

خصوصیات استاتیکی و دینامیکی بتن حاوی ذرات لاستیک تایر ضایعاتی

علی صدر ممتازی*

رومینا ذرشین زنوش

هاشم بابایی

دانشیار، گروه مهندسی عمران، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

چکیده

رفتار بتن تحت بارهای دینامیکی همانند ضربه، در مقایسه با رفتار بتن تحت بارهای استاتیکی متفاوت است. یک برنامه آزمایشگاهی به منظور تعیین خصوصیات استاتیکی و دینامیکی بتن حاوی ذرات لاستیک در نظر گرفته شده است. بدین منظور ذرات لاستیک تایر ضایعاتی در سه اندازه ۰-۱، ۱-۳ و ۳-۵ میلیمتر جانشین حجمی ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ درصد ریزدانه در مخلوط بتن شده‌اند. آزمون‌های استاتیکی و دینامیکی به وسیله دستگاه‌های هیدرولیکی و وزنه پرتابی انجام شده و مقاومت فشاری و خمشی، سرعت عبور امواج التراسونیک، مدول الاستیسیته، کرنش و جذب انرژی استاتیکی و دینامیکی برای بتن تعیین شده است. نتایج حاکی از آن است که، ذرات لاستیک تایر ضایعاتی در اندازه بزرگتر به عنوان جانشین ریزدانه، خصوصیات بهتری از خود نشان داده‌اند. همچنین افزایش محتوای لاستیک، وزن مخصوص، مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته استاتیکی و دینامیکی بتن را کاهش داده است. همچنین انعطاف پذیری بتن با افزودن ذرات لاستیک به مخلوط بتن افزایش یافته است. به علاوه در این تحقیق به کمک مدل جرم-فنر، معادله حرکت برای تیرهای بتنی حاوی ذرات لاستیک تایر ضایعاتی به دست آمده است.

واژه‌های کلیدی: بتن حاوی ذرات لاستیک تایر ضایعاتی، بار ضربه، مدول الاستیسیته دینامیکی، مدل جرم-فنر، بتن منعطف.

Static and Dynamic Properties of Concrete Contained Waste Tire Rubber

A. Sadrmomtazi

R. Zarshin Zanoosh

H. Babaei

Department of Civil Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran

Department of Civil Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran

Department of Mechanical Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran

Abstract

The behavior of concrete subjected to impact load, is different compared to the behavior under static loading. A test program was carried out to determine static and dynamic properties of rubberized concrete. In this study, waste tire rubber particles were replaced with fine aggregate in concrete mixture in 3 sizes, 0-1, 1-3 and 3-5 mm and in volume ratio of 0%, 10%, 20%, 30%, 40% and 50%. Static and dynamic tests are done with hydraulic and drop hammer machines. Results of compressive and flexural strength, velocity of ultrasonic wave, Static and dynamic modulus of elasticity, strain and Static and absorption energy of rubberized concrete are determined. The results indicated that: larger rubber particles in replacement of sand have better results than smaller sizes. Also increased in rubber content, decreased the unit weight, compressive strength and static and dynamic modulus of elasticity of rubberized concrete. Using rubber particles in concrete significantly increased the ductility and strain capacity of concrete. In addition in this study equation of impact test with using mass-spring modelling, was determined.

Keywords: Rubberized concrete, Impact loading, Dynamic modulus of elasticity, Mass-spring model, Ductile concrete.

نه تنها به سرعت بارگذرای بستگی دارد بلکه به خصوصیات فیزیکی و

مکانیکی مصالحی که سازه با آن ساخته شده است نیز وابسته است.

یکی از متداول‌ترین مصالح سازه‌ای بتن است. بتن یک ماده شکننده است و رفتار الاستوپلاستیک دارد. مقاومت، مد شکست و سرعت ترک خوردگی بتن تحت تاثیر سرعت بارگذاری است. با تغییر سرعت بارگذاری، شکست بتن نیز تغییر می کند (شکل ۱).

انواع محدوده سرعت کرنش برای بارگذاری‌های مختلف تحت نتایج آزمون‌هایی که توسط پری و بیسچاف [۲] انجام شده است در جدول ۱ آمده است. دستگاه‌های آزمایشگاهی مختلفی برای تولید مقیاس مختلف سرعت کرنش توسط محققین مورد استفاده قرار گرفته است، از جمله دستگاه آزمون هیدرولیکی برای تعیین مقاومت فشاری و کششی استاتیکی در محدوده سرعت کرنش 10^{-1} بر ثانیه، آزمون شارپی برای سرعت کرنش بالای 10^0 بر ثانیه [۳]، آزمون ضربه با سامانه وزنه پرتابی برای سرعت کرنش در محدوده سرعت 10^1 بر ثانیه

۱- مقدمه

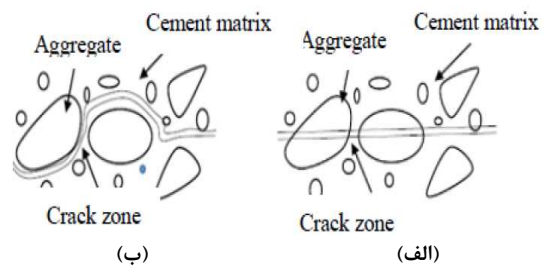
سازه‌ها علاوه بر این که تحت بارهای استاتیکی یا شبه استاتیکی قرار می‌گیرند ممکن است تحت بارهای دینامیکی نیز قرار گیرند. بارهای دینامیکی که به سازه وارد می‌شوند، همانند بار زلزله، باد، امواج دریا و برخورد وسایل نقلیه، از نظر مقدار، جهت و موقعیت نسبت به زمان تغییر می‌کنند، در نتیجه رفتار سازه تحت تاثیر این‌گونه از بارها همانند تغییر شکل‌ها، نیروهای داخلی و تنش‌ها وابسته به زمان خواهد بود. در چنین حالتی سازه رفتار منحصر به فردی نخواهد داشت، بلکه در هر لحظه از زمان، رفتار خاصی از خود نشان خواهد داد. بررسی رفتار دینامیکی سازه‌ها بسیار پیچیده و طولانی است، بنابراین روشی که بتوان سازه را به صورت استاتیکی تحلیل کرد و به جواب دینامیکی رسید می‌تواند مفید باشد. پاسخ سازه تحت بارگذاری‌های مختلف

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: sadrmomtazi@yahoo.com

تاریخ دریافت: ۹۵/۰۹/۰۱

تاریخ پذیرش: ۹۶/۱۰/۲۰

[۴]. آزمون میله فشار هاپکینسون برای سرعت‌های بالای 10^2 بر ثانیه [۵] و آزمون سامانه انفجاری برای سرعت بالای 10^3 بر ثانیه مورد استفاده قرار می‌گیرد.



شکل ۱- ترک در بتن، (الف) تحت بار دینامیکی، (ب) تحت بار استاتیکی [۱]

جدول ۱- سرعت کرنش در بارگذاری های مختلف

سرعت کرنش	انواع بارگذاری
10^{-8} - 10^{-7}	خزش
10^{-6} - 10^{-5}	شبه استاتیکی
10^{-4} - 10^{-3}	برخورد اتومبیل
10^{-2} - 10^{-1}	برخورد هواپیما
10^{-3} - 10^{-1}	زلزله
10^{-1} - 10^2	برخورد گلوله
10^2 - 10^3	انفجار

در این تحقیق برای تعیین رفتار بتن در برابر بارهای استاتیکی از آزمون هیدرولیکی و آزمون ضربه توسط سامانه وزنه پرتابی که تولید ضربه با سرعت پایین می‌کند، استفاده شده است.

تحقیقات زیادی در رابطه با بررسی رفتار بتن تحت بار ضربه به وسیله سامانه وزنه پرتابی انجام شده است. از جمله چاکاترا و باتاچاریا [۶] تیرهای بتنی حاوی ذرات ضایعاتی از بتن را تحت آزمون ضربه با سرعت پایین قرار دادند و بیان نمودند که، بار ضربه در یک زمان کوتاه اتفاق می‌افتد و یک فرایند پپیچیده است. همچنین پاسخ سازه تحت بارگذاری ضربه‌ای، نه تنها به انرژی ضربه بستگی دارد، بلکه به خصوصیات مکانیکی ماده و سختی اعضا نیز بستگی دارد.

محققین مختلف به منظور افزایش مقاومت ضربه‌ای بتن، مصالح مختلفی را به طرح اختلاط بتن اضافه کردند. از جمله، وانگ و همکارانش [۷] از الیاف پلی‌پروپیلن در مخلوط بتن استفاده کردند و وزنه‌ای به وزن $60/3$ کیلوگرم را از ارتفاع $1/5$ متر بر روی صفحات بتنی حاوی الیاف پلی‌پروپیلن پرتاب کردند. آن‌ها بیان کردند که، گرچه بتن توانایی کمی در برابر بارهای خمشی و جذب انرژی دارد ولی الیاف پلی‌پروپیلن مقاومت ضربه‌ای بتن را به دلیل افزایش مقاومت خمشی بهبود می‌بخشد.

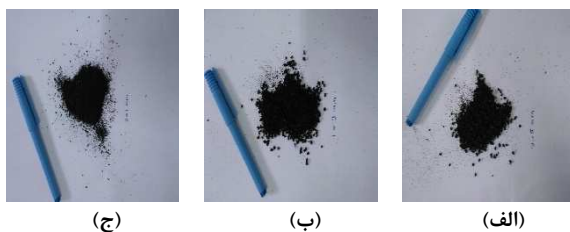
با توجه به تحقیقات انجام شده توسط محققین، پیشنهاد شده است که به منظور بدست آوردن بتنی با شکست نرم و آسیب‌دیدگی کمتر، از ذرات لاستیک تاپر ضایعاتی به صورت جانشین بخشی از سنگدانه استفاده شود. از جمله کرنز و همکارانش [۸] از ذرات لاستیک با اندازه بیشینه 20 میلی‌متر به عنوان درشت دانه در بتن استفاده کردند و باوو

و بریتو [۹] از ذرات لاستیک به عنوان ریزدانه در بتن استفاده کردند. آن‌ها بیان کردند که، استفاده از ذرات لاستیک در ماتریس بتن، مدول الاستیسیته بتن را افزایش می‌دهد اما مقاومت فشاری آن را کاهش می‌دهد. همچنین خالو و همکارانش [۱۰] انعطاف پذیری بتن حاوی ذرات لاستیک را به عنوان جانشین حجمی سنگدانه در بتن بررسی کردند آن‌ها بیان کردند که افزودن ذرات لاستیک به بتن، انعطاف پذیری بتن را افزایش می‌دهد. رافائل و همکارانش [۱۱] تحت آزمون-های که بر روی بتن حاوی ذرات لاستیک انجام دادند، به این نتیجه رسیدند که، مقاومت بتن حاوی ذرات لاستیک تحت تاثیر نوع و اندازه ذرات لاستیک می‌باشد. علی‌ابو و همکارانش [۱۲] به این نتیجه رسیدند رسانایی گرمایی در بتن حاوی ذرات لاستیک کاهش می‌یابد و جانشینی ۶۹ تا ۱۰۰ درصد از ریزدانه‌ها با ذرات لاستیک در بتن موجب جذب قابل توجهی از امواج صوتی در بتن می‌شود. آن‌ها همچنین بیان کردند که تعداد ضرباتی که برای ایجاد ترک در بتن لازم است با افزایش ذرات لاستیک افزایش می‌یابد و بتن حاوی ذرات لاستیک، قابلیت تغییر شکل بیشتری نسبت به بتن عادی دارد.

در بیشتر تحقیقاتی که در گذشته انجام گرفت، اثر ضربه توسط آزمون‌های ضربه بر روی بتن های عادی در نظر گرفته شده است، نوآوری این تحقیق در این است که، علاوه بر این که رفتار استاتیکی از جمله مقاومت فشاری، وزن مخصوص، مدول الاستیسیته استاتیکی برای بتن حاوی ذرات لاستیک تاپر ضایعاتی به عنوان جانشین حجمی ریزدانه، توسط آزمون‌های مختلف تعیین شد، رفتار دینامیکی بتن مذکور، از جمله مدول الاستیسیته دینامیکی، کرنش دینامیکی و جذب انرژی، توسط ضربه توسط وزنه پرتابی تعیین شد. همچنین به منظور آنالیز تیرهای بتنی حاوی ذرات لاستیک تاپر ضایعاتی، تحت بارگذاری-های مختلف از مدل جرم-فنر [۱۳] استفاده شد و معادله حرکت تیر تحت بارگذاری ضربه‌ای به دست آمد.

۲- مصالح مورد نیاز

در این تحقیق از سیمان تیپ ۱ ایلام استفاده شده است. همچنین ۰، ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۰ درصد ذرات لاستیک تاپر ضایعاتی (شکل ۲) در اندازه ۰-۱، ۱-۳، ۳-۵ و ۳-۵ میلی‌متر، با وزن مخصوص در حدود ۵۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب که ترکیبات آن مطابق با جدول ۲ می‌باشد، به صورت جانشین حجمی ریزدانه در بتن استفاده شده است. طرح اختلاط بتن حاوی ذرات لاستیک در جدول ۳ آمده است.

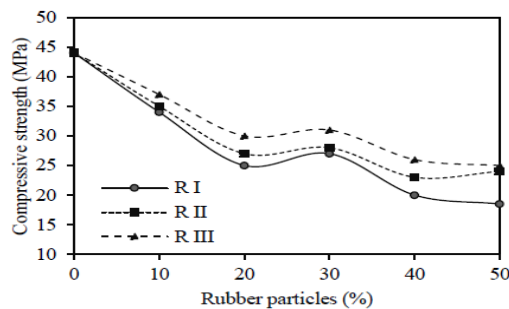


شکل ۲- ذرات لاستیک تاپر ضایعاتی در اندازه (الف) ۰-۱ میلی‌متر (ب) ۱-۳ میلی‌متر (ج) ۳-۵ میلی‌متر

۴-۱- مقاومت فشاری

همانطور که در شکل ۳ نشان داده شده است. با افزودن ذرات لاستیک به مخلوط بتن، مقاومت فشاری بتن از ۴۴ مگاپاسکال برای بتن نرمال به ۱۸/۵، ۲۴ و ۲۵ مگاپاسکال برای بتن حاوی ذرات لاستیک در اندازه‌های ۰-۱، ۳-۱ و ۵-۳ میلیمتر کاهش پیدا کرده است. مطابق با نتایج به دست آمده مشاهده شده است که بتن حاوی ذرات لاستیک در اندازه کوچکتر، کاهش مقاومت فشاری بیشتری را از خود نشان داده‌اند. دلیل کاهش مقاومت فشاری بتن را می‌توان اینگونه بیان نمود که، به علت این که ذرات لاستیک خیلی نرم‌تر از خمیر سیمان سخت شده هستند، در هنگام بارگذاری ترک به سرعت از اطراف ذرات لاستیک در مخلوط بتن شروع می‌شود و در بتن گسترش یافته و در نهایت سبب تسریع در شکست بتن می‌گردد. همچنین ذرات لاستیک چسبندگی چندانی با خمیر سیمان در مخلوط بتن ندارند، در نتیجه محیط پیوسته و یکپارچه‌ای در برابر بار وارده وجود ندارد و به دلیل ناهماهنگی و ناپیوستگی مخلوط بتن تنش‌های وارده به صورت یکنواخت توزیع نمی‌شوند و ترک‌ها به سرعت در مرز خمیر سیمان ایجاد می‌گردند و موجب افزایش سرعت شکست در بتن می‌شوند. علت تغییر شیب در شکل ۳ را می‌توان اینگونه توجیح کرد که، به دلیل اینکه افزودن ذرات لاستیک به مخلوط بتن، موجب افزایش هوای محبوس در بتن شده و به دلیل خصوصیات آب‌گریزی ذرات لاستیک، ذرات دلاستیک با دفع آب در مخلوط بتن، موجب جذب هوای بیشتر شده در نتیجه با افزایش هوا در بتن، مقاومت فشاری آن کاهش یافته است.

لازم به ذکر است، در بتن حاوی ذرات لاستیک تایلر ضایعاتی، گرچه مقاومت فشاری نسبت به بتن نرمال کاهش پیدا می‌کند ولی شکست بتن نرم‌تر شده و در حین شکست تکه‌های بتن همانند بتن نرمال، به اطراف پرتاب نمی‌شوند. در واقع تحت بارهای وارده، در بتن حاوی ذرات لاستیک تایلر ضایعاتی، ذرات لاستیک همانند مرکز تنش عمل می‌کنند و روی توقف ترک و اتلاف انرژی تأثیر می‌گذارند، در نتیجه سرعت گسترش ترک را پایین می‌آورند. همانطور که در شکل نشان داده شده است، در اثر اعمال بار، نمونه بتنی حاوی ذرات لاستیک دارای شکست نرم‌تر و آسیب‌دیدگی کمتر می‌باشد. همچنین در رابطه با تأثیر اندازه ذرات لاستیک بر مقاومت فشاری بتن می‌توان بیان نمود که با افزایش اندازه ذرات لاستیک در مخلوط بتن، مقاومت فشاری بتن حاوی ذرات لاستیک افزایش می‌یابد.



شکل ۳- مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن حاوی ذرات لاستیک تایلر ضایعاتی

جدول ۲- تغییرات مواد تشکیل دهنده لاستیک تایلر اتومبیل

ترکیبات ضایعاتی اتومبیل	مواد تشکیل دهنده لاستیک تایلر
لاستیک	۵۴
کربن سیاه	۲۹
مواد خام	۲
روی اکسید شده	۱
گوگرد	۱
افزاینده	۱۳

جدول ۳- طرح اختلاط بتن حاوی ذرات لاستیک تایلر ضایعاتی

درصد وزنی (kg/m ³)	ترکیبات	نوع بتن
۴۶۲	سیمان	NC
		R%
۱۸۵	آب	NC
		R%
۱۰۷۲	درشت‌دانه	NC
		R%
۶۶۱	ریزدانه	NC
		R%
۰	ذرات لاستیک	NC
		R10
		R20
		R30
		R40
		R50

۳- اندازه نمونه‌ها

اندازه نمونه‌های بتنی تحت آزمون‌های مختلف در جدول ۴ آمده است.

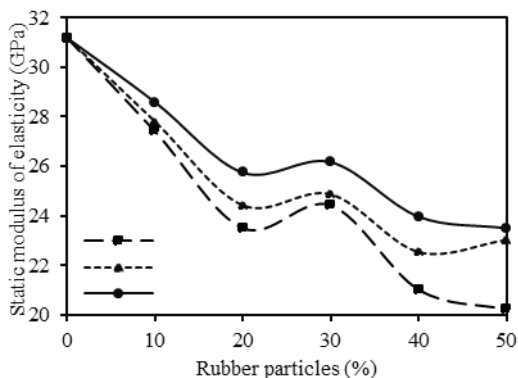
جدول ۴- اندازه نمونه‌های بتنی

اندازه نمونه (mm)	آزمون
۱۰۰×۱۰۰×۱۰۰	مقاومت فشاری
۱۰۰×۱۰۰×۱۰۰	وزن مخصوص
۱۰۰×۱۰۰×۱۰۰	امواج التراسونیک
۳۰۰×۷۰×۷۰	مقاومت خمشی
۱۲۰۰×۱۶۰×۱۰۰	ضربه

۴- خصوصیات فیزیکی و مکانیکی

در این تحقیق خصوصیات فیزیکی و مکانیکی، شامل مقاومت فشاری بتن حاوی ذرات لاستیک، مطابق با استاندارد B.S11881:Part116، وزن مخصوص بتن حاوی ذرات لاستیک مطابق با استاندارد ASTM C1240 و سرعت عبور امواج التراسونیک بتن حاوی ذرات لاستیک مطابق با استاندارد ASTM C597 به دست آمده است.

$$E_c = 4800 \sqrt{f_c} \quad (1)$$



شکل ۶- مدول الاستیسیته استاتیکی بتن برحسب درصد ذرات لاستیک تاثیر ضایعاتی

۴-۳-۲- مدول الاستیسیته دینامیکی

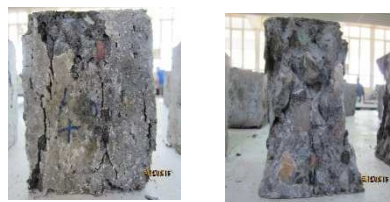
در رابطه با مدول الاستیسیته بتن می‌توان ذکر کرد که، مدول الاستیسیته دینامیکی بتن از مدول الاستیسیته استاتیکی آن بزرگتر است [۱۶]. زمانی که بارهای ضربه‌ای بر سازه بتنی وارد می‌شود، بهتر است که از مدول الاستیسیته دینامیکی استفاده شود. مدول الاستیسیته دینامیکی بتن را می‌توان به کمک دستگاه تراسونیک (شکل ۷) به دست آورد بدین صورت که بوسیله دستگاه تراسونیک، مدت زمان عبور امواج صوتی در جهت طولی نمونه‌های بتنی اندازه-گیری می‌شود و با توجه به ابعاد نمونه، سرعت عبور امواج تراسونیک مطابق با معادله (۲) به دست می‌آید.



شکل ۷- دستگاه آزمون تراسونیک

$$C_t = \frac{L}{t} \quad (2)$$

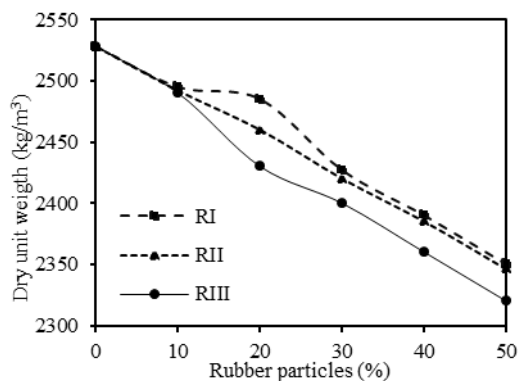
در آزمون تراسونیک، امواج تراسونیک از بین حفره‌های هوا عبور می‌کنند و در طول ماتریس بتن گسترش می‌یابند. مدول الاستیسیته دینامیکی را می‌توان با کمک سرعت عبور امواج تراسونیک و با توجه به فرمول‌های (۳)، (۴) و (۵) [۱۷] به دست آورد. لازم به ذکر است که، مدول الاستیسیته دینامیکی با وزن مخصوص و سرعت عبور امواج تراسونیک از داخل نمونه‌های بتنی ارتباط دارد. همانطور که در شکل ۸ نشان داده شده است، با افزودن ذرات لاستیک به مخلوط بتن، مدول الاستیسیته دینامیکی بتن از ۵۵/۱۵ مگاپاسکال برای بتن نرمال به ۳۵/۸۳، ۳۵/۵۲ و ۳۳/۱۵ مگاپاسکال برای بتن حاوی ذرات لاستیک در اندازه ۱-، ۳- و ۵- میلیمتر کاهش یافته است. مطابق با نتایج به دست آمده، کاهش مدول الاستیسیته در نمونه های بتنی حاوی ذرات لاستیک در اندازه بزرگتر بیشتر است. در نتیجه این آزمون، می‌توان بیان نمود که، توانایی بتن



شکل ۴- شکست بتن تحت آزمون فشاری در سن ۲۸ روز، (الف) بتن نرمال (ب) بتن حاوی ذرات لاستیک

۴-۲- وزن مخصوص

با افزودن ذرات لاستیک به مخلوط بتن، وزن مخصوص نمونه‌های بتنی، از ۲۵۲۸ کیلوگرم بر مترمکعب در بتن نرمال به ۲۳۴۶ و ۲۳۵۰ و ۲۳۲۰ کیلوگرم بر مترمکعب در بتن حاوی ذرات لاستیک در اندازه ۱-، ۳- و ۵- میلیمتر کاهش پیدا کرده است. علت تغییر شیب در شکل ۵ را می‌توان اینگونه توجیح کرد که، با افزودن ذرات لاستیک به مخلوط بتن، چون وزن مخصوص ذرات لاستیک که به عنوان جانشین ریزدانه در بتن استفاده شده‌اند کمتر از وزن مخصوص ریزدانه می‌باشد، وزن مخصوص بتن حاوی ذرات لاستیک تاثیر ضایعاتی با افزایش درصد جانشینی ذرات لاستیک به جای ریزدانه کاهش یافته است. مطابق با نتایج به دست آمده مشاهده شده است که بتن حاوی ذرات لاستیک در اندازه بزرگتر، سبک تر می‌باشد. همچنین دلیل کاهش وزن مخصوص نمونه‌ها را نیز می‌توان این‌گونه بیان کرد که، لاستیک اضافه شده به بتن می‌تواند با دفع آب، هوا را جذب کند و موجب افزایش هوای محبوس شده در بتن و کاهش وزن مخصوص بتن شود.



شکل ۵- چگالی بتن برحسب درصد ذرات لاستیک تاثیر ضایعاتی

۴-۳-۲- مدول الاستیسیته

۴-۳-۱- مدول الاستیسیته استاتیکی

در این تحقیق مدول الاستیسیته استاتیکی بتن از معادله (۱) [۱۴]، ۱۵ تخمین زده شده است. همانطور که در شکل ۶ نشان داده شده است، با افزودن ذرات لاستیک به مخلوط بتن، مدول الاستیسیته استاتیکی بتن با توجه به کاهش مقاومت فشاری، کاهش می‌یابد.



شکل ۱۰- دستگاه آزمون ضربه توسط ضربه رها شونده

۴-۴-۱- کرنش استاتیکی

به منظور به دست آوردن کرنش استاتیکی بتن حاوی ذرات لاستیک تایر ضایعاتی، ابتدا مقاومت خمشی نمونه های بتنی به دست آمده است. مطابق با نتایج حاصل از آزمون مقاومت خمشی (شکل ۱۱)، با افزودن ذرات لاستیک به مخلوط بتن، در ۱۰ درصد جانشینی ذرات لاستیک، ابتدا مقاومت خمشی از ۱۵/۸۳ برای بتن نرمال به ۱۳/۶، ۱۳/۸۱، ۱۳/۹۳ برای بتن حاوی ۱۰ درصد ذرات لاستیک به ترتیب در اندازه ۰-۱، ۱-۳، ۳-۵ میلیمتر کاهش یافته و سپس در بتن حاوی ۴۰ درصد ذرات لاستیک در اندازه ۰-۱، ۱-۳، ۳-۵ میلیمتر بیشینه مقاومت خمشی به ترتیب به مقدار ۱۵/۳۳، ۱۵/۵۲ و ۱۵/۹۳ مگاپاسکال افزایش یافته، و دوباره در بتن حاوی ۵۰ درصد ذرات لاستیک به ترتیب در اندازه ۰-۱، ۱-۳، ۳-۵ میلیمتر به ۱۳/۱، ۱۳/۲۸ و ۱۳/۲۸ مگاپاسکال کاهش یافته است. علت تغییر تقعر در شکل ۱۱ را می توان اینگونه بیان نمود که، در هنگام اعمال بارهای خمشی به نمونه ها، در یک طرف تار خنثی در نمونه بتن حاوی ذرات لاستیک، تنش کششی و در طرف دیگر تنش فشاری ایجاد شده تا با ایجاد کوپل نیروهای کششی و فشاری، ممان خمشی وارده را خنثی نمایند. به علت کم بودن مقاومت کششی بتن در مقایسه با مقاومت فشاری آن در تنش های پایین تر و قبل از این که بتن در ناحیه فشاری به مقاومت نهایی خود برسد، خرابی روی می دهد. در نتیجه مهمترین عامل کاهش مقاومت خمشی، عدم چسبندگی خوب بین لاستیک و خمیر سیمان است که این چسبندگی، در بتن حاوی درصد های مختلف ذرات لاستیک متفاوت است.

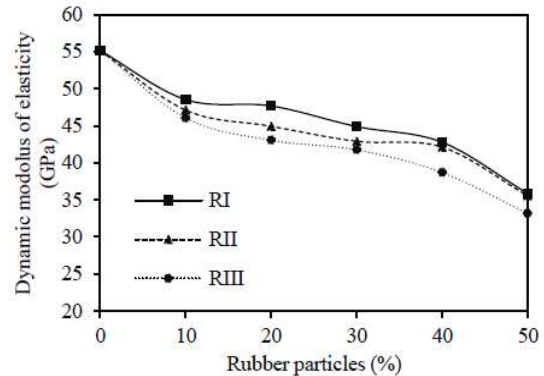
همچنین تحت آزمون مقاومت خمشی، میزان کرنش استاتیکی در تیرهای بتنی حاوی ذرات لاستیک تایر ضایعاتی در شکل ۱۲ آمده است. نتایج حاکی از آن است که، کرنش استاتیکی یا به عبارت دیگر شبه استاتیکی با افزودن ذرات لاستیک به مخلوط بتن، کاهش می یابد، ولی در نمونه حاوی ۳۰ درصد جانشینی ذرات لاستیک تایر ضایعاتی در هر سه اندازه ذرات لاستیک، افزایش کرنش مشاهده شده است. علت تغییر تقعر در شکل ۱۲ را می توان اینگونه بیان کرد که، ابتدا به دلیل

در جذب شدت صوت و لرزش، با افزودن ذرات لاستیک و استفاده از اندازه بزرگتر از ذرات لاستیک به عنوان ریزدانه افزایش می یابد. در نتیجه بتن حاوی ذرات لاستیک را می توان یک جاذب صوت نیز نامید.

$$E_d = \frac{(1 + \vartheta)(1 - 2\vartheta)}{(1 - \vartheta)^2} \rho C_1^2 \quad (3)$$

$$\frac{(1 + \vartheta)(1 - 2\vartheta)}{(1 - \vartheta)^2} \approx 1 \quad (4)$$

$$E_d \approx \rho C_1^2 \quad (5)$$



شکل ۸- مدول الاستیسیته دینامیکی بتن برحسب درصد ذرات لاستیک تایر ضایعاتی

۴-۴-۲- کرنش

در این تحقیق به منظور به دست آوردن مقدار کرنش بتن تحت بارهای استاتیکی، از آزمون مقاومت خمشی مطابق با استاندارد ASTM C78 و توسط دستگاه اندازه گیری مقاومت خمشی که در شکل ۹ نشان داده شده، استفاده شده است. همچنین برای به دست آوردن کرنش، تحت بارهای دینامیکی همانند ضربه، از آزمون ضربه با سرعت پایین که توسط دستگاه رها کننده وزنه که در شکل ۱۰ نشان داده شده، استفاده شده است. این دستگاه قابلیت رها کردن وزنه ای که توسط نیروی مغناطیسی نگاه داشته شده است را، از ارتفاع حداکثر ۳ متر دارا می باشد.



شکل ۹- دستگاه آزمون مقاومت خمشی



شکل ۱۳- شکست تیر بتنی حاوی ذرات لاستیک تحت آزمون ضربه با وزنه رها شونده

نتایج حاصل از اندازه گیری کرنش توسط دیتالاگر کرنش ثبت شده است. این نتایج توسط ۳ کرنش سنج تعبیه شده بر روی سطح تیرهای بتنی حاوی ذرات لاستیک تایر ضایعاتی بدست آمده است که دو کرنش سنج (یکی از دو کرنش سنج، به منظور تبادل حرارتی بین محیط، کرنش سنج نول در نظر گرفته شده است). در فاصله ۱۰ سانتیمتری از تکیه‌گاه و یک کرنش سنج در وسط تیر یعنی نقطه برخورد وزنه به تیر، توسط دستگاه اعمال ضربه توسط وزنه رها شونده (شکل ۱۴) به دست آمده است.



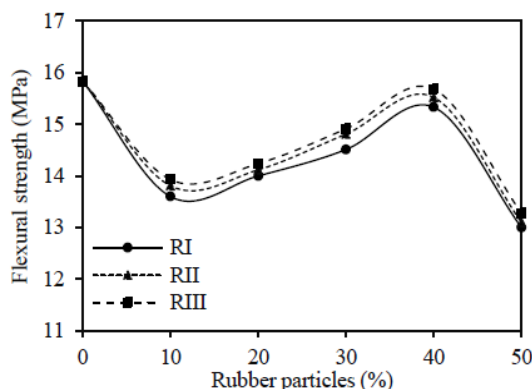
شکل ۱۴- کرنش سنج چسبیده بر سطح بتن حاوی ذرات لاستیک تایر ضایعاتی در فاصله ۱۰ سانتیمتری از تکیه‌گاه

نتایج حاکی از آن است که، افزودن ذرات لاستیک به نمونه بتنی موجب افزایش کرنش و انعطاف پذیری تیر بتنی تحت بارهای دینامیکی می شود. همچنین همانطور که در شکل ۱۵ نشان داده شده است، در درصد جانشینی ۳۰ درصد، بیشترین کرنش به مقدار ۳۶، ۳۶/۵ و ۳۷/۷۱ برای نمونه های بتنی حاوی ذرات لاستیک به ترتیب در اندازه های ۰-۱، ۱-۳، ۳-۵ و ۳-۵ میلیمتر مشاهده شده است. با توجه به ناچیز بودن مقدار اصطکاک، مطابق با فرمول (۶)، (۷) و (۸) و مطابق با اصل پایستگی انرژی، سرعت پرتاب در زمان اعمال ضربه، در حدود ۳/۱۳ متر بر ثانیه به دست آمده است.

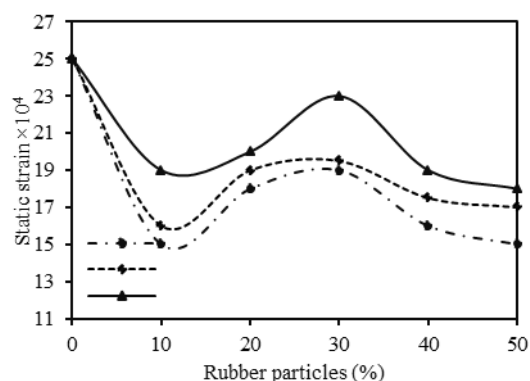
$$\Delta E = 0 \quad (6)$$

$$gh = \frac{1}{2} m_1 v_1^2 + m_2 \quad (7)$$

افزودن ذرات لاستیک به عنوان جانشین ریزدانه در مخلوط بتن، موجب کاهش چسبندگی در بتن شده است و در درصد بهینه ۳۰، به دلیل اینکه مدول الاستیسیته لاستیک کمتر از مدول الاستیسیته ریزدانه می باشد، انعطاف پذیری و در نتیجه کرنش استاتیکی بتن افزایش یافته است و دوباره با افزودن مقدار بیشتر از ذرات لاستیک به دلیل کاهش چسبندگی در مخلوط بتن، با کاهش کرنش در نمودار مشاهده شده است.



شکل ۱۱- مقاومت خمشی تیر بتنی برحسب درصد ذرات لاستیک تایر ضایعاتی

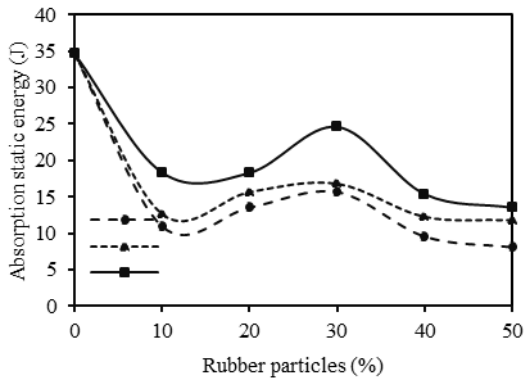


شکل ۱۲- کرنش استاتیکی بتن برحسب درصد ذرات لاستیک تایر ضایعاتی تحت آزمون خمشی

۴-۴-۲- کرنش دینامیکی

همانطور که قبلاً گفته شد، به منظور به دست آوردن کرنش دینامیکی تیرهای بتنی حاوی درصدهای مختلف ذرات لاستیک تایر ضایعاتی، از آزمون وزنه پرتابی استفاده شده است.

در این تحقیق، وزنه ۶۷/۴ کیلوگرمی از ارتفاع ۰/۵ متری رها شده و به وسط تیر بتنی حاوی ذرات لاستیک تایر ضایعاتی، برخورد کرده است (شکل ۱۳)، خطای ناشی از اسلکاک ۵ درصد برآورد شده است که از آن صرف نظر شده است.

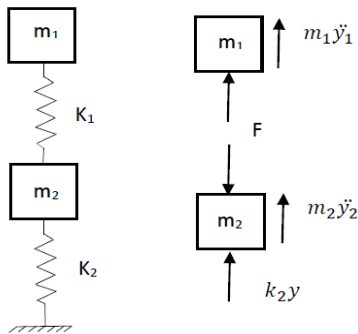


شکل ۱۷- میزان انرژی استاتیکی جذب شده بر حسب درصد ذرات لاستیک تایر ضایعاتی

۴-۵-۲- میزان جذب انرژی دینامیکی

به منظور به دست آوردن مقدار انرژی جذب شده توسط تیرهای بتنی حاوی ذرات لاستیک و با در نظر گرفتن مدول الاستیسیته دینامیکی به جای مدول الاستیسیته استاتیکی از فرمول (۱۲)، (۱۳)، (۱۴)، (۱۵)، (۱۶) و (۱۷) استفاده شده است. در این شرایط مدل جرم - فنر (شکل ۱۸) برای جسم تحت ضربه در نظر گرفته شده است. در این مدل جسم ضربه زننده و تیر همانند دو جرم متمرکز می باشند که در بین دو فنر قرار گرفته اند.

مقدار انرژی جذب شده توسط تیرهای بتنی حاوی ذرات لاستیک در شکل ۱۹ آمده است. با افزودن ذرات لاستیک به مخلوط بتن، مقدار جذب انرژی تحت بارگذاری دینامیکی در نمونه‌های تیر بتنی حاوی ۳۰ درصد ذرات لاستیک بیشترین مقدار می باشد.



شکل ۱۸- مدل جرم-فنر برای آنالیز تیرهای بتنی تحت ضربه

$$K_1 = \frac{48E_1 I}{L^3} \quad (12)$$

$$I = \frac{1}{12} b d^3 \quad (13)$$

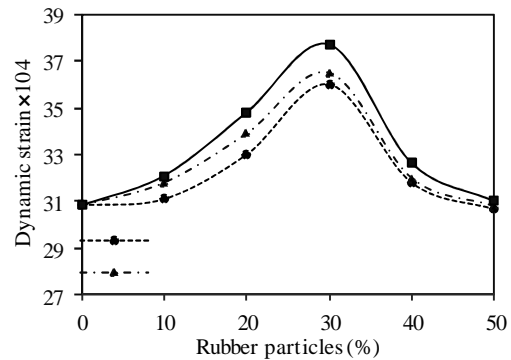
$$E_1 \approx \rho C_1^2 \quad (14)$$

$$\Delta U_1 = \frac{1}{2} K_1 \Delta y_1^2 \quad (15)$$

$$\Delta x \approx \Delta y \quad (16)$$

$$\Delta x = \varepsilon \times L \quad (17)$$

$$v_1 = \sqrt{2gh} \quad (8)$$



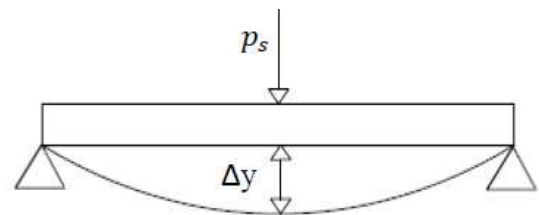
شکل ۱۵- کرنش دینامیکی در تیرهای بتنی بر حسب درصد ذرات لاستیک تایر ضایعاتی تحت ضربه

۴-۵-۴- میزان جذب انرژی

۴-۵-۱- میزان جذب انرژی استاتیکی

با توجه به تفاوت کرنش برای تیرهای بتنی تحت بارهای استاتیکی و دینامیکی، میزان جذب انرژی تیر در دو حالت متفاوت خواهد بود. به منظور آنالیز تیر و به دست آوردن مقدار انرژی جذب شده در حالتی که تیر بتنی حاوی ذرات لاستیک در معرض بارگذاری استاتیکی قرار گرفته است (شکل ۱۶)، از فرمول (۹)، (۱۰) و (۱۱) استفاده شده است.

نتایج حاصل از برآورد جذب انرژی توسط تیر بتنی حاوی ذرات لاستیک که تحت بارگذاری استاتیکی قرار گرفته اند، در شکل ۱۷ نشان داده شده است. نتایج حاکی از این است که، هر چه ذرات لاستیک بزرگتر باشند، میزان جذب انرژی بیشتر است و این میزان جذب انرژی در درصد جانشینی ۳۰ درصد، بیشترین مقدار را در نمونه‌های بتنی حاوی ذرات لاستیک دارا می‌باشد.



شکل ۱۶- تیر تحت بار استاتیکی

$$K_2 = \frac{48E_2 I}{L^3} \quad (9)$$

$$\Delta y_2 = \frac{F_2}{K_2} \quad (10)$$

$$\Delta U_2 = \frac{1}{2} K_2 \Delta y_2^2 \quad (11)$$

همچنین معادله حرکت برای تیر بتنی که تحت بار ضربه در وسط خود قرار گرفته است، به کمک معادلات (۲۵)، (۲۶)، (۲۷)، (۲۸)، (۲۹)، (۳۰) و (۳۱) به دست آمده و سرانجام به صورت معادله (۳۲) خواهد بود.

$$m_z \ddot{y}_z(t) + K_z y_z(t) = F_z \quad (25)$$

$$y_z(t=0) = 0 \quad (26)$$

$$\dot{y}_z(t=0) = v_z \quad (27)$$

$$F_z = F_0 \sin(42.19t) \quad (28)$$

$$F_0 = 8901.53 \quad (29)$$

$$w_z = \sqrt{\frac{K_z}{m_z}} \quad (30)$$

$$m_z = \rho V = 0.0192 \rho \quad (31)$$

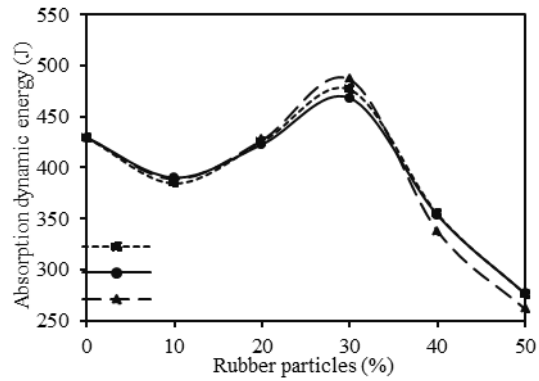
$$\ddot{y}_z(t) + w_z^2 y_z(t) = \frac{463621.25}{\rho} \sin(42.19t) \quad (32)$$

مشاهده شده است که، معادله حرکت تیر تحت بارگذاری ضربه در وسط، در سیستم جرم-فنر وابسته به خصوصیات فیزیکی و مکانیکی تیر تحت ضربه توسط سامانه رها کننده وزنه از جمله چگالی آن می-باشد.

۶- نتیجه گیری

در این مقاله، خصوصیات بتن، حاوی سه اندازه ۱-، ۳- و ۵- میلیمتر از ذرات لاستیک به صورت جانشین ۰ تا ۵۰ درصد از ریزدانه، تحت آزمون‌های استاتیکی و دینامیکی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاکی از آن است که، وقتی که ذرات لاستیک به مخلوط بتن اضافه می شود، گرچه مقاومت فشاری و خمشی بتن کاهش می‌یابد، ولی بتن سبک‌تر شده و مدول الاستیسیته استاتیکی و دینامیکی آن کاهش می‌یابد. در نتیجه انعطاف پذیری بتن مذکور افزایش یافته است. در رابطه با میزان کرنش، مقایسه نتایج آزمون با نتایج تحقیقاتی که توسط هرناندز و همکارانش [۱۹] بر روی بتن حاوی ۳/۵ و ۵ درصد از الیاف لاستیک تاثیر ضایعاتی به طول ۰/۸۵ تا ۲/۱۵ سانتیمتر تحت بارگذاری استاتیکی و دینامیکی انجام دادند حاکی از آن است که میزان کرنش بتن با میزان جذب انرژی و شکنندگی بتن رابطه مستقیم دارد. گرچه آن‌ها بیان کردند که بتن حاوی ۳/۵ درصد از الیاف لاستیکی کرنش بیشتری را از بتن حاوی درصد بیشتری از لاستیک نشان داده است، اما در این تحقیق، چه در حالت بارگذاری استاتیکی و چه در حالت بارگذاری دینامیکی در بتن حاوی ذرات لاستیک، در درصد جانشینی بهینه ۳۰، بیشترین کرنش در بتن حاوی ذرات لاستیک مشاهده شده است. در نتیجه این بتن کمترین خسارت را در زمانی که تحت بارگذاری‌های مختلف قرار می‌گیرد، خواهد داشت. در بررسی میزان جذب انرژی بتن مذکور، چه در حالت بارگذاری استاتیکی و چه در حالت بارگذاری دینامیکی نموداری مشابه با کرنش به دست آمده است و در ۳۰ درصد جانشینی ذرات لاستیک به جای ریزدانه، بیشترین جذب انرژی توسط بتن مشاهده شده است.

در رابطه با اندازه ذرات لاستیک جانشین ریزدانه در مخلوط بتن لازم به ذکر است که، بتن حاوی ذرات لاستیک در اندازه بزرگتر، نتایج بهتری از خود نشان داده است.

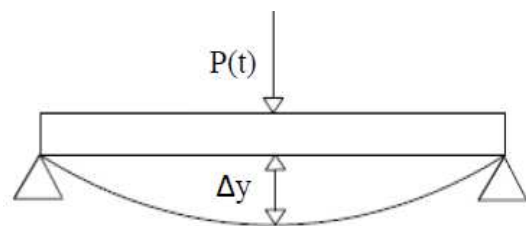


شکل ۱۹- میزان انرژی دینامیکی جذب شده بر حسب درصد ذرات لاستیک تاثیر ضایعاتی

مقایسه میزان انرژی در هر دو حالت استاتیکی و دینامیکی حاکی از آن است که، بتن حاوی ۳۰ درصد ذرات لاستیک در اندازه ۳-۵ میلیمتر به عنوان ریزدانه، بیشترین مقدار جذب انرژی را در دو حالت بارگذاری استاتیکی و دینامیکی دارا می باشد.

۵- معادله حرکت دینامیکی تیرهای بتنی

نیروی وارد شده بر تیر بتنی حاوی ذرات لاستیک، تحت بارگذاری دینامیکی همانند ضربه توسط سامانه پرتابی و مطابق با مدل جرم - فنر را می‌توان توسط معادلات (۱۸)، (۱۹)، (۲۰)، (۲۱)، (۲۲) و (۲۳) به دست آورد. لازم به ذکر است، در معادله (۱۹)، بر اساس تئوری ضربه هر تیر، سختی در فنر مدل شده بین وزنه ضربه زننده و تیر بتنی ۱۲۰۰۰۰ کیلو نیوتن بر متر فرض شده است [۱۸]. با جایگذاری مقدار جرم، سختی و فرکانس زاویه ای نهایتاً می‌توان به معادله (۲۴) برای برآورد نیرویی که به تیر بتنی حاوی ذرات لاستیک وارد می‌شود، رسید. مشاهده می‌شود که این نیرو وابسته به زمان می‌باشد.



شکل ۲۰- تیر تحت بار دینامیکی وابسته به زمان

$$m_1 \ddot{y}_1(t) + F_1 = 0 \quad (18)$$

$$F = K_z y_z(t) \quad (19)$$

$$w = \sqrt{\frac{K_z}{m_z}} \quad (20)$$

$$\ddot{y}_1 + w_z^2 y_1 = 0 \quad (21)$$

$$y_1(t) = \frac{v_1}{w_z} \sin(w_z t) \quad (22)$$

$$F_1 = v_1 \sqrt{K_z m_z} \sin(w_z t) \quad (23)$$

$$F_1 = 8901.53 \sin(42.19t) \quad (24)$$

دامنه بیشینه نیروی تولید شده در فرایند ضربه (MPa)
 شتاب جاذبه زمین ($m\ s^{-2}$)
 ارتفاع پرتاب وزنه پرتابی (m)
 ممان اینرسی مقطع تیر بتنی (m^4)
 سختی فنر فرض شده بین وزنه پرتابی و تیر بتنی (Nm^{-1})
 سختی تیر بتنی (Nm^{-1})
 سختی استاتیکی تیر بتنی (Nm^{-1})
 طول تیر بتنی (m)
 جرم وزنه رها شونده (kg)
 جرم تیر بتنی (kg)
 بتن نرمال
 بار استاتیکی (N)
 بار دینامیکی (N)
 بتن حاوی درصدی از ذرات لاستیک (%)
 بتن حاوی ذرات لاستیک در اندازه ۰-۱ میلیمتر (%)
 بتن حاوی ذرات لاستیک در اندازه ۱-۳ میلیمتر (%)
 بتن حاوی ذرات لاستیک در اندازه ۳-۵ میلیمتر (%)
 بتن حاوی ۱۰ درصد ذرات لاستیک (%)
 بتن حاوی ۲۰ درصد ذرات لاستیک (%)
 بتن حاوی ۳۰ درصد ذرات لاستیک (%)
 بتن حاوی ۴۰ درصد ذرات لاستیک (%)
 بتن حاوی ۵۰ درصد ذرات لاستیک (%)
 زمان (t)
 سرعت وزنه پرتابی در زمان برخورد با تیر بتنی ($m\ s^{-1}$)
 سرعت تیر بتنی در فرایند ضربه ($m\ s^{-1}$)
 حجم تیر بتنی (m^3)
 فرکانس زاویه ای وزنه پرتابی در حین ضربه ($rad\ s^{-1}$)
 فرکانس زاویه ای تیر بتنی در فرایند ضربه ($rad\ s^{-1}$)
 جابجایی وزنه پرتابی در حین ضربه (m)
 شتاب وزنه پرتابی در حین ضربه ($m\ s^{-2}$)
 جابجایی تیر بتنی در فرایند ضربه (m)
 سرعت تیر بتنی در فرایند ضربه ($m\ s^{-1}$)
 شتاب تیر بتنی در فرایند ضربه ($m\ s^{-2}$)

علائم یونانی


اختلاف انرژی (J)
 انرژی جذب شده توسط تیر بتنی در حالت استاتیکی (J)
 انرژی جذب شده توسط تیر بتنی در حالت دینامیکی (J)
 تغییر مکان افقی تیر (m)


F_c در مقایسه نتایج به دست آمده در این تحقیق با نتایج به دست آمده توسط محققینی که بتن حاوی ذرات لاستیک را تحت آزمون ضربه قرار داده‌اند می‌توان اینگونه بیان نمود که، مقدار بهینه از ذرات لاستیک در آزمون مقاومت، ۳۰ درصد به دست آمد که با نتایج به دست آمده توسط اتنن و همکارانش [۲۰] که ذرات لاستیک را جانشین ۲۰، ۴۰، ۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ درصد از ریزدانه در بتن کردند و درصد بهینه را بین ۲۰ تا ۴۰ درصد بوده هماهنگی داشته است. گرچه آن‌ها بتن حاوی ۶۰ درصد از ذرات لاستیک را در فرایند آزمون ضربه با وزنه رها شونده به وزن ۱۴/۷ کیلوگرم، سرعت ۳/۸۷ متر بر ثانیه و انرژی ضربه ۱۰۹/۸ ژول بر روی نمونه استوانه به اندازه ۲۰×۱۰ سانتیمتر انجام شده بود، ضربه پذیرتر از بقیه نمونه‌ها معرفی کردند، در این تحقیق بتن حاوی ۳۰ درصد از ذرات لاستیک قابلیت ضربه‌پذیری بیشتری با توجه به نمودار جذب انرژی از خود نشان داده است.
 همچنین در رابطه با اندازه ذرات لاستیک، مقایسه نتایج به دست آمده با نتایج محققین دیگر از جمله فنگ لیو و همکارانش [۵] که بتن حاوی ذرات لاستیک در سه اندازه ۰/۱۷۸، ۱/۱۱ و ۲ میلیمتر را تحت بار ضربه به مقدار ۰/۲، ۰/۳، ۰/۴ و ۰/۵ مگاپاسکال قرار دادند، می‌توان اینگونه بیان کرد که با افزایش اندازه ذرات لاستیک تغییر شکل و مقدار جذب انرژی نیز در بتن افزایش یافته است.
 با توجه به نتایج به دست آمده، پیشنهاد می‌شود که از بتن حاوی ذرات لاستیک (بیشینه ۳۰ درصد در اندازه ۳-۵ میلیمتر) به عنوان پناهگاه در زمان حملات احتمالی و زلزله استفاده شود. این بتن پس از آسیب‌دیدگی همچنان پابرجا مانده و و به دلیل شکست نرم، افراد پناهنده حتی پس از قرار گرفتن در معرض بارهای احتمالی همچنان ایمن خواهند بود. همچنین در سیستم راه، موج شکن، باند فرودگاه و گادریل جاده نیز بتن مذکور می‌توان استفاده کرد.
 همچنین به منظور به دست آوردن معادله حرکت تیرهای بتنی تحت بارگذاری ضربه از مدل جرم-فنر استفاده شده است. فرمول به دست آمده برای معادله حرکت تیرهای بتنی تحت بارگذاری دینامیکی و ضربه ای حاکی از آن است که حرکت تیر تحت بارگذاری دینامیکی تحت تاثیر خصوصیات فیزیکی و مکانیکی نمونه‌ها می‌باشد.


۷- نمادها

ASTM C78 استاندارد مقاومت خمشی با یک بار متمرکز
 ASTM C597 استاندارد آزمون التراسونیک
 ASTM C1240 استاندارد چگالی بتن
 B.S 1881:Part 116 استاندارد مقاومت فشاری نمونه مکعبی برای بتن بعد نمونه مکعبی (m)
 a عرض مقطع تیر بتنی (m)
 b سرعت عبور امواج التراسونیک از داخل نمونه بتنی ($m\ s^{-1}$)
 c ارتفاع مقطع تیر بتنی (m)
 d مدول الاستیسیته استاتیکی نمونه بتنی (MPa)
 e مدول الاستیسیته دینامیکی نمونه بتنی (MPa)
 f مقاومت فشاری نمونه بتنی (MPa)
 F نیروی وارده بر تیر بتنی در فرایند ضربه (N)

- [19] F. Hernández-Olivaresa and G. Barluenga, Static and dynamic behaviour of recycled tyre rubber-filled concrete. *Cement and Concrete Research*, Vol. 32, pp. 1587–1596, 2002.
- [20] Ali O. Atahan and Ayhan Öner Yücel, Crumb rubber in concrete: Static and dynamic evaluation. *Construction and Building Materials*, Vol. 36, pp. 617-622, 2012.

تغییر مکان عمودی تیر (m) 

ضریب پواسون 

چگالی (kgm⁻³) 

۸- مراجع

- [1] Tinic C. and Bruhwilert E., Effect of compressive loads on the tensile strength of concrete at high strain rate. *Cement composite and lightweight concrete*, Vol. 7, 1985.
- [2] Bischoff and S. Perry, Compression behaviour of concrete at high strain rate. *Material and Structures*, Vol. 24, pp. 425-450, 1991.
- [3] Krauthammer T. and Zineddin M., Structural concrete slabs under localized impact. *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 34, pp. 1517-1534, 2007.
- [4] Ayda S. Agar Ozbek, et al., Dynamic behavior of porous concretes under drop weight impact testing. *Cement & Concrete Composites*, Vol.39, pp. 1-11, 2013.
- [5] Feng Liu, Study of impact performance of rubber reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, Vol. 36, pp. 604-616, 2012.
- [6] Chakradhara Rao M. and Bhattacharyy S.K., Behaviour of recycled aggregate concrete under drop weight impact load. *Construction and Building Materials*, Vol. 25, pp. 69-70, 2011.
- [7] Rui Wang, et al., Experimental behavior of concrete filled double steel tubular (CFDST) members under low velocity drop weight impact. *Thin-Walled Structures*, Vol. 97, pp. 279–295, 2015.
- [8] Cairns R., Kew H., and Kenny, M. The use of recycled rubber tyres in concrete construction. Final Report. *The Onyx Environmental Trust, University of Strathclyde, Glasgow*, pp. 135-142.
- [9] Bravo M. and de Brito J., Concrete made with used tyre aggregate: durability-related performance. *Journal of cleaner production*, Vol.25, pp. 42-50, 2012.
- [10] Ali R. Khaloo, Dehestani M. and Rahmatabadi P., Mechanical properties of concrete containing a high volume of tire-rubber particles. *Waste Management*, Vol.28, pp. 2472–2482, 2008.
- [11] Samar Raffoul and Reyes Garcia, Optimisation of rubberised concrete with high rubber content: An experimental investigation. *Construction and Building Materials*, Vol. 12, pp. 391-404, 2016.
- [12] Ali A. Aliabdo and Abd Elmoaty. Utilization of waste rubber in non-structural applications. *Construction and Building Materials*, Vol. 91, pp. 195-207, 2015.
- [13] Kabir M.Z. and Shafeil E., Analytical and Numerical Study of FRP Retrofitted RC Beams Under Low Velocity Impact. *Sharif University of Technology*, Vol. 16, pp. 415-428, 2009.
- [14] Arduini M and Di Tommaso A, Brittle failure in FRP plate and sheet bonded beams. *ACI Struct*, Vol.94, pp. 363-70, 1997.
- [15] Wong RSY and V. FJ., Towards modeling of reinforced concrete members with externally bonded fiber-reinforced polymer composites. *ACI Struct J*, Vol. 100, pp. 47-55, 2003.
- [16] H. J. F. DIÓGENES a, et al., Determination of modulus of elasticity of concrete from the acoustic response. *IBRACON Structures and Materials Journal*, Vol. 4, pp. 792-813, 2011.
- [17] Rahman M., Usman M. and Ali A., Al-Ghalib, Fundamental properties of rubber modified self-compacting concrete (RMSCC). *Construction and Building Materials*, Vol.36, pp. 630-637, 2012.
- [18] Fujikaka K., Li B. and Soeun S., Impact response of reinforced concrete beam and its analytical evaluation. *Journal of structural engineering*, Vol. 135, pp. 938-950, 2009.