

ارزیابی فنی استفاده از سنگدانه های بتن بازیافتی در تولید بتن با رده های مقاومتی مختلف

مسعود کافی^۱، حبیب ملایی*^۲

^۱ عضو هیات علمی گروه عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد بندرانزلی

Email: kafi@iaubanz.ac.ir

^۲ دانشجوی کارشناسی ارشد عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد بندرانزلی

Email: Hmallaei1843@gmail.com

چکیده

بازیافت نخاله‌های ساختمانی حاصل از تخریب ساختمان‌ها، ایده‌ای است که در سالهای گذشته جهت ارتقای شاخص‌های زیست محیطی و پیشگیری از انتشار آلودگی به ذخایر آب و خاک و همچنین هوای شهرها مطرح شده است. بدین معنی که بکارگیری سنگدانه‌های حاصل از بازیافت از یک سو با مصرف نخاله‌های انباشت شده در طول سال‌های گذشته اثر سودمندی بر محیط زیست خواهد داشت، از سوی دیگر، استفاده این مصالح در مصارف عمرانی، کاهش برداشت از معادن سنگدانه‌های طبیعی و حفظ این منابع برای آیندگان را نیز میسر می‌کند.

در این مطالعه با تهیه طرح‌های مخلوط آزمایشگاهی کنترل با رده‌های مقاومتی C۴۰، C۲۵ و C۱۵ و جایگزینی مقادیر ۵۰٪ و ۱۰۰٪ از مصالح طبیعی با سنگدانه‌های بازیافتی در هر گروه از طرح‌ها، میزان افت هر یک از پارامترهای مقاومت فشاری، مقاومت کششی، درصد جذب آب اولیه و نهایی اندازه گیری و گزارش گردید و مقایسه بین مقادیر افت هر یک از پارامترها در نتیجه جایگزینی مقادیر مشابه مصالح بازیافتی در بتن‌های با رده‌های مقاومتی انجام گرفت.

به منظور شبیه سازی هر چه بیشتر برنامه آزمایشگاهی با انباشت‌های موجود نخاله‌های ساختمانی موجود در حاشیه شهرها و در نتیجه امکان پذیر ساختن تعمیم نتایج این مطالعه به شرایط واقعی، سنگدانه‌های بازیافتی مورد استفاده در این تحقیق از نخاله‌های حاصل از تخریب یک ساختمان مسکونی تهیه شده است.

نتایج این مقاله بصورت کلی نشان می‌دهد که با ارتقای رده‌های مقاومتی بتن از C۱۵ به C۲۵ و C۴۰، افت عملکرد ناشی از جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی، شدت می‌گیرد. البته میزان افت عملکرد بتن در پارامترهای خواص مکانیکی و جذب آب متفاوت بوده و یکسان نمی‌باشند. اما کمترین کاهش مقاومت فشاری و کششی و افزایش جذب آب در نتیجه جایگزینی ۵۰ و ۱۰۰ درصد سنگدانه طبیعی با مصالح بازیافتی مربوط به نمونه‌های ساخته شده با طرح C۱۵ اندازه گیری شده است. که این کاهش خواص مکانیکی و افزایش جذب آب با افزایش رده بتن، بیشتر و بیشتر می‌گردد.

بنابراین نتیجه نهایی قابل گزارش در این مقاله تاکید بر بکارگیری سنگدانه‌های بازیافتی در بتن‌های با رده‌های مقاومتی پایین و کاربردهای بتن غیرسازه‌ای یا غیرمسلح می‌باشد.

واژه های کلیدی: بازیافت ، سنگدانه ، خواص مکانیکی ، نفوذپذیری ، رده مقاومتی

Technical evaluation of the use of the recycled aggregate concrete in the production of concrete with different strength classes

Masoud Kafi¹, Habib Mallaei²

Assistant Professor, Islamic Azad University, Anzali Branch

Email: kafi@iaubanz.ac.ir

Master student of civil engineering, Islamic Azad University, Anzali Branch,

Email: Hmallaei1843@gmail.com

Abstract

Construction and demolition debris recycling is an idea, which has been raised in the past years in order to promote environmental indicators and to prevent pollution emissions to soil and water resources as well as urban air. This means that the use of recycled aggregates on the one hand has a beneficial effect on the environment by consumption of debris deposited during the past years, and on the other hand, the use of these materials in civil engineering applications will provide the reduction of mine exploitation of natural aggregates and preservation of resources for future as well.

In the present study, by manufacturing controlling experimental mix designs with the strength classes of C40, C25, and C15 in which 50% and 100% of natural materials are replaced by recycled aggregates, the loss value for parameters such as compressive strength, tensile strength, initial and final water absorption percentage, were measured and reported for each design classes. The comparison of loss values resulted from the replacing of recycled materials was performed in the concretes with different strength classes.

In order to better simulating the deposits of construction debris existing in the peripheral areas of town by experimental program, and therefore making the possibility of generalizing the results of this study to actual conditions, the used recycled aggregates have been prepared from debris of the demolition of a residential building.

The obtained results from this article generally show that the performance loss caused by the replacement of recycled aggregates increases with enhancing the concrete strength classes from C15 to C25 and C40. However, the performance loss of concrete in the parameters of mechanical properties and water absorption is different, but the minimum reduction in compressive and tensile strength and the minimum increase in water absorption have been measured for the replacement of 50% and 100% of natural aggregates with recycled aggregates related to the C15 specimens. This reduction in mechanical properties and increase in water absorption increase more and more with increase in the concrete class.

Therefore, it can be reported from this dissertation that the emphasis is on the use of recycled aggregates in the concretes with low strength classes and non-structural or unreinforced uses.

Keywords: " recycling", " aggregate", " mechanical properties", " permeability", " strength class"

مقدمه

تخریب سازه های بتن مسلح در دنیا به دلایل گوناگونی چون پایان عمر مفید سازه، نیاز به احداث سازه ی جدید، عواملی مانند بلایای طبیعی نظیر زلزله، سیل و طوفان و بلایای انسانی نظیر جنگ بطور گسترده انجام می گیرد. حجم آوار ناشی از این تخریب ها بصورت گسترده رو به افزایش است. انتقال و دفن نخاله های ساختمانی به خارج از شهرها اولین راه حل محسوب می گردد. اما انباشت روزافزون این نخاله ها در دراز مدت آثار زیانباری بر محیط زیست مناطق حاشیه شهرها و انتشار آلودگی های آب و هوا به مناطق شهری را در پی خواهد داشت. راه حل دیگر، بازیافت این مصالح و استفاده ی مجدد آن ها به عنوان مصالح درجه دوم و جایگزین مصالح طبیعی است، این ایده در مناطقی که خالی از معادن سنگدانه های طبیعی است قابلیت بهره برداری بیشتری دارد.

مطالعات منتشرشده در این خصوص به دو دلیل عمده، اولاً فقدان نگاه اقتصادی به این موضوع و بکارگیری افزودنی هایی نظیر (نانو مواد، الیاف، پوزولان های فعال و ...) که به منظور جبران افت ارتقای خواص مکانیکی از دست رفته صورت گرفته به دلیل گرانی هزینه اقتصادی گزافی را متحمل خواهد نمود. (پیام حسینی و همکاران - فصلنامه انجمن بتن ایران - تابستان ۱۳۸۸) (محمد اسماعیل نیا عمران، مجتبی فریدی - پنجمین کنفرانس ملی سالیانه بتن ایران - مهر ۱۳۹۲) (محمد نیلی، ابراهیم نظری منفرد - چهارمین کنفرانس ملی سالیانه بتن ایران - مهر ۱۳۹۱)

دوما در اکثر موارد سنگدانه های بازیافتی مورد مطالعه عاری از هر گونه آلودگی و فاقد ذرات نازک کاری ساختمانی نظیر (گچ، سیمانکاری رویه و ...) بوده و از طرفی در محیط آزمایشگاهی خرد و دانه بندی شده و با نسبت های مشخص به عنوان جایگزین تمام یا قسمتی از سنگدانه های بتن جدید مورد استفاده قرار گرفته است که بکارگیری این مصالح را در ابعاد اجرایی امکان پذیر ن ساخته است. (علی صدر ممتازی و همکاران - مجله تحقیقات بتن - بهار و تابستان ۱۳۹۲) (محمد نیلی و همکاران - ششمین کنفرانس ملی سالیانه بتن ایران - مهر ۱۳۹۳) (علیرضا خالو و همکاران - مجله تحقیقات بتن - تابستان ۱۳۸۹)

لذا در این مطالعه در نظر است تا با بررسی فنی استفاده از این مصالح در بتن های با رده های مقاومتی مختلف که کاربردهای مختلفی در پروژه های عمرانی دارند، مستندات توجیهی اجرای این ایده جمع آوری گردد تا دستیابی اهداف مدنظر از قبیل کاهش انباشت نخاله های آلاینده محقق شود. بدین منظور با تهیه طرح های مخلوط آزمایشگاهی کنترل بار رده های مقاومتی متغیر به عنوان مثال C۴۰، C۲۵ و C۱۵ و جایگزینی مقادیر متفاوت مصالح طبیعی با سنگدانه های بازیافتی ۵۰٪ و ۱۰۰٪ ضمن بررسی مقادیر افت احتمالی خواص مهندسی (مقاومت فشاری و کششی) و پارامترهای جذب آب، بهینه ترین شرایط استفاده و بکارگیری مصالح بازیافتی ارزیابی و معرفی گردد.

هدف اصلی این تحقیق دستیابی و معرفی بهینه ترین شرایط استفاده و بکارگیری مصالح بازیافتی در تولید بتن است. ارزیابی میزان اثرپذیری هر یک از پارامترهای بتن سخت شده از قبیل خواص مکانیکی و جذب آب در نتیجه بکارگیری مقادیر جایگزینی سنگدانه های بازیافتی دیگر هدفی است که در این تحقیق دنبال می شود. بدین منظور دو نکته در روند مطالعه مدنظر قرار گرفته است:

- تهیه مصالح بتن بازیافتی از انباشت های نخاله های شهری جهت بکارگیری در مخلوط های آزمایشگاهی وجه تمایز این مطالعه با مطالعات پیشین در این موضوع است.

- ارائه طرح مخلوط بتن معمولی بدون استفاده از افزودنی های ویژه به منظور دستیابی به کمترین اثر کاهنده جایگزینی مصالح بازیافتی بر مشخصات بتن

هدف از تاکید ویژه بر موارد فوق در روند این مطالعه، دستیابی به نتایجی کاربردی و سودمند جهت نیل به اهداف توسعه پایدار شهری است که قابلیت عرضه و بهره برداری در صنعت ساختمان و تامین آثار مثبت بر محیط زیست شهری را فراهم نماید.

با توجه به دستورالعمل تهیه طرح جامع مدیریت پسماند تدوین شده توسط سازمان شهرداری ها و دهیاری های کشور، مسئولیت برنامه ریزی و سیاست گذاری پروژه های بازیافت نخاله ها بر عهده شهرداری ها، دهیاری ها و بخشرداری ها می باشد که از طریق برگزاری مناقصه به شرکت

های پیمانکار این حوزه واگذار می شود. بنابراین نتایج این مطالعه قابلیت بهره برداری توسط نهادهای مذکور و همچنین سازمان حفاظت محیط زیست و شرکت های خصوصی پیمانکار را خواهد داشت.

مصالح و مواد مورد استفاده:

سیمان:

سیمان مورد استفاده در این تحقیق از نوع پرتلند نوع ۲ تولید شده در کارخانه سیمان هگمتان بوده که دارای توده ویژه $3142 kg/m^3$ و سطح مخصوص $2900 gr/cm^2$ می باشد.

آب:

کیفیت آب در بتن از آن جهت حائز اهمیت است که ناخالصی های موجود در آن ممکن است در گیرش سیمان اثر گذاشته و سبب بروز لکه هایی در سطح بتن و حتی خوردگی آرماتور شود. به دلایل فوق باید برای ساخت بتن و عمل آوردن آن آب مناسب انتخاب شود. مطابق استانداردها، آب مناسب برای بتن، آبی است که برای آشامیدن مناسب باشد.

آب استفاده شده در ساخت آزمون های بتن، آب شرب شهر رشت بوده و الزامات *ASTM D 1129* را برآورده می کند.

مصالح سنگی طبیعی:

در این مطالعه جهت ساخت بتن از ماسه طبیعی رودخانه ای و شن طبیعی شکسته با بزرگترین اندازه اسمی ۱۹ میلی متر استفاده شد.

مصالح بازیافتی:

در این مطالعه به منظور تهیه سنگدانه های بازیافتی از مصالح حاصل از تخریب یک ساختمان مسکونی در استان گیلان استفاده گردید.

مشخصات عمومی این ساختمان به شرح زیر است:

- ساختمان مسکونی ۲ طبقه با اسکلت بتن مسلح با زیربنای حدودی ۲۰۰ متر مربع

- دیوارهای داخلی از جنس آجر سفالی

- دیوارهای پیرامونی از نوع بلوک سیمانی

- سقف از نوع تیرچه و بلوک سیمانی

- کف سازی رویین فضاهای مسکونی از نوع موزاییک فرنگی (موزاییک سیمانی با رویه سفید)

- در روند تخریب و بارگیری نخاله های این ساختمان که حجم تخمینی آن قریب به ۲۵۰ مترمکعب برآورد می گردد، طی ۵ نوبت نمونه برداری،

حجم حدودی ۱.۵ تا ۲ مترمکعب بطوری که فاقد مواد زایدی همچون اندود گچ و پلاستیک باشد تهیه گردید. مصالح جداسازی شده به وسیله

یک دستگاه سنگ شکن فکی طی دو مرحله با تغییر فواصل فک ها خرد و سپس روی سرنده ۳۰ میلی متر جداسازی گردید. سپس مصالح از

سرنده با قطر چشمه ۴ میلی متر، عبور داده شد و ذرات ریزتر جدا شد.

درصد	اجزای تشکیل دهنده مصالح بازیافتی
۵۶	بتن و سنگدانه
۱۹	بلوک سیمانی
۵.۵	اندود سیمان
۱۴	آجر و سفال
۴	موزاییک
۱.۵	سایر مصالح

طراحی مخلوط شاهد و بازیافتی با رده‌های مقاومتی مختلف:

در این مطالعه طرح اختلاط هریک از رده‌های مقاومتی بتن براساس استاندارد ۲۱۱.۱-۹۱ *ACI* محاسبه گردید. لذا در نظر است اثر جایگزینی سنگدانه طبیعی با مصالح بازیافتی بر هر یک از طرح‌های اختلاط با رده مقاومتی متفاوت مورد بررسی قرار گیرد. بدین منظور با جایگزینی ۵۰ و ۱۰۰ درصد از درشت دانه‌ها با مصالح بازیافتی، امکان این مقایسه فراهم می‌گردد. در طرح‌های اختلاط به منظور سهولت ارجاع به هر طرح، هریک از طرح‌های اختلاط با یک کد اختصاری متمایز شده است. طرح‌های شاهد با کدهای $C15$ ، $C25$ و $C40$ نامگذاری شده‌اند که C به معنی طرح شاهد (*Control*) و عدد مقابل آن معرف رده مقاومتی طرح می‌باشد. طرح‌های بازیافتی بصورت کلی با کد $Rx-y$ مشخص شده‌اند که R به معنی طرح حاوی مصالح بازیافتی (*Recycle*)، x رده مقاومتی و y درصد جایگزینی مصالح بازیافتی را مشخص می‌کند. به عنوان مثال $R25-50$ نشانگر طرح با رده مقاومتی ۲۵ مگاپاسکال و حاوی ۵۰ درصد درشت‌دانه‌های بازیافتی می‌باشد.

جدول شماره ۱- طرح‌های اختلاط شاهد و بازیافتی

(Kg/m^3)	سیمان	آب	نسبت آب به سیمان	ریزدانه طبیعی	درشت دانه طبیعی	درشت دانه بازیافتی
$C15$	۲۵۹	۲۰۵	۰.۷۹	۸۷۲	۹۵۰	۰
$R15-50$	۲۵۹	۲۰۵	۰.۷۹	۸۷۲	۴۷۵	۴۱۷
$R15-100$	۲۵۹	۲۰۵	۰.۷۹	۸۷۲	۰	۸۳۳
$C25$	۳۳۶	۲۰۵	۰.۶۱	۸۰۸	۹۵۰	۰
$R25-50$	۳۳۶	۲۰۵	۰.۶۱	۸۰۸	۴۷۵	۴۱۷
$R25-100$	۳۳۶	۲۰۵	۰.۶۱	۸۰۸	۰	۸۳۳
$C40$	۴۸۸	۲۰۵	۰.۴۲	۶۸۶	۹۵۰	۰
$R40-50$	۴۸۸	۲۰۵	۰.۴۲	۶۸۶	۴۷۵	۴۱۷
$R40-100$	۴۸۸	۲۰۵	۰.۴۲	۶۸۶	۰	۸۳۳

ساخت آزمون‌ها و انجام آزمایش‌ها (ساخت طرح‌های مخلوط):

روش اختلاط برای ساخت مخلوط‌های بتنی در مخلوط کن ۱۰۰ لیتری موجود در آزمایشگاه بتن، به این صورت بود که ابتدا سنگدانه‌ها بصورت خشک به مدت یک دقیقه مخلوط شده، پس از آن ۱/۳ آب اختلاط به مخلوط اضافه شده و به مدت ۱ دقیقه مخلوط شدند، سپس سیمان به همراه ۲/۳ کل آب به مدت ۳ دقیقه مخلوط می‌گردند. با توجه به انجام آزمایش‌های مختلف بر روی بتن سخت شده، آزمون‌هایی با ابعاد مختلف، متناسب با هر آزمایش تهیه شد. آزمون‌های تهیه شده از هر مخلوط در جدول ۲ نشان داده شده است.

جدول شماره ۲- مشخصات آزمون‌های ویژه هر آزمایش

آزمایش	هندسه و ابعاد آزمون (سانتیمتر)
مقاومت فشاری	مکعب ۱۰*۱۰*۱۰
مقاومت کششی	استوانه ۱۵*۳۰
جذب آب کوتاه و بلندمدت	مکعب ۱۰*۱۰*۱۰

آزمایش مقاومت فشاری:

آزمایش افت ارتفاع اسلامپ برای طرح های مخلوط طبق جدول ذیل مورد استفاده قرار گرفته است.

آزمایش افت ارتفاع اسلامپ برای طرح های مخلوط

کد طرح ها	افت ارتفاع در آزمایش اسلامپ (cm)		
	۰	۵۰ %	۱۰۰ %
C۱۵	۱۰.۵	۹.۵	۹
C۲۵	۱۰	۸	۶
C۴۰	۱۰.۵	۷	۵

به منظور بررسی این پارامتر، نمونه‌های بتن مکعبی با ابعاد ۱۰*۱۰*۱۰ سانتیمتر ساخته شده و نمونه‌ها تا سن آزمایش، در حوضچه‌های آب عمل‌آوری می‌گردند. در سن آزمایش، نمونه‌ها طبق استاندارد ملی ۳۲۰۶ مورد آزمایش قرار می‌گیرند. جهت بارگذاری بر روی نمونه های مکعبی عمود بر جهت بتن ریزی قالب می‌باشد. بارگذاری فشاری بطور پیوسته و با سرعت مشخصی مابین ۰.۲ تا ۰.۴ مگاپاسکال بر ثانیه انجام گرفت. تعداد نمونه های مورد آزمایش در هر سن ۳ نمونه انتخاب شد.

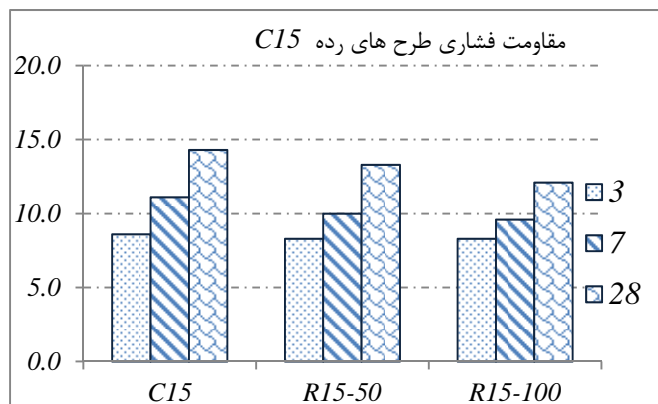
جدول شماره ۳- نتایج مقاومت فشاری

کد طرح ها	مقاومت فشاری (Mpa)		
	۳	۷	۲۸
C۱۵	۸.۶	۱۱.۱	۱۴.۳
R۱۵-۵۰	۸.۳	۱۰.۰	۱۳.۳
R۱۵-۱۰۰	۸.۳	۹.۶	۱۲.۱
C۲۵	۱۵.۸	۱۸.۷	۲۷.۱
R۲۵-۵۰	۱۴.۰	۱۶.۹	۲۲.۹
R۲۵-۱۰۰	۱۳.۱	۱۵.۰	۲۰.۳
C۴۰	۲۶.۰	۳۲.۰	۴۳.۰
R۴۰-۵۰	۲۱.۳	۲۶.۵	۳۴.۸
R۴۰-۱۰۰	۱۹.۴	۲۲.۰	۲۵.۴

روند توسعه مقاومت فشاری نمونه‌های بتن ساخته شده با طرح اختلاط رده C۱۵ در سنین ۳، ۷ و ۲۸ روز در شکل شماره ۱ نشان داده شده است. بیشترین مقاومت فشاری در همه سنین برای طرح شاهد یعنی نمونه‌های فاقد مصالح بازیافتی اندازه‌گیری شده است. مقاومت فشاری ۲۸ روزه برای طرح شاهد که جزئیات طرح اختلاط بر مبنای جداول تعیین اجزای طرح اختلاط به روش ACI تعیین گردید، ۱۴.۳ مگاپاسکال ثبت گردید.

مقایسه نتایج طرح‌های حاوی ۵۰ درصد و ۱۰۰ درصد مصالح بازیافتی نشان می‌دهد که در سن ۳ روز، تفاوتی مابین این شاخص وجود نداشته و با افزایش مدت عمل‌آوری تا ۷ و ۲۸ روز افت مقاومت فشاری ناشی از جایگزینی سنگدانه‌های طبیعی با مصالح بازیافتی، نمود بیشتری دارد بطوری که در سن ۲۸ روز مقاومت فشاری طرح شاهد همانطور که قبلاً اشاره شده ۱۴.۳ مگاپاسکال اندازه‌گیری گردید در حالیکه مقاومت فشاری طرح حاوی ۵۰ و ۱۰۰ درصد درشت‌دانه‌های بازیافتی به ترتیب برابر ۱۳.۳ و ۱۲.۱ مگاپاسکال ثبت گردید.

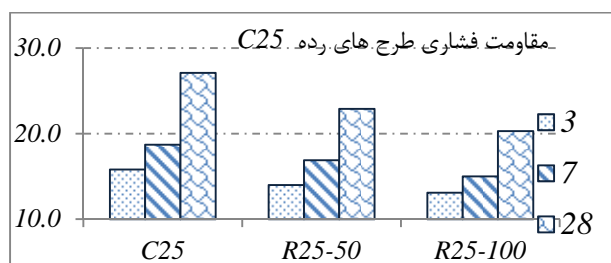
به نظر می‌رسد علت وجود این تفاوت در روند نتایج سنین اولیه و نهایی ناشی از آن است که در سنین ابتدایی (۳روز) به دلیل عدم توسعه واکنش‌های هیدراسیون و فراورده‌های ناشی از این واکنش‌ها که ارتقای سختی ساختار ماتریس بتن را سبب می‌گردند، مقاومت ملات نگهدارنده سنگدانه‌ها حاکم بر مقاومت مجموعه نمونه بتن که از دو بخش سنگدانه و ملات تشکیل می‌گردد، می‌باشد و ضعف ساختار ملات که در همه طرح‌ها با حجم مساوی و مشخصات یکسان ساخته شده است موجب کسب نتایج مقاومت فشاری مشابه می‌گردد اما با توسعه واکنش‌های هیدراسیون با گذشت مدت زمان عمل‌آوری نمونه‌ها، و رسیدن مشخصات ملات به حالت آرمانی خود، اثرگذاری مشخصات سنگدانه نمود بیشتری پیدا کرده و ضعف ناشی از سنگدانه بازیافتی منجر به کسب مقاومت فشاری کمتر نسبت به نمونه حاوی سنگدانه‌های طبیعی می‌گردد.



شکل شماره ۱- مقاومت فشاری طرح C15 در سنین مختلف

مقاومت فشاری نمونه‌های بتن ساخته شده با طرح اختلاط رده C25 در سنین ۳، ۷ و ۲۸ روز در شکل شماره ۲ نشان داده شده است. مطابق نمودار در هر یک از طرح اختلاط‌ها با گذشت زمان عمل‌آوری، مقاومت فشاری افزایش می‌یابد. مقاومت فشاری ۲۸ روزه برای طرح شاهد که جزئیات طرح اختلاط بر مبنای جداول تعیین اجزای طرح اختلاط به روش ACI تعیین گردید، ۲۷.۱ مگاپاسکال ثبت گردید.

در تمامی سنین ۳، ۷ و ۲۸ روز با جایگزینی مصالح بازیافتی از مقاومت فشاری کاسته شده است. اما مشابه با نتایج طرح رده C15 روند کاهشی مقاومت فشاری در سنین نهایی شدت بیشتری از سنین ابتدایی دارد. در سن ۲۸ روز مقاومت فشاری از ۲۷.۱ مگاپاسکال برای طرح شاهد به ۲۲.۹ مگاسکال برای طرح با ۵۰ درصد جایگزینی مصالح بازیافتی و ۲۰.۳ مگاپاسکال برای طرح حاوی ۱۰۰ درصد درشت‌دانه‌های بازیافتی کاهش می‌یابد.



شکل شماره ۲- مقاومت فشاری طرح C25 در سنین مختلف

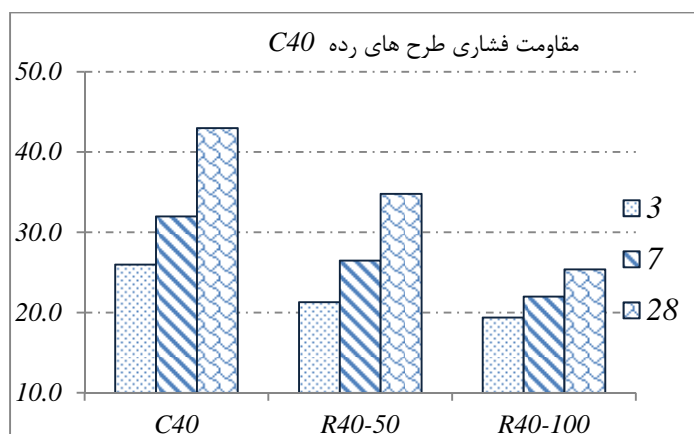
مقاومت فشاری نمونه‌های بتن ساخته شده با طرح اختلاط رده C40 در سنین ۳، ۷ و ۲۸ روز در شکل شماره ۳ نشان داده شده است. مطابق نمودار در هر یک از طرح اختلاط‌ها با گذشت زمان عمل‌آوری، مقاومت فشاری افزایش می‌یابد.

مقاومت فشاری ۲۸ روزه برای طرح شاهد که جزئیات طرح اختلاط بر مبنای جداول تعیین اجزای طرح اختلاط به روش ACI تعیین گردید، ۴۳ مگاپاسکال ثبت گردید.

در تمامی سنین ۳، ۷ و ۲۸ روز با جایگزینی مصالح بازیافتی از مقاومت فشاری کاسته شده است. اما مشابه با نتایج طرح رده C۱۵ و C۲۵ روند کاهش مقاومت فشاری در سنین نهایی شدت بیشتری از سنین ابتدایی دارد.

در سن ۲۸ روز مقاومت فشاری از ۴۳ مگاپاسکال برای طرح شاهد به ۳۴.۸ مگاپاسکال برای طرح با ۵۰ درصد جایگزینی مصالح بازیافتی و ۲۵.۴ مگاپاسکال برای طرح حاوی ۱۰۰ درصد درشت‌دانه‌های بازیافتی کاهش می‌یابد.

اما یکی از وجوه تمایز روند توسعه مقاومت فشاری طرح های C۱۵، C۲۵ و C۴۰ مقاومت فشاری سنین اولیه می‌باشد. برخلاف توضیحات ارائه شده مبنی بر حاکم بودن مقاومت ملات بر مقاومت فشاری نمونه و توجیه نتایج مشابه مقاومت فشاری طرح‌های حاوی سنگدانه‌های طبیعی و بازیافتی رده C۱۵، نتایج طرح‌های C۲۵ و C۴۰ علی‌رغم اینکه کاهش مقاومت کمتری در ۳ روز در مقایسه با نتایج ۲۸ روزه را نتیجه داده‌اند اما مشابه با طرح C۱۵ مقاومت فشاری یکسانی ندارند. علت این تفاوت در رده های مختلف مقاومتی بتن را می‌توان اینگونه توجیه کرد که با افزایش عیار سیمان و کاهش نسبت آب به سیمان در طرح های اختلاط نرخ توسعه واکنش‌های هیدراتاسیون افزایش می‌یابد و سرعت کسب مقاومت ملات بیشتر می‌شود که موجب می‌گردد با ارتقای رده مقاومتی بتن، اثرگذاری منفی ناشی از جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی حتی در سنین اولیه نیز بروز و ظهور یابد.



شکل شماره ۳- مقاومت فشاری طرح C۴۰ در سنین مختلف

درصد مقاومت فشاری طرح های حاوی سنگدانه های بازیافتی نسبت به طرح شاهد در سنین مختلف در جدول ۴ آورده شده است.

جدول شماره ۴- درصد مقاومت فشاری کسب شده نسبت به طرح شاهد

کد طرح ها	درصد مقاومت فشاری کسب شده نسبت به طرح شاهد (Mpa)		
	۳	۷	۲۸
C۱۵	۱۰۰.۰	۱۰۰.۰	۱۰۰.۰
R۱۵-۵۰	۹۶.۵	۹۰.۱	۹۳.۰
R۱۵-۱۰۰	۹۶.۵	۸۶.۵	۸۴.۶
C۲۵	۱۰۰.۰	۱۰۰.۰	۱۰۰.۰
R۲۵-۵۰	۸۸.۶	۹۰.۴	۸۴.۵

R۲۵-۱۰۰	۸۲.۹	۸۰.۲	۷۴.۹
C۴۰	۱۰۰.۰	۱۰۰.۰	۱۰۰.۰
R۴۰-۵۰	۸۱.۹	۸۲.۸	۸۰.۹
R۴۰-۱۰۰	۷۴.۶	۶۸.۸	۵۹.۱

نتایج آزمایش مقاومت کششی:

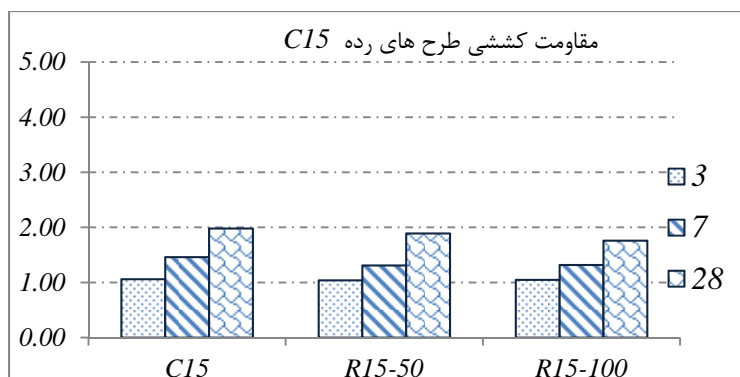
در آزمایش مقاومت کششی به روش شکافت، استوانه استاندارد $15 \times 30 \text{ cm}$ به صورت خوابیده (طوری که ارتفاع استوانه در راستای افق قرار گیرد) تحت بارگذاری قرار می‌گیرد.

این روش آزمایش با اعمال نیروی فشاری قطری روی طول نمونه استوانه ای بتن با سرعتی در محدوده مناسب، تا گسیختگی نمونه انجام می‌شود. بارگذاری به صورت پیوسته و بدون اعمال ضربه انجام می‌شود. سرعت ثابت بارگذاری بین ۵۱ تا ۱۰۲ KN/min می‌باشد. نتایج مقاومت کششی طرح‌های حاوی سنگدانه‌های طبیعی و بازیافتی در سنین مختلف در جدول ۵ آورده شده است.

جدول شماره ۵- مقاومت کششی

کد طرح ها	مقاومت کششی (Mpa)		
	۳	۷	۲۸
C۱۵	۱.۰۶	۱.۴۶	۱.۹۸
R۱۵-۵۰	۱.۰۴	۱.۳۱	۱.۸۹
R۱۵-۱۰۰	۱.۰۵	۱.۳۲	۱.۷۶
C۲۵	۱.۴۶	۲.۲۳	۳.۵۴
R۲۵-۵۰	۱.۳۶	۱.۸۶	۲.۸۸
R۲۵-۱۰۰	۱.۲۳	۱.۶۳	۲.۱۶
C۴۰	۲.۸۸	۳.۴۱	۴.۶۳
R۴۰-۵۰	۲.۳۴	۲.۵۴	۳.۱۱
R۴۰-۱۰۰	۲.۰۱	۲.۱۵	۲.۴۳

روند توسعه مقاومت کششی نمونه‌های بتن ساخته شده با طرح اختلاط رده C۱۵ در سنین ۳، ۷ و ۲۸ روز در شکل شماره ۴ نشان داده شده است. بیشترین مقاومت کششی در همه سنین برای طرح شاهد یعنی نمونه‌های فاقد مصالح بازیافتی اندازه‌گیری شده است. مقایسه نتایج طرح‌های حاوی ۵۰ درصد و ۱۰۰ درصد مصالح بازیافتی نشان می‌دهد که در سن ۳ روز، مشابه با نتایج آزمایش مقاومت فشاری، تفاوتی مابین این شاخص وجود نداشته و با افزایش مدت عمل‌آوری تا ۷ و ۲۸ روز افت مقاومت کششی ناشی از جایگزینی سنگدانه‌های طبیعی با مصالح بازیافتی، نمود بیشتری البته به میزان اندک دارد بطوری که در سن ۲۸ روز مقاومت کششی طرح شاهد از ۱.۹۸ مگاپاسکال به ۱.۸۹ و ۱.۷۶ مگاپاسکال برای طرح حاوی ۵۰ و ۱۰۰ درصد درشت‌دانه‌های بازیافتی می‌رسد.



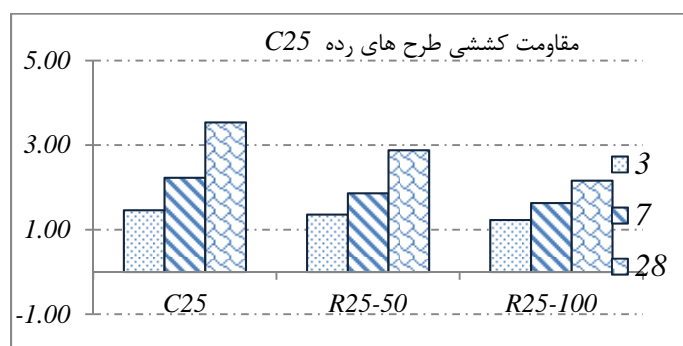
شکل شماره ۴- مقاومت کششی طرح C15 در سنین مختلف

مقاومت کششی نمونه‌های بتن ساخته شده با طرح اختلاط رده C25 در سنین ۳، ۷ و ۲۸ روز در شکل شماره ۵ نشان داده شده است. مطابق نمودار در هر یک از طرح اختلاط ها با گذشت زمان عمل‌آوری، مقاومت کششی افزایش می‌یابد.

در تمامی سنین ۳، ۷ و ۲۸ روز با جایگزینی مصالح بازیافتی از مقاومت کششی کاسته شده است. اما مشابه با نتایج طرح رده C15 روند کاهشی مقاومت کششی در سنین نهایی شدت بیشتری از سنین ابتدایی دارد.

استدلالی که قابل ارائه برای این روند تغییرات مقاومت کششی می‌باشد همان استدلال طرح شده برای مقاومت فشاری می‌باشد. بدین معنی که عدم توسعه فرایندهای هیدراتاسیون سیمان و کسب سختی ساختار ملات در سنین اولیه موجب می‌شود که مقاومت ملات در نمونه‌های بتن حاکم و تعیین کننده مقاومت کششی نمونه‌ها باشد و ضعف سنگدانه‌های بازیافتی در مقایسه با سنگدانه‌های طبیعی اثرگذاری قابل ملاحظه‌ای در این سنین نخواهد داشت که با گذشت مدت عمل‌آوری و توسعه و تکمیل واکنش‌های گیرش و تامین پتانسل سختی ساختار ملات هر رده مقاومتی، ضعف سنگدانه‌ها عاملی اثرگذارتر خواهد بود و تعیین کننده مقاومت نمونه‌ها می‌باشد.

در سن ۲۸ روز مقاومت کششی از ۳.۵۴ مگاپاسکال برای طرح شاهد به ۲.۸۸ مگاسکال برای طرح با ۵۰ درصد جایگزینی مصالح بازیافتی و ۲.۱۶ مگاپاسکال برای طرح حاوی ۱۰۰ درصد درشت‌دانه‌های بازیافتی کاهش می‌یابد.



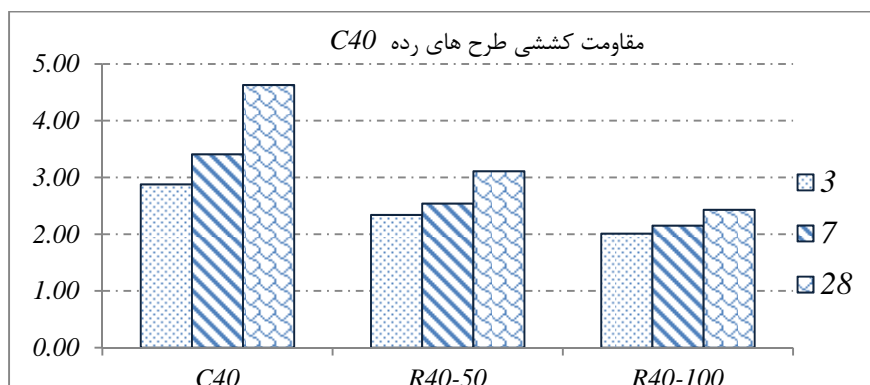
شکل ۵- مقاومت کششی طرح C25 در سنین مختلف

مقاومت کششی نمونه‌های بتن ساخته شده با طرح اختلاط رده C40 در سنین ۳، ۷ و ۲۸ روز در شکل شماره ۶ نشان داده شده است. مطابق نمودار در هر یک از طرح اختلاط‌ها با گذشت زمان عمل‌آوری، مقاومت کششی افزایش می‌یابد.

در تمامی سنین ۳، ۷ و ۲۸ روز با جایگزینی مصالح بازیافتی از مقاومت کششی کاسته شده است. اما مشابه با نتایج طرح رده C15 و C25 روند کاهشی مقاومت کششی در سنین نهایی شدت بیشتری از سنین ابتدایی دارد.

در سن ۲۸ روز مقاومت کششی از ۴.۶۳ مگاپاسکال برای طرح شاهد به ۳.۱۱ مگاپاسکال برای طرح با ۵۰ درصد جایگزینی مصالح بازیافتی و ۲.۴۳ مگاپاسکال برای طرح حاوی ۱۰۰ درصد درشت دانه های بازیافتی کاهش می یابد.

مشابه با روند تغییرات مقاومت فشاری، برخلاف توضیحات ارائه شده مبنی بر حاکم بودن مقاومت ملات بر مقاومت فشاری اولیه نمونه و توجه به نتایج مشابه مقاومت کششی طرح های حاوی سنگدانه های طبیعی و بازیافتی رده C۱۵، نتایج طرح های C۲۵ و C۴۰ علی رغم اینکه کاهش مقاومت کمتری در ۳ روز در مقایسه با نتایج ۲۸ روزه را نتیجه داده اند اما مشابه با طرح C۱۵ مقاومت کششی یکسانی ندارند. علت این تفاوت در رده های مختلف مقاومتی بتن را می توان اینگونه توجیه کرد که با افزایش عیار سیمان و کاهش نسبت آب به سیمان در طرح های اختلاط نرخ توسعه واکنش های هیدراتاسیون افزایش می یابد و سرعت کسب مقاومت ملات بیشتر می شود که موجب می گردد با ارتقای رده مقاومتی بتن، اثرگذاری منفی ناشی از جایگزینی سنگدانه های بازیافتی حتی در سنین اولیه نیز بروز و ظهور یابد.



شکل ۶- مقاومت کششی طرح C۴۰ در سنین مختلف

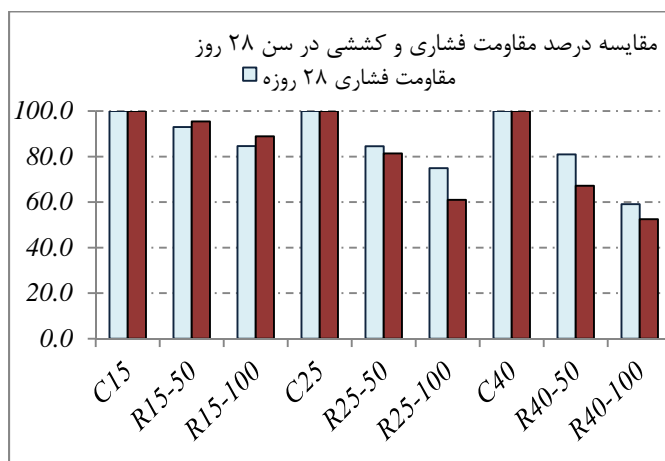
درصد مقاومت کششی طرح های حاوی سنگدانه های بازیافتی نسبت به طرح شاهد در سنین مختلف در جدول شماره ۶ آورده شده است.

جدول شماره ۶- درصد مقاومت کششی کسب شده نسبت به طرح شاهد

کد طرح ها	درصد مقاومت کششی کسب شده نسبت به طرح شاهد (Mpa)		
	۳	۷	۲۸
C۱۵	۱۰۰.۰	۱۰۰.۰	۱۰۰.۰
R۱۵-۵۰	۹۸.۱	۸۹.۷	۹۵.۵
R۱۵-۱۰۰	۹۹.۱	۹۰.۴	۸۸.۹
C۲۵	۱۰۰.۰	۱۰۰.۰	۱۰۰.۰
R۲۵-۵۰	۹۳.۲	۸۳.۴	۸۱.۴
R۲۵-۱۰۰	۸۴.۲	۷۳.۱	۶۱.۰
C۴۰	۱۰۰.۰	۱۰۰.۰	۱۰۰.۰
R۴۰-۵۰	۸۱.۳	۷۴.۵	۶۷.۲
R۴۰-۱۰۰	۶۹.۸	۶۳.۰	۵۲.۵

شکل شماره ۷ مقایسه‌ای بین درصد مقاومت فشاری و کششی کسب شده در هر یک از طرح‌های اختلاط در سن ۲۸ روز نسبت به طرح شاهد را نشان می‌دهد. مشاهده می‌گردد بدون در نظر گرفتن نتایج طرح‌های حاوی مصالح بازیافتی با رده C۱۵، در سایر طرح‌های حاوی مصالح بازیافتی درصد مقاومت کششی کسب شده کمتر از درصد مقاومت فشاری متناظر آن طرح می‌باشد.

این بدین معنی است که جایگزینی سنگدانه‌های طبیعی با مصالح بازیافتی، اثر کاهنده و منفی بیشتری بر مقاومت کششی بتن در مقایسه با مقاومت فشاری آن خواهد گذارد. در توجیه این تفاوت اثرگذاری میتوان به مکانیسم حاکم بر آزمایش مقاومت کششی به روش شکافت اشاره کرد. در این آزمایش به واسطه نوع بارگذاری که منجر به شکافته شدن و دو نیم شدن بتن در راستای ارتفاع استوانه که بصورت افقی تحت بار قرار دارد، فاز انتقالی بین سنگدانه و ملات نقش تعیین کننده‌ای در مقاومت نمونه در مقابل دو نیم شدن خواهد داشت. از آنجایی که فاز انتقالی بین سنگدانه‌های بازیافتی و ملات جدید به علت وجود یک لایه ملات قدیمی چسبیده به سنگدانه‌های بازیافتی، ضعیف‌ترین و بحرانی‌ترین بخش بتن‌های حاوی مصالح بازیافتی محسوب می‌گردد، بنابراین این ضعف در فاز انتقالی منجر به افت مقاومت کششی بیشتری در این بتن‌ها در مقایسه با مقاومت فشاری آنها خواهد شد.

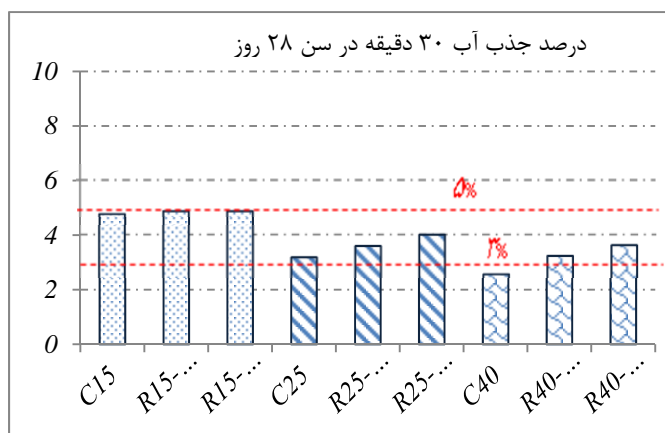


شکل ۷- مقایسه درصد مقاومت فشاری و کششی در سن ۲۸ روز

نتایج آزمایش درصد جذب آب اولیه:

درصد جذب آب نیم ساعته نمونه‌های بتن ساخته شده با هر یک از طرح‌های اختلاط در سن ۲۸ روز در شکل شماره ۸ نشان داده شده است. کمترین درصد جذب آب در همه سنین برای طرح شاهد یعنی نمونه‌های فاقد مصالح بازیافتی اندازه‌گیری شده است. درصد جذب آب نیم ساعته برای نمونه‌های حاوی سنگدانه‌های طبیعی و بازیافتی ساخته شده با رده C۱۵ حدود ۴.۸ تا ۴.۹ درصد اندازه‌گیری شد که بر طبق رده بندی کیفی CEB-FIP در مرز بین کیفیت متوسط و ضعیف قرار می‌گیرد. به نظر می‌رسد در نمونه‌های مربوط به این رده به دلیل ساختار متخلخل تر ملات پوشش نمونه در نتیجه نسبت آب به سیمان ۰.۷۹، این تخلخل ساختاری بر ضعف سنگدانه‌های بازیافتی غالب بوده و در نتیجه جذب آب نمونه‌های این رده تقریباً مشابه یکدیگر اندازه‌گیری شده است و با جایگزینی ۵۰ یا ۱۰۰ درصد سنگدانه‌های بازیافتی تغییری در این پارامتر ایجاد نمی‌گردد. اما با ارتقای رده بتن‌ها به C۲۵ و C۴۰ در نتیجه کاهش نسبت آب به سیمان به ۰.۶۱ و ۰.۴۲ جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی ضعیف و متخلخل اثرگذاری افزایشی بر پارامتر جذب آب می‌گذارند. علی‌رغم افزایش درصد جذب آب ناشی از جایگزینی مصالح بازیافتی در بتن رده C۲۵ همچنان کلیه طرح‌های این رده در محدوده درصد جذب آب ۳ تا ۵ درصد یعنی رده متوسط طبق دسته بندی کیفی CEB-FIP جای می‌گیرد.

اما نتایج درصد جذب آب نیم ساعته برای طرح‌های گروه C40 نشان می‌دهد که طرح شاهد این رده درصد جذب آبی کمتر از ۳ درصد (رده کیفی خوب) دارد و با جایگزینی ۵۰ و ۱۰۰ درصد از سنگدانه‌ها با مصالح بازیافتی، درصد جذب آب به ترتیب به ۳.۲۵ و ۳.۶۳ درصد (رده کیفی متوسط) افزایش می‌یابد.

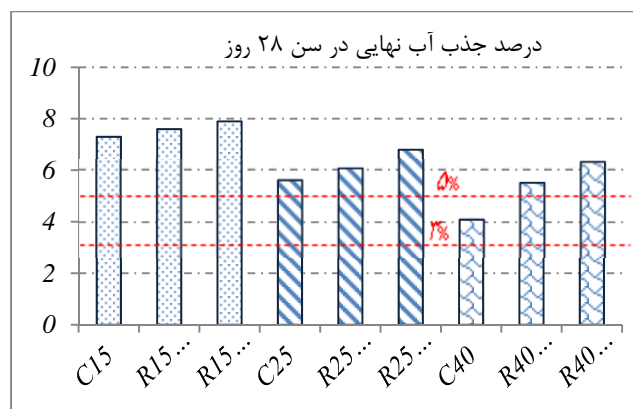


شکل ۸- درصد جذب آب ۳۰ دقیقه در سن ۲۸ روز

همچنین در آیین نامه ملی پایایی بتن در محیط خلیج فارس و دریای عمان، مقدار مجاز جذب آب نیم ساعته در سن ۲۸ روز، حداکثر ۲ درصد برای شرایط محیطی D, E و F، حداکثر ۳ درصد در شرایط محیطی B و C و حداکثر ۴ درصد در شرایط محیطی A تعیین شده است.

نتایج آزمایش درصد جذب آب نهایی:

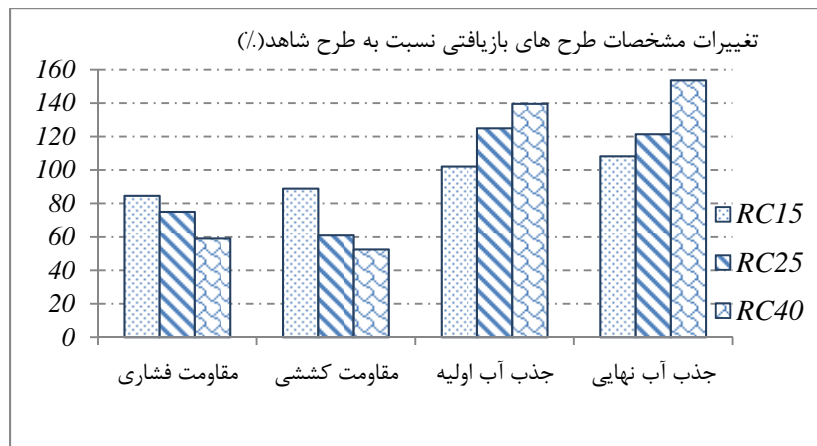
درصد جذب آب نهایی نمونه‌های بتن ساخته شده با هر یک از طرح‌های اختلاط در سن ۲۸ روز در شکل شماره ۹ نشان داده شده است. مشابه با نتایج جذب آب نیم‌ساعته، کمترین درصد جذب آب نهایی نیز در همه سنین برای طرح شاهد یعنی نمونه‌های فاقد مصالح بازیافتی اندازه‌گیری شده است. نتایج درصد جذب آب نهایی برای طرح‌های رده C15 کمی متفاوت از نتایج جذب آب نیم‌ساعته این طرح می‌باشد بطوری که روند افزایشی خفیفی با جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی حادث می‌گردد. این تفاوت عملکرد با استدلال ارائه شده در خصوص نتایج جذب آب اولیه این طرح که به غالب بودن تخلخل ساختار ملات بر ضعف سنگدانه‌ها ارتباط داده شد همچنان مطابقت دارد با این توضیح که افزایش زمان غوطه‌وری نمونه‌ها به منظور اندازه‌گیری جذب آب نهایی فرصت نفوذ آب به عمق نمونه‌ها را در اختیار می‌گذارد که این نفوذ با رسیدن آب به سنگدانه‌های بازیافتی، تفاوت عملکرد بتن‌های حاوی مصالح بازیافتی و طرح شاهد را بروز می‌دهد.



شکل ۹- درصد جذب آب نهایی در سن ۲۸ روز

جمع بندی نتایج آزمایشگاهی:

شکل شماره ۱۰ مروری بر نتایج بدست آمده از هر یک از آزمایشهای انجام شده در این مقاله را در اختیار می‌گذارد. اثر منفی جایگزینی مصالح بازیافتی بر هر چهار پارامتر بررسی شده با ارتقای رده مقاومتی بتن تشدید می‌شود.



شکل ۱۰- تغییرات مشخصات طرح های بازیافتی نسبت به طرح شاهد

نتیجه گیری:

- نتایج نشان می‌دهد که اثر منفی جایگزینی مصالح بازیافتی با ارتقای رده مقاومت فشاری بتن شاهد نمود بیشتری پیدا می‌کند. این روند کاهش مقاومت در سنین اولیه عمل‌آوری که هنوز محصولات واکنش‌های هیدراتاسیون سیمان تشکیل نشده و فرایند سخت‌شدگی ساختار ملات تکمیل نگردیده، بروز کمتری داشته اما با گذشت زمان و تکمیل فرایندهای گیرش شدت بیشتری می‌یابد.
- علی‌رغم افزایش مقاومت فشاری طرح شاهد با کاهش نسبت آب به سیمان و همچنین افزایش عیار سیمان، روند رشد مقاومت فشاری طرح حاوی سنگدانه‌های بازیافتی بسیار کندتر از مقاومت طرح شاهد می‌باشد. به نظر می‌رسد علت این عملکرد آن است که در مصالح حاصل از بازیافت بتن بیش از آنکه خود سنگدانه محل بروز ضعف و شروع ترک خوردگی باشد، ناحیه انتقال بین ملات قدیمی چسبیده به سنگدانه بتن خردشده و ملات جدید، محل ضعف و نقطه آغاز ترک‌ها محسوب می‌گردد. و این ضعف عامل تعیین‌کننده تری نسبت به مقاومت ملات در تعیین مقاومت فشاری بتن حاوی سنگدانه‌های بازیافتی محسوب می‌گردد.
- جمع‌بندی نتایج حاصل از آزمایش مقاومت کششی بر روی نمونه‌های تهیه شده از سنگدانه‌های طبیعی و بازیافتی در طرح‌های اختلاط با رده‌های مقاومتی مختلف، نشان می‌دهد که مشابه با روند تغییرات مقاومت فشاری، اثر منفی جایگزینی مصالح بازیافتی با ارتقای رده مقاومت فشاری بتن شاهد نمود بیشتری پیدا می‌کند. این روند کاهش مقاومت در سنین اولیه عمل‌آوری که هنوز محصولات واکنش‌های هیدراتاسیون سیمان تشکیل نشده و فرایند سخت‌شدگی ساختار ملات تکمیل نگردیده، بروز کمتری داشته اما با گذشت زمان و تکمیل فرایندهای گیرش شدت بیشتری می‌یابد.
- جایگزینی سنگدانه‌های طبیعی با مصالح بازیافتی، اثر کاهنده و منفی بیشتری بر مقاومت کششی بتن در مقایسه با مقاومت فشاری آن داشته است. علت آن است که فاز انتقالی بین سنگدانه و ملات نقش تعیین‌کننده‌ای در مقاومت نمونه در مقابل دو نیم شدن خواهد داشت. بنابراین با توجه به اینکه ضعیف‌ترین بخش در بتن‌های حاوی مصالح حاصل از بازیافت به فاز انتقالی اختصاص دارد، این ضعف منجر به افت مقاومت کششی بیشتری در این بتن‌ها در مقایسه با مقاومت فشاری آنها خواهد شد.

- ۵- جایگزینی ۵۰ و ۱۰۰ درصد از درشت‌دانه اثر قابل ملاحظه‌ای بر درصد جذب آب طرح رده C۱۵ ندارد اما این افزایش در طرح‌های رده C۲۵ به ترتیب موجب افزایش درصد جذب آب به ۱۱۲.۵ و ۱۲۶؛ و در طرح‌های رده C۴۰ افزایش به ۱۲۵ و ۱۳۹ درصد عدد متناظر طرح شاهد را به همراه دارد.
- ۶- تغییرات درصد جذب آب نهایی در طرح‌های مختلف نشان می‌دهد که جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی در طرح رده C۱۵ حداکثر موجب افزایش ۱۰ درصدی شده در حالیکه در طرح‌های رده C۲۵ و C۴۰ با ۱۰۰ درصد جایگزینی مصالح بازیافتی این شاخص تا ۲۰ و ۵۳ درصد افزایش می‌یابد. بنابراین مشابه با نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری و کششی، بکارگیری درشت‌دانه‌های بازیافتی اثر منفی بیشتری بر پارامتر جذب آب بتن‌های بار رده مقاومتی بالاتر دارد.
- ۷- بنابراین نتیجه نهایی قابل گزارش در این پایان‌نامه تاکید بر بکارگیری سنگدانه‌های بازیافتی در بتن‌های با رده‌های مقاومتی پایین و کاربردهای بتن غیرسازه‌ای یا غیرمسلح می‌باشد.
- ۸- همچنین با توجه به نتایج آزمایش‌های جذب آب اولیه و نهایی به نظر می‌رسد استفاده از سنگدانه‌های حاصل از بازیافت در شرایط محیطی خورنده و یا در امان‌های سازه‌ای در معرض آب گزینه مناسبی نمی‌باشد.

مراجع:

- ۱- علی صدر ممتازی، محمد هادی طهمورثی، حسن نصرتی، "ارزیابی خصوصیات بتن الیافی حاوی سنگدانه‌های بازیافتی بتنی با استفاده از روش غیر مخرب"، مجله تحقیقات بتن بهار و تابستان ۹۲، سال ششم، شماره اول، ص ۷۳-۸۶
- ۲- پیام حسینی، عباس بوشهریان، محمد مهدی خداوردی زنجانی، "بهبود کیفیت بتن‌های بازیافتی با بهره‌گیری از نانو ذرات سیلیس" - فصلنامه انجمن بتن ایران - سال نهم - شماره ۳۸ - تابستان ۸۸ - ص ۴۵
- ۳- محمد اسماعیل نیا عمران، مجتبی فریدی، "اثر ژئولیت بر مقاومت فشاری بتن خود تراکم حاوی سنگدانه بازیافتی"، پنجمین کنفرانس ملی سالیانه بتن ایران - تهران - مهرماه ۱۳۹۲
- ۴- محمود نیلی، حسین ساسانی پور، مهدی بیات، "بررسی تاثیر سنگدانه‌های بازیافتی بر مقاومت مکانیکی بتن‌های خود تراکم" ششمین کنفرانس ملی سالیانه بتن ایران ۱۵ مهرماه ۱۳۹۳
- ۵- علیرضا خالو، محمد مهدی خداوردی زنجانی، پیام حسینی، "بررسی ساخت بتن خود تراکم با استفاده از درشت‌دانه‌های بازیافتی"، مجله تحقیقات بتن، تابستان ۸۹، سال سوم، شماره ۱، ص ۹-۲۰
- ۶- محمود نیلی، ابراهیم نظری مفرد، "تاثیر مقاومت بتن مادر، دوده سیلیسی و الیاف فولادی بر مشخصات مکانیکی بتن‌های بازیافتی"، چهارمین کنفرانس ملی سالیانه بتن ایران تهران ۱۵ مهرماه ۱۳۹۱
- ۷- Shi-cong Kou, Chi-sun Poon, Francisco Agrela, Comparisons of natural and recycled aggregate concrete prepared with the addition of mineral admixtures, *Cement & Concrete Composites* ۳۳(۲۰۱۱) ۷۸۸-۷۹۵
- ۸- L.Evangelista. J. de Brito, Durability performance of concrete made with fine recycled concrete aggregates, *Cement & Composites* ۳۲(۲۰۱۰) ۹-۱۴
- ۹- Someyeh Lotfi, Manuel Eggimann, Eckhard Wagner, Radoslaw Mroz, Jan Deja, Performance of recycled aggregate concrete based on a new concrete recycling technology, *Construction and Building materials* ۹۵(۲۰۱۵)۲۴۳-۲۵۶
- ۱۰- S.C. Kou, C.S. POOn, Enhancing the durability properties of concrete prepared with coarse recycled aggregate, *Construction and Building Materials* ۳۵(۲۰۱۲)۶۹-۷۶
- ۱۱- Mahdi Arezoumandi, Adam Smith, Jeffry S. Volz, Kamal H.Khayat, An experimental study on flexural strength of reinforced concrete beams with ۱۰۰٪ recycled concrete aggregate, *Engineering Structures* ۸۸(۲۰۱۵)۱۵۴-۱۶۲