

تأثیر استفاده از ترکیب نانو سیلیس و متاکائولن در بتن حاوی لاستیک ریزدانه دانه بازیافتی بر مقاومت فشاری و کششی

نوید چلنگران^۱، محمدهدی جباری^۲

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، واحد قشم، دانشگاه آزاد اسلامی، قشم، ایران

۲- عضو هیئت علمی، گروه مهندسی عمران، واحد شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایران.

آدرس پست الکترونیکی نویسنده رابط jabbari@iaushiraz.ac.ir

چکیده

سال‌هاست که لاستیک فرسوده خودروها و نبودن راهی مناسب برای بازیافت یا استفاده دوباره آن‌ها، باعث مشکلات زیست‌محیطی شده است. به علت زیاد بودن چقرمگی لاستیک، می‌توان از این خصوصیت برای افزایش چقرمگی بتن استفاده نمود که در صورت خرد کردن لاستیک، می‌توان خرده لاستیک را جایگزین بخشی از سنگ‌دانه بتن کرد و مقادیر بسیار زیادی از لاستیک فرسوده را در بتن‌ریزی‌های حجیم مصرف نمود؛ اما همین جایگزینی باعث کاهش معیارهای مقاومتی بتن می‌گردد. هنگامی می‌توان از خرده لاستیک بازیافتی در بتن استفاده کرد که بتوان ضعف مقاومتی بتن را جبران کرد. در این پژوهش ۱۳ طرح اختلاط موردبررسی قرار گرفت. لاستیک ضایعاتی با اندازه ۱ تا ۳ میلی‌متر جایگزین ۵، ۱۰ و ۱۵٪ از ماسه شده و به جهت جبران کاهش معیارهای مقاومتی و همچنین افزایش مقاومت از ترکیب دو افزودنی نانو سیلیس و متاکائولن با مقادیر بهینه استفاده شده و مقاومت فشاری و کششی (برزیلین) اندازه‌گیری شده است. نتایج حاکی از تأثیرات مثبت استفاده از دو افزودنی نانو سیلیس و متاکائولن بر مقاومت فشاری و کششی بتن حاوی خرده لاستیک می‌باشد. مشاهده می‌گردد با اضافه شدن نانو سیلیس و متاکائولن به طرح مخلوط، مقاومت فشاری و کششی ۵ الی ۱۰ درصد افزایش می‌یابد.

کلمات کلیدی: نانو سیلیس، متاکائولن، مقاومت فشاری، خرده لاستیک

۱. مقدمه

سالانه بیش از ۲۴۲ میلیون تیر فرسوده فقط در آمریکا دور انداخته می‌شود، این مقدار فقط متعلق به کشور آمریکا بوده و ۱،۲٪ از وزن کل ضایعات شهری را به خود اختصاص داده است [۱]. جدا از لاستیک ضایعات شهری، سالانه چند بیلیون لاستیک در دره‌ها دفن می‌گردد یا به آتش کشیده می‌شود که به‌غیراز آلودگی‌های محیط زیستی، بروی سلامتی انسان نیز تأثیرات مخرب دارد [۲].

اضافه کردن خرده لاستیک به آسفالت، باعث افزایش پلاستیسیته آسفالت شده و در انقباض و انبساط دمایی، از ترک خوردن و جمع شدگی آسفالت جلوگیری می‌کند [۳]. در سال‌های اخیر تحقیقات گسترده‌ای پیرامون استفاده و کاربرد خرده لاستیک در بتن شده است. بررسی تأثیر اندازه لاستیک بر خواص مقاومتی بتن نشان داده که اگرچه مقاومت بتن حاوی لاستیک کاهش می‌یابد ولی ظرفیت پلاستیک بتن به‌طور قابل توجهی افزایش می‌یابد [۴]. جایگزینی خاکستر لاستیک تیر به‌عنوان بخشی از ماسه، باعث کاهش هوای موجود در بتن، افزایش زمان گیرش، افزایش مقاومت فشاری و خمشی می‌گردد، همچنین تأثیرات مثبت مقاومتی در برابر آسیب‌های ذوب و یخ‌بندان دارد [۵]. استفاده از حجم کم لاستیک در بتن، خطر پوسته‌شدن ناگهانی بتن در دماهای زیاد را کاهش می‌دهد [۶]. با جایگزینی لاستیک به‌جای ماسه باعث به تعویق افتادن پیدایش اولین ترک در بتن، کاهش درصد ناحیه ترک و افزایش انعطاف‌پذیری بتن می‌گردد [۷]. اگر دانه‌های لاستیکی دارای سطح خشن باشند و یا با آب یا اسید، پیش عمل‌آوری شده باشند، چسبندگی بهتری با مخلوط بتن خواهند داشت و ممکن است منجر به کسب مقاومت فشاری بهتری شود [۸].

با جایگزینی خرده لاستیک به جای ریزدانه مقاومت فشاری حدوداً ۶۵٪ کاهش می‌یابد و با جایگزینی خرده لاستیک به جای درشت‌دانه، مقاومت فشاری حدوداً ۸۵٪ کاهش خواهد یافت [۹]. با اضافه کردن خرده لاستیک با اندازه ۴٫۷۵ میلی‌متر به مقدار ۱ تا ۱۰٪ وزنی سیمان به بتن، تغییر چندانی در مقاومت فشاری بتن مشاهده نشده است [۱۰]. یکی از عواملی که باعث کاهش مقاومت بتن در طرح‌های حاوی خرده لاستیک می‌گردد این است که سوراخ‌های ریز موجود در دانه‌های لاستیکی از آب پر می‌شود و موجب ایجاد حفرات می‌گردد [۱۱]. بتن حاوی درشت‌دانه لاستیکی بار فشاری زیادی را پس از گسیختگی تحمل می‌کند و تغییر مکان‌های زیادی را بدون متلاشی شدن به نمایش می‌گذارد. این جابجایی‌ها و تغییر شکل‌ها، پس از باربرداری قابل بازگشت هستند. این رفتار نشان‌دهنده جذب انرژی زیاد بتن حاوی لاستیک می‌باشد [۱۱].

۲. برنامه آزمایشگاهی

در این پژوهش، در ابتدا طرح مخلوط بر اساس ACI به‌گونه‌ای طراحی گردید که اسلامپ بین ۵۰ الی ۷۰ میلی‌متر باشد. مقاومت فشاری برای نمونه‌ها با ابعاد ۱۵*۱۵ سانتی‌متر در سنین ۱۴٫۷ و ۲۸ روز اندازه‌گیری شده و مقاومت کششی و مدول الاستیسیته با ابعاد استوانه ۳۰*۱۵ سانتی‌متر ساخته و برای سن ۲۸ روزه اندازه‌گیری شده است. هر افزودنی به‌صورت جداگانه، برای سه درصد متفاوت جایگزینی معیارهای مقاومتی بررسی گردید. در آخر مقاومت فشاری بهینه نانو سیلیس، متاکائولن اندازه‌گیری و با بیشترین مقدار وزنی خرده لاستیک ترکیب گردید.

۲-۱. مصالح

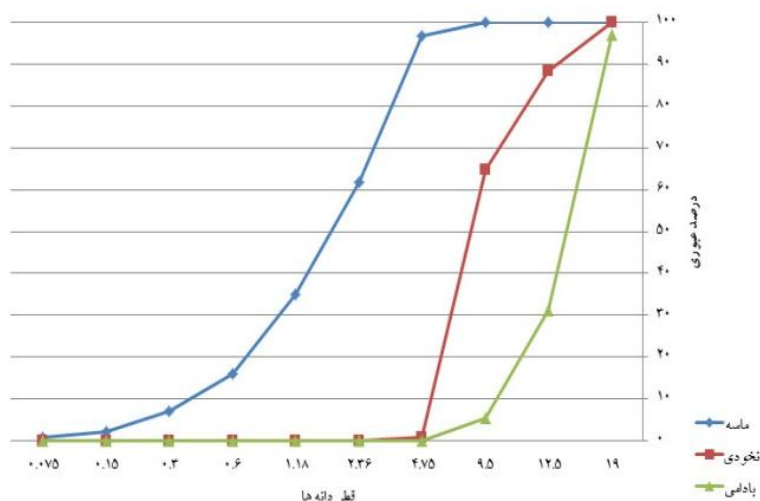
سیمان مورد استفاده در این پژوهش تیپ ۲ فارس نو می‌باشد، این سیمان مقاومت در برابر حمله سولفات و کلرایدها بوده و دارای گرمای هیدراسیون کمتری می‌باشد. آنالیز شیمیایی این سیمان در جدول شماره ۱ آمده است. متاکائولن مورد استفاده در این پژوهش ساخته‌شده توسط شرکت 20micron می‌باشد که آنالیز شیمیایی آن در جدول شماره ۱ موجود می‌باشد.

پودر نانو سیلیس مصرف‌شده، از شرکت نانو ساو خریداری‌شده، این نوع نانو سیلیس دارای ابعاد ۲۰ نانومتر می‌باشد و آنالیز شیمیایی این پودر در جدول شماره ۱ توضیح داده شده است.

جدول ۱- ساختار شیمیایی مواد سیمانی مورد استفاده

ترکیب شیمیایی (%)	سیمان	متاکائولن	نانو سیلیس
Sio2	۲۱	۵۱٫۸۵	۹۸
Al2O3	۵٫۴	۴۳٫۸۷	-
Fe2O3	۴٫۲۱	۰٫۹۹	۰٫۲۹۴
CaO	۶۳٫۵۹	۰٫۲	۰٫۳۹۳
MgO	۱٫۷	۰٫۱۸	-
SO3	۱٫۸	-	۰٫۱۸۵
K2O	۰٫۸	۰٫۱۲	-
Na2O	۰٫۱۲	۰٫۰۱	۰٫۳۲۸
L.O.I	۱٫۳۸	۰٫۵۷	-

لاستیک استفاده شده از نوع تایر ضایعاتی خودرو بوده که در دو اندازه متفاوت خرد شده است. لاستیک‌های خرد شده با ابعاد 1 الی 3 میلی‌متر بانام Pr نام‌گذاری شده است. لاستیک ضایعاتی حاوی سیم و پود می‌باشد که جهت حصول بهترین نتیجه، پود و سیم اضافی با تکان دادن و چرخاندن خرده لاستیک‌ها در سطل، از لاستیک جداسازی شده است. ماسه مصرفی از نوع معدنی بوده و با وزن مخصوص خشک ۲۵۹۰ و حداکثر بعد ۴,۷۵ میلی‌متر می‌باشد که نمودار دانه‌بندی آن در تصویر ۱ آمده است. در طرح اختلاط از شن نخودی با وزن مخصوص خشک ۲۶۲۰ و حداکثر بعد ۱۲,۵ میلی‌متر و شن بادامی با وزن مخصوص خشک ۲۶۰۰ و حداکثر بعد ۱۹ میلی‌متر استفاده شده است.



شکل ۱- منحنی دانه‌بندی سنگ‌دانه

فوق روان کننده مصرفی بانام تجاری super plast P.C 5000N بر پایه کربوکسیلات اتر بوده که با ایجاد ممانعت فضایی بین ذرات، باعث پخش و یکنواخت شدن بتن و مانع از به هم چسبیدن دوباره ذرات می‌گردد همچنین کاهش ۳۰٪ آب اختلاط را در پی دارد.

۲-۲. طرح مخلوط

طرح اختلاط با توجه به دستورالعمل استاندارد aci 211 طراحی گردید [۱۲]. طرح بر اساس اشباع با سطح خشک محاسبه شده و رطوبت سنگ‌دانه از آب اختلاط کسر شده است. بدین منظور ۴ طرح اختلاط بتن با مقاومت هدف ۴۰ مگاپاسکال طراحی گردید که هرکدام از طرح‌های اختلاط شامل ۳ دسته هستند. نسبت آب به سیمان ۰,۲۹ لحاظ گردیده است و به‌واسطه کاهش و افزایش فوق روان کننده، مقدار اسلامپ اندازه‌گیری شده در تمامی طرح‌ها 50 ± 20 میلی‌متر بوده است. در هنگام ساخت بتن، ابتدا فوق روان کننده با آب ترکیب کرده و درون میکسر ریخته شده‌اند، سپس افزودنی (نانو سیلیس و یا متاکاژولن) را در آب ریخته، پس از آن سنگ‌دانه و سیمان، از درشت‌دانه تا ریزدانه وارد میکسر کرده و به مدت ۲ دقیقه، اختلاط توسط میکسر صورت پذیرفته است. در طرح‌های حاوی خرده لاستیک، جهت اختلاط بهتر، ابتدا خرده لاستیک را با ماسه ترکیب کرده سپس مانند طرح‌های قبل وارد میکسر کرده. پس از میکس کامل بتن، ابتدا اسلامپ بتن مشخص گردیده و سپس اقدام به نمونه‌برداری شده است، لازم به ذکر است که در تمامی نمونه‌برداری‌ها، قالب‌ها در سه لایه پر شده، هر لایه ۲۵ ضربه کوبیده شده و در نهایت صاف گردیده و در حوضچه نگه‌داری قرار داده شده‌اند. در جدول ۲، جزئیات طرح اختلاط بتن آمده است.

به علت جذب آب زیاد نانو سیلیس و متاکائولن، جهت ترکیب صحیح و یکنواخت مصالح، استفاده از فوق روان کننده قوی، اجتناب ناپذیر است و در صورت عدم استفاده از فوق روان کننده، طرح اختلاط با کاهش آب و عدم اختلاط صحیح مواجه خواهد شد.

جدول ۲- طرح مخلوط بتن

مشخصات نمونه	شن (kg/m ³)	ماسه (kg/m ³)	سیمان (kg/m ³)	نانو سیلیس (kg/m ³)	متاکائولن (kg/m ³)	آب (kg/m ³)	فوق روان کننده (kg/m ³)	لاستیک (kg/m ³)	اسلامپ (mm)
control	۹۹۲	۸۸۴,۰۶	۲۸۲,۶	-	-	۱۳۰,۰۲	۰,۸۵	-	۶۰
N 1%	۹۹۲	۸۸۴,۰۶	۲۷۹,۷	۲,۸	-	۱۳۰,۰۲	۰,۸۵	-	۴۵
N 3%	۹۹۲	۸۸۴,۰۶	۲۷۴,۱	۸,۴	-	۱۳۰,۰۲	۱,۱	-	۴۰
N 5%	۹۹۲	۸۸۴,۰۶	۲۶۸,۴	۱۴,۱	-	۱۳۰,۰۲	۱,۲	-	۳۵
M 5%	۹۹۲	۸۸۴,۰۶	۲۶۸,۴	-	۱۴,۱	۱۳۰,۰۲	۱,۱	-	۵۵
M 10%	۹۹۲	۸۸۴,۰۶	۲۵۴,۳	-	۲۸,۲	۱۳۰,۰۲	۱,۲	-	۶۰
M 15%	۹۹۲	۸۸۴,۰۶	۲۴۰,۲	-	۴۲,۳	۱۳۰,۰۲	۱,۳۵	-	۴۵
Pr 5%	۹۹۲	۸۳۹,۸۵	۲۸۲,۶	-	-	۱۳۰,۰۲	۰,۸۵	۴۴,۲	۵۵
Pr 10%	۹۹۲	۷۹۵,۶۵	۲۸۲,۶	-	-	۱۳۰,۰۲	۰,۹	۸۸,۴	۵۰
Pr 15%	۹۹۲	۷۵۱,۴۵	۲۸۲,۶	-	-	۱۳۰,۰۲	۱	۱۳۲,۶	۴۵
15%M.3%N.5%PR	۹۹۲	۸۳۹,۸۵	۲۳۱,۷	۸,۴	۴۲,۳	۱۳۰,۰۲	۱,۷	۴۴,۲	۴۵
15%M.3%N.10%PR	۹۹۲	۷۹۵,۶۵	۲۳۱,۷	۸,۴	۴۲,۳	۱۳۰,۰۲	۱,۸	۸۸,۴	۵۰
15%M.3%N.15%PR	۹۹۲	۷۵۱,۴۵	۲۳۱,۷	۸,۴	۴۲,۳	۱۳۰,۰۲	۱,۹	۱۳۲,۶	۵۵

۳. بحث و نتایج

مقاومت فشاری و مقاومت کششی طبق استانداردهای BS EN 12390 و ASTM C469 صورت پذیرفته است [۱۳]، [۱۴]. آزمایش مقاومت فشاری و مقاومت کششی بتن توسط دستگاه جک بتن شکن ۲۰۰ تن صورت پذیرفته است. لازم به ذکر است سرعت بارگذاری در تمامی آزمایشها ۰,۵ Mpa/s به صورت ثابت در نظر گرفته شده است. برای انجام آزمایش مقاومت فشاری، برای تمامی طرحهای اختلاط ۹ نمونه مکعبی ۱۵*۱۵ سانتی متر، در سنین ۲۸,۱۴,۷ روز ساخته شده اند. همچنین برای آزمایش کشش (برزیلین) که توسط محفظه برزیلین صورت پذیرفته است، برای هر طرح اختلاط ۳ نمونه ۱۵*۳۰ در سن ۲۸ روز مورد آزمایش قرار گرفته است. در تصاویر ۲ - الف دستگاه جک بتن شکن جهت سنجش مقاومت فشاری بتن و در تصویر ۲-ب دستگاه جک بتن شکن حاوی محفظه برزیلین جهت سنجش مقاومت کششی به تصویر کشیده شده است.



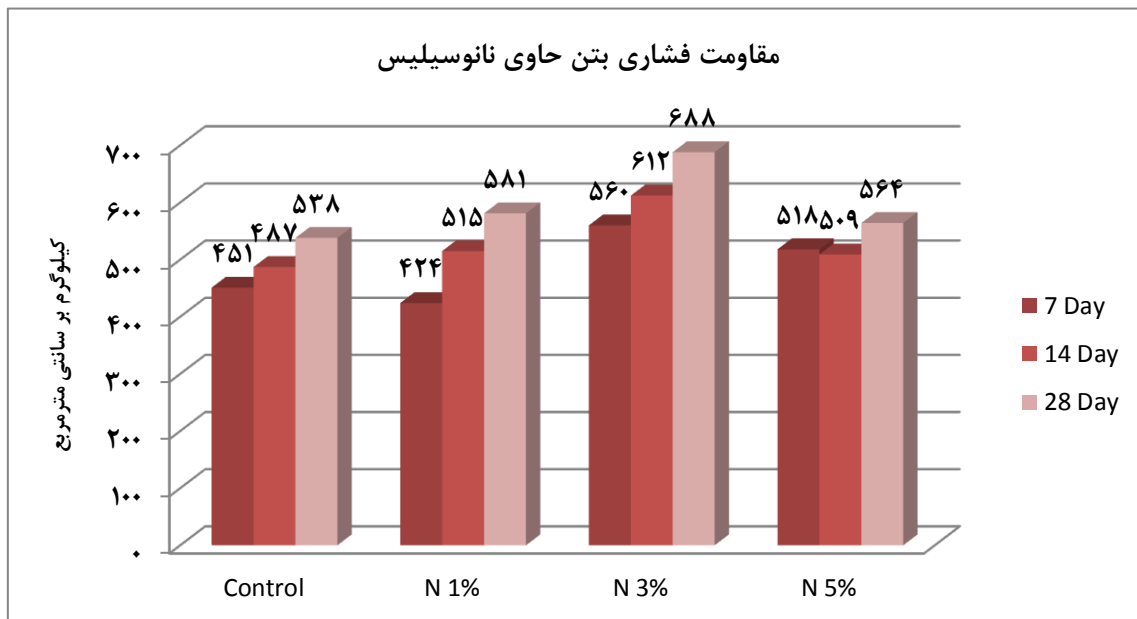
تصویر ۲-ب- آزمون کشش (برزیلین)



تصویر ۲-الف- سنجش مقاومت فشاری بتن

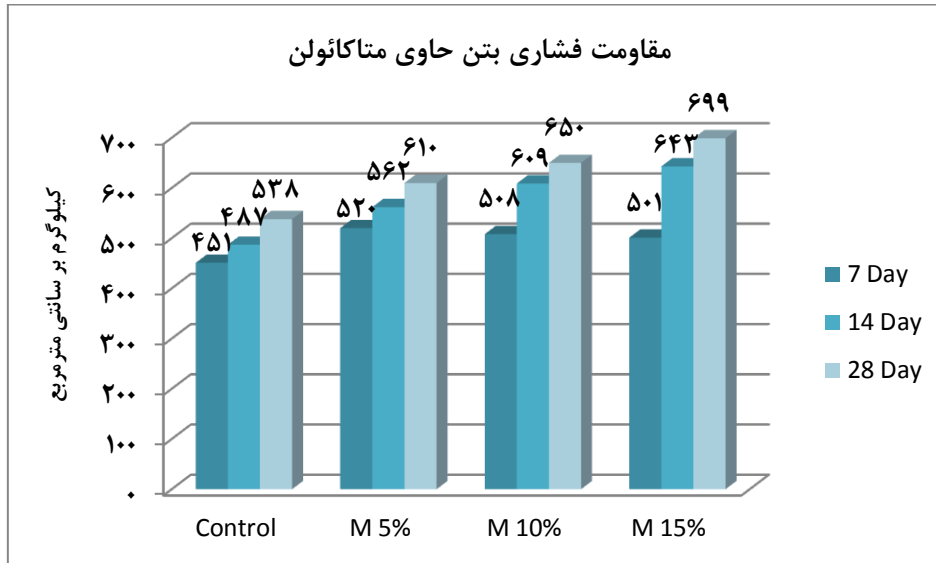
۱-۳. مقاومت فشاری

در تصویر ۳ مشاهده می‌شود، مقاومت فشاری در طرح‌های حاوی نانو سیلیس، بیشترین افزایش مقاومت را نمونه‌های حاوی ۳٪ نانو سیلیس داشتند که مقاومت ۲۸ روزه به نسبت نمونه شاهد تقریباً ۲۵٪ افزایش مقاومت داشته است.



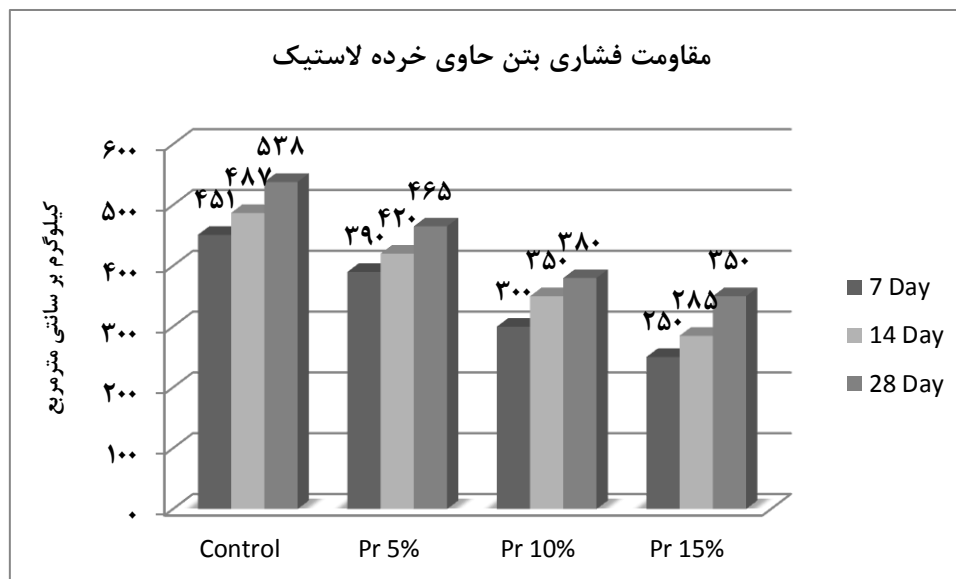
تصویر ۳- مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی نانو سیلیس

در نمونه‌های حاوی متاکائولن، بیشترین مقاومت فشاری را نمونه‌های حاوی ۱۵٪ متاکائولن داشتند که تقریباً ۳۰٪ افزایش مقاومت فشاری را کسب کرده‌اند، در تصویر ۴، نمودار تغییرات مقاومت فشاری بتن حاوی متاکائولن آورده شده است.



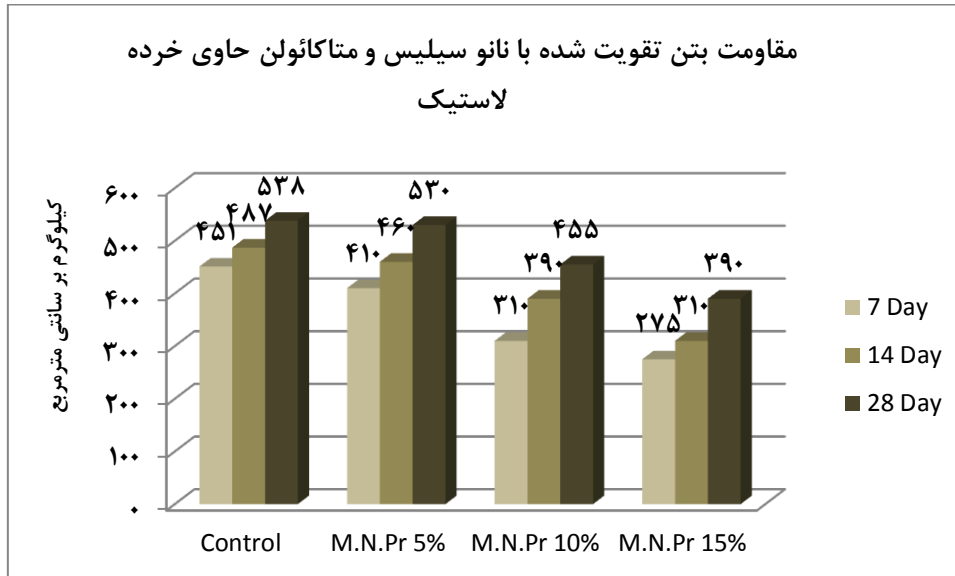
تصویر ۴- مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی متاکائولن

در نمونه‌های حاوی لاستیک که در تصویر ۵ به تصویر کشیده شده‌اند، بیشترین مقاومت را نمونه‌های حاوی ۵٪ خرده لاستیک کسب کرده و با افزایش مقدار لاستیک، شاهد کاهش مقاومت فشاری خواهیم بود.



تصویر ۵- مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی لاستیک

با ترکیب مقادیر بهینه مقاومتی، جهت افزایش خصوصیات مقاومتی بتن، مشاهده می‌گردد، نمونه حاوی ۱۵٪ خرده لاستیک و مقادیر بهینه نانو سیلیس و متاکائولن، مقاومت فشاری ۳۹۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع را کسب نموده است. نتایج ترکیب این افزودنی‌ها در تصویر ۶ آمده است.



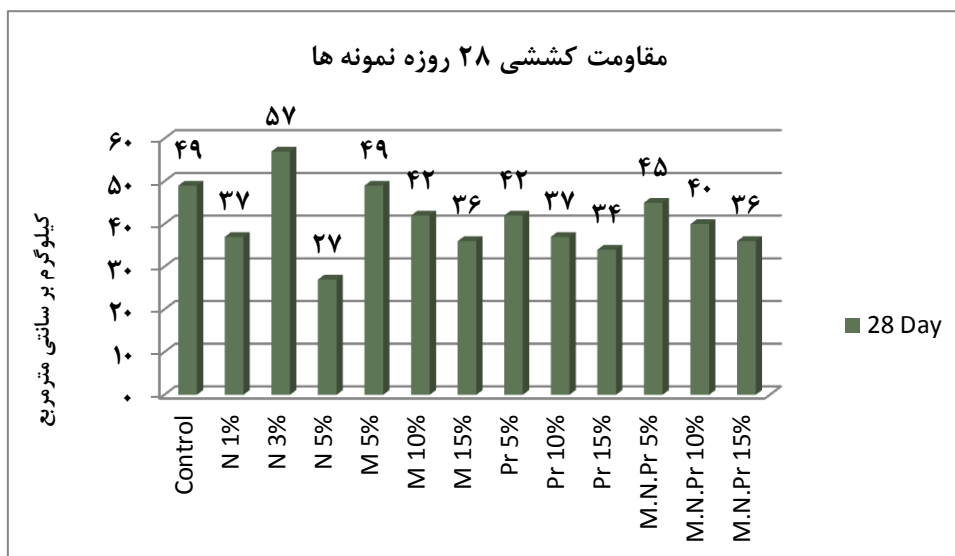
تصویر ۶- مقاومت فشاری نمونه‌های ترکیب نانو سیلیس، متاکائولن و خرده لاستیک

۲-۳. مقاومت کششی

جهت انجام آزمایش مقاومت کششی، نمونه‌های استوانه‌ای ۳۰*۱۵ سانتی‌متری را درون محفظه برزیلین قرار داده و درون دستگاه جک بتن شکن قرار داده، پس از شکسته شدن نمونه، نیروی اعمالی را در رابطه (۱-۱) قرار داده و مقاومت کششی را محاسبه کرده‌ایم.

$$T = \frac{P}{\pi \times l \times d}$$

رابطه (۱-۱):



تصویر ۷- مقاومت کششی نمونه‌ها در تمامی طرح‌های اختلاط

همان گونه که در تصویر ۷ مشخص شده است، نمونه‌های حاوی ۱۵٪ متاکائولن، ۳٪ نانو سیلیس و ۵٪ خرده لاستیک بیشترین مقدار مقاومت کششی را کسب نموده‌اند.

۴. نتیجه‌گیری

- استفاده از خرده لاستیک در بتن باعث کاهش مقاومت فشاری و کششی بتن می‌گردد.
- باوجود کاهش معیارهای مقاومتی بتن حاوی لاستیک، دارای شکست نرم‌تر و تغییر شکل بسیار کمتری نسبت به بتن معمولی می‌باشد.
- بتن حاوی خرده لاستیک، دارای رنگ تیره‌تر و دارای یکپارچگی بهتر از بتن معمولی می‌باشد.
- درصد بهینه مقاومتی خرده لاستیک ۵٪ می‌باشد و درصد بهینه مقاومتی نانو سیلیس ۳٪ و متاکائولن ۱۵٪ می‌باشد.
- در صورت استفاده از نانو سیلیس و یا متاکائولن در طرح اختلاط، به علت جذب آب زیاد این افزودنی‌ها، حتماً باید از فوق روان کننده استفاده گردد و ترجیحاً نسبت آب بیشتر از ۰,۴.
- با افزایش درصد جایگزینی متاکائولن، چسبندگی بتن افزایش می‌یابد.

۵- قدردانی

با تشکر فراوان از مسئول آزمایشگاه عمران دانشگاه آزاد واحد شیراز جناب آقای مهندس هادی فاطمی بابت تمامی زحمات، لطف‌ها و همکاری‌های ایشان در جهت انجام این پژوهش.

مراجع

- [1] Everett, Jess W., and Salim Douglah. "Scrap tire disposal(II): Case study and recommendations." *Journal of Solid Waste Technology and Management* 25, no. 1 (1998): 51-60.
- [2] Amir Khanian, Serji. "Utilization of waste materials in highway industry: a literature review." *Journal of solid waste technology and management* 24, no. 2 (1997): 94-103.
- [3] Epps, Jon A. *Uses of recycled rubber tires in highways*. Vol. 198. Transportation Research Board, 1994.
- [4] Lee, Hee Suk, Hosin Lee, Jang Soo Moon, and Hwan Wook Jung. "Development of tire added latex concrete." *Materials Journal* 95, no. 4 (1998): 356-364.
- [5] Al-Akhras, Nabil M., and Mohammed M. Smadi. "Properties of tire rubber ash mortar." *Cement and concrete composites* 26, no. 7 (2004): 821-826.
- [6] Hernández-Olivares, F., and G. Barluenga. "Fire performance of recycled rubber-filled high-strength concrete." *Cement and concrete research* 34, no. 1 (2004): 109-117.
- [7] Botros, Amany G. "Micheal," Improving plastic shrinkage cracking of concrete using recycled waste rubber crumbs." *HBRC Journal* 3, no. 3 (2007).
- [8] Rostami, H., J. Lepore, T. Silverstraim, and I. Zundi. "Use of recycled rubber tires in concrete." In *Proceedings of the international conference on concrete*, vol. 1993, pp. 391-399. London, United Kingdom: Thomas Telford Services Ltd, 2000.
- [9] Eldin, Neil N., and Ahmed B. Senouci. "Rubber-tire particles as concrete aggregate." *Journal of materials in civil engineering* 5, no. 4 (1993): 478-496.

- [10] Huynh, Hai, Dharmaraj Raghavan, and C. Ferraris. "Rubber particles from recycled tires in cementitious composite materials." NISTIR 5850 (1996): 23.
- [11] Raghavan, Dharmaraj, H. Huynh, and C. F. Ferraris. "Workability, mechanical properties, and chemical stability of a recycled tyre rubber-filled cementitious composite." Journal of Materials science 33, no. 7 (1998): 1745-1752.
- [12] American Concrete Institute. Committee 211. (1977). Recommended practice for selecting proportions for normal and heavyweight concrete (ACI 211.1-77). Detroit :The Institute,
- [13] Standard, A. S. T. M. C496 (2003). Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens. Annual Book of ASTM Standards, 4(2).
- [14] ASTM, C39. (1996), Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens. Annual book of ASTM standards, 4.