نشریه علمی - پژوهشی مهندسی سازه و ساخت، دوره ۶، شماره ویژه ۲، سال ۱۳۹۸، صفحه ۲۵ تا ۴۴

نشریه مهندسی سازه و ساخت
(علمی - پژوهشی)

www.jsce.ir

مروری بر عوامل موثر بر خواص مکانیکی بتن های بازیافتی

سید فتح اله ساجدی[1*]، حسن جلیلی فر[2]

۱-دانشیار، دانشکده فنی مهندسی، گروه مهندسی عمران، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران

۲-دانشجوی دکتری مهندسی سازه، دانشکده فنی مهندسی، گروه مهندسی عمران، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران

چکیده

یکی از معضلات کنونی جوامع، نحوه رویارویی با مصالح حاصل از تخریب ساختمان‌ها و اثرات زیست‌محیطی انباشت آن‌ها می‌باشد. بتن به عنوان یکی از اصلی‌ترین اجزای صنعت ساخت از آغاز فرآیند تولید، اجراء و تخریب، نقش زیادی در ایجاد آلودگی‌های زیست‌محیطی دارد. از آنجایی‌که بیش از ٪۷۰ از بدنه اصلی بتن را سنگدانه‌ها تشکیل می‌دهند، ترویج فرهنگ و ملاحظات مبتنی بر رعایت اصول توسعه پایدار در فرآیند طراحی، ساخت و تخریب بتن از اهمیت بالایی برخوردار است. یکی از اصول اساسی توسعه پایدار، توجه به اهمیت بازیافت است. بازیافت بتن‌های حاصل از تخریب در قرن اخیر به یکی از علایق مهم پژوهش‌گران عرصه بتن تبدیل شده است، به نحوی که پس از بررسی و شناخت خواص مکانیکی و دوام آن‌ها، امروزه در کشورهای توسعه یافته مناسبات لازم جهت شناخت عملکرد سازه‌ای این بتن‌ها در حال پایه‌ریزی است. هدف این تحقیق بررسی نتایج پژوهش‌های انجام‌شده در کشورهای مختلف در عرصه شناخت خواص مکانیکی بتن‌های بازیافتی است. در این راستا بیش از ۸۰ مقاله پراستناد چاپ‌شده در مجلات معتبر فنی بررسی شده و عوامل مشترکی را که محققان در تحلیل خواص مکانیکی بتن‌های بازیافتی بیشتر مورد توجه قرار داده‌اند، در شش گروه دسته‌بندی شدند. تاثیر هر یک از این گروه‌ها بر مقاومت فشاری، مقاومت کششی و ضریب ارتجاعی بتن بررسی گردیدند. نتایج نشان داد که نوع، اندازه و کیفیت سنگدانه‌های بازیافتی در تعیین سطح جایگزینی مصالح بازیافتی در بتن بسیار موثرند. شرایط عمل‌آوری، مواد کاهنده آب و مواد پوزولانی گرچه در بهبود خواص مکانیکی بتن‌های بازیافتی موثرند،اما نمی‌توانند از تاثیر نامطلوب افزایش جایگزینی مصالح بازیافتی بر خواص مکانیکی بتن بکاهند.در زمینه تأثیر سن بر خواص مکانیکی بتن‌های بازیافتی، اجماع نظر این است که برخی از این خواص همانند بتن‌های معمولی است.

کلمات کلیدی: توسعه پایدار، بتن بازیافتی، سنگدانه بازیافتی، خواص مکانیکی، مقاومت فشاری، مقاومت کششی، ضریب ارتجاعی

سابقه مقاله:					شناسه دیجیتال:
دریافت	بازنگری	پذیرش	انتشار آنلاین	چاپ	10.22065/JSCE.2018.104332.1368
۱۳۹۶/۰۸/۱۱	۱۳۹۶/۱۰/۲۶	۱۳۹۶/۱۲/۰۳	۱۳۹۶/۱۲/۰۳	۱۳۹۸/۰۶/۰۱	doi: 10.22065/JSCE.2018.104332.1368

*نویسنده مسئول: سید فتح اله ساجدی

پست الکترونیکی: sajedi@iauahvaz.ac.ir

An Overview of the Factors Affecting the Mechanical Properties of Recycled Concrete

Seyed Fathollah Sajedi[1*], Hasan Jalilifar[2]

1-Associate professor, Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran
2-Ph.D. Student in Structural Engineering, Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran

ABSTRACT

Concrete, as one of the main components of the manufacturing industry since the beginning of the process of production, operation and destruction, plays a major role in the creation of environmental pollution. Since more than 70% of the main body of concrete is aggregate, the promotion of culture and considerations based on the principles of sustainable development in design, construction and demolition process of concrete is of great importance. One of the basic principles of sustainable development is the importance of recycling. Recycling of damaged concrete in the last century has become one of the most important interests of researchers. So, after studying and recognizing their durability and mechanical properties (MP's), today in developed countries, the necessary relationships for the recognition of structural performance of these concretes is under construction. The purpose of this research is to investigate the results of research carried out in different countries in the field of recognition of the MP's of recycled concretes (RC's). More than 80 articles published in prestigious technical journals were examined and classified together in the six groups that the researchers considered in analyzing the MP's of RC's. The effect of each of these groups on compressive and tensile strengths and elasticity of concrete were studied. The results showed that the type, size and quality of recycled aggregates (RA's) are very effective in determining the level of replacement of recycled materials (RM's) in concrete. Curing conditions, water reducing and pozzolanic materials, although effective in improving the MP's of RC's, cannot reduce the adverse effects of increasing the replacement of RM's on the mechanical properties of concrete. Concerning the effect of age on the mechanical properties of RC's, it is common ground that some of these properties are similar to conventional ones.

ARTICLE INFO

Received: 02/11/2017
Revised: 16/01/2018
Accepted: 22/02/2018

Keywords:
Sustainable development,
Recycled concrete,
Recycled aggregate,
Mechanical properties,
Compressive strength,
Tensile strength,
Modulus of elasticity.

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/JSCE.2018.104332.1368

*Corresponding author: Seyed Fathollah Sajedi
Email address: sajedi@iauahvaz.ac.ir

۱-مقدمه

امروزه بر کسی پوشیده نیست که سرعت بهبود و پیشرفت‌های صنعتی بشر در سطح جهانی، تاثیرات مخرب زیادی بر روی محیط زیست داشته و تا حد مخاطره‌آمیزی تعادل و پایداری محیط زیست را تحت تاثیر قرار داده است. بهره‌برداری بیش از حد از منابع طبیعی تجدیدناپذیر جهت گسترش زیرساخت‌ها به جهت بهبود صنعتی منجر به مصرف میلیون‌ها تن از منابع طبیعی شده و از سوی دیگر تخریب ساختمان‌های قدیمی و غیرمنطبق با نیازهای بشر مدرن منجر به تولید زباله‌های ساختمانی و صنعتی بسیار زیادی شده است. این در حالی است که بیش‌تر کشورهای در حال بهبود هیچ برنامه مدون و دقیقی جهت کاهش مصرف منابع طبیعی تجدیدناپذیر و مدیریت مصالح حاصل از تخریب ساختمان‌های قدیمی ندارند. از سوی دیگر امروزه حجم بسیار زیاد زباله‌های ناشی از ساخت و سازها تبدیل به یک مشکل بزرگ برای جوامع شده است. میزان تولید زباله‌ها و نخاله‌های ساختمانی در کشور آمریکا به حدود ۱۴۰ میلیون تن رسیده [۱] و اتحادیه اروپا میزان تولید زباله‌های ساختمانی را در هر سال برابر ۹۷۰ میلیون تن، معادل ۲ تن به ازای هر شهروند اعلام کرده است [۲]. بازیافت زباله‌ها و نخاله‌های ساختمانی به‌دلیل کاهش اثرات زیست‌محیطی از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد. این روش مانع از افزایش نیاز به گسترش فضای دپوی زباله‌ها و نیز مانع از مصرف بیش از حد مواد غیرقابل بازگشت به طبیعت می‌شود. برداشت و مصرف مواد طبیعی تجدیدناپذیر منجر به بروز اثرات نامطلوب زیست‌محیطی از قبیل تغییرات ظاهری زیاد، کاهش ضخامت لایه سطحی زمین، آلودگی هوا و منابع آب می‌گردد. در کنار تمام موارد عنوان شده، لازم به یادآوری است که چیزی حدود ٪۴۰ از تمام مواد و مصالح طبیعی موجود در جهان در صنعت ساخت مورد استفاده قرار می‌گیرند[۳].

وانگ و همکاران[1] [۴] در گزارش‌های خود بیان نمودند که صنعت ساخت در کشور چین حدود ٪۴۰ از تمام منابع طبیعی و حدود ٪۴۰ از انرژی موجود را مصرف می‌کند. طی یک قرن اخیر، میزان مصرف مواد و مصالح طبیعی موجود در جهان به ۸ برابر افزایش یافته است، در نتیجه سالانه تقریباً ۶۰ میلیارد تن مواد خام موجود درطبیعت مورد مصرف و بهره‌برداری قرار می‌گیرند[۵]. میزان برآورد سنگدانه مورد نیاز جهت تامین نیازهای صنعت ساخت در سال ۲۰۱۵ بیش از ۴۸/۳ میلیارد تن پیش‌بینی شده بود، در حالی که پیش-بینی‌ها نشان می‌دهد که تقاضا برای مصالح و تامین مواد اولیه تا سال ۲۰۵۰ به دو برابر میزان کنونی خواهد رسید[۶] از آنجایی که پیکره اصلی بتن متشکل از ٪۶۰ تا ٪۷۰ از سنگدانه بوده و آسفالت نیز از ٪۹۲ تا ٪۹۶ از سنگدانه ساخته می‌شود، لذا واضح است که توجه به این عنصر در فرآیند ساخت و تمرکز بیش‌تر بر آن می‌تواند تاثیر به‌سزایی در دست‌یابی به هدف‌های تعیین شده صنعت پایدار داشته باشد. با وجود اینکه دلایل مناسبی می‌توان برای استفاده از سنگدانه‌های بازیافتی در تولید بتن عنوان نمود، ولی باید به این نکته توجه داشت که استفاده از این سنگدانه‌ها هم‌چنان با موانع متعددی روبرو می‌باشد. عواملی مانند مشخصه‌های متغیر این سنگدانه‌ها، فاصله میان کارگاه ساخت تا محل دپوی مصالح بازیافتی، توجیهات اقتصادی، کیفیت نهایی بتن مورد نظر، تردیدهای موجود در رابطه با منافع زیست‌محیطی استفاده از این سنگدانه‌ها، عدم وجود استانداردها و دستورکارهای معتبر و یا برخوردهای محتاطانه استانداردها و ده‌ها نمونه دیگر را می‌توان از این دسته از موانع عنوان نمود.

اکثر قریب به اتفاق مطالعات انجام‌شده بر روی ویژگی‌هایی مانند افزایش میزان تخلخل، افزایش میزان جذب آب و کاهش وزن مخصوص سنگدانه‌های بازیافتی اتفاق‌نظر دارند[۷]. در زمینه رفتارهایی مانند کاهش ضریب ارتجاعی، افزایش جمع‌شدگی ناشی از خشک-شدن، افزایش جذب آب و کاهش مقاومت در برابر یخ‌زدگی و ذوب‌شدن بتن‌های بازیافتی مطالعات متعددی نیز انجام شده و همگی به وحدت نظر یکسانی در این زمینه دست یافته‌اند[۱۲-۸]. ولی در زمینه خواص مکانیکی مانند مقاومت‌های فشاری، کششی و خمشی محققان هنوز به یک وحدت نظر دست نیافته‌اند. اگر چه اکثر محققان بر این نظر متفقند که جایگزینی‌های کم در بازه ٪۲۰ تا ٪۳۰ از سنگدانه‌های درشت‌دانه بازیافتی نمی‌تواند تاثیرات محسوسی در خواص مکانیکی بتن‌ها از خود به جای بگذارد[۱۰،۱۳] و جایگزینی‌های

[1] Wang et al.

بیش‌تر با کاهش مقاومت‌های مکانیکی روبرو خواهد شد [۱۰،۱۴،۱۵]. مطالعات انجام‌شده توسط کو و پون[۲] نشان داده که در صورت استفاده از مواد جایگزین مانند خاکستربادی، جایگزینی‌های تا سقف ٪۵۰ نیز می‌تواند منجر به ساخت بتن بازیافتی با کیفیت مطلوب گردد[۷]. کونین و کوادیو[۳]نیز در مطالعه خود نشان دادند که امکان دست‌یابی به مقاومتی بالاتر از مقاومت بتن معمولی در جایگزینی‌های ٪۶۰ نیز وجود دارد[۱۶] و مانزی و همکاران[۴] نیز دست‌یابی به مقاومت‌های مورد نیاز طراحی را در جایگزینی‌ها تا سقف ٪۸۰ امری ممکن دانسته‌اند[۱۷].

پژوهش‌گران عوامل مختلفی که بر خواص مکانیکی بتن‌های بازیافتی موثرند را مورد مطالعه قرار دادند. از این قبیل می‌توان به تاثیر جایگزینی مقدار سنگدانه‌ها [۱۸]، تاثیر میزان رطوبت موجود در سنگدانه‌ها [۱۹]، تاثیرکیفیت مصالح پایه [۲۰]، تاثیر نسبت آب به سیمان [۲۱] و تاثیر مواد افزودنی شیمیایی [۲۲] اشاره نمود. در این میان هر یک از محققان تلاش کردند برای بهبود کیفیت بتن بازیافتی، از مواد افزودنی خاصی نیز استفاده نمایند و هر یک سطح مشخصی از جایگزینی را نیز به عنوان سطح بهینه استفاده از مواد جایگزین سیمان معرفی نمودند. در این مقاله تلاش شده است تا به صورت مروری مجموعه‌ای از عوامل اثرگذار شناخته شده و پراهمیت بر روی خواص مکانیکی بتن‌های بازیافتی شناسایی شوند. نقطه تفاوت این متن با سایر مطالعات مروری انجام شده در نوع نگاهی است که در آن نویسندگان، نحوه عملکرد هر یک از این عوامل اثرگذار را بر سه خاصیت شامل مقاومت فشاری، مقاومت کششی و ضریب ارتجاعی به صورت مجزا بررسی کرده‌اند. در این تحقیق پس از بررسی حدود ۸۰ مقاله منتشر شده، مجموعه‌ای از عوامل تاثیرگذار بر خواص مکانیکی بتن‌های بازیافتی در شش گروه دسته‌بندی شده و سه خاصیت مقاومت فشاری، مقاومت کششی و ضریب ارتجاعی این بتن‌ها تحت تاثیر تغییرات روی داده در هر یک از این عوامل تبیین گشته‌اند.

۲-میزان جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی

۲-۱-مقاومت فشاری

در زمینه مقاومت فشاری بتن‌های بازیافتی، قریب به اتفاق مطالعات انجام‌شده بر این امر اجماع نظر دارند که افزایش میزان جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی در بتن منجر به کاهش مقاومت فشاری خواهد شد؛ اما این سطح از کاهش در مقاومت فشاری وابسته به نوع، اندازه و کیفیت سنگدانه‌های بازیافتی مصرف‌شده می‌باشد. برخی از مطالعات انجام‌شده [۲۳] نشان داده‌اند که جایگزینی درشت‌دانه بازیافتی بتنی تا سقف ٪۳۰ و ریزدانه بازیافتی بتنی تا سقف ٪۲۰ تاثیر محسوسی در مقاومت فشاری نخواهد داشت، اما رفته‌رفته با افزایش میزان جایگزینی از مقاومت فشاری کاسته می‌شود[۲۹-۲۴]. در رابطه با رفتار ریزدانه‌های بازیافتی بتنی برخی از محققان [۲۸،۳۰] نشان داده‌اند که در سقف ٪۱۰۰ ریزدانه بازیافتی تا حداکثر ٪۳۵ کاهش مقاومت فشاری روی خواهد داد؛ در حالی که در پژوهش برخی دیگر از محققان [۳۳-۲۲،۳۱] نشان داده شده در جایگزینی کامل ریزدانه بازیافتی بتنی نیز امکان دست‌یابی به بتنی با همان اسلامپ و مقاومت فشاری معادل با بتن معمولی مقدور می‌باشد. لیت[۵] [۱۹] دست‌یابی به این امر را با استفاده از روشی تحت عنوان " آب جبران شده" توجیه نموده است. مطالعات در زمینه سنگدانه‌های بازیافتی بنایی در مقایسه با سنگدانه‌های بازیافتی بتنی محدودتر می‌باشند. با توجه به تحقیقات به عمل‌آمده از این سنگدانه‌ها انتظار می‌رود تا ضعف بیشتری در رفتار مقاومتی بتن‌های حاوی سنگدانه‌های بازیافتی بنایی مشاهده گردد [۳۰،۳۴،۳۵]. با این حال بر خلاف انتظار، به دلیل واکنش پوزولانی میان سیلیس و آلومینای موجود در ریزدانه‌های بازیافتی بنایی با هیدروکسیدکلسیم رها شده ناشی از واکنش هیدراسیون سیمان، مشاهده شده که در گستره زمان نرخ کسب مقاومت بتن‌های بازیافتی حاوی ریزدانه بنایی در مقایسه با بتن‌های بازیافتی حاوی درشت‌دانه بنایی بیشتر بوده و در سطح جایگزینی ٪۱۰۰ صرفاً بین ٪۱۰ تا ٪۳۰ کاهش مقاومت فشاری روی داده است [۳۰،۳۶]. در حالی که بسیاری از نتایج آزمایشگاهی نشان داده‌اند که با افزایش مقدار

[2] Kou and Poon
[3] Konin and Kouadio
[4] Manziet al.
[5]leute

درشت‌دانه بازیافتی بنایی در سنگدانه‌های بازیافتی ترکیبی، مقاومت فشاری بین ۱۰٪ تا ۴۰٪ نسبت به بتن معمولی کاهش خواهد یافت [۲۵،۳۷].

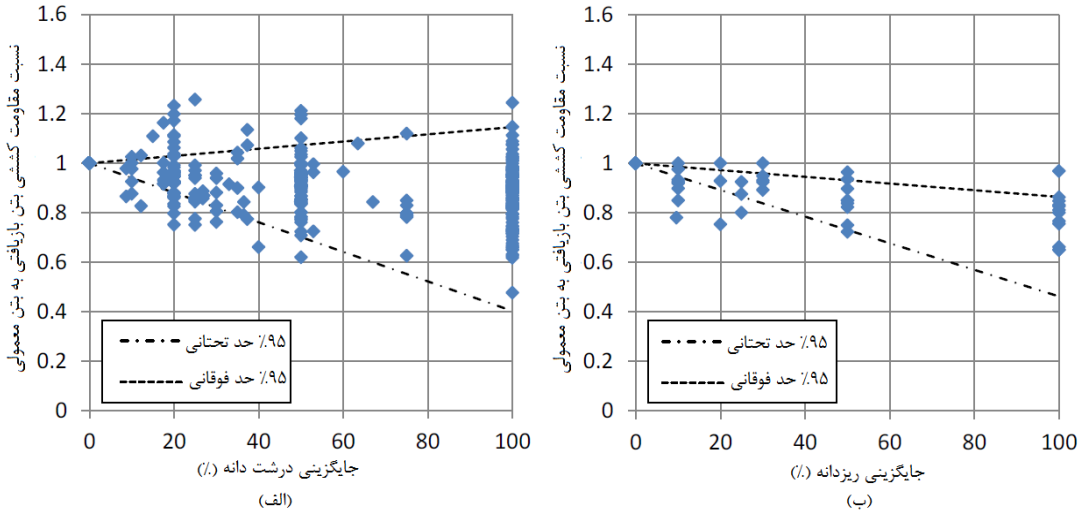
۲-۲-مقاومت کششی

اکثر قریب به اتفاق مطالعات انجام‌شده پیشین نشان از کاهش مقاومت کششی در اثر افزایش جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی دارند [۴۰-۲۶،۳۳،۳۷]. نمودار شماره ۱ بیانگر رابطه میان مقاومت کششی دو نیم‌شدن و افزایش میزان سنگدانه‌های بازیافتی درشت‌دانه و ریزدانه بدون توجه به نوع و کیفیت آن‌ها می‌باشد که توسط سیلوا[6] [۴۱] ارائه شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود اگر چه در نگاه اول، افزایش میزان جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی با کاهش مقاومت کششی دو نیم‌شدن مواجه شده، ولی در موارد معدودی به دلیل زبرتر و خشن‌تر شدن سطح سنگدانه‌های بازیافتی بتنی و بهبود مقاومت چسبندگی ناحیه انتقال میان سنگدانه‌های قدیمی و خمیر سیمانی جدید، این مقاومت به سطح مقاومت بتن معمولی و گاهاً بیشتر از آن رسیده است. اگر چه ظاهر نمودار نشان‌دهنده افت ٪۶۰ در مقاومت کششی بتن‌های تماماً بازیافتی حاوی درشت‌دانه بازیافتی و ٪۵۴ در بتن‌های تماماً بازیافتی حاوی ریزدانه بازیافتی می‌باشد، ولی وی معتقد است که افت ٪۶۰ بتن‌های حاوی درشت‌دانه بازیافتی غیرواقعی بوده و این مقدار به عدد ٪۴۰ نزدیک‌تر می‌باشد، چرا که افزایش توزیع خطا در درصدهای جایگزینی کمتر باعث شده تا بازه مورد پذیرش در گستره ٪۱۰۰ تا مقدار ٪۶۰ افزایش یابد. یانگ و همکاران[7] [۲۸] تاثیر اندازه و کیفیت سنگدانه‌های بازیافتی متفاوتی را مورد مطالعه قرار داده و نشان دادند که جایگزینی کامل درشت‌دانه بازیافتی بتنی با افت ٪۱۰ در مقاومت کششی روبرو خواهد شد، این در حالی است که آن‌ها معتقدند که درشت‌دانه و ریزدانه‌هایی که جذب آب و چگالی خشک-شده در کوره یکسانی دارند، با کاهش مقاومت کششی یکسانی روبرو خواهند شد. برخی دیگر از محققان علاوه بر اهمیت توجه به سطح جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی بر سازوکار و روش خردکردن آن‌ها نیز تاکید دارند. مطالعات نشان داده در صورتی که خردکردن سنگدانه بازیافتی از یک مرحله به دو مرحله تبدیل گردد، به دلیل کاهش میزان ملات چسبیده و بهبود کیفیت سنگدانه بازیافتی بتنی، مقاومت کششی دو نیم شدن بین ٪۴ تا ٪۱۲ رشد خواهد کرد [۴۲].

۲-۳-ضریب ارتجاعی

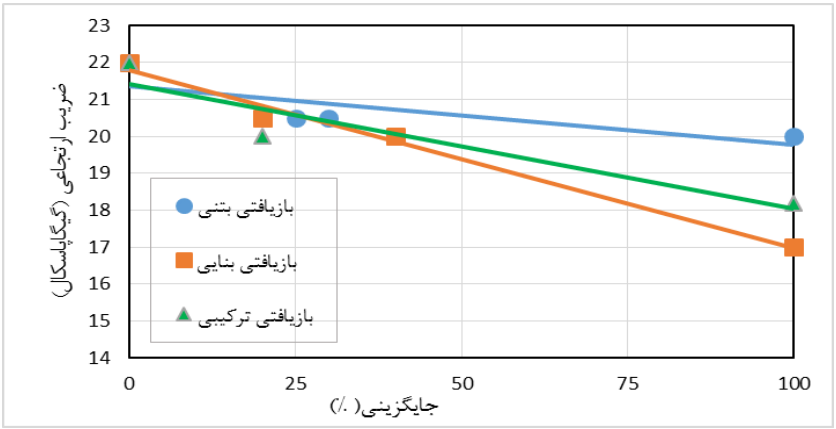
ضریب ارتجاعی بتن به میزان زیادی تحت تاثیر خواص خمیر سیمانی، نوع سنگدانه و ناحیه انتقال می‌باشد [۴۳،۴۴]. اگر چه میان محققان در رابطه با میزان مقاومت‌های فشاری و کششی بتن‌های بازیافتی تحت تاثیر جایگزینی سنگدانه‌ها اتفاق‌نظر یکسانی دیده نمی‌شود، ولی در رابطه با ضریب ارتجاعی این بتن‌ها اکثر قریب به اتفاق تحقیقات اذعان دارند که با افزایش میزان جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی از ضریب ارتجاعی کاسته خواهد شد. مطالعات نشان داده‌اند که تا سقف ٪۳۰ جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی بتنی تغییر حداقلی و جزئی در ضریب ارتجاعی روی خواهد داد [۲۵،۴۵،۴۶]. این در حالی است که جایگزینی کامل این سنگدانه‌ها باعث کاهش ضریب ارتجاعی بین ٪۲۰ تا ٪۴۰ می‌گردد [۵۰-۴۷]. مطالعه دهیر و پاینا[8] در زمینه استفاده از انواع مختلف سنگدانه بازیافتی نشان می‌دهد که استفاده از سنگدانه‌های بازیافتی بتنی کمترین میزان تاثیر را بر ضریب ارتجاعی دارد و پس از آن سنگدانه‌های بازیافتی مرکب از سنگدانه-های بازیافتی بتنی و بنایی و در مرحله آخر سنگدانه‌های بازیافتی بنایی بیشترین تاثیر را در کاهش ضریب ارتجاعی بتن دارند (نمودار شماره ۲). مطالعات گومز و دی بریتو[9] نیز نشان داده که با افزایش مقادیر سنگدانه‌های بازیافتی بنایی در مجموعه سنگدانه‌های بازیافتی، ضریب ارتجاعی بتن با کاهش روبرو خواهد شد [۵۱،۵۲].

[6] Silva
[7] Yanget al.
[8] Dhir and Paine
[9] Gomes and de Brito



شکل ۱: رابطه میان مقاومت کششی دونیم‌شدن و میزان سنگدانه‌های بازیافتی درشت و ریز

گرچه مانند مقاومت‌های فشاری و کششی با افزایش مواد ناخالصی مانند پلاستیک، لاستیک، خاک و چوب در سنگدانه‌های بازیافتی از ضریب ارتجاعی بتن تولیدشده کاسته خواهد شد [۵۵-۵۳]، ولی رودریگوئز و همکاران[10] [۵۷] نشان دادند که با افزایش تعداد مراحل خردکردن و نیز دقت در فرآیند جداسازی مواد ناخالص می‌توان از تاثیر این مواد مخرب کاست. پیش‌نویس دستورکار به‌کارگیری بتن‌های بازیافتی کشور اسپانیا [۵۸] برای بتن‌های تماماً بازیافتی کاهش ضریب ارتجاعی معادل ٪۴۰ را پیشنهاد کرده است که این مقدار با نتایج حاصل از بررسی‌های انجام شده توسط سیلوا[11] [۴۱] بر روی بیش از ۴۷۶ طرح مخلوط مختلف قرابت مناسبی دارد. اگر چه نتایج ارائه شده توسط وی نشان می‌دهد که در یک فاصله اطمینان ٪۹۵، ضریب ارتجاعی بتن‌های تماماً بازیافتی با کاهشی بین ۰/۹۷ تا ۰/۵۲ نسبت به بتن معمولی روبرو خواهند شد؛ ولی او نشان داد که در موارد جزئی ضریب ارتجاعی بتن بازیافتی در سطوح جایگزینی مختلف با ضریب ارتجاعی بتن معمولی برابر و یا بیشتر از آن می‌گردد، که این امر صرفاً مختص بتن‌های حاوی سنگدانه‌های بازیافتی بتنی با مقاومت و سختی بالا در بتن مادر می‌باشد.



شکل ۲: رابطه بین ضریب ارتجاعی، میزان جایگزینی و نوع سنگدانه

[10] Rodrigueset al.
[11] Silva

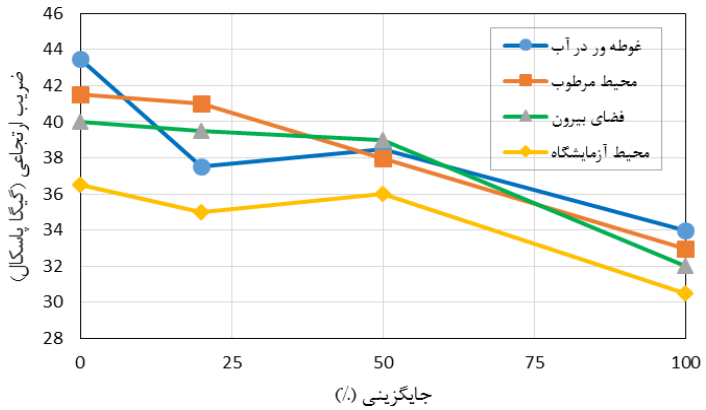
۳-تاثیر شرایط عمل‌آوری بر خواص مکانیکی

۳-۱-مقاومت‌های فشاری و کششی

مطالعات متعددی در زمینه بررسی تاثیر شرایط و حالات مختلف محیط بر خواص بتن‌های بازیافتی در مقایسه با بتن‌های معمولی مشابه انجام شده است [۲۵،۳۸،۵۹،۶۰]. در این مطالعات نشان داده شده که بهبود مقاومت‌های فشاری و کششی در بتن‌های بازیافتی متناسب با بتن‌های معمولی بوده و این امر تحت تاثیر شرایط محیطی نمی‌باشد. به عبارت دیگر تاثیر فرآیند عمل‌آوری بر مقاومت بتن در نمونه‌های بتنی متاثر از سنگدانه‌های بازیافتی نمی‌باشد.

۳-۲-ضریب ارتجاعی

نمودار شماره ۳ بیانگر میزان بهبود ضریب ارتجاعی انواع بتن‌های بازیافتی در شرایط محیطی مختلف می‌باشد. نتیجه تحقیقات انجام‌شده [۲۵،۳۸،۵۹،۶۰]نشان داد که در شرایط عمل‌آوری شده در محیط آزمایشگاه، بتن‌های تماماً بازیافتی از افت ضریب ارتجاعی کمتری نسبت به سایر درصدهای جایگزین‌شده برخوردار می‌باشند. فونسکا و همکاران[۱۲] [۳۸] بر این عقیده‌اند که استفاده از روش اختلاط "آب جبران شده" و حضور این آب در درون سنگدانه‌های بازیافتی باعث بروز انحراف در ضریب ارتجاعی بتن‌های موجود در شرایط محیطی خشک‌تر می‌گردد. این مساله منجر به این می‌شود تا ذرات سیمانی به شکل کامل‌تری هیدراته شده و متعاقباً خواص مکانیکی بتن بازیافتی و از جمله ضریب ارتجاعی بهبود یابد. با این حال تفاوت میان نسبت ضریب ارتجاعی بتن‌های بازیافتی و معمولی عمل‌آوری‌شده در شرایط مختلف در درصدهای جایگزینی یکسان با یکدیگر بسیار اندک می‌باشد. لذا می‌توان چنین استنباط کرد که برای تمامی اهداف اجرایی، شرایط عمل‌آوری بتن‌های حاوی سنگدانه‌های بازیافتی تاثیر نامحسوسی بر ضریب ارتجاعی بتن خواهد داشت.



شکل ۳: رابطه بین ضریب ارتجاعی، میزان جایگزینی و شرایط محیطی

۴-مواد کاهنده آب

۴-۱-مقاومت فشاری

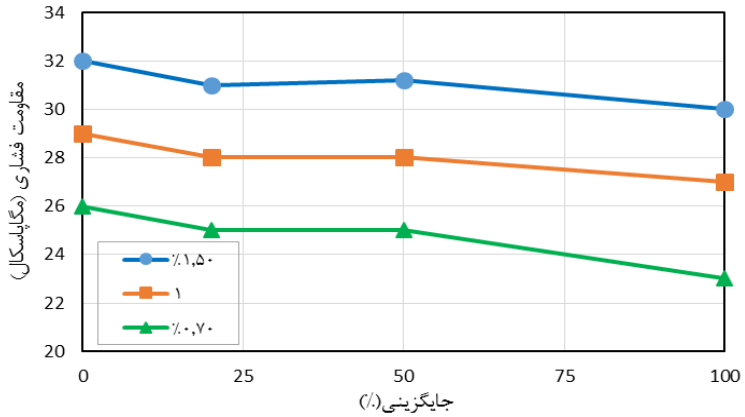
جذب آب زیاد سنگدانه‌های بازیافتی و نیز سطح خشن‌تر آن‌ها به دلیل وجود ملات چسبیده به آن‌ها، عواملی هستند که تولیدکنندگان را وادار به افزایش نسبت آب به سیمان می‌کنند. در حالی که با کنترل مقادیر فوق‌روان‌کننده نه تنها می‌توان نسبت آب به سیمان را در همان سطح حفظ کرد، بلکه بخشی از کاهش قوام ناشی از مصرف این سنگدانه‌ها جبران می‌گردد [۶۱]. خوهان و گوتی

[12]Fonseca et al.

هرز[13][۶۲] در بررسی تاثیر انواع فوق‌روان‌کننده‌ها بر مقاومت بتن بازیافتی با سطح جایگزینی متفاوت، نشان داده‌اند که بتن‌های حاوی درشت‌دانه بازیافتی بتنی دارای مقادیر مختلف فوق‌روان‌کننده، در اثر افزایش سنگدانه بازیافتی با کاهش مقاومت یکسانی روبرو خواهند شد. به عبارتی آن‌ها معتقدند که افت مقاومت ناشی از افزایش جایگزینی درشت‌دانه بازیافتی تحت تاثیر مقادیر فوق‌روان‌کننده نخواهد بود (نمودار شماره ۴). از سوی دیگر پریرا و همکاران[14][۲۲] معتقدند که بتن‌های حاوی ریزدانه بازیافتی بتنی که حاوی فوق‌روان‌کننده می‌باشند، با افزایش مقادیر سنگدانه بازیافتی، از افت مقاومتی مشابه با بتن‌های بازیافتی بدون فوق‌روان‌کننده برخوردار خواهند بود.

۴-۲-مقاومت کششی

در بررسی تاثیر فوق‌روان‌کننده بر مقاومت کششی بتن‌های بازیافتی رفتاری مشابه با مقاومت فشاری حاصل شده است. مطالعات نشان داده‌اند که در بتن‌های بازیافتی که از مقادیر سیمانی ثابت و یکسانی برخوردار می‌باشند، افزودن مقادیر فوق‌روان‌کننده نتوانسته بر فرآیند کاهش مقاومت کششی دونیم‌شدن در اثر افزایش سنگدانه‌های بازیافتی غلبه نماید و بتن‌های حاوی مقادیر مختلف فوق‌روان‌کننده با افزایش مقادیر درشت‌دانه بازیافتی با نسبت‌های مشابهی با کاهش مقاومت کششی دونیم‌شدن مواجه شده‌اند [۶۲].



شکل ۴: رابطه بین مقاومت فشاری، میزان جایگزینی و میزان مواد کاهنده آب

پریرا و همکاران[15] [۲۲] نیز نشان داده‌اند که افزایش ریزدانه بازیافتی بتنی منجر به کاهش مقاومت کششی در بتن می‌گردد. آن‌ها دریافته‌اند که تاثیر فوق‌روان‌کننده در مقاومت کششی دونیم‌شدن با افزایش میزان ریزدانه بازیافتی بتنی کاهش خواهد یافت.

۴-۳-ضریب ارتجاعی

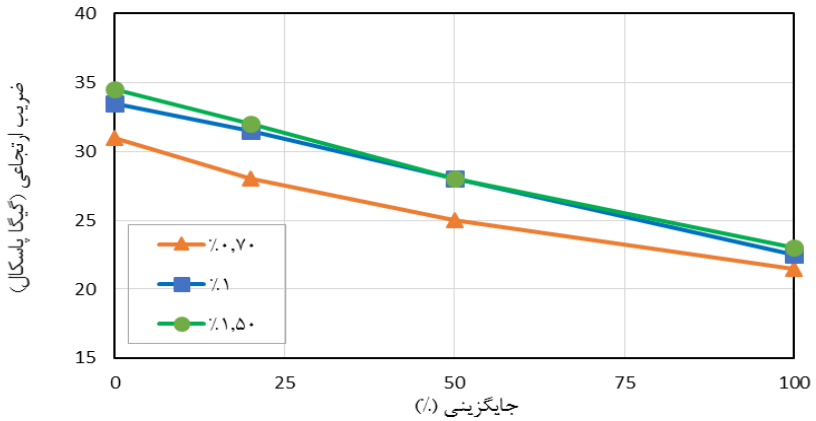
نمودار شماره ۵ بیانگر مقایسه تاثیر مقادیر مختلف مصرف فوق‌روان‌کننده در ضریب ارتجاعی بتن می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد که بدون توجه به سطح جایگزینی مصالح بازیافتی، افزایش میزان فوق‌روان‌کننده به میزان اندکی باعث افزایش ضریب ارتجاعی بتن می‌گردد. همان‌گونه که قابل پیش‌بینی می‌باشد، مصرف فوق‌روان‌کننده نتوانسته بر سازوکار کاهش ضریب ارتجاعی تحت تاثیر افزایش مصالح بازیافتی غلبه نماید و در تمامی سطوح مصرف فوق‌روان‌کننده، دست‌یابی به بتن تماماً بازیافتی، با کاهش ضریب ارتجاعی حدود ٪۳۵ روبرو شده است. در رابطه با نوع ماده کاهنده آب نیز مطالعات نشان داده‌اند که افت ضریب ارتجاعی ناشی از افزایش مصالح بازیافتی ریزدانه بتنی در بتن‌های حاوی فوق‌روان‌کننده مشابه بتن‌های بدون فوق‌روان‌کننده می‌باشد، ولی این میزان از کاهش در مقایسه با بتن‌های با روان‌کننده از مقادیر کمتری برخوردار می‌باشد [۲۲].

[13]juan and Gutierrez
[14]Pereira et al.
[15]Pereira et al.

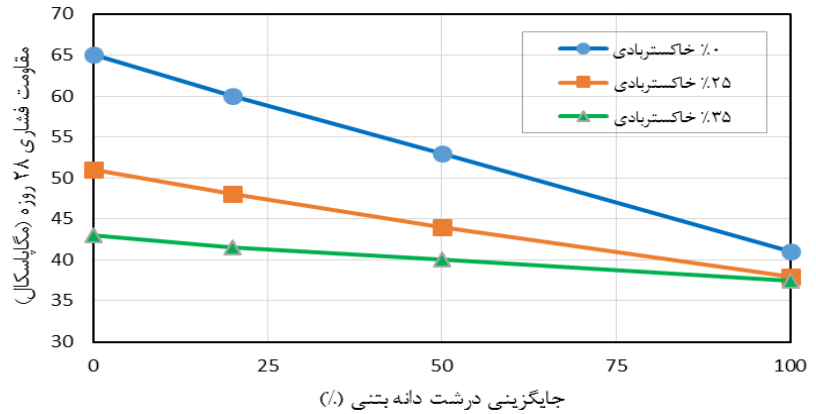
۵-مواد پوزولانی

۵-۱-مقاومت فشاری

نتایج مثبت استفاده از مواد جایگزین سیمان با خاصیت پوزولانی در ساخت بتن در موارد متعددی در مطالعات تحقیقاتی و نیز پروژه‌های اجرایی مورد توجه همگان قرار گرفته است. مواد پوزولانی با دو هدف بهبود خواص مکانیکی و دوام بتن‌های بازیافتی و نیز بهبود کیفیت سنگدانه‌های بازیافتی مورد استفاده قرار می‌گیرند. کو و همکاران[16][۶۳] در استفاده از سطوح مختلف خاکستربادی نشان داده‌اند که در هر سطح جایگزینی از درشت‌دانه‌های بازیافتی، افزایش مقادیر خاکستربادی با کاهش مقاومت فشاری ۲۸ روزه روبرو می‌گردد. اگر چه در تمام حالات، در اثر افزایش مقادیر مصرف درشت‌دانه بازیافتی مقاومت فشاری ۲۸ روزه با کاهش روبرو شده است، ولی نمودار ۶ نشان می‌دهد که هر چه میزان مصرف خاکستربادی افزایش یابد، از افت مقاومت فشاری ۲۸ روزه ناشی از افزایش جایگزینی مصالح بازیافتی نیز کاسته می‌شود. آن‌ها در مطالعه دیگری [۶۴] به بررسی تاثیر استفاده از میکروسیلیس در سطح جایگزینی ٪۱۰ در بتن‌های با درشت‌دانه بازیافتی بتنی پرداخته‌اند و نشان دادند که تمام مخلوط‌های بتنی بازیافتی حاوی ٪۱۰ میکروسیلیس، در مقایسه با بتن مشابه بدون پوزولان از رشد ٪۱۰ در مقاومت فشاری ۲۸ روزه برخوردار شدند. ولی نتایج حاصل از این پژوهش نیز نشان داده است که میکروسیلیس مصرفی نتوانسته تا افت مقاومت فشاری ناشی از افزایش مصالح بازیافتی را نسبت به بتن بازیافتی معمولی تغییر دهد.



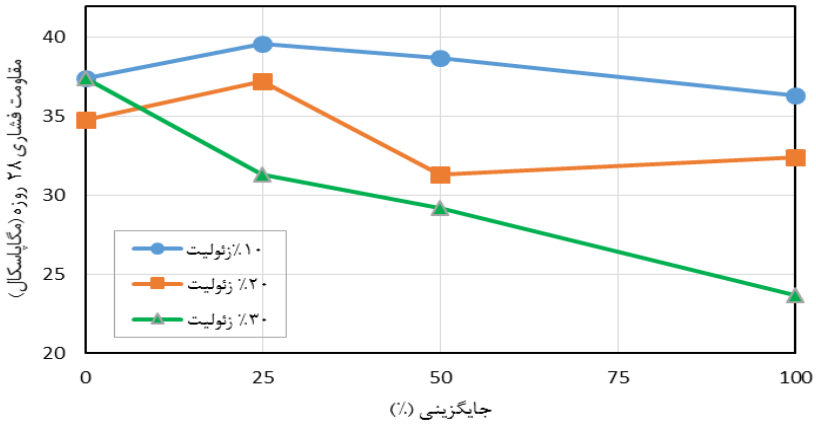
شکل ۵: رابطه بین ضریب ارتجاعی، میزان جایگزینی و مقدار مواد کاهنده آب



شکل ۶: رابطه بین مقاومت فشاری، درصد جایگزینی و میزان خاکستربادی

[16]Kou et al.

از سایر مواد پوزولانی مانند سرباره کوره آهن‌گدازی نیز در تولید بتن‌های بازیافتی استفاده شده است [۶۴،۶۵]. استفاده از این ماده نیز نشان داده که اگر چه در بازه ۲۸ روزه مقاومت فشاری بتن بازیافتی با کاهش مقاومت فشاری روبرو می‌گردد، ولی در درازمدت افزایش نرخ کسب مقاومت ناشی از فعالیت‌های پوزولانی سرباره کوره آهن‌گدازی منجر به جبران این کاهش مقاومت می‌گردد. با این وجود، این محصول نیز همانند میکروسیلیس نتوانسته تا از تاثیر افزایش سطح جایگزینی مصالح بازیافتی در کاهش مقاومت فشاری ۲۸ روزه بکاهد و با افزایش سطح جایگزینی، افتی معادل با افت مقاومت بتن‌های بازیافتی عاری از پوزولان را از خود نشان داده است. یکی دیگر از مواد پوزولانی استفاده شده در ساخت بتن‌های بازیافتی، زئولیت طبیعی می‌باشد [۶۶]. نمودارهای ارائه‌شده در رابطه با تاثیر زئولیت طبیعی بر مقاومت بتن‌های بازیافتی نشان داده که این ماده در سطح جایگزینی ٪۱۰ قادر است تا در سطح جایگزینی ٪۲۵ و ٪۵۰ درشت‌دانه بازیافتی بتنی مقاومت فشاری مطلوب‌تری نسبت به بتن معمولی تامین کند و در سطح جایگزینی ٪۱۰۰ به مقاومتی نزدیک به بتن معمولی برسد (نمودار شماره ۷). نتایج آزمایش‌ها نشان داده که استفاده بیش از ٪۲۰ از زئولیت نمی‌تواند اثرات منفی ناشی از افزایش سطح جایگزینی مصالح بازیافتی را مرتفع نماید.



شکل ۷: رابطه بین مقاومت فشاری، درصد جایگزینی و میزان زئولیت طبیعی

۵-۲-مقاومت کششی

براساس رفتار مشخصی که از خاکستربادی قابل پیش‌بینی است، افزایش مقدار خاکستربادی منجر به کاهش مقاومت کششی دونیم‌شدن در بتن‌های معمولی و بازیافتی می‌گردد. در رابطه با نسبت آب به سیمان مصرفی و خاکستربادی، مطالعات نشان می‌دهند که در بتن‌های بازیافتی با نسبت آب به سیمان ۰/۴۵، در حالی که مقدار خاکستربادی افزایش می‌یابد، از افت مقاومت کششی ناشی از افزایش مقادیر درشت‌دانه بازیافتی بتنی کاسته می‌شود. این در حالی است که وقوع این امر در نسبت آب به سیمان بیشتر از ۰/۵۵ رؤیت نشده است [۶۳]. تاثیر خاکستربادی بر روی مقاومت کششی دونیم‌شدن بتن‌های بازیافتی دارای درشت‌دانه‌های بازیافتی بتنی نشان می‌دهد که حتی در یک بازه ۱۰ ساله، بجزء سطح جایگزینی ٪۲۵ که مقاومتی معادل با بتن معمولی را حاصل کرده، افزایش جایگزینی خاکستربادی منجر به کاهش مقاومت کششی دونیم‌شدن خواهد شد. کو و همکاران[17] [۶۳] در مقایسه تاثیر خاکستربادی بر مقاومت کششی دونیم‌شدن و مقاومت فشاری معتقدند که تاثیر واکنش‌های پوزولانی در بهبود مقاومت کششی دونیم‌شدن در بتن‌های بازیافتی نمی‌تواند به اندازه تاثیری باشد که این مواد در بهبود مقاومت فشاری در بستر زمان می‌گذارند؛ چرا که آن‌ها نشان داده‌اند که نمونه‌های بتن‌های بازیافتی عمل آوری‌شده در آب در یک بازه ۱۰ ساله به طور متوسط با ۱/۵ مگاپاسکال رشد روبرو خواهند شد. در حالی که در همین بازه زمانی بتن‌های

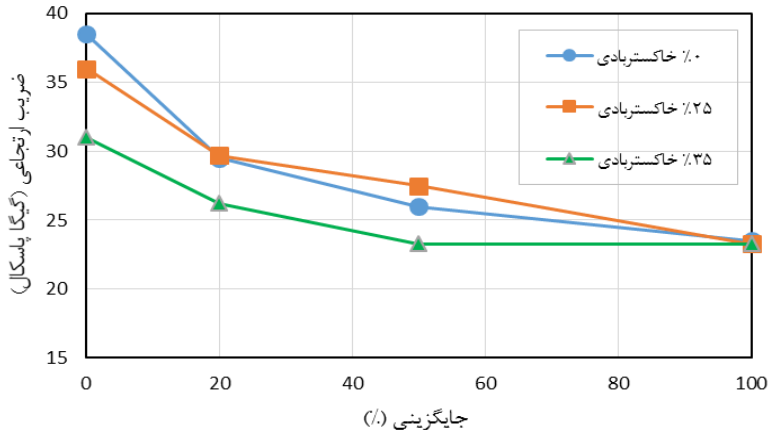
[17] Kou et al.

بازیافتی حاوی ٪۰، ٪۲۵، ٪۳۵ و ٪۵۵ خاکستربادی به طور متوسط با ۲۲/۱، ۲۹/۲، ۳۰/۹ و ۳۲/۷ مگاپاسکال رشد در مقاومت فشاری روبرو شدند.

در مقایسه میان تاثیر افزودن سایر پوزولان‌ها در یک پژوهش، ٪۱۰ میکروسیلیس، ٪۱۵ متاکائولین، ٪۳۵ خاکستربادی و ٪۵۵ سرباره کوره آهن‌گدازی مقایسه شده‌اند [۶۴]. نتایج این تحقیق نشان داد که اثر نسبی استفاده از هر یک از این مواد پوزولانی نمی‌تواند مانع از تاثیر کاهش مقاومت کششی دونیم‌شدن در اثر افزایش مصالح بازیافتی گردد. اگر چه در مقابل برندت[18] [۶۵] نشان داده که ٪۵۰ جایگزینی سرباره کوره آهن‌گدازی منجر به رشد مقاومت کششی حدود ٪۲۰ خواهد شد و در سطح جایگزینی ٪۷۰ از این پوزولان، مقاومت کششی بتن بازیافتی به مرز مقاومت کششی بتن معمولی خواهد رسید.

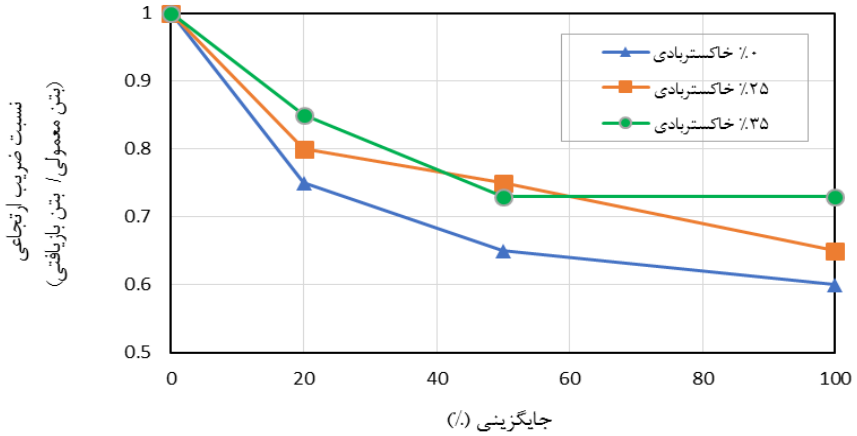
۵-۳-ضریب ارتجاعی

کو و همکاران[19] [۶۳] در ادامه تحقیقات خود در زمینه خواص مکانیکی بتن‌های بازیافتی نشان دادند که افزایش مقادیر خاکستربادی در بتن‌های معمولی با کاهش ضریب ارتجاعی روبرو می‌گردد، این در حالی است که ضریب ارتجاعی بتن‌های بازیافتی در سطوح جایگزینی ٪۲۰ و ٪۵۰ در مقایسه با بتن معمولی مشابه، با افزایش روبرو شده و در سطح جایگزینی ٪۱۰۰ تغییر محسوسی نداشته است. آن‌ها نشان دادند که در سطح جایگزینی کامل درشت‌دانه‌های بازیافتی، مقدار ضریب ارتجاعی بتن‌های حاوی درشت‌دانه بازیافتی بتنی، حاوی مقادیر مختلف خاکستربادی مشابه به هم بوده و وابسته به مقدار خاکستربادی نمی‌باشد (نمودار شماره ۷). هم‌چنین میزان افت ضریب ارتجاعی بتن‌های تماماً بازیافتی حاوی ٪۰، ٪۲۵ و ٪۳۵ خاکستربادی در مقایسه با بتن معمولی مشابه به ترتیب ٪۴۰، ٪۳۵ و ٪۲۵ ثبت شده است (نمودار شماره ۸). این مساله نشان می‌دهد که در بتن‌های تماماً بازیافتی حاوی درشت‌دانه بازیافتی با افزایش مقدار خاکستربادی، ضریب ارتجاعی نیز افزایش خواهد یافت. البته باید به این نکته توجه داشت که نتایج فوق در حالتی است که از خاکستربادی به عنوان ماده جایگزین سیمان استفاده شده است، و چنانچه مانند برخی از مطالعات [۶۷] از خاکستربادی به عنوان یک ماده افزودنی به مواد سیمانی استفاده گردد، نتایج متفاوتی حاصل می‌شود؛ به نحوی که نتایج نشان داده که در این حالت در بتن‌های حاوی ٪۱۰۰ درشت-دانه بازیافتی بتنی در نسبت‌های آب به سیمان ۰/۵۵، ۰/۴۵ و ۰/۴ ضریب ارتجاعی به ترتیب با ٪۱۳، ٪۹، ٪۱۰ و ٪۱۴ رشد نسبت به بتن‌های معمولی روبرو می‌گردد. کورینالدسی و موریکونی[20] [۶۸] نیز در تعیین ضریب ارتجاعی بتن‌های بازیافتی ترکیبی اعلام نمودند که ضریب ارتجاعی بتن‌های بازیافتی بیشتر وابسته به مقاومت آن‌ها بوده و کمتر تحت تاثیر مواد افزودنی معدنی و پوزولان‌ها قرار می‌گیرد.



شکل ۸: رابطه بین ضریب ارتجاعی، میزان جایگزینی و میزان خاکستربادی

[18] Berrndt
[19] Kou et al.
[20] Corinaldesi and Moriconi



شکل ۹: میزان افت ضریب ارتجاعی بتن‌های بازیافتی حاوی خاکستربادی در مقایسه با بتن معمولی

۶-بهبود خواص مکانیکی با افزایش سن بتن

۶-۱-مقاومت فشاری

بدیهی است که بسته به نوع طرح اختلاط و میزان مواد افزودنی و نوع سیمان مصرفی، میزان افزایش مقاومت می‌تواند سریع‌تر یا کندتر گردد. اجماع نظر محققان بر آن است که بهبود مقاومت بتن‌های بازیافتی همانند بتن‌های معمولی می‌باشد. پون و کو[۲۱] [۶۹] در یک بررسی ۱۰ ساله بر روی رفتار بتن‌های بازیافتی حاوی خاکستربادی، مقاومت ۲۸روزه، ۱، ۳، ۵ و ۱۰ ساله بتن‌های بازیافتی را ثبت کرده‌اند. آن‌ها نشان دادند که پس از گذشت یک سال میزان رشد مقاومت بتن‌های حاوی ٪۲۵ خاکستربادی نسبت به بتن‌های عاری از خاکسربادی بیشتر بوده و مقاومت فشاری نهایی کسب‌شده نیز اندکی نسبت به بتن مرجع افزایش داشته است. به دلیل طولانی‌تر شدن مدت زمان واکنش‌های پوزولانی ناشی از افزایش مقادیر خاکستربادی، نشان داده شده که بتن‌های بازیافتی حاوی ٪۳۵ خاکستربادی در پایان سال سوم به مقاومتی معادل بتن معمولی عاری از خاکستربادی می‌رسند. آن‌ها نشان دادند که بتن‌های حاوی ٪۵۵ خاکستربادی پس از گذشت ۱۰ سال نه تنها به مقاومت فشاری معادل بتن عاری از خاکستربادی می‌رسند، بلکه از رشد مقاومت بیشتری نسبت به سایر بتن‌ها برخوردار خواهند بود.

۶-۲-مقاومت کششی

از مقایسه تحقیقات موجود در زمینه مقاومت کششی می‌توان به این نتیجه رسید که با افزایش سطح جایگزینی، مقاومت کششی دونیم‌شدن در بازه ۲۸ روزه کاهش می‌یابد، اما پس از گذشت یک سال و بدون توجه به میزان خاکستربادی مصرف شده، تمام مخلوط‌های حاوی ٪۱۰۰ درشت‌دانه بازیافتی بتنی از مقاومت کششی معادل و یا بیشتر از بتن معمولی برخوردار می‌گردند [۶۹]. وقوع این پدیده را می‌توان به میزان تخلخل سطحی زیاد درشت‌دانه‌های بازیافتی بتنی وابسته دانست؛ چرا که خمیر سیمانی جدید قادر است تا این حفرات را به شکل مطلوبی پر کند و منجر به بهبود ساختار ناحیه انتقال درشت‌دانه‌های بازیافتی گردد؛ لذا در این حالت امکان بهبود کیفیت این دسته از بتن‌ها در بستر زمان افزایش می‌یابد.

[21] Poon and Kou

۶-۳-ضریب ارتجاعی

به دلیل اینکه در بستر زمان واکنش‌های شیمیایی ناشی از هیدراسیون سیمان منجر به سخت‌ترشدن خمیر سیمانی می‌گردد؛ لذا ضریب ارتجاعی نیز همانند مقاومت فشاری در بستر زمان دستخوش تغییرات می‌شود. آزمایش‌ها نشان داده که واکنش‌های شیمیایی ناشی از هیدراسیون منجر به بهبود مقاومت اتصال در ناحیه انتقال میان خمیر سیمان جدید و سنگدانه‌های بازیافتی می‌گردد [۷۱-۶۸]، لذا بهبود خواص مکانیکی بتن‌های بازیافتی در بستر زمان امری ممکن و محتمل می‌باشد. نتایج آزمایش‌ها نشان داده که در یک بستر زمانی ۱۰ ساله ضریب ارتجاعی بتن‌های بازیافتی بین ۵ تا ۱۰ گیگاپاسکال افزایش خواهد یافت. این مطالعات هم‌چنین نشان دادند که بتن‌های بازیافتی حاوی ٪۱۰۰ درشت‌دانه بازیافتی بتنی در مقایسه با بتن معمولی با کاهشی معادل ۵ تا ۱۰ گیگاپاسکال در ضریب ارتجاعی روبرو خواهند شد و این اختلاف در یک بستر زمانی ۱۰ ساله هم‌چنان باقی خواهد ماند. به‌علاوه افزودن خاکستربادی به عنوان جایگزین سیمان در بتن بازیافتی حاوی درشت‌دانه بتنی نمی‌تواند تا افت ضریب ارتجاعی ناشی از افزایش مصرف سنگدانه بازیافتی را مرتفع نماید [۷۰].

۷-روش‌های اشباع حفرات سنگدانه‌های بازیافتی

۷-۱-مقاومت فشاری

ساخت بتن با سنگدانه‌های بازیافتی در حالتی که این سنگدانه‌ها به حالت اشباع با سطح خشک باشند، امری معمول و منطقی به نظر می‌رسد. این روش مانع از جذب آب آزاد شده و میزان روانی بتن را در سطح و اندازه بتن‌های معمولی همرده خود قرار می‌دهد [۷۲]. روش پیش‌اشباع نمودن سنگدانه‌های بازیافتی در مدت زمان‌های مختلفی مانند ۳ دقیقه، ۵ دقیقه و حتی تا مدت ۲۴ ساعت قبل از اختلاط می‌تواند صورت پذیرد. آزمایش‌ها نشان داده که استفاده از روش پیش‌اشباع سازی سنگدانه‌های بازیافتی اگر چه منجر به دست‌یابی به بتن با مقاومت هدف مورد نظر ۲۵ مگاپاسکال می‌گردد، ولی در مقایسه با بتن معمولی، بتن‌های حاوی سنگدانه‌های ۳ دقیقه غوطه‌ور شده با ٪۱۱ کاهش مقاومت فشاری روبرو شدند، در حالی که بتن‌های حاوی سنگدانه‌های ۵ دقیقه غوطه‌ور شده تا ٪۱۳ با کاهش مقاومت فشاری مواجه گردیدند [۷۳].

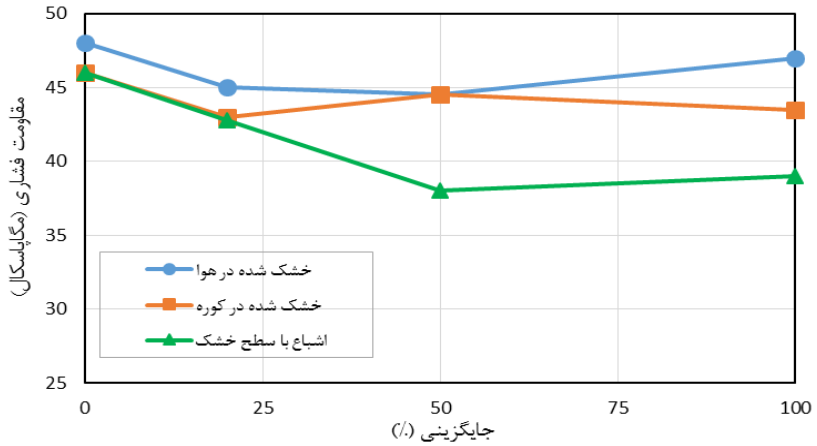
یکی دیگر از روش‌های متعارف دست‌یابی به حالت اشباع با سطح خشک سنگدانه‌های بازیافتی، افزودن آب معادل جذب‌شده (روش جبران آب جذب‌شده) حین فرآیند اختلاط می‌باشد[۱۹] که منجر به دست‌یابی به بتن‌های با کمترین میزان اسلامپ و کمترین میزان افت مقاومت می‌شود [۳۴،۴۰،۶۲،۷۵،۷۶]. فریرا و همکاران[۲۲][۷۴] نشان دادند که در این روش در مقایسه با روش پیش غوطه-ورسازی سنگدانه‌های بازیافتی، بتن‌های بازیافتی از مقاومت فشاری بالاتری برخوردار خواهند بود و بر این باورند که پیش‌اشباع نمودن سنگدانه‌های بازیافتی قبل از انجام فرآیند اختلاط باعث ممانعت و ضعیف‌شدن فرآیند نفوذ خمیر سیمانی در درون حفرات سطحی موجود در سنگدانه‌ها شده و این امر منجر به کاهش احتمال وقوع پدیده نیلینگ شده و متعاقباً باعث شده تا ناحیه انتقال میان خمیر سیمانی جدید و سنگدانه‌های بازیافتی به شکل ضعیفی تشکیل گردد.

در مطالعات اخیر [۷۱،۷۶،۷۷] روشی تحت عنوان روش اختلاط دو مرحله‌ای[۲۳] پیشنهاد گردیده است که شامل غوطه‌ورسازی سنگدانه‌های بازیافتی در دوغاب سیمانی قبل از افزودن سایر مصالح سنگی و سیمانی جهت افزایش مقاومت چسبندگی میان سنگدانه‌های بازیافتی و خمیر سیمان تازه می‌باشد. هدف اصلی این روش آن است که دوغاب سیمانی تشکیل‌شده پوششی را روی سنگدانه‌های بازیافتی تولید کرده تا منجر به ایجاد ناحیه انتقال قوی‌تر و پرشدن حفرات و ترک‌های موجود در سنگدانه‌های بازیافتی گردد [۷۷]. نتایج حاصل از این روش در یک مطالعه نشان داده که استفاده از روش اختلاط دو مرحله‌ای در سطح جایگزینی ٪۲۰ مصالح بازیافتی بتنی می‌تواند رشدی معادل ٪۲۱ نسبت به روش اختلاط معمولی را ایجاد نماید [۷۱] این در حالی است که در همین رابطه و در یک مطالعه گسترده‌تر نشان

[22] Ferreira et al.
[23] Two Stage Mixing Approach (TSMA)

داده شده که استفاده از این روش می‌تواند در سطوح جایگزینی بین ٪۲۵ تا ٪۴۰ از مصالح بازیافتی نسبت به سطح جایگزینی بین ٪۵۰ تا ٪۷۰، در رشد مقاومت فشاری ۲۸ روزه موثرتر واقع گردد [۷۷].

در برخی مطالعات افزایش مقاومت فشاری با افزایش مقادیر سنگدانه‌های بازیافتی در نسبت های آب به سیمان بالاتر نیز گزارش شده است[۷۸،۷۹]. وقوع این حالت خاص ممکن است در حالتی که برای تولید بتن از سنگدانه‌های غیراشباع استفاده می‌گردد، به واسطه کاهش نسبت آب به سیمان موثر روی دهد. در این حالت بخشی از آب آزاد مورد نیاز جهت هیدراسیون سیمان توسط سنگدانه‌های بازیافتی، جذب شده و سنگدانه‌های بازیافتی را به حالت اشباع با سطح خشک می‌رساند. لذا با افزایش میزان سطح جایگزینی سنگدانه بازیافتی در یک سطح آب ثابت، می‌توان از نسبت آب به سیمان موثر کاست، که این امر به بهبود مقاومت فشاری منجر خواهد شد. آزمایش‌های انجام‌شده توسط خلف [۲۰][۲۴] نشان داده که در ساخت بتن می‌توان از سنگدانه‌های درشت‌دانه بنایی بازیافتی بدون مرطوب-کردن در فرآیند اختلاط استفاده کرد. اگر چه در این حالت بتن بازیافتی می‌تواند به مقاومتی معادل مقاومت بتن معمولی دست یابد، ولی در مقایسه با بتن‌های ساخته شده با نسبت آب به سیمان مختلف، بتن بازیافتی بسیار خشک‌تر بوده و تراکم و پرداخت آن با سختی روبرو می‌گردد. این مسأله نشان می‌دهد که چنانچه دست‌یابی به بتن بازیافتی با کارایی و افت مقاومت اندک مد نظر باشد، استفاده از سنگدانه-های بازیافتی در حالت اشباع و اشباع با سطح خشک می‌تواند روشی موثر محسوب گردد. در همین راستا پون و همکاران[۲۵] بیان کردند که میزان افت مقاومت فشاری بتن‌های حاوی درشت‌دانه بازیافتی که در هوا خشک شدند، در مقایسه با سنگدانه‌هایی که به صورت اشباع و یا اشباع با سطح خشک مصرف گردیدند، کمتر می‌باشد (نمودار شماره ۹).



شکل ۱۰: رابطه بین مقاومت فشاری، میزان جایگزینی و شرایط سنگدانه‌ها در زمان اختلاط

۷-۲-مقاومت کششی

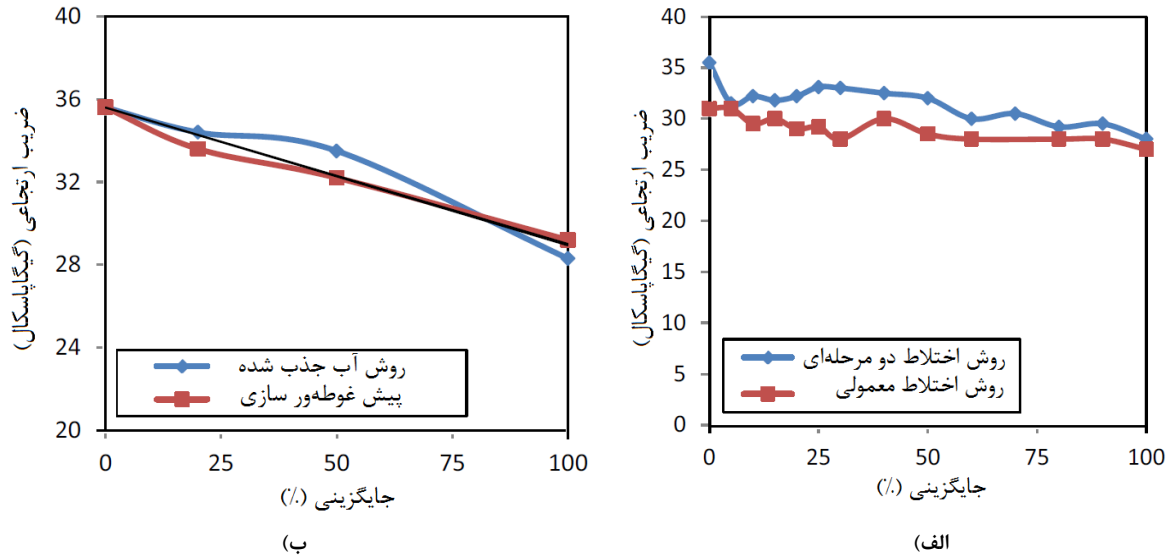
بر خلاف مقاومت فشاری و ضریب ارتجاعی، اطلاعات در رابطه با مقاومت کششی و روش اختلاط بسیار اندک می‌باشد و حتی محققانی که خود روش‌های عنوان‌شده را پیشنهاد داده‌اند، کمتر به سراغ بررسی تاثیر روش اختلاط بر مقاومت کششی رفته‌اند. اما از آنجایی که مقاومت کششی بتن به میزان زیادی تحت تاثیر مقاومت ناحیه انتقال می‌باشد، لذا می‌توان چنین پیش‌بینی کرد که مقاومت کششی در روش آب جبران‌شده به دلیل بهبود کیفیت ناحیه انتقال ایجاد شده در مقایسه با روش پیش‌اشباع سازی سنگدانه‌ها مطلوب‌تر باشد. به همین ترتیب از آنجایی که ویژگی روش دو مرحله‌ای ایجاد یک لایه پوشش دوغابی روی سنگدانه‌های بازیافتی و بهبود ناحیه انتقال می‌باشد، لذا می‌توان پیش‌بینی کرد که در مقایسه با روش اختلاط معمولی، این روش، مقاومت کششی مطلوب‌تری را تامین نماید.

[24]Khalaf
[25]Poon et al.

۷-۳-ضریب ارتجاعی

نمودار شماره ۱۱ بیانگر مقایسه دو به دو روش‌های متعارف عنوان شده می‌باشند که توسط محققان مختلف پیشنهاد و مقایسه شده‌اند. همان‌گونه که پیش‌تر ذکر شد از مقایسه دو روش پیش غوطه‌ورسازی سنگدانه‌ها و روش آب جبران‌شده (آب جذب شده معادل)، روش آب جبران‌شده به دلیل ایجاد شرایط مناسب جهت ایجاد ناحیه انتقال مناسب‌تر در اطراف سنگدانه‌های بازیافتی با مقاومت فشاری مطلوب‌تری روبه‌رو می‌گردد. نمودار۱۱- الف بیانگر مقایسه ضریب ارتجاعی این دو روش می‌باشد که توسط فریرا و همکاران[۲۶] [۷۴] ارائه شده است. چنانچه مشاهده می‌گردد همانند مقاومت فشاری، ضریب ارتجاعی بتن‌های حاصل از این روش بجز بتن تماماً بازیافتی از شرایط مطلوب‌تری نسبت به روش پیش غوطه‌ورسازی برخوردار هستند.

مقایسه روش اختلاط دو مرحله‌ای مصالح و روش معمولی نیز توسط تام و همکاران [۷۷] صورت پذیرفته که نتایج آن در نمودار ۱۱- ب ارائه شده‌اند. همان‌گونه که ملاحظه می‌گردد این روش نیز در مقایسه با اختلاط معمولی منجر به تولید بتن بازیافتی با ضریب ارتجاعی بالاتری نسبت به روش اختلاط معمولی می‌شود. البته باید توجه داشت که نتایج حاصل از روش دو مرحله‌ای اختلاف محسوسی نسبت به روش آب جبران‌شده نداشته و در سطح جایگزینی کامل سنگدانه‌های بازیافتی به مقادیری نزدیک به هم دست یافته‌اند.



شکل ۱۱: مقایسه ضریب ارتجاعی بتن‌های با شرایط اختلاط مختلف

۸-نتایج

در این تحقیق سه خاصیت از خواص مکانیکی بتن‌های بازیافتی شامل مقاومت فشاری، مقاومت کششی و ضریب ارتجاعی تحت تاثیر تغییرات شش دسته از عوامل مختلف مورد بررسی قرار گرفتند. خلاصه نتایج حاصله به شرح زیر می‌باشند:

۸-۱-مقاومت فشاری

اگر چه اجماع نظر محققان بر آن است که افزایش سطح جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی منجر به کاهش مقاومت فشاری می‌شود، اما در همین زمینه نیز برخی مطالعات انجام‌شده نتایجی دال بر امکان دست‌یابی به مقاومت مطلوب در سطوح جایگزینی بالا را نشان داده است. ولی به طور کلی نوع، اندازه و کیفیت سنگدانه‌های بازیافتی می‌تواند در تعیین این سطح از جایگزینی بسیار موثر باشد. در زمینه

[26]Ferreira et al.

تاثیر شرایط عمل‌آوری بر فرآیند کسب مقاومت نشان داده شد که رفتار بتن‌های بازیافتی همانند بتن‌های معمولی می‌باشد. در زمینه تاثیر مواد کاهنده آب نیز مشاهده شد که افت مقاومت فشاری ناشی از افزایش جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی متاثر از مقدار فوق‌روان‌کننده نمی‌باشد و استفاده و یا عدم استفاده از فوق‌روان‌کننده بر میزان افت مقاومت حاصل شده تاثیری نخواهد داشت. تمام مطالعات انجام شده در زمینه مصرف مواد پوزولانی نشان داده‌اند که استفاده از این مواد نمی‌تواند از روند کاهش مقاومت فشاری در اثر افزایش سطح جایگزینی جلوگیری نماید. اما در زمینه استفاده از خاکستربادی نشان داده شده که هر چه میزان مصرف خاکستربادی افزایش یابد، افت مقاومت فشاری ۲۸ روزه ناشی از افزایش جایگزینی مصالح بازیافتی در مقایسه با بتن‌های بازیافتی بدون خاکستربادی نیز کاسته خواهد شد. استفاده از ۱۰٪ میکروسیلیس نشان داد که مقاومت فشاری بتن بازیافتی در مقایسه با بتن بازیافتی مشابه بدون پوزولان با ۱۰٪ رشد روبرو می‌گردد، ولی هم‌چنان این ماده نیز نمی‌تواند تاثیر افزایش جایگزینی سنگدانه‌های بازیافتی در کاهش مقاومت فشاری را بکاهد. در زمینه روش اختلاط مصالح بازیافتی نیز روش‌های مختلفی مانند پیش‌غوطه‌ورسازی سنگدانه‌های بازیافتی، جبران آب جذب‌شده و روش اختلاط دو مرحله‌ای پیشنهاد شدند و نتیجه شد که بتن‌های ساخته‌شده به روش جبران آب جذب‌شده در مقایسه با روش پیش‌غوطه‌ورسازی سنگدانه‌های بازیافتی به مقاومت فشاری مطلوب‌تری دست خواهند یافت. روش اختلاط دو مرحله‌ای نیز نشان داده که اگر چه در سطح جایگزینی ۲۰٪ مصالح بازیافتی، رشد مقاومت فشاری نسبت به روش اختلاط معمولی بیش از ۲۱٪ بود، ولی با افزایش سطح جایگزینی مصالح بازیافتی، از تاثیر مطلوب و موثر این روش کاسته خواهد شد.

۸-۲-مقاومت کششی

اگر چه نوع، جنس و زبری سطح سنگدانه‌های بازیافتی و حتی روش خردکردن آن‌ها بر میزان مقاومت کششی بتن بازیافتی می‌تواند موثر باشد، ولی اکثر مطالعات نشان دادند که جایگزینی کامل درشت‌دانه‌های بازیافتی می‌تواند تا ۴۰٪ و ریزدانه بازیافتی تا ۵۴٪ منجر به کاهش مقاومت کششی دونیم‌شدن گردند. در زمینه تاثیر شرایط عمل‌آوری بر بهبود مقاومت کششی نیز نشان داده شد که تاثیر نحوه فرآیند عمل‌آوری بر مقاومت کششی دونیم‌شدن بتن تحت تاثیر سنگدانه‌های بازیافتی نمی‌باشد. مطالعه در خصوص ارتباط بین مقاومت کششی و میزان فوق‌روان‌کننده نیز نشان داده که فوق‌روان‌کننده نمی‌تواند بر سازوکار کاهش مقاومت کششی متاثر از افزایش سنگدانه‌های بازیافتی موثر باشد، و حتی افزایش میزان ریزدانه بازیافتی می‌تواند منجر به کاهش تاثیر فوق‌روان‌کننده بر مقاومت کششی دونیم‌شدن گردد. در زمینه تاثیر انواع پوزولان‌ها بر مقاومت کششی نیز می‌توان گفت که تاثیر این مواد بر بهبود مقاومت کششی دونیم‌شدن در مقایسه با تاثیری که در بهبود مقاومت فشاری دارند، کم‌تر است. اگر چه افزایش مقادیر خاکستربادی در بتن‌های بازیافتی با کاهش مقاومت کششی روبرو شده ولی در مقابل برخی از مطالعات نشان دادند که حتی در سطح جایگزینی ۵۰٪ از سرباره کوره آهنگدازی، مقاومت کششی حدود ۲۰٪ با رشد مواجه می‌گردد. از آنجایی که خمیر سیمانی قادر است تا تخلخل‌های موجود روی سطوح سنگدانه‌های بازیافتی را به شکل مطلوبی پر کند، بدون توجه به میزان مواد پوزولانی مصرف‌شده در بتن‌های بازیافتی، امکان بهبود ساختار ناحیه انتقال در این بتن‌ها در بستر زمانی بیش از یک سال خواهد بود و این امر منجر به بهبود مقاومت کششی دونیم‌شدن این بتن‌ها در مقایسه با بتن‌های معمولی می‌گردد. در زمینه تاثیر "روش اشباع حفرات سنگدانه‌های بازیافتی" و شرایط سنگدانه‌های بازیافتی بر مقاومت کششی بتن‌های بازیافتی، مطالعات مبسوطی انجام نشده و اطلاعات موجود اندک می‌باشند، لذا این بخش می‌تواند به عنوان یکی از کانون‌های مورد مطالعه در تحقیقات آتی مورد نظر باشد.

۸-۳-ضریب ارتجاعی

بر خلاف مقاومت‌های فشاری و کششی، تمام محققان بر کاهش چشم‌گیر ضریب ارتجاعی بتن در اثر افزایش سطح جایگزینی مصالح بازیافتی اتفاق نظر دارند. گرچه تا سطح ۳۰٪ جایگزینی، میزان این تغییرات اندک و نامحسوس است، ولی در جایگزینی کامل این سنگدانه‌ها ضریب ارتجاعی در بازه‌ای بین ۵۲٪ تا ۹۷٪ با افت روبرو می‌گردد. در رابطه با نوع سنگدانه نیز نشان داده شد که در مقایسه

میان سنگدانه‌های بازیافتی، به‌ترتیب سنگدانه‌های بازیافتی بتنی، سنگدانه‌های بازیافتی ترکیبی و سنگدانه‌های بازیافتی بنایی کم‌ترین تاثیر را بر ضریب ارتجاعی بتن‌های بازیافتی دارند. گرچه همانند مقاومت‌های فشاری و کششی مطالعات نشان دادند که شرایط عمل‌آوری بتن-های حاوی سنگدانه‌های بازیافتی تاثیر نامحسوسی بر ضریب ارتجاعی خواهد داشت، اما بعضاً مشاهده گردید که عمل‌آوری در محیط آزمایشگاه برای بتن‌های تماماً بازیافتی منجر به افت ضریب ارتجاعی کم‌تری نسبت به سایر درصدهای جایگزین شده می‌شود. در زمینه مواد کاهنده آب نیز مصرف این مواد نمی‌تواند بر روند کاهش ضریب ارتجاعی ناشی از افزایش جایگزینی مصالح بازیافتی تاثیر بگذارد، به نحوی که در جایگزینی کامل این سنگدانه و در حضور مواد کاهنده آب ضریب ارتجاعی با کاهش ۳۵٪ نسبت به بتن معمولی روبرو می‌گردد. در زمینه میزان فوق‌روان‌کننده نیز می‌توان چنین گفت که بدون توجه به سطح جایگزینی مصالح بازیافتی، افزایش مواد کاهنده آب به میزان اندکی بر بهبود ضریب ارتجاعی موثر واقع می‌گردد. در زمینه تاثیر مواد پوزولانی بسته به اینکه نحوه استفاده از این مواد به چه صورت باشد، نتایج نیز متفاوت خواهد بود؛ به نحوی که چنانچه از این مواد به عنوان مواد افزودنی به مواد سیمانی استفاده شود، حتی در سطح جایگزینی کامل مصالح بازیافتی، ضریب ارتجاعی با ۱۴٪ رشد روبرو خواهد شد، در حالی که اگر از این مواد به عنوان مواد جایگزین سیمان استفاده شود، در سطح جایگزینی کامل سنگدانه‌های بازیافتی میزان ضریب ارتجاعی بتن‌های با درشت‌دانه‌های بتنی بازیافتی و حاوی درصدهای مختلف خاکستربادی بین ۲۵٪ تا ۴۰٪ با کاهش مواجه خواهد شد. گرچه این مطالعات نشان داده که هرچه میزان مصرف خاکستربادی افزایش یابد، از میزان افت ضریب ارتجاعی نسبت به بتن معمولی مشابه کاسته خواهد شد. افزایش سن بتن نشان داد که در یک بستر زمانی ۱۰ ساله ضریب ارتجاعی بتن‌های تماماً بازیافتی بین ۵ تا ۱۰ گیگاپاسکال رشد خواهد کرد، که این سطح از رشد همانند رشدی است که در بتن‌های معمولی مشاهده شده است. در زمینه روش "اشباع حفرات سنگدانه‌های بازیافتی"در مقایسه با روش پیش غوطه‌ورسازی سنگدانه‌های بازیافتی، روش آب جذب‌شده منجر به دست‌یابی به ضریب ارتجاعی مطلوب‌تری می‌گردد، این در حالی است که نتایج حاصل از روش اختلاط دو مرحله‌ای نیز در مقایسه با روش اختلاط معمولی منجر به افزایش ضریب ارتجاعی بتن می‌گردد. در زمینه مقایسه نتایج حاصل از روش اختلاط دو مرحله‌ای و روش آب جبران‌شده نیاز به انجام مطالعات وسیع‌تری می‌باشد.

۹-نتیجه‌گیری کلی

بر اساس نتایج حاصل از تحقیق می‌توان بیان داشت که نوع، اندازه و کیفیت سنگدانه‌های بازیافتی می‌تواند در تعیین سطح جایگزینی سنگدانه‌ها در بتن بسیار موثر باشد. در خصوص شرایط عمل‌آوری این نتیجه حاصل شد که رفتار بتن‌های بازیافتی همانند بتن-های معمولی است. در زمینه تأثیر مواد کاهنده آب نیز به‌دست آمد که افت مقاومت ناشی از افزایش درصد جایگزینی‌ها متأثر از فوق‌روان-کننده نمی‌باشد. راجع به کاربرد مواد پوزولانی حاصل شد که استفاده از این مواد قادر به کنترل کاهش خواص مکانیکی بتن‌های بازیافتی در اثر افزایش سطح جایگزینی‌ها نیست. در زمینه تأثیر سن بر خواص مکانیکی بتن‌های بازیافتی اجماع نظر محققین بر آن است که بهبود برخی از خواص مکانیکی بتن‌های بازیافتی، همانند بتن‌های معمولی می‌باشد. راجع به نوع روش اشباع حفرات سنگدانه‌های بازیافتی جهت ساخت بتن‌های بازیافتی، استفاده از " روش جبران آب جذب‌شده" نسبت به سایر روش‌های مرسوم، نتایج مطلوب‌تری را به‌دست خواهد داد.

مراجع

[1] H. Yuan, A. Chini, Y. Lu and L. Shen, "A dynamic model for assessing the effects of managment strategies on the reduction of construction and demolition waste", Waste Managment, Vol. 32, No. 3, pp. 521-531, 2012.

[2] H. Sonigo, M. Hestin and S. Mimid, "Managment of Construction and Demolition Waste in Europe", in Stakholders Workshop, Brussels, 2010.

[3] U. Kulatunga, D. Amaratunga, R. Haigh and R. Rameezdeen, "Attitude and perception of construction workforce on construction waste in Sri Lanka", Managment of Environmental Quality, Vol. 17, No. 1, pp. 57-72, 2006.

[4] J. Y. Wang, H. P. Yuan, X. P. Kang and W. S. Lu, "Critical success factor for on- site sorting of construction waste : A China study", Resource, Conservation and Recycling, Vol. 54, No. 11, pp. 931-936, 2010.

[5] F. Krausmann , S. Gingrich , N. Eisenmenger , K.-H. Erb , H. Haberl and M. Fischer-Kowalski, "Growth in global materials use. GDP and population during the 20th century", Ecological Economics, Vol. 68, pp. 2696-2705, 2009.

[6] J. Allwood, M. Ashby, T. Gutowski and E. Worrell, "Material efficiency : A white paper", Resources, Conservation and Recycling, Vol. 55, No. 3, pp. 362-381, 2011.

[7] S. C. Kou and C. S. Poon, "Long-term mechanical and durability properties of recycled aggregate concrete prepared with the incorporation of fly ash", Cement and Concrete Composites, Vol. 37, No. 1, pp. 12-19, 2013.

[8] A. Ajdukiewicz and A. Kliszczewicz, "Influence of recycled aggregates on mechanical properties of HS/HPC", Cement and Concrete Composites, Vol. 24, No. 2, pp. 269 – 279, 2002.

[9] K. Rahal, "Mechanical properties of concrete with recycled coarse aggregate", Biulding and Environment , Vol. 42, No. 1, pp. 407-415, 2007.

[10] L. Xuping, "Recycling and reuse of waste concrete in China: Part I. Material behaviour of recycled aggregate concrete", Resources, Conservation and Recycling, Vol. 53, No. 1, pp. 36-44, 2008.

[11] R. M. Salem , E. G. Burdette and N. M. Jackson , "Resistance to freezing and thawing of recycled aggregate concrete", ACI Materials Journal, Vol. 100, No. 3, pp. 216-22, 2003.

[12] Zaharieva, Roumiana, F. Buyle-Bodin and E. Wirquin, "Frost resistance of recycled aggregate concrete", Cement and Concrete Research, Vol. 34, No. 10, pp. 1927-1932, 2004.

[13] Limbachiya, Mukesh, M. S. Meddah and Y. Ouchagour, "Use of recycled concrete aggregate in fly-ash concrete", Construction and Building Materials, Vol. 27, No. 1, pp. 439-449, 2012.

[14] W. Kwan , M. Ramli , K. Kam and M. Sulieman , "Influence of the amount of recycled coarse aggregate in concrete design and durability properties", Construction and Building Materials, Vol. 26, No. 1, pp. 565-573, 2012.

[15] M. Chakradhara Rao, S. K. Bhattacharyya and S. V. Barai, "Behaviour of recycled aggregate concrete under drop weight impact load", Construction and Building Materials, Vol. 25, No. 1, pp. 69-80, 2011.

[16] A. konin and D. M. kouadio, "Influence of Cement Content on Recycled Aggregates Concrete Properties", Modern Applied Science, Vol. 5, No. 1, 2011.

[17] S. Manzi, C. Mazzotti and M. C. Bignozzi, "Short and long-term behavior of structural concrete with recycled concrete aggregate", Cement and Concrete Composites,Vol. 37, No. 1, pp. 312-318, 2013.

[18] R. K. Dhir , M. McCarthy , J. Halliday and M. Tang , "ASR testing on recycled aggregates guidance on alkali limits and reactivity", DTI/WRAP Aggregates Research Programme, Vols. ISBN: 1-84405-185-4, p. 31, 2005.

[19] M. B. Leite, Evaluation of the mechanical properties of concrete produced with recycled aggregates from construction and demolition wastes, Brasil: PhD Thesis, Federal University of Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, 2001.

[20] F. M. Khalaf , "Using crushed clay brick as coarse aggregate in concrete", Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 18, No. 4, pp. 518-526, 2006.

[21] A. Rao, . K. N. Jha and . S. Misre, "Use of aggregates from recycled construction and demolition waste in concrete", Resources, Conservation & Recycling, Vol. 50, No. 1, pp. 71-81, 2007.

[22] P. Pereira, . L. Evangelista and . J. de Brito, "The effect of superplasticizers on the mechanical performance of concrete made with fine recycled concrete aggregates", Cement and Concrete Composites, Vol. 34, No. 9, pp. 1044-1052, 2012.

[23] R. K. Dhir, K. A. Paine, "Suitability and practicality of using coarse RCA in Normal andhigh strength concrete", Presented at the 1st International Conference on SustainableConstruction: Waste Management, Singapore, pp. 108-123, 2004.

[24] K. Teranishi, Y. Dosho , M. Narikawa and M. Kikuchi , "Application of recycled aggregate concrete for structural concrete: Part 3 - Production of recycled aggregate by real-scale plant and quality of recycled aggregate concrete", in International Symposium on Sustainable construction: Use of recycled concrete aggregate, London, UK, pp. 143-156, 1998.

[25] R. K. Dhir , M. C. Limbachiya and T. Leelawat , "Suitability of recycled concrete aggregate for use in BS 5328 designated mixes", Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Structures and Buildings, Vol. 134, No. 3, pp. 257-274, 1999.

[26] Akbarnezhad , K. C. G. Ong , M. H. Zhang and C. Tam , "Microwaveassisted beneficiation of recycled concrete aggregates", Construction and Building Materials, Vol. 25, No. 8, pp. 3469-3479, 2011.

[27] M. Etxeberria, E, Vazquez, A, Mari, M, Barra, "Influence of amount of recycledcoarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete", Cementand Concrete Research, Vol. 37, No. 5, pp. 735-742, 2007.

[28] K, Yang, H, Chung, A, Ashour. "Influence of type and replacement level of recycledaggregates on concrete properties", ACI Materials Journal, Vol, 105, No. 3, pp. 289-296, 2008.
[29] M. C. Limbachiya, "Coarse recycled aggregates for use in new concrete", Proceedingsof the Institution of Civil Engineers - Engineering Sustainability, Vol. 157, No. 2, pp. 99-106, 2004.
[30] J. M. Khatib. "Properties of concrete incorporating fine recycled aggregate", Cementand Concrete Research, Vol. 35, No. 4, pp. 763-769, 2005.
[31] P. Pereira, L. Evangelista and J. de Brito, "The effect of superplasticisers on theworkability and compressive strength of concrete made with fine recycled concrete aggregates",Construction and Building Materials, Vol. 28, No. 1, pp. 722-729, 2012.
[32] L. Evangelista, J, de Brito. "Durability performance of concrete made with finerecycled concrete aggregates", Cement and Concrete Composites, Vol. 32. No. 1, pp. 9-14, 2010.
[33] L. Evangelista, J, de Brito. "Mechanical behaviour of concrete made with fine recycledconcrete aggregates", Cement and Concrete Composites, Vol. 29, No. 5, pp. 397-401, 2007.
[34] T, Vieira, "Concrete incorporating fine recycled ceramic aggregates: Durabilityrelatedperformance", MSc Thesis, Instituto Superior Técnico, University of Lisbon, Lisbon,Portugal, 2013.
[35] F. Debieb, S. Kenai. "The use of coarse and fine crushed bricks as aggregate inconcrete", Construction and Building Materials, Vol. 22, No. 5, pp. 886-893, 2008.
[36] S. Wild, J. Khatib, B. Sabir, S.D. Addis. "The potential of fired brick clay as a partialcement replacement material", Presented at the International Conference of Concrete in theService of Mankind, London, UK, pp. 685-696, 1996.
[37] R. K. Dhir and K. A. Paine, "Performance related approach to the use of recycled aggregates", Waste and Resources Action Programme (WRAP) AggregatesResearch Programme, Banbury, Oxon, UK, p. 77, 2007.
[38] N. Fonseca, J. de Brito, L. Evangelista. "The influence of curing conditions on themechanical performance of concrete made with recycled concrete waste", Cement and ConcreteComposites, Vol. 33, No. 6, pp. 637-643, 2011.
[39] W. L. Wang, S. C. Kou, F. Xing. "Deformation properties and direct shear of mediumstrength concrete prepared with 100% recycled coarse aggregates", Construction and BuildingMaterials, Vol. 48, pp. 187-193, 2013.
[40] B. Mas, A. Cladera, T. Olmo, F. Pitarch. "Influence of the amount of mixed recycledaggregates on the properties of concrete for Non-structural use", Construction and BuildingMaterials, Vol. 27, No. 1, pp. 612-622, 2012.
[41] R. V. Silva. "Use of recycled aggregates from construction and demolition waste in the production in the structural concrete", PhD Thesis, Instituto Superior Técnico, University of Lisbon, Lisbon,Portugal, 2015.
[42] D. Pedro, J. de Brito, L. Evangelista. "Performance of concrete made with aggregatesrecycled from precasting industry waste: influence of the crushing process", Materials andStructures, Vol. 48, No. 12, pp 3965–3978, 2015.
[43] F.D. Lydon, R.V. Balendran. "Some observations on elastic properties of plainconcrete", Cement and Concrete Research, Vol. 16, No. 3, pp. 314-324, 1986.
[44] A.M. Neville. "Properties of concrete", London, UK, Longman, 1995.
[45] R. K. Dhir and K. A. Paine , "Suitability and practicality of using coarse RCA in normal and high strength concrete", 1st International Conference on Sustainable Construction: Waste Management, , Singapore, pp. 108-123, 2004.
[46] M. C. Limbachiya, T. Leelawat, R. K. Dhir. "RCA concrete: a study of properties in thefresh state, strength development and durability", Presented at the International Symposium onSustainable construction: Use of recycled concrete aggregate, London, UK, pp. 227-237, 1998.
[47] Y. S. Frondistou, "Waste concrete as aggregate for new concrete", Journal of the American Concrete Institute,, Vol. 74, No. 8, pp. 373-376, 1977.
[48] TFSCCS. "Draft of Spanish regulations for the use of recycled aggregate in theproduction of structural concrete (Task Force of the Standing Committee of Concrete of Spain)",Presented at the International RILEM Conference on the Use of Recycled Materials in Building andStructures, Barcelona, Spain, pp. 511-525, 2004.
[49] J. Z. Xiao, J. Li, C. Zhang. "Mechanical properties of recycled aggregate concreteunder uniaxial loading", Cement and Concrete Research, Vol. 35, No. 6, pp. 1187-1194, 2005.
[50] T. C. Hansen, E. Boegh. "Elasticity and drying shrinkage of recycled aggregateconcrete", Journal of the American Concrete Institute, Vol. 82, No. 5, pp. 648-652, 1985.
[51] M. Gomes, J. de Brito. "Structural concrete with incorporation of coarse recycled concrete and ceramic aggregates: durability performance", Materials and Structures, Vol. 42, No. 5, pp.663-675, 2009.
[52] M. Gomes, J. de Brito. "Structural concrete with incorporation of coarse recycledconcrete and ceramic aggregates", Presented at Portugal Sb07 - Sustainable Construction, Materials and Practices: Challenge of the Industry for the New Millennium, Pts 1 and 2, Lisbon,Portugal, pp. 887-894, 2007.
[53] L. Ferreira, J. De Brito, N. Saikia. "Influence of curing conditions on the mechanicalperformance of concrete containing recycled plastic aggregate", Construction and Building Materials, Vol. 36, pp. 196-204, 2012.
[54] M. Bravo, J. de Brito. "Concrete made with used tyre aggregate: durability-relatedperformance", Journal of Cleaner

Production, Vol. 25, pp. 42-50, 2012.
[55] F. Valadares, M. Bravo, J. De Brito. "Concrete with used tire rubber aggregates:Mechanical performance", ACI Materials Journal, Vol. 109, No. 3, pp. 283-292, 2012.
[56] R. V. Silva, J. de Brito, N. Saikia. "Influence of curing conditions on the durabilityrelatedperformance of concrete made with selected plastic waste aggregates", Cement andConcrete Composites, Vol. 35, No. 1, pp. 23-31, 2013.
[57] F. Rodrigues, M. Carvalho, L. Evangelista, J. de Brito. "Physical-chemical andmineralogical characterization of fine aggregates from construction and demolition wasterecycling plants", Journal of Cleaner Production, Vol. 52, pp. 438-445, 2013.
[58] WBTC-No.12. "Specifications facilitating the use of recycled aggregates", WorksBureau Technical Circular, Hong-Kong, p. 16, 2012.
[59] F. Buyle-Bodin, R. Hadjieva-Zaharieva. "Influence of industrially produced recycledaggregates on flow properties of concrete", Materials and Structures, Vol. 35, No. 252, pp. 504-509, 2002.
[60] P. Amorim, J. de Brito, L. Evangelista. "Concrete made with coarse concreteaggregate: Influence of curing on durability", ACI Materials Journal, Vol. 109, No. 2, pp. 195-204, 2012.
[61] K. B. Prakash, K. T. Krishnaswamy. (1998) - "Suitability of superplasticized recycled aggregateconcrete in road construction", Presented at the 8th International Symposium on Concrete Roads,Lisbon, Portugal, pp. 25-31, 1998.
[62] M. S. Juan and . P. A. Gutiérrez, "Influence of recycled aggregate quality on concrete properties", in International RILEM Conference on the Use of Recycled Materials in Buildings and Structures, Barcelona, Spain, pp. 545-553, 2004.
[63] S. C. Kou, C. S. Poon and D. Chan. "Influence of fly ash as a cement replacement on the properties of recycled aggregate concrete", Journal of Material in Civil Engineering, Vol. 19, No. 9, pp. 709-717, 2007.
[64] S. C. Kou, C. S. Poon and F. Agrela, "Comparisons of natural and recycled aggregate concretes prepared with the addition of different mineral admixtures", Cement and Concrete Composites, Vol. 33, No. 8, pp. 788-795, 2011.
[65] M. L. Berndt , "Properties of sustainable concrete containing fly ash, slag and recycled concrete aggregate", Construction and Building Materials, Vol. 23, No. 7, pp. 2606-2613, 2009.
[66] F. Sajedi, H. Jalilifar. "Investigation on mechanical properties of recycled concrete containing natural zeolite", International Journal of Engineering and Applied Sciences (IJEAS), Vol. 4, No. 3, PP. 77-81, 2017.

[67] S. C. Kou, C. S. Poon and D. Chan. "Influence of fly ash as a cement addition on the hardenedproperties of recycled aggregate concrete", Materials and Structures, Vol. 41, No. 7, pp. 1191-1201, 2008.
[68] V. Corinaldesi and G. Moriconi, "Influence of mineral additions on the performance of 100% recycled aggregate concrete", Construction and Building Materials, Vol. 23, No. 8, pp. 2869 – 2876, 2009.
[69] C. S. Poon, S. C. Kou. "Effects of fly ash on mechanical properties of 10-year-old concreteprepared with recycled concrete aggregates", Presented at the 2nd International Conference onWaste Engineering Management, ICWEM 2010, Shanghai, China, pp. 46-59, 2010.
[70] M. Etxeberria, E, Vazquez, A. Mari. "Microstructure analysis of hardened recycledaggregate concrete", Magazine of Concrete Research, Vol. 58, No. 10, pp. 683-690, 2006.
[71] V. W. Y. Tam, X. F. Gao, C. M. Tam. "Microstructural analysis of recycled aggregateconcrete produced from two-stage mixing approach", Cement and Concrete Research, Vol. 35, No. 6, pp.1195-1203, 2005.
[72] T. C. Hansen. "Recycling of Demolished Concrete and Masonry", London, UK, E & FNSpon, 1992.
[73] J. G. Gonzalez, D. R. Robles, A. J. Valdes, J. M. delpozo, M. I. G. Romero. "Pre-Saturation Technique of the Recycled Aggregates: Solution to the Water Absorption Drawback in the Recycled Concrete Manufacture", Materials, Vol. 7, No. 9, pp. 6224-6236, 2014.
[74] L. Ferreira, J. de Brito. M. Barra. "Influence of the pre-saturation of recycled coarseconcrete aggregates on concrete properties", Magazine of Concrete Research, Vol. 63, No. 8, pp.617-627, 2011.
[75] L. Evangelista, J. de Brito. "Durability performance of concrete made with finerecycled concrete aggregates", Cement and Concrete Composites, Vol. 32, No. 1, pp. 9-14, 2010.
[76] V. W. Y. Tam, C. M. Tam. "Diversifying two-stage mixing approach (TSMA) forrecycled aggregate concrete: TSMA(s) and TSMA(sc)", Construction and Building Materials, Vol. 22, No. 10,pp. 2068-2077, 2008.
[77] V. W. Y. Tam, C. M. Tam, Y. Wang. "Optimization on proportion for recycledaggregate in concrete using two-stage mixing approach", Construction and Building Materials,Vol. 21, No. 10, pp. 1928-1939, 2007.
[78] N. Y. Ho, Y. P. K. Lee, W. F. Lim, T. Zayed, K. C. Chew, G. L. Low, S. K. Ting. "Efficientutilization of recycled concrete aggregate in structural concrete", Journal of Materials in CivilEngineering, Vol. 25, No. 3, pp. 318-327, 2013.
[79] R. M. Ridzuan, A. Ibrahim, A. M. M. Ismail, A. B. M. Diah. "Durability performanceof recycled aggregate concrete", Presented at the International Conference on Globalconstruction: Ultimate Concrete Opportunities: Achieving Sustainability in Construction, London,UK, pp. 193-202, 2005.