

## ارایه مدل خستگی در تیرهای بتن غلتکی مسلح شده با الیاف ماکروسنتتیک

### مقاله پژوهشی

حامد روح‌الامینی، دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، ایران

ابوالفضل حسینی\*، استاد، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، ایران

ارسطو کریمی، دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، ایران

بهروز قبادی‌پور، دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه علم و صنعت، ایران

\*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: Hassani@modares.ac.ir

دریافت: ۹۷/۰۸/۱۶ - پذیرش: ۹۸/۰۲/۰۵

صفحه ۱۸۵-۱۹۵

#### چکیده

بتن غلتکی یک بتن با اسلامپ صفر و مخلوطی خشک است که به‌وسیله غلتک برای رسیدن به چگالی لازم متراکم می‌گردد. در مقایسه با بتن معمولی، این بتن با میزان سیمان کمتری به مقاومت یکسان می‌رسد. باین‌حال، یکی از موانع اصلی در جهت توسعه استفاده از این نوع بتن در روسازی راه، مقاومت سایشی پایین و عدم امکان استفاده از داول و میلگرد است. یکی از راهکارهای بهبود مشخصات این نوع بتن استفاده از الیاف می‌باشد. در این تحقیق الیاف ماکروسنتتیک جهت مسلح نمودن این نوع بتن استفاده گردید. آزمایش‌های مکانیکی شامل آزمایش مقاومت فشاری، کشش غیرمستقیم و آزمایش تیر خمشی بر روی دو درصد مصرفی از این الیاف صورت پذیرفت. همچنین رفتار ترک‌خوردگی و خستگی با استفاده از تیر خمشی سه‌نقطه‌ای با شیار مورد ارزیابی قرار گرفت. بیشترین اثر الیاف را می‌توان به ترتیب بر روی انرژی شکست (رفتار پس از ترک‌خوردگی)، مقاومت خمشی و مقاومت کششی غیرمستقیم بیان نمود. این در حالی است که الیاف اثرگذاری چشمگیری بر روی مقاومت فشاری ندارد. نتایج حاصل‌شده از آزمایش خستگی و تحلیل آماری صورت پذیرفته، بیانگر اثرگذاری معنادار به ترتیب نسبت تنش، درصد الیاف و انرژی شکست بر عمر خستگی تیر بتن غلتکی است

واژه‌های کلیدی: بتن غلتکی الیافی، مشخصات مکانیکی، چقرمگی شکست، عمر خستگی

#### ۱- مقدمه

مزایای این نوع بتن می‌توان به کاهش هزینه ناشی از افزایش سرعت اجرا و مصرف سیمان کمتر جهت دستیابی به مقاومت مشابه بتن معمولی اشاره کرد (ACI, 2000). هرچند مقاومت خمشی بتن غلتکی به‌عنوان پارامتر مهمی در طراحی روسازی در نظر گرفته می‌شود ولی تهیه نمونه‌های خمشی در آزمایشگاه یا بریدن نمونه‌های منشوری لازم از بتن درجا اجراشده جهت تعیین این پارامتر دشوار است. شایان توجه است که همانند مقاومت فشاری پارامترهایی نظیر نسبت  $w/c$  و درجه تراکم روی مقاومت خمشی بتن‌های غلتکی تأثیر قابل‌توجهی دارند و در صورتی که به

بتن غلتکی یک بتن با اسلامپ صفر و مخلوطی خشک است که به‌وسیله غلتک برای رسیدن به چگالی لازم متراکم می‌گردد. در مقایسه با بتن معمولی این بتن با میزان سیمان کمتری به مقاومت یکسان می‌رسد (Modarres & Hosseini, 2014). به‌منظور دستیابی به مخلوط بتن غلتکی نیاز به ایجاد تغییراتی در مخلوط بتن معمولی شامل تغییر حجم ملات و سنگ‌دانه درشت، کاهش میزان آب، تغییر نسبت آب به سیمان و افزایش میزان ریزدانه است. یکی از کاربردهای این نوع بتن در روسازی راه‌های صنعتی و چندانگانه با سرعت ترافیک پایین و میزان بار زیاد است. از

در ناحیه پس ترک خوردگی قابل انتظار است (Lin, et al, 2014). ترک خوردگی ناشی از خستگی یکی از دلایل از بین رفتن قابلیت خدمت‌دهی روسازی‌های بتنی محسوب می‌گردد. این نوع ترک نشان‌دهنده نقطه شروع یک‌فاز خرابی سازه‌ای است که باعث تغییر حالت تنش‌ها و تغییر شکل‌های به وجود آمده در سیستم لایه‌های تشکیل‌دهنده سازه‌های روسازی می‌شوند. خستگی یک پروسه در حال پیشرفت و دائمی تغییرات در داخل مصالح تحت تکرار تنش توسط نیروهای خارجی و یا تغییرات درجه حرارت است (Tricbes, 1988). در سالیان گذشته تلاش‌های زیادی برای درک مکانیسم خستگی انجام گرفته است. تحقیقات گسترده‌ای که در برزیل در خصوص رفتار خستگی روسازی بتن غلتکی انجام گرفت، نشان داد که روسازی بتن غلتکی دارای رفتار خستگی شبیه به روسازی بتنی است. البته می‌توان انتظار داشت که برای مقادیر درصد سیمان مشابه، روسازی بتن غلتکی دارای مقاومت بیشتری در برابر خستگی باشد زیرا که نسبت آب به سیمان در این‌گونه مخلوط‌ها به‌طور فراوانی کمتر است. همچنین این تحقیقات نشان داده است که دانه‌بندی سنگ‌دانه نقش نسبتاً مهمی در رفتار خستگی دارد. در مخلوط‌های با درصد سنگ‌دانه درشت‌تر مشاهده گردیده است که پس از گذشت زمانی برابر ۴۵٪ عمر خستگی ترک‌ها شروع به رشد می‌کنند درحالی‌که در مخلوط‌های با سنگ‌دانه ریزتر ترک‌ها دیرتر و کندتر رشد می‌کنند بطوریکه شروع آن در حدود ۶۵٪ عمر خستگی است (ACI, 2000). تحقیقات انجام‌گرفته توسط کایمین و کینگوان نشان داد که به دلیل تفاوت زیاد ترکیب مصالح و پروسه اجرا بین روسازی بتن معمولی و غلتکی تفاوت‌هایی نیز در رفتار خستگی آن‌ها به وجود می‌آید (Nanni, 1996). در روسازی‌های بتنی پدیده خستگی به‌صورت تنش کنترل مورد ارزیابی و آزمایش قرار می‌گیرد و نتیجه آزمایش در فرم مطالعات تجربی به‌صورت نمودار S-N که به آن نمودار اولر نیز گفته می‌شود و یا به‌صورت نمودار خستگی که تأثیر نیروی حداقل را نیز به همراه دیگر عوامل در نمودار نشان دهد نمایش داده می‌شود که به آن نمودار گودمن یا اسمیت نیز گفته می‌شود (Sendekyj, 2001). بر اساس مطالعات میدانی و آزمایشگاهی، مدل‌های خستگی متعددی برای روسازی بتنی ارائه شده است که این مدل‌ها بر مبنای

علت مناسب نبودن درصد رطوبت و یا انرژی تراکم مناسب صورت نگیرد افت مقاومت خمشی ایجاد خواهد شد. با توجه به اینکه در این نوع بتن امکان استفاده از داول در محل درزهای روسازی وجود ندارد استفاده از الیاف جهت مسلح کردن آن و افزایش توانایی انتقال بار می‌تواند گزینه مناسبی باشد (نشریه ۳۵۴، ۱۳۸۵). از منظر مواد، عمدتاً از چهار نوع الیاف جهت مسلح کردن بتن استفاده می‌گردد: الیاف شیشه‌ای، الیاف طبیعی، الیاف فلزی و الیاف سنتتیک. قابلیت الیاف در بهبود خواص و عملکرد بتن به عوامل زیادی چون نوع الیاف، درصد الیاف، نسبت ظاهری الیاف، اصطکاک سطحی و مقاومت کششی الیاف وابسته است (Yin et al, 2015). الیاف سنتتیک معمولاً در چهار دسته آرومید، پلی‌الفین، اکریلیک و کربن تولید می‌شوند. از منظر کاربرد و اندازه، الیاف سنتتیک به دودسته میکرو و ماکرو دسته‌بندی می‌شوند. الیاف میکرو با مدول الاستیسیته پایین با قطر  $\mu\text{m}$  ۵-۱۰ و طول ۳۰-۵ mm جهت کنترل انقباض پلاستیک در بتن تازه و الیاف ماکرو با سطح مقطع  $\text{mm}^2$  ۱-۶، و طول ۳۰-۶۰ mm جهت بهبود مقاومت کششی نسبی بتن و رفتار پس از ترک خوردگی بکار گرفته می‌شوند. شایان‌ذکر است که الیاف ماکرو نیز بر روی کاهش ترک‌های انقباضی پلاستیک بتن تأثیر مؤثر دارد (Habib et al, 2013, Pelisser, 2010). بیشترین اثر استفاده از الیاف ماکرو را می‌توان به ترتیب بر روی چقرمگی، مقاومت خمشی و مقاومت کششی بتن بیان نمود (Brandt, 2010). در بحث اثر الیاف بر مقاومت فشاری، همان‌طور که در جدول ۱ مشاهده می‌شود تفاوت در نتایج ارائه‌شده بیانگر این نکته است که اثر الیاف بر مقاومت فشاری بتن متأثر از نوع و اندازه و میزان مصرف الیاف و نوع بتن است. مطالعه لیبره و همکاران (Libre et al, 2011) بر روی درصد مصرفی الیاف در بتن نشان داده شد که در درصدهای پایین مصرف الیاف پلی‌پروپیلن (کمتر از ۰/۲٪) مشخصات مکانیکی بتن تغییرات چشمگیری ندارد و حداقل درصد مصرف الیاف برای بهبود قابل توجه عملکرد خمشی ۰/۴٪ توصیه شده است. در تحقیق انجام‌شده توسط آقای لین و همکاران بر روی الیاف از طریق انجام تست تیر خمش سه‌نقطه‌ای، نتیجه‌گیری شده است که با استفاده از نسبت ظاهری بالا الیاف و مقاومت بالای بتن، دستیابی به خیز سخت‌شدگی

سطح تنش و تعداد بارگذاری استوار است و هر یک با توجه به شرایط آزمایشگاه، نوع آزمایش و اطلاعات حاصله از آن و رویکرد اتخاذ شده، کاربردهای متفاوتی دارند. برخی از مهم‌ترین این مدل‌ها در جدول (۳) نشان داده شده است.

جدول ۱. مدل‌های خستگی توسعه یافته

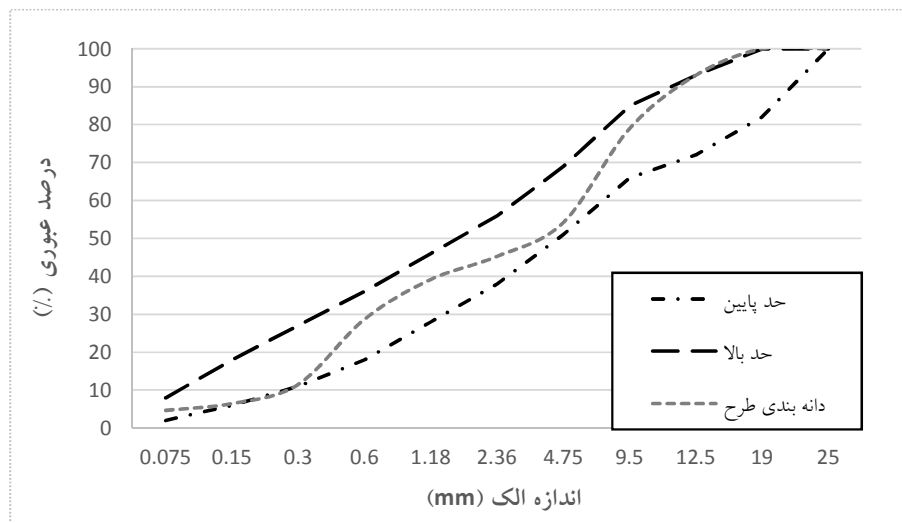
محققان	مدل‌های توسعه یافته	توضیحات
Darter, (1977)	$S = \alpha - \beta \cdot \log N$	S: سطح تنش $\alpha$ و $\beta$ : ضرایب تجربی N: تعداد تکرار بار
	$\log S = \log \alpha - \beta \log N$	
Rao & Roesler, (2005)	$N_f = K_1 \left(\frac{1}{\epsilon_t}\right)^{K_2} \left(\frac{1}{S_0}\right)^{K_3}$	N <sub>f</sub> : عمر خستگی، K <sub>1</sub> ، K <sub>2</sub> ، K <sub>3</sub> : ضرایب ثابت
Pavement EC, (2014)	$S = 1 - \beta(1 - R) \cdot \log N$ برای 0 < R < 1	S: سطح تنش $\alpha$ و $\beta$ : ضرایب تجربی N: تعداد تکرار بار R: نسبت تنش
Darter, (1993)	$S = C_1(N)^{-C_2}$	S: سطح تنش C <sub>1</sub> و C <sub>2</sub> : ضرایب تجربی N: تعداد تکرار بار

گردید. سپس با استفاده از رگرسیون چندخطی مدل پیشنهادی استخراج و تفسیر شده است.

## ۲- مصالح مصرفی و ساخت نمونه‌ها

در این تحقیق، از سیمان تیپ دو استفاده گردید. همچنین از سنگ‌دانه‌های سیلیسی رودخانه‌ای با حداکثر اندازه سنگ‌دانه ۱۹ میلی‌متر و با دانه‌بندی در محدوده نشریه ۳۵۴ مطابق شکل ۱ استفاده گردید. مشخصات هندسی و مکانیکی الیاف فلزی و سنتتیک استفاده شده در جدول لیست گردیده است.

با توجه به معادلات فوق می‌توان نتیجه گرفت که در موضوع خستگی، معیار سطح تنش که خود تابعی از مقاومت خمشی استاتیکی است، نقش تعیین‌کننده دارد. از این رو، این معیار به‌عنوان معیار اصلی در ارزیابی خستگی در این تحقیق مدنظر قرار گرفته است. هدف از انجام این تحقیق، ارائه یک مدل آزمایشگاهی در زمینه پیش‌بینی عمر خستگی تیرهای بتن غلتکی مسلح شده با الیاف ماکروسنتتیک می‌باشد. از این رو، ابتدا مشخصات کارایی و مقاومت فشاری و کششی مخلوط بتن غلتکی الیافی مورد ارزیابی قرار گرفته است. در ادامه، با استفاده از نتایج آزمایش تیر خمشی سه‌نقطه‌ای با شیار، عمر خستگی مخلوط‌های بتنی در چهار سطح تنش آزمایش



شکل ۱. دانه بندی مخلوط بتن غلتکی

جدول ۲. مشخصات الیاف مصرفی

مدول الاستیسیته (GPa)	مقاومت کششی (MPa)	وزن مخصوص	طول (mm)	قطر (mm)	جنس	نوع الیاف
۹/۵	۶۱۰	۰/۹۱	۳۸	۰/۴	پلی پروپیلن	ماکرو سنتتیک

استفاده از میز ویبره و سربار یا استفاده از چکش لرزان اشاره نمود (Rooholamini, 2018). نمونه‌های استوانه‌ای با سربار ۹ کیلوگرم و برای ساخت و تراکم یکنواخت تیرهای خمشی در طول تیر، از میز ویبره و یک سربار فلزی مکعبی با سطح تماسی ۵×۵۰ سانتی‌متر به وزن ۱۲/۷ کیلوگرم جهت ایجاد انرژی تراکم یکسان مطابق با استاندارد ASTM C1176 استفاده گردید. تیرهای ساخته شده به مدت ۲۸ روز در دمای ۲۵ سانتی‌گراد جهت انجام آزمایش تیر سه نقطه‌ای عمل‌آوری شدند.

الیاف ماکرو معمولاً در مرحله اختلاط به بتن آماده اضافه می‌گردد و این بتن مشکلی جهت اجرا و پمپینگ ندارد. در این تحقیق، پس از مخلوط کردن سیمان و آب و سنگ‌دانه، الیاف به مخلوط سیمانی اضافه گردید و جهت توزیع یکنواخت الیاف، به مدت زمان دو دقیقه با استفاده از همزن بتن میکس گردید. یکی از عوامل مهم و تأثیرگذار بر دوام و مشخصات مکانیکی بتن غلتکی میزان تراکم است. امروزه روش‌های متنوعی جهت تراکم نمونه‌های آزمایشگاهی بتن غلتکی توصیه شده است که از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به

جدول ۳. طرح اختلاط و کارایی بتن غلتکی الیافی

نوع نمونه	سیمان مصرفی (Kg/m <sup>3</sup> )	W/C	درصد حجمی الیاف مصرفی (%)	زمان وی‌بی (ثانیه)
N	۳۵۰	۰/۴۲	۰	۳۵
P0.25			۰/۲۵	۳۹
P0.5			۰/۵	۴۱

۳- روش انجام آزمایشات

۳-۱- کارایی مخلوط‌های بتن غلتکی

بتن غلتکی در حالت تازه باید قابلیت تحمل وزن غلتک را جهت تراکم آن داشته باشد و از این رو بایستی بسیار سفت و خشک باشد و میزان خمیر سیمان آن بسیار کمتر از بتن‌های معمولی است. لذا روش‌های معمول تعیین روانی و کارایی نظیر آزمایش اسلامپ برای این نوع بتن قابل کاربرد نیست. روشی که برای اندازه‌گیری کارایی بتن غلتکی توسعه یافته است روش تعیین روانی با آزمایش وی بی اصلاح شده است (ASTM C1170, 1990). در این تحقیق از دستگاه وی بی استاندارد همراه با یک سربار استفاده می‌شود. میزان این سربار ۲۲/۷ کیلوگرم در نظر گرفته شد. مدت زمان لازم

۳-۲- آزمایشات مشخصات مکانیکی

جهت ایجاد حلقه‌ی ملات به دور سربار به عنوان زمان وی بی به ثانیه گزارش گردیده است. در زمینه روسازی راه خصوصاً وقتی از بتن غلتکی به عنوان سطح نهایی تردد استفاده می‌شود، تهیه بتن غلتکی بادوام و مقاومت فشاری بالا مدنظر قرار می‌گیرد. مقاومت فشاری مورد نظر برای بتن غلتکی جهت ساخت روسازی به میزان قابل توجهی بیشتر از مقاومت‌های در نظر گرفته شده برای بتن‌های غلتکی مورد استفاده در سدسازی است. در آمریکا مقدار حداقل مقاومت فشاری برای روسازی بتن غلتکی عمدتاً در مشخصات فنی بیش از ۲۷/۶ Mpa (۴۰۰۰Psi) قید

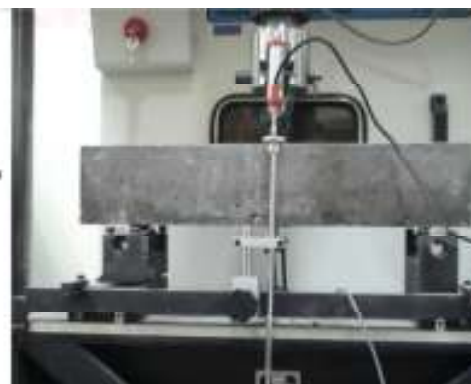
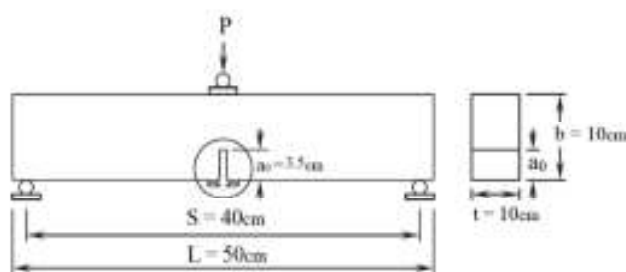
سه نقطه‌ای به دلیل راحتی در اعمال بار پایدار در آزمایش خمش با استفاده از ماشین‌های تست استاندارد از مقبولیت بالایی برخوردار است. در این تحقیق، به منظور دستیابی به مقاومت خمشی و انرژی شکست از تیرهای منشوری به ابعاد  $50 \times 10 \times 10$  سانتی‌متر استفاده گردید. مشخصات تیر سه نقطه‌ای باشیار و تنظیم دستگاه یونیورسال مطابق شکل ۳ مورد استفاده قرار گرفت. نمونه‌ها با نرخ ثابت بازشدگی  $0.6 \text{ mm/min}$  مطابق با استاندارد JCI بارگذاری گردیدند [۲]. پایان آزمایش برابر با افت ۹۵٪ بار بیشینه در نظر گرفته شد. مقاومت خمشی بتن غلتکی از طریق نتایج تیر خمشی سه نقطه‌ای و با استفاده از معادله (۱) صورت پذیرفت.

$$F = \frac{3PS}{2b(d-a_0)^2}$$

جایی که P بار ماکزیمم، S طول دهانه، b عرض نمونه، d ارتفاع نمونه و  $a_0$  عمق شیار است. مقدار انرژی شکست (GF) نیز به کمک معادله (۲) پیشنهادی RILEM محاسبه گردید [۳].

$$G_F = \frac{W_0 + mg\delta}{A_{lig}}$$

که  $W_0$  مساحت زیر منحنی بار-بازشدگی دهانه ترک (N/m)، mg وزن نمونه مابین تکیه‌گاه‌ها (Kg)،  $\delta$  حداکثر جابه‌جایی (m) و  $A_{lig}$  مساحت مقطع شکست ( $m^2$ ) است. همچنین به منظور محاسبه مقاومت خمشی باقی‌مانده در منحنی بار-بازشدگی ترک مطابق شکل از توصیه RILEM TC 162-TDF استفاده گردید [۴].



شکل ۲. آرایش و هندسه آزمایش تیر خمشی سه نقطه‌ای

### ۳-۳- آزمایش خستگی

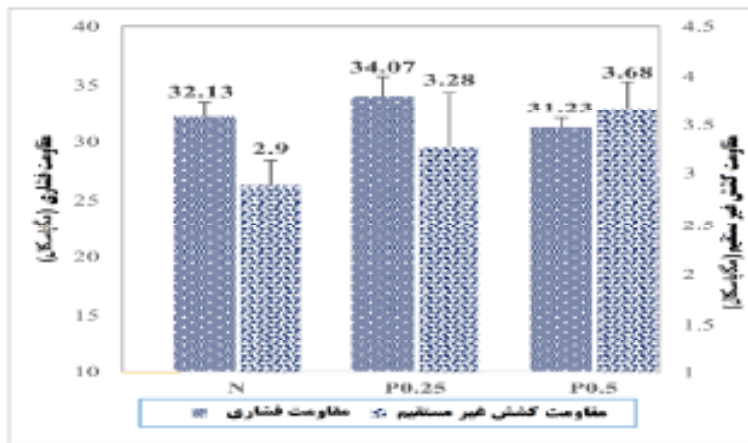
نسبت بار اعمالی به حداکثر بار آزمایش تیر سه نقطه‌ای با شیار تعریف گردید و در چهار سطح (۰/۷، ۰/۷۵، ۰/۸، ۰/۸۵) S= با تعداد تکرار چهار نمونه آزمایش خستگی صورت پذیرفت.

این آزمایش بر روی نمونه‌های منشوری به ابعاد  $50 \times 10 \times 10$  سانتی‌متری با یک شیار به عمق ۳٫۵ سانتی‌متر صورت پذیرفت. بارگذاری توسط دستگاه UTM با فرکانس ۲ هرتز و در شرایط کنترل تنش صورت پذیرفت. سطح تنش

#### ۴- نتایج و بحث

آن‌ها نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که الیاف با عملکرد باربری خود در ناحیه ترک‌خوردگی باعث افزایش ظرفیت خمیز و جذب انرژی قبل از شکست نهایی می‌گردد. در آزمایش تیر خمشی سه‌نقطه‌ای معمولاً نتایج به دلیل تمرکز در مرکز نقطه بارگذاری به نوع نمونه حساس‌تر است. باین‌حال، در آزمایش چهار نقطه‌ای خمشی، خمش ماکزیمم در طول دهانه بارگذاری اتفاق می‌افتد ( Alani, & Beckett, 2013). همچنین با توجه به ناحیه پس از ترک‌خوردگی اولیه در شکل ۴ الف و ب، شیب تغییرات در شرایط کنترل بازشدگی ترک کمتر تحت تأثیر ایجاد ترک اولیه و افت ناگهانی می‌گردد.

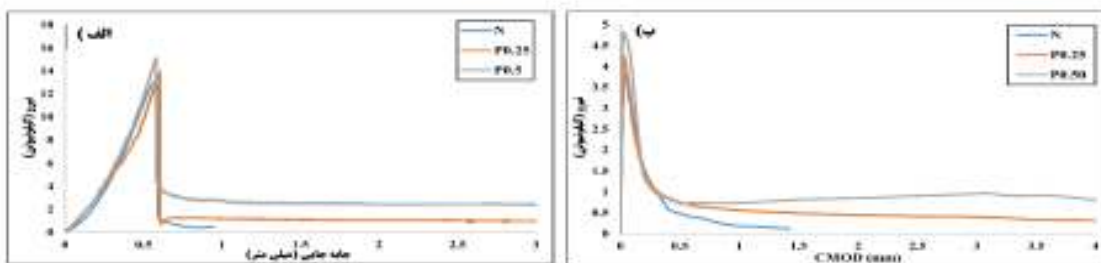
نتایج مقاومت فشاری و کشش غیرمستقیم در شکل ارائه گردیده است. مطابق شکل ۳، اضافه شدن الیاف ماکرو سنتتیک تأثیر بسزایی بر روی مقاومت فشاری نمی‌گذارد. حال‌آنکه در شرایط کشش غیرمستقیم، با افزایش درصد الیاف مصرفی ظرفیت مقاومت کششی بتن غلتکی به صورت خطی افزایش می‌یابد. در نمودار بار- جابه‌جایی خمش (شکل ۴-الف)، اضافه شدن الیاف به مخلوط باعث افزایش ۷ و ۱۹ درصدی به ترتیب برای ۰/۲۵ و ۰/۵ درصد حجمی الیاف می‌گردد. مهم‌ترین عملکرد الیاف زمانی است که اولین ترک ایجاد می‌گردد. با ایجاد ترک الیاف ماکرو در سطح ترک درگیر شده و باربری توسط این الیاف صورت می‌پذیرد. جدول ۴ نتایج محاسبات با نشانه چقرمگی و نحوه محاسبه



شکل ۳. نتایج آزمایش مقاومت فشاری و کشش غیرمستقیم

نوع مخلوط	مدول گسیختگی (Mpa)		I <sub>5</sub>	I <sub>10</sub>	I <sub>30</sub>
	Mean	S.D			
N	۳/۹	۰/۳۲	۱	۱	۱
P0.25	۴/۱۷	۰/۳	۱/۴۲	۱/۸۵	۲/۳۶
P0.5	۴/۶۳	۰/۴۱	۱/۹	۲/۸۷	۴/۷۶

جدول ۴. نتایج آزمایش خمشی و محاسبه چقرمگی باقی مانده



شکل ۴. نتایج آزمایش تیر خمشی الف) تیر چهار نقطه‌ای ب) تیر سه نقطه‌ای شیاردار

آن‌ها از جمله فرم‌های توان دویی، لگاریتمی و حاصل ضربی متغیرها در مدل‌سازی استفاده گردید. قبل از ساخت مدل، بررسی داده می‌تواند به دستیابی به مدل بهتر و کاهش خطاهای احتمالی آن کمک کند.

نتایج حاصل از آزمایش خستگی بر روی تیر سه نقطه‌ای شیاردار در جدول ارائه گردیده است. به منظور پیش‌بینی عمر خستگی تیر بتن غلتکی و همچنین اثر سنجی سطح تنش  $(S)$ ،  $P$ ،  $G_f$ ، در عمر خستگی از رگرسیون خطی چندگانه استفاده گردید. علاوه بر فرم ساده متغیرها، فرم‌های متداول

جدول ۵. نتایج آزمایش خستگی بر روی تیر سه نقطه‌ای شیاردار

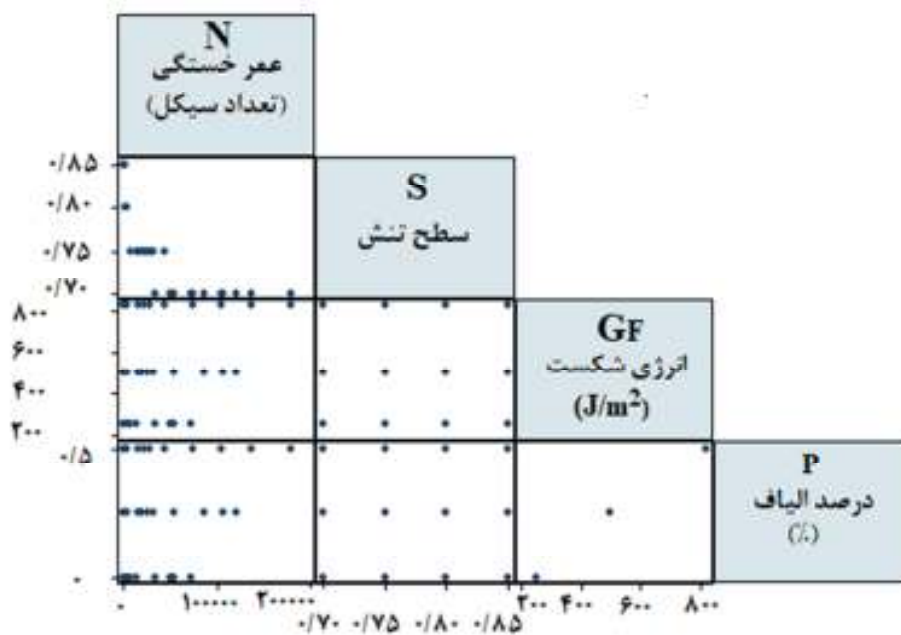
سطح تنش	نوع نمونه بتن غلتکی					
	N		P-0.25		P-0.5	
	عمر خستگی	میانگین	عمر خستگی	میانگین	عمر خستگی	میانگین
۰/۸۵	۵۲	۱۱۲	۵۶	۱۳۰	۹۹	۱۴۳
	۴۸		۱۰۳		۲۳۵	
	۲۱۷		۱۸۸		۹۳	
	۱۳۳		۱۷۴		۱۴۷	
۰/۸۰	۱۵۵۵	۱۴۴۳	۳۱۳۹	۲۲۳۹	۲۸۴۰	۲۵۹۹
	۸۱۴		۱۷۵۲		۳۸۰۳	
	۲۲۰۶		۲۲۰۰		۱۹۸۹	
	۱۱۹۷		۱۸۶۷		۱۷۶۵	
۰/۷۵	۷۷۰۹	۸۸۵۵	۱۴۷۶۳	۲۲۹۰۳	۲۸۳۶۳	۲۷۱۷۵
	۱۳۲۱۹		۳۲۱۷۵		۲۰۸۳۶	
	۶۴۸۹		۲۵۸۳۹		۴۴۱۳۳	
	۸۰۰۶		۱۸۸۳۵		۱۵۳۶۸	
۰/۷۰	۷۲۰۰۴	۵۲۲۴۹	۱۰۵۵۹۵	۹۰۹۹۸	۱۳۶۳۶۷	۱۲۳۷۳۲
	۳۴۱۴۶		۸۵۳۵۰		۷۴۲۶۰	
	۵۳۸۹۶		۱۲۰۰۷۲		۱۸۰۱۲۶	
	۴۸۹۵۳		۵۲۹۷۶		۱۰۴۱۷۷	

می‌تواند باعث چندخطی در مدل شود که بایستی مورد توجه قرار گیرد. شکل ۵ پراکندگی متغیرهای مختلف نسبت به یکدیگر را نشان می‌دهد. با توجه به این نمودار می‌توان دریافت که در سطوح تنش کم، پراکندگی تعداد بارگذاری بیشتر می‌باشد و رابطه بین سطح تنش و بارگذاری به فرم لگاریتمی نزدیک است که ادبیات قبلی موضوع نیز مؤید آن است.

در جدول ۶ همبستگی متغیرهای مختلف با یکدیگر نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در بین متغیرهای مستقل تنش دارای بیشترین همبستگی ( $-0,7596$ ) با تعداد بارگذاری است، بنابراین انتظار می‌رود سطح تنش دارای بیشترین اثر بر روی تعداد بارگذاری باشد. ضریب منفی نیز بیانگر اثر معکوس سطح تنش بر تعداد بارگذاری است. ضریب همبستگی  $G_f$  با  $P$  ( $0,997$ ) به‌عنوان متغیرهای مستقل با یکدیگر بالا می‌باشد که این

جدول ۶- همبستگی مابین متغیرهای اولیه

	$N$	$S$	$G_f$	$P$
$N$	۱/۰۰۰	-	-	-
$S$	$-0,7596$	۱/۰۰۰	-	-
$G_f$	$0,2196$	$0,000$	۱/۰۰۰	-
$P$	$0,221$	$0,000$	$0,9970$	۱/۰۰۰



شکل ۵. ماتریس پراکندگی متغیرها

هرچند مدل‌ها با فرم ساده نیز ساخته و مقایسه گردید. به‌طور کلی فرم اولیه زیر برای مدل در نظر گرفته شد.

برای ساخت مدل از فرم کلی زیر استفاده گردید. با توجه به ادبیات موضوع و تحلیل‌های اولیه برای متغیرها تعداد بارگذاری و سطح تنش شکل لگاریتمی انتخاب گردید.



$$\ln(N) = \beta_0 + \beta_1 \ln(S) + \beta_2 P + \beta_3 Gf + \beta_4 P^2 + \beta_5 Gf^2 + \beta_6 P.S + \beta_7 P.Gf \quad (3)$$

که در آن:

$\beta_0$ : ثابت مدل

$\beta_1, \dots, \beta_{12}$ : ضرایب مدل

می تواند به عنوان مدل پیش بینی عمر خستگی مورد استفاده قرار داد. در جدول ۸ ضرایب حاصل از برازش مدل و همچنین ویژگی های آماری این ضرایب نشان داده است. همان طور که مشاهده می شود متغیر  $\ln(S)$  و  $P$  در سطح اطمینان ۹۵٪ ( $p\text{-value} < 0.05$ ) معنی دار شده اند، علاوه بر این ترم حاصل ضربی  $G_f.S$  در سطح اطمینان ۹۵٪ و ۹۴٪ معنی دار شده اند. بنابراین  $\ln(s)$  و  $G_f$  بر روی عمر خستگی دارای تأثیر معنی دار هستند. معنی داری ترم  $G_f.S$ ، بیانگر این است که میزان تأثیر سطح تنش به مقادیر  $P$  موجود در مخلوط وابسته است. برای اینکه بتوان اثر خالص هر یک از متغیرهای معنی دار را در میزان عمر خستگی به دست آورد با استفاده از روابط ریاضی از مدل ارائه شده در جدول ۸ روابط زیر استخراج گردید.

پس از برازش مدل اولیه بر روی داده ها، با استفاده از روش رگرسیون گام به گام و حذف پس رو، پارامترهایی که ضرایب آن ها معنی دار نشدند، حذف گردیدند. پس از حذف گام به گام در نهایت مدل نهایی مطابق با جداول ۱ و ۲ حاصل شد. مطابق با جدول ۷، مقدار بالای  $F\text{-value}$  بیانگر معنی داری کلی مدل است که با توجه به مقدار  $p\text{-value} < 0.001$  مدل آماری حاصل در سطح اطمینان ۹۹ درصد معنی دار است. معنی داری کلی مدل به معنی تأثیر معنی دار کلیه متغیرها به صورت هم زمان بر مقدار عمر خستگی است. مقدار ضریب همبستگی تعدیل شده ( $R^2\text{- Adjusted}$ ) بیانگر این است که متغیرهای مورد استفاده در مدل بیش از ۹۴/۹ درصد از تغییرات متغیر وابسته ( $\ln(S)$ ) را توضیح می دهند. مقدار بالای ضریب همبستگی تعدیل شده (۰,۹۴۴) نشان دهنده توانایی مدل در پیش بینی است. بنابراین مدل ارائه شده

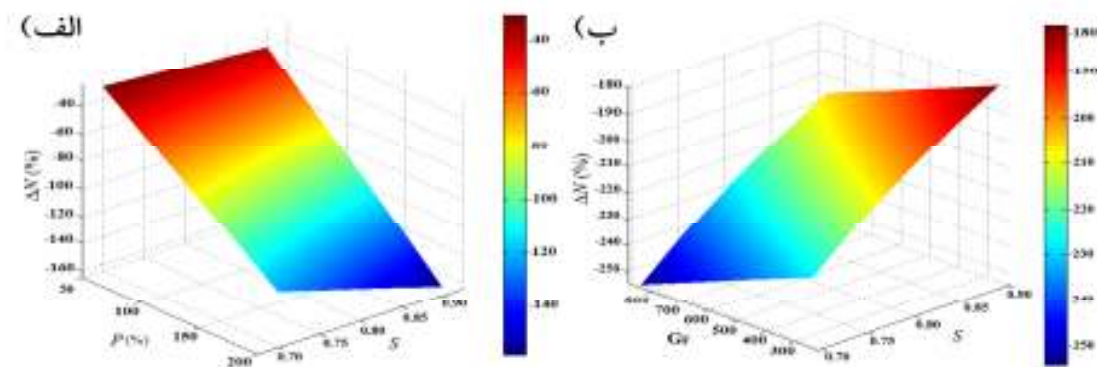
جدول ۷. نتایج تحلیل ANOVA مدل پیشنهادی

	DF	SS	MS	F-value	P-value
Total	۴۷	۳۱۰/۲۶۶	۶/۴۰۱	-	-
Model	۳	۲۹۴/۱۲۸	۹۸/۰۴۲	۲۶۷/۳۱	۰/۰۰۰
Residual error	۴۴	۱۶/۱۳۷	۰/۳۶۶	-	-
$R^2$	۰/۹۴۸۰	-	-	-	-
$R^2\text{- Adjusted}$	۰/۹۴۴۴	-	-	-	-

جدول ۸. ضرایب رگرسیون خطی برای  $\ln(N)$

متغیر مستقل	ضریب رگرسیون	P-value	t-value	خطای استاندارد	ضرایب استاندارد شده
عدد ثابت	۱/۸۰۴۵	۰/۱۹۶	۱/۳۱	۱/۳۷۵۷	-
$\ln(S)$	-۳۰/۳۴۸۶	۰/۰۰۰	-۱۳,۷۲	۱/۲۱۲۵	---۰/۸۶۴۶
P	۹/۰۸۲۳	۰/۰۳۰	۲/۲۵	۴/۰۴۲۲	۰/۷۲۹۱
$G_f.S$	-۰/۰۰۸۷	۰/۰۶۱	-۱,۹۲	۰/۰۰۴۵	۰/۶۳۲۱

$$\frac{\% \Delta N}{100} = \left( \frac{-30.34866}{S} - 0.00878 Gf \right) \Delta S \quad (4)$$



شکل ۲. اثر تغییرات سطح تنش ( $\Delta S = 0.05$ ) در میزان عمر خستگی الف) بر حسب نسبت تنش و درصد الیاف  
ب) بر حسب نسبت تنش و انرژی شکست

• با توجه به تحلیل ANOVA انجام شده، نسبت سطح تنش، انرژی شکست و درصد الیاف همبستگی مناسبی با نتایج آزمایش تیر خمشی داشتند و مدل ارائه گردیده بر اساس این سه پارامتر از سطح اطمینان بالای ۹۵٪ برخوردار است.

## ۶- مراجع

-نشریه ۳۵۴، (۱۳۸۵)، " راهنمای طراحی و اجرای بتن غلتکی در روسازی راههای کشور" وزارت راه و شهرسازی، پژوهشکده حمل و نقل کشور.

-American Concrete Institute (ACI), (2000), "State of the-art report on roller compacted concrete pavement". [325.10R].

-American Society for Testing and Materials (ASTM) C1170, (1990), "Standard Test Method for Determining Consistency and Density of Roller Compacted Concrete using a Vibrating Table.

-Alani, A. M., & Beckett, D. (2013), "Mechanical properties of a large scale synthetic fibre reinforced concrete ground slab". Construction and Building Materials, 41, pp.335-344.

به منظور تعیین مهم ترین متغیر از آنجایی که واحدهای متغیرها متفاوت بوده و ضرایب به دست آمده از مدل، قابل مقایسه نیستند، از این رو از ضرایب استاندارد شده استفاده شد. همان طور که در ستون آخر جدول ۸ مشاهده می شود نسبت تنش دارای بیشترین اثر بر روی عمر خستگی است (مقدار ضریب استاندارد شده بیشتر).

## ۵- نتیجه گیری

با توجه به نتایج حاصل از آزمایش های فشاری، کششی و خمشی صورت پذیرفته، تحلیل های آماری و همچنین مدل ارائه شده خستگی نتایج زیر قابل حصول است:

- بیشترین اثر الیاف را می توان به ترتیب بر روی انرژی شکست (رفتار پس از ترک خوردگی)، مقاومت خمشی و مقاومت کششی غیرمستقیم بیان نمود. این در حالی است که الیاف اثرگذاری چشمگیری بر روی مقاومت فشاری ندارد.
- در آزمایش تیر خمشی سه نقطه ای، الیاف ماکروسنتتیک برابر ایجاد و گسترش ترک های میکرو و ماکرو دارند که دلیل این امر را می توان به سختی نسبتاً بالای این الیاف در مخلوط بتن غلتکی بیان نمود. در ناحیه بعد از بار بیشینه، عملکرد الیاف فلزی باعث مقاومت این الیاف در برابر گسترش ترک های ماکرو و همچنین منجر به ایجاد ناحیه سخت شدگی در نمودار بار-بازشدگی دهانه ترک می گردد.

- “Effect of the addition of synthetic fibers to concrete thin slabs on plastic shrinkage cracking”. *Construction and building materials*, 24(11), pp.2171-2176.
- Nanni, A., Ludwig, D., & Shoenberger, J. (1996), “Roller compacted concrete for highway pavements”. *Concrete International*, 18(5), pp.33-38.
- Modarres, A., & Hosseini, Z. (2014), “Mechanical properties of roller compacted concrete containing rice husk ash with original and recycled asphalt pavement material”. *Materials & Design*, 64, pp.227-236.
- Rao, S., & Roesler, J. (2005), “Cumulative fatigue damage analysis of concrete pavement using accelerated pavement testing results”. University of Illinois.
- Rooholamini, H., Hassani, A., & Aliha, M. R. M. (2018), “Evaluating the effect of macro-synthetic fiber on the mechanical properties of roller-compacted concrete pavement using response surface methodology”. *Construction and Building Materials*, 159, pp.517-529.
- Sendekyj, G. P. (2001), “Constant life diagrams—a historical review”. *International journal of fatigue*, 23(4), pp.347-353.
- Singh, S. P., & Kaushik, S. K. (2003), “Fatigue strength of steel fiber reinforced concrete in flexure”. *Cement and Concrete Composites*, 25(7), pp.779-786.
- Slabs OFC, Pavement EC, Equations F (2014), “Fatigue and Static Testing of Concrete Slabs. *Transp*”. *Res. Rec.*
- Tricbes, G. (1998), “The Fatigue Behavior of Rolled Compacted Concrete”. In 8th International Symposium on Concrete Roads, Theme II, Portugal.
- Yin, S., Tuladhar, R., Shi, F., Combe, M., Collister, T., & Sivakugan, N. (2015). Use of macro plastic fibers.
- Brandt, A. M. (2008), “Fibre reinforced cement-based (FRC) composites after over 40 years of development in building and civil engineering”. *Composite structures*, 86(1-3), pp.3-9.
- Darter, M. I. (1977), “Design of a Zero-maintenance Plain Jointed Concrete Pavement, Volume One-Development of Design Procedures (No. FHWA-RD-77-111 Final Rpt”.
- Darter, M. I., Barenberg, E. J., & Salsilli, R. A. (1993), “Calibrated Mechanistic Design Procedure to Prevent Transverse Cracking of Jointed Plain Concrete Pavements”. In Fifth International Conference on Concrete Pavement Design and Rehabilitation Purdue University, School of Civil Engineering; Federal Highway Administration; Portland Cement Association; Transportation Research Board; Indiana Department of Transportation; Federal Aviation Administration; and American Concrete Pavement Association. (Vol. 2).
- Habib, A., Begum, R., & Alam, M. M. (2013), “Mechanical properties of synthetic fibers reinforced mortars”. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 4(4), pp.923-927.
- Libre, N. A., Shekarchi, M., Mahoutian, M., & Soroushian, P. (2011), “Mechanical properties of hybrid fiber reinforced lightweight aggregate concrete made with natural pumice”. *Construction and Building Materials*, 25(5), pp.2458-2464.
- Lin, C., Kayali, O., Morozov, E. V., & Sharp, D. J. (2014), “Influence of fiber type on flexural behavior of self-compacting fiber reinforced cementations composites. *Cement and Concrete Composites*, 51, pp.27-37.
- JCI-S-001 (2003), “Method of Test for Fracture Energy of Concrete by Use of Notched Beam”, Japan Concrete Institute Standard.
- Pelisser, F., Neto, A. B. D. S. S., La Rovere, H. L., & de Andrade Pinto, R. C. (2010),