

## بررسی رفتار بتن‌های حاوی لاستیک تحت بارگذاری فشار تک‌محوری

مهدی دهستانی کلاگر\*، علیرضا خالو\*\* و پیمان رحمت‌آبادی\*\*\*

دانشکده مهندسی سازه، دانشگاه صنعتی شریف

(دریافت مقاله: ۸۵/۲/۱۲ - دریافت نسخه نهایی: ۸۶/۴/۱۹)

**چکیده** - در این مطالعه اثر استفاده از خرده‌های لاستیک با رفتاری الاستیک و انعطاف‌پذیر به عنوان سنگدانه در بتن، برای تقلیل مشکلات زیست‌محیطی لاستیک‌های فرسوده و مستعمل خودروها و همچنین اصلاح برخی خواص نامطلوب بتن نظیر تردی و دادن خاصیت انعطاف‌ناپذیری به بتن مورد توجه قرار گرفته است. بدین‌منظور نمونه‌های بتنی استوانه‌ای که خرده‌های لاستیک از سه دسته ریز، درشت و ترکیبی جایگزین ۱۲/۵، ۲۵، ۳۷/۵ و ۵۰ درصد از حجم سنگدانه‌های طرح اختلاط کنترلی شده بودند، ساخته و عمل‌آوری شد. نمونه‌های بتنی تحت کنترل نرخ کرنش تا تغییر شکلهای بزرگ تحت بار فشاری قرار گرفتند. نتایج نشان داد که بتن لاستیکی در مقایسه با بتن معمولی مقاومت کمتر و انعطاف‌پذیری بسیار بیشتری داشته و شکست در آنها برخلاف شکست انفجاری بتن معمولی، آرام و یکنواخت بوده و هیچ‌گونه جداشدگی در قسمتهای بتن صورت نگرفت. عرض ترکها و سرعت انتشار ترک نیز در نمونه‌های بتن لاستیکی کمتر از مقدار آن در بتن معمولی بوده است.

واژگان کلیدی: بتن‌های لاستیکی، رفتار مکانیکی، تنش-کرنش، محیط زیست

## Investigation of the Behavior of Rubberized Concrete under Uniaxial Compressive Test

M. Dehestani, Ali R. Khaloo, and P. Rahmatabadi

Civil Engineering Department, Sharif University of Technology, Tehran  
Center of Excellence in Structures & Earthquake Engineering

**Abstract:** Use of scrap tire rubber particles as aggregate in Portland-cement concrete is a suitable solution for the environmental hazards of waste tires being produced on a large scale. Tire rubber particles also reduce the brittle behavior of concrete due to their elasticity and plasticity. The effect of tire rubber particles on the mechanical properties of concrete is investigated in this study. Tire rubber particles were used in three (coarse, fine, and combined) groups to replace 12.5, 25, 37.5, and 50% of total aggregate volume in concrete. Cylindrical concrete specimens (15cm across and 30 cm high)

\*\*\* - دانشجوی دکترا

\*\* - استاد

\* - دانشجوی کارشناسی ارشد

were fabricated and cured. A compressive strain-control test was performed on the specimens until failure occurred in large deformations. Results show lower strength and more ductile behavior for rubberized concrete compared to plain concrete specimens. Unlike in plain concrete, the failure state in rubberized concrete occurred gently and uniformly and did not cause any separation in the specimen. The crack width and its propagation velocity in rubberized concrete were lower than those in plain concrete.

**Keywords:** Rubber concrete, Mechanical behavior, Stress-strain, Environment.

## ۱- مقدمه

لاستیکهای مستعمل و فرسوده خودروها به عنوان نوعی زباله جامد مشکلات زیست محیطی زیادی را موجب شده‌اند. با توجه به توسعه روزافزون صنعت و تولید قابل ملاحظه لاستیک خودرو مکانهای دپوی لاستیک به سرعت پر می‌شوند [۱]. از سویی دیگر مکانهای دپوی لاستیک پتانسیل زیادی برای آتش‌سوزیهای بزرگ و همچنین تجمع آلودگیها و انواع حشرات و جانوران موذی دارد. لذا استفاده از لاستیک به عنوان سنگدانه در زمینه گسترده‌ای نظیر ساخت بتن، می‌تواند تا حد زیادی راهگشای مشکلات زیست محیطی مذکور باشد. علاوه بر این استفاده از دانه‌های لاستیکی به دلیل داشتن خواصی نظیر انعطاف‌پذیری، جذب انرژی و سختی پایین به عنوان سنگدانه در بتن ممکن است منجر به تعدیل برخی خواص نامطلوب بتن نظیر تردی، شکست ناگهانی و انفجاری و چقرمگی کم بتن شود. لذا محققان زیادی استفاده از لاستیک خردشده در اندازه‌های مختلف را مورد مطالعه و بررسی قرار داده‌اند [۲-۶]. از جمله کارهای انجام شده در این زمینه می‌توان به کارهای خطیب و بویامی در سال ۱۹۹۹ و نیز توپکو و اوکولر در سالهای ۱۹۹۵ و ۱۹۹۷ اشاره کرد. قبل از آنها نیز الدین و سنوکی در سال ۱۹۹۳ ذرات مربوط به سه نوع لاستیک مختلف را جایگزین بخشی از سنگدانه‌ها کردند. کارهای انجام شده فوق از نخستین کارهای انجام شده در این زمینه‌اند [۲].

کارهای انجام شده فوق در بسیاری موارد نتایج مشابهی به دست داده است. اما باید توجه داشت که عواملی چون آماده‌سازی ذرات لاستیک و نیز جنس لاستیک مورد استفاده و اندازه دانه‌ها تأثیرات قابل ملاحظه‌ای در رفتار بتن‌های حاوی لاستیک داشته است و طبعاً موجب بروز تفاوتی در نتایج

شده است. تحقیقات مربوط به بتن‌های حاوی لاستیک در سالهای بعد نیز همچنان ادامه یافته است.

هرناندز و همکاران در سال ۲۰۰۲ رفتار استاتیک و دینامیکی بتن‌های حاوی لاستیک را برای درصدهای کم، نظیر ۵ و ۷ درصد مورد بررسی قرار دادند. گوکیانگ‌لی و همکاران نیز در سال ۲۰۰۴ بتن‌های لاستیکی را برای ذرات رشته‌ای شکل لاستیک مورد بررسی قرار دادند [۵]. رفعت صدیق و تاران نیک نیز در سال ۲۰۰۴ خواص بتن‌های لاستیکی را در یک مقاله مروری بررسی کردند [۵]. ارهان گونیزی و همکاران نیز در سال ۲۰۰۴ به منظور اصلاح خواص بتن‌های حاوی لاستیک از ذرات سیلیکافوم استفاده کردند [۵].

در مقاله حاضر نمونه‌های بتنی تحت آزمایش فشار تک‌محوری که آهنگ اعمال تغییرات کرنش در آن ثابت بوده است، قرار گرفتند. با بررسی معادلات تنش-کرنش نمونه‌های بتن لاستیکی در آزمایش مزبور و نیز شکلهای مربوط به برخی از نمونه‌ها در حالت شکست، رفتار تحلیلی و دقیقی از بتن‌های حاوی لاستیک ارائه شده است. توصیف دقیق و کامل رفتار بتن‌های لاستیکی و نیز استفاده از خرده‌لاستیک با اندازه‌های ترکیبی از ویژگیهای کار حاضر است.

## ۲- مواد و روش آزمایشات

برای ساخت نمونه‌های بتن لاستیکی از ذرات دانه بندی شده لاستیک در سه دسته ریزدانه، درشت‌دانه و ترکیبی به عنوان قسمتهای مشخصی از حجم سنگدانه استفاده شده است. برای ایجاد تمایز بین دانه‌های لاستیک از نظر ریزدانه یا درشت دانه بودن از الک ۴/۷۵ (#4) میلیمتر استفاده شد، به این ترتیب که دانه‌های باقیمانده روی این الک با ماکزیمم اندازه ۲۰ میلیمتر

جدول ۱- خواص دانه‌های لاستیک (مشخصات ارائه شده توسط کارخانه سازنده)

مشخصات لاستیک مورد استفاده		
۱	چگالی نسبی	۱/۱۶ gr/cm <sup>3</sup>
۲	درصد خاکستر	٪۵
۳	نرم کننده	٪۱۰
۴	دوده	٪۲۹
۵	پلیمر	٪۵۰
۶	باقیمانده روی الک با شبکه ۴۰	٪۳/۳۶
۷	باقیمانده روی الک با شبکه ۴۰	٪۸۰
بسته بندی: کیسه‌های ۳۰ کیلوگرمی		

جدول ۲- نتایج آزمایشات انجام شده روی دانه‌های لاستیک توسط کارخانه سازنده

نتایج آزمایشات انجام شده بر اساس آزمونهای موسسه ملی استاندارد آمریکا				
آزمون	استاندارد	مقدار واقعی	واحد	آزمونهای شیمیایی
JIS K 6313	Max 70	۳۷/۵		MLT+4 در ۱۰۰ درجه
JIS K 6313	Max 70	۵	٪	درصد خاکستر
JIS K 6313	Max 70	۵	٪	عصاره استون
JIS K 6313	Min 40	۴۶	٪	درصد پلیمر
JIS K 6313	1.17+/-0.02	۱/۱۴	gr/cm <sup>3</sup>	چگالی ویژه در ۲۵ درجه'
JIS K 6313	55+/-5	۵۳	SHA	سختی
JIS K 6313	Min 70	۴۱	kg/cm <sup>2</sup>	مقاومت کششی
JIS K 6313	Min 300	۲۰۰	٪	کشیدگی

سنگدانه‌های معدنی شامل شن و ماسه نیز با توجه به استاندارد ASTM [۱] تهیه و آماده شد. مشخصات مربوط به سنگدانه‌ها و دانه‌بندی ذرات لاستیک و سنگدانه‌ها در جداول (۳) و (۴) آورده شده است. به منظور دانه‌بندی دانه‌های سبک لاستیک در الکها، چند عدد سنگ درشت دانه وارد شد تا ضمن برخورد با دانه‌های لاستیک آنها را به سمت الکهای زیرین هدایت کنند.

تعداد نمونه‌ها و مشخصات آنها در جدول (۵) آمده است. طرح اختلاط مربوط به نمونه‌ها و مشخصات کمی اجزای تشکیل دهنده آنها نیز با توجه به استاندارد ACI 211.1-81 و

در بعد به عنوان درشت دانه‌های لاستیک انتخاب شد. اما از آنجا که ذرات عبوری از این الک بعضاً حاوی ذرات بسیار ریز بوده است که ممکن بود این ذرات گیرش سیمان را در بتن کاهش دهند [۷]، این ذرات از الک #100 نیز عبور داده شدند تا ذرات ریزدانه لاستیک فقط شامل آن دسته از ذراتی باشند که روی الک #100 باقی مانده‌اند. دسته خرده‌لاستیکهای ترکیبی نیز از نسبت‌های مساوی دسته‌های ریز و درشت تشکیل شد. لاستیک مورد استفاده از کارخانه ای در ایران تهیه شده است که خواص و آزمونهای انجام شده اولیه روی آن که توسط کارخانه انجام شد، در جداول (۱) و (۲) آورده شده است.

جدول ۳- دانه بندی دانه های لاستیک

الک	اندازه (میلی متر)	وزن باقی مانده روی هر الک (گرم)	وزن تجمعی باقی مانده روی هر الک (گرم)	درصد تجمعی عبوری از هر الک (%)
1"	۲۵/۴۰	۵۶	۵۶	۷۸/۶۲
3/4"	۱۹/۰۶	۹/۹۰	۶۵/۹۰	۸۵/۴۴
1/2"	۱۲/۷۰	۴۰/۴۰	۱۰۶/۳۰	۷۶/۵۱
3/8"	۹/۵۰	۱۷/۱۰	۱۲۳/۴۰	۷۲/۷۳
#4	۴/۷۵	۷۶/۷۰	۲۰۰/۱۰	۵۵/۷۸
#8	۲/۳۶	۶۲/۲۰	۲۶۲/۳۰	۴۲/۰۳
#16	۱/۱۸	۷۴/۳۰	۳۳۶/۶۰	۲۵/۶۱
#30	۰/۶۰	۵۴/۰۰	۳۹۰/۶۰	۱۳/۶۸
#50	۰/۳۰	۴۷/۶۰	۴۳۸/۲۰	۳/۱۶
Pan	۰/۰۰	۱۴/۳۰	۴۵۲/۵۰	۰/۰۰
Wssd=۰/۴۹/۵۶		۴۵۲/۵۰		

جدول ۴ - مشخصات و دانه بندی سنگدانه ها

الک	اندازه (میلی متر)	وزن باقیمانده روی هر الک (گرم)	وزن تجمعی باقیمانده روی هر الک (گرم)	درصد تجمعی عبوری از هر الک (%)
1.5"	۳۸/۱۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۱۰۰/۰۰
1"	۲۵/۴۰	۱۵/۸۰	۱۵/۸۰	۹۹/۱۶
3/4"	۱۹/۰۶	۱۳۸/۶۰	۱۵۴/۴۰	۹۱/۷۷
1/2"	۱۲/۷۰	۴۹۳/۲۰	۶۴۷/۶۰	۶۵/۴۷
3/8"	۹/۵۳	۴۰۵/۵۰	۱۰۵۳/۱۰	۳۳/۸۴
#4	۴/۷۵	۶۹۷/۸۰	۱۷۵۰/۹۰	۶/۶۳
#8	۲/۳۶	۴۴/۲۱	۱۷۹۵/۱۱	۴/۲۷
#16	۱/۱۸	۳۱/۵۲	۱۸۲۶/۶۲	۲/۵۹
#30	۰/۶۰	۲۱/۱۴	۱۸۴۷/۷۷	۱/۴۶
#50	۰/۳۰	۱۶/۳۹	۱۸۶۴/۱۶	۰/۵۹
#100	۰/۱۵	۷/۴۹	۱۸۷۱/۶۵	۰/۱۹
Pan	۰/۰۰	۳/۵۵	۱۸۷۵/۲۰	۰/۰۰

جدول ۵ - برنامه آزمایشات

نمونه	محتوای لاستیک در کل حجم سنگدانه‌ها (%)	حجم لاستیک ریزدانه نسبت به حجم ماسه در طرح کنترلی (%)	حجم لاستیک درشت‌دانه نسبت به حجم شن در طرح کنترلی (%)	حجم ماسه نسبت به حجم ماسه در طرح کنترلی (%)	حجم شن نسبت به حجم شن در طرح کنترلی (%)	تعداد نمونه‌ها
P	۰	۰	۰	۱۰۰	۱۰۰	۳
C25	۱۲/۵	۰	۲۵	۱۰۰	۷۵	۳
C50	۲۵	۰	۵۰	۱۰۰	۵۰	۳
C75	۳۷/۵	۰	۷۵	۱۰۰	۲۵	۳
C100	۵۰	۰	۱۰۰	۱۰۰	۰	۳
F25	۱۲/۵	۲۵	۰	۷۵	۱۰۰	۳
F50	۲۵	۵۰	۰	۵۰	۱۰۰	۳
F75	۳۷/۵	۷۵	۰	۲۵	۱۰۰	۳
F100	۵۰	۱۰۰	۰	۰	۱۰۰	۳
C25F25	۲۵	۲۵	۲۵	۷۵	۷۵	۳
C50F50	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۳

جدول ۶ - طرح اختلاط نمونه‌ها

نمونه	آب (لیتر)	لاستیک درشت‌دانه (کیلوگرم)	لاستیک ریزدانه (کیلوگرم)	شن (کیلوگرم)	ماسه (کیلوگرم)	رطوبت شن (%) در شرایط آزمایش	رطوبت ماسه (%) در شرایط آزمایش	اسلامپ (سانتی‌متر)
P	۱۵۷/۵	۰	۰	۹۰۰	۹۰۰	۰	۰	۵
C25	۲۴۶/۵	۱۵۲/۳۷۵	۰	۶۷۵	۹۰۰	۲/۶	۵/۵	۲
C50	۳۱۷/۱۴	۳۰۴/۱۸	۰	۴۵۰	۹۰۰	۲	۶/۴	۳/۵
C75	۳۷۳/۴۳	۴۵۶/۳	۰	۲۲۵	۹۰۰	۳	۸	۲
C100	۴۵۹/۲	۶۰۹/۵	۰	۰	۹۰۰	۳	۷	۲/۵
F25	۲۳۲/۶۴	۰	۱۴۹/۵	۹۰۰	۶۷۵	۳	۷	۷/۵
F50	۲۸۹/۹	۰	۲۹۹	۹۰۰	۴۵۰	۴	۷/۵	۶/۵
F75	۳۹۶/۰۴	۰	۴۵۲/۱	۹۰۰	۲۲۵	۳	۲/۵	۷
F100	۴۷۰/۶	۰	۶۰۲/۸	۹۰۰	۰	۳	۷	۲/۵
C25F25	۳۱۵/۵	۱۵۲/۳۷۵	۱۴۹/۵	۶۷۵	۶۷۵	۳	۶	۵
C50F50	۴۵۱/۲	۳۰۴/۲	۳۰۱/۴	۴۵۰	۴۵۰	۴	۹	۳

استفاده از طرح اختلاط کنترلی با نسبت آب به سیمان ۰/۴۵، به طور خلاصه در جدول (۶) آورده شده است. سیمان مورد

استفاده، سیمان تیپ (۱) پرتلند بوده است.

چگالی شن: ۱۷۰۱/۳ کیلوگرم بر متر مکعب

چگالی ماسه: ۱۷۱۶/۸ کیلوگرم بر متر مکعب

چگالی لاستیک: ۱۱۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب

وزن مخصوص ویژه نسبی سنگ‌دانه‌ها: ۲/۶۵

وزن مخصوص ویژه نسبی لاستیک: ۱/۱۶

نمونه‌های بتنی، مطابق آنچه در بالا به‌طور خلاصه آورده شد، به شکل استوانه‌ای با قطر ۱۵ سانتی‌متر و طول ۳۰ سانتی‌متر ساخته و عمل‌آوری شدند. عمل‌آوری نمونه‌ها در دمای ۳۵ درجه با رطوبت بیش از ۹۸٪ صورت گرفت. این نمونه‌ها پس از ۵۰ روز تحت آزمایش فشار تک‌محوری با دستگاه یونیورسال که آهنگ تغییرات کرنش ثابتی برابر ۰/۰۰۵ میلی‌متر بر ثانیه به نمونه‌ها اعمال می‌کرد، قرار گرفتند.



شکل ۱- وضعیت شکست در بتن معمولی



(ب)



(الف)

شکل ۲- الف) وضعیت شکست در نمونه F25 ، ب) وضعیت شکست در نمونه C25

قبلی است. نمونه‌های بتن لاستیکی در مقایسه با نمونه‌های بتن معمولی رفتار انعطاف‌پذیری از خود نشان دادند. شکست در این نمونه‌ها آرام و همراه با تغییر شکل زیاد بوده است. بتن‌های لاستیکی حتی پس از این که مقاومت حداکثر خود را احراز کردند نیز در ادامه مقاومت نسبی قابل توجهی در مقایسه با بار حداکثر دارند.

شکل (۱) وضعیت شکست را برای نمونه بتن معمولی نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که قسمتهایی از بتن در حین خرابی از بتن جدا شده است. اما مطابق شکل (۲) که بتن‌های لاستیکی C25 و F25 را در وضعیت شکست نشان می‌دهد، هیچ‌گونه

### ۳- نتایج آزمایشات و بحث

#### ۳-۱- بررسی رفتار کلی

بتن‌های معمولی در زمان خرابی به یکباره قسمت قابل توجهی از مقاومت حداکثر خود را از دست دادند و شکست در آنها سریع بود، به طوری که برشها و قسمتهایی از بتن جدا شدند و این رفتار بتن از نقاط عمده ضعف بتن به شمار می‌رود که بعضاً منجر به خسارات قابل توجه نیز می‌شود. نمونه‌های بتن معمولی در هنگام شکست تغییر شکل کمی دارند و لذا شکست معمولاً بدون اخطار



شکل ۳- انتشار یکنواخت و آرام خرابی در نمونه C25

است. شکل (۳) نمونه C25 را نشان می‌دهند که گسترش ترک در آن به آرامی و یکنواخت از پایین رو به بالا در انتشار است. نمونه‌های بتنی حاوی لاستیک پس از باربرداری در مقایسه با نمونه‌های بتن معمولی مقدار نسبی بیشتری از کرنش نهایی خود را بازیافت می‌کنند. در واقع دانه‌های لاستیک در هنگام باربرداری از حالت تراکم بیرون آمده و تا حد زیادی درگیریه‌های عناصر داخلی بتن را تقلیل می‌دهند.

حین انجام آزمایشها مشاهده شد که ترکهای قابل مشاهده‌ای که در نمونه‌های بتنی حاوی لاستیک رخ می‌داد، در بعد از قسمت تناسب و یا خطی تنش - کرنش قرار گرفت و بنابراین چنانچه در طراحی این نوع بتن‌ها مقادیر قبل از نقطه انتهایی قسمت خطی نمودار را مورد استفاده قرار دهیم با این ترکها مواجه نمی‌شویم و این موضوعی است که در بتن‌های معمولی مشاهده نمی‌شود و یا اینکه این ترکها به طور نسبی زودتر و نزدیکتر به نقطه انتهایی قسمت خطی نمودار رخ می‌دهند.

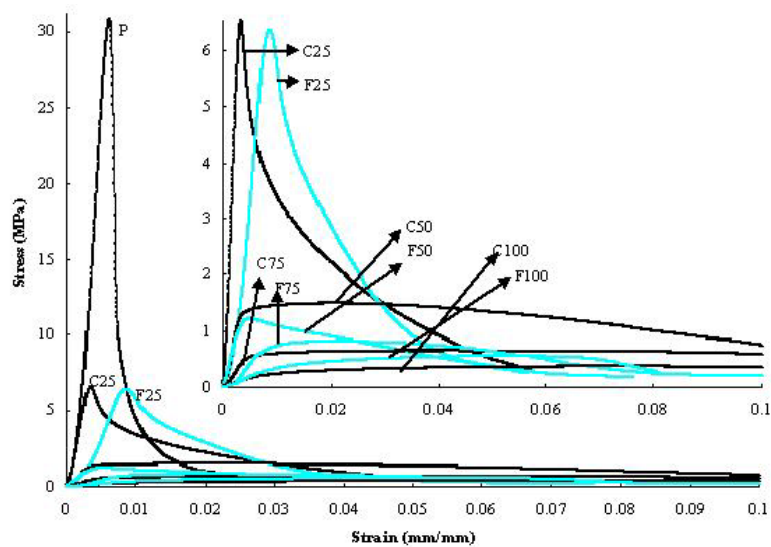
تغییر شکل عرضی نمونه‌های بتن لاستیکی در مقایسه با بتن معمولی بیشتر است و نشان می‌دهد که بتن‌های لاستیکی حایز ضرایب پواسون بیشتری نسبت به بتن معمولی هستند. تغییرشکل عرضی نمونه بتن لاستیکی C50 شکل (۴) در تایید این نکته شایان توجه است.



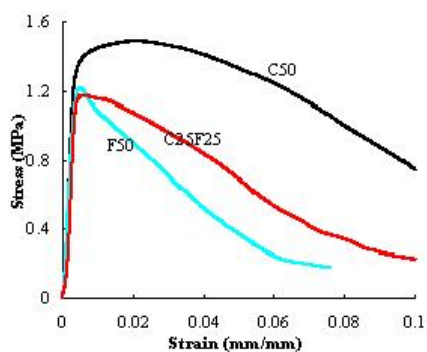
شکل ۴- تغییر شکل عرضی قابل توجه در نمونه‌های بتن لاستیکی

جداشدگی در این نمونه‌ها مشاهده نمی‌شود.

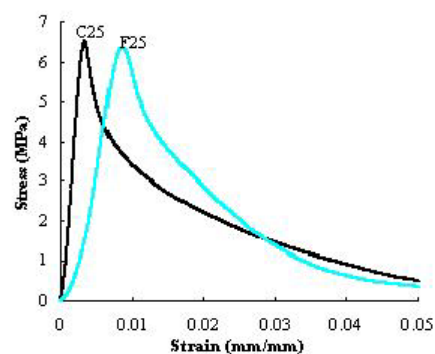
همان‌طور که در شکل (۱) مشاهده می‌شود، گسترش ترکها و دیگر عوامل خرابی در بتن‌های معمولی به سرعت و متمرکز است و حال آنکه در بتن‌های لاستیکی این‌طور نیست. انتشار ترک در بتن‌های لاستیکی به آرامی و یکنواخت صورت می‌گیرد. عرض ترک نیز در بتن‌های لاستیکی کمتر از بتن‌های معمولی



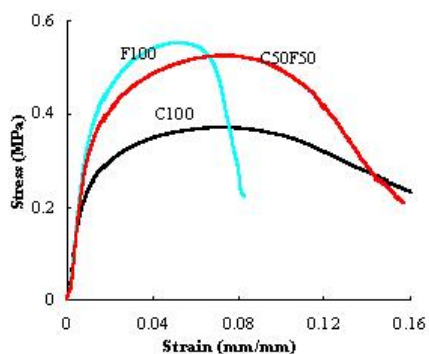
(الف)



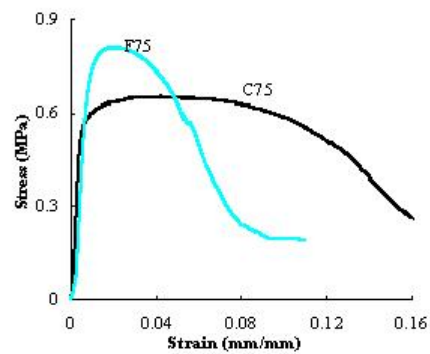
(ج)



(ب)



(ه)



(د)

شکل ۵ - منحنی تنش-کرنش کلیه نمونه‌ها

### ۲-۳- معادلات تنش-کرنش

نتایج آزمایش فشار تک‌محوری به صورت داده‌های نیرو-تغییرمکان بوده است که مطابق شکل (۵) به صورت نمودارهای تنش-کرنش برای کلیه نمونه‌ها آورده شده است. مطابق شکل

اختلاف قابل توجهی در مقاومت حداکثر و رفتار پس از مقاومت حداکثر بین بتن‌های معمولی و لاستیکی وجود دارد. مطابق منحنیهای نشان‌داده شده نمونه‌های لاستیکی پس از قسمت خطی منحنی تنش-کرنش تغییرشکل بیشتری از



جدول ۷- مقادیر مقاومت نهایی و سختی مماسی نمونه‌ها

نمونه	مقاومت نهایی (MPa)	مقاومت نسبت به نمونه کنترلی (%)	مدول مماسی (GPa)	مدول مماسی نسبت به نمونه کنترلی (%)
P	۳۰/۷۷	۱۰۰/۰۰	۷/۴۱	۱۰۰/۰۰
C25	۶/۵۲	۲۱/۱۹	۲/۴۷	۳۳/۳۳
C50	۱/۴۹	۴/۸۴	۰/۳۱	۴/۱۸
C75	۶/۵۰	۲/۱۱	۰/۱۲	۱/۶۲
C100	۰/۳۷	۱/۲۰	۰/۰۳	۰/۴۰
C25F25	۱/۱۷	۳/۸۰	۰/۴۲	۵/۶۷
C50F50	۰/۵۳	۱/۷۲	۰/۰۴	۰/۵۴
F25	۶/۳۶	۲۰/۶۷	۱/۱۵	۱۵/۵۲
F50	۱/۲۲	۳/۹۶	۰/۳۱	۴/۱۸
F75	۰/۸۱	۲/۶۳	۰/۱۱	۱/۴۸
F100	۰/۵۵	۱/۷۹	۰/۰۴	۰/۵۴

نمونه‌های C در وضعیت نرم‌شوندگی به ازای مقادیر یکسان تغییرشکل، نسبت به نمونه‌های F مقاومت بیشتری نشان دهند. نتایج حاصل از آزمایش‌های انجام‌شده روی بتن‌های حاوی دانه‌های لاستیک ترکیبی حاکی از این واقعیت بوده است که به ازای جایگزینی حجمی یکسان از درشت دانه‌ها و ریز دانه‌های لاستیک به نتایجی که مابین نتایج مربوط به دو نمونه‌ای که یا صرفاً دارای ریز دانه و یا فقط درشت دانه لاستیک‌اند، خواهیم رسید. یعنی منحنیهای تنش-کرنش مربوط به نمونه C25F25 تقریباً بین نتایج مربوط به نمونه‌های C50 و F50 قرار می‌گیرد و همین‌طور برای نمونه C50F50 در مقایسه با نمونه‌های C100 و F100. بنابراین با استفاده از ترکیبهای مختلف ریزدانه‌ها و درشت دانه‌های لاستیک می‌توان رفتاری مابین رفتارهای مربوط به نمونه‌های بتنی با محتوای لاستیک کل مشابه به دست آورد.

#### ۴- خلاصه و نتیجه‌گیری

استفاده از لاستیک در بتن با توجه به مشکلات زیست‌محیطی لاستیک مستعمل خودروها و برخی خواص نامطلوب بتن نظیر تردبودن، شکست ناگهانی و انفجاری و تغییرشکل کم در حین شکست در این مقاله مورد نظر قرار

نمونه‌های معمولی دارند. نمونه‌های بتن لاستیکی که بیش از ۲۵٪ از حجم سنگدانه‌های آنها را لاستیک تشکیل می‌دهد، حتی در قسمتهای اولیه منحنیهای تنش-کرنش رفتار خطی از خود نشان نمی‌دهند.

نمونه‌های بتنی F با محتوای لاستیک کمتر از ۲۵٪ تغییرشکل بیشتری نسبت به نمونه‌های متناظر C نشان می‌دهند. اما برای مقادیر لاستیک بیش از ۲۵٪ نمونه‌های C تغییرشکل بیشتری دارند. برای بررسی این مسئله در تغییر شکلهای الاستیک، سختی مماسی  $E_t$  را به عنوان شیب خط مماس در قسمت ابتدایی (در نقطه با مقاومت ۴۰٪ مقاومت حداکثر) تنش-کرنش تعریف شده است. مقادیر  $E_t$  که در جدول (۷) آورده شده است، شاخص خوبی برای نشان دادن میزان مقاومت در برابر تغییر شکل است. بررسی مقادیر  $E_t$  نتیجه فوق را برای نمونه‌های C و F تایید می‌کند.

جدول (۷) نشان می‌دهد که مقادیر مقاومت حداکثر نمونه‌های بتن لاستیکی نوع C با محتوای لاستیک کمتر از ۲۵٪ بیشتر از مقاومت حداکثر در نمونه‌های متناظر F است. اما برای محتوای لاستیک بیشتر از ۲۵٪ نتیجه به‌عکس است. وجود مقداری الیاف در منبع خرده‌لاستیک درشت‌دانه موجب شد که

گرفت. نمونه‌های بتنی لاستیکی با جایگزین کردن لاستیک به جای بخشی از سنگدانه‌ها ساخته شد و آزمایش فشار تک‌محوری روی نمونه‌ها انجام شد. نتایج مشاهدات و بررسیهای انجام گرفته به صورت زیر بوده است.

نمونه‌های بتن لاستیکی در مقایسه با نمونه‌های معمولی بتن رفتاری انعطاف‌پذیرتر از خود نشان دادند. شکست در نمونه‌های بتن لاستیکی برخلاف شکست انفجاری بتن معمولی، آرام و یکنواخت بوده و هیچ‌گونه جداشدگی در قسمتهای بتن صورت نگرفت. سرعت انتشار ترک در نمونه‌های بتن لاستیکی کمتر از سرعت انتشار در بتن معمولی بوده است. عرض ترکهای ایجاد شده در وضعیت شکست برای بتن‌های لاستیکی نیز در مقایسه با بتن‌های معمولی کمتر بوده است.

استفاده از لاستیک به عنوان سنگدانه در بتن موجب می‌شود که بتن مقدار زیادی از مقاومت خود را از دست بدهد. مطابق نتایج به دست آمده وقتی که کل سنگدانه شنی از بتن معمولی با درشت دانه‌های لاستیک جایگزین شود، بتن ۹۸٪ از مقاومت خود را از دست می‌دهد. به این ترتیب موارد استفاده از بتن‌های لاستیکی به مصارف غیرسازه‌ای محدود می‌شود. همچنین با توجه به کاهش قابل توجه خواص مقاومتی بتن‌های لاستیکی استفاده از محتوای لاستیک بیش از

۱۵٪ کل حجم سنگدانه به هیچ‌وجه توصیه نمی‌شود. برای محتوای لاستیک کمتر از ۲۵٪ استفاده از درشت‌دانه‌های لاستیک در مقایسه با ریزدانه‌های آن، منجر به تغییر شکل کمتر و مقاومت حداکثر بیشتر می‌شود. این نتیجه برای مقادیر بیش از ۲۵٪ از لاستیک دقیقاً به عکس است.

منحنیهای تنش-کرنش بتن‌های لاستیکی ترکیبی که در آنها میزان مساوی از درشت‌دانه و ریزدانه وجود داشت، بین منحنیهای مربوط به نمونه‌های C و F با محتوای لاستیک مشابه قرار گرفت. به این ترتیب می‌توان منحنیهای مختلف را با استفاده از سهم نسبت حجم لاستیک درشت‌دانه و ریزدانه در بین منحنیهای مربوط به نمونه‌های C و F متناظر تحصیل کرد. برای تحقیقات آینده بررسی خستگی و همچنین رفتار دینامیکی نمونه‌های بتن لاستیکی برای استفاده در سازه‌ها برای استهلاک انرژی لرزه‌ای پیشنهاد می‌شود.

### قدردانی

بدین وسیله از زحمات مسئولان آزمایشگاه مصالح و بتن دانشکده عمران دانشگاه صنعتی شریف و همکاریهای قطب علمی سازه و زلزله در دانشگاه صنعتی شریف تشکر و قدردانی می‌شود.

### مراجع

1. ASTM Standards, Concrete and Mineral Aggregates, Section 4, American Society for Testing Materials, Philadelphia, 1985
2. Khatib, and Z.K., Bayomy, F.M., "Rubberized Portland Cement Concrete," *ASCE J Mater Civil Engng*; Vol. 11, No. 3, pp. :206-213, 1999.
3. Sobral, M. Samagaio, A.J.B., and J.M.F. Ferreira, Labrincha, J.A., "Mechanical and Acoustic Characteristics of Bound Rubber Granulate, *J. Mater Process. Tech.*, Vol. 142, pp. 427-433, 2003.
4. Neil, N., Eldin, A., and Senouci, B., "Rubber-Tire Particles as Concrete Aggregate, *J Mater Civil Engng*, Vol. 5, No. 4, pp. 478-496, 1993.
5. Siddiquel, R., and Tarun, R. Naik, "Properties of Concrete Containing Scrap-Tire Rubber – an Overview, *Waste Management* Vol. 24, pp. 563-569, 2004.
6. Rostami, H., Lepore, J., Silverstraim, T., and Zundi, I., "Use of Recycled Rubber Tires in Concrete," In: Dhir, R.K. (Ed.) *Proceedings of the International Conference on Concrete*, University of Dundee, Scotland, UK, pp., 391-399, 2000.
7. Neville, A.M., *Properties of Concrete*, 4th ed., Longman, London, 1995
8. دهستانی کلاگر، م.، پایان نامه کارشناسی، "خواص فیزیکی و مکانیکی بتن‌های حاوی لاستیک خرد شده"، دانشگاه صنعتی شریف، پاییز ۱۳۸۳.