



دانشگاه شاهرود

دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک

رساله دکتری

ارائه روش مناسب برای مدلسازی اتصالات طولی قطعات پیش ساخته بتنی تونل

اکبر سالمی

اساتید راهنما:

دکتر فرهنگ سرشکی

دکتر مرتضی اسماعیلی

استاد مشاور:

دکتر سید محمد اسماعیل جلالی

شہریور ۹۴





دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک
گروه استخراج معدن

ارائه روش مناسب برای مدلسازی اتصالات طولی

قطعات پیش ساخته بتنی تونل

دانشجو:

اکبر سالمی

اساتید راهنما:

دکتر فرهنگ سرشکی

دکتر مرتضی اسماعیلی

استاد مشاور

دکتر سید محمد اسماعیل جلالی

رساله دکتری جهت اخذ درجه دکتری

شهریور ۹۴



دانشگاه شاهرود

دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک
گروه استخراج معدن

رساله دکتری آقای اکبر سالمی

تحت عنوان: ارائه روش مناسب برای مدلسازی اتصالات طولی قطعات پیش ساخته بتنی تونل در تاریخ توسط کمیته تخصصی زیر جهت اخذ مدرک رساله دکتری ارزیابی گردید و با درجه مورد پذیرش قرار گرفت.

امضاء	اساتید مشاور	امضاء	اساتید راهنما
	دکتر سید محمد اسماعیل جلالی		دکتر فرهنگ سرشکی
			دکتر مرتضی اسماعیلی

امضاء	نماینده تحصیلات تکمیلی	امضاء	اساتید داور
			دکتر رحمان ترابی
	دکتر محمد کارآموزیان		دکتر بهروز حسنی
			دکتر مجید نیکخواه

سپاس خدای را که هر چه دارم از اوست

تقدیم به

پدر بزرگوار و مادر مهربانم

فرشتگان خداوند بر روی زمین که به من زندگی بخشیدند
و انسان بودن را آموختند،

همسرم

موهبتی الهی با قلبی آکنده از عشق و معرفت که محیطی
سرشار از آرامش برای من فراهم آورده است،

و برادرانم

همراهان همیشگی و پشتوانه‌های زندگیم.

تشکر و قدردانی

تحقیق حاضر حاصل هم‌فکری، تلاش و پشتکار نویسنده رساله و اساتید راهنما و مشاور به همراه عزیزانی است، که جا دارد در اینجا تقدیر و تشکری از آنها به عمل آید. لذا بدین‌وسیله از تمامی آقایان دکتر فرهنگ سرشکی بخاطر راهنمایی و حمایت‌های فکری، دکتر مرتضی اسماعیلی بخاطر فراهم کردن آزمایشگاه و پشتیبانی علمی و فنی در زمینه فعالیت‌های آزمایشگاهی و مدلسازی، دکتر سید محمد اسماعیل جلالی بخاطر نکته نظرات علمی، مهندس جواد گلین مقدم بخاطر تلاش‌های بی‌دریغ ایشان در کمک به مدلسازی عددی، مهندس علی تبریزی‌وش بخاطر راهنمایی‌های ارزشمند در زمینه آزمایشات آزمایشگاهی، مهندس شاه‌چراغی، مهندس برمر، مهندس بسطامی، مهندس سعادت، مهندس محمدی، سرلک و همه عوامل فنی و اجرایی پروژه تونل ابوذر و کارخانه تولید سگمنت آن بخاطر در اختیار گذاشتن امکانات پروژه و کارخانه سگمنت برای تولید قالب‌های فلزی و نمونه‌های بتنی و همه عزیزانی که به نحوی در انجام این تحقیق نقشی داشتند، تقدیر و تشکر می‌نمایم.

دانشجو تأیید می نماید که مطالب مندرج در این رساله نتیجه تحقیقات خودش می باشد و در صورت استفاده از نتایج دیگران مرجع آن را ذکر نموده است.

کلیه حقوق مادی مترتب از نتایج مطالعات، آزمایشات و نوآوری ناشی از تحقیق موضوع این رساله متعلق به دانشگاه شاهرود می باشد.

شهریور ۹۴

چکیده

توسعه روزافزون تونل‌سازی سپری نیاز به طراحی دقیق پوشش متشکل از قطعات پیش ساخته بتنی (پوشش سگمنتال تونل) را افزایش داده است. از طرفی به لحاظ قطعه‌ای بودن این نوع پوشش، لحاظ نمودن اتصالات بین قطعات مذکور (سگمنت‌ها) ضروری است. در این راستا، مدل‌های متعددی بر مبنای آنالیزهای تحلیلی و عددی و آزمایشات آزمایشگاهی و میدانی برای ارزیابی تاثیر اتصالات طولی و حلقوی پوشش ارائه شده است. اغلب روش‌های مذکور با ساده‌سازی‌هایی همراه بوده و حتی در برخی مدل‌های رفتاری توسعه یافته نیز سختی محل اتصالات، مستقل از تنش ایجاد شده در آن سطح ارائه شده است. مقدار این سختی تابعی از هندسه تماس، مشخصات مکانیکی اجزاء و شرایط بارگذاری می‌باشد. لذا با توجه به وابستگی سختی محل اتصال به مقادیر تنش‌های نرمال بر سطح تماس، در تحقیق حاضر به منظور بررسی عملکرد برشی و نرمال سطوح اتصال طولی سگمنت‌ها، حدود ۱۰۰ آزمایش برش درزه در محدوده تنش نرمال ۰/۲۵ تا ۲ مگاپاسکال، بر روی سطح اتصال صاف و شیاردار قطعات بتنی در سه حالت سطح اتصال ساده بتن با بتن، با نوار آب‌بند و بولت‌دار انجام شده است. روند تغییرات مدول‌های عکس‌العمل برشی (k_s) و نرمال (k_n) بر حسب تنش نرمال در محل اتصال (σ_n) در حالت تماس ساده بتن و اتصال نوار آب‌بنددار، تک خطی و در حالت اتصال بولت‌دار، چند خطی بوده که بطور متوسط با دقت بالای ۹۸٪ بدست آمده‌اند. در این تحقیق، تاثیر وجود نوار آب‌بند بر روی ضرایب سختی نرمال و برشی توسط آزمایشات مذکور مورد ارزیابی قرار گرفته است. برای مقایسه و ارزیابی میزان کارایی روابط ارائه شده و محدوده عملکرد مدول‌های عکس‌العمل بدست آمده در محل اتصال سگمنت‌ها در شرایط مختلف، مدل‌های ساده تیر و فنر متعددی از یک پوشش سگمنتال تونل شهری، مورد تحلیل قرار گرفته است. در تحقیق حاضر مقدار ضریب سختی فنر پیچشی با بررسی و ارزیابی متون فنی سابق استخراج

گردیده و تاثیر آن بر نتایج تحلیل مورد ارزیابی قرار گرفته است. همچنین به منظور بررسی شرایط لازم برای تحقق رفتار لغزشی و عملکرد بولت در محل اتصال طولی سگمنت‌های بولت‌دار، تاثیر هر کدام از پارامترهای محیطی دخیل در مدل‌سازی و حساسیت رفتار غیرخطی سطح تماس بولت‌دار، نسبت به تغییرات هر پارامتر مورد تحلیل و ارزیابی قرار گرفته است. از طرفی برای ارزیابی رفتار تماسی اتصالات طولی بین سگمنت‌ها در حالت سه بعدی، بر اساس نتایج آزمایشات درزه مذکور، ضریب اصطکاک مناسبی برای المان تماس اصطکاکی ارائه شده و با مقادیر موجود در ادبیات فنی گذشته و همچنین زاویه اصطکاک لغزش آزاد نمونه‌های بتنی بدست آمده از آزمایش شیب‌سنجی قطعات بتنی، نیز ارزیابی شده است. لذا مدل المان محدود سه بعدی از نمونه بتنی آزمایشگاهی با سطح تماس سخت و اصطکاکی از محل اتصال دو قطعه بتنی ساخته شده و با برخی نتایج آزمایشگاهی کالیبره گردید. در نهایت مدل المان محدود سه بعدی کالیبره شده‌ای از یک حلقه کامل پوشش سگمنتال تونل واقعی ساخته شده و در شرایط یکسانی با مدل دو بعدی ساده تیر و فنرهای تماسی پیشنهاد شده در این تحقیق، مقایسه شده است. نتایج کلی این تحقیق نشان دهنده آن است که مدل تیر و فنرهای تماسی پیشنهاد شده در این تحقیق به سادگی و با دقت مناسب می‌تواند برای ارزیابی رفتار پوشش سگمنتال تونل مورد استفاده قرار گیرد.

کلمات کلیدی: تونل‌سازی مکانیزه، پوشش سگمنتال، سگمنت، اتصالات طولی، آزمایش برش درزه، المان تماس، ضرایب سختی برشی، نرمال و پیچشی

مقالات مستخرج از این رساله

الف - مقالات چاپ شده در مجلات علمی _ پژوهشی (صفحه اول مقاله پیوست است)

ردیف	عنوان مقاله	محل انتشار	تاریخ انتشار	عنوان مجله
۱	Numerical Modeling of the Segmental Lining of Underground Structures	Tehran University	Vol.48, No.2, December 2014	International Journal of Mining & Geo-Engineering
۲	Normal and shear resistance of longitudinal contact surfaces of segmental tunnel linings	Elsevier-Science Direct	Vol. 77, April 2015	International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences

ب- مقالات ارائه شده در کنفرانس های علمی (صفحه اول مقاله پیوست است).

ردیف	عنوان مقاله	محل انتشار	تاریخ انتشار	عنوان کنفرانس
۱	بررسی آزمایشگاهی تاثیر گسکت بر مقاومت نرمال و برشی سطوح تماس قطعات پیش ساخته بتنی پوشش تونل	سازمان نظام مهندسی معدن استان مازندران	۱۱ و ۱۲ شهریور ۱۳۹۳	کنفرانس علوم معدنی مازندران
۲	بررسی سختی برشی و نرمال محل اتصال سگمنت به روش آزمایشگاهی	دانشگاه تربیت مدرس - تهران	اردیبهشت ۱۳۹۳	پنجمین کنفرانس مکانیک سنگ ایران

فهرست مطالب

شماره صفحه	عنوان
۱	فصل اول: مقدمه و کلیات
۲	۱-۱ مقدمه
۲	۲-۱ کلیات و تعاریف
۴	۱-۲-۱ پوشش سگمنتال
۷	۲-۲-۱ درزه‌های طولی پوشش سگمنتال
۱۱	۳-۲-۱ نوار آب‌بند
۱۳	۴-۲-۱ بولت
۱۵	۳-۱ موضوع تحقیق
۱۶	۴-۱ فرضیات تحقیق
۱۷	۵-۱ روش تحقیق
۱۸	۶-۱ اهداف تحقیق
۲۰	فصل دوم: مرور سوابق علمی موجود
۲۱	۱-۲ مقدمه
۲۲	۲-۲ روش‌های تحلیلی طراحی پوشش سگمنتال
۲۵	۱-۲-۲ روش حلقه چند مفصلی
۲۵	۲-۲-۲ روش حلقه با سختی یکنواخت
۲۷	۳-۲-۲ روش ممان اینرسی موثر
۳۲	۴-۲-۲ مدل تیر- فنر پیچشی
۳۸	۵-۲-۲ معایب روش‌های تحلیلی طراحی پوشش سگمنتال
۴۰	۳-۲ روش‌های میدانی
۴۶	۴-۲ روش‌های آزمایشگاهی
۵۳	۵-۲ روش‌های عددی طراحی پوشش سگمنتال
۶۶	۶-۲ جمع بندی
۶۸	فصل سوم: مطالعات آزمایشگاهی تحقیق حاضر
۶۹	۱-۳ مقدمه
۷۰	۲-۳ مورد مطالعاتی
۷۴	۱-۲-۳ مشخصات بتن

۷۵	مشخصات نوار آب‌بند	۲-۲-۳
۷۶	مشخصات بولت	۳-۲-۳
۷۸	ساخت نمونه‌ها	۳-۳
۸۰	آزمایش برش درزه	۴-۳
۸۲	تحلیل نتایج آزمایشات	۵-۳
۸۳	نتایج آزمایشات نمونه‌های بتن خالص	۱-۵-۳
۸۶	نتایج آزمایشات بر روی نمونه‌های دارای نوار آب‌بند	۲-۵-۳
۸۹	مقایسه نتایج آزمایشات بر روی نمونه‌های بتن خالص و نوار آب‌بنددار	۳-۵-۳
۹۰	نتایج آزمایشات بر روی نمونه‌های بولت‌دار	۴-۵-۳
۹۳	مقایسه نتایج آزمایشات بر روی نمونه‌های بتن خالص و بولت‌دار	۵-۵-۳
۹۵	جمع بندی	۶-۳

فصل چهارم: توسعه مدل عددی برای ارزیابی مدل تماس پیشنهادی

۹۷		
۹۸	مقدمه	۱-۴
۹۸	مدل تیر و فنر با المان تماس پیشنهادی	۲-۴
۹۹	مدل تیر و فنر در حالت تماس ساده بتن به بتن	۱-۲-۴
۱۰۵	مقایسه نتایج راه‌حل‌های تحلیل با مدل پیشنهادی	۱-۱-۲-۴
۱۰۹	مدل تیر و فنر در حالت سطوح اتصال بولت‌دار	۲-۲-۴
۱۱۱	مقایسه نتایج تحلیل پوشش سگمنتال با و بدون بولت	۱-۲-۲-۴
۱۱۳	آنالیز حساسیت پارامترهای موثر بر رفتار غیرخطی تماس بولت‌دار سگمنت‌ها	۲-۲-۲-۴
۱۱۶	آنالیز حساسیت رفتار المان تماس بولت‌دار در شرایط لرزه ای	۳-۲-۲-۴
۱۲۳	مدل سه بعدی اولیه و المان تماس اصطکاکی	۳-۴
۱۲۸	مدل سه بعدی یک حلقه از پوشش یکپارچه و سگمنتال	۴-۴
۱۳۵	جمع بندی	۵-۴

فصل پنجم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۱۳۷		
۱۳۸	مقدمه	۱-۵
۱۳۸	صورت مساله و روش انجام تحقیق	۲-۵
۱۳۹	نتایج مطالعات آزمایشگاهی	۳-۵
۱۴۲	نتایج مدل‌های عددی	۴-۵
۱۴۵	پیشنهادات	۵-۵

۱۴۸	منابع و مراجع	
-----	---------------	--

فهرست اشکال

شماره صفحه	عنوان
۳	پلان کاری طراحی سگمنت ۱-۱
۵	جزئیات سگمنت و پوشش سگمنتال ۲-۱
۶	فضای خالی اطراف پوشش سگمنتال پر شده با مصالح مناسب ۳-۱
۹	انواع درزه‌های اتصال سگمنت‌های پوشش تونل ۴-۱
۱۰	محدوده کاربرد درزه‌های با سطوح صاف و محدب در محل اتصال ... ۵-۱
۱۲	نوار آب‌بند متصل شده بر روی سگمنت کلید ۶-۱
۱۳	نمودار نیرو- تغییر شکل- بازشدگی نوار آب‌بند پروفیل 86-259 ... ۷-۱
۱۴	انواع اتصالات درز بین سگمنت‌های بتنی ۸-۱
۲۳	مدل‌های سازه‌ای مرسوم در روش‌های تحلیلی حلقه سگمنتال ۱-۲
۲۷	نسبت موثر سختی خمشی ۲-۲
۲۸	مدلی از یک حلقه پوشش سگمنتال با قطعات یکسان و منظم ۳-۲
۳۲	ایده اصلی مدل‌سازی پوشش سگمنتال با قطعات غیر یکنواخت ۴-۲
۳۳	مفهوم بازشدگی منقار پرنده‌ای درز طولی سگمنت و جایگزینی فنر ... ۵-۲
۳۴	توزیع تنش و پارامترهای موثر بر مقاومت در برابر دوران در درزه‌های با ... ۶-۲
۳۶	نتایج آزمایشات سختی درزه بدست آمده از تونل متروی شانگهای ۷-۲
۳۶	تغییرات خطی سختی پیچشی با نیروی محوری در سطح اتصال طولی ... ۸-۲
۳۷	تغییرات غیر خطی ضریب سختی پیچشی درزه‌های طولی ۹-۲
۳۸	تغییر ضریب سختی پیچشی با نیروی محوری سطح اتصال طولی ... ۱۰-۲
۴۲	آزمایش مقیاس کامل بر روی تک حلقه سگمنتال متروی شانگهای ۱۱-۲
۴۳	جزئیات آزمایش مقیاس کامل پوشش چهارمین تونل Elbe ۱۲-۲
۴۴	دستگاه آزمایش پوشش سگمنتال مقیاس کامل در دانشگاه Delft در ... ۱۳-۲
۴۵	جزئیات آزمایش مقیاس کامل بر روی پوشش تونل Changjiang شانگهای ۱۴-۲
۴۶	آزمایش بیش بارگذاری برجا بر روی پوشش سگمنتال ۱۵-۲
۴۸	مدل آزمایشگاهی پوشش سگمنتال تحت شرایط بارگذاری مختلف ... ۱۶-۲
۴۹	آزمایش برش بر روی درزه‌های با اتصال کام و زبانه ۱۷-۲
۴۹	نتیجه آزمایش برش بر روی درزه‌های با اتصال کام و زبانه در تنش ... ۱۸-۲
۵۰	پیکربندی آزمایش فشاری تک محوری بر روی نیم حلقه پوشش سگمنتال ۱۹-۲
۵۰	آزمایش برش درزه بر روی بلوک‌های بتنی حاوی بالشتک‌های لاستیکی ... ۲۰-۲

۵۱	تغییرات جابجایی برشی - تنش برشی بدست آمده از آزمایش برش درزه	۲۱-۲
۵۵	دیگرام مدل پوشش سگمنتال تونل	۲۲-۲
۵۸	فنها در مدل‌های سنتی اندرکنش سازه پوشش سگمنتال و زمین	۲۳-۲
۶۰	مدل دو بعدی تیر و فنر (راست) و سه بعدی المان محدود (چپ) از ...	۲۴-۲
۶۱	سطوح تماس و جزئیات مدل پوشش سگمنتال قبل و بعد از حرکت سپر	۲۵-۲
۶۲	مدل پوسته- فنر	۲۶-۲
۶۴	چیدمان درزه‌ها در مدل (راست) دوبعدی تنش صفحه‌ای و (چپ) سه ...	۲۷-۲
۶۴	فندهای نرمال، برشی و پیچشی مورد استفاده بجای درزه‌های طولی و ...	۲۸-۲
۶۵	مدل تماس ارائه شده توسط Do و همکارانش برای درزه‌های طولی و ...	۲۹-۲
۷۱	پروفیل زمین‌شناسی مهندسی مسیر تونل کمکی کانال ابودر	۱-۳
۷۲	هندسه و چیدمان سگمنت‌ها در یک حلقه	۲-۳
۷۳	جزئیات محل اتصال طولی سگمنت	۳-۳
۷۶	نمونه بتنی با و بدون نوار آب‌بند جهت انجام آزمایش برش درزه	۴-۳
۷۷	جزئیات بولت در محل اتصال طولی سگمنت‌ها و نمونه بتنی	۵-۳
۷۸	نمونه بتنی با و بدون بولت جهت انجام آزمایش برش مستقیم	۶-۳
۷۹	نحوه نمونه‌گیری از داخل قالب سگمنت (الف)، ابعاد قالب نمونه‌ها ...	۷-۳
۸۱	اجزاء دستگاه برش درزه مورد استفاده	۸-۳
۸۳	نمودار تنش نرمال - جابجایی نرمال تا حد بار نرمال برابر با ۱ MPa ...	۹-۳
۸۴	نمودار تنش برشی - جابجایی برشی برای بار نرمال برابر با ۱ MPa ...	۱۰-۳
۸۵	نمودار تغییرات مدول‌های عکس‌العمل برشی و نرمال با تنش نرمال ...	۱۱-۳
۸۶	نمودار تنش نرمال - جابجایی نرمال تا حد بار نرمال برابر با ۱ MPa (با ...)	۱۲-۳
۸۷	نمودار تنش برشی - جابجایی برشی برای بار نرمال برابر با ۱ MPa (با ...)	۱۳-۳
۸۸	نمودار تغییرات مدول‌های عکس‌العمل برشی و نرمال با تنش نرمال ...	۱۴-۳
۹۰	تغییرات میزان اختلاف بین نتایج مدول‌های عکس‌العمل برشی و نرمال ...	۱۵-۳
۹۱	نمودار تنش نرمال - جابجایی نرمال تا حد بار نرمال برابر با ۱ MPa ...	۱۶-۳
۹۱	نمودار تغییرات لگاریتمی تنش برشی با جابجایی برشی برای بار نرمال ...	۱۷-۳
۹۲	نمودار تغییرات مدول‌های عکس‌العمل برشی و نرمال با تنش نرمال ..	۱۸-۳
۹۴	تغییرات میزان اختلاف بین نتایج مدول عکس‌العمل برشی و نرمال در ...	۱۹-۳
۱۰۰	مدل تیر بر روی بستر الاستیک و جزئیات مدل‌سازی اتصالات سگمنت ...	۱-۴
۱۰۲	تغییرات نیروهای محوری و برشی، لنگر خمشی و جابجایی‌های قائم و ...	۲-۴

۱۰۳	تغییرات نیروهای محوری و برشی، لنگر خمشی و جابجایی‌های قائم و ...	۳-۴
۱۰۵	تغییرات نیروهای محوری و برشی، لنگر خمشی و جابجایی‌های قائم و ...	۴-۴
۱۰۶	تغییرات نیروهای محوری و برشی، لنگر خمشی و جابجایی‌های قائم و ...	۵-۴
۱۱۱	تغییرات تغییرات چند خطی نیرو- تغییر شکل برشی محل اتصال ...	۶-۴
۱۱۲	نیروهای داخلی و جابجایی‌های اعضای سازه‌ای پوشش سگمنتال تونل ...	۷-۴
۱۱۴	تاثیر تغییرات نسبت تنش بر جای افقی به قائم بر روی نیروی برشی ...	۸-۴
۱۱۵	تاثیر تغییر ارتفاع روباره بر روی نیروی برشی سطح تماس بولت‌دار	۹-۴
۱۱۶	تغییرات مدول صلبیت زمین اطراف پوشش سگمنتال تونل بر روی ...	۱۰-۴
۱۱۸	تغییر شکل بیضوی مدل پوشش سگمنتال تونل	۱۱-۴
۱۱۹	تاثیر تغییرات نسبت تنش بر جای افقی به قائم بر روی نیروی برشی ...	۱۲-۴
۱۲۰	تاثیر تغییر ارتفاع روباره بر روی نیروی برشی سطح تماس بولت‌دار تحت ...	۱۳-۴
۱۲۲	تغییرات مدول صلبیت زمین اطراف پوشش سگمنتال تونل بر روی ...	۱۴-۴
۱۲۴	شرایط تکیه‌گاهی و بارگذاری مدل آزمایشگاهی برش درزه	۱۵-۴
۱۲۵	نمودار تغییرات تنش برشی آستانه لغزش سطح ساده بتن در مقابل ...	۱۶-۴
۱۲۶	آزمایش میز شیب‌دار بر روی قطعات بتنی قبل از لغزش (راست) و در ...	۱۷-۴
۱۲۶	مدل سه بعدی المان محدود با سطح تماس اصطکاکی از قطعات بتنی ...	۱۸-۴
۱۲۷	مقایسه تغییرات جابجایی نرمال در مقابل تنش نرمال قطعات بتنی ...	۱۹-۴
۱۲۷	مقایسه تغییرات جابجایی برشی در مقابل تنش برشی قطعات بتنی ...	۲۰-۴
۱۲۸	مدل سه بعدی پوشش یکپارچه، مش‌بندی و شرایط مرزی آن	۲۱-۴
۱۲۹	المان C3D20	۲۲-۴
۱۲۹	تغییر شکل پوشش یکپارچه تونل	۲۳-۴
۱۳۰	مقادیر نیروی محوری و برشی ایجاد شده در یکی از المان‌های پوشش ...	۲۴-۴
۱۳۰	مقدار لنگر خمشی ایجاد شده در یکی از المان‌های پوشش یکپارچه	۲۵-۴
۱۳۱	مقایسه نیروهای داخلی و جابجایی‌های اعضای سازه‌ای پوشش یکپارچه ...	۲۶-۴
۱۳۲	مدل سه بعدی یک حلقه سگمنتال و جزئیات سطح اتصال طولی سگمنت‌ها	۲۷-۴
۱۳۳	شرایط مرزی مدل و اندرکنش پوشش و زمین بصورت فنرهای مماسی و ...	۲۸-۴
۱۳۳	کرنش ایجاد شده در پوشش سگمنتال پس از بارگذاری	۲۹-۴
۱۳۴	تغییر شکل ایجاد شده در پوشش سگمنتال تحت بارگذاری	۳۰-۴
۱۳۵	مقایسه نیروهای داخلی و جابجایی‌های اعضای سازه‌ای پوشش ...	۳۱-۴

فهرست جداول

شماره صفحه	عنوان
۲۴	مزایا و معایب روش‌های تحلیلی طراحی پوشش سگمنتال
۴۱	مزایا و معایب روش‌های میدانی
۵۲	مزایا و معایب روش‌های آزمایشگاهی
۵۷	خلاصه برخی تحقیقات در زمینه روش عددی طراحی پوشش سگمنتال
۷۳	مشخصات فنی زمین و پوشش تونل ابوذر
۷۵	مشخصات بتن مصرفی در تولید سگمنت و نمونه‌های بتنی
۱۰۷	درصد اختلاف مقادیر نیروهای محوری و برشی و لنگر خمشی ایجاد ...
۱۰۸	درصد اختلاف مقادیر جابجایی‌های افقی و قائم ایجاد شده در اعضای ...
۱۱۷	پارامترهای محاسباتی تغییر شکل بیضوی پوشش تونل‌های دایروی
۱۲۳	خلاصه نتایج تحلیل حساسیت بر روی پارامترهای موثر بر عملکرد بولت ...

فصل اول:

مقدمه و کلیات

۱-۱- مقدمه

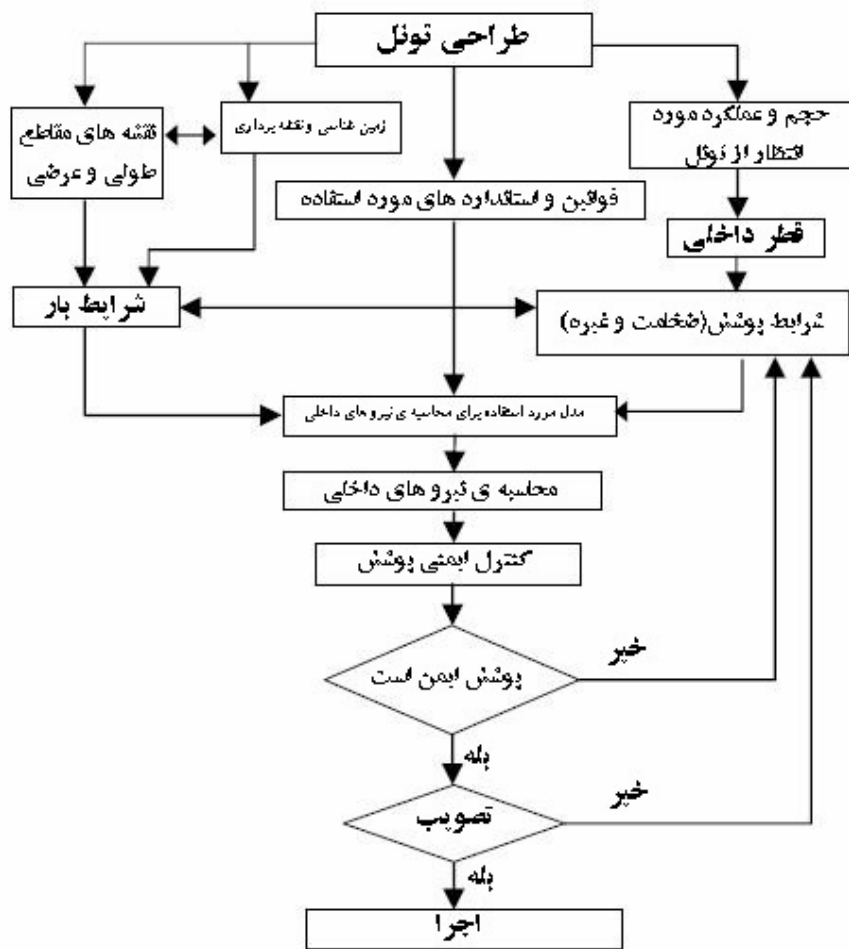
غالباً تونل‌سازی به عنوان یکی از مهم‌ترین و هزینه‌برترین پروژه‌های مهندسی معدن و عمران شناخته می‌شود. این عوامل باعث می‌شوند تا تحقیقاتی پیرامون یافتن راه‌کارهای توسعه طراحی، ساخت و پایدارسازی تونل‌ها و همچنین کاهش هزینه‌های ساخت پروژه‌های تونل‌سازی، انجام گیرد.

در طی سال‌های گذشته، استفاده از پوشش سگمنتال در تونل حفر شده توسط دستگاه حفار مکانیزه تونل^۱ رشد قابل ملاحظه‌ای داشته است. بدلیل انعطاف و هزینه مناسب و تاثیر حداقل آن بر روی ترافیک و سازه‌های سطحی روش تونل‌سازی سپری بطور گسترده برای احداث تونل‌های شهری در زمین‌های سست مورد استفاده قرار می‌گیرد. با توسعه ماشین‌های حفاری مکانیزه سپری و پیشرفت تکنولوژی ساخت و ساز، قطر این نوع تونل‌ها می‌تواند از حدود ۴ تا بیش از ۱۷ متر تغییر نماید. سازگاری تونل‌سازی سپری با شرایط مشکل و پیچیده زمین‌شناسی در حال ارتقاء و افزایش می‌باشد. با تمام این پیشرفت‌ها و مزایا، عدم قطعیت در رفتار سازه‌ای پوشش سگمنتال تونل همچنان باقی مانده است.

۱-۲- کلیات و تعاریف

پوشش تونل بایستی یک سازه دائمی، ایمن و بادوام در طی دوره بهره برداری باشد که داخل تونل را در مقابل زمین اطراف، نفوذ آب، تغییر شکل‌ها و سایر شرایط محیطی محافظت کند. ابعاد پوشش وابسته به عملکرد سازه‌ای است که غالباً تحت اثر زمین یا فشار آب قرار دارد. در اثر اندرکنش پوشش - زمین بخشی از نیروهای خارجی تونل ناشی از شرایط محیطی زمین به روی پوشش منتقل شده و به سبب شکل دایره‌ای پوشش، نیروهای داخلی آن غالباً به شکل نیروی محوری و لنگر خمشی عمل می‌کنند. بر اساس دستورالعمل AFTES، طراحی پوشش تونل مطابق الگوریتم شکل ۱-۱ انجام می‌شود.

¹ Tunnel Boring Machine (TBM)



شکل (۱-۱) پلان کاری طراحی سگمنت (AFTES, 2005)

همان گونه که در فلوجارت فوق نشان داده شده است، برای طراحی صحیح پوشش تونل، علاوه بر صحت و دقت پارامترهای ورودی طراحی، انتخاب مدل مناسب برای محاسبه نیروهای داخلی نیز از اهمیت زیادی برخوردار است. عدم بکارگیری پارامترهای صحیح یا مدل غیر واقعی منجر به طراحی محافظه کارانه یا غیرمطمئن خواهد شد. مدل رفتاری مناسب برای پوشش های ناپیوسته از اهمیت بیشتری برخوردارند. اندرکنش بین قطعات این نوع پوشش ها تاثیر بسزایی در نیروهای داخلی و به تبع آن طراح نهایی پوشش خواهد داشت.

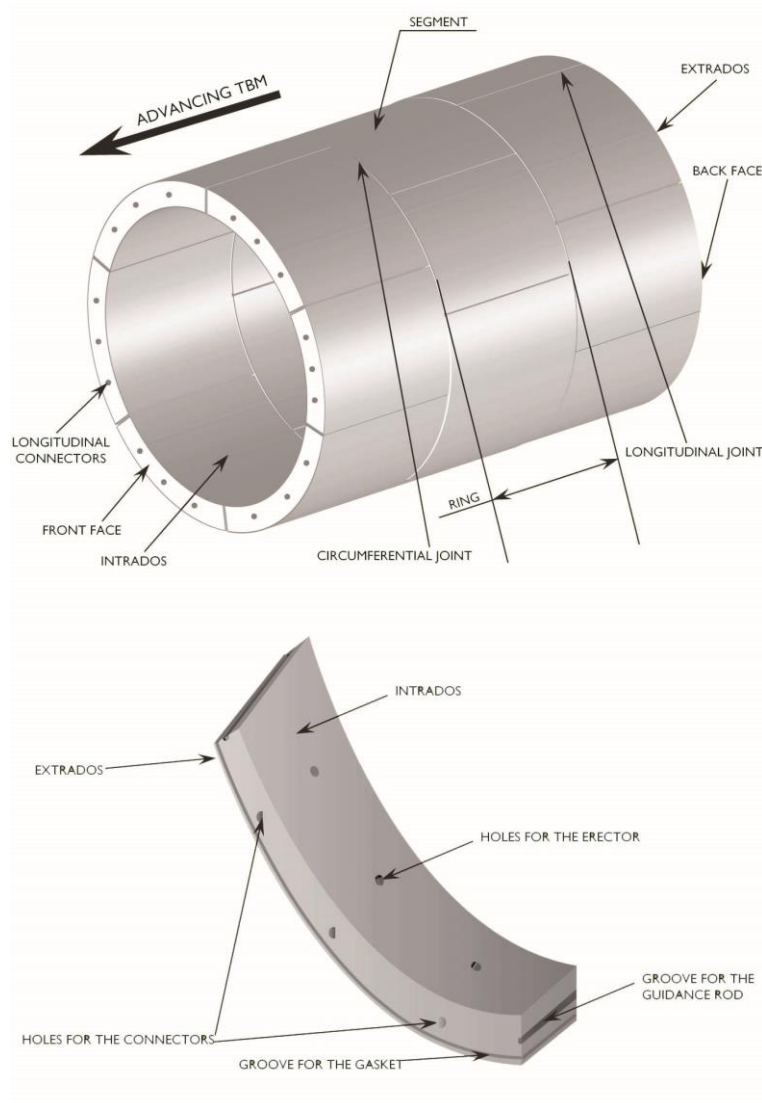
البته پوشش تونل‌های مکانیزه ممکن است بصورت تک لایه یا چند لایه (معمولاً دولایه پوشش شاتکریت با بتن درجاریز) اجرا شود. در این تحقیق منظور از پوشش تونل نوع تک لایه، ناپیوسته و قطعه‌ای (سگمنتال) می‌باشد. پوشش سگمنتال برای برآورد اهدافی مانند: نگهداری تک لایه فوری زمین بخصوص در زمین‌های ناپایدار، کنترل دقیق حرکت زمین که در اثر حفاری تونل به زمین تحمیل می‌شود، ساختن یک تونل ضد آب و عدم نیاز به زهکشی زمین و فراهم کردن یک تکیه‌گاه مناسب برای پیشرانی TBM، طراحی می‌شود. بنابراین پوشش نگهداری تونل باید در برابر انواع متنوعی از بارها مانند فشار زمین، فشار آب، نیروی وزن سگمنت‌های در حال نصب، نیروی پیشران دستگاه، فشار تزریق اطراف پوشش و سایر بارهای حین اجرا، مقاومت کند.

۱-۲-۱- پوشش سگمنتال

سگمنت‌ها قطعات پیش ساخته‌ای هستند که درون یک حلقه و به عنوان پوشش تونل نصب می‌شوند. جنس این قطعات غالباً بتنی می‌باشد. فرآیند سرهم بندی سگمنت‌ها و تولید یک حلقه با نصب نخستین سگمنت آغاز شده و با نصب سگمنت کلید پایان می‌یابد. اصلی‌ترین مزیت و ویژگی پوشش سگمنتال قطعه‌ای بودن آن و وجود درزه‌های بینشان برای چیدن آنها در کنار هم است. درزه‌های بین این قطعات را می‌توان به دو نوع درزه‌های طولی (شعاعی)^۲ که بین سگمنت‌های درون یک حلقه قرار دارند و درزه‌های حلقه‌ای (محیطی)^۳ که بین حلقه‌های متوالی پوشش قرار دارند، تقسیم نمود. شکل ۱-۲ جزئیات پوشش سگمنتال را نشان می‌دهد.

^۲ Longitudinal joint

^۳ Circumferential joint



شکل (۱-۲) جزئیات سگمنت و پوشش سگمنتال

از لحاظ شکل، بغیر از سگمنت کلید که دوزنقه‌ای است بقیه سگمنت‌ها می‌توانند دارای شکل مستطیلی^۴، دوزنقه‌ای^۵ و لوزی^۶ باشند. البته پوشش سگمنتال می‌تواند مرکب از سگمنت‌های شش ضلعی^۷ یا لانه زنبوری نیز باشد.

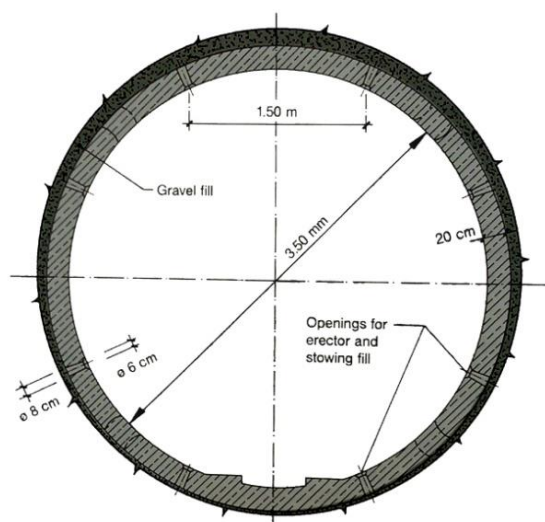
⁴ Rectangular

⁵ Trapezoidal

⁶ Rhomboidal

⁷ Honeycomb

سگمنت‌ها بواسطه دستگاه نصاب درون سپر به هم متصل می‌شوند. لذا پس از عبور سپر، پشت سگمنت‌ها فضای خالی بین دیوار و پوشش سگمنتال باقی می‌ماند. این حلقه خالی توسط مصالح مناسبی پر می‌شود تا تغییر شکل دیواره‌های تونل محدود شده و فشار زمین اطراف بصورت یکنواخت بر روی پوشش منتقل گردد. شکل ۳-۱ فضای خالی اطراف پوشش سگمنتال که مصالح مذکور پر شده را بصورت شماتیک نشان می‌دهد.



شکل (۳-۱) فضای خالی اطراف پوشش سگمنتال پر شده با مصالح مناسب

ضخامت سگمنت‌ها بر اساس معیارهای سازه‌ای و الزامات اجرایی تعیین می‌شود. اغلب حداقل ضخامت بر اساس سطح مقطع باربر مورد نیاز برای انتقال بار جک‌های پیشران TBM تعیین می‌شود. ضخامت معمول سگمنت‌ها در حدود ۲۰ تا ۵۰ سانتی متر است. البته تونل‌های با سطح مقطع بزرگتر نیازمند ضخامت بیشتری می‌باشند. به عنوان مثال سگمنت‌هایی با ضخامت ۶۱۰ و عرض ۲۱۳۳ میلیمتر برای احداث تونل Alaskan با قطر حفاری ۱۷/۵ در سیاتل آمریکا، ساخته شده است.

عرض سگمنت‌ها غالباً بین ۱ تا ۲ متر متغیر است. این در حالیست که به دلیل افزایش نرخ پیشروی، با توسعه تکنولوژی حمل و نصب سگمنت‌ها، میل به سمت استفاده از سگمنت‌های عریض‌تر بیشتر می‌شود. از طرفی استفاده از سگمنت‌های عریض باعث ایجاد نیروهای دیگری ناشی از خطای تولید و نصب بخصوص در محل درزه‌ها شده که در نهایت ممکن است باعث ایجاد ترک و لب پدیدگی در سگمنت‌ها شود. همچنین عرض سگمنت‌ها بواسطه شعاع پیچش تونل نیز محدود می‌گردد.

جزئیات درزه‌ها با توجه به بهبود پارامترهای باربرداری، ریسک لب پدیدگی و آب‌بندی پوشش انتخاب می‌گردد. مواردی که به هنگام طراحی سطوح تماس در نظر گرفته می‌شود عبارتند از:

- این سطوح باید مانع لغزش سگمنت‌ها شوند و حرکت سگمنت‌ها را در کلیه جهات محدود کنند.
- این سطوح باید تنش‌ها را به شکل مناسبی به نواحی مجاور که تحمل بار بیشتری دارند، منتقل کنند
- این سطوح باید به گونه‌ای طراحی شوند که آب‌بندی آنها با ساده‌ترین روش ممکن و بالاترین ضریب اطمینان انجام شود.
- این سطوح کنترل کننده محدوده تغییرات ابعادی (رواداری)^۸ شامل طول، عرض، صاف و صفحه‌ای بودن سطوح، فاصله زاویه‌ای، عمق تورفتگی و برآمدگی‌های مختلف سگمنت بوده، تصحیح و کنترل هندسی این حدود ابعادی نیز باید در این سطوح انجام شود.

۱-۲-۲- درزه‌های طولی پوشش سگمنتال

به‌طور کلی این درزه‌ها موازی با محور تونل هستند و ما بین قطعات یک حلقه قرار گرفته‌اند. بر اساس پارامترهایی مانند تحمل بارهای خارجی (بار سنگ)، فشار تزریق، فشار آب و طرح سیستم آب‌بندی انتخاب

⁸ Tolerance

می‌شوند. درزه‌های طولی نیروهای محوری رینگ و لنگر خمشی ناشی از نیروهای محوری خارج از مرکز و نیروی برشی ناشی از نیروهای خارجی و در برخی مواقع حتی ناشی از نیروهای داخلی، را منتقل می‌نماید. این پدیده غالباً از طریق تماس بین سطوح اتصال انجام گرفته و در برخی موارد نیز از طریق بولت‌های اتصال دهنده درزه‌های طولی سگمنت شکل می‌گیرد. از نظر سازه‌ای، درزه‌های طولی در سیستم سگمنت‌های بتنی پیش ساخته معمول، بصورت مفصل یا نیمه مفصل (مفصل‌های بتنی) با یک ظرفیت محدود برای انتقال لنگر خمشی محسوب می‌شوند (Maidl et al., 2012). این مفهوم به این معنی نیست که این درزه‌ها قادر به انتقال نیروهای محوری و برشی نیستند. لذا این تعریف گنگ نمونه‌ای از دیدگاه‌های مختلف در زمینه عملکرد این درزه‌ها می‌باشد که در عمل برای طراحی پوشش سگمنتال تونل غالباً ساده‌ترین بخش آن یعنی مفصل بودن این درزه‌ها مورد توجه قرار می‌گیرد.

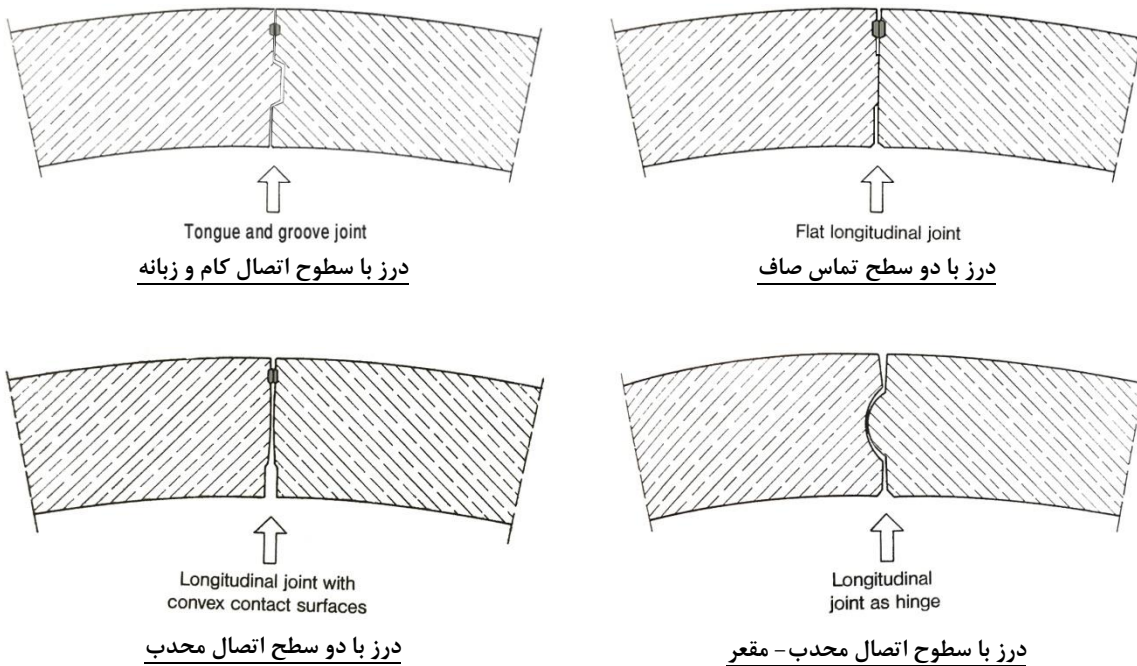
از نظر مهندسی و جزئیات ساخت، سه نوع درزه را می‌توان برای درزه‌های طولی سگمنت‌های واقع در یک حلقه پوشش لحاظ نمود:

۱- دو سطح اتصال صاف

۲- دو سطح اتصال محدب

۳- سطوح اتصال محدب و مقعر

اتصال از نوع کام و زبانه در واقع نوعی از اتصال با سطوح اتصال صاف بوده که تا حدودی بصورت مفصلی عمل می‌کند. شکل ۱-۴ انواع اتصال بین سگمنت‌ها را توصیف می‌نماید.



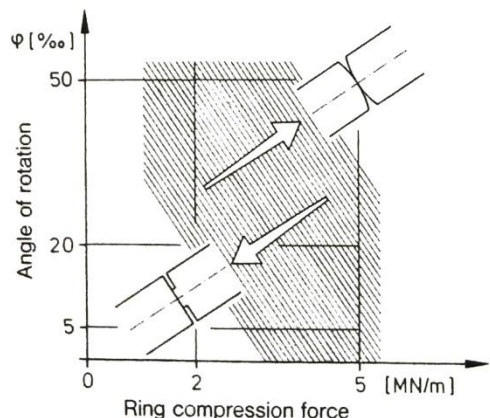
شکل (۴-۱) انواع درزه‌های اتصال سگمنت‌های پوشش تونل

سطوح اتصال صاف درزه‌های نوع اول مانع از چرخش آزادانه سگمنت‌ها شده و در نتیجه این درزه‌ها می‌توانند نه تنها نیروی محوری فشاری و نیروی برشی (ناشی از اصطکاک) بلکه لنگر خمشی را نیز منتقل نمایند که این کار لنگر خمشی ایجاد شده در سگمنت‌ها را کاهش می‌دهد.

در سطوح اتصال صاف با چرخش بیشتر سگمنت درون یک رینگ، سطوح اتصال باریکتر شده و بخش‌های تحت کشش واقع شده آن ورقه ورقه می‌شود. در این حالت اگر نیروی محوری فشاری بیشتر شود، گوشه‌های بیرونی سگمنت بتنی در اثر جدایش ورقه‌ای آسیب می‌بیند که این آسیب ممکن است تا محل نصب نوار آب‌بند^۹ در پوشش‌های تک لایه آب‌بند گسترش یابد. چنانچه نیروهای محوری و زاویه چرخش با هم افزایش یابند، استفاده از سگمنت‌های با سطوح اتصال محدب برای پوشش تونل پیشنهاد می‌شود که

^۹ Gasket

در آن عرض سطح اتصال به زاویه چرخش بستگی ندارد. نمودار شکل ۱-۵ محدوده کاربرد هر یک از سطوح تخت و محدب را برای محل اتصال سگمنت‌ها نشان می‌دهد.



شکل (۱-۵) محدوده کاربرد درزه‌های با سطوح صاف و محدب در محل اتصال سگمنت‌ها (Maidl et al., 2012)

سگمنت‌هایی با درزه‌های طولی با سطوح اتصال محدب-مقعر به دلیل قابلیت بسیار زیاد آنها برای چرخش، به سگمنت‌های مفصلی معروف هستند. بدلیل عدم توانایی در آب‌بندی این نوع سگمنت‌ها، این سطوح اتصال بیشتر در مورد تونل‌های با دو پوشش (با یک لایه آب‌بند) بکار می‌رود.

درزه‌های طولی بصورت کام و زبانه^{۱۰} با هدایت مناسب، نصب سگمنت‌ها را آسان می‌نماید. از ویژگی‌های این اتصال می‌توان به سطح صاف محل اتصال برای انتقال راحت نیروهای محوری و برشی و لنگر خمشی اشاره کرد. اما به دلیل عدم تسلیح مناسب گوشه‌های سطح اتصال بخش فرورفتگی، امکان آسیب بتن در این بخش در اثر لغزش یا برش وجود دارد (Mayer et al., 2007). این نوع اتصال معمولاً تنها برای سگمنت کلید استفاده می‌شود تا مانع از لغزش آن شود.

¹⁰ Tongue and groove

در برخی موارد برای انتقال و توزیع تنش فشاری زیاد وارد بر سطح اتصال سگمنت‌ها، در بین درزه‌های مذکور (بخصوص درزه‌های حلقوی)، بالشتک‌هایی^{۱۱} از جنس مختلفی مانند: بیتومینه، پلی اتیلن، فیبر و تخته‌لایه، به عنوان پر کننده قرار داده می‌شود. استفاده از این بالشتک‌ها در سطوح برابر سگمنت‌ها، از ایجاد ترک و ورقه ورقه شدن بتن در اثر تنش فشاری بالا جلوگیری می‌کند.

۱-۲-۳- نوار آب‌بند

در بیشتر تونل‌های حمل و نقل با پوشش سگمنتال تک لایه حفر شده در سنگ سخت یا زمین سست، نفوذ و نشت آب اجتناب ناپذیر است. برای ممانعت از نفوذ آب در این پوشش‌ها از نوارهای آب‌بند پیوسته‌ای در درزه‌های پوشش استفاده می‌شود. نوارهای آب‌بند دارای دو نوع کلی تراکمی و تراکمی-منبسط شونده هستند. نوارهای آب‌بند تراکمی در کوتاه مدت توسط المان‌ها متصل کننده و در درازمدت بواسطه تنش ایجاد شده در پوشش فشرده می‌شوند و انواع تراکمی-منبسط شونده علاوه بر این خاصیت دارای بخشی هستند که در صورت تماس با آب انبساط یافته و آب‌بندی کاملی را ایجاد می‌کنند. در پوشش‌های تونل با شرایط عادی، نوارهای آب‌بند نوع اول متداول بوده که همواره بصورت جفت عمل می‌کنند زیرا درون شیارهای مخصوصی دور تا دور هر سگمنت و نزدیک قوس بیرونی آن (شیار مخصوص نوار آب‌بند^{۱۲}) قرار گرفته و در جریان سرهم‌بندی سگمنت‌ها برای تشکیل حلقه بر روی هم قرار می‌گیرند. فشار موجود بر روی سطح اتصال سگمنت‌ها پس از نصب آن‌ها، باعث به هم فشردن و جفت‌شدگی نوارهای آب‌بند می‌شود. این پدیده در نهایت باعث آب‌بندی درزه‌های اتصال سگمنت‌ها در مقابل فشار آب اطراف تونل می‌شود. برای جلوگیری از نشت و فرار آب بایستی سطح بتن در شیار مخصوص نوار آب‌بند عاری از هرگونه سوراخ هوایی خالی باشد.

¹¹ Packer

¹² Sealing groove

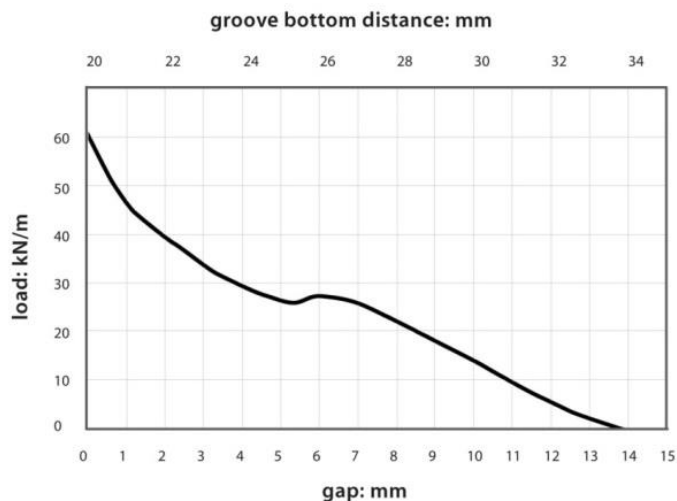
تمامی نوار آببند های قابل استفاده از هندسه مشابهی برخوردارند و تنها به لحاظ عرض، ارتفاع و سختی لاستیک مورد استفاده با هم متفاوت هستند. نوار آببند مناسب بر اساس حداقل و حداکثر فشار آب وارده، جهت فشار، رواداری های اجرای پوشش و تاثیرات شیمیایی آب، شرایط زمین و تزریق پشت سگمنت انتخاب می شود. جزئیات و ابعاد شیار بایستی با رفتار پروفیل نوار آببند تحت فشار تطابق مناسبی داشته باشد تا بتن اطراف شیار در اثر فشار نوار آببند، آسیب نبیند. در شکل ۱-۶ سگمنت کلیدی که در شیار مخصوصی بر روی آن نوار آببند چسبانده شده، قابل ملاحظه است.



شکل (۱-۶) نوار آببند متصل شده بر روی سگمنت کلید

یکی از مشخصات فنی نوار آببند، میزان بازشدگی^{۱۳} آن در اثر حداقل بار موجود در محل اتصال سگمنت ها می باشد. با توجه به اینکه اتصال اولیه سگمنت ها بوسیله بولت انجام می گیرد، حداقل بار لازم برای بسته نگه داشتن درز بین سگمنت ها، برابر با حداکثر مقاومت کششی بولت لحاظ می شود. به عبارت دیگر در حالتی که تنها بارگذاری محل اتصال سگمنت ها، ناشی از وجود بولت می باشد، بازشدگی نوار آببند باید با لحاظ ضرایب اطمینان لازم، صفر باشد. در شکل ۱-۷ نمودار نیرو- بازشدگی نوار آببند پروفیل 86-259 ارائه شده است (Datwyler, 2014).

¹³ Gap



شکل (۷-۱) نمودار نیرو- تغییر شکل- بازشدگی نوار آببند پروفیل 86-259 (برای Offset=0)

مواد استفاده شده در نوار آببند از جنس لاستیک طبیعی، پلاستیک الاستومرها، نئوپرنها، سلیکونها و لاستیکهای آماسی (هیدروتیت) هستند. لازم به ذکر است که نوارهای آببند متداول مورد استفاده در صنعت تونل سازی ایران غالباً از جنس لاستیک مخصوص EPDM^{۱۴} ساخته می شوند.

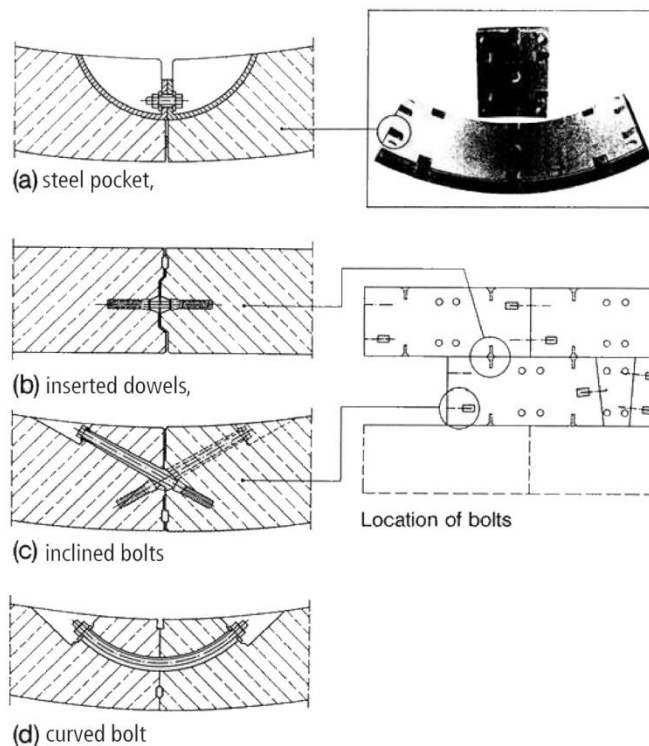
۱-۲-۴- بولت

در درزه های حلقوی، فشار تماس لازم برای عملکرد مناسب نوار آببند، بواسطه نیروی پیشران دستگاه تامین می شود. ولی این فشار لازم در درزه های طولی توسط نیروهای محوری ناشی از فشار زمین و آب تامین می شود. در حین نصب سگمنتها نیز نیروی فشاری لازم برای آببندی نوارهای آببند از طریق بولت گذاری موقت در محل اتصال تامین می شود. البته در نزدیکی ورودی تونل و محل تقاطعها، بولت یا داول بصورت دائم نصب می شود. برخی متخصصان استفاده از بولت برای اتصال سگمنت های پوشش تونل درون زمین های خشک را لازم نمی داند (Kuesel et al. 2011).

¹⁴ Ethylene propylene diene monomer (M-class) rubber

اتصال بین سگمنت‌ها و حلقه‌ها را می‌توان به دو گروه زیر تقسیم کرد (شکل ۸-۱):

- اتصال درزه‌ها با بولت‌ها: سگمنت ابتدا در موقعیت مورد نظر قرار داده شده و سپس با استفاده از بولت یا پیچ‌ها بسته می‌شوند.
- اتصال درزه‌ها با داوول^{۱۵}: اتصال دهنده‌ها (که کاملاً پوشید و پنهان‌اند) در جریان سرهم بندی به درون سگمنت هدایت شده و کاملاً به سگمنت آخرین حلقه سرهم بندی شده محکم می‌شوند.



شکل (۸-۱) انواع اتصالات درز بین سگمنت‌های بتنی

در یک پوشش نوار آب‌بند دار، بولت نصب شده در محل اتصال سگمنت‌ها، که برای تحت فشار نگه داشتن نوار آب‌بند مورد استفاده قرار می‌گیرد، ممکن است تحت برش و کشش قرار گیرد. کشش در این بولت‌ها بیشتر زمانی ممکن است اتفاق بیفتد که دستگاه TBM برای نصب سگمنت جدید، فشار را از روی

¹⁵ Dowels

سگمنت تازه نصب شده برمی‌دارد. یکی دیگر از کاربردهای بولت در یک پوشش سگمنتال، پایدارسازی موقت کل سازه تا سخت شدن حلقه تزریق پشت پوشش است. بولت‌ها همچنین به پایدارسازی حلقه ناتمام در مقابل نیروی ناشی از وزن آن‌ها، زمانی که TBM برای نصب سگمنت جدید، سگمنت‌های تازه نصب شده را رها می‌کند، نیز کمک می‌کند.

۱-۳- موضوع تحقیق

پوشش سگمنتال تونل یکی از پرکاربردترین سیستم‌های پایدارسازی تونل بخصوص برای تونل‌های سپری و مکانیزه می‌باشد. سگمنت‌های بکار رفته در این پوشش غالباً از جنس بتن آرمه است. تحلیل و طراحی این سیستم سازه‌ای، پیچیده بوده و لذا در بیشتر مواقع همراه با ساده‌سازی‌های متعددی انجام می‌شود. کاهش لنگر خمشی و صلبیت سازه در محل اتصال بین سگمنت‌های چنین پوششی محرز است ولی مقدار این کاهش به پارامتر و شرایط متعددی بستگی دارد. به منظور تحلیل و طراحی دقیق این سازه بایستی رفتار تماس بین قطعات را به درستی شبیه سازی نمود. مدل‌های تماس موجود منطبق با مکانیزم و رفتار واقعی قطعات نمی‌باشد، به گونه‌ای که مدل‌های موجود بر پایه یکی از روش‌های ساده زیر شکل گرفته است که هر کدام دارای مزایا و معایبی می‌باشند:

اتصالات بین سگمنت‌ها نادیده گرفته شده و بصورت حلقه بتنی یکپارچه‌ای با صلبیت کاهش یافته (بر اساس کاهش یکسان مدول الاستیسیته کل پوشش) مدل می‌گردد. این روش بدلیل نادیده گرفته شدن اتصالات و لنگر خمشی کاهش یافته در محل اتصالات بسیار محافظه‌کارانه بوده و گاهی ممکن است طرح ارائه شده توجیه فنی و اقتصادی نداشته باشد.

محل اتصالات بصورت مفصل کامل لحاظ شده و لنگر خمشی نقاط اتصال سگمنت‌های پوشش تونل صفر در نظر گرفته می‌شود. این روش به دلیل صرف نظر کردن از عملکرد بولت‌ها و مکانیزم صحیح اتصال بین سگمنت‌ها (انتقال همزمان نیروی محوری، برشی و لنگر خمشی) توجیه فنی نداشته و با واقعیت عملکرد سازه‌ای محل اتصالات منافات دارد. ولی از این روش می‌توان برای بدست آوردن دید اولیه و انتخاب عدد فرضی برای ضخامت سگمنت، استفاده کرد.

محل اتصال بین سگمنت‌ها بصورت ضخامت کاهش یافته (بر اساس کاهش لنگر خمشی در نقاط ضعیف) مدل می‌گردد. این روش نسبت به دو روش فوق روش بهتری بوده ولی به دلیل محدودیت‌های تئوریک و عدم انطباق کامل آن با واقعیت و مکانیزم دقیق رخ داده در محل اتصال سگمنت‌های تونل روش دقیقی نیست.

لذا با عنایت به نقاط ضعف روش‌های فوق، نمی‌توان به صحت و دقت طرح‌های انجام شده بر اساس این روش‌ها اطمینان کرد. در واقع مکانیزم رخ داده در محل اتصال قطعات بتنی تونل نتایجی بین روش‌های مذکور بوده و این روش‌ها نتایج حدی ارائه می‌دهند.

۱-۴- فرضیات تحقیق

بمنظور تحلیل و طراحی دقیق سازه پوشش سگمنتال بایستی رفتار اتصالات بین سگمنت‌ها به درستی شبیه سازی شود. لذا آگاهی از شرایط تنش- کرنش در سطوح تماس بین سگمنت‌های پوشش تونل لازم است. از طرفی بار نرمال بر سطح اتصال سگمنت‌ها نقش اساسی در میزان چفت‌شدگی یا بازشدگی و در کل، سختی محل درز اتصال بازی می‌کند. این تحقیق به صورت مجزا به بررسی رفتار درزه‌های طولی پوشش سگمنتال پرداخته و از تاثیر حلقه‌های مجاور و درزه‌های حلقوی صرف نظر شده است. نمونه‌های

آزمایشگاهی و تحلیل‌های انجام گرفته در این تحقیق بر اساس اطلاعات پوشش سگمنتال تونل کمکی کانال ابودر واقع در تهران می‌باشد. قطر پوشش تونل ۴ متر و روباره خاکی آن ۳۰ متر فرض شده است. پوشش سگمنتال تونل ابودر متشکل از ۱+۵ سگمنت به ضخامت ۰/۲۵ متر و عرض ۱/۲ متر می‌باشد. بتن مورد استفاده برای ساخت سگمنت‌های مورد مطالعه دارای مقاومت مشخصه $55/0.2 \text{ MPa}$ و مقاومت هدف حداقل 56 MPa بر روی نمونه‌های مکعبی با ابعاد 150 mm در سن ۴۲ روزه می‌باشد. آب‌بندی درزهای اتصال دو سگمنت توسط یک جفت نوار آب‌بند از جنس لاستیک EPDM با پروفیل 86-259 انجام شده است. برای اتصال سگمنت‌ها در پوشش سگمنتال تونل ابودر از بولت‌های خمیده (موزی) با قطر 24 mm از فولاد AIII با حداقل تنش تسلیم 400 MPa استفاده شده است.

۱-۵- روش تحقیق

به منظور ارزیابی رفتار پوشش سگمنتال ناگزیر باید اتصالات آن نیز لحاظ گردد. یکی از روش‌های ارزیابی رفتار سازه‌ای اتصالات سگمنت‌ها بررسی تغییرات تنش-کرنش ایجاد شده در محل اتصالات می‌باشد. لذا در این تحقیق نمونه‌های بتنی متعددی از محل اتصال سگمنت‌ها گرفته شده و تحت آزمایش برش درزه قرار گرفته است. نمونه‌های مذکور تحت بارگذاری ۸ مقدار مختلف تنش نرمال بر سطح اتصال سگمنت‌ها، در محدوده بین ۰/۲۵ تا 2 MPa مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. در طی آزمایش با اعمال مقادیر مختلف بارهای نرمال و برشی، جابجایی سطوح اتصال نمونه‌های بتنی نسبت به هم، بواسطه ابزارهای قرائت نصب شده بر روی دستگاه برداشت می‌شود. پس از انجام تست‌های متعدد آزمایشگاهی بر روی سه نوع سطح تماس بتن خالص، با نوار آب‌بند و با بولت، روابطی برای سختی برشی و نرمال متناسب با مقادیر تنش نرمال ایجاد شده در سطوح تماس متنوع سگمنت‌ها، ارائه گردید. در ادامه علاوه بر آنالیز حساسیت بر روی پارامترهای موثر، مدل دو بعدی تیر و فنر مناسبی برای اتصالات بین سگمنت‌ها ارائه گردیده است.

در ادامه مدل عددی سه بعدی از پوشش سگمنتال ساخته شده و توسط نتایج آزمایشات موفق، کالیبره گردید. در نهایت نتایج مدل عددی سه بعدی المان تماس اصطکاکی، با نتایج مدل دو بعدی تیر و فنر پیشنهادی مقایسه شده است.

۱-۶- اهداف تحقیق

استفاده از مدل‌های پیچیده برای طراحی پوشش سگمنتال تونل توسط مهندسين طراح و مشاور عملا مشکل و در بسیاری از پروژه‌ها عملی نمی باشد. لذا به منظور تحلیل و طراحی ساده پوشش سگمنتال و بر اساس نحوه توزیع تنش در سطح اتصالات بین سگمنت‌ها، ایده اصلی این رساله شکل گرفته است. بنابراین این تحقیق در پی برآورد اهداف ذیل می باشد:

۱- استخراج الگوی توزیع تنش- کرنش در محل اتصالات

۲- استخراج فنرهای معادل جهت مدلسازی محل اتصالات

۳- توسعه مدل عددی دو و سه بعدی کالیبره شده

در این تحقیق، به منظور ارائه مدل ساده‌ای از رفتار درزه‌های طولی پوشش سگمنتال تونل بر اساس تنش-کرنش ایجاد شده در این درزه‌های طولی با سطح صاف، پس از بررسی دقیق نقاط ضعف و قوت مدل‌های تحلیلی، عددی و آزمایشگاهی موجود، و همچنین پس از آزمودن چندین متد آزمایشگاهی مختلف، پلان جزء به جزء آزمایشات مورد نیاز برای این تحقیق طراحی و اجرا گردید. به عنوان یکی از نتایج این تحقیق روابط ساده‌ای برای بدست آوردن سختی فنرهای برشی و نرمال جایگزین محل اتصال سگمنت‌ها، در سه حالت اتصال ساده بتن به بتن، با گسکت و با بولت، پیشنهاد شد. در نهایت با استفاده از نتایج آزمایشگاهی، المان تماس اصطکاکی برای مدل‌سازی سه بعدی پوشش سگمنتال ارائه شده است

با توجه به روند انجام تحقیق که در بالا به اختصار ذکر شد، این رساله بصورت زیر فصل بندی شده است:

۱- فصل اول- مقدمه و کلیات: تعاریف کلی از پوشش سگمنتال تونل و جزئیات مطرح شده در این

تحقیق و همچنین اختصاری از موضوع، فرضیات، روش و اهداف تحقیق

۲- فصل دوم- مرور سوابق علمی موجود: بررسی ادبیات فنی موجود در ارتباط با موضوع و جزئیات

تحقیق، ارزیابی روش‌ها و مدل‌های مطالعه شده در گذشته

۳- فصل سوم- مطالعات آزمایشگاهی تحقیق حاضر: تشریح طرح‌ریزی، ساخت و آزمایش بر روی

نمونه‌های بتنی بواسطه آزمایش برش درزه، متدولوژی آزمایش، محاسبات و ارائه نتایج حاصل از

آزمایشات

۴- فصل چهارم- توسعه مدل عددی برای ارزیابی مدل تماس پیشنهادی: ارائه مدل دو بعدی تیر و

فنر بر اساس روابط سختی برشی و نرمال پیشنهادی، تحلیل حساسیت بر روی پارامترهای موثر،

مدل سه بعدی کالیبره شده با نتایج آزمایشگاهی و مقایسه نتایج آن با مدل پیشنهادی

۵- فصل پنجم- نتیجه‌گیری و پیشنهادات: جمع‌بندی و ارائه نتایج بدست آمده از این تحقیق و

پیشنهادات تکمیل کننده کار برای تحقیقات بعدی

فصل دوم:

مرور سوابق علمی موجود

مدل‌های پیش‌بینی رفتار تونل اغلب برای اهداف طراحی ایجاد شده‌اند. این حقیقت اجازه بکارگیری فرضیات ساده کننده را برای حل مساله می‌دهد زیرا این فرضیات محافظه‌کارانه بوده و در راستای افزایش ضریب ایمنی سازه می‌باشد. از طرف دیگر، ارزیابی پاسخ واقعی سازه مستلزم لحاظ نمودن متناسب تمامی پارامترهای دخیل در رفتار سازه می‌باشد. بنابراین، لازم است تا آنها را بوضوح مشخص کرده و برنامه ریزی و الگوی عددی را برای شبیه سازی درست آن توسعه داد. انجمن بین المللی تونل‌سازی (ITA) چهار روش برای طراحی پوشش تونل پیشنهاد داده است (Lee et al., 2001 و ITA, 2000):

۱. روش‌های طراحی تجربی و تحلیلی که بیشتر حاصل تجربیات گذشته تونل‌سازی می‌باشند،
۲. روش‌های طراحی بر اساس اندازه‌گیری برجا (میدانی) که در مقیاس کامل انجام شده است،
۳. روش‌های طراحی بر اساس نتایج مدل‌های آزمایشگاهی
۴. مدل‌های عددی که غالباً بر اساس مدل‌های مکانیک محیط‌های پیوسته شکل گرفته است.

روند مشترک بین همه روش‌های فوق، ابتدا تعیین نیروهای اعمال شده به پوشش و سپس تعیین مصالح و ابعاد مقطع پوشش برای تحلیل سازه‌ای، می‌باشد. بنابراین، برای تعیین نیروهای داخلی در هر قسمت از پوشش و اندرکنش آن تحت بارهای مختلف، انتخاب روش یا مدل طراحی مناسب بسیار مهم می‌باشد. این رویه طراحی در مورد پوشش سگمنتال نیز صادق است. اما یکی از فاکتورهای موثر بر روی نیروهای داخلی سگمنت (لنگر خمشی، نیروی محوری و...) تاثیر درزه‌های میان سگمنت‌ها است. بنابراین در این فصل ادبیات فنی موجود در زمینه تحلیل و طراحی پوشش سگمنتال تونل، در قالب چهار دسته طراحی مذکور ارائه می‌گردد.

۲-۲- روش‌های تحلیلی طراحی پوشش سگمنتال

روش‌های تحلیلی غالباً بیشتر برای اهداف طراحی ایجاد و بهبود یافته است. لذا بدلیل لحاظ نمودن ضریب اطمینان کافی برای اهداف طراحی می‌توان از این روش‌ها تا حدودی بخوبی استفاده نمود. در گذشته به منظور طراحی پوشش سگمنتال از روش محاسباتی معمول استفاده می‌کردند. در این روش فرض می‌شود که حلقه سگمنتال، به صورت حلقه‌ای با سختی خمشی یکنواخت بوده و از کاهش سختی در اتصالات میان سگمنت‌ها صرف‌نظر می‌شود. در روش محاسباتی معمول از وجود تمام اتصالات طولی و حلقوی صرف‌نظر می‌شود. این روش قادر به لحاظ نمودن سختی اتصالات سگمنت‌ها نبوده و بسیار محافظه‌کارانه می‌باشد، لذا به مرور زمان استفاده از آن برای طراحی پوشش سگمنتال منسوخ شده است.

سیستم‌های سازه‌ای بسیار متفاوتی در روند طراحی برای محاسبه نیروهای داخلی درون پوشش تونل وجود دارد. یکی از تئوری‌های معتبر و ساده در این زمینه، روش حلقه دایره‌ای بر روی فونداسیون الاستیک است که برای مدل‌سازی عملکرد درزه‌های سگمنت بتنی بر اساس مدل‌های سازه‌ای بصورت زیر دسته‌بندی شده است (شکل ۱-۲):

۱- روش حلقه چند مفصلی^{۱۶} (HR)

۲- روش حلقه با صلبیت یکنواخت^{۱۷} (UR)

۳- روش ممان اینرسی موثر^{۱۸} (EMI)

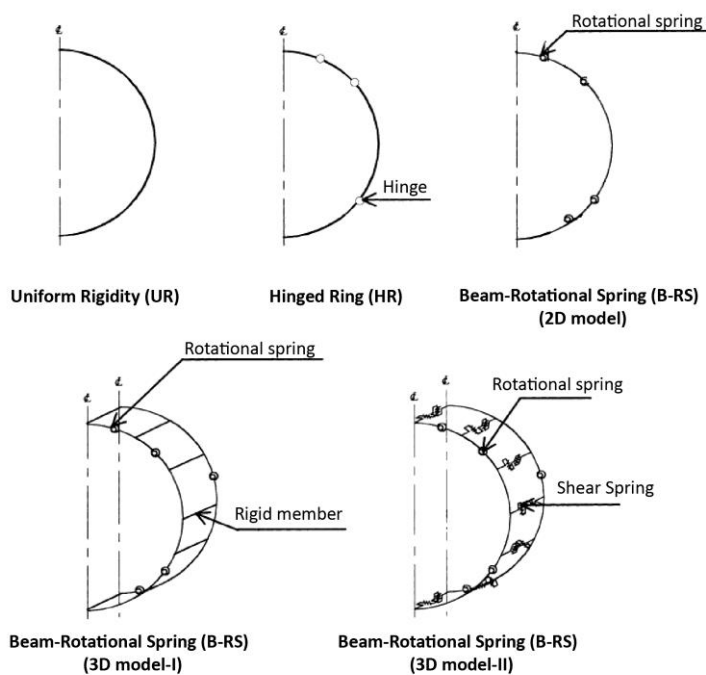
۴- مدل تیر- فنر پیچشی^{۱۹} (B-RS)

¹⁶ Hinged Ring (HR)

¹⁷ Uniform Rigidity (UR)

¹⁸ Effective Moment of Inertia (EMI)

¹⁹ Beam- Rotational Spring (B-RS)



شکل (۱-۲) مدل‌های سازه‌ای مرسوم در روش‌های تحلیلی حلقه سگمنتال (بر گرفته از Koyama, 2000 و JSCE, 2006)

در جدول ۱-۲ مختصری از مزایا و معایب هر یک از روش‌های تحلیلی طراحی پوشش سگمنتال ارائه شده است. اما با توجه به اینکه استفاده از این روش‌های بسیار مرسوم می‌باشد، لازم است تا بررسی جامع‌تری مبنی بر مزایا و معایب هر یک از این روش‌ها صورت گیرد. لذا در ادامه به تشریح هر یک از روش‌های مذکور پرداخته می‌شود. در فصل سوم مدل عددی اجزای محدودی از هر یک از روش‌های تحلیلی ساخته شده و نتایج آن‌ها با هم و با مدل پیشنهادی مقایسه می‌گردد.

جدول (۲-۱) مزایا و معایب روش‌های تحلیلی طراحی پوشش سگمنتال

ردیف	روش	محقق – سال تحقیق	فرضیات ساده کننده	عمده یافته‌ها	مشکلات و معایب کار
۱	حلقه چند مفصلی (HR)	Tang, 1988 Zhong, et al., 2006	برای شرایط مساعد زمین، حلقه بصورت درزه‌دار و اتصالات بصورت مفصل کامل (صرفنظر از سختی درزه‌ها)	مدل بسیار ساده بوده و فقط به منظور داشتن دید اولیه و حدی مناسب است.	تاثیر اتصالات حلقوی لحاظ نشده و تاثیر اتصالات طولی نیز بسیار اغراق آمیز می‌باشد.
۲	حلقه با صلبیت یکنواخت (UR)	Peak et al., 1972 Muir Wood, 1975 Lee & Ge, 2001 JSCE, 2006	حلقه یکپارچه با صلبیت کاهش یافته توسط نسبت موثر سختی خمشی $\eta \leq 1$ یعنی ηEI	تاثیر حلقه‌های مجاور لحاظ شده و بواسطه نسبت انتقال سختی خمشی η ، لنگر خمشی در وسط سگمنت و در محل تماس سگمنت‌ها اصلاح می‌شود.	ضرایب η و η تجربی بوده یا از نتایج آزمایشگاهی بدست می‌آید.
۳	ممان اینرسی موثر (EMI)	Muir Wood, 1975 Lee & Ge, 2001 Hefny et al., 2004 Hefny & Chua, 2006 سالمی، ۱۳۸۷	ضخامت کاهش یافته در محل اتصال سگمنت‌ها برای رسیدن به تنش معادل با سطح تنش پوشش سگمنتال، کاهش ضخامت در محل اتصالات برای به حداقل رساندن لنگر خمشی در تمام اتصالات پوشش سگمنتال	ارائه فرمول تجربی برای تخمین اثر درزه‌های طولی در حلقه‌های مجزا و چفت نشده بصورت کاهش سختی خمشی ارائه ضریب کاهش ضخامت و ممان اینرسی موثر در محل اتصالات به منظور لحاظ اثر درزه‌های طولی	تاثیر تعداد و آرایش درزه‌ها صرفنظر شده (سگمنت‌ها با ابعاد یکسان فرض شده است) برای رسیدن به ضخامت کاهش یافته بهینه، تکرار محاسبات زیادی لازم است ضرایب α و β تجربی بوده یا از نتایج آزمایشگاهی بدست می‌آید.
۴	تیر – فنر پیچشی (B-RS)	Mashimo & Ishimura, 2003 Huang et al, 2006 El Naggar & Hinchberger, 2008	حلقه بصورت تیرهای صاف یا خمیده و درزه‌های طولی بصورت فنرهای پیچشی و درزه‌های حلقوی بصورت فنرهای برشی	اثر اتصالات طولی و حلقوی بر روی پاسخ پوشش لحاظ شده است. لذا مدل بر اساس حداقل دو حلقه متوالی ارائه شده است.	برای مدل تک حلقه تغییر سختی پیچشی تاثیر چندانی ندارد. تعیین ضرایب سختی فنرها همراه با عدم قطعیت می‌باشد.

۲-۲-۱- روش حلقه چند مفصلی

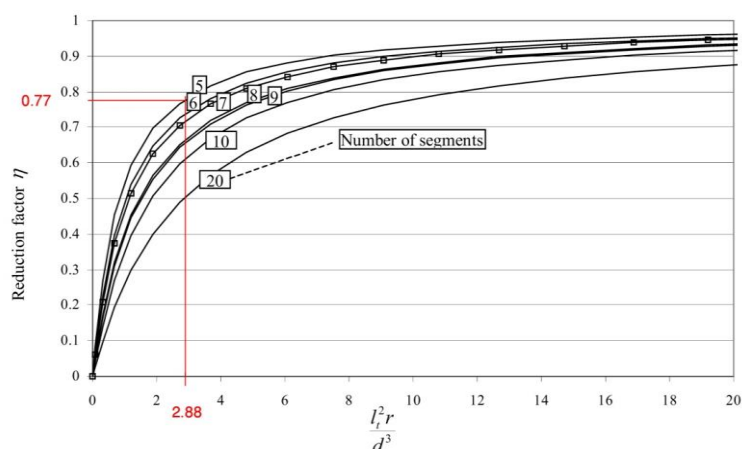
روش محاسباتی حلقه‌ای با اتصالات مفصلی، غالباً برای شرایط زمین مساعد بکار برده می‌شود. در این روش سگمنت‌ها بصورت المان تیر و محل اتصال آنها بصورت مفصل کامل (صرف‌نظر از سختی درزه‌ها) مدل می‌شوند. تاثیر اتصالات حلقوی در آن منظور نشده و تاثیر اتصالات طولی نیز به صورت اغراق‌آمیز لحاظ می‌گردد. این در حالی است که حلقه پوشش در مقابل فشارهای محیطی ناشی از مقاومت خاک اطراف می‌تواند به یک سازه نامعین استاتیکی تبدیل گردد. این روش بسیار ساده برای ارزیابی اولیه روش مناسبی است. ولی از آنجایی که در محل اتصال دو سگمنت به سبب وجود نیروی محوری فشاری، انتقال لنگر خمشی نیز میسر است، فرض مفصل کامل روش مناسبی به‌شمار نمی‌آید. محققینی مانند Tang (۱۹۸۸) و Zhong و همکارانش (۲۰۰۶) برای محل اتصال سگمنت‌ها از مفصل کامل استفاده کردند که در مقابل روش‌های دیگر از دقت و اعتبار پایین‌تری برخوردار است.

۲-۲-۲- روش حلقه با صلبیت یکنواخت

در این روش محققینی مانند Morgan (۱۹۶۱)، Peak و همکارانش (۱۹۷۲)، Ranken و همکارانش (۱۹۷۸)، Einstein و Schwartz (۱۹۷۹)، Yuen (۱۹۷۹)، Ogawa (۱۹۸۶)، Liu و Hou (۱۹۹۱)، Lee و Ge (۲۰۰۱)، Blom (۲۰۰۲) و El Naggar و همکارانش (۲۰۰۸) بجای تغییر سختی در محل اتصال سگمنت‌ها از یک سختی خمشی ثابت کاهش یافته‌ای استفاده کردند. این کاهش صلبیت پوشش بواسطه بکارگیری ضریب کاهنده‌ای با عنوان نسبت موثر سختی خمشی ($\eta \leq 1$)، بصورت سختی خمشی تعدیل یافته، ηEI ، به کل سازه پوشش یکپارچه اختصاص داده می‌شود. پس از تحلیل حلقه با صلبیت یکنواخت مذکور و بدست آوردن مقادیر لنگر خمشی (M) در بخش‌های مختلف پوشش، بواسطه بکارگیری ضریبی

با عنوان نسبت انتقال سختی خمشی ξ ، تاثیر حلقه‌های مجاور بر روی نیروهای داخلی ایجاد شده در حلقه پوشش لحاظ می‌گردد. لذا لنگر خمشی ایجاد شده در وسط سگمنت‌ها (حدفاصل نقاط انتهایی سگمنت) بصورت $M(\xi+1)$ و لنگرهای ایجاد شده در محل اتصال سگمنت‌ها به صورت $M(\xi-1)$ اصلاح می‌شود. لازم به ذکر است که در این روش نیازی به اصلاح مقادیر نیروی محوری نیست. یکی از مزایای این روش لحاظ نمودن تاثیر حلقه‌های مجاور بواسطه استفاده از ضرایب مذکور می‌باشد. اما از طرفی مقدار ضرایب η و ξ اساساً به واسطه تجربیات بدست آمده از نتایج آزمایشات مربوط به عملکرد اتصالات سگمنت‌ها و حلقه‌ها یا از پروژه‌های مشابه گذشته بدست می‌آیند. البته به شرط تحت فشار و بسته بودن تمامی درزه‌های طولی و حلقوی می‌توان مقادیر ضرایب مذکور را یکسان فرض کرد. در این حالت تغییر نسبت سختی خمشی η وابسته به شرایط بارگذاری خواهد بود (Koyama, 2003). از سوی دیگر، در حالت کلی، Bolm (۲۰۰۲) مقدار ضریب کاهنده سختی خمشی در محل اتصال طولی سگمنت‌ها را تابع سطح تماس درز و ضخامت، شعاع و تعداد سگمنت‌ها در یک حلقه معرفی می‌کند. لذا مطابق نمودار شکل ۲-۲، برای حلقه‌ای متشکل از ۱+۵ سگمنت به شعاع (r) ۲ متر و ضخامت (d) ۳۰ سانتیمتر که ضخامت سطح تماس در درز طولی سگمنت‌ها (l_t) ۱۵ سانتیمتر می‌باشد، مقدار ضریب کاهنده سختی خمشی حلقه (η) در حدود ۰/۷۷ بدست می‌آید.

لازم به ذکر است که Bolm نمودار فوق را برای تعیین مقدار ضریب کاهنده سختی خمشی تک حلقه و در حالتی که درزه‌های طولی کاملاً بسته باشند ارائه نموده است. Bolm اذعان دارد که با اینکه اندرکنش درزه‌های حلقوی حلقه‌های مجاور (بسته به موقعیت و میزان چفت شدگی) ممکن است باعث افزایش مقدار این ضریب شود، ولی مقدار این تاثیر ناچیز است. لذا او نیز مانند روش توصیه شده توسط انجمن مهندسين عمران ژاپن (JSCE, 2006) فقط از یک ضریب کاهنده برای روش تحلیلی حلقه با صلبیت یکنواخت استفاده می‌کند.

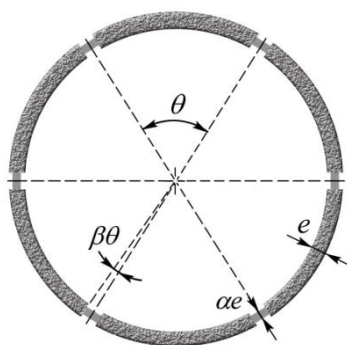


شکل (۲-۲) نسبت موثر سختی خمشی (Bolm, 2002)

۲-۲-۳- روش ممان اینرسی موثر

برای تحلیل و مدل سازی پوشش سگمنتال روش های تحلیلی متعددی ابداع شده است. یکی از ابتدایی ترین روش ها، روش Muir Wood است. در روش اولیه با ارائه ممان اینرسی موثر برای کل پوشش سگمنتال از تاثیر مستقیم تعداد و آرایش درزه ها در محاسبات صرف نظر شده است و در واقع یک فرمول تجربی برای تخمین اثر درزه های طولی در حلقه های مجزا از هم معرفی شده است که توسط این فرمول می توان با کاهش سختی خمشی پوشش سگمنتال، آن را با یک پوشش صلب همگن جایگزین کرد.

Muir Wood در سال ۱۹۷۵ روشی برای تحلیل و طراحی سگمنت بر اساس ممان اینرسی موثر پوشش سگمنتال معرفی کرد. ایده اصلی این روش از آنجا نشأت می گیرد که از نقطه نظر مکانیکی فشار وارد از طرف زمین در اتصالات طولی بین سگمنت ها، ایجاد نیروهای محوری فشاری و لنگر خمشی می کند. نکته مهم آن است که، میزان خمش در نزدیکی این اتصالات به علت کم شدن ممان اینرسی مقطع کاهش می یابد. لذا این اتصالات را همان گونه که در شکل ۲-۳ نشان داده شده است، می توان به وسیله المان هایی با ضخامت کاهش یافته و مطابق با سطح تماس موثر سگمنت ها در یک حلقه مدل کرد.



شکل (۲-۳) مدلی از یک حلقه پوشش سگمنتال با قطعات یکسان و منظم (برگرفته از، Muir Wood, 1975)

در این روش برای برآورد تاثیر اتصالات طولی حلقه‌های چفت نشده^{۲۰} در محاسبات مربوط به یک حلقه صلب همسانگرد، به واسطه کاهش سختی خمشی پوشش، فرمول تجربی آسانی توسعه داده شده است. بیشینه لنگر خمشی محاسبه شده با این روش کاملاً نزدیک به بیشینه لنگر خمشی محاسبه شده برای یک حلقه مفصلی است. برای محاسبه سختی محوری معادل از مدول الاستیک معادل استفاده شده است. به صورت تئوریک، مدول الاستیک معادل برای یک پوسته استوانه‌ای از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$E = \frac{\alpha}{\alpha(1-\beta) + \beta} E_m \quad (1-2)$$

که مطابق شکل ۲-۲، در آن، e ضخامت حلقه پوشش، αe ضخامت موثر محل تماس یا ضخامت مربوط به قسمت کاهش یافته اتصالاتی طولی، θ زاویه مرکزی مربوط به هر سگمنت از حلقه، $\beta \theta R$ طول کمان متوسط هر اتصال طولی و E_m مدول الاستیسیته پوشش سگمنتال است.

مقادیر ضرایب α و β غالباً تجربی بوده یا از نتایج آزمایشات بدست می‌آید. به هر حال، از آنجایی که ضریب بدون بعد β ، معمولاً خیلی کوچک (در حدود چند 10^{-3}) می‌باشد، بنابراین، وجود اتصالات عملاً مدول سختی محوری را تغییر نداده و نیروی محوری مجاز تنها با شرایط گسیختگی اتصالات طولی محدود

²⁰ Uncoupled joints

می‌شود. تحت همین شرایط می‌توان ممان اینرسی معادل و به تبع آن مدول سختی خمشی معادل پوشش را توسط معادله ۲-۲ محاسبه کرد:

$$I = I_j + \left(\frac{4}{n}\right)^2 \frac{e^3}{12} \quad (۲-۲)$$

که در آن I_j ، ممان اینرسی اتصالات بین سگمنت‌ها (بدست آمده از ضخامت موثر محل اتصال سگمنت‌ها) و n تعداد درزه‌های طولی موجود در حلقه است. این فرمول برای $n > 4$ قابل قبول است. بعلاوه فرض بر این است که در محل تماس سطوح اتصالات هیچ‌گونه بازشدگی در داخل یا خارج حلقه ایجاد نمی‌شود. به عبارت دیگر فرض می‌شود، سگمنت‌ها در محل اتصال طولی حول محور تونل نمی‌چرخند. اگر در محل اتصالات ممان اینرسی، به صورت $I_j = \frac{\alpha^3 e^3}{12}$ در نظر گرفته شود، خواهیم داشت:

$$I = \left[\alpha^3 + \left(\frac{4}{n}\right)^2 \right] \frac{e^3}{12} \quad (۳-۲)$$

به عنوان مثال برای مقادیر $\alpha = 0.5$ و $n = 6$ مدول معادل بصورت $I = 0.57 \frac{e^3}{12}$ محاسبه می‌شود در حالی که برای یک پوسته استوانه‌ای یکپارچه $I = \frac{e^3}{12}$ می‌باشد. بنابراین سختی خمشی یک پوشش سگمنتال کم‌تر از سختی خمشی پوشش یکپارچه با همان مشخصات بوده و در نتیجه لنگر خمشی در نقاط اتصال سگمنت‌ها کاهش خواهد یافت.

از سوی دیگر برای یک پوشش متشکل از ۴ یا تعداد کمتری سگمنت، Muir Wood توصیه می‌کند که نایستی وجود اتصالات را بر روی صلبیت پوشش تاثیر داد. اما برای یک پوشش سگمنتال با قطعات متعدد سختی اتصالات به‌طور قابل ملاحظه‌ای کمتر از خود پوشش می‌باشد، که این امر ناشی از کاهش لنگر خمشی پوشش در آن نقاط است. در مدل اولیه اثر چیدمان درزه‌ها بر نتایج مدل بررسی نشده بود و لذا این نظریه برای به دست آوردن ایده اولیه از نیروهای داخلی پوشش سگمنتال مفید است.

از آنجایی که روش ممان اینرسی موثر ارائه شده توسط Muir Wood به منظور ارائه مدلی برای بدست آوردن ضرایب معادلات نیازمند اطلاعات پیش فرضی از تحلیل‌ها یا مدل‌های مشابه می‌باشد، این روش بعداً توسط محققین دیگری مانند Lee و Ge (۲۰۰۱)، Hefny و همکارانش (۲۰۰۴) و Hefny و Chua (۲۰۰۶) توسعه داده شد. در این راستا، Lee و Ge (۲۰۰۱) تأثیرات سازه‌ای بخصوصی از قبیل چیدمان اتصالات را مدنظر قرار دادند. آنها پی بردند که نسبت سختی اتصال و شعاع تونل تأثیر بسزائی بر نسبت صلبیت موثر پوشش دارد، که به موجب آن کاهش هر کدام از نسبت سختی اتصالات یا شعاع تونل منجر به افت اساسی نسبت صلبیت موثر و در نتیجه موجب کاهش لنگر خمشی پوشش خواهد شد. اگر تعداد اتصالات افزایش یابد، نسبت صلبیت موثر و لنگر خمشی پوشش به دلیل افزایش انعطاف‌پذیری پوشش، به‌طور ذاتی کاهش خواهد یافت. عوامل دیگری از قبیل توزیع اتصالات، تأثیر بسیار زیادی بر روی ممان پوشش دارند.

در راستای ارزیابی کمی تأثیر چیدمان درزه‌های پوشش سگمنتال، ممان اینرسی موثر پوشش برای چیدمان مختلف سگمنت‌ها از جمله برای چیدمان بحرانی درزه‌ها $I_{e,max}$ و همچنین چیدمان بسیار مطلوب درزه‌ها $I_{e,min}$ به ترتیب بصورت روابط ۲-۴ و ۲-۵ ارائه شد (Hefny et al. 2004).

$$I_{e,max}/I = 429.01n^{-4.6023} \quad (۴-۲)$$

$$I_{e,min}/I = 159.19ln^{-4.2734} \quad (۵-۲)$$

که در آنها I ممان اینرسی پوشش یکپارچه است.

اساس روش Hefney و همکارانش (۲۰۰۴) بر این قاعده استوار است که ضخامت پوشش را تا حدی تغییر می‌دهند که مقادیر بیشینه تنش ایجاد شده در پوشش با مقادیر بیشینه تنش ایجاد شده در پوشش

سگمنتال برابر شود. ضخامت پوشش یک پارچه‌ای که سطح تنش یکسانی با سطح تنش پوشش سگمنتال داشته باشد، به عنوان پوشش تونل معادل با پوشش سگمنتال انتخاب خواهد شد. در بررسی‌هایی که در سال ۲۰۰۴ توسط Hefny و Tan انجام شد، تاثیر چیدمان و توزیع درزه‌ها بر روی نیروهای داخلی پوشش سگمنتال بررسی شد. مطالعه پارامتریک این محققین بر روی پوشش‌هایی متشکل از ۶ و ۸ سگمنت انجام شد. نتایج تحقیق Hefny و Tan را بطور خلاصه می‌توان بصورت زیر بیان نمود:

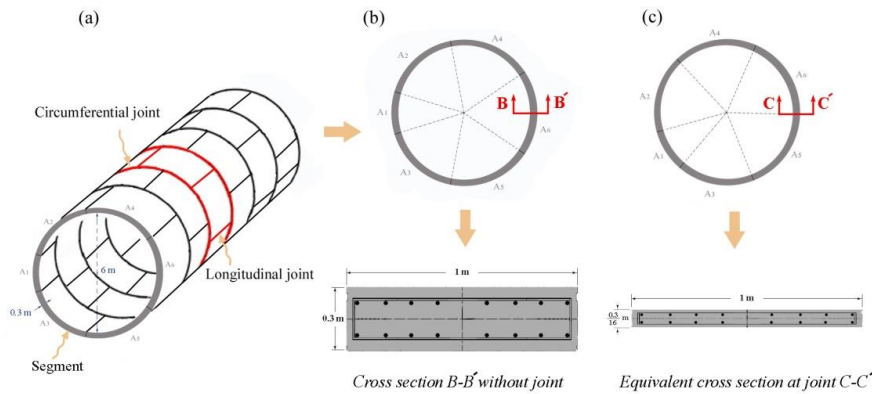
۱- برای مقادیر مختلف k_0 (نسبت تنش‌های برجای افقی به قائم زمین)، مقدار تنش القایی در پوشش سگمنتال با افزایش تعداد درزه‌ها کاهش می‌یابد،

۲- با افزایش مقدار مدول یانگ مقدار لنگر خمشی القایی در پوشش سگمنتال کاهش می‌یابد. با افزایش تعداد درزه‌ها، از اثر میزان مدول تغییر شکل در لنگر القایی در پوشش کاسته می‌شود،

۳- با افزایش ضخامت پوشش سگمنتال به علت کاهش انعطاف‌پذیری آن، بر میزان لنگر القایی در پوشش افزوده می‌شود. میزان این ضخامت با افزایش تعداد درزه‌ها کاهش می‌یابد.

بیشترین لنگر خمشی محاسبه شده بوسیله این روش با حداکثر لنگر خمشی بدست آمده از تحلیل حلقه مفصلی همخوانی دارد. اما همان‌گونه که شرح داده شد، این روش برای مقایسه تنش‌های ناشی از مدل‌سازی با مقادیر تنش‌های واقعی بدست آمده از آزمایشات آزمایشگاهی یا پروژه‌هایی با شرایط مشابه (چنانچه برداشت‌های دقیقی در دسترس باشد)، نیازمند تکرارهای زیادی می‌باشد. بنابراین در جهت رفع نیاز دوباره مدل مذکور به نتایج آزمایشگاهی، سالمی (۱۳۸۷) مدل ساده‌ای برای بیان رفتار تقریبی پوشش سگمنتال ارائه نمود. در مدل پیشنهادی، با هدف میل به صفر نمودن لنگر خمشی ایجاد شده در نقاط اتصال طولی سگمنت‌ها، ضخامت المان‌های مربوط به این نقاط کاهش می‌یابد (شکل ۲-۴). لذا بواسطه آنالیز حساسیت بر روی کاهش ضخامت نقاط اتصالی و ارزیابی تاثیر آن بر روی لنگر خمشی ایجاد

شده در سازه پوشش سگمنتال، بازه $1/8$ تا $1/16$ برای ضریب کاهش ضخامت α (شکل ۲-۲) ارائه شده است (سالمی، ۱۳۸۷).

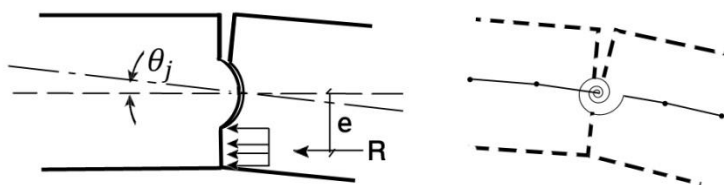


شکل (۲-۴) ایده اصلی مدل سازی پوشش سگمنتال با قطعات غیر یکنواخت (سالمی، ۱۳۸۷)

۲-۲-۴- مدل تیر- فنر پیچشی

همان طور که پیش از این نیز گفته شد، با توجه به اهمیت حضور درزه‌ها در محاسبه نیروهای داخلی پوشش سگمنتال مدل‌های متعددی بر اساس شبیه‌سازی رفتار درزه‌ها توسعه یافته است که یکی از این مدل‌ها، مدل تیر و فنر است. نکته مهمی که همواره در مدل‌های تیر و فنر مطرح است، نوع و سختی فنرهای مورد استفاده در مدل‌سازی است. در مدل تیر- فنر پیچشی (سه بعدی)، سگمنت‌ها به صورت تیرهای خمیده یا صاف، اتصالات طولی به صورت فنرهای پیچشی و اتصالات حلقوی به صورت فنرهای برشی در نظر گرفته می‌شوند. در این مدل، کاهش سختی خمشی پوشش در محل اتصال طولی سگمنت‌ها به واسطه فنرهای پیچشی و اندرکنش سگمنت‌های حلقه مجاور ناشی از چیدمان متناوب آنها به واسطه فنرهای برشی لحاظ می‌شود (Huang, et al., 2006). لازم به ذکر است که چیدمان شطرنجی سگمنت‌ها در طول تونل، کاهش سختی خمشی ایجاد شده در درزه‌های حلقوی را تا حدودی جبران می‌کند. لذا عدم لحاظ سختی خمشی بین درزه‌های حلقوی در مدل تیر- فنر سه بعدی، از این واقعیت

نشأت می‌گیرد. بر اساس چگونگی ارتباط بین دو حلقه متوالی در طول تونل، مدل تیر- فنر پیچشی سه بعدی را می‌توان بصورت دو مدل (I) و (II) تقسیم کرد. همان‌گونه که در شکل ۱-۲ نیز نشان داده شده است، این ارتباط بین حلقه‌ها ناشی از چفت شدگی و اندرکنش بین آنها می‌باشد. از طرفی در مواردی که بتوان از سختی بین حلقه‌ها (در مقایسه با سختی پوشش) صرف‌نظر کرد (حلقه‌های چفت نشده)، می‌توان از مدل تیر- فنر پیچشی دو بعدی استفاده نمود. شکل ۲-۵ مفهوم بازشدگی منقار پرنده‌ای در محل اتصال سگمنت‌ها و مدل ساده تیر و فنر پیچشی جایگزین را نشان می‌دهد. این پدیده در اثر توزیع نامتقارن تنش در سطح درزه ایجاد شده و موجب دوران در سطح اتصال سگمنت می‌گردد.



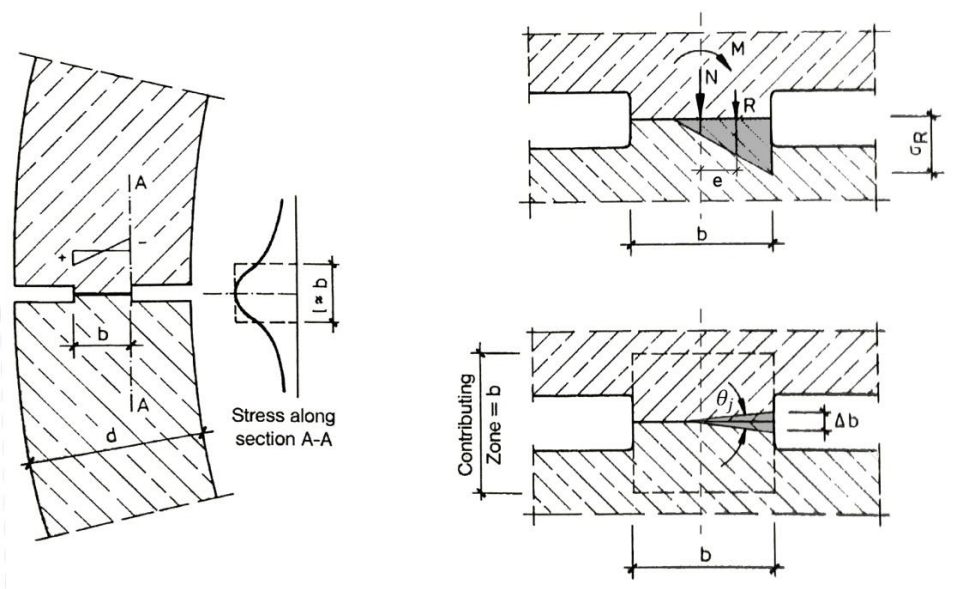
شکل (۲-۵) مفهوم بازشدگی منقار پرنده‌ای درز طولی سگمنت و جایگزینی فنر پیچشی بجای آن

سختی فنرهای پیچشی ارائه شده در مدل تیر- فنر پیچشی، توسط ثابت‌هایی مرتبط با میزان لنگر خمشی ایجاد شده در پوشش توصیف می‌شود (Mashimo & Ishimura, 2003). یکی از دلایل ارتباط تنگاتنگ لنگر خمشی با سختی درزه‌های طولی، تاثیرپذیری بالای لنگر خمشی نسبت به نیروی محوری از ساده‌سازی محل اتصالات پوشش می‌باشد (Kasper, et al., 2008). برای تعیین سختی پیچشی درزه‌های طولی معمولاً از فرمول Jonson (۱۹۸۳) استفاده می‌شود. از این سختی برای مدل کردن میزان مقاومت درزه در برابر دوران استفاده می‌شود. مطابق این رابطه تا زمانی که درزه‌ها کاملاً به هم فشرده هستند،

ضریب سختی فنر پیچشی (k_θ) که معادل سختی خمشی^{۲۱} سطح تماس سگمنت‌ها در درز طولی است، ثابت بوده و بواسطه رابطه ۶-۲ به دست می‌آید:

$$k_\theta = \frac{E \cdot b^2}{12} \quad (۶-۲)$$

که در آن، E ، مدول الاستیسیته سگمنت (بتنی) در محل اتصال و b ، ضخامت سگمنت‌ها در محل تماس درز طولی می‌باشد. در شکل ۶-۲ توزیع تنش در سطوح تماس درزه‌های طولی و پارامترهای موثر بر مقاومت در برابر دوران، نشان داده شده است.



شکل (۶-۲) توزیع تنش و پارامترهای موثر بر مقاومت در برابر دوران در درزه‌های با دو سطح صاف

اگر این لنگر خمشی از لنگر خمشی درز بیشتر شود ($M_{bou} < \frac{N \cdot b}{6}$) درزه‌ها بصورت منقار پرنده از هم باز می‌شوند (شکل ۵-۲). در این صورت سختی خمشی وابسته به نیروی محوری (N) و لنگر خمشی (M) بوده و به صورت رابطه ۷-۲ تعریف می‌شود:

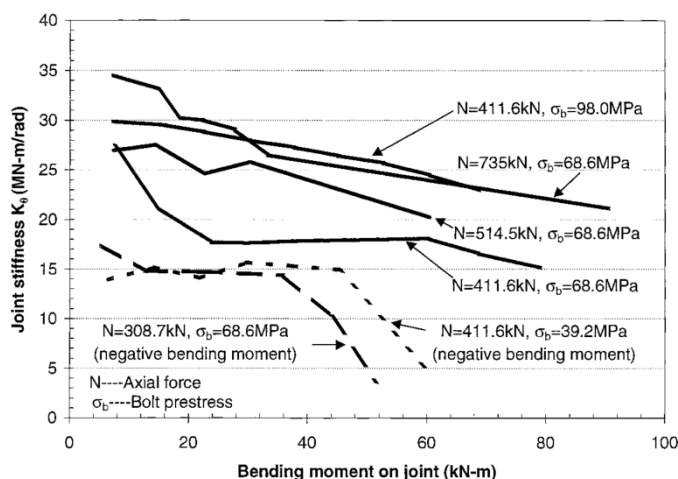
²¹ Flexural stiffness

$$k_{\theta} = \frac{9E}{32N^3 \cdot b} \times (2M - N \cdot b)^3 \quad (7-2)$$

برای بیان رفتار غیر خطی فنرهای پیچشی، باید قادر باشیم رابطه بالا را میان لنگر خمشی و سختی خمشی برآورد کنیم. در مدل‌های تیر- فنر سه بعدی (مدل B-RS II در شکل ۱-۲) به منظور لحاظ نمودن تاثیر درزه‌های حلقوی از فنرهای غیرخطی، که بیان کننده سختی برشی و حداکثر ظرفیت باربری اتصالات است، استفاده می‌شود. هنگامی که از درزه‌های صاف با بالشتک‌های^{۲۲} مختلف استفاده می‌شود، سختی فنر اتصال بین حلقه‌ها بواسطه سختی برشی این بالشتک‌ها تعیین می‌شود.

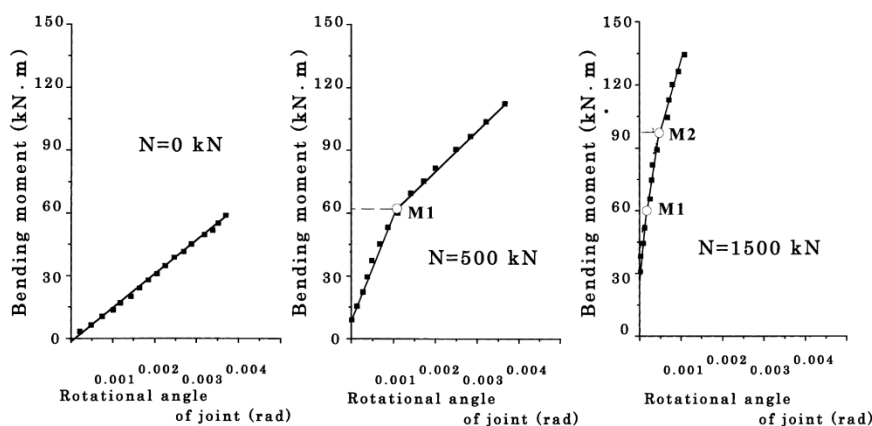
محققین مختلف در تحقیقات خود مقادیر سختی متفاوتی را برای فنرهای پیچشی ارائه داده‌اند. به عنوان مثال Lee و همکارانش در سال ۲۰۰۱ به واسطه نتایج آزمایشات مقیاس کامل انجام شده توسط Chen (۱۹۸۵) و Zhou (۱۹۸۸) به ترتیب بر روی پوشش سگمنتال تونل متروی شانگهای (نمودار شکل ۲-۷) و متروی گوانژو، به بررسی عوامل موثر بر ضریب سختی پیچشی پرداخته و مقدار متداول این ضریب سختی را بین ۴ تا ۳۰ MN.m/rad پیشنهاد داده‌اند. نمودار شکل ۲-۷ حاصل نتایج آزمایش خمش دو نقطه‌ای بر روی مدل آزمایشگاهی تونل شانگهای بدست آمده است که جزئیات بیشتر آن در بخش بعدی ارائه می‌گردد. در سال ۲۰۰۳، Mashimo و Ishimura از یک مدل تیر و فنر سه بعدی برای ارزیابی بارهای داخلی پوشش سگمنتال تونل استفاده کردند. این محققین برای درزه‌های طولی این مدل از مقدار سختی پیچشی ۳۲ تا ۱۲۷ MN.m/rad و برای درزه‌های حلقوی مدل از مقدار سختی برشی ۱/۹۶ MN/m استفاده کردند.

²² Packer



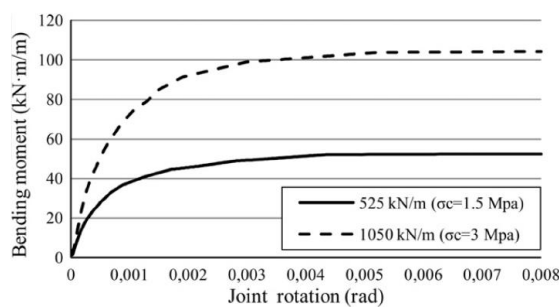
شکل (۲-۷) نتایج آزمایشات سختی درزه بدست آمده از تونل متروی شانگهای (Lee et al., 2001)

در سال ۲۰۰۳، Koyama نیز در توصیف آخرین پیشرفت‌های تکنولوژی تونل‌سازی سپری در ژاپن، انواع روش‌های تحلیلی موجود از جمله روش تیر و فنر پیچشی را مورد نقد و بررسی قرار داد. وی برای محاسبه ضریب سختی فنرهای پیچشی، نمودارهای تک، دو و سه خطی تغییرات لنگر خمشی در مقابل زاویه دوران درزه مسطح سگمنت‌ها را به ترتیب برای نیروی محوری صفر، ۵۰۰ و ۱۵۰۰ kN (در سطح اتصال طولی سگمنت‌ها) ارائه نمود. مقادیر تقریبی ضریب سختی پیچشی بدست آمده از این نمودارها در حدود ۱۵ تا ۱۵۰ MN.m/rad می‌باشد (شکل ۲-۸).



شکل (۲-۸) تغییرات خطی سختی پیچشی با نیروی محوری در سطح اتصال طولی سگمنت (Koyama, 2003)

در راستای استخراج ضریب سختی فنرهای پیچشی از کارهای آزمایشگاهی، Teachavorasinskun و Chub-uppakarn (۲۰۱۰) رفتار دورانی محل تماس سگمنت‌ها در اتصال طولی بولت‌دار پوشش سگمنتال تونلی در بانکوک را تحت آزمایش بارگذاری تک محوری مورد ارزیابی قرار دادند. این محققین بواسطه نتایج آزمایش و با آزمون و خطا بر روی مدل المان محدود پوشش تونل، محدوده ۱ تا ۳ MN.m/rad را برای ضریب سختی پیچشی محل اتصالات طولی پیشنهاد کردند. Arnau و Molins (۲۰۱۱) نیز به منظور بدست آوردن سختی پیچشی، با استفاده از آزمایش برجا و مدلسازی عددی، رفتار درزه‌های طولی مسطح حاوی بالشتک بیتومینه را در پوشش سگمنتال تونل خط ۹ متری بارسلون، مورد مطالعه قرار دادند. یکی از نتایج این تحقیق نمودار تغییرات مقدار لنگر خمشی- زاویه پیچش سطح درزه‌ها، برای مقادیر تنش فشاری ۱/۵ و ۳ MPa، می‌باشد که در شکل ۲-۹ نشان داده شده است. به ادعای این محققین روند غیر خطی ضریب سختی پیچشی این درزه‌ها ناشی از ترکیب رفتار بالشتک بین درزه و بازشدگی درزه در اثر بارگذاری بالای پوشش می‌باشد. به هر حال مقدار سختی مذکور در بخش خطی نمودار تقریباً در حدود ۵۰ تا ۱۰۰ MN.m/rad می‌باشد.

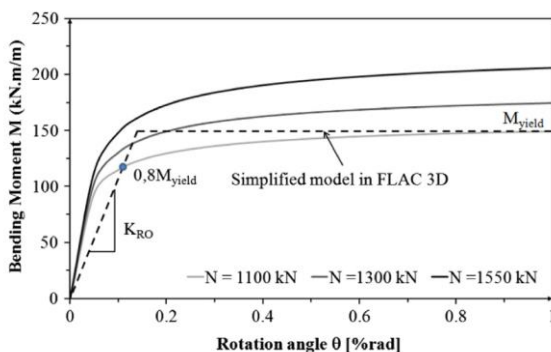


شکل (۲-۹) تغییرات غیر خطی ضریب سختی پیچشی درزه‌های طولی (Arnau & Molins, 2011)

Do و همکارانش (۲۰۱۳-a) به واسطه مدلسازی عددی پوشش سگمنتال، اتصال بین سگمنت‌ها را بصورت مفصل کامل لحاظ نموده و ضخامت پوشش در اطراف محل اتصال را کاهش داده است. این

محققین از روی متوسط نیروی محوری ایجاد شده در پوشش ($N = 1.1 \text{ MN/m}$) و برای ماکزیمم مقدار مجاز زاویه چرخش سگمنت‌ها $\theta = 0.01 \text{ rad}$ در محل اتصال طولی پوشش، بیشترین حد لنگر خمشی پوشش (M_{yield}) را در حدود 150 kN.m/m محاسبه کرده و در نهایت مطابق با نتایج خطی مدلسازی عددی (شکل ۲-۱۰) مقدار ضریب سختی پیچشی را بواسطه فرمول Janssen (۱۹۸۳) که بصورت رابطه ۲-۸ نشان داده شده، در حدود 100 MN.m/rad/m محاسبه کردند.

$$k_{\theta} = 0.8 \frac{M_{yield}}{\theta} \quad (2-8)$$



شکل (۲-۱۰) تغییر ضریب سختی پیچشی با نیروی محوری سطح اتصال طولی سگمنت‌ها (Do et al., 2013-a) با بررسی کمی نتایج تحقیقات انجام گرفته در زمینه ضریب سختی پیچشی درزه‌های طولی پوشش سگمنتال (k_{θ})، ملاحظه می‌شود که بر حسب شرایط سطح تماس درزه و میزان چفت‌شدگی آن، بازه وسیعی از ۱ تا 150 MN.m/rad برای این ضریب پیشنهاد داده شده است.

۲-۲-۵- معایب روش‌های تحلیلی طراحی پوشش سگمنتال

پوشش‌های سگمنتال بتنی تونل باید بر اساس الزامات پایداری سازه‌ای، دوام و هزینه، طراحی شوند. به منظور نائل آمدن بر این الزامات در قالب طراحی، بایستی بتوان نیروهای اعمال شده بر پوشش را در طول

عمر آن تخمین زد. روش‌های فرم بسته بدلیل سادگی برای تخمین بار و طراحی اولیه پوشش تونل مفید هستند. لذا به منظور برآورد توزیع لنگر و بار محوری در پوشش سگمنتال تونل چندین روش تحلیلی توسعه داده شده است. هر کدام از روش‌های تحلیلی ذکر شده در بالا پارامترهای مختلفی داشته و در پروژه‌های متنوعی بکار برده شده‌اند. بررسی روش‌های چهارگانه مذکور مبین آن است که این روش‌ها به خودی خود دارای ایراداتی بوده و بطور اجتناب‌ناپذیری تمایل به عدم قطعیت دارند، که استفاده از آنها به عنوان یک روش دقیق اعمال شرایط تماس سگمنت به سگمنت را با ابهاماتی مواجه می‌سازد. بطور مثال در روش اول (HR) وجود مفصل کامل در محل اتصال، اغراق آمیز بوده و لنگر خمشی صفر را برای آن نقاط لحاظ می‌کند که با واقعیت اتصال تماسی همخوانی ندارد. در روش دوم (UR) ضرایب کاهش اعمال شده بر سختی خمشی کلاً همه پوشش را تحت تاثیر قرار داده و نرم می‌کند، لیکن عملاً چنین اتفاقی فقط در محل اتصال رخ می‌دهد بنابراین استفاده از این روش در برخی موارد با مشکل مواجه است. همچنین ضریب کاهش η یا نسبت موثر سختی خمشی عموماً با توجه به پروفیل درزه و شکل و اندازه سگمنت تعیین می‌شود، هر چند که، در واقع مقدار η با میزان بار وارده تغییر می‌کند. علاوه بر آن، لنگر خمشی بین دو حلقه بسادگی در طول درزه توزیع شده است در حالی که، در واقعیت لنگر خمشی بطور قابل توجهی با تغییر سختی خمشی درزه در نوسان است (Mashimo & Ishimura, 2003). لذا ضریب η ، بواسطه کمی‌سازی تجربیات بدست آمده از پروژه‌های مختلف با شرایط متنوع زمین‌شناسی و مشخصات درزه‌های طولی پوشش سگمنتال تعیین می‌شود. روش سوم علیرغم رویکرد اصولی‌تر نسبت به دو روش قبلی، طول سگمنت‌ها را یکسان فرض کرده که این فرض در بسیاری موارد صحیح نمی‌باشد. هر چند که این روش برای گرفتن ایده اولیه در مورد نیروهای پوشش کاملاً مفید می‌باشد، اما نایستی فراموش کرد که در روابط فوق مقادیر ضرایب α و β را بایستی از تجربیات حاصل از پروژه‌های مشابه قبلی یا از طریق مدل‌های آزمایشگاهی بدست آورد. همچنین رسیدن به جوابی بهینه در این روش نیازمند تکرار زیادی

است. روش چهارم که استفاده از سختی پیچشی در محل اتصالات طولی را پیشنهاد می‌نماید، به نظر منطقی‌تر از سایر روش‌ها است. لیکن مرور ادبیات انجام شده محدوده بسیار وسیع مقادیر k_{θ} را نشان می‌دهد که غالباً وابسته به هندسه و شرایط درزه‌های طولی، وجود بولت، خواص مصالح بین درزه‌ها و نیروهای اعمال شده، می‌باشد. از آنجایی که در محل اتصال سگمنت‌ها، رفتار سازه ترکیبی از برش، خمش و نیروی محوری غالب است، بنظر می‌رسد که رفتار تماس دو قطعه بتنی بطور مشخص باید تابعی از سختی فنرهای نرمال، برشی و پیچشی باشد. بنابراین بنظر می‌رسد در روش چهارم، سختی پیچشی در مدل تیر و فنر سه بعدی و در ترکیب با فنرهای برشی بین حلقه‌ها موثر باشد. به هر حال در فصل بعد نشان داده می‌شود که تغییر این مقادیر k_{θ} در تحلیل تک حلقه، تاثیر زیادی بر روی رفتار سازه نخواهد داشت.

۲-۳- روش‌های میدانی

مدل‌های ذکر شده در بخش قبل ویژگی‌های متفاوتی برای شبیه‌سازی مناسب رفتار سازه‌ای پوشش سگمنتال دارند تا تحت شرایط مختلف بارگذاری مقادیر منطقی و نزدیک به واقعیت از نیروهای داخلی اعضای سازه ارائه نماید. اما با این حال روش‌های یاد شده در روند روبه رشد طراحی سازه‌های زیرزمینی دارای عدم قطعیت فراوانی است. لذا به منظور قطعیت بیشتر در استفاده از روش‌های تحلیلی مذکور از حدود دو دهه پیش برخی مطالعات آزمایشگاهی و میدانی برای ارزیابی رفتار اتصالات پوشش سگمنتال ارائه شده است. در این بخش به بررسی برخی از این روش‌های میدانی پرداخته می‌شود. در جدول ۲-۲ خلاصه‌ای از این مطالعات ارائه شده است.

جدول (۲-۲) مزایا و معایب روش‌های میدانی

ردیف	محقق – سال تحقیق	مورد مطالعاتی	فرضیات	عمده یافته‌ها
۱	Cheng, 1985 و Zhou, 1988	تونل مترو و بزرگراه شانگهای	آزمایش بر روی تک حلقه از پوشش تونل مترو و بزرگراه شانگهای	ارزیابی k_{θ} و تاثیر بارگذاری مختلف بر روی ترک‌خوردگی، آب‌بندی و تغییر شکل پوشش
۲	Bolm, et al., 1999	تونل Green heart هلند	آزمایش مقیاس واقعی بر روی سه حلقه از پوشش تحت بار محوری و شعاعی	بررسی عملکرد پوشش سگمنتال تحت بارگذاری‌های مختلف و مقایسه نتایج آن با مدل سه بعدی FEM
۳	Schreyer & Winselmann, 2000	تونل چهارم Elbe	آزمایش مقیاس واقعی بر روی سه حلقه از پوشش تحت بار شعاعی	تعیین رفتار بابررداری پوشش سگمنتال واقعی تعیین حد تغییر شکل بحرانی
۴	Bolm & van Oosterhout, 2001	تونل راه‌آهن Botlek (BRT)	آزمایش مقیاس واقعی بر روی سه حلقه از پوشش تحت بار محوری و شعاعی	برآورد آسیب‌های ایجاد شده در طی فرآیند ساخت و حد بیضوی شدن شعاعی بررسی انتقال بار محوری جک‌های پیشران TBM بین حلقه‌ها ارزیابی تاثیر چیدمان سگمنت‌ها
۵	Lu, et al., 2005	تونل خط ۸ متروی شانگهای	اولین تونل DOT تحت آزمایش مقیاس کامل با سه حلقه	ارزیابی کرنش حلقه، کرنش بولت درزه‌های طولی و حلقوی، تغییر شکل شعاعی و مماسی سازه و ترک خوردگی پوشش
۶	Lu, et al., 2011	تونل شانگهای Changjiang	آزمایش بر روی سه حلقه از پوشش	تعیین ظرفیت بابررداری و تغییر شکل نهایی پوشش سگمنتال و ارزیابی عملکرد درزه‌ها و کیفیت آب‌بندی
۷	Molins & Arnau, 2011	تونل خط ۹ مترو بارسلون	اعمال بار بیشتر توسط جک‌های هیدرولیکی جاسازی شده درون سگمنت، عدم لحاظ اثرات شکل درزه و سختی سگمنت	رفع عدم قطعیت در رفتار درزه‌های پوشش سگمنتال تونل، ارزیابی رفتار پوشش سگمنتال تحت بارگذاری برجای مختلف و امکان‌سنجی بکارگیری فیبرهای فولادی برای تسلیح سگمنت

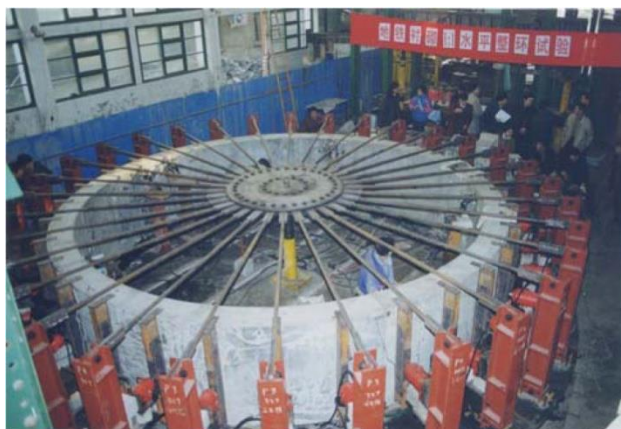
اولین ارزیابی رفتار پوشش واقعی تونل در چین با همکاری دانشگاه Tongji و انجمن تحقیق و طراحی حمل و نقل ریلی و مهندسی تونل شانگهای^{۲۳} (STEDI) بر روی تک حلقه پوشش تونل متروی شانگهای (Cheng, 1985) و متروی گوانژو (Zhou, 1988) انجام گرفت. همانگونه که در شکل ۲-۱۱ نشان داده

²³ Shanghai Tunnel Engineering & Rail Transit Design and Research Institute

شده است، این آزمایش ، شکل گرفت. در طی مرحله طراحی تونل‌های شانگهای آزمایشات مقیاس کاملی توسط Cheng (۱۹۸۵) بر روی یک حلقه با قطر خارجی ۶/۲ متر، ضخامت سگمنت ۳۵ سانتیمتر و عرض ۱ متر انجام شد تا سختی خمشی k_{θ} درزه‌های طولی پوشش تعیین شود. همچنین آزمایشات مقیاس کامل مشابهی توسط Zhou (۱۹۸۸) بر روی پوشش سگمنتال تونل متروی گوانژو با قطر خارجی ۶ متر، ضخامت سگمنت ۳۰ سانتیمتر و عرض ۱/۲ متر انجام شد. در این آزمایش‌ها، توسط ۳۲ جک هیدرولیکی که بصورت شعاعی در اطراف حلقه بسته شده بود، بارگذاری شعاعی و نامتقارنی به پوشش اعمال می‌شد. همچنین این آزمایش‌ها به منظور ارزیابی تاثیر بارگذاری مختلف بر روی ترک‌خوردگی، آب‌بندی و تغییر شکل پوشش و مقایسه نتایج آن با روش‌های تحلیلی انجام گرفت. یکی از نتایج آزمایش Cheng در نمودار شکل ۲-۷ نشان داده شده است.

خلاصه نتایج بدست آمده از آزمایش تونل متروی شانگهای و تحلیل‌های بعدی آن بشرح ذیل است (Lee, et al., 2001):

- سختی درزه، k_{θ} ، تحت لنگر خمشی مثبت نوعاً از ۴۰۰۰ تا ۳۰۰۰۰ kN.m/rad تغییر می‌کند.
- k_{θ} با افزایش لنگر خمشی کاهش می‌یابد.
- k_{θ} با افزایش نیروی محوری افزایش می‌یابد.
- k_{θ} با افزایش سطح پیش تنیدگی بولت‌های فولادی بکار رفته افزایش می‌یابد.
- مقدار k_{θ} برای درزه‌ها تحت لنگر خمشی مثبت بیشتر از درزه‌های تحت لنگر خمشی منفی قرار گرفته می‌باشد نوعاً: $k_{\theta}^{-} = (\frac{1}{2} - \frac{1}{3})k_{\theta}^{+}$

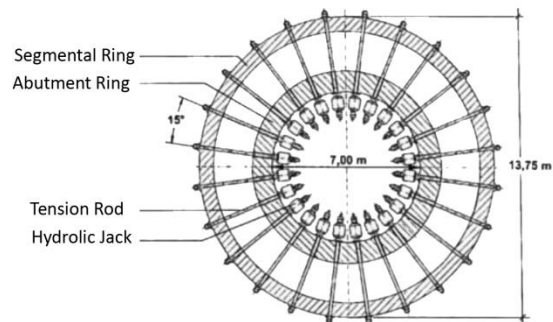
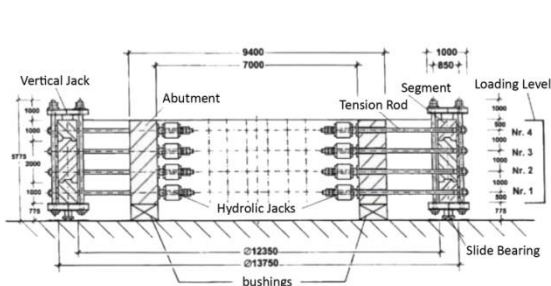


شکل (۲-۱۱) آزمایش مقیاس کامل بر روی تک حلقه سگمنتال متروی شانگهای

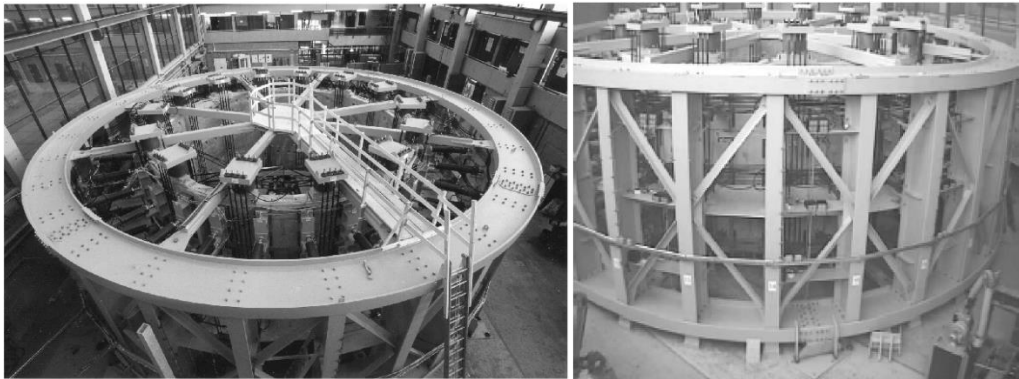
تجربه بعدی در آلمان و بر روی سه حلقه از پوشش چهارمین تونل Elbe در مرکز تحقیقات تجهیزات حمل و نقل زیرزمینی (STUVAtec) انجام شد. قطر خارجی پوشش مورد آزمایش $13/75$ m، عرض سگمنت‌های حلقه وسطی ۲ متر و حلقه‌های کناری ۱ متر، ضخامت سگمنت‌ها ۷۰ سانتیمتر که درزه‌های طولی آن بصورت صاف و درزه‌های حلقوی آن بصورت کام و زبانه می‌باشد. همانگونه که در شکل ۲-۱۲ نشان داده شده است، در این آزمایش به منظور شبیه سازی فشار آب و زمین بصورت بارگذاری شعاعی بر روی پوشش از ۹۶ جک با ظرفیت ۲۰۰ تن استفاده شده است. جابجایی پوشش توسط ۱۹۲ جابجایی سنج متصل به ۲۴ ستون ثابت اندازه گرفته شده و باز شدگی و فشردگی درزه‌ها نیز توسط ۱۰۰ حسگر ارزیابی می‌شود (Schreyer & Winselmann, 2000). این آزمایش با هدف تعیین ظرفیت باربرداری و تغییر شکل حلقه کامل پوشش، ارزیابی محدوده عملکرد قابل قبول درزه‌ها و کیفیت آب‌بندی آنها در اثر بارگذاری‌های مختلف و همچنین بهینه‌سازی آرماتوربندی سگمنت‌ها بوده است.

در سال ۱۹۹۹ در دانشگاه Delft هلند آزمایش مقیاس کاملی بر روی سه حلقه از پوشش سگمنتال تونل Green heart از خط راه آهن سریع السیر جنوب هلند، با قطر خارجی $14/5$ m و ضخامت سگمنت ۶۰ سانتیمتر انجام شد (Bolm, et al., 1999). همچنین از این دستگاه در سال ۲۰۰۱ برای آزمایش بر روی

سه حلقه از پوشش تونل راه‌آهن Botlek (BRT) به قطر خارجی ۹ متر، ضخامت سگمنت ۴۰ سانتیمتر استفاده شد (Bolm & Oosterhout, 2001). عرض هر حلقه مورد آزمایش در این دستگاه ۷۵ سانتیمتر بوده است. آزمایش اول به منظور بررسی عملکرد پوشش تحت بارگذاری‌های متنوع و مقایسه نتایج آن با مدل‌های تحلیلی و عددی و آزمایش دوم با هدف ارزیابی آسیب‌های ایجاد شده در طی فرآیند ساخت و حد بیضوی شدگی پوشش تحت فشار زمین در شرایط خاک نرم و همچنین انتقال بار محوری ایجاد شده توسط جک‌های پیشران TBM بین حلقه‌ها نیز انجام یافته است. شکل ۲-۱۳ دستگاه آزمایش پوشش با مقیاس کامل دانشگاه Delft را در حین انجام دو آزمایش مذکور نشان می‌دهد.



شکل (۲-۱۲) جزئیات آزمایش مقیاس کامل پوشش چهارمین تونل Elbe (Schreyer & Winselmann, 2000)

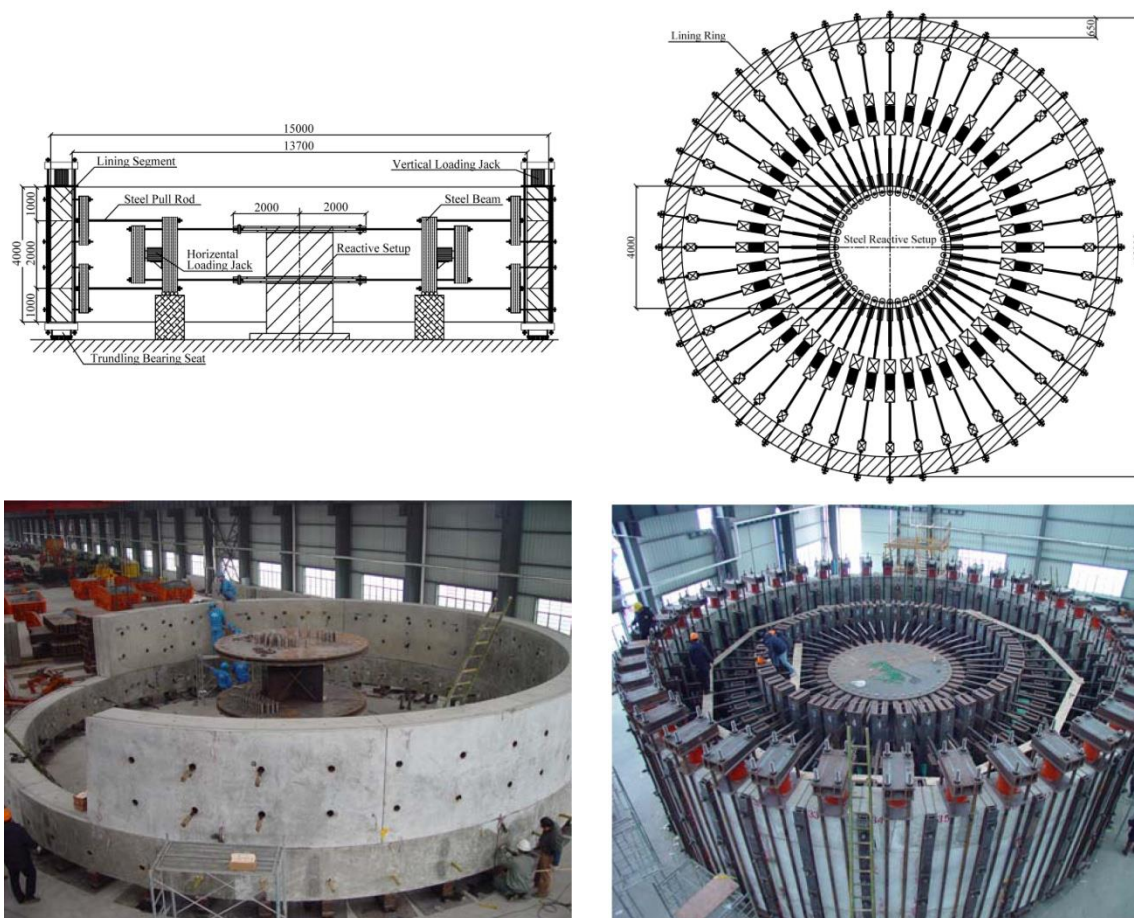


شکل (۲-۱۳) دستگاه آزمایش پوشش سگمنتال مقیاس کامل در دانشگاه Delft در حال انجام آزمایش بر روی پوشش تونل Green Heart (راست) و پوشش تونل راه آهن Botlek (چپ)

در سال ۲۰۱۱، Lu و همکارانش آزمایش دیگری بر روی پوشش تونل Changjiang شانگهای به عنوان بزرگترین تونل سپری که تا آن زمان در چین ساخته شده بود، انجام دادند. آزمایش بر روی سه حلقه با قطر خارجی ۱۵ متر و ضخامت سگمنتها ۶۵ سانتیمتر شکل گرفت. همانگونه که در شکل ۲-۱۴ نشان داده شده است، عرض حلقه وسط ۲ متر و حلقه‌های بالا و پایین ۱ متر می‌باشد. تنش ناشی از زمین و آب بصورت فشار شعاعی نامتقارن حاصل از ۴۴ جک هیدرولیکی با ظرفیت حداکثر ۲۳۰ تن، در اطراف پوشش اعمال می‌گردد. کرنش ایجاد شده در بتن، آرماتورهای داخل بتن و بولت‌های متصل کننده درزه‌های پوشش توسط ۳۴۶ کرنش سنج ارزیابی می‌شود. تغییر شکل شعاعی و جانبی پوشش و همچنین بازشدگی و فشردگی درزه‌های پوشش نیز توسط ۱۵۰ جابجایی سنج اندازه گرفته می‌شود (Lu, et al., 2011).

در تجربه‌ای متفاوت، Molins و Arnau (۲۰۱۱) به منظور رفع عدم قطعیت در رفتار سازه‌ای پوشش سگمنتال تونل، روش جدیدی بر اساس آزمایشات برجای انجام شده بر روی مقطعی از پوشش تونل تازه نصب شده خط ۹ متروی بارسلون ارائه کردند. در تمام آزمایش‌های مقیاس کامل قبلی، شرایط واقعی اندرکنش زمین و تونل همانند آزمایش برجای Molins و Arnau لحاظ نشده و عکس العمل خاک بواسطه

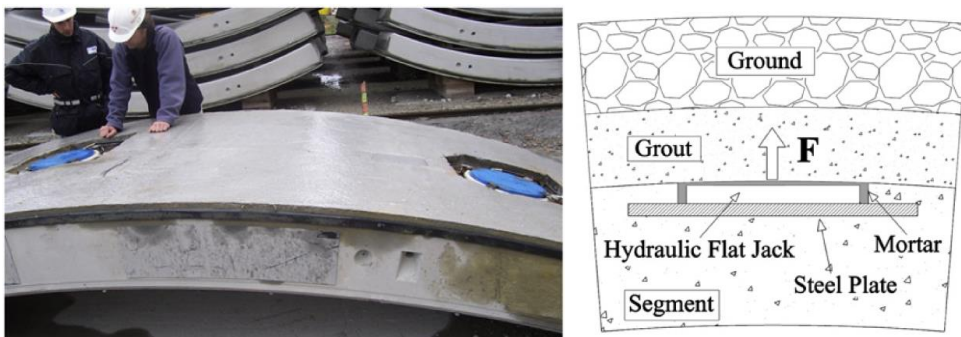
استفاده از سیستم پیچیده جک‌های هیدرولیکی شعاعی شبیه سازی شده بود. قطر خارجی پوشش سگمنتال مورد آزمایش ۱۱/۶ m، ضخامت سگمنت ۳۵ سانتیمتر و عرض سگمنت‌ها ۱/۸ متر می‌باشد.



شکل (۲-۱۴) جزئیات آزمایش مقیاس کامل بر روی پوشش تونل Changjiang شانگهای (Lu, et al., 2011)

همانگونه که در شکل ۲-۱۵ نشان داده شده است، این محققین به منظور اعمال بار بیشتر بخصوص در بخش تاج تونل از جک‌های هیدرولیک صفحه‌ای جاسازی شده درون سگمنت و نزدیک سطح خارجی سگمنت با ظرفیت بار نرمال ۱۷۰ تن، استفاده کردند. در حلقه بارگذاری شده، بارهای ایجاد شده در هر سگمنت بواسطه دو بارسنج نصب شده در $\frac{1}{4}$ و $\frac{3}{4}$ طول هر سگمنت، و جابجایی آن بواسطه ۱۵ کشیدگی سنج و کرنش‌های آن در راستای حلقوی از طریق ۱۲ کرنش سنج در راستای طولی توسط ۲ کرنش سنج

برداشت می‌شود. همچنین جابجایی برشی و نرمال درزه‌های طولی توسط جابجایی سنج‌های مکانیکی برداشت شده است. هدف از انجام این آزمایش ارزیابی رفتار پوشش سگمنتال تحت بارگذاری برجای مختلف و امکان‌سنجی بکارگیری فیبرهای فولادی برای تسلیح سگمنت می‌باشد.



شکل (۲-۱۵) آزمایش بیش بارگذاری برجا بر روی پوشش سگمنتال (Molins & Arnau, 2011)

روش‌های میدانی جزو روش‌های دقیق برای طراحی و ارزیابی رفتار پوشش در مقابل بارهای اعمال شده در پروژه خاصی می‌باشد. این روش بسیار پر هزینه بوده و به لحاظ استفاده درست از ابزارهای دقیق مناسب، پیچیده می‌باشد. این عوامل در بسیاری موارد توجیه‌پذیری این روش را بخصوص برای پروژه‌های متداول تونل‌سازی مکانیزه با مشکل مواجه می‌سازد. بنابراین، روش‌های میدانی غالباً برای مقاصد طراحی و در پروژه‌های خاص استفاده شده است.

۲-۴- روش‌های آزمایشگاهی

همان‌طور که مشاهده می‌شود، بواسطه روش‌های برجا و مقیاس کامل محاسبه سختی خمشی و سختی جانبی فنرها برای مدل کردن درزه‌های طولی و محیطی بسیار مشکل است. لذا جایگزین این روش‌های پرهزینه برای به‌دست آوردن دقیق سختی‌های خمشی و جانبی، استفاده از آزمایش‌هایی در مقیاس آزمایشگاهی می‌باشد. علاوه بر اعتبار بالای نتایج که ناشی از انجام آزمایش بر واقعیت فیزیکی

نمونه‌هاست، یکی از مهم‌ترین مزایای این روش نسبت به روش آزمایشات میدانی تغییر مشخصات بخش‌های موثر آزمایش و آنالیز حساسیت آنها می‌باشد.

در همین راستا و به منظور درک رفتار مکانیکی درزه‌های پوشش سگمنتال تونل، Tang (۱۹۸۸) یک سری آزمایش در مقیاس آزمایشگاهی بر روی قطعات پوشش سگمنتال انجام داد. این آزمایشات بر روی پوشش کوچک مقیاسی متشکل از ۱۰ حلقه به قطر خارجی ۴۱ سانتیمتر انجام شد. هر حلقه از ۶ سگمنت به ضخامت ۶ میلیمتر و عرض ۱۰ سانتیمتر تشکیل یافته است. به منظور مقیاس نمودن سختی پوشش اصلی، در مدل آزمایشگاهی، جنس سگمنت‌های از آلومینیوم انتخاب شده که بواسطه پیچ‌های فولادی به هم متصل شده‌اند. مطابق شکل ۲-۱۶ بارگذاری بر روی پوشش به دو صورت انجام یافته است: الف) بارگذاری نقطه‌ای از تاج و کف پوشش و ب) مدفون در خاک متراکم به منظور شبیه‌سازی توزیع فشار زمین در اطراف تونل. در این آزمایش چیدمان مختلفی از سگمنت‌ها آزموده شدند.

برای اندازه‌گیری میزان فشار اعمال شده و کرنش‌های ایجاد شده در روی پوشش از فشار سنج و کرنش سنج در سطح خارجی سگمنت‌ها استفاده شده و همچنین برای اندازه‌گیری جابجایی عمودی و افقی پوشش، جابجایی سنج‌هایی در داخل پوشش بکار رفته است.

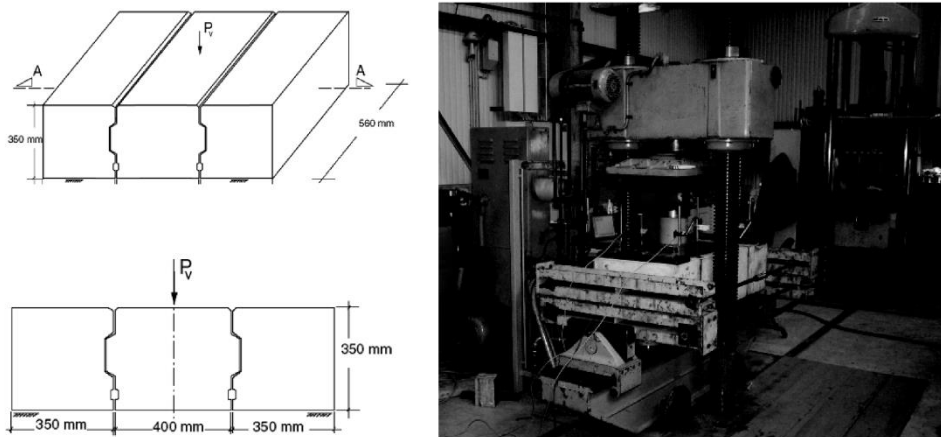
در سال ۲۰۰۱، Lee و همکارانش روش تحلیلی برای پیش بینی نیروهای داخلی و جابجایی‌های یک پوشش سگمنتال تونل دایره‌ای ایجاد شده توسط دستگاه‌های سپری در زمین‌های نرم ارائه نمودند. آنها از روش نیرو برای تعیین نیروهای داخلی و جابجایی‌های ایجاد شده در پوشش استفاده کردند. این محققین به منظور بررسی تاثیر سختی درزه، مقاومت خاک، توزیع و تعداد درزه بر روی عملکرد پوشش از پنج مورد مطالعاتی (فرضی و واقعی) استفاده کردند. آنها بواسطه مدل خود نشان دادند که بهترین مقدار ضریب سختی پیچشی برای مدل آزمایشگاهی Tang در حدود $k_{\theta} = 328.0 \text{ N.m/rad}$ می‌باشد.



شکل (۲-۱۶) مدل آزمایشگاهی پوشش سگمنتال تحت شرایط بارگذاری مختلف؛ (مدل چپ) نقطه‌ای و (مدل راست) مدفون در خاک متراکم (Tang, 1988)

از آنجایی که نیروهای ایجاد شده در محل تماس متأثر از روباره تونل و شرایط تنش برجا می‌باشد، لذا بایستی تغییرات سختی محل اتصال سگمنت‌ها متناسب با مقادیر نیروهای ایجاد شده در سطح اتصال لحاظ گردد. در این راستا Mayer و همکارانش در سال ۲۰۰۷ با این رویکرد و به منظور ارزیابی رفتار اتصالات کام و زبانه سگمنت‌ها بر روی نمونه‌های بتنی آزمایشگاهی دارای بالشتک‌های بیتومینه و لاستیکی، آزمایشات محدودی انجام دادند. نتیجه این آزمایشات بصورت ضرایب سختی برشی و نرمال سطوح اتصال ارائه گردید. Mayer و همکارانش این آزمایشات را در سه محدوده بار نرمال محل تماس صفر تا 0.25 MPa ، بین 0.25 تا 0.64 MPa و مقادیر بالاتر از 0.64 MPa انجام دادند که ضرایب سختی نرمال آن برای محدوده تنش نرمال مذکور به ترتیب 0.34 ، $1/68$ و $2/90 \text{ MPa/mm}$ بدست آمده ولی سختی برشی آن برای تمامی مقادیر بار نرمال مذکور یکسان و برابر با 0.01 MPa/mm ارائه شده است. شکل ۲-۱۷ آزمایش مذکور را نشان می‌دهد.

در این آزمایش همانگونه که در شکل ۱۸-۲ نشان داده شده است تا لحظه شکست برآمدگی زیر کام در سگمنت مادگی، تغییر ملموسی در تنش و جابجایی برشی ثبت نشده و لذا مقدار سختی برشی برای آن ثابت لحاظ شده است.



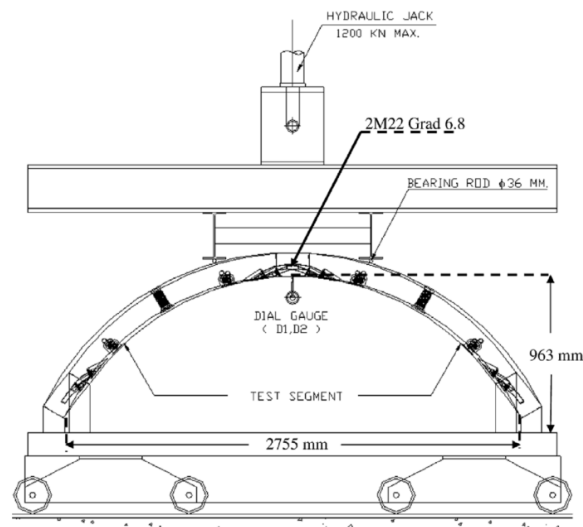
شکل (۱۷-۲) آزمایش برش بر روی درزه‌های با اتصال کام و زبانه (Mayer, et al., 2007)



شکل (۱۸-۲) نتیجه آزمایش برش بر روی درزه‌های با اتصال کام و زبانه در تنش نرمال ثابت (Mayer, et al., 2007)

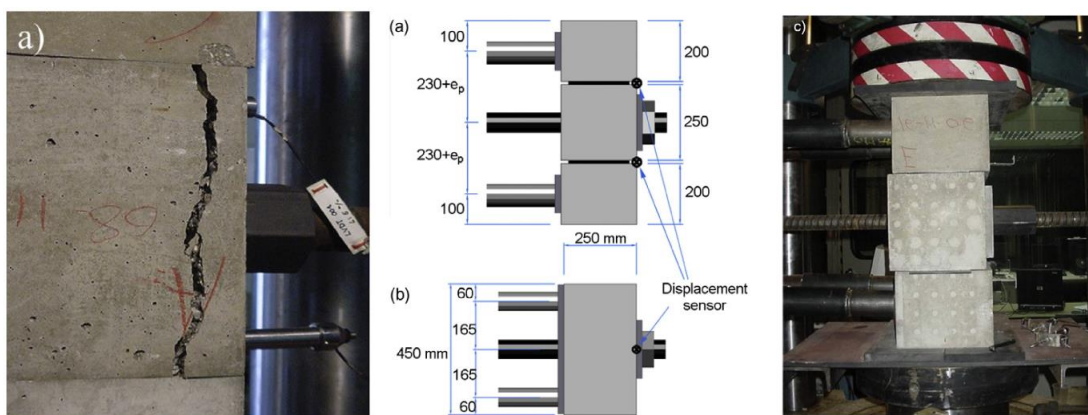
به منظور ارزیابی مقدار ضریب سختی پیچشی درزه‌های طولی پوشش سگمنتال یکی از تونل‌های شبکه تامین آب بانکوک، Teachavorasinskun و Chub-uppakarn (۲۰۱۰) یک آزمایش فشاری تک محوری بر روی نیم حلقه‌ای متشکل از دو سگمنت که با دو بولت فلزی به هم متصل شده را ترتیب دادند. این

محققین بواسطه مقایسه رابطه بین نیرو و تغییر شکل عمودی برداشت شده از آزمایش با نتایج مشابه حاصل از تحلیل آزمون و خطای مدل المان محدود پوشش با ضرایب پیچشی مختلف، در نهایت مقدار این ضریب سختی را بین ۱ تا ۳ MN.m/rad ارائه نمودند. در شکل ۲-۱۹ نمای شماتیکی از آزمایش مذکور ارائه شده است.



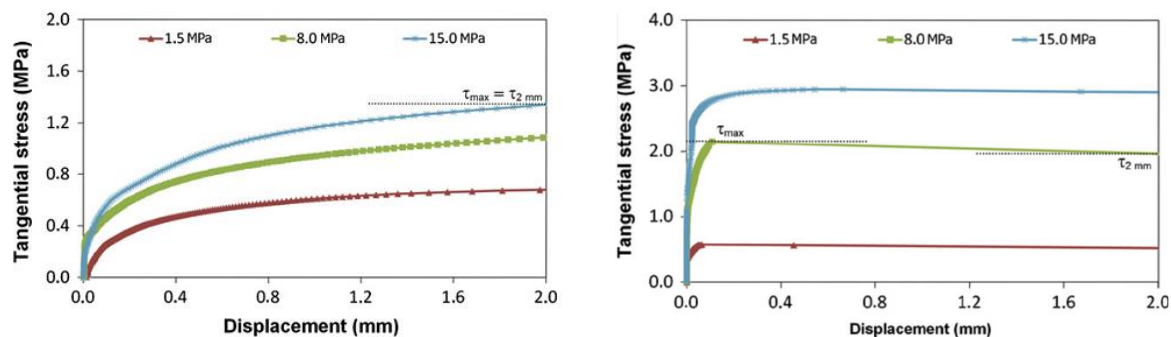
شکل (۲-۱۹) پیکربندی آزمایش فشاری تک محوری بر روی نیم حلقه پوشش سگمنتال (Teachavorasinskun & Chub-uppakarn, 2010)

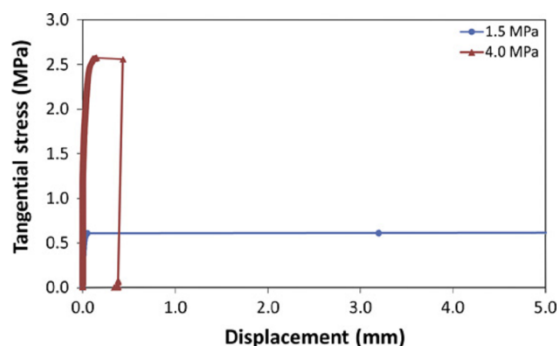
به منظور بررسی تاثیر بالشتک بین اتصالات سگمنت بر روی رفتار پوشش یکسری آزمایشاتی توسط Cavalaro در سال ۲۰۰۹ انجام شده و در سال ۲۰۱۲ به کمک Aguado تکمیل شد. این محققین بلوک‌های بتنی را که میان آنها انواع مختلف بالشتک‌های لاستیکی و بیتومینه قرار داشت، تحت تنش‌های نرمال ۱/۵، ۸ و ۱۵ MPa مورد آزمایش برشی قرار دادند.



شکل (۲-۲۰) آزمایش برش درزه بر روی بلوک‌های بتنی حاوی بالشتک‌های لاستیکی و بیتومینه و مکانیسم شکست آن (Cavalaro & Aguado, 2012)

نتایج این آزمایشات بصورت تغییرات جابجایی برشی در مقابل تنش برشی برای سه تنش نرمال مذکور ارائه شده است (شکل ۲-۲۱). این محققین علاوه بر آزمایش بر روی سطح تماس خالص بتن (بدون بالشتک)، همچنین به بررسی مکانیسم شکست نمونه‌ها در اثر استفاده از بالشتک پرداختند. آنها برای حالت تماس خالص بتن با بتن، مقادیر ضریب اصطکاک 0.56 را برای تنش نرمال $1/5$ MPa و مقدار 0.62 را برای تنش نرمال 4 MPa ارائه نمودند. مقادیر ارائه شده در محدوده توصیه شده برای تماس مستقیم دو سطح بتن پیش ساخته می‌باشد (ACI, 2005 و Tsoukantas and Tassios, 1989).





شکل (۲-۲۱) تغییرات جابجایی برشی - تنش برشی بدست آمده از آزمایش برش درزه (Cavalero & Aguado, 2012)

بر اساس تحقیقات Cavalero (۲۰۰۹) که در بالا تشریح شد، Molins و Arnau (۲۰۱۱) از این رفتار اتصالات حلقوی بالشتک‌دار که بصورت تغییرات تنش مماسی حداکثر در مقابل جابجایی برشی برای تنش فشاری نرمال ۱۵ MPa ارائه شده بود، برای سختی برشی درزه‌های حلقوی مدل خود استفاده کردند. مقدار سختی برشی بدست آمده در این بار نرمال بالا، حدود ۱۰ MPa/mm می‌باشد. همچنین Do و همکارانش (۲۰۱۳-a) بر اساس کارهای Cavalero و Aguado (۲۰۱۲) بر روی سطح تماس بالشتک‌دار سگمنت‌های تونل L9 بارسلون، به بررسی فاکتورهای موثر بر پوشش سگمنتال تونل پرداختند. در این تحقیق آنها برای تنش نرمال ۲/۷۵ MPa، محدوده ضریب سختی نرمال را از ۱۰۰ تا ۳۰۰۰ MN/m و ضریب سختی برشی را نیز از ۱۳۰ تا ۵۵۰۰ MN/m برای سطح تماس با بالشتک لاستیکی و بیتومینه و سطح تماس خالص بتن با بتن (بدون بالشتک)، تغییر دادند. Do و همکارانش (۲۰۱۳-b) در مدل سه بعدی برای تمامی اتصالات طولی و حلقوی از مقادیر ثابت سختی نرمال و برشی به ترتیب معادل با ۵۰۰ و ۱۰۵۰ MN/m استفاده کردند.

در جدول ۲-۳ خلاصه‌ای از برخی روش‌های آزمایشگاهی مربوط به ارزیابی تاثیر درزه‌های پوشش سگمنتال ارائه شده است.

جدول (۲-۳) مزایا و معایب روش‌های آزمایشگاهی

ردیف	محقق	فرضیات	عمده یافته‌ها
۱	Tang, 1988	اعمال شرایط بارگذاری نقطه‌ای و گسترده (در اندرکنش با خاک) بر روی پوشش با چیدمان متنوعی از سگمنت‌ها	تعیین تنش و کرنش در سطح خارجی سگمنت‌ها و جابجایی پوشش در شرایط مختلف
۲	Lee et al., 2001	۵ مورد مطالعاتی (فرضی و واقعی) با شرایط زمین نرم- تعیین نیروهای داخلی و جابجایی ایجاد شده در پوشش سگمنتال با استفاده از روش نیرو	ارزیابی تاثیر سختی، مقاومت خاک، توزیع و تعداد درزه‌ها و همچنین سختی درزه‌های غیریکنواخت بر روی عملکرد پوشش سگمنتال
۳	Mayer, et al., 2007	ارزیابی رفتار اتصالات کام و زبانه سگمنت‌ها بر روی نمونه‌های بتنی آزمایشگاهی دارای بالشتک‌های بی‌تومینه و لاستیکی	ارائه ضرایب سختی برشی (ثابت) و نرمال (متغیر) برای سه بار نرمال متفاوت
۴	Teachavorasinskun & Chub-uppakarn, 2010	آزمایش فشاری تک محوری بر روی نیم حلقه‌ای متشکل از دو سگمنت متصل شده با دو بولت فلزی	به واسطه تحلیل تکراری یک سری تحلیل‌های المان محدود برای رسیدن به ضریب سختی پیشگی متناسب با نتایج آزمایش
۵	Cavalaro, 2009 Cavalaro & Aguado, 2012	ارزیابی رفتار درزه‌های سگمنت با سطوح اتصال صاف با و بدون بالشتک‌های بی‌تومینه و لاستیکی	برداشت تغییرات جابجایی برشی- تنش برشی برای سه تنش نرمال مختلف

۲-۵- روش‌های عددی طراحی پوشش سگمنتال

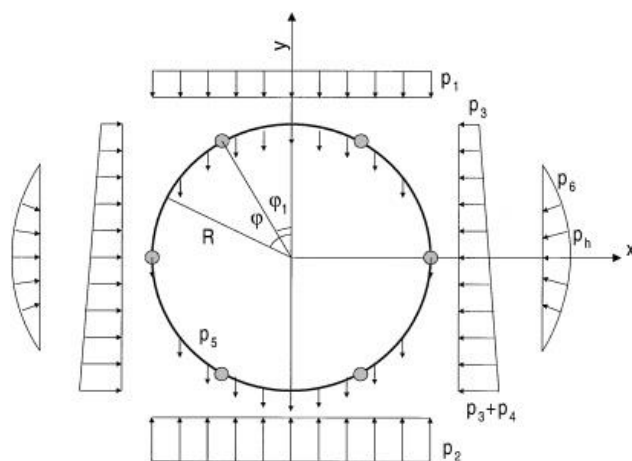
روش‌های عددی برای پیش بینی نیروهای سازه‌ای ایجاد شده در پوشش تونل بر اساس روش‌های تحلیلی ایجاد شده‌اند. در واقع روش‌های عددی برخی نواقص و ایرادات روش‌های تحلیلی را به طرقتی رفع می‌نمایند. برخی از این روش‌های تحلیلی از مدل‌های ساده‌ای که سازه پوشش تونل در آنها بصورت یک لوله صلب مدفون در مدل پیوسته زمین لحاظ شده، پیروی می‌کنند (Muir و Morgan, 1961 و Wood, 1975 و Duddeck & Erdmann, 1985). از آنجایی که اندرکنش بین پوشش و زمین تغییر شکل‌های شعاعی و مماسی را محدود کرده و عکس العمل آن بصورت تنش در زمین ظاهر می‌گردد (Bolm و همکارانش، ۱۹۹۹)، انتقال نیرو از پوشش به زمین، چگونگی اعمال تنش به سازه و به تبع آن پاسخ پوشش را تحت تاثیر قرار می‌دهد. اندرکنش زمین- پوشش معمولاً بواسطه استفاده از به اصطلاح

مدل‌های حلقه قرار گرفته بر روی بستر ارتجاعی^{۲۴} لحاظ می‌گردد. در این مدل‌ها عکس العمل زمین بوسیله فنرهای مجزایی که از تئوری Winkler پیروی می‌کنند، در نظر گرفته می‌شود (Schulze & Duddeck, 1964). راه‌حل تحلیلی این مدل‌ها جوابگوی پیچیدگی پدیده‌های مختلف درگیر با رفتار سازه‌ای پوشش سگمنتال نبوده و قادر به تحلیل شرایط پیچیده‌ای از قبیل تقاطع تونل با لایه‌های مختلف زمین نمی‌باشد. البته با استفاده از روش‌های عددی مانند روش المان محدود می‌توان شرایط پیچیده‌ای مانند بارگذاری متعدد یا استفاده از مصالحی با خواص ویژه یا اثر درزه‌های بین سگمنت‌ها را تا حدودی در تحلیل مدل حلقه و فنر لحاظ نمود. اثر اتصال حلقه‌ها موجب تغییر شکل هماهنگ کل لایه می‌شود، در حالی که در حلقه‌های مجزا حلقه‌های سگمنتال هر یک می‌توانند به طور مجزا تغییر شکل دهند. اتصال حلقه‌ها موجب کاهش تغییر شکل و افزایش لنگر خمشی می‌شود که این موضوع در مدل سازی عددی المان محدود سه بعدی، محسوس‌تر است. به عبارت دیگر برای موارد معمولی که شرایط بارها و سازه در راستای طولی عوض نمی‌شوند، رفتار سازه‌ای سه بعدی سگمنت‌ها تاثیر قابل توجهی بر روی سیستم نداشته و لذا در این شرایط می‌توان به همان مدل‌سازی دو بعدی بسنده کرد. اما برای موارد خاصی همانند بازشدگی در پوشش، بارهای مختلف بر روی حلقه‌های متفاوت (مانند آماس در سطوح جزئی)، شرایط خمشی متغیر برای حلقه‌ها (مثلاً، اگر تزریق دوغاب در فضای خالی پشت به طور صحیح و یکنواخت انجام نگرفته باشد) یا دیگر موارد ویژه، بایستی از مدل‌سازی سه بعدی برای ارزیابی وضعیت نیروهای داخلی و تغییر شکل‌های پوشش سگمنتال، بهره برد. در مدل‌سازی‌های سه بعدی ضرایب سختی اتصالات طولی و حلقوی به واسطه آزمایشات آزمایشگاهی که در آنها از اتصالات واقعی یا محاسبات تئوری استفاده شده، بدست آمده و ضرایب مربوط به فشار جانبی زمین و عکس العمل بستر نیز از مطالعات

²⁴ ring on elastic foundation (ROEF)

موردی که در گذشته در شرایط زمین مشابهی انجام یافته، بدست می‌آید (Mashiro & Ishimura, 2003).

تخمین درست از نیروهای اعمال شده به پوشش تونل گام دیگری از مدل‌سازی پوشش سگمنتال است. غالب سیستم‌های پوشش قطعات بتنی تونل‌های ساخته شده در زمین‌های نرم به واسطه درزگیرهای پلاستیکی در بین درزه‌ها عایق در مقابل نفوذ آب شده‌اند که در این حالت سازه پوشش تونل تحت فشار زمین و آب قرار خواهد گرفت. بنابراین، توزیع فشار زمین و پاسخ سازه‌ای پوشش سگمنتال تونل تحت تنش‌های کل خواهند بود. مشاهدات صحرایی توزیع فشار زمین در اطراف تونل‌های سگمنتی در رس سست (Lee & Ge, 2001) نشان داده شده است که فشارهای زمین می‌تواند همانند شکل ۲-۲۲ ترکیبی از P_1 : فشار عمودی خاک روباره، P_2 : فشار عکس‌العمل در کف پوشش، P_3 : کل فشار جانبی زمین ایجاد شده در تراز تاج پوشش تونل، P_4 : فشار جانبی اضافی زمین ایجاد شده در تراز کف تونل، P_5 : وزن خود پوشش تونل و P_6 : فشار ناشی از مقاومت خاک، باشد.



شکل (۲-۲۲) دیاگرام مدل پوشش سگمنتال تونل (Lee & Ge, 2001)

برای محاسبه نیروهای داخلی پوشش سگمنتال، بغیر از روش حل معادلات الاستیک بواسطه تعادل نیروهای نشان داده شده در شکل ۲-۲۲، می‌توان از روش تیر و فنر^{۲۵} و همچنین مدل سازی عددی نیز مقادیر نیروهای داخلی پوشش سگمنتال را به دست آورد. آنچه که باید در انتخاب کلیه روش‌های معرفی شده همواره مورد توجه قرار بگیرد، مدل کردن درزه‌های یک پوشش سگمنتال به شکل مناسب است. برای وارد کردن نقش درزه‌ها در نیروهای داخلی می‌توان از دو روش اخیر (روش تیر و فنر و مدل سازی عددی) استفاده کرد. برای طراحی سگمنت در موارد عادی مدل سازی با استفاده از روش تیر و فنر کفایت می‌کند. اما در مواردی حساسیت خاصی نسبت به رفتار باربری درزه‌ها وجود دارد لازم است تا رفتار باربری مناسبی برای پوشش سگمنتال تعریف گردد. در این راستا از روش‌های عددی مناسبی مانند اجزای محدود، می‌توان استفاده کرد. اما در هر حالت، تعریف المان‌های اتصال (تماسی)^{۲۶} متناسب با رفتاری منطبق بر واقعیت، کار ساده‌ای نیست.

رفتار دقیق درزه‌ها و تاثیر آن بر روی پاسخ سازه‌ای پوشش شاید بحث برانگیزترین پرسش متون فنی مرتبط با تحلیل سازه‌ای پوشش سگمنتال تونل باشد. اولین کارهای صورت گرفته در این زمینه بررسی اثر درزه‌های طولی بر روی افزایش انعطاف‌پذیری پوشش می‌باشد. به عنوان مثال، Muir Wood (۱۹۷۵) فرمولی را برای کاهش ممان اینرسی لوله صلب بسته به تعداد سگمنت‌های تشکیل دهنده حلقه ارائه داد. مدل‌های اخیر رفتار درزه‌های طولی یک حلقه از پوشش را بوسیله فنرهای پیچشی^{۲۷} قرار گرفته در محل درزه‌ها، لحاظ می‌نمایند (Bolm, 2002, JSCE, 2006 و Ding et al., 2004)، که به راحتی قابل بکارگیری بر روی مدل‌های تیر و فنر می‌باشند. اما همانگونه که Blom (۲۰۰۲) اشاره می‌کند، درزه‌های طولی به دلیل عدم توانایی در انتقال تنش‌های کششی، رفتار غیر خطی پیچیده‌ای از خود نشان می‌دهد.

²⁵ Beam and Spring

²⁶ Contact element

²⁷ Rotational spring

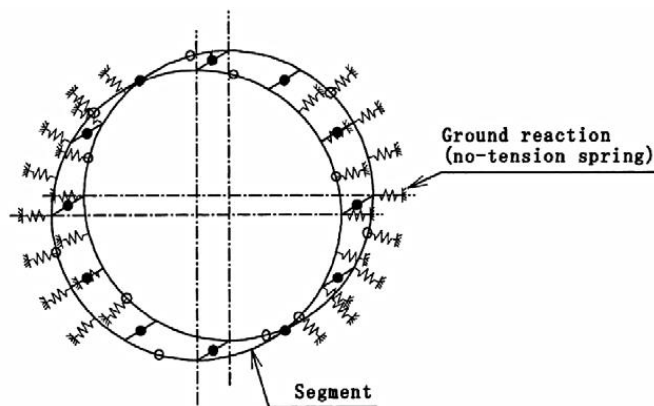
به عبارت دیگر، برای سطح مشخصی از تنش‌های محوری، افزایش لنگر خمشی باعث جدایش^{۲۸} سطح تماس در یک طرف درزه می‌شود (بازشدگی منقار پرنده‌ای در شکل ۲-۵) که این مساله موجب یک رفتار غیرخطی وابسته به تنش محوری خواهد شد. برای درزه مشابه، سطوح مختلف تنش محوری، رفتار پیچشی متفاوتی را ایجاد می‌کند، بنابراین برای جلوگیری از پیچیدگی زیاد بایستی در انتخاب ملاحظات متناسب برای مدل‌های تحلیلی دقت نمود. در نتیجه، مشکل اصلی در استفاده از فنرهای پیچشی در محل درزه‌های طولی پوشش سگمنتال، نیاز آن به اطلاع قبلی از رفتار عملی درزه و دشواری لحاظ نمودن تاثیر سطح تنش محوری معین در پاسخ درزه می‌باشد.

²⁸ Joint gapping

جدول (۲-۴) خلاصه برخی تحقیقات در زمینه روش عددی طراحی پوشش سگمنتال

ردیف	محقق	فرضیات	عمده یافته‌ها
۱	Bolm, 2002	مدل المان محدود سه بعدی منطبق بر نتایج آزمایشات مقیاس کامل لحاظ اندرکنش زمین- پوشش، فشار تزریق و جک های پیشران	استفاده از المان تماس برای اتصالات پوشش ارزیابی اندرکنش بین سگمنت‌ها و تاثیر بالشتک‌های بین درز حلقوی
۲	Zhong et al., 2006	مدلسازی درزه‌های بین سگمنت‌ها بصورت مفصل کامل غیرمنطبق بر واقعیت	بر روی اثرات سازه‌ای درزه‌های پوشش سگمنتال
۳	Klappers et al, 2006.	استفاده از فنرهای پیچشی برای اتصال طولی و فنر غیرخطی تماسی برای اتصال حلقوی در مدل دو بعدی تیر و فنر و مدل سه بعدی المان محدود	لنگر خمشی تقریبا برابر بوده و تغییر شکل دو روش اندکی متفاوت است. برای شرایط بارگذاری و سازه معمول استفاده از مدل های سه بعدی غیر ضروریست.
۴	Karinski & Yankelevsky, 2007	شبیه‌سازی محیط اطراف بصورت بستر ویسکوالاستیک با فرض بار تسلیم برای تغییر شکل پلاستیک مفاصل و بار شکست برای گسیختگی و فروریزش سازه	انجام تحلیل دینامیکی پوشش سگمنتال مدفون در خاک با استفاده از مفاصل الاستوپلاستیک برای اتصالات سگمنت‌ها
۵	Mo & Chen, 2007	مدلسازی زمین اطراف توسط توده صلب برای کنترل تغییر شکل سازه تونل المان تماسی بین آنها شامل نیروی عمودی و نیروی لغزشی اصطکاکی	بررسی اثر جابجایی احتمالی سگمنت‌ها در اندرکنش با برس‌های انتهایی سپر تحت نیروهای ناشی از جک‌های پیشران، فشار تزریق پشت پوشش و فشار زمین اطراف
۶	Teachavorasinskun & Chub-uppakarn, 2010	مدلسازی سگمنت‌ها با المان‌های پوسته و درزه‌ها بواسطه فنرهای پیچشی با ظرفیت انتقال لنگر خمشی و مقایسه با نتایج آزمایش آزمایشگاهی	یک سری تحلیل‌های المان محدود سه بعدی برای توصیف اندرکنش بین درزه‌ها و سگمنت‌ها
۷	Wang et al., 2011	استفاده از مدل پوسته- فنر عدم لحاظ ضخامت سگمنت بواسطه المان پوسته	مدلسازی اتصالات سگمنت‌ها در تقاطع تونل با چاهک عمودی و بررسی توزیع مجدد تنش بر روی سگمنت‌ها و نیروهای داخلی بولت‌های شعاعی و جانبی
۸	Arnau & Molins, 2011	مدلسازی بر اساس روش المان پوسته- فنر اعمال شرایط مرزی (اندرکنش پوشش با زمین) با فنرهای مماسی و شعاعی	مدلسازی دوبعدی (تاثیر سگمنت‌ها در یک حلقه) و مدلسازی سه بعدی (تاثیر حلقه‌های متوالی) به منظور بررسی صحت نتایج آزمایشات برجا
۹	Do, et al. 2013-a	مدلسازی بواسطه المان تفاضل محدود دوبعدی استفاده از فنرهایی با سختی پیچشی، برشی و نرمال در محل اتصال سگمنت‌ها	ارزیابی تاثیر تعداد و چیدمان درزه‌ها و نسبت تنش برجا بر روی نیروهای داخلی سگمنت
۱۰	Do, et al. 2013-b	مدلسازی سه بعدی چیدمان مختلف سگمنت‌ها با روش تفاضل محدود استفاده از فنرهای پیچشی، برشی و نرمال در درزه‌های طولی و حلقوی اعمال فشار تزریق اطراف پوشش و فشار پیشرانی دستگاه حفار	تخمین میزان نشست زمین با مدل سه بعدی پیشنهادی ارزیابی تاثیر شرایط بارگذاری مختلف، چیدمان سگمنت‌ها در یک حلقه و در حلقه‌های متوالی بر روی جابجایی و نیروهای داخلی پوشش

به منظور دستیابی به شبیه‌سازی بهتر پاسخ واقعی درزه‌ها، افراد زیادی از روش‌های عددی و مدل‌های المان محدود پیچیده‌ای استفاده کردند. Vervuurt و همکارانش (۲۰۰۲) درزه‌های بین سگمنت‌های المان‌های پوسته را با استفاده از المان‌های تیر بتنی بدون هیچ مقاومت کششی، مدل کردند، در حالیکه Van Empel و Kaalberg (۲۰۰۲) ترکیبی از سه فنر را برای مدل سازی آرایش ویژه درزه‌های مورد مطالعه‌شان بکار گرفتند. در این روش‌ها سازه توسط روش المان محدود مدل شده و رفتار درزه‌ها معمولاً بوسیله المان‌های تماسی^{۲۹} جاسازی شده در محل درزه‌ها که اجازه انتقال تنش کششی را نمی‌دهند، لحاظ می‌شود (Bolm et al., 1999 و Plizzari & Tibeti, 2006). این روش پدیده فیزیکی رخ داده در درزه را ارائه می‌دهد، بنابراین، می‌توان ادعا کرد که در حال حاضر واقعی‌ترین تخمین از رفتار درزه استفاده از روش المان‌های پوسته با فنرهایی است که اجازه انتقال تنش کششی را نمی‌دهد (شکل ۲-۲).



شکل (۲-۲۳) فنرها در مدل‌های سنتی اندرکنش سازه پوشش سگمنتال و زمین

علاوه بر رفتار درزه‌ها، پارامتر بسیار موثر دیگر در پاسخ سازه‌ای پوشش تونل، اندرکنش بین زمین و سازه می‌باشد. یک حلقه از پوشش سگمنتال، سازه‌ای چند مفصلی می‌باشد که تعادل آن در مقابل نیروها، بستگی به پاسخ زمین اطراف دارد. اندرکنش زمین-سازه شرایط مرزی سازه را تعیین می‌نماید و بنابراین

²⁹ Interface element

تغییرات آن پاسخ سازه‌ای پوشش را اصلاح خواهد نمود. دو تکنیک غالب برای مدل‌سازی این شرایط مرزی وجود دارد:

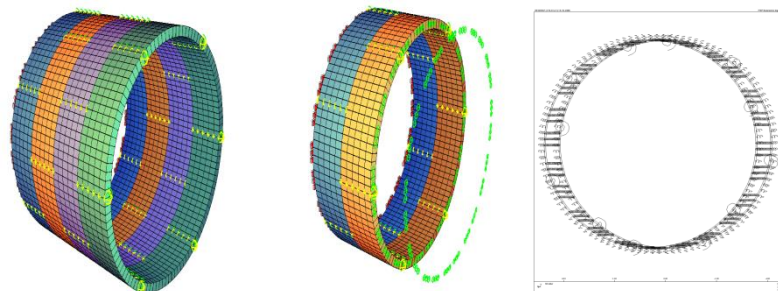
۱. استفاده از فنرهای مجزایی که از فرضیه Winkler تبعیت می‌کنند،

۲. مدل‌سازی مستقیم زمین با استفاده از المان‌های محدود.

مدلسازی کامل زمین با المان‌های محدود اساساً برای تحلیل‌هایی که نشست سطح زمین یا تخمین بارهای دقیق تونل مدنظر باشد، مورد استفاده قرار می‌گیرد (مانند: Broere & Brinkgreve, 2002, Kasper & Meshke, 2004 و Do, et al., 2013)، در حالی که مدل‌های فنر معمولاً برای تحلیل‌هایی که تمرکز بر روی رفتار سازه‌ای پوشش تونل می‌باشد، مورد استفاده قرار می‌گیرد (مانند: Blom et al., 1999 و Plizzari & Tiberti, 2006). هر چند که نتایج مدل‌سازی کامل زمین اطراف بایستی دقت بالایی داشته باشد (البته به شرط اینکه شرایط اندرکنش بدقت انتخاب گردد)، اما زمانی که رفتارهای غیرخطی زمین و سازه نیز در تحلیل مدنظر باشد، این کار نیازمند محاسبات کامپیوتری سنگینی خواهد بود. علاوه بر آن، بررسی پاسخ سازه‌ای پوشش نیازمند ارزیابی چندین سازه، زمین و سناریوهای مختلف بارگذاری است که انجام تمامی این کارها بواسطه مدل‌سازی کامل زمین کار سخت و خسته‌کننده‌ای می‌باشد.

Zhong و همکارانش (۲۰۰۶) بررسی تحلیلی بر روی اثرات سازه‌ای درزه‌های پوشش سگمنتال توسط برنامه المان محدود PLAXIS انجام داد. آنها در این تحلیل، درزه‌های بین سگمنت‌ها را بصورت مفصل کامل مدل کردند که با عنایت به قابلیت انتقال هرچند جزئی لنگر توسط درزه‌ها، این شبیه‌سازی منطبق بر واقعیت نبوده است. همچنین در سال ۲۰۰۶، Klappers و همکارانش چیدمان خاصی از پوشش سگمنتال تونل را تحت بارهای طراحی به دو روش دو بعدی (با استفاده از مدل تیر و فنر) و سه بعدی (بواسطه المان‌های پوسته با المان محدود) مورد تحلیل قرار دادند (شکل ۲-۲۴). این محققین برای

مدل‌سازی درزه‌های طولی از فنرهای پیچشی با سختی بدست آمده از روابط ۲-۶ و ۲-۷ استفاده کرده و برای درزه‌های حلقوی از المان‌های تماسی استفاده نمودند. بدلیل وجود بالشتک‌هایی در بین حلقه‌ها، ضریب اصطکاک $\mu = 0.5$ با توجه به برداشت‌های آزمایشگاهی ($0.3 < \mu < 0.7$) قبلی برای درزه‌های حلقوی استفاده شده است. مطابق با تحقیقات Bolm (۲۰۰۲) این رفتار ترکیبی از عملکرد داوول، سیستم نر و مادگی^{۳۰} و اصطکاک جانبی در طول سطح اتصال که ناشی از تماس بالشتک‌های بین سگمنت‌ها می‌باشد، را ارائه می‌کنند. تحلیل انجام شده توسط Klappers و همکارانش (۲۰۰۶) در نهایت نشان داد که مقدار لنگر خمشی بدست آمده از دو تحلیل دو بعدی و سه بعدی مشابه هم بوده و تغییر شکل پوشش در دو حالت اختلاف اندکی باهم دارد. لذا این محققین نتیجه گرفتند، در مدل‌های معمول که در آنها شرایط سازه و بارگذاری در طول تونل تغییر نمی‌کند، رفتار سازه‌ای سه بعدی سگمنت تاثیر چندانی بر روی سیستم پوشش نداشته و بنابراین مدل‌سازی سه بعدی ضرورتی ندارد.



شکل (۲-۲۴) مدل دو بعدی تیر و فنر (راست) و سه بعدی المان محدود (چپ) از پوشش سگمنتال تونل (Klappers, et al., 2006)

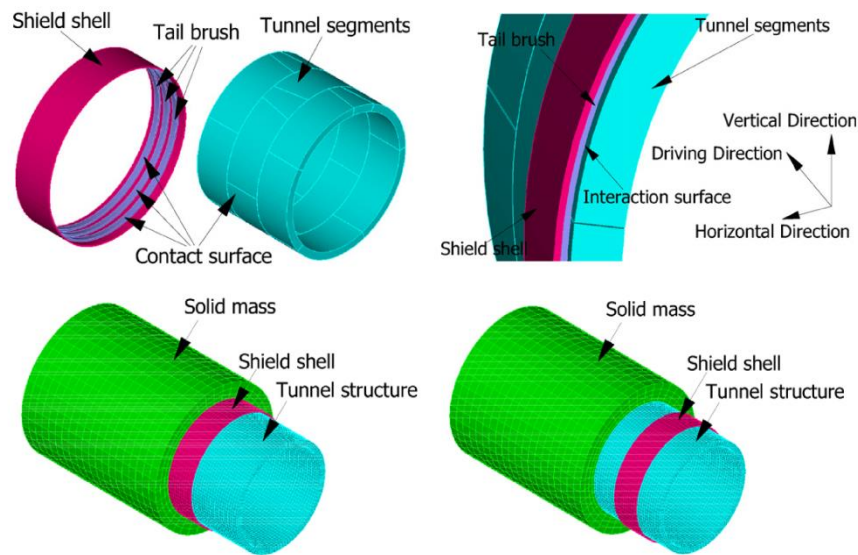
به منظور تحلیل دینامیکی پوشش سگمنتال مدفون در خاک Karinski و Yankelevsky (۲۰۰۷) از مدل مفصل‌های الاستوپلاستیک برای اتصالات سگمنت‌ها استفاده کردند. آنها پوشش را متشکل از قطعات یکسان قوس‌دار صلبی فرض کردند که با مفاصل الاستوپلاستیک بهم متصل هستند. در این تحلیل محیط

³⁰ Socket system

اطراف پوشش بصورت بستر ویسکوالاستیک با ضرایبی که فقط وابسته به مختصات می‌باشند، شبیه سازی شده است. مساله به یک سیستم غیرخطی جبری کاهش می‌یابد که معادلات دیفرانسیل آن بوسیله روش مشتق‌گیری جز بجزء مستقیم با بررسی تدریجی وضعیت مفاصل (بارگذاری/باربرداری و الاستیسیته/پلاستیسیته) حل می‌شود. در تحلیل‌های انجام شده بار تسلیم باری لحاظ شده است که باعث تغییر شکل پلاستیک مفاصل شده و همچنین بار شکست باعث گسیختگی و فروریزش سازه می‌گردد.

Chen و Mo (۲۰۰۸) به منظور بررسی اثر جابجایی احتمالی سگمنت‌ها در اندرکنش با برس‌های انتهایی سپر (جمع شدگی و فشارش آنها) تحت نیروهای ناشی از فشار جک‌های پیشران، فشار تزریق پشت پوشش و فشار زمین اطراف، بر اساس نتایج تحقیقات Blom و همکارانش (۱۹۹۹)، Sramoon و Sugimoto (۲۰۰۲)، Qin و همکارانش (۲۰۰۴) و Zhang و همکارانش (۲۰۰۶)، مدل سه بعدی المان محدود پیچیده‌ای از ۹ حلقه سگمنتال از تونل سپری مترو گوانگژو^{۳۱} ایجاد کردند. در این مدل جزئیاتی مانند: بولت‌های طولی و حلقوی، آب‌بندی پوشش، سگمنت کلید و دنباله سپر لحاظ شده است (شکل ۲-۲۵).

³¹ Guangzhou subway



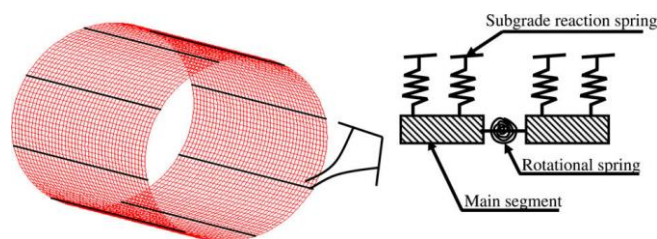
شکل (۲-۲۵) سطوح تماس و جزئیات مدل پوشش سگمنتال قبل و بعد از حرکت سپر (Mo & Chen, 2007)

در این مدل Mo و Chen فشار تزریق پشت پوشش را بصورت خطی از مقدار فشار واقعی تزریق در انتهای سپر تا مقدار متعادل با فشار زمین در طول تونل کاهش دادند. آنها توده صلب را اطراف تونل بجای زمین قرار دادند تا بواسطه مقاومت ناشی از اندرکنش بین سگمنت‌ها و توده صلب، تغییر شکل سازه تونل در مقابل فشار زمین را کنترل نمایند. لذا برای اندرکنش سگمنت‌ها با این توده صلب فراگیر از المان‌های تماسی نیرو^{۳۲} استفاده نمودند که المان‌های مذکور شامل نیروی عمودی و نیروی لغزش اصطکاکی می‌باشد که در طی فرایند تکرار^{۳۳} توسط خود برنامه ADINA محاسبه می‌شود. آنها در نهایت به این تصمیم رسیدند که توده صلب با سطوح تماس را می‌توان با فنرهای شعاعی و مماسی جایگزین نمود تا نماینده عکس العمل زمین باشند همچنین بجای سختی این فنرها می‌توان از مدول یانگ توده صلب استفاده کرد که این مدول در برخورد با لایه‌های مختلف زمین تغییر می‌یابد.

³² Contact force

³³ Iterative process

یکی از تحقیقات منطبق بر برداشت‌های آزمایشگاهی توسط Teachavorasinskun و Chub-uppakarn (۲۰۱۰) و به منظور توصیف اندرکنش بین درزه‌ها و سگمنت‌ها انجام گرفت. این محققین با ترکیب نتایج آزمایش فشار تک محوری بر روی نیم حلقه‌ای متشکل از دو سگمنت بولت شده به هم و مدل عددی المان محدود، مقدار ضریب سختی پیچشی را با آزمون و خطا در حدود ۱ تا ۳ MN.m/rad ارائه نمودند. در این مدلسازی آنها سگمنت‌ها را با استفاده از المان‌های پوسته و درزه‌ها را توسط المان‌های اندرکنشی که در آن ظرفیت انتقال لنگر توسط فنرهای پیچشی تعیین می‌شود، مدل کردند (شکل ۲-۲۶).



شکل (۲-۲۶) مدل پوسته- فنر (Teachavorasinskun & Chub-uppakarn, 2010)

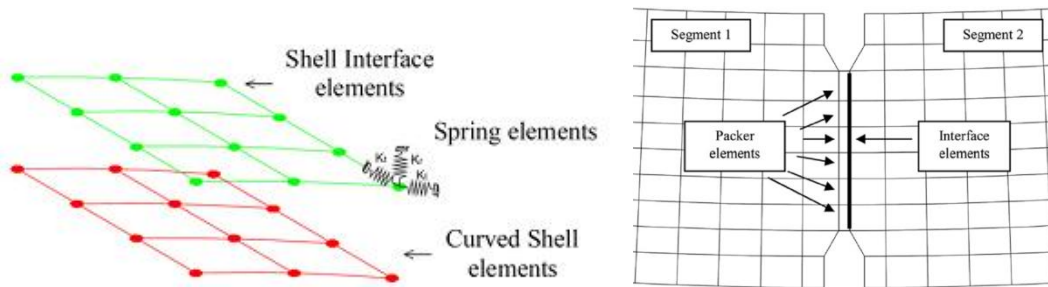
محققین دیگری نیز از مدل پوسته و فنر توسعه یافته توسط Huang و همکارانش (۲۰۰۵) بخصوص برای مدل‌سازی سه بعدی المان محدود اتصالات سگمنت‌ها در محل تقاطع تونل‌ها و بررسی توزیع مجدد تنش بر روی سگمنت‌ها و نیروهای داخلی ایجاد شده در بولت‌های شعاعی و جانبی در سطح تماس سگمنت‌ها، استفاده نمودند (Wang, et al., 2011). دلیل استفاده از این مدل بجای مدل تیر- فنر بخاطر عدم توانایی در انعکاس دقیق توزیع عرضی تنش در پوشش سگمنتال با الگوی درزه‌های شطرنجی می‌باشد. همچنین با استفاده از المان پوسته در شبیه‌سازی سگمنت‌ها می‌توان تغییر شکل جانبی سگمنت‌ها را نیز لحاظ نمود. از سوی دیگر لازم بذکر است که مدل پوسته- فنر قادر به لحاظ نمودن ضخامت سگمنت‌ها نبوده و صرفاً به منظور بکارگیری فنرها برای شبیه‌سازی درزه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد.

Molins و Arnau (۲۰۱۱) به منظور بکارگیری نتایج آزمایشات برجای خود برای ارزیابی نیروهای داخلی و جابجایی‌های ایجاد شده در پوشش، رفتار درزه‌های بین سگمنت‌ها و ترک‌های احتمالی ایجاد شده در پوشش تحت شرایط بارگذاری مختلف، مدل دو بعدی (تاثیر سگمنت‌ها در یک حلقه) و سه بعدی (تاثیر حلقه‌های متوالی) بر اساس روش المان پوسته و فنر توسعه دادند. آنها شرایط مرزی مدل (زمین اطراف تونل) را بواسطه استفاده از فنرهای مماسی و شعاعی به مدل‌ها اعمال نمودند. همانگونه که در شکل ۲-۲۷ نشان داده شده است، این محققین برای مدل‌سازی محل اتصال طولی سگمنت‌ها از المان‌های تماس خطی^{۳۴} و برای اتصال حلقوی (مدل‌سازی رفتار بالشتک‌های بیتومینه بین حلقه‌ها) از المان‌های پوسته خمیده چهارگوش^{۳۵} استفاده کردند. در این المان‌ها به منظور ترکیب رفتار بالشتک و بازشدگی درزه از سختی پیچشی نشان داده شده در شکل ۲-۹ استفاده شده است. این محققین همچنین در سال ۲۰۱۲ برای ارزیابی تاثیر چفت‌شدگی درزه‌های حلقوی بر روی پاسخ سازه، از همین مدل استفاده کردند.

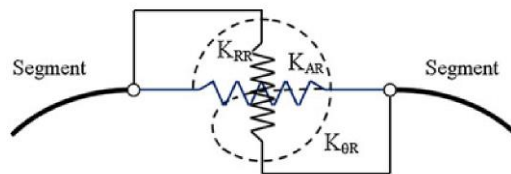
همانگونه که در بخش ۲-۲-۴ شرح داده شد، Do و همکارانش (۲۰۱۳-a) به واسطه مدل‌سازی پوشش سگمنتال بصورت مفصل کامل و کاهش ضخامت پوشش در اطراف محل اتصال، بیشترین حد لنگر خمشی ایجاد شده در پوشش را 150 kN.m/m برداشت کرده و با فرض ماکزیمم مقدار مجاز زاویه چرخش سگمنت‌ها در محل اتصال در حدود ۱٪، مقدار ضریب سختی پیچشی را در حدود 100 MN.m/rad/m محاسبه کرد. همانگونه که در شکل ۲-۲۸ نشان داده شده است، این محققین از فنرهای نرمال، برشی و پیچشی در محل اتصالات پوشش سگمنتال استفاده نموده‌اند.

³⁴ Line interface elements

³⁵ Quadrilateral curved shell elements

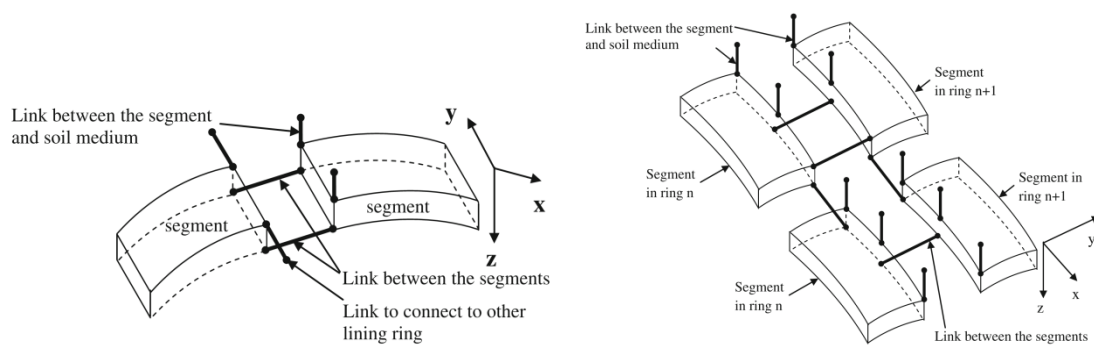


شکل (۲-۲۷) چیدمان درزه‌ها در مدل (راست) دوبعدی تنش صفحه‌ای و (چپ) سه بعدی پوسته و فنر (Arnau & Molins, 2011)



شکل (۲-۲۸) فنرهای نرمال، برشی و پیچشی مورد استفاده بجای درزه‌های طولی و حلقوی (Do, et al. 2013)

همچنین Do و همکارانش (۲۰۱۳-b) در مدل سه بعدی برای اتصالات طولی سگمنت به سگمنت و همچنین اتصالات حلقه به حلقه نیز از مقادیر یکسانی از سختی‌های پیچشی، نرمال و برشی استفاده کردند (شکل ۲-۲۹). این محققین با توجه به تاثیر کمتر فنر نرمال بر روی نیروهای داخلی پوشش، از ضریب سختی ثابت 500 MN/m برای فنر نرمال استفاده نمودند اما برای فنر برشی و پیچشی از فنر با سختی دوخطی که با دو پارامتر ضریب سختی و مقاومت حد شناخته می‌شود، استفاده کردند. بنابراین ضریب سختی برشی 1050 MN/m و بیشینه نیروی برشی در محل اتصال طولی و حلقوی برابر با $0/55 \text{ MN/m}$ را برای فنر برشی و ضریب سختی پیچشی 100 MN.m/rad/m به همراه بیشینه لنگر خمشی مجاز در درز طولی و حلقوی برابر با 150 kN.m/m را برای فنرهای پیچشی بکار بردند.



شکل (۲-۲۹) مدل تماس ارائه شده توسط Do و همکارانش برای درزه‌های طولی و حلقوی یک پوشش سگمنتال

مدل‌های عددی برای مدل کردن واقعیت پوشش سگمنتال تونل و رفتار درزه‌های آن، بطور اجتناب ناپذیری برخی واقعیات را نادیده انگاشته یا بواسطه فرضیاتی مساله را ساده می‌کنند. این در حالی است که مدل‌های پیش‌بینی رفتار تونل اغلب برای اهداف طراحی ایجاد شده‌اند. لذا این حقیقت اجازه بکارگیری فرضیات ساده کننده را برای حل مساله می‌دهد زیرا این فرضیات محافظه‌کارانه بوده و در راستای افزایش ضریب ایمنی سازه می‌باشد. همچنین ارزیابی پاسخ واقعی سازه مستلزم لحاظ نمودن متناسب تمامی پارامترهای دخیل در رفتار سازه می‌باشد. بنابراین، لازم است تا آنها را بوضوح مشخص کرده و برنامه‌ریزی و الگوی عددی مناسبی را برای شبیه‌سازی درست آن توسعه داد. از سوی دیگر، استفاده از مدل‌های سه بعدی پیچیده برای مقاصد طراحی مقبول نبوده و تحقیقات برای ارائه روش‌های ساده‌تر برای تحلیل و طراحی پوشش سگمنتال تونل که بیشترین تطابق را با واقعیت رفتار پوشش درزه‌دار داشته باشد، ادامه دارد. لذا با عنایت به کم و کاستی‌های روش‌های مختلف موجود در ادامه به تشریح روشی بر اساس نتایج آزمایش برش درزه پرداخته می‌شود.

۲-۶- جمع بندی

برای ارزیابی رفتار پوشش تونل روش‌های متعددی بر اساس تجربه، آزمایش، روش‌های تحلیلی و عددی ارائه شده است که در این فصل به معرفی و بررسی اجمالی تعدادی از این روش‌ها در ارتباط با پوشش سگمنتال پرداخته شد. مشخصه مشترک بین روش‌های مذکور، لحاظ کردن تاثیر درزه اتصال بین سگمنت‌ها می‌باشد. روش‌های تحلیلی شامل: روش حلقه چند مفصلی، روش حلقه با صلبیت یکنواخت، روش ممان اینرسی موثر و مدل تیر- فنر پیچشی، غالباً برای اهداف طراحی مورد استفاده قرار می‌گیرد. این روش‌های غالباً با فرضیات ساده کننده‌ای همراه بوده و برای ارزیابی اولیه بخصوص تخمین ضخامت سگمنت مناسب هستند. از میان آنها روش ممان اینرسی موثر و مدل تیر و فنر پیچشی بدلیل تغییر سختی محل اتصالات و انتقال بخشی از نیروهای داخلی از طریق درزه‌های بین سگمنت‌ها بهتر از روش‌های دیگر بوده، اما عدم قطعیت در انتخاب ضرایب سختی و تاثیر جزئی تغییر آن بر روی نیروهای داخلی جزو ضعف‌های آنها می‌باشد.

می‌توان گفت معتبرترین روش برای ارزیابی رفتار پوشش سگمنتال تونل روش‌های میدانی می‌باشد. این روش دقیق، پیچیده و پرهزینه برای ارزیابی رفتار و طراحی پوشش تونل در مقابل بارهای اعمال شده در یک پروژه خاص می‌باشد. این عوامل در بسیاری موارد توجیه‌پذیری این روش را بخصوص برای پروژه‌های متداول تونل‌سازی مکانیزه با مشکل مواجه می‌سازد. بنابراین، روش‌های میدانی غالباً در مقیاس کامل و برای مقاصد طراحی در پروژه‌های خاص استفاده شده و بواسطه آن مدل جامعی از رفتار پوشش تحت شرایط مختلف بارگذاری و سطوح اتصال ارائه نشده است.

یکی از روش‌های مناسب برای به‌دست آوردن مقادیر سختی‌های خمشی و جانبی محل اتصال سگمنت‌ها، استفاده از آزمایش‌هایی در مقیاس آزمایشگاهی می‌باشد. یکی از مهم‌ترین مزایای روش‌های آزمایشگاهی

نسبت به روش آزمایشات میدانی تغییر مشخصات بخش‌های موثر در آزمایش و آنالیز حساسیت آنها می‌باشد. آزمایشات انجام یافته تا کنون غالباً برای ارزیابی تاثیر بالشتک‌های لاستیکی بر روی رفتار درزه تحت تنش‌های نرمال محدود، بوده و در آنها رویه مناسبی برای تعیین سختی سطوح اتصال ارائه نشده است.

روش‌های عددی با تکمیل برخی نواقص روش‌های تحلیلی، برای پیش بینی نیروهای سازه‌ای پوشش تونل و تحلیل حساسیت بر روی پارامترهای موثر در رفتار آن مناسب می‌باشند. پیچیدگی بکار رفته در مدلسازی عددی بستگی به نوع روش تحلیلی و جزئیات مدل دارد. لذا برای جلوگیری از پیچیدگی زیاد بایستی در انتخاب ملاحظات متناسب برای مدل‌های تحلیلی دقت نمود.

با توجه به مزایا و معایب روش‌های مذکور، در این تحقیق سعی شده است بواسطه یک سری آزمایش برش درزه و با بررسی برخی پارامترهای موثر بر رفتار اتصال بین سگمنت‌ها، روابطی برای تخمین میزان سختی برشی و نرمال اتصالات طولی پوشش سگمنتال ارائه گردد.

فصل سوم:

مطالعات آزمایشگاهی تحقیق حاضر

سختی محل اتصال سگمنت‌ها یکی از پارامترهای تاثیرگذار بر مقادیر نیروهای وارد بر پوشش بوده و تحلیل و طراحی سازه‌ای آن را تحت تاثیر قرار می‌دهد. این سختی تابعی از هندسه تماس، مشخصات مکانیکی اجزاء و شرایط بارگذاری است. محققین بسیاری به بررسی تاثیر و رفتار محل اتصال سگمنت‌ها در پوشش سگمنتال پرداخته‌اند که کلیات آن در فصل قبل تشریح شد. اکثر این محققین از سختی پیچشی برای درزه‌های طولی و سختی برشی را برای درزه‌های حلقوی استفاده کرده‌اند. اما از آنجایی که در محل اتصال سگمنت‌ها، رفتار سازه ترکیبی از برش، خمش و نیروی محوری غالب است، بنظر می‌رسد که رفتار تماس دو قطعه بتنی بطور مشخص می‌بایستی تابعی از سختی فنرهای نرمال، برشی و پیچشی باشد. در این راستا، برخی محققین مقادیر ثابت سختی برشی، نرمال و پیچشی را در محل اتصالات سگمنت‌ها بکار برده‌اند. لذا آنچه که در مدل‌سازی صحیح رفتار نقاط تماس اهمیت دارد، از یک سو بررسی شرایط سطوح تماس قطعات با یکدیگر بوده و از سوی دیگر نیروهای موجود در محل تماس که متاثر از روباره تونل و شرایط تنش برجا می‌باشد. در این زمینه تحقیقاتی انجام شده است که غالب آن به بررسی اثر بالشتک بر رفتار درزه مربوط بوده و برای مقادیر محدودی از تنش نرمال انجام شده که در نهایت رابطه‌ای برای آن توسعه داده نشده است. بنابراین از آنجایی که تحقیقات مذکور بر اساس رفتار خالص بتن نبوده و متاثر از بالشتک می‌باشد، لذا در این تحقیق به منظور بدست آوردن ضرایب سختی برشی و نرمال سطوح اتصال طولی سگمنت‌ها، با استفاده از دستگاه برش درزه، یک‌سری آزمایش‌هایی بر روی نمونه‌های بتنی آزمایشگاهی انجام شد (ISRM, 2007). این آزمایش‌های برش درزه، بر روی تقریباً ۹۰ نمونه بتنی قالب گرفته شده از محل اتصال طولی سگمنت‌های متوالی A و B، با سطح تماس مشترک در یک حلقه از پوشش سگمنتال تونل انتقال آب ابودر، در سه حالت اتصال خالص بتن با بتن، با نوار آب‌بند و با بولت انجام شده است. تعداد آزمایشات موفق برای این سه حالت اتصال به ترتیب ۶۲، ۲۹ و ۶

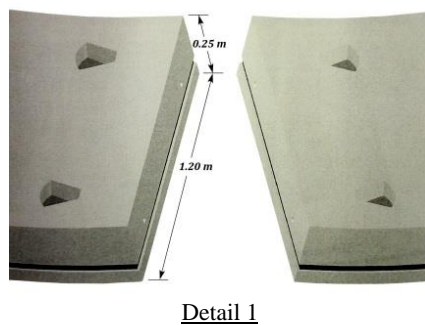
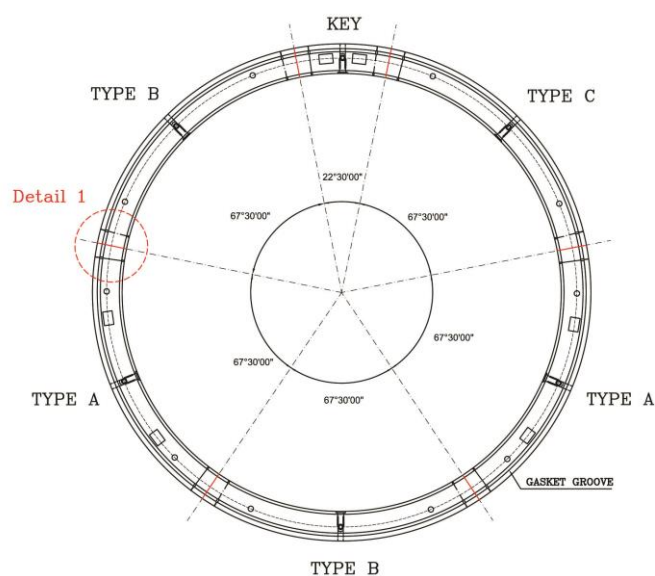
آزمایش بوده است. این تحقیق بطور خاص بر روی سطح تماس سگمنت‌های از نوع دوسطح صاف متمرکز شده است. در آزمایش برش درزه، این نمونه‌ها تحت تنش نرمال مختلف از ۰/۲۵ تا ۲ MPa قرار گرفته و مقادیر تنش‌های نرمال و برشی بر حسب جابجایی‌های نرمال و برشی ترسیم شده و مقادیر مدول عکس العمل مربوطه استخراج می‌گردد.

۲-۳- مورد مطالعاتی

به منظور لحاظ نمودن شرایط واقعی در تحقیق حاضر از پروژه تونل کمکی کانال ابوذر استفاده شده است. نمونه‌های بتنی آزمایش شده و مدل‌های عددی تحلیل شده در این گزارش بر اساس اطلاعات این مورد مطالعاتی شکل گرفته است. لذا لازم است در این بخش به اختصار مشخصات فنی این پروژه ارائه شود.

تونل کمکی انتقال آب ابوذر به منظور ساماندهی روان‌آب‌های سطحی مازاد و انتقال آن به زیر زمین، در جنوب شرقی تهران و در حاشیه شرقی کانال ابوذر بطول ۴/۲ کیلومتر و به قطر ۴/۳۵ متر بصورت مکانیزه و به روش EPB حفاری شده است. همانگونه که در شکل ۱-۳ ملاحظه می‌شود لیتولوژی زمین اطراف تونل ابوذر متشکل از خاک‌های دانه درشت تا دانه ریز می‌باشد. از بین این چهار دسته خاک اشاره شده در شکل ۱-۳ خاک غالب اطراف تونل از نوع ماسه بسیار رس و سیلت دار به همراه شن می‌باشد (خاک رده ET-3 در شکل ۱-۳). مشخصات خاک مذکور در جدول ۱-۳ ذکر شده است. همانگونه که در شکل ۱-۳ نشان داده شده است روبراه تونل مذکور از ۴ تا ۳۰ متر متغیر است که در این تحقیق برای ارزیابی مدل‌های عددی مقدار ۳۰ متر ملاک عمل قرار گرفته است.

پوشش سگمنتال تونل ابوذر متشکل از ۱+۵ سگمنت به ضخامت ۰/۲۵ متر و عرض ۱/۲ متر (در راستای طولی تونل) نگهداری شده، که در نهایت قطر تمام شده آن ۳/۷۵ متر خواهد بود. لذا در محاسبات قطر پوشش سگمنتال ۴ متر لحاظ شده است. در این پروژه با توجه به هندسه و چیدمان سگمنت‌ها، چهار نوع سگمنت دوزنقه‌ای A، B، C و K مورد استفاده قرار گرفته که هندسه و چیدمان آنها در شکل ۲-۳ نشان داده شده است. با این حال سطح تماس طولی آنها یکسان می‌باشد.

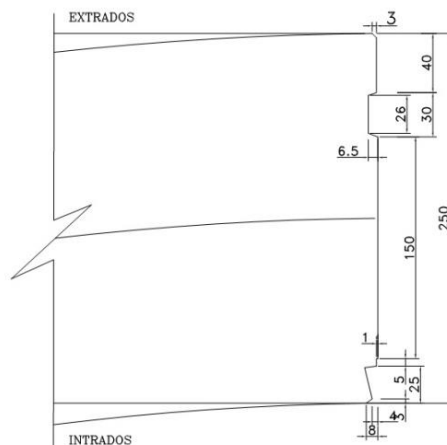


شکل (۲-۳) هندسه و چیدمان سگمنت‌ها در یک حلقه

لازم به ذکر است با وجود اینکه مطابق شکل ۳-۲، مساحت کلی اتصال طولی دو سگمنت متوالی در یک حلقه ۰/۲۵ در ۱/۲ متر است، ولی همانگونه که در شکل ۳-۳ برای مقطع اتصال طولی سگمنت نشان داده شده است، از ضخامت ۲۵۰ میلیمتر سگمنت مذکور فقط ۱۵۰ میلیمتر آن بصورت موثر در تماس با سگمنت مجاور می‌باشد. در واقع سطح تماس موثر سگمنت‌ها در درزه طولی ۰/۱۵ در ۱/۲ متر می‌باشد.

جدول (۱-۳) مشخصات فنی زمین و پوشش تونل ابوذر (مهندسیین مشاور ساحل، ۱۳۹۰-الف)

زمین اطراف تونل Very silty clayey sand with gravel (passing -200= 30 – 60%) خاک:	
۱۸/۱۵	چگالی (kN/m^3)
۴۴/۱۳	مدول الاستیسیته (MPa)
۰/۳۲	نسبت پواسون
۳۲	(درجه زاویه اصطکاک داخلی)
۱۹/۶۱	چسبندگی (kPa)
۶۰۰	سرعت ظاهری انتشار موج برشی (m/s)
۰/۴	نسبت تنش بر جای افقی به قائم
پوشش تونل	
بتن مسلح	
۲۹/۶۲	مدول الاستیسیته (GPa)
۵۱/۰۹	مقاومت فشاری تک محوری بتن f'_c (MPa)
۰/۳۹	مقاومت تسلیم فولاد f_y (GPa)
۰/۲	نسبت پواسون



شکل (۳-۳) جزئیات محل اتصال طولی سگمنت (مهندسیین مشاور ساحل، ۱۳۹۰-الف)

پوشش مذکور از جنس بتن مسلح می‌باشد که مشخصات فنی آن در جدول ۳-۱ ارائه شده است. لازم به ذکر است که این تحقیق در حین ساخت فاز یک تونل انجام یافته و لذا برای نمونه‌گیری از محل اتصال طولی سگمنت‌ها از همان بتن سگمنت‌های تولید شده در کارخانه سگمنت استفاده شده است. از طرفی با توجه به ابعاد کوچک نمونه‌های بتنی نسبت به سگمنت‌ها و همچنین تحقیق بر روی سطح بتن، از تسلیح بتن در نمونه‌های آزمایشگاهی صرف‌نظر شده است.

۳-۲-۱- مشخصات بتن

مشخصات بتن مورد استفاده در سگمنت‌ها و نمونه‌های بتنی آزمایشگاهی به شرح جدول ۳-۲ می‌باشد. نمونه‌های بتنی ۴۲ روزه مذکور همانند سگمنت‌های اصلی به شیوه سنتی و در استخر عمل‌آوری^{۳۶} شده‌اند.

بتن مورد نیاز برای ساخت سگمنت‌های مورد مطالعه دارای مقاومت مشخصه $55/0.2$ MPa و مقاومت هدف حداقل 56 MPa بر روی نمونه‌های مکعبی با ابعاد 150 mm در سن ۴۲ روزه می‌باشد. با توجه به اینکه محیط اطراف تونل دارای سولفات و املاح بوده لذا برای بتن سگمنت‌ها از سیمان تیپ ۵ استفاده شده و جهت حصول مقاومت و دوام کافی بتن، نسبت آب به سیمان تا حداقل ممکن کاهش داده شده است. لذا نسب آب به سیمان $0/32$ و نسبت حجمی درصد سنگدانه ریز به درشت برابر 55 به 45 گرفته شده تا افزودنی روان کننده از نوع پلی کربوکسیلاتی بهترین عملکرد را داشته باشند. در نهایت اسلایپ بتن بین 50 تا 80 mm بدست آمد. همچنین مقاومت فشاری 24 ساعته بتن بیشتر از $11/28$ MPa می‌باشد، تا امکان باز کردن قالب و انتقال سگمنت تولید شده به استخر عمل‌آوری وجود داشته باشد.

³⁶ curing

جدول (۲-۳) مشخصات بتن مصرفی در تولید سگمنت و نمونه‌های بتنی (مهندسین مشاور ساحل، ۱۳۹۰-الف)

پارامتر مشخصه	مقدار
سیمان تیپ ۵ (kg)	۴۸۰
ماسه (/.)	۵۵
شن (/.)	۴۵
نسبت آب به سیمان (W/C)	۰/۳۲
روان کننده PC375 * (/.)	۰/۳۵
اسلامپ ۵ دقیقه (mm)	۹۰
اسلامپ ۱۰ دقیقه (mm)	۷۵
مقاومت ۱ روزه (MPa)	۱۷/۷۵
مقاومت ۱۱ روزه (MPa)	۵۱/۰۹
مقاومت ۴۲ روزه (MPa)	۷۱/۳۹

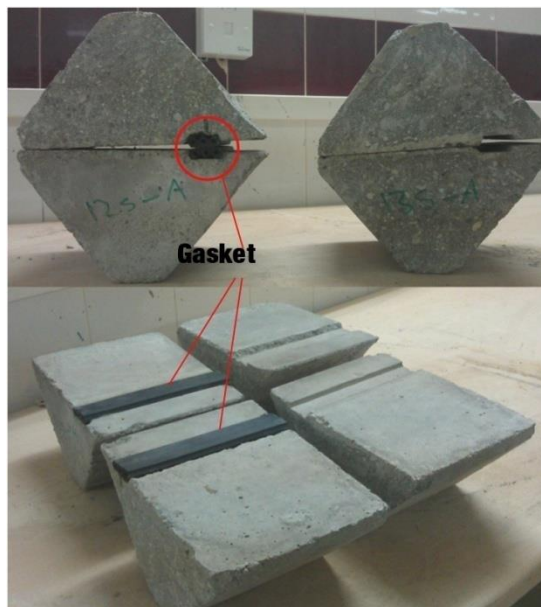
*- ساخت شرکت رزین بتن برتر (www.rbbco.com)

۲-۲-۳- مشخصات نوار آب‌بند

همان‌گونه که در بخش ۱-۲-۳ در مورد نوار آب‌بند توضیح داده شد، در روند عملیات اجرایی، آب‌بندی درزهای اتصال دو سگمنت توسط یک جفت نوار آب‌بند از جنس لاستیک مخصوص^{۳۷} (EPDM) با پروفیل 86-259 انجام شده است. این نوار آب‌بند مطابق شکل ۱-۶ در شیار مخصوصی دور تا دور سگمنت نصب می‌شود. به عنوان یکی از مشخصات فنی و طراحی نوار آب‌بند، در شکل ۱-۷ نمودار نیرو-بازشدگی نوار آب‌بند مذکور ارائه گردیده است (Datwyler, 2014).

³⁷ Ethylene propylene diene monomer (M-class) rubber

در این تحقیق به منظور بررسی عملکرد نوار آببند و تاثیر آن بر رفتار سطح تماس سگمنت‌ها، تعدادی از نمونه‌ها با نوار آببند مورد آزمایش برش قرار گرفتند. در شکل ۳-۴ نمونه‌ای از دو قطعه بتنی آماده شده A و B به منظور انجام آزمایش برش درزه در شرایط با و بدون نوار آببند، نشان داده شده است.

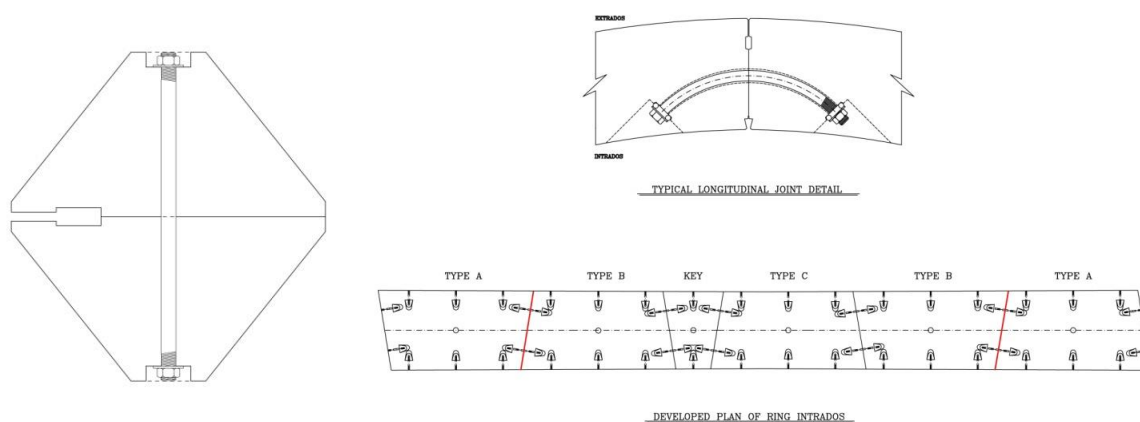


شکل (۳-۴) نمونه بتنی با و بدون نوار آببند جهت انجام آزمایش برش درزه

۳-۲-۳- مشخصات بولت

در راستای مزایای بکارگیری بولت در اتصالات پوشش سگمنتال که در بخش ۱-۲-۴ توضیح داده شد، سگمنت‌های تونل ابودر نیز در درزه‌های طولی به واسطه دو بولت موزی و در درزه‌های حلقوی توسط یک (در سگمنت کلید) یا سه بولت موزی (در ۵ سگمنت باقیمانده) به هم متصل می‌شوند (شکل ۳-۵). بولت‌های خمیده (موزی) مذکور با قطر ۲۴ mm از فولاد AIII با حداقل تنش تسلیم ۴۰۰ MPa ساخته شده‌اند. در هنگام ساخت سگمنت‌ها در سطح اتصال طولی و حلقوی آن سوراخ‌هایی به قطر ۳۲ mm

مخصوص بولت تعبیه می‌شود. به منظور ارزیابی تاثیر بولت بر رفتار تماس طولی سگمنت‌ها تعدادی از نمونه‌ها با بولت تحت آزمایش قرار گرفت. لذا برای ساخت نمونه‌های بتنی بولت‌دار، مقیاس^{۳۸} بولت بر اساس نسبت مساحت فولاد و بتن در سطح اتصال سگمنت و نمونه‌ها، کوچک شد (Muir Wood, 2004). به عبارت دیگر، دو عدد بولت با قطر ۲۴ میلیمتر بر روی سطح ۱/۲ در ۰/۲۵ متری بتن سگمنت معادل با یک بولت فولادی با قطر ۱۲ میلیمتر بر روی سطح ۱۷ در ۲۱ سانتیمتری نمونه بتنی می‌باشد. بنابراین همانگونه که در شکل ۳-۵ ملاحظه می‌شود بولت مستقیم ۱۲ میلیمتری از فولاد AIII دو قطعه A و B نمونه‌های بتنی را به هم متصل نموده است.

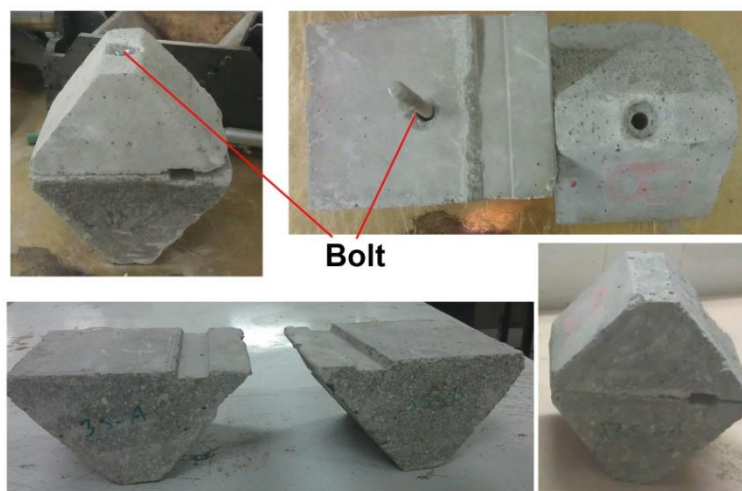


شکل (۳-۵) جزئیات بولت در محل اتصال طولی سگمنت‌ها و نمونه بتنی

برای جاسازی بولت‌های ۱۲ میلیمتری درون نمونه‌های بتنی، در حین ساخت سوراخ‌هایی به قطر ۱۶ mm در مرکز نمونه و عمود بر سطح اتصال قطعات ایجاد شد. بنابراین سطح تماس درگیر نمونه‌های بولت‌دار به اندازه دایره‌ای به قطر ۱۶ mm کمتر از سطح اتصال نمونه‌های بدون بولت می‌باشد. که تاثیر آن در محاسبات بعدی لحاظ شده است. در شکل ۳-۶ نمونه‌ای از دو قطعه بتنی آماده شده A و B به منظور انجام آزمایش برش درزه در شرایط با و بدون بولت، نشان داده شده است. آزمایش برش بر روی نمونه‌های

³⁸ Scale down

بولت‌دار در نهایت باعث شکست نمونه شده و لذا هر نمونه برای یک آزمایش (با یک تنش نرمال) بکار گرفته شده است. لازم به ذکر است که همانند اجرای پوشش سگمنتال تونل ابوذر در آزمایشگاه نیز بولت‌های مستقیم تا حد چفت شدگی نمونه‌های بتنی سفت می‌شود. اما در واقع ارتباط میزان چفت‌شدگی نمونه‌ها (گشتاور لازم برای سفت کردن بولت‌ها) با سختی برشی می‌تواند موضوع تحقیقات آتی باشد.



شکل ۳-۶- نمونه بتنی با و بدون بولت جهت انجام آزمایش برش مستقیم

۳-۳- ساخت نمونه‌ها

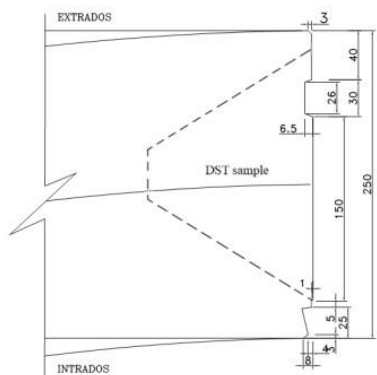
به منظور آزمایش برش درزه بایستی سطوح اتصال درزه طولی سگمنت برداشت شود. به این منظور، نمونه‌های بتنی با ابعاد سطح برش ۲۱۰ در ۱۷۰ میلیمتر (به ترتیب در راستای شعاعی و عرضی سگمنت) در درون قالب سگمنت‌های A و B (شکل ۳-۲) و بر روی دیواره مربوط به سطح اتصال آنها، قالب‌گیری شد (شکل ۳-۴-الف). همانگونه که در بالا ذکر شد، سطح تماس موثر سگمنت در درز طولی در راستای شعاعی ۱۵۰ میلیمتر است که در شکل ۳-۷ این سطح موثر نشیمن سگمنت‌ها بر روی هم را نشان

می‌دهد. لازم به ذکر است که این سطح به عنوان سطح برش موثر سگمنت‌ها در آزمایشات و محاسبات دخالت داده می‌شود.

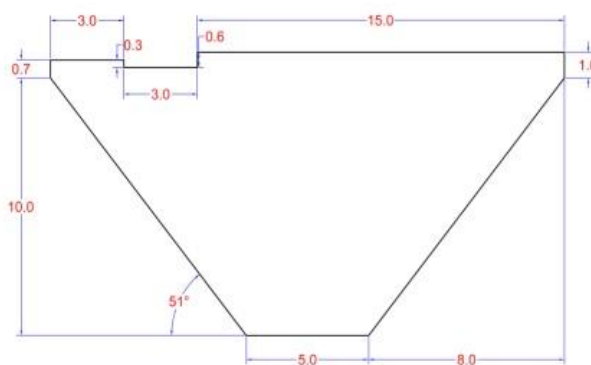
برداشت سطوح اتصال طولی سگمنت‌ها، نمونه‌های بتنی بواسطه قالب‌های اصلاح شده منشوری با مقطع دوزنقه‌ای از درون قالب‌های واقعی سگمنت و از وجه اتصال دو سگمنت متوالی A و B برداشت شده است. شکل ۳ نحوه ساخت نمونه از درون قالب‌های سگمنت را نشان می‌دهد.



(الف)



(ج)



(ب)

شکل (۳-۷) نحوه نمونه‌گیری از داخل قالب سگمنت (الف)، ابعاد قالب نمونه‌ها (ب) و موقعیت نمونه در محل اتصال طولی سگمنت‌ها (ج)

۳-۴- آزمایش برش درزه

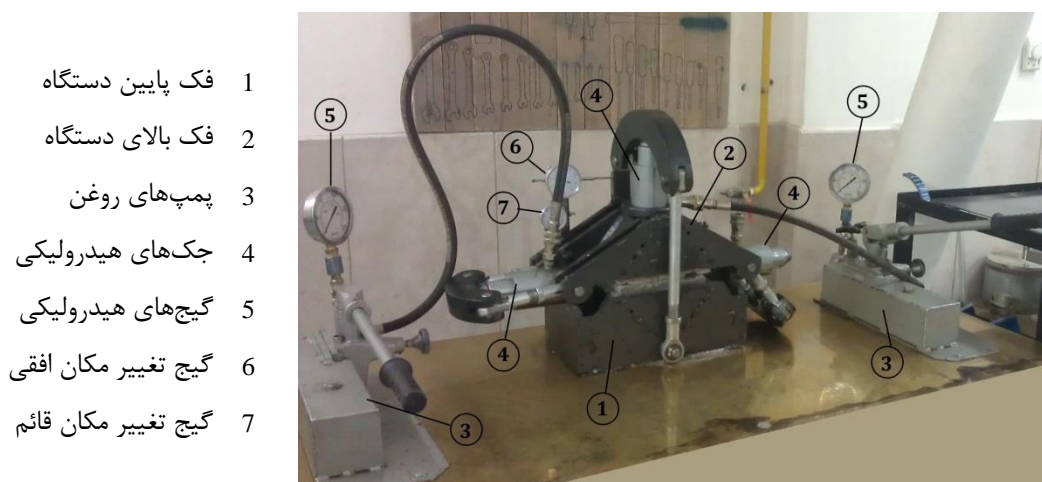
به کمک دستگاه برش درزه، پروژه‌های تحقیقاتی مختلفی در آزمایشگاه بر روی درزه‌ها انجام شده و در آنها تنش نرمال اعمال شده بر صفحه درزه در فرآیند برش، ثابت در نظر گرفته شده است. این نحوه برش برای درزه‌های صاف مناسب است چون درزه در طی برش، اتساع پیدا نمی‌کند و تنش نرمال در حین برش ثابت باقی مانده و آزمایش در حالت تنش نرمال ثابت^{۳۹} (CNL) انجام خواهد شد. اما در درزه‌های ناصاف، همراه با برش، اتساع نیز ایجاد می‌شود و اگر توده سنگ این اتساع را دفع نکند، تنش نرمال حتماً افزایش پیدا خواهد کرد. بنابراین برش درزه‌های زبر تحت شرایط بار نرمال ثابت انجام نخواهد شد. در این حالت، سختی توده سنگ اطراف رفتار برشی را کنترل می‌کند و لذا این وضعیت برش در شرایط سختی نرمال ثابت^{۴۰} (CNS) نامیده می‌شود (امیر شاه‌کرمی و تقی پور، ۱۳۸۱). در گذشته محققین بسیاری برای بررسی رفتار برشی درزه‌ها تحت شرایط CNL آزمایش‌هایی بر روی درزه‌های تمیز و خالی مصنوعی یا طبیعی سنگ انجام دادند. کارهای تحقیقاتی اولیه توسط Patton (۱۹۶۶) و سپس توسط Barton (۱۹۷۳، ۱۹۸۳)، Ladanyi و Arshambault (۱۹۷۷)، Hoek و Brown (۱۹۸۰)، Bandis و همکارانش (۱۹۸۱)، Hoek (۱۹۹۰)، Brady و Brown (۲۰۰۴) و دیگران انجام شد.

دستگاه برش مورد استفاده در این تحقیق، از نوع CNL و برش بزرگ مقیاس می‌باشد. این دستگاه دارای دو جعبه فولادی هر کدام به ابعاد ۲۱۰ میلیمتر طول و ۱۷۰ میلیمتر عرض و عمق متغیر تا بیشینه مقدار ۱۰ میلیمتر می‌باشد. همانگونه که در شکل ۳-۸ نشان داده شده است، دستگاه مذکور دارای دو فک بالا (متحرک) و پایین (ثابت) است که بر فک بالایی یک جک بار نرمال و بر روی فک پایینی دو جک برای اعمال بار برشی به نمونه متحرک بالایی نصب شده است. جک‌های هیدرولیکی مذکور با قطر داخلی ۵۰/۲ mm دارای ظرفیت نهایی ۵۰ kN می‌باشند که میزان بار اعمالی آنها، توسط دو گیج فشار هیدرولیکی با دقت ۰/۷ MPa قرائت می‌شوند. بطور مثال برای اعمال تنشی معادل ۰/۲۵ MPa بر روی

³⁹ Constant Normal Load

⁴⁰ Constant Normal Stiffness

سطح نمونه‌های بتنی، فشار روغن جک حدود $3/22 \text{ MPa}$ قرائت شده است. به منظور برداشت تغییر مکان قائم و افقی دو قطعه A و B نمونه بتنی (قطعه بالایی و پایینی) نسبت به هم از گیج‌های مکانیکی با دقت $0/01$ میلی‌متر در استفاده می‌شود. به منظور جلوگیری از بروز خطای ناشی از جابجایی دستگاه نسبت به میز، گیج‌ها بر روی نیمه پایینی دستگاه که بر روی میز ثابت شده، متصل گردید. لذا قرائت‌های صورت گرفته جابجایی دو قطعه نمونه سگمنت (یکی در نیمه بالایی دستگاه و دیگری در نیمه پایینی آن) نسبت به هم می‌باشد.



- 1 فک پایین دستگاه
- 2 فک بالای دستگاه
- 3 پمپ‌های روغن
- 4 جک‌های هیدرولیکی
- 5 گیج‌های هیدرولیکی
- 6 گیج تغییر مکان افقی
- 7 گیج تغییر مکان قائم

شکل (۳-۸) اجزاء دستگاه برش درزه مورد استفاده

در نهایت مقدار سختی نرمال و برشی محل تماس دو قطعه سگمنت از آزمایش برش درزه با اعمال بارهای نرمال و برشی مختلف بدست می‌آید. بدین ترتیب با برداشت جابجایی متناسب با بار اعمال شده به نمونه‌ها در دو حالت نرمال و برشی، مدول‌های عکس‌العمل نرمال و برشی به ترتیب از روابط $k_n = \frac{\Delta\sigma_n}{\Delta\delta_n}$ و $k_s = \frac{\Delta\tau}{\Delta\delta_s}$ بدست می‌آیند که در آنها $\Delta\tau$ و $\Delta\sigma_n$ به ترتیب تغییرات بار نرمال و برشی و $\Delta\delta_n$ و $\Delta\delta_s$ به ترتیب تغییرات جابجایی نرمال و برشی در محل تماس بین دو قطعه می‌باشند.

هر نمونه با ۸ بار نرمال از ۰/۲۵ تا ۲ MPa (به شرط سالم باقی ماندن آن برای ادامه آزمایشات) تحت آزمایش برش درزه قرار گرفته است. این محدوده تنش نرمال در محل تماس سگمنت را می‌توان به راحتی از روابط مربوط به غشاهای جدار نازک در شرایط تنش صفحه‌ای از رابطه زیر محاسبه نمود (موتابی، ۱۳۸۲):

$$\sigma_n = \frac{Pr}{t} \quad (۱-۳)$$

که در آن P برابر فشار هیدرواستاتیک اطراف تونل ناشی از سربار، r شعاع داخلی تونل و t ضخامت پوشش می‌باشد.

با فرض وزن مخصوص $۱۸/۱۵ \text{ kN/m}^3$ برای خاک در محدوده سربار حداکثر ۳۰ m ، مقدار σ_n یا همان تنش نرمال بر روی سطح تماس سگمنت‌ها بطور متوسط برابر $۴/۳۵ \text{ MPa}$ محاسبه خواهد شد که در این آزمایشات با توجه به محدودیت اعمال بار توسط جک‌های دستگاه برش درزه، محدوده اعمال تنش قائم بین $۰/۲۵$ تا ۲ MPa در نظر گرفته شده است. دامنه کاربرد نتایج آنچنان که در ادامه نشان داده می‌شود، برای مقادیر تنش‌های نظیر تنش ناشی از سربار ۳۰ متری نیز جوابگو خواهد بود.

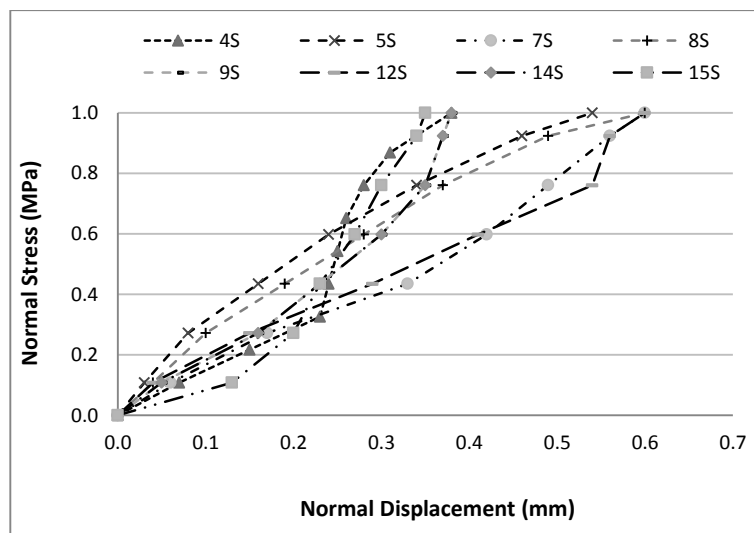
۳-۵- تحلیل نتایج آزمایشات

پس از آماده سازی نمونه‌ها در سه دسته بتن خالص، با نوار آب‌بند و با بولت، جفت قطعه‌های A و B در دستگاه برش قرار داده شده و تحت ۸ تیپ تنش نرمال از $۰/۲۵$ تا ۲ مگاپاسکال (به فواصل $۰/۲۵$ مگاپاسکال) مورد آزمایش قرار داده شده است. در طی آزمایش با افزایش تدریجی تنش نرمال از صفر تا مقدار مورد نظر، جابجایی نرمال قطعه‌ها نسبت به هم در محل تماس قرائت گردیده است. سپس با ثابت نگه داشتن مقدار تنش نرمال مورد نظر، نمونه‌ها تحت تنش برشی قرار داده شده است. با عنایت به اینکه

در این آزمایش برش درزه، قطعه پایینی ثابت بوده و قطعه بالا متحرک می‌باشد، با افزایش تدریجی تنش برشی، جابجایی برشی قطعه بالایی بر روی سطح تماس با قطعه پایینی قرائت گردیده است. در ادامه نمونه‌ای از برداشته‌های انجام شده برای بار نرمال $\sigma_n = 1 \text{ MPa}$ بصورت نمودارهای تنش نرمال-جابجایی نرمال و تنش برشی-جابجایی برشی برای حالت بتن خالص، با نوار آب‌بند و با بولت مورد بحث قرار گرفته است. لازم به ذکر است که در نمودارهای ترسیم شده کد مشخص کننده نمونه دارای دو بخش است. بطور مثال 5S پنجمین نمونه بتن خالص و 5S-G پنجمین نمونه با نوار آب‌بند را نشان می‌دهد.

۳-۵-۱- نتایج آزمایشات نمونه‌های بتن خالص

در آزمایش بر روی سطح خالص بتن (نمونه‌های بتنی بدون نوار آب‌بند و بولت)، سطح تماس موثر ۱۵ در ۱۷ سانتی‌متری نمونه‌های بتنی، تنها سطح درگیر در فشار و برش می‌باشد. در آزمایش بر روی نمونه‌های متعدد تعداد کمی از نمونه‌ها شکسته شد که نتایج آنها کنار گذاشته شده و نتایج نمونه‌های سالم باقیمانده (نمونه‌های 2S تا 15S) مدنظر قرار داده شده است. در شکل ۳-۹ تغییرات جابجایی نرمال در مقابل تنش نرمال تا حد تنش نرمال ۱ MPa بر روی این نمونه‌ها، نشان داده شده است.



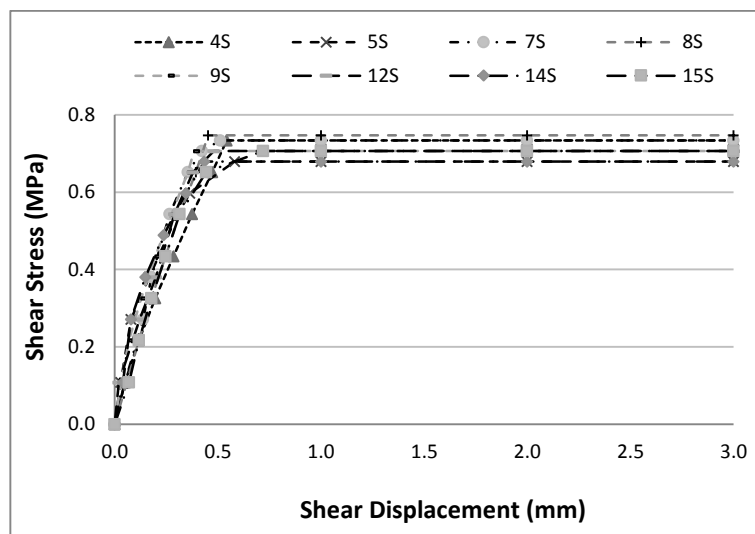
شکل ۳-۹- نمودار تنش نرمال - جابجایی نرمال تا حد بار نرمال برابر با ۱ MPa (بدون نوار آب‌بند و بولت)

شکل ۳-۹ نشان دهنده روند تغییرات تقریباً خطی جابجایی نرمال در برابر تنش نرمال بوده که شیب

بخش خطی آن نماینده مدول عکس‌العمل نرمال ($k_n = \frac{\Delta\sigma_n}{\Delta\varepsilon}$) می‌باشد.

در شکل ۳-۱۰ تغییرات جابجایی برشی در مقابل تنش برشی، تحت تنش نرمال ثابت ۱ MPa قبل و بعد

از لغزش نشان داده شده است.



شکل ۳-۱۰- نمودار تنش برشی - جابجایی برشی برای بار نرمال برابر با ۱ MPa (بدون نوار آب‌بند)

شکل ۳-۱۰ نشان دهنده روند خطی تغییرات جابجایی برشی در مقابل تنش برشی بوده که شیب این

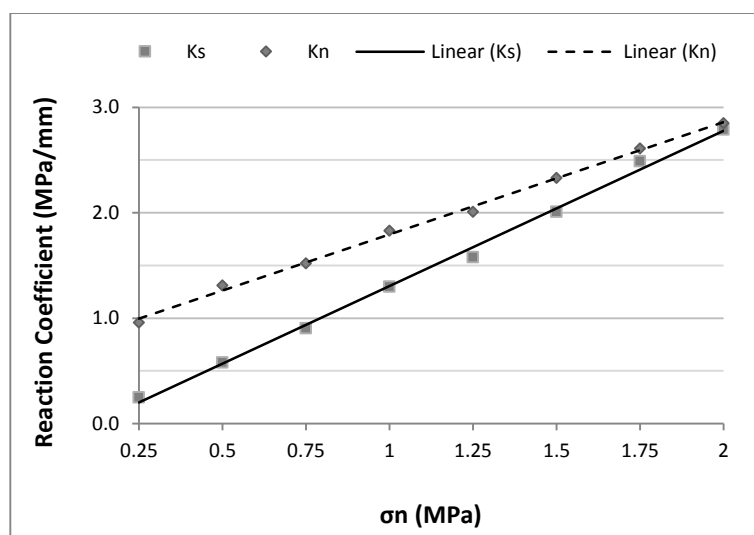
خط قبل از رسیدن به لغزش کامل، بیانگر مدول عکس‌العمل برشی ($k_s = \frac{\Delta\tau}{\Delta\gamma}$) سطح تماس نمونه‌های

بتنی می‌باشد. در محدوده تنش نرمال ۰/۲۵ تا ۲ MPa، نتایج همه نمونه‌های بتنی خالص نشان دهنده

آن است که تنش برشی حد آستانه لغزش بین ۰/۲ تا ۱/۴۴ MPa و جابجایی برشی حد آستانه لغزش بین

۰/۴۵ تا ۰/۵۸ mm متغیر است.

مقادیر مدول‌های عکس‌العمل بدست آمده از شکل‌های ۳-۹ و ۳-۱۰ (برای $\sigma_n = 1 \text{ MPa}$) به عنوان نمونه‌ای از مدول‌های عکس‌العمل نرمال و برشی بدست آمده از آزمایش‌های برش درز در محدوده تنش نرمال ۰/۲۵ تا ۲ MPa برای حالت بتن خالص (بدون نوار آب‌بند و بولت) می‌باشد. روند تغییرات مدول‌های عکس‌العمل برشی و نرمال با تنش نرمال وارد بر سطح تماس نمونه‌ها در نمودار شکل ۳-۱۱ نشان داده شده است.



شکل ۳-۱۱- نمودار تغییرات مدول‌های عکس‌العمل برشی و نرمال با تنش نرمال اعمال شده به سطح اتصال نمونه‌های بتنی خالص (بدون نوار آب‌بند و بولت)

همان‌گونه که در شکل ۳-۱۱ برای حالت بتن خالص نشان داده شده است، مقادیر مدول عکس‌العمل برشی از مقدار ۰/۲۵ MPa/mm برای تنش نرمال برابر با ۰/۲۵ MPa تا مقدار ۲/۷۹ MPa/mm برای تنش نرمال برابر با ۲ MPa و همچنین مقادیر مدول عکس‌العمل نرمال نیز برای همان مقادیر تنش نرمال به ترتیب از مقدار ۰/۹۶ تا ۲/۸۵ MPa/mm بصورت خطی متغیر می‌باشد. بهترین روابط خطی برازش شده برای ارتباط مدول‌های عکس‌العمل برشی و نرمال با میزان تنش نرمال اعمال شده به سطح تماس به صورت زیر است:

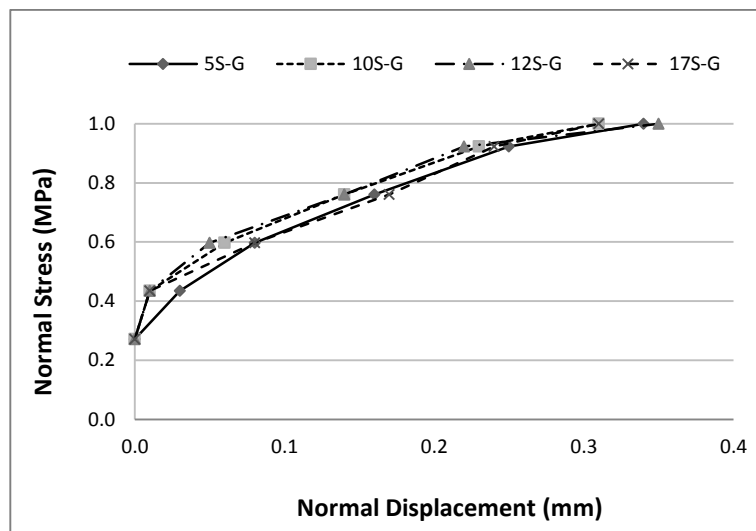
$$k_s = 1.4725\sigma_n - 0.1684 \quad R^2 = 0.9965 \quad (2-3)$$

$$k_n = 1.0638\sigma_n + 0.730 \quad R^2 = 0.9974 \quad (3-3)$$

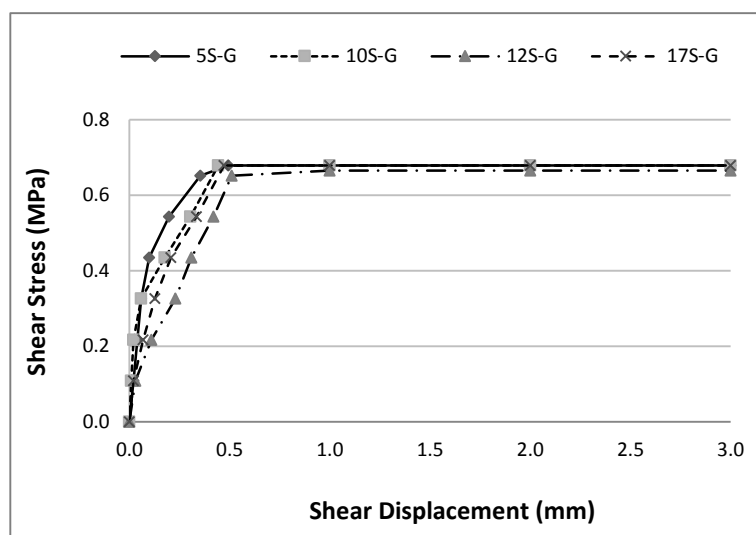
در این روابط k_s و k_n به ترتیب مدول عکس العمل برشی و نرمال سطح تماس بر حسب MPa/mm، σ_n تنش نرمال اعمال شده به سطح تماس دو قطعه بر حسب MPa و R^2 ضریب رگرسیون خطی رابطه ارائه شده است.

۳-۵-۲- نتایج آزمایشات بر روی نمونه‌های دارای نوار آب‌بند

همان‌گونه که در شکل ۳-۴ نشان داده شده است نوار آب‌بند نوع پروفیل 86-259 با نوعی چسب درون شیار مخصوص نوار آب‌بند واقع بر روی سطح اتصال نمونه‌های بتنی چسبانده شده و بنابراین سطح تماس درگیر نمونه‌ها به ۱۸ در ۱۷ سانتی‌متر افزایش می‌یابد. اما لازم به ذکر است که عملاً نوار آب‌بند در مقابل تنش‌های نرمال توان باربرداری نداشته و بار نرمال بر بتن وارد می‌شود. نتایج نمونه‌های با نوار آب‌بند سالم (نمونه‌های 5S-G تا 17S-G) در آزمایش برش درز در شکل‌های ۳-۱۲ و ۳-۱۳ به فرم تغییرات جابجایی نرمال در مقابل تنش نرمال تا حد تنش نرمال ۱ MPa و تغییرات جابجایی برشی در مقابل برشی در تنش نرمال ثابت ۱ MPa قبل و بعد از لغزش نشان داده شده است.



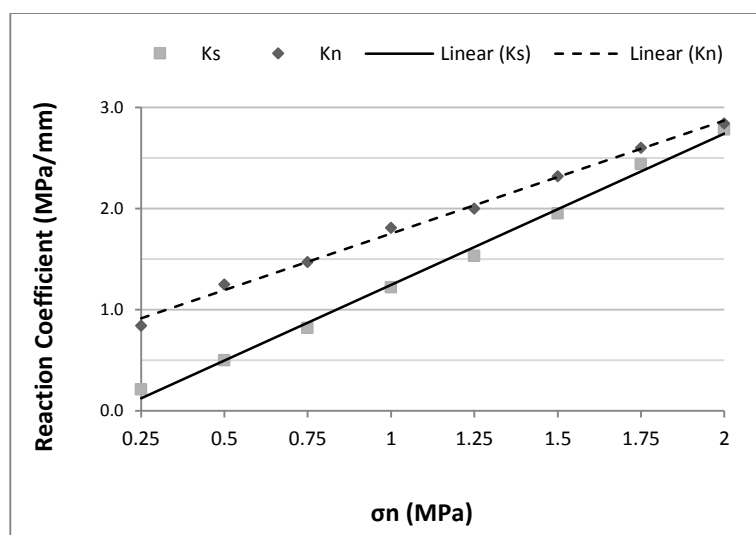
شکل ۳-۱۲- نمودار تنش نرمال - جابجایی نرمال تا حد بار نرمال برابر با ۱ MPa (با نوار آببند)



شکل ۳-۱۳- نمودار تنش برشی - جابجایی برشی برای بار نرمال برابر با ۱ MPa (با نوار آببند)

در محدوده تنش نرمال ۰/۲۵ تا ۲ MPa، بررسی نتایج نمونه‌های دارای نوار آببند نشان دهنده آن است که تنش برشی حد آستانه لغزش بین ۰/۱۵ تا ۱/۴۲ MPa و جابجایی برشی حد آستانه لغزش بین ۰/۴۹ تا ۰/۵۴ mm متغیر است.

بخش خطی نمودار شکل ۳-۱۲ مقدار مدول عکس العمل نرمال و بخش خطی نمودار شکل ۳-۱۳ قبل از رسیدن به لغزش کامل، مقدار مدول عکس العمل برشی را برای نمونه‌های با نوار آب‌بند تحت بار نرمال $\sigma_n = 1 \text{ MPa}$ بدست می‌دهد که به عنوان نمونه‌ای از مدول‌های عکس العمل نرمال و برشی بدست آمده از آزمایش‌های برش درزه در محدوده تنش نرمال از ۰/۲۵ تا ۲ MPa ارائه گردیده است. روند تغییرات این مدول‌های مذکور با تنش نرمال وارد بر سطح تماس نمونه‌ها در نمودار شکل ۳-۱۴ نشان داده شده است.



شکل ۳-۱۴- نمودار تغییرات مدول‌های عکس العمل برشی و نرمال با تنش نرمال اعمال شده به سطح اتصال نمونه‌های بتنی با نوار آب‌بند

همان‌گونه که در شکل ۳-۱۴ نیز نشان داده شده است، ارتباط مدول‌های عکس العمل برشی و نرمال با تنش نرمال اعمال شده به سطوح اتصال نمونه‌های بتنی با نوار آب‌بند رابطه‌ای خطی داشته که می‌توان معادلات ۳-۴ و ۳-۵ را با دقت قابل قبولی، به ترتیب برای ارتباط مدول‌های عکس العمل برشی و نرمال با بار نرمال لحاظ نمود. برای حالت با نوار آب‌بند مقادیر مدول عکس العمل برشی بصورت خطی از مقدار 0.21 MPa/mm برای تنش نرمال برابر با 0.25 تا مقدار 2.78 MPa/mm برای تنش نرمال 2 MPa

متغیر است. همچنین برای این مقادیر تنش نرمال مدول عکس العمل نرمال نیز از مقدار $0/84$ تا $2/84$ MPa/mm بصورت خطی متغیر است.

$$k_s = 1.4948\sigma_n - 0.2504 \quad R^2 = 0.9953 \quad (4-3)$$

$$k_n = 1.1186\sigma_n + 0.6329 \quad R^2 = 0.9957 \quad (5-3)$$

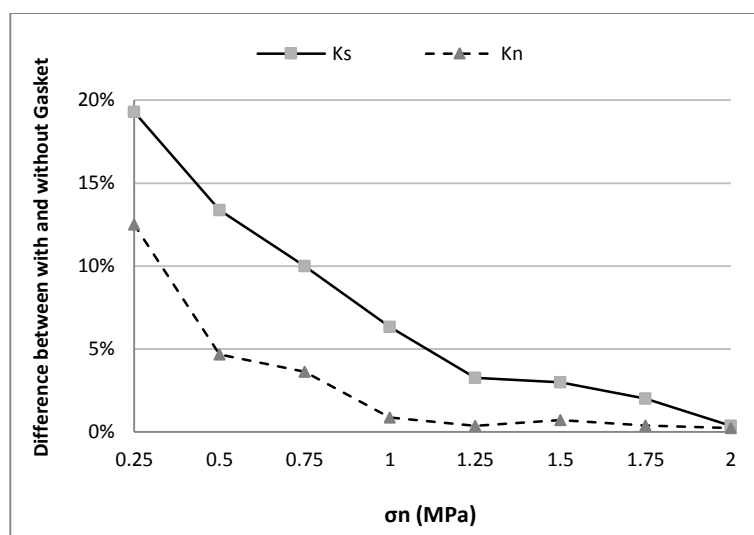
در این روابط k_n و k_s به ترتیب مدول‌های عکس العمل برشی و نرمال سطح تماس بر حسب MPa/mm، σ_n تنش نرمال اعمال شده به سطح تماس دو قطعه بر حسب MPa و R^2 ضریب رگرسیون خطی رابطه ارائه شده است.

۳-۵-۳- مقایسه نتایج آزمایشات بر روی نمونه‌های بتن خالص و نوار آب‌بنددار

به منظور ارزیابی تاثیر نوار آب‌بند بر روی سختی سطح اتصال سگمنت‌ها در این بخش اختلاف نتایج دو حالت سطح اتصال خالص بتن با بتن و سطح اتصال با نوار آب‌بند مورد بررسی قرار می‌گیرد. درصد اختلاف میان مقادیر مدول‌های عکس العمل برشی (k_s) و نرمال (k_n) در دو حالت بدون و با نوار آب‌بند برای مقادیر مختلف تنش نرمال در شکل ۳-۱۵ نشان داده شده است. همان‌گونه ملاحظه می‌شود، با افزایش σ_n وجود نوار آب‌بند تاثیر خود را بر مقادیر k_s و k_n از دست داده است. با بررسی مقادیر σ_n در پروژه تونل کمکی انتقال آب ابودر می‌توان چنین نتیجه گرفت که به ازای $\sigma_n = 1$ بدست آمده متناسب با شرایط پروژه، وجود نوار آب‌بند به ترتیب باعث کاهش $6/32$ و $0/88$ درصدی مقادیر سختی برشی و نرمال گردیده است.

مدول عکس العمل برشی در حالت بدون نوار آب‌بند حداکثر $19/29$ درصد (در کمترین بار نرمال برابر با $0/25$ MPa) و حداقل $0/36$ درصد (در بیشینه بار نرمال 2 MPa) بیشتر از حالت با نوار آب‌بند می‌باشد.

همچنین ضریب سختی نرمال در حالت بدون نوار آببند حداکثر ۱۲/۵۰ درصد (در کمترین بار نرمال ۰/۲۵ MPa) و حداقل ۰/۲۳ درصد (در بیشینه بار نرمال ۲ MPa) بیشتر از حالت با نوار آببند می‌باشد این روند کاهش درصد اختلاف ضرایب سختی با افزایش بار نرمال برای دو حالت بدون و با نوار آببند، تاکید مجددی بر ارتباط مستقیم این ضرایب با بار نرمال بوده و نشان می‌دهد که تقریباً از تنش نرمال ۱/۲۵ MPa به بعد عملاً نوار آببند تاثیر زیادی بر مقادیر ضرایب سختی برشی و نرمال نخواهد داشت.

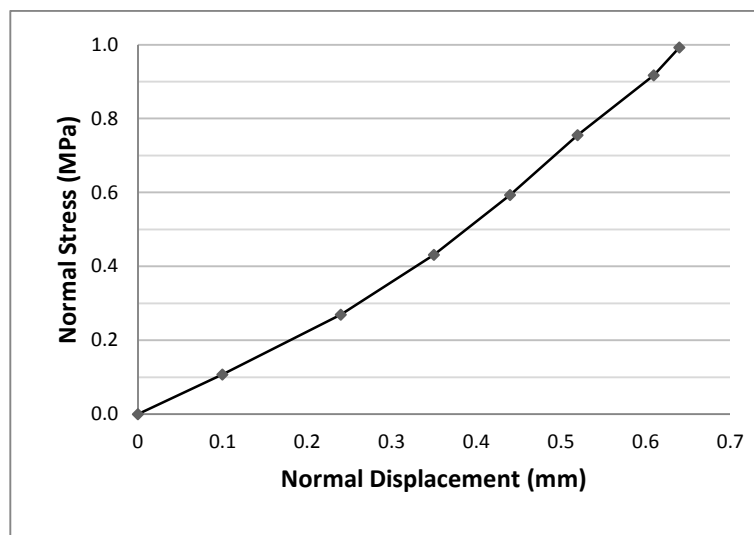


شکل ۳-۱۵- تغییرات میزان اختلاف بین نتایج مدول‌های عکس‌العمل برشی و نرمال در دو حالت با و بدون نوار آببند با مقدار بار نرمال

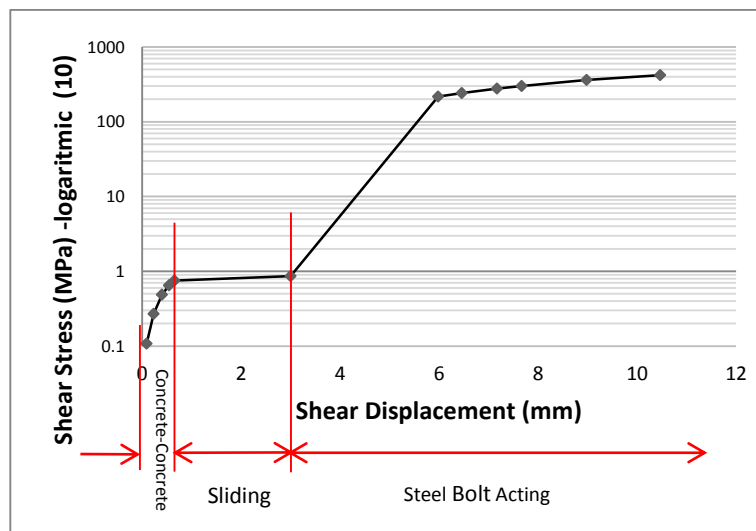
۳-۵-۴- نتایج آزمایشات بر روی نمونه‌های بولت‌دار

همان‌گونه که در شکل‌های ۳-۵ و ۳-۶ نشان داده شده است به هنگام ساخت نمونه‌های بولت‌دار سوراخی به قطر ۱۶ میلی‌متر در هر نمونه تعبیه شده است. بنابراین سطح تماس موثر نمونه‌های بولت‌دار به اندازه دایره‌ای به قطر ۱۶ میلی‌متر کمتر از سطح اتصال نمونه‌های بتن خالص (بدون نوار آببند و بولت) می‌باشد.

آزمایش برش بر روی نمونه‌های بولت‌دار در نهایت باعث شکست نمونه شده و لذا هر نمونه برای یک آزمایش (با یک تنش نرمال) بکار گرفته شده است. نتایج یکی از آزمایشات برش مستقیم با تنش نرمال ۱ MPa بر روی نمونه بولت‌دار در شکل‌های ۱۶-۳ و ۱۷-۳ به فرم تغییرات جابجایی نرمال در مقابل تنش نرمال تا حد تنش نرمال ۱ MPa و تغییرات جابجایی برشی در مقابل برشی در تنش نرمال ثابت ۱ MPa قبل و بعد از لغزش نشان داده شده است. شیب خط نمودار ۱۶-۳ مقدار مدول عکس‌العمل نرمال را برای نمونه با بولت تحت بار نرمال $\sigma_n = 1 \text{ MPa}$ بدست می‌دهد.

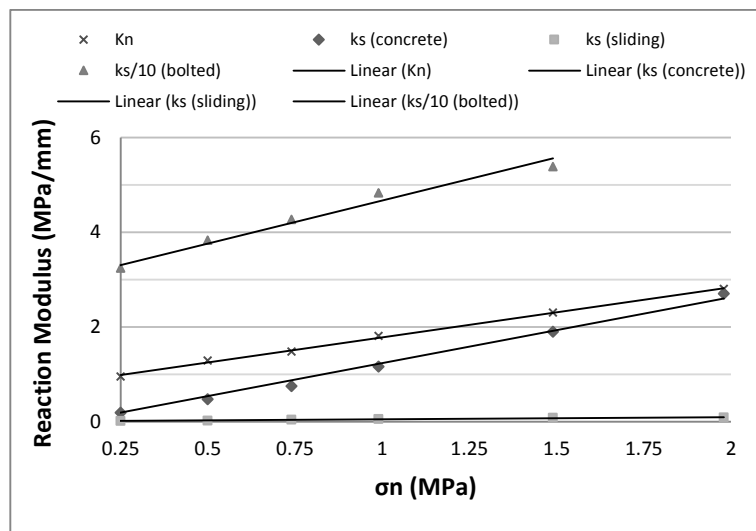


شکل ۱۶-۳- نمودار تنش نرمال - جابجایی نرمال تا حد بار نرمال برابر با ۱ MPa (با بولت)



شکل ۳-۱۷- نمودار تغییرات لگاریتمی تنش برشی با جابجایی برشی برای بار نرمال برابر با ۱ MPa (با بولت)

همان‌گونه که در شکل ۳-۱۷ نشان داده شده است، این نمودار از سه بخش تقریباً خطی تشکیل شده است. بخش اول که تا تنش برشی حد آستانه لغزش تنش برشی تحمل می‌کند، مربوط به اتصال بتن به بتن بوده و در واقع نماینده مقاومت برشی سطح اتصال بتن با بتن تحت بار نرمال $\sigma_n = 1 \text{ MPa}$ می‌باشد. بخش دوم که تا جابجایی برابر با لقی حلقوی بین سوراخ و بولت (در حدود ۴ میلیمتر) امتداد می‌یابد مربوط به لغزش دو قطعه بتنی بر روی هم می‌باشد. واضح است که بدلیل وجود بولت، نمودار در این بخش لغزش، برخلاف حالت بدون بولت کاملاً افقی نباشد. بخش سوم که در واقع بخش قابل توجهی از تنش برشی را به خود اختصاص می‌دهد مربوط به درگیری بولت در ایجاد مقاومت در برابر تنش برشی اعمال شده است. نمودار جابجایی برشی- تنش برشی ترسیم شده برای تمام نمونه‌های بولت دار آزمایش شده، به همین صورت سه بخشی و تقریباً خطی بوده و شیب هر بخش متناسب با بار نرمال اعمال شده به سطح اتصال، تغییر می‌یابد. در شکل ۳-۱۸ روند تغییرات مدول‌های عکس‌العمل نرمال و برشی بدست آمده از آزمایش‌های برش مستقیم بر روی نمونه‌های بولت‌دار در محدوده تنش نرمال ۰/۲۵ تا ۲ MPa نشان داده شده است.



شکل ۳-۱۸- نمودار تغییرات مدول های عکس العمل برشی و نرمال با تنش نرمال اعمال شده به سطح اتصال نمونه های بولت دار

در بالا ذکر شد، مدول عکس العمل برشی نمونه های بولت دار از سه بخش تماس بتن به بتن، لغزش بتن روی بتن و درگیری بولت تشکیل شده است. از سوی دیگر همان گونه که در شکل ۳-۱۸ نیز نشان داده شده است ارتباط هر سه بخش مدول عکس العمل برشی و مدول عکس العمل نرمال با تنش نرمال اعمال شده به سطوح اتصال نمونه ها در حالت با بولت رابطه ای خطی داشته که می توان معادلات ۳-۶ و ۳-۷ را با دقت قابل قبولی، به ترتیب برای ارتباط مدول عکس العمل برشی و نرمال با بار نرمال بر سطح تماس لحاظ نمود. شکل ۳-۱۸ نشان می دهد که در محدوده تنش نرمال ۰/۲۵ تا ۲ MPa، مقدار مدول عکس العمل نرمال بصورت خطی از مقدار ۰/۹۵ تا ۲/۸ MPa/mm تغییر می کند. در محدوده تنش نرمال مذکور مقدار مدول عکس العمل برشی برای بخش تماس بتن با بتن بصورت خطی بین ۰/۱۹ تا ۲/۷ MPa/mm متغیر است. در محدوده تنش نرمال مذکور مقدار مدول عکس العمل برشی برای بخش لغزش بتن بر روی بتن نیز بصورت خطی بین ۰/۱۵ تا ۰/۰۹ MPa/mm تغییر می کند. همچنین مدول

عکس العمل برشی برای بخش درگیری بولت از $32/43$ MPa/mm تحت تنش نرمال برابر با $0/25$ تا مقدار $53/87$ MPa/mm تحت تنش نرمال برابر با $1/5$ MPa بصورت خطی متغیر است.

$$k_s = \begin{cases} 1.4674\sigma_n - 0.2602 & 0 \leq \delta_s < 0.85 \\ 0.0404\sigma_n - 0.0043 & 0.85 \leq \delta_s < 4 \\ 18.154\sigma_n + 28.516 & 4 \leq \delta_s \end{cases} \quad R^2 = \begin{cases} 0.9961 \\ 0.9655 \\ 0.9825 \end{cases} \quad (6-3)$$

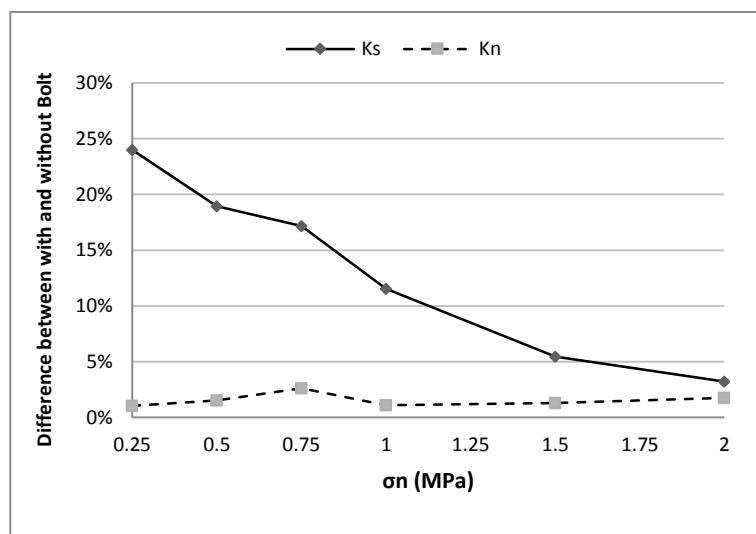
$$k_n = 1.0666\sigma_n + 0.7123 \quad R^2 = 0.9984 \quad (7-3)$$

در این روابط k_s و k_n به ترتیب مدول‌های عکس العمل برشی و نرمال سطح تماس بر حسب MPa/mm، σ_n تنش نرمال اعمال شده به سطح تماس دو قطعه بر حسب MPa، δ_s جابجایی برشی دو قطعه نسبت به هم بر حسب mm و R^2 ضریب رگرسیون خطی رابطه ارائه شده است.

۳-۵-۵- مقایسه نتایج آزمایشات بر روی نمونه‌های بتن خالص و بولت‌دار

در این بخش بواسطه مقایسه نتایج سطح اتصال ساده بتن با بتن و سطح اتصال بولت‌دار، تاثیر بکارگیری بولت بر سختی سطح اتصالات طولی سگمنت‌ها مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. برای این منظور درصد اختلاف میان مقادیر مدول عکس العمل برشی (k_s) و نرمال (k_n) در دو حالت بدون و با بولت (در بخش خطی اول) برای مقادیر مختلف تنش نرمال در شکل ۳-۱۹ نشان داده شده است. همان‌گونه ملاحظه می‌شود، وجود بولت مقادیر مدول k_n را با یک نرخ تقریباً ثابتی کاهش داده است. کاهش مدول عکس العمل نرمال در اثر استفاده از بولت به دلیل کاهش سطح تماس به اندازه مساحت سوراخ بولت می‌باشد. لذا همان‌گونه که در شکل ۳-۱۹ نشان داده شده است درصد اختلاف مقادیر مدول عکس العمل نرمال در دو حالت با و بدون بولت در مقابل تنش نرمال بر سطح تماس تغییرات یکنواختی خواهد داشت. از سوی دیگر می‌توان بوضوح ملاحظه کرد درصد اختلاف مقادیر مدول عکس العمل برشی با افزایش σ_n کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر با افزایش تنش نرمال بر سطح تماس، تاثیر بولت بر روی مقادیر مدول k_s کاهش می‌یابد. با

بررسی مقادیر σ_n در پروژه تونل کمکی انتقال آب ابودر می توان چنین نتیجه گرفت که به ازای $\sigma_n = 1$ بدست آمده متناسب با شرایط پروژه، وجود بولت به ترتیب باعث کاهش ۱۱/۵۴ و ۱/۲۹ درصدی مقادیر مدول عکس العمل برشی و نرمال گردیده است.



شکل ۳-۱۹- تغییرات میزان اختلاف بین نتایج مدول عکس العمل برشی و نرمال در دو حالت با و بدون بولت با مقدار بار نرمال

مدول عکس العمل برشی در حالت بدون بولت حداکثر ۲۴ درصد (در کمترین بار نرمال ۰/۲۵ MPa) و حداقل ۳/۲۳ درصد (در بیشینه بار نرمال ۲ MPa) بیشتر از حالت با بولت می باشد. همچنین مدول عکس العمل نرمال در حالت بدون بولت بطور متوسط ۱/۷۵ درصد بیشتر از حالت بولت دار می باشد این روند کاهش درصد اختلاف مدول های عکس العمل با افزایش بار نرمال برای دو حالت بتن خالص و بولت دار، تاکید مجددی بر ارتباط مستقیم مدول های عکس العمل برشی و نرمال با بار نرمال بر سطح تماس می باشد.

۳-۶- جمع بندی

با توجه به وابستگی سختی اتصالات به هندسه تماس، مشخصات مکانیکی اجزاء و شرایط بارگذاری، در این تحقیق بواسطه آزمایش برش درزه، تاثیر پارامترهای مذکور بر سختی اتصال بین سگمنت‌ها و عملکرد سازه‌ای پوشش سگمنتال ارزیابی شد. نمونه‌های بتنی از محل اتصال طولی سگمنت‌های تونل ابوذر و در محل کارخانه سگمنت تهران تولید شد. نوار آب‌بند و بولت مورد استفاده در آزمایش نیز از همان نوع بکار رفته تونل ابوذر انتخاب شده است. به منظور لحاظ تمام جزئیات محل اتصال، آزمایشات در سه حالت اتصال خالص بتن به بتن، با نوار آب‌بند و با بولت انجام گرفت. با توجه به محدودیت اعمال بار توسط دستگاه، بار نرمال بر سطح اتصال نمونه‌های آزمایشگاهی متناسب با روباره تونل، در ۸ سطح تنش از ۰/۲۵ تا ۲ MPa (با فواصل ۰/۲۵ MPa) انتخاب شد. نتایج آزمایشات بصورت تغییرات جابجایی نرمال - تنش نرمال و جابجایی برشی - تنش برشی نمونه‌های بتنی بر روی هم، برداشت شده است. نتایج آزمایشات نشان دهنده روند کلی خطی برای تغییرات مذکور می باشد که شیب این خطوط (مربوط به هر یک از سه حالت سطح اتصال و عملکرد ملحقات آن) نماینده مدول عکس العمل نرمال یا برشی سطح اتصال قطعات بوده که با ضرب موثر اتصال سگمنت‌ها در مدول‌های فوق مقدار ضرایب سختی نرمال و برشی سطح تماس سگمنت‌ها بدست می‌آید. مقایسه نتایج آزمایش اتصال خالص بتن به بتن با اتصال با نوار آب‌بند نشان داد که با افزایش تنش نرمال، نوار آب‌بند عملاً تاثیر خود را بر روی سختی محل اتصال از دست می‌دهد. نمودار سه بخشی تغییرات جابجایی برشی - تنش برشی سطح اتصال بولت‌دار نشان دهنده سه بخش مقاومت اصطکاکی بتن بر روی بتن، لغزش بتن بر روی بتن (تا حد لقی بین دیواره سوراخ و بولت) و عملکرد بولت فولادی می‌باشد که شیب هر یکی از خطوط متناسب با تنش نرمال اعمال شده متفاوت است. مقایسه نتایج آزمایش اتصال خالص بتن به بتن و اتصال بولت‌دار نشان داد که اختلاف سختی نرمال دو آزمایش در مقابل تنش نرمال بر سطح تماس، تغییرات یکنواختی داشته ولی اختلاف سختی برشی با

افزایش تنش نرمال کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر با افزایش تنش نرمال، از تاثیر بولت بر روی سختی برشی کاسته می‌شود.

فصل چهارم:

توسعه مدل عددی برای ارزیابی مدل

تماس پیشنهادی

۴-۱- مقدمه

سختی محل اتصال سگمنت‌ها یکی از پارامترهای تاثیرگذار بر مقادیر نیروهای وارد بر پوشش بوده و تحلیل و طراحی سازه‌ای آن را تحت تاثیر قرار می‌دهد. به عبارت دیگر، به لحاظ آنکه پوشش متشکل از قطعات بتنی تونل حفاری سپری یک سازه حلقه‌ای پیوسته نمی‌باشد، تاثیر اتصالات بر روی نیروهای داخلی و جابجایی‌ها بایستی در طراحی پوشش تونل لحاظ گردد. تعیین نادرست نیروهای داخلی قطعاً بر نتایج طراحی تاثیرگذار بوده و ممکن است به طرحی غیرمطمئن منجر شود. بنابراین به منظور طراحی صحیح این سازه قطعه‌ای و طویل بایستی رفتار آن بخصوص در محل اتصال قطعات، تحت بارهای مختلف به درستی ارزیابی شود. آزمایشات ذکر شده در فصل قبل منجر به ارائه روابطی بین سختی برشی و نرمال سطوح تماس با تنش نرمال وارد بر این سطوح شد. روابط مذکور برای سه حالت تماس ساده بتن با بتن، با نوار آب‌بند و با بولت ارائه گردید. در این فصل نحوه استفاده از این روابط در مدل‌های ساده تیر و فنر در حالت دوبعدی ارائه شده و توسط مدل‌های سه بعدی با المان تماس اصطکاکی کالیبره شده، به ارزیابی آن‌ها پرداخته می‌شود.

۴-۲- مدل تیر و فنر با المان تماس پیشنهادی

در این بخش هدف آن است که میزان کارایی سختی‌های برشی و نرمال بدست آمده، در مدل‌سازی رفتار پوشش تونل ابودر بعنوان یک مورد مطالعاتی تونل شهری مورد ارزیابی قرار داده شود. برای این منظور از مدل تیر بر روی بستر ارتجاعی استفاده شده است. برای تحلیل عددی دو بعدی از نرم افزار اجزای محدود SAP2000 جهت مدل‌سازی استفاده شده است (CSI, 2009).

به منظور لحاظ کردن اندرکنش زمین و پوشش تونل از المان‌های Gap با ضرایب سختی تماسی و شعاعی بدست آمده از روابط Winkler استفاده شده است. مقدار ضرایب سختی فنر شعاعی از رابطه ۴-۱ و ضریب سختی فنر تماسی یک سوم مقدار شعاعی آن در نظر گرفته شده است (Plizzari and Tiberi, 2006).

$$K_r = \frac{E_s b R \theta}{R(1 + \nu_s)} \quad (1-4)$$

که در آن، E_s و ν_s به ترتیب مدول الاستیک و نسبت پواسون خاک یا زمین اطراف تونل، b عرض سگمنت، $R\theta$ طول کمان هر المان سازه‌ای بین دو گره متصل به زمین و R شعاع خارجی تونل می‌باشد. با عنایت به تعداد ۹۰ المان Gap لحاظ شده برای مدل‌سازی اندرکنش زمین و پوشش تونل، ضریب سختی شعاعی و تماسی هر المان Gap به ترتیب برابر $۲/۸۰$ و $۰/۹۳$ MN/m بدست آمده است.

با عنایت به نقش و تاثیر ناچیز نوار آب‌بند در مقابل تاثیر زیاد بولت بر سطح اتصال سگمنت‌ها، در ادامه مدل تیر و فنر پیشنهادی و تاثیر سختی فنرهای مذکور در دو حالت سطح اتصال ساده بتن با بتن و سطح اتصال بولت‌دار مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۴-۲-۱- مدل تیر و فنر در حالت تماس ساده بتن به بتن

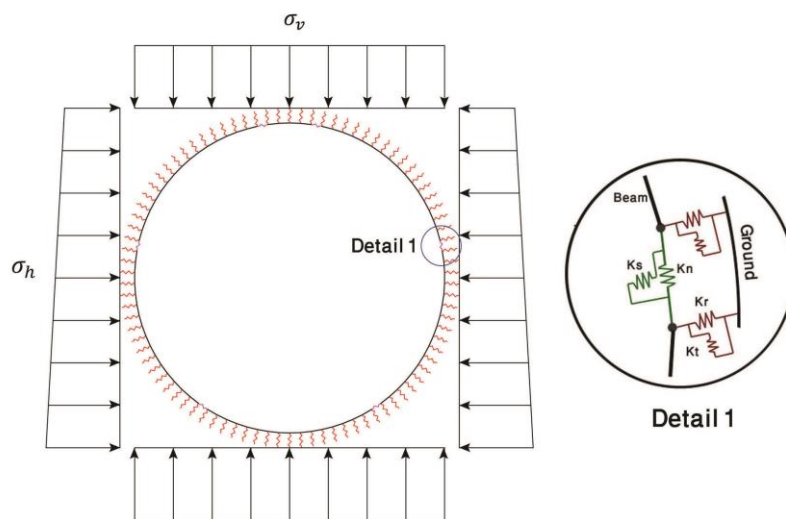
با توجه به اینکه بخش اعظم تماس دو سگمنت به واسطه اتصال ساده بتن با بتن بوده و بولت در مراحل بعدی وارد عمل می‌شود، لذا در این بخش با رویکرد بررسی مدل‌های قبلی اتصال سگمنت به سگمنت و مقایسه آنها با مدل ارائه شده، روابط مربوط به اتصال ساده بتن به بتن مورد استفاده قرار گرفته و با مدل‌های تحلیلی ارائه شده در فصل دوم مقایسه می‌گردد. لذا در این بخش مجموعاً ۲۲ تحلیل دو بعدی به شرح زیر انجام شد:

- یک مدل پوشش یکپارچه بدون درز و با سختی خمشی EI ؛
- نه مدل شامل پوشش با صلبیت کاهش یافته ηEI با نسبت موثر سختی خمشی (η) ۰/۱ تا ۰/۹؛

- یک مدل پوشش چند مفصلی؛
- دو مدل شامل پوشش با ممان اینرسی موثر مینیمم و ماکزیمم بدست آمده از روابط ۲-۴ و ۲-۵؛
- هشت مدل تیر و فنر پیچشی با سختی ۱ تا 128 MN.m/rad بدلیل بازه گسترده ضریب سختی خمشی و به منظور ارزیابی نرخ تغییر نیروها و جابجایی‌های ایجاد شده در اعضای تیر (پوشش تونل) در بازه مذکور؛

- یک مدل تیر و فنرهای برشی و نرمال با ضرایب سختی ارائه شده در این تحقیق؛

در شکل ۱-۴ نمونه‌ای از مدل‌های ساخته شده با جزئیات مدل‌سازی اتصالات نشان داده شده است.

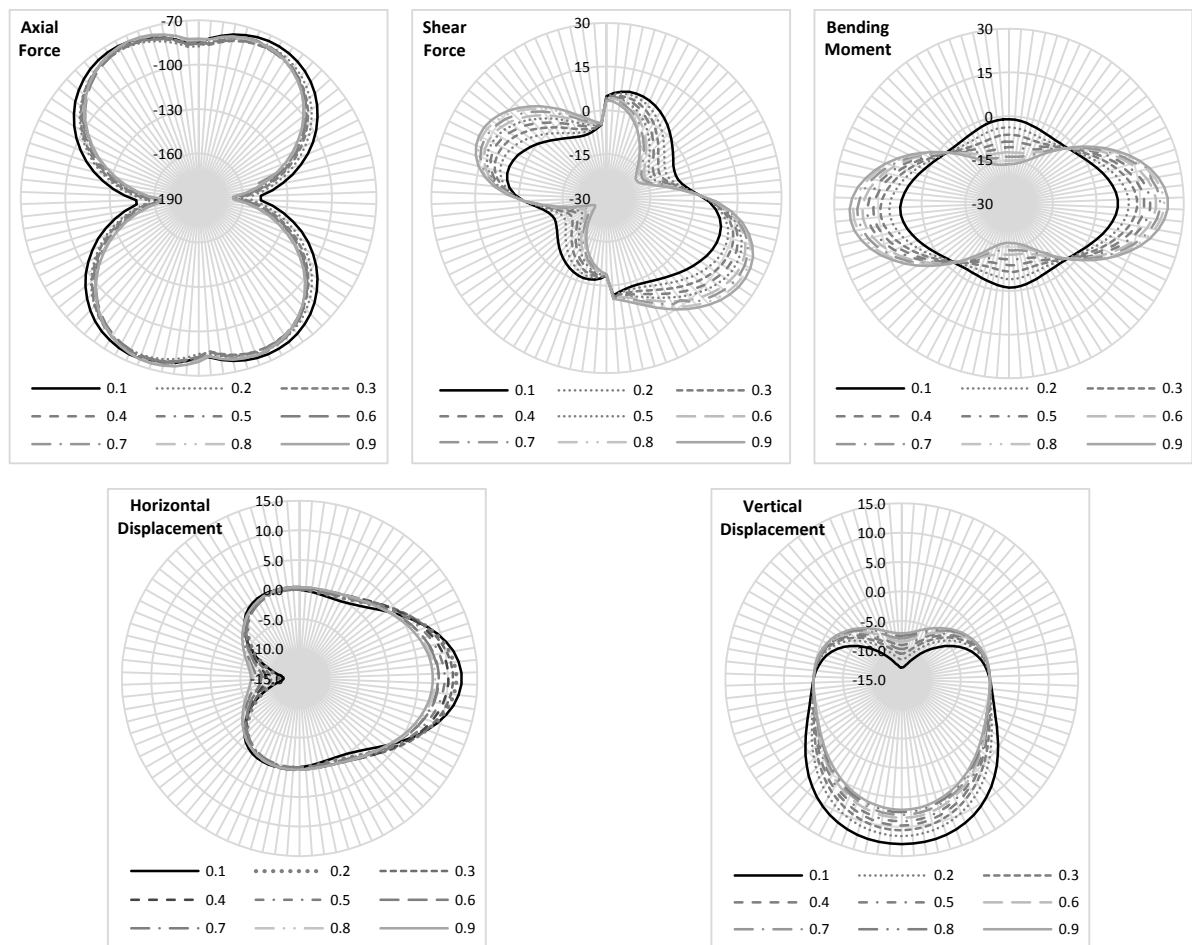


شکل ۱-۴- مدل تیر بر روی بستر الاستیک و جزئیات مدل‌سازی اتصالات سگمنت‌های یک حلقه

با توجه به شرایط مساله اشاره شده در جدول ۳-۱ و سر بار ۳۰ متری تونل، از معادله ۳-۱ مقدار تنش نرمال (σ_n) اعمال شده به سطح موثر اتصال سگمنت‌ها برابر $4/35 \text{ MPa}$ بدست آمده و از روابط پیشنهاد شده ۳-۲ و ۳-۳ مقادیر مدول عکس العمل برشی و نرمال به ترتیب $k_s = 6.24 \text{ MPa/mm}$ و $k_n = 5.36 \text{ MPa/mm}$ بدست می‌آید. برای محاسبه سختی فنرهای برشی و نرمال لازم است مقادیر مذکور در سطح تماس موثر سگمنت‌ها ($1/2 \times 0/15 \text{ m}^2$) ضرب شوند. به این ترتیب ضرایب سختی برشی و نرمال سطح موثر اتصال سگمنت‌ها به ترتیب $k_s = 1123.76 \text{ MN/m}$ و $k_n = 965.28 \text{ MN/m}$ محاسبه شده است. لذا محل اتصالات با فنرهای خطی و بواسطه این ضرایب سختی برشی و نرمال مدل گردیده است. در تحلیل‌های عددی صورت گرفته نتایج مدل پیشنهادی بصورت مدل تیر و فنرهای تماسی^{۴۱} (B-CS) نامگذاری شده است. لازم به ذکر است که مطابق شکل ۴-۱ تمامی مدل‌های دو بعدی و سه بعدی (بغیر از مدل‌هایی که میزان بار و نسبت تنش افقی به قائم را تحت آنالیز حساسیت قرار داده‌اند) تحت بار یکسانی متناسب با روبراه ۳۰ متر و نسبت بار افقی به قائم معادل با $0/4$ بارگذاری شده‌اند. بار قائم و افقی مذکور در تراز تاج تونل به ترتیب معادل $0/54 \text{ MPa}$ و $0/22 \text{ MPa}$ می‌باشد که مطابق شکل ۴-۱ متناسب با عمق بصورت گرادیان بار به تمام ۹۰ گره مدل اعمال شده است.

به منظور بررسی میزان تغییرات نیرو و جابجایی اعضای سازه‌ای پوشش با صلبیت کاهش یافته در مقابل تغییر نسبت موثر سختی خمشی و انتخاب مدل مناسب از بین مدل‌های پوشش با سختی کاهش یافته ۹ مدل با نسبت موثر سختی خمشی (η) $0/1$ تا $0/9$ ساخته شده و نتایج آنها در شکل ۴-۲ مقایسه شده است.

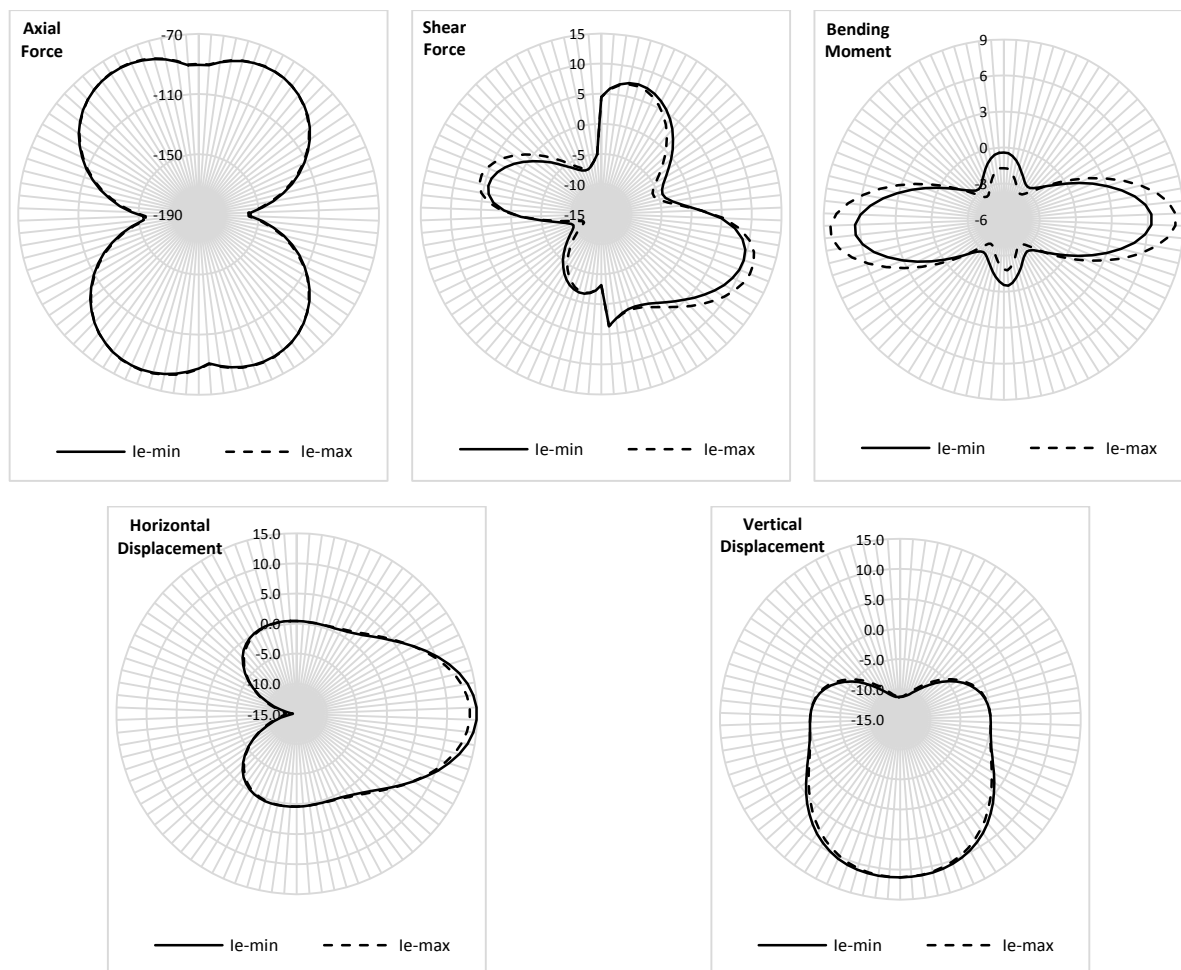
⁴¹ Beam- Contact Springs



شکل ۴-۲- تغییرات نیروهای محوری و برشی، لنگر خمشی و جابجایی‌های قائم و افقی اعضای سازه‌ای پوشش تونل در مقابل تغییرات نسبت موثر سختی خمشی

بررسی نتایج مدل‌های پوشش با صلبیت کاهش یافته در شکل ۴-۲ نشان می‌دهد که با افزایش نسبت موثر سختی خمشی مقادیر نیروی محوری و برشی و لنگر خمشی ایجاد شده در اعضای سازه پوشش نیز افزایش خواهد یافت. با مقایسه نتایج این مقادیر با مقادیر نیرو و لنگر مدل‌های دیگر ملاحظه می‌شود که این افزایش در جهت محافظه کاری بیشتر می‌باشد. لذا از میان ۹ مدل مربوط به نسبت‌های مختلف سختی خمشی کمترین مقدار آن یعنی $\eta = 0.1$ انتخاب شده و با نتایج مدل پیشنهادی مقایسه شده است.

به منظور انتخاب مدل مناسب از میان دو مدل پوشش با ممان اینرسی موثر ماکزیمم بدست آمده از معادله ۲-۴ ($I_{e,max} = 0.11I$) و مینیمم بدست آمده از معادله ۲-۵ ($I_{e,min} = 0.07I$)، تغییرات نیروی محوری و برشی و لنگر خمشی و همچنین جابجایی قائم و افقی اعضای پوشش تونل مورد مطالعه در شکل ۳-۴ نشان داده شده است.



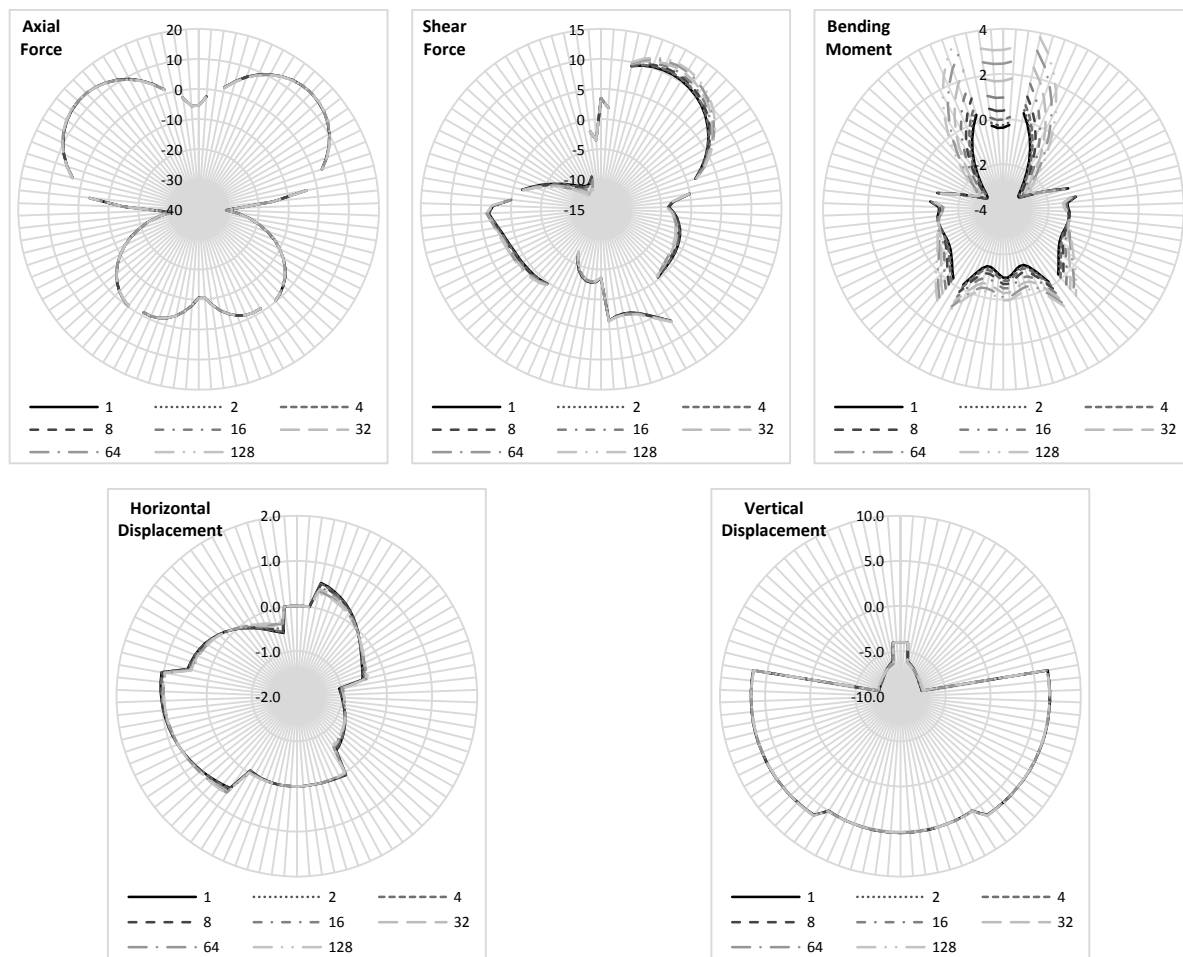
شکل ۳-۴- تغییرات نیروهای محوری و برشی، لنگر خمشی و جابجایی‌های قائم و افقی اعضای سازه‌ای پوشش تونل برای ممان اینرسی موثر مینیمم و ماکزیمم

مقایسه نتایج مدل‌سازی پوشش با ممان اینرسی موثر مینیمم و ماکزیمم در شکل ۳-۴ نشان دهنده آن است که نیروی محوری در هر دو حالت اختلاف چندانی با هم نداشته و در بیشترین مقدار نیروی محوری

$I_{e,max}$ حدود ۱ درصد بیشتر از $I_{e,min}$ است. در المان‌های تیر واقع در ربع اول و سوم نیروی برشی $I_{e,min}$ بیشتر بوده و در ربع دوم و چهارم مقادیر نیروی برشی $I_{e,max}$ بیشتر است. بطور متوسط مقادیر نیروی برشی $I_{e,max}$ بیشتر از $I_{e,min}$ است. همچنین مقادیر لنگر خمشی $I_{e,max}$ بیشتر از $I_{e,min}$ است. در مجموع مدل $I_{e,min}$ جابجایی افقی و قائم بیشتری نسبت به مدل $I_{e,max}$ نشان می‌دهد. بنابراین از آنجایی که در مقایسه با سایر مدل‌ها، بیشتر بودن مقادیر نیروها و بخصوص لنگر خمشی مدل $I_{e,max}$ در جهت محافظه کاری بیشتری بوده و نتایج آن به مدل پوشش یکپارچه نزدیکتر می‌شود، لذا به منظور مقایسه روش ممان اینرسی موثر با روش تیر و فنرهای برشی و نرمال پیشنهاد شده، از نتایج مدل $I_{e,min}$ استفاده می‌شود.

بدلیل بازه گسترده ضریب سختی پیچشی در ادبیات فنی پیشین و به منظور ارزیابی نرخ تغییر نیروها و جابجایی‌های ایجاد شده در اعضای تیر (پوشش تونل) در بازه مذکور، هشت مدل بواسطه فنرهای خطی با ضریب سختی پیچشی ۱ تا 128 MN.m/rad ساخته شد که نتایج آن در شکل ۴-۴ نشان داده شده است.

بررسی نتایج مدل‌های تیر و فنر پیچشی ارائه شده در شکل ۴-۴ نشان می‌دهد که مقادیر نیروی محوری و جابجایی‌های افقی و قائم المان‌های تیر برای مقادیر مختلف سختی پیچشی تغییر چندانی نمی‌کند. با افزایش مقدار ضریب سختی پیچشی محل اتصال سگمنت‌ها، نیروی برشی و لنگر خمشی اعضای پوشش مقداری افزایش می‌یابد. لذا با توجه به نتایج سایر روش‌ها بهترین حالت برای مدل تیر و فنر پیچشی کمترین مقدار ضریب سختی پیچشی پیشنهاد شده در ادبیات فنی گذشته (حدوداً $k_{\theta} = 1 \text{ MN.m/}$ *rad*) می‌باشد (Teachavorasinskun & Chub-uppakarn, 2010).



شکل ۴-۴- تغییرات نیروهای محوری و برشی، لنگر خمشی و جابجایی‌های قائم و افقی اعضای تیر پوشش تونل در مقابل تغییرات سختی فنر پیچشی

۴-۱-۲-۱- مقایسه نتایج راه‌حل‌های تحلیل با مدل پیشنهادی

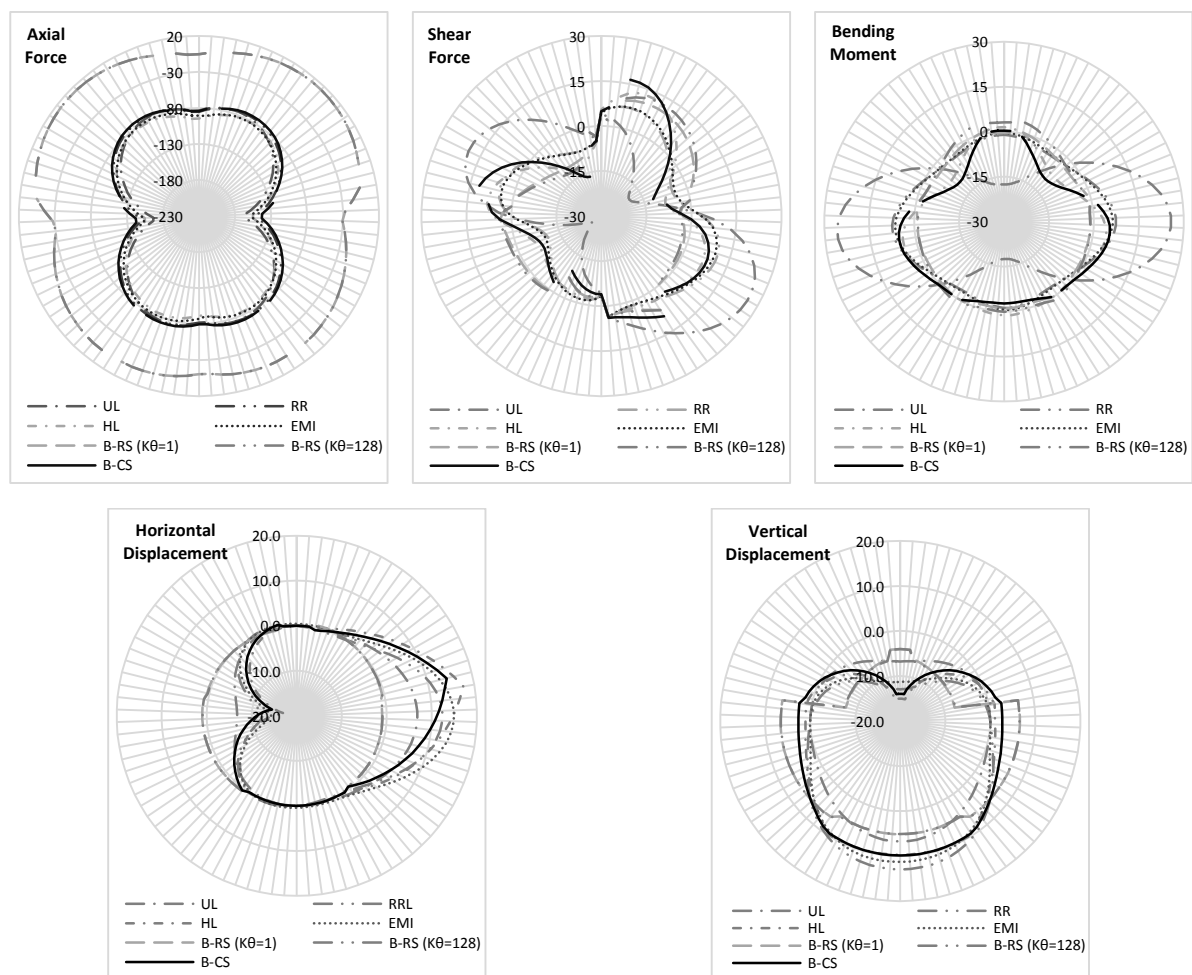
نتایج حاصل از مقایسه مدل‌های پوشش یکپارچه^{۴۲} (UL)، پوشش با سختی کاهش یافته^{۴۳} (RR)، پوشش چند مفصلی^{۴۴} (HL)، پوشش با ممان اینرسی موثر^{۴۵} (EMI)، مدل تیر و فنر پیچشی^{۴۶} (B-RS) و مدل

⁴² Uniform Lining

⁴³ Reduced Rigidity

⁴⁴ Hinged Lining

تیر و فنرهای تماسی (B-CS) نشان می‌دهد که مدل تیر و فنرهای برشی و نرمال هماهنگی بیشتری با نتایج همه مدل‌ها داشته و نتایجی بین مدل پوشش با سختی کاهش یافته و مدل پوشش چند مفصلی ارائه می‌کند (شکل ۴-۵).



شکل ۴-۵- تغییرات نیروهای محوری و برشی، لنگر خمشی و جابجایی‌های قائم و افقی اعضای تیر پوشش تونل برای ۶ مدل مذکور برای ارزیابی عملکرد درزهای طولی یک حلقه از پوشش سگمنتال

نتایج این مدل‌ها بصورت مقادیر نیروی محوری ماکزیمم به همراه نیروی برشی و لنگر خمشی در همان المان و همچنین لنگر خمشی ماکزیمم به همراه نیروی محوری و برشی متناظر با آن، در جدول ۴-۱ و

⁴⁵ Effective Moment of Inertia

⁴⁶ Beam- Rotational Spring

جابجایی‌های ایجاد شده درالمان سقف، کف و دیواره تونل در جدول ۴-۲ ارائه شده است. در این جداول اختلاف مقادیر مذکور نسبت به مدل تیر و فنرهای برشی و نرمال (B-CS) پیشنهادی محاسبه شده است.

جدول ۴-۱- درصد اختلاف مقادیر نیروهای محوری و برشی و لنگر خمشی ایجاد شده در اعضای پوشش مدل‌های مختلف با مدل پیشنهادی

	Pmax (ton)	M (ton.m)	V (ton)	P (ton)	Mmax (ton.m)	V (ton)
UL	166.47	25.71	1.63	166.47	25.71	1.63
	-16.99%	-382.36%	76.61%	-111.10%	-148.89%	27.56%
RR	147.70	7.36	1.63	147.70	7.36	1.63
	-3.80%	-38.09%	76.61%	-87.29%	28.75%	27.56%
HL	154.64	3.86	7.89	90.52	7.84	2.20
	-8.68%	27.58%	-13.20%	-14.79%	24.10%	2.22%
EMI	155.41	6.30	1.63	155.41	6.30	1.63
	-9.22%	-18.20%	76.61%	-97.07%	39.01%	27.56%
B-RS	30.80	1.52	3.01	9.52	4.49	0.70
	78.35%	71.48%	56.81%	87.93%	56.53%	68.89%
B-CS	142.29	5.33	6.97	78.86	10.33	2.25

بررسی مقادیر جدول ۴-۱ نشان می‌دهد که روش تیر- فنر پیچشی اختلاف زیادی با سایر روش‌ها دارد چنانچه بیشترین نیروی محوری آن کمتر از ۲۰ درصد سایر روش‌ها و حدود ۲۱ درصد روش تیر و فنرهای برشی و نرمال می‌باشد. علاوه بر نیروی محوری این روش نیروی برشی و لنگر خمشی کمتری نسبت به سایر روش‌ها نشان می‌دهد. ماکزیمم لنگر خمشی ایجاد شده در مدل تیر و فنر پیچشی کمتر از ۷۰ درصد سایر روش‌ها و حدود ۴۳ درصد روش تیر و فنرهای برشی و نرمال می‌باشد. روش‌های پوشش چند مفصلی، پوشش با صلبیت کاهش یافته و ممان اینرسی موثر به ترتیب بیشترین تطابق را با روش تیر و فنرهای برشی و نرمال دارند. اختلاف بین نیروی محوری ماکزیمم این سه روش و روش تیر و فنرهای برشی و نرمال در بیشترین مقدار ۹/۲۲ درصد مربوط به روش ممان اینرسی موثر و در کمترین مقدار حدود ۳/۸۰ درصد مربوط به پوشش با صلبیت کاهش یافته می‌باشد. در مورد لنگر خمشی ماکزیمم بین

این سه روش نیز بیشترین اختلاف ۳۹ درصد مربوط به روش ممان اینرسی موثر و کمترین اختلاف ۲۴/۱ درصد مربوط به پوشش چند مفصلی می‌باشد.

جدول ۴-۲- درصد اختلاف مقادیر جابجایی‌های افقی و قائم ایجاد شده در اعضای پوشش مدل‌های مختلف با مدل پیشنهادی

	Roof		Wall		Invert	
	H-Disp. (m)	V-Disp. (m)	H-Disp. (m)	V-Disp. (m)	H-Disp. (m)	V-Disp. (m)
UL	1.97E-15	-6.76E-03	6.77E-03	1.35E-05	-3.68E-16	6.76E-03
	814.03%	51.55%	36.70%	99.49%	109.13%	31.62%
RR	1.72E-16	-1.29E-02	1.23E-02	1.20E-04	-3.55E-17	1.29E-02
	162.24%	7.21%	-15.28%	95.46%	100.88%	-30.96%
HL	-5.08E-15	-1.50E-02	1.42E-02	1.09E-03	1.28E-15	9.71E-03
	-1742.51%	-7.67%	-32.65%	59.12%	68.25%	1.73%
EMI	4.27E-04	-1.13E-02	1.49E-02	2.98E-05	4.27E-04	1.13E-02
	-	19.00%	-39.29%	98.88%	-	-14.32%
B-RS	2.51E-15	-2.29E-02	-5.55E-03	3.72E-02	-1.19E-15	2.90E-02
	1009.18%	-64.48%	151.87%	-1301.80%	129.52%	-193.33%
B-CS	-2.76E-16	-1.39E-02	1.07E-02	2.66E-03	4.04E-15	9.88E-03

همانگونه که در جدول ۴-۲ نشان داده شده است، مقادیر جابجایی‌های ایجاد شده در مدل تیر و فنر پیچشی بطور متوسط نسبت به سایر روش‌ها بیشتر می‌باشد. از نظر جابجایی نیز سه مدل صلبیت کاهش یافته، مفصلی و ممان اینرسی موثر نتایج نزدیکی به مدل تیر و فنرهای برشی و نرمال نشان می‌دهد. از میان این سه روش، اختلاف جابجایی افقی و قائم سقف تونل مدل صلبیت کاهش یافته به ترتیب با ۱۶۹/۲۴ و ۷/۲۱ درصد کمترین و مدل ممان اینرسی موثر با ۱۹ درصد بیشترین اختلاف را با مدل تیر و فنرهای برشی و نرمال نشان می‌دهند. از نظر جابجایی افقی و قائم کف تونل روش مفصلی به ترتیب با ۶۸/۲۵ و ۱/۷۳ درصد کمترین اختلاف را داشته و مدل ممان اینرسی موثر از نظر جابجای افقی و همچنین مدل صلبیت کاهش یافته با ۳۰/۹۶ درصد بیشترین اختلاف را از نظر جابجایی قائم با مدل

پیشنهادی دارد. مقایسه جابجایی دیواره نشان می‌دهد که از نظر جابجایی افقی دیواره مدل صلبیت کاهش یافته با ۱۵/۲۸ درصد کمترین و مدل ممان اینرسی موثر با ۳۹/۲۹ درصد بیشترین اختلاف را با مدل پیشنهادی دارند. همچنین از نظر جابجایی قائم دیواره مدل مفصلی با ۵۹/۱۲ درصد کمترین و مدل ممان اینرسی موثر با ۹۸/۸۸ درصد بیشترین اختلاف را بین سه مدل یاد شده با مدل تیر و فنرهای برشی و نرمال دارند.

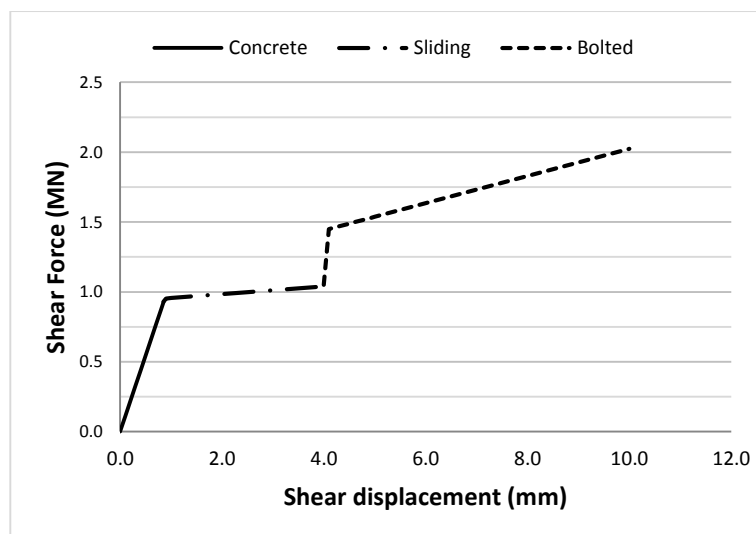
بعلاوه همچنان که نمودارهای شکل ۴-۵ نیز نشان می‌دهد، نیروی محوری و برشی و لنگر خمشی و همچنین جابجایی‌های قائم و افقی روش تیر و فنرهای برشی و نرمال تطابق خوبی با روش‌های مرسوم بخصوص به روش پوشش با صلبیت کاهش یافته، مفصلی و ممان اینرسی موثر داشته ولی مقدار نیروی محوری و لنگر خمشی کمتری از روش‌های دیگر (بغیر از روش تیر و فنر پیچشی) نشان می‌دهد. همچنین بدلیل استفاده از فنر برشی با سختی متناسب با تنش نرمال در آن نقطه، مقدار واقعی تری از نیروی برشی ایجاد شده در محل اتصال را نشان می‌دهد.

۴-۲-۲- مدل تیر و فنر در حالت سطوح اتصال بولت‌دار

در بخش قبل به ارزیابی مدل تیر و فنرهای تماسی پیشنهادی در مقایسه با مدل‌های تحلیلی موجود پرداخته شد. از سوی دیگر با توجه به نقش بولت در بارهای زیاد، لازم دیده شد تا روابط ارائه شده برای این حالت از تماس سگمنت‌ها مورد ارزیابی قرار گرفته و شرایط عملکرد بولت مورد بررسی قرار گیرد. لذا در این بخش سختی فنرهای بین اتصال سگمنت‌ها در مدل ارائه شده در بخش قبل (مدل B-CS)، از روابط مربوط به عملکرد بولت تبعیت می‌نماید. بنابراین با توجه به تنش نرمال (σ_n) اعمال شده به سطح موثر اتصال سگمنت‌ها برابر ۴/۳۵ MPa، مقدار مدول عکس‌العمل نرمال در حالت بولت‌دار، از معادله ۳-۷ در حدود $k_n = 5.35 \text{ MPa/mm}$ بدست می‌آید. لذا برای بدست آوردن ضرایب سختی نرمال در شرایط

اتصال بولت‌دار، مقدار مدول مذکور در سطح تماس موثر سگمنت‌ها با کسر سوراخ‌های بولت ($1.2 \times$)
 $0.15 - 2\pi \times \frac{0.032^2}{4} \text{ m}^2$ ضرب شده و مقدار سختی نرمال برابر با $k_n = 954.75 \text{ MN/m}$ بدست می
آید. با توجه به سه بخشی بودن مدول عکس العمل برشی ارائه شده برای اتصال طولی سگمنت بولت‌دار،
از رابطه ۳-۶ مقدار مدول برای هر بخش آن بصورت مجزا محاسبه شده و در سطح اتصال موثر آن بخش
ضرب می شود. بنابراین به لحاظ درگیری فقط بتن در بخش اول، مقدار مدول عکس العمل برشی $k_s =$
 6.12 MPa/mm بدست آمده از خط اول معادله ۳-۶ در سطح موثر سگمنت با کسر سوراخ‌های بولت
ضرب شده و مقدار سختی برشی برابر با $k_s = 1092.29 \text{ MN/m}$ را برای بخش تماس برشی بتن با بتن
بدست می آید. در بخش دوم نیز به لحاظ لغزش بتن بر روی بتن، مقدار مدول عکس العمل برشی $k_s =$
 0.17 MPa/mm بدست آمده از خط دوم معادله ۳-۶ در سطح موثر سگمنت با کسر سوراخ‌های بولت
ضرب شده و مقدار $k_s = 30.58 \text{ MN/m}$ را برای سختی برشی بخش لغزش بتن بر روی بتن بدست می
آید. برای بخش سوم که مربوط به درگیری بولت فولادی می باشد، صرفنظر از لهیدگی بولت سطح غالب
درگیر سطح بولت‌های فولادی بوده و لازم است از مجموع سطح مقطع بولت‌های محل اتصال برای تعیین
سختی برشی استفاده شود ($2\pi \times \left(\frac{0.024}{2}\right)^2 = 9.05 \times 10^{-4} \text{ m}^2$). بنابراین برای محاسبه ضریب سختی
برشی بخش سوم، مدول عکس العمل برشی $k_s = 107.49 \text{ MPa/mm}$ بدست آمده از خط سوم معادله
۳-۶ را در سطح مقطع معادل محاسبه شده در بالا ($9.05 \times 10^{-4} \text{ m}^2$) ضرب می کنیم ($k_s =$
 97.25 MN/m). به منظور مدلسازی عددی رفتار غیر خطی محل اتصال طولی سگمنت‌های بولت‌دار، با
توجه به مقادیر سختی برشی بدست آمده در بالا و محدوده جابجایی برشی هر کدام از بخش‌های معادله
۳-۶، سختی نرمال و برشی محل اتصال با استفاده از المان Link و بصورت تغییرات چند خطی نیرو-
تغییر شکل، تعریف می‌شود. به عنوان مثال نمونه‌ای از تغییرات چند خطی نیرو-تغییر شکل برشی اعمال
شده به مدل پوشش سگمنتال بولت‌دار تحت روباره ۳۰ متری ($\sigma_n = 4.35 \text{ MPa}$) در شکل ۴-۶ نشان

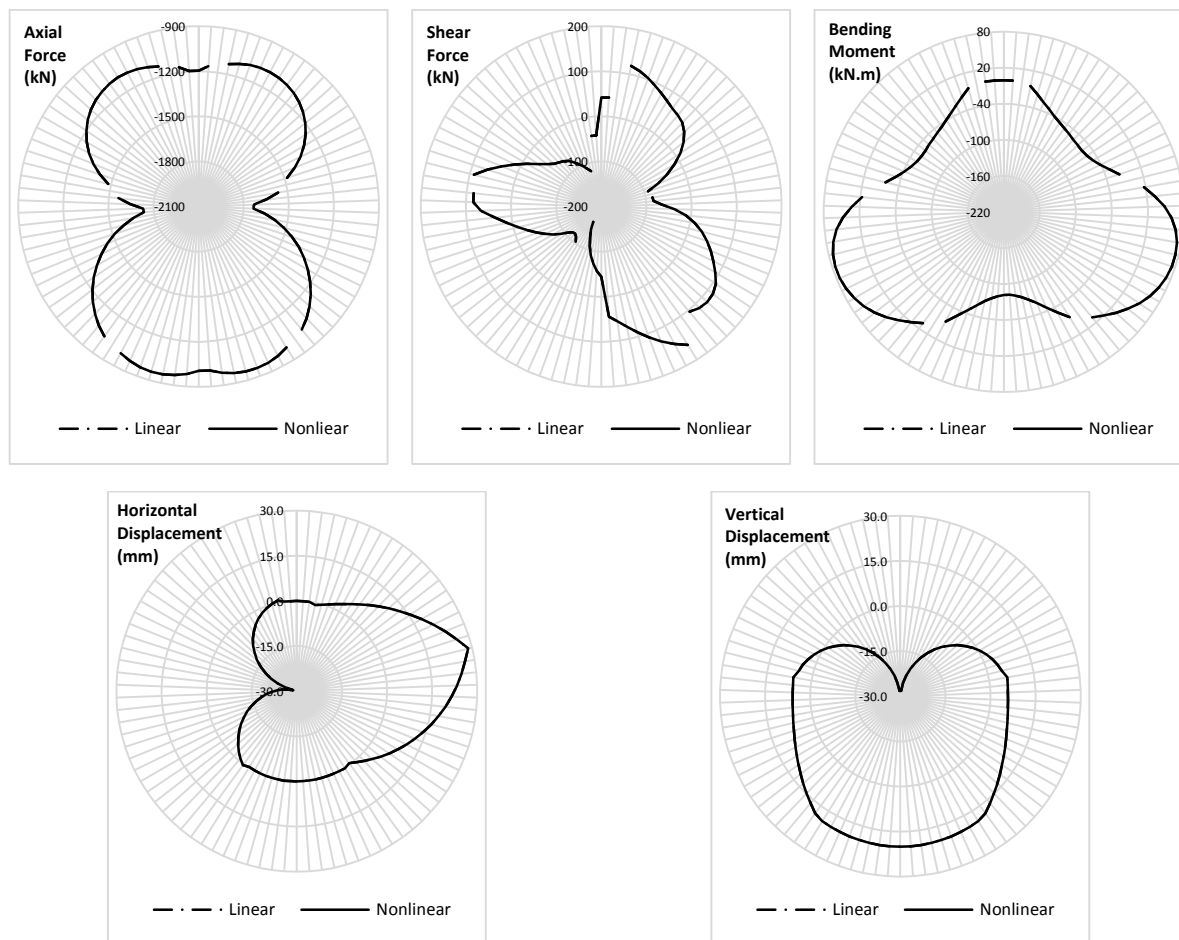
داده شده است. در تحلیل‌های عددی صورت گرفته نتایج چنین مدلی بصورت مدل غیر خطی نامگذاری شده است.



شکل ۴-۶- تغییرات تغییرات چند خطی نیرو- تغییر شکل برشی محل اتصال سگمنت بولت‌دار در $\sigma_n = 4.35 \text{ MPa}$

۴-۲-۱- مقایسه نتایج تحلیل پوشش سگمنتال با و بدون بولت

برای مقایسه رفتار محل اتصال سگمنت‌ها در دو حالت با و بدون بولت، مدل تیر و فنر ساده‌ای از پوشش سگمنتال تونل ابودر با روباره ۳۰ متری ($\sigma_n = 4.35 \text{ MPa}$) و مشخصات ذکر شده در شکل ۳-۱ و جدول ۳-۱ مورد ارزیابی قرار گرفت. مدل پوشش سگمنتال بدون بولت بصورت خطی تحلیل شده و سگمنت‌های بولت‌دار با مشخصات سختی چند خطی بصورت غیرخطی تحلیل شده است. به منظور ارزیابی رفتار سازه پوشش مذکور، میزان تغییرات نیرو و جابجایی اعضای سازه‌ای پوشش سگمنتال در دو حالت با و بدون بولت در شکل ۴-۷ نشان داده شده است.



شکل ۴-۷- نیروهای داخلی و جابجایی‌های اعضای سازه‌ای پوشش سگمنتال تونل بدون بولت (خطی) و با بولت (غیر خطی)

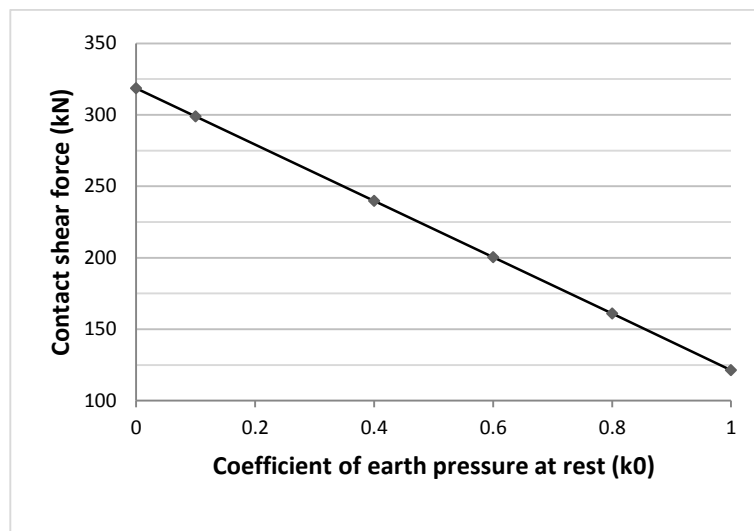
تحلیل‌های غیر خطی پوشش سگمنتال در شرایط بولت‌دار نشان می‌دهد که تحت نیروهای ناشی از روباره ۳۰ متر، رفتار برشی المان‌های غیرخطی Link مدل شده در محل اتصالات سگمنت‌ها، در محدوده عملکرد بخش اول سختی برشی محل تماس بولت‌دار (خط اول معادله ۳-۶ مربوط به تماس بتن با بتن) باقی مانده و وارد بخش دوم و سوم سختی برشی غیرخطی (لغزش و عملکرد بولت) نشده است. لذا با توجه به اختلاف کم سختی برشی و نرمال بخش مذکور در تحلیل غیرخطی پوشش سگمنتال بولت‌دار نسبت به مقادیر متناظر سختی محل اتصال سگمنت‌ها در تحلیل خطی پوشش بدون بولت و همچنین

سختی بسیار کم اندرکنش زمین- پوشش، جابجایی‌ها و نیروهای داخلی اعضای سازه‌ای پوشش سگمنتال بولت‌دار نسبت به حالت بدون بولت تغییر محسوسی نشان نمی‌دهد (شکل ۴-۷).

۴-۲-۲-۲- آنالیز حساسیت پارامترهای موثر بر رفتار غیرخطی تماس بولت‌دار سگمنت‌ها

به منظور بررسی شرایط لازم برای تحقق رفتار لغزشی و عملکرد بولت در محل اتصال طولی سگمنت‌های بولت‌دار، تاثیر هر کدام از پارامترهای محیطی دخیل در مدلسازی و حساسیت رفتار غیرخطی سطح تماس سگمنت‌های بولت‌دار نسبت به تغییرات هر پارامتر مورد ارزیابی قرار گرفته است. از پارامترهای محیطی موثر بر رفتار پوشش تونل، نسبت تنش بر جای افقی به قائم (k_0)، ارتفاع روباره تونل (h) و صلیبیت خاک اطراف تونل (E_s) که بواسطه رابطه ۴-۱ تاثیر آن بصورت اندرکنش پوشش و زمین (ضرایب سختی فنرهای شعاعی و برشی پیرامون پوشش تونل k_r و k_t) لحاظ شده است، تحلیل حساسیت شده‌اند. لازم به ذکر است که مطابق شکل ۴-۶ یکی از راهکارهای ارزیابی عملکرد هر بخش از رفتار غیر خطی اتصال بولت‌دار یا به عبارت ساده تر معیار تحقق رفتار لغزشی یا عملکرد بولت در محل اتصال بولت‌دار، مقایسه نیروی برشی ایجاد شده در المان Link مدل شده در محل اتصالات با مقادیر نیروی برشی آستانه حد آن بخش (لغزش یا عملکرد بولت) تحت شرایط مختلف مدلسازی می‌باشد. به عنوان مثال در شکل ۴-۶ برای تنش نرمال سطح تماس سگمنت‌ها برابر با $\sigma_n = 4.35 \text{ MPa}$ نیروی برشی حد آستانه لغزش برابر با $954/44 \text{ kN}$ و نیروی برشی حد آستانه عملکرد بولت $1439/78 \text{ kN}$ می‌باشد.

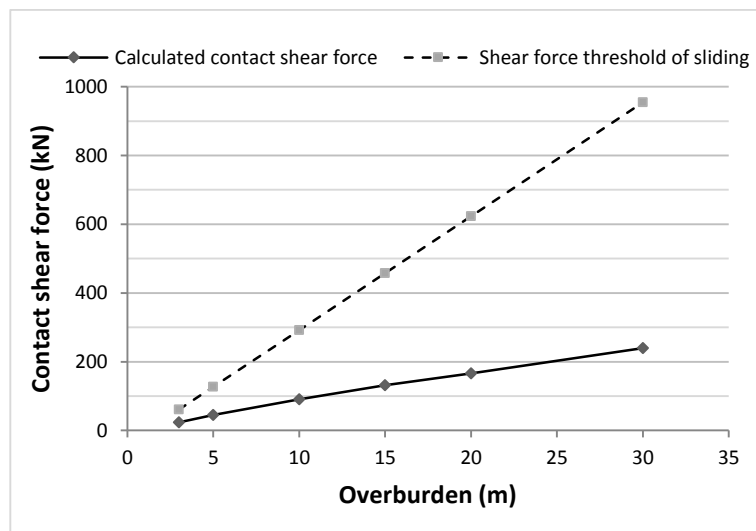
به منظور تحلیل حساسیت بر روی پارامتر k_0 ، با ثابت نگه داشتن بقیه پارامترهای مدل غیر خطی پوشش سگمنتال بولت‌دار ابودر با روباره ۳۰ متر، تاثیر پارامتر k_0 در محدود صفر تا ۱ مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج این بررسی در شکل ۴-۸ نشان داده شده است.



شکل ۴-۸- تاثیر تغییرات نسبت تنش بر جای افقی به قائم بر روی نیروی برشی سطح تماس بولت‌دار

نتایج تحلیل‌ها نشان می‌دهد که در شرایط مدل توصیف شده، حداکثر مقدار نیروی برشی سطح تماس بولت‌دار سگمنت‌های پوشش با افزایش ضریب k_0 کاهش می‌یابد. در مقایسه حداکثر مقدار نیروی برشی $318/67$ kN ایجاد شده در سطح تماس با مقدار نیروی برشی $954/44$ kN آستانه لغزش سطح تماس سگمنت بولت‌دار نشان می‌دهد که تغییر نسبت تنش بر جای افقی به قائم نمی‌تواند شرایط تحقق لغزش و عملکرد بولت در رفتار غیرخطی سطح تماس سگمنت بولت‌دار را برآورده نماید.

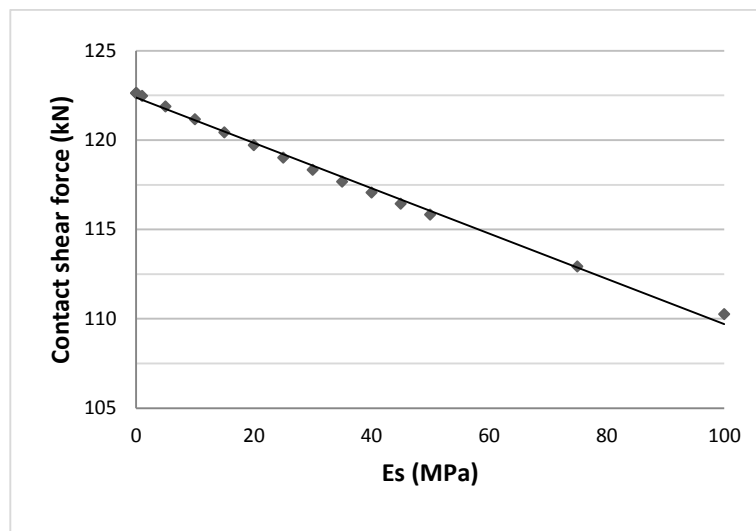
به منظور بررسی تاثیر ارتفاع روباره تونل، مقادیر روباره مدل اولیه تونل را از ۳ تا ۳۰ متر تغییر داده شده و بیشینه مقادیر نیروی برشی ایجاد شده در المان‌های Link، به همراه نیروی برشی حد آستانه لغزش در محل اتصال سگمنت‌های پوشش سگمنتال با رفتار برشی و نرمال تعریف شده در بالا، به صورت شکل ۴-۹ برداشت می‌شود.



شکل ۴-۹- تاثیر تغییر ارتفاع روباره بر روی نیروی برشی سطح تماس بولت‌دار

نتایج تغییرات فقط ارتفاع روباره تونل نشان می‌دهد که با افزایش روباره مقدار نیروی برشی ایجاد شده در المان Link محل اتصال سگمنت‌ها نیز بیشتر می‌شود. از طرفی بدلیل وابستگی مقادیر سختی برشی و نرمال ارائه شده با مقدار تنش نرمال بر سطح اتصال سگمنت که ناشی از روباره تونل می‌باشد، مقدار نیروی برشی حد آستانه لغزش نیز با افزایش روباره بیشتر خواهد شد. همانگونه که در شکل ۴-۹ نشان داده شده است نرخ افزایش نیروی برشی حد آستانه لغزش بسیار بیشتر از نرخ افزایش نیروی برشی محل تماس می‌باشد. لذا با توجه به اینکه نیروی برشی حد آستانه عملکرد بولت خیلی بیشتر از نیروی برشی حد آستانه لغزش است، لذا تغییر روباره نیز به تنهایی نمی‌تواند بولت را وارد عمل کند.

به منظور بررسی تاثیر صلبیت خاک اطراف تونل (E_s) بر روی پوشش سگمنتال بولت‌دار، بواسطه رابطه ۴-۱، اثر آن در مدل تیر و فنر، بصورت اندرکنش پوشش و زمین (ضرایب سختی فنرهای شعاعی و برشی پیرامون پوشش تونل k_r و k_t) لحاظ شده است. نتایج این بررسی بصورت پیشینه مقادیر نیروی برشی ایجاد شده در محل اتصال سگمنت‌ها با مقادیر مدول الاستیسیته خاک اطراف تونل در شکل ۴-۱۰ نشان داده شده است.



شکل ۴-۱۰- تغییرات مدول صلبیت زمین اطراف پوشش سگمنتال تونل بر روی نیروی برشی محل اتصال بولت‌دار

نتایج بررسی تاثیر صلبیت زمین بر سطح اتصال سگمنت بولت‌دار، نشان می‌دهد که با افزایش صلبیت خاک اطراف و به عبارتی افزایش سختی فنرهای اندرکنش زمین- پوشش تونل، نیروی برشی ایجاد شده در محل اتصال سگمنت‌ها کاهش می‌یابد. مقدار این کاهش بسیار کمتر از آن است که در شرایط طبیعی بتواند به تنهایی باعث لغزش یا عملکرد بولت در محل اتصال سگمنت‌ها شود.

با توجه به اینکه در شرایط عادی رفتار محل اتصال سگمنت‌ها وارد بخش عملکرد بولت نشده و بولت فعال نمی‌شود، در قالب مثال‌های خاص لرزه‌ای رفتار المان تماس بولت‌دار مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

۴-۲-۳- آنالیز حساسیت رفتار المان تماس بولت‌دار در شرایط لرزه ای

برای انجام تحلیل لرزه‌ای پوشش سگمنتال تونل، بر اساس روابط ارائه شده توسط Wang (۱۹۹۳) و Pensien (۲۰۰۰) برای بیضوی شدگی تونل‌های دایروی که پس از آنها توسط Hashash (۲۰۰۱) تعدیل

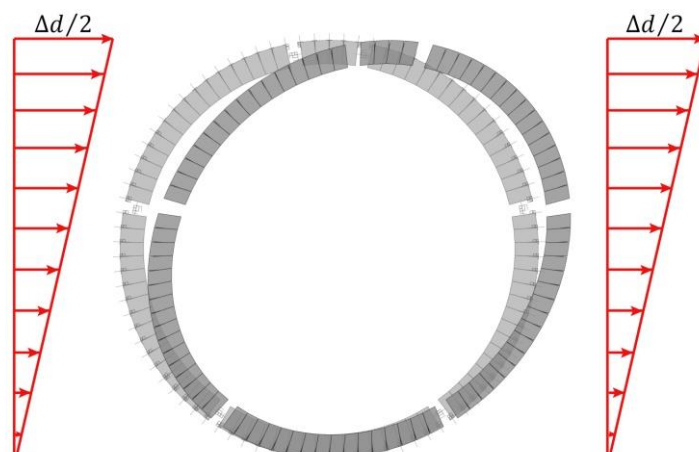
شده است، مقدار تغییر شکل قطری پوشش در اثر حداکثر زلزله محتمل^{۴۷} (MIE) محاسبه شده و به مدل SAP2000 اعمال می‌شود. بر این اساس مطابق بخش ۷-۲-۱ مقاله Hashash (۲۰۰۱) و مثال طراحی ۳ آن، برای زلزله‌ای با بزرگای $M_w = 8.5$ ، فاصله سایت تا منبع زلزله ۵۰ تا ۱۰۰ کیلومتر، نسبت جابجایی زمین در عمق به جابجایی سطح زمین در اثر این زلزله برابر 0.9 و نسبت سرعت حداکثر زمین به شتاب حداکثر آن در سطح زمین برابر $1/93$ m/g بوده و بقیه پارامترهای آن برای مقادیر مختلف شتاب PGA در جدول ۳-۴ ارائه شده است. لازم به ذکر است که مقادیر مدول الاستیسیته و مدول برشی مورد استفاده در این روابط از نوع دینامیکی بوده و بر اساس سرعت موج برشی، نسبت پواسون و دانسیته خاک بدست می‌آید.

جدول ۳-۴- پارامترهای محاسباتی تغییر شکل بیضوی پوشش تونل‌های دایروی

Peak ground particle acceleration at surface (PGA)	$a_{max} (g)$	1	0.9	0.8	0.7	0.6
Peak particle acceleration associated with S-wave	$a_s (g)$	0.9	0.81	0.72	0.63	0.54
Peak particle velocity associated with S-waves	$V_s (m/s)$	1.74	1.56	1.39	1.22	1.04
Maximum free-field shear strain of soil or rock medium	$\gamma_{max} (10^{-3})$	2.90	2.61	2.32	2.03	1.74
Free-field diametric deflection in non-perforated ground	$\Delta d_{free-field} (mm)$	6.08	5.47	4.86	4.26	3.65
Lining diametric deflection under normal loading only	$\Delta d_{lining}^n (mm)$	16	15	13	12	10

به منظور ایجاد تغییر شکل بیضوی در مدل پوشش سگمنتال تونل، مقادیر تغییر شکل نهایی بدست آمده از جدول ۳-۴، بصورت افقی و متقارن و با یک روند کاهش خطی از بیشینه مقدار تغییر شکل در تاج تا مقدار صفر در کف تونل، به همه گره‌های پوشش اعمال می‌شود (شکل ۴-۱۱).

⁴⁷ Maximum Incredible Earthquake



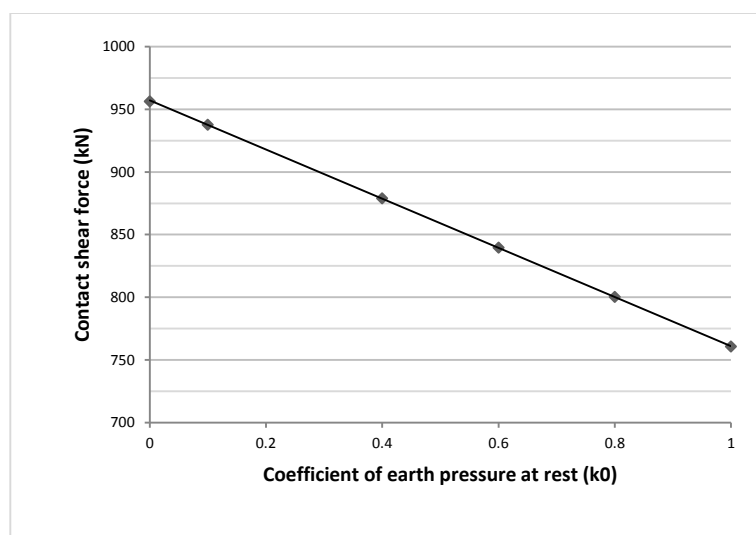
شکل ۴-۱۱- تغییر شکل بیضوی مدل پوشش سگمنتال تونل

با عنایت به مقدار بیشینه نیروی برشی در حدود $879/03 \text{ kN}$ ایجاد شده در محل اتصال پوشش سگمنتال بولت‌دار در اثر ماکزیمم زلزله محتمل با $\text{PGA}=1g$ ، که کمتر از مقدار نیروی برشی حد آستانه لغزش برابر با $954/44 \text{ kN}$ و نیروی برشی حد آستانه عملکرد بولت $1439/87 \text{ kN}$ (با روبراه 30 متر و $\sigma_n = 4.35 \text{ MPa}$) می‌باشد، تغییر شکل ناشی از تحلیل لرزه‌ای به تنهایی قادر به فعال نمودن بولت در محل اتصال نیست. بنابراین در ادامه ترکیب تغییر شکل بیضوی ذکر شده در جدول ۳-۴ با تغییر پارامترهای نسبت تنش بر جای افقی به قائم، ارتفاع روبراه و صلبیت خاک اطراف تونل تحت آنالیز حساسیت قرار می‌گیرد.

به منظور بررسی اثر تغییر نسبت تنش بر جای افقی به قائم در تحلیل لرزه‌ای با $\text{PGA}=1g$ ، مقادیر k_0 از صفر تا ۱ تغییر داده شده و نتایج آن بر روی نیروی برشی ایجاد شده در محل تماس بولت‌دار سگمنت‌ها در شکل ۴-۱۲ نشان داده شده است.

همانگونه که در شکل ۴-۱۲ نشان داده شده است، تحت تغییر شکل بیضوی ناشی از زلزله مذکور مقدار نیروی برشی سطح تماس بولت‌دار با افزایش k_0 کاهش می‌یابد. مقایسه شکل‌های ۴-۸ و ۴-۱۲ نشان

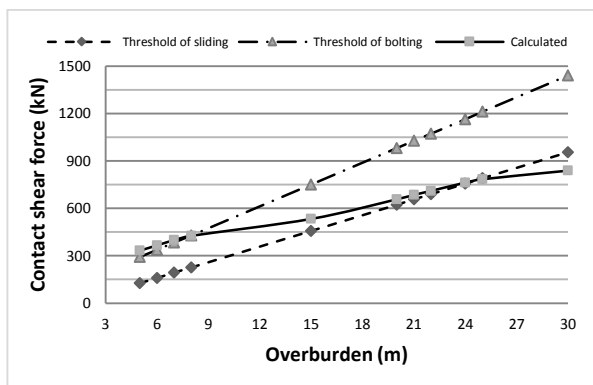
می دهد که مقادیر نیروی برشی سطح تماس بولت‌دار در حالت با تغییر شکل لرزه‌ای نسبت به حالت بدون تغییر شکل لرزه‌ای حدود ۴/۵ برابر (۳ تا ۶ برابر) شده است. با این وجود فقط نسبت‌های تنش برجای افقی به قائم صفر (با تنش برشی حدود ۹۵۶/۲۹ kN) می تواند باعث ایجاد لغزش در سطح اتصال بولت‌دار سگمنت‌ها شده ولی حتی کمترین مقدار نسبت تنش برجای افقی به قائم ($k_0 = 0$) نیز در شرایط زلزله شدید، نمی تواند بولت را فعال نماید.



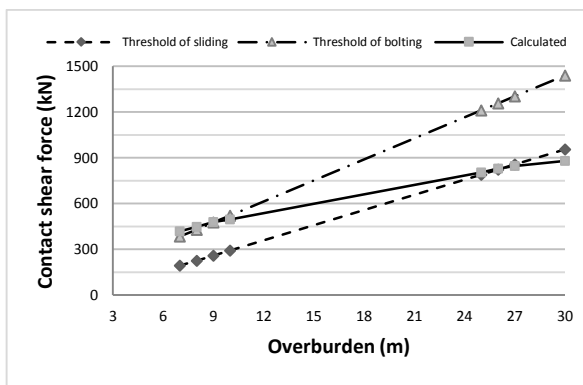
شکل ۴-۱۲- تاثیر تغییرات نسبت تنش برجای افقی به قائم بر روی نیروی برشی سطح تماس بولت‌دار تحت

ماکزیمم زلزله محتمل با $PGA=1g$

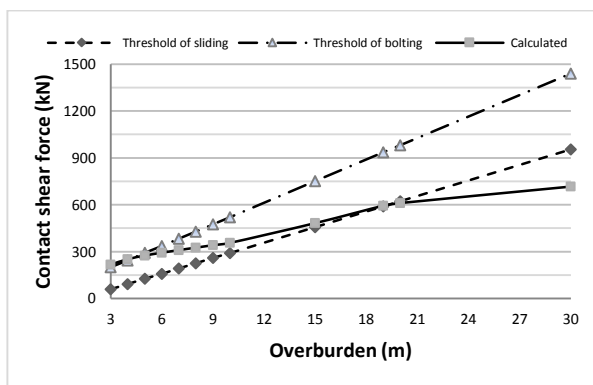
برای ارزیابی تغییر ارتفاع روباره تونل با وجود تغییر شکل بیضوی ذکر شده در جدول ۴-۳ بر روی رفتار سطح تماس بولت‌دار، ارتفاع‌های متغیر روباره تونل تحت زلزله با PGA برابر با ۱، ۰/۹، ۰/۸، ۰/۷ و ۰/۶ برابر گرانش زمین (g) مدل شده که نتایج آن بر روی نیروی برشی سطح تماس بولت‌دار سگمنت‌ها در شکل ۴-۱۳ نشان داده شده است.



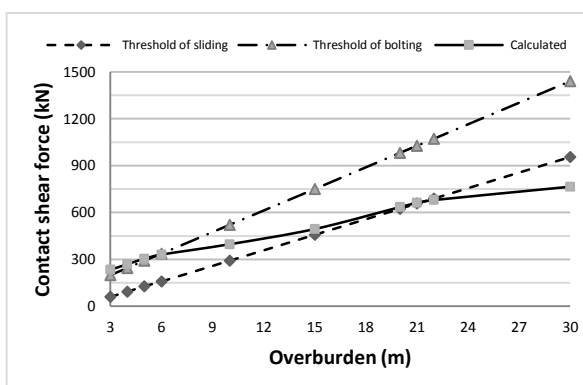
PGA=0.9g



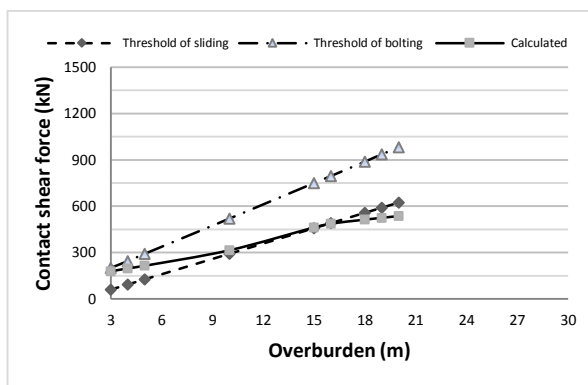
PGA=1g



PGA=0.7g



PGA=0.8g



PGA=0.6g

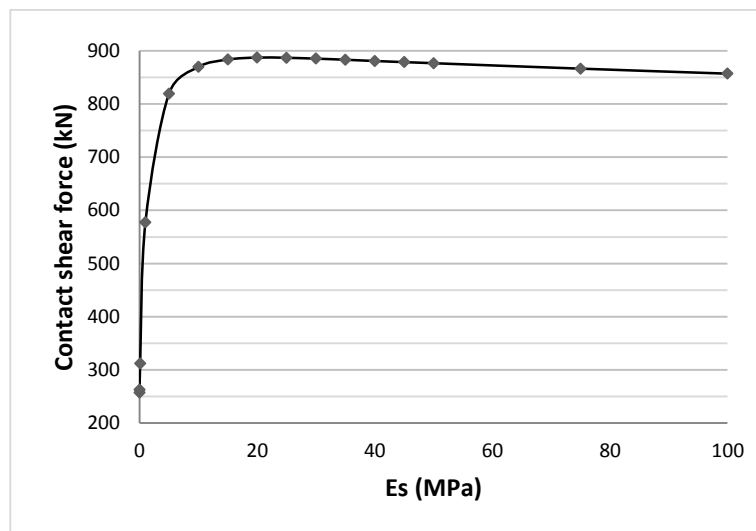
شکل ۴-۱۳- تاثیر تغییر ارتفاع روباره بر روی نیروی برشی سطح تماس بولت‌دار تحت زلزله‌های با حداکثر

شتاب زمین مختلف

نمودارهای شکل ۴-۱۳ نشان دهنده آن است که بولت در اتصال بین سگمنت‌های پوشش سگمنتال تونل در زلزله‌های با شتاب حداکثر زمین کمتر از 0.6g وارد عمل نشده ولی در لغزش در محل اتصال رخ می‌دهد. به عبارت دیگر در حداکثر زلزله محتمل منطقه با شتاب زمین برابر با 0.6g، پوشش سگمنتال تونل واقع در روباره‌های کمتر از ۱۵ متر، در محل اتصال سگمنت‌ها دچار لغزش می‌شود. در زلزله‌ای با حداکثر شتاب زمین برابر با 0.7g، فقط در روباره‌های کمتر از ۴ متر بولت وارد عمل شده و در روباره‌های کمتر از ۱۹ متر در محل اتصال سگمنت بتن روی بتن می‌لغزد. در زلزله‌ای با حداکثر شتاب 0.8g در روباره‌های کمتر از ۵ متر بولت وارد عمل شده و در روباره‌های کمتر از ۲۱ متر محل اتصال سگمنت‌ها می‌لغزد. در شتاب حداکثر 0.9g روباره زیر ۷ متر باعث عملکرد بولت شده و در روباره کمتر از ۲۴ متر محل اتصال سگمنت‌ها می‌لغزد. در زلزله شدیدی با شتاب حداکثر 1g بولت محل اتصال سگمنت‌ها در روباره زیر ۹ متر موثر بوده و در روباره کمتر از ۲۶ متر در محل اتصال سگمنت‌ها بتن بر روی بتن می‌لغزد.

برای بررسی اثر صلبیت خاک پیرامون تونل بر روی رفتار محل تماس بولت‌دار سگمنت‌ها در شرایط لرزه‌ای، در شرایط مدل اولیه (با روباره ۳۰ متر) سختی فنرهای شعاعی و مماسی معادل صلبیت خاک با وجود حداکثر زلزله محتمل با $PGA=1g$ مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

نتایج ارائه شده در شکل ۴-۱۴ نشان می‌دهد که در شرایط وقوع زلزله شدید در خاک‌های با صلبیت زیر ۱۰ MPa، نرخ رشد نیروی برشی ایجاد شده در سطح اتصال بولت‌دار سگمنت با افزایش صلبیت خاک شیب تندی داشته و برای خاک‌های با صلبیت بیشتر از ۱۰ MPa نیروی برشی ایجاد شده تقریباً یکنواخت خواهد بود. بیشترین نیروی برشی سطح تماس بولت‌دار سگمنت ۸۸۷/۲۵ kN در خاک با صلبیت ۲۰ MPa ایجاد می‌شود که در مقایسه با نیروی برشی حد آستانه لغزش سطح اتصال بولت‌دار (۹۵۴/۴۴ kN)، تغییر صلبیت خاک در شرایط لرزه‌ای شدید نیز نمی‌تواند بولت را فعال نماید.



شکل ۴-۱۴- تغییرات مدول صلبیت زمین اطراف پوشش سگمنتال تونل بر روی نیروی برشی سطح اتصال

بولت‌دار تحت ماکزیمم زلزله محتمل با $PGA=1g$

خلاصه نتایج بدست آمده از تحلیل‌های حساسیت انجام شده در جدول ۴-۴ ارائه شده است. در جدول زیر محدوده فعالیت هر کدام از بخش‌های رفتار سه خطی سطح تماس بولت‌دار سگمنت‌های پوشش سگمنتال، تحت تاثیر هر کدام از پارامترهای تحلیل حساسیت انجام شده به تفکیک مشخص شده است.

لازم به ذکر است که مشخصات پیش فرض مدل اولیه برای تحلیل حساسیت فوق روباره ۳۰ متر، نسبت تنش افقی به قائم $0/4$ و مدول الاستیسیته خاک اطراف در حدود 45 MPa می باشد. با توجه به جدول فوق می‌توان ادعا کرد که بولت پس از نصب در پوشش سگمنتال، فقط در شرایط خاصی مانند روباره کم و زلزله شدید وارد عمل می‌شود. لازم به یادآوری است که نقش اصلی بولت در حین نصب پوشش و تکمیل حلقه سگمنت‌ها می‌باشد.

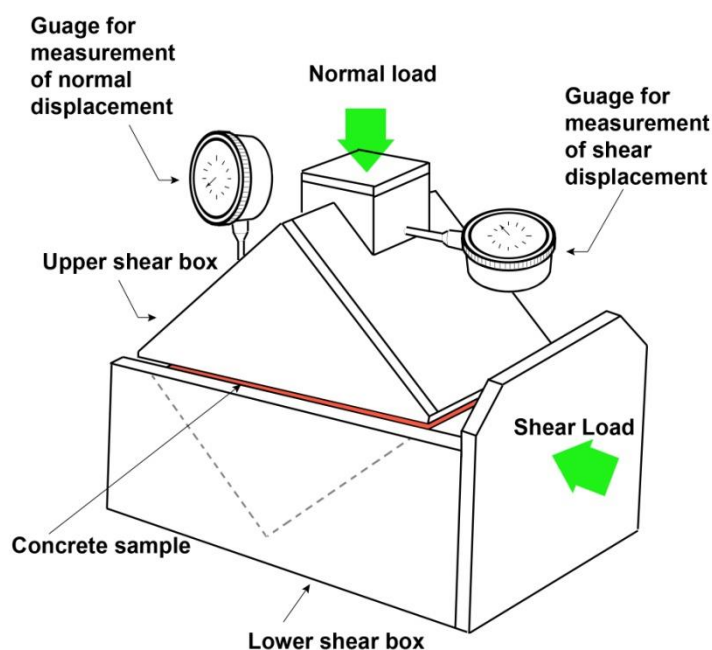
جدول ۴-۴- خلاصه نتایج تحلیل حساسیت بر روی پارامترهای موثر بر عملکرد بولت در محل اتصال

سگمنت‌ها

parameter	Concrete-concrete shear resistance	Sliding	Bolt acting
Soil stiffness ($0.001 \leq E_s \leq 1000$ MPa)	√	-	-
Coefficient of earth pressure at rest ($0 \leq k_0 \leq 1$)	√	-	-
Overburden ($3 \leq h \leq 30$ m)	√	-	-
Maximum incredible earthquake ($0.6g \leq PGA \leq 1g$)	√	-	-
PGA = 1g and $0.001 \leq E_s \leq 1000$ MPa	√	-	-
PGA = 1g and $0 \leq k_0 \leq 1$	√	(only PGA = 1g and $k_0 = 0$)	-
PGA = 0.6g and $3 \leq h \leq 30$ m	√	(for $h \leq 15$ m)	-
PGA = 0.7g and $3 \leq h \leq 30$ m	√	(for $h \leq 19$ m)	(for $h \leq 4$ m)
PGA = 0.8g and $3 \leq h \leq 30$ m	√	(for $h \leq 21$ m)	(for $h \leq 5$ m)
PGA = 0.9g and $3 \leq h \leq 30$ m	√	(for $h \leq 24$ m)	(for $h \leq 7$ m)
PGA = 1g and $3 \leq h \leq 30$ m	√	(for $h \leq 26$ m)	(for $h \leq 9$ m)

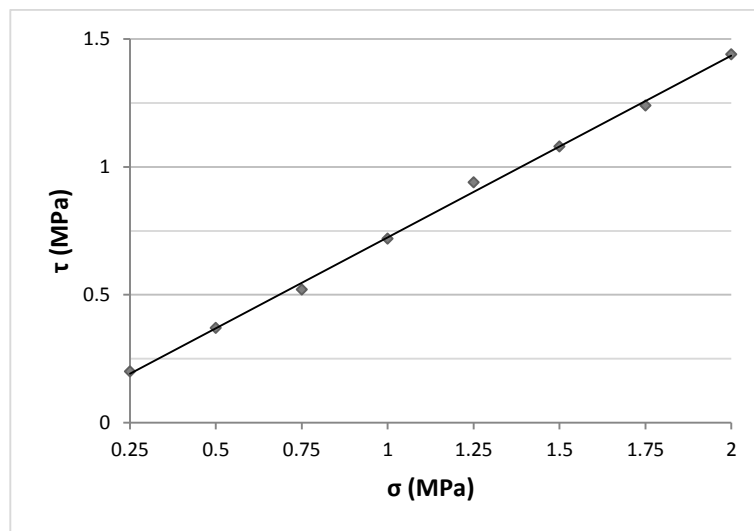
۴-۳- مدل سه بعدی اولیه و المان تماس اصطکاکی

به منظور ارزیابی عملکرد صحیح نتایج سختی پیشنهادی، از مدل سه بعدی المان محدود با شرایط المان تماس اصطکاکی بین سطوح اتصال قطعات استفاده شده است. با توجه به شرایط تکیه‌گاهی دستگاه برش درزه که بصورت شماتیک در شکل ۴-۱۵ نیز نشان داده شده است، مدل سه بعدی با ابعاد نشان داده شده در شکل ۳-۷-ب توسط نرم افزار المان محدود Abaqus ساخته شد (D.S. Simulia, 2010).



شکل ۴-۱۵- شرایط تکیه‌گاهی و بارگذاری مدل آزمایشگاهی برش درزه

همان‌گونه که در فصل دوم در بررسی آزمایشات آزمایشگاهی اشاره شد، محققینی مانند Klappers و همکارانش (۲۰۰۶) و Cavalero و Aguado (۲۰۱۲) ضرایب اصطکاک مختلفی برای اتصال قطعات بتنی بواسطه بالشتک‌های لاستیکی و بیتومینه در محدوده $0.3 < \mu < 0.7$ پیشنهاد داده‌اند. این ضرایب اصطکاک که غالباً در حدود ۰/۵ می‌باشد قابل استناد برای وضعیت تماس مستقیم بتن با بتن نبوده و فقط مطابق پیشنهاد ACI (۲۰۰۵) حدود آنرا مشخص می‌نماید. لذا برای ضریب اصطکاک مورد استفاده در المان تماس اصطکاکی مدل سه بعدی ذکر شده در بالا از نتایج آزمایشات برش درزه بهره گرفته شده است. در آزمایشات یاد شده تغییرات تنش برشی آستانه لغزش در مقابل تنش نرمال ترسیم شده است که مطابق شکل ۴-۱۶ برای تماس ساده بتن این تغییرات خطی می‌باشد. بنابراین شیب ثابت خط مذکور نماینده ضریب اصطکاک سطوح اتصال سگمنت می‌باشد.



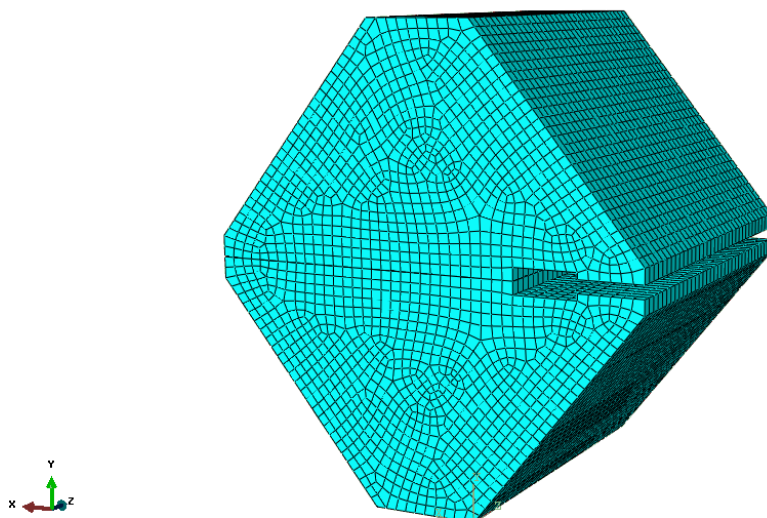
شکل ۴-۱۶- نمودار تغییرات تنش برشی آستانه لغزش سطح ساده بتن در مقابل تنش نرمال

همان‌گونه که اشاره شد شیب خط نمودار تغییرات تنش برشی در مقابل تنش نرمال نماینده ضریب اصطکاک سطوح تماس می‌باشد. لذا با توجه به شکل ۴-۱۶ ضریب اصطکاک سطح اتصال ساده بتن به بتن در حدود ۰/۷۱ بدست می‌آید. بنابراین حد ضریب اصطکاک ۰/۷ برای مدل‌سازی سه بعدی با المان تماس اصطکاکی مناسب می‌باشد. لازم به ذکر است که ضریب اصطکاک مذکور مربوط به زاویه اصطکاک داخلی سطح درزه در حدود ۳۵ درجه می‌باشد. مقدار این زاویه در آزمایش میز شیب‌دار^{۴۸} و در حالت لغزش آزاد نیز بدست آمد که در شکل ۴-۱۷ نحوه انجام آزمایش نشان داده شده است. مدل سه بعدی با شرایط سطح تماس اصطکاکی مذکور که در شکل ۴-۱۸ نشان داده شده است، تحت بار نرمال ۱ MPa و تنش برشی متغیر قرار گرفته است.

⁴⁸ Tiltmeter test

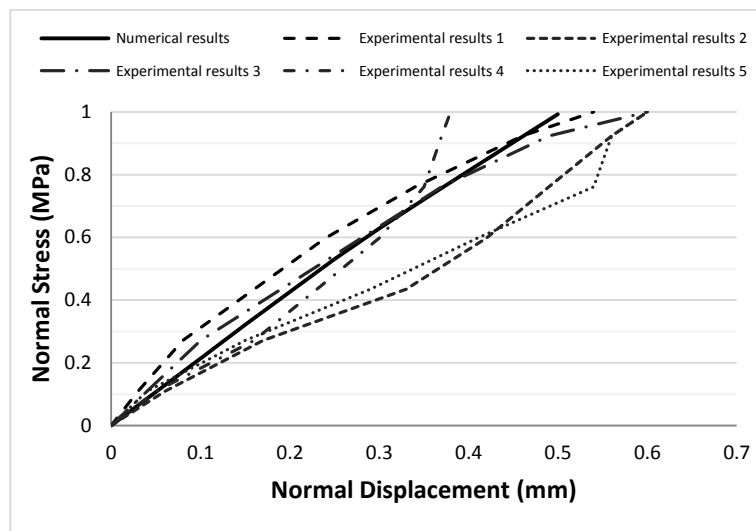


شکل ۴-۱۷- آزمایش میز شیب‌دار بر روی قطعات بتنی قبل از لغزش (راست) و در حین لغزش (چپ)

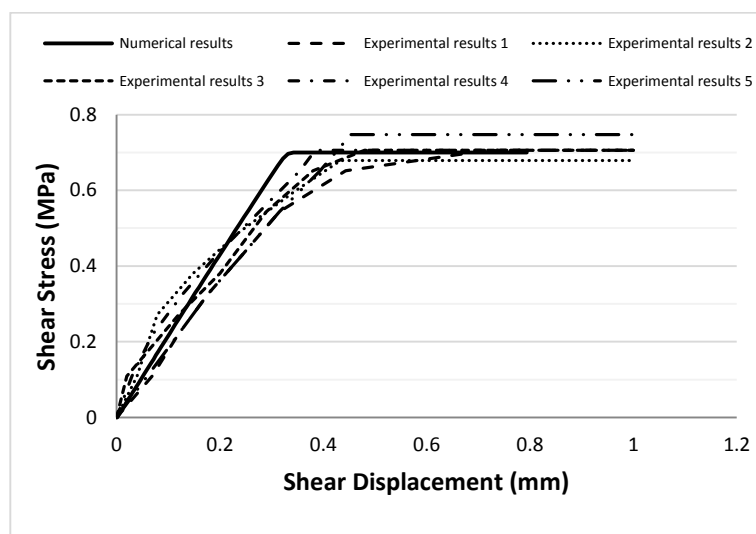


شکل ۴-۱۸- مدل سه بعدی المان محدود با سطح تماس اصطکاکی از قطعات بتنی آزمایشگاهی

پس از تحلیل استاندارد مدل مذکور تغییرات جابجایی نرمال در مقابل تنش نرمال و همچنین تغییرات جابجایی برشی در مقابل تنش برشی قطعات بتنی نسبت به هم استخراج شده و با نتایج مشابه بدست آمده از آزمایش برش درزه مقایسه شده است که به ترتیب در اشکال ۴-۱۹ و ۴-۲۰ ملاحظه می‌گردد.



شکل ۴-۱۹- مقایسه تغییرات جابجایی نرمال در مقابل تنش نرمال قطعات بتنی آزمایشگاهی با مدل سه بعدی (تا حد بار نرمال برابر با 1 MPa)



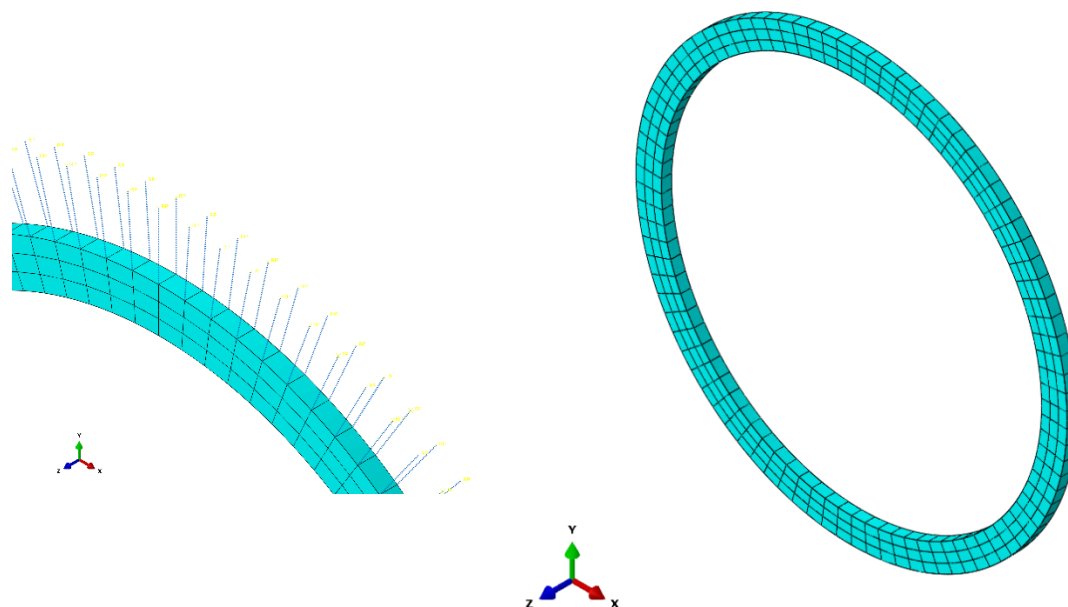
شکل ۴-۲۰- مقایسه تغییرات جابجایی برشی در مقابل تنش برشی قطعات بتنی آزمایشگاهی با مدل سه بعدی (برای بار نرمال برابر با 1 MPa)

با توجه به تطابق مناسب نتایج مدل سه بعدی با سطح تماس اصطکاکی با نتایج آزمایشگاهی در ادامه از المان تماس مذکور برای مدل سازی سه بعدی یک حلقه کامل پوشش و مقایسه نتایج مدل های ساده تیر

و فنر پیشنهادی استفاده خواهد شد. در ادامه به تشریح مدل ساده تیر و فنر تماسی بر اساس روابط ارائه شده در فصل قبل، پرداخته و شرایط و جزئیات مختلف آن مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد.

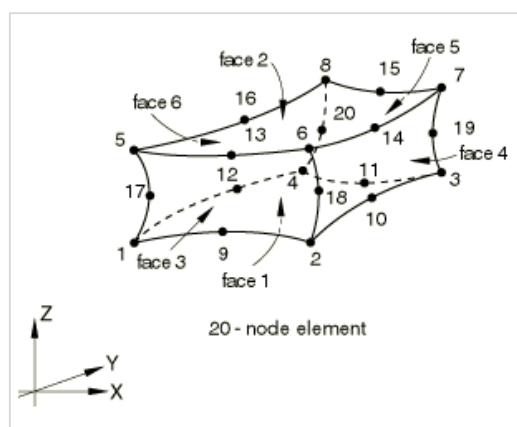
۴-۴- مدل سه بعدی یک حلقه از پوشش یکپارچه سگمنتال

به منظور ارزیابی روند مدلسازی سه بعدی ابتدا مدل سه بعدی از پوشش یکپارچه ساخته شده و نتایج آن با مدل دوبعدی مقایسه می‌شود. مشخصات پوشش مطابق جدول ۳-۱ و شرایط مرزی آن در اطراف پوشش بصورت فنرهایی با سختی شعاعی و تماسی که از رابطه ۴-۱ و برای سطح موثر ۵ سانتی‌متر بدست آمده و در دو طرف پوشش (در راستای طولی تونل) مشابه شرایط مدل دوبعدی ذکر شده در بخش ۴-۲-۱، کرنش صفحه‌ای لحاظ شد. پوشش یکپارچه تونل، المان بندی آن و فنرهای دور پوشش در شکل ۴-۲۱ قابل ملاحظه است.



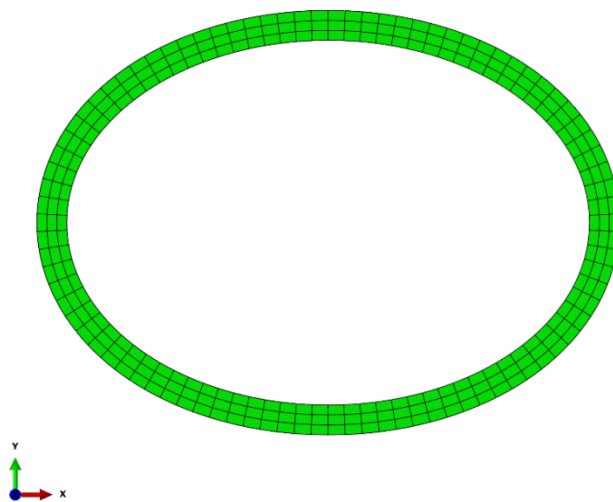
شکل ۴-۲۱- مدل سه بعدی پوشش یکپارچه، مش بندی و شرایط مرزی آن

فنها و پوشش بتنی با رفتار الاستیک خطی مدل شده است. المان‌های استفاده شده از نوع پیوسته شش وجهی مرتبه دوم معمولی (C3D20) بوده که هر ضلع آن دارای ۳ نقطه می‌باشد (شکل ۳-۲۲). در آنالیز مدل سه بعدی در نرم افزار Abaqus از تحلیل استاتیکی (استاندارد) استفاده شد.



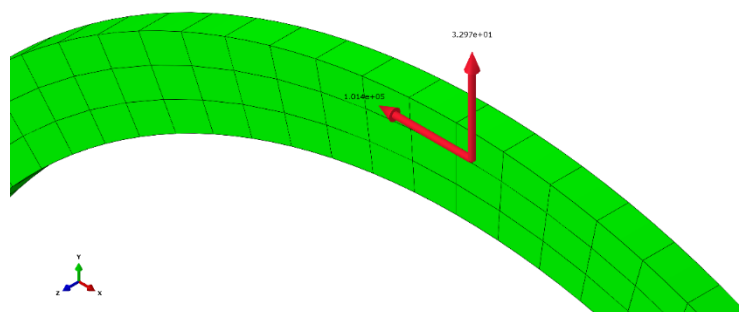
شکل ۴-۲۲- المان C3D20

به منظور بارگذاری بر روی پوشش مطابق شکل ۴-۱، از همان مقدار بار متناسب با روبره ۳۰ متر استفاده شده است. مدل پوشش در اثر بارگذاری مذکور مطابق شکل ۴-۲۳ تغییر شکل می‌دهد.

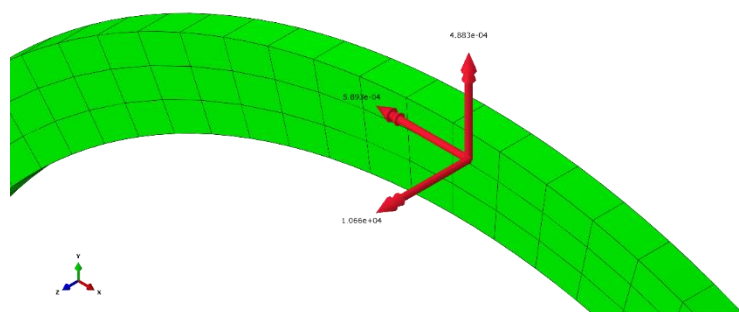


شکل ۴-۲۳- تغییر شکل پوشش یکپارچه تونل

در شکل ۲۴-۴ و ۲۵-۴ نمونه‌ای از نیروهای داخلی محاسبه شده در المان‌های پوشش تونل به ترتیب بصورت نیروی محوری و برشی و لنگر خمشی نشان داده شده است.

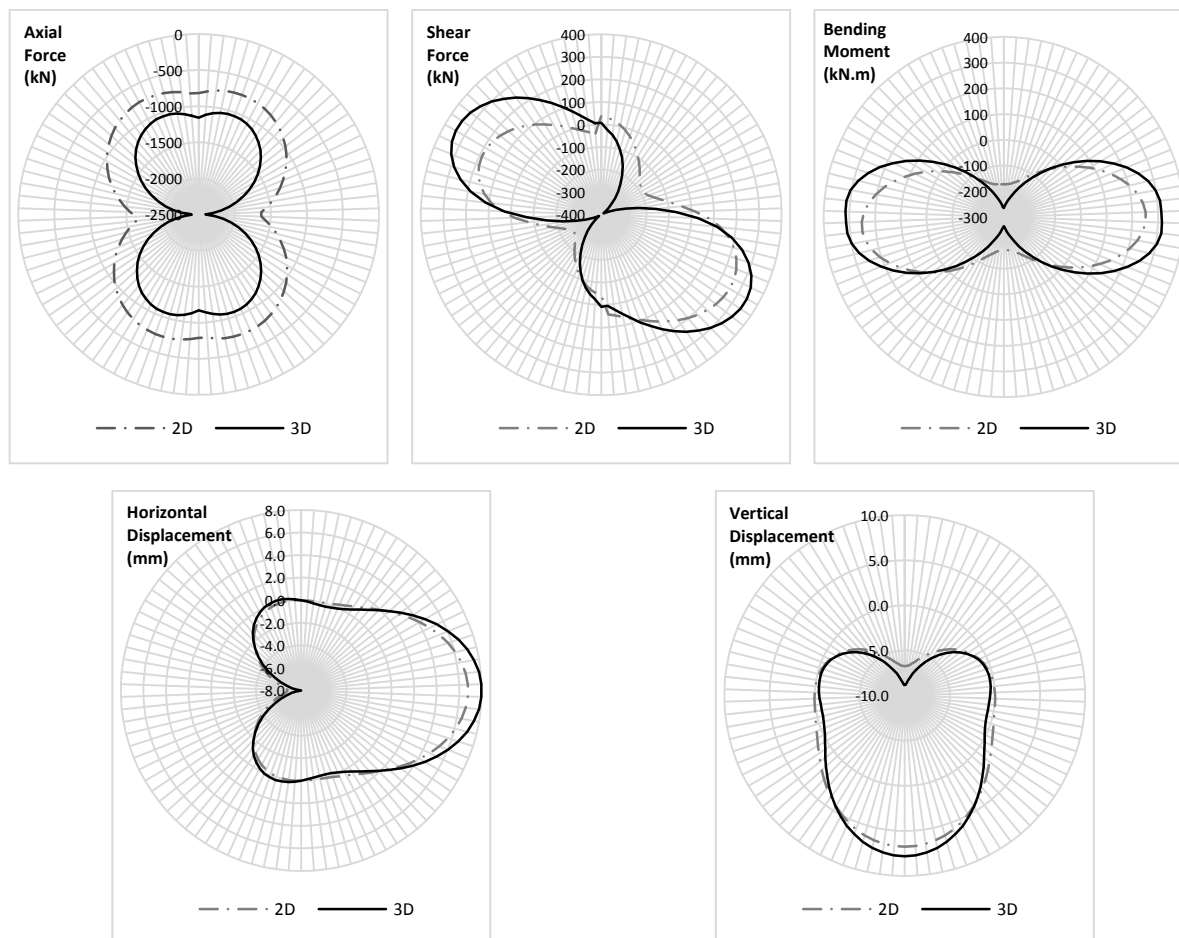


شکل ۲۴-۴- مقادیر نیروی محوری و برشی ایجاد شده در یکی از المان‌های پوشش یکپارچه



شکل ۲۵-۴- مقدار لنگر خمشی ایجاد شده در یکی از المان‌های پوشش یکپارچه

مقادیر نیروها و جابجایی‌های ایجاد شده در کل پوشش برای مقایسه با مدل دو بعدی در شکل ۲۶-۴ نشان داده شده است. همان‌گونه که در شکل زیر ملاحظه می‌شود مقادیر نیروهای داخلی مدل‌های دوبعدی و سه بعدی تطابق قابل قبولی داشته و اختلاف اندک بین مقادیر نیروهای ایجاد شده در مدل دوبعدی و سه بعدی ناشی از معادلات حل متفاوت برای المان‌های یک و دوبعدی در مقایسه با معادلات مورد استفاده برای المان‌های سه بعدی می‌باشد.



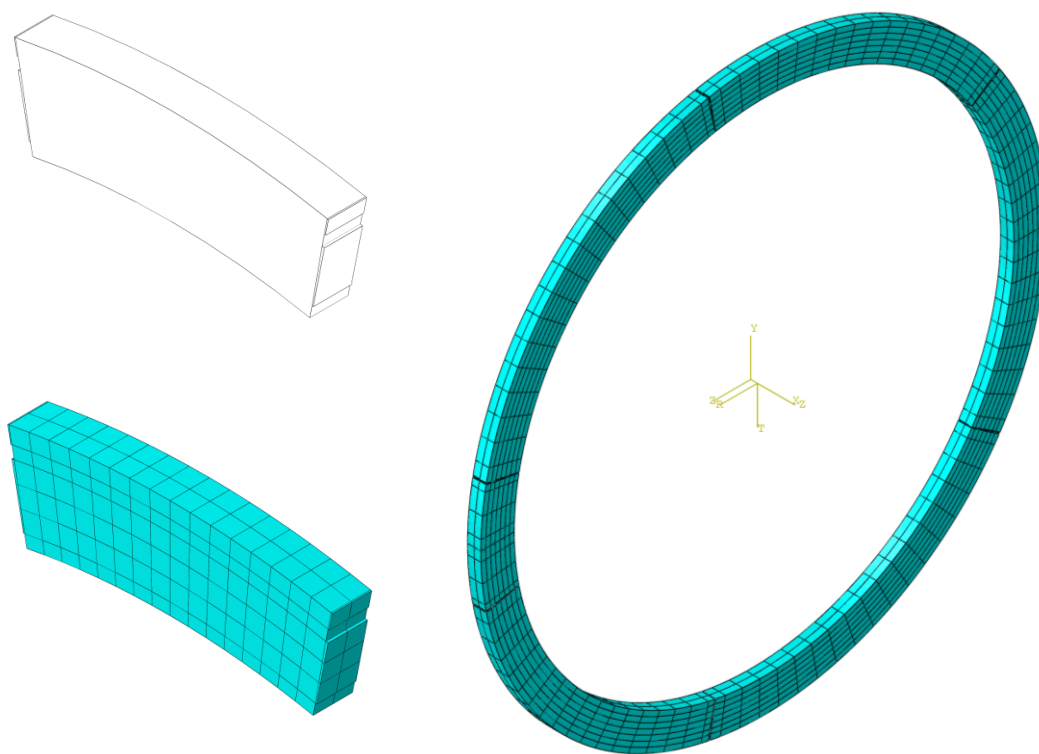
شکل ۴-۲۶- مقایسه نیروهای داخلی و جابجایی‌های اعضای سازه‌ای پوشش یکپارچه تونل در مدل‌های

دو بعدی و سه بعدی

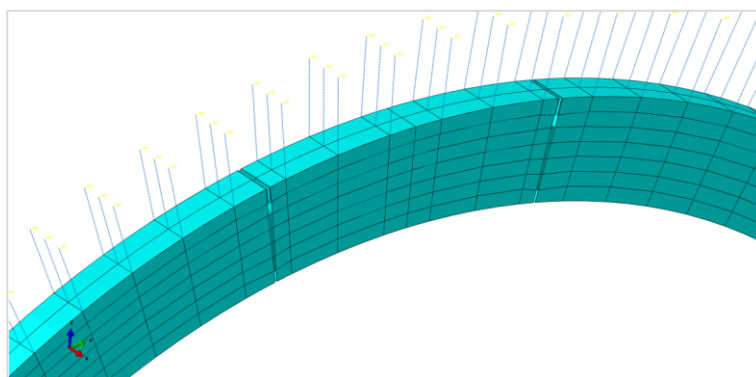
در ادامه به منظور ارزیابی نتایج مدل دو بعدی تیر و فنرهای تماسی (B-CS)، مدل سه بعدی از یک حلقه کامل پوشش سگمنتال تونل ساخته شده است. مدل سه بعدی مذکور بر اساس المان تماس اصطکاکی ارائه شده در بخش ۴-۳ ساخته شده و همانگونه که در شکل ۴-۲۷ نیز نشان داده شده است جزئیات سطح اتصال ساده بتن به بتن مدل سه بعدی مطابق با سطح اتصال طولی سگمنت‌های واقعی (شکل ۳-۳) می‌باشد. به منظور لحاظ شرایط مرزی یکسان با مدل دو بعدی، از فنرهای مماسی و شعاعی با سختی بدست آمده از رابطه ۴-۱، استفاده شده است. مطابق شکل ۴-۲۸ فنرهای مذکور در هر گره سطح

خارجی پوشش متصل شده و شرایط مرزی زمین اطراف پوشش را تامین می‌کنند. تعداد فنرهای مذکور با افزایش دانسیته مش‌بندی افزایش یافته و لذا جهت تسهیل در آنالیز مدل تعداد مش‌ها در جهت طولی تونل به حداقل تعداد ممکن رسانده شد. از طرفی به دلیل عدم لحاظ تاثیر درزه‌های حلقوی (بین حلقه‌های متوالی سگمنت‌ها) مدل مذکور با فرض کرنش صفحه‌ای آنالیز شده و لذا مطابق شکل ۴-۲۷ و ۴-۲۸ تعداد دو المان یا سه گره در راستای طولی تونل لحاظ شده است.

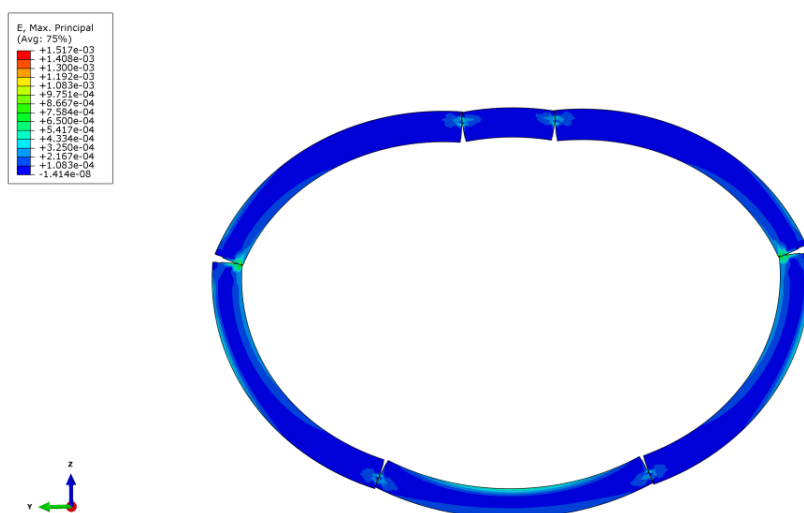
به منظور بارگذاری بر روی پوشش مطابق شکل ۴-۱، از همان مقدار بار متناسب با روباره ۳۰ متر استفاده شده است که با لحاظ سطح تاثیر متناسب با هر گره بر روی گره‌های میانی بار کامل و در گره‌های کناری نصف آن اعمال می‌گردد. نتایج حاصل از مدلسازی سه بعدی بصورت کرنش و جابجایی ایجاد شده در پوشش به ترتیب در شکل‌های ۴-۲۹ و ۴-۳۰ نشان داده شده است.



شکل ۴-۲۷- مدل سه بعدی یک حلقه سگمنتال و جزئیات سطح اتصال طولی سگمنت‌ها



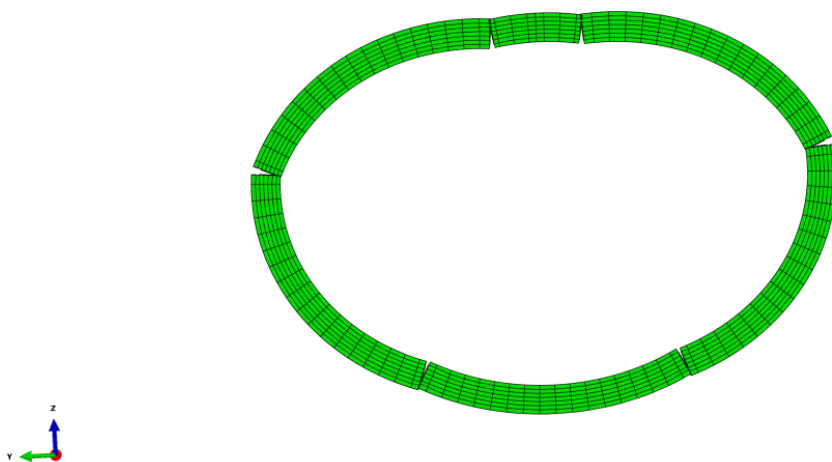
شکل ۴-۲۸- شرایط مرزی مدل و اندرکنش پوشش و زمین بصورت فنرهای مماسی و شعاعی



شکل ۴-۲۹- کرنش ایجاد شده در پوشش سگمنتال پس از بارگذاری

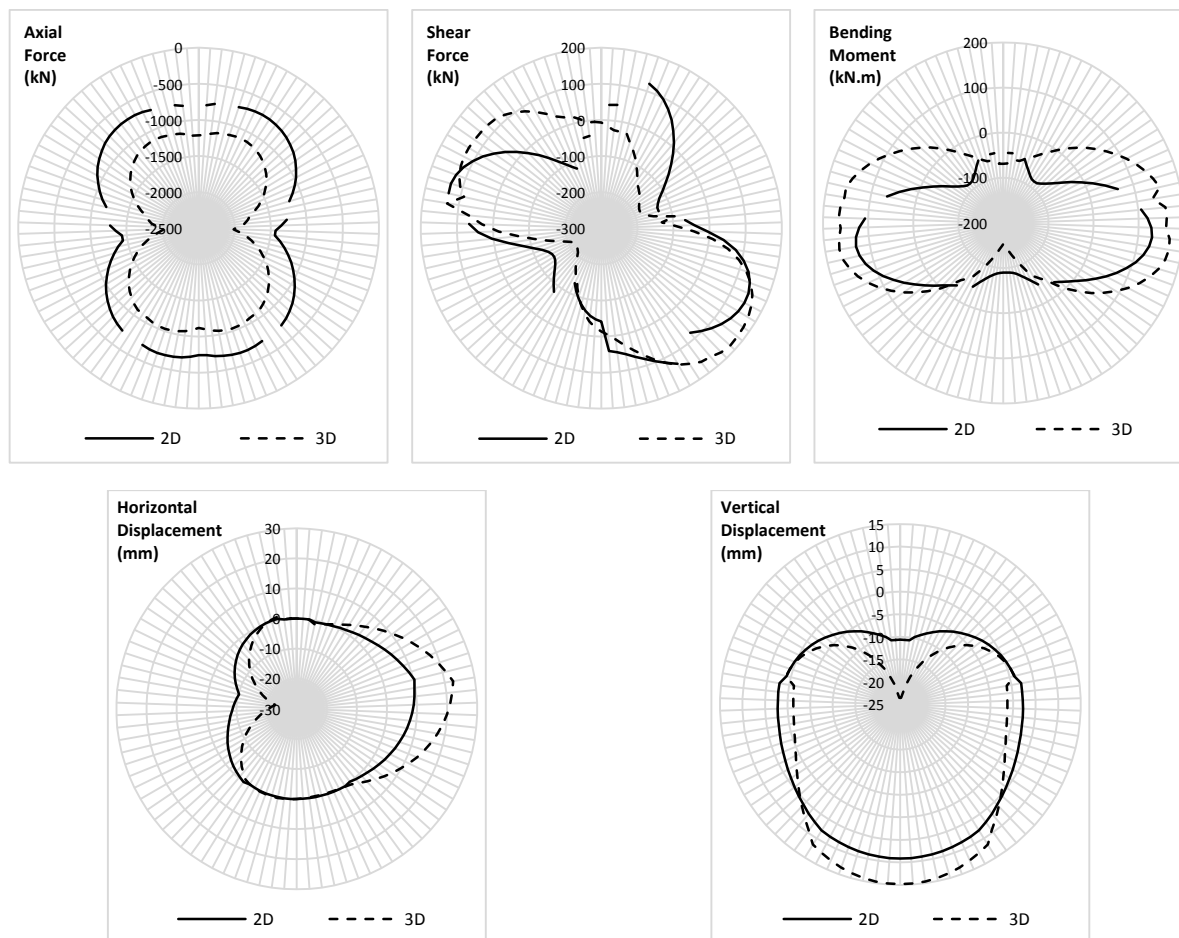
بازشدگی دهان پرده‌ای ایجاد شده در محل اتصالات (شکل‌های ۴-۲۹ و ۴-۳۰) بیانگر عملکرد واقعی پوشش سگمنتال تحت بارگذاری می‌باشد. لذا به منظور ارزیابی رفتار صحیح پوشش، بایستی تاثیر این عملکرد پوشش در مدل‌های دوبعدی نیز لحاظ گردد. لذا مقدار بازشدگی مذکور در محل اتصالات‌های طولی مختلف مدل سه بعدی اندازه‌گیری شده و برای محاسبه سختی پیچشی از نسبت لنگر خمشی ایجاد شده در نقاط اتصال به زاویه بازشدگی آن نقطه استفاده می‌شود ($k_{\theta} = \frac{\Delta M}{\Delta \theta}$). به دلیل تقارن موجود در شرایط

پوشش و بارگذاری آن مقدار بازشدگی‌های نیز در دو نقطه اتصال متناظر چپ و راست پوشش یکسان می‌باشد. مقدار بازشدگی دهان پرده‌ای نقاط اتصال طولی پوشش بین $0/008$ تا $0/014$ رادیان می‌باشد. در حالی که مقدار لنگر خمشی ایجاد شده در این نقاط حدوداً بین 70 تا 180 kN.m بدست می‌آید. بنابراین بطور متوسط مقدار ضریب سختی فنر پیچشی جایگزین در محل اتصالات طولی سگمنت‌ها در حدود 10 MN.m/rad بدست می‌آید. البته همان‌گونه که در بخش ۴-۲-۱ نیز اشاره شد، در این مدل نیز تغییر مقدار ضریب سختی فنر پیچشی تغییر چندانی بر نتایج تحلیل نداشته و فقط لنگر خمشی ایجاد شده در پوشش را اندکی تحت تاثیر قرار می‌دهد.



شکل ۴-۳۰- تغییر شکل ایجاد شده در پوشش سگمنتال تحت بارگذاری

در ادامه به منظور مقایسه درست نتایج مدل‌سازی دوبعدی و سه بعدی از پوشش سگمنتال تونل، فنرهای پیچشی با ضریب سختی بدست آمده در بالا به محل اتصالات پوشش سگمنتال دو بعدی مدل شده در بخش ۴-۲-۱ افزوده شده و تحت آنالیز غیرخطی با نتایج مدل سه بعدی مقایسه می‌شود. همان‌گونه که در شکل ۴-۳۱ نشان داده شده است تناسب قابل قبولی بین نیروهای داخلی ایجاد شده در پوشش تونل مدل دو بعدی و سه بعدی ارائه شده وجود دارد.



شکل ۴-۳۱- مقایسه نیروهای داخلی و جابجایی‌های اعضای سازه‌ای پوشش سگمنتال تونل در مدل‌های دو بعدی و سه بعدی

۴-۵- جمع بندی

در این فصل نحوه استفاده از روابط پیشنهادی سختی نرمال و برشی اتصال طولی پوشش سگمنتال تونل، در مدل‌های ساده تیر و فنر در حالت دو بعدی (مدل تیر و فنرهای برشی و نرمال) ارائه شده و توسط مدل‌های سه بعدی با المان تماس اصطکاکی کالیبره شده با بخشی از نتایج آزمایشات برش درزه، به ارزیابی آن‌ها پرداخته می‌شود. برای این منظور یک حلقه ۵+۱ سگمنتی از پوشش سگمنتال تونل ابودر با

روباره خاکی ۳۰ متر (معادل تنش نرمال بر سطح اتصال ۴/۳۵ MPa) مدل شده است. برای مقایسه مدل پیشنهادی با روابط تحلیلی پوشش مختلفی بصورت یکپارچه بدون درز، با صلبیت کاهش یافته، چند مفصلی، با ممان اینرسی موثر و تیر و فنر پیچشی، مدل شد. نیروهای داخلی و جابجایی‌های بدست آمده از مدل‌های دوبعدی نشان دهنده آن است که مدل پیشنهادی تطابق خوبی با همه راه‌حل‌های تحلیلی مرسوم داشته و نتایجی بین مدل پوشش با سختی کاهش یافته و مدل پوشش چند مفصلی ارائه می‌کند.

تحلیل‌های انجام یافته بر روی مدل پیشنهادی برای اتصال بولت‌دار نشان می‌دهد که بولت فقط در شرایط خاصی مانند بارگذاری زلزله شدید بر تونل‌های کم عمق، وارد عمل می‌شود.

به منظور ارائه یک المان تماس سه بعدی مناسب برای محل اتصال سگمنت‌ها، مدل عددی سه بعدی از روی مدل فیزیکی آزمایشگاهی ساخته شد. مطابق نتایج بدست آمده از آزمایش برش درزه (تغییرات تنش برشی آستانه لغزش نمونه‌ها با تنش نرمال بر سطح اتصال) مقدار ضریب اصطکاک ۰/۷ برای المان تماس اصطکاکی سه بعدی پیشنهاد شد که با شرایط لغزش آزاد نمونه‌های آزمایشگاهی و نتایج تحقیقات گذشته نیز تطابق خوبی نشان می‌دهد. به منظور کالیبره کردن مدل المان تماس پیشنهادی، تغییرات جابجایی نرمال - تنش نرمال و جابجایی برشی - تنش برشی بدست آمده از نتایج آزمایشگاهی و مدل سه بعدی مذکور با هم مقایسه شد که تطابق خوب بین این نتایج نشان دهنده مناسب بودن المان تماس سه بعدی پیشنهادی است. در ادامه بواسطه المان تماس پیشنهادی، مدل سه بعدی از یک حلقه کامل پوشش سگمنتال ساخته شده و تخمینی از مقدار ضریب سختی پیچشی محل اتصال سگمنت‌ها ارائه شد. در نهایت نیروهای داخلی بدست آمده از مدل سه بعدی مذکور با نتایج مدل دو بعدی تیر و فنرهای نرمال، برشی و پیچشی پیشنهادی مقایسه شد. نتایج تناسب قابل قبولی را بین نیروهای داخلی ایجاد شده در پوشش تونل مدل دو بعدی و سه بعدی پیشنهادی نشان می‌دهد.

فصل پنجم:

نتیجه گیری و پیشنهادات

از آنجایی که سختی پوشش سگمنتال در محل اتصالات آن، یکی از پارامترهای تاثیرگذار بر مقادیر نیروهای وارد بر پوشش می‌باشد، لذا به منظور تحلیل و طراحی سازه پوشش سگمنتال تونل بایستی رفتار اتصال سگمنت‌ها به درستی و متناسب با تغییرات تنش- کرنش ایجاد شده در سطح تماس ارزیابی گردد. در این تحقیق تلاش شده است که برای پوشش سگمنتال با سطوح اتصال صاف و شیاردار در سه حالت تماس ساده بتن به بتن، سطح تماس با نوار آب‌بند و با بولت روابلی برای میزان سختی برشی و نرمال محل اتصال ارائه گردد.

۵-۲- صورت مساله و روش انجام تحقیق

به منظور ارزیابی رفتار پوشش سگمنتال تونل تحقیقات متعددی انجام شده است. برخی از این تحقیقات دقیق، پیچیده و بسیار پرهزینه بوده ولی قابلیت انعطاف لازم برای بررسی پارامترهای مختلف موثر بر رفتار محل اتصال سگمنت‌ها را نداشتند. برخی دیگر به تاثیر مصالح بین درزه اتصال سگمنت‌ها پرداخته و مدل جامعی برای تعیین سختی محل اتصال در شرایط مختلف ارائه نداده‌اند. روش‌های تحلیلی موجود غالباً از تئوری‌های ساده‌ای بهره برده و بدلیل همین سادگی، برای ارزیابی اولیه رفتار پوشش مناسب هستند. با این وجود هنوز برای تحلیل و طراحی پوشش سگمنتال تونل، راه‌حل ساده و جامعی برای تعیین سختی محل اتصال سگمنت‌ها وجود ندارد. لذا در این تحقیق به منظور ارائه مدل رفتاری ساده‌ای برای اتصال طولی پوشش سگمنتال یکسری مطالعات آزمایشگاهی و عددی توسعه داده شده و نتایج بدست آمده با نتایج تحقیقات گذشته ارزیابی شد. برای این منظور با استفاده از آزمایش برش درزه بر سطوح تماس نمونه‌های بتنی گرفته شده از سطوح اتصال صاف سگمنت‌ها با شیار مخصوص نوار آب‌بند، در سه حالت تماس ساده، با نوار آب‌بند و با بولت، مقادیر مدول عکس العمل نرمال و برشی این سطوح بصورت تابعی از

بار نرمال اعمال شده به آن سطوح مورد ارزیابی قرار گرفت. ارتباط بین مدول‌های یاد شده با تنش نرمال اعمال شده بر سطح تماس سگمنت به سگمنت در یک حلقه در سه حالت مذکور بصورت خطی با دقت حدود ۹۹٪ ارائه شده است. برای ارزیابی میزان کارائی روابط ارائه شده و مقایسه عملکرد روش ارائه شده در مقابل سایر روش‌های تحلیلی موجود در حالت اتصال ساده بتن به بتن و همچنین بررسی محدوده عملکرد مدول‌های عکس‌العمل بدست آمده در محل اتصال سگمنت‌های بولت‌دار، مدل‌های عددی از یک تونل شهری سپری مورد تحلیل قرار گرفته است. در همین راستا و به منظور بررسی شرایط لازم برای تحقیق رفتار لغزشی و عملکرد بولت در محل اتصال طولی سگمنت‌های بولت‌دار، تاثیر هر کدام از پارامترهای محیطی دخیل در مدل‌سازی و حساسیت رفتار غیرخطی سطح تماس سگمنت‌های بولت‌دار، نسبت به تغییرات هر پارامتر مورد ارزیابی قرار گرفته است. در ادامه به منظور کالیبره کردن المان تماس اصطکاکی بر اساس نتایج آزمایشگاهی، مدل سه بعدی از روی نمونه آزمایشگاهی ساخته شده و نتایج آنها مورد ارزیابی قرار گرفت. در نهایت با استفاده از المان تماس اصطکاکی کالیبره شده بر اساس نتایج آزمایشگاهی، مدل سه بعدی المان محدودی از یک حلقه کامل از پوشش سگمنتال ساخته شده و نتایج آن با مدل ساده تیر و فنرهای تماسی پیشنهاد شده در این تحقیق مقایسه شد. نتایج کلی این تحقیق بصورت دو بخش مجزا شامل نتایج مطالعات آزمایشگاهی و نتایج مدل‌های عددی در زیر خلاصه شده است.

۵-۳- نتایج مطالعات آزمایشگاهی

مطالعات آزمایشگاهی انجام گرفته در این تحقیق شامل ساخت نمونه‌های معرف از محل اتصال طولی سگمنت‌ها، آزمایش برش درزه در سه حالت اتصال ساده بتن به بتن، با نوار آب‌بند و با بولت و همچنین لغزش آزاد نمونه‌ها می‌باشد که نتایج آن بطور خلاصه در زیر ارائه شده است.

۱. در آزمایش برش درزه در محدوده تنش نرمال $0/25$ تا 2 MPa، تنش برشی حد آستانه لغزش در حالت بدون نوار آببند بین $0/2$ تا $1/44$ MPa و جابجایی برشی حد آستانه لغزش بین $0/45$ تا $0/58$ mm متغیر است.

۲. در محدوده تنش نرمال $0/25$ تا 2 MPa، برای نمونه‌های با نوار آببند تنش برشی حد آستانه لغزش بین $0/15$ تا $1/42$ MPa و جابجایی برشی حد آستانه لغزش بین $0/49$ تا $0/54$ mm متغیر است.

۳. برای حالت بدون نوار آببند مقادیر مدول عکس العمل برشی از مقدار $0/25$ MPa/mm برای تنش نرمال برابر با $0/25$ MPa تا مقدار $2/79$ MPa/mm برای تنش نرمال برابر با 2 MPa و همچنین مقادیر مدول عکس العمل نرمال نیز برای همان مقادیر تنش نرمال به ترتیب از مقدار $0/96$ تا $2/85$ MPa/mm بصورت خطی متغیر می‌باشد.

۴. برای حالت با نوار آببند مقادیر مدول عکس العمل برشی از مقدار $0/21$ MPa/mm برای تنش نرمال برابر با $0/25$ تا مقدار $2/78$ MPa/mm برای تنش نرمال برابر با 2 MPa بصورت خطی متغیر است. همچنین برای این مقادیر تنش نرمال مدول عکس العمل نرمال نیز از مقدار $0/84$ تا $2/84$ MPa/mm بصورت خطی متغیر است.

۵. برای حالت با بولت، در محدوده تنش نرمال $0/25$ تا 2 MPa، مقدار مدول عکس العمل نرمال بصورت خطی از مقدار $0/95$ تا $2/8$ MPa/mm تغییر می‌کند. مدول عکس العمل برشی به سه بخش تماس بتن به بتن، لغزش بتن بر روی بتن و عملکرد بولت تقسیم می‌شود که در محدوده تنش نرمال مذکور مقدار مدول عکس العمل برشی برای بخش تماس بتن با بتن بصورت خطی بین $0/19$ تا $2/7$ MPa/mm متغیر است. در محدوده تنش نرمال مذکور مقدار مدول عکس العمل برشی برای بخش لغزش بتن بر روی بتن نیز بصورت خطی بین $0/15$ تا $2/7$ MPa/mm

۰/۰۹ تغییر می‌کند. همچنین مدول عکس العمل برشی برای بخش عملکرد بولت از MPa/mm ۳۲/۴۳ تحت تنش نرمال برابر با ۰/۲۵ تا مقدار MPa/mm ۵۳/۸۷ تحت تنش نرمال برابر با MPa ۱/۵ بصورت خطی متغیر است.

۶. بهترین روابط خطی برازش شده با دقت بالای ۹۹ درصد، برای ارتباط مدول عکس العمل برشی با میزان تنش نرمال اعمال شده به سطح تماس بدون نوار آببند $k_s = 1.4725\sigma_n - 0.1684$ و برای ارتباط مدول عکس العمل برشی با میزان تنش نرمال $k_n = 1.0638\sigma_n + 0.7307$ می‌باشد.

۷. ارتباط مدول‌های عکس العمل برشی و نرمال با تنش نرمال اعمال شده به سطوح اتصال نمونه‌ها در حالت با نوار آببند رابطه‌ای خطی داشته که می‌توان معادله $k_s = 1.4948\sigma_n - 0.2504$ را برای ارتباط مدول عکس العمل برشی و بار نرمال و معادله $k_n = 1.1186\sigma_n + 0.6329$ برای ارتباط مدول عکس العمل نرمال و بار نرمال با دقت ۹۹ درصد لحاظ نمود.

۸. ارتباط مدول عکس العمل سه خطی برشی با تنش نرمال اعمال شده به سطوح اتصال نمونه‌های بولت‌دار بصورت معادله‌های خطی $k_s = 1.4674\sigma_n - 0.2602$ برای بخش تماس بتن با بتن و جابجایی برشی صفر تا ۰/۸۵ میلیمتر، $k_s = 0.0404\sigma_n - 0.0043$ برای بخش لغزش بتن بر روی بتن و جابجایی برشی بین ۰/۸۵ تا ۴ میلیمتر و $k_s = 18.154\sigma_n + 28.516$ برای بخش عملکرد بولت فولادی و جابجایی برشی بزرگتر از ۴ میلیمتر با دقت بالای ۹۸ درصد بدست آمده است و همچنین معادله $k_n = 1.1186\sigma_n + 0.6329$ را می‌توان برای ارتباط مدول عکس العمل نرمال و بار نرمال با دقت حدوداً ۹۹ درصد لحاظ نمود.

۹. وجود نوار آببند سختی نرمال و برشی را کاهش داده و با افزایش تنش نرمال وارد بر سطح اتصال سگمنت، تاثیر نوار آببند در کاهش سختی نرمال و برشی کاهش می‌یابد.

۵-۴- نتایج مدل‌های عددی

در این تحقیق مدل‌های عددی متعددی از یک حلقه پوشش سگمنتال تونل ساخته شد. این مدل‌های عددی شامل مدل‌های دو بعدی و سه بعدی است. مدل‌های عددی دو بعدی شامل مدل‌های ساخته شده بر اساس راه‌حل‌های تحلیلی مرسوم از قبیل: پوشش یکپارچه بدون درز، پوشش با صلبیت کاهش یافته، پوشش چند مفصلی، پوشش با ممان اینرسی موثر و مدل تیر و فنر پیچشی بوده که با مدل پیشنهادی تیر و فنرهای تماسی مقایسه شدند. مدل‌های سه بعدی نیز شامل مدل اولیه‌ای از نمونه آزمایشگاهی برای کالیبره کردن المان تماس پیشنهادی و مدل سه بعدی از یک حلقه کامل که در نهایت خروجی آن با نتایج مدل دو بعدی پیشنهادی مقایسه شد. نتایج بدست آمده از مدل‌سازی‌های مذکور بطور خلاصه در زیر اشاره شده است.

۱۰. اختلاف بین نیروی محوری ماکزیمم سه روش تحلیلی مفصلی، صلبیت کاهش یافته و ممان اینرسی موثر با روش پیشنهادی تیر و فنرهای تماسی در بیشترین مقدار $9/22$ درصد مربوط به روش ممان اینرسی موثر و در کمترین مقدار حدود $3/80$ درصد مربوط به پوشش با صلبیت کاهش یافته می‌باشد. در مورد لنگر خمشی ماکزیمم بین این سه روش نیز بیشترین اختلاف 39 درصد مربوط به روش ممان اینرسی موثر و کمترین اختلاف $24/1$ درصد مربوط به پوشش چند مفصلی می‌باشد.

۱۱. از میان این سه روش تحلیلی مذکور، اختلاف جابجایی افقی و قائم سقف تونل مدل صلبیت کاهش یافته به ترتیب با $169/24$ و $7/21$ درصد کمترین و مدل ممان اینرسی موثر با 19 درصد بیشترین اختلاف را با مدل تیر و فنرهای تماسی نشان می‌دهند. از نظر جابجایی افقی و قائم کف تونل روش مفصلی به ترتیب با $68/25$ و $1/73$ درصد کمترین اختلاف را داشته و مدل ممان

اینرسی موثر از نظر جابجایی افقی و همچنین مدل صلبیت کاهش یافته با $30/96$ درصد بیشترین اختلاف را از نظر جابجایی قائم با مدل پیشنهادی دارد. مقایسه جابجایی دیواره نشان می‌دهد که از نظر جابجایی افقی دیواره مدل صلبیت کاهش یافته با $15/28$ درصد کمترین و مدل ممان اینرسی موثر با $39/29$ درصد بیشترین اختلاف را با مدل پیشنهادی دارند. همچنین از نظر جابجایی قائم دیواره مدل مفصلی با $59/12$ درصد کمترین و مدل ممان اینرسی موثر با $98/88$ درصد بیشترین اختلاف را بین سه مدل یاد شده با مدل تیر و فنرهای تماسی دارند.

۱۲. در مجموع مدل تیر و فنرهای تماسی پیشنهادی در این تحقیق از نظر نیروهای اعمال شده به اعضای سازه‌ای پوشش به ترتیب بیشترین تطابق را با مدل مفصلی، صلبیت کاهش یافته، ممان اینرسی موثر، تیر و فنر پیچشی و پوشش یکپارچه داشته و از نظر جابجایی‌های ایجاد شده در اعضای سازه‌ای مدل به ترتیب بیشترین تناسب را با روش پوشش با صلبیت کاهش یافته، مفصلی، ممان اینرسی موثر، پوشش یکپارچه و روش تیر و فنر پیچشی نشان می‌دهد.

۱۳. وجود بولت مقادیر مدول k_s با نرخ تندتر و مدول k_n را با یک نرخ تقریباً ثابتی کاهش داده است یعنی درصد اختلاف مقادیر مدول عکس‌العمل نرمال در دو حالت با و بدون بولت در مقابل تنش نرمال بر سطح تماس تغییرات یکنواختی خواهد داشت اما درصد اختلاف مقادیر مدول عکس‌العمل برشی با افزایش σ_n کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر با افزایش تنش نرمال بر سطح تماس، تاثیر بولت بر روی مقادیر مدول k_s کاهش می‌یابد.

۱۴. تحلیل‌های خطی و غیر خطی پوشش سگمنتال با و بدون بولت در شرایط بارگذاری عادی نشان می‌دهد که رفتار برشی المان‌های غیرخطی Link مدل شده در محل اتصالات سگمنت‌ها، در محدوده تماس بتن با بتن باقی مانده و وارد بخش لغزش و عملکرد بولت نمی‌شود.

۱۵. تغییر مقادیر نسبت تنش برجای افقی به قائم (k_0)، ارتفاع روباره تونل (h)، صلبیت خاک اطراف تونل (E_s) و اعمال بیشینه زلزله ممکن با بیشینه شتاب زمین برابر با 0.6g تا 1g به تنهایی نمی‌توانند باعث لغزش بتن بر روی بتن محل تماس سگمنت‌ها شده یا بولت را فعال نماید.

۱۶. با ثابت نگه داشتن شرایط اولیه مدل (۳۰ متر روباره خاکی)، نسبت تنش برجای افقی به قائم برابر با صفر فقط در ترکیب با بیشینه زلزله ممکن با شتاب حداکثر زمین 1g می‌تواند باعث لغزش بتن بر روی بتن شود. با این حال این ترکیب قادر به فعال نمودن بولت فولادی در محل اتصال سگمنت نمی‌باشد.

۱۷. ترکیب روباره‌های مختلف با بیشینه زلزله ممکن با شتاب حداکثر زمین 0.6g تا 1g نشان می‌دهد با شتاب 0.6g فقط در روباره‌های کمتر از ۱۵ متر در محل اتصال سگمنت‌ها لغزش رخ داده ولی بولت فعال نمی‌شود. ترکیب شتاب 0.7g با روباره‌های کمتر از ۱۹ متر باعث لغزش بتن بر روی بتن در محل اتصال سگمنت شده و در روباره‌های کمتر از ۴ متر بولت فعال می‌شود. شتاب 0.8g در روباره خاکی کمتر از ۲۱ متر باعث لغزش و در روباره کمتر از ۵ متر بولت را فعال می‌نماید. زلزله ای با شتاب حداکثر 0.9g زمین در روباره خاکی کمتر از ۲۴ متر باعث لغزش شده و در روباره کمتر از ۷ متر بولت را وارد عمل می‌کند. در نهایت زلزله ای با شتاب حداکثر زمین برابر با 1g در روباره خاکی کمتر از ۲۶ متر موجب لغزش بتن بر روی بتن سگمنت در محل اتصال آن شده و در روباره‌های زیر ۹ متر باعث عملکرد بولت می‌شود.

۱۸. در حالت تماس ساده بتن به بتن که غالب نقش اتصال سطوح سگمنت‌ها را بر عهده دارد، تغییرات تنش برشی حد آستانه در مقابل تنش نرمال وارد بر سطوح اتصال نمونه‌ها روند خطی از خود نشان می‌دهند که شیب این خط بیانگر ضریب اصطکاک سطح تماس مذکور می‌باشد. مقدار ضریب اصطکاک این سطح ۰/۷ که متناسب با زاویه اصطکاک سطح درزه در حدود ۳۵ درجه

می‌باشد. حدود این زاویه بواسطه آزمایش میز شیب‌دار نیز تأیید شد. بنابراین المان تماس اصطکاکی با ضریب اصطکاک ۰/۷ برای مدل‌سازی سه بعدی کالیبره شد.

۱۹. اندازه‌گیری زاویه بازشدگی منقار پرنده‌ای در محل اتصال طولی سگمنت‌ها نشان داد که متوسط مقدار ضریب سختی پیچشی در حدود 10 MN.m/rad برای استفاده در مدل‌های ساده تیر و فنر به همراه فنرهای برشی و نرمال ارائه شده مناسب می‌باشد.

۲۰. مقایسه نیروهای داخلی بدست آمده از مدل‌سازی المان محدود دو بعدی و سه بعدی نشان دهنده تطابق مناسب نتایج مدل‌سازی بوده و بیانگر آن است که به راحتی و دقت مناسب با یک مدل ساده تیر و فنرهای نرمال، برشی و پیچشی، می‌توان از روابط و ضرایب سختی ارائه شده در این تحقیق برای تحلیل و طراحی پوشش سگمنتال با اتصالات طولی استفاده کرد.

۵-۵- پیشنهادات

در این تحقیق سعی شده است تا شرایط مختلف موثر بر رفتار درزه‌های طولی پوشش سگمنتال مورد ارزیابی قرار گیرد. اما به تناسب زمان و امکانات موجود تحقیق حاضر با یکسری کمبودها و ساده‌سازی‌هایی همراه بوده است. لذا توصیه می‌شود در ادامه کار در زمینه‌های ذیل تحقیقات بیشتری انجام گیرد:

۱- آزمایش با دستگاه‌های اتوماتیک: در تحقیق حاضر از یک دستگاه برش درزه مجهز به ابزار اندازه‌گیری آنالوگ با بارگذاری دستی، استفاده شد. این دستگاه به لحاظ کاربردی برای ارزیابی رفتار درزه‌های سنگ با دقت متوسط ساخته شده است. لذا استفاده از آن برای درزه‌های دندانه‌دار بدون ثابت‌کننده بار قائم اتوماتیک خالی از خطا نمی‌باشد. از طرفی بهتر است از ابزار بارگذاری و کنترل بار اتوماتیک و همچنین نیرو و جابجایی‌سنج دیجیتال متصل به نمونه بتنی استفاده شود

تا خطای آزمایش به حداقل ممکن برسد. این در حالیست که به دلیل سطح صاف نمونه‌های بتنی در مقایسه با سطح دنداندار درزه‌های سنگ مقدار خطای ایجاد شده در کمترین سطح قابل قبول می‌باشد که نتایج تحقیق نیز بخوبی بیان کننده این مورد است.

۲- آزمایش بر روی ضریب سختی پیچشی: به دلیل عدم وجود امکانات لازم برای برداشت مقدار بازشدگی منقار پرنده‌ای درزه‌های طولی پوشش، در این تحقیق، مقدار این زاویه و ضریب سختی مربوط به آن از طریق مدل‌سازی سه بعدی ارزیابی شد. این در حالیست که به واسطه بهره‌گیری از ابزارهای برداشت لیزری، عکس‌برداری خاص و پردازش تصویر یا سنجنده‌های ابداعی امکان برداشت این مورد نیز وجود دارد. هنگام برداشت زاویه بازشدگی مذکور بایستی دقت کرد که مطابق شکل ۲-۶، مقدار این زاویه و تنش ایجاد شده در محل اتصال درزه بستگی به محل شروع بازشدگی داشته و در غالب موارد ممکن است موجب برداشت اشتباه آن شود.

۳- ارزیابی میزان لهیدگی بتن در محل اتصال سگمنت: همان‌گونه که در مورد قبل نیز اشاره شد، محل شروع بازشدگی منقار پرنده‌ای اتصال طولی سگمنت از جهت ایجاد لهیدگی در بخش بازنشده آن نیز مهم است. لذا پیشنهاد می‌شود مقدار سطح و میزان لهیدگی بتن در این بخش از درزه‌ها نیز ارزیابی شود.

۴- اندرکنش واقعی پوشش تونل و زمین: در این تحقیق از مدل ساده فنرهای Winkler برای اینکار استفاده شد. لذا پیشنهاد می‌شود مدل‌های دقیق‌تری برای این منظور ارائه شود.

۵- اندرکنش بین پوشش و دستگاه حفار مکانیزه: در این تحقیق با فرض عدم تاثیر سینه‌کار تونل و ماشین حفار بر مقطع مورد مطالعه، مدل‌سازی انجام شد. لذا چنانچه لازم باشد تاثیر ماشین حفار مکانیزه بر روی پایداری پوشش و نیروهای موثر بر آن نیز ارزیابی گردد، بایستی مدل درستی

برای اندرکنش بین پوشش و دستگاه حفار و تاثیر عواملی از قبیل: فشار تزریق دوغاب، نیروی پیشران جک‌های TBM، آب و غیره استفاده شود.

۶- ارزیابی تاثیر درزه‌های حلقوی: در تحقیق حاضر فقط نقش درزه‌های طولی بر روی رفتار پوشش سگمنتال مورد ارزیابی قرار گرفته و از تاثیر درزه‌های حلقوی صرف‌نظر شد. لذا پیشنهاد می‌شود با مدنظر قرار دادن نتایج این تحقیق برای درزه‌های طولی، نقش درزه‌های حلقوی بر رفتار پوشش سگمنتال تونل بطور کامل مورد ارزیابی قرار گیرد.

منابع و مراجع

منابع و مراجع

امیر شاه‌کرمی، عبدالعظیم و تقی پور، سیاوش (۱۳۸۱). مکانیک سنگ: رفتار برشی درزه های سنگ (پایداری و تغییر شکل پذیری). تهران: جهاد دانشگاهی واحد صنعتی امیرکبیر، ۲۸۵ ص.

سالمی، اکبر (۱۳۸۷). تحلیل دینامیکی تونل های دوقلوی خط یک متروی تبریز، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، ۱۸۰ ص.

مهندسین مشاور ساحل (۱۳۹۰-الف). تحلیل و طراحی سازه سگمنت. خدمات مهندسی پروژه تونل کمکی کانال ابودر، معاونت فنی عمرانی شهرداری تهران، شرکت مهندسی خاکریزآب، کد گزارش: SCE 4501 UNGR TUN CS RP 031، ۷۳،D0 ص.

مهندسین مشاور ساحل (۱۳۹۰-ب). مطالعات زمین شناسی مهندسی مسیر تونل. خدمات مهندسی پروژه تونل کمکی کانال ابودر، معاونت فنی و عمرانی شهرداری تهران، شرکت مهندسی خاکریزآب، کد گزارش: SCE 10478 UNGR TUN EG RP 001 D1، ۴۵ ص.

موتابی، هدایت (۱۳۸۲). مقاومت مصالح. تالیف: فردینانندی بیر، ئی راسل جانسون و جان تی. دوولف، انتشارات آشینا، جلد ۲: ۶۰۸ ص.

ACI (2005). *Building Code Requirements for Structural Concrete*. American Concrete Institute, ACI 318-05, p. 430

AFTES (2005). *Recommendations on TBMs, shields and segmental lining*. Association Française des Tunnels et de l'Espace Souterrain, French Tunnelling Society, 285p. http://www.aftes.asso.fr/publications_recommandations.html

Arnau, O., & Molins, C. (2011). Experimental and analytical study of the structural response of segmental tunnel linings based on an in situ loading test- Part 2: Numerical simulation. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 26: 778-88. doi:10.1016/j.tust.2011.04.005

Arnau, O., & Molins, C. (2012). Three dimensional structural response of segmental tunnel linings. *Engineering Structures*, 44: 210–21. 10.1016/j.engstruct.2012.06.001

Bandis, S. C., Lumsden, A. C. & Barton, N. R. (1981). Experimental studies of scale effects on the shear behaviour of rock joints, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 18(1): 1–21.

Barton, N. R. (1973). Review of a new shear strength criterion for rock joints. *Engng Geol.*, 8(4): 287–332.

Barton, N. R. (1983) Application of Q-system and index tests to estimate shear strength and deformability of rock masses. *Proc. Int. Symp. on Engineering Geology and Underground Construction*, Lisbon, 2: 51–70.

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): 217-24. doi:10.1016/S0886-7798(99)00035-8

Blom, C.B.M. & van Oosterhout, G.P.C., (2001). *Full-scale laboratory tests on a segmented lining*. Summary report, Ministry of Transport and Water Management, Project Organisation High Speed Line, Project Office North Holland, Management Group Betuweroute, TNO Building and Construction, Delft University of Technology, The Netherlands.

Blom, C. B. M. (2002). *Design philosophy of concrete linings for tunnel in soft soils*. PhD thesis, Delft University of Technology, Netherlands.

Brady, B. H. G. & Brown, E. T. (2004). *Rock Mechanics for Underground Mining*, Springer, Berlin and New York.

Broere, W., & Brinkgreve, R.B.J. (2002). Phased simulation of a tunnel boring process in soft soil. *Numerical Methods in Geotechnical Engineering*. Presses de l'ENPC/LCPC, 529–36.

Cavalaro, S. H. P. (2009). *Aspectos tecnológicos de túneles construídos con tuneladoray dovelas prefabricadas de hormigón*. PhD Thesis, Universitat Politècnica de Catalunya (in Spanish).

Cavalaro, S., & Aguado, A. (2012). Packer behaviour under simple and coupled stresses. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 28, 159–73. doi:10.1016/j.tust.2011.10.008

Cheng, S. (1985). *The analysis of the joint mechanism of shield driven tunnel lining*. M. Phil. thesis, Department of Geotechnics, Tongji University, P. R. China (in Chinese).

CSI. (2009). *SAP2000 Basic Analysis Reference Manual: Linear and Nonlinear Static and Dynamic Analysis and Design of Three-Dimensional Structures*, Computers and Structures, Inc., Berkeley, USA. www.csiberkeley.com

Do, N. A., Dias, D., Oreste, P. P., & Djeran-Maigre, I. (2013-a). 2D numerical investigation of segmental tunnel lining behavior. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 37, 115–27. doi:10.1016/j.tust.2013.03.008

Do, N. A., Dias, D., Oreste, P. P., & Djeran-Maigre, I. (2013-b). Three-dimensional numerical simulation for mechanized tunnelling in soft ground: the influence of the joint pattern. *Acta Geotechnica*, 9, 673-694. doi:10.1007/s11440-013-0279-7

D.S. Simulia, (2010). *Abaqus/CAE or Complete Abaqus Environment User's Manual*, Ver. 6.10, Dassault Systèmes Simulia Corp., USA. www.simulia.com

El Naggar, H., Hinchberger, S., & Lo, K. Y. (2008). A closed-form solution for composite tunnel linings in a homogenous infinite isotropic elastic medium. *Canadian Geotechnical Journal*, 45, 266–287. doi:10.1139/T07-055

Einstein, H.H., Schwartz, C.W. (1979). Simplified analysis for tunnel supports. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 499–517.

Huang, Z.R., Zhu, W., Liang, J.H., Lin, J. & Jia, R., (2006). Three-dimensional numerical modelling of shield tunnel lining. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 21: 434.

Hashash, Y. M. A., Hook, J. J., Schmidt, B., & Yao, J. I. C. (2001). Seismic design and analysis of underground structures. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 16, 247-293. doi:10.1016/S0886-7798(01)00051-7

Hefny, A. M., Tan, F. C., & Macalevery, N. F. (2004). Numerical Study on the Behavior of Jointed Tunnel Lining. *Journal of the Institution of Engineers*, Singapore, 44: 108-18.

Hefny, A. M., & Chua, H. C. (2006). An investigation into the behavior of jointed tunnel lining. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 21, 428. doi:10.1016/j.tust.2005.12.070

Hoek, E. (1990). Estimating Mohr-Coulomb friction and cohesion values from the Hoek-Brown failure criterion, *Int. J. Rock Mech.*, 27: 227–9.

Hoek, E. & Brown, E. T. (1980). *Underground Excavations in Rock*, Institution of Mining and Metallurgy, London.

ISRM (2007). The Complete ISRM Suggested Methods for Rock Characterization. In R., Ulusay & J. A., Hudson (Eds.), *Testing and Monitoring: Part 2- SM for Laboratory Determination of Direct Shear Strength* (p. 628). Ankara: ISRM & ISRM Turkish National Group.

ITA, Working Group No. 2. (2000). Guidelines for the design of shield tunnel lining, International Tunneling Association, *Tunneling and Underground Space Technology*, 15: 303–31.

JSCE (2006). *Standard specifications for tunneling: Shield tunnels*, Tokyo: Japan Society of Civil Engineers, Tunnel Engineering Committee, 271p.

Karinski, Y.S. & Yankelevsky, D.Z. (2007). Dynamic analysis of an elastic–plastic multisegment lining buried in soil. *Engineering Structures*, 29(3): 317–28. doi: 10.1016/j.engstruct.2006.04.013

Kasper, T., & Meschke, G. (2004). A 3D finite element simulation model for TBM tunnelling in soft ground. *Int J Numer Anal Methods Geomech*, 28:1441–60

Klappers, C., Grübl, F., & Ostermeier, B. (2006). Structural analyses of segmental lining – coupled beam and spring analyses versus 3D-FEM calculations with shell elements. In: *Proceedings of the ITA-AITES 2006 world tunnel congress, safety in the underground space*. 6 pp. doi:10.1016/j.tust.2005.12.116

Koyama, Y. (2000). *Study on the improvement of design method of segments for shield-driven tunnels* RTRI Report: Special No. 33. RTRI,P.114 (in Japanese).

Koyama, Y. (2003). Present status and technology of shield tunnelling method in Japan. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 18:145-59. doi:10.1016/S0886-7798(03)00040-3

Kuesel, T. R., King, e. H., Bickel, J. O. (2011). *Tunnel Engineering Handbook*. 2rd Ed, New York: Chapman & Hall, Inc., CBS Pubs., 528 p.

Ladanyi, B. & Archambault, G. (1977). Shear strength and deformability of filled indented joints, *Proc. Int. Symp. Geotechnics of Structurally Complex Formations*, Capri, 1: 317–26.

Lee, K. M., & Ge, X. W. (2001). The equivalence of a jointed shield-driven tunnel lining to a continuous ring structure. *Canadian Geotechnical Journal*, 38, 461-483. doi:10.1139/cgj-38-3-461

Lee, K. M., Hou, X. Y., Ge, X. W., & Tang, Y. (2001). An analytical solution for a jointed shield-driven tunnel lining. *International Journal of Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 25,365-390. doi:10.1002/nag.134

Liu, J. H., & Hou, X. Y. (1991). *Shield-driven tunnels*. Beijing: China Railway Press, 152–303.

Lu, L., Lu, X. L., Fan, P. F. & Guo, Z. J. (2005). Experimental study of a double-circular shield tunnel lining. *In: Proceeding of the First International Conference on Advances in Experimental Structural Engineering*, Nagoya, Japan, Vol.1: 127-34.

Lu, L., Lu, X. L. & Fan, P. F. (2011). Full-Ring Experimental Study of the Lining Structure of Shanghai Changjiang Tunnel. *Journal of Civil Engineering and Architecture*, David Pubs., Vol. 5, No. 8: 732-9.

Maidl, B., Herrenknecht, M., Maidl, U., & Wehrmeyer, G. (2012). *Mechanised Shield Tunnelling*. 2nd Ed., Berlin: Wiley- Blackwell, Ernst & Sohn co., 490 p.

Mashimo, H., & Ishimura, T. (2003). Evaluation of the load on shield tunnel lining in gravel. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 18, 233-241. doi:10.1016/S0886-7798(03)00032-4

Mayer, P. M., Libreros, A., & Hilber, H. M. (2007). Numerical modeling of cam-pocket coupling system for concrete lining. *Advances in Construction Material 2007*, Springer Berlin Heidelberg, Part I, 57-65. doi:10.1007/978-3-540-72448-3_7

Mo, H.H. & Chen, J.S. (2008). Study on inner force and dislocation of segments caused by shield machine attitude. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 23: 281–91

Molins, C., & Arnau, O. (2011). Experimental and analytical study of the structural response of segmental tunnel linings based on an in situ loading test, Part 1: Test Configuration and Execution. *Tunneling and Underground Space*, 26: 764-77. doi:10.1016/j.tust.2011.05.002.

Morgan, H.D., 1961. A contribution to the analysis of stress in a circular tunnel. *Géotechnique*, 11 (1): 37–46

Muir Wood, A.M. (1975). The circular tunnel in elastic ground. *Geotechnique*, 25: 115–27

Muir Wood, D. (2004). *Geotechnical modelling (Applied Geotechnics)*, CRC Press, 504 p.

Ogawa, T. (1986). *Elasto-plastic, thermo-mechanical and three-dimensional problems in tunneling*. Ph.D. thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, The University of Western Ontario, London, Ont.

Patton, F. D. (1966). Multiple modes of shear failure in rock, *Proc. 1st. Congr., Int. Soc. Rock Mech.*, Lisbon,1: 509–13.

Peck, R.B., Hendron, A.J., Mohraz, B., (1972). State of the art of soft ground tunneling. *In: Proceedings of 1st Rapid Excavation and Tunneling Conference*, AIME Chicago, Vol. 1: 259–85.

Penzien, J. (2000). Seismically induced racking of tunnel linings. *International journal of Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 29, 683-691. doi:10.1002/(SICI)1096-9845(200005)

Plizzari, G. A., & Tiberti, G., (2006). Steel fibres as reinforcement for precast tunnel segments. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 21, 438-439. doi:10.1016/j.tust.2005.12.079.

Qin, J.S., Zhu, W., & Chen, J. (2004). Study of dislocation of duct pieces and crack problems caused by shield attitude control. *Journal of Construction Technology*, 33(10): 25–27 (in Chinese).

Ranken, R.E., Ghaboussi, J., & Hendron, A.J. (1978). *Analysis of ground-liner interaction for tunnels*, Report No. UMTA-IL-06- 0043-78-3, Department of Civil Engineering, University of Illinois at Urbana-Champaign. p. 441

Sramoon, A., & Sugimoto, M. (2002). Theoretical model of shield behavior during excavation- I: Theory. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 128(2): 138–165. doi: 10.1061/(ASCE)1090-0241(2002)128:2(138)

Schreyer J., & Winselmann, D., (2000). Suitability tests for the lining for the 4th Elbe tunnel tube – Results of large-scale tests. *Tunnel 1/2000*, pp. 34-44.

Tang, Y., (1988). *The mechanism study of the staggering assembly of shield-driven tunnel*, M. Phil. Thesis, Department of Geotechnics, Tongji University, China.

Teachavorasinskun, S., & Chub-uppakarn, T. (2010). Influence of segmental joints on tunnel lining. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 25: 490-494. doi:10.1016/j.tust.2010.02.003

Tsoukantas, S.G., & Tassios, T.P., (1989). Shear resistance of connections between reinforced concrete linear precast elements. *ACI- Structural Journal*, 86 (3): 242–49. doi: 10.14359/2883.

Van Empel, W.H.N.C., Kaalberg, F.J. (2002). Advanced modeling of innovative bored tunnel design Amsterdam North-Southline. In: *Proceedings of the DIANA World Conference*. Tokyo, 439–48.

Vervuurt, A.H.J.M., Van del Veen, C., Gijsbers, F.B.J., Den Uijl, F.B.I. (2002). Numerical simulations of tests on a segmented tunnel lining. In: *Proceedings of the DIANA World Conference*. Tokyo, 429–37.

Yuen, C.M. (1979). *Rock-structure time interaction*. Ph.D. thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, The University of Western Ontario, London, Ont .

Wang, J. J. (2005). The Design Considerations for the segmental lining of the Hsuehshan tunnel. *International Symposium on Design, Construction and Operation of Long Tunnels*, Taipei, Taiwan, 61- 66.

Wang, J. N. (1993). *Seismic Design of Tunnels: A State-of-the-Art Approach*. New York: Parsons Brinckerhoff, Quade and Douglas, Inc.

Wang, L.Z., Wang, Z., Li, L.L. & Wang, J.C. (2011). Construction behavior simulation of a hydraulic tunnel during standpipe lifting. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 26: 674–85

Zhong, X., Zhu, W., Huang, Z., & Han, Y. (2006). Effect of joint structure on joint stiffness for shield tunnel lining. *Tunneling and Underground Space Technology*, 21, 406-407. doi:10.1016/j.tust.2005.12.215

Zhou, J. (1988). *The analysis of segmental circular tunnel lining*. *Underground Engineering and Tunnels* 4:2–6 (in Chinese).

ABSTRACT

As normal and tangential stiffness of contact points in segmental linings remarkably depends on normal stress in contact locations and this issue has not been investigated in the previous studies, the present study tried to develop a precise contact model based on experimental direct shear tests (DST) results. By selecting the normal stress between 0.25 and 2 MPa, about 100 tests were performed on the grooved cubic samples of contact points of segments in three conditions include the contact of concrete to concrete, with gasket and with bolt. As practical outcome of this study, the contact shear and normal reaction moduli k_s and k_n were related to contact normal stress via two linear regression equations considering R^2 of 98%. For evaluating the proposed method, finite element models of an urban tunnel liner were developed using the concept of beam on elastic foundation considering the proposed contact model of the present study (beam-contact springs (BCS)), the results of which were compared with those of the conventional contact models. Results demonstrated that the proposed model of this research had the highest correspondence with reduced RR, HL, EMI, BRS, and comprehensive coverage, respectively. According to the test results from this research, 3D FEM models were developed. Finally to access the sliding and bolt acting conditions of contact points, some sensitive analyses were conducted. Finally obtained results in this research shows proposed BCS model can be used easily to estimate segmental lining behavior.

KEYWORDS: Shield tunneling, Segmental lining, Segment, Longitudinal joints, Direct shear test (DST), Contact element, Shear, normal and rotational stiffness coefficients



Shahrood University

Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics

Developing a constitutive model of contact element in segmental lining of tunnel

Akbar Salemi

Supervisors:

Dr. Farhang Sereshki

Dr. Morteza Esmaeili

September 2015

