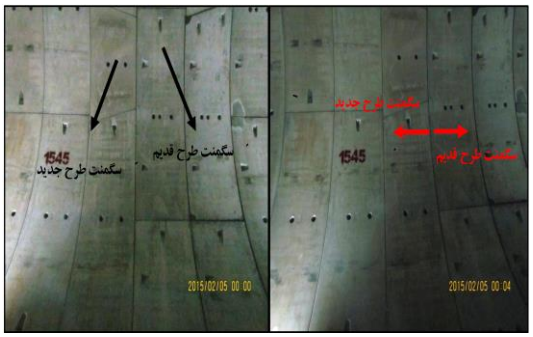


شکل ۶- سگمنت‌های تولید شده تیپ B (داول)

۴- مقایسه نصب سگمنت‌های تیپ A و تیپB

سگمنت‌های نصب شده در پروژه خط A متروی قم با توجه به سگمنت‌های تولیدی به صورت ادواری در تیپ A یا B نصب می‌شود. نصب سگمنت‌ها به عوامل مختلفی از جمله دقت اپراتور ارکتور، وضعیت زمین، خروج از محوریت دستگاه و ... وابسته است و یکی از مهم‌ترین مشکلات در پیش روی تیم حفاری تونل‌های مکانیزه است. این مشکل با توجه به دو تیپ سگمنت به کار رفته در تونل به‌خصوص در محل اتصال آن‌ها دو چندان شده است. برای حل این مشکل از اعمال نیروی مناسب جک‌های تراست دستگاه حفار و تزریق پشت سگمنتی دقیق و با گیرش اولیه مناسب قبل از برداشتن جک‌ها از روی سگمنت استفاده شده است.

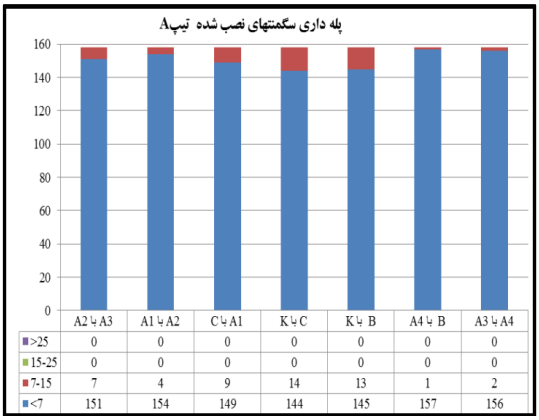
رینگ‌ها در داخل تونل باید طوری نصب گردند که جهت‌یابی آن‌ها به‌طور دقیق در راستای جهت‌یابی مورد نیاز طرح باشد. در این خصوص مقایسه دقیقی بین پارامترهای کنترل کیفیت توسط کارشناسان این واحد بعد از نصب ۱۵۸رینگ از هر کدام از سگمنت‌های تیپ A و B در اتصالات سگمنتی مورد بررسی قرار گرفته است که به شرح ذیل آورده شده‌اند (**شکل ۷**).



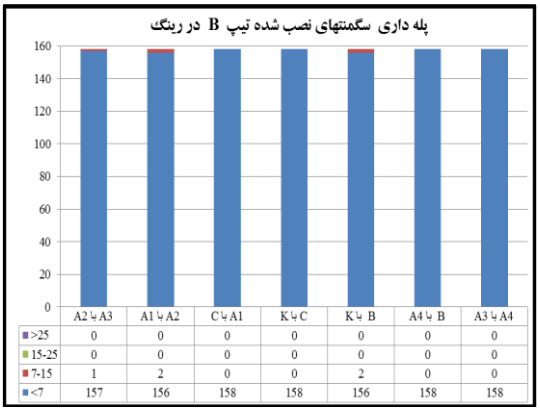
شکل ۷- سگمنت تیپ‌های مختلف نصب شده در تونل

۴-۱- پله‌داری در رینگ

پله‌داری: اختلاف تراز ایجاد شده در هر رینگ نسبت به رینگ مجاور آن یا در هر سگمنت نسبت به سگمنت کناری آن را گویند. پله‌داری سگمنت‌ها در رینگ، در ۴ رده ۰ تا ۷ میلی‌متر، ۷ تا ۱۵ میلی‌متر، ۱۵ تا ۲۵ میلی‌متر و بزرگ‌تر از ۲۵ میلی‌متر تقسیم‌بندی شده است. در **شکل ۸** و **شکل ۹**، تعداد پله‌داری‌ها در هر رده مشخص شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، پله‌داری در سگمنت‌های تیپ B کاهش قابل ملاحظه‌ای داشته است.



شکل ۸- وضعیت پله‌داری سگمنت‌های نصب شده تیپ A

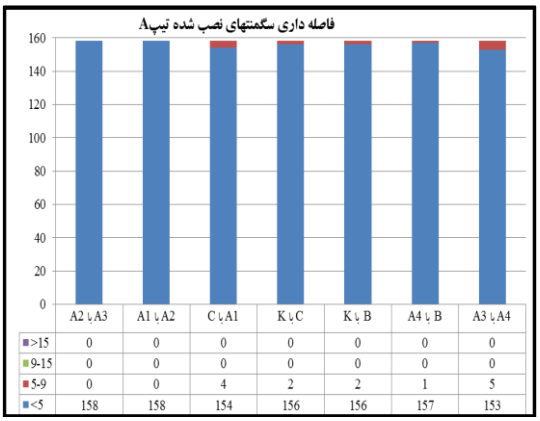


شکل ۹- وضعیت پله‌داری سگمنت‌های نصب شده تیپ B

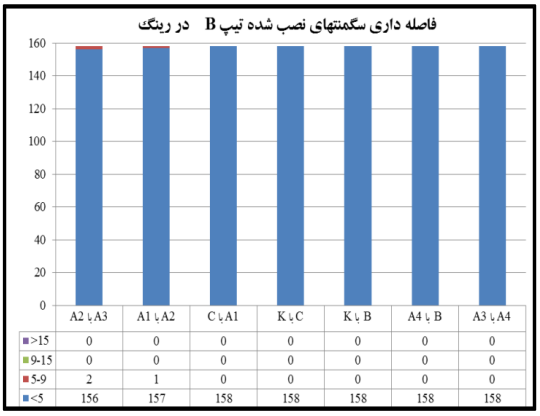
۴-۲- فاصله‌داری در رینگ

به فاصله درز ایجاد شده در هر رینگ نسبت به رینگ مجاور آن یا در هر سگمنت نسبت به سگمنت کناری آن فاصله‌داری گویند. فاصله‌داری سگمنت‌ها در رینگ، در ۴ رده ۰ تا ۵ میلی‌متر، ۵ تا ۹ میلی‌متر، ۹ تا ۱۵ میلی‌متر و

بزرگ‌تر از ۱۵ میلی‌متر تقسیم‌بندی شده که در **شکل ۱۰** و **شکل ۱۱**، تعداد فاصله‌داری‌ها در هر رده مشخص شده است. نتایج نشان‌دهنده کاهش فاصله‌داری در سگمنت‌های تیپ B است.



شکل ۱۰- فاصله‌داری سگمنت‌های نصب شده تیپ A

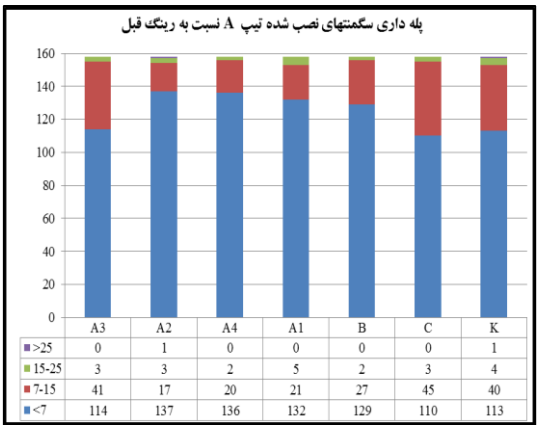


شکل ۱۱- فاصله‌داری سگمنت‌های نصب شده تیپ B

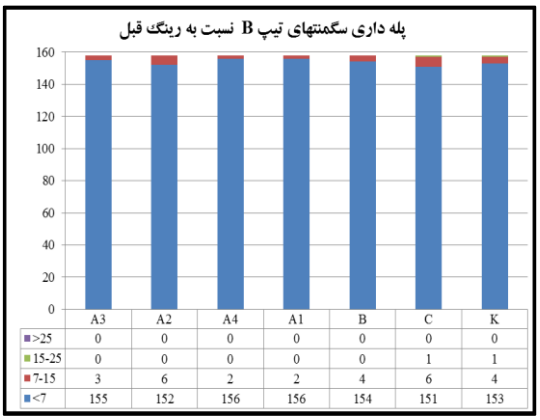
۴-۳- پله‌داری نسبت به رینگ قبل

پله‌داری سگمنت‌ها نسبت به رینگ قبلی، در ۴ رده همانند **شکل ۸**، تقسیم‌بندی شده است. در **شکل ۱۲** و **شکل ۱۳**، تعداد پله‌داری‌ها در هر رده مشخص شده است. نتایج به‌دست آمده بر کاهش چشم‌گیر پله‌داری در اتصالات رینگ به رینگ در سگمنت‌های تیپ B دلالت دارد.

افزایش کیفیت کار و همچنین افزایش سرعت اجرا در این آیتم کاملاً مشهود می‌باشد. با تغییر سیستم نگهدارنده داول به جای بولت پس از نصب، میزان پله‌شدگی و بیرون‌زدگی رینگ‌ها به‌طور محسوسی کاهش نشان داده است.



شکل ۱۲- پله‌داری سگمنت‌های نصب‌شده تیپ A نسبت به رینگ قبل

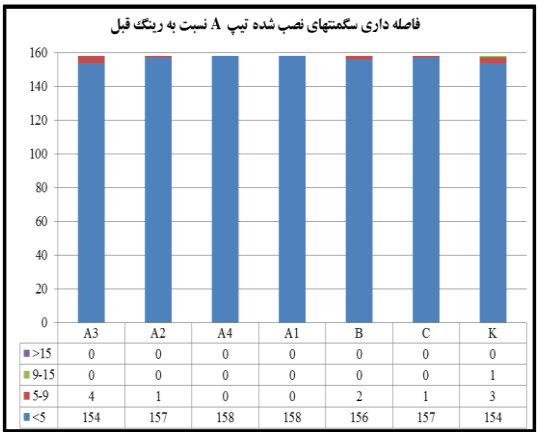


شکل ۱۳- پله‌داری سگمنت‌های نصب شده تیپ B نسبت به رینگ قبل

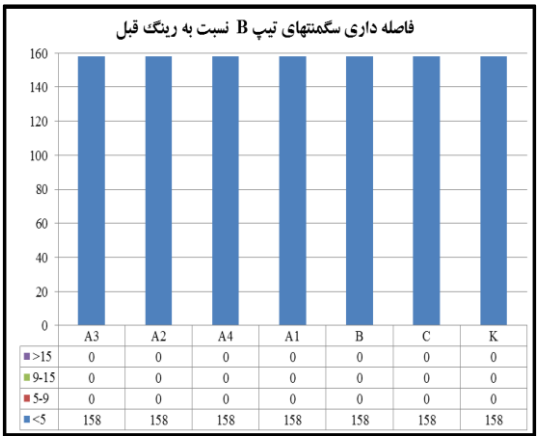
۴-۴- فاصله‌داری نسبت به رینگ قبل

فاصله‌داری سگمنت‌ها نسبت به رینگ قبلی، در ۴ رده ۰ تا ۵ میلی‌متر، ۵ تا ۹ میلی‌متر، ۹ تا ۱۵ میلی‌متر و بزرگ‌تر از ۱۵ میلی‌متر تقسیم‌بندی شده است. در **شکل ۱۴** و **شکل ۱۵**، تعداد فاصله‌داری‌ها در هر رده مشخص شده است. بر اساس نمودارها، فاصله‌داری رینگ به رینگ در قالب‌های جدید کمتر شده است.

با توجه به تغییر استفاده از داول پلاستیکی به جای سیستم بولت فولادی، چفت شدگی رینگ‌ها متناسب با فشار جک‌های تراست افزایش یافته و بازشدگی و فاصله‌داری رینگ‌ها مطابق نمودارها کاهش یافته است.



شکل ۱۴- فاصله‌داری سگمنت‌های نصب‌شده تیپ A نسبت به رینگ قبل

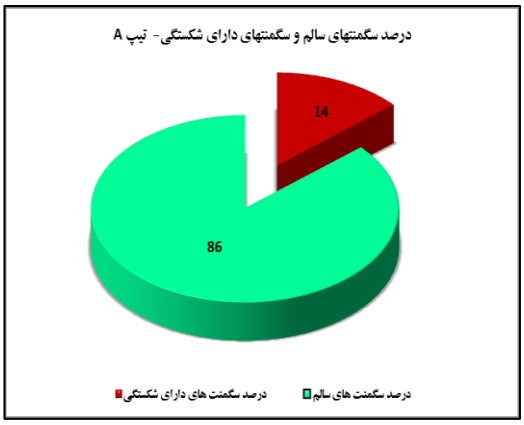


شکل ۱۵- فاصله‌داری سگمنت‌های نصب‌شده تیپ B نسبت به رینگ قبل

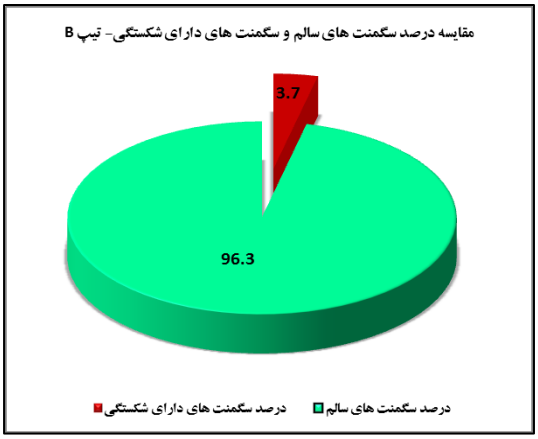
۴-۵-بررسی آمار شکستگی موجود در سگمنت های جدید و قدیم

۴-۵-۱- مقایسه درصد کل سگمنت‌های سالم و سگمنت‌های دارای شکستگی

مقایسه بین درصد کل سگمنت‌های سالم و سگمنت‌های دارای شکستگی تیپ‌های A و B (**شکل ۱۶** و **شکل ۱۷**) داخل تونل نشان می‌دهد که درصد کل شکستگی‌های موجود در سگمنت‌های تیپ B به مراتب کمتر از درصد کل شکستگی‌های موجود در تیپ A بوده، در نتیجه مشاهده شده درصد کل سگمنت‌های سالم و نیز کیفیت نصب رینگ با سگمنت‌های تیپ B، در داخل تونل افزایش یافته است.



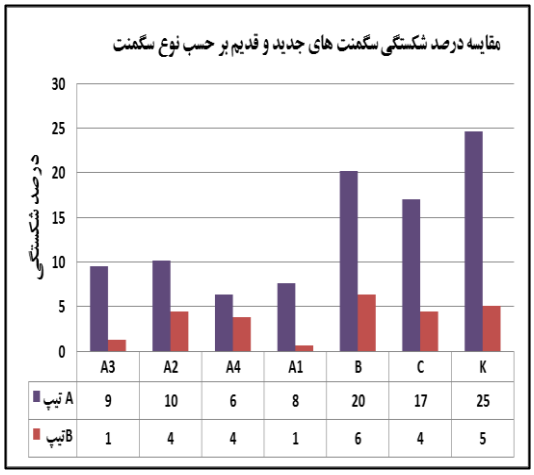
شکل ۱۶- درصد کل سگمنت‌های سالم و سگمنت‌های دارای شکستگی- تیپ A



شکل ۱۷- درصد کل سگمنت‌های سالم و سگمنت‌های دارای شکستگی- تیپ B

۴-۵-۲-مقایسه درصد سگمنت‌های دارای شکستگی بر حسب نوع سگمنت

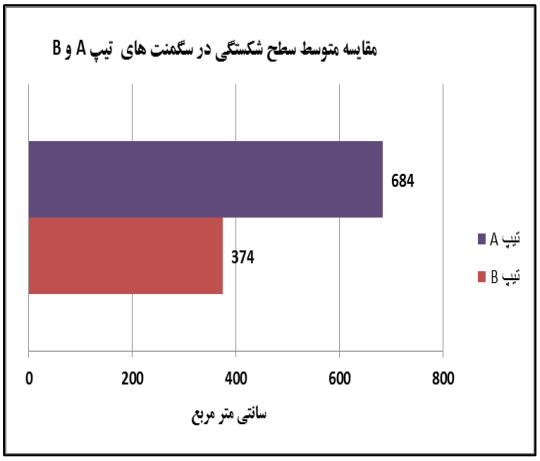
مقایسه بین درصد سگمنت‌های دارای شکستگی بر حسب نوع سگمنت، در قالب‌های تیپ A و B (**شکل ۱۸**) داخل تونل نشان می‌دهد که شکستگی‌های موجود در سگمنت-های تیپ B بر حسب نوع سگمنت نیز به مراتب کمتر از شکستگی‌های موجود در سگمنت‌های تیپ A بوده و این مقایسه نیز افزایش کیفیت نصب رینگ با سگمنت‌های قالب داولی را تصدیق می‌کند.



شکل ۱۸- مقایسه درصد سگمنت‌های دارای شکستگی بر حسب نوع سگمنت

۴-۵-۳- مقایسه متوسط سطح شکستگی در قالب های جدید و قدیم

با توجه به **شکل ۱۹**، مشاهده می‌شود که متوسط سطح شکستگی سگمنت‌های نصب‌شده در تونل در سگمنت‌های تیپ B تقریبا ۵۰ درصد سگمنت‌های تیپ A است که نشانگر کیفیت نصب بالای سگمنت‌های تیپ B است و دلیل آن را می‌توان به نقش هدایت نصب سگمنت اتصالات داولی بیان کرد. در این مورد منشا ترک ها نیز مدنظر نبوده و فقط آمار و کاهش میزان ترک‌ها و شکستگی‌ها (با توجه به شرایط یکسان تولید و نصب سگمنت) مدنظر است.

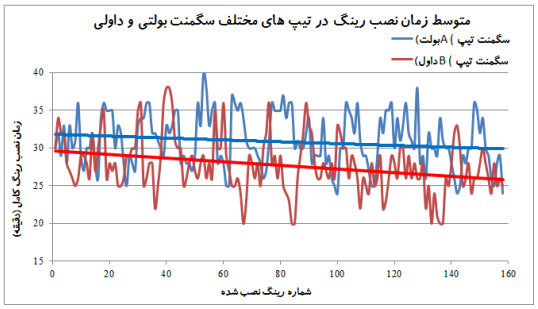


شکل ۱۹- مقایسه متوسط سطح شکستگی سگمنت‌های نصب شده در تونل

۴-۶- متوسط زمان نصب رینگ در سگمنت‌های تیپ A و B

در خصوص نصب رینگ‌ها نیز دو نوع تیپ مختلف حدود ۱۵۸ رینگ از هر نوع داخل تونل نصب گردیده و زمان دقیق نصب آنها توسط تیم کارشناسان کنترل کیفیت ثبت گردید. زمان نصب رینگ شامل نصب ۷ قطعه سگمنت به همراه جایگذاری بولت‌ها و سفت نمودن آن‌ها و همچنین نصب داول‌ها در قطعات سگمنت است.

در این بررسی مطابق **شکل ۲۰**، متوسط زمان نصب رینگ کامل در سگمنت‌های نوع A (بولت فولادی) حدود ۳۱ دقیقه و زمان نصب یک رینگ کامل در سگمنت‌های نوع B (داول پلاستیکی) حدود ۲۸ دقیقه ثبت گردید. از دلایل این کاهش ۱۱ درصدی می‌توان به هم‌راستا شدن سگمنت‌های متناظر به دلیل داول در بدنه سگمنت و کاهش زمان نصب بولت‌های فولادی در تیپ B را ذکر کرد؛ همچنین زمان استفاده از باکس بادی جهت سفت نمودن بولت‌های فولادی حذف گردیده است.



شکل ۲۰- نمودار مقایسه زمان نصب رینگ در سگمنت های تیپ A و B

۵- مقایسه هزینه‌ای دو گزینه

هزینه خرید داول‌های پلاستیکی نسبت به بولت های فولادی با توجه به ابعاد و اندازه اختلاف چندانی وجود ندارد. در هر رینگ حدود ۱۳ عدد بولت جهت اتصال رینگ به رینگ اجرا می‌شود. طول هر عدد بولت فولادی به قطر ۳۲ میلی‌متر حدود ۴۰ سانتی‌متر بوده و طول هر عدد داول پلاستیکی به قطر ۵۰ میلی‌متر حدود ۲۵ سانتی‌متر است. در استفاده از بولت فولادی هزینه خرابی باکس بادی بسیار بالا بوده، ولی در استفاده از داول پلاستیکی استفاده از باکس

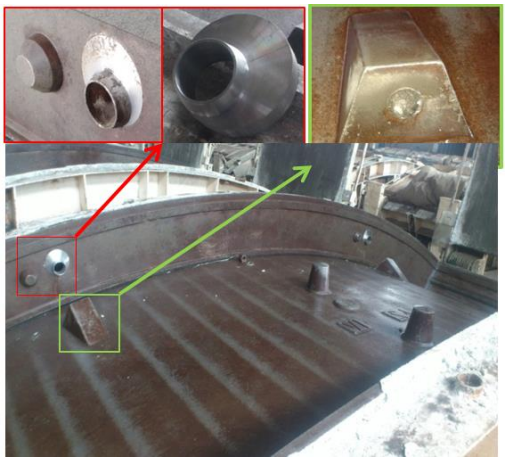
بادی حذف می‌شود. هزینه‌های مرتبط همانند خرید مواد ترمیمی جهت اصلاح شکستگی سگمنت و هزینه افزایش آرماتور در محل بولت و نصب اینزرت پلاستیکی داخل سگمنت در نوع بولت فولادی بالا است و به‌طور متوسط حدود ۸ درصد هزینه‌های جایگزینی داول به جای بولت کاهش نشان می‌دهد.

۶- تبدیل سگمنت‌ها از بولتی به داولی

با توجه مطالبی که در مقدمه نسبت به عملکرد بولت‌ها آورده‌شده، بولت‌ها عملکرد سازه‌ای در نگهداری نداشته و بیشترین عملکرد آنها مربوط به بسته نگه داشتن گسگت های فشرده شده است. در صورت تأمین نیروی مورد نیاز جک‌های تراست جهت بسته نگهداشتن گسگت‌ها و تزریق مناسب پشت سگمنتی نیازی به استفاده از بولت‌ها نمی‌باشد. با درنظر گرفتن مشکلات نصب سگمنت‌ها بخصوص در محل اتصال سگمنت‌های تیپ B به تیپ A و نتایج کنترل کیفی به‌دست آمده از نصب این دو تیپ سگمنت و همچنین تجربیات تیم نصب سگمنت‌ها در تونل و شکل ظاهری سگمنت‌های نصب شده بیانگر این بوده است که در موقع نصب، سگمنت‌های تیپ B به صورت منظم تر و دقیق تر نصب شده‌اند. علاوه بر این سهولت در ساخت سبد سگمنت و کاهش برش‌های سازه‌ای و کاهش زمان تولید یکی دیگر از مزایای این قالب بوده است. به همین دلایل تیم مهندسی مستقر در کارگاه خط A متروی قم، ایده تبدیل قالب‌های سگمنت تیپ A به تیپ B جهت بهبود فرآیند نصب سگمنت و همچنین سرعت در تولید سگمنت را ارائه نمود که این امر روی یکی از قالب‌های رینگ تیپ A (رینگ M4) صورت گرفت. لازم به ذکر است، حفرات ایجاد شده در این رینگ با توجه به همسان‌بودن فواصل طولی آن‌ها با تیپ B سرعت کار را دو چندان نمود.

روند کار با بررسی دقیق طرح‌های هندسی دو تیپ قالب سگمنت A,B به همراه اندازه‌های دقیق همراه بود که در ادامه با برشکاری و تبدیل قالب‌ها و ساخت شابلون محل حفرات قالب B و اعمال آن روی قالب تیپ A ادامه یافت و در نهایت با اندازه‌گیری دقیق و کنترل‌های نهایی قالب‌های رینگ M4 از سیستم اتصال بولتی به داولی تبدیل گردید. **شکل ۲۱** و **شکل ۲۲**، نمونه‌ای از این قالب تبدیل‌یافته را نشان می‌دهند.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، در دیواره قالب شابلون های سگمنت تیپ A برش خورده و شابلون سگمنت مشابه تیپ B جایگزین آن شده است؛ همچنین در کف محل پیچ بولت شابلون تیپ A به دلیل عدم نیاز به آن پر شده است. یک نمونه سگمنت تولید شده در قالب تغییر یافته در **شکل ۲۲**، آورده شده است.



شکل ۲۱- قالب سگمنتی تغییر یافته از اتصال بولتی به داولی در رینگ M4

شکل ۲۲- نمونه سگمنت تغییر یافته از اتصال بولتی به داولی در رینگ M4

در بررسی مراحل نصب و اتصال سگمنت‌های تبدیل شده تیپ A با هم و با سگمنت‌های تیپ B در حالت‌های مختلف و با تغییر موقعیت‌های سگمنت کلید، مشکل خاصی از نظر پله‌شدگی و فاصله‌داری در رینگ و نسبت به رینگ قبل مشاهده نگردید و سگمنت‌های تبدیل شده تیپ A

رفتاری مشابه تیپ B از خود نشان دادند. **شکل ۲۳** و **شکل ۲۴**، به‌ترتیب مراحل نصب و بعد از نصب یک نمونه از سگمنت تغییر یافته تیپ A به سگمنت تیپ B را نشان می‌دهند.

شکل ۲۳- مرحله نصب سگمنت تغییر یافته تیپ A به سگمنت تیپ B

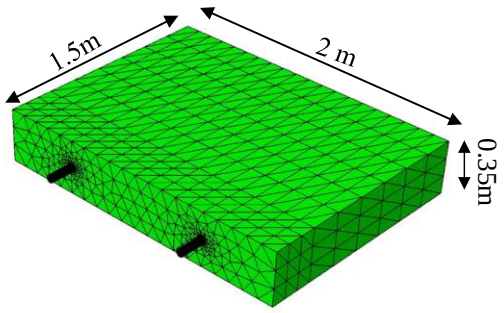
شکل ۲۴- نمونه سگمنت تغییر یافته از اتصال بولتی به داولی در رینگ A4

۷- مدل‌سازی دو گزینه

دو گزینه استفاده از بولت و داول جهت تحلیل و آنالیز بیشتر به روش المان محدود (FE) با نرم افزار Abaqus مدل‌سازی و گردید. هدف از این کار بررسی نحوه خرابی و ظرفیت این دو تیپ اتصال است.

۷-۱- هندسه مدل

شکل ۲۵، ابعاد مدل و نحوه شبکه بندی اجزای محدود آن را نشان می‌دهد. کلیه المان‌ها از نوع C3D4 که یک المان سه بعدی ۴گرهی مثلثی است، انتخاب شدند.



شکل ۲۵- هندسه مدل و شبکه‌بندی آن

۷-۲- مشخصات مصالح

برای بولت: قطر سوراخ بولت ۳/۵ سانتی‌متر- قطر بولت ۲/۵ سانتی‌متر – فولاد با مدول الاستیک ۲۰۰ گیگاپاسکال

برای داول: قطر سوراخ داول ۶ سانتی‌متر- قطر داول ۵ سانتی‌متر – مدول الاستیک داول ۲/۵ گیگاپاسکال

سگمنت‌ها به‌صورت الاستیک از بتن C30 با مدول الاستیک ۲۶/۱۵ گیگاپاسکال

اندرکنش بین بولت یا داول و بتن اطراف طوری تعیین شد که به محض برخورد باهم ایجاد تنش بین دو سطح نماید.

۷-۳- بارگذاری

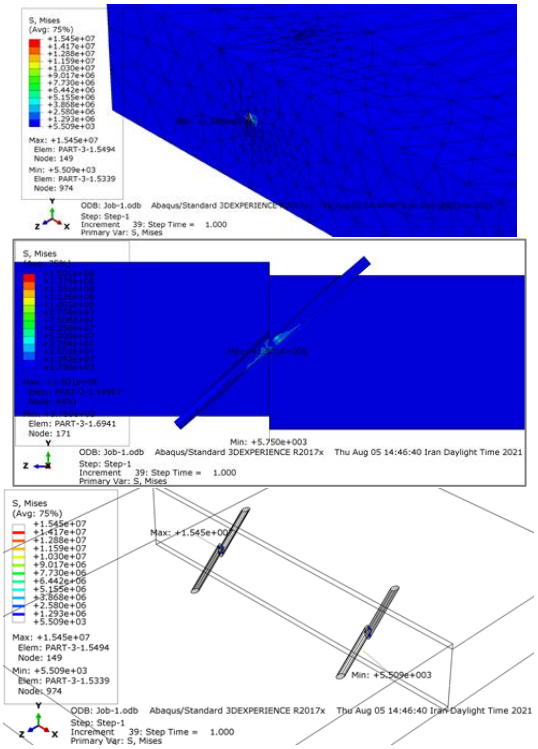
بارگذاری بصورت کنترل تغییرمکان به نحوی اعمال گردید که یک سگمنت نسبت به سگمنت مجاور ۳ سانتی‌متر جابجایی داشته باشد. سایر بارهای وارد بر سگمنت در واقع با این جابجایی معادل سازی شده‌اند. در ادامه نتایج تحلیل اجزای محدود مجموعه دو سگمنت مجاور ارائه گردیده است.

۷-۴- نتایج تحلیل

پس از بارگذاری به شیوه بیان شده در بخش قبل، توزیع تنش در اتصالات بولت و داول بصورت **شکل ۲۶** و **شکل ۲۷**، به‌دست آمد.

براساس مدل‌سازی انجام شده در ABAQUS میزان تنش‌های ایجاد شده در استفاده از بولت‌های فولادی در سگمنت بیشتر از میزان استفاده از داول‌ها در سگمنت بوده که نشان از پایداری و تحکیم در سگمنت در محدوده داول است. به علاوه، میزان تنش‌ها و همچنین دامنه تنش‌ها در استفاده از بولت بیشتر بوده که این امر می‌تواند دلیلی برای بالاتر بودن آمار شکستگی‌ها در اتصالات بولتی که در

بخش‌های گذشته بیان گردید؛ همچنین تقارن تنش‌ها در استفاده از داول‌ها نتایج بهتری نشان می‌دهد.



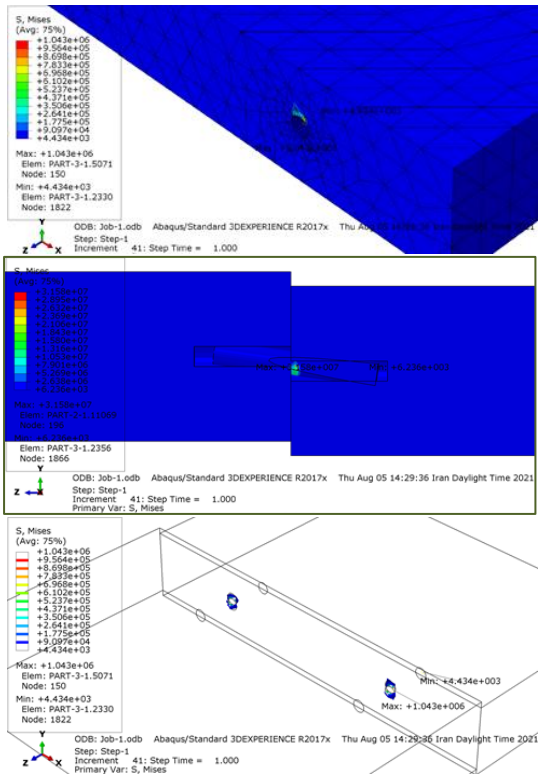
شکل ۲۶-نتایج مدل‌سازی استفاده از بولت در سگمنت

نمودار نیرو در برابر جابجایی نشان داده شده در **شکل ۲۸**، نشان می‌دهد که اتصالات داولی زودتر درگیر شده و شروع به تحمل تنش می‌کنند (داول‌ها اثرات لقی کمتری دارند). در مورد ظرفیت تحمل بار بین دو حالت، تفاوت چندانی وجود ندارد، هرچند اندکی ظرفیت باربری بولت‌ها بیش از داول‌ها است.

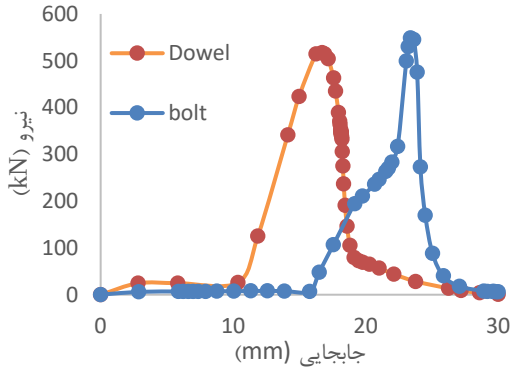
در نهایت با مدل‌سازی صورت گرفته می‌توان نتیجه گرفت، استفاده از داول در سگمنت از منظر پایداری و تمرکز تنش‌ها با توجه به جهت نصب آن مطلوب‌تر است.

۸- نتیجه‌گیری

با بررسی‌های صورت گرفته در هر دو روش اتصال رینگ‌ها مشاهده گردید که استفاده از داول پلاستیکی نسبت به بولت فولادی دارای مزایای زیادی بوده و تغییر قالب‌های تولید سگمنت جهت استفاده از این اتصال هزینه‌های را کاهش داده و کیفیت کار به‌طور چشمگیری افزایش خواهد یافت. با توجه به مطالب اشاره شده در بخش‌های قبلی و همچنین بررسی آماری دقیق در مراحل نصب سگمنت‌های با تیپ‌های مختلف در تونل می‌توان به نتایج زیر اشاره کرد:



شکل ۲۷- نتایج مدل‌سازی استفاده از داول در سگمنت



شکل ۲۸- نمودار نیرو-جابجایی در دو حالت

۱) بولت‌ها نقش سازه‌ای در نگهداری ایفا نمی‌کنند و معمولاً در طراحی‌ها آن را برای بسته نگه‌داشتن گسکت‌های فشرده شده استفاده می‌کنند.

۲) زمان نصب سگمنت‌ها در سیستم اتصال داولی کمتر از بولتی بوده و دلیل آن همراستا بودن سگمنت‌ها در این روش و صرفه‌جویی در زمان صرف شده جهت محکم کردن بولت‌ها است.

۳) پله‌داری و فاصله‌داری در رینگ و نسبت به رینگ قبلی در سگمنت‌های نصب شده تیپ B (داول پلاستیکی) کاهش قابل توجهی نسبت به تیپ A (بولت فولادی) نشان می‌دهد و بیانگر کیفیت مناسب‌تر نصب این سگمنت‌ها در تونل است.

۴) میزان درصد سگمنت‌های دارای شکستگی در سگمنت‌های تیپ B نسبت به A حدود ۲۵ درصد است؛ همچنین درصد شکستگی در سگمنت‌های B و C و K در سگمنت‌های تیپ B به‌طور قابل توجهی نسبت به تیپ A کاهش یافته است.

۵) متوسط سطح شکستگی در سگمنت‌های تیپ B نسبت به A حدود ۵۰ درصد کاهش یافته است. استفاده از داول‌ها جهت نصب رینگ و در یک راستا قرارگرفتن سگمنت‌ها می‌تواند یکی از علل کاهش شکستگی‌ها باشد.

۶) هزینه‌های مرتبط بخصوص در مورد استفاده از ماده ترمیمی در محل شکستگی‌ها بشدت کاهش یافته و زمان نصب رینگ در تونل نیز کاهش چشمگیر نشان داده است. با کاهش شکستگی، هزینه خرید ماده ترمیمی با پایه بتن کاهش نشان داد.

۷) در بررسی مراحل نصب و اتصال سگمنت‌های قالب‌های تبدیل شده یکی از رینگ‌های تیپ A (رینگM4) رفتاری مشابه با رفتار سگمنت‌های تیپ B از خود نشان دادند.

۸) مدل‌سازی اجزای محدود انجام گرفته نشان داد که اتصالات داولی زودتر درگیر شده و شروع به تحمل تنش می کنند (لقی کمتری دارند). در مورد ظرفیت تحمل بار بین دو حالت، تفاوت چندانی وجود ندارد. همچنین میزان تنش‌های ایجاد شده در استفاده از بولت های فولادی در سگمنت بیشتر از میزان استفاده از داول ها بوده که نشان از پایداری و تحکیم در سگمنت در محدوده داول است.

۹- پیشنهادات

در استفاده از سگمنت‌های پیش ساخته در تونل‌های مکانیزه پیشنهاد می‌شود که نوع قالب‌ها از سیستم بولتی به داول تغییر یافته تا کیفیت اجرا و همچنین سرعت اجرای کار افزایش یابد. استفاده از داول نشان داد، در همه موارد کیفیت کار افزایش یافته و هزینه‌های مرتبط نیز کاهش نشان داده است.

۱۰- مراجع

Gruebl, F. (2006). Segmental rings (critical loads and damage prevention). *International Symposium on Underground Excavation and Tunnelling*, Bangkok, Thailand.

Harding, A., Chappell, M., & King, M. (2014). Myth and reality: bolts in modern concrete segmental tunnel linings. *North American tunneling*: 2014 proceedings. (pp. 66-75)

International Tunneling Association. (2000). Guidelines for the design of shield tunnel lining. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 15(3), 303-331.

Johnson, M. (2003). Copenhagen Metro, Segmental Tunnel Lining Durability Strategy and the Supervision thereof. *The World Tunnel Confrence*, Amsterdam, Netherland.

Koyama, Y. (2003). Present status and technology of shield tunneling method in Japan. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 18(2-3), 145-159.

Kramer, G., Gregor, T., Ghazi, M., & Herbert, C. (2003). Segment design for tunnelling productivity. *The Rapid Excavation and Tunneling Conference Proceedings*, San Francisco, California.

Nishikawa, K. (2003). Development of a prestressed and precast concrete segmental lining. *Tunnelling*

and Underground Space Technology, 18(2-3), 243-251.

Sahel Consultant Engineers. (2016). Qualitative report on the installation of new mold segments in mechanized tunnels. Retrieved from Tehran, Iran (in persian)

tuse.shahroodut.ac.ir

Tunneling & Underground Space Engineering

(TUSE)

Volume 9-Issue 4\Winter 2021

نشریه‌ی مهندسی تونل و فضاهای زیرزمینی

The comparison between steel bolts and plastic dowels in axial and radial segments, Case study: The tunnel of "A" Line in the Qom metro

E. Moeini[1]; S. M. Saberizadeh[2]; E. Zamani Beydokhti[3]

1-MSc in Mining Exploitation Engineering; Qazvin International University, emad_moini@yahoo.com

2- MSc in Structural Engineering; Ferdowsi University of Mashhad, saberizade.m@gmail.com

3- Assistant Professor; Faculty of Civil Engineering, Shahrood University of Technology, Zamani.eb@shahroodut.ac.ir

Received: 20 Feb 2021; Accepted: 8 Sep 2021

DOR: 20.1001.1.23223111.1399.9.4.4.3

Keywords

TBM Tunnel
Gap
Misalignment
Steel bolt
Plastic-made dowel
Precast segment

Extended Abstract

Summary

The current study compares the quality and speed of installing the ring segments in TBM tunnels with two different connection types. The TBM tunnel of the “A” line in the Qom metro Project was selected. Two different types of segment rings with bolts and dowels were used with some modifications in casting bodies.

Introduction

Common deficiencies in TBM tunnels are the existence of the gap and uneven surface between two adjacent segments with bolted connections that lead to water penetration to the tunnel and inappropriate lining surfaces. To resolve these deficiencies, one segment casting was modified from bolted form to dowel form, and then, installed on the selected tunnel. Furthermore, finite element analysis was carried out, and two types of connections (bolt and dowel) were numerically compared.

Methodology and Approaches

ABAQUS software was used and elastic displacement-controlled analysis was performed. Observations and statistical assessments on the installed segments in the tunnel lining were carried out in terms of gap size, misalignment measurement and fractured segment count.

Results and Conclusions

Investigations on the installed segments showed a significant decrease in gaps and uneven surfaces as well as the fracture segments. The fractures in segment edges and bodies decreased 75% and 50%, respectively. Moreover, the time of installation of the ring with dowels decreased 11%. It finally showed the higher quality of installation that decreased the penetration, amount of repairing materials, the time of installation, and the cost. Finite element analysis was performed to ensure desirable load carrying capacity and appropriate stress propagation between the devices and concrete segments. The results showed that the dowel connections had better behavior. Finally, the modification of steel bolted connection to plastic dowels is recommended in TBM tunnel projects.