

Effect of Polypropylene Fibers on the Seismic Performance of Longitudinal Joints in Segmental Tunnel Linings

Ata Hojat Kashani^{1*}, Mehdi Shalchi Tousi², Payam Tarighi^{2*}

1. Department of Civil Engineering, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

2. Department of Civil Engineering, Ahlul Bayt International University, Tehran, Iran.

a_hojatkashani@iaui.ac.ir

Received: 05 October 2025 Revised: 03 December 2025 Accepted: 14 February 2026

Research paper

Abstract

This study examines the effect of polypropylene fibers on the seismic performance of longitudinal joints in segmental tunnel linings. Tunnels, as vital components of urban infrastructure, are highly vulnerable to seismic hazards, and weaknesses in joint regions can compromise overall stability. In this research, the fiber-reinforced concrete behavior model was validated using experimental data, and nonlinear time-history analyses were conducted to evaluate the seismic response of the lining under multiple earthquake records. Three volumetric ratios of polypropylene fibers (0.7%, 1%, and 1.5%) were considered, and the longitudinal joint behavior was assessed in terms of stress, displacement, and moment-axial force interactions. The results revealed that the inclusion of 1.5% polypropylene fibers significantly enhances normal and shear strength, reduces critical displacements, and improves structural ductility. Moreover, the numerical findings showed good agreement with both the analytical relations provided by the ACI code and validated experimental data, confirming the reliability of the model. Overall, incorporating 1.5% polypropylene fibers can be proposed as a practical solution for improving the seismic safety and durability of segmental tunnel linings in earthquake-prone regions.

Keywords: structure of tunnel, segment cover, dynamic loads, fibers, tunnel lining, concrete damage model.

*Corresponding Author: Ata Hojat Kashani

Hojat Kashani A., Shalchi Tousi M., Tarighi P. Effect of Polypropylene Fibers on the Seismic Performance of Longitudinal Joints in Segmental Tunnel Linings. J. Concr. Struct. Mater., 2026; 10(1): 22-52.

<http://doi.org/10.30478/jcsm.2026.550737.1403>

2538-5828/ © 2026 The Authors. Published by Iranian Concrete Society

This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

تأثیر الیاف پلی پروپیلن بر عملکرد لرزه‌ای درزه‌های طولی در تأثیر الیاف پلی پروپیلن بر عملکرد لرزه‌ای درزه‌های طولی در پوشش سگمنتال تونل

عطا حجت کاشانی^{۱*}، مهدی شالچی طوسی^۲، پیام طریقی^۲

۱. استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، ایران.

۲. استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین المللی اهل بیت (ع)، ایران.

* پست الکترونیکی نویسنده مسئول: a_hojatkashani@iaui.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۷/۱۳، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۹/۱۲، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۱/۲۵

نوع مقاله: پژوهشی

چکیده

این پژوهش به بررسی تأثیر الیاف پلی پروپیلن بر عملکرد لرزه‌ای درزه‌های طولی پوشش سگمنتال تونل‌ها پرداخته است. تونل‌ها به عنوان زیرساخت‌های حیاتی شهری در معرض خطرات لرزه‌ای قرار دارند و ضعف در نواحی درزه می‌تواند پایداری کلی سازه را تحت تأثیر قرار دهد. در این مطالعه، مدل رفتاری بتن مسلح به الیاف بر پایه داده‌های آزمایشگاهی معتبرسازی شد و سپس رفتار پوشش سگمنتال تحت رکوردهای مختلف زلزله از طریق تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی ارزیابی گردید. به منظور بررسی اثر میزان الیاف، سه نسبت حجمی مختلف شامل ۰/۷، ۱ و ۱/۵ درصد برای الیاف پلی پروپیلن در مدل‌سازی در نظر گرفته شده و پاسخ لرزه‌ای درزه‌های طولی بر اساس پارامترهای تنش، جابجایی و منحنی‌های لنگر-نیرو تحلیل شده است. نتایج نشان داد که افزودن الیاف پلی پروپیلن، به‌ویژه در نسبت حجمی ۱/۵ درصد، موجب بهبود قابل توجه مقاومت نرمال و برشی در درزه‌ها، کاهش جابجایی‌های بحرانی و افزایش شکل‌پذیری سازه گردیده است. همچنین، مقایسه نتایج عددی با روابط تحلیلی آیین‌نامه ACI و داده‌های آزمایشگاهی معتبر، انطباق قابل قبولی را نشان داده و اعتبار نتایج را تأیید کرده است. در مجموع، استفاده از ۱/۵ درصد الیاف پلی پروپیلن می‌تواند به عنوان راهکاری عملی برای افزایش ایمنی و پایداری تونل‌های سگمنتال در مناطق لرزه‌خیز پیشنهاد گردد.

واژه‌های کلیدی: سازه تونل، پوشش سگمنتال، بارهای دینامیکی، الیاف، پوشش تونل، مدل آسیب بتن.

تونل‌ها به عنوان زیرساخت‌های حیاتی در شبکه‌های شهری، نقشی اساسی در سامانه‌های حمل‌ونقل، انتقال آب و تاسیسات زیرزمینی دارند. با این حال، تجربه زلزله‌های بزرگ در دهه‌های اخیر نشان داده است که این سازه‌ها در برابر بارهای دینامیکی زمین‌لرزه مصون نبوده و درزه‌ها و اتصالات بین سگمنت‌های پوشش، از آسیب‌پذیرترین بخش‌های آن محسوب می‌شوند. تا پیش از دهه ۱۹۹۰، طراحی تونل‌ها عمدتاً بر اساس بارهای استاتیکی صورت می‌گرفت و رفتار لرزه‌ای آن‌ها چندان مورد توجه نبود. وقوع زمین‌لرزه‌های شدیدی همچون زلزله کوبه در ژاپن (۱۹۹۵)، چی‌چی در تایوان (۱۹۹۹) و دوزجه در ترکیه (۱۹۹۹) موجب بازنگری اساسی در روش‌های طراحی و تحلیل لرزه‌ای تونل‌ها گردید [۵-۱]. پس از این رویدادها، محققانی چون Hashash و همکاران (۲۰۰۱، ۲۰۱۴) چارچوبی برای تحلیل لرزه‌ای سازه‌های زیرزمینی ارائه کردند و بر لزوم بررسی شکل‌پذیری و ظرفیت جذب انرژی پوشش، تونل‌ها تأکید نمودند [۷-۶].

هم‌زمان با تحول در مبانی تحلیل و طراحی لرزه‌ای، توسعه مصالح نوین به‌ویژه بتن‌های تقویت‌شده با الیاف (Fiber-Reinforced Concrete – FRC) توجه بسیاری از پژوهشگران را جلب کرد. بتن معمولی با وجود مقاومت فشاری بالا، در کشش عملکرد ضعیفی دارد و در برابر ترک‌خوردگی شکننده است؛ در نتیجه، افزودن الیاف کوتاه به مخلوط بتن به‌عنوان روشی مؤثر برای افزایش چقرمگی، شکل‌پذیری و ظرفیت جذب انرژی معرفی شد. تحقیقات اولیه در قرن بیستم عمدتاً بر الیاف فولادی متمرکز بود [۸-۱۰]، اما به تدریج الیاف شیشه‌ای، کربنی و مصنوعی نیز مورد توجه قرار گرفتند و تأثیر نوع، طول، قطر و درصد حجمی الیاف بر رفتار مکانیکی بتن بررسی گردید [۱۵-۱۱].

در سال‌های اخیر، استفاده از بتن‌های مسلح به الیاف مصنوعی به‌ویژه پلی‌پروپیلن (Polypropylene Fiber Reinforced Concrete – PFRC) به عنوان راهکاری کارآمد برای بهبود عملکرد لرزه‌ای سازه‌های زیرزمینی مطرح شده است. پلی‌پروپیلن به دلیل چگالی پایین، مقاومت بالا در برابر خوردگی و توانایی کنترل ریزترک‌ها، گزینه‌ای مناسب برای استفاده در محیط‌های مرطوب و مهاجم تونلی است. مطالعات آزمایشگاهی و عددی متعددی نشان داده‌اند که افزودن الیاف پلی‌پروپیلن می‌تواند موجب کاهش تمرکز تنش، کنترل توسعه ترک و بهبود ظرفیت جذب انرژی در درزه‌های طولی پوشش سگمنتال گردد [۱۹-۱۶]. همچنین، پژوهش‌هایی مانند تحقیقات Conforti و همکاران (۲۰۱۷) و Guo و همکاران (۲۰۲۴) نشان داده‌اند که به‌کارگیری PFRC نه‌تنها مقاومت برشی و نرمال در اتصالات سگمنت‌ها را افزایش می‌دهد، بلکه توزیع تنش را یکنواخت‌تر کرده و رفتار کلی پوشش را در برابر زلزله بهبود می‌بخشد [۲۱-۲۰].

در عین حال، با وجود شواهد متعدد درباره مزایای استفاده از الیاف پلی پروپیلن، هنوز روابط طراحی اختصاصی برای ارزیابی عملکرد لرزه‌ای درزه‌های سگمنتال تدوین نشده و درصد حجمی بهینه الیاف با توجه به نوع بارگذاری و هندسه درزه‌ها به‌طور دقیق مشخص نیست. بررسی‌های جدید، از جمله پژوهش‌های Linjie و همکاران و Wang و همکاران، بر لزوم مطالعات عددی و آزمایشگاهی ترکیبی برای تعیین رفتار واقعی درزه‌ها و مقایسه با آیین‌نامه‌های طراحی نظیر ACI 544.7R-16 تأکید دارند [۲۳-۲۲].

بررسی ادبیات نشان می‌دهد که اگرچه مطالعات مختلفی به بررسی رفتار لرزه‌ای تونل‌ها و تأثیر الیاف مصنوعی از جمله پلی‌پروپیلن پرداخته‌اند [۲۱-۱۶]، اما این تحقیقات عمدتاً بر رفتار کلی پوشش یا آزمایش‌های مقیاس کوچک متمرکز بوده و رفتار درزه‌های طولی سگمنت‌ها، به‌ویژه تحت تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی سه‌بعدی، کمتر به‌صورت دقیق بررسی شده است. در پژوهش‌هایی مانند An et al. [۱۷]، Xin et al. [۱۶] و Guo et al. [۱۸] اگرچه نقش PFRC مطالعه شده، اما تنش‌های نرمال و برشی، مکانیزم باز- بسته‌شدن درزه‌ها، و اثر درصدهای مختلف الیاف بر رفتار موضعی اتصال سگمنت‌ها در مدل‌سازی لحاظ نشده است.

همچنین اغلب مطالعات از مدل‌های ساده‌شده یا دوبعدی استفاده کرده و از ظرفیت مدل رفتاری-Concrete Damage Plasticity برای شبیه‌سازی واقع‌بینانه بتن الیافی بهره نبرده‌اند.

بر همین اساس، یک خلأ مهم پژوهشی در ادبیات وجود دارد و آن، نبود تحلیل جامع رفتار لرزه‌ای درزه‌های طولی با مدل معتبرسازی‌شده بتن الیافی و ارزیابی تنش‌ها، جابجایی‌ها و ظرفیت لنگر _ نیرو تحت رکوردهای واقعی زلزله است. پژوهش حاضر برای رفع این خلأ، از مدل رفتاری معتبرسازی‌شده PFRC بر اساس داده‌های آزمایشگاهی [۲۱]، تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی سه‌بعدی و مقایسه نتایج با روابط ACI 544.7R-16 استفاده کرده و تأثیر درصدهای مختلف الیاف پلی‌پروپیلن را بر پاسخ لرزه‌ای درزه‌ها ارزیابی می‌کند. این رویکرد امکان شناسایی درصد بهینه الیاف پلی‌پروپیلن و درک دقیق‌تر از عملکرد لرزه‌ای اتصالات سگمنت‌ها را فراهم می‌سازد.

در این مطالعه، به منظور بررسی عملکرد لرزه‌ای درزه‌های طولی در پوشش سگمنتال تونل، ابتدا مدل رفتاری بتن مسلح به الیاف پلی‌پروپیلن بر اساس داده‌های آزمایشگاهی معتبرسازی شده و سپس با بهره‌گیری از نرم‌افزار ABAQUS تحلیل عددی تاریخچه زمانی غیرخطی بر روی تونل انتقال آب سد امیرکبیر انجام گرفته است. با در نظر گرفتن درصدهای مختلف حجمی الیاف، تأثیر آن‌ها بر پارامترهای تنش و جابجایی در محل درزه‌ها تحت بارگذاری‌های لرزه‌ای ارزیابی شده و همچنین به کمک روابط تحلیلی آیین‌نامه ACI، نمودارهای لنگر-نیرو برای درزه‌های بحرانی استخراج و تحلیل گردیده است. هدف اصلی این مطالعه تعیین درصد بهینه الیاف پلی‌پروپیلن برای ارتقای ظرفیت جذب انرژی، افزایش پایداری و بهبود عملکرد لرزه‌ای پوشش سگمنتال تونل در مناطق زلزله‌خیز می‌باشد. تمایز اصلی این تحقیق نسبت به مطالعات پیشین در تمرکز بر تحلیل لرزه‌ای درزه‌های طولی پوشش سگمنتال تونل با استفاده از مدل رفتاری معتبرسازی‌شده بتن مسلح به الیاف پلی‌پروپیلن است؛ موضوعی که تاکنون به صورت عددی و بر پایه تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی کمتر بررسی شده است. این پژوهش علاوه بر ارائه بینش جدید در خصوص توزیع تنش و جابجایی در درزه‌ها، یک درصد بهینه از الیاف پلی‌پروپیلن (۱/۵٪) را برای دستیابی به عملکرد لرزه‌ای مطلوب شناسایی کرده است. از دیدگاه کاربردی، نتایج حاصل می‌تواند به عنوان مبنای طراحی و مقاوم‌سازی پوشش سگمنتال تونل‌ها در مناطق زلزله‌خیز مورد استفاده مهندسان طراح و مشاوران پروژه‌های زیرزمینی قرار گیرد.

۲- انواع بتن الیافی

بر اساس مباحث مطرح‌شده در چهارمین کارگاه بین‌المللی بتن الیافی در سال ۱۹۹۰، پیشنهاد شد که بتن‌های الیافی بر مبنای پاسخ کششی آن‌ها به دو دسته «دارای سخت‌شدگی کششی» و «دارای نرم‌شدگی کششی» تقسیم شوند. تفاوت اساسی میان این دو رفتار در نحوه‌ی ایجاد و گسترش ترک‌ها نهفته است؛ به‌طوری‌که در بتن با رفتار نرم‌شدگی کششی، ترک‌های منفرد تشکیل شده و به تدریج رشد می‌کنند، در حالی که در بتن با رفتار سخت‌شدگی کششی، مجموعه‌های از ریزترک‌های موازی به‌طور هم‌زمان ایجاد می‌شوند. این تفاوت بنیادی در مکانیزم ترک‌خوردگی، پیامدهای قابل‌توجهی بر دوام، شکل‌پذیری و ظرفیت باربری اعضای سازه‌ای خواهد داشت [۲۴].

یکی دیگر از روش‌های بخش‌بندی بتن‌های الیافی، مشخص کردن آن‌ها بر اساس میزان الیاف داخل آن‌هاست. نسبت حجمی الیاف؛ یعنی حجم الیاف استفاده شده در بتن به کل حجم ترکیب. به خاطر تفاوت در وزن مخصوص الیاف، بدیهی است که دو نوع الیاف مختلف با نسبت حجمی‌های یکسان لزوماً نسبت جرمی یکسانی نخواهند داشت.

یکی از روش‌های متداول در طبقه‌بندی بتن‌های الیافی، تفکیک آن‌ها بر اساس میزان الیاف به کاررفته در ترکیب بتن است. نسبت

حجمی الیاف، بیانگر نسبت حجم الیاف مصرفی به کل حجم مخلوط بتن می‌باشد. با توجه به تفاوت چگالی (وزن مخصوص) انواع الیاف، بدیهی است که دو نوع الیاف با نسبت‌های حجمی یکسان، لزوماً دارای نسبت‌های جرمی یکسان نخواهند بود. به‌طور معمول، الیاف به صورت وزنی خریداری و تأمین می‌شوند، اما ویژگی‌های مکانیکی بتن الیافی بر اساس نسبت حجمی الیاف ارزیابی می‌گردد. به عنوان مثال، یک درصد حجمی الیاف فولادی در بتن معمولی معادل حدود ۱۱ کیلوگرم الیاف در هر مترمکعب بتن است، در حالی که همین درصد حجمی از الیاف پلی‌پروپیلن تن‌ها حدود ۲/۳ کیلوگرم بر مترمکعب را شامل می‌شود [۲۵].

۳- طراحی درزه بین سگمنت در تونل‌ها

در روش‌های آنالیز تونل فرض می‌شود که مقطع پوشش تونل پیوسته است. هنگامی که تونل با ماشین‌های تونلسازی (TBM) حفر می‌شود، پوشش تونل معمولاً به شکل سگمنت نصب می‌گردد. این سگمنت‌ها معمولاً با بولت به یکدیگر متصل می‌شوند. درزه بین سگمنت‌ها باید به گونه‌ای طراحی شود که تغییرشکل‌های پیش‌بینی شده زمین را در خود جای دهد. طراح ممکن است که درزه بین دو سگمنت را به طور الاستیک فرض نماید و یا اگر رفتار غیرالاستیک با جزئیات بیشتر پیش‌بینی شود، باید اندرکنش بین زمین و پوشش در نظر گرفته شود [۲۶].

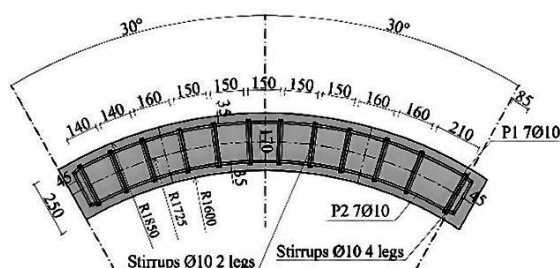
در سال ۲۰۱۷، Conforti و همکارانش [۲۱] بر روی تاثیر الیاف بر بتن به صورت آزمایشگاهی تحقیق کردند. در آن مقاله از نتایج این تحقیق آزمایشگاهی برای صحت‌سنجی مدل رفتاری مورد استفاده بهره گرفته شده است. پروژه مورد بررسی برای صحت‌سنجی در ناحیه Monte Liro در کشور پاناما واقع شده که با استفاده از روش TBM حفاری شده است. مشخصات این تونل به شرح جدول ۱ می‌باشد. همچنین نحوه آرماتوربندی سگمنت‌های این تونل در شکل ۱ نمایش داده شده است.

جدول ۱- مشخصات سگمنت‌های تونل مورد مطالعه برای صحت‌سنجی [۲۱]

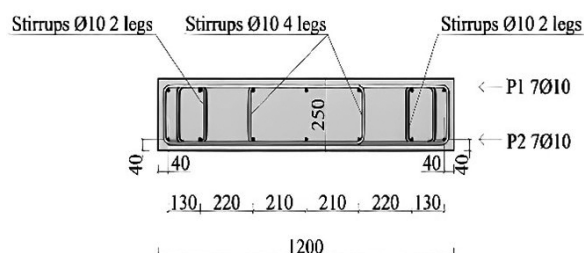
پارامتر	واحد	مقدار
طول کلی تونل	Km	۷/۸۸
قطر داخلی سگمنت	Mm	۳۲۰۰
ضخامت سگمنت	Mm	۲۵۰
قطر خارجی سگمنت	Mm	۳۷۰۰
عمق سگمنت	Mm	۱۲۰۰
تعداد سگمنت اصلی در هر رینگ	عدد	۴
تعداد سگمنت کلید در هر رینگ	عدد	۲

Section A-A

[mm]

**Section B-B**

[mm]



شکل ۱- نحوه آرماتوربندی یک قطعه سگمنت تونل Monte Liro [۲۱]

در جدول ۲ ویژگی‌های الیاف پلی پروپیلن مصرفی در پروژه آورده شده است. مقاومت‌های تسلیم و نهایی برای میلگرد نمره ۱۰ طبق استاندارد Eurocode2 [۲۷] به ترتیب ۴۷۵ و ۵۷۲ مگاپاسکال در نظر گرفته شده است [۲۱].

جدول ۲- ویژگی‌های الیاف مصرفی در تونل Monte Liro [۲۱]

ویژگی	واحد	مقدار
طول		۵۴/۰۰
	mm	
قطر	mm	۰/۸۱
نسبت ابعاد	-	۶۷/۰۰
حداقل مقاومت کششی	MPa	۵۵۲/۰۰
مدول الاستیسیته	MPa	۶۰۰۰/۰۰
چگالی	kg/m ³	۹۱۰/۰۰

۴- مطالعه عددی و تحلیل شبه استاتیک غیرخطی سگمنت تونل Monte Liro

برای مدل‌سازی سگمنت‌های تونل Monte Liro، نرم‌افزار آباکوس و مدل Damage Plasticity بتن استفاده شد تا پوشش بتنی تونل به صورت دقیق شبیه‌سازی گردد. در این تحلیل، برای تعریف مشخصات مصالح غیرخطی بتن آرمه پوشش تونل، از مدل رفتاری (Concrete Damaged Plasticity) (CDP) بهره گرفته شد که یکی از پیشرفته‌ترین و پرکاربردترین مدل‌ها برای شبیه‌سازی رفتار غیرخطی بتن در نرم‌افزار Abaqus محسوب می‌شود. این مدل با تلفیق مفاهیم الاستیسیته آسیب‌دیده ایزوتروپیک و پلاستیک کششی و فشاری، رفتار غیرخطی بتن را شبیه‌سازی می‌کند. برای مدل‌سازی رفتار فشاری بتن بدون الیاف، روابط ارائه شده در Eurocode 2 به کار گرفته شده است (روابط (۱) الی (۴)).

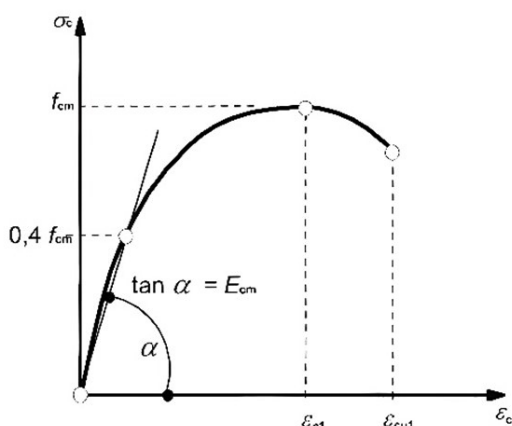
$$\frac{\sigma_c}{f_{cm}} = \frac{k\eta - \eta^2}{1 + (k - 2)\eta} \quad (۱)$$

$$\eta = \varepsilon_c / \varepsilon_{c_1} \quad (\Upsilon)$$

$$k = 1.05E_{cm} \times |\varepsilon_{c1}|/f_{cm} \quad (3)$$

$$E_{cm} = 22[(f_{cm})/10]^{0.3} \quad (9)$$

در روابط بالا f_{cm} مقاومت فشاری استوان‌های بتن است که در این پروژه ۴۸/۲ مگاپاسکال بوده اد σ_c . تنش فشاری ε_{c1} تنش فشاری در بیشینه مقاومت فشاری، مد E_{cm} الاستیسیته در نظر گرفته شده است. در شکل ۲ نمودار تنش- کرنش فشاری بتن بدون الیاف نمایش داده شده است.



شکل ۲- منحنی تنش- کرنش فشاری بتن بدون الیاف [۲۷]

برای مدل رفتاری کششی بتن از روابط Hsu استفاده شده است [۲۸]. رابطه تنش-کرنش کششی در روابط (۵) و (۶) نشان داده شده است.

$$f_t = f_{ct} \left(\frac{\varepsilon_{ct}}{\varepsilon_t} \right) \quad (\Delta)$$

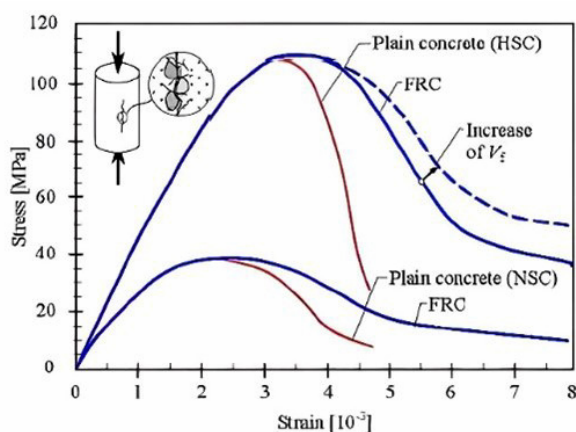
$$f_{ct} = 0.63 \times \sqrt{f_{cm}} \quad (8)$$

در روابط بالا f_{ct} مت کششی و کرنش ϵ_{ct} کششی می‌باشد. پارامترهای مدل Concrete Damaged Plasticity شامل زاویه اتساع (30°)، خروج از مرکز ($0/1$)، نسبت تنش فشاری دومحوره به تک‌محوره ($1/16$)، نسبت تنش کششی ثانویه به بیشینه ($0/66$) و ضریب ویسکوزیته ($0/001$) بر اساس مطالعات [29] Lubliner et al و [30] Lee & Fenves و دستورالعمل نرم‌افزار ABAQUS [31] انتخاب شده‌اند. این پارامترها در جدول ۳ به تفصیل ارائه شده‌اند.

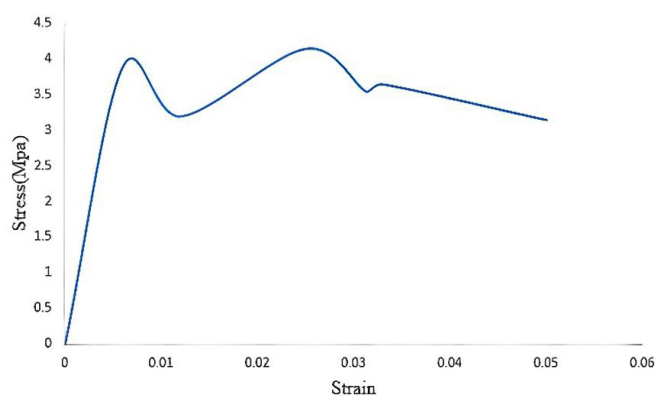
جدول ۳- پارامترهای پلاستیک بتن بدون الیاف

پارامتر	مقدار
زاویه اتساع بتن	۳۰/۰۰
خروج از مرکز بتن (ϵ)	۰/۱۰
نسبت تنش تسلیم فشاری دو محوره به تک محوره	۱/۱۶
نسبت تنش ثانویه به ماکزیمم مقدار کشش	۰/۶۶
پارامتر ویسکوزیته در معادلات تعادل بتن	۰/۰۰۱

برای رفتار فشاری بتن الیافی از منحنی تنش-کرنش فشاری استخراج شده از آیین‌نامه FIBCODE 2010 استفاده شده است [۳۲]. در شکل ۳ مقایسه تنش-کرنش فشاری بتن با الیاف و بدون آن نمایش داده شده است. همچنین در شکل ۴ منحنی تنش-کرنش بتن الیافی معرفی شده در نرم افزار که از راهنمای [33] AFTES استخراج شده، نمایش داده شده است.



شکل ۳- مقایسه منحنی تنش-کرنش فشاری بتن با الیاف و بدون الیاف [۳۲]



شکل ۴- منحنی تنش-کرنش کششی بتن الیافی وارد شده به نرم‌افزار [۳۳]

برای رفتار کششی و محدوده پلاستیک و خرابی بتن الیافی از روابط (۷) الی (۱۷) استفاده شده است [۳۴-۳۵].

$$\varepsilon_c^{pl} = \varepsilon_c^{in} - \frac{d_c}{(1 - d_c)} \frac{\sigma_c}{E_{cm}} \quad (۷)$$

$$\varepsilon_t^{pl} = \varepsilon_t^{ck} - \frac{d_t}{(1 - d_t)} \frac{\sigma_t}{E_{cm}} \quad (۸)$$

$$d_c = \frac{1}{e^{-1/m_c^{hf}} - 1} \left(e^{-\varepsilon_c^{in\,norm}/m_c^{hf}} - 1 \right) \quad (۹)$$

$$d_t = \frac{1}{e^{-1/m_t^{hf}} - 1} \left(e^{-\varepsilon_t^{ck\,norm}/m_t^{hf}} - 1 \right) \quad (۱۰)$$

$$m_c^{hf} = m_c (1 + a_{m1} \lambda_{sf} + b_{m1} \lambda_{pf}) \quad (۱۱)$$

$$m_t^{hf} = m_t (1 + a_{m2} \lambda_{sf} + b_{m2} \lambda_{pf}) \quad (۱۲)$$

$$\lambda_{sf} = V_{sf} (l_{sf} / d_{sf}) \quad (۱۳)$$

$$\lambda_{pf} = V_{pf} (l_{pf} / d_{pf}) \quad (۱۴)$$

$$\varepsilon_c^{in\,norm} = \varepsilon_c^{in} / \varepsilon_{cu}^{in} \quad (۱۵)$$

$$\varepsilon_t^{ck\,norm} = \varepsilon_t^{ck} / \varepsilon_{tu}^{ck} \quad (۱۶)$$

$$\varepsilon_{cu}^{in} = 0.033 \quad \varepsilon_{tu}^{ck} = 0.0033 \quad (۱۷)$$

تعریف پارامترهای روابط بالا به شرح زیر می‌باشد:

$\varepsilon_c^{in\,norm}$ = کرنش فشاری نرمال

ε_{cu}^{in} = کرنش فشاری نهایی

$\varepsilon_t^{ck\,norm}$ = کرنش کششی نرمال

ε_{tu}^{ck} = کرنش کششی نهایی

m_c و m_t = پارامترهایی هستند که سرعت تکامل خسارت را کنترل می‌کنند.

m_c^{hf} و m_t^{hf} = پارامترهای کنترل سرعت خسارت برای بتن الیافی می‌باشند.

λ_{sf} = پارامتری است که به درصد حجم و طول و قطر الیاف فولادی بستگی دارد.

λ_{pf} = پارامتری است که به درصد حجم و طول و قطر الیاف پلی پروپیلن بستگی دارد.

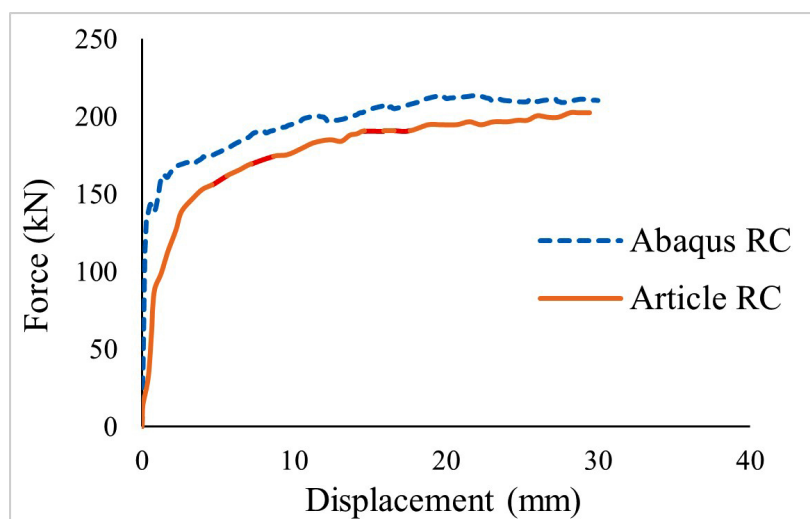
V_{pf} = درصد حجمی الیاف پلی پروپیلن که در این پروژه ۱/۱ درصد می باشد.

۵- صحت سنجی

به منظور اطمینان از درستی مدل سازی عددی و اعتبارسنجی آن، نتایج نرم افزار آباکوس با داده های آزمایشگاهی موجود مقایسه گردید. در این راستا، منحنی های نیرو- جابجایی برای نمونه های بتن بدون الیاف و بتن مسلح به الیاف پلی پروپیلن استخراج گردید. این مقایسه ها نشان داد که مدل عددی، رفتاری مشابه با نتایج مقاله مرجع داشته و توانسته به عنوان مدل معتبری جهت تحلیل های لرزه ای سگمنت های تونل مورد استفاده قرار گیرد. در شکل ۵ نیز مقایسه نمودار نیرو-جابجایی بدست آمده از کار آزمایشگاهی و عددی، برای نمونه حاوی بتن بدون الیاف آورده شده است. منحنی آبی رنگ مربوط به خروجی نرم افزار و نمودار نارنجی مربوط به نتایج مقاله است، که رفتاری مشابه دارند. برای اعتبارسنجی مدل عددی، نتایج تحلیل با نرم افزار آباکوس (ABAQUS RC) با داده های آزمایشگاهی گزارش شده در مقاله مرجع (Article RC) مقایسه گردید. شرایط مرزی مدل به گونه ای تعریف شده است که جابجایی نرمال در محل تماس پوشش با خاک مقید شده و حرکت برشی در راستای مماسی آزاد است تا رفتار واقعی اندرکنش خاک-سازه شبیه سازی گردد.

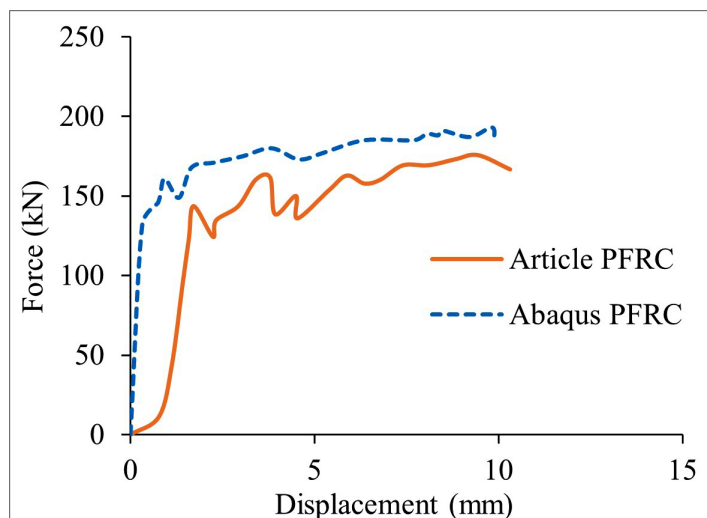
شبکه المان ها از نوع C3D8R (المان سه بعدی خطی کاهش یافته) انتخاب شده و برای اطمینان از دقت مدل، مطالعه ای همگرایی مش انجام گرفت. نتایج نشان داد که با کاهش اندازه المان به کمتر از ۵۰ میلی متر، تغییر در پاسخ نیرو-جابجایی کمتر از ۳٪ بوده و لذا مش انتخاب شده از دقت کافی برخوردار است.

این مقایسه بر اساس منحنی نیرو-جابجایی نشان داد که در مراحل ابتدایی بارگذاری، به دلیل مقادیر بسیار کم نیروی آزمایشگاهی، اختلاف درصدی ظاهری بالاتری مشاهده می شود، اما با افزایش جابجایی و ورود سازه به محدوده عملکرد اصلی، اختلاف بین نتایج عددی و آزمایشگاهی به طور محسوسی کاهش یافته و عمدتاً در بازه های بین ۵ تا ۱۰ درصد قرار می گیرد. در نزدیکی جابجایی های نهایی (حدود ۳۰ میلی متر)، اختلاف نیرو به حدود ۴ درصد رسیده که نشان دهنده انطباق قابل قبول مدل عددی با رفتار واقعی نمونه آزمایشگاهی است. بنابراین می توان نتیجه گرفت که مدل عددی توسعه یافته، توانایی پیش بینی دقیق رفتار غیرخطی بتن مسلح به الیاف را داشته و مبنای مناسبی برای تحلیل های لرزه ای پوشش سگمنتال تونل محسوب می شود.



شکل ۵- مقایسه نمودار نیرو-جابجایی آباکوس و مقاله مرجع [۲۱] برای نمونه حاوی بتن الیاف

در شکل ۶ نیز مقایسه نمودار نیرو-جابجایی برگرفته از مقاله و نرم‌افزار برای نمونه حاوی بتن الیافی نشان داده شده است.



شکل ۶- مقایسه نمودار نیرو-جابجایی آباکوس و مقاله مرجع [۲۱] برای نمونه حاوی بتن الیافی

۶- معرفی تونل مورد مطالعه

تونل مورد بررسی، تونل انتقال آب سد امیرکبیر به تصفیه‌خانه شماره ۵ تهران بوده است. این تونل از توده سنگ‌های مختلفی عبور کرده که بیشتر آن‌ها از جنس سنگ‌های آذرین می‌باشد. مقطع مورد نظر در کیلومتر ۲۶۰۰ انتخاب شده است. ارتفاع روباره در این مقطع برابر با ۴۰ متر بوده است. مشخصات فیزیکی و مکانیک سنگی این مقطع در جدول ۴ آورده شده است.

جدول ۴- خواص مقاومتی توده سنگ برای مقطع مورد نظر بر اساس مطالعات مشاور طرح [۳۶]

مشخصات	وزن مخصوص	مدول تغییر شکل پذیری	نسبت پواسون	چسبندگی	زاویه اصطکاک
واحد	Kg / m ^۳	GPa	-	MPa	درجه
مقدار	۲۷۰۰/۰۰	۶/۰۰	۰/۲۵	۱/۳۵	۴۹/۶۰

مقطع حفاری شده این تونل به صورت دایره‌ای بوده و شعاع آن برابر با ۱/۹۵ متر است. در این تونل از پوشش سگمنتال با شش قطعه سگمنت (۵+۱) به عنوان سیستم نگهداری استفاده می‌گردد. خصوصیات پوشش سگمنتال در جدول ۵ الی ۷ آورده شده است. پارامترهای قطعات بتنی پیش‌ساخته از مطالعات مشاور طرح و پارامترهای سطح تماس بین سگمنت و محیط اطراف و بین دو سگمنت، به طور عمده از منبع [۳۷] استخراج شده است.

جدول ۵- خصوصیات قطعات بتنی پیش ساخته (سگمنت) برای مقطع مورد نظر بر اساس مطالعات مشاور طرح [۳۶]

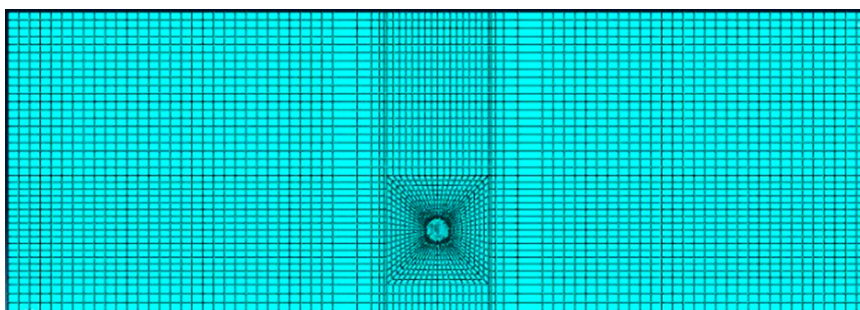
مشخصه	مقدار	واحد
وزن مخصوص	۲۵۰۰/۰۰	Kg / m ^۳
مدول تغییر شکل پذیری	۳۰/۲۰	GPa
نسبت پواسون	۰/۲۰	-
چسبندگی	۵/۵۰	MPa
زاویه اصطکاک	۵۵/۰۰	درجه
مقاومت فشاری تک محوری	۴۰/۰۰	MPa
مقاومت کششی تک محوری	۳/۲۰	MPa

جدول ۶- خصوصیات سطح تماس بین دو سگمنت برای مقطع مورد نظر بر اساس مطالعات مشاور طرح [۳۶]

مشخصه	مقدار	واحد
چسبندگی	۰/۷۵	MPa
زاویه اصطکاک	۴۵/۰۰	درجه
سختی برشی	۱۲/۵۸	GPa/m
سختی نرمال	۱۶/۷۰	GPa/m

جدول ۷- خصوصیات سطح تماس بین سگمنت و محیط اطراف برای مقطع مورد نظر بر اساس مطالعات مشاور طرح [۳۶]

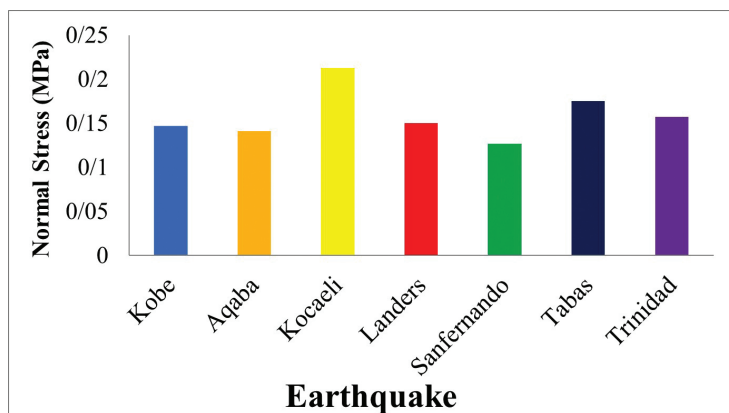
مشخصه	مقدار	واحد
چسبندگی	۰/۶۰	MPa
زاویه اصطکاک	۳۵/۰۰	درجه
سختی برشی	۲/۴۰	GPa/m
سختی نرمال	۴/۰۰	GPa/m



شکل ۷- هندسه مدل عددی ساخته شده در نرم افزار

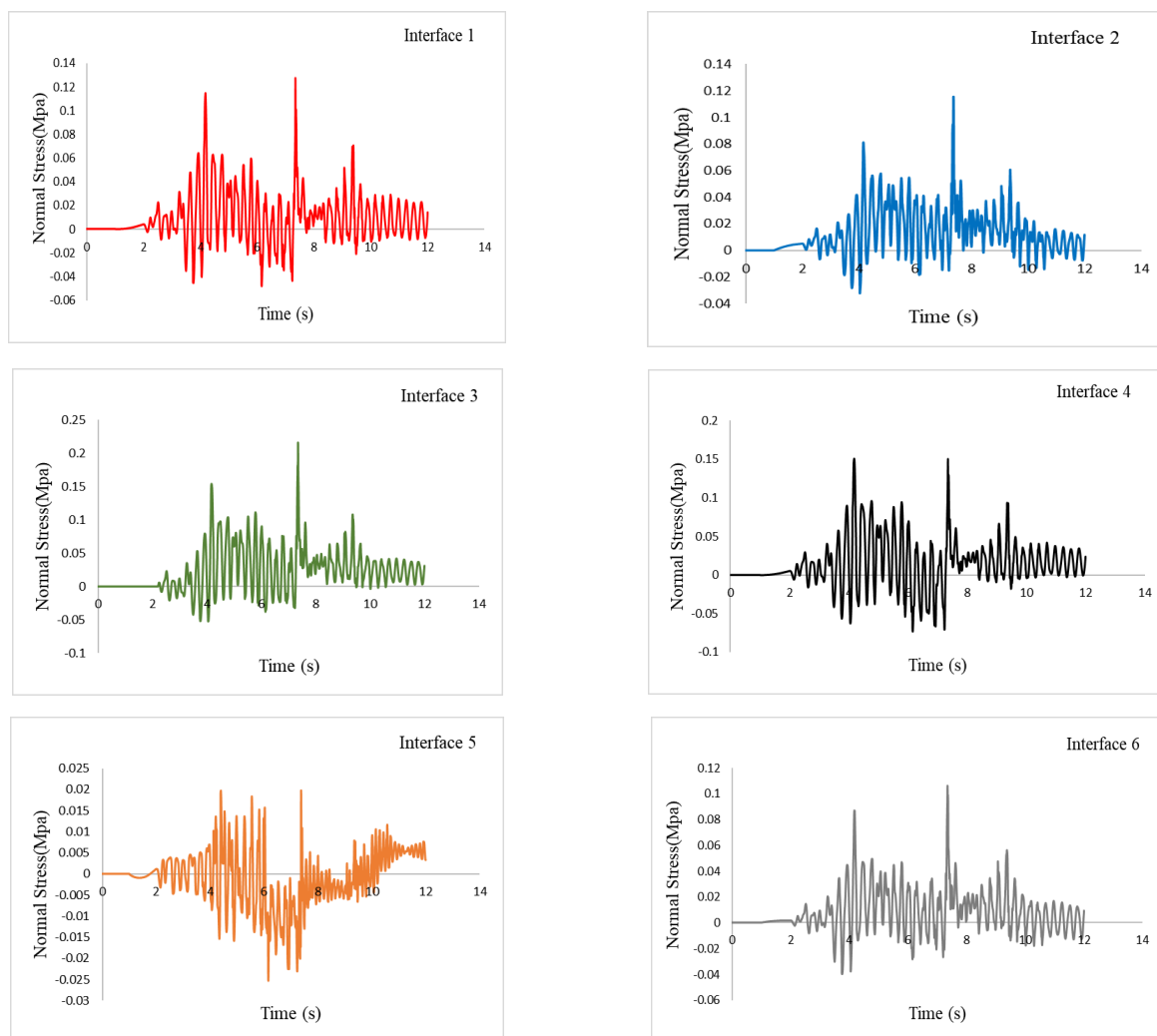
روند تغییرات تنش‌ها و جابجایی‌ها مشابه بوده و دامنه تغییرات مقادیر بیشینه در محدوده‌های کمتر از ۱۰٪ قرار دارد. بنابراین، نتایج عددی دارای پایداری قابل قبول بوده و می‌توان مقادیر میانگین را به عنوان رفتار شاخص مدل در نظر گرفت. این موضوع بیانگر آن است که پاسخ پوشش سگمنتال در برابر رکوردهای لرزه‌ای مختلف از حساسیت محدودی برخوردار بوده و رفتار کلی مدل از نظر عددی پایدار است.

در مقابل، رکوردهایی مانند San Fernando و Aqaba کمترین تنش نرمال را ایجاد کرده‌اند (کمتر از ۰/۱۴ مگاپاسکال)، که نشان‌دهنده شدت پایین‌تر ارتعاشات مؤثر این زلزله‌ها بر تونل مورد مطالعه است. این اختلاف مقادیر، نقش بارز ویژگی‌های شتاب‌نگاشت هر زلزله، شامل مدت زمان دوام، محتوای فرکانسی و دامنه شتاب بیشینه را در توزیع تنش‌های نرمال تأیید می‌کند. به‌طور کلی، نتایج این بخش نشان می‌دهد که در شرایط وجود الیاف پلی‌پروپیلن با درصد بهینه (۱/۵ درصد)، درزه‌های طولی قادر به تحمل مقادیر بالاتری از تنش نرمال هستند. این موضوع بیانگر عملکرد بهبود یافته‌ی پوشش سگمنتال تونل در برابر زلزله‌های شدید بوده و اهمیت طراحی مقاوم‌سازی متناسب با رکوردهای بحرانی نظیر Kocaeli و Tabas را برجسته ساخته است.



شکل ۹- مقایسهٔ بیشینه تنش نرمال درزهٔ بحرانی رینگ تونل تحت ۷ رکورد زلزله

در شکل ۱۰ تاریخچه بیشینه تنش نرمال درزه‌های تونل در حالت ۱/۵ درصد الیاف تحت زلزله Kocaeli نمایش داده شده است. تحلیل نتایج نشان می‌دهد که افزایش درصد الیاف پلی‌پروپیلن منجر به کاهش تمرکز تنش در نواحی بحرانی و توزیع یکنواخت‌تر تنش نرمال در درزه‌ها شده است. این رفتار به دلیل ایجاد پل‌های تنشی میان ریزترک‌ها و تأخیر در گسترش ترک‌های کششی در ماتریس بتن است. همچنین، الیاف با افزایش چسبندگی و ظرفیت جذب انرژی، توانست‌هاند اثرات بارهای دینامیکی را در ناحیه تماس سگمنت‌ها کاهش دهند. این روند بیانگر نقش مؤثر الیاف در بهبود دوام و پایداری درزه‌های طولی در شرایط لرزه‌ای شدید است.



شکل ۱۰- تاریخچه حداکثر تنش نرمال درزها در حالت ۱/۵ درصد ایاف تحت زلزله Kocaeli

جدول ۸: میزان تنش نرمال (بر حسب مگاپاسکال) در رزهای رینگ تونل همراه با درصد ایاف ۰ الی ۱/۵ درصد تحت زلزله‌های مختلف

زلزله	درزه	0%	0.70%	1.00%	1.50%	.Max	.Total Max
Kobe	درزه ۱	0.0982	0.1009	0.0956	0.09904	0.100878	0.15825
	درزه ۲	0.064	0.0759	0.0734	0.09012	0.090115	
	درزه ۳	0.1018	0.0989	0.1073	0.10395	0.107304	
	درزه ۴	0.1454	0.1522	0.1482	0.15825	0.158253	
	درزه ۵	0.0788	0.0984	0.0961	0.10278	0.102779	
	درزه ۶	0.0731	0.0705	0.0732	0.07541	0.075412	

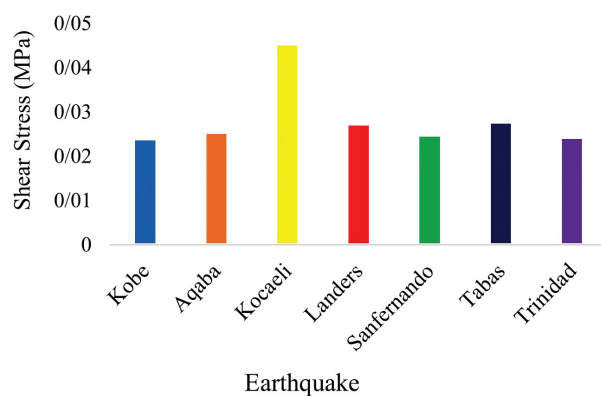
Aqaba	درزه ۱	0.0755	0.0774	0.0797	0.0806	0.080604	0.148587
	درزه ۲	0.069	0.0698	0.0708	0.0713	0.071297	
	درزه ۳	0.1428	0.1445	0.1473	0.14859	0.148587	
	درزه ۴	0.1254	0.1323	0.1328	0.1339	0.133904	
	درزه ۵	0.0369	0.0316	0.0317	0.03156	0.036864	
	درزه ۶	0.0887	0.0896	0.0916	0.09267	0.092669	
Kocaeli	درزه ۱	0.1126	0.1299	0.1167	0.12992	0.12994	0.230221
	درزه ۲	0.12	0.1185	0.1148	0.11891	0.120044	
	درزه ۳	0.2215	0.199	0.2074	0.23022	0.230221	
	درزه ۴	0.1512	0.1516	0.1533	0.15314	0.153252	
	درزه ۵	0.0364	0.0423	0.0405	0.04053	0.042327	
	درزه ۶	0.101	0.1016	0.0988	0.10774	0.107737	
Landers	درزه ۱	0.075	0.0772	0.0775	0.07851	0.078507	0.16075
	درزه ۲	0.081	0.0289	0.0653	0.07647	0.080995	
	درزه ۳	0.1481	0.1608	0.1224	0.15778	0.160752	
	درزه ۴	0.1157	0.115	0.1199	0.12056	0.120565	
	درزه ۵	0.0349	0.035	0.0355	0.03559	0.035593	
	درزه ۶	0.0719	0.0841	0.0836	0.08447	0.084475	
San Fernando	درزه ۱	0.0844	0.0829	0.0868	0.08641	0.086755	0.132788
	درزه ۲	0.0541	0.0655	0.0646	0.06491	0.065512	
	درزه ۳	0.1275	0.1233	0.1284	0.13279	0.132788	
	درزه ۴	0.1243	0.1297	0.1242	0.12311	0.129727	
	درزه ۵	0.0453	0.0573	0.0453	0.05384	0.057347	
	درزه ۶	0.0638	0.0699	0.0673	0.07182	0.071818	
Tabas	درزه ۱	0.1027	0.1083	0.1082	0.1089	0.108896	0.18643
	درزه ۲	0.0657	0.0635	0.0673	0.07169	0.07169	
	درزه ۳	0.1033	0.1771	0.1787	0.18643	0.18643	
	درزه ۴	0.15	0.1561	0.1566	0.1563	0.156615	
	درزه ۵	0.0375	0.0683	0.0698	0.06863	0.069842	
	درزه ۶	0.0832	0.0782	0.0795	0.08104	0.083202	
Trinidad	درزه ۱	0.0863	0.103	0.1038	0.1062	0.106203	0.16449
	درزه ۲	0.0551	0.0743	0.0729	0.07268	0.07434	
	درزه ۳	0.103	0.1645	0.1608	0.16402	0.164499	
	درزه ۴	0.1148	0.1426	0.1434	0.1473	0.1473	
	درزه ۵	0.0355	0.0435	0.0427	0.04373	0.043726	
	درزه ۶	0.0758	0.0769	0.0764	0.07605	0.076877	

۷-۲- بررسی تغییرات تنش برشی درزه‌های طولی

بررسی‌های عددی نشان داد که در پنج زلزله از مجموع هفت رکورد لرزه‌ای مورد مطالعه، بیشینه‌ی تنش برشی در اغلب درزه‌های طولی رینگ تونل (حداقل در چهار درزه از شش درزه) در حالتی رخ داده است که بتن حاوی الیاف پلی‌پروپیلن با درصد حجمی ۱/۵ درصد بوده است. این موضوع دلالت بر نقش مؤثر این مقدار بهینه‌ی الیاف در افزایش مقاومت برشی درزه‌های طولی دارد.

نتایج تحلیلی بیانگر آن است که تمرکز بیشینه‌ی تنش برشی عمدتاً در درزه شماره ۴ مشاهده شده است؛ به‌گونه‌ای که در حالت بدون حضور الیاف (۰ درصد) در دو زلزله و در حالت حاوی ۱/۵ درصد الیاف در سه زلزله، بیشترین مقادیر به ثبت رسیده است. در مجموع، این درزه در پنج رکورد لرزه‌ای بیشترین مقدار تنش برشی را تجربه کرده است. افزون بر آن، در درزه شماره ۳ نیز بیشینه تنش برشی در یک رکورد لرزه‌ای تحت حالت ۰/۷ درصد الیاف و در یک رکورد دیگر تحت حالت ۱/۵ درصد الیاف مشاهده گردیده است که نشان‌دهنده حساسیت این درزه در شرایط خاص است. به‌طور کلی، تمرکز مقادیر بحرانی در درزه شماره ۴ نشان‌دهنده آسیب‌پذیری بالاتر آن در مقایسه با سایر درزه‌ها در برابر تنش‌های برشی است.

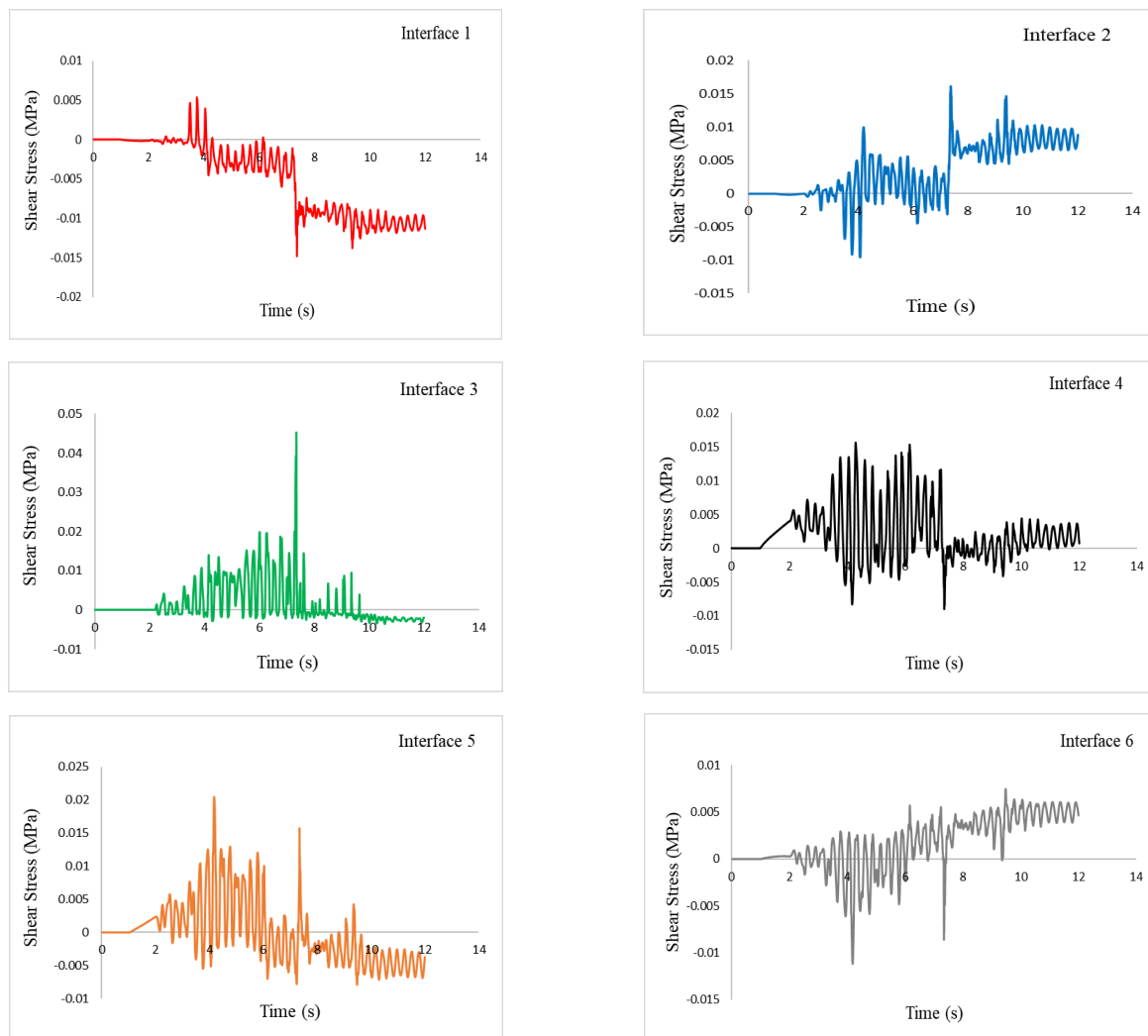
شکل ۱۱ مقایسه بیشینه تنش برشی در درزه شماره ۴ را تحت رکوردهای San Fernando و Tabas در حالت بدون یاف (۰ درصد) و همچنین بیشینه تنش برشی در درزه شماره ۳ را تحت زلزله‌های Kocaeli (در حالت ۱/۵ درصد یاف) و Landers (در حالت ۰/۷ درصد یاف) نشان می‌دهد. تحلیل این نمودار بیان می‌کند که رکورد Kocaeli بیشترین مقدار تنش برشی را در درزه‌های طولی، رینگ تونل ایجاد کرده و نسبت به سایر زلزله‌ها اثرگذاری شدیدتری بر رفتار برشی این سازه داشته است.



شکل ۱۱- مقایسهٔ بیشینه تنش برشی درزه بحرانی رینگ تونل تحت ۷ رکورد زلزله

در شکل ۱۲ تاریخچه بیشینه تنش برشی درزه‌های رینگ تونل در حالت ۱/۵ درصد الیاف تحت زلزله Kocaeli آورده شده است. همچنین در جدول ۹ نیز مقدار تنش برشی در درزه‌های رینگ تونل برای درصد‌های الیاف بین ۰ الی ۱/۵ درصد برای ۷ رکورد زلزله، آورده شده است. تحلیل این شکل نشان می‌دهد که اضافه کردن الیاف پلی‌پروپیلن با درصد بهینه موجب افزایش ظرفیت جذب انرژی و پایداری درزه‌ها در برابر ارتعاشات شدید شده است. تمرکز بیشینه تنش برشی در درزه شماره ۳ تأیید می‌کند که این ناحیه نسبت به سایر درزه‌ها حساس‌تر بوده و در طراحی باید به‌عنوان ناحیه بحرانی در نظر گرفته شود. همچنین مشاهده می‌شود که حضور الیاف موجب کاهش نوسانات ناگهانی و یکنواخت‌تر شدن توزیع تنش در طول زمان شده و این امر نشان‌دهنده نقش موثر الیاف در بهبود شکل‌پذیری و کاهش احتمال شکست ترد درزه‌های طولی است. به‌طور کلی، شکل ۱۲ اثبات می‌کند که استفاده از ۱/۵ درصد الیاف پلی‌پروپیلن بهترین عملکرد لرزه‌ای را فراهم کرده و می‌تواند به‌عنوان یک راهکار عملی در طراحی مقاوم‌سازی پوشش سگمنتال تونل‌ها در برابر زلزله‌های شدید مورد استفاده قرار گیرد.

از دیدگاه مکانیکی، افزایش مقاومت برشی در حضور الیاف پلی پروپیلن را می توان ناشی از افزایش اصطکاک داخلی در سطح درزه و مقاومت کششی پس از ترک دانست. در واقع، الیاف با مهار گسترش ترک های مورب و ایجاد شبکه های از اتصالات درون خمیر سیمان، موجب تأخیر در وقوع لغزش برشی می شوند. این رفتار منجر به پایداری بیشتر در ناحیه تماس سگمنت ها و کاهش احتمال شکست ترد در زمان زلزله می گردد.



شکل ۱۲- تاریخچه بیشینه تنش برشی درزه شماره ۳ در حالت ۱/۵ درصد الیاف تحت زلزله Kocaeli

جدول ۹: میزان تنش برشی (بر حسب مگاپاسکال) در رزدهای رینگ تونل همراه با درصد الیاف ۰ الی ۱/۵ درصد تحت زلزله‌های مختلف

زلزله	درزه	0%	0.70%	1.00%	1.50%	.Max	.Total Max
Kobe	درزه ۱	0.00285	0.003	0.00271	0.0032	0.003199	0.023922
	درزه ۲	0.01676	0.0188	0.01519	0.01889	0.018891	
	درزه ۳	0.01446	0.0029	0.0176	0.00275	0.017603	
	درزه ۴	0.01253	0.0234	0.02376	0.02392	0.023922	
	درزه ۵	0.00467	0.0057	0.00587	0.00748	0.007479	
	درزه ۶	0.0029	0.0027	0.00733	0.00274	0.007327	
Aqaba	درزه ۱	0.00922	0.0094	0.00926	0.0093	0.00935	
	درزه ۲	0.00635	0.0064	0.00644	0.0065	0.0065	
	درزه ۳	0.01166	0.0117	0.01209	0.01214	0.012142	0.025309
	درزه ۴	0.02461	0.0248	0.02507	0.02531	0.025309	
	درزه ۵	0.00547	0.0054	0.00557	0.00561	0.00561	
	درزه ۶	0.00537	0.0052	0.00526	0.00526	0.005369	
Kocaeli	درزه ۱	0.01538	0.0142	0.01378	0.01486	0.015378	
	درزه ۲	0.01276	0.0168	0.01581	0.01612	0.016773	
	درزه ۳	0.04414	0.0419	0.04191	0.04527	0.045269	0.045269
	درزه ۴	0.0167	0.0152	0.01523	0.01549	0.0167	
	درزه ۵	0.01899	0.0204	0.02054	0.02045	0.02054	
	درزه ۶	0.01023	0.011	0.01119	0.01117	0.011194	
Landers	درزه ۱	0.00266	0.0083	0.00805	0.00811	0.008328	
	درزه ۲	0.00977	0.0163	0.01615	0.01626	0.016342	
	درزه ۳	0.01523	0.0273	0.02168	0.02143	0.027267	0.027267
	درزه ۴	0.02164	0.0225	0.02226	0.0224	0.02246	
	درزه ۵	0.01285	0.0129	0.01321	0.01328	0.013284	
	درزه ۶	0.00638	0.0064	0.00624	0.00631	0.00642	
San Fer-nando	درزه ۱	0.00247	0.0073	0.00744	0.00757	0.007571	
	درزه ۲	0.01053	0.0171	0.01771	0.01781	0.017813	
	درزه ۳	0.00245	0.0156	0.01395	0.01176	0.015569	0.023934
	درزه ۴	0.02393	0.0212	0.02165	0.02178	0.023934	
	درزه ۵	0.0083	0.015	0.01545	0.01619	0.016186	
	درزه ۶	0.00729	0.0071	0.00752	0.0074	0.007516	

Tabas	درزه ۱	0.00232	0.0061	0.00675	0.00705	0.007055	0.020367
	درزه ۲	0.00903	0.0144	0.01579	0.01589	0.015895	
	درزه ۳	0.00199	0.0168	0.01603	0.0166	0.016786	
	درزه ۴	0.02015	0.0193	0.0192	0.01963	0.020151	
	درزه ۵	0.00776	0.0204	0.01988	0.02005	0.020367	
	درزه ۶	0.0088	0.0102	0.00923	0.01023	0.010229	
Trinidad	درزه ۱	0.00429	0.0067	0.00685	0.0067	0.00685	0.019789
	درزه ۲	0.00987	0.0139	0.01417	0.01421	0.014206	
	درزه ۳	0.01768	0.0151	0.01526	0.01536	0.017676	
	درزه ۴	0.01925	0.0193	0.01927	0.01979	0.019789	
	درزه ۵	0.00745	0.0187	0.019	0.01939	0.01939	
	درزه ۶	0.00922	0.0097	0.01022	0.01039	0.01039	

۷-۳- بررسی تنش فون مایسز درزه‌های طولی

در تحلیل سازه‌هایی که همزمان تحت تنش‌های نرمال و برشی قرار دارند، استفاده از معیار تسلیم فون مایسز به عنوان یک شاخص مؤثر برای ارزیابی رفتار سازه‌های اجتناب‌ناپذیر است. این معیار با در نظر گرفتن ترکیب تنش‌های اصلی، امکان برآورد حالت بحرانی تسلیم یا شکست موضعی را فراهم می‌آورد. برای شرایط دوبعدی، رابطه تنش فون مایسز به صورت معادله (۱۸) تعریف می‌شود [۳۸]:

$$\sigma_v = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_{11})^2 + (-\sigma_{11})^2] + 3(\sigma_{12}^2)} \quad (18)$$

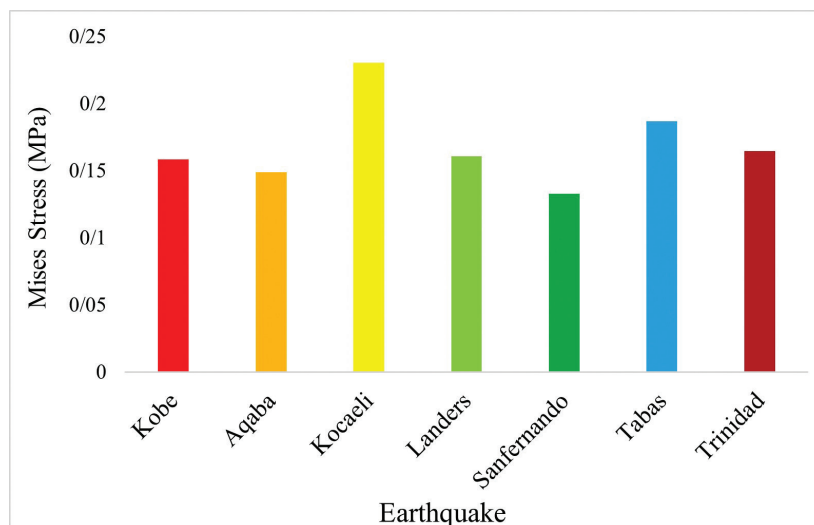
در رابطه ۱۸، σ_{11} نرمال و σ_{12} برشی است.

نتایج حاصل از تحلیل دینامیکی تونل نشان می‌دهد که در ۶ رکورد از مجموع ۷ رکورد زلزله بررسی شده، بیشینه تنش فون مایسز در درزه شماره ۳ اتفاق افتاده است. این تمرکز تنش در یک درزه خاص می‌تواند بیانگر هندسه نامتقارن توزیع نیروها، شرایط تماس و یا حساسیت بیشتر این درزه به اثرات دینامیکی زمین‌لرزه باشد. شکل ۱۳ روند تغییرات بیشینه تنش فون مایسز در درزه بحرانی را تحت رکوردهای مختلف زلزله نشان می‌دهد.

مطابق گزارش انجمن مهندسی عمران ژاپن (JSCE)، تبدیل مقطع یکپارچه به مقطع سگمنتال منجر به تغییر مسیر تنش‌ها و کاهش بخشی از تمرکز تنش در نواحی تشکیل درزه‌های طولی می‌شود [۳۹]. این موضوع در نتایج عددی این مطالعه نیز مشهود است، به‌گونه‌ای که حضور الیاف پلی‌پروپیلن به‌ویژه در درصد حجمی بهینه (۱/۵٪) باعث توزیع یکنواخت‌تر تنش‌ها و کاهش احتمال شکست ترد در نواحی بحرانی گردیده است.

افزون بر این، مقایسه رکوردهای مختلف نشان داد که زلزله‌های با محتوای فرکانسی پایین و مدت زمان دوام بیشتر، مقادیر بالاتری از تنش فون مایسز را در درزه‌ها ایجاد کرده‌اند. این مسئله اهمیت تحلیل تاریخچه زمانی با رکوردهای واقعی و متنوع را در طراحی لرزه‌ای پوشش سگمنتال تونل‌ها دوچندان می‌کند.

تحلیل مقادیر تنش فون مایسز نشان می‌دهد که توزیع یکنواخت‌تر تنش‌ها در حضور الیاف، به‌ویژه در درصد ۱/۵٪، موجب کاهش احتمال تمرکز تنش در ناحیه بحرانی درزه شماره ۳ شده است. این موضوع به‌طور مستقیم با افزایش شکل‌پذیری مصالح و جذب انرژی ناشی از الیاف مرتبط است و می‌تواند احتمال بروز شکست ترد را در ناحیه درزه کاهش دهد.

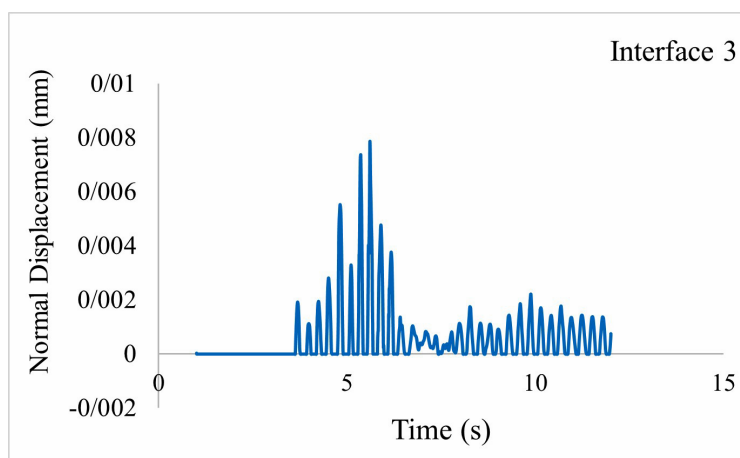


شکل ۱۳- مقایسه تنش فون مایسز درزۀ طولی بحرانی تحت ۷ رکورد زلزله

۷-۴- بررسی تغییرات جابجایی نرمال درزۀ طولی

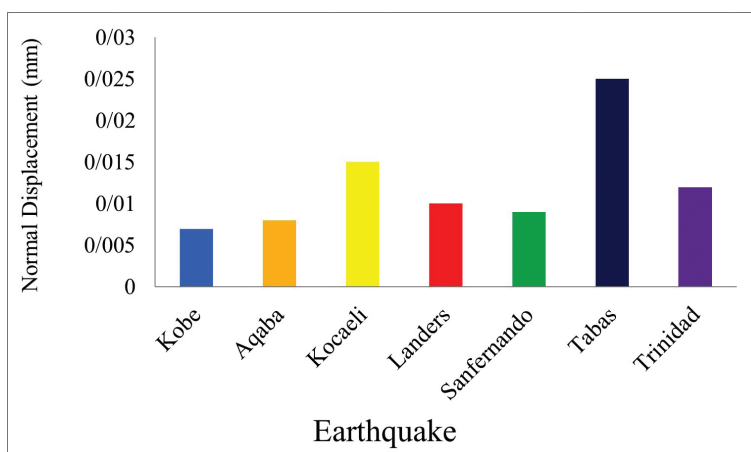
بر اساس نتایج حاصل از تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی، بیشینه جابجایی نرمال درزۀ طولی رینگ تونل تحت رکوردهای مختلف زلزله تفاوت معناداری داشته است. همان طور که در شکل ۱۴ نشان داده شده، در برخی رکوردها مانند Tabas و Kocaeli میزان جابجایی نرمال به طور محسوسی بیشتر از سایر رکوردها بوده است، به طوری که رکورد Tabas بیشترین تغییرمکان نرمال (حدود ۰/۰۲۵ میلی متر) را در درزۀ شماره ۳ ایجاد کرده است. این مقدار حاکی از شدت اثرگذاری این رکورد بر تغییرشکل پوشش سگمنتال تونل است. در مقابل، رکوردهایی همچون Kobe و Aqaba تغییرشکل کمتری (به ترتیب حدود ۰/۰۰۷ و ۰/۰۰۸ میلی متر) ایجاد نموده اند که بیانگر اثرگذاری محدودتر این زلزله ها بر جابجایی نرمال درزۀ طولی می باشد.

تحلیل نتایج نشان می دهد که الیاف پلی پروپیلن با درصد حجمی ۱/۵٪ نقش مؤثری در کاهش دامنه تغییرشکل های ناخواسته داشته و سبب بهبود ظرفیت جذب انرژی درزۀ طولی شده است. این موضوع به ویژه در رکوردهای شدید مانند Tabas و Kocaeli اهمیت ویژه ای دارد، زیرا توانسته است با کاهش نسبی جابجایی نرمال، از تمرکز بیش از حد تغییرشکل در درزۀ طولی بحرانی جلوگیری نماید.



شکل ۱۴- مقایسه حداکثر جابجایی نرمال درزۀ طولی بحرانی رینگ تونل تحت هفت رکورد زلزله

در شکل ۱۵ تاریخچه بیشینه جابجایی نرمال درزه شماره ۳ در حالت ۱/۵ درصد الیاف آورده شده است. تاریخچه زمانی جابجایی نرمال (شکل ۱۵) نشان می‌دهد که حضور الیاف علاوه بر کاهش مقدار بیشینه جابجایی، موجب کاهش نوسانات ناگهانی و یکنواخت‌تر شدن پاسخ دینامیکی درزه‌ها نیز شده است. این امر از منظر طراحی لرزه‌ای اهمیت بالایی دارد، چرا که یکنواخت‌تر شدن تغییرشکل‌ها منجر به کاهش احتمال وقوع شکست ترد در درزه‌ها و افزایش شکل‌پذیری کلی پوشش سگمنتال می‌گردد.

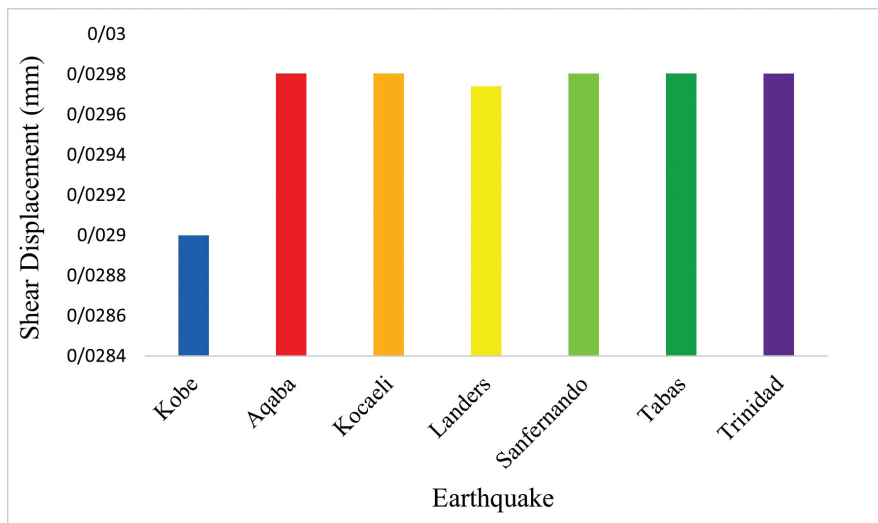


شکل ۱۵ - تاریخچه بیشینه جابجایی نرمال درزه شماره ۳ در حالت ۱/۵ درصد الیاف تحت زلزله Tabas

نتایج فوق نشان می‌دهد که نقش الیاف پلی‌پروپیلن در کنترل تغییرشکل‌های نرمال دوگانه است: از یک سو با افزایش مدول مؤثر بتن باعث کاهش کرنش‌های موضعی می‌شود، و از سوی دیگر با ایجاد خاصیت میرایی داخلی، دامنه ارتعاشات موضعی را کاهش می‌دهد. این دو عامل موجب افزایش دوام درز و پایداری لرزه‌ای سیستم پوشش سگمنتال در طول زلزله می‌شوند. به طور کلی، بررسی تغییرات جابجایی نرمال نشان می‌دهد که ترکیب بتن با الیاف پلی‌پروپیلن می‌تواند به‌عنوان راهکاری کارآمد در کاهش تغییرشکل‌های بحرانی، افزایش دوام درزه‌ها و بهبود عملکرد لرزه‌ای پوشش سگمنتال تونل‌ها مورد استفاده قرار گیرد. این یافته‌ها علاوه بر ارائه راهکارهای عملی در طراحی تونل‌های جدید، می‌تواند مبنایی برای مقاوم‌سازی تونل‌های موجود در برابر زلزله‌های شدید باشد.

۵-۷- بررسی تغییرات جابجایی برشی درزه‌های طولی

در تحلیل جابجایی برشی درزه‌های طولی رینگ تونل تحت اثر رکوردهای مختلف لرزه‌ای، نتایج به‌دست‌آمده بیانگر آن است که شدت و ماهیت هر زلزله نقش تعیین‌کننده‌ای در مقادیر بیشینه جابجایی دارد. همان‌گونه که در شکل ۱۶ مشاهده می‌شود، بیشترین میزان جابجایی برشی در حالت بدون الیاف برای درزه شماره یک تحت رکورد زلزله Kobe ثبت شده است که نشان‌دهنده اثرگذاری بالای محتوای فرکانسی و دامنه ارتعاشات این زلزله بر رفتار برشی درزه‌هاست. در مقابل، رکوردهایی مانند Aqaba و Landers جابجایی‌های به‌مراتب کمتری ایجاد کردند و این موضوع بیانگر تأثیر محدودتر آن‌ها بر تغییرشکل‌های بحرانی پوشش سگمنتال است.

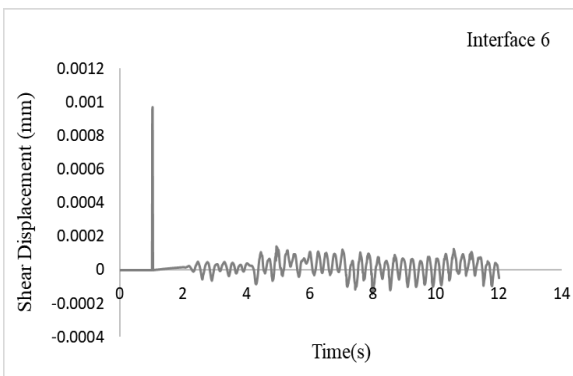
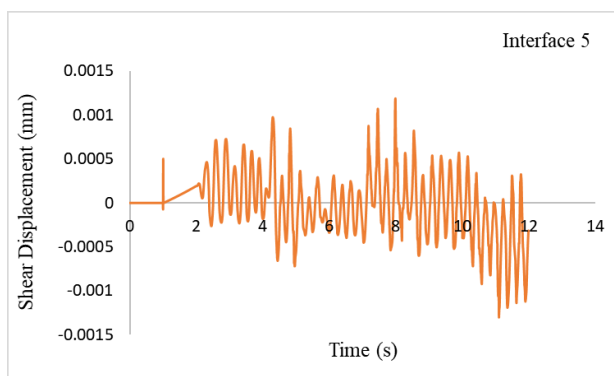
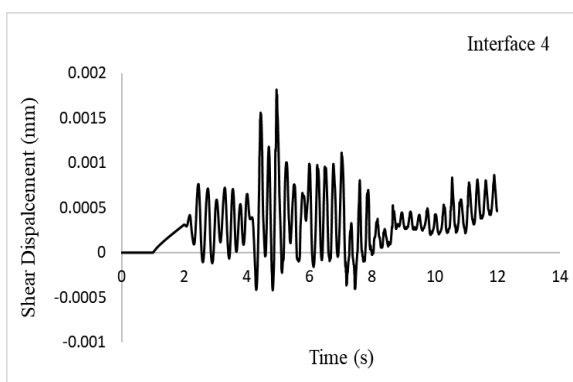
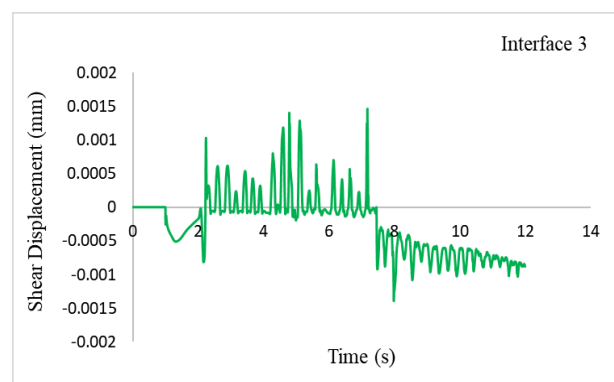
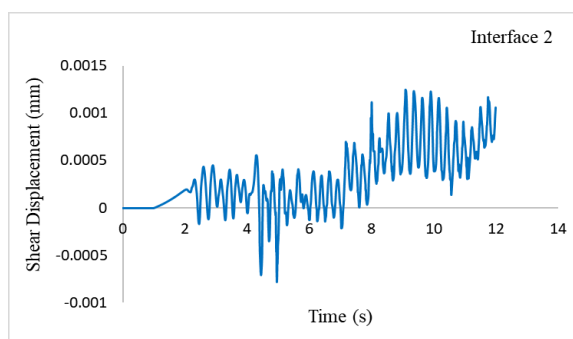
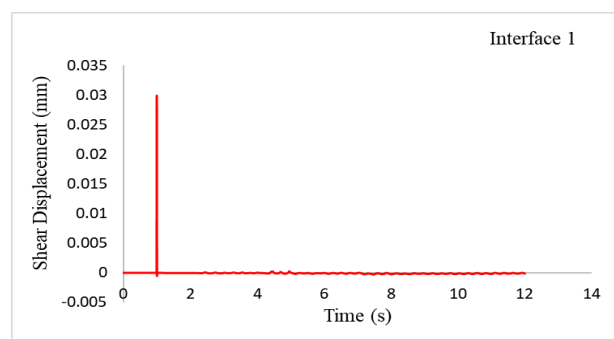


با افزودن الیاف پلی پروپیلن مشخص شد که مقادیر پایین، به ویژه در نسبت حجمی ۰/۷ درصد، کارایی مطلوبی در کاهش جابجایی‌های برشی ندارند و حتی در برخی رکوردها به افزایش نسبی آن‌ها انجامیده است. این رفتار نشان می‌دهد که به کارگیری مقدار اندک الیاف به تنهایی برای مهار تغییر شکل‌های برشی کافی نیست و دستیابی به عملکرد لرزه‌ای بهینه نیازمند استفاده از درصدهای بالاتر است. بررسی تاریخچه زمانی پاسخ در حالت بدون الیاف تحت رکورد Kobe که در شکل ۱۷ ارائه شده است، آشکار ساخت که نبود الیاف موجب بروز نوسانات شدید و تکرار شونده در جابجایی برشی می‌شود. این نوسانات، تمرکز انرژی را در نقاط بحرانی افزایش داده و احتمال وقوع شکست ترد در درزه‌ها را به طور قابل توجهی بالا می‌برد.

در مقابل، حضور الیاف در مقادیر بالاتر نه تنها سبب کاهش دامنه جابجایی‌ها می‌شود، بلکه پاسخ دینامیکی سیستم را یکنواخت‌تر ساخته و ظرفیت جذب انرژی درزه‌ها را افزایش می‌دهد. از منظر مهندسی، این نتایج اهمیت انتخاب درصد حجمی بهینه الیاف، حدود ۱/۵ درصد، را در بهبود عملکرد لرزه‌ای پوشش سگمنتال تونل‌ها تأیید می‌کند. همچنین، یافته‌ها نشان می‌دهد که رکوردهایی مشابه زلزله Kobe باید به عنوان سناریوهای بحرانی در طراحی لرزه‌ای مدنظر قرار گیرند تا مقاومت و پایداری اتصال سگمنت‌ها در برابر ارتعاشات شدید تضمین شود.

این تحلیل به طور کلی بیانگر آن است که در کنار توجه به تنش‌های نرمال، بررسی دقیق جابجایی‌های برشی نیز در طراحی لرزه‌ای پوشش سگمنتال تونل‌ها ضروری است. استفاده از الیاف پلی پروپیلن با درصد بهینه می‌تواند رویکردی کارآمد برای کاهش تغییر شکل‌های بحرانی، جلوگیری از شکست ترد و افزایش ایمنی سازه‌های زیرزمینی در برابر زلزله‌های شدید باشد.

همان‌گونه که در نمودارهای نیرو-جابجایی مشاهده می‌شود، افزایش درصد الیاف باعث تغییر تدریجی از رفتار ترد به رفتار نرم‌تر شده است. شیب کاهش نیرو پس از نقطه اوج، در نمونه‌های حاوی الیاف کمتر است که نشان‌دهنده افزایش ظرفیت جذب انرژی و شکل‌پذیری مصالح است. این ویژگی در طراحی لرزه‌ای تونل‌ها اهمیت زیادی دارد زیرا می‌تواند منجر به تأخیر در گسیختگی ناگهانی درزه‌ها شود.



شکل ۱۷- تاریخچه بیشینه جابجایی برشی درزهای رینگ تونل در حالت صفر درصد الیاف تحت زلزله Kobe

۸- نگاهی بر آیین نامه ACI 544.7R-16

آیین نامه [40] ACI 544.7R-16 یکی از منابع معتبر بین المللی در طراحی و اجرای مقاطع پیش ساخته بتن الیافی به ویژه در پوشش سگمنتال تونل ها محسوب می شود. این آیین نامه علاوه بر ارائه اصول طراحی، به طور خاص بر نحوه ی تحلیل رفتار درزهای طولی تحت بارهای مرکب محوری و خمشی تمرکز دارد و ابزار اصلی آن، دیاگرام های برهم کنش لنگر- نیرو است. این دیاگرام ها با تقسیم بندی رفتار درزه به سه ناحیه ی اصلی (A، B و C) امکان ارزیابی ظرفیت و وضعیت عملکرد مقطع را فراهم می سازند: ناحیه A: مقطع عمدتاً تحت فشار محوری است و نقش الیاف در محدودسازی ترک های اولیه پررنگ تر می شود. ناحیه B: مقطع درگیر بارگذاری ترکیبی محوری- خمشی است؛ در این شرایط ظرفیت جذب انرژی بتن الیافی و بهبود شکل پذیری، اهمیت کلیدی دارند.

ناحیه C: ناحیه آستانه شکست و گسیختگی است که مشخص کننده حدود عملکرد ایمن درزه محسوب می شود.

آیین‌نامه برای هر ناحیه روابط تحلیلی جداگان‌های ارائه کرده است (معادلات ۱۹ تا ۴۳). این روابط در واقع شرایط تعادل بین نیروهای محوری و خمشی را تحت مقاومت‌های فشاری و کششی بتن الیافی بیان می‌کنند. به عنوان مثال، معادلات (۱۹) تا (۲۴) برای مقاطع حاوی ۰/۷٪ تا ۱/۵٪ الیاف پلی‌پروپیلن، منحنی‌های لنگر-نیرو را در ناحیه A ترسیم می‌کنند. به همین ترتیب، روابط (۳۰) تا (۳۸) شرایط نواحی B و C را توصیف کرده و بیانگر تأثیر درصد الیاف بر توسعه دامنه برهم‌کنش می‌باشند.

PFRC 0.7%:

$$f_c = 41.1 \text{ MPa} \quad b = 250 \text{ mm} \quad h = 1200 \text{ mm} \rightarrow \varphi P_n = 5869.08 \text{ kN} \quad (19)$$

PFRC 1%:

$$f_c = 43.11 \text{ MPa} \quad b = 250 \text{ mm} \quad h = 1200 \text{ mm} \rightarrow \varphi P_n = 6156.108 \text{ kN} \quad (20)$$

PFRC 1.5%:

$$f_c = 44.77 \text{ MPa} \quad b = 250 \text{ mm} \quad h = 1200 \text{ mm} \rightarrow \varphi P_n = 6393.156 \text{ kN} \quad (21)$$

$$C_c = f_c \frac{bh}{2} \left(1 + \frac{c-h}{c} \right) \quad (22)$$

$$P_n = C_c \rightarrow 0.68 f_c b h = f_c \frac{bh}{2} \left(1 + \frac{c-h}{c} \right) \rightarrow c = 1.562 h P_n = C_c \quad (23)$$

$$f_{bot} = \frac{c-h}{c} f_c = \frac{0.562}{1.562} f_c = 0.36 f_c \quad (24)$$

$$y_c = \frac{h(2 \times 0.36 f_c + f_c)}{3(f_c + 0.36 f_c)} = \frac{1.72 h f_c}{4.08 f_c} \rightarrow y_c = 0.421 h \quad (25)$$

$$C_c = \frac{(1 + 0.36) f_c}{2} b h = 0.68 f_c b h \quad (26)$$

$$M_n = C_c \left(\frac{h}{2} - y_c \right) = 0.68 f_c b h \left(\frac{h}{2} - 0.421 h \right) = 0.68 f_c b h (0.78) \quad (27)$$

$$M_n = 0.053 f_c b h^2 ; \varphi = 0.7 \rightarrow \varphi M_n = 0.037 f_c b h^2 \quad (28)$$

PFRC 0.7%:

$$f_c = 41.1 \text{ MPa} \quad b = 250 \text{ mm} \quad h = 1200 \text{ mm} \rightarrow \varphi P_n = 5869.08 \text{ kN} \quad (29)$$

$$\varphi M_n = 547.452 \text{ kN.m} \quad (30)$$

PFRC 1%:

$$f_c = 43.11 \text{ MPa} \quad b = 250 \text{ mm} \quad h = 1200 \text{ mm} \rightarrow \varphi P_n = 6156.108 \text{ kN} \quad (31)$$

$$\varphi M_n = 574.2252 \text{ kN.m} \quad (32)$$

PFRC 1.5%:

$$f_c = 44.77 \text{ MPa} \quad b = 250 \text{ mm} \quad h = 1200 \text{ mm} \rightarrow \varphi P_n = 6393.156 \text{ kN} \quad (33)$$

Point C (Fig. 20):

(34)

$$C_c = f_c \frac{bh}{2}$$

(35)

$$P_n = C_c \rightarrow P_n = f_c \frac{bh}{2} ; \varphi = 0.7$$

$$\varphi P_n = 0.35 f_c bh$$

$$M_n = C_c \left(\frac{h}{2} - \frac{h}{3} \right) = C_c \left(\frac{h}{6} \right) = \frac{f_c}{12} bh^2 \quad (36)$$

$$\varphi M_n = 0.058 f_c bh^2$$

(37)

PFRC 0.7%:

(38)

$$f_c = 41.1 \text{ MPa} \quad b = 250 \text{ mm} \quad h = 1200 \text{ mm} \rightarrow \varphi P_n = 4315.5 \text{ kN}$$

$$\varphi M_n = 858.168 \text{ kN.m}$$

(39)

PFRC 1%:

(40)

$$f_c = 43.11 \text{ MPa} \quad b = 250 \text{ mm} \quad h = 1200 \text{ mm} \rightarrow \varphi P_n = 4526.55 \text{ kN}$$

$$\varphi M_n = 900.1368 \text{ kN.m}$$

(41)

PFRC 1.5%:

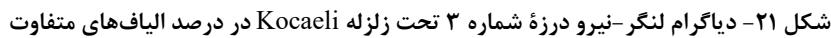
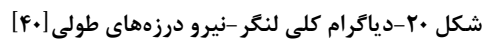
(42)

$$f_c = 44.77 \text{ MPa} \quad b = 250 \text{ mm} \quad h = 1200 \text{ mm} \rightarrow \varphi P_n = 5641.02 \text{ kN}$$

$$\varphi M_n = 934.7976 \text{ kN.m}$$

(43)

برای اعتبارسنجی آیین‌نامه در این پژوهش، درزه شماره ۳ تونل امیرکبیر به‌عنوان بحرانی‌ترین درزه تحت رکورد زلزله Kocaeli انتخاب شد. بیشینه تنش نرمال این درزه نشان داد که شرایط بحرانی مناسبی برای تحلیل فراهم است. با استفاده از نتایج نرم‌افزار ABAQUS و روابط تحلیلی [40] ACI 544.7R-16، دیاگرام‌های لنگر-نیرو برای درصدهای حجمی مختلف الیاف (۰/۷٪، ۱٪ و ۱/۵٪) ترسیم گردیده است. در شکل ۲۰، دیاگرام کلی لنگر-نیرو را به‌صورت سه ناحیه تفکیک‌شده نمایش داده شده است. همچنین در شکل ۲۱ نیز دیاگرام‌های به‌دست‌آمده برای درزه شماره ۳ تحت زلزله Kocaeli آورده شده است.

[illegible]

مطالعه تطبیقی بین آیین‌نامه و شبیه‌سازی عددی این نتیجه را تقویت می‌کند که الیاف پلی‌پروپیلن با درصد حجمی بهینه ۱/۵٪ عملکرد لرزه‌ای مطلوبی در درزه‌های طولی تونل ایجاد می‌کنند. این مقدار نه‌تنها ظرفیت باربری را افزایش داده، بلکه با توزیع یکنواخت‌تر تنش‌ها و کاهش تمرکز شکست، احتمال گسیختگی ناگهانی را به حداقل رسانده است. در مجموع، می‌توان چنین نتیجه گرفت که روابط ارائه‌شده در آیین‌نامه ACI 544.7R-16 ابزار تحلیلی قدرتمندی برای ارزیابی رفتار درزه‌های طولی هستند. همچنین استفاده از این دستورالعمل در کنار شبیه‌سازی عددی موجب افزایش دقت طراحی و بهبود ایمنی لرزه‌ای سازه‌های زیرزمینی خواهد شد.

۹- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، عملکرد لرزه‌ای درزه‌های طولی در پوشش سگمنتال تونل انتقال آب سد امیرکبیر با استفاده از مدل‌سازی عددی تاریخچه زمانی غیرخطی در نرم‌افزار ABAQUS و بهره‌گیری از مدل رفتاری بتن الیافی بررسی شده است. در این راستا، بتن تقویت‌شده با الیاف پلی‌پروپیلن در درصدهای حجمی مختلف اعتبارسنجی گردیده و اثر آن بر کاهش تغییرشکل‌ها، افزایش ظرفیت باربری و ارتقای ایمنی لرزه‌ای پوشش تونل ارزیابی شده است. لازم به ذکر است که پارامترهای زلزله مورد استفاده (دامنه شتاب و مدت دوام) بر اساس طیف طرح مناطق با خطر لرزه‌خیزی متوسط تا زیاد انتخاب شده‌اند. در این محدوده، تحلیل‌های انجام‌شده رفتار کلی سازه را به‌خوبی نمایان می‌کند و انجام تحلیل حساسیت به پارامترهای لرزه‌ای می‌تواند در تحقیقات آتی مورد بررسی قرار گیرد. نتایج بدست آمده از این مطالعه به شرح ذیل می‌باشد:

۱. در پنج زلزله از هفت زلزله بررسی‌شده، بیشینه تنش نرمال در حالت وجود ۱/۵٪ الیاف پلی‌پروپیلن مشاهده گردید که نشان‌دهنده نقش مؤثر این درصد در افزایش مقاومت و پایداری درزه‌های طولی است.
۲. نتایج نشان داد که در بیشتر رکوردهای لرزه‌ای، بیشینه تنش برشی نیز در حالت ۱/۵٪ الیاف به وقوع پیوسته است. این موضوع بیانگر بهبود رفتار برشی و افزایش مقاومت در برابر گسیختگی ترد در درزه‌ها بوده است.
۳. تمرکز بیشترین تنش فون‌مایسز در اغلب موارد در درزه شماره ۳ مشاهده گردید. با این حال، حضور الیاف باعث توزیع یکنواخت‌تر تنش‌ها و کاهش احتمال شکست ناگهانی شده است.
۴. استفاده از الیاف پلی‌پروپیلن به ویژه در مقدار ۱/۵٪ موجب کاهش تغییرمکان‌های بحرانی و یکنواخت‌تر شدن پاسخ لرزه‌ای درزه‌ها گردیده است. این ویژگی ظرفیت جذب انرژی و شکل‌پذیری سیستم را به طور محسوسی افزایش داد.
۵. نتایج نشان داد که افزایش درصد الیاف باعث گسترش نمودارهای لنگر-نیرو و ارتقای ظرفیت خمشی و محوری درزه‌ها می‌شود. بنابراین، استفاده از ۱/۵٪ الیاف، بهترین شرایط عملکرد لرزه‌ای را فراهم آورده و با توصیه‌های آیین‌نامه همسو بوده است.
۶. به طور کلی، مقدار بهینه ۱/۵٪ الیاف پلی‌پروپیلن بهترین تعادل بین کاهش تغییرشکل‌ها، افزایش مقاومت و ارتقای ایمنی لرزه‌ای را فراهم کرده و می‌تواند به عنوان راهکاری عملی در طراحی تونل‌های جدید و مقاوم‌سازی تونل‌های موجود در مناطق زلزله‌خیز مورد استفاده قرار گیرد.

کاربردهای عملی و محدودیت‌های پژوهش:

یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که استفاده از بتن الیافی با درصد بهینه‌ی حدود ۱/۵ درصد الیاف پلی‌پروپیلن می‌تواند به‌صورت مؤثر موجب افزایش شکل‌پذیری، کاهش جابجایی بحرانی و بهبود ظرفیت جذب انرژی در پوشش سگمنتال تونل‌ها شود. از

دیدگاه کاربردی، این نتایج قابلیت استفاده مستقیم در طراحی لرزه‌ای تونل‌های شهری ایران را دارند؛ به‌ویژه در پروژه‌هایی مانند مترو تهران، تبریز و مشهد که در مناطق با خطر لرزه‌خیزی متوسط تا زیاد واقع شده‌اند. استفاده از این نتایج می‌تواند به کاهش ضخامت پوشش، صرفه‌جویی در مصرف فولاد و بهبود ایمنی لرزه‌ای سازه‌های زیرزمینی منجر شود.

با این حال، باید توجه داشت که در مدل عددی این پژوهش، برخی محدودیت‌ها وجود داشته است؛ از جمله عدم لحاظ اندرکنش آب-سازه، فرض خشک بودن محیط اطراف تونل، و ساده‌سازی رفتار تماسی بین سگمنت‌ها. پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آتی، اثر اندرکنش هیدرودینامیکی آب زیرزمینی، رفتار دینامیکی سه‌بعدی خاک، و استفاده از مدل‌های پیشرفته‌تر تماس بین سگمنت‌ها مورد بررسی قرار گیرد تا درک دقیق‌تری از رفتار واقعی پوشش سگمنتال حاصل شود.

۱۰- مراجع

- [1] Dowding, C.H. & Rosen, A. (1978). "Damage to rock tunnels from earthquake shaking" *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, 104(GT2), pp.175–191.
- [2] Okamoto, S. (1984). "Introduction to Earthquake Engineering" University of Tokyo Press.
- [3] Owen, G.N. & Scholl, R.E. (1981). "Earthquake engineering of large underground structures" FHWA/RD-80/195.
- [4] Sharma, S. & Judd, W.R., (1991). "Underground openings and earthquakes" *Tunnelling and Underground Space Technology*, 6(3), pp.177–193.
- [5] Wang, J.N. (2001). "Seismic design of tunnels: A simple state-of-the-art design approach" Parsons Brinckerhoff.
- [6] Hashash, Y.M.A., Hook, J.J. & Schmidt, B. (2001). "Seismic design and analysis of underground structures" *Tunnelling and Underground Space Technology*, 16.
- [7] Hashash, Y.M.A. & Romero-Ardiz, M.I. (2014). "Seismic design of tunnels" *Encyclopedia of Earthquake Engineering*, Springer, pp.1–29.
- [8] Monier, J. (1867). "Patent for iron-reinforced concrete troughs" France Patent, July 16.
- [9] Plizzari, G. & Mindess, S. (20xx) "Fiber-reinforced concrete".
- [10] Varzavand, S. (1987). "The Study of Steel Fiber Reinforced Concrete" MSc thesis. University of Northern Iowa.
- [11] Shah, S.P. & Rangan, B.V. (1970). "Effect of reinforcement on ductility of concrete" *Journal of Structural Engineering*, 96(ST6), pp.1167–1184.
- [12] Labib, W.A. (2018). *Fibre Reinforced Cement Composites*. In: *Cement Based Materials*. DOI:10.5772/intechopen.75102.
- [13] MDPI (2020). "Impact of fibres on the mechanical and durable behaviour of fibre-reinforced concrete" *Buildings*, 12(9), Article 1436.
- [14] MDPI (2022). "A review of the use of natural fibers in cement composites" *Polymers*, 14(10), Article 2043.
- [15] Springer (2024). "Enhancing mechanical properties of fibre-reinforced concrete" *Discover Civil Engineering*, 1, Article 88.

- [16] Xin, C.-L. et al. (2019). "Shaking-table tests on seismic behavior of polypropylene fiber reinforced concrete tunnel lining" *Tunnelling and Underground Space Technology*, 88, pp.1–15.
- [17] An, D. et al. (2020). "Application of fiber-reinforced concrete lining for fault-crossing tunnels" *Engineering, Construction and Architectural Management*, 12(7).
- [18] Guo, X. et al. (2024). "Seismic response of shield tunnel with double-layer lining" *Applied Sciences*, 14(12), 5318.
- [19] Zhang, S. et al. (2024). "Experimental investigation of seismic performance of PFRC tunnel members" *KSCE Journal of Civil Engineering*.
- [20] Zhang, Z. et al. (2024). "Damage prediction for tunnel lining using FRC under train loading" *Tunnelling and Underground Space Technology*, 28(11), pp.2534–2574.
- [21] Conforti, A., Tiberti, G. & Plizzari, G. (2017) "Precast tunnel segments reinforced by macro-synthetic fibers" *Tunnelling and Underground Space Technology*, 63, pp.1–11.
- [22] Linjie, K. et al. (2023). "Application prospect analysis of hybrid fiber for tunnel segments" *International Journal of Infrastructure Research and Management*, 11(2), pp.63–73.
- [23] Wang, Z. et al. (2025). "Mechanical properties of steel fiber-reinforced concrete tunnel secondary lining" *Buildings*, 15(14).
- [24] Qiu, M. et al. (2020). "Effect of reinforcement ratio and fiber properties on UHPC tension behaviour" *Construction and Building Materials*, 256, 119311.
- [25] JP, A.D.K. & Sakthieswaran, N. (2015). "Strength and stability of GGBS–red-mud geopolymer concrete with hybrid fibres" *Indian Concrete Journal*, p.66.
- [26] Fischer, O. (2015). "Soil–structure interaction in tunnel lining analyses" *Geotechnik*, 38(2), pp.134–145.
- [27] CEN (2004) *Eurocode 2: Design of Concrete Structures – Part 1-1*. European Committee for Standardization.
- [28] Hsu, L.S. & Hsu, C.T. (1994). "Complete stress-strain behavior of high-strength concrete" *Magazine of Concrete Research*, 46(169), pp.301–312.
- [29] Lubliner, J., Oliver, J., Oller, S. & Onate, E. (1989). "A plastic-damage model for concrete" *International Journal of Solids and Structures*, 25(3), pp.299–326.
- [30] Lee, J. & Fenves, G.L. (1998). "Plastic-damage model for cyclic loading of concrete structures" *Journal of Engineering Mechanics*, 124(8), pp.892–900.
- [31] Dassault Systèmes (2023). "ABAQUS Analysis User's Manual" Version 2023.
- [32] fib (2010). *fib Model Code 2010*. Vol. 1.
- [33] AFTES (1999). "The design and sizing of precast concrete segments installed behind a TBM".
- [34] Choi, Y. & Yuan, R.L. (2005). "Relationship between splitting tensile and compressive strength of GFRC and PFRC" *Cement and Concrete Research*, 35(8), pp.1587–1591.
- [35] Chi, Y., et al., (2017). "Finite element modeling of steel-polypropylene hybrid fiber reinforced concrete using modified concrete damaged plasticity". *Engineering Structures*, 148: p. 23-35.
- [36] Sahel (1388) "Geology report of Karaj water transfer tunnel to Tehran", Piece K–BR.
- [37] Group, I.C. (2004), *UDEC Version 4.1 User's manual*.
- [38] Emadi, R. (2019) *Von Mises*. Available at: <http://pinion.ir>

- [39] Koyama, Y. (2003) “*Present status and technology of shield tunneling method in Japan*” *Tunnelling and Underground Space Technology*, 18(2), pp.145–159.
- [40] American Concrete Institute (2016) “*ACI 544.7R-16: Report on Design and Construction of Fiber-Reinforced Concrete Elevated Slabs*” Farmington Hills, MI: ACI.