مجلهٔ تحقیقات بتن
تابستان۸۹ ،سال سوم، شمارهٔ۱
ص۲۰-۹
تاریخ دریافت: ۸۸/۷/۱۶
تاریخ پذیرش: ۸۸/۱۱/۳۰

بررسی ساخت بتن خودتراکم با استفاده از درشت‌دانه‌های بازیافتی

علیرضا خالو
استاد دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی شریف
محمد مهدی خداویردی زنجان
سرپرست واحد پژوهش و کنترل کیفی بتن شرکت آتی ساز
پیام حسینی
مسؤول واحد پژوهش و تحقیقات، گروه بتن و مصالح پیشرفته، پژوهشکده توسعه فناوری طلوع، دانشگاه صنعتی شریف
p.hosseini@civil.sharif.edu

چکیده

ساخت بتن‌های بازیافتی به عنوان یک استراتژی اساسی جهت دستیابی به توسعه پایدار محسوب می‌گردد. اغلب بتن‌های بازیافتی شامل سنگدانه‌های بازیافتی در قسمت ریزدانه و درشت‌دانه و بخش پودری بازیافتی شامل فیلر و پوزولان می‌باشند. به‌کارگیری مواد زائداتی در جهت جایگزینی با مصالح طبیعی اولیه اولاً منجر به کاهش اثرات زیست محیطی این مواد و ثانیاً موجب حفظ منابع طبیعی برای نسل‌های آینده می‌گردد.

هدف از انجام این پژوهش، به‌کارگیری سنگ‌دانه‌های بازیافتی به عنوان درشت‌دانه با درصدهای جایگزینی مختلف نسبت به درشت‌دانه طبیعی(۰، ۲۵٪، ۵۰٪، ۷۵٪ و ۱۰۰٪)، جهت ساخت بتن‌های خودتراکم می‌باشد. براساس نتایج به‌دست آمده از تست‌های رئولوژی بتن خودتراکم، به‌کارگیری سنگ‌دانه‌های بازیافتی موجب افت خواص رئولوژیک بتن‌های خودتراکم می‌گردد و دستیابی به خواص خودتراکمی را دشوار می‌سازد. البته با توجه به نتایج تحقیق، جایگزینی ۲۵٪ درشت‌دانهٔ بازیافتی با درشت‌دانهٔ غیربازیافتی (طبیعی) منجر به ساخت بتن خودتراکم گردیده است.

واژه‌های کلیدی: سنگ‌دانه بازیافتی، بتن بازیافتی، ویژگی‌های رئولوژیک، بتن خود تراکم

۱- مقدمه:

با توجه به اقبال عمومی در سرتاسر جهان که در ساخت سازه‌های بتنی وجود دارد، تولید بتن به یکی از مهمترین پارامترهای اثرگذار در ساخت و ساز بدل گشته است. نظر به اینکه هر سازه دارای طول عمر مفید مشخصی در زمان بهره برداری خود می‌باشد، خواه نا خواه مجبور به تخریب سازه و ایجاد سازه‌ای جدید می‌باشیم. از طرفی عوامل گوناگون مانند بلایای طبیعی نظیر زلزله، سیل و طوفان و بلایای انسانی نظیر جنگ نیز به خودی خود سبب از بین رفتن سازه‌ها از جمله سازه‌های بتنی می‌گردند. در نتیجه حجم آوار ناشی از این تخریب‌ها در جهان روزبروز در حال افزایش است و موضوع دفن بتن‌های تخریب شده را بیش از پیش با اهمیت می‌سازد و با توجه به اینکه یکی از راه‌های اصلی در جهت کاهش اثرات مخرب زیست محیطی ناشی از دفن بتن فرسوده، استفاده مجدد از آن می‌باشد، لذا موضوع بازیافت این مصالح تخریبی از نظر زیست‌محیطی مهم و ضروری می‌گردد [۱-۴].

در ایران نیز با توجه به رشد فزاینده ساخت و ساز ساختمان‌های مسکونی از یک سو و الزام به بازسازی سازه‌های فرسوده توسط سیاستگذاران عرصهٔ مسکن از سوی دیگر به ترتیب سبب کاهش منابع سنگ‌دانه‌های طبیعی و افزایش نخاله‌های ساختمانی می‌گردند. در این رابطهٔ می‌توان به تولید ۱۲ میلیون تن نخاله ساختمانی در سال ۱۳۸۰ تنها در شهر تهران اشاره نمود [۵].

با بررسی پدیدهٔ بازیافت مصالح، مزایای قابل‌توجهی از جمله حفظ محیط زیست، عدم نیاز به دپو آوار ناشی از تخریب، صرفه‌جویی در مصرف انرژی، صرفه جویی اقتصادی و ... در اثر این عمل، قابل حصول می‌باشند. بازیافت بتن کهنه در حالت کلی شامل یک فرآیند پنج مرحله‌ای می‌باشد. مراحل این روش شامل (۱) کندن و خرد کردن بتن قدیمی، (۲) شکستن بتن در سنگ شکن اولیه و ثانویه، (۳) جدا کردن میلگردهای فولادی و قطعات دیگری که در بتن مدفون شده‌اند، (۴) دانه‌بندی و شستن و سرانجام (۵) دپو کردن سنگ‌دانه‌های درشت‌دانه و ریزدانه به دست آمده می‌باشد. محصول نهایی باید از آلودگی‌هایی مانند خاک، قطعات گچ، چوب و مصالح دیگری جز بتن عاری باشد[۶-۷]، چراکه وجود این مواد موجب کاهش خواص مقاومتی و دوامی بتن‌های بازیافتی می‌گردد.

در بتن‌های بازیافتی، سنگ‌دانه‌های بازیافتی را می‌توان هم به عنوان جایگزین بخشی از ریزدانه یا درشت‌دانه و هم می‌توان جایگزین کل ریزدانه یا درشت‌دانه یا هر دو کرد. سنگدانه‌های ناشی از بازیابی بتن عمدتاً جذب آب بالاتر و مقاومت کمتری نسبت به سنگ‌دانه‌های طبیعی دارند [۱-۴]. چراکه مقاومت ملات چسبیده از مقاومت سنگ‌دانه کمتر می‌باشد [۸]. از طرفی ملات موجود در روی سنگ‌دانه‌های بازیافتی به سبب تخلخل بیشتر نسبت به سنگ‌دانه، دارای جذب آب بیشتری می‌باشد [۹].

حذف عمل لرزاندن بتن جهت متراکم‌تر کردن آن توسط بتن خود تراکم سبب گردیده است که استفاده از این بتن در عملیات بتن‌ریزی مورد توجه قرار گیرد. صرفه اقتصادی و بهبود شرایط کار برای کارگران دست اندرکار بتن ریزی ناشی از حذف عملیات لرزاندن می‌تواند عاملی مهم به‌منظور کاربرد بتن خودتراکم باشد [۱۰]. بتن خودتراکم نوعی از بتن است که تحت اثر وزن خود جاری شده و می‌تواند خلل و فرج خود را حتی زمانی که از مکانی با تراکم بالای آرماتور می‌گذرد پر کرده و سطحی تخت را بدون بهم خوردن حالت همگن بودن خود، ایجاد نماید[۱۱].

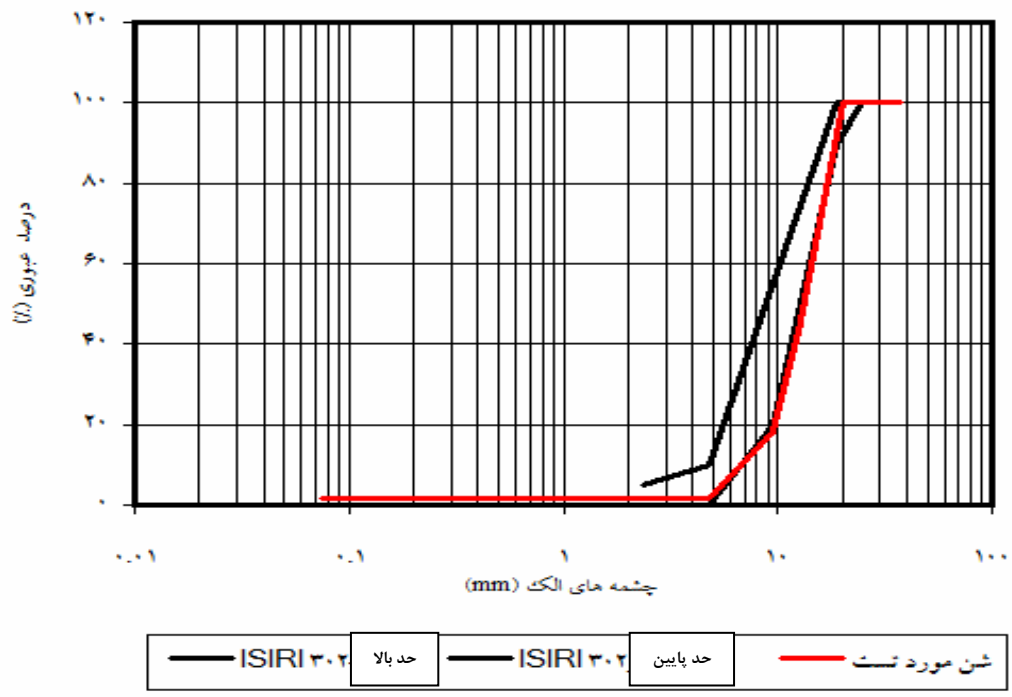
با توجه به نو پا بودن صنعت بتن خودتراکم در کشورمان از یک سو و افزایش نخاله‌های ساختمانی ناشی از تخریب بناهای مختلف به خصوص سازه‌های فرسوده از سوی دیگر، امکان سنجی ساخت بتن خودتراکم با استفاده از این مصالح هم به لحاظ هزینه و هم از جهت حفاظت از محیط زیست و حفظ انرژی دارای توجیه خواهد بود. بر همین اساس بررسی همخوانی دو عامل خودتراکمی و استفاده از مصالح بازیافتی قابل توجه است. چراکه جذب آب بالای سنگ‌دانه‌های بازیافتی به شدت خواص رئولوژیک را تحت تأثیر قرار خواهد داد. اما از آنجا که درشت‌دانه‌های بازیافتی در مقایسه با ریزدانه‌های بازیافتی دارای جذب آب کمتری می‌باشند، لذا در این تحقیق به‌کارگیری درشت‌دانهٔ بازیافتی مد نظر قرار رفت تا حصول نتایج مناسب‌تر امکان‌پذیر گردد.

با توجه به به‌کارگیری درشت‌دانهٔ بازیافتی و جایگزینی بخش درشت‌دانهٔ بتن خودتراکم با درشت‌دانهٔ بازیافتی، از یک طرف آیین نامه[۱۲] ACI 555R.1 محدودیت هایی برای دانه‌بندی

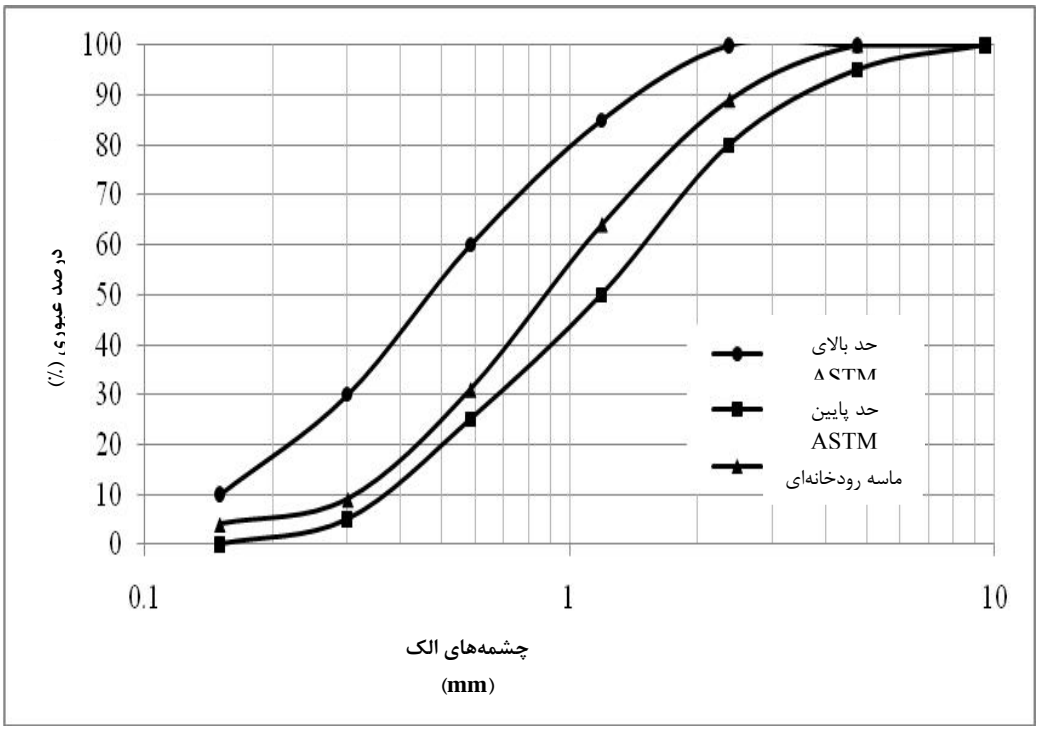
درشت‌دانه‌های بازیافتی قائل شده است. از طرف دیگر دانه‌بندی مصالح سنگی از سوی آیین‌نامهٔ ISIRI 302 کنترل می‌گردد و در نهایت ، آیین نامه EFNARC [11] محدودیت‌های خاص خود را جهت حصول رئولوژی لازم برای ساخت بتن خود تراکم مدنظر قرار می‌دهد. حال با در نظر گرفتن تمامی این محدودیت‌ها در استفاده از سنگ‌دانه‌های بازیافتی به‌منظور ساخت بتن خود تراکم، ساخت این نوع بتن خاص با مصالح سنگی بازیافتی مورد توجه قرار گرفته است. بر همین اساس در ابتدا با مقایسهٔ محدودیت‌های دانه‌بندی سنگ‌دانه‌های درشت‌دانه براساس استانداردهای ACI 555R.1، ASTM C33 و ISIRI 302، محدودهٔ دانه‌بندی استاندارد درشت‌دانه‌های بازیافتی مورد استفاده تعیین گردیده و سپس اقدام به ساخت بتن‌های خودتراکم شده است. سپس با بررسی خواص رئولوژیک هریک از بتن‌ها به ارائه نتایج به‌کارگیری مصالح درشت‌دانه بازیافتی با مقادیر جایگزینی مختلف در بخش درشت‌دانه و اثرات آن بر خواص رئولوژیک بتن‌های خودتراکم پرداخته شده است.

۲- مصالح و برنامه آزمایشگاهی :

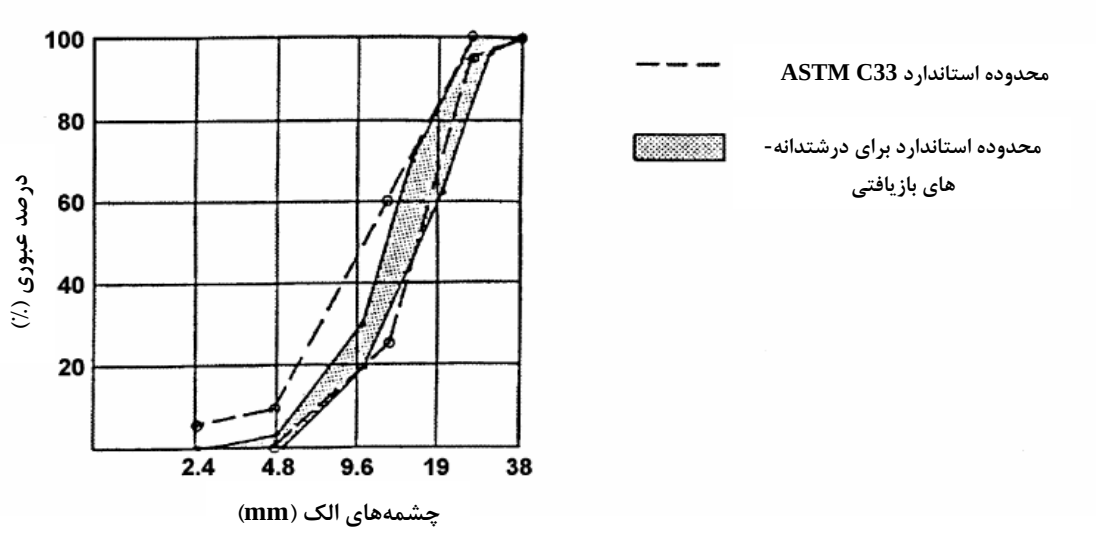
مصالح اولیه جهت ساخت بتن مادر (بتن تخریب شده) و نیز مصالح ساخت بتن‌های خودتراکم از یک نوع بوده و بخش‌های سنگدانه آن‌ها مشخصات و محدودیت‌های لازم در ISIRI 302 را پوشش می‌دهند. نمودارهای ۱ و۲ به ترتیب مشخصات دانه‌بندی درشت‌دانه و ریزدانه مورد استفاده را نشان می‌دهند. ویژگی‌های درشت‌دانه و ریزدانهٔ مورد استفاده در جدول ۱ بیان گردیده است. درشت‌دانهٔ مورد استفاده شن معدنی بوده و ریزدانه نیز ماسهٔ رودخانه‌ای می‌باشد. سیمان مورد مصرف در ساخت بتن مادر از نوع I-425 سیمان تهران می‌باشد که خصوصیات فیزیکی و شیمیایی آن در جدول ۲ بیان گردیده است. طرح اختلاط بتن مادر که برای بازیافت از آن استفاد گردیده است، دارای ۳۷۵ کیلوگرم سیمان در متر مکعب بوده، نسبت آب به سیمان ۰/۵۷ و ۳۵٪ از کل سنگ‌دانه‌ها را مصالح درشت دانه به خود اختصاص داده‌اند (جدول ۱). هیچ‌گونه افزودنی در بتن مادر استفاده نشده است، مقاومت فشاری مشخصهٔ بتن مادر ۲۵ مگاپاسکال بوده و تمامی نمونه ها حداقل ۲۸ روز زمان از ساخت خود را سپری کرده‌اند.



نمودار۱- دانه‌بندی شن مورد استفاده در بتن بازیافتی



نمودار ۲- دانه‌بندی ریزدانهٔ طبیعی (ماسهٔ رودخانه‌ای) در بتن مادر، شاهد و بازیافتی



نمودار ۳- کنترل محدودیت دانه‌بندی مصالح درشت دانه بازیافتی با[12]ACI 555R.1

جدول ۱- طرح اختلاط بتن مادر (مورد بازیافت)

نام ماده	مقدار مصرف (kg/m^3)	وزن مخصوص حقیقی (kg/m^3)	جذب آب (٪)
سیمان	۳۷۵	۳۱۵۰	–
درشت‌دانه	۶۱۰	۲۳۷۰	۱/۲۱
ریزدانه	۱۰۸۰	۲۶۶۰	۳/۶۳
آب	۲۱۷/۵	۱۰۰۰	–
نسبت آب به سیمان	۰/۵۷	–	–

جدول ۲- ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی سیمان مورد استفاده

اجزاء	مقدار (٪)
SiO_2	۲۱/۴
CaO	۶۴
Al_2O_3	۶
Fe_2O_3	۳/۴
MgO	۱/۸
SO_3	۱/۴
K_2O+Na_2O	۱
L.O.I	۳
ویژگی‌های فیزیکی	**مقدار**
وزن مخصوص (gr/cm^3)	۳/۱۵
سطح ویژه (m^2/gr)	۰/۳۷
میانگین اندازه ذرات (میکرومتر)	۱۵

با توجه به هم‌خوانی محدودیت های ASTM C33 و ISIRI 302 و از طرفی همخوانی دانه‌بندی مصالح درشت‌دانه بازیافتی براساس ACI 555R.1 با ASTM C33 طبق نمودار ۳، هم‌خوانی دانه‌بندی مصالح این تحقیق با ACI 555R.1 براساس نمودارهای ۱ و ۳ کاملاً مشهود است.

از سوی دیگر شکسته بودن مصالح مصرفی در بتن باعث یک سری تغییرات در خصوصیات بتن خواهد شد. این تغییرات در بتن خود تراکم جلوه بیش‌تری پیدا خواهد کرد. توزیع اندازهٔ ذرات و شکل درشت‌دانه‌ها تأثیر مستقیم بر جریان، قابلیت عبور و مقدار خمیر سیمان مورد نیاز در بتن خودتراکم دارد. دانه‌های کروی ذرات سنگ‌دانه سبب کاهش امکان انسداد بتن و بیش‌تر شدن قابلیت جریان به علت کاهش اصطکاک داخلی بتن می‌شوند[۱۱]. مقدار جذب آب سنگ‌دانه‌های مورد استفاده در بتن خودتراکم تأثیر زیادی بر رفتار رئولوژیک این نوع بتن از جمله ایجاد روانی لازم، می‌گذارد[۱۳]. مقدارجذب آب سنگ‌دانه‌های بازیافتی به صورت تابعی از جذب آب سنگدانه‌های بتن مادر و تراکم آن قابل بررسی است. چراکه سنگدانه‌های بازیافتی در حالت کلی از سنگ‌دانهٔ شکسته شده که اطراف آن را خمیر سیمان احاطه کرده است تشکیل می‌شوند. لذا مجموعه خمیر که نسبت به سنگدانه متخلخل‌تر است (البته این موضوع در اینجا به شدت قابل توجه است، چراکه بتن مادر دارای مقاومت بالا نبوده و در نتیجه ساختاری متراکم و مناسب را نخواهد داشت) و سنگ‌دانه، جذب آب سنگ‌دانه‌های بازیافتی را سبب می‌گردد و با توجه به تخلخل بیش‌تر خمیر نسبت به سنگدانه، جذب آب بالای سنگ‌دانه‌های بازیافتی به جذب آب بالای خمیر احاطه کننده آن‌ها نسبت داده می‌شود[۹]. از طرفی درشت‌دانه‌های بازیافتی دارای جذب آب پایین‌تری نسبت به ریزدانه‌های بازیافتی می‌باشند[۹]. در نتیجه با توجه به جذب آب بالای سنگ‌دانه‌های بازیافتی، در این پژوهش جایگزینی درشت‌دانهٔ بازیافتی که دارای جذب آب کمتری نسبت به ریزدانه بازیافتی می‌باشد مد نظر قرار گرفته است که این موضوع موجب بهبود نسبی خواص رئولوژیک بتن‌های ساخته شده با درشت‌دانهٔ بازیافتی نسبت به ریزدانهٔ بازیافتی خواهد شد.

یکی دیگر از عوامل مؤثر در بتن‌های بازیافتی، آب انداختگی یا جذب آب آن‌ها با توجه به شکسته و چند وجهی بودن مصالح می‌باشد که خود عاملی در جهت افزایش یافتن سطح مخصوص سنگ‌دانه‌ها بوده و رابطهٔ مستقیم با رئولوژی بتن خواهد داشت. این عامل مقدار سیمان مورد نیاز به جهت حصول روانی لازم را نیز افزایش خواهد داد.

بـا توجـه بـه بررسـی هـای صـورت گرفتـه [۱]، جـذب آب سنگ‌دانه‌های بازیافتی معمولاً بیش‌تر از سنگ‌دانه به‌کار رفتـه در ساختار بتن اولیه می‌باشد. البته لازم به ذکر است بـه دلیـل احاطـه شدن سنگ‌دانه‌های بازیافتی توسط خمیر سیمان و این مطلب کـه نفوذپذیرترین بخـش مـاتریس بـتن در اصـل همـین بخـش خمیـر سیمان می‌باشد [۱۴]، در نتیجه جذب آب بـالای سـنگ‌دانـه‌هـای بازیافتی نسبت به سنگ‌دانه‌های معمولی قابل توجیـه مـی‌باشـد. از سویی مقاومت و خصوصیات مکانیکی بتن ساخته شده با مـصالح بازیـافتی دارای نـسبت مـستقیم بـا خـصوصیات مکـانیکی بتنـی می‌باشد که مصالح بازیافتی از آن تهیه گردیده اسـت (بـتن مـادر) [۱۲].

براساس مباحث مطرح گردیده طرح مخلوط بتن سـاخته شـده بـا مصالح بازیافتی باید متناسب با خصوصیات مکـانیکی سـنگ‌دانـه باشد. درصورتی که در طرح مخلـوط بـتن، مقاومـت فـشاری بـالا مدنظر باشد، تأمین چنین مقاومتی در فاز سنگ‌دانـه بـا اسـتفاده از سنگ‌دانه‌هایی با ظرفیت مقاومتی پـایین میـسر نخواهـد بـود و بـه طور معمول تقویت ماتریس مـلات نیـز منجـر بـه شکـست از فـاز سنگ‌دانه خواهد شد[۱۲].

در جهت آماده‌سازی سنگ‌دانه‌های بازیافتی به منظور به‌کارگیری در انجـام پـژوهش، ابتـدا بـتن‌هـای مـادر تحـت بارگـذاری اولیـه شکسته شدند. سـپس نمونـه‌هـای شکـسته شـده تحـت بارگـذاری ثانویه به قطعات کوچک‌تری خرد گردیدند. پـس از ایـن مرحلـه قطعات کوچک‌تر با سنگ‌شکن به صورت ریزتر خرد شـده و بـا انجام دانه‌بندی، بخش درشـت‌دانـهٔ بازیـافتی و ریزدانـهٔ آن از هـم جدا گردید. سـپس بخـش درشـت‌دانـه دانـه‌بنـدی شـده و جهـت به‌کارگیری مهیا گردید. ویژگـی‌هـای فیزیکـی درشـت‌دانـه‌هـای بازیـــافتی در جـــدول ۳ ذکـــر گردیـــده اســـت. شـــکل ۱ نیـــز سنگ‌دانه‌های بازیافتی مـورد کـاربرد در بـتن‌هـای خـودتراکم را نشان می‌دهد.طرح شاهد، بتن خود تراکم سـاخته شـده بـا مـصالح استاندارد بوده و تمامی خصوصیات رئولوژیکی مـورد نظـر را بـر آورده مـی‌نمایـد (براسـاس نتـایج بـه‌دسـت آمـده از آزمایـشات رئولوژی در جدول ۶). ریزدانهٔ مصرفی در تمـامی طـرح‌هـا (بـتن مادر و بتن‌های خودتراکم) ماسهٔ رودخانـه‌ای دوبـار شـسته شـده می‌باشد که از معادن اطراف تهران (شهریار) تهیه گردیـده اسـت. همچنین سیمان مورد استفاده در تمامی طرح‌ها نیز یکـسان بـوده و از نوع I-425 سیمان تهران می‌باشد. خصوصیات ایـن مـصالح در جدول ۱ و۲ بیان گردیده است.

با توجه بـه مطالعـات انجـام شـده بـر روی مـصالح بـومی و بافـت سـنگی مـصالح و بـا عنایـت بـه محـدودیت‌هـای حـداکثر انـدازهٔ مصالح، تمهیدات لازم جهت دستیابی بـه رئولـوژی مـورد نیـاز بـا توجه به حداکثر اندازه مصالح درشت‌دانه مد نظر قـرار گرفـت. از سوی دیگر با تغییرات ایجاد شده در چرخهٔ تولید سنگ‌دانـه‌هـای بازیافتی، دانـه‌بنـدی مـصالح بازیـافتی دقیقاً منطبـق بـر دانـه‌بنـدی مـصالح اولیـه در نظـر گرفتـه شـد. در طـرح‌هـای a، b، c و d بـه ترتیب ۲۵٪، ۵۰٪، ۷۵٪ و ۱۰۰٪ از مصالح سـنگی درشـت‌دانـه بـا مصالح بازیافتی درشت‌دانه جایگزین شد. ایـن تغییـرات در حـالی صورت پذیرفت که سعی شده بود اکثر عوامل ساخت بتن کنتـرل شده و بـدون تغییـر باشـند و فقـط تـأثیر جـایگزینی ایـن مـواد در رئولوژی بتن خودتراکم مورد بررسی قـرار گیـرد. لـذا در جهـت بررسی ویژگی‌های رئولوژیکی بتن‌های خود تراکم آزمایش‌هـای جریان اسلامپ، L-Box (جعبه L شـکل)، V-Funnel (قیـف V شـکل) و J-Ring (حلقـه J) صـورت پـذیرفت. مشخـصات طرح‌های مخلوط بتن خودتراکم و همچنین نمودار دانه‌بندی کـل سنگ‌دانهٔ مـصرفی در ایـن بـتن‌هـا بـه ترتیـب در جـداول ۴ و ۵ و نمودار ۴ بیان گردیده است.

۳. نتایج و بحث

نتایج حاصل از آزمایش‌های رئولوژی صورت گرفته در جدول ۶ آمده است. براساس نتایج به‌دست آمده به بررسی اثرات افـزودن مقـادیر مختلـف درشـت‌دانـهٔ بازیـافتی در بـتن‌هـای خـودتراکم می‌پردازیم.

با توجه به نتایج بـه‌دسـت آمـده از آزمایـشات صـورت گرفتـه در مورد بتن خود تراکم بازیافتی نسبت به نمونـه شـاهد، اولـین نکتـه قابل برداشت، مشهود بودن کاهش توانایی جریـان و بـروز پدیـده انسداد با افزایش درصـد جـایگزینی مـصالح بازیـافتی بجـای شـن طبیعی می‌باشد. نکته قابل توجه سطح ویـژه بـالاتر سـنگدانه‌هـای بازیافتی نسبت به سنگ‌دانه‌های طبیعی مـی‌باشـد. چراکـه بـا خـرد کـردن بـتن، سـنگ‌دانـه‌هـای تولیـد شـده دارای ابعـاد شکـسته می‌گردند. از طرفی با توجـه بـه اینکـه در تمـامی طـرح‌هـا مقـدار سیمان ثابت بوده و نیز با افزایش مقـدار سـنگ‌دانـه‌هـای بازیـافتی

سطح ویژه کل سنگ‌دانه‌ها افزایش می‌یابد، لذا با کاهش خمیر میان سنگدانه‌ها روبرو هستیم و این امر سبب کاهش لزجت بتن‌های بازیافتی گردیده است. بر همین اساس طبق جدول ۶، با افزایش درصد جایگزینی درشت‌دانهٔ بازیافتی، میزان جریان اسلامپ کاهش یافته است.

همان‌گونه که مشاهده می‌گردد، طرح شاهد و طرح a، در محدودهٔ SF3 قرار می‌گیرند، در حالی که سایر طرح‌ها در محدودهٔ SF2 می‌باشند. محدوده رده‌بندی بتن‌های خودتراکم براساس آزمایش جریان اسلامپ طبق آیین‌نامهٔ EFNARC [۱۱]، در جدول ۷ بیان گردیده است. بتن‌های دارای رتبهٔ SF3 جهت بتن‌ریزی در مقاطع عمودی، سازه‌های پر آرماتور و سازه‌های با شکل پیچیده قالب‌بندی مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱۵].

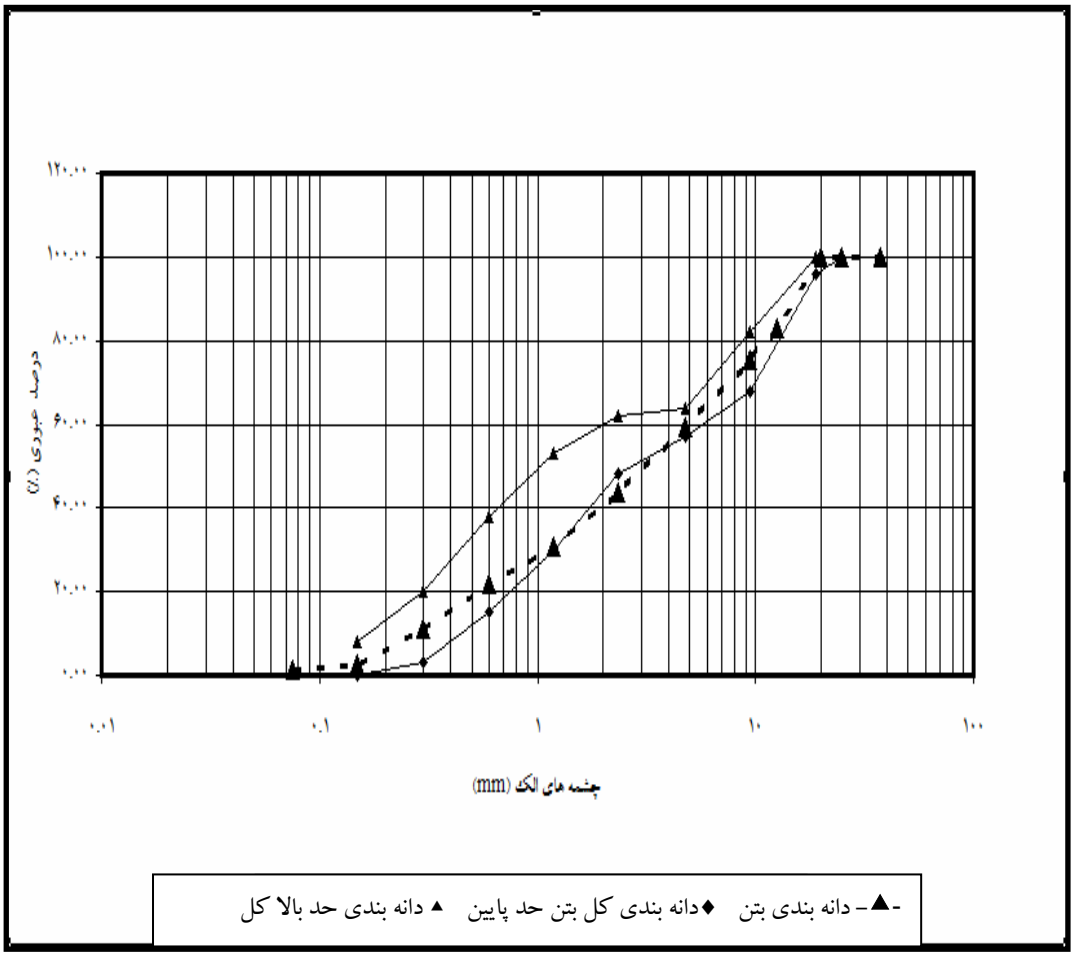
جدول ۳- مشخصات سنگ‌دانه‌های بازیافتی

نوع	وزن مخصوص حقیقی (kg/m^3)	جذب آب (٪)
شن بازیافتی	۲۴۱۰	۵/۵۴

شکل ۱- تصویری از سنگ‌دانه‌های بازیافتی درشت‌دانهٔ مورد استفاده در آزمایش

جدول ۴- مشخصات طرح اختلاط‌های بتن خودتراکم با به‌کارگیری مصالح بازیافتی

نام طرح	طرح شاهده	a	b	c	d
آب (kg/m^3)	۱۷۰	۱۷۰	۱۷۰	۱۷۰	۱۷۰
فوق‌روان‌کننده (kg/m^3)	۴/۸	۴/۸	۴/۸	۴/۸	۴/۸
سیمان (kg/m^3)	۴۰۰	۴۰۰	۴۰۰	۴۰۰	۴۰۰
پودر سنگ آهک (kg/m^3)	۲۰۰	۲۰۰	۲۰۰	۲۰۰	۲۰۰
مصالح درشت‌دانهٔ غیربازیافتی با حداکثر ابعاد ۲۵ میلیمتر (kg/m^3)	۴۰۰	۳۰۰	۲۰۰	۱۰۰	۰
مصالح درشت‌دانهٔ بازیافتی با حداکثر ابعاد ۲۵ میلیمتر (kg/m^3)	۰	۱۰۰	۲۰۰	۳۰۰	۴۰۰
مصالح ریزدانه-ماسهٔ رودخانه‌ای (kg/m^3)	۱۲۰۲	۱۲۰۲	۱۲۰۲	۱۲۰۲	۱۲۰۲
نسبت روان‌کننده به سیمان (وزنی) (٪)	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱/۲
نسبت آب به سیمان (وزنی) (٪)	۴۲/۶	۴۲/۶	۴۲/۶	۴۲/۶	۴۲/۶
نسبت آب به پودر (وزنی) (٪)	۲۸/۴	۲۸/۴	۲۸/۴	۲۸/۴	۲۸/۴
نسبت آب به پودر (حجمی) (٪)	۸۴/۷۷	۸۴/۷۷	۸۴/۷۷	۸۴/۷۷	۸۴/۷۷
نسبت وزنی مصالح بازیافتی به کل مصالح درشت‌دانه (٪)	۰	۲۵	۵۰	۷۵	۱۰۰
نسبت وزنی مصالح بازیافتی به کل مصالح سنگی (٪)	۰	۶/۷	۱۴/۳	۲۳	۳۳/۳



نمودار(۴) نمودار دانه‌بندی مصالح سنگی بتن خودتراکم طرح‌های آزمایشی

جدول ۵- دانه‌بندی بتن خودتراکم

درصد تجمعی عبوری از الک	اندازه الک (mm)	شماره الک
۱۰۰	۳۷/۵	۱/۵
۱۰۰	۲۵	۱
۱۰۰	۲۰	۳/۴
۸۲/۸۸	۱۲/۵	۱/۲
۷۵/۲۱	۹/۵	۳/۸
۵۹/۳۰	۴/۷۵	۴
۴۳/۵۷	۲/۳۶	۸
۳۰/۷۳	۱/۱۸	۱۶
۲۱/۹۷	۰/۶	۳۰
۱۱/۲۵	۰/۳	۵۰
۲/۵۷	۰/۱۵	۱۰۰
۱/۲۱	۰/۰۷۵	۲۰۰

جدول۶- مشخصات رئولوژیکی بتن خودتراکم بازیافتی

آزمایشات	طرح شاهد	a	b	c	d
درصد جایگزینی درشت‌دانه با مصالح درشت‌دانهٔ بازیافتی (٪)	۰	۲۵	۵۰	۷۵	۱۰۰
جریان اسلامپ (mm)	۸۰	۷۶	۷۵	۷۲	۷۲
جریان اسلامپ (زمان ۵۰ سانتی‌متر)	۱/۷	۲	۳	۳/۸	۵/۵
حلقه J (میلیمتر)	۱۰	۱۲	۲۰	۲۵	۲۸
قیف V شکل (ثانیه)	۶	۱۲	۲۰	۳۲	۴۰
جعبهٔ L شکل (زمان ۲۰۰ میلیمتر) (ثانیه)	۱	۱/۱	۱/۳	۱/۷	۲/۲
جعبهٔ L شکل (زمان ۴۰۰ میلیمتر) (ثانیه)	۲	۲	۴	۴	۵/۲
جعبه L شکل (h_1/h_2)	۰/۹۲	۰/۸۱	۰/۷۲	۰/۵۵	۰/۴۶

با توجه به نتایج به‌دست آمده از آزمایشات صورت گرفته در مورد بتن خودتراکم بازیافتی نسبت به نمونه شاهد، اولین نکته قابل برداشت، مشهود بودن کاهش توانایی جریان و بروز پدیده انسداد با افزایش درصد جایگزینی مصالح بازیافتی به‌جای شن طبیعی می‌باشد. نکته قابل توجه سطح ویژهٔ بالاتر سنگ‌دانه‌های بازیافتی نسبت به سنگ‌دانه‌های طبیعی می‌باشد. چراکه با خرد کردن بتن، سنگ‌دانه‌های تولید شده دارای ابعاد شکسته می‌گردند. از طرفی با توجه به اینکه در تمامی طرح‌ها مقدار سیمان ثابت بوده و نیز با افزایش مقدار سنگ‌دانه‌های بازیافتی سطح ویژهٔ کل سنگ‌دانه‌ها افزایش می‌یابد، لذا با کاهش خمیر میان سنگ‌دانه‌ها روبرو هستیم و این امر سبب کاهش لزجت بتن‌های بازیافتی گردیده است. بر همین اساس طبق جدول ۶، با افزایش درصد جایگزینی درشت‌دانهٔ بازیافتی، میزان جریان اسلامپ کاهش یافته است. همانگونه که مشاهده می‌گردد، طرح شاهد و طرح a، در محدوده SF3 قرار می‌گیرند، در حالی که سایر طرح‌ها در محدودهٔ SF2 می‌باشند. محدودهٔ‌رده‌بندی بتن‌های خودتراکم براساس آزمایش جریان اسلامپ طبق آیین‌نامهٔ EFNARC [۱۱]، در جدول ۷ بیان گردیده است. بتن‌های دارای رتبهٔ SF3 جهت بتن‌ریزی در مقاطع عمودی، سازه‌های پر آرماتور و سازه‌های با شکل پیچیدهٔ قالب‌بندی مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱۵].

در صورتی که مدت زمان رسیدن جریان اسلامپ به قطر ۵۰ سانتی‌متر بیش از ۵ ثانیه باشد، بتن دارای لزجت خمیری زیاد خواهد بود. از طرفی زمان کمتر از ۱ ثانیه نیز می‌تواند نشان دهندهٔ لزجت خمیری کم بتن ساخته شده باشد. بر طبق نتایج به‌دست آمده، با افزایش مقدار جایگزینی درشت دانه‌های بازیافتی، میزان زمان نیز افزایش یافته است، اما تنها طرح d از محدودهٔ ۱ الی ۵ ثانیه خارج گردیده است که نشان از لزجت بالای بتن با جایگزینی صد درصد درشت‌دانهٔ بازیافتی می‌باشد.

جدول ۷- رده‌بندی بتن‌های خودتراکم براساس آزمایش جریان اسلامپ

ردهٔ بتن	میزان جریان یافتگی (سانتی‌متر)
SF1	۵۵-۶۵
SF2	۶۶-۷۵
SF3	۷۶-۸۵

براساس آزمایش حلقهٔ J، هرمقدار که اختلاف ارتفاع بتن موجود در قبل و بعد آرماتورها بیش‌تر باشد، توانایی عبور بتن از میان آرماتورها کاهش می‌یابد. لذا حداکثر اختلاف ارتفاع مجاز جهت دستیابی به خواص خودتراکمی ۱۰ میلیمتر در نظر گرفته می‌شود[۱۱]. بر همین اساس تمامی بتن‌های دارای سنگدانهٔ بازیافتی در محدودهٔ مجاز تست حلقه j، قرار نگرفته‌اند. لذا این گمان ایجاد می‌گردد که توانایی عبور بتن‌های ساخته شده با

سنگ‌دانهٔ بازیافتی پایین باشد. این موضوع نیاز به بررسی تست‌های دیگر از جمله جعبهٔ L شکل دارد. با توجه به شکل ۲، با افزایش درصد مصالح بازیافتی در آزمایش حلقهٔ J، قابلیت عبور کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر، تنش تسلیم و لزجت بتن کاهش یافته که این پدیده با افزایش جذب آب مصالح سنگی که در نتیجه جذب بالای مصالح بازیافتی می‌باشد و نیز با ازدیاد اصطکاک داخلی بتن به دلیل سطح بیش‌تر سنگ‌دانه‌های بازیافتی، همخوانی دارد.

شکل ۲- آزمایش حلقهٔ J، مربوط به طرح c، کاهش قابلیت عبور و محصور شدن سنگ‌دانه‌ها در میان آرماتورها و عبور خمیر سیمان به تنهایی در مسیرجریان

در مورد نتایج آزمایش قیف V، با افزایش میزان جایگزینی درشت‌دانه‌های بازیافتی، زمان تخلیهٔ قیف به شدت افزایش می‌یابد و از آنجا که زمان مناسب تخلیه جهت دستیابی به خواص مناسب لزجت، ۶ الی ۱۲ ثانیه می‌باشد[۱۱]، لذا طرح‌های b، c و d، در محدوده مجاز قرار نگرفته و در این تست مردود گردیده‌اند. زمان تخلیه بیش از ۱۲ ثانیه نشان از وجود لزجت خمیری بالا در بتن‌های ساخته شده دارد. گرچه نتایج این تست به تنهایی جهت نتیجه‌گیری جهت رد و یا قبول بتن خودتراکم ساخته شده کافی نیست، اما از آنجا که از طرح b به بعد (تا طرح d) زمان تخلیه فاصله زیادی با حد مجاز (۱۲ ثانیه) دارد، لذا می‌توان گفت این طرح‌ها دارای لزجت بالایی می‌باشند که دستیابی به کارایی مورد نظر را مشکل خواهند نمود. البته لازم به ذکر است که آزمایش قیف V، با افزایش جایگزینی شن بازیافتی از طرح a تا d، تا مرز انسداد کامل پیش می‌رود.

با توجه به نتایج تست جعبهٔ L شکل، نسبت دو ارتفاع اندازه‌گیری شده (h_2/h_1)، در بتن شاهد و طرح a به مقدار ۱ نزدیکتر می‌باشد. در همین رابطهٔ لازم به ذکر است که هرچه میزان این نسبت به عدد یک نزدیکتر باشد، بتن دارای خاصیت عبورکنندگی مناسب‌تر از میان آرماتورها خواهد بود [۱۱]. لذا طرح‌های b، c و d با اختلاف زیاد نسبت به مقدار ۱، از محدودهٔ مجاز دور گشته‌اند. علت این موضوع نیز جذب آب بالای سنگ‌دانه‌های بازیافتی نسبت به سنگ‌دانه‌های معمولی می‌باشد. لذا می‌توان بیان داشت که موضوع جذب آب بالای سنگ‌دانه‌های بازیافتی عاملی نامناسب در جهت دستیابی به خواص خودتراکمی می‌باشد. بر همین اساس جهت دستیابی به نتایج بهتر لازم است تا حد امکان با بهره‌گیری از سیستم سرند اقدام به زدودن خاک همراه سنگ‌دانه‌ها نمود و از طرف دیگر این سنگ‌دانه‌ها را به صورت اشباع با سطح خشک به مخلوط اضافه نمود. همچنین نباید زمان مخلوط نمودن را بی‌جهت افزایش داد، چراکه این موضوع سبب خرد شدن بیش‌تر سنگ‌دانه‌های بازیافتی (به سبب ضعف مقاومتی ملات در نواحی انتقالی داخلی با سنگ‌دانه قدیمی) و در نتیجه بالا رفتن جذب آب توسط اجزای خرد شده سنگ‌دانه‌ها خواهد گردید که دستیابی به خواص رئولوژیک از پیش طراحی شده را دشوار می‌سازد. اما نکتهٔ بسیار مهم نقش افزودنی‌های شیمیایی در ساخت بتن‌های خودتراکم بازیافتی می‌باشد. چراکه در این نوع بتن‌ها با افزایش لزجت و کاهش کارایی روبرو خواهیم بود. افزایش لزجت نیز در حالت افزایش کارایی مطلوب می‌باشد. بر همین اساس، به‌کارگیری افزودنی‌های فوق‌روان‌کننده جهت ساخت بتن‌های خودتراکم بازیافتی از ملزومات است.

براساس نتایج تست جعبهٔ L شکل، موجود در جدول ۶، زمان رسیدن به فواصل ۲۰۰ میلی‌متر و ۴۰۰ میلی‌متر با افزایش میزان جایگزینی شن بازیافتی افزایش یافته است. این موضوع گواهی بر افزایش لزجت بتن‌های دارای سنگ‌دانهٔ بازیافتی و با افزایش این سنگ‌دانه‌ها می‌باشد. همانطور که در شکل ۳ مشخص می‌باشد، آزمایش جعبه L، برای طرح d انسداد کامل جریان را نشان می‌دهد. در نتیجه این امر، دو عامل پرکنندگی و قابلیت عبور در اثر افزایش درصد شن بازیافتی دستخوش تغییر شده‌اند.

با توجه به مباحث مطرح گردیده، افزایش لزجت بتن‌های بازیافتی با افزایش میزان جایگزینی درشت‌دانهٔ بازیافتی، نشان از تأثیر بالای میزان آب آزاد موجود در مخلوط بتن جهت دستیابی به خواص رئولوژیک مناسب دارد. لذا اتخاذ تصمیماتی که در بالا به آن‌ها اشاره گردید می‌تواند تا حد مناسبی پاسخگو باشد. نکتهٔ قابل توجه در این باره، نیاز یک بتن خودتراکم به دارا بودن مقدار مناسبی لزجت می‌باشد. در نتیجه همین موضوع انواع فیلرها جهت افزایش لزجت در بتن‌های خودتراکم به‌کار گرفته شده‌اند. لزجت مناسب موجب پیوستگی هرچه بیش‌تر بتن و انتقال نیروی جلوبرنده از اجزای قبلی به اجزای بعدی در بتن خودتراکم می‌گردد. لذا به‌کارگیری سنگ‌دانه‌های بازیافتی در حد مناسب (در اینجا ۲۵٪ جایگزینی درشت‌دانه)، می‌تواند به ایجاد لزجت مناسب در بتن‌های خودتراکم کمک شایانی نماید و همچنین مقاومت بتن را نیز تحت تأثیر قرار ندهد. چراکه جایگزینی تا حدود ۲۰ الی ۳۰ درصد درشت‌دانهٔ بازیافتی تأثیری بر مقاومت فشاری بتن‌های ساخته شده نگذاشته است[۱۶]. لذا به‌کارگیری درشت‌دانه‌های بازیافتی در حد مقادیر زیر ۲۰٪ می‌تواند بدون تأثیر بر مقاومت، خواص رئولوژیک را نیز از جهت بالا بردن لزجت خمیری بتن‌های خودتراکم بهبود بخشد.اما نکته اساسی در دستیابی طرح a ، به خواص خودتراکمی، تأثیر متقابل کاهش

شکل۳- آزمایش جعبهٔ L، طرح d

لزجت به علت کاهش سیمان در دسترس سنگ‌دانه‌ها و افزایش لزجت به سبب جذب آب بالای سنگ‌دانه‌های بازیافتی و نیز بیش‌تر شدن اصطکاک داخلی سنگ‌دانه‌ها می‌باشد. لذا در صورت به‌کارگیری مقادیر مناسب مصالح پودری، تقابل این دو عامل می‌تواند به کسب نتایج مثبت در خواص رئولوژیک بتن‌های خودتراکم منجر گردد.

٤. نتیجه‌گیری:

براساس بررسی‌های صورت پذیرفته در این پژوهش، می‌توان به نتایج زیر به عنوان دستاوردهای پژوهش اشاره نمود:

- امکان جایگزینی مصالح بازیافتی به جای بخشی از سنگ‌دانه‌ها با در نظر گرفتن خصوصیات خودتراکمی میسر بوده و نیاز به تغییراتی در طرح مخلوط می‌باشد.
- با توجه به افزایش سطح مخصوص در مصالح بازیافتی و به تبع آن بالاتر رفتن میزان جذب آب آن‌ها، حجم خمیر سیمان مورد نیاز به جهت حصول کارایی مد نظر افزایش می‌یابد.
- با افزایش درصد سنگ‌دانه‌های بازیافتی احتمال رخداد پدیدهٔ انسداد افزایش یافته و این امر تأثیر قابل‌توجهی بر قابلیت عبور جریان خواهد گذاشت.
- در هنگام استفاده از مصالح بازیافتی کاهش لزجت به علت کاهش خمیر سیمان در دسترس سنگ‌دانه‌ها و افزایش لزجت به سبب بالا بودن میزان جذب آب درشت‌دانه‌های بازیافتی و افزایش اصطکاک داخلی سنگ‌دانه‌ها، عوامل تعیین کننده خواهند بود که در جهت بهبود رئولوژی باید مد نظر قرار گیرند. لذا باید تمهیدات خاصی جهت به‌کارگیری سنگ‌دانه‌های بازیافتی برای ساخت بتن خودتراکم درنظر گرفته شود.
- سرند کردن اولیه و ثانویه، عدم افزایش زمان اختلاط و به‌کارگیری سنگ‌دانه‌های بازیافتی در حالت اشباع با سطح خشک از جمله این تمهیدات خواهد بود. گرچه به هیچ وجه نمی‌توان از اثرات افزودنی‌های فوق‌روان کننده در بالا بردن کارایی مخلوط صرفنظر نمود. لذا در صورت کاربرد سنگ‌دانه‌های بازیافتی، قویاً بر به‌کارگیری افزودنی فوق‌روان‌کننده جهت بالاتر بردن کارایی مخلوط تأکید می‌گردد.

۵. تشکر و قدردانی:

نویسندگان این مقاله بر خود لازم می‌دانند از مدیرعامل محترم شرکت آتی‌ساز، مهندس مونسان، همچنین مدیریت روابط عمومی این شرکت، مهندس مجتهدی به علت کمک‌های فراوانشان در انجام این پروژه، تشکر و قدردانی نمایند. همچنین از

آقایان بهروز کرمی و علی شاه محمدی از کارشناسان مرکز تحقیقات این شرکت جهت همکاری در انجام این طرح نیز تشکر و قدردانی می گردد.

٦. منابع:

[1].Oikonomou, N.D. "Recycled Concrete Aggrega -tes", Cement & Concrete Composites. 27, 315-318, 2005.

[2]. Winter, M.G., and Henderson, C. "Estimates of The Quantities of Recycled Aggregates in Scotland," Engineering Geology. 70, 205-215, 2003.

[3]. Shima, H., Tateyashiki, H., Matsuhashi, R., and Yoshida, Y. "An Advanced Concrete Recycling Technology and Its Applicability Assessment Through Input-Output Analysis," Journal of advanced concrete technology. Vol.3, No.1, 53-67, 2005.

[4]. Nagatak, S., Gokce,. A., Saeki, T., and Hisada. M. "Assessment of Recycling Process Induced Damage Sensitivity of Recycled Concrete Aggregates," Cement and Concrete Research. 34, 965-971, 2004.

[۵]. ماجدی اردکانی، م.ح.، رئیس قاسمی، الف.م. و فیروزیار، ف.، مطالعات مقدماتی بازیافت آوارهای ساختمانی (ایستگاه آبعلی)، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، گزارش تحقیقاتی، شماره: گ-۴۵۹، ۳۹ صفحه، ۱۳۸۶.

[6]. Etxeberria و M., Vazquez, E., Mari and A., Barra,M. "Influence of Amount of Recycled Coarse Aggregates and Production Process on Properties of Recycled Aggregate Concrete", Cement & Concrete Research. 37, 735-742, 2007.

[7].Khatib. J.M. "Properties of Concrete Incorporating Fine Recycled Aggregate", Cement & Concrete Research. 35, 763-769, 2005.

[8].Larranaga, M.E., "Experimental Study On Microstructure and Structural Behaviour of Recycled Aggregate Concrete," Doctoral thesis, Catalunya PolytechnicUniversity, Barcelona, 2004.

[9]. Hosseini, P., A. Booshehrian, M. Delkash, S. Ghavami, and M.M. Khodavirdi Zanjani. "Use of Nano-SiO_2 To Improve Microstructure and Compressive Strength of Recycled Aggregate Concretes," Proceeding of 3rd International Symposium on Nanotechnology in Construction, May 31–June 2, Prague, Czech Republic. 215-221, 2009.

[10].Torrijos, M.C., Barragan, B.E., and Zerbino, R.L. "Physical-Mechanical Properties, and Mesostructure of Plain and Fiber Reinforced Self-Compacting Concrete," Construction and Building Materials. 22, 1780-1788, 2008.

[11]. EFNARC. Specification and Guidelines for Self-Compacting Concrete. London: EFNARC Publication. p. 1–32, 2002.

[12]. ACI Committee 555R-01, "Removal and Reuse of Hardened Concrete," Reported by ACI Committee 555, American Concrete Institute, 26 pp., 2001.

[13]. Khayat, K.H., Ghezal, A. and Hadriche, M.S. "Factorial Design Models for Proportioning Self Consolidating Concrete," Materials and Structures. 32, 679-686, 1999.

[14]. Waddell, J.J. and Dobrowolski, J.A., Concrete Construction Handbook, 3rd Edition. MaGraw-Hill, 2002.

[۱۵]. شکرچی‌زاده، محمد.، لیبر، نیکلاس علی.، ماهوتیان، مهرداد.، محبی، علیرضا. و بهرادی یکتا، سجاد.، «آزمایش‌های بتن خودتراکم و تفسیر نتایج به‌دست آمده در برآورد پایداری بتن تازه، اولین کارگاه تخصصی بتن خودتراکم»، تهران، ایران، اسفند ۱۳۸۵.

[16].Khatib, J.M. "Properties of Concrete Incorporating Fine Recycled Aggregate," Cement and Concrete Research, 35, 763-769, 2005.