بررسی تجربی تأثیر استفاده از میکرو سیلیس و فوق روان‌کننده بربعضی خواص مکانیکی بتن بازیافتی ساخته شده از خرده بتن*

«یادداشت پژوهشی»

محمود مقیمی[۱] پیام شفیق[۲] جواد برنجیان[۳] کامران نعمتی[٤]

چکیده *بتن ضایعاتی حاصل از تخریب سازه‌ها را می‌توان دوباره خرد کرده و به عنوان سنگدانه در ساخت بتن استفاده نمود. با استفاده از بتن بازیافتی از مشکلات زیست‌محیطی ناشی از خرده بتن‌های انباشته‌شده در سطح زمین، کاسته می‌گردد و همچنین از استخراج بی‌رویه مصالح سنگی از طبیعت، جلوگیری می‌شود. در این تحقیق اثر میکروسیلیس و فوق روان کننده در بتن بازیافتی ساخته شده از خرده بتن، مورد بررسی قرار گرفته است. بتن‌هایی با مقاومت معلوم برای بازیافت در نظر گرفته شده و بعضی از خواص مکانیکی از جمله، مقاومتهای فشاری، کششی و مدول الاستیسیته بتن‌های بازیافتی و معمولی با استفاده از میکروسیلیس و فوق روان کننده وبدون آن باهم مقایسه گردیده است. ۱۰۲ عدد نمونه با ٦ طرح اختلاط مختلف ساخته شده، که مواد سیمانی (مجموع سیمان و میکروسیلیس) در همگی ثابت است و فاکتور تعیین کننده‌ی اختلاف آنها شامل نوع سنگدانه (طبیعی، بازیافتی، ترکیبی از این دو) و همچنین استفاده یا عدم استفاده از افزودنی می‌باشد. تحلیل نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که در اغلب طرح‌ها استفاده از میکروسیلیس و فوق روان کننده، باعث دستیابی به بتن بازیافتی با مقاومت فشاری و کششی بیشتر، نسبت به بتن معمولی می‌گردد.*

واژه های کلیدی بتن بازیافتی، خرده بتن، میکروسیلیس، فوق روان کننده و خواص مکانیکی.

Experimental Investigation of Effects of Microsilica and Superplasticizer on Some Mechanical Properties of Recycled Concrete Made of Crushed Concrete

M. Moghimi P. Shafigh J. Berengian K. Nemati

Abstract *The damaged concrete obtained from destruction of aged concrete buildings could be turned into crushed aggregates and reused for making concrete. By using recycled concrete, it can be eliminated the environmental problems of accumulation of unwanted concrete on the ground surface and also it will prevent the extraction of materials and stone from natural environments. In this research, the effect of microsilica and superplasticizer on the recycled concrete made of crushed aggregate has been investigated. some concrete with certain strength for recycling have been considered and also compressive, tensile strength and modulus of elasticity of recycled and normal concrete with and without microsilica and superplasticizer have been compared. 102 specimens were cast with six different concrete mix designs of constant cement content (cement, microsilica), however, the type of aggregate, (natural, recycled, combination of both) and also the usage or the lack of the additive were different.The analysis of the results of tests show that in most of the concrete mix designs, by usage of microsilica and superplasticizer in recycled concrete it is possible to reach a concrete with higher compressive and tensile strength with compare to the normal concrete.*

Key Words Recycled Concrete, Microsilica, Superplasticizer, Mechanical Properties.

---

* تاریخ تصویب مقاله ۸٦/۹/۲ و تاریخ دریافت نسخه‌ی نهایی اصلاح شده ۸۹/٦/۲۹

(۱) نویسنده‌ی مسئول، کارشناس ارشد، مرکز تحقیقات بتن ایران

(۲) عضو هیئت علمی، گروه عمران، مؤسسه‌ی آموزش عالی شمال- آمل

(۳) استادیار، گروه عمران، دانشکده‌ی فنی بابل، دانشگاه مازندران

(٤) دانشیار، دانشکده‌ی فنی، دانشگاه واشینگتن

مقدمه

یکی از مسائل مهمی که در حال حاضر جهان را به خود مشغول داشته است، مسأله بازیافت می‌باشد. بازیافت، یعنی استفاده مجدد از موادی که قبلاً مصرف شده‌اند. سازه‌های بتن مسلح که در اثر عواملی نظیر زلزله، انفجار، بتن نامرغوب از لحاظ ظاهر، مقاومت فشاری، فرسایش، ناپایداری و غیره نابود می‌شوند، بتن ضایعاتی را به وجود می‌آورند. بتن ضایعاتی می‌تواند دوباره خردشده، به عنوان سنگدانه در ساخت بتن استفاده گردد. تحقیقات در زمینه استفاده دوباره از بتن تخریب شده و مصالح ساختمانی، به عنوان سنگدانه‌هایی برای بتن جدید، به پایان جنگ جهانی دوم باز می‌گردد [1].

از حدود ۲۰ سال پیش، بتن حاصل از تخریب بزرگراه‌ها و ساختمان‌های بتن آرمه در آمریکا و اروپا وارد صنعت بازیافت شده‌است. بتن، بیشترین حجم را در میان زباله‌های ساختمانی دارد. در آمریکا ٦٧ درصد کل زباله‌های ساختمانی را بتن تشکیل می‌دهد [2]. در جامعه‌ی اقتصادی اروپا، سالانه حدود ۵۰ میلیون تن بتن تخریب می‌شود. حدود ۱۱ میلیون تن بتن در انگلستان و حدود ٦۰ میلیون تن بتن در آمریکا سالانه به محل‌های انباشت نخاله‌های ساختمانی حمل می‌شود. در عین حال، در هر سال در آمریکا می‌توان حدود ۱۰ تا ۱۲ میلیون تن بتن را به نحوی مورد استفاده‌ی مجدد قرار داد [3].

درسال۱۹۹٦، Vazqnez و همکارش به مطالعه‌ی اثر رطوبت در سنگدانه‌ی بازیافتی روی خواص بتن تازه سخت شده پرداختند. در این مطالعه، اثر جذب رطوبت درسنگدانه بازیافتی روی خواص مکانیکی ودوام بتن تازه سخت شده مشخص شد [4].

Katz در سال ۲۰۰۲ به بررسی خصوصیات بتن ساخته شده با سنگدانه بازیافتی از بتن تازه سخت شده پرداخت. او بتن‌هایی با مقاومت ۲۸ روزه (MPa) ۲۸ را در سن‌های ۱، ۳ و۲۸ روزه شکست و بازیافت نمود [5].

Ajdukiewiez و همکاران، در سال ۲۰۰۲ به بررسی اثر سنگدانه بازیافتی روی بتن‌های مقاومت بالا پرداختند. در این تحقیق، خواص مکانیکی بتن بازیافتی با مقاومت بالا با بتن ساخته شده از سنگدانه‌ی طبیعی مورد مقایسه قرار گرفته است و طی یک‌سری آزمایش از بتن‌هایی با عمر ۲ تا ۷ سال با مقاومت متوسط و بالا استفاده گردید که حداقل۳ ماه قبل از استفاده مجدد خرد شده بودند [6].

حاجی‌غفاری به مطالعه‌ی بتن بازیافتی و بررسی خواص بتن ساخته شده با خرده بتن به عنوان درشت دانه پرداخت. در این تحقیق که جهت بررسی پتانسیل استفاده از بتن خرد شده به عنوان درشت دانه بتن انجام شد، مشخصات فیزیکی بتن خرد شده توسط آزمایش‌های مختلف تعیین‌گردید و نتایج با نتایج آزمایش‌های مشابه بر روی سنگ شکسته، مورد مقایسه قرار گرفت [۷].

در این تحقیق ازمیکروسیلیس و فوق روان کننده به همراه بتن خردشده به عنوان درشت‌دانه و ریزدانه در ساخت مجدد بتن استفاده شد. هدف اصلی این تحقیق، بررسی اثرمیکروسیلیس و فوق روان کننده در بتن بازیافتی با استفاده ازخرده بتن به عنوان سنگدانه می‌باشد. مخلوط‌های بتن با استفاده از۱۰۰درصد خرده بتن به عنوان بتن بازیافتی و بتن نیمه بازیافتی با جایگزینی ماسه‌ی طبیعی به جای ریزدانه‌ی بازیافتی در محدوده (۲mm-۰) و سنگدانه طبیعی (بتن مبنا) ساخته شده وتمام اختلاط‌ها- یک‌سری با استفاده ازافزودنی و یک‌سری بدون افزودنی- انجام شد و نمونه‌های فشاری، کششی و مدول الاستیسیته آزمایش گردید.

روش تحقیق

جهت بررسی اثر میکروسیلیس و فوق روان کننده بر روی بتن تهیه شده از خرده بتن مخلوط‌های بتنی مختلف طراحی و ساخته شد. از هر مخلوط ۸ نمونه‌ی استوانه‌ای و ۹ نمونه‌ی مکعبی تهیه شد. نمونه‌ها در سنین ۳، ۷ و ۲۸ روزه آزمایش شدند. نمونه‌های استوانه‌ای، جهت تعیین مقاومت کششی، مدول الاستیسیته و نمونه‌های مکعبی جهت تعیین مقاومت فشاری، مورد استفاده

قرارگرفت. در هر سری آزمایش، سه نمونه مقاومت فشاری و دو نمونه مقاومت کششی آزمایش شد تا با به دست آوردن میانگین آن‌ها، اثر پراکندگی نتایج به دست آمده کاهش یابد. در نمونه‌های ساخته شده از خرده بتن، قسمتی از ریزدانه‌ی خرده بتن با ماسه‌ی طبیعی در محدوده (۲mm-۰)، جهت مشاهده اثر آن در مقاومت بتن جایگزین شد. خرده بتن، شن وماسه طبیعی در حالت اشباع با سطح خشک(SSD)، مورد استفاده قرار گرفت. در این تحقیق، جمعاً ۱۰۲ نمونه ساخته شده است که از این تعداد، ٥٤ نمونه جهت اندازه‌گیری مقاومت فشاری، ۳٦ نمونه برای اندازه‌گیری مقاومت کششی،۱۲نمونه جهت اندازه‌گیری مدول الاستیسیته، تحت آزمایش قرار گرفته‌اند. نمونه‌های بتن معمولی با سنگ شکسته برای مقایسه خواص فیزیکی بتن بازیافتی با بتن معمولی، ساخته شدند.

مصالح مصرفی

خرده بتن. برای تهیه‌ی خرده بتن جهت انجام آزمایشات، از خرده بتن با کیفیت اولیه معلوم مربوط به تیرهای تحت بارگذاری قرار گرفته با مقاومت میانگین فشاری $300\ kg/cm^2$ استفاده شد. بتن خرد شده به وسیله‌ی سنگ‌شکن به دانه‌های کوچکتر از ۲۵ میلی‌متر ریز شد و برای آن‌ها آزمایش دانه‌بندی، جذب آب، چگالی و وزن مخصوص انبوه انجام گرفت. نتایج این آزمایش‌ها در جدول (۱) آمده است. اسلامپ تمام طرح اختلاط‌ها در محدوده‌ی mm (۱۰۰-۸۰) ثابت نگه داشته شد.

همانطور که انتظار می‌رود، دانه‌های خرده بتن در حین اختلاط تا حدی به دانه‌های ریزتر از خود تبدیل می‌شود که این امر باعث افزایش درصد ریزدانه بتن و افت اسلامپ آن می‌گردد [6]. بدین منظور، مقدارجزئی فوق روان‌کننده به مخلوط‌های بتن با ٪۱۰۰ مصالح بازیافتی اضافه شد که میزان آن در جدول (٤) ارائه شده است. با درنظرگرفتن تعریف روان کننده‌ها، که با ثابت نگه داشتن نسبت w/c افزودن روان‌کننده‌ها باعث افزایش کارایی می‌شود و با توجه به مقدار خیلی کم آن از اثر آن صرف‌نظر شده است. برای یکسان بودن عملکرد و مقایسه‌ی بهتر، در ساخت بتن بازیافتی به ساخت نمونه‌های شاهد با همان مصالح طبیعی که بتن بازیافت شده از آن ساخته شده بود، مبادرت گردید.

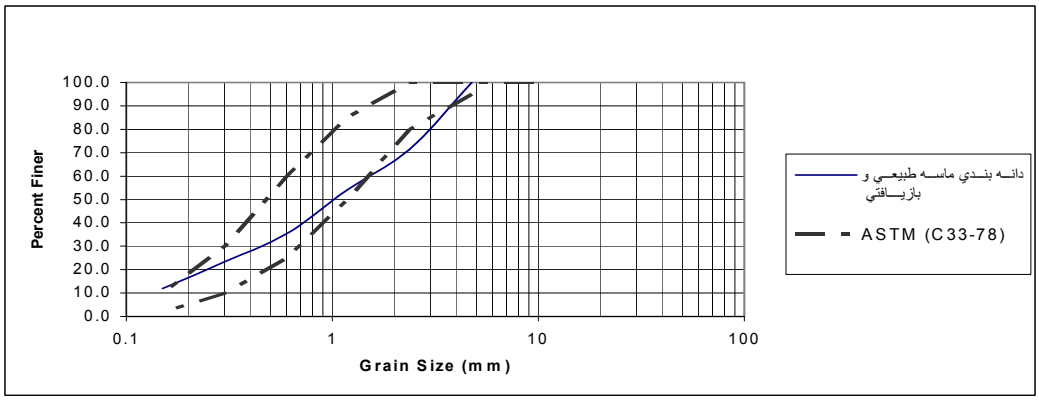
با توجه به این‌که حداکثر اندازه‌ی سنگدانه در بتن بازیافت شده‌ی اولیه‌ی ردشده از الک ۱۲/۵میلیمتر بود، شن طبیعی و نیز درشت دانه‌ی بازیافتی از الک ۱۲/۵ میلی‌متر عبور داده شد و فقط از سنگدانه زیر ۱۲/۵میلی‌متر برای طرح بتن مبنا و بازیافتی استفاده گردید. از آن جایی که برای ساخت بتن بازیافت شده‌ی اولیه، این ماسه از الک ٤ عبور داده شده بود، در بتن از ماسه عبور کرده از الک ٤ استفاده شد، اما برای ریزدانه بازیافتی دانه‌بندی شده، دانه‌بندی مطابق ماسه طبیعی استفاده گردید. به طوری که در شکل (۱) نشان داده شده، نمودار ماسه‌ی بازیافتی، منطبق بر نمودار ماسه‌ی طبیعی می‌باشد.

جدول ۱ ویژگی‌های فیزیکی سنگدانه‌ی مصرفی

خصوصیات سنگدانه‌ها	استاندارد به کاررفته	خرده بتن	سنگدانه طبیعی
وزن مخصوص ظاهری شن در حالت اشباع با سطح خشک (g/cm^3)	ASTM C127	۲/۳۱	۲/۸٦
وزن مخصوص ظاهری ماسه در حالت اشباع با سطح خشک (g/cm^3)	ASTM C,128	۱/۹۷	۲/٤۷
جذب آب درشت‌دانه	ASTM C127	٦/۷۸٪	۰/ ٦۰٪
جذب آب ریزدانه	ASTM C128	۱٤/۰٥٪	٤/۱٦٪
*مقاومت سنگدانه (N/mm^2)	ASTM C33-84	٤۰	۱۲۰
وزن مخصوص توده‌ای(kg/m^3)	ASTM C33-84	۱۳۱٤	۱٦٥۰

*aggregate crushing value

مشخصات سایر اجزا. سیمان مورد استفاده در مخلوط‌های آزمایشی، سیمان تیپ ۲ کارخانه سیمان نکا بوده است. جهت بررسی تأثیر افزودنی‌ها بر خواص مکانیکی بتن بازیافتی، نیمی از نمونه‌ها با استفاده از ۱۰٪ میکروسیلیس به عنوان جایگزین در سیمان مصرفی (SF/C=۱۰٪) ساخته شدند. میکروسیلیس یکی از محصولات فرعی در کارخانه‌های تولید سیلیس یا آلیاژ فروسیلیس می‌باشد. دانسیته پودر میکروسیلیس حدود $2/20\ gr/cm^3$ و قطر دانه‌های آن حدود ۰/۲-۰/۱ میکرون یعنی ۵۰ تا ۱۰۰ برابر کوچکتر از دانه های سیمان است. ریزدانگی بسیار زیاد میکروسیلیس، عامل اصلی پرکنندگی و کاهش نفوذپذیری در بتن بوده و از مهمترین خواص فیزیکی آن به شمار می‌رود. در بتن معمولی، همیشه بین کریستال‌های کلسیم هیدراته شده (ژل C-S-H) حفره‌هایی وجود دارد که پتانسیل بالقوه بتن را برای رسیدن به حداکثر مقاومت و نفوذ ناپذیری بتن سلب می‌کند. افزودن میکروسیلیس سبب می‌شود که دانه‌های کروی شکل فعال میکروسیلیس که تقریباً دی اکسید سیلیسیم خالص هستند، حفره ها را پر کرده و به صورت هسته‌ی مرکزی برای تشکیل کریستال‌های ثانوی، کلسیم سیلیکات هیدراته شده عمل می‌کند. کلسیم سیلیکات هیدراته ثانوی بر اثر ترکیب دی اکسید سیلیسیم و هیدروکسیدکلسیم به وجود می‌آید و از مهمترین خواص شیمیایی آن به شمار می‌رود. نتایج تجزیه شیمیایی انجام یافته روی میکروسیلیس در جدول (۲) نشان داده شده است [۸]. نکته‌ی قابل توجه به هنگام مصرف پودر میکروسیلیس به ویژه برای مخلوط‌های با نسبت آب به سیمان پایین، آن است که کارایی مخلوط به دلیل ریزدانگی شدید پودر و نیاز مبرم به آب اضافی، به طور محسوس کاهش می‌یابد؛ لذا استفاده از فوق روان کننده، امری اجتناب ناپذیر است[۹]. به همین علت در ساخت بتن‌هایی که در آن‌ها از میکروسیلیس استفاده شد،۳٪ وزنی سیمان، فوق روان کننده به کار گرفته شد. با توجه به ثابت نگه داشتن اسلامپ تمام طرح ها ، نسبت w/c برای مخلوط‌های با استفاده از میکروسیلیس و فوق روان کننده کاهش داده شد. ساختار شیمیایی فوق روان کننده‌ها، به صورت ترکیبات ملامین سولفونات فرمالدئید ویا نفتالین سولفونات فرمالدئید و لیگنوسولفونات‌های اصلاح شده می‌باشد [۱۰]. فوق روان کننده‌ی مورد استفاده SikamentNN، بر پایه‌ی شیمیایی ملامین سولفونات فرمالدئید، جهت مصرف در بتن به آب مخلوط گردید.



شکل ۱ نمودار دانه بندی ماسه طبیعی و ریزدانه بازیافتی براساس استاندارد ASTM C33

مکانیزم عمل فوق روان کننده ها شباهت زیادی به عمل روان کننده ها دارد. مهمترین اختلاف آنها در میزان تشکیل مولکول‌های خیلی بزرگ محلول درآب که آنیون‌ها را تولید می‌کنند، است. آرایش ساختمانی این آنیون‌ها (به جزدر مورد لیگنو سولفونات‌ها)، هنوز کاملاً شناخته شده نیست، اما احتمال دارد به صورت آنیون‌هایی که در سطح دانه‌های سیمان به میزان کافی جذب شده و غشایی در اطراف آن تشکیل می‌دهند، نیروی دافعه الکترواستاتیکی که بین یون‌ها وجود دارد سبب پراکندگی دانه های سیمان شده و آن‌ها را به حالت معلق در می‌آورد. این عمل سبب می‌شود تا آب بین آن‌ها بیشتر به جریان افتاده و سبب روانی سیمان در نتیجه کارایی بهتر بتن گردد [۱۱].

پارامترهای پروژه

در این پروژه برای طرح اختلاط بتن و ساختن نمونه‌ها پارامترهای زیر درنظر گرفته شده است:

۱- بتن با ۱۰۰٪ سنگدانه طبیعی به عنوان بتن مبنا،

۲- بتن نیمه بازیافتی با جایگزین کردن ماسه طبیعی به جای خرده بتن در محدوده‌ی mm (۲-۰)،

۳- بتن بازیافتی با ۱۰۰٪ سنگدانه بازیافتی،

٤- اضافه کردن فوق روان کننده و میکروسیلیس به بتن بازیافتی،

۵- ساختن بتن با سنگدانه طبیعی به همراه میکروسیلیس و فوق روان کننده،

٦- استفاده از خرده بتن با کیفیت اولیه‌ی معلوم،

۷- اضافه کردن حداقل افزودنی برای رساندن اسلامپ در محدوده‌ی موردنظر.

در طرح اختلاط نمونه‌ها از روش وزنی استفاده شده و مقادیر وزنی طرح اختلاط در جداول (۳) و(٤) ارائه گردیده است.

جدول ۲ نتایج تجزیه شیمیایی انجام یافته روی میکرو سیلیس [۸]

ترکیبات شیمیایی	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	Na_2O	K_2O	SO_3	Cl
میکروسیلیس	۹۱/۱	۱/۵۵	۲/۰۰	۲/۲۴	۰/۶۰	-	-	۰/۴۵	-

جدول ۳ طرح اختلاط بتن اولیه که مورد بازیافت قرارگرفته kg/m^3

سیمان	آب	ماسه (۰-٤) mm	شن (٤-۱۲/۵) mm	نسبت آب به سیمان w/c	اسلامپ (mm)
٤۱۰	۲۲۵	۹٤۷	۷۳۵	۰/۵۵	۸۰- ۱۰۰

جدول٤ طرح اختلاط بتن آزمایش‌شده kg/m^3

نماد طرح	سیمان (kg)	آب (لیتر)	ماسه‌ی طبیعی(kg)		شن طبیعی(kg)		سنگدانه‌ی بازیافتی(kg)				SP (لیتر)	SF (kg)
			(۰-۲)	(۲-٤)	(٤-۹/۵)	(۹/۵-۱۲/۵)	(۰-۲)	(۲-٤)	(٤-۹/۵)	(۹/۵-۱۲/۵)		
C-R	٤۱۰	۱۹۵	–	–	–	–	٦۷۵/۲	۲۷۱/۸	۱۸۳/۸	۵۵۱/۲	۱	–
C-N	٤۱۰	۱۹۵	٦۷۵/۲	۲۷۱/۸	۱۸۳/۸	۵۵۱/۲	–	–	–	–	–	–
C-NR	٤۱۰	۱۹۵	٦۷۵/۲	–	–	–	–	۲۷۱/۸	۱۸۳/۸	۵۵۱/۲	–	–
H-NR	۳٦۹	۱۰۰	٦۷۵/۲	–	–	–	–	۲۷۱/۸	۱۸۳/۸	۵۵۱/۲	۱۲/۳	٤۱
H-R	۳٦۹	۱۰۰	–	–	–	–	٦۷۵/۲	۲۷۱/۸	۱۸۳/۸	۵۵۱/۲	۱۲/۳	٤۱
H-N	۳٦۹	۱۰۰	٦۷۵/۲	۲۷۱/۸	۱۸۳/۸	۵۵۱/۲	–	–	–	–	۱۲/۳	٤۱

R:recycled aggregate C: concrete H:concrete additive (sp+sf) N:natural aggregate
NR:natural and recycled aggregate SF:silicafume SP:superplasticizer

تحلیل نتایج

خرده بتن و سنگدانه‌ی طبیعی. منحنی دانه بندی ماسه‌ی طبیعی و ریزدانه‌ی بازیافتی مصرف شده در محدوده استاندارد ASTM C33-78 در شکل (۱) نشان داده شده است. نتایج آزمایش‌های مصالح سنگی بر روی خرده بتن، شن و ماسه طبیعی در جدول (۱) آمده است. وزن مخصوص توده‌ای خرده بتن ۲۰ درصد سبکتر از سنگ شکسته است. سطح بتن خرد شده دارای تخلخل زیادی می‌باشد. وزن مخصوص ظاهری اشباع با سطح خشک درشت دانه وریزدانه خرده بتن حدوداً ۲۰ درصد سبکتر از وزن مخصوص ظاهری اشباع با سطح خشک شن و ماسه‌ی طبیعی می‌باشد. این وزن مخصوص کمتر، به دلیل وجود خمیر سیمان سخت شده در خرده بتن می‌باشد. همچنین به علت وجود ملات سیمان سخت شده در خرده بتن، درصد جذب آب آن بیشتر است. نسبت به شن و ماسه طبیعی، درشت دانه خرده بتن ۱۱ برابر سنگ شکسته و ریزدانه خرده بتن ۳/۵ برابر ماسه طبیعی جذب آب دارد.

بتن بازیافتی و بتن معمولی با و بدون استفاده از میکروسیلیس و فوق روان کننده. با استفاده از میکروسیلیس و فوق روان کننده، جایگزین کردن خرده بتن به جای قسمتی و یا تمامی سنگدانه باعث کاهش وزن مخصوص بتن می‌شود. مقدار این کاهش برای بتن بازیافتی با ۱۰۰ درصد خرده بتن و بتن نیمه بازیافتی به ترتیب ۸ و۷ درصد نسبت به بتن مبنا و بدون استفاده ازمیکروسیلیس و فوق روان کننده این نسبت به ترتیب ۱۳و۸ درصد می‌باشد. میانگین وزن مخصوص بتن بازیافتی با و بدون افزودنی kg/m^3 ۲۲۶۰و ۲۱۴۰ و بتن معمولی kg/m^3 ۲٤٦۸ می‌باشد که نشانگر این است که بتن‌های بازیافتی مقداری سبکتر از بتن‌های معمولی هستند.

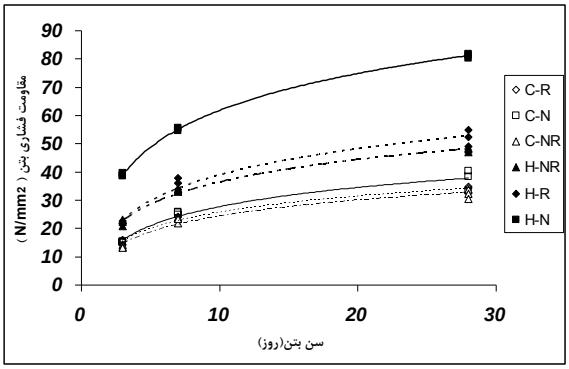
نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری، کششی ومدول الاستیسیته(ASTM C469) بتن بازیافتی و بتن مبنا با استفاده از میکروسیلیس و فوق روان کننده و بدون آن در جدول (۵) و شکل‌های (۲)، (۳)، (٤) و(۵) آمده است. شایان ذکر است که هر عدد مقاومت فشاری میانگین ۳ نمونه و مقاومت کششی و مدول الاستیسیته میانگین ۲ نمونه می‌باشد و چگالی بتن قبل از انجام آزمایش محاسبه شده است.

بررسی و مقایسه‌ی مقاومت نمونه‌های ساخته شده در سنین مختلف براساس تحلیل جداول و نمودارها به شرح زیر است:

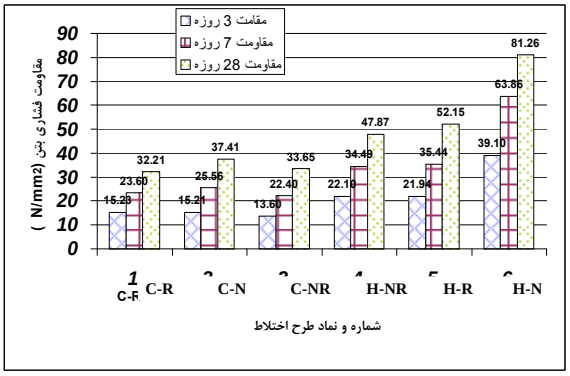
درصد مقاومت فشاری بتن بازیافتی با استفاده از میکرو سیلیس و فوق روان کننده و بدون آن، نسبت به مقاومت فشاری بتن

جدول ۵ نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری، کششی، مدول الاستیسیته و وزن مخصوص بتن

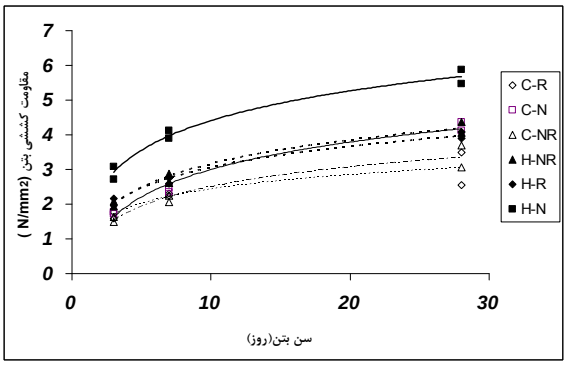
شماره طرح	نماد طرح اختلاط	مقاومت فشاری (N/mm^2)			مقاومت کششی(N/mm^2)			مدول الاستیسیته (N/mm^2)	چگالی بتن (kg/m^3)
		۳	۷	۲۸	۳	۷	۲۸		
۱	C-R	۱۵/۲۳	۲۳/٦۱	۳۲/۲۱	۱/٦۹	۲/۲۸	۳/۰۳	۱/۳۲۹ X۱۰^{٤}	۲۱٤۸
۲	C-N	۱۵/۲۳	۲۵/۵٦	۳۷/۳۱	۱/۷۵	۲/٤۰	٤/۲۵	۲/۱۹٤ X۱۰^{٤}	۲٤٦۸
۳	C-NR	۱۳/٦۰	۲۲/٤۰	۳۳/٦۵	۱/۵٦	۲/۱۵	۳/۳۷	۱/۳۵۲ X۱۰^{٤}	۲۲۷۳
٤	H-NR	۲۲/۱۰	۳٤/۵۰	٤۷/۸۷	۲/۰۱	۲/۷۵	٤/۲۲	۱/٦۲۸ X۱۰^{٤}	۲۲۷٦
۵	H-R	۲۱/۹٤	۳۵/٤٤	۵۲/۱۵	۲/۰٦	۲/٦۷	٤/۰	۱/٦٦٦ X۱۰^{٤}	۲۲٦٦
٦	H-N	۳۹/۱۰	٦۳/۸٦	۸۱/۲٦	۲/۹۰	٤/۰۱	۵/٦۷	۲/٦۰۹ X۱۰^{٤}	۲۵٤٦



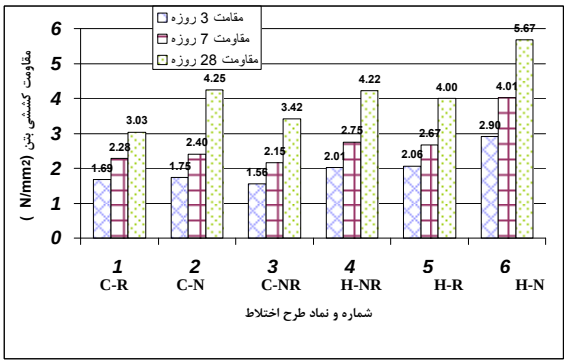
شکل ۲ مقایسه‌ی روند افزایش مقاومت فشاری بتن‌های معمولی با استفاده از افزودنی و بدون آن



شکل ۳ بررسی مقاومت فشاری ۳،۷و۲۸ روزه بتن‌های بازیافتی و بازیافتی و معمولی با استفاده از افزودنی و بدون آن



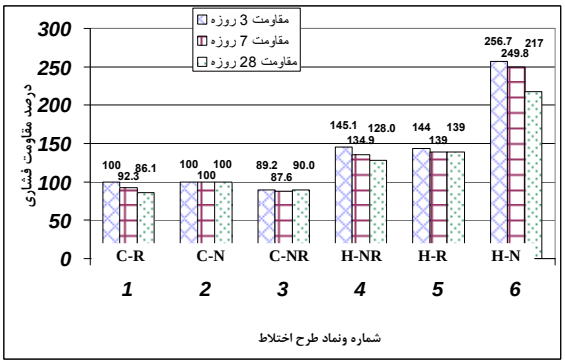
شکل ٤ مقایسه‌ی روند افزایش مقاومت کششی بتن‌های بازیافتی و معمولی با استفاده از افزودنی و بدون آن



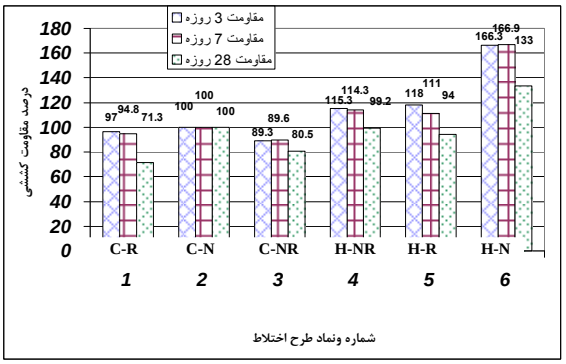
شکل ٥ بررسی مقاومت کششی ۳،۷و۲۸ روزه بتن‌های بازیافتی و معمولی با استفاده از افزودنی و بدون آن

مبنا در سنین ۳، ۷و ۲۸ روزه در شکل (٦) نشان داده شده است. با استفاده از میکروسیلیس و فوق روان کننده میانگین مقاومت فشاری نمونه های ساخته شده از ۱۰۰٪ خرده بتن، بتن نیمه بازیافتی و بتن معمولی با افزودنی به مقاومت مشابه بتن مبنا به ترتیب در سن ۳ روزه ۱/٤٤، ۱/٤٥ و۲/٥٦، در سن ۷ روزه ۱/۳۸، ۱/۳٤ و۲/٤۹، در سن ۲۸ روزه ۱/۳۹، ۱/۲۸ و۲/۱۷ می‌باشد و بدون استفاده از میکروسیلیس و فوق روان کننده میانگین مقاومت فشاری بتن بازیافتی با ۱۰۰٪ خرده بتن و بتن نیمه بازیافتی به مقاومت مشابه بتن مبنا به ترتیب در سن ۳روزه ۰/۹۹ و۰/۸۹، در سن۷ روزه ۰/۹۲و۰/۸۷، در سن ۲۸ روزه ۰/۸٦و۰/۹۰ می‌باشد.

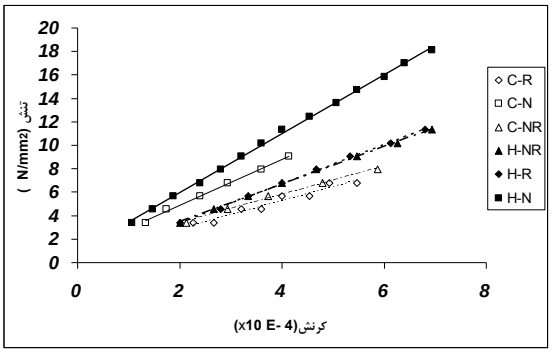
درصد مقاومت کششی بتن بازیافتی با و بدون استفاده از میکرو سیلیس و فوق روان کننده، نسبت به مقاومت کششی بتن مبنا در سنین ۳،۷و۲۸ روزه در شکل (۷) نشان داده شده است. با استفاده از میکروسیلیس و فوق روان کننده، میانگین مقاومت کششی نمونه های ساخته شده از ۱۰۰٪ خرده بتن، بتن نیمه بازیافتی و بتن نرمال با افزودنی به مقاومت مشابه بتن مبنا به ترتیب در سن ۳ روزه: ۱/۱۸، ۱/۱۵ و۱/٦٦، در سن ۷ روزه: ۱/۱۱، ۱/۱٤ و۱/٦٦، در سن ۲۸ روزه: ۰/۹٤، ۰/۹۹ و۱/۳۳ می‌باشد. و بدون استفاده از میکروسیلیس و فوق روان کننده، میانگین مقاومت کششی بتن بازیافتی با ۱۰۰٪ خرده بتن و بتن نیمه بازیافتی به مقاومت مشابه بتن مبنا به ترتیب در سن ۳ روزه: ۰/۹٦ و ۰/۸۹، در سن ۷ روزه: ۰/۹٤ و ۰/۸۹،در سن ۲۸ روزه: ۰/۷۱و۰/۸۰ می‌باشد.



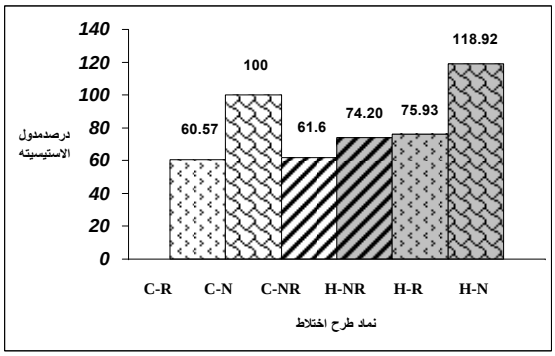
شکل ٦ تأثیر استفاده از مصالح بازیافتی و افزودنی‌های بتن بر مقاومت فشاری۳،۷و۲۸ روزه



شکل ۷ تأثیر استفاده از مصالح بازیافتی و افزودنی‌های بتن بر مقاومت کششی۳،۷و۲۸ روزه



شکل ۸ نمودارتنش- کرنش بتن با استفاده از مصالح بازیافتی و معمولی با استفاده از افزودنی و بدون آن



شکل ۹ تأثیر استفاده از مصالح بازیافتی و افزودنی بر مدول الاستیسیته بتن

نمونه های استوانه‌ای برای به دست آوردن رابطه تنش – کرنش درسن ۲۸ روز آزمایش شدند. شیب مماس بر منحنی تنش- کرنش در فشار تک محوری (به مقدار ۲۵٪ تنش نهایی) در شکل (۸) نشان داده شده است. شیب منحنی تنش- کرنش برای بتن بازیافتی کمتر از بتن معمولی می‌باشد که نشان دهنده‌ی پایین بودن مدول الاستیسیته بتن بازیافتی نسبت به بتن معمولی است.

با توجه به شکل (۹)، مشاهده می‌شود که در سن ۲۸ روزه مدول الاستیسیته میانگین نمونه های ساخته شده از ۱۰۰٪ خرده بتن و بتن نیمه بازیافتی به ترتیب:۰/٦۰ و ۰/٦۱، برابر مدول الاستیسیته بتن مبنا می‌باشد. همچنین با استفاده از میکرو سیلیس و فوق روان کننده برای بتن بازیافتی با ۱۰۰٪ خرده بتن و بتن نیمه بازیافتی و بتن معمولی با افزودنی به ترتیب: ۰/۷۵، ۰/۷٤ و۱/۱۸ برابر مدول الاستیسیته بتن مبنا می‌باشد.

برای تحلیل کلی نتایج، درصد کاهش میانگین مقاومت‌های فشاری وکششی بتن بازیافتی نسبت به مقاومت‌های مشابه بتن مبنا با توجه به نمودارهای (٦) و (۷) در سن ۳ و ۷ و ۲۸ نشان داده شده است.

مقاومت فشاری وکششی بتن نیمه بازیافتی با جایگزینی ماسه‌ی طبیعی به جای ریزدانه بازیافتی در محدوده‌ی mm (۲-۰) کمتر از مقاومت‌های مشابه بتن

مبنا و روند خاصی نسبت به مقاومت‌های مشابه بتن بازیافتی ندارد؛ به عبارت دیگر، در بعضی موارد مقاومت‌های کمتر و در موارد دیگر بیشتر می‌باشد، ولی با استفاده از میکروسیلیس و فوق روان کننده، مقاومت فشاری و کششی بتن‌های بازیافتی نسبت به بتن مبنا بیشتر می‌شود.

می‌توان به ذکر دو دلیل برای کاهش مقاومت بتن بازیافتی نسبت به بتن مبنا اشاره کرد:

اولاً، در حین اختلاط قسمت‌های ضعیف بتن خرد شده، که معمولاً ملات سیمان سخت شده بر روی آن‌ها می‌باشد به قطعات ریزتر خرد می‌شوند. این مسأله باعث افزایش ریزدانه در مخلوط بتن می‌شود که خود باعث افت مقاومت بتن می‌گردد. ثانیاً، به دلیل این‌که بتن خرد شده به دلیل وجود ترک‌ها‌و ریزترک‌ها در سنگدانه بازیافتی و همچنین ملات سیمان سخت شده بر روی آن‌ها، ضعیفتر از سنگ شکسته می‌باشد، مقاومت بافت کریستالی بین دو قطعه ملات سخت شده و یا یک قطعه ملات سخت شده و سنگ شکسته کمتر از مقاومت بافت کریستالی بین دو قطعه سنگ شکسته می‌باشد که خود، باعث کاهش مقاومت بتن بازیافتی می‌شود.

کاهش یا افزایش نسبت مقاومت فشاری وکششی بتن بازیافتی به مقاومت مشابه بتن مبنا روند خاصی با افزایش سن بتن دنبال نمی‌کند.

نتیجه‌گیری

با توجه به آزمایش‌های فیزیکی و مکانیکی انجام گرفته، نتایج به دست آمده به شرح زیر می‌باشد:

۱- بتن خردشده چگالی کمتر و تخلخل بیشتر و در نتیجه جذب آب بیشتری نسبت به سنگ شکسته دارد. وزن مخصوص توده ای خرده بتن حدوداً ۲۰ درصد سبکتراز سنگ شکسته می‌باشد. ریزدانه‌ی خرده بتن ۳/۵ برابر ماسه طبیعی و درشت دانه خرده بتن ۱۱ برابر سنگ شکسته جذب آب مشاهده شد. جایگزین کردن خرده بتن به جای قسمتی و یا تمامی سنگدانه، باعث کاهش وزن مخصوص بتن می‌شود.

۲- اضافه کردن میکروسیلیس و فوق روان کننده به بتن بازیافتی، همانند بتن معمولی باعث بهبود خواص بتن بازیافتی می‌شود. امکان ساخت یک بتن بازیافتی با خرده بتن با مقاومتی بیش از بتن بازیافت شده وجود دارد.

۳- در سن ۲۸ روزه با استفاده از میکروسیلیس و فوق روان کننده، مقاومت‌های بتن‌های بازیافتی، بتن های نیمه بازیافتی و بتن نرمال با افزودنی به ترتیب: ۱/۳۹، ۱/۲۸ و ۲/۱۷ برابر مقاومت فشاری بتن مبنا و همچنین: ۰/۹٤، ۰/۹۹ و ۱/۳۳ برابر مقاومت کششی بتن مبنا می‌با شد.

٤- با استفاده از میکروسیلیس و فوق روان کننده و بدون آن، مدول الاستیسیته بتن بازیافتی وبتن نیمه بازیافتی کمتر از بتن مبنا و مدول الاستیسیته بتن نرمال با استفاده از میکروسیلیس و فوق روان کننده بیشتر از بتن مبنا می‌باشد.

۵- در این تحقیق با استفاده از ماسه‌ی طبیعی به جای ریزدانه‌ی بازیافتی، تأثیر چندانی در مقاومت‌های فشاری و کششی بتن بازیافتی مشاهده نگردید.

مراجع

1. Malhotra, V.M., Nevill, A. "Symposium on concrete technology in the use of demolition waste in concrete", by wain Wright, PJ 26, pp. 179-197, (1995).

2. Frondistion, K., Yannas, S., "Economics of concrete Recycling in the United Sates", Advanced Research

institute problems in the Recycling concrete, France, Nov. 25-28, pp.163-186, (1980).

3. Hansen, T. C. (Editor), "Recycling of demolished concrete and Masonry", RILEM (The international – union of testing and Research laboratories for materials and structures), Reports, (1992).
4. Vazqnez, E., Bara, M., "The influence of retained moisture in aggregates from recycling on the properties of new hardened concrete", Waste Management, Volume 16, Issues 1-3, pp.113-117, (1996).
5. Katz, A., "Properties of concrete made with recycled aggregate from partially hydrated old concrete", Cement and concrete Research, Vo. 33, pp. 703-711, (2003).
6. Ajdukiewiz, A., kliszczewicz, A., "Influence of recycled aggregates on mechanical properties of HS/HPC", Cement and concrete composites, Vol. 24, pp. 269-279, (2002).

۷. حاجی غفاری؛ حسین،"بتن بازیافتی – بررسی خواص بتن ساخته شده با خرده بتن به عنوان درشت دانه"،مجموعه مقالات کنفرانس بین المللی بتن ،دفتر تحقیقات و معیارهای فنی دانشکده فنی دانشگاه تهران ،صفحه ۱٤۰ الی صفحه ۱٤۹، (۱۳۷٦).

۸. گنجیان؛ اسماعیل، "خواص مکانیکی و فیزیکی میکروسیلیس ایران"، مجموعه مقالات سمینار بین المللی کاربرد میکرو سیلیس در بتن،۷-۸ صفحه ۱۹۸ الی ۲۱۳، اردیبهشت (۱۳۷٦).

۹. نویل؛ آدام،"بتن شناسی"،ترجمه دکتر هرمز فامیلی، بازنگری چهارم، انتشارات جهاد دانشگاهی علم و صنعت،(۱۳۷۸).

۱۰. اسماعیل پور؛ اسماعیل"افزودنی‌های بتن و استانداردهای ملی وبین المللی"، مجموعه مقالات نخستین سمینار نقش مواد افزودنی در توسعه تکنولوژی بتن- دانشگاه صنعتی امیر کبیر و شرکت بتون شیمی خاورمیانه، تهران، صفحه‌ی ۹۰ الی ۱٤۷، ۱۹- ۲۰ اردیبهشت (۱۳٦۸).

۱۱. ماجدی اردکانی؛ محمدحسین، رمضانیانپور؛ علی اکبر، طاهری؛ افشین"ترکیبات و ویژگی‌های فوق روان کننده های بتن"، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، نشریه شماره ۹۳۲، چاپ اول، زمستان (۱۳۷٤).