Journal of Structural and Construction Engineering, 8(Special Issue 4), 2022, pp. 144-155

Journal of Structural and Construction Engineering

www.jsce.ir

Investigation of fatigue phenomena and stress variations by using FRP dowel bars

Jalal Ayoubinejad*[1], Mahdieh Marashi[2]

1- Assistant professor, Faculty of Engineering, Payame Noor University, Tehran, Iran
2- MSc, Payame Noor University, Tehran, Iran

ABSTRACT

Behavior of concrete pavements is affected by the performance and the ability to transmit force through their joints and joints. The efficiency and useful life of these structures are directly dependent on the transmission forces. Therefore, the analysis of the performance of joints and joints of pavements has an important role in this case, which itself depends on the use of appropriate behavioral models to simulate the mechanism of force transfer. In this study, the main purpose is comparing the stress changes in FRP dowels with steel dowels under fatigue analysis. for this purpose, nine models including three different diameters of 16, 25 and 38 mm in three materials contains; steel, carbon composite (CFRP) and glass composite (GFRP) were simulated and analyzed in ANSYS software. The analysis used in the models is the Fatigue analysis performed at ANSYS-WORKBENCH. The analysis outputs including stress variations and fatigue parameters including LIFE and DAMAGE were extracted in all models. The results showed that in all the diameters studied, the stress value was the lowest in the models with CFRP dowels, followed by the models with GFRP dowels and the highest stress was related to steel bars. In other words, CFRP dowels performed better in load transfer and resulted in less fracture stresses in the model.

ARTICLE INFO

Receive Date: 20 December 2020
Revise Date: 26 February 2021
Accept Date: 15 April 2021

Keywords:
Stress,
Dowel bars,
Fatigue analysis,
ANSYS,
CFRP,
GFRP

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2021.262652.2313

*Corresponding author: Jalal Ayoubinejad
Email address: j.ayoubinejad@pnu.ac.ir

نشریه مهندسی سازه و ساخت
(علمی - پژوهشی)
www.jsce.ir

Journal of Structural and Construction Engineering
JSCE
نشریه علمی-پژوهشی مهندسی سازه و ساخت

بررسی پدیده خستگی و تغییرات تنش با به کارگیری میلگردهای داول کامپوزیتی FRP با قطرهای متداول در روسازی های بتنی به روش شبیه سازی المان محدود

جلال ایوبی نژاد[1*]، مهدیه مرعشی[2]

۱- استادیار گروه عمران دانشگاه پیام نور تهران شمال، تهران، تهران

۲- کارشناس ارشد مهندسی راه و ترابری، دانشگاه پیام نور تهران شمال، تهران، تهران

چکیده

رفتار روسازیهای بتنی متاثر از عملکرد و میزان قابلیت انتقال نیرو از درزها و اتصالهای آنهاست و شکست خستگی در میله های داول، یکی از عوامل مهم در تحلیل این روسازی ها می باشد. با توجه به انواع مصالح مختلف میله های داول و اهمیت تحلیل خستگی در آنها و پیچیدگی رفتار روسازی در محل درزها، در این پژوهش، برای اولین بار، برای مدلسازی خستگی داول‌ها از روش المان محدود استفاده شده و مقایسه تغییرات تنش در داول های پلیمری مسلح شده با الیاف (FRP) با داول های فولادی تحت تحلیل خستگی و برای قطرهای مختلف داول های مرسوم در روسازی‌های بتنی، به انجام رسیده است. برای این منظور، نه مدل از میله های داول شامل سه قطر مختلف ۱۶، ۲۵ و ۳۸ میلیمتر در سه جنس فولادی، کامپوزیت کربنی و کامپوزیت شیشه در نرم افزار ANSYS شبیه سازی و تحلیل گردیده و تحلیل مورد استفاده در مدل ها تحلیل خستگی می باشد. خروجی های تحلیل شامل تغییرات تنش و پارامترهای خستگی از جمله LIFE و DAMAGE در تمام مدل ها استخراج شده است. نتایج نشان می دهد در تمامی قطرهای مورد بررسی مقدار تنش در مدل های دارای داول کامپوزیت کربنی از سایر مدل ها کمترین مقدار را دارد و پس از آن مدل‌های دارای جنس داول بار کامپوزیت شیشه قرار دارد و بیشترین مقدار تنش مربوط به آرماتورهای فولادی می باشد. به عبارت دیگر داول های کامپوزیت شیشه، در انتقال بار بهتر عمل نموده و منجر به ایجاد تنش های گسیختگی کمتری در مدل شده و همچنین، قطر بزرگتر، منجر به تنش ماکزیمم کمتری در تحلیل خستگی مدل شده است.

کلمات کلیدی: تنش، داول بار، تحلیل خستگی، ANSYS، CFRP، GFRP

سابقه مقاله:					شناسه دیجیتال:	
دریافت	بازنگری	پذیرش	انتشار آنلاین	چاپ	https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2021.262652.2313	doi:
۱۳۹۹/۰۹/۳۰	۱۳۹۹/۱۲/۰۸	۱۴۰۰/۰۱/۲۶	۱۴۰۰/۰۱/۲۶	۱۴۰۰/۱۲/۲۹	10.22065/jsce.2021.262652.2313	

*نویسنده مسئول: جلال ایوبی نژاد

پست الکترونیکی: j.ayoubinejad@pnu.ac.ir

۱- مقدمه

طراحی روسازی های بتنی بر اساس تحلیل تنش های ایجاد شده در قسمت های مختلف سازه انجام می شود و لذا تحلیل تنش در درزهای روسازی نیز باید مورد توجه قرار گیرد. کارآیی و عمر مفید این سازه ها به طور مستقیم وابسته به نیروهای انتقالی در درزها است. بنابراین تحلیل عملکرد درزها و اتصال های روسازی ها نقش مهمی دارد که خود نیز، وابسته به بکارگیری مدلهای رفتاری مناسب برای شبیه سازی سازوکار انتقال نیرو است. روسازی های بتنی درزدار غیرمسلح یکی از پرکاربردترین انواع روسازی در آمریکا و کشورهای اروپایی هستند. تمام روسازی های بتنی غیرمسلح باید در فواصل معینی دارای درز انقباض باشند. داول‌ها یا قفل و بست دانه ای، وسیله ای برای انتقال بار از یک دال به دال دیگر در محل درز هستند و بسته به نوع روسازی، آب وهوا و تجربه، فاصله ی درزها بین ۴,۵ تا ۹ متر متغیر است [۱].

عبور بارهای ترافیکی از روی دال سبب ایجاد تنش در دال می شود. وظیفه اصلی داول‌ها انتقال بار از یک دال به دال دیگر می باشد تا این مقدار بار بین دو دال تقسیم شده و سبب کاهش تمرکز تنش در یک طرف درز شود. عدم استفاده از داول، سبب کاهش ظرفیت باربری در یک طرف دال شده و در صورت نفوذ آب به درز، عمل مکش بین دال و بستر یا اساس اتفاق می‌افتد . نتیجه این امر، ایجاد ناهمواری در محل درز است و استفاده از داول، کارایی روسازیهای بتنی در دراز مدت را افزایش می دهد [۲]. در همین زمینه اثبات شده است که عمده خرابی روسازی های بتنی غیرمسلح درزدار معمولا در محل درزهای آن مشاهده می شود. انتقال بار چرخ در محل درزها، منجر به پیدایش تنشهای برشی و خمشی داول ها شده که به عنوان یکی از معیارهای طراحی و عملکردی داول محسوب می شود [۳]. مانند سازه های بتنی، میله های داول نیز اغلبا از جنس فولاد است تا وظیفه انتقال بار را انجام دهد اما در سال های اخیر، انواع دیگری از مصالح کامپوزیتی مانند پلیمر مسلح شده با الیاف (FRP) ایجاد شده که بعنوان میله های داول بار، استفاده می شود. میلگردهای داول ساخته شده از فولاد و FRP می‌تواند به عنوان یک مکانیسم انتقال بار موثر در روسازی بتنی درزدار (JPCP[3]) مورد استفاده قرار گیرد و مزایا و یا محدودیت های مرتبط با هر یک از این مواد توسط نویسندگان مختلف مورد بحث قرار گرفته است [۴] و مقایسه میان انواع FRP های تولید و استفاده شده مانند کامپوزیت کربنی (CFRP) و کامپوزیت شیشه‌ای (GFRP) با مصالح فولادی می تواند به طراحان و بهره برداران در شناخت دقیق تر رفتار داول تحت تاثیر انواع بارها و شکست های سازه های کمک نماید.

در این میان، تنش های خستگی، یکی از عوامل تاثیرگذار در طراحی داول ها است که موجب ایجاد شکست خستگی در داول می‌گردد و به دلیل ناگهانی بودن این نوع از خرابی، شناخت و تحلیل آن، دارای اهمیت زیادی است. اما مکانیزم انتقال بار در محل درزها به کمک داول ها امری پیچیده محسوب شده لذا استفاده از روش هایی تحلیل مانند المان محدود، از کارایی لازم برخوردار است [۳] و می-تواند به تحلیل دقیق‌تر از رفتار داول تحت نیروهای وارده، کمک نماید. استفاده از روش های المان محدود دو و سه بعدی برای تحلیل روسازی های بتنی قرار گرفته در معرض بارهای مکانیکی و محیطی طی دهه های اخیر ازکاربرد گسترده ای برخوردار گردیده است. فهم بهتر و دقیق تر فرایند انتقال بار در محل درزها یکی از کاربردهای این روش ها محسوب می شود [۵] .

در جاده های بتنی میله های داول در بین درزها برای انتقال بار از یک دال به دال مجاور به کار می‌روند. تا زمانی که میله های داول کاملا توسط بتن محصور شده، درز بیشترین بازده را خواهد داشت [۶] اما با توجه به اختلاف در ضریب الاستیسیته فولاد و بتن و همچنین به دلیل سختی بالای داول های فولادی در بتن، بارگذاری تکراری درز می تواند به بیضوی شدن بتن در اطراف داول فولادی منجر شود. [۷] . بدین ترتیب به دلیل تمرکز تنش در محل اتصال داول و بتن، فضای خالی در اطراف داخلی ایجاد می شود. در مدت زمان بهره برداری و با حرکت ترافیک بر روی درز، بتن اطراف میله های داول شکسته شده و بدین ترتیب توانایی انتقال بار در محل درزها کاهش میابد. فضای خالی ایجاد شده در بتن اطراف داول باعث جمع شدن آب و مواد دیگر شده و در نهایت باعث خوردگی و قفل شدن درز خواهد شد و بدین ترتیب اجازه انبساط حرارتی به دال داده نخواهد شد که این شرایط میخکوب شدن میله‌های داول را فراهم می سازد. در صورت عدم انتقال بار از طریق درز ها بار به بستر منتقل شده و پلکانی شدن درز اتفاق خواهد. تفاوت در میزان نشست دو دال مجاور در محل درز باعث ایجاد ناهمواری در درز شده و حرکت وسایل نقلیه را با مشکل مواجه خواهد کرد و سرانجام تعمیر یا تعویض دال اجتناب ناپذیر

[3] Jointed Plain Concrete Pavements

خواهد شد. اکنون استفاده از ابزار انتقال نیرو در درز روسازی های بتنی بسیار متداول است تحقیقات اخیر نشان داده است که درزهای با میله های داول، عمر کاری بیشتری را نسبت به درز های بدون داول خواهند داشت داول ها اغلب فولادی و صاف با پوشش اپوکسی با قطر ۲۵ تا ۳۸ میلیمتر و در بعضی موارد مانند روسازی ضخیم فرودگاه ها، میله هایی لوله ای با قطر خارجی ۳۲ تا ۵۰ میلیمتر است [۸].

حسنی و پاژنگ [۹] پژوهشی با موضوع تاثیر سختی میله های داول در عملکرد درز روسازیهای بتنی انجام داده‌اند و در این مقاله استفاده از میله های GFRP به عنوان ابزار انتقال نیرو و جایگزینی برای داول های فولادی بررسی و مطالعه آزمایشگاهی شده است. نتایج به دست آمده نشانگر ضعف نیروی چسبندگی داول‌های GFRP در مقایسه با داول‌های فولادی در ابتدای بارگذاری است. اما نتایج نشان می-دهد که پس از زایل شدن چسبندگی، نرخ کاهش نیروی چسبندگی و افزایش تغییر مکان در میلگردهای فولادی به مراتب بیش از GFRP است.

تعدادی از محققین، به ارایه مدل المان محدود سه بعدی برای بررسی اصطکاک و برهم کنش داول و بتن در روسازی های بتنی با استفاده از برنامه ی المان محدود ABAQUS پرداختند و مدل سه بعدی المان محدود برای بررسی اصطکاک بین داول و بتن در روسازیهای بتنی، با استفاده از برنامه آباکوس ارائه شده است. یافته ها نشان داده است استفاده از پوشش های کمک کننده اصطکاک روی داول، سبب کاهش نیروی محوری لازم برای بازشدن درز می شود [۱۰و ۱۱] .

شفابخش و نوروزی [۳] به بررسی عملکرد داول در روسازی بتنی راه ها با استفاده از تحلیل المان محدود سه بعدی پرداختند. در این تحقیق، تنش های به وجود آمده در داول های ۱۹۲ نمونه روسازی بتنی غیرمسلح درزدار، تحت تاثیر پارامتر های گوناگون با استفاده از مدل المان محدود سه بعدی برآورد شده است. همچنین از نمونه های تعریف شده برای ارائه یک مدل رگرسیونی چند متغیره استفاده شده است که از آن می توان پاسخ داول به بارهای وارده و تحت تاثیر پارامترهای مختلف را تعیین نمود. نرم افزار مورد استفاده در پژوهش شفابخش و نوروزی EverFE بوده است. درتحلیل حساسیت مدل های پیشنهادی نیز، بیشترین و کمترین تاثیر در نیروی برشی داول های تکی، ناشی از ضخامت دال روسازی و مدول بستر و برای لنگر خمشی، قطر داول و مدول بستر بدست آمده اند.

موریسون و همکاران [۱۲] پژوهشی با عنوان مدل‌سازی سطوح تماس داول ها در بتن روسازی های بتنی انجام دادند. در این پژوهش، از نرم افزار ADINA استفاده شده است. قطر داول ها در دو حالت ۳۸ و ۶۰ میلیمتر و با دو جنس FRP و فولاد مورد بررسی قرار گرفته است. در نتایج این پژوهش آمده است که میلگرد های داول FRP به دلیل سختی کمتر مقدار تغییر شکل ها و جابجایی های بیشتری را نشان می‌دهد و مقدار تنش های تحمل شده در آرماتورهای FRP با قطر ۳۸ میلیمتر بیشتر از سایر میلگردهاست. پارک و همکاران [۱۳] تحقیقی با موضوع بررسی میکروساختاری میلگردهای داول GFRP در روسازی های بتنی انجام دادند و در این بررسی میلگردهای فولادی و GFRP با قراردادن در شرایط محیطی نامناسب مورد آزمایش قرار گرفته اند و نتایج نشان داد میلگردهای GFRP بیشتر در معرض آسیب‌های محیطی قرار دارند. مانتگیو و همکاران [۱۴] تحقیقی در خصوص بررسی آزمایشگاهی داول های GFRP در روسازی های بتنی درزدار انجام دادند. در این تحقیق، تست خمش و برش بر روی میلگردهای داول انجام شد. متغیرهای این آزمایش دو قطر داول شامل ۲۵,۴ و ۴۴,۸ میلیمتر و سه دمای ۲۵، ۵۰ و ۶۰ درجه سانتیگراد بود. نتایج آزمایش تغییرات قابل توجهی را در خواص میلگردهای GFRP پس از گذشت زمان و در دمای ۶۰ درجه نشان نداد. جانگ و همکارانش [۱۵] به بررسی تاثیر الیاف پلیمری در عملکرد بتن مورد استفاده در روسازی راه ها پرداختند. دال های بتنی، یکی از انواع سازه هایی است که کاربرد زیادی در صنعت ساختمان داشته و تحقیقات زیادی در زمینه استفاده از الیاف پلی پروپیلن در جهت کنترل ترک خوردگی در آنها صورت گرفته است.

هو و چن [۱۶ و ۱۷] در دو پژوهش، به بررسی اثر آرماتورهای FRP در تقویت روسازی های بتنی و اثر آنها بر ترک های عرضی پرداختند. برای بررسی از روش شبیه سازی عددی نرم افزاری استفاده نمودند و در نتایج هر دو پژوهش بیان شده است به کارگیری FRP باعث کاهش ۱۷ درصدی ترک ها در روسازی‌های تقویت شده داشته است. ویجی و همکاران [۱۸] به بررسی و مقایسه داول‌های FRP با داول‌های فولادی به صورت اجرایی پرداختند. داول‌های مورد استفاده در قطرهای ۳۸ و ۲۵ میلیمتر بوده است و فواصل قرارگیری آنها به ترتیب ۳۰۰ و ۱۵۰ میلیمتر استفاده شده است. نتیجه قابل توجه در آزمایشات ویجی این است که داول های FRP نیاز به طول‌های کمتری برای انتقال بار در روسازی های بتنی نسبت به داول های فولادی دارند. فنگ و همکاران [۱۹] به بررسی روسازی های بتنی عرشه پل‌ها با تقویت شبکه CFRP پرداختند، در این پژوهش از روش محاسبات عددی استفاده شده است و صحت سنجی روش انتخابی با روش‌های

تجربی انجام شده است و نتایج دقت قابل قبولی را نشان داده است، نتایج این بررسی نشان می‌دهد که بهترین جانمایی شبکه CFRP در جهت افقی و در تراز بالایی روسازی در عرشه پل می باشد.

السیف و همکاران [۲۰] پژوهشی در خصوص تقویت روسازی بتنی به صورت ترکیب FRP و الیاف فولادی بازیافتی از تایرهای لاستیک انجام دادند، نتایج پژوهش بیان می‌کند که ترکیب این دو در تقویت روسازی بتنی، منجر به افزایش ۵۰ درصدی شکل پذیری بتن نسبت به بتن معمولی شده است. کیم در سال ۲۰۱۹ [۲۱] به تحقیقی در خصوص عملکرد FRP در پل های بزرگراه ها پرداخت. نکته قابل توجه در پژوهش، روش مورد استفاده برای بررسی هدف تحقیق بود که از روش پرسشنامه‌ای استفاده نموده است. بدین ترتیب که در بزرگراه‌هایی که از FRP به عنوان تقویت کننده استفاده شده بود، پرسشنامه ای جهت شناسایی چالش ها و نظرات کارشناسان و مسئولان حمل و نقل توزیع نمود. به طور کلی نظرات مسئولان حاکی از رضایت از راه تقویت شده را داشت و البته در خصوص دوام FRP نظرات، نشان داده است که نیاز به پژوهش‌های بیشتری می باشد. فروزانمهر و همکاران [۲۲] ارزیابی آزمایشگاهی در خصوص مقاومت شیمیایی داول‌های GFRP در روسازی بتنی انجام دادند. برای انجام آزمایش شرایط مختلف شیمیایی اعم از محیط قلیایی، شور، انجماد و خنک شدن و درجه حرارت بیشتر، ایجاد شد. نتایج نشان می دهد عملکرد GFRP در شرایط مختلف دارای ثبات نبوده و در برخی شرایط شیمیایی، عملکرد مناسب و بالا و در برخی شرایط، عملکرد نامناسبی داشته است. محمد و همکاران [۲۳] نیز به بررسی روسازی بتنی مسلح شده با GFRP در بزرگراهی در مونترال کانادا پرداخت، در این پژوهش پس از ۱۲ ماه از تقویت روسازی با GFRP آزمایشات بر روی روسازی انجام شده است و نتایج، افزایش ظرفیت خمشی روسازی را با تقویت GFRP نسبت به فولاد نشان داده است.

گالگو و همکاران در سال ۲۰۱۷ [۲۴] پژوهشی در خصوص مقاومت استاتیک کوتاه مدت و بلندمدت دال‌های روسازی بتنی تقویت شده با GFRP انجام دادند. نتایج نشان داده است که تغییرات دمایی فصلی بر مقاومت بلندمدت روسازی تاثیر منفی دارد. ویجی و همکاران[۲۵] در پژوهشی با موضوع بررسی آزمایشگاهی روسازی های بتنی درزدار دارای داول های FRP انجام دادند. در این مطالعه، نمونه‌های روسازی بتنی درزدار (JPCP) دارای داول های (FRP) و مقایسه با نمونه های دارای داول فولادی مورد بررسی قرار گرفتند و در تحلیل آزمایشگاهی، تست خستگی و استاتیکی بر روی نمونه ها انجام شده است. پن و همکاران [۲۶] در سال ۲۰۲۰ از مش‌های GFRP برای تقویت روسازی بتنی در باند هواپیما استفاده نموده و رفتار خستگی روسازی را بررسی نمودند و نتایج نشان داده است که نمونه جدید، توانایی تحمل تعداد بار بسیار بیشتری را دارد و ترک خستگی دیرتر آغاز می شود.

بررسی پژوهش های انجام شده در زمینه داول ها و بررسی نوع کامپوزیتی نشان می دهد، بررسی های انجام شده عموما آزمایشگاهی و از نوع صرفا تست خمش و بارگذاری استاتیکی بوده است. در خصوص بررسی خستگی نیز تحقیقات انجام شده بسیار محدود و به صورت تجربی انجام شده است، در رابطه با روش‌های شبیه سازی عددی و بررسی المان محدود نیز پژوهش های محدودی وجود دارد که از نرم افزارهای قدرتمند المان محدود در آنها استفاده نشده است. لذا برای مدل‌سازی دقیق‌تر رفتار خستگی میله های داول تحت بارهای وارده، از روش المان محدود استفاده شده تا توانایی و قابلیت داول‌های فولادی و کامپوزیتی GFRP و CFRP مورد ارزیابی دقیق قرار گیرد. از آنجا که رفتار میله داول در قطرهای مختلف نیز متقاوت است، برای مدلسازی دقیق‌تر از اندازه قطرهای مختلف نیز استفاده شده تا مقایسه میان جنس و قطر داول ها نیز میسر شود.

از آنجا که تاکنون تحلیل دقیق خستگی به روش المان محدود بر روی میله های داول با مصالح مختلف انجام نشده، در این مقاله، مقایسه‌ای میان رفتار داول‌های از جنس فولاد و دو نوع از کامپوزیت‌های FRP تحت بارهای وارده انجام شده و تحلیل تغییرات تنش و خستگی ایجاد شده در مصالح به انجام رسیده است. برای این منظور از روش المان محدود استفاده شده تا ضمن مدلسازی مناسب بارها و مصالح، تحلیل دقیقی از شرایط ایجاد شکست خستگی میان مصالح مختلف به دست آمده و مناسبترین نوع مصالح که کارآیی بالاتری را در تحمل پدیده خستگی دارند، مشخص گردد . برای نیل به این مقصود از داول های با مصالح و قطرهای مختلف استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که در تمامی قطرهای مورد بررسی مقدار تنش در مدل های دارای داول کامپوزیت کربنی از سایر مدل ها کمترین مقدار را دارد و پس از آن مدل های دارای جنس داول بار کامپوزیت شیشه قرار دارد و بیشترین مقدار تنش مربوط به آرماتورهای فولادی می باشد و لذا داول های با جنس CFRP در انتقال بار مناسبتر بوده و تنش های خستگی کمتری را ایجاد نموده و تاب آوری بالاتری را داشته اند.

این نتایج می تواند در انتخاب مناسبتر جنس میله های داول، مورد استفاده قرار گرفته و طول عمر بیشتری را برای روسازی های بتنی به همراه داشته باشد.

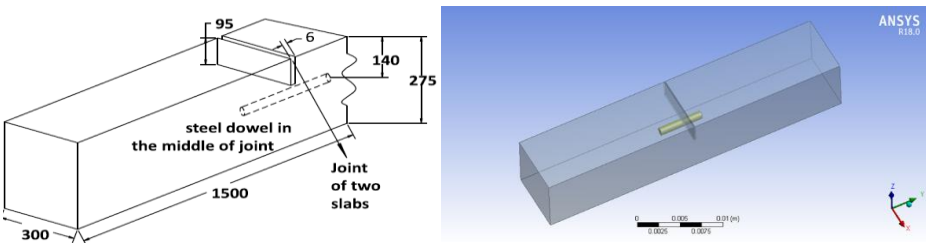
۲- روش انجام کار و مدلسازی

روش اجزای محدود روشی برای حل تقریبی معادلات دیفرانسیل حاکم بر محیط‌های پیوسته است. محبوبیت این روش بیشتر به دلیل سهولت برنامه نویسی آن است. این روش، در اوایل برای حل مسائل سازه ای به کار گرفته شد ولی استفاده از آن در زمینه های مختلف، گسترش یافت. مشخصات مدل‌های مورد بررسی در این پژوهش، بر اساس پژوهش‌های قبلی محققین تعیین گردیده و به شرح زیر است:

- دال بتنی مورد نظر دارای عرض ۳,۶۵ متر، طول ۶,۱ متر و ضخامت ۴۵ سانتیمتر می باشد [۳].
- سه قطر انتخابی جهت آرماتورهای داول نیز سه قطر رایج [۹] معادل ۱۶، ۲۵ و ۳۸ میلیمتر انتخاب می شود. داول در وسط ضخامت دال و در فواصل ۳۰,۴۸ سانتیمتری قرار می گیرد [۶] و طول داول ها ۴۵,۷۲ سانتیمتر [۱۰] انتخاب شده است.
- مصالح مورد استفاده در داول ها ، فولاد، الیاف کامپوزیتی کربنی (CFRP) و الیاف کامپوزیت شیشه (GFRP) می باشد.
- تحلیل مورد بررسی در مدل ها (۹ مدل، سه جنس داول در سه قطر مختلف) تحلیل خستگی می باشد.

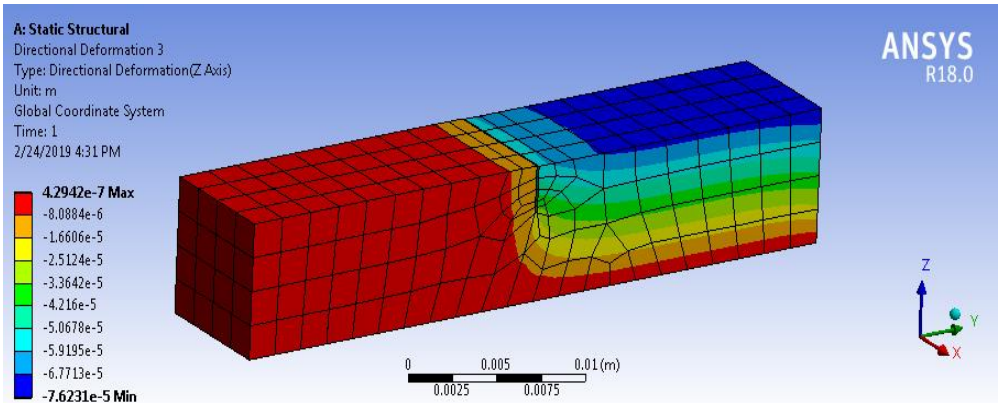
۳- صحت سنجی نرم افزار ANSYS

در این بخش، برای صحت سنجی نرم افزار مورد استفاده، از نرم‌افزار اجزا محدود ANSYS جهت مدل‌سازی یک نمونه آزمایشگاهی استفاده می‌گردد. در واقع، هدف صحت سنجی، بررسی عملکرد نرم افزار در مورد یک نوع هندسه و یا مصالح مشخص می باشد. در بسیاری از موارد، دقیقا مدل مورد نظر در پژوهش تحت عنوان کارهای آزمایشگاهی و یا عددی با نرم افزارهای دیگر، در دسترس می باشد. معمولا برای کارهای آزمایشگاهی از مدلهای نسبتا کوچک استفاده می شود که در قیاس با سازه ابعاد خیلی کوچکتری دارند اما نمودی از رفتار سازه را به خوبی نشان خواهند داد. برای برخی از مدلهای عددی، بعضا کارهای آزمایشگاهی در دسترس نیستند، لذا باید رفتار مصالح مورد استفاده در مدل عددی، در قالب یک کار آزمایشگاهی ارزیابی شود. در این پژوهش، مدل آزمایشگاهی طبق پژوهش ویجی و همکاران [۱۸] انتخاب شده است. هندسه مدل مطابق شکل (۱) می باشد.



شکل ۱- مشخصات هندسی مدل آزمایشگاهی محققین [۱۸] (سمت راست) مدل هندسی ایجاد شده در نرم افزار ANSYS (سمت چپ)

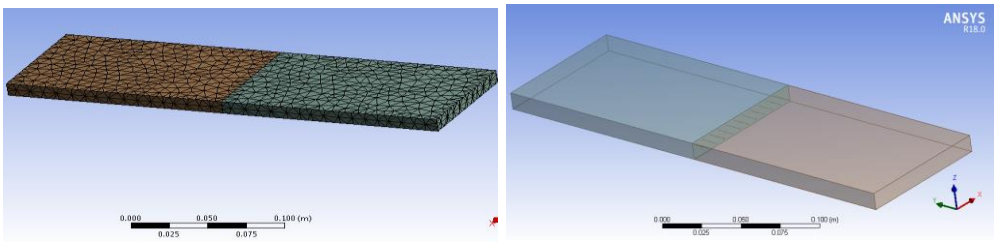
بررسی نتایج به دست آمده در آزمایش ویجی نشان می دهد مقدار تغییر شکل در مدل انتخابی ۰,۰۶۱ میلی‌متر می باشد. بررسی خروجی گرافیکی نرم افزار نیز (شکل (۲)) نشان می دهد مقدار ماکزیمم تغییر شکل $۷,۶\ e^{-۵}$ متر است که به طور تقریبی معادل ۰,۰۷ میلی‌متر می باشد. به عبارت دیگر، مقایسه نتایج آزمایشگاهی و نرم افزاری نشان می‌دهد خروجی‌ها به یکدیگر نزدیک بوده و نتایج صحت سنجی با دقت نسبتا مناسبی، قابل پذیرش می باشد.



شکل ۲- تغییر شکل در راستای قائم در مدل مورد بررسی مطابق با نمونه آزمایشگاهی پژوهش ویجی

۴- مدل‌سازی در نرم افزار ANSYS

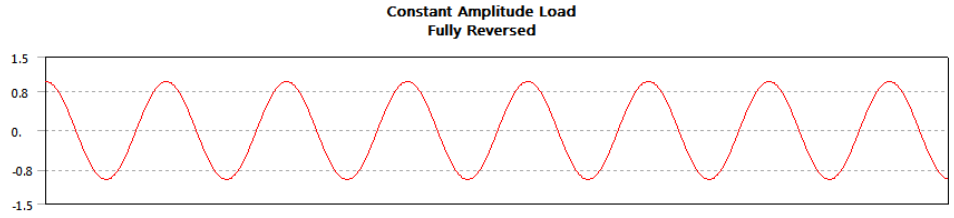
مدلسازی در نرم افزار شامل ایجاد هندسه، تعریف مشخصات مصالح، تعریف سطوح تماس بین المان های مختلف هندسه مورد بررسی، تعریف شرایط مرزی و بارگذاری، تعریف نوع تحلیل و استخراج خروجی می باشد. در این بخش هندسه مدل‌های مورد بررسی در نرم افزار AUTOCAD ترسیم و سپس به نرم افزار ANSYS فراخوانی شده است. در این پژوهش سه هندسه با سه قطر مختلف از آرماتورهای داول وجود دارد که شامل ۱۶، ۲۵ و ۳۸ میلی متر می باشد. هر هندسه شامل دو پارت بتنی و یازده پارت آرماتور می باشد. المان مورد استفاده در پارت‌های بتن و آرماتور از نوع SOLID است. نوع سطح تماس آرماتورها و بتن، شامل دو نوع سطح تماس می شود. آرماتورها به صورت مدفون در بتن و همچنین دارای اصطکاک در محل تماس با بتن تعریف شده است. نمای سه بعدی از مدل مورد بررسی و مش بندی مدل در شکل (۳) نشان داده شده است.



شکل ۳- نمای سه بعدی مدل (سمت راست) مدل مش بندی شده (سمت چپ)

پس از مش بندی دو شرط مرزی شامل محدود نمودن حرکت صفحه پایینی مدل در جهت قائم و همچنین محدود نمودن صفحات جانبی مدل در دو جهت افقی انجام می شود. مقدار بار وارده بر مدل نیز به یکی از دال‌های بتنی و برابر ۲۰۰ کیلو نیوتن انتخاب شده است. مقدار بار با توجه به مطالعه و بررسی مقالات مشابه به دست آمده است. مقدار بار وارده می‌بایست از مقدار تنش گسیختگی مصالح موجود در مدل کمتر باشد که این شرط رعایت شده است.

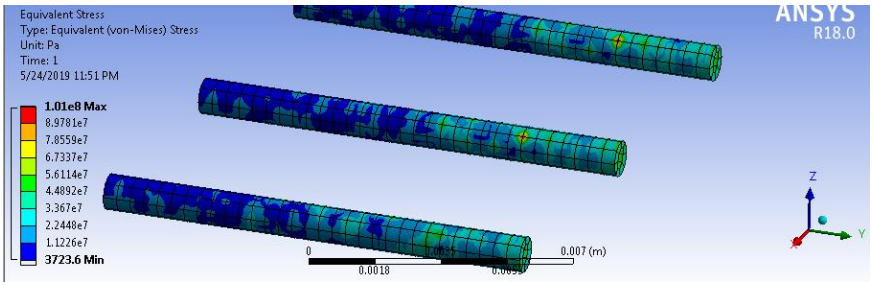
تنشی که در تعداد مشخصی از تکرار بارگذاری، نمونه در آن گسیخته می‌شود، استحکام خستگی (Fatigue Strength) و تعداد تکرار سیکل‌های تنشی که قطعه طی می‌کند تا به شکست برسد، عمر خستگی (Fatigue LIFE) نامیده می‌شود. در این پژوهش، با توجه به تحلیل اولیه و عمر خستگی بیش از ۱×۱۰^{۹} ، تعداد سیکل های بارگذاری ۱×۱۰^{۲۰} تعریف شده است. علت تعریف رقم بالا در تعداد ماکزیمم سیکل بارگذاری جلوگیری از ایجاد محدودیت ماکزیمم سیکل در مدل می باشد. در این پژوهش الگوی بارگذاری از نوع بحرانی و معکوس که شامل تنش فشاری و کششی می باشد انتخاب شده است. الگوی بارگذاری این پژوهش در شکل (۴) نشان داده شده است.



شکل ۴- الگوی بارگذاری خستگی مورد استفاده

۵- خروجی های تنش و عمر حاصل از تحلیل خستگی

در این بخش، خروجی‌های تنش در مدل‌ها بر اساس معیار تنش فون میسز ارائه شده است. در مورد المان‌هایی که تحت تنش‌های ترکیبی نرمال و برشی قرار دارند می توان با استفاده از معیار تنش فون میسز بررسی کرد که آیا جسم به نقطه تسلیم رسیده یا خیر. در این پژوهش، با توجه به اینکه نوع تحلیل خستگی می باشد و گسیختگی سازه بر مبنای تکرار سیکل بارگذاری رخ می دهد، مبنای رخ دادن گسیختگی در مدل، رسیدن به تنش تسلیم نمی باشد، بلکه بررسی پارامتر عمر و تعداد سیکل بارگذاری حاصل از تحلیل خستگی است. در شکل (۵) تغییرات تنش در آرماتورهای داول فولادی با قطر ۱۶ میلیمتر نشان داده شده است.



شکل ۵- تغییرات تنش در داول بارهای فولادی ۱۶ میلیمتری

خلاصه نتایج مربوط به تنش در مدل ها در جدول (۱) ارائه شده است.

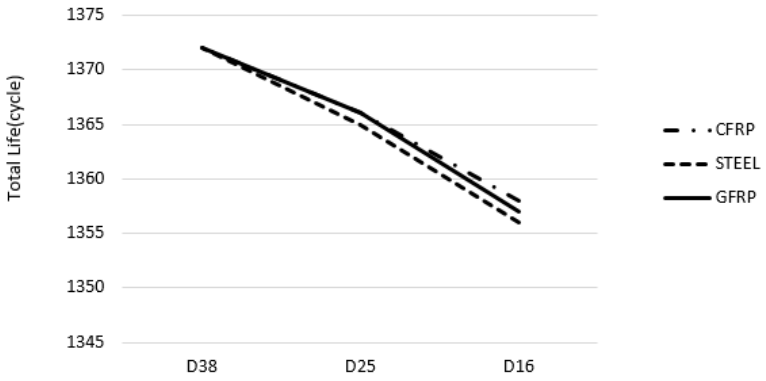
جدول ۱- نتایج بررسی تنش در مدل ها تحت تحلیل خستگی

جنس داول بار	قطر ۳۸ میلیمتر	قطر ۲۵ میلیمتر	قطر ۱۶ میلیمتر
STEEL	۷,۰۲۵ eV	۷,٤ eV	۱۰,۱ eV
CFRP	۵,۱۲ eV	۵,٦۲ eV	۵,۸۷ eV
GFRP	۵,۷۲ eV	٦,٤٦ eV	٦,۸۵ eV

بررسی نتایج تنش در مدل ها نشان می دهد در تمامی قطرهای مورد بررسی مقدار تنش در مدل‌های دارای داول CFRP از سایر مدل‌ها کمترین مقدار را دارد و پس از آن، مدل‌های دارای جنس داول بار GFRP قرار دارد و بیشترین مقدار تنش، مربوط به آرماتورهای فولادی می باشد. به عبارت دیگر داول‌های CFRP در انتقال بار بهتر عمل نموده و منجر به ایجاد تنش‌های گسیختگی کمتری در مدل شده اند.

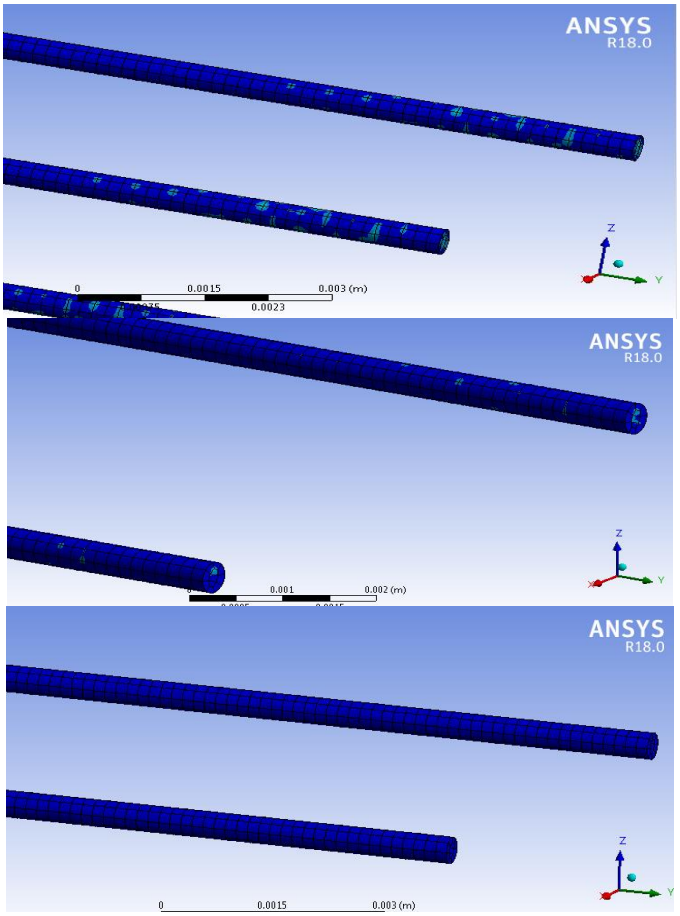
بررسی اثر افزایش قطر نیز نشان می‌دهد با افزایش قطر در هر سه نوع داول بار مورد بررسی مقدار تنش گسیختگی افزایش یافته است و قطر بزرگتر منجر به تنش ماکزیمم کمتری در تحلیل خستگی مدل شده است.

در این پژوهش سه قطر مختلف آرماتور داول در سه جنس مختلف در نرم افزار المان محدود ANSYS مورد مدل‌سازی قرار گرفتند. جهت بررسی پدیده خستگی در مدل های مذکور، پس از تحلیل مدل‌ها، خروجی‌های کمانش هر نمونه و تعداد سیکل منتج به شکست (LIFE) استخراج و ارائه گردید. مقایسه سیکل‌های منجر به شکست در شکل (۶) نشان داده شده است.



شکل ۶- مقایسه تغییرات LIFE کلی در مدل ها

همان گونه که انتظار می‌رود، با افزایش قطر آرماتور، تعداد سیکل منتج به شکست افزایش می یابد. بررسی شکل (۶) همچنین نشان می‌دهد، تفاوت فاحشی در تغییر مقدار شروع سیکل عمرخستگی در مدل که در پارت بتنی آغاز می شود وجود ندارد و اختلاف دو تا سه سیکل بارگذاری با درنظر گرفتن تعداد کل سیکل‌های بارگذاری ناچیز محسوب می شود. لذا جهت بررسی تاثیر جنس داول به بررسی عمر خستگی در خود داول بارها و بدون در نظر گرفتن بتن پرداخته می شود. (شکل (۷)).



شکل ۷- تصویر از بالا به پایین به ترتیب عمر خستگی داول بار ۱۶ میلیمتری: در فولاد، GFRP و CFRP

بررسی تغییرات عمر خستگی در داول بارهای ۱۶ میلیمتری نشان می دهد، مقدار عمر خستگی در داول بار فولادی در سیکل 10^{9} مشاهده می‌شود و در داول بار GFRP در سیکل 10^{12} شروع می‌شود و در داول بار CFRP تمامی نقاط در سیکل انتهایی 10^{15} شروع می‌شود. در خصوص بررسی تاثیر قطر نیز در هر یک از جنس های داول بار می توان اثر افزایش قطر را در عمر خستگی داول بار مشاهده نمود. بدین ترتیب که در عدد عمر خستگی داول بارها تفاوت چندانی ملاحظه نمی شود ولی در تعداد نقاطی که شروع به گسیختگی می-نمایند، تفاوت دیده می شود و بررسی‌ها نشان می‌دهد با افزایش قطر تعداد نقاطی از داول که شروع به گسیختن می‌نماید کاهش می‌یابد.

۶- نتیجه‌گیری و پیشنهادات

بررسی نتایج تنش در مدل‌ها نشان می‌دهد در تمامی قطرهای مورد بررسی مقدار تنش در مدل‌های دارای داول CFRP نسبت به سایر مدل‌ها کمترین مقدار را دارد و پس از آن، مدل‌های دارای جنس داول بار GFRP قرار دارد و بیشترین مقدار تنش مربوط به آرماتورهای فولادی می باشد. به عبارت دیگر داول‌های CFRP در انتقال بار بهتر عمل نموده و منجر به ایجاد تنش‌های گسیختگی کمتری در مدل شده اند .

با بررسی اثر افزایش قطر، مشخص می‌گردد که با افزایش قطر در هر سه نوع داول، مقدار تنش گسیختگی افزایش یافته است و قطر بزرگتر منجر به تنش ماکزیمم کمتری در تحلیل خستگی مدل شده است. تفاوت زیادی در تغییر مقدار شروع سیکل عمرخستگی در مدل وجود ندارد و اختلاف دو تا سه سیکل بارگذاری با درنظر گرفتن تعداد کل سیکل‌های بارگذاری، ناچیز محسوب می شود. بررسی تغییرات عمر خستگی در داول بارهای ۱۶ میلیمتری نشان می دهد مقدار عمر خستگی در داول بار ۱۶ میلیمتری فولادی در سیکل ۲۵۶ میلیونی مشاهده می شود و در داول بار ۱۶ میلیمتری GFRP در سیکل ۱۱۱ میلیاردی شروع می شود و در داول بار ۱۶ میلیمتری CFRPتمامی نقاط در سیکل انتهایی 10^{15} شروع می‌شود.

در خصوص بررسی تاثیر قطر نیز در هر یک از جنس های داول بار می توان اثر افزایش قطر را در عمر خستگی داول بار مشاهده نمود. به این صورت که در عمر خستگی داول بارها تفاوت چندانی ملاحظه نمی شود ولی در تعداد نقاطی که شروع به گسیختگی می نمایند تفاوت وجود دارد و تحلیل نتایج نشان می‌دهد با افزایش قطر، تعداد نقاطی از داول که شروع به گسیختن می‌نماید، کاهش می‌یابد .

در رابطه با فاکتور ایمنی، مشخص شده است که قبل از رسیدن به عمر طراحی، شکست اتفاق نیفتاده است ولی در افزایش تعداد نقاط دارای فاکتور ایمنی، مشاهده می شود که بیشترین ایمنی در CFRP و کمترین مقدار در فولاد وجود دارد. همین روند در قطرهای ۲۵ و ۳۸ میلیمتر نیز اثبات شده است. مقایسه نتایج آنالیز حساسیت خستگی نشان می دهد هرچه مقدار تنش متوسطی که به عضو وارد می‌شود، بیشتر باشد، زودتر خسته می‌شود و عمر خستگی در سازه را کاهش می‌دهد. در رابطه با تاثیر جنس داول بارها در تغییر حساسیت خستگی تفاوت قابل ملاحظه در شروع سیکل شکست مشاهده نگردید و نهایتا در برخی از مدل ها، دو الی سه سیکل کاهش و یا افزایش، در شروع شکست دیده می شود که ناچیز می باشد. این نتایج می تواند راهنمایی در انتخاب مناسبتر جنس میله های داول باشد تا امکان افزایش عمر بیشتر روسازی های بتنی را میسر نماید .

۷- مراجع

[1] Huang, Y. H. (1993) “Pavement analysis and design”, Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall.

[2] Lofsjogard, M. (2005) “A laboratory investigation on bonding properties of dowels in concrete roads”, Materials and structures, Vo. 38, No. 7, pp. 721-728.

[3] Shafabakhsh, Gholam Ali and Reza Nowruzi (2015) “Modeling and Investigation of Dowel Performance in Concrete Road Pavement Using 3D Element Finite Element Analysis”, Tenth International Congress of Civil Engineering, Tabriz University School of Civil Engineering ,Tabriz.

[4] Al-Humeidawi, B. H., & Mandal, P. (2014) "Evaluation of performance and design of GFRP dowels in jointed plain concrete", International Journal of Pavement Engineering, Vol. 15, No. 5, pp. 449-459.
[5] William, G. W., & Shoukry, S. N. (2001) "3D finite element analysis of temperature-induced stresses in dowel jointed concrete pavements", International Journal of Geomechanics, Vol. 3, No. 1, pp. 291-307.
[6] Porter, M. L., & Guinn Jr, R. J. (2002) "Assessment of dowel bar research", Iowa DOT Project HR-1080, CTRE Project 00-93,, Final Report.
[7] Porter, M. L., Guinn Jr, R. J., & Lundy, A. L. (2001) "Dowel bar optimization: Phases I and II", Center for Transportation Research and Education, Iowa State University.
[8] Shalaby, A., & Murison, S. (2001) "Using Fiber-Reinforced Polymer Load Transfer Devices in Jointed Concrete Pavements", In Seventh International Conference on Concrete Pavements. The Use of Concrete in Developing Long-Lasting Pavement Solutions for the 21st Century. International Society for Concrete Pavements, Orlando, Florida.
[9] Hasani, Abolfazl and Pajang, Ali, (2007) "The Influence of Dowel bar Hardness on joint Performance of Concrete Pavements", Modares Engineering Journal, spring 2007, No. 27, pp. 55- 64.
[10] Mansour Khaki, Ali and Ehsan Azadroush, (2010) "Proposed Three-dimensional Finite Element Model for the Study of Friction and Interaction of Dowel and Concrete Interaction in Concrete Pavements Using the Abaqus Finite Element Program", Fifth National Congress of Civil Engineering, Mashhad, Ferdowsi University of Mashhad.
[11] Keymanesh. M. R., Mirshekari. M., Sahriari. N., Pirhadi. A., (2018) "Evaluating the Performance of Dowel in PCC Pavement of Roads using ABAQUS Finite Element Software", International Journal of Transportation Engineering, Vol. 5, No. 4, pp. 349-365.
[12] Murison, S., Shalaby, A., & Mufti, A. A. (2002) "Modelling Of Concrete Pavement Dowel-Slab Interaction", In Proceedings of the Annual Conference of the Canadian Society for Civil Engineering, Montreal, QC.
[13] Park, C. G., Jang, C. I., Lee, S. W., & Won, J. P. (2008) "Microstructural investigation of long-term degradation mechanisms in GFRP dowel bars for jointed concrete pavement", Journal of applied polymer science, Vol. 5, No. 5, pp. 3128-3137.
[14] Montaigu, M., Robert, M., Ahmed, E. A., & Benmokrane, B. (2013) "Laboratory characterization and evaluation of durability performance of new polyester and vinyl ester E-glass GFRP dowels for jointed concrete pavement", Journal of Composites for Construction, Vol. 17. No. 2, pp. 176-187.
[15] Jong, K. C., Roh, I. T., & Chang, S. H. (2015) "Stress analysis of runway repaired using compliant polymer concretes with consideration of cure shrinkage" Composite Structures, No. 199, pp. 13-23.
[16] Hu, C., & Chen, L. (2015) "Research on Transverse Cracks in Continuously Reinforced Concrete Pavements Using Fiber Reinforced Polymer Bars", 2nd International Conference on Green Materials and Environmental Engineering, pp. 118-120.
[17] Hu, C., & Chen, L. (2017) "Load Transfer Coefficient of Transverse Cracks in Continuously Reinforced Concrete Pavements Using FRP Bars", In Proceedings of the 2nd Czech-China Scientific Conference 2016. InTechOpen, pp: 372-381.
[18] Vijay, P. V., Li, H., & GangaRao, V. H. (2020). Laboratory testing, field construction, and decade long performance evaluation of jointed plain concrete pavement with FRP dowels. International Journal of Pavement Engineering, Vol 21, No, 6, pp. 713-724.
[19] Fang, H., Zou, F., Liu, W., Wu, C., Bai, Y., & Hui, D. (2017) "Mechanical performance of concrete pavement reinforced by CFRP grids for bridge deck applications", Composites Part B: Engineering, Vol. 110, pp. 315-335.
[20] Alsaif, A., Garcia, R., Guadagnini, M., & Pilakoutas, K. (2018) "Behavior of FRP-Confined Rubberised Concrete with Internal Recycled Tyre Steel Fibres", In High Tech Concrete: Where Technology and Engineering, Springer, Cham, pp. 233-241.
[21] Kim, Y. J. (2019) "State of the practice of FRP composites in highway bridges", Engineering Structures, No. 179, pp.1-8.
[22] Foruzanmehr, M., Montaigu, M., Benmokrane, B., & Robert, M. (2016) "Laboratory evaluation of chemical resistance of pultruded GFRP dowels for concrete pavement. Materials and Structures, Mater Struct, Vol. 49, pp. 929-940.

[23] Mohamed, H. M., Thébeau, D., & Benmokrane, B. (2016) "Building sustainable continuously reinforced concrete pavement GFRP bars. Case study highway 40 west Montreal, Canada", Resilient Infrastructure, pp. 1-9.

[24] Gallego, J. M., Michels, J., & Czaderski, C. (2017) "Influence of the asphalt pavement on the short-term static strength and long-term behavior of RC slabs strengthened with externally bonded CFRP strips", Engineering Structures, Vol. 150, pp. 481-496.

[25] Vijay, P. V., Li, H., & GangaRao, H. V. S. (2015) "Field Construction and Long-Term Performance Evaluation of Jointed Plain Concrete Pavement with FRP Dowels", TRB- CD-ROM Publication and Presentation.

[26] Yang Pan, Chao Wu, Xianfeng Cheng, Victor C. Li, Li He (2020) "Impact fatigue behavior of GFRP mesh reinforced engineered cementitious composites for runway pavement", Construction and Building Materials ,Volume 230.