

مدل سازی سه بعدی غیرخطی مرحله ای سازه بازشو با در نظر گرفتن اثرات اندرکنشی قطعات پیش ساخته بتن مسلح پوشش تونل

پژوهشی

میثم جلالی*

۱- استادیار؛ دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، mjalali@shahroodut.ac.ir

دریافت دست نوشته: ۱۴۰۱/۰۱/۲۸؛ پذیرش دست نوشته: ۱۴۰۱/۰۸/۰۴

شماره صفحات: ۱۴۷ تا ۱۶۴

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22044/tuse.2022.11811.1450

چکیده	واژگان کلیدی
<p>در کاربردهای مهندسی، به منظور مدل سازی سازه بازشو در تونل های سگمنتی (قطعات پیش ساخته بتنی پوشش تونل)، اندرکنش سگمنت ها در نظر گرفته نشده و سازه تونل معمولاً به صورت یکپارچه مدل سازی می شود. امکان لغزش قطعات سگمنت در محدوده بازشوها ممکن است توزیع تنش در سازه را متاثر نماید. اما میزان این تاثیر نامشخص بوده و اطلاعات جامعی از آن در دسترس نیست. در تحقیق حاضر با هدف مدل سازی اندرکنش قطعات پیش ساخته در محل بازشو در تونل های سگمنتال، از ابزار مدل سازی سه بعدی غیرخطی استفاده شده است. با توجه به اینکه در واقعیت، بازشو به صورت مرحله ای اجرا می شود در روش مدل سازی پیشنهاد شده، اثرات مدل سازی مرحله ای نیز مدنظر قرار گرفته است. نتایج مدل سازی با رفتار یکپارچه در مقایسه با مدلسازی رفتار اندرکنشی در سه بخش رفتار سگمنت، رفتار سازه نگهبان موقت و رفتار سازه نگهبان دائم مورد بررسی انتقادی قرار گرفته است. نتایج تحقیق نشان می دهد روند فعلی در مدل سازی مهندسی بازشو در تونل سگمنتی، منجر به نتایج در خلاف جهت اطمینان در طراحی برشی خواهد شد. همچنین مدل سازی صلب درزه های سگمنتی منجر به مشاهده نواحی تمرکز تنش کاذب در سگمنت ها می شود که این امر ممکن است منتهی به طرح های تقویتی در نواحی غیرلازم شود.</p>	<p>تونل سگمنتال بازشو مدلسازی مرحله ای تحلیل سه بعدی غیرخطی بتن مسلح</p>

گردد (Caratelli, et al., 2018). مراجع مختلف روش هایی را برای منظور کردن اثرات سه بعدی در تحلیل سازه پوشش تونل پیشنهاد کرده اند (Ebrahimi, et al., 2020, Horioka, et al., 2019). وضعیت چیدمان سه بعدی قطعات پیش ساخته بتنی را نشان داده است. آرنو و مولنز در سال ۲۰۱۲، نشان دادند چنانچه لاینیگ تونل سگمنتال در معرض بارگذاری نامتقارن یا در محیط خاک نرم واقع شده باشد عملکرد سه بعدی سگمنت ها می تواند منجر به بازتوزیع نیروها و لغزش قطعات سگمنت گردد. بر

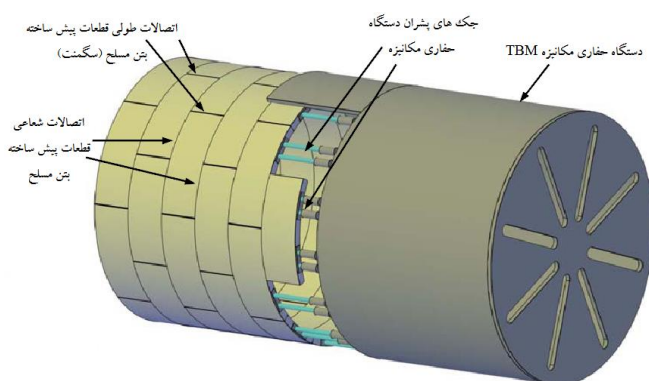
۱- مقدمه

پوشش تونل های حفاری شده به روش مکانیزه از قطعات پیش ساخته بتن مسلح به نام سگمنت تشکیل شده است (Wittke, et al., 2007). این قطعات پیش ساخته که بلافاصله پس از حفاری در تونل نصب می شوند باعث ایجاد عملکرد سازه ای سه بعدی در سازه پوشش تونل می شوند. چیدمان ناپیوسته قطعات سگمنت می تواند باعث تغییر سختی و همچنین توزیع نیروهای داخلی سازه پوشش تونل

* سمنان؛ شاهرود؛ میدان هفت تیر؛ بلوار دانشگاه؛ دانشگاه شاهرود؛ دانشکده مهندسی عمران؛ طبقه سوم؛ کد پستی: ۳۶۱۹۹۵۱۶۱؛ صندوق پستی: ۳۱۶؛ شماره تلفن: ۰۲۳-۳۲۳۰۳۰۰

را مدل کرد. از این روش برای تحلیل تونل راه‌آهن-Genoa (Wittke, et al., 2007) در ایتالیا استفاده شده است. روش دیگر مدل‌سازی پوشش به صورت رینگ یکپارچه است که نتایج نسبتاً محافظه کارانه‌ای را بدست می‌دهد (Wang, et al., 2018). مورد مهم دیگر اندرکنش بین دو رینگ متوالی است که در صورت استفاده از روش‌های مذکور لازم است با مدل‌سازی دو رینگ کنار هم و تعریف المان‌های تماسی بین دو رینگ این امر لحاظ گردد یا با استفاده از منطق مناسبی تاثیر دو رینگ مجاور لحاظ گردد. اثر اندرکنشی بین دو رینگ متوالی سبب افزایش تلاش‌های وارده بر یک رینگ می‌گردد (Liu, et al., 2011). روش مناسب دیگری که در آن تاثیر دو رینگ مجاور نیز لحاظ شده است روشی است که در استاندارد ژاپنی توصیه شده است (JSCE, 2016). در این روش رینگ به صورت یکپارچه با مدول الاستیسیته کاهش یافته مدل می‌شود و با اعمال ضریب افزایشدهنده و کاهشدهنده در لنگر به ترتیب مقادیر ممان در سگمنت و محل اتصال تعیین می‌گردد. در محل عبور گالری‌های عرضی (Cross Passages) به واسطه ایجاد بازشوه‌های بزرگ احتمال وقوع لغزش‌های جزئی بین قطعات سگمنت بسیار محتمل می‌باشد. تحقیقات انجام شده پیشین عمدتاً بر روی رفتار سه بعدی تونل بدون منظور کردن اثر بازشوها متمرکز بوده است.

مبنای مدل‌سازی سه بعدی انجام شده توسط آرنو و مولنز، بارگذاری موضعی روی تونل‌های سگمنتی اثرات تغییرمکانی متفاوتی را نسبت به لاینینگ یکپارچه نتیجه داده است (Arnau & Molins, 2015). لی و همکاران به واسطه مدل‌سازی سه بعدی بازشو در یکی از خطوط مترو هنگ کنگ نشان دادند در محل بازشو در صورت عدم اجرای سازه نگهدارنده اولیه تغییر مکان‌های قابل ملاحظه‌ای ایجاد خواهد شد. این محققین اشاره‌ای به نحوه کنترل تغییر مکان‌ها نداشتند (Li, et al., 2015). برای مدل‌سازی پوشش تونل روش‌های گوناگونی وجود دارد که در هر روش با اعمال فرضیاتی جهت ساده‌سازی از حجم محاسبات کاسته می‌شود (Horioka, 2019). یکی از دیدگاه‌ها، مدل‌سازی پوشش با استفاده از المان تیر و داشتن مفصل کامل در محل تماس سگمنت‌ها به یکدیگر در یک رینگ است (AASHTO, 2010; Zhang, 2022; Kuesel, et al., 2012). از آنجایی که در محل اتصال دو سگمنت به سبب وجود نیروی محوری فشاری انتقال ممان نیز میسر است، فرض مفصل کامل روش مناسبی به شمار نمی‌آید. روش دیگر داشتن فنرهای پیچشی با سختی مناسب در محل اتصال دو سگمنت است (Spyridis & Bergmeister, 2015). روش مناسب دیگر مدل کردن پوشش با استفاده از روش المان محدود است که در آن به سبب مدل شدن ضخامت سگمنت می‌توان با تعریف المان‌های صرفاً فشاری بین دو سگمنت وضعیت واقعی اتصال دو سگمنت به یکدیگر

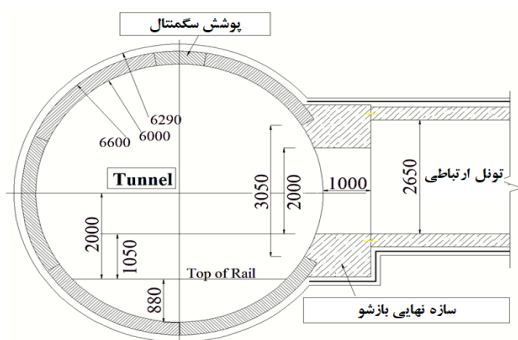


شکل ۱- عملکرد پازلی قطعات پیش ساخته بتن مسلح (سگمنت) پوشش تونل (Krahl, et al., 2021)

مدل‌سازی سه بعدی به کمک روش اجزا محدود استفاده شده است. امکان لغزش بین قطعات پیش ساخته با استفاده از المان‌های تماسی فراهم شده است. همچنین سعی شده

تحقیق حاضر به بررسی و مدل‌سازی سه بعدی تونل‌های ساخته شده از قطعات پیش ساخته بتن مسلح در محل بازشوه‌های بزرگ می‌پردازد. به این منظور از ابزار

شده در شکل ۲، است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود بازشو دارای عرض و ارتفاع داخلی ۲۰۰۰ میلی‌متر بوده و گالری نیز به صورت D شکل دارای ارتفاع کل ۲۶۵۰ میلی‌متر، ارتفاع دیواره ۱۱۵۰ و عرض ۳۰۰۰ میلی‌متر است. مشخصات سازه‌ای مصالح در جدول ۱، به‌طور کامل درج شده است.



شکل ۲- هندسه سازه (تونل با پوشش سگمتنی فرض شده است)

سگمت‌های تونل دارای ضخامت و عرضی به‌ترتیب معادل ۳۰۰ و ۱۴۰۰ میلی‌متر بوده و بتن آنها از رده $C45$ می‌باشد. آرماتورهای خمشی اصلی (در جهت عمود بر راستای تونل) نیز ۱۲ عدد آرماتور نمره ۱۲ در دو لایه با پوشش بتن ۳۰ میلی‌متر هستند. برای اتصال سازه نگهداری فلزی اطراف بازشو به پوشش تونل لازم است از کاشت بولت استفاده شود. پارامترهای ژئوتکنیکی بر اساس گزارش "پارامترهای ژئوتکنیکی بازشوی تونل‌های ارتباطی (Cross-Passage) (حداصل ایستگاه‌های قهرمانان و عادل‌آباد) پروژه خط ۲ قطار شهری شیراز-موسسه مهندسی مشاور ایمن‌سازان" مطابق جدول ۲، انتخاب شده است.

است تمامی مراحل ساخت و اجرای بازشو در مدل‌سازی منظور گردد. برای داشتن شرایط واقعی از اطلاعات و مشخصات پروژه تونل دوقلوی قطار شهری (مترو) خط ۲ شیراز استفاده شده است. به منظور درک بهتر از میزان موثر بودن مدل‌سازی اثرات لغزشی مدل‌سازی برای حالت سازه صلب نیز انجام شده است.

هدف از مطالعه حاضر بررسی روش مدل‌سازی عددی اندرکنش قطعات پیش ساخته بتن مسلح پوشش تونل (سگمت) در محل بازشو با انجام مطالعه موردی مترو خط دو شیراز است. در روش‌های متعارف مهندسی در طراحی بازشوها، اثرات پازلی تونل‌های پیش‌ساخته در نظر گرفته نمی‌شود و تمامی اتصالات به‌صورت صلب مدل‌سازی می‌شوند. در تحقیق حاضر ضمن مدل‌سازی اتصالات به صورت صلب، در مدل دیگری اثر رفتار غیر صلب اتصالات بررسی شده است. در نهایت ضمن مقایسه و تفسیر تمامی نتایج دو روش، نتایج حاصل با برداشت‌های میدانی انجام شده در واقعیت مقایسه و تفسیر شده است. در مدل‌سازی‌های آرایه شده اثر سکناس‌های (مراحل) ساخت نیز لحاظ شده است. همچنین اثرات اندرکنشی خاک و سازه در مدل‌سازی در نظر گرفته شده است. اگرچه تفاوت نتایج با در نظر گرفتن انفصال در بین سگمت‌ها بدیهی می‌باشد اما نوآوری تحقیق حاضر معطوف به اعمال روش مدل‌سازی غیرخطی مرحله‌ای است که در مدل‌سازی‌های رایج مهندسی مرسوم نمی‌باشد.

۲- هندسه سازه و مشخصات مصالح

هندسه سازه بازشو و مقطع عرضی بازشو به‌صورت نشان داده

جدول ۱- مشخصات مصالح

مصالح	ویژگی	سگمت‌ها	اجزای بازشو
بتن	مقاومت ۲۸ روزه نمونه استوانه‌ای استاندارد (MPa)	۴۵	۲۵
	مدول الاستیسیته (MPa)	۳۲۰۰۰	۲۳۸۷۵
	ضریب پواسون	۰/۲	۰/۲
میلگرد	جرم واحد حجم بتن مسلح (kg/m^3)	۲۴۰۰	۲۴۰۰
	نوع میلگرد	آچار AIII	آچار AIII
پروفیل‌ها و ورق‌های فولادی	تنش جاری شدن (MPa)	۴۰۰	۴۰۰
	نوع فولاد	-	فولاد نمره ST-37
	تنش جاری شدن (MPa)	-	۲۴۰

جدول ۲- پارامترهای ژئوتکنیکی پیشنهادی در موقعیت بازشوی تونل‌های ارتباطی (Cross-Passage)

GC-GM	CLI	CL-ML	CL2	نوع خاک
شن رس و سیلت‌دار با ۲۰ در ماسه متراکم	رس با شاخص خمیری کم	رس سیلتی بسیار سفت	رس با شاخص خمیری کم	تشریح جنس خاک
۰-۲، ۱۰-۱۲، ۳۴-۳۵	۲-۱۰	۱۰-۱۲	۱۲-۲۲، ۲۴-۳۴	عمق (متر)
>۴۰	۸-۳۲	>۳۲	>۳۲	$N_{modified\ SPT}$
۱/۸-۲	۱/۶۵-۱/۷	۱/۶۷	۱/۷-۱/۷۵	$\gamma_a\ (gr/cm^2)$
۲/۰۵-۲/۱	۱/۸-۱/۹	۲	۱/۹-۲/۱	$\gamma_{sat}\ (gr/cm^2)$
۰	۰/۱	۰/۰۵	۰/۲-۰/۲۵	$C'\ (kg/cm^2)$
۳۵	۲۸/۷-۲۹/۳	۲۸	۲۶/۳-۲۷/۱	$\phi'\ (deg)$
۶۰۰-۷۰۰	۳۰۰	۴۰۰	۵۰۰-۶۰۰	$E\ (kg/cm^2)$
۰/۳۵	۰/۴	۰/۴۲	۰/۴۵	ν
$۲/۳ \times ۱۰^{-۵}$	$۴/۴۵ \times ۱۰^{-۷}$	۱×۱۰^{-۵}	۱×۱۰^{-۷}	$K\ (cm/s)$
۰/۴۳	۰/۵۱	۰/۵۳	۰/۵۵	K_0

می‌توان در مدل‌سازی به روش تیر- فنر به عنوان یک الگوی بار مستقل از آن استفاده کرد. در مرحله آخر با داشتن الگوی بارگذاری خاک، مدل‌سازی سه بعدی غیرخطی مرحله‌ای در نرم‌افزار SAP برای دو حالت با و بدون مدل کردن درزه‌های سگمنت انجام می‌شود.

۳-۱- مدل‌سازی محیط پیوسته

در مدل عددی تهیه شده در این مرحله، مرزهای چپ و راست در راستای افق و مرز تحتانی در راستای قائم بسته می‌باشد. مدل‌سازی شامل ۳ مرحله اصلی می‌باشد. در اولین مرحله، زمین در شرایط اولیه و قبل از حفاری تونل مدل‌سازی می‌شود. هدف از این قسمت رسیدن به تعادل اولیه زمین قبل از حفاری تونل است. در این حالت بارگذاری سطحی شامل بار نامتقارن ۲۰ کیلونیوتن بر مترمربع (جهت حصول به نتایج بحرانی) فرض شده است. شکل ۳، مدل ساخته شده این قسمت را نشان می‌دهد. ابعاد محیط پیرامونی ۴۸×۳۶ متر انتخاب شده است. پس از تعادل زمین، حفاری با اعمال همگرایی لازم (همگرایی در سینه کار و همگرایی بین خط حفاری و شیلد دستگاه حفار) مدل می‌شود. میزان همگرایی با استناد به تجربه‌های مشابه و نیز مشخصات هندسی دستگاه حفار حدود ۲۰ میلی‌متر لحاظ می‌شود. انجام تحلیل مدل عددی پس از رسیدن به این مقدار همگرایی متوقف می‌شود. پس از حفاری جهت داشتن شرایط واقعی‌تر، فشار تزریق به صورت بارگذاری خارجی بر جدار حفاری (به صورت فشار به بیرون) اعمال می‌گردد که

۳- مدل‌سازی عددی

در تونل‌های مکانیزه که اجرای آنها به روش تعادل فشار زمین است، توصیه بر استفاده از روش‌های عددی به منظور لحاظ نمودن کلیه مراحل اجرا در تعیین بارهای وارده از محیط است. از طرفی برای مدل‌سازی و تحلیل سازه تونل، روش تیر- فنر خروجی‌های سازه‌ای مناسب‌تری را نسبت به روش مدل‌سازی تیر- محیط (مدل‌سازی در نرم‌افزارهای محیط پیوسته) ارائه می‌کند. مشکل بسیار مهمی که در روش تیر- فنر وجود دارد این است که در این روش لازم است تا بار خاک به‌صورت یک الگوی بار مستقل تعریف شود. در این تحقیق از آنجا که مدل‌سازی‌ها در نرم‌افزار SAP2000 انجام می‌شود، لازم است تا برآورد مناسبی از بار خاک انجام شود. به این منظور مدل‌سازی عددی در سه بخش مجزا انجام شده است. در مرحله اول از نرم‌افزار FLAC-2D v5.0.327 استفاده شده است که در مدل‌سازی این مرحله محیط میزبان خاکی و سازه تونل به همراه مراحل اجرا، به‌صورت محیط پیوسته مدل شده‌اند و مقادیر نیروهای محوری و لنگرهای خمشی ایجاد شده در پوشش تونل به‌دست می‌آید. در بخش دوم تحلیل، از نرم‌افزار SAP2000 و مدل‌سازی به روش تیر- فنر استفاده شده است. در این مرحله با انجام سعی و خطا بارهایی که در پوشش تونل همان نیروهای حاصل از مدل‌سازی مرحله اول را نتیجه دهد، تخمین زده می‌شوند. به این ترتیب برآورد مناسبی از بار خاک وارد بر سازه تونل به‌دست می‌آید که

الاستیسیته کاهش یافته مدل می‌شود و با اعمال ضریب افزایشنده و کاهشده‌ای در لنگر به ترتیب مقادیر لنگر در سگمنت و محل اتصال سگمنت‌ها تعیین می‌گردد. در تحقیق حاضر از این روش (که خود تاثیر رینگ‌های متوالی را لحاظ می‌کند) استفاده شده است. مراحل تحلیل در این روش به این شرح می‌باشد. ابتدا مدول الاستیسیته رینگ با ضریب ξ -۱ اصلاح می‌شود. سپس تحلیل سازه رینگ یکپارچه با لحاظ کردن مدول الاستیسیته مرحله قبل انجام می‌شود. اصلاح مقادیر لنگر خمشی در محل وسط سگمنت، حداقل نقاط انتهایی سگمنت و محل اتصال دو سگمنت، با استفاده از ضرایب اصلاح ξ -۱ به عنوان ضریب اصلاح لنگر خمشی در محل وسط سگمنت و ضریب اصلاح ξ +۱ به عنوان ضریب اصلاح لنگر خمشی در محل اتصال دو سگمنت نیز مرحله آخر است. مقدار ضریب ξ بین اعداد ۰/۳ تا ۰/۶ می‌باشد که برای تحقیق حاضر عدد ۰/۴ انتخاب شده است. لازم به ذکر است مقادیر نیروی محوری در این روش نیاز به اصلاح ندارند. شکل ۴، دیاگرام تلاش‌های داخلی رینگ (بدون ضریب افزایش بار) را پس از نصب سگمنت نمایش می‌دهد. در پایان هر مرحله از تحلیل نیروی نامتوازن در فرآیند حل عددی به صفر رسیده است (شکل ۴) که مبین به تعادل رسیدن نهایی مدل است.

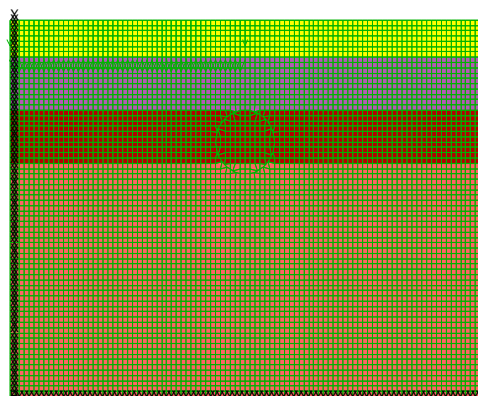
۳-۲- مدل‌سازی تیرفنر، برآورد بار خاک برای استفاده در مدل سه بعدی

در این مرحله مدل‌سازی در نرم‌افزار *SAP2000V14* انجام شده است. سازه تونل با المان دو بعدی *FRAME* مدل شده است و برای مدل‌سازی محیط میزبان تونل از فنرهای صرفاً فشاری در راستای شعاعی استفاده شده است. سختی این فنرها از رابطه زیر محاسبه شده است که در این رابطه E مدول الاستیسیته، R شعاع تونل و ν ضریب پواسون محیط می‌باشد.

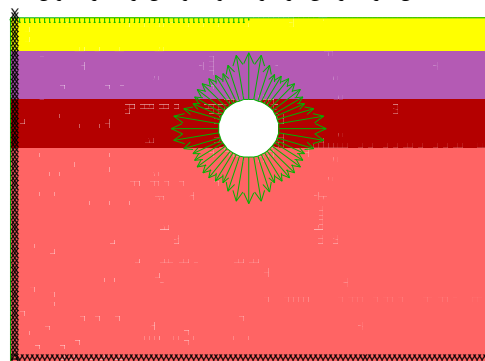
$$K = \frac{E}{R(1+\nu)} \quad (1)$$

روش کار در این مرحله به این ترتیب است که با روش سعی و خطا بارهایی به دست می‌آیند که همان تلاش‌های نتیجه شده در تحلیل مرحله اول را در سازه تونل ایجاد کنند. در نهایت الگوی بار خاک در این مرحله به دست می‌آید.

همگرایی را کاهش می‌دهد و سبب ایجاد شرایط هیدروستاتیک زمین می‌گردد و در شرایط وجود آب زیرزمینی این بار به صورت اختلاف فشار تزریق و فشار آب در مدل‌سازی اعمال می‌شود. فشار تزریق نیز به صورت فشار هیدروستاتیک به سازه تونل اعمال می‌شود که بر مبنای وزن مخصوص مصالح تزریق (۱۳ کیلو نیوتن بر متر مکعب) از تاج تونل به کف تونل افزایش می‌یابد. فشار تزریق اعمالی در شکل ۳، نشان داده شده است. فشار تزریق با فشار خاک به تعادل می‌رسد و این مسئله باعث می‌شود تا نسبت فشار افقی به فشار قائم خاک در اطراف تونل افزایش یابد و شرایطی نزدیک به هیدروستاتیک در محیط پیرامون ایجاد گردد (که هدف از این روش اجرا نیز ایجاد همین شرایط می‌باشد). در نهایت پوشش بتنی تونل مدل می‌شود.



الف) مدل‌سازی زمین در شرایط اولیه و قبل از حفاری تونل



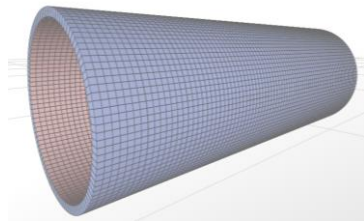
ب) اعمال فشار تزریق پس از رسیدن تونل به همگرایی مورد نظر

شکل ۳- مدل‌سازی مرحله اول: محیط پیوسته

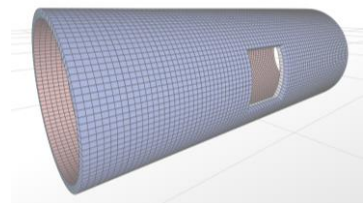
روش مناسب و اجرایی که در آن تاثیر درزه دو رینگ مجاور نیز لحاظ شده، روش توصیه شده در استاندارد ژاپنی است. در این روش رینگ به صورت یکپارچه با مدول

۴- تحلیل سازه به صورت ساخت مرحله‌ای (Staged Construction)

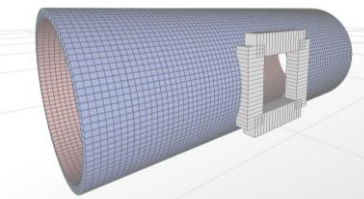
مراحل مدل‌سازی و تحلیل منطبق بر موارد بیان شده در مدل‌سازی پیوسته محیط پیرامونی و پوشش است که پیش‌تر بیان شد و در آن از روش توصیه شده در استاندارد ژاپنی استفاده شده است. با استفاده از روش تحلیل ساخت مرحله‌ای می‌توان ترتیب مراحل اجرای سازه‌ها از قبیل اضافه یا کم کردن اجزای سازه و مقدار بار در هر مرحله را در محاسبات لحاظ کرد. تحلیل مرحله‌ای به دلیل امکان تغییر سازه در طی تحلیل، نوعی از تحلیل‌های غیرخطی به حساب می‌آید. در ادامه هر یک از مراحل تحلیل شرح داده شده است. این روش با استفاده از قابلیت‌های نرم‌افزار مورد استفاده مبنای مدل‌سازی قرار گرفته است. در مرحله نخست فرض شده است که سازه به صورت کامل بوده و بارهای افقی و عمودی زمین و بار مرده با ضریب بار ۱ بر سازه اعمال شده باشد. شمای گرافیکی پوشش تونل در این مرحله در شکل ۵، قابل مشاهده است.



مدل مرحله اول



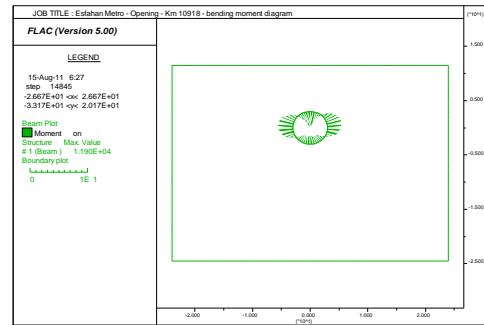
مرحله دوم



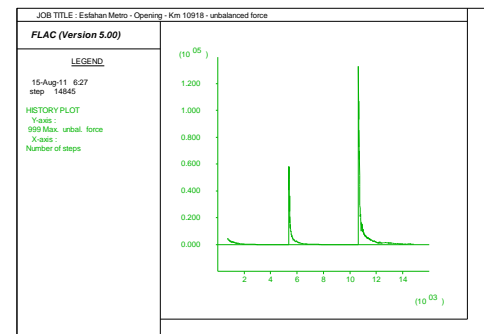
مرحله سوم

شکل ۵- مدل اجزا محدود سازه در مدل‌سازی سه بعدی مرحله‌ای در سه مرحله

ترکیب بارگذاری با توجه به آیین‌نامه بتن *ACI-318* و نیز مد نظر قرار دادن ترکیب‌های بارگذاری و ضرایب بار ارائه شده در آیین‌نامه ژاپن و ایتالیا انتخاب شده است. به این ترتیب مجموع بار خاک، بار مرده و فشار پسماند دستگاه حفار در ضریب افزایش بار ۱/۴ ضرب شده است.



دیاگرام لنگر خمشی



نیروی نامتوازن در گام‌های مختلف حل مدل محیط پیوسته

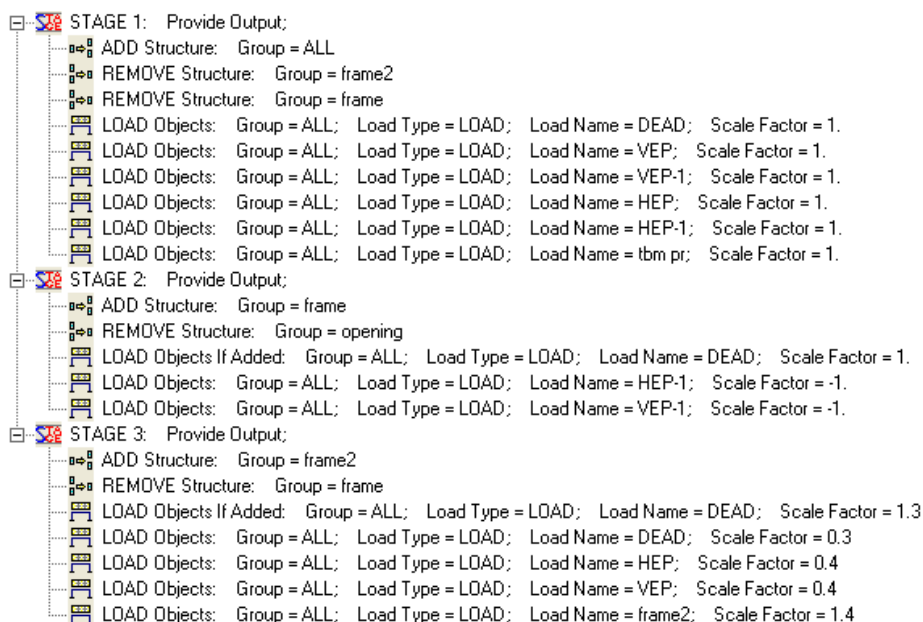
شکل ۴- نتایج حل مدل محیط پیوسته

۳-۳- تحلیل سه بعدی مرحله‌ای سازه تونل در محل بازشو

پس از برآورد بار وارد از محیط به صورت یک الگوی بار مستقل، برای مدل‌سازی و تحلیل سازه از نرم‌افزار *SAP2000 v.14.1.0* استفاده شده است. در تحلیل سازه سعی شده تا شرایط مدل‌سازی تا حد امکان به واقعیت نزدیک باشد. از این رو روش تحلیل غیرخطی مرحله‌ای برای منظور کردن ارتباط رینگ‌های پوشش تونل با یکدیگر و سازه نگهداری موقت و دائم و همچنین مراحل اجرای سازه به کار برده شده و مدل‌سازی به صورت سه بعدی و با استفاده از المان‌های *Link, shell* و *Frame* انجام شده است.

سوم قاب بتنی نگهداری دائم بازشو همراه با بار مرده و بار خاک ضریب دار وارد بر آن اضافه شده و اضافه بارها برای رسیدن به ضریب بار مورد نظر بر سازه اعمال می‌شوند. خلاصه مراحل تحلیل نیز در شکل ۶، ارایه شده است.

در مرحله بعد، قاب فولادی نگهدارنده موقت بازشو نصب و سگمنت‌های مورد نظر حذف می‌شوند. همچنین بار مرده قاب اضافه شده و بار زمین روی سگمنت‌های اطراف بازشو تا فاصله ۶۰۰ میلی‌متر برداشته می‌شود. در مرحله‌ی



شکل ۶- جزئیات مدل‌سازی غیر خطی مرحله‌ای

است که قطعات بتنی در فشار به یکدیگر فشرده شده ولی در صورت ایجاد کشش می‌توانند از یکدیگر جدا شوند، که این حالت توسط تعریف لینک الاستیک غیرخطی تعریف شده است. مقدار سختی این لینک با فرض محوری عمل کردن ستون بتنی با ابعاد ۱/۴ در ۰/۲ در ۰/۳ متر به دست آمده که حدود ۱۴۰۰۰ کیلونیوتن بر متر برای هر لینک تخمین زده شده است (فاصله لینک‌ها در مدل از یکدیگر برابر با ۲۰۰ میلی‌متر می‌باشد). همچنین تحت اثر نیروی برشی (لغزش سگمنت‌ها روی یکدیگر) سختی برشی سه بولت فولادی با سطح مقطع ۳/۱۴ سانتی‌متر و طول ۲۰۰ میلی‌متر برای هر سگمنت معادل‌سازی شده که نهایتاً برای هر المان لینک با فواصل ۲۰۰ میلی‌متری این سختی در جهت اطمینان برابر با ۲۵۰۰۰ کیلونیوتن بر متر فرض شده است. به دلیل کم بودن مقدار سختی برشی که در بالا ارائه شد، بار بیشتری به قاب نگهدارنده بازشو منتقل می‌شود و استفاده از نتایج تحلیل در این حالت، برای طراحی بازشوها در جهت اطمینان خواهد بود. پس از مشخص شدن نواحی

۴-۱- صحت سنجی مدل عددی

از آنجایی که روش ارایه شده برای طراحی در این مقاله در اجرای پروژه‌های مشابه نیز استفاده و نتایج رضایت بخش بوده است می‌توان به روش مدل‌سازی مطمئن بود. شایان ذکر است صحت‌سنجی به طور کلی در قیاس با نتایج مدل آزمایشگاهی معنی پیدا می‌کند اما مدل فیزیکی یا آزمایشگاهی مشابه برای مدل‌سازی حاضر در ادبیات فنی وجود ندارد و امکان انجام صحت سنجی بیشتر برای فرآیند مدل‌سازی عددی میسر نمی‌باشد.

۴-۲- مدل‌سازی اندرکنش اعضای سازه با یکدیگر

در ادامه به معرفی روش مدل‌سازی اندرکنش اجزا مختلف در مدل عددی پرداخته شده است. مقدار سختی‌های فرض شده برای این المان‌ها با آنالیز حساسیت به‌گونه‌ای فرض شده‌اند که در طراحی هر یک از بخش‌های سازه با استفاده از پاسخ‌های ایجاد شده، در جهت اطمینان باشند. در اتصال رینگ‌ها و سگمنت‌ها در محل درزه‌ها به یکدیگر فرض شده

برابر با ۶۶۰۰ کیلونیوتن بر متر تخمین زده می‌شود. اندرکنش قاب بتنی (سازه نگهداری دائم) و قطعات پیش ساخته بتن مسلح به گونه‌ای تعریف شده‌اند که شرایط واقعی را شبیه‌سازی کنند. سختی فشاری این المان‌ها برابر با سختی فشاری لینک‌های رینگ به رینگ فرض شده و امکان لغزش سطوح روی یکدیگر وجود دارد. اندرکنش قطعات پیش ساخته بتنی و زمین به صورت غیرخطی و فقط برای تحمل فشار تعریف شده و مقدار سختی المان آن‌ها برابر با مدول واکنش بستر می‌باشد.

۵- بارهای وارد بر پوشش

نحوه اعمال بارها بر سازه تونل در مراحل اول و دوم در شکل ۷ و شکل ۸، نشان داده شده است. بارهای مرحله سوم مشابه مرحله دوم بوده و تنها ضرایب بار متفاوتی دارند.

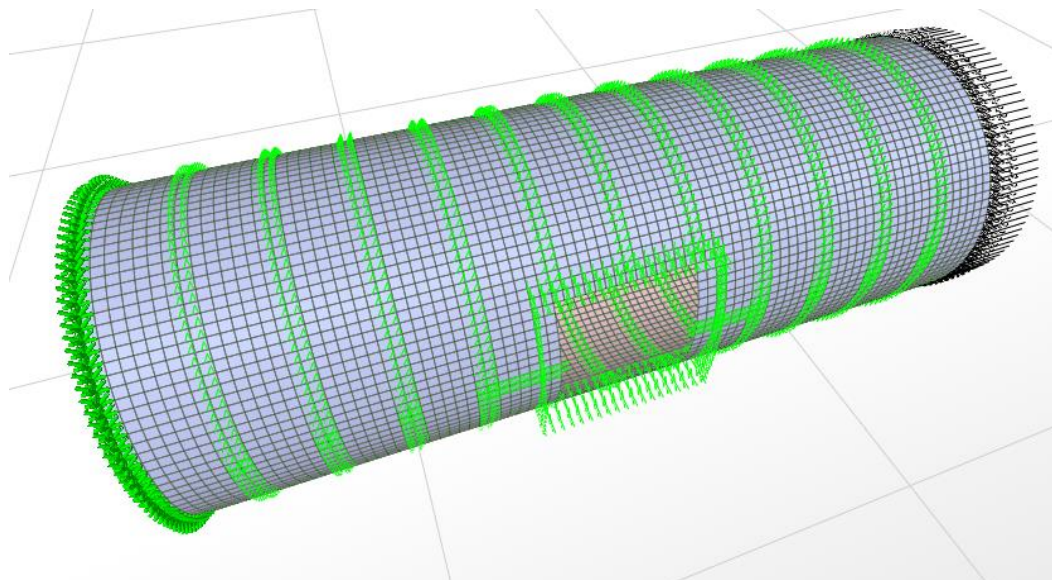
۶- نتایج تحلیل سازه تونل در محل بازشو

۶-۱- وضعیت تلاش‌ها در پوشش تونل در مراحل مختلف

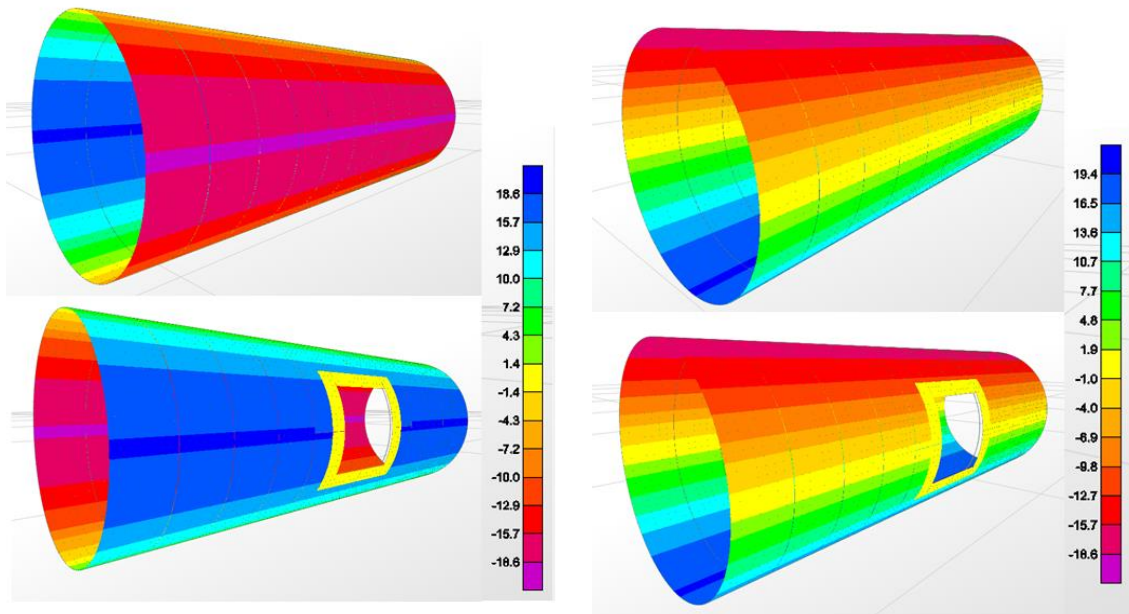
در شکل ۹ و شکل ۱۰، تلاش‌های ایجاد شده در پوشش تونل در مرحله اول به تصویر درآمده است.

که سگمنت‌ها باید به یکدیگر متصل شوند سختی وسیله اتصال (ورق‌های اتصال) باید جایگزین سختی مفروض قبلی شود. در این حالت بیشتر بار از طریق وسایل اتصال به سگمنت‌های رینگ مجاور منتقل خواهد شد. با فرض استفاده از ورق فولادی به ضخامت ۱۰ میلی‌متر و عرض ۳۰۰ میلی‌متر حداکثر سختی هر لینک (در فواصل ۲۰۰ میلی‌متری) حدود ۵۳۰۰۰۰ کیلونیوتن بر متر تخمین زده می‌شود.

در مدل‌سازی اتصال صلب رینگ‌ها به یکدیگر، اتصال قطعات سگمنت به یکدیگر به صورت صلب در نظر گرفته می‌شود. شایان ذکر است در مدل‌سازی‌های رایج در مهندسی معمولا این حالت لحاظ می‌شود. اندرکنش قاب فولادی (سازه نگهداری موقت) و قطعات پیش ساخته بتن مسلح به گونه‌ای تعریف شده است که حرکت قاب و سازه تونل نسبت به یکدیگر را در تمامی جهات محدود کند. در این صورت سازه تونل و قاب فولادی به صورت مرکب رفتار خواهند کرد و تلاش‌های ایجاد شده در این المان‌ها نشان دهنده تلاش‌های ایجاد شده در بولت‌های اتصال خواهد بود. سختی این لینک برابر با سختی محوری دو مقطع فولادی به ابعاد ۳۱/۴ میلی‌متر و طول ۲۰۰ میلی‌متر فرض شده که



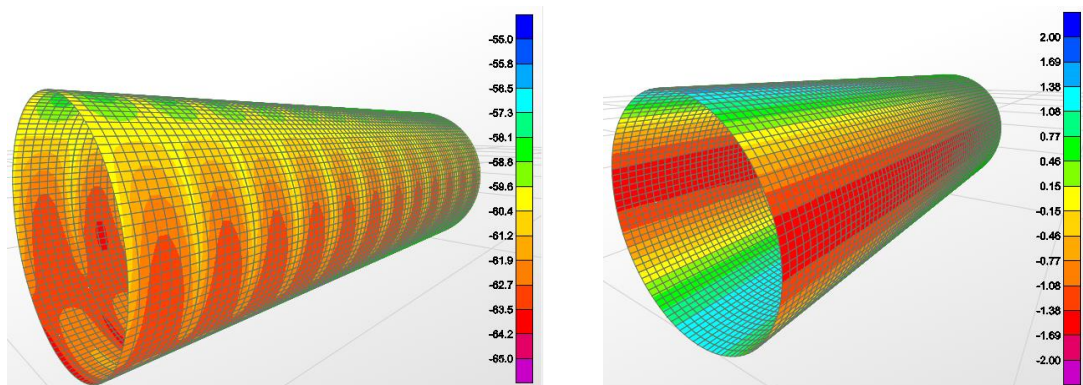
شکل ۷- مدل‌سازی المان‌های اندرکنشی به همراه نمایش بار پسماند فشار جک‌های دستگاه حفار روی رینگ سگمنتال



بالا: بار افقی زمین اعمال شده بر سازه در مرحله اول
پایین: بار افقی زمین اعمال شده بر سازه در مرحله دوم

بالا: بار عمودی زمین اعمال شده بر سازه در مرحله اول
پایین: بار عمودی زمین اعمال شده بر سازه در مرحله دوم

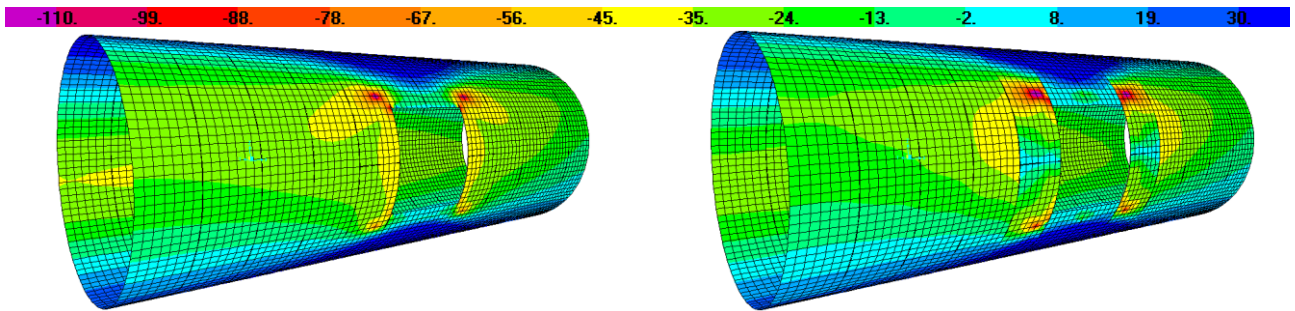
شکل ۸- بارهای افقی و قائم زمین، اعمال شده بر سازه در مراحل مختلف مدل‌سازی سه بعدی (Ton/m^2)



لنگر خمشی در پایان مرحله اول

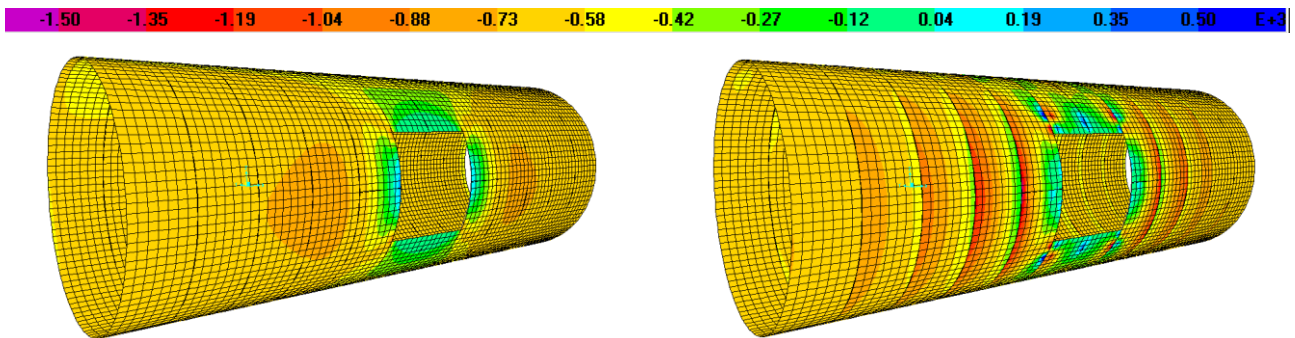
نیروی محوری در پایان مرحله اول

شکل ۹- نیروی محوری و لنگر خمشی در پایان مرحله اول



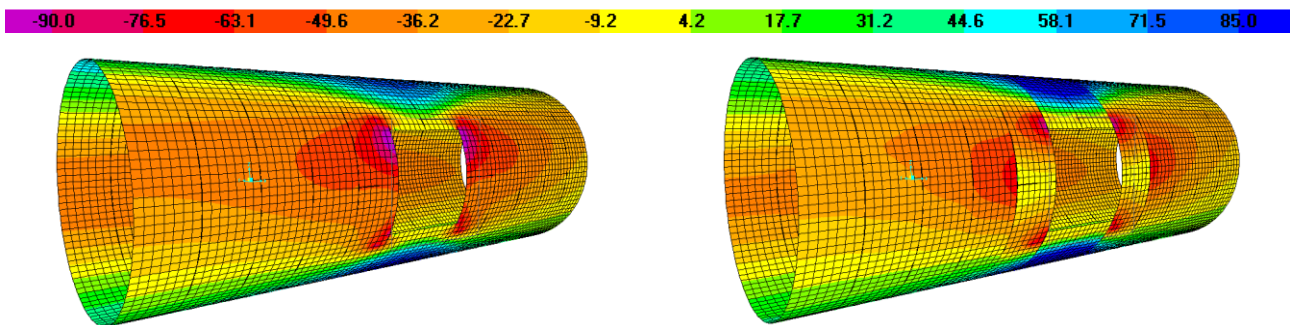
(b) لنگر خمشی ۲-۲ گام دوم

(a) لنگر خمشی ۲-۲ گام دوم



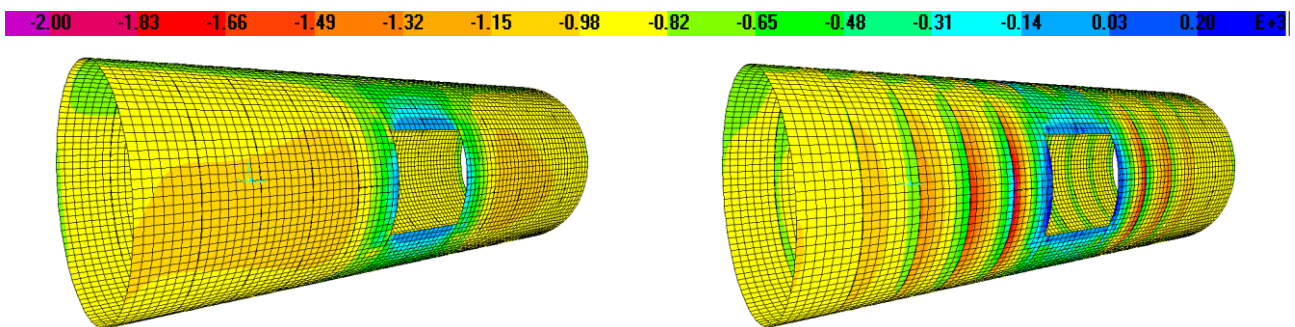
(d) نیروی محوری ۲-۲ گام دوم

(c) نیروی محوری ۲-۲ گام دوم



(f) لنگر خمشی ۲-۲ گام سوم

(e) لنگر خمشی ۲-۲ گام سوم



(h) نیروی محوری ۲-۲ گام سوم

(g) نیروی محوری ۲-۲ گام سوم

شکل ۱۰- سمت راست مدل‌سازی اندرکنش قطعات پیش ساخته، ستون سمت چپ مدل‌سازی اتصال صلب قطعات پیش ساخته

۶-۲- بحث در خصوص اثر مدل‌سازی اندرکنش در توزیع نیروهای داخلی

در شکل ۱۰ a و b ، توزیع لنگر خمشی در مرحله دوم تحلیل نمایش داده شده است. به واسطه مدل‌سازی اثرات اندرکنشی تمرکز لنگر خمشی بیشتری در نواحی گوشه بالایی بازشو ایجاد شده است. همچنین در محل درزه مدل شده در طرفین بازشو، افزایش لنگر خمشی نسبت به مدل صلب مشاهده می‌شود. اثرات ناشی از ایجاد بازشو در افزایش لنگر رینگ‌های جانبی در مدل صلب نسبت به مدل اندرکنشی نیز کمتر بوده است. در شکل ۱۰ c و d ، توزیع نیروی محوری در مرحله دوم تحلیل نمایش داده شده است. در شکل ۱۰ e که اندرکنش رینگ‌ها مدل‌سازی شده است، تمرکز نیروی محوری در محل اتصال رینگ حاوی بازشو با رینگ کناری ایجاد شده است که این بدان معنی است که تنش‌های مماسی بین رینگ بازشو و رینگ مجاور آن می‌تواند بحرانی و کنترل‌کننده بوده و احتمال ترک‌های موضعی در این محل وجود دارد. همچنین تاثیر ایجاد بازشو در شکل ۱۰ f تا چهار رینگ مجاور بازشو مشاهده می‌شود، حال آنکه در شکل ۱۰ d این اثر به سرعت در رینگ کناری محو شده است. اثرات مشابهی در مرحله سوم تحلیل در در شکل ۱۰، قسمت‌های e تا h قابل مشاهده است.

۶-۳- اثر مدل‌سازی اندرکنش در نیروهای داخلی سازه نگهبان

در شکل ۱۱، a و b ، اثر متقابل لنگر خمشی و برش با نیروی محوری قاب نگهبان بتنی نشان داده است. مطابق با روش طراحی بر اساس مقاومت نهایی در سازه‌های بتن مسلح، در حضور نیروی محوری، مقاومت خمشی و برشی متاثر خواهد شد. با افزایش نیروی محور فشاری تا مرز کنترل شونده توسط کشش، مقاومت خمشی افزایش و پس از آن با افزایش نیروی محوری مقاومت خمشی مقطع کاهش پیدا می‌کند. نیروی محوری فشاری طبق رابطه زیر باعث افزایش مقاومت برشی و نیروی محوری کششی باعث کاهش مقاومت برشی می‌شود.

$$V_u = \left(0.17\sqrt{f'_c} + \frac{N_u}{6A_g} \right) b_w d \quad (2)$$

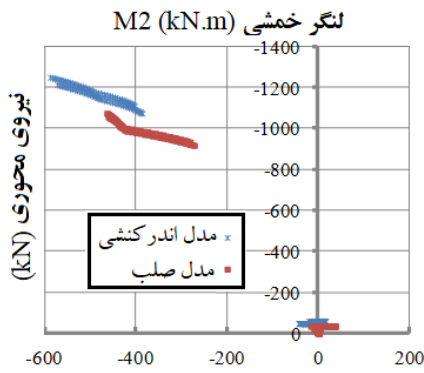
در این رابطه f'_c و N_u به ترتیب مقاومت فشاری بتن سگمنت و نیروی محوری فشاری می‌باشند. d ، A_g و b_w

به ترتیب عرض سگمنت، عمق موثر سگمنت و مساحت کل مقطع سگمنت هستند. V_u معرف ظرفیت برشی سگمنت می‌باشد. طبق رابطه‌ی (۱) با افزایش نیروی محوری ظرفیت برشی افزایش پیدا می‌کند. در شکل ۱۰ a, b با فرض رفتار صلب قطعات پیش ساخته بتنی، به طور همزمان نیروی محوری و لنگر خمشی سازه نگهبان دائم نسبت به حالت مدل‌سازی غیرصلب کاهش پیدا کرده است. از دیدگاه طراحی می‌توان نتیجه گرفت مدل‌سازی صلب اتصالات منجر به کاهش نیروها و در نتیجه مقطع خمشی ضعیف‌تری در سازه نگهبان دائم خواهد شد. در خصوص برش مطابق شکل ۱۱ c, d مدل‌سازی صلب اتصالات منتهی به کاهش نیروی محوری فشاری شده است. در شکل ۱۱ e علاوه بر کاهش نیروی فشاری مقطع، نیروی برشی نیز افزایش یافته است. برخلاف طرح خمشی که با فرض رفتار صلب به ظرفیت سازه ای کمتری نیاز بود، در خصوص نیروی برشی با مدل‌سازی صلب رفتار اتصالات، شرایط بحرانی‌تر شده و نیاز به ظرفیت بیشتری در تحمل نیروی برشی برای سازه نگهبان دائم می‌باشد.

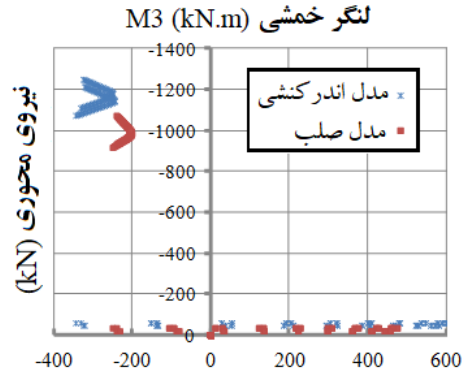
در شکل ۱۱ a مدل‌سازی اتصالات صلب منجر به کاهش مقادیر لنگر مثبت، همزمان با کاهش نیروی محوری شده است. اما نکته مهم در این شکل افزایش لنگر منفی می‌باشد که برای چند نقطه محدود این اتفاق افتاده است. به این منظور بررسی دقیق‌تری بر روی دیاگرام توزیع لنگر خمشی انجام شد. مقادیر کوچک تر از ۱۰۰- کیلونیوتن متر مربوط به ناحیه فوقانی بازشو در رینگ‌های جانبی هستند (شکل ۱۲). در این ناحیه به واسطه مدل‌سازی رفتار صلب اتصالات، درجه نامعینی سازه افزایش یافته و امکان لغزش قطعات پیش‌ساخته و بازتوزیع لنگر ایجاد نشده است. به همین دلیل تمرکز تنش ایجاد شده است. مطابق با اصول تحلیل سازه، در سازه‌های نامعین با افزایش درجه نامعینی، سختی سازه زیاد شده و این موضوع مترادف با افزایش نیروهای داخلی سازه می‌باشد. صرف‌نظر از این تمرکز نیرویی، در سایر نواحی، مدل‌سازی صلب منجر به کاهش ظرفیت مورد نیاز خمشی (محور ۲)- فشاری شده است. در خصوص لنگر $MI-1$ شکل ۱۱ b نیز رفتار مشابه با لنگر $M2-2$ می‌باشد. در شکل ۱۱ c, d مدل‌سازی رفتار صلب متناظر با نیاز به ظرفیت برشی بیشتری در سازه تونل بوده

راستای کاهش نیاز سازه ای بود، در طرح برشی فرض صلبیت در جهت افزایش نیاز سازه‌ای می‌باشد.

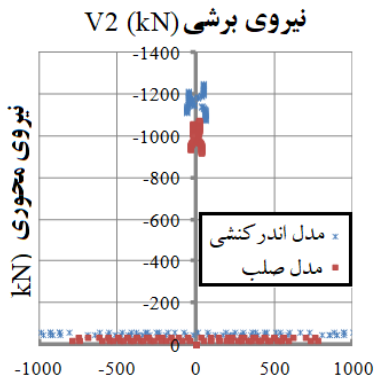
است. به عبارتی بر خلاف طرح خمشی که به غیر از ناحیه محدود بحث شده در پاراگراف قبل، فرض صلبیت در



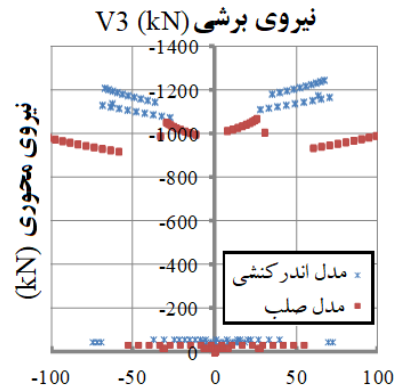
(b) اثر متقابل خمش و نیروی محوری



(a) اثر متقابل خمش و نیروی محوری

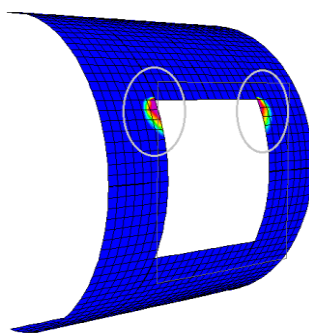


(d) اثر متقابل برش و نیروی محوری

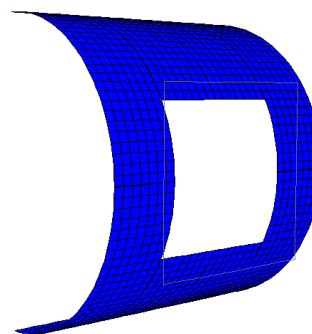


(c) اثر متقابل برش و نیروی محوری

شکل ۱۱- مقادیر نیروهای داخلی سازه نگهبان دائم



(b) مدل صلب

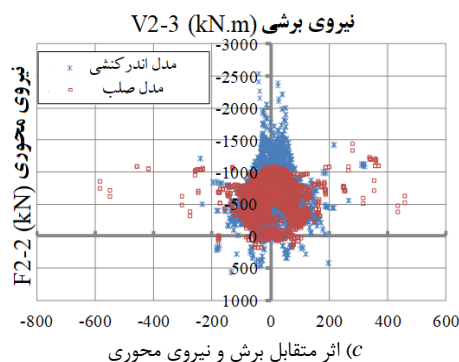
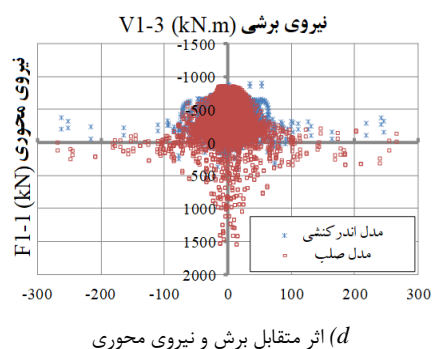
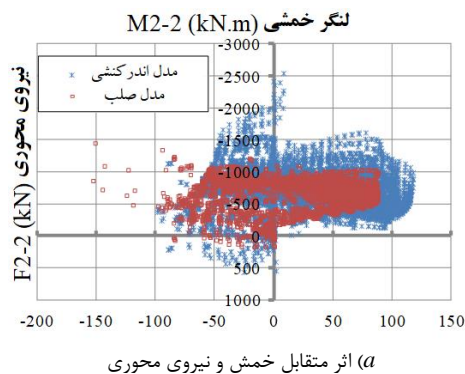
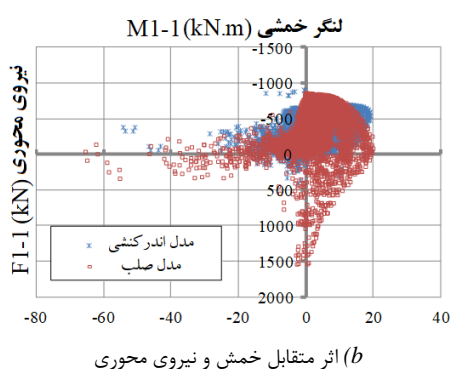


(a) مدل اندرکنشی

شکل ۱۲- تمرکز لنگر ۲ در مرحله سوم تحلیل

پایین سمت چپ در قاب فولادی می‌باشند. از آنجایی که در مدل عددی ارائه شده اتصال قاب به سازه تونل به صورت گره به گره انجام شده است در نتایج برخی قسمت‌ها تمرکز تنش مشاهده می‌شود که ناشی از این اتصال نقطه‌ای می‌باشد و در واقعیت وجود ندارد و لذا از این تمرکزهای موضعی می‌توان صرف‌نظر کرد. مدل‌سازی اندرکنش باعث افزایش لنگر خمشی جهت ۲ (بردار لنگر خمشی ۲ در راستای شعاع تونل می‌باشد) مطابق شکل ۱۳ (a) شده است. لنگر ۲ درون‌حی اتصال قطعات پیش ساخته بتنی در مدل اندرکنشی دچار افزایش موضعی شده است.

در شکل ۱۳، توزیع نیروهای داخلی در سازه نگهدارنده موقت فولادی برای دو حالت مداسازی صلب و مدل‌سازی رفتار اندرکنشی اتصال قطعات پیش ساخته بتنی پوشش تونل نشان داده شده است. در این شکل منظور از Ratio نسبت نتایج مدل اندرکنشی به نتایج مدل صلب می‌باشد که مقادیر آن در محور قائم سمت راست شکل‌ها نمایش داده شده است. در نمای بیرون بازشو، موقعیت مکانی روی قاب فولادی (Location) که با حروف A, B, C و D نام گذاری شده اند به ترتیب مربوط به گوشه بالا سمت چپ، گوشه بالا سمت راست، گوشه پایین سمت راست و گوشه



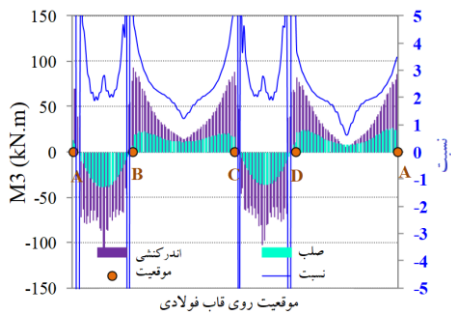
شکل ۱۳- مقادیر نیروهای داخلی لایننگ تونل در محل بازشو و اطراف آن

برای برش جهت ۲ (برش با جهت مماس بر محیط تونل) قابل بحث می‌باشد. در قسمت A تا B در محدوده نزدیک به A از یک طرف و نزدیک به B از طرف دیگر اختلاف قابل ملاحظه‌ای در مقادیر نیروی برشی در جهت ۲ مشاهده می‌شود به طوری که نسبت نیرو فراتر از ۲۰ برابر بوده است. دلیل اصلی این اختلاف قابل ملاحظه، تمایل به لغزش دو رینگ مجاور در مدل اندرکنشی است. از آنجایی که سازه

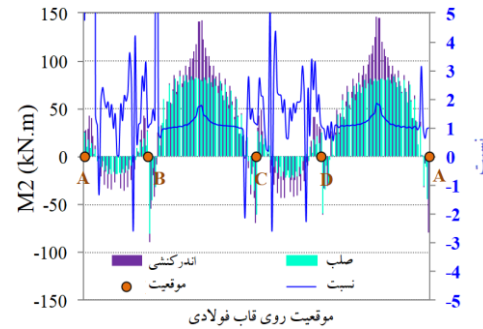
در نواحی دیگر، افزایش لنگر ۲ در مدل اندرکنشی بین ۱/۵ تا ۳ برابر مدل صلب به دست آمده است. مقایسه مقادیر لنگر ۳ (بردار لنگر خمشی ۳ در راستای محور تونل می‌باشد) نشان دهنده تفاوت متوازن‌تر در دو مدل اندرکنشی و صلب می‌باشد (شکل ۱۴ (b)). مقدار لنگر ۳ در مدل اندرکنشی بین ۲ تا ۵ برابر مقدار لنگر در مدل صلب به دست آمده است. موارد مهمی در خصوص شکل ۱۴ (c)

مانع اصلی لغزش نسبی رینگ های مجاور می‌باشد.

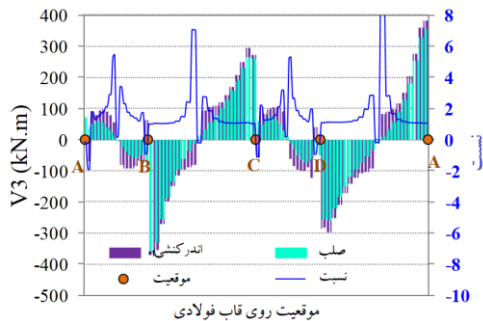
نگهبان فلزی رینگ های مجاور را به هم متصل کرده است



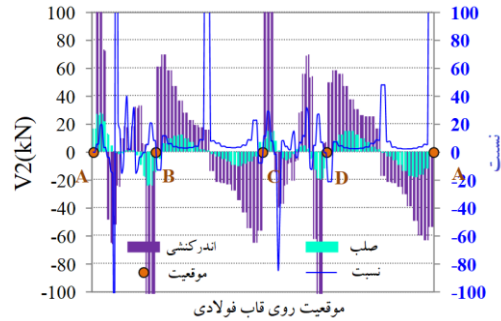
(b) اثر متقابل خمش و نیروی محوری



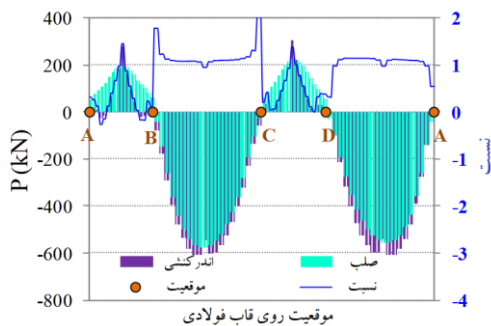
(a) اثر متقابل خمش و نیروی محوری



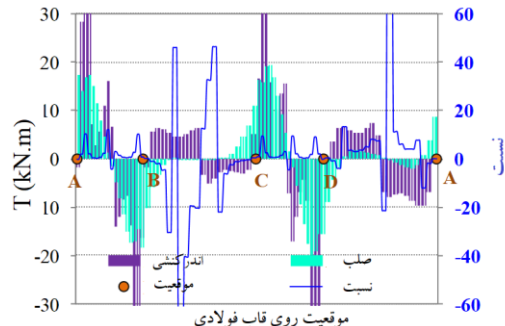
(d) اثر متقابل برش و نیروی محوری



(c) اثر متقابل برش و نیروی محوری



(f) مقادیر نیروی محوری



(e) مقادیر لنگر پیچشی

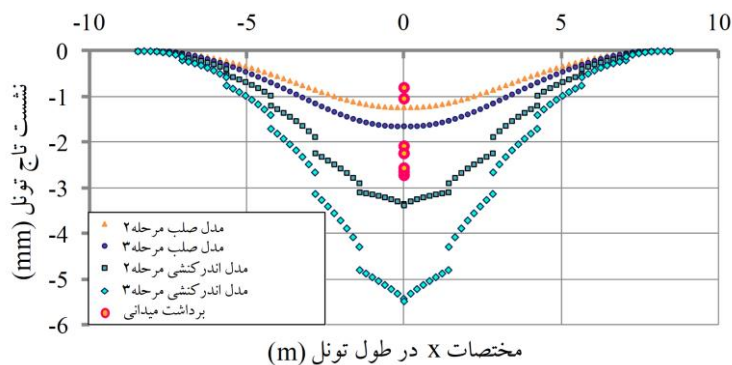
شکل ۱۴- نیروهای داخلی سازه نگهبان موقت

رفتار برشی جهت ۲ است. بر اساس شکل ۱۴ (e) بیشترین تفاوت لنگر پیچشی به میزان بیشتر از ۲۰ برابر مربوط به محدوده میانی BC و DA است (شکل ۱۴ (e)). این رفتار نشان دهنده دوران بیشتر لبه های سازه پوشش در مدل اندرکنشی نسبت به مدل صلب است. در بحث نیروی محوری تفاوت دو مدل قابل ملاحظه نمی‌باشد (شکل ۱۴ (f)).

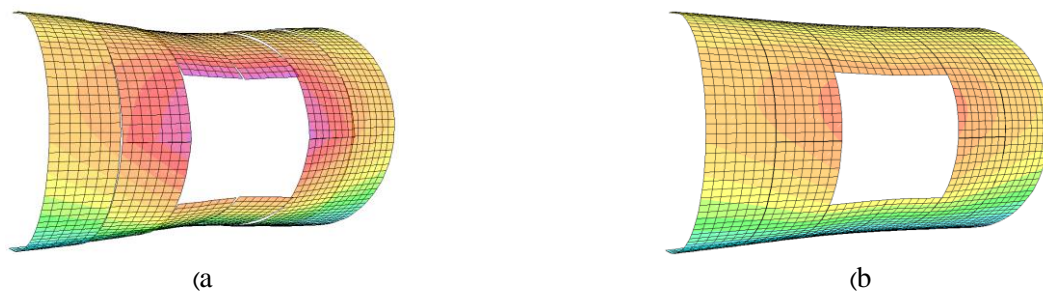
به این ترتیب نیروی برشی قابل ملاحظه‌ای در سازه نگهبان فلزی ایجاد شده است. همچنین به واسطه مدل‌سازی درز انقطاع اتصال قطعات پیش ساخته در طرفین چپ و راست بازشو، اختلاف برش بیش از ۲۰ برابری در وسط قسمت BC و DA ایجاد شده است. بیشترین اختلاف برش در جهت ۳ (شکل ۱۴ (d)) مربوط به میانه قسمت BC و DA می‌باشد که از این جهت رفتار برشی جهت ۳ مشابه

مکان‌های میدانی (۲/۸ میلی‌متر) از تغییر مکان‌های حاصل از مدل صلب در مرحله ۳ (۱/۶ میلی‌متر) به میزان ۷۵ درصد بزرگ‌تر بوده‌اند. همچنین کمترین مقدار تغییر مکان‌های میدانی (۰/۸ میلی‌متر) از تغییر مکان‌های حاصل از مدل صلب در مرحله ۲ (۱/۳ میلی‌متر) به میزان ۳۸ درصد کوچک‌تر بوده است. در مقایسه‌ی نتایج نشست‌های واقعی با نتایج مدل غیرصلب مشاهده می‌شود که بیشترین مقدار تغییر مکان‌های میدانی (۲/۸ میلی‌متر) از تغییر مکان‌های حاصل از مدل غیر صلب در مرحله‌ی ۲ و ۳ به ترتیب ۱۶ و ۴۹ درصد کوچک‌تر بوده است. در ایزارنگاری انجام شده اطلاعات دیگری مانند تنش‌ها یا کرنش‌های واقعی رخ داده، اندازه‌گیری نشده و در دسترس نیست. اگر چه مقادیر تغییر مکان‌ها ۴۹ درصد از نتایج حاصل از مدل غیر صلب کمتر بوده است اما نتایج نشان می‌دهد مدل سازی صلب در خصوص نتایج تغییر مکانی در خلاف جهت اطمینان بوده و منجر به برآورد دست پایین تغییر مکان‌ها به میزان ۷۵ درصد نسبت به آنچه در واقعیت اتفاق افتاده است، می‌شود. تغییر شکل‌ها در دو حالت با و بدون مدل سازی اثرات پازلی سگمنت‌ها، در شکل ۱۶، مقایسه شده‌اند.

در حین اجرای سازه بازشو در تونل از نقشه برداری به روش *Geodetic* به منظور اندازه‌گیری تغییر مکان نواحی اطراف بازشو استفاده شده است. جهت همگرایی سنجی دیواره و تاج تونل و ثبت حرکات آن متناسب با اجرای بازشو، از پنج مارک‌ها و نقاط ترازبایی به کمک وسایل دقیق نقشه‌برداری استفاده شده است. در این موارد ضمن نصب پین‌های مرجع در محل مناسب و قرائت متناوب آنها به کمک دوربین‌های دقیق الکترونیکی، از هرگونه حرکت جداره تونل اطلاع حاصل شده است. پس از پردازش نتایج برداشت‌های میدانی، تغییر مکان‌های خالص تاج تونل در موقعیت وسط بازشو به این شرح ثبت شده است: ۰/۸، ۱/۱، ۲/۲، ۲/۳۵، ۲/۵۵، ۲/۷، ۲/۷ و ۲/۸ میلی‌متر. شکل ۱۵، نتایج مدل‌سازی عددی را در کنار برداشت‌های میدانی نشان می‌دهد. هدف از انجام برداشت‌های میدانی پایش سلامت سازه تونل در حین اجرای بازشو بوده است و متأسفانه اطلاعات زمانی برداشت‌ها نسبت به سکنس‌های اجرای بازشو ثبت نشده است. به عبارتی مشخص نیست تغییر مکان‌های ثبت شده مربوط به چه مرحله‌ای از اجرا هستند. همان‌طور که مشاهده می‌شود بیشترین مقدار تغییر



شکل ۱۵- مقایسه نتایج برداشت میدانی و مدل سازی



شکل ۱۶- مقایسه تغییر شکل دو حالت با و بدون مدل سازی اثرات پازلی سگمنت‌ها

۷- نتیجه‌گیری

از دیدگاه طراحی می‌توان نتیجه گرفت مدل‌سازی صلب اتصالات منجر به کاهش میانگین ۲۰ درصدی لنگرها و در نتیجه مقطع خمشی ضعیف‌تری در سازه نگهدارنده خواهد شد. به این ترتیب مدل‌سازی اتصالات صلب برای طراحی خمشی سازه نگهدارنده در محل بازشوها در تونل‌های سگمنتی در خلاف جهت اطمینان می‌باشد. در خصوص نیروی برشی، با مدل‌سازی صلب رفتار اتصالات، شرایط بحرانی‌تر شده و نیاز به ۲۷/۶ درصد ظرفیت بیشتری در تحمل نیروی برشی سازه نگهدارنده می‌باشد. به این ترتیب می‌توان گفت اثر مدل‌سازی رفتار صلب اتصالات و درزه‌های سگمنتی در طراحی برشی سازه نگهدارنده محافظه کارانه‌تر می‌باشد.

با مدل‌سازی اندرکنش رینگ‌ها، تمرکز ۱/۶ برابری نیروی محوری در محل اتصال رینگ حاوی بازشو با رینگ کناری ایجاد شده است که این بدان معنی است که تنش‌های مماسی بین رینگ بازشو و رینگ مجاور آن می‌تواند بحرانی و کنترل‌کننده بوده و احتمال ترک‌های موضعی در این محل وجود دارد که این مهم در مدل‌سازی صلب درزه‌ها دیده نمی‌شود.

۸- مراجع

- ACI Committee. (2019). ACI 318-19: Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary. *American Concrete Institute: Farmington Hills, MI, USA*.
- Arnau, O., & Molins, C. (2012). Three dimensional structural response of segmental tunnel linings. *Engineering structures*, 44, 210-221.
- Arnau, O., & Molins, C. (2015). Theoretical and numerical analysis of the three-dimensional response of segmental tunnel linings subjected to localized loads. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 49, 384-399.
- Caratelli, A., Meda, A., Rinaldi, Z., Giuliani-Leonardi, S., & Renault, F. (2018). On the behavior of radial joints in segmental tunnel linings. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 71, 180-192. doi:10.1016/j.tust.2017.08.022
- Ebrahimi, S., Hadei, M. R., Rashidell, A., & Hajihassani, M. (2020). Numerical investigation of innovative support frame of openings in the segmental tunnel lining. *Open Construction and Building Technology Journal*, 14(1), 358-369. doi:10.2174/1874836802014010358
- Horioka, Y., Ishihara, M., & Otsuka, I. (2019). Design and construction method of reinforcement around the lining concrete openings due to construction of additional evacuation tunnels in service. Paper presented at the *Tunnels and Underground Cities: Engineering and Innovation Meet Archaeology*,

در برخی نواحی، مانند ناحیه گوشه‌های بازشو، به واسطه مدل‌سازی رفتار صلب اتصالات، درجه نامعینی سازه افزایش یافته و امکان لغزش ۴۳ میلی‌متری قطعات پیش‌ساخته و بازتوزیع لنگر ایجاد نشده است. به همین دلیل در مدل‌سازی رفتار صلب تمرکز تنش کاذب ایجاد و مشاهده شده است. از آنجایی که سازه نگهدارنده فلزی عامل اصلی در نگهداری و دوخت سگمنت‌ها به یکدیگر می‌باشد، مقادیر برش ایجاد شده در آن بسیار بزرگ‌تر از مدل صلب بوده (۲/۳۳ برابر) و در این خصوص مدل صلب درخلاف جهت اطمینان عمل کرده است. در مقایسه با مقادیر نشست میدانی اگر چه مقادیر تغییرمکان‌ها ۴۹ درصد از نتایج حاصل از مدل غیر صلب کمتر بوده است اما نتایج نشان می‌دهد مدل‌سازی صلب در خصوص نتایج تغییرمکانی در خلاف جهت اطمینان بوده و منجر به برآورد دست پایین تغییر مکان‌ها به میزان ۷۵ درصد نسبت به آنچه در واقعیت اتفاق افتاده است، می‌شود. از آنجایی که نتایج تحقیق حاضر محدود به یک مطالعه ی موردی بوده است برای تعمیم نتایج آن نیاز تحقیقاتی جامع تری برای پوشش حالت‌های مختلف وجود دارد.

Architecture and Art- Proceedings of the WTC 2019 ITA-AITES World Tunnel Congress, 5675-5684. doi:10.1201/9780429424441-600 Retrieved from www.scopus.com

- JSCE (Japan Society of Civil Engineers). (2016). *Standard Specifications for Tunneling–2016: Shield Tunnels*. Tokyo, Japan: Japan Society of Civil Engineers.
- Krahl, P. A., Palomo, I. I., Almeida, S. J. D. C., Henrique Siqueira, G., Pinto Júnior, N. D. O., & Vieira Junior, L. C. M. (2021). Tolerances for TBM thrust load based on crack opening performance of fiber-reinforced precast tunnel segments. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 111 doi:10.1016/j.tust.2021.103847
- Kuesel, T. R., King, E. H., & Bickel, J. O. (2012). *Tunnel engineering handbook*. Springer Science & Business Media.
- Li, X., Yan, Z., Wang, Z., & Zhu, H. (2015). Experimental and analytical study on longitudinal joint opening of concrete segmental lining. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 46, 52-63. doi:10.1016/j.tust.2014.11.002
- Liu, Y., Huang, H., & Zhang, D. (2011). *Influence of segment design of shield tunnel on the magnitude of joint opening* doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.160-162.698 Retrieved from www.scopus.com
- National Highway Institute (US), Parsons, Brinckerhoff, & Quade & Douglas. (2010). *Technical manual for design and construction of road tunnels--civil elements*. AASHTO.
- Spyridis, P., & Bergmeister, K. (2015). Analysis of lateral openings in tunnel linings. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 50, 376-395. doi:10.1016/j.tust.2015.08.005
- Wang, J., Liu, H., & Liu, H. (2018). Measuring joint opening displacement between model shield-tunnel segments for reduced-scale model tests. *Structures*, 16, 112-118. doi:10.1016/j.istruc.2018.09.003
- Wittke, W., Erichsen, C., & Gattermann, J. (2007). Stability analysis and design for mechanized tunnelling. *Geotechnical Engineering in Research and Practice*, 581.
- Zhang, Y., Huang, H., Zhang, D., & Ayyub, B. M. (2022). Deformation recoverability of longitudinal joints in segmental tunnel linings: An experimental study. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 124 doi:10.1016/j.tust.2022.104475

Three-dimensional non-linear staged construction modeling of the opening structure considering the interaction of the precast reinforced concrete of the tunnel lining

¹M. Jalali

1- Assistant Professor; Civil engineering Department, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran.

Received: 17 Apr 2022; Accepted: 26 Oct 2022

DOI: 10.22044/tuse.2022.11811.1450

Keywords

Segmental tunnel
Tunnel opening
Staged construction modeling
Tunnel boring machine (TBM)
Nonlinear 3D modeling
Reinforced concrete

Extended Abstract

Summary

In engineering applications, in order to model the opening structure in segmental tunnels (precast concrete parts of the tunnel lining), the interaction of the segments is not considered and the tunnel structure is usually modeled in an integrated manner. The possibility of slipping of segment parts in the range of openings may affect the stress distribution in the structure. However,

the extent of this impact is unclear and comprehensive information is not available.

Introduction

Nowadays, tunnels, as one of the most important underground structures, are constructed as a result of increasing demand of transportation industry. For modeling the opening structure in segmental tunnels (precast concrete parts of the tunnel lining), the interaction of the segments is normally not considered and the tunnel structure is usually modeled in an integrated manner. For this purpose, three-dimensional (3D) non-linear staged construction modeling of the opening structure considering the interaction of the precast reinforced concrete of the tunnel lining is made, and the results are discussed in this paper.

Methodology and Approaches

In the current research, with the aim of modeling the interaction of prefabricated parts at the opening in segmental tunnels, a non-linear 3D modeling tool has been used. Considering that in reality, the opening is implemented step by step in the proposed modeling method, the effects of step modeling are also taken into consideration. The results of integrated behavior modeling have been critically examined in comparison with interactive behavior modeling in three parts: segment behavior, temporary guard structure behavior, and permanent guard structure behavior.

Results and Conclusions

The results of the research show that the current trend in the engineering modeling of the opening in the segmental tunnel will lead to results contrary to the confidence in the shear design. Moreover, rigid modeling of segmental joints leads to the observation of false stress concentration areas in the segments that may lead to reinforcement plans in unnecessary areas.
