

بررسی عددی رفتار دال مسلح شده با الیاف فولادی به منظور بکارگیری در خطوط ریلی بدون بالاست

مقاله پژوهشی

مرتضی اسماعیلی*، استاد، دانشکده مهندسی راه آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

احمد مسعودنژاد، دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی راه آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: m_esmaeili@iust.ac.ir

دریافت: ۹۹/۰۵/۲۷ - پذیرش: ۹۹/۱۰/۲۵

صفحه ۸۴-۶۳

چکیده

بکارگیری الیاف در سازه‌های بتن آرمه بجای آرماتور و یا در ترکیب با آن‌ها دارای مزایایی از جمله افزایش انعطاف پذیری، جذب انرژی و کنترل ترک می‌باشد. مطالعات آزمایشگاهی در خصوص عملکرد دال‌ها با الیاف فولادی صورت گرفته لیکن مطالعه عددی مشخصی که مشخصات الیاف مستقیماً در روند تحلیل وارد شود انجام نشده است. در تحقیق حاضر ترکیب الیاف فولادی با بتن به روش اجزای محدود شبیه‌سازی شده و با کار آزمایشگاهی دال‌الیافی موجود مقایسه و معتبرسازی شده است. سپس با توسعه مدل، دال‌خط الیافی متکی بر بستر ارتجاعی تحت بار متحرک شبیه‌سازی شده است. نتایج نشان‌دهنده آنست که در محدوده بار سرویس وجود الیاف تأثیر چندانی بر نیروهای برشی و خمشی دال نداشته است. در ادامه با استفاده از آیین‌نامه FIB روند طراحی بتن‌های الیافی و امکان استفاده از الیاف در دال‌خط‌ها بررسی شده است. نتایج نشان‌دهنده آنست که استفاده از الیاف به تنهایی در دال‌خط مقاومت خمشی لازم برای تحمل بارهای وارده را نداشته و عرض ترک نیز چندین برابر مقدار مجاز آیین‌نامه‌ها بدست می‌آید. در نتیجه، از ترکیب الیاف و آرماتور برای کنترل ترک استفاده شده و گراف‌های طراحی ترکیب الیاف و آرماتور در دال‌خط بدست آمده است. نتایج نشان‌دهنده آنست که با افزودن الیاف، میزان آرماتور مورد نیاز کمی کاهش و عرض ترک مقدار قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد. برای مثال در شرایط بار محوری ۲۵ تن، سرعت بار یکواتر بر ساعت ۱۲۰ و سختی ۲۰۰۰۰ با درصد‌های حجمی الیاف ۰/۲۵، ۰/۵ و ۰/۷۵، آرماتور مصرفی ۳/۵، ۴/۹ و ۶/۳ درصد کاهش و عرض ترک بترتیب ۳۰، ۲۶ و ۳۵ درصد کاهش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: روسازی صلب راه آهن، بتن الیافی، الیاف فولادی، روش اجزای محدود

۱- مقدمه

به عنوان یکی از اجزای مهم حمل و نقل ریلی، استفاده از خطوط ریلی بدون بالاست بجای سیستم روسازی متداول بالاستی مورد توجه قرار گرفته است. از مزایای سیستم روسازی بدون بالاست می‌توان به سختی جانبی زیاد، کاهش ریسک کمانش، ارتفاع تمام شده کمتر (که

امروزه در کشورهای پیشرفته دنیا سیستم حمل و نقل ریلی نقش بسزایی در جابجایی بار و مسافر دارد. یکی از مسایل مهم در توسعه سیستم حمل و نقل ریلی، نیاز به بهبود سرعت و افزایش ظرفیت در این خطوط است. در این راستا با بازنگری در طراحی و اجرای خطوط ریلی

آزمایشگاهی در خصوص نحوه عملکرد الیاف فولادی در دال‌ها صورت گرفته لیکن کار عددی مشخصی که بتواند تأثیر وجود الیاف را بر رفتار مکانیکی دال خط‌ها نشان دهد، صورت نگرفته است. بطور مثال در تحقیق انجام شده توسط **Barros** و **Figueiras**، رفتار مکانیکی دال تقویت شده با ۴۰ کیلوگرم بر مترمکعب الیاف فولادی مورد مطالعه قرار گرفته است. آن‌ها مطابقت بسیار خوبی بین منحنی تغییر شکل - بار آزمایشگاهی با منحنی تغییر شکل - بار تحلیل المان محدود به دست آورده و همچنین رفتار ترک خوردگی دال را پیش بینی کرده و اثر سختی بستر (مدول بستر) را روی آن بررسی کرده‌اند. (**Figueiras and Barros.2001**) و در همین راستا بکارگیری الیاف فولادی در دال خط خطوط ریلی در برخی از کشورهای دنیا مد نظر قرار گرفته است که بطور مثال می‌توان به پروژه بازسازی تقاطع مسیر در شهر **Newmarket** که بخش مهمی از پروژه گسترش حمل‌ونقل ریلی ایالت اوکلند اشاره کرد. در این مطالعات استفاده از الیاف **RC-80/60-BN** شرکت **درامیکس** و با حجم مصرفی ۴۰ کیلوگرم در متر مکعب، باعث صرفه جویی زمانی در اوج بار ترافیکی شده است. در تحقیق حاضر الیاف بصورت مستقیم با رفتار الاستوپلاستیک درون مصالح بتنی با استفاده از تکنیک خسارت پلاستیک بتن مدل سازی گردیده است. در گام نخست رفتار بار تغییر شکل تا نقطه شکست در دال مورد مطالعه قرار گرفته و نتایج آن با کار آزمایشگاهی خالو و همکاران در دانشگاه شریف (**Khaloo et al . 2005**) مقایسه و معتبرسازی شده است. سپس با توسعه مدل نرم افزاری، دال خط خطوط ریلی در شرایط متکی بر بستر ارتجاعی تحت اثر بار متحرک عبوری شبیه سازی و تأثیر الیاف فولادی بر روی رفتار بار - تغییر مکان، نیروهای برشی و لنگر خمشی مورد بررسی قرار گرفته است. در ادامه بدلیل حجم بالای حل عددی با استفاده از المان **Solid**، تحلیل دال خط با استفاده از المان پوسته انجام گرفته است. در ادامه با توجه به مطابقت نتایج المان **Solid** و پوسته، دال خط به صورت المان پوسته تحت بار منحرک قطار شبیه سازی شده و روند تحلیل دال خط برای بارهای محوری ۱۵، ۲۵، ۳۰ تن، با سرعت‌های ۸۰، ۱۲۰ و ۲۰۰ کیلومتر بر ساعت و مدول عکس‌العمل بستر ۵۰۰۰ و ۲۰۰۰۰ و ۱۰۰۰۰۰ کیلو نیوتن بر متر مکعب

فضای بیشتری برای خطوط بالاسری و بارهای بلند ایجاد می‌کند) و کاهش هزینه احداث تونل‌ها، امکان ایجاد هندسه دقیق در زمان اجرا و کاهش نیاز به تنظیم‌های مجدد اشاره کرد. از طرفی چون در خطوط بدون بالاست، مصالح بالاست حذف شده‌اند، بنابراین حجم عمده فعالیت‌های مرتبط با این لایه نیز از بین رفته و به همین دلیل هزینه تعمیر و نگهداری خطوط بدون بالاست به مقدار قابل توجهی از هزینه خطوط بالاستی کمتر است.

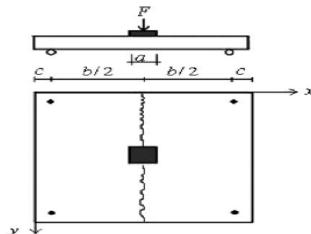
در کنار مزایای فراوان، سیستم‌های روسازی بدون بالاست (دال خط) دارای معایب و مشکلاتی در اجرا و نگهداری هستند. یکی از این مشکلات، ترک‌های ناشی از عبور بار و آسیب‌های محیطی است بدین‌صورت که ترک در دال خط و دال زیر سازی تبدیل به کانال ورودی مواد خورنده و مضر شده و در محیط دارای کلر یا دی اکسید کربن، فولاد در دال دچار خوردگی خواهد شد. در ادامه انبساط مصالح فولادی، گسترش ترک و در نتیجه کاهش دوام سازه ای بتنی را به دنبال دارد. (**Yongjiang and Huajian.2009**) در راستای حل مشکل ترک خوردگی بتن، استفاده از الیاف بدلیل افزایش مقاومت کششی، کنترل گسترش ترک‌ها و افزایش طاقت بتن و تحمل تغییر شکل‌های زیاد پس از نقطه حداکثر تنش در یک مقطع ترک خورده مورد توجه قرار گرفته و در این راستا مطالعات گسترده عددی و آزمایشگاهی بر روی بتن الیافی صورت گرفته است. به عنوان مثال **Z. Xu** به مطالعه خواص کششی دینامیکی بتن تقویت شده با الیاف فولادی با تست آزمون شکافت سقوط وزنه پرداخته و افزایش مقاومت کششی و انرژی شکست تحت هر دو تست استاتیکی و دینامیکی در نمونه بتن الیافی با الیاف قلاب دار را گزارش نموده است (**Xu and Hao 2011**). در مقاله دیگری **GinFrer** و همکاران به بررسی رفتار مکانیکی، دینامیکی و میرایی بتن الیافی و تأثیر الیاف فولادی و کربنی بر روی خواص مکانیکی بتن حاوی دوده سیلیس پرداخته‌اند. در تحقیق مذکور نتایج بصورت کاهش فرکانس تشدید نمونه‌های بتنی با الیاف فولادی و افزایش اندک در فرکانس تشدید نمونه‌های بتنی با افزودن الیاف کربنی ارائه شده است. (**Giner et al . 2011**) این مصالح با هدف افزایش باربری و کنترل ترک در دال خط‌ها بکار گرفته شده است. برخی کارهای

بنابراین برای رفع این مشکل، از نرم افزار MATLAB برای ایجاد تعداد الیاف لازم به صورت تصادفی استفاده شده و برنامه نوشته شده در نرم افزار المان محدود پیاده سازی و الیاف مورد نظر ساخته می شود.

۲-۱- رفتار آزمایشگاهی دال مسلح شده با الیاف

فولادی

در این بخش به جهت استفاده از مشخصات کار آزمایشگاهی انجام شده توسط خالو و همکاران (Khaloo et al . 2005) به منظور اعتبارسنجی مدل عددی خلاصه‌ای از کار یاد شده با جزئیات مربوطه ارائه می‌گردد. در تحقیق مذکور تأثیر مقاومت بتن، درصد و نسبت طول به قطر معادل الیاف فولادی بر مقاومت و شکل پذیری دال‌های بتنی مورد بررسی قرار گرفته است. چهارده مخلوط بتن با چهار درصد الیاف مختلف، دو طول الیاف متفاوت و دو مقاومت فشاری بتن مد نظر قرار گرفته است. دال‌ها به شکل مربع و ابعاد ۸ X ۸۲ X ۸۲ سانتی-متر ساخته شده و مطابق شکل ۱ در چهار گوشه روی تکیه گاه‌های نقطه ای غلتکی با فاصله مرکز تا مرکز ۶۸ سانتیمتر قرار گرفته‌اند. بار به کمک یک جک هیدرولیکی به صفحه ای فولادی به ابعاد ۸ X ۸ X ۱ سانتیمتر در بخش میانی وجه فوقانی نمونه بر آن اعمال می‌شود. جابجایی در نقطه بارگذاری با سرعت ۱/۵ میلی متر بر دقیقه افزایش یافته و از یک LVDT حساس برای اندازه گیری تغییر شکل در مرکز دال استفاده شده و در هر لحظه نیرو (F) و تغییر مکان صفحه فولادی نسبت به تکیه‌گاه‌ها (w) قرائت شده است. (Khaloo et al . 2005)



شکل ۱. دال‌ها در چهار گوشه روی تکیه گاه‌های غلتکی و بار وارده بر مرکز دال

برابر ۰/۵، ۱ و ۱/۵ در نظر گرفته شده که متناظر با مقدار وزنی ۲۵، ۵۰ و ۷۵ کیلوگرم الیاف فولادی است. در ساخت بتن از سیمان تپ یک همراه با مصالح رودخانه ای استفاده شده است. ماسه مورد استفاده دارای مدول

انجام شده است. از میان آیین نامه‌های موجود در زمینه طراحی بتن الیافی، آیین نامه FIB انتخاب و طراحی خمشی، برشی و کنترل ترک دال خط با بتن الیافی در درصدهای حجمی الیاف ۰/۲۵ و ۰/۵ و ۰/۷۵ گراف‌های طراحی ارائه گردیده است.

۲- توسعه مدل عددی اجزاء محدود جهت تحلیل

دال بتنی الیافی

در این بخش در ابتدا از بین کار های آزمایشگاهی انجام شده در زمینه دال الیافی، کار آزمایشگاهی خالو و همکاران (Khaloo et al . 2005) توضیح داده می‌شود. سپس مدل رفتاری بتن الیافی در نرم افزار المان محدود توسعه داده شده و در ادامه برای اعتبار سنجی مدل عددی، از کار آزمایشگاهی یاد شده استفاده می‌شود. برای توسعه مدل عددی اجزاء محدود، در این مقاله از نرم افزار ABAQUS استفاده شده است. یک برنامه‌ی شبیه ساز قوی مهندسی بر اساس روش المان محدود که قادر به حل مسائل مختلفی در محدوده خطی و پیچیده غیر خطی است. یکی از قابلیت‌های مهم این نرم افزار، مدل سازی مواد کامپوزیتی همچون بتن الیافی است که در آن الیاف در داخل بتن مدفون شده‌اند. برای مدل سازی بتن الیافی در ابتدا بایستی مدل رفتاری مناسب برای تحلیل غیر خطی بتن انتخاب شده و با توجه به مقاومت مشخصه بتن آزمایشگاهی، پارامترهای لازم مدل رفتاری مشخص شوند. در ادامه بایستی الیاف با خاصیت الاستوپلاستیک بصورت تصادفی و به تعداد لازم در داخل بتن جاسازی شوند لازم به ذکر است که این نرم افزار قادر به تولید تصادفی الیاف مورد نیاز نیست و

مقاومت فشاری نمونه ساده استوانه‌ای ۳۰۴ × ۱۵۲ میلی‌متری بتن مورد استفاده در دال برابر ۳۰ و ۴۵ مگاپاسکال در سن ۲۸ روز است. درصد حجمی الیاف فولادی، یعنی نسبت حجم الیاف به حجم ماتریس بتنی

مورد استفاده دارای مقطع مستطیلی و ساخت کارخانه Jesagi Hankook کره جنوبی بوده و خواص آن در جدول ۱ ارائه شده است.

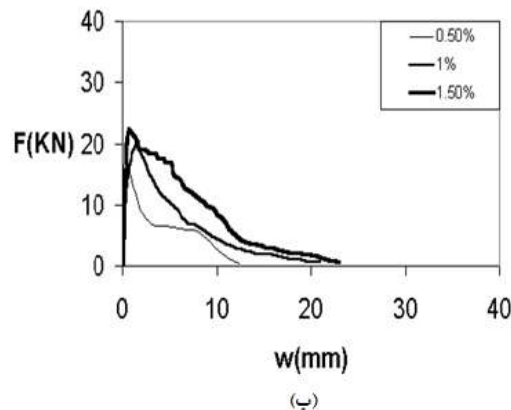
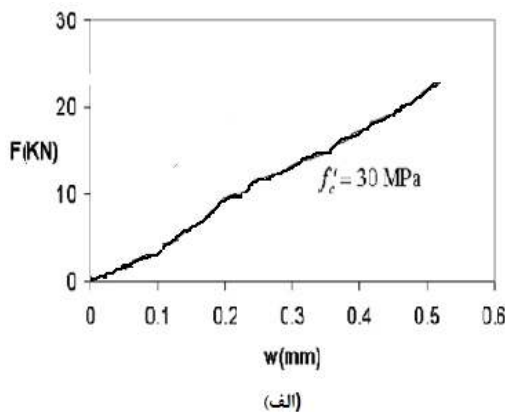
نرمی ۲/۷ و حداکثر اندازه دانه‌ها ۱۹ میلی متر بوده است. فوق روان کننده مصرفی نیز از مشخصات ASTM C494F پیروی می‌کند. الیاف موج دار فولادی

جدول ۱. مشخصات الیاف فولادی مورد استفاده در ترکیب بتن

Fibres type	Length (L,mm)	Width (W,mm)	Thickness (T,mm)	Equivalent diameter (d_f ,mm)	Aspect ratio (L/d_f)
JC۲۵	۲۵	.۸	۰/۳۵	۰/۵۹۷	۴۱/۹

نمی‌دهند. اثر اصلی الیاف در ظرفیت جذب انرژی است که در این مطالعه مورد بررسی قرار گرفته است. الیاف فولادی ظرفیت جذب انرژی را که توسط سطح زیر منحنی بار- تغییر شکل اندازه گیری می‌شود را افزایش می‌دهند. همچنین، با افزایش الیاف، نرخ رشد جذب کل انرژی کاهش یافته است.

همان‌گونه که در شکل ۲ ملاحظه می‌شود، وجود الیاف فولادی در بتن اثر قابل توجهی بر مقاومت نهایی دال ندارد و تغییرات کوچک در استحکام نهایی به علت تغییر در مقاومت فشاری بتن ناشی از افزودن الیاف بوده است. اساساً مقاومت نهایی، متناظر با شروع ترک‌های بزرگ است و الیاف، ویژگی‌های خمشی دال را قبل از ترک خوردگی بطور قابل توجهی تحت تأثیر قرار



شکل ۲. نمودار بار - تغییر مکان دال با بتن مشخصه ۳۰ مگاپاسکال (الف) بتن ساده (ب) بتن حاوی الیاف ۲۵

تغییر مکانی در راستای قائم بر مرکز صفحه صلب قرار گرفته در وسط دال ایجاد می‌شود. سرعت بارگذاری ۱/۵ میلی‌متر بر ثانیه بوده و تغییر مکانی در محدوده نتایج کار آزمایشگاهی بصورت خطی بر آن اعمال می‌گردد.

۳-۲-۳- مدل رفتاری بتن

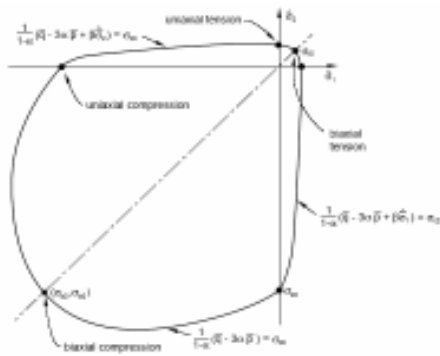
تعیین رفتار غیر خطی بتن مهم‌ترین مرحله در مدل سازی عددی سازه‌های بتن‌آرمه است. در نرم افزار المان

۲-۲-۲- المان بندی مورد استفاده در تحلیل عددی دال

در تحقیق حاضر برای مدل سازی بتن از المان هشت گرهی خطی C_3D_8 با اندازه تقریبی ۳۰ میلی‌متر و برای مدل سازی الیاف فولادی از المان دو گرهی خرابایی T_3D_2 با اندازه تقریبی ۱۰ میلی‌متری استفاده شده است. الیاف با استفاده از تکنیک نواحی مدفون به بتن متصل شده‌اند. مدل سازی بتن و الیاف مطابق مدل رفتاری الاستوپلاستیک بیان شده در قسمت قبل انجام شد. مطابق کار آزمایشگاهی صورت گرفته، بار از نوع

بکارگیری این مدل رفتاری بهتر است المان بندی با استفاده از تکنیک المان بندی تطبیق پذیر انجام شود. (Martin.2010). مدل خسارت پلاستیک بتن تعمیم یافته معیار شکست دراگر- پراگر (Drucker-Pruger) است. این معیار یک سطح شکست مخروطی داشته، و یکی از مدل های رفتاری قوی در مدل سازی شکست بتن آرمه است. (Kmieciak and Kaminski. 2011).

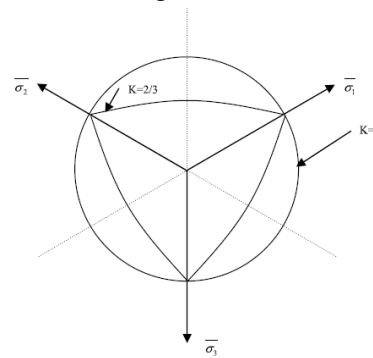
طبق اصلاح صورت پذیرفته در مدل خسارت پلاستیک، لزومی بر دایروی بودن صفحه دویاتوریک وجود نداشته و این صفحه می تواند شکل دیگری نیز داشته باشد (شکل ۳-الف). شکل این صفحه با ضریب Kc تعیین می شود این ضریب مقداری بیش از ۰/۵ دارد و وقتی مساوی ۱ باشد شکل دایره و یا همان معیار دراگر- پراگر معمول بدست می آید. از لحاظ فیزیکی، Kc نسبت فاصله بین محور هیدرو استاتیک با مریدین فشاری و مریدین کششی است. در مدل خسارت پلاستیک بتن مقدار پیش فرض این ضریب ۰/۶۶ است که بر اساس آزمایش های فشاری سه محوره و تحلیل های عددی پیشنهاد شده است. در این مدل شکل مریدین ها نیز در فضای تنش تغییر کرده است و آزمایش ها نشان گر این است که مریدین ها منحنی شکل هستند (Kmieciak and Kaminski. 2011). سطح تسلیم در فضای تنش دو بعدی برای مدل خسارت پلاستیک بتن در شکل ۳-ب نشان داده شده است.



(ب)

محدود ABAQUS، رفتار غیر خطی مصالح ترد را می توان به سه روش؛ مدل ترک پخشی، مدل شکست ترد و مدل خسارت پلاستیک بتن تعریف کرد (ABAQUS 6.10 Analysis User Manual Volume III . 2010). در این مقاله برای مدل سازی دال بتنی الیافی از تکنیک خسارت پلاستیک بتن استفاده شده است. در این بخش به مفاهیم و نحوه تعیین پارامترهای این مدل و منحنی تنش کرنش فشاری و کششی بتن با استفاده از رفتار مقاومت فشاری تک محوره بتن پرداخته شده است. مدل خسارت پلاستیک بتن مدل رفتاری است که قابلیت نشان دادن رفتار غیر خطی و خصوصیات خرابی مواد شبه ترد همانند بتن را دارد. مدل خسارت بتن تنها مدلی است که در هر دو تحلیل استاتیکی و دینامیکی قابل استفاده است. در این مدل فرض بر آن است که ترک کششی و خردشدگی فشاری دو جنبه اصلی مکانیسم گسیختگی بتن می باشند و این مدل امکان بررسی شکست مصالح ترد تحت بارگذاری های چرخه ای (کشش و فشار متناوب) را داشته و در آن امکان بازیابی سختی در طی بارهای رفت و برگشتی وجود دارد. در مدل خسارت پلاستیک، به دلیل عدم وجود معیار گسیختگی امکان حذف المان ها در طول تحلیل ایجاد ترک، وجود ندارد ولی این مدل توانایی پیشگویی محل و جهت تشکیل ترک ها را دارا هستند.

به منظور اجتناب از خرابی های زیاد در شرایط



(الف)

شکل ۳-الف. صفحه دویاتوریک در مدل خسارت پلاستیک بتن (ب) سطح تسلیم مدل خسارت پلاستیک بتن در فضای تنش دو بعدی

بتن است. مقدار پیش فرض آن ۰/۱ است. وقتی که این عدد صفر باشد در واقع شکل مریدین تبدیل به یک خط

پتانسیل خروج از مرکزیت پلاستیک عدد کوچک مثبتی است که برابر نسبت مقاومت کششی به مقاومت فشاری

موارد مقدار آن ۳۶ یا ۴۰ فرض می‌شود (Kmiecik and Kaminski, 2011). پارامتر ویسکو الاستیک (μ) در مدل خسارت پلاستیک در واقع برای همگرایی بهتر گام‌ها تحلیل استاندارد بکار می‌رود و مقدار آن از چند بار تحلیل بدست می‌آید. μ کوچک‌ترین عدد مثبتی است که باعث همگرایی بهتر تحلیل می‌شود. این پارامتر امکان خروج تدریجی از سطح پتانسیل پلاستیک را در شرایط ناهمگرایی‌های جزئی تحلیل فراهم می‌سازد (Kmiecik and Kaminski, 2011). در این مقاله، پارامترهای مرتبط با مدل خسارت پلاستیک بتن در جدول ۲ نشان داده شده است.

راست می‌شود (معیار دراگر پراگر کلاسیک) نسبت مقاومت فشاری دو محوره بتن به مقاومت فشاری تک محوره است. نتایج حاصل از آزمایشات نشان داده است که رابطه بین مقاومت فشاری تک محوره و دو محوره بتن به شکل رابطه ۱ است. (Kmiecik and Kaminski, 2011).

$$f_{bo} = 1/16248 f_c \quad (1)$$

زاویه اتساع (ψ) شیب صفحه گسیختگی به طرف صفحه هیدرو استاتیک در صفحه مریدین است. از لحاظ فیزیکی ψ زاویه اصطکاک داخلی بتن است که در اغلب

جدول ۲. مقادیر پارامترهای مورد استفاده در مدل خسارت پلاستیک بتن

Dilation Angle	Eccentricity	fbo/fco	K	Parameter Viscosity
36	0/1	1/16	0/666	0/0001

نامه تنش و کرنش فشاری از روابط ۲ و ۳ و مدول الاستیسیته بتن از رابطه ۴ محاسبه می‌شود.

در این بخش برای تعیین نمودار تنش - کرنش فشاری بتن از مدل پیشنهادی آیین نامه یوروکد CEB_FIB model code ۱۹۹۰ استفاده شده است. در این آیین

$$\sigma_c = - \frac{\frac{E_{ci} \varepsilon_c}{E_{ci} \varepsilon_{ci}} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{ci}}\right)^2}{1 + \left(\frac{E_{ci}}{E_{ci}} - 2\right) \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{ci}}} f_{cm} \quad \text{for} \quad |\varepsilon_c| < |\varepsilon_{c,lim}| \quad (2)$$

$$\frac{\varepsilon_{c,lim}}{\varepsilon_{ci}} = \frac{1}{2} \left(\frac{1 E_{ci}}{2 E_{ci}} + 1 \right) + \left[\frac{1}{4} \left(\frac{1 E_{ci}}{2 E_{ci}} + 1 \right)^2 - \frac{1}{2} \right]^{1/2} \quad (3)$$

$$E_{ci} = E_{cu} \left[\frac{(f_{ck} + \Delta f)}{f_{cmo}} \right]^{1/3} \quad (4)$$

کشش مستقیم، می‌توان از رابطه ۵ استفاده کرد. برای تعیین این نمودار بایستی پارامترهای α_f ، E_{ci} ، $\sigma_{f,cr}$ و $\varepsilon_{f,cr}$ را که به ترتیب بیانگر مدول الاستیسیته، مقاومت کششی، کرنش شکست و پارامتر خرابی هستند، را مشخص کرد. در ضمن کرنش شکست از رابطه ۶ بدست می‌آید. مقادیر تنش - کرنش فشاری و کششی به ترتیب در جداول ۳ و ۴ ارائه گردیده‌اند.

$$\sigma_f = 0/3 \sigma_c^2$$

در روابط بالا، مقادیر $E_{cu} = 2/15 \times 10^4$ MPa و $\Delta f = 8MPa$ و $\varepsilon_{ci} = -0/0022$ و $E_{ci} = 0/85 E_{ci}$ و $f_{cmo} = 10MPa$ متناسب با مقاومت فشاری بتن در آیین نامه آمده است. در این تحقیق از مدل پیشنهادی نایال و رشید برای تعیین شکل نمودار تنش - کرنش کششی بتن استفاده شده است. برای بدست آوردن حداکثر تنش کششی در صورت در دسترس نبودن نتایج آزمایشگاهی حاصل از آزمایش شکافت استوانه و یا

(۵)

$$\varepsilon_t^{ck} = \varepsilon_t - \varepsilon_{ot}^i \quad (6)$$

در این رابطه $\varepsilon_{ot}^i = \frac{\sigma_t}{E_0}$ نشان دهنده کرنش الاستیک مصالح آسیب ندیده و ε_t کرنش کششی کلی است.

جدول ۳. مقادیر تنش - کرنش فشاری بتن

Stress $\sigma_c (MPa)$	ε_c	Inelastic strain ε_c^m	Damage (d_t)
15/58	0/0011	0/000487	0/49
20/51	0/00143	0/000658	0/50
30/00	0/00231	0/001232	0/56
17/25	0/00286	0/001974	0/78
12/55	0/00323	0/00297	0/92

جدول ۴. مقادیر تنش - کرنش کششی

Stress $\sigma_t (MPa)$	ε_t	Cracking strain ε_t^{ck}	Damage (d_t)
2/26	0/000091	0	0
1/27	0/000365	0/00029	0/80
0/1	0/0009	0/00082	0/92

جدول ۵. مشخصات الاستیک ییاف

Density (kg/m ³)	7800
Young's Module (GPa)	200
Poisson's Ratio	۰/۳

جدول ۶. مشخصات پلاستیک ییاف

Plastic strain	Yield stress
۰	۲۸۰
0/09	۳۷۰

۲-۴- مدل رفتاری ییاف

تصادفی استفاده شده است. در ادامه برنامه نوشته شده در محیط MATLAB به نرم افزار ABAQUS وارد و ییاف مورد نظر ساخته شده است. در شکل ۴ الگوریتم و منطق ریاضی تولید ییاف ملاحظه می شود. (Fang and Zhang, 2013)

ییاف در مدل عددی بصورت الاستو پلاستیک به نرم افزار معرفی شده است. رفتار الاستو پلاستیک در برگیرنده رفتار الاستیک قبل از نقطه تسلیم و رفتار پلاستیک بعد از نقطه تسلیم است. مشخصات الاستیک و پلاستیک ییاف به ترتیب در جداول ۵ و ۶ ارائه گردیده است.

۳- اعتبار سنجی مدل عددی بتن ییافی

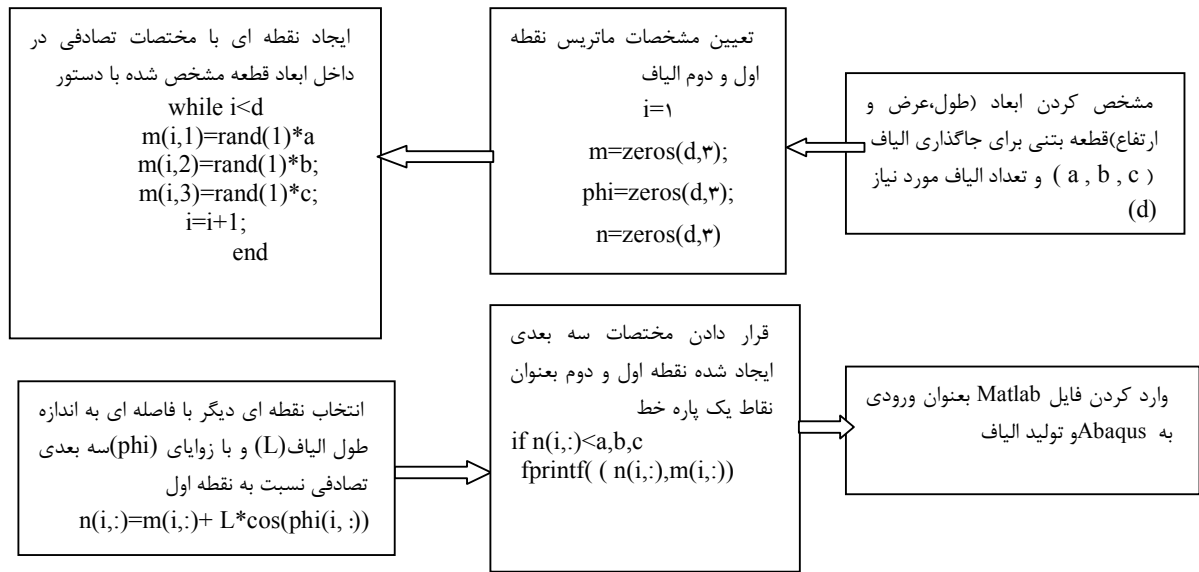
در این بخش از بین کارهای تحقیقاتی صورت گرفته، تحقیق آزمایشگاهی صورت گرفته توسط دکتر خالو در دانشگاه شریف، مورد بررسی دقیق قرار می گیرد. ویژگی این کار آزمایشگاهی نسبت به بقیه تحقیقات انجام شده، استفاده از بتن ییافی در دال است بنابراین به عنوان

۲-۵- الگوریتم تولید تصادفی ییاف در بتن

محدودیت نرم افزار ABAQUS برای مدل سازی بتن ییافی، مدل کردن ییاف بصورت تصادفی بوده است. برای رفع این مشکل، از برنامه نویسی در محیط MATLAB برای ایجاد تعداد ییاف لازم به صورت

استفاده در مرجع (Khaloo et al . 2005) مد نظر قرار گرفته و شبیه سازی عددی صورت گرفته است در ادامه مقایسه صورت گرفته میان نتایج ارائه می گردد.

مرجع اعتبار سنجی در تحقیق حاضر مورد استفاده قرار گرفته است. در این راستا با توجه به شرایط بار گذاری مشخصات بتن و ابعاد دال عینت همان تصاویر مورد

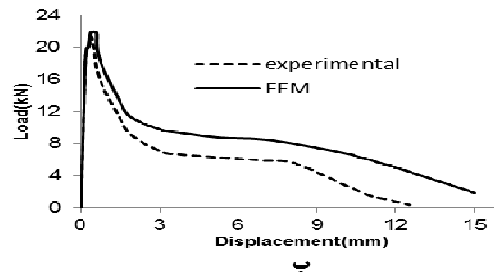
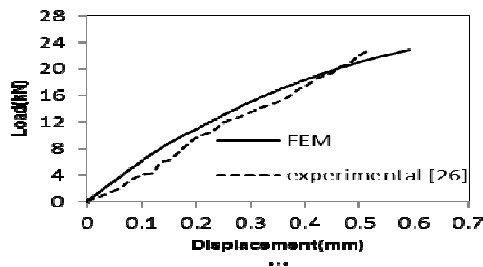


شکل ۴. الگوریتم تولید الیاف بصورت تصادفی

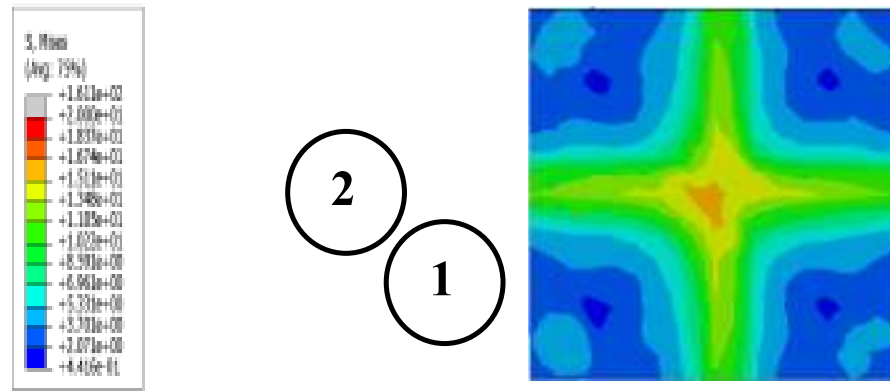
۳-۱- مقایسه نتایج تحلیل عددی و آزمایشگاهی

عددی و آزمایشگاهی دارای اختلاف در میزان سطح زیر نمودار بعد از شروع ترک در دال الیافی است. سطح زیر نمودار بار تغییر مکان معرف میزان انرژی جذب شده توسط دال است. تفاوت موجود در انرژی جذب شده توسط دال بعد از ترک، می تواند بدلیل چسبندگی کامل الیاف به بتن در مدل عددی باشد چرا که درصدی از الیاف در بتن آزمایشگاهی ممکن است در لحظه شکست دال دچار بیرون زدگی از بتن شده و تعداد الیاف موثر در لحظه ترک خوردگی در شرایط آزمایشگاهی نسبت به مدل عددی کمتر باشد. نکته دیگر می تواند به مدل رفتاری بتن در شرایط بعد از گسیختگی و عدم تطابق آن با نتایج آزمایشگاهی مربوط باشد.

برای اعتبار سنجی مدل سازی عددی دال خط بتنی الیافی و بدون الیاف، نتایج را در سه بخش نمودار بار - تغییر شکل، سطوح گسیختگی و شکست دال، و نمودار تنش - کرنش الیاف مورد بررسی قرار می دهیم. در ابتدا با توجه به شکل ۵-الف ملاحظه می شود که نمودار بار - تغییر مکان بتن ساده با مقاومت مشخصه ۳۰ مگاپاسکال در مدل عددی اجزاء محدود و نتایج آزمایشگاهی دارای روند یکسانی بوده و از نظر بار نظیر شکست مطابقت خوبی داشته و از نظر جابجایی نظیر شکست نیز دارای اختلاف اندکی است. با افزودن الیاف به میزان ۰/۵ درصد حجمی در دال بتنی مطابق شکل ۵-ب مشاهده می شود که نمودار بار - تغییر مکان در مدل



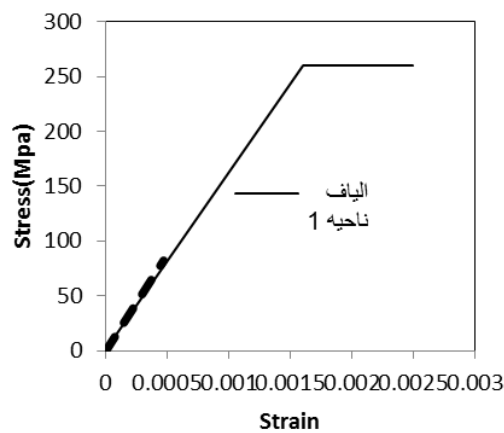
شکل ۵. نمودار بار - تغییر مکان دال بتنی با مقاومت مشخصه ۳۰ مگاپاسکال (الف) بدون الیاف (ب) با الیاف



شکل ۶. توزیع تنش بتن در دال با بتن الیافی

بار - تغییر شکل نشان می‌دهد. در عین حال الیاف منطقه ۱ کماکان در حالت الاستیک باقی مانده است. با مقایسه نتایج بدست آمده از تحلیل عدی دال با بتن الیافی و نتایج موجود آزمایشگاهی و اختلاف قابل قبول موجود بین این دو دسته در مجموع می‌توان، نتایج تحلیل عددی را رضایت بخش دانست و آن را برای تحلیل دال خط خطوط ریلی با بتن الیافی مورد استفاده قرار داد.

در ادامه همان طور که در شکل ۶ ملاحظه می‌شود خطوط شکست در مدل عددی دال بتنی نشان دهنده گسیختگی دوطرفه در وسط دال است که با نتایج کار آزمایشگاهی تطابق خوبی را نشان می‌دهد. از طرفی با توجه به شکل ۷ و مشخصات الیاف داده شده در جداول ۴ و ۵، الیاف قرار گرفته در محدوده خطوط شکست، از محدوده الاستیک گذشته و وارد مرحله پلاستیک شده است که این موضوع عملکرد صحیح الیاف را از منظر



شکل ۷. نمودار تنش - کرنش نمونه الیاف فولادی قرار گرفته در نواحی ۱ و ۲ دال بتن الیافی

۴- مدل سازی دال خط الیافی خطوط ریلی تحت بار متحرک

مشخصات رهدا (Rehda2000) استفاده شده است. بستر زیر دال برای دو حالت با بستر نرم و سخت به ترتیب با سختی بستر ۵/۰ کیلوگرم بر سانتی متر مکعب و ۳۵ کیلوگرم بر سانتی متر مکعب بصورت فنرهای خطی از گره های کف دال به زمین متصل شده است بار مرده در این بخش شامل بار مرده دال، ریل و تراورس‌ها

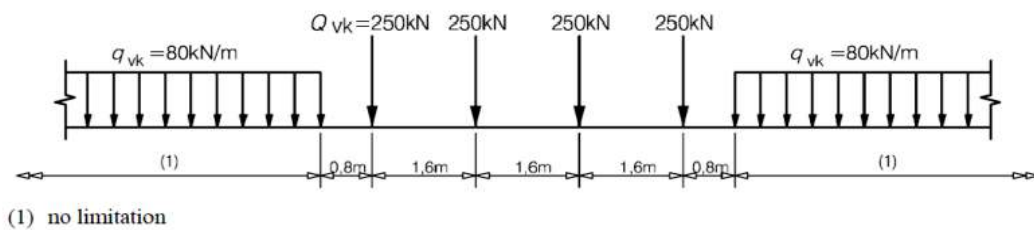
در این بخش دال خطی به ابعاد ۳/۳x۲x۳ با استفاده از المان SOLID مدل شده است. برای مدل سازی ریل از المان BEAM با مشخصات ریل ۶۰ UIC مطابق جدول ۷ استفاده شده است. با توجه به فواصل ۰/۶ متری پابند و پد زیر آنها از هم، برای اتصال ریل به دال از فنر با سختی ۴۵۰ کیلو نیوتن بر میلی متر مطابق

پیشنهاد می‌نماید. در این مقاله برای مدل سازی بار متحرک قطار، الگوی بار زنده بر روی دو ریل دال خط حرکت داده می‌شود و نتایج در اثر حرکت ترکیب بار ارائه شده در آیین‌نامه FIB به صورت ضریبدار آمده است که به ترتیب ضرایب بار مرده و زنده برابر با $1/35$ و $1/5$ هستند.

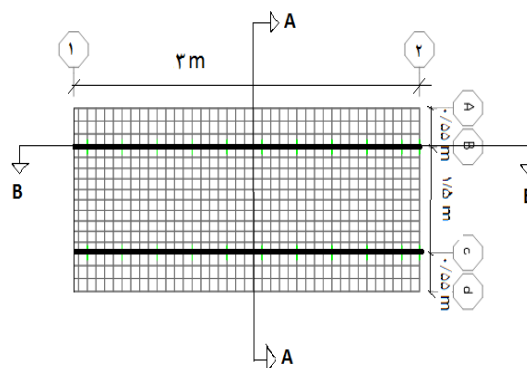
است. وزن مخصوص بتن مصرفی برابر با 2500 کیلوگرم بر متر مکعب و وزن واحد طول ریل برابر با 60 کیلوگرم در نظر گرفته شده است. الگوی بار زنده نقش مهمی در طراحی دال خط داشته و آیین‌نامه‌های مختلف بر حسب نوع بهره برداری مورد نظر الگوهایی را برای بار زنده پیشنهاد نموده‌اند. آیین‌نامه UIC به منظور مدل سازی بار ترافیکی الگوی بار LM71 مطابق شکل ۸ را

جدول ۷. مشخصات هندسی ریل UIC 60

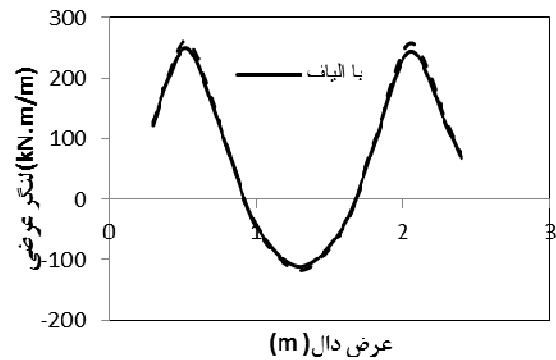
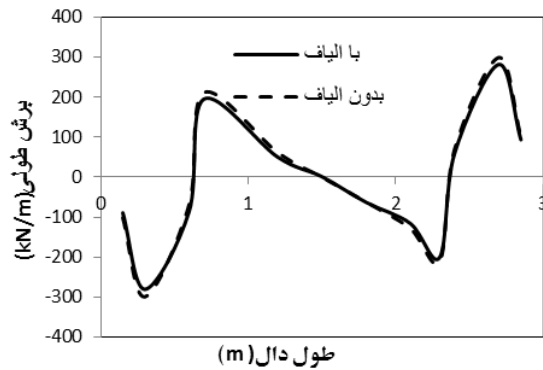
نوع مقطع	ارتفاع ریل mm	عرض پاشنه mm	عرض کلاهک mm	ضخامت جان mm	ارتفاع کلاهک mm	ارتفاع محور خنثی mm	مساحت سطح مقطع mm^2	ممان اینرسی حول محور قوی cm^4	مدول مقطع cm^3
UIC60	172	150	74/3	16/5	51	80/9	7587	3055	335/5



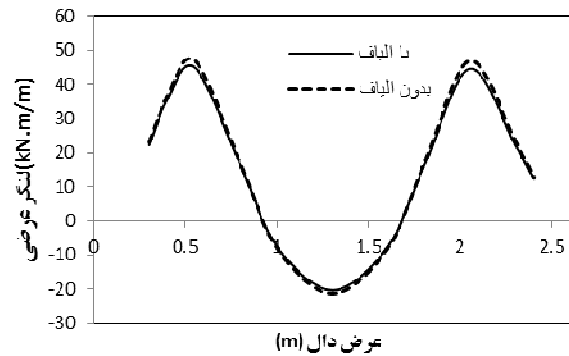
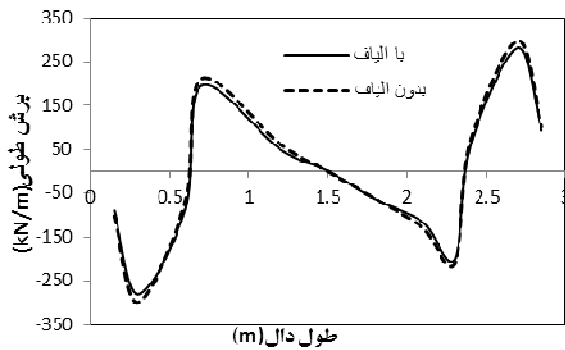
شکل ۸. مدل بارگذاری LM71



شکل ۹. مدل دال خط با بتن یابی



شکل ۱۰. مقایسه نتایج مدل سازی عددی دال خط بتن با و بدون الیاف در دال با سختی بستر $K=35 \text{ kg/cm}^3$



شکل ۱۱. مقایسه نتایج مدل سازی عددی دال خط بتن با و بدون الیاف در دال با سختی بستر $K=0/5 \text{ kg/cm}^3$

مقاصد طراحی دال خط با بتن الیافی می‌توان از تحلیل دال خط بدون الیاف استفاده نمود.

۴-۲- بررسی مدل سازی دال خط با استفاده از المان پوسته

برای کاهش حجم عملیات تحلیل دال خط بتنی، مدل سازی روسازی بتنی با استفاده از المان پوسته انجام شده است. نیروهای برشی در زیر ریل و لنگرهای خمشی در وسط دال دارای حداکثر مقدار هستند. با مقایسه نتایج تحلیل دال خط مدل سازی شده با المان SOLID و المان پوسته و نزدیک بودن نتایج آن‌ها مطابق جدول ۸ مدل سازی در ادامه روسازی بتنی دال خط با استفاده از المان پوسته انجام شده است.

۴-۱- مقایسه نتایج تحلیل دال خط با بتن الیافی و بدون الیاف

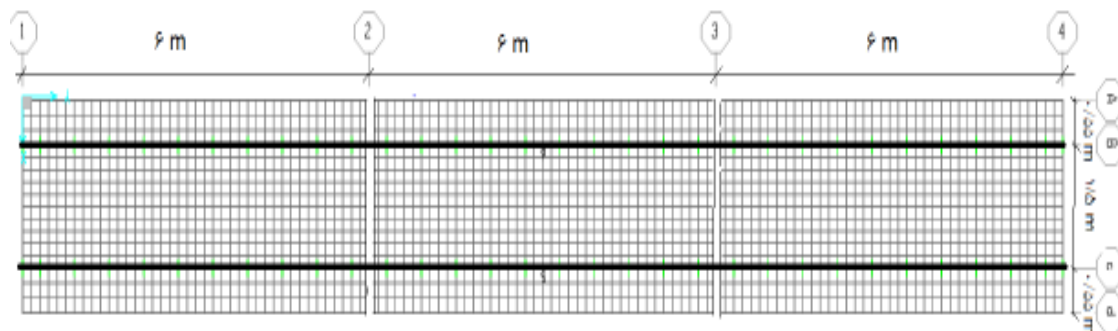
برای حالت دال با بستر سخت (۳۵ کیلوگرم بر سانتی متر مکعب) نتایج دال خط الیافی و بدون الیاف بصورت لنگر عرضی در مقطع وسط دال (A-A) و برش طولی در مقطع زیر ریل (B-B) بدست آمده است. نتایج برای بارگذاری سرویس در دال‌های بتنی با و بدون الیاف مطابق شکل ۱۰-الف و ۱۰-ب نشان می‌دهد که افزودن الیاف تأثیر چندانی در نیروهای برشی و لنگرهای خمشی وارده ندارد و حداکثر اختلاف در برش طولی در حدود ۳ درصد و در لنگر عرضی در حدود ۵ درصد است. البته مقایسه نتایج برای دال با بستر نرم (۰/۵ کیلوگرم بر سانتی متر مکعب) با تغییر شکل‌های قابل توجه در شکل‌های ۱۱-الف و ۱۱-ب نشان دهنده آن است که نیروهای برشی و لنگرهای خمشی نیز بسیار بهم نزدیکند بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که برای

جدول ۸. نتایج تلاش‌های برشی و خمشی در المان **SOLID** و پوسته

Axle load(ton)	V(km/h)	Max MOMENT		Max SHEAR	
		SOLID ELEMENT	SHELL ELEMENT	SOLID ELEMENT	SHELL ELEMENT
۲۵	80	95	94	221	218
	120	106	102	235	233
	200	135	133	252	248

نیز ۱۵۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است. بار متحرک پس از اعمال ضرایب ضربه ناشی از سرعت حرکت بر روی ریل‌ها حرکت می‌کند. اتصال ریل به دال بتنی در فواصل ۶۰ سانتیمتری با استفاده از المان فنر دو گره ایی انجام شده که در جهت محوری دارای سختی برابر سختی پد زیر ریل ۴۵۰ کیلو نیوتن بر میلی متر است و در سایر جهات آزاد است. سطح زیر دال بصورت بستر خاکی متراکم بر روی فنر گسترده قرار گرفته و مقدارمدول عکس‌العمل بستر خاک در سه حالت بستر نرم و متوسط و سخت به ترتیب با سختی‌های بستر ۵۰۰۰ و ۲۰۰۰۰ و ۱۰۰۰۰۰ کیلو نیوتن بر متر مکعب در نظر گرفته شده است برای منظور نمودن اثرات دینامیکی ناشی از عبور بار زنده، در فرایند تحلیل و طراحی، نیروی استاتیکی وارد از چرخ وسایل نقلیه ریلی، در ضربی موسوم به ضریب ضربه دینامیکی ضرب شده و نیروی شبه استاتیکی مورد استفاده در طراحی خطوط راه آهن محاسبه می‌گردد. در این تحقیق برای محاسبه ضریب ضربه، از رابطه پیشنهادی آیین نامه AREMA استفاده می‌شود.

در نمای سه بعدی دال بتنی مدل سازی شده با المان پوسته در شکل ۱۲ نشان داده شده است. برای شبیه سازی بیشتر با مدل اصلی در این پروژه سه عدد دال به طول ۶ متر مدل سازی شده است و درز بین دال‌ها ۲ سانتی متر در نظر گرفته شده است. مطابق مدل‌سازی خط به فاصله محور ریل تا محور ریل دیگر ۱/۵ متر که شامل دال بتنی است که با استفاده از المان **Shell-Thick** صورت گرفته است. طول کلی دال خط برابر ۱۸ متر و عرض آن برابر ۲/۶ متر لحاظ شده است. مش بندی دال بصورتی در نظر گرفته شده است که در محل اتصال به ریل‌ها دارای گره باشد و شکل المان‌ها بصورت مربعی و در ابعاد ۱۵ سانتیمتری ایجاد شده است. وزن مخصوص بتن مصرفی برابر با ۲۵۰۰ (کیلوگرم بر متر مکعب) و وزن واحد طول ریل برابر با ۶۰ کیلوگرم در نظر گرفته شده است. بار زنده وارده بر دال الگوی بار زنده ترافیکی LM71 است. با توجه به عملکرد جداگانه دال‌ها و سرتاسری بودن ریل بر روی آن، ریل‌ها بطول ۱۸ متر با استفاده از المان **Beam** مدل سازی شده‌اند و مشخصات مقطع ریل ۶۰ **UIC** به آن اختصاص داده شده است. فاصله محور به محور ریل‌ها



شکل ۱۲. مدل سازی دال خط با استفاده از المان پوسته

$$P_d = \varphi P_s \quad (۷)$$

$$\varphi = 1 + 5/21 \frac{V}{D} \quad (۸)$$

باز تولید شده

است.

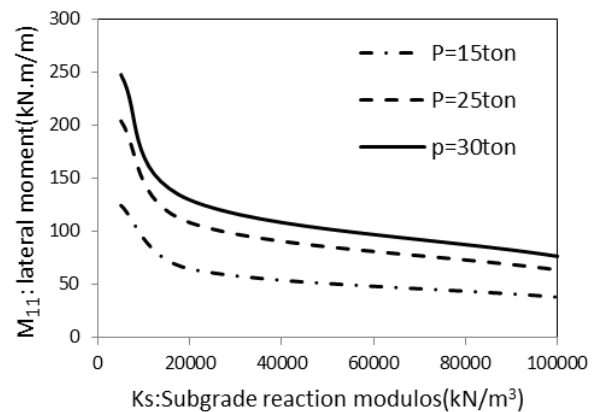
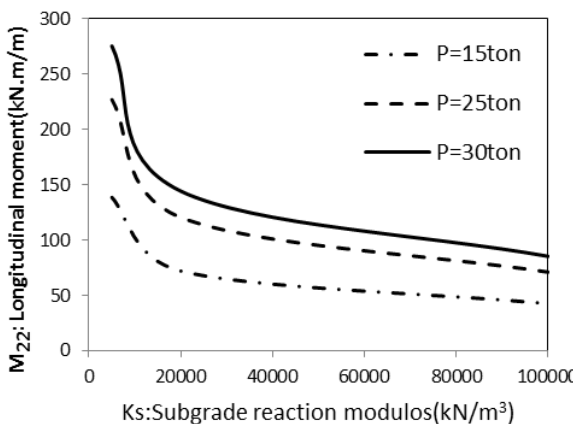
۴-۳- بررسی تلاش‌های برشی و خمشی ایجاد شده

در دال خط

پس از انجام تحلیل‌ها، نتایج نیروهای برشی و لنگرهای خمشی دال میانی به منظور استفاده در مقاصد طراحی استخراج می‌گردد. همان‌گونه که در شکل ۱۳ نشان داده شده است با افزایش ضریب عکس‌العمل بستر ممان‌های طولی و عرضی و برش‌های وارده بر دال خط به میزان زیادی کاهش یافته و تقریباً به سمت مقدار ثابتی میل می‌کند.

در این روابط، φ نشان دهنده ضریب ضربه و V و D به ترتیب سرعت عبوری بار بر حسب کیلومتر بر ساعت و قطر چرخ بر حسب میلی‌متر هستند. در این مقاله قطر چرخ برابر ۱۰۰۰ میلی‌متر در رابطه ۸ استفاده شده است. همچنین تحلیل حساسیت برای بارهای محوری ۱۵، ۲۵ و ۳۰ تن، با سرعت‌های ۸۰، ۱۲۰ و ۲۰۰ کیلومتر بر ساعت و سختی‌های بستر ۵۰۰۰ و ۲۰۰۰۰ و ۱۰۰۰۰۰ کیلو نیوتن بر متر مکعب انجام گرفته است. برای اعمال بارهای عبوری مختلف، الگوی بار LM71 (بار محوری ۲۵ تن) به نسبت

بار محور تغییر کرده و نظیر بارهای محوری مختلف



شکل ۱۳. نمودار نتایج لنگر عرضی با تغییر بار محوری و ضریب عکس‌العمل بستر در سرعت ثابت ۸۰ کیلومتر بر ساعت

۵- طراحی بتن الیافی

فقط FIB وارد مبحث طراحی دال‌های بتنی الیافی بدون آرماتور شده و در مورد دال بتنی با ترکیب الیاف و آرماتور حرفی نزنده است. در ادامه برای طراحی دال بتنی ترکیب الیاف و آرماتور، از روابط طراحی تیرهای بتنی الیافی همراه با آرماتور استفاده شده است. از طرفی آیین نامه ACI توضیحاتی مورد تیرهای بتنی الیافی بسیار کوچک ارائه نمود که کاربردی محدود دارد.

در این بخش با دید طراحی، مروری بر ضوابط و آیین نامه‌های موجود در خصوص طراحی بتن الیافی صورت می‌گیرد. در این راستا آیین نامه‌های RILEM¹ و FIB و ACI² مورد بررسی قرار می‌گیرند. آیین‌نامه‌های RILEM و FIB به مبحث طراحی خمشی، برشی و کنترل ترک تیرهای بتنی الیافی ترکیب با آرماتور و بدون آرماتور پرداخته‌اند در حالی که از دو آیین نامه مذکور،

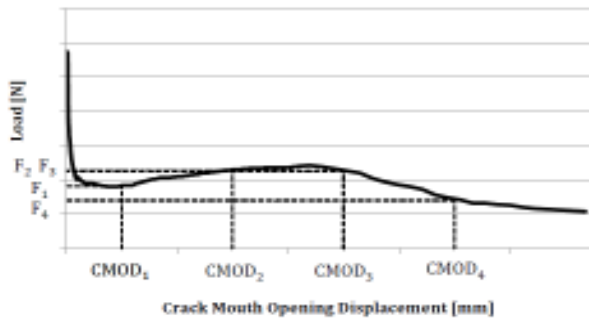
در این رابطه L طول دهانه نمونه مورد آزمایش، b عرض نمونه مورد آزمایش، h_{sp} فاصله بین نوک شکاف تا بالای نمونه مورد آزمایش، F_j بار متناظر با f_{Rj} ، $CMOD_j$ مقاومت کششی خمشی پسماند متناظر با f_{Rj} با $[j=1,2,3,4]$ و مقدار f_{R3} و f_{R1} از مقادیر متناظر $F_{R3} - CMOD_3$ و $F_{R1} - CMOD_1$ مطابق شکل ۱۴ بدست می آیند.

مقاومت پسماند کششی خمشی بتن الیافی بصورت یک بلوک تنش به نمودار تنش بتن اضافه شده است. در آیین نامه FIB، لنگر خمشی و نیروی محوری در حالت حدی نهایی یک رابطه تنش کرنشی ساده شده ارائه شده است. همان طور که در شکل ۱۵ ملاحظه می شود توزیع تنش خطی بعد از ترک برای مصالحی با دو نوع رفتار سخت شونده و نرم شونده در سمت چپ و توزیع تنش صلب پلاستیک در سمت راست نشان داده شده است. برای بتن با مقاومت فشاری کوچک تر از ۵۰ مگاپاسکال ضرایب بلوک تنش برابر $\eta=1$ و $\lambda=0/8$ است.

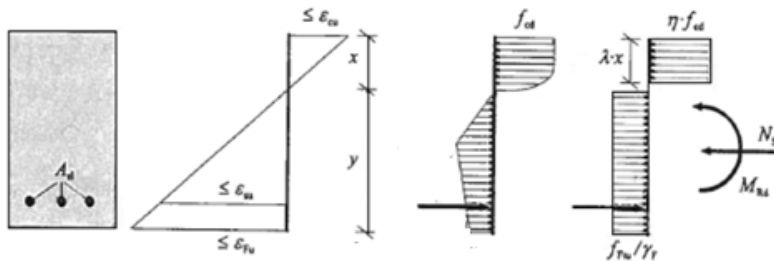
۱-۵- طراحی تیرهای بتن الیافی مطابق آیین نامه FIB

در این بخش از مقاله، مروری بر ضوابط و آیین نامه های موجود در خصوص تحلیل و طراحی بتن الیافی پرداخته شده است. در این راستا آیین نامه FIB مورد بررسی قرار می گیرد. این آیین نامه وارد مبحث طراحی دال های بتنی الیافی بدون آرماتور است در این آیین نامه برای طراحی بتن الیافی همه فرضیات بتن مسلح معمولی بجز در نظر گرفتن مقاومت کششی بتن در نظر گرفته می شود. بر طبق آیین نامه، در طراحی بتن الیافی یکی از پارامترهای مهم، مقاومت کششی خمشی پسماند، طبق رابطه ۹، f_{Rj} است. برای تعیین این پارامتر باید از تست میزان جابجایی بازشدگی دهانه ترک (CMOD) استفاده کرد. تست CMOD، تست بارگذاری با تغییر شکل کنترل شده است که میزان بازشدگی دهانه ترک را اندازه گیری می کند. برای انجام تست نیازمند تیری شکافدار و وسایلی برای ثبت میزان بار اعمالی و مقدار دهانه ترک می باشد.

$$f_{Rj} = 3 \frac{F_j L}{2b h^2 \eta} \quad (9)$$



شکل ۱۴. نمونه ای از نمودار به دست آمده از تست خمشی تیر با رفتار نرم شونده طبق آیین نامه FIB



شکل ۱۵. رابطه تنش کرنشی ساده شده بتن الیافی در آیین نامه FIB

محاسبه لنگر نهایی بصورت پارامتر f_{Ft} در فرمول آمده است.

لنگر نهایی تیرهای بتنی الیافی همراه با آرماتور معمولی با استفاده از روابط ساده شده خطی بعد از ترک بصورت فرمول زیر بدست می‌آید. میزان مشارکت الیاف در

$$M_{Rdy} = f_{sy} A_s (d - \beta x) + f_{Ft} (h - x) b [\beta x + x_{TOT} \gamma] \quad (10)$$

بلوک تنش کششی هستند. ظرفیت برشی بتن در آیین نامه FIB بصورت مجموع مقاومت برشی بتن و مقاومت برشی آرماتورهای برشی بصورت رابطه ۱۱ محاسبه می‌شود.

در رابطه ۱۰، f_{sy} نشان دهنده مقاومت تسلیم آرماتور، A_s مساحت آرماتور، d عمق موثر، h ارتفاع تیر، x فاصله بالاترین نقطه تیر از تار ختنی، x_{TOT} مرکز ثقل بلوک کششی الیاف بصورت درصدی از ارتفاع کل و γ ارتفاع

$$V_{Rd} = V_{Rdc} + V_{Rds} \quad (11)$$

مقاومت برشی تیر بتنی بدون الیاف با استفاده از رابطه ۱۲ محاسبه می‌شود.

$$V_{Rdc} = 0.9 * k_v \frac{\sqrt{f_{ctk,cyl}}}{\gamma_c} b d \quad (12)$$

ظرفیت برشی بتن با درصدهای مختلف الیاف ترکیب با آرماتور متداول و بدون آرماتور برشی با استفاده از رابطه ۱۳ بدست می‌آید.

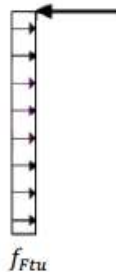
$$V_{Rd} = \left[\left(\frac{0.18}{\gamma_c} \right) k \left[100 \rho_1 \left(1 + 7/5 \frac{f_{Ftu}}{f_{ctc}} \right) f_{ctk,cyl} \right]^{2/3} + 0.15 \sigma_{cp} \right] b d \quad (13)$$

در رابطه ۱۳، σ_{cp} متغیر میانگین تنش وارده بر بتن در اثر بارگذاری یا پیش تنیده شدگی و ρ_1 متغیر درصد آرماتور متداول و f_{Ftu} متغیر مقاومت پسماند حالت نهایی هستند.

۵-۲- طراحی دال‌های بتن الیافی مطابق آیین نامه FIB

PLASTIC) استفاده شده است که در آن فرض بر این است که نیروی فشاری در تار بالایی مقطع متمرکز شده است. (شکل ۱۶)

در این بخش طراحی دال بتنی روی تکیه‌گاه ساده برای حالت حدی نهایی با الیاف بر مبنای آیین‌نامه FIB آورده شده است. برای طراحی دال با بتن الیافی بدون آرماتور از روابط پلاستیک صلب (RIGID



شکل ۱۶. مدل ساده شده برای تعیین مقاومت کششی نهایی f_{Ftu} در آیین نامه FIB

استفاده از رابطه ۱۵ محاسبه می‌شود.

$$f_{Ftu} = \frac{FR3}{3}$$

$$m_{Rd} = \frac{f_{Ftu} h^2}{2}$$

تأمین حداقل آرماتور برآورده می‌شود. حداقل مقدار آرماتور در تیرهای بتنی آرمه معمولی از رابطه ۱۶ بدست می‌آید.

$$A_{s,min} = k_c k (f_{ctm} - f_{ctm}) \frac{A_{ct}}{\sigma_s}$$

نام FIB برای همه مراحل ترک خوردگی از تیرهای بتنی مخلوط الیاف و آرماتور از رابطه ۱۷ استفاده می‌شود که اثر الیاف در فرمول زیر در مقاومت خمشی الیاف فولادی (f_{RS}) لحاظ گردیده است.

$$W_d = \frac{1}{2} \frac{\rho_s}{\rho_{s,ef}} \frac{(f_{ctm} - f_{ctm})}{\tau_{brn}} (\sigma_s - \beta \sigma_{sR}) \frac{1}{E_s}$$

مقاومت کششی نهایی از رابطه ۱۴ و مقاومت خمشی، m_{Rd} برای دال بتنی الیافی بدون آرماتور با

(۱۴)

در رابطه ۱۵، h و f_{Ftu} به ترتیب ارتفاع دال و مقاومت کششی نهایی هستند.

طراحی در حالت حدی نهایی، نیاز به کفایت انعطاف پذیری دارد. در آیین نامه FIB شرط انعطاف پذیری با

(۱۶)

در رابطه ۱۶، A_{ct} نشان دهنده مساحت قسمت کششی مقطع بتنی، σ_s ، بیشترین تنش کششی آرماتور در هنگام ترک خوردگی، k_c ضریب مربوط به توزیع تنش در مقطع دقیقاً قبل از ترک خوردگی، k ، ضریب مربوط به تنش‌های خود متعادلی غیر یکنواخت هستند. در آیین

(۱۷)

۳-۵- فلوجارت گام به گام طراحی خمشی دال الیافی با آرماتور

گراف‌های طراحی ارائه گردیده است.

با مقایسه نتایج جدول ۹ و نتایج تلاش‌های برشی و خمشی ایجاد شده در دال خط، استفاده از الیاف به تنهایی در دال بتنی دارای مقاومت خمشی لازم برای تحمل بارهای وارده نیست و از طرفی عرض ترک در این شرایط به میزان چندین برابر عرض ترک مجاز آیین نامه (۰/۳ میلی‌متر) بدست آمده است. با توجه به نتایج بدست آمده، می‌توان نتیجه گرفت که درصد بالایی از الیاف برای تسلیح دال خط مورد نیاز است که این کار مقرون به صرفه نیست در نتیجه بایستی از ترکیب الیاف و آرماتور برای تأمین مقاومت خمشی لازم و حصول عرض ترک مجاز آیین نامه استفاده کرد.

در شکل ۱۷ روند طراحی دال الیافی با آرماتور مطابق

آیین نامه FIB بصورت خلاصه ارائه گردیده است.

۴-۵- نتایج طراحی برای دال خط خطوط ریلی

در این بخش، از نتایج تحلیل و دال خط برای بارهای محوری ۱۵، ۲۵ و ۳۰ تن، با سرعت‌های ۸۰، ۱۲۰ و ۲۰۰ کیلومتر بر ساعت و سختی‌های بستر ۵۰۰۰ و ۲۰۰۰۰ و ۱۰۰۰۰۰ کیلو نیوتن بر متر مکعب استفاده شده است. سپس از بین آیین نامه‌های موجود در زمینه طراحی بتن الیافی، آیین نامه FIB انتخاب شده و طراحی خمشی، برشی و کنترل ترک دال خط بتن الیافی در درصد حجمی الیاف ۰/۲۵ و ۰/۵ و ۰/۷۵ بصورت



شکل ۱۷. مراحل طراحی خمشی دال خط بتنی الیافی با آرماتور

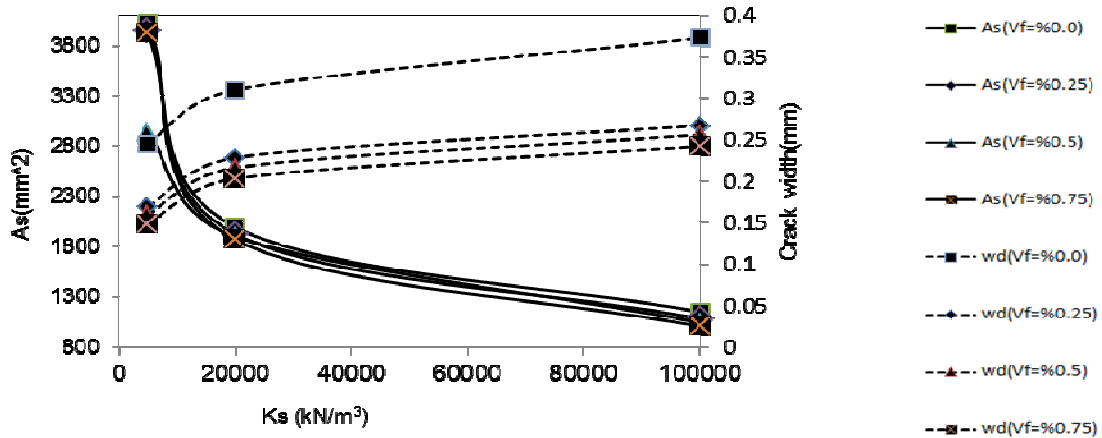
جدول ۹. نتایج استفاده از الیاف به تنهایی در دال خط بتنی

درصد حجمی الیاف (%) V_f	عرض ترک دال w (mm)	ممان مقاوم دال در هر متر طول M_{Rd} (kNmm)
۰/۲۵	۲۸۵	۶/۷۹
۰/۵	۲۰۷	۱۰/۲۱
۰/۷۵	۱۵۶	۱۴/۴۸

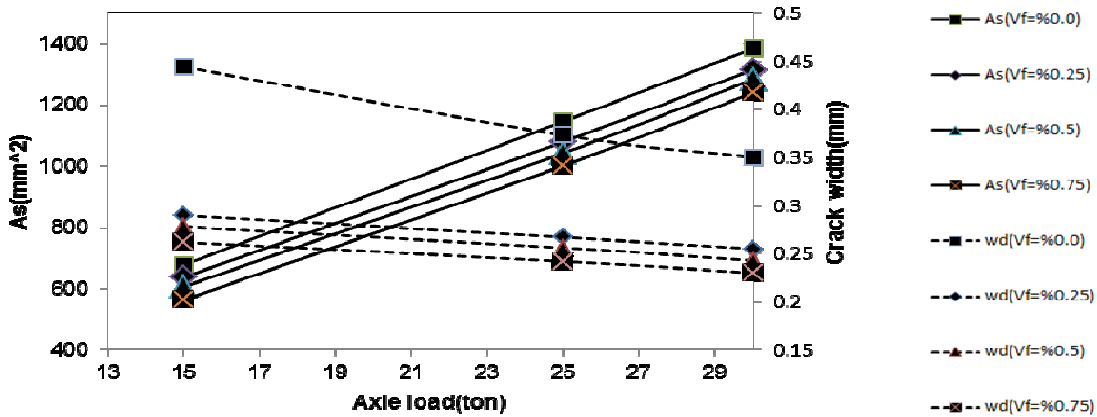
۵-۵- نتایج طراحی خمشی دال بتنی الیافی به همراه آرماتور متداول

ناوگان میزان آرماتور مورد نیاز در دال بتنی الیافی با درصد های حجمی مختلف افزایش یافته و با افزایش میزان آرماتور مورد نیاز، عرض ترک کاهش می یابد. از طرفی، با افزایش ضریب عکس العمل بستر میزان آرماتور مورد نیاز مختلف کاهش یافته و با کاهش میزان آرماتور مورد نیاز، عرض ترک افزایش می یابد.

در این بخش، نتایج بدست آمده از روند تحلیل و طراحی بصورت گراف هایی کاربردی نشان داده شده است. در این گراف ها، سه پارامتر بار محوری، ضریب عکس العمل بستر و سرعت عبوری در دال خط مورد بررسی قرار گرفته اند. در شکل های ۱۸ و ۱۹ ملاحظه می گردد که با افزایش بار محوری و سرعت عبوری



شکل ۱۸. گراف طراحی دال خط بتن الیافی با تغییر ضریب عکس العمل بستر زیر دال خط در سرعت عبوری ۱۲۰ کیلومتر بر ساعت و بار محوری ۲۵ تن

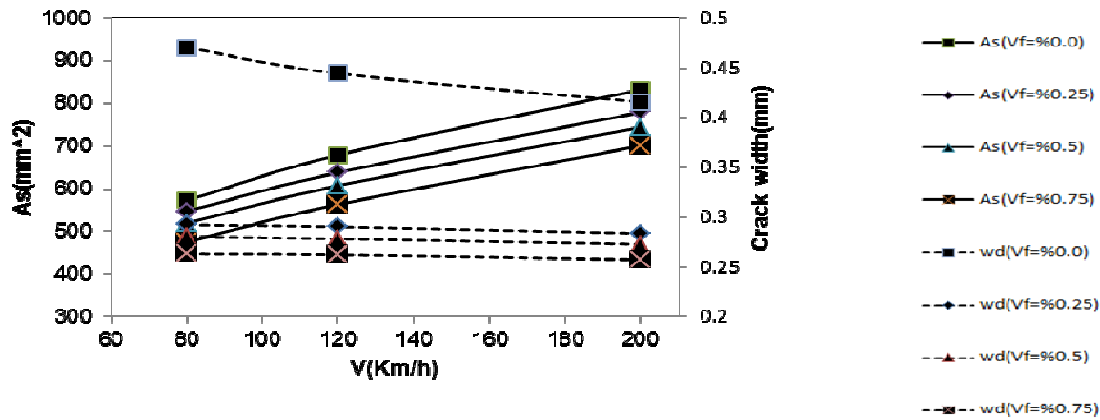


شکل ۱۹. گراف طراحی دال خط بتن الیافی با تغییر بار محوری عبوری و ضریب عکس العمل بستر ۱۰۰۰۰۰ کیلونیوتن بر متر مکعب و سرعت عبوری ۱۲۰ کیلومتر بر ساعت

۵۵۰ میلی‌متر بر متر و میزان عرض ترک حدود ۰/۲۸ میلی‌متر است. می‌توان برای درصدهای الیاف ۰/۲۵ و ۰/۵ این مقادیر را بدست آورد.

در ادامه با توجه به نتایج بدست آمده از طراحی خمشی و برشی، مطابق جدول ۱۰، می‌توان نتیجه گرفت که مقاومت برشی ناشی از آرماتورهای طولی و الیاف بیشتر از نیروی برشی بدست آمده از تحلیل دال خط است، در نتیجه آرماتورهای خمشی جوابگوی نیروی برشی وارده بوده و طراحی برشی ملاک نیست.

برای مثال در گراف طراحی دال خط بتن الیافی با تغییر سرعت عبوری ناوگان با ضریب عکس‌العمل بستر ۱۰۰۰۰۰ کیلونیوتن بر متر مکعب و بار محوری ۱۵ تن مطابق، در ابتدا سرعت عبوری را مشخص کرده و سرعت عبوری بوسیله خطی بر روی خط نقطه چین که معرف عرض ترک و خط پر که معرف میان آرماتور لازم در درصد های مختلف الیاف است عمود می‌شود. در این مثال برای سرعت عبوری ۱۲۰ کیلومتر بر ساعت بدون الیاف میزان آرماتور لازم حدود ۶۹۰ میلی‌متر بر متر و حالی که میزان عرض ترک حدود ۰/۴۴ میلی‌متر، در حالی که با درصد الیاف ۰/۷۵، میزان آرماتور لازم حدود



شکل ۲۰. گراف طراحی دال خط بتن الیافی با تغییر سرعت عبوری با ضریب عکس‌العمل بستر ۱۰۰۰۰۰ کیلونیوتن بر متر مکعب و بار محوری عبوری ۱۵ تن

جدول ۱۰. طراحی برشی دال بتن الیافی در ترکیب با آرماتور

لنگر تحلیل (kN.m)	برش تحلیل (kN)	Axle load (ton)	V (km/h)	فقط آرماتور		ترکیب ۰,۲۵ الیاف و آرماتور		ترکیب ۰,۵ الیاف و آرماتور		ترکیب ۰,۷۵ الیاف و آرماتور	
				As (mm ²)	V _{Rd} (kN)	As (mm ²)	V _{Rd} (kN)	As (mm ²)	V _{Rd} (kN)	As (mm ²)	V _{Rd} (kN)
95	221	۲۵	80	1712	265	1639	283	1611	288	1577	295
106	235		120	1994	278	1925	302	1897	307	1869	312
135	252		200	2544	290	2475	315	2456	320	2431	325

برشی بدست آمده از تحلیل دال خط ناشی از عبور بار دینامیکی است، در نتیجه آرماتورهای خمشی جوابگوی نیروی برشی وارده بوده و طراحی برشی ملاک نیست.

۷- پی نوشتها

1. The International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures
2. American Concrete Institute

۸- مراجع

-A. Abrishambaf, J.Barros, V.Cunha, (2015), "Tensile stress-crack width law for steel fibre reinforced self-compacting concrete obtained from indirect (splitting) tensile tests Cement and Concrete Composites", Vol. 57, pp. 153-165.

-ABAQUS 6.10 Analysis User Manual Volume III.

-American Society for Testing and Materials, (2004), "Standard Specification for Steel Fibers for Fiber-Reinforced Concrete", ASTM A820, 100 Barr Harbor:ASTM.

-C.Octavio, J. Alfaiate, E.Julio, (2016), "Modeling the behavior of steel fibre reinforced concrete using a discrete strong discontinuity approach, Engineering Fracture Mechanics", Vol. 154, pp.12-23.

- J. A. O Barros. and J. A Figueiras, (-2001), "Model for the Analysis of Steel Fiber Reinforced Concrete Slabs on Grade," Journal of Computers and Structures, 79, pp.97-106.

-K haloo, A. R. and Afshari, M., (2005), "Flexural Behavior of Small Steel Fiber Reinforced Concrete Slabs," Journal of Cement and Concrete Composites, 27, pp. 141-145.

-Oliver Martin, (2010), "European Commission Joint Research Centre Institute for Energy JRC-IE, Comparison of different Constitutive Models for Concrete in ABAQUS/Explicit for Missile Impact Analyses", Netherlands.

۶- نتیجه گیری

در این مقاله مدل عددی دال خط الیافی از طریق یک مکانیزم تصادفی جهت تولید الیاف استفاده شده است. در ادامه برای کاهش حجم محاسبات از المان پوسته بجای SOLID استفاده شد. مقایسه نتایج نشان می دهد که تلاش های برشی و خمشی در این دو المان در مدل سازی دال خط با یکدیگر تطابق خوبی دارد. در ادامه با توجه به تغییرت سرعت و بار محوری قطار مطابق LM71 و سختی بستر مقادیر تلاش های برشی و خمشی محاسبه شده است. در پایان مطابق آیین نامه طراحی دال بتن الیافی انجام گرفته است. عمده نتایج بدست آمده مبین آن است که :

۱) استفاده از الیاف به تنهایی جوابگوی نیروهای وارده نبوده و از طرفی عرض ترک را بیشتر از مقدار مجاز نتیجه می دهد لذا بایستی از ترکیب الیاف و آرماتور برای کنترل عرض ترک استفاده کرد.

۲) با افزایش سختی بستر، میزان نیروهای وارده بر دال کاهش می یابد. برای مثال در شرایط بار محوری ۲۵ تن و سرعت بار ۱۲۰ کیلومتر بر ساعت با تغییر سختی از ۵۰۰۰ به ۲۰۰۰۰ و ۱۰۰۰۰۰ میزان لنگر طولی وارده به ترتیب ۴۶ و ۶۸ درصد کاهش داشته و به همین ترتیب میزان مصرف آرماتور مورد کاهش می یابد.

۳) با افزودن الیاف به دال بتنی، میزان مصرف آرماتور مورد نیاز کمی کاهش و عرض ترک به میزان زیادی کاهش می یابد. برای مثال در شرایط بار محوری ۲۵ تن و سرعت بار کیلومتر بر ساعت ۱۲۰ و سختی ۲۰۰۰۰ کیلو نیوتن بر متر مکعب میزان بکارگیری الیاف با درصدهای حجمی ۰/۲۵ و ۰/۵ و ۰/۷۵ مقدار آرماتور مصرفی را ۳/۵، ۴/۹، ۶/۳ درصد کاهش داده و مقدار عرض ترک را به ترتیب به میزان ۲۶ و ۳۰ و ۳۵ درصد کاهش می دهد.

۴) نتایج بارگذاری سرویس در دال های بتنی الیافی و دال بتنی بدون الیاف نشان می دهد که افزودن الیاف تأثیر چندانی در نیروهای برشی و لنگرهای خمشی وارده ندارد. در نتیجه می توان برای تحلیل دال بتن الیافی، از دال بتن بدون الیاف استفاده کرده و از نتایج تحلیل برای طراحی دال بتن الیافی استفاده کرد.

۵) با توجه به نتایج طراحی خمشی و برشی، مقاومت برشی ناشی از آرماتورهای طولی و الیاف بیشتر از نیروی

-www.bosfa.com.au.

-Xie Yongjiang, Li, Huajian, (2009), "Concrete Crack of Ballastless Track Structure and its Repair", IJR International Journal of Railway, Vol. 2, No. 1, pp. 30-36.

-Z. Xu., N. Hao, (2011), Dynamic tensile behavior of fiber reinforced concrete with spiral fibers.

-P. Kmiecik M., M. Kaminski, (2011), "Modeling of reinforced concrete structures and composite structures with concrete strength degradation taken into consideration", Archives Of Civil and Mechanical Engineering, Vol. XI, No. 3.

-Qin Fang, Jinhua Zhang, (2013), "Three-dimensional modeling of steel fiber reinforced concrete material under intense dynamic loading", Construction and Building Materials 44, pp.118–132.

-V.T. Giner, F.J. Baeza, S. Ivorra, E. Zornoza, Ó. Galao, (2011), "Effect of steel and carbon fiber additions on the dynamic properties of concrete containing silica fume".

Numerical Investigation of the Behavior of Steel Fibre Concrete Reinforcement Slab Track for Use on Ballastless Slab Track of Railway

Morteza Esmaili, Professor, School of Railway Engineering, Iran University of Science, Technology (IUST), Tehran, Iran.

Ahmad Masoudnezhad, M.Sc., Grad, School of Railway Engineering, Iran University of Science, Technology (IUST), Tehran, Iran.

E-mail: m_esmaeili@iust.ac.ir

Received: September 2020-Accepted: January 2021

ABSTRACT

The use of steel fibre instead of Rebar reinforcement or in combination with them have advantage such as increasing flexibility, energy absorption and control of crack. Laboratory studies have been performed on the performance of slabs with steel fibres, but no specific numerical study has been performed that enters the fibre properties directly into the analysis process. Steel fibre concrete in this study modeled with finite element method and laboratory work with existing fibre-reinforced slab compare and validate. Then, with the development of fibre-reinforced slab track model, relies on the rebound under the bed moving a simulated load. The results show that the presence of fibres in the service load range has little effect on the shear and flexural forces of the slab. In the following, using FIB regulations, the process of designing steel fibre concretes and the possibility of using steel fibres in slab track is examined. The results show that the use of fibres in the slab alone does not have the necessary flexural strength to withstand the incoming loads and the crack width is obtained several times the allowable value of the regulations. As a result, the combination of fibres and reinforcement is used to control cracks and the design graph of the combination of fibres and reinforcement in the slab is obtained. The results show that with the addition of fibres, the amount of reinforcement required is slightly reduced and the crack width is significantly reduced. For example, in the case of axial load of 25 tons, load speed of 120 km / h and hardness of 32,000 kN/m with fibre volume percentages of 0.25, 0.5 and 0.75 in slab track model, the reinforcement used is reduced by 26, 30 and 35% respectively. as well as crack width used is reduced by 3.5, 4.9 and 6.3% respectively.

Keywords: Finite Element Method, Steel Fibre, Steel Fibre Concrete