

## بررسی نتایج آزمایش خمش ۴ نقطه‌ای تیرچه‌های مخلوط بتن غلتکی (RCC) حاوی خرده لاستیک و خرده آسفالت بازیافتی

### مقاله پژوهشی

علیرضا عاملی، گروه مهندسی عمران، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران  
ابراهیم پرورش کاران\*، گروه مدیریت ساخت، دانشکده مهندسی کاربردی، فناوری و ایمنی، دانشگاه میلرزویل، میلرزویل، پنسیلوانیا، ایالات متحده آمریکا

سیدامیرحسین هاشمی، گروه مهندسی عمران، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی، قزوین، ایران  
\*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: ebrahim.karan@millersville.edu

دریافت: ۹۷/۰۱/۲۲ - پذیرش: ۹۸/۰۴/۲۸

صفحه ۱۸۸-۱۶۵

### چکیده

ترک خوردگی ناشی از تنش کششی یکی از اساسی‌ترین نوع خرابی در روسازی‌های بتنی بشمار می‌آید. در این مقاله اثر خصوصیات بتن غلتکی حاوی خرده لاستیک بازیافتی و خرده آسفالت بر روی رفتار شکست نمونه‌ها در مودهای مختلف<sup>۱</sup> شکست مورد بررسی قرار گرفته است. مجموعه‌ای شامل ۲۸۸ نمونه تیرچه بتن غلتکی حاوی<sup>۲</sup> RAP یا خرده لاستیک تحت آزمایش خمش چهارنقطه‌ای (4PB) قرار گرفتند. تاثیر دانه‌بندی و درصد خرده لاستیک یا خرده آسفالت بازیافتی و سیمان بر ضریب شدت تنش نمونه‌ها در مودهای او II مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج ضریب شدت تنش نمونه‌ها بیانگر این بود که ترکیب مخلوط بتن غلتکی تاثیر بسزایی بر رفتار شکست آن خواهد داشت. همچنین اگرچه، ترکیب مصالح بازیافتی باعث افزایش انعطاف پذیری و چقرمگی نمونه‌ها می‌گردد ولیکن اثر معکوسی در میزان ضریب شدت تنش شکست نمونه‌ها و میزان تاب باربری آنها خواهد داشت.

واژه‌های کلیدی: بتن غلتکی، ضریب شدت تنش، تیرچه چهار نقطه‌ای، خرده آسفالت بازیافتی، خرده لاستیک بازیافتی

### ۱-مقدمه

می‌باشد، از این رو، بتن غلتکی از میزان سیمان کمتر، درصد مصالح سنگی بیشتر، درصد فضای خالی و میزان آب کمتر نسبت به بتنهای معمولی برخوردار است (Madhkan et al. 2012). در خصوص اجرای روسازی بتن غلتکی همانند آسفالت، توسط دستگاه فینیشر پخش شده و عملیات غلتک زنی توسط غلتک ویریه انجام می‌گیرد. محصول نهایی، بتن متراکمی است که توانایی بازگشایی زود هنگام تری بر روی ترافیک نسبت به روسازی‌های بتنی معمولی دارد. برای سالیان متمادی از RCC در ساخت سدها استفاده می‌گردید، اما در سال‌های اخیر بتن غلتکی به عنوان یک روش نوین در

روسازی‌های بتن غلتکی در حال حاضر به عنوان گزینه جایگزینی برای روسازی‌های آسفالتی در برخی از پروژه‌ها، مورد استفاده قرار می‌گیرد. با توجه به مشابه بودن اجرای روسازی‌های بتن غلطکی و بتن آسفالتی، خصوصیات هم‌چون ساخت آسانتر، بازگشایی سریع‌تر بر روی ترافیک، هزینه کمتر مصالح و ساخت، افزایش مقاومت سازه ای دوام بیشتر روسازی به نسبت ضخامت برابر، از جمله عواملی هستند که کاربرد بتن غلطکی را در ساخت روسازی‌ها بصورت روز افزون، افزایش داده است. مشخصات بتن غلتکی تا حدودی با مشخصات بتن معمولی متفاوت

چالش برانگیز در پیش‌بینی و کنترل خرابی‌های روسازی است. در راستای یافتن راه حلی برای مسئله ترک خوردگی در مخلوط‌های بتنی، اندازه‌گیری ویژگی‌های ذکر شده با کمک تئوری مکانیک شکست ارتجاعی خطی<sup>۴</sup> (LEFM) امکانپذیر است. LEFM قادر است در صورتی که محدوده فرآیند شکست<sup>۵</sup> (FPZ) اطراف رأس ترک خوردگی در مقایسه با طول ترک، خیلی کوچک باشد، وضعیت تنش نزدیک به رأس ترک خوردگی نواحی آسیب دیده را پیش‌بینی کند. شماری از پژوهش‌ها چقرمگی شکست مخلوط‌های بتنی را ارزیابی نموده‌اند و مفهوم ضریب شدت تنش<sup>۶</sup> را مورد سنجش قرار دادند (Nuñez et al. 2016). برخی دیگر آزمایش‌های شکست و تحلیل‌های عددی را با استفاده از یک مدل منطقه چسبنده<sup>۷</sup> جهت مطالعه رفتار شکست مخلوط‌های آسفالتی و بتنی اجرا نمودند (Oliveira and Leonel 2013). اخیراً روش مدلسازی منطقه چسبنده در مدلسازی شروع و رشد ترک، در میان فعالان حوزه مکانیک شکست روسازی و مصالح آسفالتی توجه زیادی را به خود جلب کرده است زیرا روش منطقه چسبنده می‌تواند به طور مناسب شکست ترد و غیر ترد (شکننده و غیرشکننده) را مدلسازی کند. در بسیاری از آزمایش‌های شکست معمولاً از کشش سنج یا کلیپ گیج جهت تعیین میزان باز شدگی دهانه ترک استفاده شده است. استخراج این پارامتر به همراه نیرو یا تنش اعمالی می‌تواند در تعیین و محاسبه سایر پارامترهای شکست نمونه‌ها بکارگرفته شود. بسیاری از رویدادهای شکست تحت وضعیت‌های بارگذاری پیچیده و در ترکیبی از تغییرشکل لغزشی و بازشدگی (حالت ترکیبی) روی می‌دهند. بنابراین اقداماتی نیز جهت مشخص نمودن شکست ترکیبی و توسعه پروتکل‌های آزمایشی در مصالح مهندسی مانند سنگ، بتن و سرامیک صورت گرفته است (علیها و همکاران ۲۰۱۰، آیت‌اللهی و علیها ۲۰۱۲). همچنین در میان محققین موضوع مکانیک شکست، توجه بسیاری به آزمایش مود I شکست شده و این امر به دلیل ویژگی‌ها و مشکلات بسیاری است که در اجرای آزمایش‌های مود II شکست وجود دارد (Aliha et al. 2012, Aliha et al. 2010). در میان پژوهشگران در زمینه مکانیک شکست روسازی، مطالعات اندکی در خصوص آزمایش‌های مود II و مود ترکیبی شکست وجود

ساخت رویه راه‌ها مورد استفاده قرار گرفته است. البته توجه به این موضوع که کاربرد RCC در سد و روسازی راه تفاوت‌هایی در نوع و دانه بندی سنگدانه‌ها، مقدار سیمان مصرفی، نسبت W/C و روش اجرا دارند، نیز ضرورت دارد (Huang et al. 2005). از آنجاکه در بتن‌های غلتکی بخش عمده مخلوط را مصالح سنگی ریزدانه تشکیل می‌دهد، حساسیت رفتاری زیادی به میزان مصرف نوع مصالح وجود دارد. از این رو تعیین نسبت صحیح مصرف می‌تواند در شرایط اقتصادی پروژه تأثیرگذار باشد (صادق ۱۳۸۶). از دلایل عمده و اصلی استفاده از RCC به عنوان رویه راه، افزایش فوق العاده قابلیت باربری آن در شرایط آب و هوایی بسیار سخت است. تحقیقات نشان داده‌اند که RCC می‌تواند جایگزینی برای بخشی از لایه آسفالتی در شرایط آب و هوایی گرم (آسفالت دچار شیارشدگی چرخ، جمع شدگی و ... می‌شود) و آب و هوای سرد (آسفالت دچار ترک خوردگی می‌شود) باشد (صادق ۱۳۸۶). همچنین یکی از نیازهای اولیه صنعت در اختیار داشتن روسازی با صرفه اقتصادی است که ماشین آلات بسیار سنگین (با بارهای غالباً دینامیکی) قادر به عبور و توقف دراز مدت بر روی آن باشند. بطور عمده در سال‌های اخیر از بتن غلتکی در راه‌ها با ترافیک سنگین به همراه شرایط آب و هوایی نامساعد، محوطه‌های صنعتی، اسکله‌ها و بنادر استفاده گردیده است (صادق ۱۳۸۶). از لحاظ اقتصادی استفاده از بتن غلتکی ۳۰٪ مقرون بصرفه‌تر از آسفالت گرم و ۱۰ تا ۲۰ درصد ارزانتر از بتن معمولی می‌باشد. درپاره‌ای مواقع بتن RCC همانند بتن معمولی عمل کرده و همان مقاومت و کارایی و عملکرد را نشان می‌دهد (Modarres and Hosseini 2014). مسائل مختلف روسازی بتنی مانند ترک خوردگی ناشی از خستگی (بالا به پایین و پایین به بالا)، ترک خوردگی ناشی از دما (عرضی) و ترک خوردگی انعکاسی<sup>۳</sup> لایه بتنی، به موضوع مکانیک شکست مرتبط است. ترک خوردگی در لایه‌های روسازی بتنی سبب گسیختگی اولیه سازه جاده شده و به دنبال آن مقوله دوام روسازی در بلند مدت را تحت الشعاع قرار می‌دهد که اغلب با خرابی ناشی از رطوبت نیز مرتبط است. مقاومت در برابر شکست و ویژگی‌های مصالح بتنی اثر قابل توجهی بر عمر خدمت رسانی روسازی و متعاقباً مدیریت و نگهداری شبکه روسازی دارد. مفهوم ترک خوردگی یکی از موضوعات

نمونه‌ها با اشکال مختلفی برای آزمایشات شکست مود ترکیبی استفاده شده است. از آن جمله به نمونه تیرچه ۴ نقطه ای (Aliha and Ayatollahi 2009), (4PB) <sup>۱۱</sup>، نمونه برزیلی (Zipf Jr and Bieniawski 1986)، نمونه نیم دیسکی <sup>۱۲</sup> (SCB) تحت بارگذاری ۳ نقطه ای (Chong and Kuruppu 1984, Kuruppu and Chong 2012) میتوان اشاره نمود که معمولاً برای بررسی خصوصیات شکست بتن و سنگ استفاده میشود و البته سایر اشکال نیز وجود داشته که برای اینگونه مصالح کاربرد ندارد (Aliha et al. 2006, Aliha et al. 2013). برخی از محققین نمونه‌های SCB را به عنوان نمونه برتر از لحاظ صرفه اقتصادی، قابلیت اطمینان و انطباق پذیری معرفی کرده اند (Lim et al. 1993). سورش و همکاران جدولی برای توابع هندسی پیشنهاد دادند که در مطالعه آنان نمونه‌های آزمایش ۳ و ۴ نقطه ای از طریق آنالیز اجزای محدود بررسی شده و ضرایب شدت تنش برای طول ترک در محدوده  $0.1 < \frac{a}{W} < 0.7$  محاسبه و گزارش گردید (Suresh et al. 1990). علیها و همکاران آزمایشاتی بر روی مصالح مختلف و بمنظور تعیین رفتار آنان تحت مودهای بارگذاری مختلف انجام دادند. آنها از نمونه SCB در تعیین ضریب شدت تنش تحت مود بارگذاری مختلف از مود I خالص تا مود II خالص استفاده نمودند. از آنجا که نتایج آنها از انطباق مناسبی با نتایج مشاهداتی برخوردار نبود، آنها اثر تنش T را در محاسباتشان برای محاسبه ضرایب شدت تنش تحت بارگذاریهای مختلف منظور نمودند (Aliha and Ayatollahi 2011). مقاومت کششی نمونه‌ها تاثیر قابل توجهی در رفتار شکست مصالح دارند. مقاومت کششی بدست آمده از آزمایشات تیرچه خمشی ۳ یا ۴ نقطه‌ای، مقاومتی به میزان ۲ تا ۳ برابر بیشتر از نتایج آزمایش برزیلی خواهند داشت. از آنجا که نتایج بدست آمده از نمونه‌های نیم دیسک، مطابقت بیشتری با آزمایش برزیلی داشت، براساس پیشنهاد علیها نمونه SCB بعنوان جایگزین تست برزیلی مورد استفاده قرار گرفت (Aliha 2014). در همین راستا آرتامندی دو نمونه تیرچه و نیم دیسک آسفالتی را با یکدیگر مقایسه نمود. وی برای مودهای مختلف بارگذاری ضرایب شدت تنش را محاسبه و نتایج نشان داد که مود I از انطباق خوبی برخوردار است (Artamendi and Khalid

دارد. آنها نمونه <sup>۱۳</sup> SEB را برای شناسایی خواص شکست در مود ترکیبی با ایجاد ترک انحرافی <sup>۱۴</sup> مورد استفاده قرار دادند. براهم از کلیپ گیج برای اندازه‌گیری ترکیب بازشدگی ترک کششی و جابه‌جایی لغزشی برشی در رأس ترک استفاده نمود تا هر دو مود I و مود II انرژی شکست را در برگیرد. نتایج نشان داد که هرچه ترک بیشتر منحرف شود، اثر مود II افزایش می‌یابد در حالی که اثر مود I کاهش می‌یابد. آنها توصیه نمودند بمنظور بررسی رفتار مود ترکیبی و مود II شکست در مصالح، آزمایش‌های شکست تعمیم یافته می‌بایست اجرا گردد. کمیل و همکاران آزمایشات مقاومت فشاری، کششی و خمشی بر روی مخلوهای بتن غلتکی حاوی خرده لاستیک انجام داده و ضریب حرارتی و آنالیز میکروسکوپی ملامت را بررسی کردند. نتایج حاکی از آن بود که با افزایش درصد لاستیک، مقاومت فشاری و کششی کاهش یافته و کرنش شکست افزایش خواهد یافت. در ادامه آنان میزان بازشدگی دهانه ترک <sup>۱۵</sup> (CMOD) و انرژی شکست نمونه‌ها را قبل و بعد از شکست بررسی کرده و دریافتند که خرده لاستیک تاثیر بسزایی در افزایش آن دارد (Kaloush et al. 2005). شناخت بهتر رفتار مصالح ترد بویژه بتن غلتکی حائز اهمیت می‌باشد. چقرمگی شکست، معیار مناسبی برای مهندسی ایجاد می‌نماید تا تعبیر مطلوب‌تری از مقاومت ترک خوردگی مصالح، تحت بارگذاری ایجاد نمایند. روسازیها، بطور معمول تحت اثر مجموعه ای از بارگذاریها قرار گرفته و از آنجا که مسیر گسترش ترک به زاویه بارگذاری بستگی دارد، بنابراین ترکیبی از هر دو مود شکست در روسازیها رخ خواهد داد: مود I ناشی از خمش خالص و مود II ناشی از برش خالص. بنابراین مطالعه ترکیب مودهای شکست در مصالح ترد و بتن می‌تواند سودمند باشد (Ayatollahi and Aliha 2007, Akbardoost and Ayatollahi 2014). از آنجا که مسیر گسترش ترک تحت شرایط بارگذاری، ممکن است بصورت منحنی شکل گیرد، لزوماً مسیر ترک اولیه را دنبال نخواهد کرد. بنابراین تحلیل شکست در مود ترکیبی و تخمین راستای گسترش ترک، بویژه در جلوگیری از ترک خوردگی حائز اهمیت است. علاوه بر این، بررسی و تخمین زاویه ترک تحت مود بارگذاری ترکیبی، موضوع مناسبی برای تحقیق می‌باشد (Aliha et al. 2010). در گذشته از

Ataei 2013, Berry *et al.* 2013, Lin *et al.* 2013, Modarres and Hosseini 2014). در این مطالعات از معیارهای جذب انرژی، انعطاف پذیری و عمر خستگی مخلوط‌ها در اثر جایگزینی بخشی از مصالح سنگی با RAP استفاده شده است. در سال‌های اخیر با افزایش میزان لاستیک‌های فرسوده در اکثر نقاط دنیا، بازیافت و استفاده مجدد از این زباله‌های غیر قابل بازگشت به طبیعت، مورد توجه قرار گرفته است. بر این اساس توجه خاصی به استفاده از اینگونه مصالح در ساخت روسازیهای آسفالتی و بتنی شده است. بدلیل بالا بودن میزان ویسکوزیته لاستیک و دمای اختلاط آن در حین ساخت مصالح آسفالتی، استفاده از لاستیک بازیافتی در آسفالت، کمی مورد تردید واقع شده است. اولین استفاده از پودر لاستیک به سال ۱۹۹۰ بازمیگردد و نتایج نشان می‌دهد که استفاده از آن در روسازی بتنی باعث ایجاد سطح ظاهری مناسبتری می‌گردد. البته میزان استفاده از خرده لاستیک بازیافتی به لحاظ تفاوت ماهیتی با مصالح سنگی از محدودیت برخوردار می‌باشد. این محدودیت در کنار واقعیت کاهش مقاومت فشاری بتن (تا حدود ۵۰ درصد) حاوی خرده لاستیک، استفاده از آن را در سازه‌های بتنی محدود نموده است. استفاده از خرده لاستیک در روسازی بتنی باعث کاهش چگالی مخلوط، افزایش دوام و چقرمگی مخلوط و مقاومت در برابر ترک خوردگی روسازی بتنی می‌گردد. همچنین در کنار مزیت‌های استفاده از پودر لاستیک در بتن، معضلاتی نیز وجود دارد. بدلیل تفاوت در وزن مخصوص این دو ماده و همچنین همراه بودن حباب هوا در حین اختلاط خرده لاستیک، باعث ایجاد عدم یکنواختی و همگنی در مخلوط نهایی می‌گردد. محمدی و همکاران (۲۰۱۴) (Mohammadi *et al.* 2014)، اثر غرقاب کردن خرده لاستیک بر خواص بتن را بررسی نمودند و دریافتند که پس از ۲۴ ساعت غرقاب و حذف حبابهای هوای ناخواسته محبوس شده در مخلوط در اثر افزودن خرده لاستیک، نتایج متفاوتی بدست خواهد آمد. آزمایشات آنان نشان دهنده افزایش نسبی ۲۲ درصدی در مقاومت فشاری مخلوط بود. همچنین کاهش کارایی مخلوط و افزایش نسبت آب به سیمان بر اثر افزودن خرده لاستیک از دیگر نتیجه‌گیری‌های تحقیق آنان بود (Mohammadi *et al.* 2014). کاهش مقاومت فشاری مخلوط در اثر اختلاف در مدول الاستیسیته بتن و لاستیک و نیز عدم برابری لاستیک، منتج به

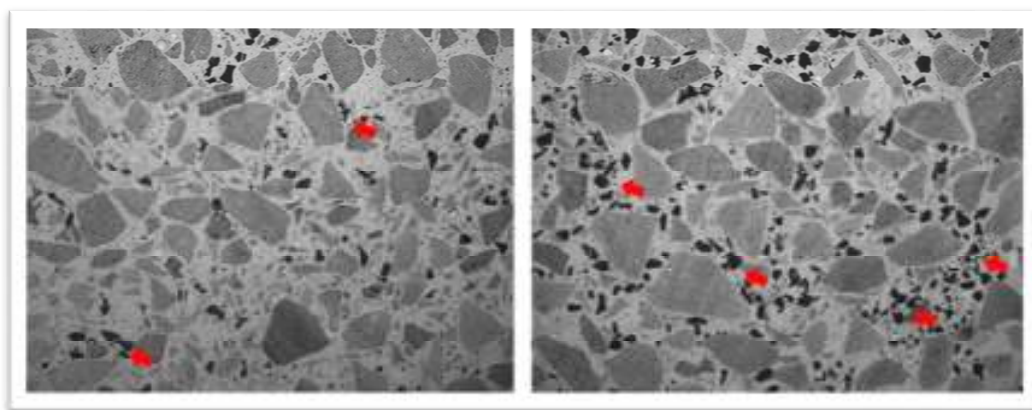
2006). براهام و همکاران جهت تحلیل رفتار شکست آسفالت از تیرچه ترک دار، استفاده نمودند. سپس با اندازه گیری انرژی شکست مخلوطهای آسفالتی، دریافتند که نمونه‌های آسفالتی با میزان حداکثر نیروی شکست یکسان، انرژی شکست متفاوتی در مود II شکست، خواهند داشت. همچنین دریافتند که هرچه مخلوط انعطاف‌پذیرتر باشد، درصد خزش بالاتری داشته و هرچه تردتر باشد درصد شکست بیشتری خواهد داشت (Braham *et al.* 2010). پترسون در سال ۱۹۸۱ از طریق مدلسازی با تحلیل عددی، ناحیه شکست بتن ترک دار تحت ترک مجازی را مورد مطالعه قرار داد. این مدل که مدل مجازی نام دارد، قابلیت انتقال تنش را دارا خواهد بود. این قابلیت به عرض ترک در مسیر بارگذاری وابسته است. گسترش ترک در نقطه ای که اولین تنش اصلی به حد مقاومت کششی رسیده، آغاز گردیده و در مسیر عمود بر اولین تنش اصلی گسترش می‌یابد. او طول ناحیه شکستی، برابر با ۱۵۰ میلیمتر در نوک ترک برای اعضای بتنی را گزارش نمود (Pettersson 1981). هوانگ و همکاران (۲۰۰۵)، اثر افزودن مصالح RAP بر خصوصیات چقرمگی و شکست ترد بتن را مورد بررسی قرار دادند. مطالعات آنان این فرضیه را بوجود آورد که قسمت ریزدانه خرده آسفالت از شکست ذرات جلوگیری بعمل آورده و فرایند اتلاف انرژی در اثر ترک خوردگی را افزایش می‌دهد. با این یافته‌ها این نتیجه بدست آمد که با افزودن مصالح آسفالتی به بتن، روند گسترش ترک تحت کنترل در می‌آید (Huang *et al.* 2005). نتایج حاصله از تحقیقات آنان بیانگر این بود که استفاده از RAP تأثیری در میزان فضای خالی مخلوط نداشته و امکان استفاده از آن بعنوان بخشی از مصالح سنگی میسر است. همچنین بعلت جذب آب کم مصالح قیر اندود میزان خمیر سیمان بیشتری در مخلوط موجود خواهد بود. با وجود کاهش میزان مقاومت فشاری و کششی مخلوط، چقرمگی مخلوط به نسبت افزایش یافت و این افزایش در اثر افزودن مصالح RAP درشت دانه بیشتر بود (محمد کریمی گوغری ۱۳۹۱، Huang *et al.* 2005). پژوهش‌های دیگری بر مبنای استفاده از خمیر سیلیس، خاکستر بادی، سیوس برنج و پلیمر به منظور بهبود خصوصیات مکانیکی مخلوط در اثر استفاده از RAP انجام پذیرفته است (Hassan *et al.* 2000, Sobhan and Mashnad 2001, Güneysi *et al.* 2004, Courard *et al.* 2010, Okafor 2010,

لاستیک مشخصات مکانیکی مخلوط دچار افت خواهد گردید. آنها با استفاده از خمیر سیلیس این نقیصه را مرتفع نمودند (Fakhri 2016). در همین راستا مده و همکاران امکان استفاده از خرده لاستیک بازیافتی در مخلوط بتن غلتکی را بررسی کردند و دریافتند که مشخصات مکانیکی مخلوط با افزایش درصد لاستیک کاهش می یابد. آنها استفاده از خرده لاستیک بازیافتی را در راه‌های کم ترافیک یا باترافیک سبک به منظور ارتقای خصوصیات فنی مخلوط نظیر تخلخل، انعطاف پذیری و مقاومت در برابر ترک خوردگی پیشنهاد دادند (Meddah et al. 2014). دادو و همکاران نیز در مطالعاتی مشابه با مطالعات مده، متوجه شدند که استفاده از خرده لاستیک بازیافتی در مخلوط سبب افزایش اسلامپ، کاهش کارایی و مقاومت فشاری بتن می‌شود. با این وجود مزایایی همچون کاهش چگالی، بالا بودن میزان مقاومت و چقرمگی در برابر ضربه و افزایش نا محسوس در مقاومت خمشی در بتن‌های با مقاومت فشاری کمتر را، گزارش نمودند (Dodoo-Arhin et al. 2015). اوینا گزارش داد که در صورت پیش اندودی خرده لاستیک و استفاده از خمیر سیلیس، امکان بهبود مشخصات مکانیکی مخلوط بتن غلتکی وجود دارد (Onuaguluchi and Panesar 2014). در ادامه گاروس نشان داد که تحت بارگذاری خمشی، ظرفیت کرنش پذیری مخلوط‌های حاوی خرده لاستیک، در اثر کاهش سرعت گسترش ترک خوردگی، افزایش خواهد یافت. بنابراین استفاده از خرده لاستیک در بتن قابل توجه خواهد شد (Turatsinze and Garros 2008).

کاهش سطح موثر بتن و چسبندگی ضعیف بتن و لاستیک خواهد شد. به موجب آن تجمع تنش در اطراف لاستیک بعلت قابلیت میزان بالای تغییر شکل آن، در نهایت منجر به شکست در آن ناحیه، ایجاد مخلوط ضعیف‌تر در اثر جایگزینی خرده لاستیک با ماسه، عدم توزیع یکنواخت خرده لاستیک در بتن و ایجاد بتن ضعیف تر، افزایش حباب‌های هوای ناخواسته در بتن در اثر افزودن خرده لاستیک خواهد شد و در نهایت افزایش احتمال تماس ذرات لاستیک با یکدیگر و عدم انتقال مناسب بار از این طریق از جمله معضلات استفاده از خرده لاستیک در بتن بوده که می بایست بدقت مورد توجه قرار گیرند. طبق آزمایشات انجام شده استفاده از حداکثر ۴۰ درصد خرده لاستیک توصیه شده است (Mohammadi et al. 2014).

## ۲- مقاومت خمشی نمونه‌های بتن غلتکی

مقاومت خمشی بتن یکی از مباحث مورد اختلاف در مراجع مختلف و آیین نامه‌ها بوده و نه تنها بر نتایج طراحی تاثیر گذار می باشد، بلکه مستقیماً بر مقاومت مخلوط در برابر ترک خوردگی حرارتی و خستگی موثر است. یافتن راه حل مناسب جهت ارتقاء مقاومت خمشی مخلوط‌ها و مقابله با این گونه خرابیها از دیگر مسایل پیش روی طراحان است. تحقیقات نشان داده که برخی از مصالح بازیافتی می‌توانند در بهبود شرایط موثر باشند. فخری و همکاران مطالعاتی بر روی استفاده از خرده لاستیک بازیافتی در بتن غلتکی انجام دادند. آنها پس از مطالعات گسترده دریافتند که استفاده از ۵٪ خرده لاستیک در طرح اختلاط بتن غلتکی می‌تواند باعث ارتقای مقاومت فشاری و خمشی مخلوط گردد. با افزایش درصد



شکل ۱. اثر افزودن ۲۰ و ۵۰ درصد خرده لاستیک به بتن و توزیع غیر یکنواخت آن در مخلوط (Mohammadi *et al.* 2014)

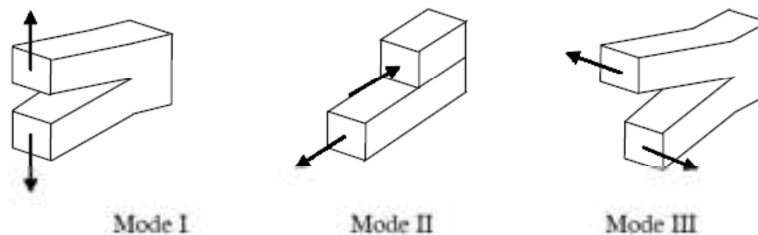
### ۳- مکانیزم ترک خوردگی

نحوه باز شدن ترک‌ها ناشی از اعمال بارهای وارده در حالت کلی به ۳ مود<sup>۱۳</sup> تقسیم می‌شود که در شکل ۲ نشان داده شده است.

۱- مود بازشوندگی (کششی)<sup>۱۴</sup> (مود I): در این حالت وجوه ترک به سادگی از هم دور می‌شوند. این شکل از گسیختگی تحت اثر کشش خالص ناشی از گرادیان حرارتی در عمق لایه‌ها و نیز وارد شدن بار ترافیکی براس ترک می‌باشد.

۲- مود برشی (لغزشی)<sup>۱۵</sup> (مود II): در این حالت وجوه ترک نسبت به هم در جهت عبور بر لبه‌ی ترک می‌لغزند. این مود ناشی از بارگذاری برشی در صفحه ترک است.

۳- مود پارگی<sup>۱۶</sup> (مود III): این مود ناشی از نیروی برشی اعمالی در صفحه خارج از سطح ترک است. گسترش ترک ناشی از مود برشی به محل قرارگیری چرخ اتومبیل نسبت به ترک بستگی دارد. دی بونت نشان داد که قرارگیری چرخ دقیقاً در نزدیک ترک در رشد ترک موثر می‌باشد (De Bondt 1992). برای ترک‌های سطحی، ترک خوردگی مود II که منجر به توزیع تنش برشی پیچیده در سطح تماس بین چرخ و جاده می‌باشد مهم تلقی می‌شود. اما براساس یافته‌های شلابی و همکارانش (Shalaby *et al.* 1996) غالب گسیختگی و توسعه ترک به لایه‌های فوقانی ناشی از مود I و یا مود بازشوندگی می‌باشد.



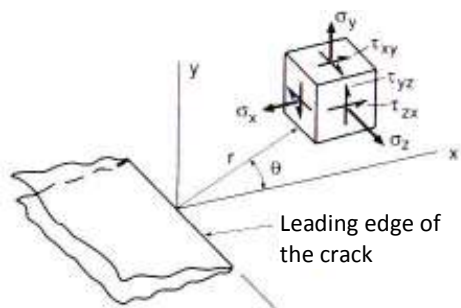
شکل ۲. انواع مودهای ترک خوردگی تحت بارگذاری‌های مختلف (Gdoutos 2005, Artamendi and Khalid 2006)

### ۳-۱- ضریب شدت تنش (K)

براساس تئوری مکانیک شکست، گسیختگی حاصل از خستگی از سه بخش شروع شدن ترک، گسترش پایدار ترک و گسترش ناپایدار یا ناگهانی ترک تشکیل شده است. اصولاً تئوری مکانیک شکست به منظور مطالعه فرآیند گسترش ترک‌ها تعمیم یافته و فرض بر آن است که این فرآیند بیشترین سهم را در تعیین میزان آسیب ناشی از تکرار بار و عمر باقیمانده روسازی دارد. در مصالح آسفالتی همیشه مقداری تخلخل وجود دارد و لذا هنگام برخورد ترک با فضای خالی، ترک با سرعتی بیشتر از حالت قبل پیش می‌رود. این پیشروی پایدار همچنان ادامه می‌کند تا اینکه ترک به طول بحرانی خود رسیده که در این هنگام ترک به

طور ناگهانی پیشروی کرده و موجب گسیختگی کامل لایه می‌شود. عوامل موثر در سرعت پیشروی ترک عبارتند از بزرگی تنش، تغییرشکل ایجاد شده و اندازه ترک‌های موجود در مصالح که میزان تمرکز تنش را در راس ترک کنترل می‌کنند (Jacobs 1995). معیار پیش‌بینی شروع و ایجاد ترک در مواد، ضریب شدت تنش<sup>۱۷</sup> (K)، می‌باشد که شدت تنش‌ها در مجاورت نوک ترک تیز در یک ماده الاستیک خطی را مشخص می‌کند. براساس اشکال مختلف گسیختگی (I، II و III) می‌توان ضریب شدت تنش بحرانی<sup>۱۸</sup> را برای هرکدام از این اشکال تعریف کرد و چنانچه ضریب شدت تنش موجود در نقطه‌ای از روسازی و یا درحوالی ترک از

مقادیر فوق تجاوز کردند ترک گسترش می‌یابد. شکل ۳ می‌دهد. تنش‌های وارد به یک المان در نزدیکی نوک ترک را نشان



شکل ۳. سیستم مختصات سه بعدی برای نوک ترک (Gdoutos 2005)

روابط زیر برای تنش‌های وارد به المان صادق است (Gdoutos 2005).

(۱)

$$\sigma_{xx} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2}\right) - \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \left(2 + \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2}\right)$$

(۲)

$$\sigma_{yy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2}\right) + \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2}$$

(۳)

$$\tau_{xy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} + \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2}\right)$$

$K_I$ : ضریب شدت تنش برای مود I،  $K_{II}$ : ضریب شدت تنش برای مود II

به طور کلی ضریب شدت تنش برای اجسام مختلف به صورت تابع رابطه ۴ تعریف می‌شود:

$$K = \sigma \sqrt{\pi a} \quad (۴)$$

که  $\sigma$  تابعی است از هندسه ترک و ابعاد جسم است.

فاکتور شدت تنش بحرانی برای مودهای I و II به ترتیب

$K_{Ic}$  و  $K_{IIc}$  نامیده می‌شود. که این مقادیر در آزمایشگاه بر اساس نتایج آزمایش مونوتنیک قابل محاسبه خواهد بود.

۴- متغیرهای مربوط به مشخصات مخلوطهای بتن غلتکی

در گام نخست، جنس مصالح مناسب جهت ساخت نمونه‌ها تعیین شده و دانه بندی‌های پیشنهادی با استفاده از

سنگی مورد استفاده در مخلوهای بتنی در آیین نامه‌های مختلفی نظیر نشریه ۳۵۴، نشریه ۱۰۱، آیین نامه آبا، ACI و PCA آورده شده است. مخلوط‌های بتنی اغلب از مصالح رودخانه ای تهیه شده و جهت اصلاح مشخصات مصالح، روش شستشو بکاربرده می‌شود. یکی از ضعفهای عمده مصالح شسته موجود در بازار، عدم وجود فیلر مناسب و کافی برای تولید بتن با مشخصات دانه بندی ارائه شده در نشریات می‌باشد. به همین دلیل در این تحقیق از مصالح سنگی شکسته کوهی از معدن اسب چران با فیلر پودر سنگ استفاده گردیده است. مشخصات مربوط به مصالح سنگی مورد استفاده در جداول ۱ و ۲ نشان داده شده است.

آیین نامه‌های موجود مورد بررسی قرار می‌گیرند. این نکته قابل ذکر می‌باشد که فرمول کارگاهی در هر کارگاه، با استناد به دانه بندی پیشنهادی تعیین می‌گردد. سپس در گام دوم، طرح اختلاط مناسب جهت ساخت نمونه‌های بتن غلتکی تهیه می‌گردد. در ادامه مقدمات ساخت و قالب‌گیری نمونه‌ها توسط میز وی بی و قالبهای مربوطه فراهم می‌گردد. در بخش‌های آتی به تفصیل راجع به هر یک از مطالب ذکر شده پرداخته خواهد شد.

#### ۴-۱- مشخصات مصالح سنگی

مشخصات مصالح سنگی یکی از پارامترهای تاثیرگذار در عملکرد مخلوط بتن غلتکی می‌باشد. مشخصات مصالح

جدول ۱. نتایج آنالیز شیمیایی مصالح سنگی

نتایج آنالیز شیمیایی (%)					
Co2	MgO	CaO	Fe2O3	Al2O3	SiO2
33.35	3.8	40.60	1.25	1.92	13.47

جدول ۲. مشخصات مصالح سنگی

نوع مصالح	چگالی (T/M3)		درصد جذب آب (%)		درصد سایش لوس آنجلس	آزمایش درصد سلامت
	درصد مانده روی الک #۸	درصد عبوری از	درصد مانده روی الک #۸	درصد عبوری از الک #۸		
مصالح سنگی	۲/۵۹۸	۲/۶۹۴	۱/۷	۱/۳	۱۷	۱/۸
RAP	۲/۲۷		۱/۴		-	۳/۷
خرده لاستیک	۱/۲۱		-		-	-

#### ۴-۲- دانه بندی مصالح سنگی

دانه بندی نیز همچون سایر پارامترهای طرح اختلاط در عملکرد مخلوط بتن غلتکی تاثیر بسزایی دارد. دانه بندی‌های ارائه شده توسط آیین نامه‌های ACI, PCA از مشهورترین دانه‌بندی‌های مورد استفاده در طرح اختلاط مخلوطهای بتن غلتکی می‌باشند. با توجه به اینکه در بیشتر نشریات، حداکثر اندازه مصالح مصرفی در ساخت مخلوطها را به ۲۵ میلیمتر محدود نموده اند، با این وجود در اجرا به لحاظ ایجاد سطح نهایی یکنواخت، استفاده از حداکثر اندازه ۱۹ میلی‌متر، از مقبولیت بیشتری برخوردار است (Anon 1397). مضاف بر این یکنواختی دانه‌بندی و بویژه وجود فیلر غیر آلی کافی، برای داشتن کارایی و قفل و بست بیشتر دانه بندی مخلوط امری ضروری می‌باشد. همچنین استفاده از فیلر پودر سنگ مناسب برای دستیابی به چگالی مناسب و حداقل فضای خالی در مخلوط از اهمیت بسزایی برخوردار است. بمنظور تهیه مخلوطهای بتن غلتکی با توجه به مطالب عنوان شده در منابع از دو نوع دانه بندی استفاده شده است. دانه‌بندی شماره

دانه بندی نیز همچون سایر پارامترهای طرح اختلاط در عملکرد مخلوط بتن غلتکی تاثیر بسزایی دارد. دانه بندی‌های ارائه شده توسط آیین نامه‌های ACI, PCA از مشهورترین دانه‌بندی‌های مورد استفاده در طرح اختلاط مخلوطهای بتن غلتکی می‌باشند. با توجه به اینکه در بیشتر نشریات، حداکثر اندازه مصالح مصرفی در ساخت مخلوطها را به ۲۵ میلیمتر محدود نموده اند، با این وجود در اجرا به لحاظ ایجاد سطح نهایی یکنواخت، استفاده از حداکثر اندازه ۱۹ میلی‌متر، از

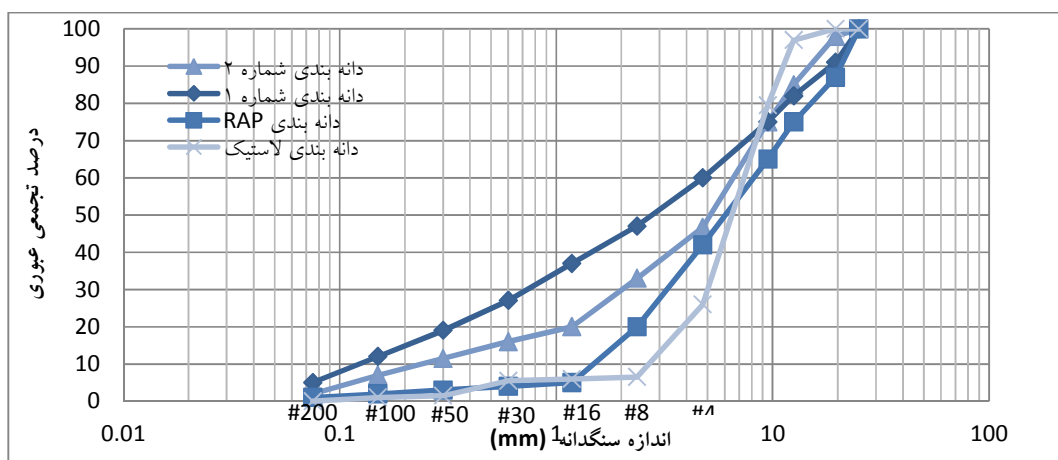


جدول ۳ منحنی دانه بندی مصالح سنگی، RAP و لاستیک مورد استفاده در ساخت نمونه‌های بتن غلتکی را نشان می‌دهد. مصالح بازیافتی ابتدا سرند شده، و دانه‌های بزرگتر از ۲۵ میلی‌متر جدا گردیده و در گروه‌های مطلوب، دانه‌بندی شدند.

۱ بر اساس پیشنهاد ACI و دانه بندی شماره ۲ بر اساس پیشنهاد PCA انتخاب شدند. تفاوت عمده این دو نوع دانه بندی در درصد عبوری از الک شماره ۴ می باشد. مشاهدات صورت گرفته پس از ساخت مخلوط‌ها حاکی از این بود که دانه بندی شماره ۲ میزان کارایی بیشتری را به نسبت اختلاط، تراکم و میزان روانی مخلوط ایجاد نموده است. شکل ۴ و

جدول ۳. جدول دانه بندی مصالح مصرفی و دانه بندی‌های مورد استفاده (Association 1987, Committee 2001)

شماره الک	حدود دانه بندی پیشنهادی ACI و دانه بندی استفاده شده			حدود دانه بندی پیشنهادی PCA و دانه بندی استفاده شده			دانه بندی لاستیک	دانه بندی RAP	دانه بندی
	حد بالا	حد پایین	دانه بندی شماره ۱	حد بالا	حد پایین	دانه بندی شماره ۲			
1	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	
3/4	۱۰۰	۸۳	۹۱	۱۰۰	۹۰	۹۸	۸۷	۱۰۰	
1/2	۹۳	۷۲	۸۲	۹۰	۷۰	۸۵	۷۵	۹۷	
3/8	۸۵	۶۶	۷۵	۸۵	۷۰	۷۵	۶۵	۷۹/۵	
#4	۶۹	۵۱	۶۰	۶۰	۴۰	۴۶/۷	۴۲	۲۶	
#8	۵۶	۳۸	۴۷	-	-	-	۲۰	۶/۵	
#16	۴۶	۲۸	۳۷	۴۰	۲۰	۲۰	۵	۶	
#30	۳۶	۱۸	۲۷	-	-	-	۴	۵/۵	
#50	۲۷	۱۱	۱۹	-	-	-	۳	۱/۵	
#100	۱۸	۶	۱۲	۱۶	۶	۷	۲	۱	
#200	۸	۲	۵	۸	۲	۲	۱	۰	



شکل ۴. نمودار دانه بندی مصالح سنگی و مصالح بازیافتی (Association 1987, Committee 2001)

می‌گیرد. عیارسیمان مورد استفاده در ساخت مخلوطها کیلومتر بر متر مکعب ۳۵۰، ۳۰۰، ۲۵۰ و ۴۰۰ در نظر گرفته شده است، که معادل ۱۱/۶ تا ۲۰ درصد وزنی مصالح سنگی در مخلوط می‌باشد. سیمان مصرفی از نوع سیمان تیپ II شرکت سیمان تهران بوده و آنالیز شیمیایی آن در جدول ۴ آورده شده است.

مخلوطهای بتن غلتکی، نسبت به بتن معمولی دارای میزان سیمان کمتری می‌باشند و سیمان نقش چسباننده مصالح و یکپارچگی و استحکام مخلوط را ایفا می‌نماید. از آنجا که تعیین درصد سیمان با توجه به نیاز پروژه و مشخصات طرح تعیین می‌گردد و با توجه به اینکه درصد سیمان دارای اثر مستقیم بر مشخصه‌های مکانیکی مخلوط بوده، لذا درصدهای متفاوتی از سیمان در ساخت نمونه‌ها مورد استفاده قرار

جدول ۴. جدول آنالیز شیمیایی سیمان مصرفی

SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	LOI	Other
21.84	4.72	3.77	1.15	61.14	0.44	2.23	0.65	1.63	2.43

#### ۴-۴- مصالح بازیافتی شامل RAP و لاستیک

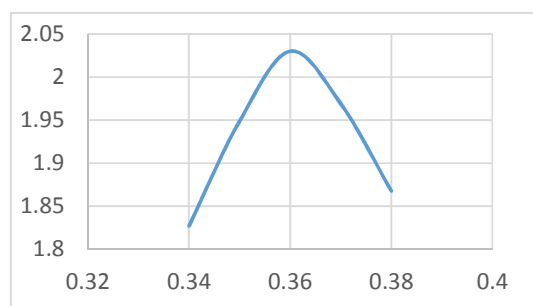
درصد رطوبت بهینه مخلوط صورت گرفته و تعیین طرح اختلاط بهینه از اهداف این پروژه نبوده است. مشخصات نمونه‌های تیرچه و مخلوطهای مورد استفاده در این تحقیق در جدول ۵ آورده شده است.

۱- برای رسیدن به دانه بندی طرح از اختلاط ۵۵٪ ریز دانه، ۲۰٪ مصالح ۱۲-۱۹ میلی‌متر و ۲۰٪ مصالح ۶-۱۲ میلی‌متر و ۵٪ فیلر استفاده شده است. میزان درصد رطوبت بهینه و حداکثر چگالی خشک بر اساس استاندارد ASTM D1557 Soil and Rock محاسبه و گزارش گردیده است (2009). با اختلاط مصالح و سیمان (در اینجا ۱۱ تا ۲۰ درصد سیمان) در درصدهای مختلف آب (۵ ترکیب متفاوت بر اساس درصد آب مابین ۴/۵٪ تا ۶/۵٪ وزن خشک سنگدانه ها) و از ترسیم منحنی‌های تراکم، حداکثر وزن مخصوص مصالح مخلوط، رطوبت بهینه و مقدار درصد وزنی بهینه سیمان به دست می‌آید. مطابق استاندارد ASTM D-558 مصالح سنگی به مقادیر مناسب توزین شده و به هر واحد مقادیر مشخص سیمان افزوده و با درصدهای مختلف آب در قالب استاندارد به ۹۴۴ سانتیمتر مکعب (استوانه به قطر ۴ اینچ و ارتفاع ۴/۵۸ اینچ) وبا کوبه ۵/۵ پوندی در سه لایه یکسان، متراکم می‌شود تا حداکثر وزن مخصوص خشک مخلوط مصالح، درصد رطوبت بهینه و درصد سیمان بهینه مخلوط بدست می‌آید (شکل ۵).

هدف اصلی این مطالعه بررسی تاثیر استفاده از مصالح بازیافتی به عنوان جایگزین بخشی از مصالح سنگی، در ترکیب بتن غلتکی بر مشخصات مکانیکی مخلوط بتن غلتکی می‌باشد. دو نوع مصالح بازیافتی شامل خرده لاستیک بازیافتی و خرده آسفالت بازیافتی در ساخت مخلوطها مورد استفاده قرار گرفت. دانه بندی و مشخصات مصالح بازیافتی در جدول ۳ و شکل ۴ آورده شده است. بدین منظور ترکیب ۲۵، ۵۰، ۱۰۰، ۲۵، ۵۰، ۱۰۰ درصد خرده آسفالت بازیافتی و ۱۰، ۲۵، ۵۰ درصد خرده لاستیک بازیافتی بعنوان جایگزین بخشی از مخلوط مصالح سنگی، مورد استفاده قرار گرفت. تاثیر هر یک از مصالح بازیافتی بصورت جداگانه بررسی شد.

#### ۵- طرح اختلاط مخلوطها

به منظور دستیابی به ترکیبهای متفاوت با خواص مختلف و جهت بررسی تاثیر افزودن مصالح بازیافتی، با توجه به مطالعات پیشین، متغیرهای مورد استفاده شامل: ۴ گروه درصد سیمان، ۲ نوع دانه بندی، ۴ گروه درصد خرده آسفالت بازیافتی و ۳ گروه درصد خرده لاستیک بازیافتی، بوده که در مجموع ۴۸ مخلوط متفاوت در ساخت نمونه‌ها با طرح اختلاط بر اساس زمان وی بی در نظر گرفته شد (میزان ۱۰٪ مصالح بازیافتی برای خرده لاستیک و خرده آسفالت مشترک است- یا همان ترکیب مخلوط کنترلی). ذکر این نکته ضروری است که طرح اختلاط نمونه‌ها با احتساب



شکل ۵. نمودار نسبت آب به سیمان- وزن مخصوص برای نمونه C400R100G1

جدول ۵. مشخصات طرح اختلاط نمونه‌های تیرچه به وزن تقریبی ۲۸۰۰ گرم

شماره نمونه	مشخصه نمونه	شماره دانه بندی	میزان سیمان(گرم)	نسبت آب به سیمان	درصد جذب آب
۱	C250G1	۱	۲۹۲	۰/۴	۱/۲
۲	C300G1	۱	۳۵۰	۰/۳۹	۱/۳
۳	C350G1	۱	۴۰۸	۰/۳۸	۱/۹
۴	C400G1	۱	۴۶۷	۰/۳۷	۱/۴
۵	C250R25G1	۱	۲۹۲	۰/۳۹	۱/۱
۶	C300R25G1	۱	۳۵۰	۰/۳۹	۱/۲
۷	C350R25G1	۱	۴۰۸	۰/۳۸	۱/۶
۸	C400R25G1	۱	۴۶۷	۰/۳۷	۲
۹	C250R50G1	۱	۲۹۲	۰/۳۹	۲/۶
۱۰	C300R50G1	۱	۳۵۰	۰/۳۹	۲/۴
۱۱	C350R50G1	۱	۴۰۸	۰/۳۸	۱/۷
۱۲	C400R50G1	۱	۴۶۷	۰/۳۷	۱/۱
۱۳	C250R100G1	۱	۲۷۰	۰/۴	۴/۴
۱۴	C300R100G1	۱	۳۲۵	۰/۳۹	۱/۵
۱۵	C350R100G1	۱	۳۸۰	۰/۳۸	۱/۳
۱۶	C400R100G1	۱	۴۳۳	۰/۳۷	۱/۷
۱۷	C250CR10G1	۱	۲۹۲	۰/۳۹	۱/۷
۱۸	C300CR10G1	۱	۳۵۰	۰/۳۸	۱/۶
۱۹	C350CR10G1	۱	۴۰۸	۰/۳۷	۱/۴
۲۰	C400CR10G1	۱	۴۶۷	۰/۳۶	۱
۲۱	C250CR25G1	۱	۲۹۲	۰/۳۹	۳/۶
۲۲	C300CR25G1	۱	۳۵۰	۰/۳۸	۱/۴
۲۳	C350CR25G1	۱	۴۰۸	۰/۳۶	۱/۳
۲۴	C400CR25G1	۱	۴۶۷	۰/۳۶	۱/۱
۲۵	C250G2	۲	۲۹۲	۰/۴	۱/۴
۲۶	C300G2	۲	۳۵۰	۰/۳۸	۰/۹
۲۷	C350G2	۲	۴۰۸	۰/۳۷	۰/۷
۲۸	C400G2	۲	۴۶۷	۰/۳۶	۰/۷
۲۹	C250R25G2	۲	۲۹۲	۰/۳۹	۱/۸
۳۰	C300R25G2	۲	۳۵۰	۰/۳۸	۰/۸
۳۱	C350R25G2	۲	۴۰۸	۰/۳۷	۰/۸
۳۲	C400R25G2	۲	۴۶۷	۰/۳۶	۰/۹
۳۳	C250R50G2	۲	۲۹۲	۰/۳۹	۲/۲
۳۴	C300R50G2	۲	۳۵۰	۰/۳۸	۱/۵
۳۵	C350R50G2	۲	۴۰۸	۰/۳۷	۱/۳
۳۶	C400R50G2	۲	۴۶۷	۰/۳۶	۱/۲
۳۷	C250R100G2	۲	۲۷۰	۰/۳۹	۲/۳
۳۸	C300R100G2	۲	۳۲۵	۰/۳۸	۱/۶
۳۹	C350R100G2	۲	۳۸۰	۰/۳۷	۱/۲

۱/۱	۰/۳۶	۴۳۳	۲	C400R100G2	۴۰
۱/۸	۰/۳۸	۲۹۲	۲	C250CR10G2	۴۱
۱/۱	۰/۳۷	۳۵۰	۲	C300CR10G2	۴۲
۱/۹	۰/۳۶	۴۰۸	۲	C350CR10G2	۴۳
۱/۱	۰/۳۵	۴۶۷	۲	C400CR10G2	۴۴
۲/۴	۰/۳۸	۲۹۲	۲	C250CR25G2	۴۵
۱	۰/۳۷	۳۵۰	۲	C300CR25G2	۴۶
۰/۹	۰/۳۶	۴۰۸	۲	C350CR25G2	۴۷
۱/۵	۰/۳۵	۴۶۷	۲	C400CR25G2	۴۸

C : درصد سیمان، R : درصد CR.RAP : درصد لاستیک، G : شماره دانه بندی

#### ۵-۱- آماده سازی و ساخت نمونه‌ها

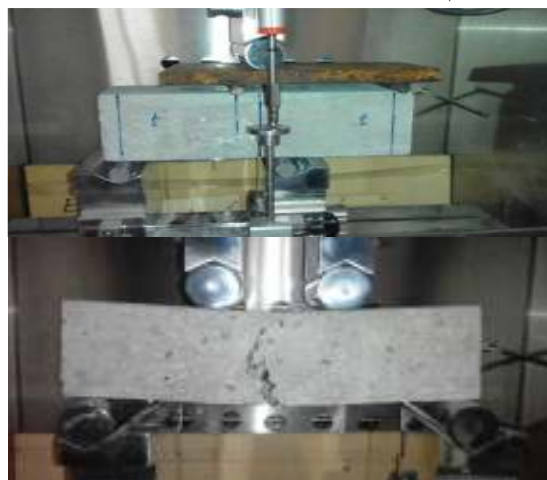
دو روش کلی آزمون‌های روانی و تراکم خاک برای طرح اختلاط بتن غلتکی در حال حاضر مورد استفاده قرار می‌گیرند. بر مبنای روش تراکم خاک، رطوبت بهینه بر اساس روش تراکم پروکتور اصلاح شده و حداکثر دانسیته مخلوط، تعیین می‌شود. در روش روانی، روانی مطلوب مخلوط با استفاده از دستگاه وی بی طبق استاندارد ASTM C1170 تعیین شده که در این مطالعه ضمن استفاده از روش روانی میزان رطوبت لازم جهت رسیدن به حداکثر چگالی نیز استفاده شده است. در این روش در نهایت وزن مصرفی مصالح درشت دانه و ریزدانه با توجه به وزن مخصوص مربوطه تعیین شده و میزان آب بدست می‌آید. زمان وی بی بصورت چشمی بدست آمد و میزان آب لازم به صورت چشمی و بر اساس زمان وی بی (زمان بالا آمدن خمیر سیمان به سطح وزنه) تعیین شد.

مدول الاستیسیته

(سمت چپ)

در این مطالعه از نمونه‌های تیرچه با ابعاد داخلی  $70 \times 240$  میلی‌متر استفاده گردیده است. مشخصات نمونه‌ها در جدول ۵ آورده شده است. جهت تراکم کردن نمونه‌ها از میز لرزه‌ای وی بی<sup>۱۹</sup> مطابق با استاندارد ASTM C1176-92 استفاده می‌شود (شکل ۶). ارتعاش این میز بصورت سینوسی و با فرکانس ۶۰ HZ و دامنه  $0/43$  میلی‌متر می‌باشد. همچنین برای تراکم کردن نمونه‌ها از سرباری معادل ۹ کیلوگرم طبق استاندارد ASTM C1176 بر روی نمونه استفاده می‌شود. وزن سربار طبق استانداردهای مختلف، متفاوت بوده و استاندارد ASTM D1170 سرباری معادل  $22/7$  کیلوگرم را پیشنهاد نموده است. نمونه‌ها به مدت ۳۰ تا ۴۵ ثانیه تحت تراکم و ارتعاش قرار می‌گیرند.

#### ۵-۲- تراکم نمودن نمونه‌ها



شکل ۶. نمونه تیرچه تحت بارگذاری در مود خالص II (سمت راست)، بارگذاری نمونه تیرچه برای تعیین انرژی شکست و

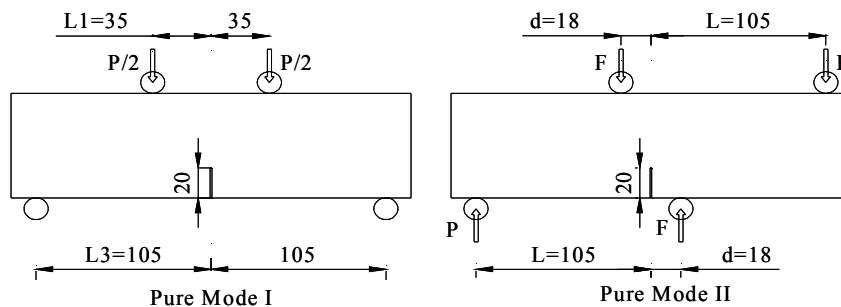
## ۶- آنالیز شکست نمونه‌های بتن غلتکی

ترکیبات مختلف سیمان و مصالح بازیافتی جهت بررسی خصوصیات شکست مخلوط‌های بتن غلتکی استفاده گردید. ابعاد و مشخصات بارگذاری نمونه‌ها در اشکال ۷ و ۸ نشان داده شده است. در مطالعات پیشین از نمونه‌ها با اشکال و اندازه‌های متفاوتی استفاده شده است (Bažant and Pfeiffer 1986, Golewski et al. 2012). ولی از نمونه‌های فوق‌الذکر در مطالعه خصوصیات شکست بتن به ندرت استفاده شده است. همچنین تعیین ضریب شدت تنش و تنش T برای نمونه‌ها و مخلوط‌های مختلف با استفاده از نرم افزار تحلیل اجزای محدود آباکوس انجام پذیرفت. در مجموع ۲۸۸ نمونه تیرچه تحت بارگذاری برای بررسی مود شکست II, I قرار گرفتند.

### ۶-۱- نمونه‌های بتن غلتکی برای مود II, I شکست

شرایط بارگذاری و موقعیت ترک در نمونه‌های مختلف مورد مطالعه در شکل ۷ آورده شده است. زاویه ترک صفر درجه و بارگذاری برای مود I متقارن می‌باشد. تعیین محل تکیه‌گاه‌ها برای نمونه‌های 4PB در مود شکست خالص، کمی دشواری می‌باشد. بطور کلی جهت تعیین محل و موقعیت تکیه‌گاه‌ها و محل اعمال بار از نرم افزار اجزای محدود آباکوس استفاده شده است. برای مود I شکست از بارگذاری متقارن و محل تکیه‌گاه معادل  $2L=210$  میلی‌متر و  $L_1=35 \pm 35$  میلی‌متر از مرکز ترک بدست آمد.

اکثر ترک خوردگی‌های روسازی‌های بتنی در اثر تنش‌های کششی ناشی از انقباض یا گیرش و بهره‌برداری صورت می‌گیرند. برای جلوگیری یا کنترل بروز این ترک‌ها، از الیاف یا آرماتورهای کششی استفاده می‌شود. در پاره‌ای مواقع با استفاده از تیغه برش، درزهای انبساط مجازی جهت ایجاد ترک در محل‌های قابل کنترل و بشکل یکنواخت در سطح روسازی بتنی ایجاد می‌نمایند (Ayatollahi et al. 2011). چنانچه میزان تنش کششی از حد مقاومت کششی تجاوز نماید، ترک خوردگی در اثر ممان خمشی در سطوح زیرین شروع و گسترش می‌یابد. میزان خمش ایجاد شده و مشخصات مکانیکی مخلوط و شرایط طراحی می‌تواند در کنترل اندازه و طول ترک تاثیر گذار باشد. با رسیدن ترک به لایه‌های زیرین روسازی و به دنبال آن نفوذ آب به آن لایه‌ها، روند گسترش خرابی به شدت افزایش خواهد یافت. ترافیک باعث ایجاد بارگذاری متناوب و در نتیجه افزایش احتمال ترک خوردگی ناشی از خستگی و گسترش ترک‌ها خواهد شد (Graeff et al. 2012). با استفاده از مصالح بازیافتی مورد مطالعه در این پژوهش انتظار بر این است که احتمال بروز ترک خوردگی کاهش و رفتار روسازی پس از ترک خوردگی بهبود یافته و کاهش زمان ساخت و عملکرد بهتر مخلوط‌های حاوی مصالح بازیافتی، استفاده از آنها را مقرون بصرفه نماید (Mueller 1990, Ribeiro and De Almeida 2000). در این مطالعه از نمونه 4PB حاوی

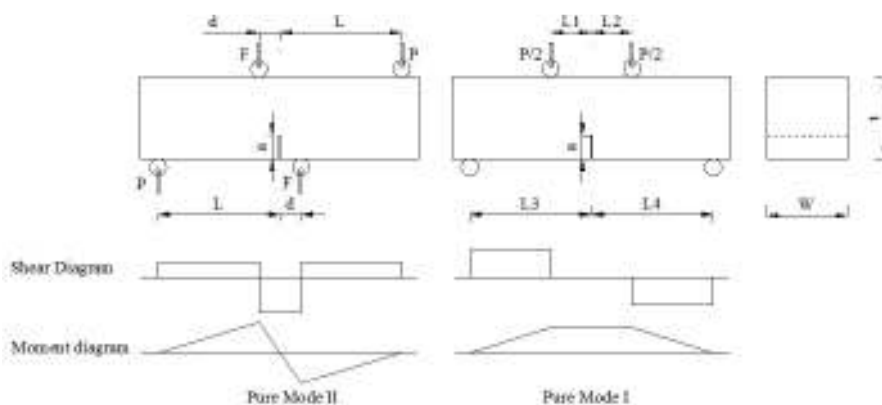


شکل ۷. شکل و محل بارگذاری نمونه‌های بتن غلتکی برای مودهای I, II

شکست است. ترکیبی از مودهای شکست II, I در مسایل مهندسی متداول‌تر است (Williams and Ewing 1972).

مود شکست خالص به ندرت در مسایل مهندسی رخ می‌دهد و مساله اصلی نحوه مواجهه با مودهای ترکیبی

مقارن و نامتقارن را دارا می‌باشد. استفاده از این نمونه جهت بررسی مدهای مختلف بسیار متداول است (Shahani and Tabatabaei 2008). در شکل ۸ شرایط بارگذاری و اثر نوع بارگذاری بر اساس نیروی اعمالی  $F$ ، فاصله اعمال نیرو از مرکز نمونه  $d$ ، طول ترک  $a$ ، عرض نمونه  $w$  و فاصله دهانه بارگذاری از مرکز نمونه  $L$  نشان داده شده است.



شکل ۸ محل بارگذاری نمونه‌های 4PB برای مدهای I,II

تغییرات  $d/w$  ترسیم گردید. چنانچه مشاهده می‌شود با وجود صفر بودن ممان خمشی،  $K_I$  در تمامی حالات صفر نیست. با تعیین مقدار  $d/w$  در ناحیه  $K_I = 0$  با توجه به تحلیل‌های آباکوس، میتوان موقعیت تکیه‌گاه‌ها در مود II شکست را به شرح  $d=18 \text{ mm}$ ،  $L=105 \text{ mm}$  بدست آورد. شکل ۹ بر اساس موقعیت بارگذاری و تکیه‌گاه‌ها برای مود II شکست و با فرض  $F=1 \text{ kN}$ ،  $L=105 \text{ mm}$ ،  $w$  و  $a=20 \text{ mm}$ ،  $d=70 \text{ mm}$  و فاصله از اعمال بار نشان داده است. شکل ۱۰ مش بندی نمونه‌ها برای تحلیل در نرم افزار آباکوس را نشان می‌دهد.

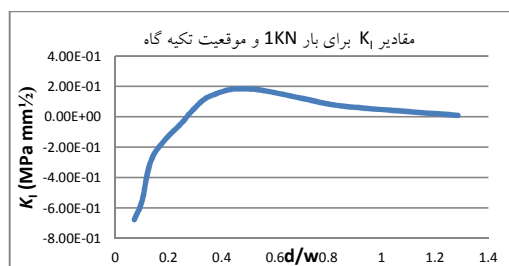
#### ۶-۲- شرایط آزمایش

بار قائم بر بالای نمونه در راستای ترک اعمال شده و تغییرات بار-جابجایی برای محاسبه انرژی شکست توسط کرنش سنج نصب شده در بالای نمونه محاسبه میگردد. قسمت ثابت کرنش سنج از طریق صفحه فلزی به میله اعمال بار متصل شده و انتهای دیگر به نگهدارنده پایینی متصل می‌گردد. جابجایی جانبی ترک بوسیله کرنش سنج متصل

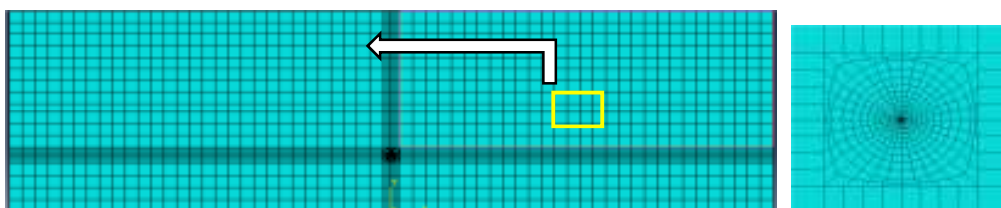
یکی از نمونه‌های استاندارد جهت بررسی مود شکست ترکیبی، نمونه 4PB است. وانگ و همکاران در سال ۱۹۷۷، ضرایب شدت تنش و ضرایب شکل را برای مدهای مختلف شکست برای نمونه 4PB محاسبه نمودند (Maccagno and Knott 1989). مطالعات جامعی برای تعیین ضرایب شکل این نمونه‌ها و تعیین ضرایب شدت تنش آنها، انجام گرفته است. از آنجا که این نمونه قابلیت بارگذاری، بصورت

همانگونه که در شکل ۸ نشان داده شده است، با صفر شدن ممان خمشی در مرکز نمونه، انتظار می‌رود تا تنها مود II خالص، در نمونه ایجادگردد. با مطالعه نتایج و آنالیزهای اجزای محدود، این موضوع قابل نتیجه‌گیری است، که برخلاف انتظارات روش‌های تحلیل استاتیکی، مقدار اندکی ممان خمشی در نمونه وجود داشته که سبب ایجاد مود I نیز در نمونه تحت این بارگذاری می‌شود. این پدیده در اثر تقابل بارگذاری و ترک ایجاد می‌گردد. با دور نمودن محل اعمال بار به اندازه کافی از ترک، می‌توان شاهد مود II خالص بود (Shahani and Tabatabaei 2008). با تغییر مکان ترک یا محل تکیه‌گاه‌ها (موقعیت  $L_1$  تا  $L_4$ ) ممان خمشی افزایش یافته و برش به صفر نزدیک می‌شود. در حالتی که  $L_3=L_4$  و  $L_1=L_2$  (حالت بارگذاری متقارن) تنها مود I پدید خواهدگردید. در سایر حالات و با وجود همزمان خمش و برش، مود ترکیبی بوجود خواهد آمد. شکل ۹ نمودار تغییرات  $K_I$  را بر اساس تغییرات محل بار و برای مقدار بار 1000 N در نمونه 4PB تحت بارگذاری مود II شکست نشان داده است. همچنین نمودار تغییرات  $K_I$  نسبت به

شده به دو صفحه فلزی چسبیده به لبه‌های ترک برای تعیین  
 اعمال شده برای محاسبه ضریب شدت تنش و انرژی  
 بازشدگی دهانه ترک، اندازه گیری میشود. بار با سرعت ۱  
 میلی‌متر بر ثانیه بصورت قائم به نمونه اعمال شده و بار  
 نمونه‌ها و دستگاه را نشان می‌دهد.



شکل ۹. نتایج تحلیل‌های آباکوس برای  $K_I$  بر اساس محل اعمال بار جهت تعیین مود II خالص برای  $F=1kN$



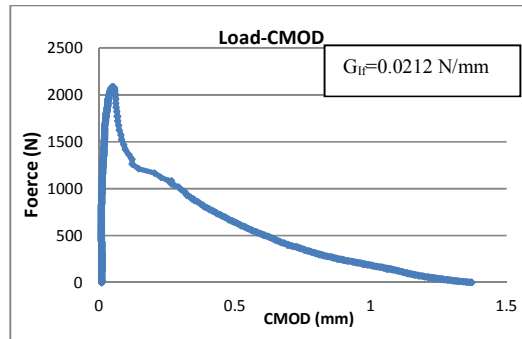
شکل ۱۰. مش‌بندی نمونه‌ها جهت آنالیز در برنامه آباکوس



شکل ۱۱. دستگاه بارگذاری و شرایط تکیه گاه‌ها در مودهای شکست مختلف و نحوه شکست نمونه‌ها در مودهای مختلف

متوقف می‌شود. شکل ۱۲ نمودار بار- CMOD را نشان می‌دهد.

در ابتدا مقدار 5 N بار به منظور اطمینان از تماس یکنواخت بین نمونه و صفحه بارگذاری به نمونه اعمال شده و آزمایش تا رسیدن به مقدار نیروی 10 N پس از حداکثر بار



شکل ۱۲. نمودار شماتیک بار-CMOD برای نمونه‌های بتن غلتکی و مخلوط‌های مختلف

نمودار بار- CMOD میتوان مشاهده نمود که با محاسبه انرژی جذب شده، می‌توان معیار مناسبی جهت بررسی رفتار نمونه‌ها ارائه داد.

۷- تنش و چقرمگی شکست

تنش الاستیک نوک ترک تحت بارگذاری به شکل روابط ۵ تا ۷ بیان می‌گردد:

$$\sigma_{\theta\theta} = \frac{1}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left[ K_I \cos^2 \frac{\theta}{2} - \frac{3}{2} K_{II} \sin \theta \right] + T \cos^2 \theta + O(r^{1/2}) \quad (5)$$

$$\sigma_{rr} = \frac{1}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left[ K_I \left( 1 + \sin^2 \frac{\theta}{2} \right) + K_{II} \left( \frac{3}{2} \sin \theta - 2 \tan \frac{\theta}{2} \right) \right] \quad (6)$$

$$\tau_{r\theta} = \frac{1}{2\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} [K_I \sin \theta + K_{II} (3 \cos \theta - 1)] \quad (7)$$

جزء باقیمانده تنش،  $O(r^{1/2})$  قابل صرف نظر کردن است. ضرایب شدت تنش بر اساس روابط زیر قابل محاسبه است: (Aliha et al. 2009, Aliha and Ayatollahi 2010)

رابطه های ۸ و ۹ و ۱۰ به شرح زیرند:

$$\begin{cases} K_I = \frac{P}{2tW} \left( 1 - \frac{L_3}{L_1} \right) \sqrt{\pi a} Y_I \\ K_{II} = \frac{F}{tW} \sqrt{\pi a} \left( 1 - \frac{a}{L} \right) Y_{II} \\ T = \frac{T^*P}{tW} \end{cases}$$

P, F بار اعمالی مطابق شکل ۷، طول ترک، t, w به ترتیب عرض و ارتفاع نمونه و  $Y_I, Y_{II}$  ضرایب شکل نمونه برای

در ابتدای آزمایش نمودار بار-جابجایی رفتار خطی داشته و چنانچه در شکل ۱۲ نشان داده شده، می‌توان در این قسمت از مکانیک شکست الاستیک خطی (LEFM) در تحلیل رفتار نمونه‌ها استفاده نمود. رفتار کرنش نمونه‌ها پس از شکست کاملا متفاوت بوده و این به دلیل چقرمگی آنها می‌باشد که در جای خود توضیح داده شد. از آنجاکه چقرمگی بیانگر رفتار نمونه‌ها پس از شکست بوده، با مطالعه

در این روابط  $\sigma_{rr}, \sigma_{\theta\theta}, \sigma_{r\theta}$  اجزای تنش در سیستم قطبی،  $r, \theta$  راستای سیستم و  $K_I, K_{II}$  ضرایب شدت تنش در مود I, II می‌باشند. T به عنوان تنش T شناخته شده که سینگولار نبوده و مستقل از r یا فاصله از نوک ترک است.

مود I, II می‌باشد که به محل تکیه گاه‌ها و محل اعمال بار بستگی دارد. نتایج آزمایشات شکست در جدول ۶ برای نمونه‌های تیرچه آورده شده است. نتایج حاکی از آنستکه مقادیر مصالح بازیافتی، سیمان و دانه بندی تاثیر بسزایی در مقاومت ترک خوردگی نمونه‌ها دارد.



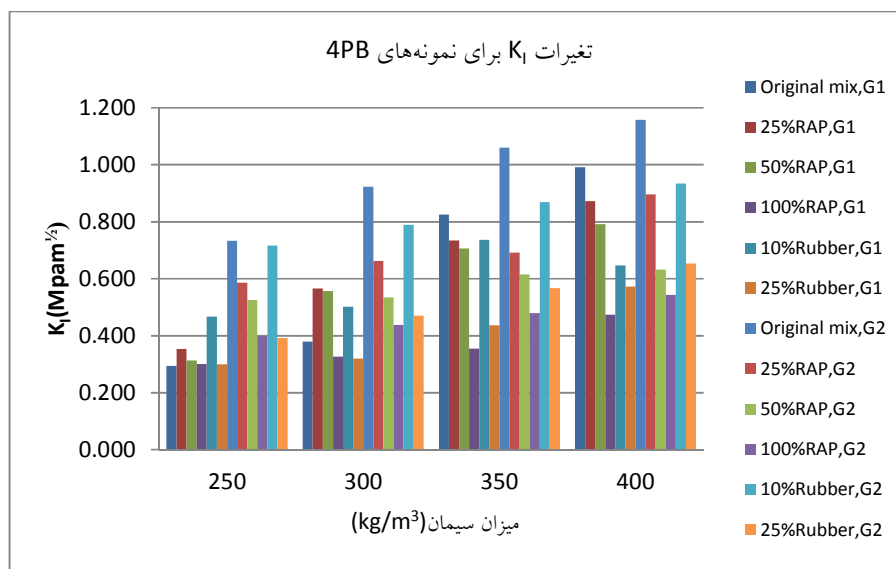
جدول ۶. ضرایب شدت تنش، تنش T و ضرایب شکل نمونه‌های 4PB

Sp. ID	مود I خالص					مود II خالص					$K_{II}/K_I$
	P max (N)	YI	$K_I$ (MPa m <sup>1/2</sup> )	T (MPa)	T*	P max (N)	YII	$K_{II}$ (MPa m <sup>1/2</sup> )	T (MPa)	T*	
1	1688.3	0.295	3.40981	-0.107	0.31116	10393.7	-0.389	1.0200	-1.097	0.022	1.32
2	2179.8	0.380	3.40981	-0.138	0.31116	14278.3	-0.519	1.0194	-1.464	0.021	1.37
3	4730.9	0.825	3.40981	-0.300	0.31116	23862.4	-0.856	1.0194	-2.412	0.020	1.04
4	5686.4	0.992	3.40981	-0.361	0.31116	26140.2	-0.979	1.0200	-2.758	0.022	0.99
5	2086.6	0.354	3.40995	-0.129	0.31116	9457.3	-0.339	1.0194	-0.956	0.020	0.96
6	3293.2	0.566	3.41024	-0.206	0.31116	17007.6	-0.600	1.0166	-1.719	0.020	1.06
7	4387.5	0.734	3.41025	-0.267	0.31116	18457.6	-0.681	1.0199	-1.920	0.021	0.93
8	5217.9	0.873	3.41025	-0.318	0.31116	22769.0	-0.817	1.0194	-2.302	0.020	0.94
9	1820.7	0.313	3.41024	-0.114	0.31116	9177.4	-0.339	1.0199	-0.954	0.021	1.08
10	3336.9	0.557	3.35467	-0.211	0.31871	16026.6	-0.581	1.0168	-1.667	0.021	1.04
11	4055.9	0.707	3.40981	-0.258	0.31116	20537.9	-0.736	1.0194	-2.076	0.020	1.04
12	2725.7	0.792	3.40981	-0.173	0.31116	23908.1	-0.855	1.0169	-2.453	0.020	1.08
13	1722.3	0.300	3.40981	-0.109	0.31116	7613.9	0.269	1.0199	-0.759	0.020	0.90
14	2048.7	0.327	3.30072	-0.132	0.33476	8470.4	-0.299	1.0166	-0.856	0.020	0.91
15	2156.0	0.356	3.40992	-0.130	0.31116	10472.2	-0.381	1.0194	-1.073	0.021	1.07
16	2794.4	0.474	3.40995	-0.173	0.31116	12100.0	-0.421	1.0169	-1.207	0.019	0.89
17	5656.0	0.467	3.41024	-0.354	0.31116	15634.8	-0.569	1.0194	-1.603	0.021	1.22
18	2958.2	0.502	3.40995	-0.183	0.31116	15883.4	-0.578	1.0194	-1.628	0.021	1.15
19	4281.6	0.736	3.41024	-0.268	0.31116	25826.1	-0.939	1.0194	-2.647	0.021	1.28
20	4055.0	0.646	3.24909	-0.279	0.35154	28015.6	-1.022	1.0225	-2.830	0.020	1.58
21	1813.9	0.299	3.40992	-0.109	0.31116	7557.1	-0.271	1.0194	-0.764	0.020	0.91
22	1890.7	0.321	3.40995	-0.117	0.31116	7829.9	-0.285	1.0194	-0.803	0.021	0.89
23	2574.6	0.437	3.40995	-0.159	0.31116	12592.6	-0.459	1.0225	-1.272	0.020	1.05
24	3426.1	0.573	3.41025	-0.209	0.31116	16701.5	-0.601	1.0224	-1.752	0.021	1.05
29	4398.3	0.734	3.35467	-0.278	0.31871	18386.2	-0.659	1.0194	-1.859	0.020	0.90
30	6579.6	0.924	3.35507	-0.422	0.31871	21835.5	-0.831	1.0224	-2.301	0.022	0.90
31	6080.2	1.061	3.40981	-0.386	0.31116	26230.8	-0.971	1.0223	-2.686	0.021	0.92
32	6638.9	1.158	3.40981	-0.422	0.31116	27455.0	-1.013	1.0199	-2.855	0.021	0.87
33	3460.0	0.587	3.40995	-0.214	0.31116	16119.3	-0.586	1.0194	-1.652	0.021	1.00
34	3904.5	0.662	3.40995	-0.241	0.31116	16180.6	-0.580	1.0194	-1.636	0.020	0.88
35	4081.7	0.692	3.40995	-0.252	0.31116	17010.6	-0.610	1.0194	-1.720	0.020	0.88
36	4798.6	0.896	3.40995	-0.296	0.31116	25828.9	-0.926	1.0194	-2.611	0.020	1.03
37	3095.1	0.525	3.40995	-0.191	0.31116	13512.1	0.478	1.0199	-1.348	0.020	0.91
38	3195.1	0.534	3.41025	-0.195	0.31116	13694.9	0.491	1.0194	-1.385	0.020	0.92
39	3624.8	0.615	3.40995	-0.224	0.31116	15291.0	0.548	1.0194	-1.546	0.020	0.89
40	3214.3	0.632	3.41025	-0.196	0.31116	16434.8	-0.598	1.0194	-1.685	0.021	0.95
41	2382.9	0.398	3.41025	-0.145	0.31116	8658.3	-0.298	1.0197	-0.840	0.018	0.75
42	2618.8	0.438	3.41025	-0.159	0.31116	9684.4	-0.338	1.0200	-0.953	0.019	0.77
43	2865.8	0.479	3.41025	-0.175	0.31116	11908.9	-0.427	1.0194	-1.204	0.020	0.89
44	3201.0	0.543	3.40995	-0.198	0.31116	13208.2	-0.467	1.0199	-1.317	0.020	0.86
45	4166.8	0.717	3.41024	-0.261	0.31116	17679.6	-0.634	1.0194	-1.787	0.020	0.88
46	4525.8	0.790	3.40981	-0.287	0.31116	20321.7	0.739	1.0194	-2.083	0.021	0.94
47	5059.0	0.870	3.41024	-0.317	0.31116	22426.3	-0.818	1.0225	-2.265	0.020	0.94
48	4574.9	0.934	3.40995	-0.282	0.31116	23483.2	-0.842	1.0194	-2.374	0.020	0.90
49	2376.0	0.392	3.40992	-0.143	0.31116	11132.4	-0.394	1.0199	-1.110	0.020	1.00
50	2737.6	0.471	3.41024	-0.171	0.31116	11533.8	-0.421	1.0225	-1.165	0.020	0.89
51	3252.5	0.567	3.40981	-0.207	0.31116	13782.6	-0.501	1.0194	-1.413	0.021	0.88

T\* نرمال شده تنش T است که برای محاسبه زاویه گسترش ترک در مودهای مختلف کاربرد دارد.

عامل در اثر متفاوت بودن ضرایب شکل، که سبب کاهش اثر باربری نمونه‌ها و در نتیجه ضریب شدت تنش آنها، می‌باشد. صرفنظر از اثر افزودن مصالح بازیافتی بر چقرمگی شکست مخلوطهای بتن غلتکی، نتیجه میشود که نسبت  $K_{II} / K_I > 0.87$  (نسبت  $K_{II} / K_I$  بیانگر مقاومت مصالح است) بوده و انطباق مناسبی با معیار شکست MTS پیشنهاد شده توسط اردوگان (۱۹۶۳) دارد (Erdogan and Sih 1963). براون بیان داشتند که با نسبت  $K_{II} / K_I > 0.82$  (1963) برای لئو و چائو) زاویه گسترش ترک بصورت یکنواخت کاهش یافته و از معیار MTS تبعیت می‌نماید. مقادیر کمتر از ۰/۸۱ بیانگر مود ترکیبی است و عموماً مرتبط با رابطه  $\frac{\tau_c}{\sigma_c} = \frac{k_{IIc}}{k_{Ic}}$  و در مقادیر بیشتر (۰/۸۲ تا ۰/۸۶۶) تغییر شکل برشی رخ نخواهد داد (Highsmith Jr 2009). شکل ۱۳ روند تغییرات ضریب شدت تنش مود I نمونه‌های 4PB را نشان می‌دهد.

شکل ۹ تغییرات  $K_I$  نمونه‌های 4PB را نشان می‌دهد.  $K_I$  رابطه مستقیمی با درصد سیمان در نمونه‌ها دارد. هرچه میزان سیمان نمونه‌ها افزایش یابد، میزان تردی نمونه‌ها افزایش می‌یابد. و از آنجاکه  $K_I$  تابعی از میزان بار اعمالی به نمونه می‌باشد،  $K_{Ic}$  مربوط به زمانیکه که حداکثر بار اعمالی به نمونه وارد شود. مصالح بازیافتی تاثیر منفی بر مقاومت کششی نمونه‌ها داشته و به همین جهت میزان  $K_{Ic}$  با افزایش درصد مصالح بازیافتی، کاهش خواهد یافت. به همان صورت  $K_{IIc}$  بیانگر قابلیت مصالح در حالت برشی است. بکارگیری مصالح بازیافتی سبب کاهش مقاومت برشی مخلوط بتن غلتکی شده و در نتیجه  $K_{IIc}$  کاهش خواهد یافت. قابل ذکر است که با افزایش درصد سیمان، مقاومت برشی افزایش خواهد یافت. از آنجایی که بار اعمالی در مود II بیشتر از مود I است، همچنان نمونه‌ها تحت تاثیر روابط ۵ تا ۱۰ دارای مقادیر ضرایب شدت تنش متفاوتی خواهند بود. روند غالب در نمونه‌های 4PB دلالت بر  $K_I > K_{II}$  دارد. این



شکل ۱۳. نمودار تغییرات  $K_I$  برای نمونه‌های 4PB و مخلوطهای مختلف

تشریح رفتار شکست نمونه‌ها کاربرد دارد. هرچه مقدار ضریب شدت تنش بیشتر باشد، میزان تردی نمونه بیشتری

مقادیر  $K_{Ic}$  از خواص ویژه مصالح و منحصر بفرد می‌باشد.  $K_{Ic}$  مقدار ضریب شدت تنش بحرانی مصالح است که برای

مقادیر P استفاده می شود. مقادیر بالاتر P بیانگر توزیع بهتر است. با مقایسه مقادیر P بین توزیع های آماری می توان میزان انطباق پذیری آنها را مقایسه نمود. مقادیر  $P < 0.05$  نشان دهنده این واقعیت است که داده ها از آن توزیع تبعیت نمیکنند. محاسبه مقادیر P برای توزیع سه پارامتری قابل تعیین نیست که در جدول ۷ با ستاره نشان داده شده اند. پارامتر آخر یعنی LRT P، به ندرت در توزیع ۳ پارامتری<sup>۲۱</sup> استفاده می شود. مقادیر پایین بیانگر اینستکه اضافه نمودن توزیع ۳ پارامتری از ۲ پارامتری از مزیت بالاتری برخوردار است. مقادیر بالا نشانگر این است که بهتر است از ورژن ۲ پارامتری استفاده شود. با مطالعه مقادیر P در جدول ۷ می توان قضاوت مناسبی در مورد انتخاب توزیع مناسب بدست آورد. توزیع لوگ نرمال<sup>۲۲</sup> و باکس کاکس را می توان برای مقادیر ضریب شدت تنش نمونه های تیرچه مود I ( $K_{I-4PB}$ ) مورد استفاده قرارداد. و برای ضرایب شدت تنش در مود II ( $K_{II-4PB}$ ) از توزیع کوچکترین حد<sup>۲۳</sup> و جانسون<sup>۲۴</sup> استفاده می شود. اگرچه داده ها از توزیع نرمال تبعیت نمی کنند ولی تابع توزیع تطبیق داده شده بر آنها به تابع توزیع نرمال بسیار نزدیک دارد. نتایج پارامترهای توزیع آماری در جدول ۷ آورده شده است. توزیعهای با بالاترین مقادیر P به عنوان بهترین توزیع در جدول با رنگ زرد مشخص شده اند. توابع نهایی توزیع های آماری در جدول ۸ آورده شده اند. توابع توزیع وسیله مناسبی برای تشخیص نوع توزیع آماری داده ها است. اگر داده ها از خط مستقیمی تبعیت کند آن داده ها با آن توزیع ها انطباق دارند. نحوه انطباق توابع توزیع آماری داده ها بصورت گرافیکی در شکل ۱۴ نشان داده شده اند.

شود. لازم به ذکر است که مصالح با میزان ضریب شدت تنش بیشتر دارای مقاومت و ظرفیت باربری کمتری هستند. مقدار  $K_1$  با افزایش بار افزایش یافته و به مقدار بیشینه می رسد که بعنوان خصوصیت مصالح گزارش داده می شود.

#### ۸- توزیع آماری ضریب شدت تنش نمونه های تیرچه

دانستن توزیع آماری داده ها تنها اطلاعات باارزشی در مورد خود داده ها بدست می دهد بلکه می تواند در انتخاب نوع آنالیز و نحوه تفسیر نتایج موثر باشد. این واقعیت است که اکثر مسایل مربوط به زندگی همیشه توزیع نرمال ندارند. این مورد بویژه در مورد آنالیز بهبود پروسه کیفیت صدق مینماید زیرا که اکثر داده ها دارای چولگی (عدم تقارن) هستند. خروجی بیشتر داده ها اغلب دارای یک حد طبیعی در یک راستای توزیع هستند. حدود طبیعی شامل مسایلی نظیر خلوص (که هیچگاه ۱۰۰ درصد میشود) یا اندازه قطر سوراخ (که نمی تواند کوچکتر از قطر پیچ باشد) می شود. این حدود طبیعی توزیعات دارای چولگی ایجاد نموده که گاهی از حدود طبیعی فراتر می روند. بنابراین داده های غیر نرمال در برخی مواقع طبیعی هستند (Walck 2007). برای نشان دادن این پروسه از نرم افزار Minitab برای تعیین توزیع آماری داده ها استفاده شده است. برای تفسیر نتایج توزیع های آماری از پارامترهای زیر استفاده خواهد شد: پارامتر دارلینگ اندرسون<sup>۲۰</sup> (AD) برای تعیین میزان تطبیق داده ها استفاده می شود و مقادیر پاینتر AD بیانگر میزان تطبیق بالاتر است. به هر حال برای تعیین میزان تطبیق داده ها بر توزیع آماری از

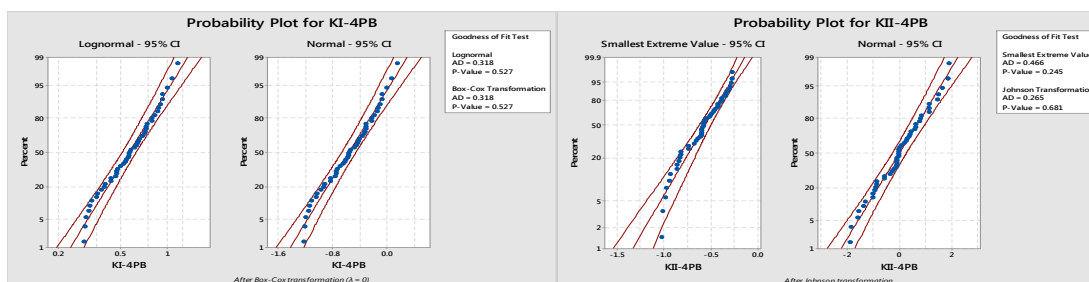
جدول ۷. مقادیر پارامترهای توابع توزیع داده های نمونه های

	Distribution & Transformation	Goodness of Fit Test			ML Estimates of Distribution Parameters			
		AD	P	LRT P	Location	Shape	Scale	Threshold
$K_{I-4PB}$	Normal	0.435	0.288		0.60623		0.21906	*
	Box-Cox Transformation	0.318	0.527	*	-0.56593	*	0.37031	*
	Lognormal	0.318	0.527	*	-0.56593	*	0.37031	*
	3-Parameter Lognormal	0.329	*	0.945	-0.52986	*	0.35343	-0.01954
	Exponential	9.134	<0.003	*	*	*	0.60623	*

	2-Parameter Exponential	1.464	0.024	0	*	*	0.31785	0.28838
	Weibull	0.337	>0.250	*	*	3.02391	0.67995	*
	3-Parameter Weibull	0.49	0.23	0.01	*	1.4162	0.35624	0.27998
	Smallest Extreme Value	1.239	<0.010	*	0.71911	*	0.22851	*
	Largest Extreme Value	0.333	>0.250	*	0.5033	*	0.17908	*
	Gamma	0.266	>0.250	*	*	7.80383	0.07768	*
	3-Parameter Gamma	0.477	*	0.178	*	2.08221	0.16906	0.2542
	Logistic	0.438	0.235	*	0.59395	*	0.12666	*
	Loglogistic	0.374	>0.250	*	-0.55728	*	0.21779	*
	3-Parameter Loglogistic	0.387	*	0.928	-0.61174	*	0.23039	0.02916
K <sub>II-4PB</sub>	Normal	0.703	0.062		-0.59492	*	0.21902	*
	3-Parameter Lognormal	0.729	*		6.26694	*	0.00041	-527.4563
	2-Parameter Exponential	4.823	<0.010		*	*	0.43617	-1.03109
	3-Parameter Weibull	0.501	0.131		*	8.19361	1.56022	-2.06333
	Smallest Extreme Value	0.466	0.245		-0.491	*	0.18173	*
	Largest Extreme Value	1.438	<0.010		-0.70666	*	0.21587	*
	3-Parameter Gamma	0.961	*		*	59.0910	0.02885	-2.30423
	Logistic	0.698	0.04		-0.58285	*	0.12841	*
	3-Parameter Loglogistic	0.699	*		6.26489	*	0.00024	-526.3649
	Johnson Transformation	0.265	0.681		-0.01081	*	0.96359	*

جدول ۸. توابع توزیع داده های نمونه های 4PB

نوع ضریب شدت تنش	توزیع آماری مربوطه
K <sub>I-4PB</sub>	$f(x) = \frac{1}{0.549097x} \exp\left[-\frac{(\ln x - 0.606229)^2}{0.095983}\right]$
K <sub>II-4PB</sub>	$f(x) = \frac{1}{0.18173} e^{(x+0.49100)/0.18173} \exp(e^{(x+0.49100)/0.18173})$



شکل ۱۴. توزیع آماری انطباق داده شده بر داده های ضرایب شدت تنش

## ۹- نتیجه گیری

آزمایشات خمش چهار نقطه ای مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین مدل های آماری مناسب برای صحت سنجی

نتایج مدل های برازش شده بر نتایج آزمایشات انجام شده بر روی نمونه های بتن غلتکی حاوی مقادیر مختلف خرده لاستیک بازیافتی و خرده آسفالت بازیافتی بر اساس

- 22- Lognormal  
23- Smallest Extreme Value Distribution  
24-Johnson Transformation

### ۱۱-مراجع

-آنون (۱۳۹۷)، "نشریه شماره ۷۳۱"، دستورالعمل طراحی، اجرا و نگهداری روسازی بتنی راه ها.

-صادق، ا.، (۱۳۸۶)، "مطالعه رفتار مکانیکی بتن غلتکی با مصالح ریزدانه غیرخمیری برای کاربرد در روسازی های بتنی".

-محمدکریمی گوغری، ا.ح.، امین احمدی حمزه عرب عامری، (۱۳۹۱)، "امکان سنجی آزمایشگاهی استفاده از خرده آسفالت بازیافتی به عنوان جایگزین سنگدانه در مخلوط بتن غلتکی روسازی"، مهندسی حمل و نقل مجله، شماره اول (سال سوم).

-Akbaridoost, J. & Ayatollahi, M., (2014), "Experimental analysis of mixed mode crack propagation in brittle rocks: The effect of non-singular terms". Engineering Fracture Mechanics, 129, pp.77-89.

-Aliha, M., (2014), "Indirect tensile test assessments for rock materials using 3-d disc-type specimens". Arabian Journal of Geosciences, 7 (11), pp.4757-4766.

-Aliha, M., Ashtari, R. & Ayatollahi, M.R., (2014), "Mode i and mode ii fracture toughness testing for a coarse grain marble ed". Applied Mechanics and Materials Trans Tech Publ, pp.181-188.

-Aliha, M. & Ayatollahi, M., (2009), "Brittle fracture evaluation of a fine grain cement mortar in combined tensile-shear deformation". Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 32 (12), pp.987-994.

-Aliha, M. & Ayatollahi, M., (2011), "Geometry effects on fracture behaviour of polymethyl methacrylate". Materials Science and Engineering: A, 527 (3), pp.526-530.

توزیع داده ها بر آنها برازش شد. نتایج زیر بر اساس ارزیابی های انجام شده حاصل گردید:

۱-افزودن خرده لاستیک بازیافتی و خاکستر بادی به نمونه های بتن غلتکی باعث کاهش مقاومت مخلوط بتن غلتکی گردید.

۲-مخلوط بتن غلتکی توسط میز وی بی متراکم گردیده است. در مقایسه با مصالح غیر بازیافتی، وجود مصالح بازیافتی سبب کاهش میزان درصد آب لازم برای مخلوطها و کاهش حداکثر چگالی بتن می گردد. همچنین به دلیل میزان جذب آب کمتر مصالح بازیافتی، میزان بیشتری از خمیر سیمان آزاد وجود داشته که سبب افزایش کارایی و تراکم مخلوط می گردد.

۳-نمونه های حاوی خرده لاستیک از چقرمگی شکست بیشتری نسبت به RAP برخوردار می باشند.

۴-با افزایش میزان سیمان از درصد ۱۲ به ۲۰ درصد، چقرمگی شکست نمونه ها افزایش یافت.

۵-مقادیر ضرایب شکل و به دنبال آن پارامترهای  $K_{I}$ ,  $K_{II}$  T برای نمونه ها، از طریق آنالیز نرم افزار المان محدود آباکوس قابل انجام است.

### ۱۰-پی نوشت ها

- 1 - Fracture Mode I And II
- 2 - Reclaimed Asphalt Pavement
- 3- Reflective Cracking
- 4- Linear Elastic Fracture Mechanics (LEFM)
- 5 - Fracture Process Zone (FPZ)
- 6- Stress Intensity Factor
- 7 - Cohesive Zone Model
- 8 -Single Edge Notched Beam
- 9 - Offset Notch
- 10- Crack Mouth Opening Displacement
- 11 - 4-Point Beam
- 12 - Semi-Circle Bend
- 13- Mode
- 14 -Opening Mode
- 15- Sliding Mode
- 16- Tearing Mode
- 17- Stress Intensity Factor
- 18- Critical Stress Intensity Factor
- 19 - Vebe
- 20- Anderson-Darling
- 21-Parameter Lognormal

- Ayatollahi, M., Aliha, M. & Saghafi, H., 2011. An improved semi-circular bend specimen for investigating mixed mode brittle fracture. *Engineering Fracture Mechanics*, 78 (1), 110-123.
- Bažant, Z. & Pfeiffer, P., 1986. Shear fracture tests of concrete. *Materials and Structures*, 19 (2), 111-121.
- Berry, M., Stephens, J., Bermel, B., Hagel, A. & Schroeder, D., 2013. Feasibility of reclaimed asphalt pavement as aggregate in portland cement concrete.
- Braham, A., Buttlar, W. & Ni, F., 2010. Laboratory mixed-mode cracking of asphalt concrete using the single-edge notch beam. *Road Materials and Pavement Design*, 11 (4), 947-968.
- Chong, K. & Kuruppu, M., 1984. New specimen for fracture toughness determination for rock and other materials. *International Journal of Fracture*, 26 (2), R59-R62.
- Committee, A., 2001. Committee 325. 10 r-95. Report on Roller-Compacted Concrete Pavements.
- Courard, L., Michel, F. & Delhez, P., 2010. Use of concrete road recycled aggregates for roller compacted concrete. *Construction and Building Materials*, 24 (3), 390-395.
- De Bondt, A.H., (1992), "Cracking of asphalt concrete overlays". RRRL Report, 7-92-203-8.
- Dodoo-Arhin, D., Mensah, S.A., Yaya, A. & Agyei-Tuffour, B., (2015), "Application of discarded rubber car tyres as synthetic coarse aggregates in light weight pavement concretes. *American Journal of Materials Science*, 5 (4), pp.75-83.
- Erdogan, F. & Sih, G., (1963), "On the crack extension in plates under plane loading and transverse shear". *Journal of basic engineering*, 85 (4), pp.519-525.
- Fakhri, M., (2016), "The effect of waste rubber particles and silica fume on the mechanical properties of roller compacted
- Aliha, M. & Ayatollahi, M., (2011), "Mixed mode i/ii brittle fracture evaluation of marble using scb specimen". *Procedia Engineering*, pp.311-318.
- Aliha, M., Ayatollahi, M. & Kharazi, B., (2009), "Mode ii brittle fracture assessment using asfpb specimen". *International journal of fracture*, 159 (2), pp.241-246.
- Aliha, M., Ayatollahi, M., Smith, D. & Pavier, M., (2010), "Geometry and size effects on fracture trajectory in a limestone rock under mixed mode loading". *Engineering Fracture Mechanics*, 77 (11), pp.2200-2212.
- Aliha, M., Hosseinpour, G.R. & Ayatollahi, M., (2013), "Application of cracked triangular specimen subjected to three-point bending for investigating fracture behavior of rock materials". *Rock mechanics and rock engineering*, 46 (5), pp.1023-1034.
- Aliha, M., Sistaninia, M., Smith, D., Pavier, M. & Ayatollahi, M., (2012), "Geometry effects and statistical analysis of mode i fracture in guiting limestone". *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 51, pp.128-135.
- Artamendi, I. & Khalid, H.A., (2006), "A comparison between beam and semi-circular bending fracture tests for asphalt". *Road Materials and Pavement Design*, 7 (sup1), pp.163-180.
- Association, P.C., (1987), "Structural design of roller-compacted concrete for industrial pavements: Portland Cement Association".
- Ataei, H., (2013), "Sustainability and effect of rubber tire aggregates on compressive and dynamic strength of concrete used for highway and airfield paved roads". *Airfield and Highway Pavement 2013: Sustainable and Efficient Pavements* ASCE, pp.64-75.
- Ayatollahi, M. & Aliha, M., (2007), "Fracture toughness study for a brittle rock subjected to mixed mode i/ii loading". *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 44 (4), pp.617-624.

- specimen. *Engineering Fracture Mechanics*, 91, pp.133-150.
- Lim, I., Johnston, I. & Choi, S., (1993), "Stress intensity factors for semi-circular specimens under three-point bending". *Engineering Fracture Mechanics*, 44 (3), pp.363-382.
- Lin, Y., Karadelis, J.N. & Xu, Y., (2013), "A new mix design method for steel fibre-reinforced, roller compacted and polymer modified bonded concrete overlays". *Construction and Building Materials*, 48 , pp.331-341.
- Maccagno, T. & Knott, J., (1989), "The fracture behaviour of pmma in mixed modes i and ii. *Engineering Fracture Mechanics*", 34 (1), pp.65-86.
- Madhkhan, M., Azizkhani, R. & Harchegani, M.T., (2012), "Effects of pozzolans together with steel and polypropylene fibers on mechanical properties of rcc pavements". *Construction and Building Materials*, 26 (1), pp.102-112.
- Meddah, A., Beddar, M. & Bali, A., (2014), Use of shredded rubber tire aggregates for roller compacted concrete pavement. *Journal of Cleaner Production*, 72, pp.187-192.
- 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.
- Mohammadi, I., Khabbaz, H. & Vessalas, K , (2014), "In-depth assessment of crumb rubber concrete (crc) prepared by water-soaking treatment method for rigid pavements". *Construction and Building Materials*, 71, pp.456-471.
- Mueller, P., (1990), "Roller compacted concrete pavement". State of the art, Final report.
- Nuñez, J.Y.M., Leonel, E.D. & Faxina, A.L., (2016), "Fatigue characteristics of modified asphalt binders using fracture concrete pavement". *Journal of Cleaner Production*, 129, pp.521-530.
- Gdoutos, E., (2005), "Fracture mechanics: An introduction, 2nd edn., Vol. 123 of solid mechanics and its applications. Springer, Dordrecht.
- Golewski, G., Golewski, P. & Sadowski, T., (2012), "Numerical modelling crack propagation under mode ii fracture in plain concretes containing siliceous fly-ash additive using xfm method". *Computational Materials Science*, 62, pp.75-78.
- Graeff, A.G., Pilakoutas, K., Neocleous, K. & Peres, M.V.N., (2012), "Fatigue resistance and cracking mechanism of concrete pavements reinforced with recycled steel fibres recovered from post-consumer tyres". *Engineering Structures*, 45, pp.385-395.
- Güneyisi, E., Gesoğlu, M. & Özturan, T., (2004), "Properties of rubberized concretes containing silica fume." *Cement and Concrete Research*, 34 (12), pp.2309-2317.
- Hassan, K., Brooks, J. & Erdman, M., (2000), "The use of reclaimed asphalt pavement (rap) aggregates in concrete". *Waste Management Series*, 1, pp.121-128.
- Highsmith Jr, S., (2009), "Crack path determination for non-proportional mixed-mode fatigue: ProQuest".
- Huang, B., Shu, X. & Li, G., (2005), "Laboratory investigation of portland cement concrete containing recycled asphalt pavements". *Cement and Concrete Research*, 35 (10), pp.2008-2013.
- Jacobs, M.M.J., (1995), "Crack growth in asphaltic mixes". TU Delft, Delft University of Technology.
- Kaloush, K., Way, G. & Zhu, H., (2005), "Properties of crumb rubber concrete". *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (1914), pp.8-14.
- Kuruppu, M.D. & Chong, K.P., (2012), "Fracture toughness testing of brittle materials using semi-circular bend (scb)

- Sobhan, K. & Mashnad, M., (2001), "Roller-compacted fiber concrete pavement foundation with recycled aggregate and waste plastics. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, (1775), pp.53-63.
- Soil, A.C.D.-O. & Rock, (2009), "Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using modified effort (56,000 ft-lbf/ft<sup>3</sup> (2,700 kn-m/m<sup>3</sup>)) 1: ASTM international"
- Suresh, S., Shih, C., Morrone, A. & O'dowd, N., (1990), Mixed mode fracture toughness of ceramic materials. Journal of the American Ceramic Society, 73 (5), pp.1257-1267.
- Turatsinze, A. & Garros, M., (2008), "On the modulus of elasticity and strain capacity of self-compacting concrete incorporating rubber aggregates". Resources, conservation and recycling, 52 (10), pp.1209-1215.
- Walck, C., (2007), "Handbook on statistical distributions for experimentalists".
- Williams, J. & Ewing, P., (1972), "Fracture under complex stress—the angled crack problem. International Journal of Fracture Mechanics, 8 (4), pp.441-446.
- Zipf Jr, R.K. & Bieniawski, Z., (2012), "Mixed mode testing for fracture toughness of coal based on critical-energy-density eds". The 27th US Symposium on Rock Mechanics (USRMS) American Rock Mechanics Association.
- mechanics. Engineering Fracture Mechanics, 154", pp.1-11.
- Okafor, F.O., (2010), "Performance of recycled asphalt pavement as coarse aggregate in concrete". Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies, 17, pp.47-58.
- Oliveira, H.L. & Leonel, E.D., (2013), "Cohesive crack growth modelling based on an alternative nonlinear bem formulation". Engineering Fracture Mechanics, 111, pp.86-97.
- Onuaguluchi, O. & Panesar, D.K., (2014), "Hardened properties of concrete mixtures containing pre-coated crumb rubber and silica fume". Journal of Cleaner Production, 82, pp.125-131.
- Pettersson, P.-E., (1981), "Crack growth and development of fracture zones in plain concrete and similar materials: Division, Inst. Ribeiro, A.B. & De Almeida, I., 2000. Study on high performance roller compacted concrete. Materials and Structures, 33 (6), pp.398-402.
- Shahani, A. & Tabatabaei, S., (2008), "Computation of mixed mode stress intensity factors in a four-point bend specimen. Applied Mathematical Modelling, 32 (7), pp.1281-1288.
- Shalaby, A., Abd El Halim, A. & Easa, S., (2011), "Influence of thermal stresses on construction-induced cracks. RILEM proceedings Chapman & Hall, pp.30-39.