

بررسی آزمایشگاهی اثر مصالح خرده آسفالتی و سرباره فولاد بر خصوصیات روسازی بتنی خودمتراکم (SCC)

محسن عموزاده عمرانی *

استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد سوادکوه، دانشگاه آزاد اسلامی، سوادکوه، ایران

قاسم طهموری

دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، واحد آیت الله آملی، دانشگاه آزاد اسلامی، آمل، ایران

پیمان پیری

گروه مهندسی عمران، واحد آیت الله آملی، دانشگاه آزاد اسلامی، آمل، ایران.

چکیده

در پژوهش حاضر، اثر استفاده از خرده آسفالت بازیافتی (RAP) به عنوان جایگزین بخشی از سنگ دانه طبیعی و سرباره فولاد به عنوان جایگزین بخشی از سیمان، در مخلوط‌های بتنی خودمتراکم (SCC) جهت ساخت روسازی راه‌ها مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور، آزمایش‌های بتن تازه و بتن سخت شده روی نمونه‌ها انجام شد. نتایج نشان داد تأثیر استفاده از سرباره و خرده آسفالت، باعث کاهش مقاومت‌های فشاری، کششی و خمشی بتن خودمتراکم می‌شود؛ با این وجود، با جایگزینی تا ۲۵ درصد مصالح سنگی با مصالح خرده آسفالتی بازیافتی و ۳۰ درصد سیمان با سرباره، حداقل معیارهای قابل قبول استانداردها حاصل شد. برای طرح اختلاط‌های ترکیبی، طرح حاوی ۳۰ درصد خرده آسفالت جایگزین مصالح سنگی توأم با ۲۵ درصد سرباره جایگزین سیمان، نتایج مناسب‌تری نشان داد. بهینه‌ترین حالت استفاده از این مصالح، به ترتیب، استفاده تکی از ۳۰ درصد سرباره جایگزین سیمان و ۲۵ درصد خرده آسفالت جایگزین مصالح سنگی می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: روسازی بتنی خودمتراکم، خرده آسفالت بازیافتی، سرباره فولاد، بتن تازه، بتن سخت شده.

۱- مقدمه

کاهنده فولاد ضد زنگ (SSRS)^۶ در بتن خودمتراکم، بهترین نتایج مقاومت فشاری و سرعت پالس امواج اولتراسونیک را به دست آوردند. در نتیجه، می توان با کاهش ۴۳ درصدی هزینه ساخت بتن خودمتراکم سبب حفظ محیط زیست و بازیافت منابع شد [۱۳]. محققان با استفاده از سنگ دانه ی بتن بازیافتی و خرده آسفالت بازیافتی به جای سنگ دانه ی طبیعی در روسازی بتنی خودمتراکم دریافتند که جایگزینی نسبی سیمان با خاکستر بادی و سرباره، منجر به مقاومت فشاری ۲۸ روزه کوچک تری در مقایسه با نمونه شاهد شد. جایگزینی سنگ دانه درشت طبیعی با سنگ دانه ی بازیافتی باعث کاهش کارایی مقاومت کششی و فشاری مخلوط های بتن خودمتراکم شد [۱۴].

مطالعه محققان، نشان داد طرح اختلاط هایی با جایگزینی ۲۵٪ ریزدانه ی بازیافتی و طرح با جایگزینی ۲۵٪ درشت دانه ی بازیافتی در هر فاز، کمترین تغییرات منفی از لحاظ خواص مکانیکی و رئولوژیکی را نسبت به طرح شاهد داشته است؛ و با جایگزینی ۲۵٪ سنگ دانه ی بازیافتی و ۵٪ میکروسیلیس، خواص نزدیک تری نسبت به طرح شاهد اولیه دارد [۱۵].

پرهام و همکاران در پژوهشی دیگر میزان کارآمدی بتن خودمتراکم جهت استفاده در روسازی سطوح پروازی دریافتند عامل تعیین کننده در تأمین دوام بتن های خودمتراکم در برابر شرایط یخ زدن- آب شدن، عامل ماده افزودنی هوازا است. در ضمن با کاهش نسبت آب به سیمان و همچنین تغییر در میزان ماده سیمانی می توان تا حدودی این هدف را تأمین کرد [۱۶].

امروزه استفاده از مصالح خرده آسفالت بازیافتی و سرباره فولاد در راستای کاهش هزینه های جاری و همچنین کاهش و حذف مشکلات زیست محیطی به یکی مباحث مورد علاقه اکثر محققین تبدیل شده است. در چند سال اخیر، قیمت بالای سیمان و مصالح سنگی باعث شده به کارگیری مصالح ضایعاتی؛ مانند، خرده آسفالت و سرباره فولاد به عنوان مواد جدید در صنعت روسازی راه، در راستای حفظ منابع طبیعی و محیط زیست و نیز اقتصادی تر شدن زیرساخت های حمل و نقل مورد توجه باشد. استفاده از خرده آسفالت بازیافتی و سرباره فولاد در بتن خودمتراکم سبب کاهش

شبکه حمل و نقل هر کشور رگ های حیاتی آن کشور و از عظیم ترین سرمایه های ملی به حساب می آید؛ بنابراین توجه به ملاحظات اقتصادی و دوام سازه های بتنی موجود و کیفیت روسازی های بتنی به عنوان اجزای مهم این شبکه حائز اهمیت است [۱]. در این راستا، استفاده از بتن خودمتراکم در ساخت رویه های بتنی، انقلابی در صنعت راه سازی به شمار می آید [۲]. طرح اولیه بتن خودمتراکم در ابتدا در سال ۱۹۸۶ توسط اکامورا^۱ پیشنهاد گردید و در سال ۱۹۸۸ این بتن با نام اختصاری SCC^۲ به دنیا معرفی شد. بتن خودمتراکم به دلیل قابلیت جریان و چسبندگی بالای سنگ دانه ها نیازی به متراکم کردن آن نیست و بدون آن که جدا شدگی سنگ دانه ها رخ دهد تحت وزن خود حرکت کرده و متراکم می شود [۳، ۴ و ۵]. اطلاعاتی کافی در زمینه انتخاب مصالح سیمانی و مواد افزودنی و نسبت مورد نیاز آن ها برای ساخت بتن خودمتراکم وجود دارد، اما داده های محدودی در رابطه با انتخاب و ترکیب مصالح سنگی با توجه به تأثیر بسزای آن در خصوصیات بتن خودمتراکم موجود می باشد [۶ و ۷]. با جایگزینی مصالح ضایعاتی و بازیافتی با بخشی از سنگ دانه ها در این نوع بتن، می توان کمک زیادی به بهبود محیط زیست و کاهش هزینه تولید بتن نمود [۸ و ۹].

استفاده از بتن خودمتراکم در مهندسی عمران از چندین سال پیش با بکارگیری در ساخت پل ها و تونل ها، روسازی راه ها و سازه های مختلفی در جهان به سبب خواص و مزیت های آن رو به افزایش است [۱۰]؛ از جمله آن می توان به پل معلق آکاشی کای کیو^۳ در کوبه و آواجی ژاپن، ساخت دیواره های مخازن عظیم ال ان جی شرکت اوزاکا^۴، همچنین به علت تراکم بالای آرماتور در ستون های طبقات اولیه برج ۷۰ طبقه لندمارک یوکوهامای ژاپن اشاره کرد [۱۱]. در ایران می توان از مصرف بتن خودمتراکم در لاینینگ تونل رسالت تهران، ساخت پل طبقاتی شهید صدر و قطعات پیش ساخته برای عبور دستگاه های حفاری متروی شیراز نام برد [۱۲].

محققان با جایگزینی ۱۰۰٪ سنگ دانه ها با سرباره اکسید کننده فولاد ضد زنگ (SSOS)^۵ و با جایگزینی ۳۰٪ سیمان با سرباره

۴ - Osaka

۵- Stainless Steel Oxidizing Slag

۶ -Stainless Steel Reducing Slag

۱- Okamura

۲- self compacted concrete

۳ - Akashi-Kaikyo

از دیوی مصالح غرب تهران تهیه شد. برای ساخت نمونه‌ها از سیمان پرتلند تیپ II کارخانه سیمان تهران استفاده شده است. سیمان مورد استفاده از نظر شیمیایی، ملزومات استاندارد ملی شماره ۱۶۹۲ و از نظر فیزیکی، استانداردهای ملی شماره ۳۹۰ تا ۳۹۴ را برآورده می‌نماید. برای تهیه نمونه‌ها ترکیبات شیمیایی سیمان مورد استفاده در جدول ۴ آورده شده است.

در این پژوهش، از دانه‌بندی یکسانی برای تمام ترکیبات شامل مصالح سنگی، خرده آسفالت بازیافتی و سرباره فولاد استفاده شد تا شرایط یکسانی برای همه حالت‌ها در نظر گرفته شود. در شکل شماره ۱ نمودار دانه‌بندی خرده آسفالت، شکل ۲ نمودار دانه‌بندی درشت‌دانه و در شکل ۳ نمودار دانه‌بندی ریزدانه نشان داده شده است. محدوده دانه‌بندی مورد استفاده در این پژوهش مطابق دستورالعمل پیشنهادی مؤسسه سیمان آمریکا PCA^2 [۱۷] در جدول ۵ آورده شده است.

جدول ۱- ترکیب شیمیایی سرباره مصرفی

درصد	ترکیبات شیمیایی
۳۸/۲	SiO ₂
۹/۱۱	Al ₂ O ₃
۳۶/۶۸	CaO
۷/۶۷	MgO
۰/۸۱	Fe ₂ O ₃
۱/۵۲	MnO
۲/۳۱	S
۳/۸۷	سایر مواد

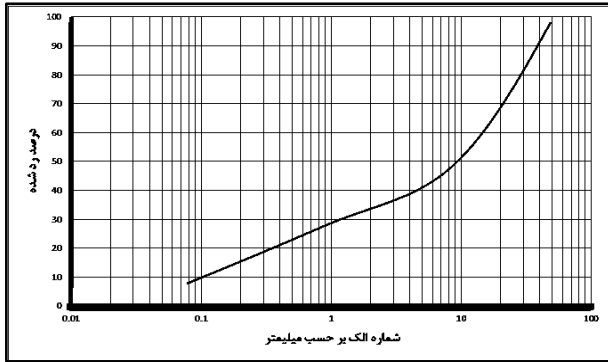
مقاومت فشاری، کششی و خمشی می‌شود. در پژوهش حاضر برای تعیین مقدار بهینه این مصالح بازیافتی، از درصد‌های مختلف آن‌ها استفاده شد و تأثیر جایگزینی مقادیر مختلف خرده آسفالت بازیافتی به جای سنگ‌دانه و سرباره فولاد به جای سیمان و اثر توأمان جایگزینی هر دو بر روی بتن تازه و سخت شده بررسی و با بتن شاهد (بدون خرده آسفالت و بدون سرباره فولاد) در سنین مختلف مقایسه شد، تا با تعیین درصد بهینه این مواد، مصرف مصالح سنگ-دانه و سیمان در بتن خودمترکم کاهش یابد.

۲- مواد و روش‌ها

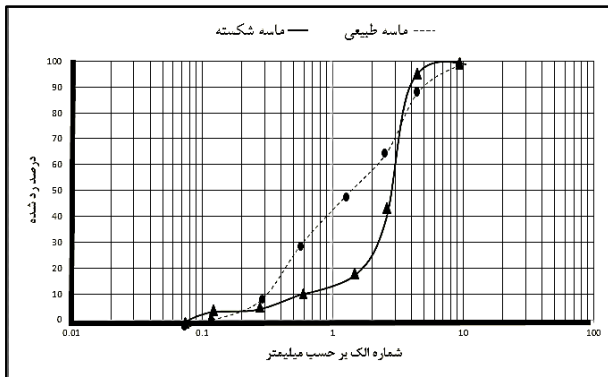
در پژوهش حاضر، پس از انتخاب مصالح، پودر سرباره فولاد با درصد‌های مختلف جایگزین سیمان و مصالح خرده آسفالتی بازیافتی جایگزین سنگ‌دانه‌های طبیعی با درصد‌های مختلف شد که در مجموع ۱۲ نوع طرح اختلاط ایجاد گردید. مصالح اصلی مورد استفاده در این پژوهش شامل مصالح سنگی، سیمان، خرده آسفالت بازیافتی، سرباره فولاد و آب است. مصالح سنگی مصرفی در این مطالعه از نوع سنگ شکسته می‌باشد. مشخصات سنگ‌دانه ریز و درشت طبق روش‌های آزمایش C3، C127 و C128 از استاندارد ASTM تعیین شده است. سرباره مورد استفاده در این پژوهش، که از نوع سرباره فولاد کوره اکسیژنی (BOF)^۱ یا حاصل فرایند کنورتر اکسیژنی است، و مطابق مشخصات شیمیایی جدول شماره ۱ از کارخانه فولاد مبارکه اصفهان تهیه شد. مشخصات فیزیکی مصالح سنگی و سرباره در جدول ۲ و خرده آسفالت در جدول ۳ نشان داده شده است. خرده آسفالت بازیافتی

جدول ۲- مشخصات مصالح سنگی و سرباره فولاد

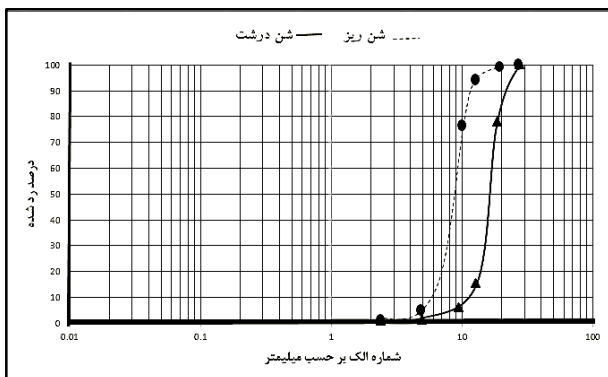
استاندارد	سرباره فولاد	مصالح سنگی	مشخصات
ASTM C131-06	۲۰	۱۸	حداکثر سایش (%)
ASTM C127	۳/۲۶	۲/۷۵	چگالی واقعی درشت‌دانه (گرم بر سانتیمتر مکعب)
ASTM C128	۲/۷۴	۲/۵۸	چگالی واقعی ریزدانه (گرم بر سانتیمتر مکعب)
ASTM C127	۱/۸	۱/۲	جذب مصالح درشت‌دانه (%)
ASTM C127	۳/۲	۲/۴	جذب مصالح ریزدانه (%)
-	-	۸۱	ارزش ماسه‌ای (%)
ASTM C125	۳/۶۱	۲/۷۶	مدول نرمی



شکل ۱- منحنی دانه‌بندی خرده آسفالت مورد استفاده در ساخت نمونه‌ها



شکل ۲- منحنی دانه‌بندی مصالح ریزدانه مورد استفاده در ساخت نمونه‌ها



شکل ۳- منحنی دانه‌بندی مصالح درشت‌دانه مورد استفاده در ساخت نمونه‌ها

۳- آزمایش‌های انجام شده

۳-۱- آزمایش‌های بتن تازه

۳-۱-۱- آزمایش جریان اسلامپ

این آزمایش، برای سنجش جریان آزادانه و افقی بتن خودمتراکم بدون وجود هیچ قیدی به جز اصطکاک صفحه جریان، برای اولین بار در ژاپن برای ارزیابی کارایی بتن در زیر آب مورد استفاده قرار گرفت. این آزمایش شاخصی از مقاومت در برابر جدایش می‌باشد. در ابتدا بتن تازه به داخل یک قالب به شکل مخروط ریخته می‌شود (شکل ۴). وقتی که مخروط به سمت بالا کشیده می‌شود فاصله‌ای که بتن پخش می‌شود اندازه غلظت بتن را نشان می‌دهد.

در این پژوهش برای ساخت نمونه‌ها از آب شهری (آشامیدنی) استفاده شده و از ۱۲ نوع طرح اختلاط استفاده گردید. در این طرح اختلاط‌ها سرباره فولاد با نسبت‌های ۰، ۳۰، ۵۰ و ۷۰ درصد جایگزین سیمان شد و خرده آسفالت با نسبت‌های ۰، ۲۵ و ۵۰ درصد جایگزین مصالح سنگی گردید (جدول ۶).

جدول ۳- مشخصات فیزیکی خرده آسفالت بازیافتی

نوع مصالح	خرده آسفالت
جذب آب (%)	۲/۱
چگالی ($\frac{gr}{cm^3}$)	۲/۳۵
درصد قیر (%)	۵/۲
درجه نفوذ قیر (۰/۱mm)	۱۶

جدول ۴- عناصر تشکیل دهنده سیمان مصرفی

ترکیبات شیمیایی	درصد
CaO	۶۱/۷۱
SiO ₂	۲۱/۰۴
Al ₂ O ₃	۴/۷۵
Fe ₂ O ₃	۳/۶۱
MgO	۱/۱۹
SO ₃	۲/۳۵
K ₂ O	۰/۶۱
Na ₂ O	۰/۵۴
LOI	۱/۷۳
سایر	۲/۴۷

جدول ۵- مقادیر دانه‌بندی مصالح سنگی مورد استفاده

اندازه الک (mm)	حدود دانه‌بندی PCA	دانه‌بندی استفاده شده
۲۵	۱۰۰	۱۰۰
۱۹	۱۰۰-۹۰	۹۵
۱۲/۵	۹۰-۷۰	۸۳
۹/۵	۸۵-۷۰	۷۵
۴/۷۵	۶۰-۴۰	۴۵
۱/۱۸	۴۰-۲۰	۲۵
۰/۱۵	۱۶-۶	۶
۰/۰۷۵	۸-۲	۲

جدول ۶- مشخصات و نسبت‌های اختلاط مخلوط‌های مختلف RCC و SCC

ردیف	نام نمونه	درصد سیمان	درصد سرباره فولاد	درصد خرده آسفالت	درصد مصالح سنگی
۱	RAP0SS0	۱۰۰	۰	۰	۱۰۰
۲	RAP0SS30	۷۰	۳۰	۰	۱۰۰
۳	RAP0SS50	۵۰	۵۰	۰	۱۰۰
۴	RAP0SS70	۳۰	۷۰	۰	۱۰۰
۵	RAP25SS0	۱۰۰	۰	۲۵	۷۵
۶	RAP25SS30	۷۰	۳۰	۲۵	۷۵
۷	RAP25SS50	۵۰	۵۰	۲۵	۷۵
۸	RAP25SS70	۳۰	۷۰	۲۵	۷۵
۹	RAP50SS0	۱۰۰	۰	۵۰	۵۰
۱۰	RAP50SS30	۷۰	۳۰	۵۰	۵۰
۱۱	RAP50SS50	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰
۱۲	RAP50SS70	۳۰	۷۰	۵۰	۵۰

در مخلوط بتن خودتراکم تازه با حداکثر اندازه اسمی سنگ‌دانه تا ۲۵ میلی‌متر ارائه کرده است [۲۰]. ابتدا حداکثر قطر پخش‌شدگی و سپس قطر پخش‌شدگی در جهت عمود بر آن اندازه‌گیری می‌شود. قطر پخش‌شدگی در آزمایش حلقه‌ی J (شکل ۷)، میانگین این دو مقدار خواهد بود. طبق استاندارد ASTM، برای انجام این آزمایش، نحوه‌ی قرارگیری مخروط اسلامپ می‌تواند به صورت معمول و یا وارونه باشد.



شکل ۴. دستگاه آزمایش جریان اسلامپ شکل ۵. دستگاه آزمایش قیف V



شکل ۶. دستگاه آزمایش جعبه L شکل ۷. دستگاه آزمایش حلقه J

۳-۱-۲- آزمایش قیف V

در آیین‌نامه EFNARC، آزمایش قیف V معیاری برای تعیین لزجت (ویسکوزیته) بتن خودتراکم است. تغییر سرعت خروج بتن، نشان‌دهنده ناهمگن بودن آن و جداشدگی بتن است. محدوده زمان قابل قبول عبور از قیف V برای این آزمایش ۶ تا ۱۲ ثانیه می‌باشد [۱۸]. این آزمایش می‌تواند به عنوان معیاری برای تعیین جداشدگی بتن مورد استفاده قرار بگیرد. علاوه بر مدت زمان خروج بتن، نحوه خروج بتن از قیف (شکل ۵) و یکنواختی بتن خارج شده نیز مهم است.

۳-۱-۳- آزمایش جعبه L

این آزمایش بیانگر قابلیت پرکنندگی و قابلیت عبور بتن خودتراکم است (شکل ۶). همچنین می‌توان بود و نبود جداشدگی بتن را به صورت چشمی مشاهده نمود. این آزمایش به منظور بررسی قابلیت جریان بتن تازه و پدیده انسداد ناشی از حضور میلگردها، طراحی شده است. در آیین‌نامه EFNARC، آزمایش جعبه ال معیاری برای سنجش توانایی عبور بتن خودتراکم است [۱۹].

۳-۱-۴- آزمایش حلقه J یا جی رینگ^۱

استاندارد ASTM آزمایش حلقه J را برای ارزیابی قابلیت عبور

۲-۳- آزمایش‌های بتن سخت شده

۱-۲-۳- مقاومت فشاری بتن

رفته در این آزمایش، باید فاصله بین دو تکیه گاه ۳ برابر عمق تیر بوده، و تیر به کار رفته باید دارای قاعده مربعی بوده و راست گوشه باشد. نمونه به کار رفته در این آزمایش، دارای ابعاد ۱۰×۱۰×۴۰ سانتی متر می‌باشد، که فاصله بین دو تکیه گاه، با احتساب سه برابر عمق تیر، ۳۰ سانتی متر است. نحوه اعمال بار باید به گونه‌ای باشد که سرعت افزایش تنش در شدیدترین و دورترین تار تنشی، ۰/۹ مگاپاسکال بر دقیقه تا ۱/۲ مگاپاسکال بر دقیقه باشد. فرمول محاسبه مقاومت خمشی به صورت زیر می‌باشد:

$$M_R = \frac{3PL}{2bd^2} \quad (2)$$

که در این معادله، M_R به معنای مدول گسیختگی یا مقاومت خمشی بتن است. P نیروی نهایی است که به نمونه وارد می‌شود. L طول نمونه است. b میانگین عرض نمونه‌ها در نقطه گسیختگی است و d نیز میانگین عمق گسیختگی در نمونه‌های بتنی است [۲۳].

۴- بررسی نتایج

۴-۱- نتایج آزمایشات بتن تازه

برای هر طرح مخلوط، خصوصیات تازه بتن خودتراکم شامل قابلیت جریان، قابلیت عبور و پایداری مطابق پیشنهاد آئین‌نامه EFNARC توسط دستگاه‌های آزمایش اسلامپ جاری، حلقه جی، قیف وی و جعبه ال انجام گرفته است. در جدول شماره ۷ رواداری پذیرش بتن خودتراکم آورده شده است.

جدول ۷- رواداری پذیرش بتن خودتراکم [۲۴]

حدود تغییرات اندازه‌ها		واحد	روش آزمایش
حداکثر	حداقل		
۸۰۰	۶۵۰	mm	اسلامپ جاری
۱۰	۰	sec	حلقه جی
۱۲	۶	sec	قیف وی
۱	۰/۸	%	جعبه ال

۴-۱-۱- نتایج آزمایش اسلامپ جاری

نتایج بدست آمده از اسلامپ جاری بر روی نمونه‌های مختلف در شکل ۸ نشان داده شده است. مطابق با شکل ارائه شده کمترین کارایی و روانی مربوط به نمونه‌های بدون خرده آسفالت بوده و با

۲-۲-۳- مقاومت کششی بتن

مقاومت کششی بتن یکی از مقاومت‌های مکانیکی مهم و مؤثر بتن است. این مقاومت از لحاظ نظری ۸ تا ۱۰ برابر کمتر از مقاومت فشاری بتن می‌باشد و این به معنی وجود رابطه‌ای منطقی بین این دو مقاومت است. در این پژوهش، از آزمایش کشش دو نیم شدن یا روش برزیلی استفاده شده است. قالب‌های به کار رفته برای آزمایش کششی، قالب‌های استوانه‌ای با قطر ۱۵ سانتی متر و ارتفاع ۳۰ سانتی متر می‌باشند. تنش کششی بر اساس استاندارد ۴۹۶ ASTM C ایالات متحد آمریکا، باید در محدوده سرعت ثابت ۰/۷ تا ۱/۴ مگاپاسکال بر دقیقه قرار گیرد. در پژوهش حاضر، سرعت ۱ مگاپاسکال بر دقیقه اعمال شد [۲۱].

نحوه محاسبه مقاومت کششی بر اساس رابطه‌ی زیر می‌باشد.

$$T = \frac{2 \times P}{\pi \times D \times L} \quad (1)$$

که در آن T ، مقاومت کششی (MPa)؛ P ، بار اعمال شده (N)؛ L ، طول نمونه (mm)؛ D ، قطر نمونه (mm) می‌باشد [۲۲].

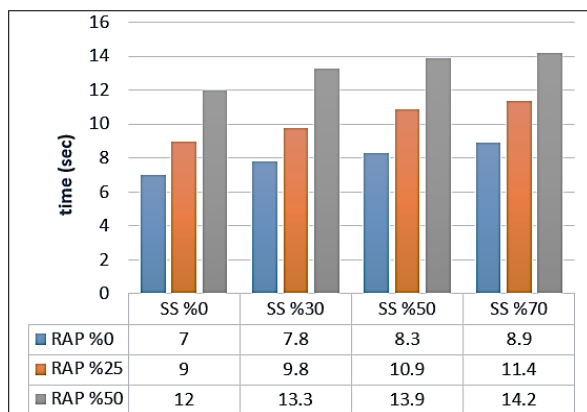
۳-۲-۳- مقاومت خمشی بتن

این آزمایش نیز مانند سایر آزمایش‌های مکانیکی بتن در استانداردها ذکر شده است. دو استاندارد ASTM C78 و ASTM C293 به این آزمایش اختصاص یافته‌اند. این آزمایش به دو صورت انجام می‌گیرد. مطابق استاندارد ASTM C293 برای این آزمایش از یک نقطه بارگذاری در وسط تیر استفاده می‌شود (سه نقطه‌ای) و مطابق با استاندارد ASTM C78 آزمایش خمش با دو نقطه بارگذاری و به فاصله $L/3$ از هر طرف تیر انجام می‌شود (چهار نقطه‌ای). میزان مقاومت خمشی حاصل شده در آزمایش ASTM C293 به ابعاد و نوع عمل آوری نمونه بستگی دارد. این آزمایش، مقدار مقاومت خمشی بالاتر از نتیجه حاصل شده از آزمون ASTM C78 می‌دهد. برای نمونه به کار

سرباره صاف تر از سیمان است؛ از طرفی دیگر، آب انداختگی تحت اثر واکنش ماده سیمانی است؛ زیرا، انجام سریع واکنش هیدراتاسیون از حرکت آب به سطح بتن جلوگیری می کند. از آن-جایی که واکنش شیمیایی سرباره آهسته تر از سیمان است، آب- انداختگی در بتن ساخته شده از سرباره افزایش می یابد. بدین ترتیب، جایگزینی بخشی از سیمان با سرباره سبب افزایش کارآیی بتن می شود [۲۷].

۴-۱-۲- نتایج آزمایش قیف وی

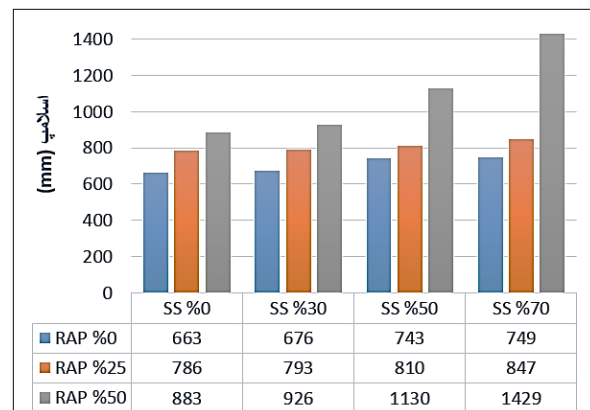
نتایج آزمایش قیف وی در شکل ۹ نشان داده شده است. مطابق شکل، درصد تغییرات ویسکوزیته نمونه های حاوی خرده آسفالت تنها برای نسبت های ۲۵ و ۵۰ درصد نسبت به نمونه شاهد به ترتیب برابر با ۲۸ و ۷۲ درصد بوده و برای نمونه های حاوی سرباره تنها برای نسبت های ۳۰، ۵۰ و ۷۰ درصد، این تغییرات برابر با ۱۱، ۱۹ و ۲۷ درصد می باشد.



شکل ۹- آزمایش قیف V با درصد های مختلف خرده آسفالت و سرباره فولاد

نتایج نشان می دهد افزایش مقدار خرده آسفالت بازیافتی به دلیل چرب بودن سطوح سنگ دانه ها و کاهش اصطکاک بین سنگ- دانه ای باعث افزایش زمان عبور از قیف V می شود. همچنین برای نمونه های حاوی سرباره و خرده آسفالت میزان کاهش ویسکوزیته افزایش یافته و از بین طرح اختلاط های ترکیبی، طرح اختلاط حاوی ۲۵ درصد خرده آسفالت و ۳۰ درصد سرباره بیشترین ویسکوزیته را نشان داده و در مقایسه با نمونه شاهد با کاهش ۴۰ درصدی ویسکوزیته مواجه شده است. بنابراین در حالت کلی نمونه های حاوی خرده آسفالت صفر درصد با همه درصد های

اضافه کردن خرده آسفالت به نمونه ها میزان روانی و کارآیی اضافه شده و بیشترین مقدار کارآیی و روانی به نمونه های حاوی ۵۰ درصد خرده آسفالت تعلق داشته و مقدار افزایش روانی این نمونه بین ۱۹ تا ۳۳ درصد می باشد. همچنین مطابق شکل ارائه شده مشاهده می گردد که با اضافه کردن سرباره به طرح اختلاط بین ۲ تا ۱۳ درصد از میزان کارآیی و روانی اضافه می شود. در بین نمونه- های حاوی سرباره بهترین کارآیی و روانی مربوط به طرح اختلاط حاوی ۳۰ درصد سرباره می باشد. همچنین تغییرات شکل نشان می- دهد که با استفاده از سرباره و خرده آسفالت در نمونه ها، به کارآیی و روانی نمونه ها اضافه خواهد شد. کمترین کاهش روانی برای نمونه های حاوی ۲۵ درصد خرده آسفالت و ۳۰ درصد سرباره مشاهده می گردد. با توجه به این که حداقل و حداکثر اسلامپ قابل قبول بر طبق آیین نامه EFNARC، به ترتیب ۶۵۰ و ۸۰۰ میلی متر می باشد، مشاهده می گردد که همه طرح اختلاط های حاوی درصد های مختلف سرباره در محدوده قابل قبول این آیین نامه قرار دارند و برای نمونه های حاوی خرده آسفالت، فقط طرح اختلاط حاوی ۲۵ درصد خرده آسفالت در محدوده مجاز قرار دارد. همچنین در بین طرح اختلاط های ترکیبی، طرح اختلاط حاوی ۲۵ درصد خرده آسفالت و ۳۰ درصد سرباره قابل قبول می باشد.

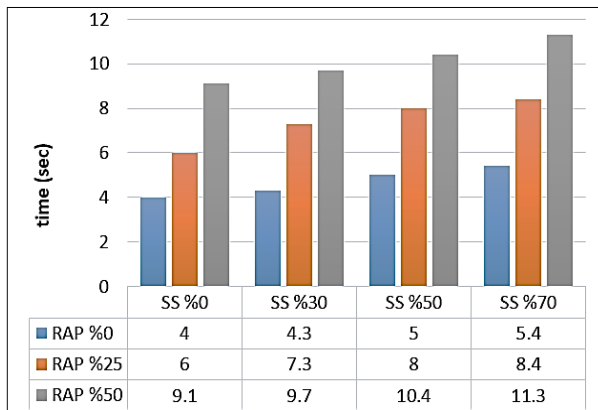


شکل ۸- آزمایش اسلامپ جاری با درصد های مختلف خرده آسفالت و سرباره فولاد

نتایج نشان می دهد خرده آسفالت بازیافتی به دلیل پوشش لایه قیر دور سنگ دانه ها جذب آب کمتری دارد؛ به همین دلیل، با افزایش خرده آسفالت، اسلامپ و کارایی در بتن افزایش می یابد [۲۶].

میزان آب انداختگی بتن تازه، تابع توزیع، اندازه، شکل و بافت سطح سیمان و سرباره می باشد. از یک سو، بافت سطحی ذرات

شکل ۱۱ نشان می‌دهد با اضافه شدن خرده آسفالت بازیافتی و سربراره در مخلوط بتن خودمتراکم، به دلیل افزایش وزن مخصوص و کاهش لزجت، جداسدگی سنگ‌دانه‌ها اتفاق می‌افتد. همچنین مطابق سایر آزمایش‌های بتن تازه، در این آزمایش نیز سربراره و خرده آسفالت نسبت به نمونه شاهد دارای مقادیر کاهشیه بوده، به طوری که با استفاده از خرده آسفالت تنها به طرح اختلاط، مقاومت در برابر جدا شدگی بین ۵۰ تا ۱۲۷ درصد کاهش یافته و برای نمونه‌های حاوی سربراره تنها این مقدار کاهش بین ۷/۵ تا ۳۵ درصد قرار دارد. برای نمونه‌های ترکیبی سربراره و خرده آسفالت کاهش مقاومت بین ۸۳ تا ۱۸۳ درصد می‌باشد. در آیین‌نامه EFNARC، آزمایش جی رینگ برای مشخص شدن مقاومت در برابر جداسدگی بتن خودمتراکم می‌باشد و محدوده قابل قبول برای این آزمایش در آیین‌نامه ۰ تا ۱۰ ثانیه است که با توجه به نتایج بدست آمده می‌توان گفت که نمونه‌های بدون خرده آسفالت با درصد‌های مختلف سربراره فولاد و همچنین نمونه‌های حاوی ۲۵ درصد خرده آسفالت با سربراره فولاد صفر و ۳۰ درصد از مقاومت در برابر جداسدگی مناسبی برخوردار می‌باشند.



شکل ۱۱ - آزمایش جی رینگ با درصد‌های مختلف خرده آسفالت و سربراره فولاد

۴-۲- نتایج آزمایشات بتن سخت شده

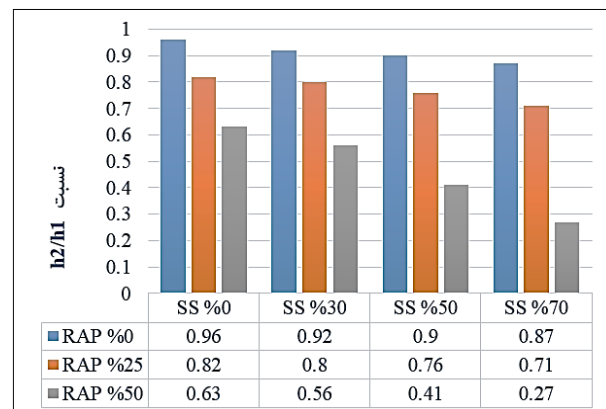
۴-۲-۱- آزمایش مقاومت فشاری

اگرچه هدف اصلی در بتن خودمتراکم، دست یافتن به خصوصیات رئولوژیکی مناسبی می‌باشد، اما مقاومت فشاری یک موضوع کلیدی در طراحی بتن به شمار می‌آید. طرح اختلاط را باید جوری تنظیم نمود که تمام خواص و ویژگی‌های بتن تازه و سخت شده را بر آورده نماید. مقاومت فشاری در نمودار شکل‌های ۱۲ و ۱۳ و

سربراره فولاد و همچنین خرده آسفالت ۲۵ درصد با درصد سربراره فولاد صفر و ۳۰ از ویسکوزیته مناسبی برخوردار می‌باشند.

۴-۱-۳- نتایج آزمایش جعبه L

نتایج بدست آمده از آزمایش جعبه ال بر روی نمونه‌های مختلف در شکل ۱۰ نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد با افزایش مقدار سربراره و خرده آسفالت، به دلیل سنگین تر شدن بتن خود-متراکم، جریان و روانی کاهش می‌یابد. محدوده سنجش برای این آزمایش در آیین‌نامه بین ۰/۸ تا ۱ می‌باشد. بر طبق نمودار این شکل می‌توان گفت که طرح اختلاط نمونه‌های حاوی سربراره و خرده آسفالت چه به صورت تکی و چه ترکیبی، سبب کاهش قابلیت عبوری بتن خواهد شد. این کاهش برای نمونه‌های حاوی سربراره تنها مطابق با آیین‌نامه EFNARC مورد قبول بوده و درصد تغییرات بین ۴ تا ۹/۵ درصد متغیر می‌باشد. درصد کاهش قابلیت عبور بتن برای نمونه‌های حاوی ۲۵ و ۵۰ درصد خرده آسفالت تنها نیز برابر با ۱۸ و ۳۷ درصد است، که برای نمونه حاوی ۲۵ درصد خرده آسفالت این مقدار کاهش مورد قبول می‌باشد. همچنین برای نمونه‌های حاوی سربراره و خرده آسفالت این کاهش بین ۱۸ تا ۷۳ درصد متغیر می‌باشد. از بین طرح اختلاط‌های ترکیبی، تنها طرح اختلاط حاوی ۲۵ درصد خرده آسفالت و ۳۰ درصد سربراره مطابق با آیین‌نامه EFNARC دارای قابلیت عبوری مورد قبول در محدوده این آیین‌نامه بوده و سایر نمونه‌های ترکیبی خارج از این محدوده قرار گرفته و مورد قبول نیستند.



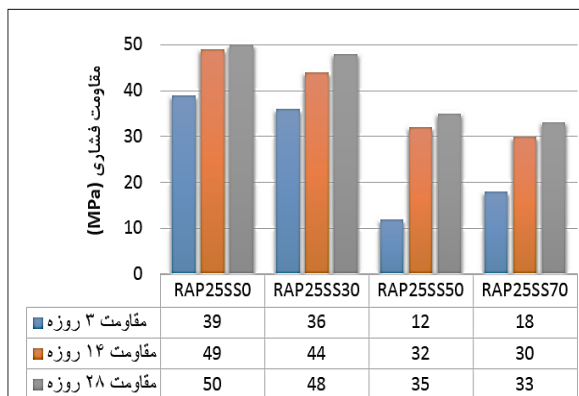
شکل ۱۰- آزمایش جعبه L با درصد‌های مختلف خرده آسفالت و سربراره فولاد

۴-۱-۴- نتایج آزمایش جی رینگ

نتایج حاصل از آزمایش جی رینگ بر روی نمونه‌های مختلف در

سیلیکات کلسیم هیدراته ناشی از واکنش سرباره فولاد، مقاومت فشاری بتن، کمتر کاهش یافته است.

در ادامه با توجه به شکل ۱۳ نتیجه گیری می شود که اضافه نمودن ۲۵ درصد خرده آسفالت به نمونه های حاوی درصد های مختلف سرباره سبب کاهش مقاومت فشاری در همه سنین نسبت به نمونه شاهد و نمونه حاوی درصد های مختلف سرباره بدون خرده آسفالت شده است. درصد کاهش مقاومت نمونه های حاوی ۲۵ درصد خرده آسفالت نسبت به نمونه شاهد و نمونه های حاوی سرباره برای سنین مختلف در جداول ۹ و ۱۰ آورده شده است.



شکل ۱۳- آزمایش مقاومت فشاری با خرده آسفالت ۲۵ درصد

جدول ۹- درصد کاهش مقاومت فشاری نمونه های حاوی ۲۵ درصد خرده آسفالت نسبت به نمونه شاهد

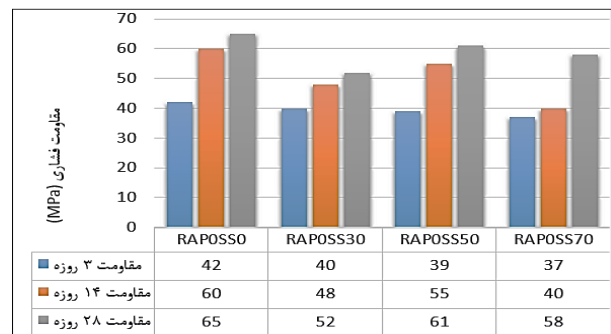
نوع طرح اختلاط	۳ روز (%)	۱۴ روز (%)	۲۸ روز (%)
RAP25SS0	۷	۱۸	۲۳

جدول ۱۰- درصد کاهش مقاومت فشاری نمونه های حاوی ۲۵ درصد خرده آسفالت با سرباره نسبت به نمونه های حاوی ۲۵ درصد خرده آسفالت و بدون سرباره

نوع طرح اختلاط	۳ روز (%)	۱۴ روز (%)	۲۸ روز (%)
RAP25SS30	۸	۱۰	۴
RAP25SS50	۷۰	۳۴	۳۰
RAP25SS70	۵۴	۳۹	۳۴

در جدول ۹ مشاهده می گردد که افزودن خرده آسفالت به مخلوط، سبب کاهش مقاومت فشاری در همه سنین شده است، که مشابه نتایج به دست آمده به وسیله هی لیو و همکاران است [۲۹]. با افزایش سن نمونه مقدار کاهش مقاومت افزایش می یابد همچنین سرعت نرخ کاهش مقاومت بین ۳ تا ۱۴ روز بیشتر می باشد. اعداد

۱۴ برای سنین ۳، ۱۴ و ۲۸ روزه به ترتیب برای نمونه های حاوی سرباره تنها، نمونه های حاوی سرباره با ۲۵ درصد خرده آسفالت و نمونه های حاوی سرباره با ۵۰ درصد خرده آسفالت نشان داده شده است. نتایج در شکل ۱۲ نشان می دهد که اضافه نمودن سرباره به نمونه ها سبب کاهش مقاومت فشاری در همه ی سنین شده است. درصد کاهش مقاومت نمونه های حاوی ۳۰، ۵۰ و ۷۰ درصد سرباره برای سنین مختلف به شرح جدول ۸ می باشد.

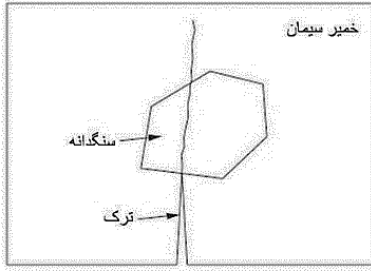


شکل ۱۲- آزمایش مقاومت فشاری بدون خرده آسفالت

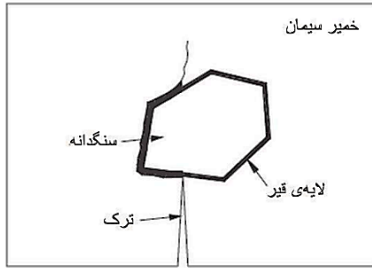
جدول ۸- درصد کاهش مقاومت فشاری نمونه های حاوی سرباره نسبت به نمونه شاهد

نوع طرح اختلاط	۳ روز (%)	۱۴ روز (%)	۲۸ روز (%)
RAPOSS30	۴/۵	۲۰	۲۰
RAPOSS50	۷	۸	۶
RAPOSS70	۱۲	۳۳	۱۱

بر طبق این جدول می توان گفت که با افزایش درصد جانشینی سرباره بیشترین مقدار کاهش مقاومت در سن ۱۴ روزگی رخ داده است. همچنین با توجه به درصد تغییرات مقاومت در سن ۲۸ روزگی مشاهده می گردد که کاهش مقاومت در این سن کمتر بوده و با نرخ کمتری رشد کرده است. نمونه حاوی ۵۰ درصد سرباره، کمترین کاهش مقاومت را نسبت به نمونه شاهد داشته و با افزایش سن نمونه از میزان کاهش مقاومت کاسته می شود. دلیل کاهش مقاومت فشاری در سنین پایین، جایگزینی سیمان با سرباره فولاد است، که در مقایسه با سیمان پرتلند از واکنش هیدراتاسیون کندتری برخوردار است؛ علاوه بر آن، مطالعات گذشته نشان داده اتصال کمتری بین مصالح ریز سرباره فولاد و خمیر سیمان برقرار است، که باعث کاهش تحمل بار می شود [۲۸]. این مشکل می تواند به دلیل تشکیل پوشش کربنات کلسیم طی فرایند هوازدگی مصالح سرباره باشد [۲۹]. ولی در سنین بالاتر، به دلیل تشکیل ژل



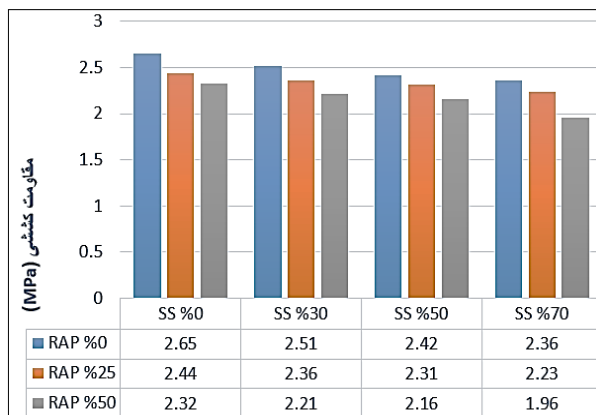
شکل ۱۵. انتشار ترک در بتن با سنگدانه طبیعی [۳۰ و ۳۱]



شکل ۱۶. انتشار ترک در بتن با خرده آسفالت بازیافتی [۳۰ و ۳۱]

۴-۲-۲- آزمایش مقاومت کششی بتن

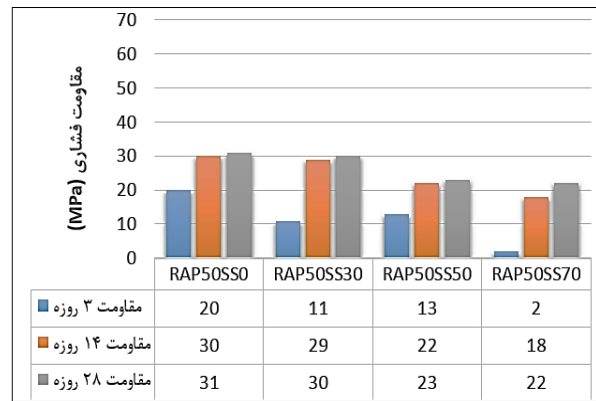
در شکل های ۱۷ و ۱۸ مقاومت کششی نمونه ها در سن های ۷ و ۲۸ روز، نشان داده شده است. با بررسی این دو شکل مشاهده می گردد که با اضافه کردن خرده آسفالت بازیافتی و سرباره فولاد از مقاومت کششی نمونه های بتنی کاسته شده است. با توجه به شکل ۱۸ مشاهده می گردد که کاهش مقاومت کششی برای نمونه حاوی ۳۰ درصد سرباره کمترین مقدار می باشد. و بعد از آن نمونه حاوی ۲۵ درصد خرده آسفالت کمترین کاهش مقاومت را داشته و برای طرح اختلاط های ترکیبی سرباره و خرده آسفالت، نمونه حاوی ۳۰ درصد سرباره و ۲۵ درصد خرده آسفالت بهترین مقاومت را از خود نشان داده است.



شکل ۱۷- آزمایش مقاومت کششی طرح های با درصد های

مختلف خرده آسفالت و سرباره فولاد در سن ۷ روز

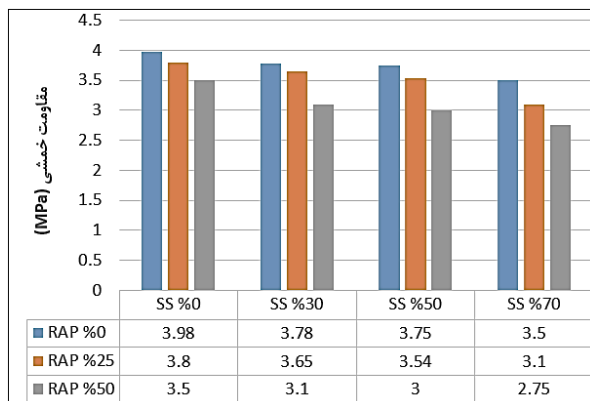
نشان داده شده در جدول ۱۰ نشانگر این مطلب است، که با افزودن سرباره به طرح اختلاط حاوی ۲۵ درصد خرده آسفالت در مقایسه به نمونه شاهد باعث کاهش مقاومت فشاری شد. نمونه حاوی ۳۰ درصد سرباره بهترین مقاومت را از خود نشان داده و دارای کاهش مقاومت کمتری در مقایسه با سایر نمونه ها هست. همچنین مشاهده می گردد که با افزایش سن نمونه از مقدار کاهش مقاومت نمونه ها کاسته شد و در این سنین، نرخ کاهش مقاومت با سرعت کمتری رخ داده است. نتایج مقاومت فشاری نمونه های حاوی ۵۰ درصد خرده آسفالت با درصد های مختلف سرباره در شکل ۱۴ نشان داده شده است.



شکل ۱۴- آزمایش مقاومت فشاری با خرده آسفالت ۵۰ درصد

متابقی با این شکل مشاهده می گردد که کاهش مقاومت فشاری برای این طرح اختلاط ها قابل توجه می باشد. دلیل افت مقاومت در مخلوط های حاوی خرده آسفالت، می تواند وجود لایه قیر پیر شده حول مصالح تراشه باشد که باعث کاهش چسبندگی مصالح به یکدیگر و هدایت مسیر ترک ها شده است. قیر در آسفالت بازیافتی یک لایه نازک پیرامون سنگدانه تشکیل می دهد، که این لایه، چسبندگی میان خمیر سیمان و سنگدانه را کاهش داده و باعث ضعیف شدن ناحیه انتقال سطحی در بتن می شود. همین امر باعث می شود که در صورت اعمال تنش در بتن حاوی آسفالت بازیافتی، به جای انتشار ترک در سنگدانه (شکل ۱۵)، شاهد انتشار ترک در ناحیه انتقال سطحی باشیم. در اثر عدم پیوند مناسب بین ذرات آسفالت بازیافتی و خمیر سیمان، تنش های اعمال شده به نمونه به طور یکنواخت توزیع نمی شوند و به همین دلیل، ترک ها در حین بارگذاری در اطراف ذرات خرده آسفالت، ایجاد شده (شکل ۱۶) و گسترش می یابند [۳۰ و ۳۱].

همچنین مشاهده می‌شود که استفاده از مصالح خرده آسفالتی اثر کاهشی کمتری بر مقاومت خمشی نسبت به مقاومت فشاری دارد. مقدار زیاد CaO آزاد در سرباره فولاد، باعث می‌شود در گیرش اولیه، بتن به آهستگی با آب، هیدراته شود و گیرش به کندی صورت گیرد؛ در نتیجه، در حین هیدراته شدن، حجم بتن افزایش یافته، باعث ایجاد خصوصیات مکانیکی نامطلوب؛ مانند، ترک در مخلوط شود.



شکل ۱۹- آزمایش مقاومت خمشی طرح‌های با درصد‌های

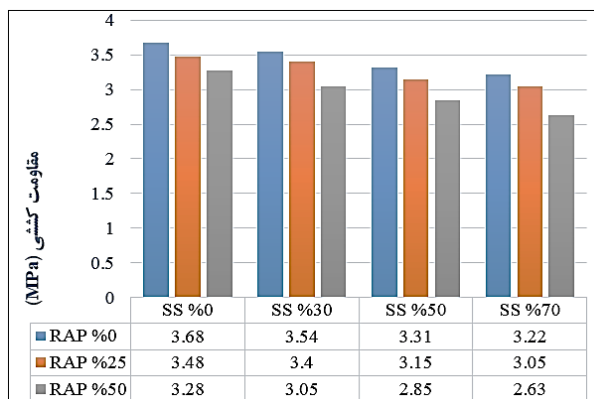
مختلف خرده آسفالت و سرباره فولاد در سن ۲۸ روز

۵- نتایج

در این پژوهش، امکان استفاده از مصالح خرده آسفالتی به عنوان جایگزین مصالح سنگی طبیعی و استفاده از سرباره فولاد جایگزین سیمان و همچنین ترکیبی از آن‌ها در روسازی با بتن خودمتراکم مورد بررسی قرار گرفت. اهم نتایج به دست آمده به شرح زیر است:

- نتایج آزمایش اسلامپ نشان داد که با استفاده از خرده آسفالت به جای مصالح سنگی و سرباره به جای سیمان، اسلامپ و کارایی نمونه‌ها در مقایسه با نمونه‌ی شاهد کاهش می‌یابد، ولی این کاهش اسلامپ برای نمونه‌های حاوی ۳۰ درصد سرباره و ۲۵ درصد خرده آسفالت بصورت تکی قابل قبول می‌باشد. بهینه‌ترین اسلامپ برای طرح اختلاط حاوی ۳۰ درصد سرباره، با کاهش ۲ درصد روانی به دست آمده است.

- نتایج حاصل از آزمایش قیف ۷ نشان داد که استفاده هم‌زمان از خرده آسفالت و سرباره با درصد‌های مختلف سبب کاهش زیاد ویسکوزیته بتن تازه می‌شود. با توجه به نتایج بدست آمده مشاهده می‌گردد که طرح اختلاط حاوی ۳۰ درصد سرباره بهترین نتیجه را



شکل ۱۸- آزمایش مقاومت کششی طرح‌های با درصد‌های

مختلف خرده آسفالت و سرباره فولاد در سن ۲۸ روز

سرباره فولاد به دلیل خاصیت پرکنندگی منافذ ریز بتن خودمتراکم باعث ایجاد مخلوطی متراکم شده و باعث بهبود چسبندگی مناسب میان خرده آسفالت و خمیر سیمان می‌شود. درصد کاهش مقاومت کششی این نمونه‌ها در مقایسه با نمونه شاهد به ترتیب برابر با ۴، ۵/۵ و ۸ درصد می‌باشد. برای سایر نمونه‌ها، کاهش مقاومت کششی مشهود است.

۴-۲-۳- آزمایش مقاومت خمشی بتن

مقاومت خمشی در طراحی روسازی‌های بتنی، پارامتر اصلی است. شکل ۱۹ تغییرات مقاومت خمشی بتن خودمتراکم در مقایسه با نمونه شاهد در سن ۲۸ روزگی نشان می‌دهد. مطابق با این شکل، کاهش مقاومت خمشی برای نمونه‌های حاوی سرباره و خرده آسفالت به صورت تکی و ترکیبی قابل مشاهده می‌باشد. کاهش مقاومت برای نمونه‌های حاوی سرباره بصورت تکی در مقادیر کمتر، جزئی بوده و با افزایش این مقادیر کاهش مقاومت نمونه‌ها نیز افزایش می‌یابد. در بین نمونه‌های حاوی خرده آسفالت بصورت تکی کمترین کاهش مقاومت مربوط به نمونه حاوی ۲۵ درصد خرده آسفالت بوده که این کاهش در مقایسه با نمونه شاهد برابر با ۴/۷ درصد است. در بین نمونه‌های حاوی سرباره و خرده آسفالت نیز نمونه حاوی ۳۰ درصد سرباره و ۲۵ درصد خرده آسفالت از سایر نمونه‌های ترکیبی کاهش مقاومت کمتری دارند. این کاهش مقاومت در مقایسه با نمونه شاهد برابر با ۸ درصد می‌باشد.

بررسی نتایج مقاومت خمشی بیانگر این موضوع است، که افزایش درصد مصالح خرده آسفالتی جایگزین مصالح سنگی و سرباره فولاد جایگزین سیمان باعث کاهش مقاومت خمشی می‌شود.

- به طور کلی می‌توان گفت که با تعیین مقدار بهینه استفاده از خرده آسفالت بازیافتی و سرباره فولاد در ساخت بتن خودتراکم، علاوه بر کسب مقاومت مکانیکی قابل قبول، می‌توان با کاهش دفع ضایعات و مصالح بازیافتی در محیط زیست، میزان استفاده از مصالح سنگی و سیمان و نیز هزینه حمل مصالح و در نهایت هزینه نهایی پروژه‌های راه‌سازی را کاهش داد. در پژوهش حاضر، طرح حاوی ۳۰ درصد خرده آسفالت بازیافتی جایگزین مصالح سنگی توأم با ۲۵ درصد سرباره جایگزین سیمان، حداقل معیارهای قابل قبول را بر اساس استانداردها و دستورالعمل‌های مربوطه برآورده کرد.

۶- مراجع

- [1] Abdi Esiabarki, E, and Salehi, A. M., pseudo self-compacting concrete; Construction of concrete pavement without the need for molding and compaction, the third national conference of concrete procedures, Iran University of Science and Technology, Tehran. (2018).
- [2] Sidi Marghaki, M. and Rahimi Pardanjani, A. and Qadri, M. and Moghbali, M., Feasibility assessment of using self-compacting concrete in the construction of concrete pavements by slip-forming method, the fifth national conference of self-compacting concrete of Iran and the first national conference on maintenance and repair Concrete structures, Tehran. (2016).
- [3] Siddique, R., Aggarwal, P., & Aggarwal, Y. Influence of water/powder ratio on strength properties of self-compacting concrete containing coal fly ash and bottom ash. *Construction and Building Materials*, 29, 73-81. (2012).
- [4] Sonebi, M. Medium strength self-compacting concrete containing fly ash: Modelling using factorial experimental plans. *Cement and Concrete research*, 34(7), 1199-1208. (2004).
- [5] Okamura, Hajime, and Masahiro Ouchi. "Self-compacting concrete." *Journal of advanced concrete technology* 1.1: 5-15. (2003).
- [6] Nanthagopalan, P., & Santhanam, M. An empirical approach for the optimisation of aggregate combinations for self-compacting concrete. *Materials and structures*, 45(8), 1167-1179. (2012).
- [7] Nanthagopalan, P., & Santhanam, M. An empirical approach for the optimisation of aggregate combinations for self-compacting concrete. *Materials and structures*, 45(8), 1167-1179. (2012).

داده و بعد از آن طرح اختلاط حاوی ۲۵ درصد خرده آسفالت دارای نتیجه مطلوب می‌باشد.

- نتایج حاصل از آزمایش جعبه L نشان می‌دهد که نمونه‌های حاوی سرباره و خرده آسفالت چه بصورت تکی و چه ترکیبی، سبب کاهش توان عبوری بتن خواهد شد. این کاهش برای نمونه‌های حاوی سرباره تنها مطابق با آیین‌نامه EFNARC مورد قبول بوده و درصد تغییرات بین ۴ تا ۹/۵ درصد است. همچنین از بین طرح اختلاط‌های ترکیبی، تنها طرح اختلاط حاوی ۲۵ درصد خرده آسفالت و ۳۰ درصد سرباره مطابق با آیین‌نامه EFNARC دارای توان عبوری مورد قبول در محدوده این آیین‌نامه بوده و سایر نمونه‌های ترکیبی خارج از این محدوده قرار گرفته و مورد قبول نیستند.

- با توجه به نتایج بدست آمده از آزمایش جی رینگ می‌توان گفت که نمونه‌های بدون خرده آسفالت با درصد‌های مختلف سرباره فولاد و همچنین نمونه‌های حاوی ۲۵ درصد خرده آسفالت با سرباره فولاد صفر و ۳۰ درصد، از مقاومت در برابر جداشدگی مناسبی برخوردار هستند.

- نتایج مقاومت فشاری نمونه‌ها نشان می‌دهد که اضافه نمودن سرباره و خرده آسفالت بصورت تکی و ترکیبی به نمونه‌ها، سبب کاهش مقاومت فشاری در همه‌ی سنین شده است. همچنین با توجه به درصد تغییرات مقاومت در سن ۲۸ روزگی مشاهده می‌گردد که نرخ کاهش مقاومت در این سن کمتر بوده است. نمونه حاوی ۵۰ درصد سرباره کمترین کاهش مقاومت را نسبت به نمونه شاهد داشته و با افزایش سن نمونه از میزان کاهش مقاومت کاسته شد.

- آزمایش مقاومت کششی نمونه‌ها نشان می‌دهد که طرح اختلاط حاوی ۳۰ درصد سرباره با کاهش ۴ درصدی نسبت به نمونه شاهد بهینه‌ترین نتیجه را از خود نشان داده است.

- آزمایش مقاومت خمشی نمونه‌ها نشان می‌دهد، در نمونه حاوی خرده آسفالت، کمترین کاهش مقاومت مربوط به نمونه حاوی ۲۵ درصد خرده آسفالت بوده که این کاهش در مقایسه با نمونه شاهد برابر با ۴/۷ درصد است. در بین نمونه‌های حاوی سرباره و خرده آسفالت نیز نمونه حاوی ۳۰ درصد سرباره و ۲۵ درصد خرده آسفالت از سایر نمونه‌های ترکیبی کاهش مقاومت کمتری دارند. این کاهش مقاومت در مقایسه با نمونه شاهد برابر با ۸ درصد می‌باشد.

- concrete” London, UK: Association House.(2005).
- [21] ASTM, C. (1996). 496-96. Standard test method for splitting tensile strength of cylindrical concrete specimens.
- [22] “Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens,” ASTM C 496, (2004).
- [23] “Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete,” ASTM C293, (2004).
- [24] Liu, H., Duan, G., Wang, F., Zhang, J., Zhou, Y., Feng, Y., & Zhang, K. Investigation on mechanical behaviors of Self-compacting concrete containing reclaimed asphalt pavement. *Construction and Building Materials*, 346, 128421. (2022).
- [25] Debbarma, S., Selvam, M., & Singh, S. Can flexible pavements’ waste (RAP) be utilized in cement concrete pavements?—A critical review. *Construction and Building Materials*, 259, 120417. (2020).
- [26] Hossiney, N., Tia, M., & Bergin, M. J. Concrete containing RAP for use in concrete pavement. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 3(5), 251. (2010).
- [۲۷] علی اکبر، رمضانپور؛ طیب، پرهیزگار؛ افشین، طاهری؛ "مواد افزودنی و پوزولانی و کاربرد آن در بتن"، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، (۱۳۶۳).
- [28] Rooholamini, H., Sedghi, R., Ghobadipour, B., & Adresi, M. Effect of electric arc furnace steel slag on the mechanical and fracture properties of roller-compacted concrete. *Construction and building materials*, 211, 88-98. (2019).
- [29] Lam, M. N. T., Jaritngam, S., & Le, D. H. Roller-compacted concrete pavement made of Electric Arc Furnace slag aggregate: Mix design and mechanical properties. *Construction and building materials*, 154, 482-495. (2017).
- [30] Huang, B., Shu, X., & Li, G. Laboratory investigation of portland cement concrete containing recycled asphalt pavements. *Cement and Concrete Research*, 35(10), 2008-2013. (2005).
- [31] Vijay, K., Paluri, Y., Reddy, M. S., Rao, I. V., John, K., & Dayanand, N. Performance evaluation of reclaimed asphalt pavement (RAP) aggregate in concrete pavements: a state-of-the-art review. *Journal of Building Pathology and Rehabilitation*, 8(2), 90. (2023).
- [8] Bíly, P., Fládr, J., & Haase, M. Experimental verification of properties of roller-compacted concrete for pavements. In *Advanced Materials Research (Vol. 1124, pp. 307-312)*. Trans Tech Publications Ltd. (2015).
- [9] Cortez, E. R., & Eaton, R. A. Environmental monitoring and performance evaluation of roller-compacted concrete pavement: Conley Terminal, Boston, Massachusetts. *COLD REGIONS RESEARCH AND ENGINEERING LAB HANOVER NH*. (1991).
- [10] Ramadan, K. Z., & Haddad, R. H. Self-healing of overloaded self-compacting concrete of rigid pavement. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 21(1), 63-77. (2017).
- [11] Akbari Mahmoud, Zohrabi Mehdi, Kandahari Munira Investigation of mechanical and rheological properties of recycled self-compacting concrete and its reinforcement with microsilica. *Sharif Civil Engineering* 2-1. 91-104. (2019).
- [12] Ahari, R. S., Erdem, T. K., & Ramyar, K. Effect of various supplementary cementitious materials on rheological properties of self-consolidating concrete. *Construction and Building Materials*, 75, 89-98. (2015).
- [13] Sheen, Y. N., Huang, L. J., Sun, T. H., & Le, D. H. Engineering properties of self-compacting concrete containing stainless steel slags. *Procedia engineering*, 142, 79-86. (2016).
- [14] Khodair, Y. Self-compacting concrete using recycled asphalt pavement and recycled concrete aggregate. *Journal of Building Engineering*, 12, 282-287. (2017).
- [15] Hesami, S., Hikouei, I. S., & Emadi, S. A. A. Mechanical behavior of self-compacting concrete pavements incorporating recycled tire rubber crumb and reinforced with polypropylene fiber. *Journal of cleaner production*, 133, 228-234. (2016).
- [16] Hayati, Parham, Ziari, Hassan, Sobhani, and Jafar. "Investigation of the engineering properties of self-compacting concrete used in the concrete pavement of flight surfaces." *Concrete Research* 7, no. 1: 83-97.(2014).
- [17] Tennis, P. D., Leming, M. L., & Akers, D. J. *Pervious concrete pavements (Vol. 8)*. Skokie, IL: Portland Cement Association. (2004).
- [18] Concrete, S. C. The European guidelines for self-compacting concrete. *BIBM, et al*, 22, 563. (2005).
- [19] ASTM C1621, “C 1621M-09b ‘Standard Test Method for Passing Ability of Self-Consolidating Concrete by J-Ring,’” *Annual Book of ASTM Standard*, vol. i, p. 5, (2014): doi: 10.1520/C1621.
- [20] EFNARC. “Guidelines for self-compacting

Experimental study of the Effect of Steel Slag and Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) on the Properties of Self-compacting Concrete (SCC) Pavement

Mohsen Amouzadeh Omrani *

Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Savadkooh Branch, Islamic Azad University, Savadkooh, Iran.

Ghasem Tahmoursi

Ph.D. Candidate, Department of Civil Engineering, Ayatollah Amoli Branch, Islamic Azad University, Amol, Iran.

Peyman Piri

Department of Civil Engineering, Ayatollah Amoli Branch, Islamic Azad University, Amol, Iran.

Abstract

The existence of waste materials from various physical and chemical processes is one of the important problems of industrialized and developing countries. For this reason, extensive research is being done on the methods of recycling or disposing of them in order to minimize the damage to the environment. In the present study, the effect of using recycled asphalt crumb (RAP) as a substitute for natural aggregate and steel slag as a substitute for cement in self-compacting concrete (SCC) mixtures for the construction of road pavements has been investigated. For this purpose, fresh concrete tests including slump flow, V funnel, L box, J ring and hardened concrete tests of compressive, tensile and bending strength were performed on the samples. The results showed the effect of using slag instead of cement and asphalt chips. Instead of coarse grain, it reduces the compressive, tensile and bending resistance of self-dense concrete. Also, by replacing up to 25% of stone materials with small asphalt materials and 30% of slag with cement, minimum acceptable standards were achieved according to the relevant standards. Also, for the design of double mixes, the design containing 30% asphalt crumb instead of stone materials with 25% slag instead of cement has shown more suitable results. The most optimal mode of using these materials is respectively using 30% slag instead of cement and 25% asphalt crumb instead of stone materials.

Keywords: self-compacting concrete pavement, reclaimed asphalt pavement, steel slag, fresh concrete, hardened concret.

* Corresponding Author: m_amouzadeh@yahoo.com