به نام خدا

بررسی علل شکستگی و ترک قطعات بتنی پیش‌ساخته (سگمنت) در پروژه‌های حفاری تونل به صورت مکانیزه

مطالعه موردی تونل جمع‌آوری آب‌های سطحی منطقه ۲۱ و ۲۲

رضا ظریف پور

کارشناس ارشد مهندسی معدن

ناظر حفاری مکانیزه مهندسین مشاور ری آب

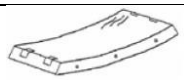
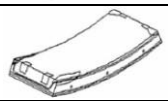
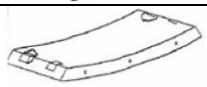
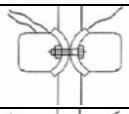
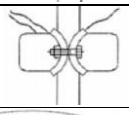
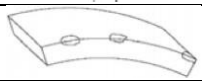
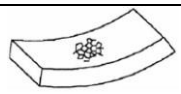
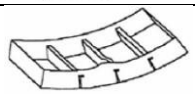
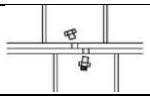
مقدمه

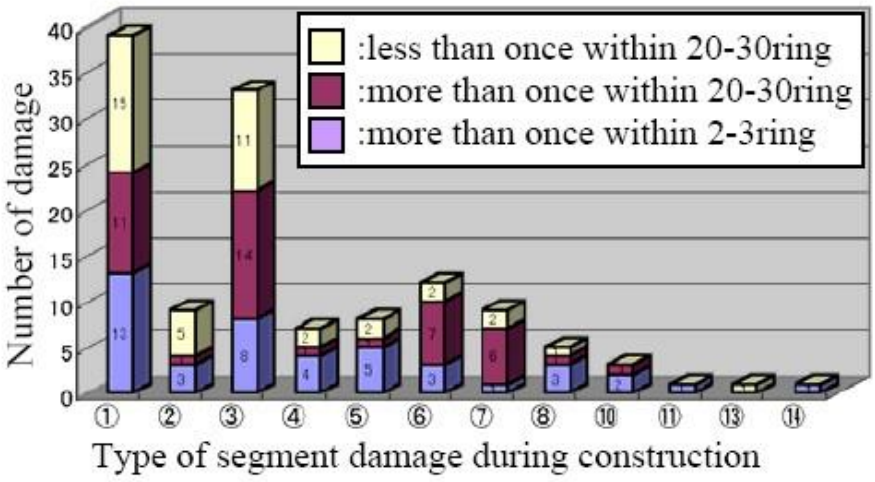
در تونلها معمولا شکستگی‌ها به دو بخش تقسیم می‌شوند. بخش اول شکستگی‌هایی است که به دلیل ضعف در اجرا رخ می‌دهد بخش دوم ترک‌هایی است که منشأ سازه‌ای داشته و به علل مختلفی نظیر افزایش بارها بیش از مقادیر درنظر گرفته شده در محاسبات، کمبود مقاومت فشاری بتن ناشی از عمل‌آوری و اختلاط نامناسب و یا فراهم نشدن شرایط تکیه‌گاهی سازه تونل مانند عدم تزریق در اجرا رخ می‌دهد. بخش اول شکستگی‌ها با رفع نقایص اجرا اصلاح می‌شود که شکستگی‌های آن به دلیل مشکلات بهره‌برداری نیاز به ترمیم خواهند داشت. به منظور مرتفع کردن نقایص بخش دوم نیز نیاز به مقاوم‌سازی طرح و بعضاً طراحی مجدد سگمنت می‌باشد. در این مقاله به بررسی کلیه عوامل مرتبط در ایجاد شکستگی و ترک سگمنت‌ها می‌پردازیم و در پایان با بررسی موردی پروژه تونل جمع آوری و هدایت آب‌های سطحی بزرگراه‌های فتح و مخصوص پیشنهاداتی در خصوص کاهش و رفع شکستگی‌ها ارائه می شود.

انواع آسیب وارده به سگمنت تونلها

خرابی سگمنتها در طی ساخت بر اساس تجارب کارگاهی ثبت شده از تونلهای مختلف، طبقه بندی و در جدول(۱) ارائه شده است. همچنین در شکل (۱) فراوانی آسیب‌های سگمنت در حین ساخت براساس نوع آن نشان داده شده است . شماره نوع آسیب در شکل (۱) با اعداد جدول (۱) متناظر میباشد.

جدول(۱)- طبقه‌بندی آسیب وارده به سگمنتها در طی ساخت

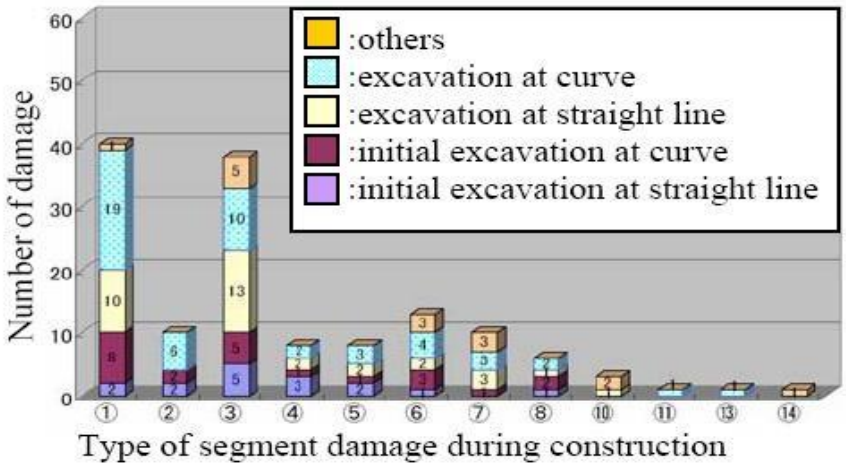
ردیف	نوع خرابی	شکل
۱	ترک محوری	
۲	ترک پیرامونی	
۳	لب پریدگی در گوشه‌های سگمنت	
۴	قلوه‌کن شدن بتن اطراف محل اتصال به سگمنت دیگر	
۵	قلوه‌کن شدن بتن اطراف محل اتصال به حلقه دیگر	
۶	ترک برشی اطراف محل اتصال به حلقه دیگر	
۷	ترک برشی اطراف محل اتصال به سگمنت دیگر	
۸	قلوه‌کن شدن در سطح خارجی	
۹	ترک مویی در سطح داخلی	
۱۰	پیدایش ترکهای میکروسکوپی	
۱۱	کمان پشتبند طولی(سگمنت فولادی)	
۱۲	تغییر شکل پشتبند (سگمنت فولادی)	
۱۳	شکست پیچ‌های اتصال	
۱۴	سایر موارد	



شکل(۱)- فراوانی آسیب سگمنتها در طی ساخت

با توجه به نمودار ارائه شده در شکل(۱) خسارت‌های عمده وارده به سگمنت، ترک محوری نوع ۱ و لب‌پریدگی در گوشه‌ها نوع ۳ می‌باشند. خسارت‌های فراوان بعدی ترکهای برشی اطراف اتصال دو رینگ نوع ۶ و ترکهای برشی اطراف اتصال دو سگمنت نوع ۷ و ترک در جهت پیرامونی نوع ۲ می‌باشند.

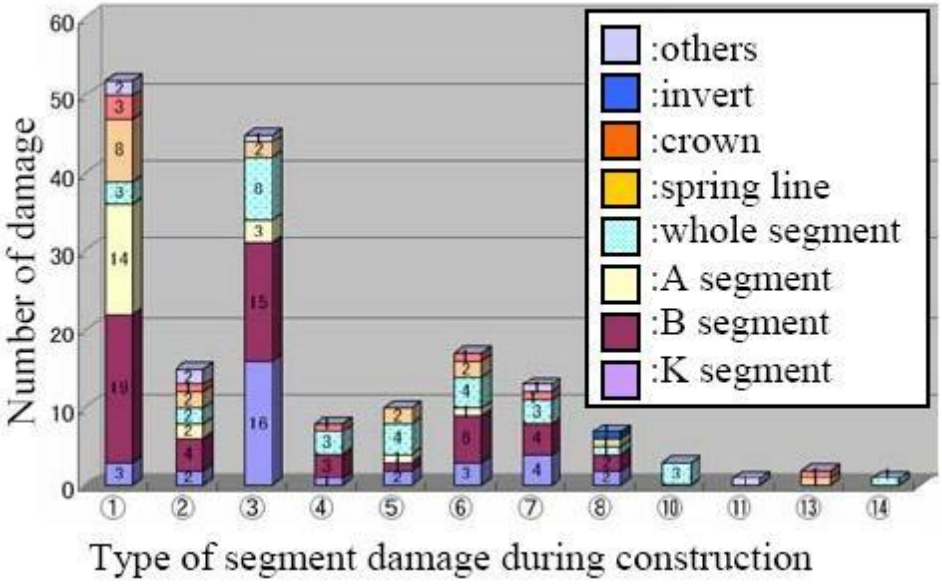
شکل (۲) تعداد خسارتها را به تفکیک مراحل مختلف ساخت برای هر نوع خرابی نشان میدهد. با استفاده از این شکل می‌توان دریافت که حدود ۷۰ درصد ترک‌های محوری نوع ۱ در مسیرهای خمیده مشاهده می‌شود.



شکل(۲)- تعداد خسارتها به تفکیک مراحل مختلف ساخت

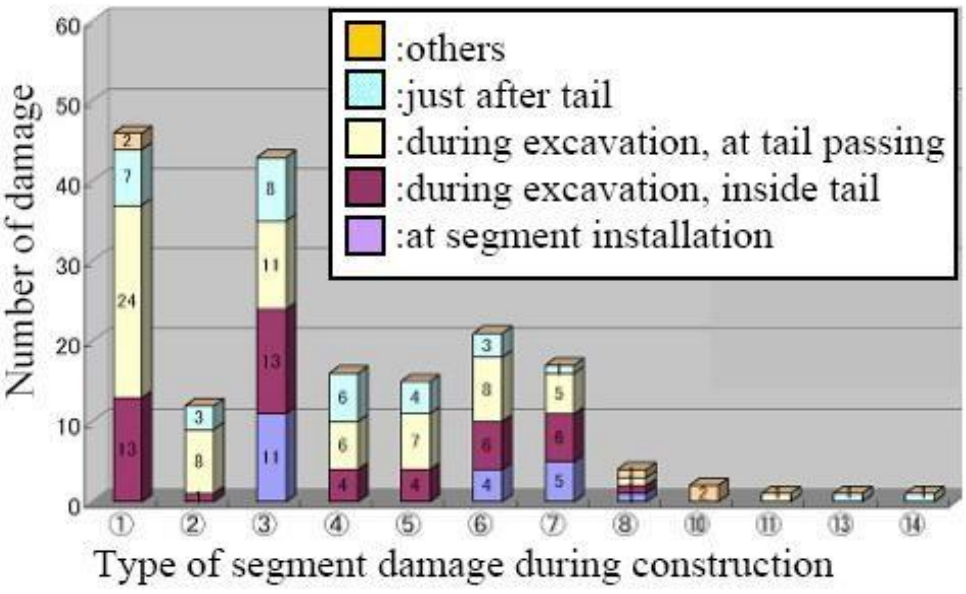
شکل(۳) آسیب سگمنت بر اساس موقعیت رخداد آن را نشان میدهد .حدود ۶۰ درصد ترکهای محوری آسیب نوع ۱ در سگمنتهای اصلی دیواره یا سقف(A segment و B segment) مشاهده شده است. در حدود ۷۰ درصد

لب‌پریدگی گوشه‌های سگمنت آسیب نوع ۳، ترک برشی اطراف محل اتصال دو رینگ آسیب نوع ۶ و ترک برشی اطراف محل اتصال دو سگمنت آسیب نوع ۷ در سگمنت مجاور کلید و سگمنت کلید (B segment و K segment) مشاهده شده است. خسارت نوع ۱ به محل سگمنت و آسیبهای نوع ۶،۳ و۷ به شکل سگمنت مربوط هستند.



شکل(۳)- فراوانی آسیب سگمنتها به تفکیک محل رخداد آن

شکل(۴) خرابی سگمنت‌ها به تفکیک زمان رخداد آن را نشان می‌دهد. ترک‌های محوری آسیب نوع ۱، در هنگام نصب سگمنت مشاهده نشده و حدود ۸۰ درصد این خسارت در حین حفاری هنگامی که سگمنت در داخل سپر دنباله (Tail Sheild) است یا در هنگام عبور از آن مشاهده میشود. حدود ۸۰ درصد آسیب‌های نوع ۳ لبپریدگی، نوع ۶ ترک برشی اطراف محل اتصال به حلقه دیگر و نوع ۷ ترک برشی اطراف محل اتصال به سگمنت دیگر، در هنگام نصب سگمنت و حفاری مشاهده میشود. بنابراین خسارت نوع ۱ از حفاری و شرایط زمین تأثیر می‌پذیرد و خسارتهای نوع ۶،۳ و۷ با مهارت نیروی انسانی(workmanship) رابطه دارد.



شکل(۴)- فراوانی آسیب سگمنتها به تفکیک زمان رخداد آن

مناطق عمده ایجاد آسیب به سگمنت به شرح زیر است:

- ترکهای محوری در بخش میانی سگمنت‌های A یا B
- ترک برشی نزدیک سگمنت کلید
- ترک برشی اطراف محل اتصال دو رینگ
- ترک برشی اطراف محل اتصال دو سگمنت
- کناره‌های سگمنت، جایی که جکهای TBM عمل میکنند

دلایل وقوع آسیب در سگمنتها

دلایل صدمات وارده به سگمنت نه تنها به مرحله ساخت بلکه به مرحله طراحی نیز مربوط می‌شود. جدول (۲) طبقه‌بندی دلایل وقوع خسارت به سگمنت در حین طراحی و ساخت را براساس تجارب کارگاهی نشان می‌دهد.

جدول (۲)- طبقه‌بندی دلایل خرابی سگمنتها در طی ساخت

مرحله		دلایل خرابی سگمنتها
طراحی	زمین	زمین سخت (A) زمین نرم (B) فشار هیدرولیکی زیاد (C)
	امتداد تونل	قوس تند (D) شیب تند (E)
	TBM	لقی کم سپر دنباله (F) نبود مکانیزم چرخشی (G)
	سگمنت	سگمنت با ضخامت کم (H) سگمنت عریض (I) الگوی تقسیم سگمنت (J) مشخصات اتصال (K) مشخصات مواد آببندی (L)
ساخت	جک سپر	تراست زیاد جک(a) تراست خارج از مرکز جک بر سگمنت (b) انحراف جک نسبت به سگمنت (c) تراست خارج از مرکز جکها به حلقه سگمنت (d)
	سپر دنباله	تماس بین سپر دنباله و سگمنت (e)
	نصب سگمنت	اتصال غیر مسطح (f) اتصال باز (g) دقت نصب سگمنت(h)
	سایر دلایل	فشار خارج از مرکز روغن (i) فشار خارج از مرکز تزریق (j) نیروی نامناسب کیپ کننده اتصالات (k) تزریق ناکافی (l)

همانطورکه در جدول (۲) مشاهده می‌شود، دلایل خسارات وارده به سگمنت در مرحله طراحی ناشی از پارامترهایی چون زمین، راستای تونل ،TBM و سگمنت است که در ادامه شرح داده میشود:

- در حالت زمین سخت (A)، زمین اجازه چرخش به TBM را نداده و محور TBM ممکن است نسبت به محور سگمنت دارای انحراف شود .
- در حالت زمین نرم (B)، در صورت عدم کفایت نیروی واکنش زمین برای پشتیبانی تراست و لنگر جک در طول سگمنت، کنترل TBM در قوسهای تند مشکل می‌شود. علاوه بر این، فشار وارد به سگمنت از طرف زمین ممکن است بیش از بار طراحی بوده و منجر به آسیب سازه‌ای به سگمنت شود.
- فشار هیدرولیکی بیش از مقدار پیش بینی شده در مرحله طراحی (C) موجب افزایش تراست مورد نیاز جک و فشار وارده به سگمنت شده که باعث آسیب رساندن به سگمنت میشود .
- درنظر گرفتن انحنای زیاد (D) و شیب تند (E) در طرح هندسی مسیر، لقی سپر دنباله (Tailclearance) را کاهش داده و ممکن است باعث برخورد سگمنت و سپر شود. همچنین درنظر گرفتن قوس افقی و قائم همزمان در طول مسیر، کنترل TBM را مشکل می‌سازد.
- عدم پیش بینی لقی مناسب سپر دنباله در طراحی (F) و نبود مکانیزم چرخشی (G) باعث تماس بین سگمنت و سپر دنباله می‌شود. دراین حالت، به سگمنت نیروی متمرکزی وارد می‌شود که در طراحی پیش بینی نشده و می‌تواند منجر به آسیب رساندن به سگمنت گردد.
- سگمنت با ضخامت کم (H) باعث ایجاد تراست خارج از مرکز جک روی سگمنت‌ها می‌شود. همچنین استفاده از سگمنتهای نازک و عریض، می‌تواند منجر به بروز صدماتی به سگمنت درحین ساخت مانند ترک‌خوردگی، لب‌پریدگی و قلوه‌کن شدگی بتن شود.
- طراحی سگمنت عریض (I) باعث تماس بین سگمنت و سپر دنباله میشود.
- الگوی تقسیم نامناسب سگمنت (J) باعث سخت شدن کار نصب سگمنت میشود. همچنین در صورت عدم پیش بینی Tapering مناسب برای سگمنت، اجرای قوس تونل با مشکل مواجه خواهد شد. در شرایط قوس، اتصال کامل بین سگمنت‌های دو رینگ متوالی، ایجاد نشده و تمرکز تنش ناشی از فشار رینگ جلویی، منجر به پوسته شدن و یا لب پریدگی سگمنتهای رینگ پشتی می‌شود.
- طرح نامناسب هندسه، ابعاد و تلورانس نصب سگمنت در ناحیه‌ی اتصال بین سگمنتهای مجاور (K) و مشخصات نامناسب مصالح آب‌بندی (L) باعث ایجاد تمرکز تنش در سگمنت می‌شود.

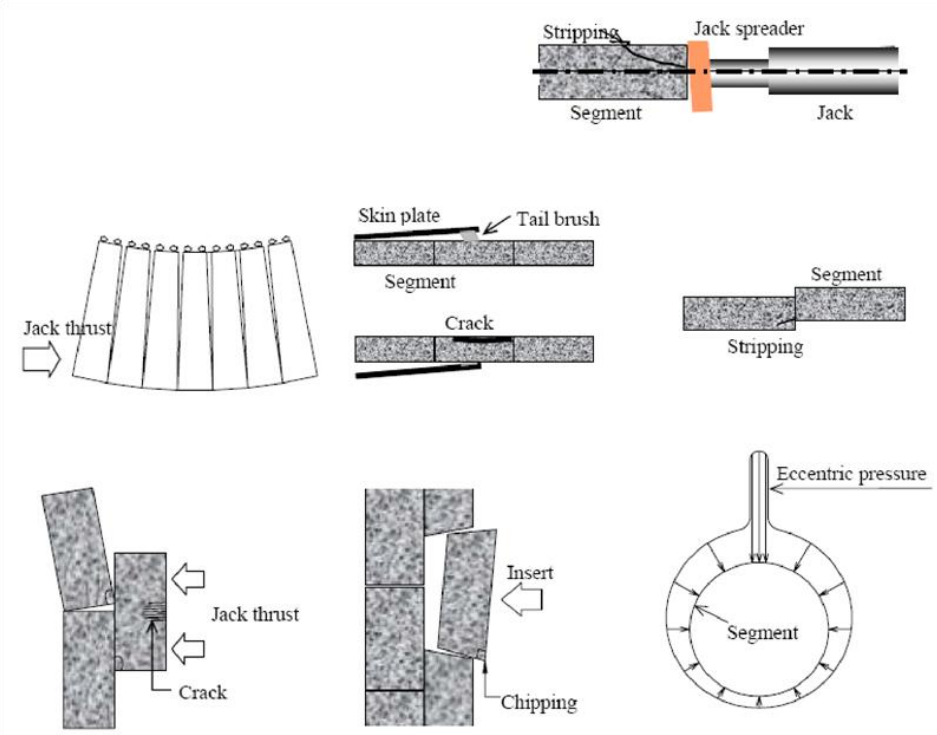
علاوه بر موارد اشاره شده در بالا، پیش بینی نادرست وزن سیستم پشتیبانی TBM به سگمنت و یا فرض نادرست شرایط تکیه‌گاهی پیرامون رینگ، از دیگر دلایل آسیب احتمالی به سگمنت در مرحله طراحی می‌باشد. دلایل خسارات وارده به سگمنت در مرحله ساخت مربوط به جک سپر، سپر دنباله، نحوه نصب سگمنت و سایر عوامل به شرح زیر میباشد:

- تراست زیاد جک(a) تنش فشاری را در سگمنت افزایش میدهد .
- تراست خارج از مرکز جک به سگمنت (b) و اتصال باز (g) باعث وارد شدن لنگر به سگمنت می‌شود .
- تراست خارج از مرکز جکها به رینگ سگمنت (d) و یا تراست نامتقارن جکها به یک رینگ، باعث وارد شدن لنگر به رینگ سگمنت میشود .
- انحراف جک نسبت به سگمنت(c) اتصال سپر دنباله و سگمنت (e)، اتصال غیر مسطح (f)، دقت کم در نصب سگمنت (h)، فشار خارج از مرکز روغن (i) و فشار خارج از مرکز تزریق (j) باعث ایجاد تمرکز تنش در سگمنت می‌شود .
- نیروی کم کیپ‌کنندگی اتصال(k) باعث ایجاد تغییر شکل حلقه سگمنت میشود .
- تزریق ناکافی (l) اثر نیروی واکنش زمین را کاهش می‌دهد. معمولاً هنگامی که پشت سگمنت‌ها به خوبی تزریق شده باشد، به دلیل توزیع مناسب نیرو، گسترش ترک مشاهده نمی‌شود و ترک‌های جدید به وجود نمی‌آید. تزریق نامتقارن پشت رینگ، علاوه بر اعمال بارگذاری نامتقارن به رینگ ، شرایط تکیه‌گاهی نامناسبی نیز ایجاد می‌کند و منجر به ایجاد لنگر در رینگ و بروز ترکهای محوری خمشی میشود.
- علاوه بر موارد بالا، ناهمگونی ظاهری سگمنت در مرحله نصب و حفاری نیز باعث ایجاد رینگ‌هایی با قطر متفاوت و در نتیجه تحمل بارهای متفاوت در زمان نصب خواهد شد.

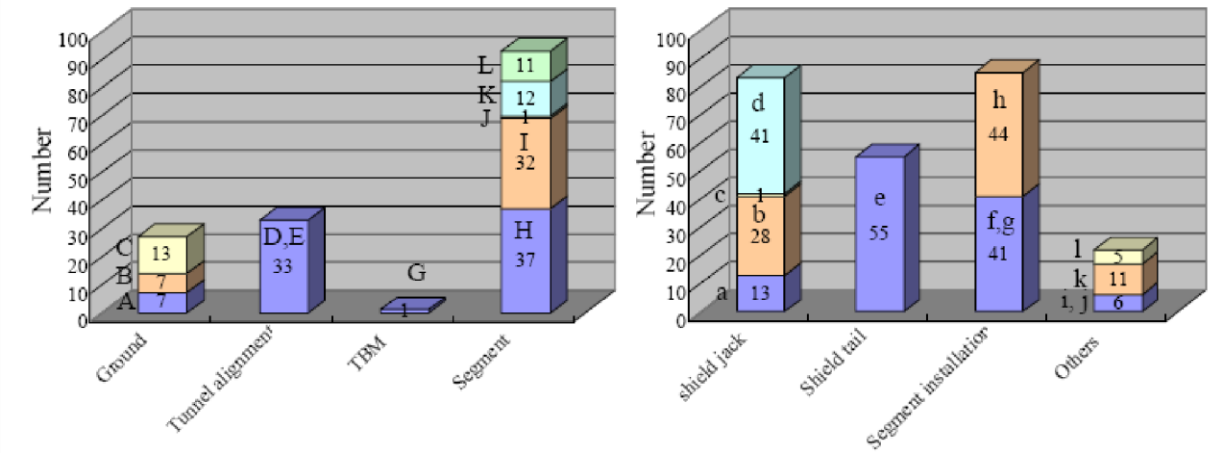
شکلهای(۵) و(۶) دلایل و فراوانی دلایل آسیب سگمنتها را در طول ساخت نشان میدهد. با استفاده از این شکل‌ها نتایج زیر حاصل میشود:

- در مرحله طراحی، پارامترهای شکل سگمنت مثل سگمنت نازک(H) و سگمنت عریض (l) و مسیر تونل مانند قوس شدید(D) و شیب تند(E) بارزترین دلایل خرابی سگمنت هستند. اگرچه در شکل (۶)، TBM سهم کوچکی در خرابی سگمنت دارد، اما باید به این نکته توجه نمود که لقی کم طراحی سپر دنباله(F) در TBM امکان اتصال بین سپر دنباله و سگمنت(e) را افزایش می‌دهد .
- در مرحله ساخت، اتصال بین سپر دنباله و سگمنت(e) مهمترین دلیل خرابی سگمنت است.
- فراوانترین دلایل خرابی بعدی، با شرایط نصب سگمنت مرتبط است، مانند اتصال غیر مسطح (f)، اتصال باز(g) و دقت کم در نصب سگمنت(h). تراست خارج از مرکز جکها به حلقه سگمنت‌ها (d)، و تراست

خارج از مرکز جک به سگمنت(b) در جک سپر (shield Jack) نیز سهم عمده‌ای در خرابی سگمنت دارند.



شکل(۵)- دلایل خرابی سگمنتها در زمان ساخت



شکل (۶)- فراوانی دلایل آسیب سگمنتها در زمان ساخت

در ارزیابی خسارات وارده به سگمنت، بایستی به نکات زیر نیز توجه داشت:

آسیب سگمنت معمولاً به دلایل متعددی در مرحله طراحی یا ساخت ایجاد می‌شود. خرابی سگمنت در برخی موارد به صورت ترکیبی از آسیب‌های یاد شده مشاهده می‌شود. بیشترین تأثیر عوامل یاد شده، در نقاط ضعف بتن نظیر محل بولت‌گذاری، سوراخهای حمل و نقل سگمنت و گوشه‌ها مشاهده می‌شود. برای کاهش آسیب‌های وارده به سگمنت در حین ساخت، بایستی به نکات زیر توجه داشت:

مرحله طراحی در خرابی سگمنت مؤثر است. بنابراین شرایط واقعی بارهای وارده به سگمنت در زمان ساخت و بهره‌برداری بایستی ارزیابی شود. با توجه به اینکه در زمان طراحی، پیش بینی کامل رفتار زمین مقدور نیست، ضروری است در مرحله ساخت تغییر شکل‌ها و مشخصات مقاومتی زمین مشاهده و اندازه‌گیری شود.

دلایل مهم هر خرابی سگمنت و مکانیزم آن باید براساس تجربه و اندازه‌گیری کارگاهی بررسی شود. از روی اندازه‌گیری‌های انجام شده به صورت برجا میتوان در خصوص دلایل آسیب رسیدن به سگمنت‌ها قضاوت بهتری نمود .

بررسی علل وقوع شکستگی‌ها در پروژه تونل مکانیزه فتح

بر اساس آنچه پیشتر ذکر شد، در تونل‌ها معمولا شکستگی‌ها به دو بخش تقسیم می‌شوند. بخش اول شکستگی-هایی است که به دلیل ضعف در اجرا رخ می‌دهد بخش دوم ترک‌هایی است که منشأ سازه‌ای داشته و به علل مختلفی نظیر افزایش بارها بیش از مقادیر درنظر گرفته شده در محاسبات، کمبود مقاومت فشاری بتن ناشی از عمل‌آوری و اختلاط نامناسب و یا فراهم نشدن شرایط تکیه‌گاهی سازه تونل مانند عدم تزریق در اجرا رخ میدهد.

به طور کلی عوامل ایجاد ترکها و شکستگی‌های رخ داده در تونل مکانیزه فتح را می‌توان به دو بخش زیر تقسیم‌بندی نمود:

۱- عوامل موثر در روند تولید سگمنتها

۲- عوامل موثر در فرآیند نصب سگمنتها

عوامل موثر در روند تولید سگمنت‌ها:

قطعات سگمنت از مرحله تولید تا نصب و بهره برداری تحت تنش‌های مختلف فشاری و کششی قرار می‌گیرند. عملکرد مناسب قطعه تولید شده مستلزم تامین همزمان مقاومت بتن و دوام آن خواهد بود. به منظور دستیابی به این مهم باید علاوه بر طرح اختلاط مناسب و استفاده از مصالح مرغوب، بر روند عمل‌آوری و نگهداری قطعه تولید شده نظارت مستمر داشت. برخی نکات قابل تامل در فرآیند تولید و نگهداری سگمنت‌های تونل مکانیزه فتح در ادامه ارائه شده است.

کیفیت و دانه‌بندی مصالح

همانطورکه در شکل(۷) مشاهده می‌شود، لایه لایه شدن بتن و شکست برخی سنگدانه‌ها حاکی از کیفیت و دانه‌بندی نامناسب در این موارد است. به نظر میرسد افزایش دقت در جلوگیری از تغییر الگلوی دانه بندی و افزایش درشت‌دانه در دانه‌بندی موجود و همچنین استفاده از سنگدانه‌های با دوام بالا اجتناب ناپذیر است.

شکل(۷)- لایه لایه شدن و شکستگیهای کاور بتن سگمنتها

نگهداری سگمنت‌ها

در نگهداری اولیه سگمنت‌ها در درون کارخانه حداقل زمان یاد شده رعایت شود. ضمناً در فصول سرد سال قرار دادن سگمنت‌ها در محیط باز مستلزم گذشت زمان و کاهش تدریجی دمای آن می‌باشد تا از تحمیل تنش‌های حرارتی به بتن جلوگیری گردد .

دپوی سگمنت در محیط باز تابع شرایطی است که شامل ملاحظات خاص از جمله کنترل تنش های حرارتی، جلوگیری از انجماد و ذوب‌شدگی در سطوح و تامین پوشش کافی برای حفرات می‌باشد.(شکل ۸)

شکل(۸)- دپوی سگمنتها در محیط باز و به وجود آمدن ترکهای ناشی از تنشهای حرارتی و انجماد

عوامل موثر در وقوع ترک ها و شکستگی‌ها طی فرآیند نصب سگمنت‌ها

اعمال بارهای نامتقارن بیشتر از مقدار درنظر گرفته شده در طراحی، یا حتی اعمال بارها در نقاط نامناسبی که منجر به تمرکز تنش در سگمنت خواهد شد، بعضاً ترکها و شکستگی‌های ناخواسته را در حین اجرا ایجاد خواهد کرد. به منظور جلوگیری از این ترکها و شکستگی‌های ناخواسته می‌بایست با تأمل در روند اجرا و شناسایی عوامل آن نسبت به اصلاح آن اقدام کرد. در اجرای لاینینگ و نصب سگمنت ها در تونل مکانیزه فتح، توجه به نکاتی که در سرفصل‌های ذیل ارائه شده است ضروری به نظر می‌رسد.

انحراف دستگاه

انحراف بیش از حد دستگاه و تغییر زاویه آن که بعضاً ناشی از افتادگی دستگاه در مسیر می باشد منجر به اعمال فشار نامتقارن قابل توجهی به منظور اصلاح مسیر شده است که نتیجتاً موجب ترک‌خوردگی و شکستن سگمنت‌ها شده است.

کالیبره نبودن جکها و دوران آنها

تنظیم نبودن جکها و چرخش آنها منجر به اعمال تنش در لبه‌های سگمنت و تمرکز تنش علی‌الخصوص در محل بستن پیچ‌ها و وجوه کناری سگمنت شده که شکستگی‌هایی را به دنبال داشته است(شکل۹).

شکل(۹) – کالیبره نبودن جکها و دوران آنها

رواداری در نصب سگمنتها

عدم بستن پیچ‌های بین قطعات در یک رینگ منجر به جابجایی یک ردیف سگمنت‌های کناری حین فشار پیش‌روی جک ها خواهد شد. از طرف دیگر رواداری‌های سگمنتها (Gap and Offset)، برخورد لبه‌های آنها را به دنبال خواهد داشت که موجب شکستگی و لبپریدگی سگمنتها خواهد شد (شکل ۱۰).

شکل(۱۰)- رواداری در نصب سگمنتها و عدم نصب پیچهای بین قطعات

لازم به ذکر است، با توجه به وجود این رواداری‌ها متاسفانه رینگ‌ها قابلیت آب‌بندی خود را نیز از دست خواهند داد. در مجموع عوامل یادشده سبب تنش های نامتقارن در لبه‌های سگمنت، لب‌پریدگی و شکستگی لبه‌ها خواهد شد (شکل۱۱).

شکل(۱۱)- لبپریدگی و شکست لبه سگمنتها در اثر تنشهای نامتقارن

راهکارهای کاهش ترک و شکستگی سگمنت‌ها

راهکارهای موثر در روند تولید سگمنتها

همانطورکه پیش‌تر ذکر شد، کاهش ترک‌های ناشی از عوامل موثر در وقوع ترکها طی روند تولید سگمنتها، مستلزم افزایش کیفیت تولید قطعات است. به طور خلاصه راهکارهای کاهش ترکهای ناشی از عوامل موثر در روند تولید سگمنتها عباتند از:

- کنترل پیوسته کیفیت و دوام سنگدانه‌ها
- افزایش حجم درشت‌دانه و بهبود دانه‌بندی مصالح
- سرپوشیده کردن دپوی مصالح و افزایش سطح کیفی نگهداری از سنگدانه‌ها
- کنترل تنش‌های حرارتی وارده به سگمنت‌ها
- کنترل سیکل عمل‌آوری

راهکارهای موثر در فرآیند نصب سگمنتها

کاهش ترکهای ناشی از عوامل موثر در وقوع ترک طی فرآیند نصب سگمنت‌ها مستلزم رعایت نکات زیر است:

- کالیبره کردن جک‌ها و رفع نقایص آن نظیر دوران جک‌ها
- پیشگیری از انحراف دستگاه و اصلاح انحرافات موجود
- کاهش رواداری‌های نصب سگمنت‌ها به طوری که کلیه پیچ‌های یک رینگ بسته شوند.
- افزایش بعد پد دو جک کناری به گونهای که فشار پیشروی هماهنگ به سگمنت پایینی و بالایی اعمال شود تا از جابجایی نسبی بین آنها جلوگیری شده و مانع برخورد لبه سگمنتها به یکدیگر گردد.
- دقت در نصب سگمنت‌ها به گونه‌ای که نیاز به پدهای بین قطعات نباشد و از اعمال تنش‌های موضعی جلوگیری شود.
- افزودن الیاف در طرح سازه سگمنت به منظور افزایش مقاومت کششی در لبه‌ها:

امروزه بکارگیری بتن الیافی در تونلها به دلیل عملکرد مناسب آنها از جمله مقاومت مناسب کششی و دوام آنها رو به گسترش می‌باشد. در گزارشی از دکتر مهدی بخشی عضو کمیته ACI 544 آمده است که بتن الیافی در بیش از ۹۳ تونل استفاده شده و اولین آن تونل Metrosud در ایتالیا در سال ۱۵۱۲ بوده است جدول(۳).

جدول(۳)- تونلهای اجرا شده با استفاده از بتن الیافی

Tunnel Name	Year	Country	Function	D_i, ft (m)	h, in. (m)	D_i/h (-)	Steel Fiber Content, lb/yd³ (kg/m³)	Reinforcing bars used
Metrosud	1982	Italy	Subway	19 (5.8)	12 (0.30)	19.3	NA*	No
Fanaco	1989	Italy	Water Supply	10 (3.0)	8 (0.20)	15.0	NA*	No
Heathrow Baggage Handling	1993	England	Service	15 (4.5)	6 (0.15)	30.0	50 (30)	No
Heathrow Express	1994	England	Railway	18.7 (5.7)	9 (0.22)	25.9	50 (30)	No
Napoli metro	1995	Italy	Subway	19 (5.8)	12 (0.30)	19.3	67 (40)	No
Lesotho Highlands	1995	South Africa	Water Supply	15 (4.5)	12 (0.30)	15.0	84 (50)	No
Hachinger	1998	Germany	Water Supply	7.2 (2.2)	7 (0.18)	12.2	NA*	No
2nd Heinenoord	1999	Netherlands	Road	25 (7.6)	14 (0.35)	21.7	NA*	No
Jubilee Line	1999	England	Subway	15 (4.5)	8 (0.20)	22.3	50 (30)	No
Trasvases Manabi (La Esperanza)	2001	Ecuador	Water Supply	11.5 (3.5)	8 (0.20)	17.5	50 (30)	No
Essen	2001	Germany	Subway	24 (7.3)	14 (0.35)	20.9	NA*	No
Sorenberg	2002	Switzerland	Gas Pipeline	12.5 (3.8)	10 (0.25)	15.2	67 (40)	No
Canal de Navarra	2003	Spain	Water Supply	17.7 (5.4)	10 (0.25)	21.6	NA*	No

مشخصات کلی تونلهایی که بتن الیافی در آنها استفاده شده است به شرح زیر است:

- کاربری: انتقال آب، لوله‌های گاز، تونل‌های راه و یا راه‌آهن و- ..
- قطر داخلی تونل‌ها: ۲/۲ الی ۱۱/۴ متر
- حداقل و حداکثر ضخامت سگمنت: ۱۵ تا ۴۰ سانتیمتر
- درصد الیاف فولادی بکار رفته: ۲۵تا ۶۰ کیلوگرم بر مترمکعب

محاسن بکارگیری الیاف به شرح ذیل برشمرده شده است:

- مقاومت و دوام بالاتر
- کاهش عرض ترکها
- مقاومت بالاتر در برابر برخوردهای غیرعمدی قطعات
- بهره‌وری مناسب در فرآیند تولید
- کاهش خردشدگی و ورقه ورقه شدن بتن در کاور بتن و گوشه‌های آسیب پذیر آن

تجربیات اجرای تونل‌ها با بتن الیافی و همچنین تحقیقات انجام شده در زمینه کاربرد بتن الیافی در سگمنت حاکی از آن است که الگوی توزیع ترکهای کششی با توجه به عملکرد متفاوت بتن الیافی بهتر از بتن معمولی بوده است. از همین رو به منظور جلوگیری از وقوع ترک و شکستگی سگمنت‌ها در این پروژه، استفاده همزمان بتن الیافی به همراه آرماتور توصیه میشود. با توجه به تجربیات مشابه گذشته میزان الیاف لازم در هر مترمکعب بتن به میزان حدود ۱ کیلوگرم خواهد بود.

جمع‌بندی و پیشنهادات

با توجه به مطالب بیان شده، خلاصه علل وقوع شکستگی‌های سگمنت تونل مکانیزه فتح و راهکارهای پیشنهادی در این مقاله به طور خلاصه در جدول(۴) ارائه شده است.

جدول(۴)- خلاصه علل وقوع شکستگی‌های سگمنت و راهکارهای پیشنهادی

مرحله اجرایی	عامل بروز ترک	آسیبی که ایجاد میکند	راهکار اصلاحی پیشنهادی
تولید، حمل و نقل و نگهداری سگمنت	کیفیت پایین سنگدانه‌ها و دانه‌بندی نامناسب	کیفیت پایین سنگدانه‌ها و دانه‌بندی نامناسب آنها (عدم وجود سنگدانه‌های سایز متوسط) باعث لایه‌لایه شدن بتن و شکست آن میشود.	افزایش دقت در جلوگیری از تغییر الگوی دانه‌بندی و همچنین استفاده از سنگدانه‌های با دوام بالا.
	عدم نگهداری کافی سگمنت در کارخانه	تحمیل تنش های حرارتی اضافی و بروز ترک	کنترل نگهداری اولیه سگمنتها در درون کارخانه به میزان حداقل زمان یاد شده در طرح سازه
عوامل موثر در فرآیند نصب سگمنتها	انحراف دستگاه	ترک‌خوردگی و شکستن سگمنتها در اثر تلاش برای جبران انحراف	اصلاح و جلوگیری از انحراف دستگاه-استفاده از بتن الیافی در سگمنتها
	کالیبره نبودن جک‌ها و دوران آنها	تنظیم نبودن جک‌ها و چرخش آنها منجر به تمرکز تنش در لبه‌های سگمنت شده است.	کالیبره کردن جکها، رفع دوران به وجود آمده در جک‌ها و استفاده از بتن الیافی در سگمنت‌ها
	رواداری زیاد در نصب سگمنتها	بروز ترک و شکستگی ناشی از اعمال تنش های موضعی در لبه‌های سگمنت- عدم امکان نصب پیچ‌ها	افزایش دقت در نصب- بستن کلیه پیچ‌های بین سگمنت‌های یک رینگ- استفاده از بتن الیافی