مجله مهندسی مکانیک مدرس، دی 1395، دوره 16، شماره 10، ص‌ص 173-180

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

بررسی تجربی رفتار بتن‌های حاوی ذرات لاستیک تایر ضایعاتی، دوده سیلیس و الیاف پلی‌پروپیلن تحت بارگذاری ضربه ای

علی صدرممتازی[1]، رومینا ذرشین زنوش[2]،هاشم بابایی[3*]

1- دانشیار، مهندسی عمران، دانشگاه گیلان، رشت
2- دانشجوی دکتری، مهندسی عمران، دانشگاه گیلان، رشت
3- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت
* رشت، صندوق پستی 3756-41635، ghbabaei@guilan.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 23 تیر 1395
پذیرش: 08 شهریور 1395
ارائه در سایت: 18 مهر 1395

کلید واژگان:
ضربه
بتن منعطف
ذرات لاستیک تایر ضایعاتی
تفنگ گازی
وزنه پرتابی

چکیده

سازه‌ها ممکن است در طول عمر مفیدشان در معرض بارهای ناگهانی همانند ضربه قرار گیرند. تولید مصالح جدید که بتواند آسیب کمتری را در هنگام مواجه شدن با فرایند ضربه و ارتعاشات ناگهانی از خود نشان دهد از مواردی است که باید مورد توجه قرار گیرد. بتن ماده‌ای شکننده است و وقتی در معرض بارهای دینامیکی قرار می‌گیرد، علاوه بر آسیب دیدگی خود، ممکن است به محیط اطراف به دلیل از هم پاشیدگی صدمه وارد کند. در این تحقیق، ذرات لاستیک تایر ضایعاتی در 3 اندازه 1-0، 3-1 و 5-3 میلی‌متر و در نسبت‌های 0، 10، 20، 30، 40 و 50 درصد، به صورت جانشین حجمی ریزدانه به مخلوط بتن اضافه شده است. ابتدا با توجه به نتایج آزمون مقاومت فشاری، اندازه بهینه از ذرات لاستیک تعیین شد، سپس به نمونه‌های بتنی حاوی ذرات لاستیک در اندازه بهینه، دوده سیلیس و الیاف پلی‌پروپیلن اضافه شد و مجددا نمونه‌ها تحت آزمون‌های مقاومت فشاری، وزن مخصوص، جذب امواج التراسونیک، بارگذاری ضربه با وزنه پرتابی و تفنگ گازی قرار داده شدند. نتایج حاکی از آن است که، گرچه اضافه کردن ذرات لاستیک موجب کاهش مقاومت فشاری بتن شده است ولی انعطاف‌پذیری بتن را افزایش داده است. همچنین دوده سیلیس به دلیل داشتن خصوصیت پوزولانی موجب چسبندگی بیشتر در نمونه بتنی و در نتیجه افزایش مقاومت در بتن شده و الیاف پلی پروپیلن موجب افزایش انعطاف پذیری در بتن گردیده است.

Experimental investigation into the behavior of concrete containing waste tire rubber, silica fume and polypropylene fiber subjected to impact loading

Ali Sadrmomtazi[1], Romina Zarshin Zanoosh[1], Hashem Babaei[2*]

1- Department of Civil Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran.
2- Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
* P.O.B. 3756-41635 Rasht,Iran,ghbabaei@guilan.ac.ir, Iran

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 13 July 2016
Accepted 23 August 2016
Available Online 09 October 2016

Keywords:
Impact
Ductile concrete
Waste tire rubber particle
Gas gun
Drop hammer

ABSTRACT

Structures might be subjected to impulse loads such as impact loads in their usefull lifetime. Production of new materials that are shown less vulnerable to sudden shocks and vibrations, is an issue that should be considered. Concrete is a brittle material and when is exposed to dynamic loads, in addition to its injury, it may cause damage to the environment due to disintegration. In this study, waste 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%. First, with compressive strength test, optimum sizes of rubber particles were obtained, then silica fume and polypropylene fiber were added to concrete mixture that contained optimum size of rubber particles. In addition, compressive strength, dry unit weight, velocity of ultrasonic wave, impact with drop hammer and gas gun device test were done. The results show that, adding rubber particles to concrete mixture decreases compressive strength but increases ductility. Also, silica fume because of pozzolanic properties increased adhesive in concrete matrix, so the increased strength of concrete and polypropylene fiber increased the ductility of concrete.

1- مقدمه

امنیت سازه، علاوه بر بارهای استاتیکی، در برابر بار ضربه نیز باید تضمین شود، این نوع بارگذاری در طول عمر مفید سازه با احتمال خیلی اندک اتفاق می‌افتد. شرایط بارگذاری ضربه، بارهایی هستند که در یک سرعت بالا اتفاق می‌افتند و می‌توانند انرژی زیادی را در بازه زمانی کوتاهی انتقال دهند و موجب آسیب بزرگی به سازه شوند. افتادن سنگ روی پناهگاه، وسایل نقلیه در برخورد با سازه، ضربه گلوله و موج انفجار از جمله بارهای ضربه‌ای هستند که ممکن است به سازه وارد گردند.

ضربه به دو صورت ضربه نرم و ضربه سخت بیان می‌شود. در صورتی که که تغییر شکل جسم پرتاب شونده بیشتر از تغییر شکل سازه ضربه دیده باشد، سازه ضربه دیده بدون تغییرشکل باقی می‌ماند و تمام انرژی جنبشی جسم ضربه زننده، تبدیل به تغییر شکل جسم ضربه زننده می‌شود، این حالت

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:
A. Sadrmomtazi, R. Zarshin Zanoosh, H. Babaei, Experimental investigation into the behavior of concrete containing waste tire rubber, silica fume and polypropylene fiber subjected to impact loading, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 10, pp. 173-180, 2016 (in Persian)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2025-04-03]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.10.21.2]

ضربه نرم نامیده می‌شود. اما در صورتی که جسم ضربه زننده صلب باشد و جسم ضربه دیده دارای تغییر شکل زیاد شود، ضربه سخت نامیده می‌شود. در این حالت انرژی جنبشی جسم ضربه زننده، به طور کامل و یا بخشی از آن به وسیله جسم مورد اصابت جذب می‌شود [1].

بتن ماده‌ای شکننده است و زمانی که در معرض بار دینامیکی همانند ضربه قرار می‌گیرد رفتاری متفاوت نسبت به حالت شکست استاتیکی از خود نشان می‌دهد (شکل 1). همچنین در حین ضربه آسیب جدی به محیط اطراف در نتیجه پرتاب ذرات بتن ناشی از شکست ترد اعمال می‌گردد.

تاکنون تحقیقات زیادی در رابطه با اثر ضربه بر بتن انجام گرفته است. کراتامر و همکارانش [2] اثر ضربه را توسط دستگاه ضربه پاندولی بر روی دال های بتنی بررسی کردند، این دستگاه ارتفاع 4.25 متر داشت و قادر بود وزنه شناور 7.1 کیلو نیوتن را در یک منحنی که ارتفاع پرتاب 3.65 متر بود پرتاب کند. آن‌ها شکل شکست دال بتنی را بعد از پرتاب وزنه از ارتفاعات مختلف به صورت دوایری با شعاعهای مختلف، نشان دادند. همچنین دستگاه وزنه پرتابی، با طرح‌های مختلف در اعمال ضربه با سرعت کم کاربرد بسیار زیادی دارد. این نوع آزمایش با تغییرات سرعت کرنش، به سادگی قابل انجام است و از آزمایشهای کم هزینه به حساب می‌آید. این وسیله معمولا برای مطالعه اثر ضربه بر روی تیرهای بتنی استفاده می‌شود . ساز و کار این ابزار شامل یک ضربه زننده با جرم مشخص است که از ارتفاع معینی رها می‌شود و به هدف اصابت می‌کند. برای دستیابی به انرژی ضربه مطلوب، جرم ضربه زننده و ارتفاع سقوط قابل تغییر است. تاریخچه نیرو-زمان ضربه زننده به سادگی از راه مبدل نیروی وابسته به دست می‌آید. چاکراتهارا رائو و همکارانش در سال 2.11 [3]، رفتار بتن حاوی سنگدانه‌های ضایعاتی تحت ضربه توسط دستگاه وزنه پرتابی را بررسی کردند. آن‌ها از تیرهای بتنی در اندازه‌های 0.16×0.1×1.15 متر استفاده کردند. جرم وزنه پرتابی 5 کیلوگرم بود و از ارتفاع 0.5 متری بالای نمونه تیر رها شد. که سرعتی در حدود 2.1 متر بر ثانیه در زمان ضربه را تولید کرد. آن‌ها همچنین برای بدست آوردن ضربه نقطه‌ای از یک گوی فلزی به قطر 15 میلی‌متر در زیر چکش استفاده کردند و بیان کردند که بار پیک در زمان 1 میلی‌ثانیه بعد از ضربه اتفاق می‌افتد. کانول و همکارانش [4] سامانه دیگری را برای محاسبه سرعت پرتابه ابداع کردند. آن‌ها دو سیم نازک را در لوله تفنگ با فاصله معین از هم قرار داده و با مشخص بودن زمان سپری شده در لحظه شکستن سیم اول و دوم، سرعت پرتابه را محاسبه کردند. به طور عمومی رخدادهای ضربه در الگوی سرعتی بالستیک با استفاده از تفنگ باروتی انجام شد. این وسیله هم چون تفنگ گازی بود. در این حالت برای حرکت دادن پرتابه با جرم کم، از باروت استفاده شد و پرتابه‌ها پیش از اصابت به هدف از دهانه تفنگ خارج شدند. در این روش به علت بی ثباتی حاصل از پرتاب آزاد پرتابه‌ها و مواجه شدن با سرعت-های خیلی زیاد در الگوی ضربه بالستیک، اندازه‌گیری حرکت پرتابه بسیار پیچیده است. ضربه‌های وارد شده طی نشست و برخاست هواپیما از سطح باند فرودگاه که می‌تواند سبب آسیب دیدن سازه شود، با استفاده از پرتابه‌های کوچک با سرعت زیاد به کمک دستگاه تفنگ گازی به خوبی قابل شبیه سازی است.

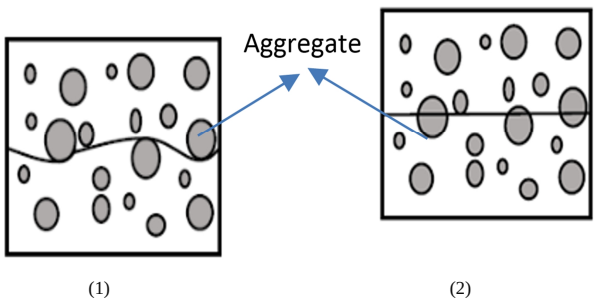


Fig. 1 Concrete fracture under loading (1) Static condition (2) Dynamic condition

شکل 1 شکست بتن تحت بارگذاری (1) شرایط استاتیکی (2) شرایط دینامیکی

در سازه‌های بتنی که در معرض بار ضربه قرار می‌گیرند، یکی از روش-هایی که برای کاهش خسارات ناشی از شکست ترد بتن، پیشنهاد می‌شود، استفاده از درصد بهینه‌ای از ذرات لاستیک در بتن است. بتن حاوی ذرات لاستیک، بر خلاف بتن عادی تا حدودی دارای شکست نرم می‌باشد و در واقع این نوع بتن یک بتن منعطف می‌باشد [5].

گرچه تحقیقات زیادی در رابطه با ضربه بر بتن انجام گرفته است، اما تحقیقات کمی در رابطه با ضربه بر بتن‌های حاوی ذرات لاستیک وجود دارد. کرنز و همکارانش [6] از ذرات لاستیک با ماکزیمم اندازه 20 میلی‌متر به عنوان درشت‌دانه در بتن استفاده کردند. آن‌ها بیان کردند که در بتن حاوی 50 درصد ذرات لاستیک، اسلامپ بتن به سمت 0 می رود. همچنین آلبانو و همکارانش [7] بیان کردند که جانشینی 5 و10 درصد ریزدانه در بتن اسلامپ بتن موجب می گردد که اسلامپ بتن 88 درصد کاهش پیدا کند. در مورد مقاومت فشاری بتن‌های حاوی ذرات لاستیک میتوان گفت: با افزایش مقدار لاستیک مقاومت فشاری بتن کاهش مییابد. آیلو و همکارانش [8] بیان کردند که تاثیر ذرات لاستیک به عنوان درشت‌دانه و ریزدانه متفاوت است. آنها ذکرکردند که وقتی ذرات لاستیک جایگزین درشت دانه در بتن می‌شوند، بتن مقاومت فشاری بیشتری را نسبت به زمانی که لاستیک جایگزین ریزدانه در بتن می‌شود از دست میدهد. اسکریپکیناس و همکارانش [9] مدول الاستیسیته بتن را برای مقاومت فشاری یکسان و ذرات لاستیک متفاوت بررسی کردند. آن‌ها بیان کردند که وقتی ذرات لاستیک به بتن افزوده می-شود، مدول الاستیسیته بتن افزایش می‌یابد. این رفتار مربوط به مدول الاستیسیته لاستیک می‌باشد.

پدیده جذب انرژی، انعطاف پذیری و آسیب‌های بتن حاوی ذرات لاستیک دوده سیلیس و الیاف پلی‌پروپیلن تحت بار ضربه، همچنین درصد بالای جانشینی ذرات لاستیک و بیان خصوصیات بتن در این شرایط در تحقیقات گذشته دیده نشده است که در تحقیق مذکور بدان پرداخته شده است که نوآوری پروژه می‌باشد.

در این تحقیق، با اضافه کردن ذرات لاستیک تایر ضایعاتی به مخلوط بتن، خصوصیات ضربه‌پذیری بتن افزایش داده شد و خسارات ناشی از پرتاب ذرات بتن به اطراف کمتر شد. بتن جدید تحت بار ضربه با دو نوع سرعت (توسط دستگاه چکش پرتابی و تفنگ گازی) قرار داده شد و درصد لاستیک بهینه در بتن بدست آمد. به منظور بهبود خواص مکانیکی بتن، پوزولان دوده سیلیس (جانشین 10 درصد وزن سیمان) به مخلوط بتن بهینه حاوی ذرات لاستیک اضافه شد. میکروسیلیس پودری خاکستری رنگ و محصول جانبی کوره‌های قوس‌الکتریکی است که تا حدی شبیه سیمان می‌باشد. مصرف دوده سیلیس باعث تغییرات مثبت فیزیکی و شیمیایی در میکروساختار بتن مصرف دوده سیلیس سبب اضافه شدن میلیون‌ها میلیون ذره بسیار ریز به مخلوط بتن می‌شود و فضای خالی بین ذرات سنگدانه بتن را پر می‌کند. همچنین به دلیل مقدار بسیار بالای دی‌اکسید سیلیسیم ، یک ماده پوزولانی بسیار واکنش پذیر در بتن می‌باشد. هنگامی که سیمان پرتلند در بتن واکنش می

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2025-04-03]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.10.21.2]

دهد، هیدروکسیدکلسیم آزاد می‌کند. دوده سیلیس با این هیدروکسیدکلسیم واکنش داده و یک ماده چسبنده دیگر هیدرات‌سیلیکات کلسیم را تشکیل می‌دهد. این ماده چسبنده خواص بتن را بهبود می‌بخشد. همچنین انعطاف پذیری بتن نیز با افزودن الیاف پلی پروپیلن (0.3، 0.5 درصد وزنی نمونه بتنی) افزایش یافت. مشاهدات نشان داد که، استفاده از ذرات لاستیک در بتن، کارایی بتن را تا حدودی کاهش داده است و استفاده از الیاف پلی-پروپیلن انعطاف پذیری بتن را مقداری افزایش داده است [10].

2- مصالح مصرفی

سیمان مصرفی در ساخت بتن، سیمان تیپ 1 ایلام می‌باشد. در این تحقیق از 5 درصد مختلف ذرات لاستیک از 10 درصد تا 50 درصد، به صورت جانشین حجمی ریز دانه در اندازه 1-0، 3-1 و 5-3 میلی‌متر با وزن مخصوص در حدود 500 کیلوگرم بر متر مکعب استفاده شده است (شکل 2). همچنین در نمونه-های حاوی دوده سیلیس از 10 درصد دوده سیلیس به صورت جانشین وزنی سیمان در بتن استفاده شده است. همچنین به منظور بهبود انعطاف‌پذیری بتن، الیاف پلی پروپیلن با طول 6 میلی‌متر به صورت 0.3 و 0.5 درصد حجمی نمونه بتنی به مخلوط بتن اضافه شده است.

در شکل 3 کامپوزیت سیمانی حاوی ذرات لاستیک، دوده سیلیس و الیاف پلی‌پروپیلن توسط میکروسکوپ الکترونی نشان داده شده است. مدل این میکروسکوپ مدل VEGA II TESCAN می‌باشد و قابلیت تصویربرداری با توان بزرگ‌نمایی اسمی 100000 برابر را دارد و دارای ولتاژ 15 ولت می باشد. در تصویر اول شکل 3، در ناحیه بین لاستیک و خمیر سیمانی چسبندگی کمی مشاهده می‌شود. در حالی که در تصویر دوم که کامپوزیت سیمانی حاوی دوده سیلیس می‌باشد، دوده سیلیس به دلیل داشتن اندازه بسیار ریز، اثر بسزایی در متراکم کردن ملات سیمان و حذف خلل و فرج در خمیر سیمان داشته، همچنین در نتیجه فعالیت پوزولانی دوده سیلیس در داخل خمیر سیمان، دوده سیلیس با کاهش مقدار هیدروکسید کلسیم تولید شده در فرایند هیدراسیون که در نتیجه ترکیب آب و سیمان در خمیر سیمان به وجود می‌آید و واکنش با آن و تولید ژل چسبنده C-H-S، فضاهای خالی ما بین ذرات لاستیک و خمیر سیمان را پر کرده و در نتیجه فصل مشترک خمیر سیمان با ذرات لاستیک بیشتر شده و چسبندگی ما بین آن‌ها افزایش داده است [11]. در نتیجه اعمال بار، ریز ترک‌ها که ابتدا در ناحیه بین ذرات لاستیک و خمیر سیمان ایجاد می‌شوند، در کامپوزیت حاوی دوده سیلیس کمتر شده و مقاومت نمونه افزایش می‌یابد. در تصویر سوم نیز الیاف پلی‌پروپیلن در داخل کامپوزیت سیمانی مشاهده می‌شود که دو قسمت جدا شده را بعد از شکست نمونه، همچنان در کنار هم نگه داشته و همانند یک پل مانع جداشدگی کامل نمونه شده است.

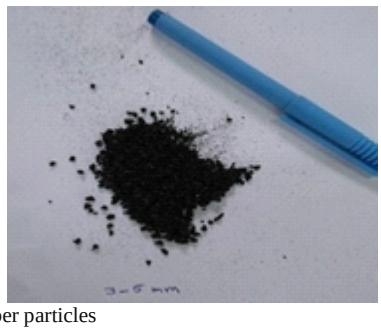
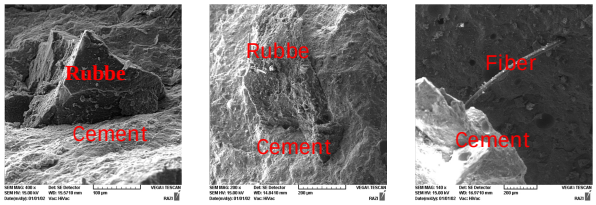


Fig. 2 Rubber particles

شکل 2 ذرات لاستیک



(1) (2) (3)

Fig. 3 SEM picture, (1) Rubber in cement composite of concrete (2) Rubber in cement composite of concrete with silica fume (3) Polypropylene in cement composite of concrete

شکل 3 تصویر میکروسکوپ الکترونی (1) کامپوزیت سیمانی بتن حاوی ذرات لاستیک، (2) کامپوزیت سیمانی بتن حاوی ذرات لاستیک و دوده سیلیس، (3) کامپوزیت سیمانی بتن حاوی الیاف پلی پروپیلن

3- اندازه نمونه‌ها

اندازه نمونه‌های بتنی تحت آزمون‌های مختلف در جدول 1 آمده است .

4- خصوصیات فیزیکی و مکانیکی

با افزایش ذرات لاستیک در ماتریس بتن، کارایی بتن کاهش یافت و وقتی که حجم ذرات به 40 درصد رسید این کارایی بسیار کم شد. کارایی مناسب در نمونه‌های حاوی دوده سیلیس به کمک فوق روان کننده به دست آمد.

به منظور به دست آوردن اندازه بهینه ذرات لاستیک، ابتدا نمونه‌های بتنی شامل هر 3 اندازه از ذرات لاستیک تحت آزمون مقاومت فشاری قرار داده شدند. مطابق با شکل 4، نتایج حاکی از آن بود که ذرات لاستیک در اندازه 5-3 میلی‌متر بیشترین مقاومت فشاری را از خود نشان دادند. قبل از آزمون ضربه بر بتن، ابتدا آزمون‌های مقاومت فشاری، وزن مخصوص و التراسونیک (به منظور به دست آوردن سرعت عبور امواج صوتی و مدول الاستیسیته دینامیکی) برای بتن حاوی ذرات لاستیک در اندازه 5-3 میلی‌متر انجام شد تا خصوصیات مکانیکی این نوع بتن تعیین شود. نتایج آزمون‌ها در شکل‌های 5 تا 7 آمده است و حاکی از آن است که، با افزایش ذرات لاستیک به مخلوط بتن، مقاومت فشاری و وزن مخصوص بتن کاهش پیدا کرده است. در این نوع بتن‌ها، تحت بارهای وارده، ذرات لاستیک مانند مرکز تغییر شکل سازه عمل می‌کنند و روی توقف ترک و اتلاف انرژی تاثیر می‌گذارند و سرعت گسترش ترک را پایین می‌آورند.

با افزودن ذرات لاستیک به مخلوط بتن استحکام بتن کم شده ولی استحکام تنها خصوصیت مورد توجه بتن نمی‌باشد که در سازه‌های مهندسی باید در نظر گرفته شود. همچنین بتن ذکر شده بعد از اضافه کردن لاستیک همچنان مقاومت سازه‌ای تقریبا قابل قبول که در حدود 22 مگاپاسکال می باشد را دارا است. دلایل کاهش مقاومت در بتن حاوی ذرات لاستیک را می-توان اینگونه توجیح کرد که: به علت این که ذرات لاستیک خیلی نرم‌تر از

جدول 1 اندازه نمونه‌های بتنی

Table 1 Size of concrete samples

نوع آزمایش	نوع نمونه	طول	عرض	ارتفاع
	mm	mm	mm	mm
ضربه با وزنه پرتابی	تیر	1200	100	160
ضربه با تفنگ گازی	مکعب	150	150	150
مقاومت فشاری	مکعب	100	100	100
وزن مخصوص	مکعب	100	100	100
التراسونیک	مکعب	100	100	100

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2025-04-03]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.10.21.2]

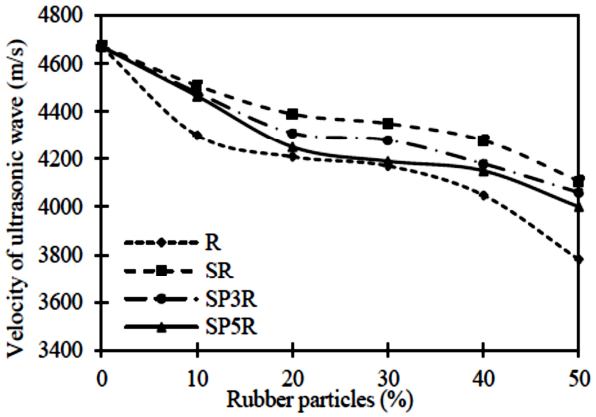


Fig. 7 Velocity of ultrasonic wave of rubberized concrete with silica fume and polypropylene fiber

شکل 7 سرعت عبور امواج التراسونیک از بتن حاوی ذرات لاستیک و دوده سیلیس و الیاف پلی‌پروپیلن

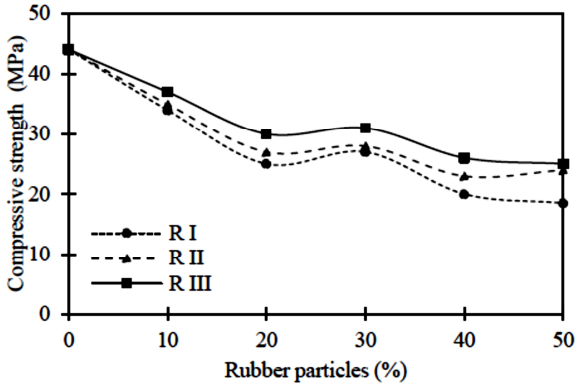


Fig. 4 Compressive strength of rubberized concrete in 3 sizes of rubber particles

شکل 4 مقاومت فشاری بتن حاوی ذرات لاستیک در3 اندازه از ذرات لاستیک

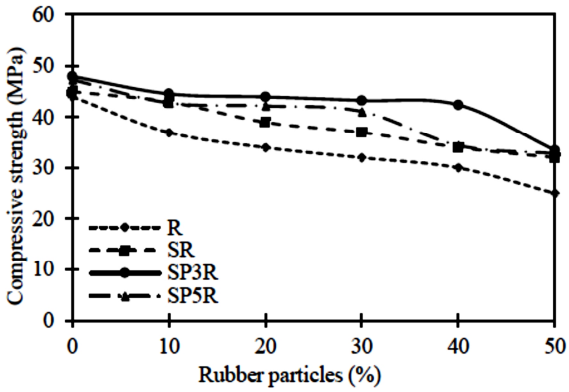


Fig. 5 Compressive strength of rubberized concrete with silica fume and polypropylene fiber

شکل 5 مقاومت فشاری بتن حاوی ذرات لاستیک، دوده سیلیس و الیاف پلی-پروپیلن

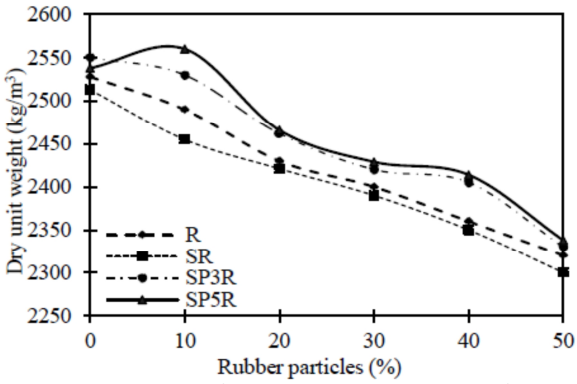


Fig. 6 Dry unit weight of rubberized concrete with silica fume and polypropylene fiber

شکل 6 وزن مخصوص بتن حاوی ذرات لاستیک، دوده سیلیس و الیاف پلی-پروپیلن

خمیر سیمان سخت شده هستند، در هنگام بارگذاری ترک از اطراف ذرات لاستیک در مخلوط بتن شروع می‌شود و به سپس گسترش یافته و در نهایت سبب تسریع در شکست بتن می‌گردد. همچنین افزایش انعطاف‌پذیری و شکست نرم در بتن به دلیل کمتر بودن سختی ذرات لاستیک نسبت به ریزدانه‌های استفاده شده در بتن نرمال نیز می‌تواند باشد.

دلایل کاهش وزن مخصوص نمونه‌ها را نیز می‌توان این گونه بیان کرد که با اضافه کردن ذرات لاستیک به مخلوط بتن، مقدار هوای محبوس در بتن زیاد شده و سبب کاهش چگالی بتن می‌شود. این امر می‌تواند به دلیل غیرقطبی بودن لاستیک و توانایی به دام انداختن حباب‌های هوا در سطوح زیر آن باشد. همچنین لاستیک اضافه شده به بتن می‌تواند با دفع آب، هوا را جذب کند. بنابراین هوای محبوس در بتن زیاد شده و وزن مخصوص بتن کاهش می‌یابد.

مدول الاستیسیته دینامیکی، از طریق امواج التراسونیک و با توجه به فرمول‌های (1)، (2) و (3) [12] به دست آمد، که نشان دهنده توانایی ماده در جذب شدت صوت و لرزش می‌باشد. مدول الاستیسیته دینامیکی از مدول الاستیسیته استاتیکی بزرگتر است [13] و در زمانی که بارهای ضربه‌ای بر سازه بتنی وارد می‌شود، بهتر است که از مدول الاستیسیته دینامیکی استفاده شود. مدول الاستیسیته دینامیکی برای درصدهای مختلف ذرات لاستیک در شکل 8 آمده است. نتایج حاکی از آن است که، وقتی به مخلوط بتن، ذرات لاستیک اضافه شد، مدول الاستیسیته دینامیکی بتن کاهش یافت. کاهش مدول الاستیسیته در نمونه‌هایی که تنها حاوی ذرات لاستیک هستند از همه کمتر، در حالی که در نمونه‌های حاوی دوده سیلیس مدول الاستیسیته دینامیکی از بقیه نمونه‌ها بیشتر دیده شده است که ارتباط به وزن مخصوص و سرعت عبور امواج التراسونیک از داخل نمونه‌ها دارد. بر طبق نتایج به دست آمده از آزمایش التراسونیک، بتن حاوی ذرات لاستیک را می توان یک جاذب صوت نیز نامید.

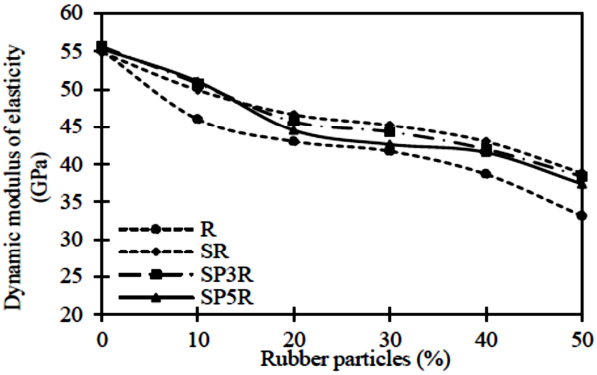


Fig. 8 Dynamic modulus of elasticity of rubberized concrete with silica fume and polypropylene fiber

شکل 8 مدول الاستیسیته دینامیکی بتن حاوی ذرات لاستیک ، دوده سیلیس و الیاف پلی‌پروپیلن

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2025-04-03]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.10.21.2]

$$E_d = \frac{(1+v)(1-2v)}{(1-v)^2}\rho {C_l}^2 \quad (1)$$

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

$$E_d \approx \rho {C_l}^2 \quad (3)$$

5- آزمون ضربه

5-1-آزمون ضربه با وزنه پرتابی

دستگاهی که آزمون ضربه با وزنه پرتابی با آن انجام شد در شکل 9 آمده است، ظرفیت نهایی این دستگاه 1 تن و ارتفاع حداکثر پرتاب وزنه توسط این دستگاه 3.5 متر می‌باشد.

در این تحقیق وزنه‌ای به جرم 62.4 کیلوگرم از ارتفاع 0.5 متر پرتاب و به وسط تیر دو سر مفصل وارد شد. همچنین به منظور ایجاد بار نقطه‌ای در انتهای چکش، وزنه‌ای با سر کروی همانند شکل 10 پیچ شد. 3 گیج کرنش بر روی تیر بتنی چسبانده شد، یکی در فاصله 10 سانتی‌متری از وسط تیر و دوتا در فاصله 10 سانتی‌متری از بر تکیه‌گاه، که یکی از آن دو نول بود و تنها نقش تبادل حرارتی را ایفا کرد (شکل 11). کرنش سنج‌ها به یک دیتالاگر اتصال داده شدند واطلاعات بدست آمده پس از پرتاب وزنه به کامپیوتر انتقال داده شد و کرنش در دو نقطه تیر تحت بار دینامیکی ضربه (شکل 12) در کامپیوتر ثبت شد و از آنالیز داده‌ها مقدار کرنش در وسط تیرمطابق شکل 13 به دست آمد.

Fig. 9 Drop hammer device

شکل 9 دستگاه چکش پرتابی

Fig. 10 Head of hammer for generating point load

شکل 10 سر چکش به منظور تولید بار نقطه‌ای

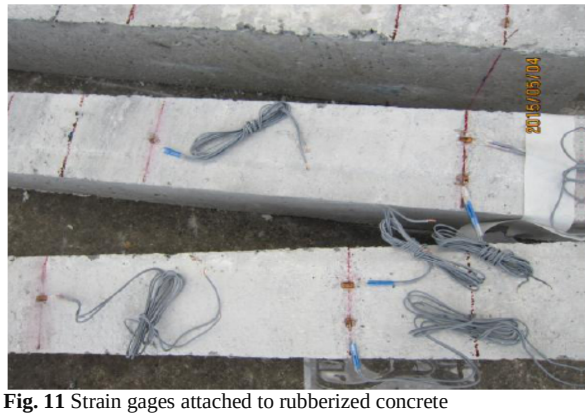


Fig. 11 Strain gages attached to rubberized concrete

شکل 11 گیج سنجش کرنش چسبیده بر بتن حاوی ذرات لاستیک

Fig. 12 Fracture of concrete under impact loading with drop hammer

شکل 12 شکست بتن تحت ضربه توسط چکش پرتابی

نتایج حاکی از آن است که، وقتی که ذرات لاستیک به مخلوط بتنی اضافه شد، کرنش در بتن افزایش یافت و با افزودن دوده سیلیس به نمونه بتنی، گرچه مقاومت بتن افزایش یافت، بتن تردتر شد و مقدار کرنش در آن تحت اثر بار ضربه کاهش یافت. همچنین در نمونه‌های حاوی پلی‌پروپیلن مشاهده شد که با افزایش الیاف پلی پروپیلن به نمونه‌های بتنی حاوی ذرات لاستیک و دوده سیلیس، کرنش در بتن افزایش یافت و دردرصد لاستیک 30 و درصد الیاف 0.3 بیشترین کرنش مشاهده شد.

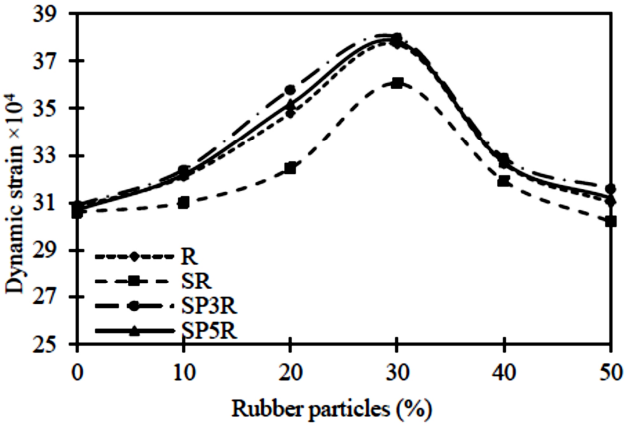


Fig.13 Dynamic strain of rubberized concrete with silica fume and polypropylene fiber

شکل 13 کرنش دینامیکی بتن حاوی ذرات لاستیک و دوده سیلیس و الیاف پلی-پروپیلن

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2025-04-03]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.10.21.2]

در توضیح انرژی در این فرایند قابل ذکر است که، انرژی پتانسیل در جریان پرتاب وزنه به انرژی جنبشی تبدیل می‌گردد، سرعت در زمان برخورد چکش پرتابی در لحظه برخورد به تیر بتنی 3.13 متر بر ثانیه بود که مطابق فرمول‌های (4) و (5) به دست آمده است.

$$mgh = \frac{1}{2}mV^2 \quad (4)$$

$$V = \sqrt{2gh} \quad (5)$$

در آنالیز داده‌ها، اگر تیر دو سر مفصل را به صورت یک فنر در نظر گرفته شود، در این صورت سختی فنر و انرژی جذب شده توسط تیر مطابق فرمول‌های (6) تا (8) خواهد شد:

$$K = \frac{48E_dI}{L^3} \quad (6)$$

$$\Delta E = \frac{1}{2}K\Delta X^2 \quad (7)$$

$$\Delta X = \varepsilon \times L \quad (8)$$

در این فرمول ΔE انرژی جذب شده، K سختی فنر، I ممان اینرسی، E_d مدول الاستیسیته دینامیکی بتن و ΔX تغیر طول تیر، ε کرنش تیر بتنی و L طول دهانه آزاد تیر می‌باشد. لازم به ذکر است که در آزمون‌های دینامیکی بهتر است مدول الاستیسیته دینامیکی به جای مدول الاستیسیته استاتیکی در نظر گرفته شود.

در شکل 14 انرژی جذب شده توسط تیرهای بتنی حاوی ذرات لاستیک آمده است. نتایج حاکی از آن است که با افزایش ذرات لاستیک به بتن، کرنش در بتن در درصد بهینه افزایش یافت، همچنین انرژی جذب شده در بتن نیز افزایش یافت. با افزودن دوده سیلیس به نمونه‌های بتنی حاوی ذرات لاستیک، گرچه مقاومت بتن، به دلیل خاصیت پوزولانی دوده سیلیس بهبود یافت ولی بتن تردتر شد و کرنش بتن کاهش یافت. همچنین با افزودن الیاف پلی‌پروپیلن به مخلوط بتن، به دلیل افزایش انعطاف‌پذیری، مقدارکرنش در نمونه‌های بتنی افزایش یافت و این افزایش در درصد بهینه 0.3 به دست آمد. الیاف پلی‌پروپیلن در زمان شکست در نمونه‌های بتنی همانند پل عمل می‌کنند و موجب می‌گردند که خاصیت چسبندگی در بتن افزایش پیدا کند.

2-5- آزمون ضربه با تفنگ گازی

در آزمون ضربه توسط تفنگ گازی، مطابق شکل نمونه بتنی در داخل محفظه‌ای که برایش تعیین شده (شکل 15) در انتهای ریل دستگاه تفنگ گازی (شکل 16) قرارداده شد، سپس گلوله ای با قطر 19 میلی‌متر و وزن 29 گرم (شکل 17) با سرعت میانگین 150 متر بر ثانیه، به نمونه شلیک شد (شکل 18). عمق ناحیه آسیب دیده بعد از ضربه در شکل 19 و میانگین قطر ناحیه آسیب دیدگی در شکل 20 آمده است. در این آزمون مقدار نفوذ گلوله در نمونه بتنی توسط کولیس و قطر میانگین ناحیه آسیب دیده توسط فرمول (9) در بتن‌های حاوی درصدهای مختلف ذرات لاستیک، به دست آمد و با هم مقایسه شد. نتایج حاکی از آن است که عمق نفوذ گلوله در بتن با مقدار انرژی جذب شده در بتن ارتباط دارد و در نمونه‌های بتنی حاوی 30 درصد ذرات لاستیک بیشترین جذب انرژی و کمترین عمق نفوذ مشاهده شده است. همچنین در درصد الیاف 0.3 درصد، کمترین عمق نفوذ در نمونه‌های بتنی حاوی ذرات لاستیک و دوده سیلیس مشاهده شده است. مطابق با فرمول (9) [14] قطر میانگین ناحیه آسیب دیده، از قطر کوچک ناحیه آسیب دیده و قطر بزرگ ناحیه آسیب دیده به دست آمده است. با افزودن ذرات لاستیک به بتن عمق نفوذ گلوله در بتن و قطر ناحیه آسیب دیدگی نمونه بتنی نسبت به نمونه بتن نرمال تغییر کرده است. در حین فرایند ضربه، امواج فشاری در داخل نمونه بتنی به صورت امواج کروی ایجاد شده و وقتی که این امواج به نواحی سطحی بتن می‌رسند به صورت موج کششی منعکس می‌شوند وقتی که دامنه موج کششی از تنش کششی دینامیکی تجاوز کرد بتن ترک می‌خورد، در ادامه، باقیمانده موج کششی وقتی به نواحی سطحی بتن می‌رسد به صورت موج فشاری منعکس می‌شود و این فرایند تکرار می‌شود تا ترک‌های بعدی در بتن ایجاد گردد و موج باقیمانده از مقدار موج کششی دینامیک کوچکتر شود [15]. همان‌طور که در شکل 20 مشاهده می‌شود، در نمونه‌های بتنی حاوی 40 درصد ذرات لاستیک، دوده سیلیس و 0.3 درصد الیاف پلی‌پروپیلن کمترین قطر ناحیه آسیب‌دیدگی مشاهده شده است.

$$D_{eq} = \sqrt{D_{min} \times D_{max}} \quad (9)$$

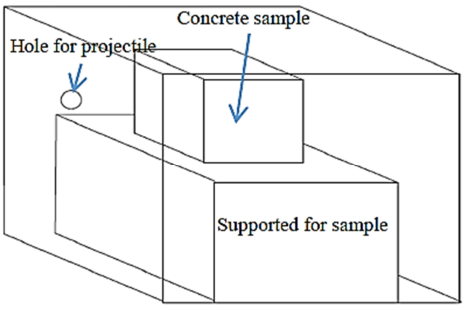


Fig. 15 Chamber for concrete sample in gas gun device

شکل 15 محفظه برای نمونه‌های بتنی در دستگاه تفنگ گازی

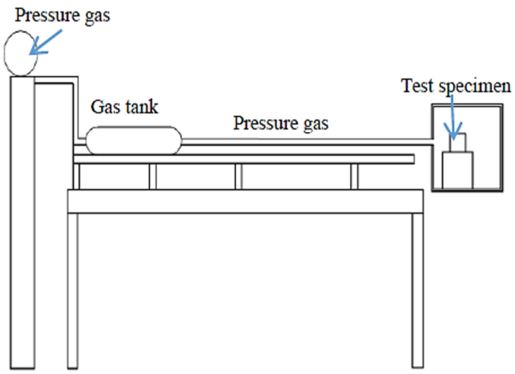


Fig. 16 Gas gun device

شکل 16 دستگاه تفنگ گازی

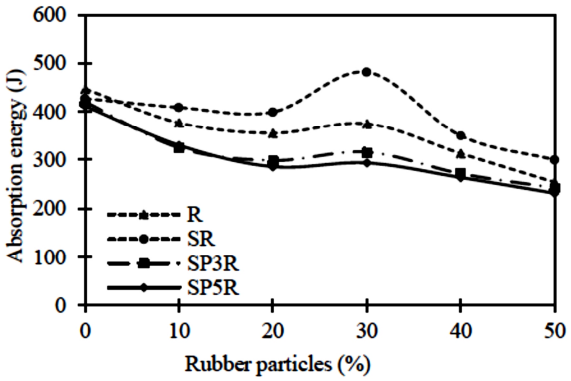


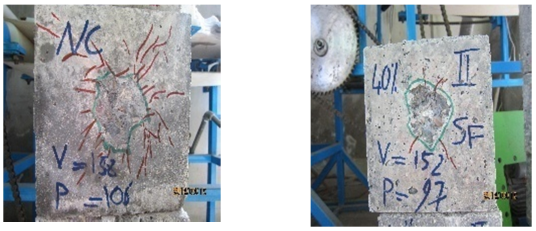
Fig.14 Absorption energy of rubberized concrete beam with silics fume and polypropylene

شکل 14 انرژی جذب شده توسط تیر بتنی حاوی ذرات لاستیک، دوده سیلیس و الیاف پلی پروپیلن

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2025-04-03]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.10.21.2]

Fig. 17 Projectile used in impact with gas gun device

شکل 17 گلوله استفاده شده در ضربه با تفنگ گازی



(1) (2)

Fig. 18 Concrete after impact with gas gun (1) Normal concrete (2) Rubberized concrete contained 40% rubber and silica fume

شکل 18 بتن بعد از ضربه توسط تفنگ گازی (1) بتن نرمال (2) بتن حاوی 40 درصد ذرات لاستیک و دوده سیلیس

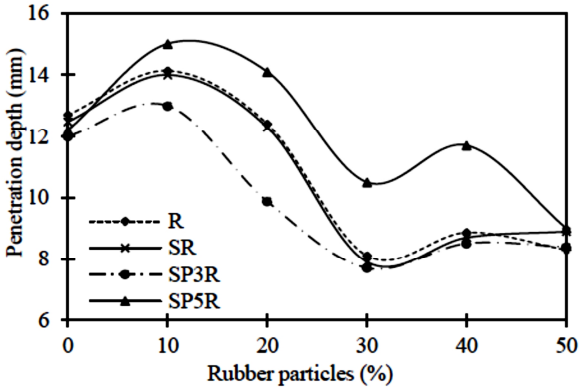


Fig. 19 Penetration depth of rubberized concrete with silica fume and polypropylene fiber

شکل 19 عمق نفوذ بتن حاوی ذرات لاستیک، دوده سیلیس و الیاف پلی‌پروپیلن

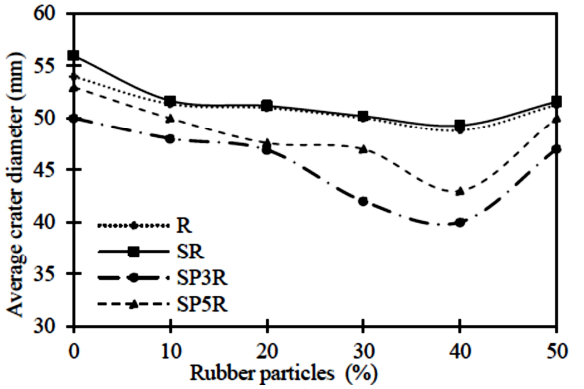


Fig. 20 Crater average diameter of rubberized concrete with silica fume and polypropylene fiber

شکل 20 میانگین قطر ناحیه آسیب دیده بتن حاوی ذرات لاستیک، دوده سیلیس و الیاف پلی‌پروپیلن

6- نتیجه‌گیری

در این مقاله خصوصیات فیزیکی، مکانیکی بتن حاوی ذرات لاستیک تایر ضایعاتی، دوده سیلیس و الیاف پلی‌پروپیلن بررسی شد و رفتار بتن مذکور تحت بارگذاری ضربه‌ای مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج بدست آمده حاکی از آن است که، میتوان ذرات لاستیک را به عنوان جانشین ریزدانه در بتن استفاده کرد. گرچه مقاومت مقاومت فشاری بتن حاوی ذرات لاستیک از بتن نرمال کمتر است ولی بتن مذکور سبک‌تر و جاذب صوت و ارتعاش می‌باشد. همچنین به منظور افزایش مقاومت بتن‌های حاوی ذرات لاستیک، از پوزولان دوده سیلیس به عنوان جانشین درصدی از وزن سیمان استفاده شد و الیاف پلی‌پروپیلن نیز به دلیل افزایش انعطاف‌پذیری به بتن اضافه گردید.

در آزمون‌های مختلف، با توجه به رفتار نرمتری که بتن حاوی ذرات لاستیک نسبت به بتن نرمال از خود نشان داد، بتن تحت آزمون ضربه توسط چکش پرتابی و تفنگ گازی قرارگرفت. در آزمون ضربه توسط چکش پرتابی، ارتفاع نمونه‌های تیر بتنی ثابت فرض شد و تکیه‌گاه ساده برای تیر در نظر گرفته شد. نتایج حاکی از این بود که بتن در درصد بهینه 30 از ذرات لاستیک، دوده سیلیس و 0.3 درصد الیاف پلی‌پروپیلن بیشترین کرنش و انعطاف پذیری را نشان داده است. همچنین حداکثر انرژی جذب شده توسط تیر بتنی برای نمونه‌های با درصد بهینه 30 از ذرات لاستیک و دوده سیلیس به دست آمده است.

در فرایند ضربه توسط تفنگ گازی، کمترین عمق نفوذ و قطر ناحیه آسیب‌دیدگی توسط گلوله، در نمونه‌های بتنی حاوی 30 و 40 درصد ذرات لاستیک، دوده سیلیس و 0.3 درصد الیاف پلی‌پروپیلن مشاهده شده است.

با توجه به نتایج به دست آمده، از بتن مذکور می توان در ساخت پناهگاه‌های نظامی، موج شکن‌ها، بتن محافظ وسط جاده و هر مکانی که احتمال قرار گرفتن در معرض بار ضربه را دارد استفاده کرد.

7- فهرست علایم

C_l	سرعت عبور امواج التراسونیک از نمونه بتنی (ms^{-1})
D_{eq}	میانگین قطر ناحیه آسیب دیده در نمونه بتنی (mm)
D_{min}	قطر کوچک ناحیه آسیب دیده در نمونه بتنی (mm)
D_{max}	قطر بزرگ ناحیه آسیب دیده در نمونه بتنی (mm)
E_d	مدول الاستیسیته دینامیکی (MPa)
E_s	مدول الاستیسیته (MPa)
g	شتاب جاذبه زمین (ms^{-2})
h	ارتفاع پرتاب وزنه در دستگاه چکش پرتابی (m)
I	ممان اینرسی مقطع تیر بتنی (m^4)
K	سختی تیر بتنی (N/m)
L	طول تیر (m)
m	جرم گلوله پرتابی در دستگاه تفنگ گازی (kg)
R	بتن حاوی ذرات لاستیک بهینه در اندازه 3-5 میلی‌متر (%)
RI	بتن حاوی ذرات لاستیک در اندازه 1-0 میلی‌متر (%)
RII	بتن حاوی ذرات لاستیک در اندازه 3-1 میلی‌متر (%)
RIII	بتن حاوی ذرات لاستیک در اندازه 5-3 میلی‌متر (%)
SF	بتن حاوی دوده سیلیس
SR	بتن حاوی ذرات لاستیک بهینه در اندازه 5-3 میلی‌متر (%)
SP3R	بتن حاوی ذرات لاستیک بهینه در اندازه 5-3 میلی‌متر (%)، دوده سیلیس و الیاف پلی پروپیلن (0.3 %)
SP5R	بتن حاوی ذرات لاستیک بهینه در اندازه 5-3 میلی‌متر(%)، دوده

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2025-04-03]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.10.21.2]

سیلیس و الیاف پلی پروپیلن (0.5 %)

V سرعت برخورد وزنه پرتابی به تیر بتنی در دستگاه چکش پرتابی (ms^{-1})

علایم یونانی

ΔE انرژی جذب شده

ΔX تغییر مکان افقی تیر(m)

ϑ ضریب پواسون

ρ چگالی (kgm^{-3})

8- مراجع

[1] L. Daudeville, Y. Malécot, Concrete structures under impact, *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, Vol. 15, pp. 101-140, 2011.

[2] T. Krauthammer, M. Zineddin, Structural concrete slabs under localized impact, *International Jurnal of Mpact Engineering*, Vol. 34, pp. 1517-1534, 2007.

[3] M. Chakradhara Raoa, S.K. Bhattacharyya b, S.V. Barai, Behaviour of recycled aggregate concrete under drop weight impact load. *Construction and Building Materials*, Vol. 25, pp. 69-80, 2011.

[4] W. J. Canwell, J. Morton, Comparition of the low and high velocity impact responses of CFRP, *Composites*, Vol. 20, pp. 545-551, 1989.

[5] L. Feng, Study of impact performance of rubber reinforced concrete, *Construction and Building Materials*, Vol. 36, pp. 604-616, 2012.

[6] R. Cairns, H. Kew, M. Kenny, The use of recycled rubber tyres in concrete construction. Final Report, *The Onyx Environmental Trust, University of Strathclyde, Glasgow*, pp. 135-142, 2004.

[7] C. Albano, Influence of scrap rubber addition to Portland concrete composites, destructive and non-destructive testing, *Compos Structure*, Vol. 71, pp. 439-446, 2005.

[8] M. Aiello, F. Leuzzi, Waste tyre rubberized concrete, properties at fresh and hardened state, *Waste Manage*, Vol. 30, pp. 1696-704, 2010.

[9] G. Skripkiunas, A. Grinys, Deformation properties of concrete with rubber waste additives, *Materials Science*, Vol. 13, pp. 219-223, 2007.

[10] A. Sadrmomtazi, R. Zarshin, The effects of polypropylene fibers and rubber particles on mechanical properties of cement composite containing rice husk ash, *Procedia Engineering*, Vol. 10, pp. 3608-3615, 2011.

[11] M. Turki, Microstructure, physical and mechanical properties of mortar-rubber aggregates mixtures, *Construction and Building Materials*, Vol. 23, pp. 2715–2722 , 2009.

[12] M. Rahman, M. Usman, A. Al-Ghalib, Fundamental properties of rubber modified self-compacting concrete (RMSCC), *Construction and Building Materials*, Vol. 36, pp. 630-637, 2012.

[13] H.J.F. DIÓGENES, Determination of modulus of elasticity of concrete from the acoustic response, *IBRACON Structures and Materials Journal*, Vol. 4, pp. 792-813, 2011.

[14] AN. Dancygier,DZ. Yankelevsky, Response of high performance concrete plates to impact of non-deforming projectiles, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 34, pp. 1768-1779, 2007.

[15] T.H. Almusallam, N.A. Siddiqui, Response of hybrid-fiber reinforced concrete slabs to hard projectile impact, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 58, pp. 17-30, 2013.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2025-04-03]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.10.21.2]