نشریه‌ی مهندسی تونل و فضاهای زیرزمینی
Tunneling & Underground Space Engineering (TUSE)
tuse.shahroodut.ac.ir
دوره‌ی ۳- شماره‌ی ۱/تابستان ۱۳۹۳

ارزیابی کیفیت نصب پوشش بتنی در حفاری مکانیزه مطالعه‌ی موردی: قطعه‌ی دوم تونل انتقال آب کرج-تهران

مجید تاجیک[1*]؛ امید فروغ[2]؛ حمیدرضا توکلی[3]
۱- کارشناس ارشد زمین‌شناسی مهندسی؛ موسسه‌ی مهندسین مشاور ساحل
2- Post Doc fellow; Dept. of Energy and Mineral Eng.; Penn State University
۳- کارشناس ارشد مکانیک سنگ؛ موسسه‌ی مهندسین مشاور ساحل

دریافت دست‌نوشته: ۱۳۹۲/۰۶/۲۳؛ پذیرش مقاله: ۱۳۹۲/۱۲/۲۱

واژگان کلیدی
پوشش تونل
سگمنت
لب‌پریدگی
پله‌شدگی
تونل کرج

چکیده

در تونل‌هایی که با *D.S.TBM* ساخته می‌شوند، حفاری و سگمنت‌گذاری به صورت همزمان انجام می‌شود. از مهم‌ترین فواید این نوع پوشش می‌توان به کنترل کیفیت بتن در کارخانه‌ی تولید سگمنت و نصب سریع و دقیق رینگ توسط *TBM* اشاره نمود؛ اما باید در نظر داشت که خرابی‌های زمان ساخت و همچنین لب‌پریدگی (*Stepping*) و پله‌شدگی (*Spalling*) که از نقایص زمان نصب هستند، سبب کاهش کیفیت نصب پوشش نهایی تونل می‌شود. بررسی علل و شناخت مکانیزم وقوع این نواقص در بالا بردن کیفیت پوشش بتنی پیش‌ساخته‌ی تونل‌ها از اهمیت زیادی برخوردار است. قطعه‌ی دوم تونل انتقال آب کرج-تهران با طول تقریبی ۱۴ کیلومتر با استفاده از *D.S.TBM* احداث و نصب قطعات بتنی پیش‌ساخته (سگمنت) همزمان با حفاری انجام شده است. در این تونل ۱+۵ سگمنت با ابعاد متفاوت و از نوع یونیورسال یک رینگ را تشکیل می‌دهند. در این مقاله نقایص زمان نصب سگمنت با توجه به انحرافات حفاری، نیروی وارده از طرف جک‌ها به سگمنت‌ها و دقت نصب مورد بررسی قرار گرفته است. ارزیابی کیفی میزان پله‌شدگی و لب‌پریدگی سگمنت‌ها در ۱۰۲۴۲ رینگ نشان می‌دهد بیش‌ترین تعداد لب‌پریدگی در سگمنت‌های مجاور کلید و کمترین مقدار آن در سگمنت کلید رخ داده است. همچنین پله‌شدگی در سگمنت‌های مجاور کلید بیشتر از سایر سگمنت‌ها دیده شده است. ارزیابی شرایط سگمنت‌گذاری و میزان انحراف مسیر ماشین حفاری نشان می‌دهد در محدوده‌ی قوس، کیفیت سگمنت‌گذاری به شدت کاهش یافته و تعداد پله‌شدگی و مساحت لب‌پریدگی‌ها افزایش یافته است.

۱- پیشگفتار

امروزه به طور چشمگیری از ماشین‌های حفاری تمام مقطع در حفر تونل‌های بلند استفاده می شود. ایده‌ی ساخت ماشین‌های حفاری تونل به قبل از سال ۱۸۵۰ بر می‌گردد. اولین ماشین حفاری تمام مقطع (*TBM*) که مشخصاتی مانند *TBM*های امروزی داشت توسط چارلز ویلسون (*Charles Wilson*) در سال ۱۸۵۱ ساخته شد **[1]**. جیمز رابینز (*James Rabbins*) در سال ۱۹۵۴ اولین ماشین حفاری تمام مقطع نسل امروزی را ساخت. ماشین‌های اولیه از نوع ماشین‌های حفر تونل باز بودند که با تغییراتی بر روی آن‌ها دستگاه‌های حفاری تمام مقطع از نوع سپردار ساخته شد. اولین ماشین حفاری دو سپره در سال ۱۹۷۲ به کار گرفته شد. ایده‌ی این ماشین توسط شرکت *Seli* ایتالیا مطرح و با همکاری شرکت رابینز ساخته شد. امروزه به طور

* تهران؛ بزرگراه رسالت؛ خیابان شهید اردکانی؛ بن‌بست مهابادی‌پور؛ پلاک ۷۸؛ موسسه‌ی مهندسین مشاور ساحل؛ بخش پروژه‌های زیرزمینی؛ کدپستی: ۱۵۹۵۹۵۴۶۱۱؛ صندوق پستی: ۳۴۶۵-۱۶۷۶۵؛ شماره‌ی تلفن: ۰۲۱-۲۳۰۱۵۵۰۱؛ رایانامه: tajikm1@gmail.com

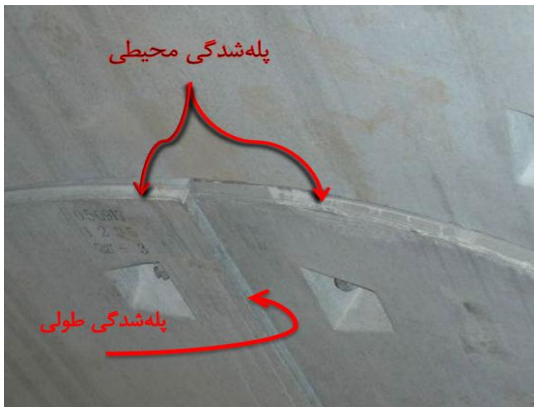
گسترده، انواع ماشین‌های حفاری تمام مقطع با توجه به شرایط زمین‌شناسی و نیازهای پروژه برای حفاری تونل‌ها در سنگ سخت و خاک مورد استفاده قرار می‌گیرند **[2]**.

ماشین حفاری از نوع سپردار، سیستم نگهداری دائم تونل را نیز نصب می‌کند. این سیستم‌های نگهداری متشکل از تعدادی قطعات بتنی پیش‌ساخته (*Precast Concrete Segments*) هستند و توسط یکسری قالب‌های خاص تولید می‌شوند. اولین پوشش قطعه‌ای در سال ۱۸۶۰ میلادی به کار گرفته شد. این پوشش، شامل تعدادی قطعات چدنی قالب‌ریزی شده بود که در یک تونل بزرگراه در لندن استفاده شد **[3]**. استفاده از اولین پوشش قطعه‌ای بتنی به سال ۱۹۰۳ میلادی باز می‌گردد. این پوشش در گلاسکو (*Glasgow*) اسکاتلند توسط یک پیمانکار انگلیسی ساخته شد. در آن زمان انگیزه‌ی اصلی در گسترش پوشش‌های بتنی پیش‌ساخته، کمبود مواد خام تولید چدن پیش از جنگ جهانی دوم بود. اکنون ثابت شده است که پوشش‌های متشکل از قطعات بتنی پیش‌ساخته از نقطه‌نظر فنی و اقتصادی بسیار مناسب و جانشین خوبی برای پوشش‌های چدنی هستند. البته پوشش‌های چدنی هنوز هم در تونل‌های زیر سطح آب، استفاده می‌شوند [۴].

از مهم‌ترین فواید پوشش‌های متشکل از قطعات بتنی پیش‌ساخته، سهولت و تداوم کنترل کیفیت بتن در کارخانه تولید سگمنت، نصب سریع و دقیق رینگ توسط *TBM*، امکان تزریق دوغاب بلافاصله پس از نصب رینگ برای تثبیت پوشش نهایی و اعمال فشارهای ناشی از همگرایی تونل پس از تثبیت رینگ است. علاوه بر آن هزینه‌های پروژه در پوشش‌های سگمنتی تک‌لایه با ضخامت کم به مقدار قابل توجهی کاهش می‌یابد. استفاده از این نوع پوشش، معایبی نیز به همراه دارد که در این تحقیق به بررسی دو نقیصه‌ی پله‌شدگی و لب‌پریدگی در زمان نصب پرداخته می‌شود.

ایجاد پله در بین سگمنت‌ها، امری معمول درچیدمان رینگ بتنی است ولی مقدار مجاز پله‌شدگی در هر پروژه وابسته به اهداف پروژه، قطر تونل، خصوصیات *TBM* (ابعاد شیلد پشتی)، نوع و ابعاد سگمنت، روش اتصال سگمنت‌ها، شرایط آب‌بندی (بکارگیری گسکت) و روش اجرای تزریق دوغاب است **[5]**. پله‌شدگی نسبت به رینگ قبل در نتیجه‌ی عدم قرارگیری مناسب سگمنت‌ها در امتداد درزهای محیطی (*Circumferential Joint*) است؛ در حالی‌که پله‌شدگی در رینگ در امتداد درزهای طولی (*Longitudinaljoint*) رخ می‌دهد. بنابراین پله‌شدگی‌ها به دو گروه پله‌شدگی محیطی و طولی طبقه‌بندی می‌شود.

لب‌پریدگی نوعی شکستگی سگمنت است که در گوشه‌های سگمنت و تحت تاثیر بارهای موقت در زمان رینگ‌گذاری ایجاد می‌شود. توزیع خارج از مرکز نیروی جک‌های جلو برنده بر رینگ سگمنتی یکی از عوامل لب‌پریدگی است. این عامل در زمین‌های نرم و ناهمگن می‌تواند منجر به افزایش آرماتوربندی یا تغییر ابعاد سگمنت در طراحی پوشش تونل شود. علاوه بر آن شکستگی سگمنت دوام پوشش بتنی تونل را کاهش می‌دهد **[5]**. همچنین نشت آب به تونل تحت تاثیر پله‌شدگی و لب‌پریدگی افزایش می‌یابد. در **شکل ۱** نمونه‌ای از نواقص رخ داده در تونل انتقال آب کرج-تهران نشان داده شده است.



شکل ۱- پله‌شدگی و لب‌پریدگی در سگمنت‌های نصب شده در تونل

برای بررسی علل و اثرات نواقص مربوط به مرحله‌ی نصب سگمنت‌ها، تونل انتقال آب کرج مورد مطالعه قرار گرفته است، به طوری‌که پس از نصب و تکمیل هر رینگ و خروج آن از سپر انتهایی (*Tail Shield*)، وضعیت نواقص هر سگمنت با اطمینان از سلامت ظاهری آن در زمان بارگیری و انتقال به داخل تونل مورد بررسی قرار گرفته و ثبت شده است. سپس نواقصی از قبیل لب‌پریدگی و پله‌شدگی با توجه به شرایط رینگ‌گذاری و میزان انحرافات *TBM* به تفکیک هر سگمنت برای تعیین راهکارهایی برای کاهش پله‌شدگی و همچنین کاهش هزینه‌های تعمیرات ناشی از لب‌پریدگی سگمنت‌ها، مقایسه و ارزیابی شده است.

۲- نواقص پوشش سگمنتی

در حفاری مکانیزه، پوشش تونل باید توانایی تحمل بارهای وارده بر آن را داشته باشد. هرگونه افزایش تنش در جسم که فراتر از مقاومت آن باشد منجر به شکستگی می‌شود. در مورد سگمنت نیز افزایش بارهای وارده و ضربات ناگهانی می‌تواند سبب تمرکز تنش شده و صدماتی از قبیل ترک‌خوردگی، لب‌پریدگی و شکستگی را بوجود آورد. در موارد خاص، علاوه بر بارهای اعمال شده، پوشش بتنی باید در مقابل عواملی از قبیل واکنش شیمیایی آب‌های زیرزمینی و فاضلاب‌ها، یخزدگی‌های مکرر، بار ترافیک و آتش‌سوزی نیز مقاوم باشد که بررسی این عوامل در مرحله‌ی طراحی ضرورت دارد **[6]**.

انجمن مهندسین عمران ژاپن (*JSCE*)، بارهای وارد بر سگمنت را به سه گروه اصلی بارهای اولیه، ثانویه و ویژه تقسیم می‌کند. بارهای ثانویه شامل بارهای وارد شده در حین و پس از ساخت تونل است. مطابق این طبقه‌بندی عواملی که در محدوده‌ی زمانی نصب سگمنت تا تکمیل رینگ می‌تواند صدماتی را به آن وارد کند، در **جدول ۱** آورده شده است. بارهای حین ساخت وابسته به نوع پروژه، موقعیت و شرایط ساخت تونل است. این بارها به دو مرحله‌ی طراحی و ساخت طبقه‌بندی می‌شوند. در این طبقه‌بندی شرایط زمین‌شناسی، مشخصات تونل، ماشین حفاری و سگمنت از پارامترهای طراحی هستند. از بارهای مرحله‌ی ساخت می‌توان به بارهای ناشی از جک‌های تراست، فشار تزریق پرکننده، عملکرد ارکتور و مهارت اپراتور اشاره نمود **[7]**.

جدول ۱- طبقه‌بندی برخی از پارامترهای حین ساخت موثر در ایجاد نواقص سگمنت [7]

مرحله	گروه	علت
طراحی	شرایط زمین	زمین سخت زمین نرم فشار هیدرولیکی زیاد
	مسیر تونل	قوس با شعاع کم تغییر شیب ناگهانی
	TBM	مقدار فضای باز در شیلد مکانیسم غیر مفصلی
	سگمنت	شکل سگمنت تعداد سگمنت در رینگ مشخصات درزه‌های بین سگمنت مشخصات نوار آب‌بند
ساخت	جک‌های جلو برنده	افزایش فشار محوری جک‌ها توزیع متفاوت فشار اعمال شده تمایل صفحات بارگذاری در تماس با سگمنت فشار نامتقارن جک‌های تراست بر روی رینگ
	شیلد دنباله	تماس سگمنت و شیلد
	سگمنت گذاری	پله‌شدگی بازشدگی مهارت در نصب سگمنت
	سایر	فشار نامتقارن روغن فشار غیر یکنواخت تزریق دوغاب نیروی اضافی در بستن بولت‌ها تزریق پرکننده‌ی ناقص

علاوه بر طبقه‌بندی *JSCE*، برخی از محققین نشان داده‌اند مقدار رواداری در ابعاد سگمنت‌های تولید شده، نصب نامناسب رینگ، فشار تزریق غیر یکنواخت، انحراف ماشین حفاری و نوع و تعداد سگمنت در رینگ می‌توانند در تغییر شکل و پله‌شدگی رینگ موثر باشند **[8]**.

انحراف از مسیر حفاری به خصوصیات هندسی تونل (ابعاد، شیب، قوس و ...)، وضعیت زمین‌شناسی، شرایط حفاری و مهارت اپراتور حفار وابسته است. در حالی‌که رفتار رینگ سگمنتی تحت بارهای اعمال شده به تعداد قطعات

سگمنتی در هر رینگ، نیروی اعمال شده بر هر سگمنت، پروفیل درزه‌ها، انتظار چرخش درزه‌ها تحت بارگذاری، کیفیت هندسی نصب رینگ و اندرکنش بین رینگ‌های متوالی مربوط می شود **[9]**.

نیروهای موثر بر رینگ سگمنتی در دو گروه نیروهای عمودی (*Normal Force*) و مورب (*Transverse Force*) تقسیم‌بندی می‌شوند. نیروهای عمودی ناشی از فشار جک‌های تراست یا فشار آب در اطراف سگمنت است در حالی‌که نیروهای مورب در نتیجه‌ی استقرار نامناسب صفحات بارگذاری و پله‌شدگی رینگ‌ها بوجود می‌آید. بدیهی است پله‌شدگی سگمنت می‌تواند مقدار نیروهای مورب در حاشیه‌ی سگمنت را افزایش داده و منجر به لب‌پریدگی شود **[6]**.

۳- معرفی پروژه‌ی مورد مطالعه

قطعه‌ی دوم تونل انتقال آب از سد امیرکبیر به تصفیه‌خانه‌ی شماره‌ی ۶ تهران با طول حدود ۱۴ کیلومتر بخش دیگری از پروژه‌ی آبرسانی به غرب تهران است (قطعه‌ی *K''-BR*). حفاری مکانیزه این تونل از حوالی روستای کندر (*K''*) با طول ۱۳۴۷۰٫۸ متر و شیب طولی ۰٫۰۰۱۳۷ با استفاده از *D.S.TBM* با قطر ۴٫۶۶۵ متر تا پایین دست سد تنظیمی کرج (*BR*) اجرا شده است. مشخصات *TBM* مورد استفاده در این پروژه در **جدول ۲** آورده شده است **[2]**. در **شکل ۲** نیز *TBM* مورد نظر در پرتال ورودی نشان داده شده است.

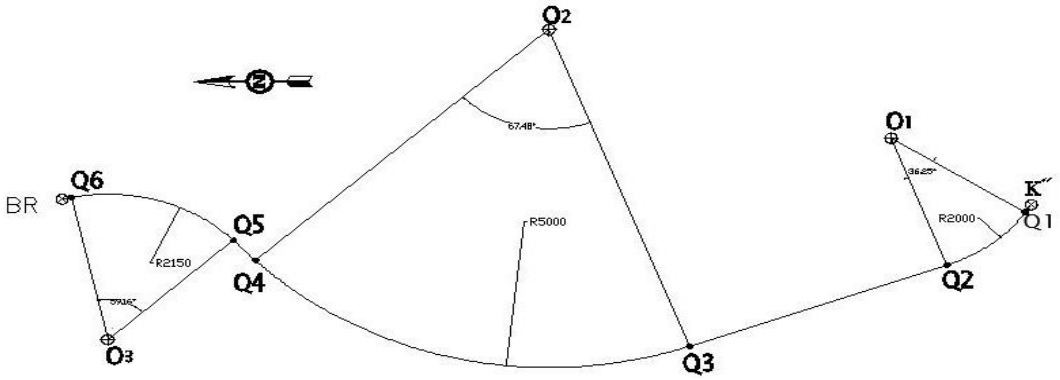
حدود ۱۳۳ متر ابتدایی این تونل با قطر بیش‌تر و با استفاده از حفاری و آتشباری احداث و از این فضا برای لجستیک تونل استفاده شده است **[2]**. مسیر تونل شامل ۳ قوس با شعاع ۲۰۰۰، ۵۰۰۰ و ۲۱۵۰ متر است. مشخصات هندسی و موقعیت آن‌ها در **شکل ۳** و **جدول ۳** آورده شده است [۱۰].

جدول ۲- مشخصات ماشین حفاری تونل انتقال آب کرج-تهران [2]

پارامتر	مقدار
قطر ماشین *(m)*	۴٫۶۶
قطر دیسک کاتر *(mm)*	۴۳۲
فاصله‌داری دیسک کاترها *(mm)*	۷۰
تعداد دیسک کاتر	۳۱
توان کاترهد *(KW)*	۱۲۵۰
سرعت کاترهد *(RPM)*	۱۱
گشتاور کاترهد *(KN-m)*	۲۵۰۰
حداکثر فشار پشت کاترهد *(KN)*	۱۷۰۰۰

قطعات بتنی بر اساس سطح خارجی به دو گروه قطعات توپر و قطعات حفره‌دار طبقه‌بندی می‌شوند. همچنین بر اساس شکل هندسی، سگمنت‌هایی با اشکال مستطیل، متوازی‌الاضلاع، ذوزنقه و شش‌وجهی رایج هستند. هر رینگ سگمنت قسمتی از پوشش استوانه‌ای شکل تونل است که سطوح آن می‌توانند به صورت موازی یا غیرموازی باشند. بر این اساس، طراحی هندسی سگمنت‌ها را می‌توان به دو گروه رینگ با سطوح موازی (مستقیم) و رینگ با سطوح غیر موازی طبقه‌بندی نمود که نوع دوم شامل رینگ یک طرف مخروطی (*Left or Right Tapered Ring*) و رینگ دو طرف مخروطی (*Universal Tapered Ring*) است **[11]**.

شکل ۲- ماشین حفاری در تونل انتقال آب کرج-تهران و مقطع نهایی تونل



شکل ۳- نمای شماتیکی قوس‌ها در مسیر تونل [۱۰]

جدول ۳- مشخصات هندسی قوس‌ها در مسیر تونل [۱۰]

نام قوس	متراژ شروع	متراژ پایان	طول (متر)	شعاع (متر)	زاویه (درجه)
قوس ۱	۱۳۴ *(Q1)*	۱۳۹۹ *(Q2)*	۱۲۶۵	۲۰۰۰	۳۵٫۶۶
قوس ۲	۴۸۳۱ *(Q3)*	۱۰۷۲۰ *(Q4)*	۵۸۸۹	۵۰۰۰	۶۷٫۴۸
قوس ۳	۱۱۱۲۱ *(Q5)*	۱۳۳۴۰ *(Q6)*	۲۲۱۹	۲۱۵۰	۵۹٫۱۶

تفاوت عمده‌ی بین دو نوع رینگ ذکر شده، کاربری آن‌ها در داخل تونل است. رینگ‌های با سطوح موازی تنها در قسمت‌های مستقیم و بدون قوس تونل قابل استفاده هستند؛ در حالی‌که با استفاده از رینگ‌های با سطوح غیر موازی می‌توان مسیرهای منحنی با قوس‌های افقی و قائم را نیز ایجاد نمود. رینگ‌های یونیورسال به دلیل نیاز به قالب‌های کمتر، کارخانه‌ی تولید کوچک‌تر و کمتر بودن تنوع قفسه‌ی آرماتوری هزینه‌ی کمتری نسبت به رینگ‌های یک طرف مخروطی دارند **[11]**.

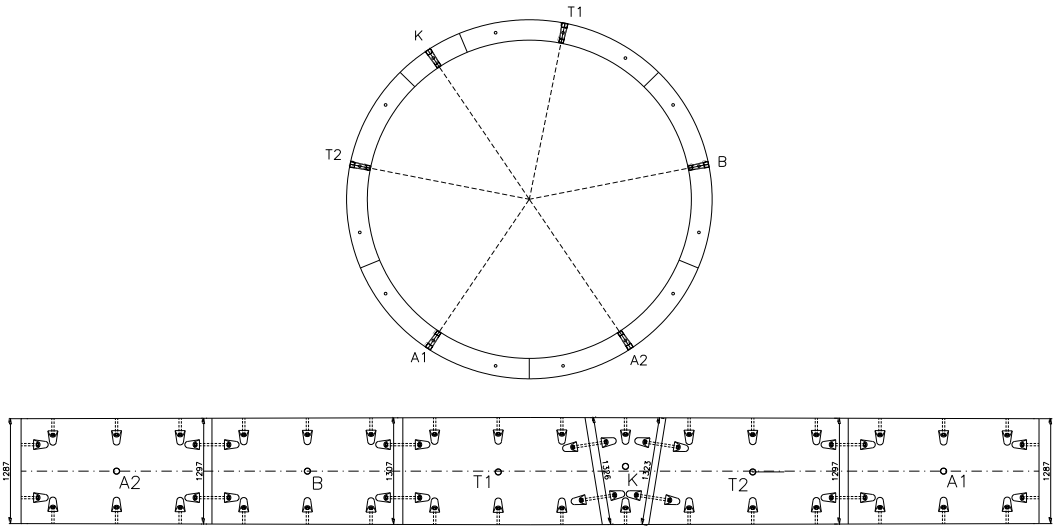
در سگمنت‌های یونیورسال درزه‌های طولی رینگ‌های مجاور به صورت متناوب قرار می‌گیرند تا قطعات پوشش در طول تونل حالت شطرنجی پیدا کند. این آرایش علاوه بر افزایش پایداری قطعات، مشکلات ناشی از مسایل آب‌بندی را نیز کاهش می‌دهد **[12]**.

در این تحقیق، پوشش نهایی تونل با نصب ۱+۵ قطعه بتنی پیش‌ساخته از نوع یونیورسال با ضخامت ۲۵ سانتی‌متر و ابعاد متغیر تکمیل می‌شود. اگر چه در تونل‌های مکانیزه، تعداد و آرایش سگمنت‌ها متفاوت است ولی معمولاً نحوه‌ی چیدمان در تمام آن‌ها یکسان است و نصب سگمنت کلید در آخرین مرحله صورت می‌گیرد. در این پروژه نحوه‌ی چیدمان سگمنت‌ها ساعت‌گرد است؛ بنابراین نصب رینگ با قطعه‌ی *T2* شروع و با نصب سگمنت *K* پایان می‌پذیرد. در **شکل ۴** ابعاد و نحوه‌ی چیدمان یک رینگ سگمنتی نشان داده شده است.

برای اتصال سگمنت‌های یک رینگ و همچنین اتصال یک رینگ به رینگ قبلی از ۲۸ پیچ خمیده (*Curve Bolt*) استفاده می‌شود. فضای خالی پشت پوشش بتنی حدود ۱۳ سانتی‌متر است که به دلیل محدودیت‌های شیلد و روش سگمنت‌گذاری اپراتورها، معمولاً در کف تونل فاصله‌ی کمتری وجود دارد.

۴- تحلیل آماری نواقص

در طبقه‌بندی *JSCE* عوامل موثر بر پله‌شدگی و لب‌پریدگی بیانگر شرایط کلی حفاری‌های مکانیزه تونل است. با توجه به این‌که در تونل مورد مطالعه خصوصیات *TBM*، نوع سگمنت و شرایط نصب آن برای تمامی مسیر یکسان است، پس تاثیر بسیاری از پارامترهای حین ساخت بر پله‌شدگی و لب‌پریدگی یکسان خواهد بود. در چنین شرایطی می‌توان با صرف نظر از پارامترهای یکسان، مهم‌ترین پارامترهای موثر در ایجاد نواقص را مطابق با **جدول ۴** تقسیم‌بندی نمود.



شکل ۴- ابعاد و آرایش قرارگیری سگمنت‌ها در تونل [۱۳]

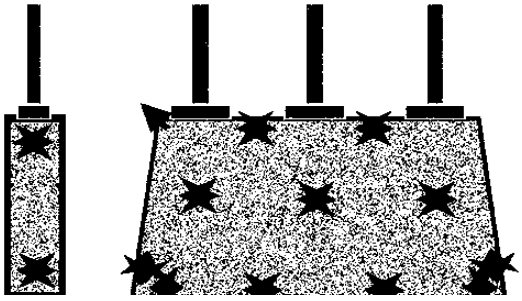
جدول ۴- دلایل ایجاد نواقص سگمنت‌گذاری در تونل انتقال آب کرج-تهران در مرحله‌ی ساخت

گروه	علت
جک‌های جلو برنده	افزایش فشار محوری جک‌ها توزیع متفاوت فشار اعمال شده تمایل صفحات بارگذاری در تماس با سگمنت
خطای تعیین مسیر	مسیر مستقیم/قوس‌دار مقدار فضای باز در شیلد تماس سگمنت و شیلد
سگمنت‌گذاری	مهارت در نصب سگمنت

با توجه به **جدول ۴**، عوامل موثر بر پله‌شدگی و لب‌پریدگی سگمنت در حین ساخت رینگ به شرح زیر است:

- در زمان پیشروی یا جابجایی ماشین، جانمایی نامناسب صفحات بارگذاری جک‌های جلو برنده می‌تواند منجر به لب‌پریدگی سگمنت‌ها شود.
- انحراف رینگ و اعمال فشار مضاعف بر رینگ‌ها برای قرارگیری آن‌ها به صورت هم‌مرکز با خط پروژه می‌تواند منجر به تغییر شکل رینگ و شکستگی سگمنت شود.
- تغییر شکل رینگ بعد از عبور از محدوده‌ی شیلد به علت حرکت جانبی رینگ‌ها در قوس تونل و بارگذاری بر روی رینگ‌ها که منجر به پله‌شدگی و شکستگی در رینگ می‌شود.
- مشکلات راهبری و انحراف *TBM* در حین عملیات حفاری سبب انحراف رینگ از مرکز و پله‌شدگی در سگمنت‌ها می‌شود.
- خطای اپراتور ارکتور در حین نصب سگمنت‌های رینگ موجب دشواری در نصب سگمنت کلید و افزایش پله‌شدگی در رینگ شده و اعمال ضربه ممکن است منجر به تشکیل ترک و لب‌پریدگی شود.

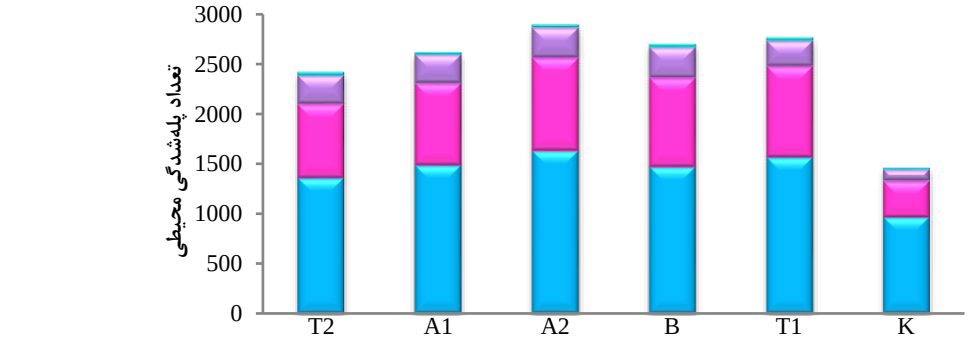
در این پروژه مشاهدات حین نصب رینگ نشان می‌دهد نیروی عمودی جک‌های جلو برنده عامل اصلی لب‌پریدگی است و سایر عوامل بر روی شدت و نحوه‌ی توزیع فشار جک‌های جلو برنده تاثیر می‌گذارند. در **شکل ۵** نیروی وارد بر سگمنت‌ها توسط جک‌های جلو برنده و محل‌هایی که ممکن است دچار آسیب شوند، نشان داده شده است.



شکل ۵- تاثیر فشار جک‌های جلو برنده بر لب‌پریدگی سگمنت‌ها [14]

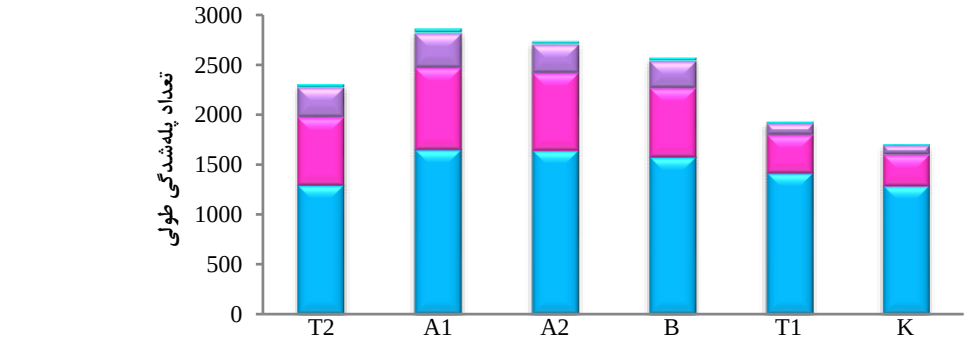
آمار به دست آمده از کیفیت ظاهری ۱۰۲۴۲ رینگ (۶۱۴۵۲ سگمنت) نصب شده نشان می‌دهد بیش‌ترین پله‌شدگی محیطی در سگمنت *A2* و کمترین مقدار در سگمنت *K* وجود دارد. همچنین تشکیل پله‌های کوچک به مراتب بیش‌تر از پله‌های بزرگ (بیش از ۲۵ میلی‌متر) رخ می‌دهد (**شکل ۶**).

بیش‌ترین پله‌شدگی طولی در سگمنت *A1* و کمترین تعداد پله‌شدگی طولی در سگمنت *K* ثبت شده است. در این شرایط نیز درصد بالایی از پله‌شدگی‌ها مربوط به پله‌شدگی کمتر از ۱۰ میلی‌متر است. **شکل ۷** نشان می‌دهد تعداد پله‌شدگی طولی با ترتیب چیدمان سگمنت‌ها کاهش می‌یابد. تجربیات سگمنت‌گذاری در این پروژه نشان می‌دهد قرارگیری مناسب اولین سگمنت (*T2*) در هر رینگ تاثیر به سزایی در کاهش پله‌شدگی طولی سایر سگمنت‌ها دارد. به عبارت دیگر انحراف رینگ نصب شده، کمبود فضای کافی در شیلد پشتی و عدم دقت در نصب سگمنت *T2* منجر به پله‌شدگی در سگمنت مجاور (*A1*) می‌شود. در چنین شرایطی اپراتور در حین تکمیل رینگ سعی می‌کند تعداد پله‌شدگی‌های طولی در رینگ را کاهش دهد و از ایجاد پله در سگمنت‌های بعدی جلوگیری نماید.



	T2	A1	A2	B	T1	K
پله‌شدگی بیش از ۲۵ میلی‌متر	35	23	32	33	34	19
پله‌شدگی از ۱۶ تا ۲۵ میلی‌متر	287	289	303	307	258	113
پله‌شدگی از ۱۱ تا ۱۵ میلی‌متر	740	821	929	891	910	369
پله‌شدگی از ۶/۵ تا ۱۰ میلی‌متر	1357	1483	1628	1467	1562	966

شکل ۶- وضعیت پله‌شدگی محیطی در ۱۰۲۴۲ رینگ (۶۱۴۵۲ سگمنت)

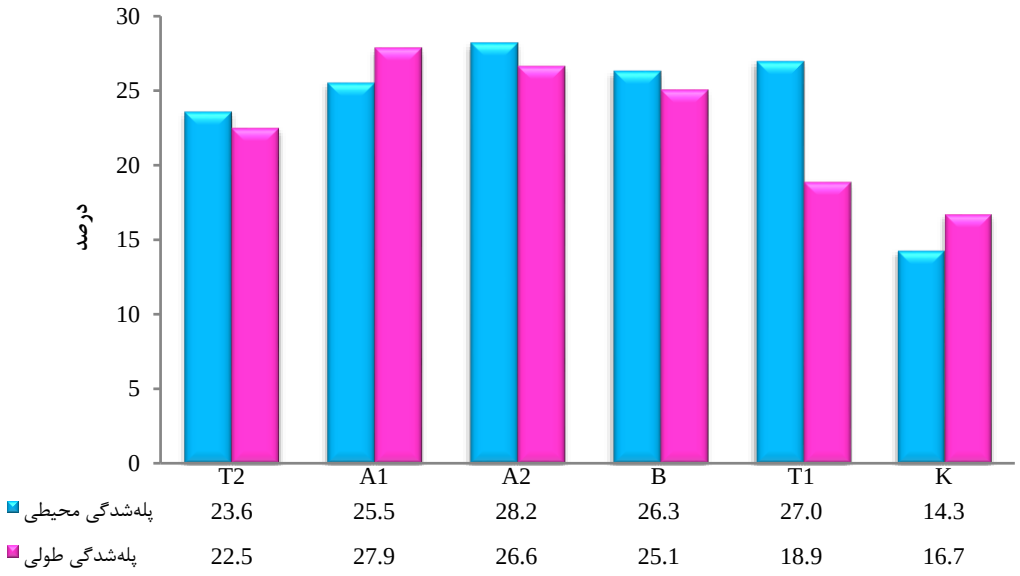


	T2	A1	A2	B	T1	K
پله‌شدگی بیش از ۲۵ میلی‌متر	29	41	26	29	21	14
پله‌شدگی از ۱۶ تا ۲۵ میلی‌متر	300	346	287	272	113	93
پله‌شدگی از ۱۱ تا ۱۵ میلی‌متر	682	822	777	694	387	318
پله‌شدگی از ۶/۵ تا ۱۰ میلی‌متر	1293	1646	1639	1572	1414	1287

شکل ۷- وضعیت پله‌شدگی طولی در رینگ‌های نصب شده (۶۱۴۵۲ سگمنت)

در **شکل ۸**، وضعیت پله‌شدگی به تفکیک هر سگمنت نشان داده شده است. نگاهی اجمالی به این شکل نشانگر کاهش چشمگیر پله‌شدگی در سگمنت کلید است. سگمنت کلید آخرین قطعه‌ی تشکیل‌دهنده‌ی یک رینگ است. پس به دلیل وجود تکیه‌گاه و وجود فشار از طرفین امکان جابجایی و تشکیل پله بعد از خروج از شیلد در آن کمتر است.

در **شکل ۸**، درصد پله‌شدگی محیطی در اکثر سگمنت‌ها بیش‌تر از پله‌شدگی طولی است؛ زیرا صرف نظر از مهارت اپراتور سگمنت‌گذاری، طول درزه عامل مهمی در تعداد پله‌شدگی است. طول بیشتر درزه‌های محیطی نسبت به درزه‌های طولی احتمال تشکیل پله‌های محیطی را افزایش می‌دهد. به عبارتی انطباق سگمنت‌ها بر روی درزه‌های محیطی دشوارتر است. در مورد سگمنت K به دلیل شکل گوه‌ای و عرض کوچک‌تر نسبت به سایر سگمنت‌ها، درزه‌ی محیطی کوچک‌تر از درزه‌ی طولی است؛ بنابراین تعداد پله‌شدگی طولی بیش‌تر از پله‌شدگی محیطی شده است.



شکل ۸- مقایسه‌ی درصد پله‌شدگی طولی و محیطی در رینگ

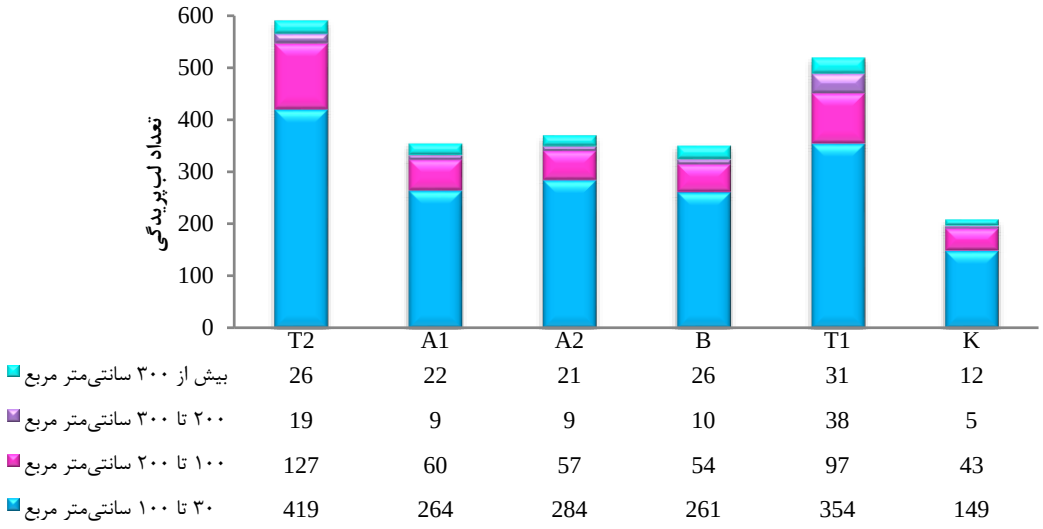
یکی از عملکردهای مهم پوشش تونل در حفاری مکانیزه، تحمل اثرات بار پخش شده بر روی سگمنت از طریق کفشک‌های فشاردهنده‌ی جک‌های تراست است که برای جلو راندن سپر ماشین به پوشش وارد می‌شود. اگر چه بار وارده از طرف جک موقتی است؛ ولی مهم‌ترین و تاثیرگذارترین بار در حین حفاری است. در زمان جابجایی سیستم پشتیبان یا حفاری با کمک جک‌های جلوبرنده، عدم تقارن در بارگذاری یا قرارگیری کفشک‌های فشاردهنده در موقعیت نامناسب (معمولاً مرز بین دو سگمنت به دلیل تمرکز تنش بر گوشه‌های سگمنت) لب‌پریدگی رخ می دهد. آمار سطح لب‌پریدگی در سگمنت‌های نصب شده نشان می‌دهد اکثر لب‌پریدگی‌ها مساحتی کمتر از ۱۰۰ سانتی‌متر مربع دارند. علاوه بر آن سگمنت‌های $T1$ و $T2$ بیش‌ترین تعداد لب‌پریدگی و سگمنت کلید کمترین تعداد را نشان می‌دهد (**شکل ۹**).

مشاهدات حین نصب رینگ نشان می‌دهد که اکثر لب‌پریدگی‌ها در زمان نصب سگمنت کلید رخ می‌دهد؛ زیرا در زمان تکمیل رینگ، درزه‌ی محیطی حدود ۳۰-۲۰ میلی‌متر کوچک‌تر می‌شود. در این شرایط فضای کافی جهت نصب سگمنت کلید وجود ندارد، پس اپراتور با کمک جک‌های جلو برنده سعی می‌کند که سگمنت کلید را در موقعیت مناسب قرار دهد **[15]**. به دلیل این‌که در گوشه‌های سگمنت بتن غیر مسلح است، همچنین احتمال تماس گوشه‌های سگمنت کلید در مجاورت درزه‌های محیطی

بیش‌تر است، پس فشار اعمال شده توسط جک‌های تراست منجر به لب‌پریدگی سگمنت‌های مجاور (*T1* و *T2*) می‌شود.

کاهش تعداد لب‌پریدگی در سگمنت کلید مربوط به صفحات بارگذاری جک‌های جلو برنده و نحوه‌ی تماس و زاویه‌ی آن‌ها با سگمنت است. در زمان پیشروی *TBM*، انحراف محور جک‌های جلو برنده منجر به فشار اضافی روی سگمنت می‌شود؛ در چنین شرایطی اگر صفحات بارگذاری با گوشه‌ی سگمنت در تماس باشند تمرکز تنش بیش‌تری ایجاد شده و احتمال لب‌پریدگی افزایش می‌یابد **[16]**.

ماشین حفاری مورد استفاده در این پروژه دارای ۱۶ جک جلو برنده است که به دلیل کوچک‌تر بودن سگمنت *K* همواره یک صفحه‌ی بارگذاری در مجاورت آن قرار می‌گیرد. علاوه بر این‌که بار وارده بر سگمنت کلید کمتر از سگمنت‌های دیگر است، ولی به دلیل انتقال نیرو توسط یک صفحه‌ی بارگذاری احتمال بارگذاری نامتقارن و ایجاد نیروهای مورب کمتر است. بنابراین امکان لب‌پریدگی در سگمنت *K* کمتر از سایر سگمنت‌ها است. این موضوع در **شکل ۹** برای سگمنت *K* مشهود است.



	T2	A1	A2	B	T1	K
بیش از ۳۰۰ سانتی‌متر مربع	26	22	21	26	31	12
۲۰۰ تا ۳۰۰ سانتی‌متر مربع	19	9	9	10	38	5
۱۰۰ تا ۲۰۰ سانتی‌متر مربع	127	60	57	54	97	43
۳۰ تا ۱۰۰ سانتی‌متر مربع	419	264	284	261	354	149

شکل ۹- وضعیت لب‌پریدگی در سگمنت‌ها

۴-۱- رابطه‌ی پله‌شدگی و لب‌پریدگی

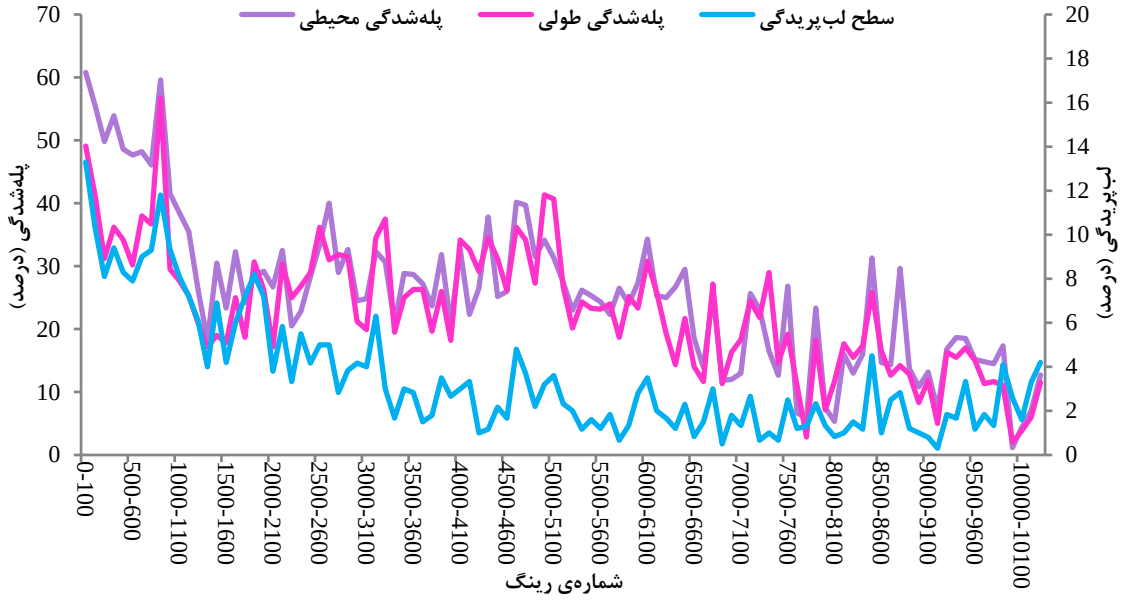
برای مقایسه‌ی روند پله‌شدگی و لب‌پریدگی سگمنت‌ها در طول مسیر تونل، برای هر ۱۰۰ رینگ نمودار جداگانه‌ای ترسیم شده است. سپس متوسط داده‌ها در هر بازه‌ی ۱۰۰ رینگی به عنوان یک نقطه در **شکل ۱۰** نشان داده شده است. همانطور که انتظار می‌رود رابطه‌ی مناسبی بین پله‌شدگی طولی و محیطی و لب‌پریدگی وجود دارد. نحوه‌ی چیدمان سگمنت‌ها در کنار هم تشکیل یک رینگ را می‌دهد؛ بنابراین اگر در یک رینگ پله‌شدگی طولی رخ دهد، شکل رینگ از حالت دایره خارج شده و اثر آن در پله‌شدگی محیطی نمایان می‌شود. در هر صورت تغییر شکل رینگ و پله‌شدگی در سگمنت‌ها منجر به افزایش نیروهای برشی شده و تحت فشار عمودی جک‌های جلو برنده، احتمال لب‌پریدگی افزایش می‌یابد.

رفع این نقیصه در سگمنت‌های یونیورسال به دلیل شکل گوه‌ای سگمنت کلید، وجود *Taper* در سگمنت‌ها و تغییر موقعیت نصب آن‌ها در هر رینگ بسیار مشکل است. حتی وقتی که نهایت دقت در نصب رینگ صورت می‌گیرد جابجایی در سگمنت‌ها و ایجاد پله بین ۵-۸ میلی‌متر غیر قابل اجتناب است **[15]**.

۴-۲- تاثیر انحراف مسیر حفاری در نواقص سگمنت‌گذاری

یکی از روش‌های مسیریابی و پردازش داده‌های نقشه‌برداری در حفاری مکانیزه با نصب سگمنت، استفاده از روش *SLS-T* است. با تکیه بر این سیستم راهبری، تمامی اطلاعات مربوط به موقعیت ماشین حفاری از قبیل مختصات حفاری، انحراف

از مرکز شیلد، انحراف به طرفین و موقعیت نصب سگمنت‌ها به تفکیک هر رینگ ذخیره می‌شود. با در اختیار داشتن اطلاعات مسیر می‌توان تاثیر قوس‌های تونل و انحراف مسیر حفاری بر نواقص نصب سگمنت را بررسی نمود **[17]**.



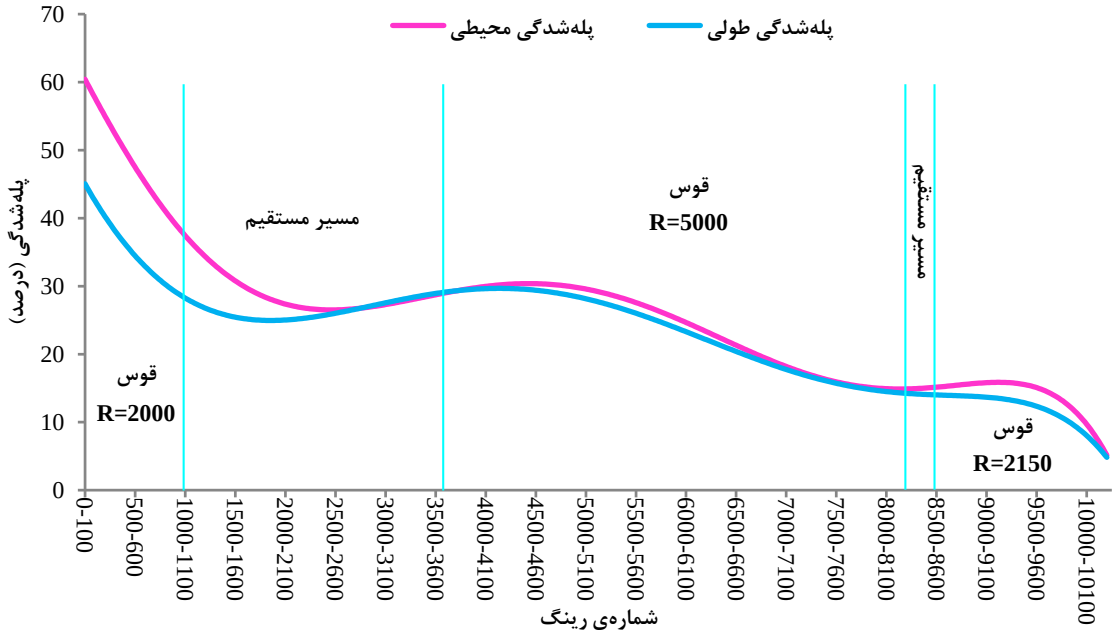
شکل ۱۰- رابطه‌ی افزایش کیفیت نصب سگمنت و وابستگی نواقص در رینگ‌های نصب شده

اگر *TBM* از مسیر حفاری منحرف شود در این صورت تاثیر آن بر انحراف رینگ از مرکز نمایان می‌شود. در قوس‌های تند (شعاع کمتر از ۵۰۰ متر) انحراف رینگ در امتداد درزهای محیطی رخ می‌دهد؛ با این توضیح که توزیع فشار جک‌ها در مسیرهای قوس‌دار یکنواختی کمتری داشته و جک‌های جلو برنده در حین انحراف از مرکز مقداری نیروهای مورب به صفحات بارگذاری منتقل می‌کنند **[18]**. نیروهای مورب آخرین رینگ نصب شده را به بیرون قوس هدایت کرده تا این‌که بولت‌های نگهدارنده‌ی رینگ در امتداد درزهای محیطی وارد عمل شده و انحراف را متوقف کنند **[15]**. در این شرایط رینگ نصب شده پس از خروج از شیلد تمایل به نشست دارد که می‌تواند منجر به افزایش پله‌شدگی و احتمال شکستگی در محل اتصال رینگ شود.

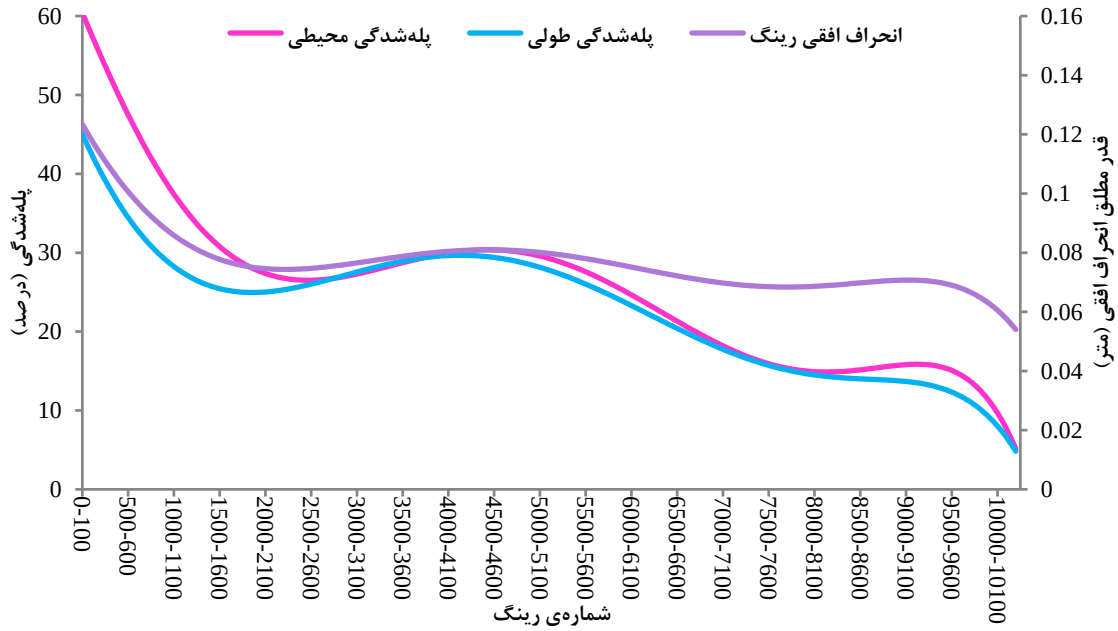
در این پژوهش، افزایش میزان انحراف *TBM* از مسیر طراحی در محدوده‌ی قوس‌های تونل (*Curve Alignment*) و کمبود فضای کافی در شیلد پشتی، درصد پله‌شدگی سگمنت‌ها را افزایش داده است (**شکل ۱۱**). در محدوده‌ی اولین قوس تونل (رینگ ۹۷۰-۱) با شعاع ۲۰۰۰ متر، تعداد پله‌شدگی سگمنت‌ها قابل توجه است؛ اما با پیشروی تونل تعداد پله‌شدگی‌ها به تدریج کاهش می‌یابد. مهم‌ترین عامل در این روند نزولی افزایش مهارت و دقت اپراتور سگمنت‌گذار است. تاثیر این پارامتر می‌تواند کاستی‌های دیگر از قبیل خطای مسیریابی و فشار نامتقارن جک‌های جلو برنده را تا حد زیادی مرتفع کند. اپراتور ماهر می‌تواند تعداد و میزان پله‌شدگی را به کمترین مقدار کاهش دهد. کاهش پله‌شدگی در هر رینگ منجر به توزیع یکنواخت نیروی جک‌های جلو برنده می‌شود و احتمال لب‌پریدگی را از بین می‌برد.

ثبت اطلاعات انحراف رینگ از محور تونل توسط پردازش نرم‌افزاری داده‌های نقشه‌برداری نشان می‌دهد در رینگ‌هایی که انحراف افقی رینگ از محور قابل توجه است، تعداد پله‌شدگی (طولی و محیطی) سگمنت‌ها نیز افزایش یافته است (**شکل ۱۲**). همان‌طور که در **شکل ۱۲** ملاحظه می‌شود تعداد پله‌شدگی طولی وابستگی بیش‌تری با قدر مطلق انحراف افقی رینگ دارد زیرا مقادیر بالای انحراف افقی می‌تواند فاصله‌ی بین رینگ و شیلد عقبی را به شدت

کاهش دهد، به گونه‌ای که فضای کافی برای نصب سگمنت وجود نداشته و اپراتور بدون توجه به موقعیت رینگ، تلاش دارد با تماس سگمنت به شیلد، پله‌شدگی محیطی را کنترل کرده و تعداد آن را به حداقل برساند. به عبارت دیگر انحراف افقی شیلد پشتی عملکرد اپراتور را تحت شعاع قرار داده و با محدودیت‌های ایجاد شده امکان اجتناب از پله‌شدگی طولی را کاهش می‌دهد؛ بنابراین اپراتور ماهر، نصب سگمنت را با تبعیت از درزه‌های محیطی انجام می‌دهد.



شکل ۱۱- رابطه‌ی پله‌شدگی طولی و محیطی با مشخصات هندسی تونل



شکل ۱۲- تاثیر انحراف افقی رینگ در تعداد پله‌شدگی سگمنت‌ها

در این پروژه به دلیل قوس‌های متفاوت و شیب یکسان در مسیر تونل، انحراف افقی رینگ در دامنه‌ی بزرگ‌تری رخ داده است. در حالی‌که انحراف عمودی کاتر هد و رینگ از محور تونل ناچیز است. به نظر می‌رسد مقادیر کوچک انحراف عمودی نمی‌تواند در تعداد پله‌شدگی سگمنت تاثیرگذار باشد. بنابراین در **شکل ۱۳** هیچ‌گونه رابطه‌ی منطقی بین پله‌شدگی و قدر مطلق انحراف عمودی رینگ از محور تونل مشاهده نمی‌شود.

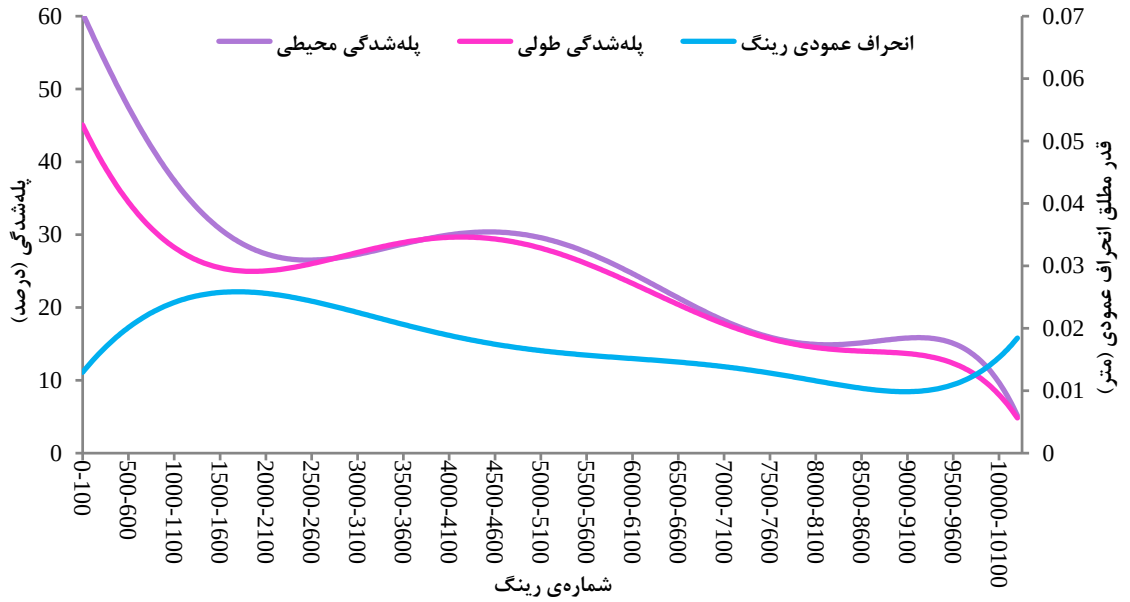
با توجه به این‌که بیش‌ترین سطوح شکستگی در سگمنت‌های *T1* و *T2* رخ داده است، پس برای بررسی تاثیر انحراف رینگ بر سطح شکستگی سگمنت، موقعیت قرارگیری سگمنت *K* به عنوان معیار قضاوت انتخاب شده است. داده‌های استخراج شده از پردازشگر سیستم نقشه‌برداری نشان می‌دهد امکان نصب سگمنت *K* در ۱۶ موقعیت از رینگ وجود دارد. بنابراین می‌توان تعداد شکستگی‌ها را به ازای هر ۲۲٫۵ درجه، چرخش ساعت‌گرد ارزیابی نمود.

ارزیابی سطوح شکستگی در موقعیت‌های متفاوت نشان می‌دهد بیش‌ترین شکستگی‌ها در موقعیت‌های ۹۰ و ۲۷۰ درجه رخ داده است. این بدان معنی است که انحرافات افقی رینگ و کمبود فضای کافی در شیلد پشتی علاوه بر ایجاد پله‌شدگی می‌تواند منجر به لب‌پریدگی سگمنت‌هایی شود که در این موقعیت نصب شده‌اند (**شکل ۱۴**). به عبارت دیگر انحراف شیلد به چپ و راست منجر به شکستگی‌های وسیع می‌شود و انحراف در راستای قائم در این‌گونه شکستگی‌ها تاثیر کمتری دارد.

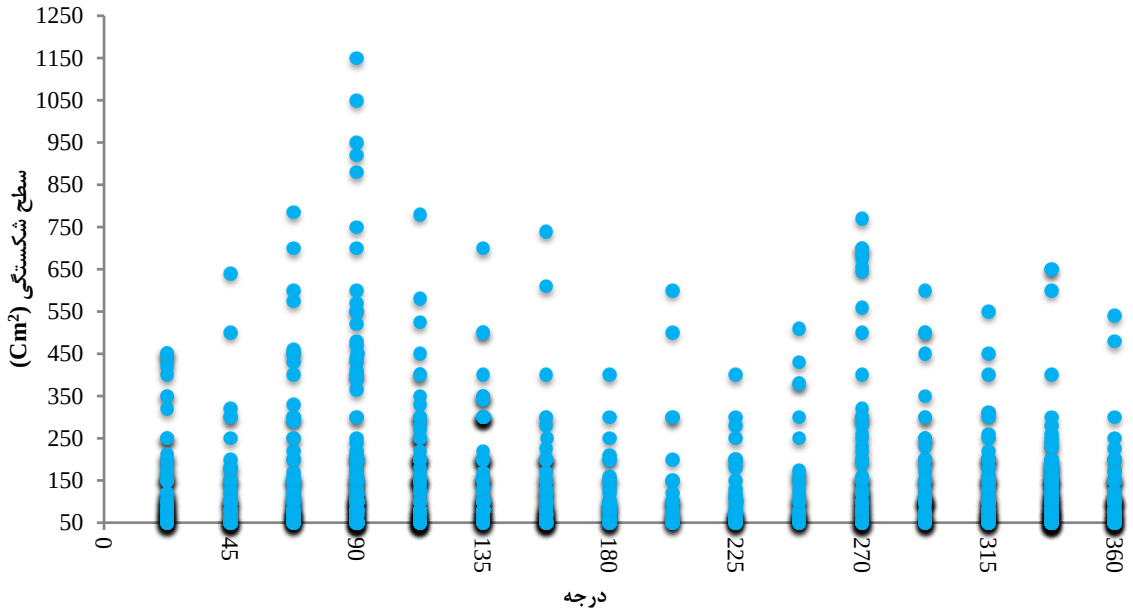
۵- نتیجه‌گیری

دو نقیصه‌ی مهم در زمان نصب سگمنت‌ها، پله‌شدگی و لب‌پریدگی است. ایجاد پله در بین سگمنت‌ها، امری معمول در چیدمان رینگ بتنی است که به دو گروه محیطی و طولی طبقه‌بندی می‌شود. لب‌پریدگی نوعی شکستگی سگمنت است که معمولاً در گوشه‌های سگمنت و تحت تاثیر بارهای موقت در زمان رینگ‌گذاری ایجاد می‌شود. از بررسی علل و اثرات نواقص مربوط به مرحله‌ی نصب سگمنت‌ها، در پروژه‌ی مورد نظر نتایج زیر به دست آمده است:

- طول و شکل درزه‌ها تاثیر بسزایی در ایجاد پله‌شدگی دارند. هر چه طول و شعاع انحنای سگمنت بیش‌تر باشد، در نتیجه خط اثر درزه‌ها بزرگ‌تر شده و امکان انطباق سگمنت‌ها دشوارتر می‌شود؛ بنابراین در شرایط یکسان با افزایش قطر تونل، احتمال تشکیل پله‌شدگی در سگمنت‌ها بیش‌تر می‌شود.



شکل ۱۳- تاثیر انحراف عمودی رینگ در تعداد پله‌شدگی سگمنت‌ها



شکل ۱۴- افزایش سطوح شکستگی در دیواره‌های چپ و راست

- در تونل‌هایی با قطر یکسان، اگر تعداد سگمنت در یک رینگ افزایش یابد، آنگاه درزهای محیطی در یک سگمنت کوچک‌تر شده و انطباق آن‌ها آسان‌تر می‌شود. در چنین شرایطی علی‌رغم کاهش پله‌شدگی محیطی به دلیل افزایش تعداد درزه‌های طولی، پله‌شدگی طولی افزایش می‌یابد.
- لب‌پریدگی‌ها اغلب تحت تاثیر نیروی جک‌های جلو برنده ایجاد می‌شوند؛ اما مشخصات قوس‌ها و انحراف مسیر حفاری می‌تواند در وسعت لب‌پریدگی‌ها موثر باشد. در اکثر مواقع با نصب سگمنت کلید در موقعیت مناسب می‌توان از انحراف رینگ جلوگیری نمود. بنابراین با کنترل مسیر حفاری مقدار پله‌شدگی و لب‌پریدگی به شدت کاهش می‌یابد.
- مهارت اپراتور نقش مهمی در نصب رینگ دارد و می‌تواند سایر عوامل تاثیرگذار در پله‌شدگی و لب‌پریدگی را کاهش دهد؛ به گونه‌ای که گاهی در شرایط نامساعد از قبیل مسیرهای قوس‌دار، انحراف مسیریابی و فشار نامتقارن جک‌ها، رینگ‌هایی با کمترین نواقص نصب شده است.
- اگر چه بیش‌ترین تعداد پله‌شدگی در سگمنت‌های *A2* و *A1* دیده می‌شود؛ اما بیش‌تر لب‌پریدگی‌ها در سگمنت‌های *T2* و *T1* رخ داده است. بنابراین نیروی عمودی جک‌های جلو برنده در مقایسه با افزایش تنش ناشی از پله‌شدگی، تاثیر بیش‌تری بر لب‌پریدگی دارد. در آخرین مرحله‌ی تکمیل رینگ با کنترل فشار جک‌های جلو برنده بر سگمنت کلید می‌توان لب‌پریدگی در سگمنت‌های *T1* و *T2* را کاهش داد.
- کنترل مسیر حفاری، تنظیم فشار جک‌های جلو برنده و افزایش مهارت سگمنت‌گذاری همراه با طراحی مناسب سگمنت (ابعاد و شکل هندسی، آرایش مناسب آرماتوربندی)، می‌تواند پله‌شدگی و لب‌پریدگی را بطور قابل توجهی کاهش دهد.

۶- منبع‌ها

[1] Maidl, B., Schmid, L., Ritz, W., & Herrenknecht, M. (2008). *Hardrock Tunnel Boring Machines*. Berlin: Ernst & Sohn. ISBN: 9783433016763. http://dx.doi.org/10.1002/9783433600122.

[2] Frough, O., Torabi, S. R., Tajik, M. (2012). Evaluation of TBM Utilization Using Rock Mass Rating System: A Case Study of Karaj-Tehran Water Conveyance Tunnel (Lots 1 and 2). *Journal of Mining and Environment, 3*(2), 89-98. http://jme.shahroodut.ac.ir/article_86_11.html.

[3] Wittaker, B. N., & Frith, R. C. (1990). *Tunnelling: Design, Stability and Construction*. London: Institution of Mining and Metallurgy. ISBN: 1870706196.

[۴] فرخ، ا. (۱۳۸۶). *قطعات بتنی پیش‌ساخته*. تهران: جهاد دانشگاهی (دانشگاه صنعتی امیرکبیر). شابک: ۷-۸۳-۸۷۳۷-۹۶۴-۹۷۸.

[5] Kolic, D., & Mayerhofer, A. (2009). Segmental Lining Tolerances and Imperfections. *ITA-AITES World Tunnel Congress: Safe Tunnelling for the City and Environment*. http://www.ctta.org/FileUpload/ita/2009/papers/O-09/O-09-03.pdf.

[6] Herrenknecht, M., & bappler, K. (2003). Segmental Concrete Lining Design and Installation. *Soft Ground and Hard Rock Mechanical Tunneling Technology Seminar*. Colorado School of Mines. http://emi.mines.edu/UserFiles/File/earthMechanics/seminar/06_segmental_concrete_lining_design_and_installation.pdf.

[7] Sugimoto, M. (2006). Causes of Shield Segment Damages during Construction. *International Symposium on Underground Excavation and Tunnelling: Effect of Groundwater on Tunnel Stability* (pp. 67–74). Thailand.

[8] Blom, C. B. M., van der Horst, E. J., & Jovanovic, P. S. (1999). Three-Dimensional Structural Analyses of the Shield Driven "Green Heart" Tunnel of the High-Speed Line South. *Tunnelling and Underground Space Technology, 14*(2), 217-224. http://dx.doi.org/10.1016/S0886-7798(99)00035-8.

[9] Mahajan. R. (2010). *3 Dimensional Structural Modelling of Segmental Tunnel Lining Using Finite Element Software*. Australasian Tunneling Society. http://www.ats.org.au/papers/Ritesh%20Mahajan_paper2010.pdf.

[۱۰] موسسه‌ی مهندسین مشاور ساحل. (۱۳۸۸). *گزارش طراحی مسیر قطعه‌ی دوم تونل انتقال آب کرج-تهران (قطعه‌ی K"-BR)*.

[11] AFTES: French Association of Tunnelling and Underground Space. (2005). *The Design, Sizing and Construction of Precast Concrete Segments Installed at The Rear of a Tunnel Boring Machine (TBM)*. Recommendations on TBM, Shields, and Segments. Reference: GT18R1A1.

[12] DAUB: German Committee for Underground Construction. (2000). *Concrete Linings for Tunnel Built by Underground Construction*. http://www.daub-ita.de/fileadmin/media/daub/gtcrec08e.pdf.

[۱۳] موسسه‌ی مهندسین مشاور ساحل. (۱۳۸۸). گزارش طرح هندسی قطعات بتنی پیش‌ساخته در قطعه‌ی دوم تونل انتقال آب کرج-تهران.

[14] Guglielmetti, V., Grasso, P., Mahtab, A., & Xu, S. (2007). *Mechanized Tunnellingin Urban Areas*. CRC Press. ISBN: 9780415420105.

[15] Gruebl. F. (2006). Segmental Rings-Critical Loads and Damage Prevention. *International Symposium on Underground Excavation and Tunnelling: Effect of Groundwater on Tunnel Stability* (pp. 9-19). Thailand.

[16] Kasper, T., & Meschke, G. (2004). A 3D Finite Element Simulation Model for TBM Tunnelling in Soft Ground. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 28*(14), 1441-1460. http://dx.doi.org/10.1002/nag.395.

[17] VMT GmbH. (2004). *Operators Manual SLS-T APD Guidance System in Segmental Lining*.

[18] Chen. J. S., & Mo. H. H. (2006). Study on Effect of Segments Erection Tolerance and Wedge-Shaped Segment on Segment Ring in Shield. *Journal of Zhejiang University SCIENCE A, 7*(11), 1864-1869. http://dx.doi.org/10.1631/jzus.2006.A1864.

Tunneling & Underground Space Engineering (TUSE)
نشریه‌ی مهندسی تونل و فضاهای زیرزمینی
tuse.shahroodut.ac.ir
Volume 3-Issue 1\Summer 2014

Quality Assessment of Segmental Lining Installation in Mechanized Excavation (D.S.TBM) Case Study: Tehran-Karaj Water Conveyance Tunnel (lot II)

M. Tajik[1]; O. Frough[2]; H. R. Tavakoli[3]
1- M.Sc. in Engineering Geology; Sahel Consultant Engineers institute
2- Post Doc fellow; Dept. of Energy and Mineral Eng.; Penn State University
3- M.Sc. in Rock Mechanics Engineering; Sahel Consultant Engineers institute

Received: 14 Sep 2013; Accepted: 12 Mar 2014

Keywords

Concrete lining
Segment
Spalling
Stepping
Karaj tunnel

Extended Abstract

Excavation and segment installation is simultaneous in D.S.TBM tunneling. Segmental quality control in production phase (in factory) and accuracy and rapidity of segment installation in implementation phase are considered amongst main advantages of segmental lining application in mechanized tunneling. But inherent defects of segments and stepping and spalling after installation decrease concrete lining quality. Recognition of cause and mechanism of segment defects is an important factor in quality improvement of precast concrete lining. In this paper, lining installation quality and causes of concrete damages have been studied using Tehran-Karaj water conveyance tunnel (lot II) site data.

Introduction

During segment installation some damages such as stepping and spalling might occur. There are different influencing factors, which can be categorized as manufacturing and installation related damages. In order to study the type and the cause of segment damages which were installed in different location of a ring, about ten thousand rings were analyzed in Tehran-Karaj water conveyance tunnel (lot II) with 14 km length, excavated by D.S.TBM.

Methodology and Approaches

Lining installation quality of this tunnel was studied using statistical approach. The effective parameters on segment damages classified in ground situation, tunnel alignment, machine parameters, concert characterizations, thrust of the jacks, tail shield situation, quality of installation and other parameters. In this tunnel, each concrete ring consists of 5+1 key universal segment that was assessed based on survey deviance, eccentric thrust jacks and accuracy of segment installation on amount and size of defects.

Results and Conclusions

This approach shows that minimum and maximum spalling occurs in key segment and its contiguous segments, respectively. In addition, stepping in key contiguous segments are more than other type of segments. Comparing segment installation condition and survey deviance in curve alignments shows a great reduction in installation quality and increase in number of stepping and spalling area.