تاثیر روش استفاده از کیک‌کربناته ضایعاتی برروی مقاومت‌فشاری و کششی بتن سبز

چکیده

حجم زیادی از ضایعات کارخانه‌های قند به‌صورت پسماند انباشت می‌شود. هدف تحقیق حاضر، بازیافت پسماند حجیم این کارخانجات، با نام کیک‌کربناته (گل کربنات‌کلسیم، آهک کربناته و لجن‌آهک)، که تولید آن معظل جدی این کارخانجات و محیط زیست است، به‌عنوان جایگزین بخشی از سیمان مورداستفاده در بتن می‌باشد. بدلیل اندازه ناهمگن ذرات و برای شباهت بیشتر اندازه دانه‌های آن با ذرات سیمان، کیک‌کربناته با سه‌روش حل‌شده در آب طرح اختلاط، الک‌شده وآسیاب‌شده در طرح‌های مختلف مورداستفاده قرار گرفت. نمونه های بتنی آزمایشگاهی با نسبت آب به سیمان ۰,۳۵ و با درصدهای مختلف جایگزینی کیک کربناته به جای سیمان برابر با ۵، ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ ساخته شده و در نهایت مقاومت فشاری نمونه های ۲۸ و ۵۶ روزه و مقاومت کششی نمونه های ۲۸ روزه سنجیده شد. نتایج نشان داد که بهترین روش استفاده از کیک‌کربناته در بتن، استفاده از کیک‌کربناته آسیاب‌شده می‌باشد و جایگزینی آن تا حداقل ۲۰ درصد وزنی سیمان با این روش، بدون کاهش چشمگیر مقاومت‌های فشاری و کششی در بتن امکان‌پذیر می‌باشد؛ به صورت کمی نتایج حاکی از آن است که مقاومت فشاری نمونه‌های ۲۸ و ۵۶ روزه و مقاومت کششی نمونه های ۲۸ روزه با ۲۰ درصد پودر ضایعاتی جایگزین سیمان نسبت به نمونه‌های شاهد بدون پودر در این روش، بترتیب حدود ۶,۵، ۱۰ و ۵,۴ درصد کاهش داشته‌اند. شایان ذکر است که بازیافت کیک‌کربناته سبب کاهش درپسماندهای صنعتی، هزینه حمل‌ونقل ضایعات، هزینهٔ دفن پسماندها و حذف بوی نامناسب و مواد آلی نیز می‌گردد. لذا استفاده از این بتن سبز در صنعت ساختمان توصیه می‌شود.

کلمات کلیدی: ضایعات کارخانه قند، بازیافت،کیک کربناته، مقاومت، بتن سبز

The effect of the method of using waste carbonate cake on the compressive and tensile strengths of green concrete

A large amount of waste from sugar factories is accumulated as waste. The purpose of this research is to recycle the waste of these factories, called carbonate cake (calcium carbonate mud, lime carbonate and lime sludge), which production is a serious problem for these factories and the environment, as a substitute for part of the cement used in concrete. Due to the heterogeneous size of the particles and for the greater similarity of the size of its grains with cement particles, carbonated cake with three methods:dissolved in water of mixing plan,sieved and milled, was used in different designs. Laboratory concrete samples were made with a water-cement ratio of 0.35 and with different percentages of replacing carbonate cake instead of cement equal to 5, 10, 20, 30 and 40, and finally, the compressive strength of the 28- and 56-day samples and the tensile strength of the 28-day samples was measured. The results showed that the best method of using carbonated cake in concrete is to use milled carbonated cake and it is possible to replace it up to at least 20% by weight of cement, without significantly reducing the compressive and tensile strengths in concrete. Quantitatively, the results indicate that the compressive strength of the 28-day and 56-

day samples and the tensile strength of the 28-day samples with 20% waste powder instead of cement have decreased by 6.5, 10, and 5.4%, respectively, compared to the control samples without powder. It is worth mentioning that the carbonate cake recycling causes reduction in industrial waste, waste transportation cost, waste disposal cost and removing inappropriate smell and organic materials. Therefore the use of this green concrete in the construction industry is recommended.

Key words: Sugar factory waste, recycling, carbonate cake, strength, green concrete

۱- مقدمه

با وجود پیشرفت علم و صنعتی شدن جوامع، تولید زباله‌های انبوه از صنایع یک نگرانی جدی است، زیرا بسیاری از این زباله‌ها شامل مواد شیمیایی مضر برای محیط زیست هستند. بازیافت و استفاده مجدد از ضایعات، علاوه بر صرفه‌جویی اقتصادی، فواید زیست‌محیطی نیز دارد. صنعت ساختمان به عنوان جایی مناسب برای پذیرش مواد بازیافتی شناخته شده است. استفاده از پوزولان‌ها (مواد بازیافتی) در بتن، به بهبود خواص آن کمک می‌کند و به دلیل کاهش هزینه‌ها و سازگاری با محیط زیست، اهمیت بیشتری یافته است. با این حال، تحقیق درباره استفاده از ضایعات قندی در صنعت ساخت و ساز کم است. این تحقیق در تلاش است تا با بررسی پتانسیل‌های کاربردی این ضایعات، بتنی سازگار با محیط زیست تولید کند و مشکلات ناشی از سیمان که خود آلاینده‌ای بزرگ است، کاهش دهد. استفاده از پوزولان‌های آلی در بتن به عنوان یکی از روش‌های مؤثر در بهبود خواص آن در سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته است. یکی از شیوه‌های افزودن این پوزولان‌ها به بتن، سوختن آن‌ها در کوره و سپس آسیاب کردن می‌باشد. پوزولان های طبیعی و مصنوعی به طور گسترده در مصالح ساختمانی مورد استفاده قرار می گیرند و نقش مهمی در به حداقل رساندن هزینه ها ایفا می کنند و در سال‌های اخیر به‌ویژه در دهه‌های اخیر به دلیل تمرکز بر سازگاری با محیط زیست و نیاز به مواد ساختمانی با خواص بهبود یافته، اهمیت بیشتری پیدا کرده‌اند [۱،۲]. تأثیر ضایعات پوزولانی بر خواص مکانیکی، دوام و ریزساختار ملات سیمانی تحت تأثیر استفاده از مواد زائد بازیافتی در ملات‌های سیمانی نیر مورد ارزیابی قرار گرفته است[۳،۴]. اما متاسفانه در زمینه بازیافت پسماندهای کارخانجات قندی و امکان استفاده گسترده از این مواد ضایعاتی در صنعت ساخت و ساز پژوهش چشمگیری تا کنون دیده نشده است.

تحقیق حاضر با پر کردن شکاف تحقیقاتی بین این طلای آهکی و مصالح ساختمانی و شکوفا شدن پتانسیل‌های کاربردی ضایعات قندی به‌ویژه کیک کربناته (شکل ۱)، سعی درتولید بتن سبز سازگار با محیط زیست

را دارد. یکی از بهترین جایگاه‌ها، استفاده از این مواد به‌جای سیمان است؛ زیرا خود سیمان یک آلاینده بزرگ برای محیط‌زیست می‌باشد و درنتیجه ارزش بازیافت چند برابر می‌شود.

شکل ۱.کیک کربناته ضایعات کارخانجات قند

در طول فرآیند تولید و بهره برداری کارخانجات قند مقدار زیادی ضایعات از جمله تفاله، ملاس و کیک کربناته تولید می‌شود که از این پسماند می‌توان به عنوان مواد اولیه برای تولید محصولات دیگر با ارزش بالا استفاده کرد. به تازگی پژوهش هایی به چگونگی استفاده از ملاس در تهیه سیمان، ملات و بتن پرداخته است [۵-۷] و پژوهش های دیگری نیز بر روی استفاده مجدد از تفاله در صنایع دیگر [۸-۱۲] و مخصوصا صنایع غذایی [۱۳-۱۵] متمرکز شده است.

پسماند آهک کربناته یکی از محصولات زائد کارخانجات قند است که به طور معمول در حجم وسیع انباشت می‌شود و به ندرت مورد استفاده قرار می‌گیرد(شکل۲). بررسی‌ها نشان می‌دهد که در ایام اوج کاری، روزانه حداقل ۸۰ تن کیک کربناته تولید می‌شود که انباشت آن باعث آلودگی محیط زیست و مشکلات جدی برای دفع در کارخانجات قند شده است. این وضعیت حتی منجر به تعطیلی برخی کارخانه‌ها و ثبت نام آن‌ها در لیست سیاه سازمان محیط زیست ایران شده است. برای فرار از این مشکل، برخی کارخانه‌ها اقدام به دفن یا انتقال این مواد به مناطق دیگر کرده‌اند که این کار آسیب‌های جدی به محیط زیست و جانوران وارد می‌کند. همچنین، پسماندهای خشک شده به صورت پودری ریز در محیط پراکنده می‌شوند و وجود مزارع چغندر قند در کنار این کارخانه‌ها، باعث مسدود شدن منافذ خاک و اختلال در رشد گیاهان می‌شود.با انجام این پژوهش پیش‌بینی می‌شود با ورود کیک کربناته به صنعت ساخت‌وساز بتوان حجم عظیمی از این ضایعات را مصرف و بازیافت کرد و مشکل انباشت این پسماند را که برای محیط اطرافشان مشکل ساز شده تا اندازه ای مرتفع کرده و موجبات سودآوری را برای هر دو

صنعت فراهم نمود. از طرف دیگر استفاده از هر ماده دورریز در بتن مستلزم شناخت کافی و تخصصی در مورد آن است. اطمینان از دوام و ایمنی ضایعات مصرفی در بتن، نیاز به مطالعه همه‌جانبه دارد و استفاده از پژوهش‌های گذشته به این امرسرعت می‌بخشد.

شکل ۲. انباشت کیک کربناته، ضایعات کارخانه قند در حیاط و محوطه بیرونی کارخانجات

اگرچه کربنات کلسیم رسوب کرده در کارخانجات قند، به خاطر جذب ناخالصی های ناشی از آلودگی های غیرقندی در طول فرایند تصفیه شکر، با کربنات کلسیم اصلی متفاوت است، اما از آنجایی که این ضایعات منشاء آهکی دارند، بررسی نتایج پژوهش هایی که در آنها کربنات کلسیم جایگزین سیمان در تولید بتن شده، می تواند سودمند باشد [۱۶-۲۱]. اخیرا پژوهش هایی بر روی تاثیر استفاده از پسماند آهک کربناته به عنوان تثبیت کننده خاک [۲۲]، کامپوزیت های اپوکسی [۲۳]، بر روی پارامترهای مختلف ژئوپلیمرها [۲۴،۲۵]، بتن های پلیمری [۲۶]، سیمان [۲۷]، به عنوان سنگدانه در ساخت بتن [۲۸،۲۹] و به عنوان جایگزین سیمان در ساخت بتن [۳۰،۳۱] انجام شده است. غریب و راشد [۳۰] و نیز فویال و همکاران [۳۱] جز معدود کسانی هستند که تاکنون استفاده مجدد از پسماند آهک کربناته را در تولید بتن بررسی کرده اند. غریب و راشد با انجام آزمایش های آزمایشگاهی، تاثیر جایگزینی این پسماند به جای ۵ تا ۲۵ درصد وزنی سیمان بر روی مقاومت فشاری، وزن مخصوص، جذب آب و تخلخل بتن را بررسی کردند. نتایج آنها نشان داد بهترین مقاومت فشاری بتن مربوط به نسبت جایگزینی ۵ درصد می باشد و جایگزینی مقادیر بیشتر پسماند آهک کربناته باعث کاهش مقاومت فشاری بتن می شود. فویال و همکاران با جایگزین کردن ۰ تا ۱۰۰ درصد سیمان با پسماند آهک کربناته و بررسی مقاومت های فشاری، کششی و خمشی بیان کردند که افزایش درصد جایگزینی باعث کاهش مقاومت بتن می گردد.

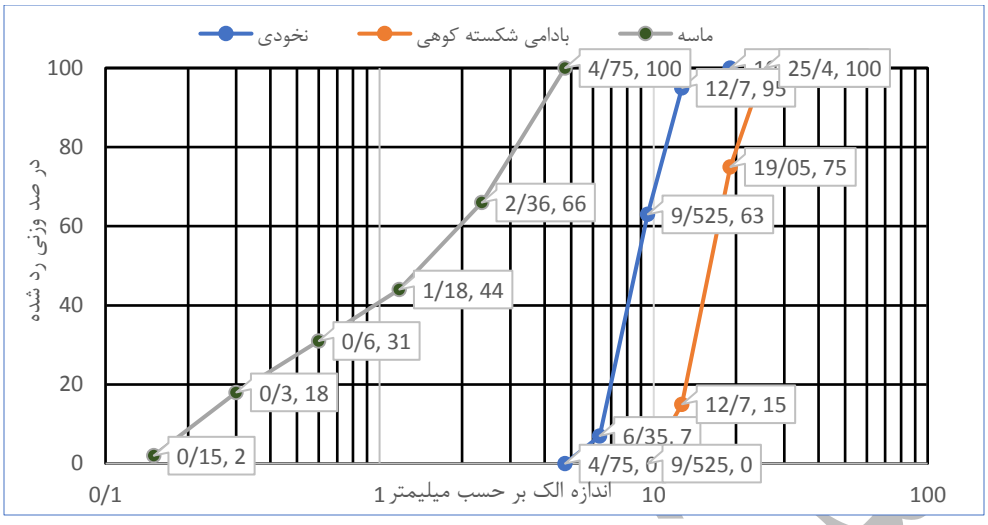
هر چند از بررسی پژوهش های پیشین و تلاش محققین این نکته بر میاید که استفاده از کیک کربناته ضایعاتی می‌تواند جایگزین درصدی از سیمان مورد استفاده در بتن باشد، ولی در این پژوهش ها به نحوه استفاده از کیک

کربناته در طرح اختلاط بتن و به بیان دیگر تعیین بهترین روش استفاده از آن اشاره ای نشده است. لذا در این مقاله، تلاش شده است ضمن بررسی سه روش متفاوت استفاده از کیک کربناته در ساخت بتن شامل حل کردن در آب طرح اختلاط، الک کردن وآسیاب کردن بهترین روش استفاده معرفی گردد. طبق بررسی های میدانی، در شهر اصفهان هم اکنون سه کارخانه قند فعال و بزرگ می باشد. برای شناخت ماهیت ذرات تشکیل دهنده پسماندها در ابتدای کار، آزمایش‌هایی مانندXRF و ICP انجام شد. در آزمایشگاه طرح اختلاط با نسبت آب به سیمان ۰,۳۵ تهیه شده و نمونه بتنی با درصدهای جایگزینی کیک کربناته به جای سیمان برابر با ۵، ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ ساخته شده و در نهایت مقاومت فشاری نمونه های ۲۸ و ۵۶ روزه برای هر سه روش حل کردن در آب طرح اختلاط، الک کردن وآسیاب کردن مورد ارزیابی قرار گرفت. به منظور تعیین مقاومت کششی نمونه ها، آزمایش تست برزیلی بر روی نمونه¬های ساخته شده تنها با روش آسیاب شده با درصدهای مختلف جایگزینی پسماند آهک کربناته انجام و مقاومت کششی ۲۸ روزه نمونه ها اندازه گیری شد.

۲- مواد و روش ها

۲-۱- مصالح مصرفی

در بازیافت و بهره‌وری مجدد ضایعات، شاخصه های مختلفی می تواند مورد هدف گذاری و مطالعه قرار گیرد. لذا پیش از هر چیز ابتدا به معرفی مصالح مورد استفاده در پژوهش و ویژگی های آنها پرداخته می شود.دانه بندی شن و ماسه مصرفی در طرح ها مطابق با استاندارد ملی به شماره ۳۰۲ [۳۲] ارزیابی شده (شکل ۳) و سنگ دانه ها در سایزهای نخودی (معدن مجتمع نور)، بادامی شکسته کوهی (معدن پایا سنگ) و ماسه (معدن مجتمع نور)، از شهر اصفهان تهیه شد. همچنین از آب شرب مصرفی با مشخصات جدول ۱ در آزمایشگاه استفاده گردید و حداکثر نسبت آب به سیمان در طرح ها به میزان ۰,۳۵ در نظر گرفته شد. در این تحقیق از سیمان پرتلند نوع ۲ تولیدی کارخانه سیمان اردستان واقع در شهر اصفهان با مشخصات جدول ۲ استفاده شده است. این نوع سیمان برای مصارف عمومی استفاده می‌شود و در زمان گیرش حرارت هیدراتاسیون متوسطی تولید می‌کند. از کیک کربناته تولید شده در کارخانه نقش جهان اصفهان به عنوان جایگزین سیمان در تولید بتن استفاده شده و نتایج آزمایش های ICP و XRF برای شناخت ماهیت آن کیک کربناته به ترتیب در جداول ۳ و ۴ آورده شده است.



شکل ۳. دانه بندی مصالح، نخودی، بادامی شکسته کوهی و ماسه

نتایج آنالیز ICP انجام شده بر روی کیک کربناته مندرج درجدول ۳ نشان می‌دهد بیش از ۱۰ درصد ذرات کیک کربناته از کلسیم و بعد از آن بیشترین فراوانی مربوط به عناصری چون منیزیم، آهن، آلومینیوم، سدیم، فسفر، گوگرد، مقدار اندکی روی و...می‌باشد.

جدول ۱.استاندارد آب آشامیدنی

ویژگی	واحد اندازه گیری	حداکثر مطلوب	حداکثر مجاز
بو	TON	حداکثر ۱۲ واحد در ۱۲ درجه سلسیوس و حداکثر ۳ واحد در ۲۵ درجه سلسیوس	–
رنگ	TCU	–	۱۵
PH	-	۶,۵–۸,۵	۶,۵–۹
سختی	ppm	۲۰۰	۵۰۰
TDS	ppm	۱۰۰۰	۱۵۰۰
کدورت	NTU	≤ ۱	۵

جدول ۲. مشخصات شیمیایی سیمان پرتلند نوع ۲

l.O.I	CaO	Al_2O_3	SiO_2	Cl	Na_2O	MgO	Fe_2O_3	SO_3	C_3A	K_2O	IR
۰,۷	۶۰,۴	۵	۱۹	۰,۰۱۹	۰,۲۵	۱,۹	۳,۸۲	۱,۵	۶,۵	۰,۴۹	۰,۴۶

جدول ۳. نتایج آزمایش ICP کیک کربناته ضایعات قند

Sample (کیک کربناته)	Element	Ag	Al	As	Be	Ca	Co	Cr
	DL	0.1	100	0.1	0.2	100	1	1
	Unit: ppm	<0.1	470	2.1	<0.2	>10%	<1	16
Sample (کیک کربناته)	Element	Cu	Fe	Mg	Mn	Mo	Na	P
	DL	1	100	100	5	0.1	100	10
	Unit: ppm	11	1039	3684	44	<0.1	295	191
Sample (کیک کربناته)	Element	S	Sr	Ti	V	Zn	Zr	
	DL	50	1	10	1	1	5	
	Unit: ppm	3938	288	56	9	25	<5	

جدول۴. نتایج آنالیز XRF کیک کربناته ضایعات کارخانه قند

Sample (کیک کربناته)	Element	SiO_2	Al_2O_3	BaO	CaO	Cr_2O_3	Fe_2O_3	K_2O
	DL	۰,۰۵	۰,۰۵	۰,۰۵	۰,۰۵	۰,۵	۰,۰۵	۰,۰۵
	unit%	۰,۲۰	۰,۰۵	۰,۰۵>	۵۵,۰۰	<۰,۵	۰,۰۵>	۰,۰۵>

Sample (کیک کربناته)	Element	MgO	Mno	Na_2O	P_2O_5	SO_2	TiO_2	LOI
	DL	۰,۰۵	۰,۰۵	۰,۰۵	۰,۰۵	۰,۰۵	۰,۰۵	۰,۰۵
	unit%	۰,۷۲	۰,۰۵>	۰,۰۵>	۰,۰۵>	۰,۸۱	۰,۰۵>	۴۳,۲۲

طبق نتایج آنالیز XRF مندرج در جدول ۴، بیشترین فراوانی ذرات تشکیل‌دهنده کیک کربناته مربوط به آهک (CaO) و LOI (مواد فرار) که معمولا شامل آب ترکیبی، هیدرات‌ها و ترکیبات حساس به هیدروکسی و دی‌اکسیدکربن که ازکربنات‌ها خارج می‌شوند، می باشد.

۲-۲- طرح اختلاط:

طرح اختلاط بتن، روند تعیین نسبت اجزاء بتن است، به‌نحوی‌که بتن تاحدامکان مقرون‌به‌صرفه شود و الزامات موردنیاز شامل خواص فیزیکی، مکانیکی و دوام را برآورده نماید. در این پژوهش از روش ملی طرح مخلوط بتن (ویرایش سوم) [۳۳] برای طرح اختلاط بتن استفاده شد. مشخصات مصالح در جدول ۵ و طرح اختلاط نمونه ها در

جدول ۶ آمده است. در جدول ۶، PC، CK، Fine agg. و Coarse agg. به ترتیب بیانگر سیمان پرتلند، کیک کربناته، شن نخوری و شن بادامی می‌باشند.

جدول ۵. مشخصات مصالح استفاده شده در بتن در این پژوهش

نوع	چگالی	درصد رطوبت	درصد جذب آب
سیمان	۳,۱۵		-
ماسه	۲,۶	۳	۳,۱
نخودی	۲,۶	۰	۲
بادامی	۲,۶	۰	۱,۶

جدول ۶: جزئیات طرح اختلاط بتن با درصدهای متفاوت کیک کربناته (کیلوگرم در یک مترمکعب بتن)

Mix code	PC	CK	Water	Sand	Fine agg.	Coarse agg.
CK0	400	0	152.4	1075	400	250
CK5	380	20				
CK10	360	40				
CK20	320	80				
CK30	280	120				
CK40	240	160				

۲-۳- کیک کربناته در طرح اختلاط بتن

پس از بررسی پژوهش‌های گذشته در زمینه بازیافت کیک کربناته، مشاهده شد در تحقیقات گذشته از کیک کربناته با ظاهر و شکل دست نخورده آن استفاده شده است. این در حالی است که دانه بندی این ماده با سیمان متفاوت است و بافت متفاوتی ازسیمان دارد. بررسی‌های میدانی از پودر کربنات کلسیم ضایعاتی سه کارخانه قند بزرگ موجود در شهر اصفهان (کارخانه قند نقش‌جهان، کارخانه قند اصفهان وکارخانه قند نور سپاهان) نشان داد اندازهٔ اولیه

پودر ضایعاتی بعضا به‌صورت کلوخه‌های با سایزهای بادامی به بالا (شکل ۴) می‌باشد که گاهی بر اثر فشار در هنگام انباشت، متراکم و فشرده شدند و گاها با فشار دست به راحتی خورد می‌شوند.

شکل ۴. دانه‌بندی و ابعاد ذرات کیک کربناته انباشت شده

باتوجه‌به شکل ظاهری کیک کربناته ضایعاتی که مخلوطی از پودر و کلوخه‌های ریزودرشت می‌باشد برای استفاده در طرح به‌عنوان جایگزین سیمان باید اندازه ذرات یک‌دست و ریزتر ودانه بندی آنها یکنواخت‌تر شود. بدین منظور سه روش متفاوت استفاده از کیک کربناته در ساخت بتن شامل حل کردن در آب طرح اختلاط، الک کردن وآسیاب کردن مورد استفاده قرار گرفت و نمونه‌های بتنی با درصدهای جایگزینی مختلف پسماند آهک کربناته به جای سیمان (۰، ۵، ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درصد) تهیه و پارامترهای مختلف دوام و مقاومت، مورد ارزیابی قرارگرفت.

۲-۳-۱- روش حل‌کردن:

در طرح اختلاط با روش حل کردن آهک کربناته تصمیم بر آن شد که پودر آهک کربناته در آب اندازه‌گیری شده طرح اختلاط حل شود. حل کردن این پور در آب به دو روش دستی و مکانیکی انجام شد (شکل ۵). در روش دستی، آب اندازه گیری شده در طرح را در ظرف ریخته سپس کیک کربناته ضایعاتی کاملا دست نخورده بدون هیچ تغییر شکلی به آن اضافه شده و با یک میله به صورت دستی حداقل به مدت نیم ساعت هم زده شد. مشاهدات عینی حاکی از آن بود که تمام مواد به صورت یکدست حل نمی‌شوند و مقداری از آن به صورت کلوخ‌هایی با سایز بادامی همراه با مقداری ناخالصی از بقایای چغندر قند ته ظرف باقی می‌ماند. تمام محلول به مخلوط بتن در میکسر اضافه شد. در روش مکانیکی، از یک همزن برقی برای هم زدن پودر ضایعاتی کربنات کلسیم و آب طرح اختلاط استفاده شد و در هر مرحله حداقل نیم ساعت برای حل کردن پودر از همزن برقی استفاده شد.در این روش محلول یک‌دست و همگن‌تر از طرح قبلی شد و کف ظرف مقدار خیلی کمتر از روش قبلی، کلوخه‌هایی با سایز نخودی وجود داشت.

شکل ۵. حل کردن کیک کربناته در آب طرح اختلاط به دو روش دستی و همزن برقی و افزودن به مخلوط

۲-۳-۲- روش الک کردن

در این روش برای الک کردن پودر ضایعاتی کیک کربناته از الک شماره ۳۰ استفاده شد و به علت عبور خیلی اندک پودر از آن، امکان عبور از الک ریزتر وجود نداشت. الک کردن کیک کربناته بسیار وقت‌گیر می‌باشد و به‌سختی انجام می‌شود. ضمن اینکه موادی که روی الک باقی می‌ماند عمدتا کلوخ‌های آهکی بوده که با سرند کردن از پودر ضایعاتی جدا می‌شوند و عملا مخلوط الک شده با نمونه اولیه تفاوت داشته و درصد آهک آن کاهش می‌یابد.

۲-۳-۳- روش آسیاب‌کردن

در این روش، کیک کربناته ضایعاتی حاصله از کارخانه قند با استفاده از دستگاه آسیاب صنعتی (شکل ۶) خورد و اندازه ذرات آن یکدست‌تر و ریزتر گردید. آسیاب کردن پسماند آهک کربناته با دمای محیط و با یک مرتبه عبور از دستگاه انجام شده و تنظیمات سرعت و قدرت دستگاه تا رسیدن به سایز ذرات در حدود ۱۰۰ میکرون انجام شد.

شکل ۶. دستگاه آسیاب صنعتی

۳- آزمایش های انجام شده

۳-۱- آزمایش مقاومت فشاری

آزمایش های مقاومت فشاری در این پژوهش با استفاده از استاندارد ACI318-14 [۳۴] انجام پذیرفت. برای ساخت نمونه ها از قالب های استوانه ای با قطر ۱۰۰ میلی متر و ارتفاع ۲۰۰ میلی متر استفاده شد. همچنین نمونه شاهد بدون اضافه‌کردن پودر کربنات کلسیم ضایعاتی آماده شد و نمونه‌های بعدی با اضافه‌کردن پودر با درصد های ۵، ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ به جای سیمان ساخته شد. نمونه ها در حوضچه آب عمل آوری قرار داده شدند و در زمان‌های مشخص مقاومت فشاری آنها از تقسیم نیروی شکست قرائت شده از دستگاه جک فشاری کالیبره شده (شکل ۷). مقاومت فشاری بتن سخت‌شده ۲۸ و ۵۶ روزه، اندازه‌گیری شد و ثبت گردید.

شکل ۷. آزمون مقاومت فشاری نمونه‌ها توسط جک

۳-۲- آزمایش مقاومت کششی

به منظور تعیین مقاومت کششی نمونه ها، آزمایش تست برزیلی با استاندارد ASTM C496-96 [۳۵] انجام شد. طریقه انجام آن به این صورت است که نمونه به صورت افقی بین دو صفحه دستگاه قرار گرفته و نیروی شکست به صورت عمودی به قطر نمونه‌ها وارد می‌شود و نمونه‌ها به دو نیم تقسیم می‌شوند. (شکل ۸). نمونه‌های استوانه‌ای به ابعاد ۲۰۰ * ۱۰۰ میلی‌متر با درصدهای مختلف جایگزینی پسماند آهک کربناته ساخته شد وپس از انجام این تست، نتایج آن مورد ارزیابی قرار گرفت. برای محاسبه مقدار مقاومت کششی σ_t باید از رابطه زیر استفاده شود:

$$\sigma_t = \frac{2 \times P}{\pi \times d \times t} \qquad (۱)$$

P: بار در لحظه شکست (نیوتن)

d: قطر نمونه (میلی متر)

t: ضخامت نمونه آزمایش در مرکز آن (میلی متر)

شکل ۸ آزمایش مقاومت کششی (تست برزیلی)

۴- نتایج و بحث

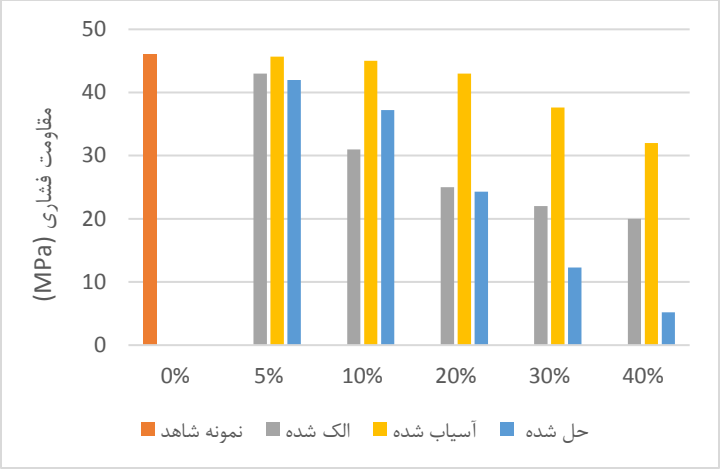
۴-۱- نتایج مقاومت فشاری

پودر آهک کربناته ضایعاتی کارخانجات قند، به سه روش در بتن سبز جایگزین سیمان گشت و نتایج مقاومت فشاری مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفت (نمودار شکل‌های ۹ و ۱۰). نتایج حاکی از آن است که روش حل کردن آهک کربناته در آب طرح اختلاط، کمترین میزان مقاومت فشاری را به همراه دارد. به عنوان مثال نتایج نشان می‌دهند که مقاومت فشاری نمونه‌های ۲۸ و ۵۶ روزه با ۲۰ درصد پودر ضایعاتی جایگزین سیمان نسبت به نمونه‌های شاهد بدون پودر، به ترتیب حدود۴۷ و ۴۹ درصد کاهش یافته است. در این روش نرخ کاهش مقاومت نمونه های حاوی بیش از ۲۰ درصد کیک کربناته، بسرعت افزایش یافت، بطوریکه مقاومت فشاری نمونه‌های ۵۶ روزه با ۳۰ و ۴۰ درصد پودر ضایعاتی، نسبت به نمونه‌های شاهد، به‌ترتیب حدود ۷۰ و ۹۰ درصدکاهش داشت. در طرح اختلاط با روش حل کردن، آب توسط پودر آهک کربناته جذب شده و برای مخلوط کردن و روان کردن اجزای دیگر مثل سیمان و سنگدانه، رطوبت کافی در اختیار نبود. دلیل دیگر این کاهش قابل ملاحظه مقاومت فشاری را می توان واکنش‌های شیمیایی ایجاد شده بین آب و کیک کربناته دانست. باتوجه‌به خاصیت آهکی بالای کیک کربناته، با حل شدن در آب طرح اختلاط، مواد آهکی شکفته شده و این امر باعث کاهش بیشتر مقاومت بتن می گردد.

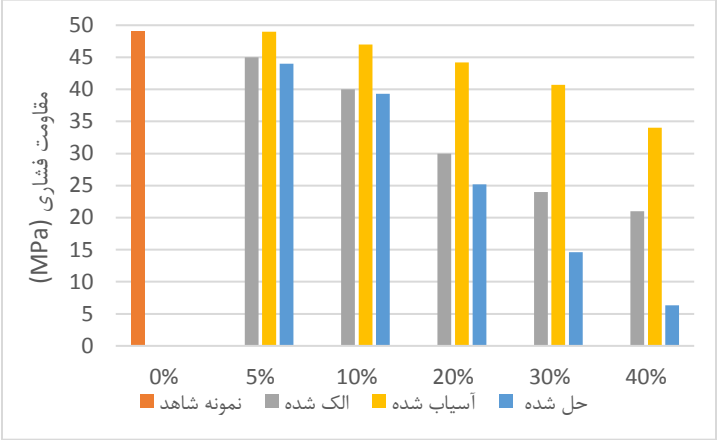
نتایج بدست آمده از بتن تولید شده با کیک کربناته به روش الک کردن نشان دهنده کاهش مقاومت فشاری نمونه‌های ۲۸ و ۵۶ روزه با ۲۰ درصد پودر ضایعاتی جایگزین سیمان نسبت به نمونه‌های شاهد بدون پودر بترتیب حدود ۴۵ و ۳۸ درصد می‌باشند. در این روش نرخ کاهش نمونه های بیش از ۲۰ درصد کیک کربناته، نسبت به روش حل کردن وضعیت بهتری دارند؛ بطوریکه مقاومت فشاری نمونه‌های با ۳۰ و ۴۰ درصد پودر ضایعاتی ۵۶ روزه، نسبت به

نمونه‌های شاهد، در این روش بترتیب حدود ۵۰ و ۶۰ درصدکاهش داشت. در روش الک کردن، از نظر شکل ظاهری و آب انداختگی بتن درهنگام ساخت، تفاوت چشمگیری بین مخلوط‌ها به وجود آمد. در این روش موادی که روی الک باقی می‌ماند، عمدتا کلوخ‌های آهکی بوده که بواسطه الک، از پودر ضایعاتی جدا می‌گردند. این امر سبب تفاوت مخلوط با نمونه اولیه و کاهش درصد آهک آن و در نتیجه کاهش مقاومت بتن می‌گردد.

گرچه نتایج حاصله از مقاومت فشاری نمونه‌ها، در هر سه روش حاکی از کاهش مقاومت فشاری نمونه‌ها با افزایش کیک کربناته به مخلوط بتن بود، نتایج نشان داد استفاده از کیک کربناته به روش آسیاب کردن، بهترین روش استفاده از کیک کربناته در بتن می باشد، چرا که خاصیت آهکی مواد حفظ شده و بهترین واکنش شیمیایی را در تشکیل بتن هنگام ترکیب با آب و سایر مصالح از خود نشان داده است. نتایج آزمایش های فشاری ارائه شده در شکل های ۹ و ۱۰ نشان می‌دهند که در روش آسیاب کردن، مقاومت فشاری نمونه‌های ۲۸ و ۵۶ روزه با ۲۰ درصد پودر ضایعاتی جایگزین سیمان نسبت به نمونه‌های شاهد بدون پودر، بترتیب حدود ۶,۵ و ۱۰درصد کاهش داشته است، که این امر نشان می دهد که در روش آسیاب کردن جایگزینی کیک کربناته تا حداقل ۲۰ درصد وزنی سیمان، بدون کاهش چشمگیر مقاومت بتن می باشد و این نتیجه قابل قبولی می باشد. مقاومت فشاری نمونه‌های با ۳۰ و ۴۰ درصد پودر ضایعاتی در این روش، نسبت به نمونه‌های شاهد، بترتیب حدود ۱۷ و ۳۰ درصدکاهش داشت که نسبت به دو روش قبل تفاوت چشمگیری را نشان می‌دهد. درکار مشابهی که پیش از این توسط غریب و راشد [۲۵] انجام شد، مقاومت فشاری نمونه‌های با ۱۰ درصد پودر ضایعاتی ۲۸ روزه، نسبت به نمونه‌های شاهد، حدود ۶ درصدکاهش داشت که این میزان در نمونه با ۱۰ درصد پودر ضایعاتی ۲۸ روزه به روش آسیاب کردن در این تحقیق، حدود ۲ درصد می‌باشد و از تقارب قابل قبولی برخوردار است. همچنین در این روش مقاومت فشاری نمونه‌های با ۵ و ۱۰درصد پودر ضایعاتی ۵۶ روزه، نسبت به نمونه‌های شاهد، بترتیب صفر و حدود ۴ درصدکاهش داشت که این نتایج می‌تواند ارزشمند و حائز اهمیت باشد.



شکل ۹. مقاومت فشاری ۲۸روزه نمونه های بتنی با درصدهای متفاوت کیک کربناته



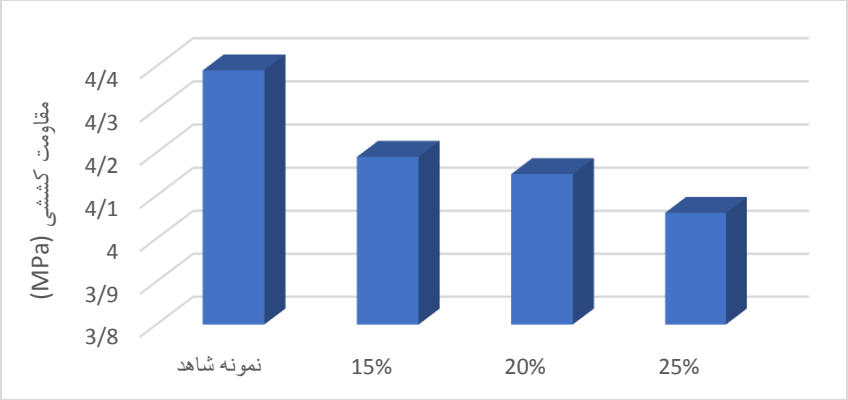
شکل ۱۰. مقاومت فشاری ۵۶ روزه نمونه های بتنی با درصدهای متفاوت کیک کربناته

۴-۳- نتایج مقاوت کششی

با توجه به اینکه در مرحله قبل، روش آسیاب شده بهترین روش برای اضافه کردن پودر کیک کربناته به بتن تشخیص داده شد، برای تعیین مقاومت کششی بتن، پودر کیک کربناته تنها با روش آسیاب شده به بتن اضافه شد. نتایج نمونه هایی که تحت آزمایش کشش برزیلی قرار گرفتند، در جدول ۷ و نمودار شکل ۱۱ آورده شده است و نشان می‌دهد که جایگزینی پسماند آهک کربناته با مقداری از سیمان کاهش چشم‌گیری در مقاومت کششی بتن معمولی ندارد. می‌توان نتیجه گرفت که مقاومت کششی نمونه‌های بتنی با افزایش پودر پسماند آهک کربناته نسبت به نمونه شاهد کاهش یافت اما این کاهش تا جایگزینی ۲۰ درصد وزنی از کیک کربناته نسبت به بخش استحکام دهنده‌ی بتن چشم‌گیر نیست.

جدول ۷. نتایج مقاومت کششی

نام نمونه	بارکششی P (گسیختگی) (N)	مقاومت کششی برزیلی (MPa)	درصد کاهش
نمونه شاهد	۱۳۸۰۰۰	۴,۳۹	–
نمونه حاوی ۱۵ درصد کیک کربناته	۱۳۱۵۰۰	۴,۱۹	۴,۵
نمونه حاوی ۲۰ درصد کیک کربناته	۱۳۰۳۵۰	۴,۱۵	۵,۴
نمونه حاوی ۲۵ درصد کیک کربناته	۱۲۷۵۰۰	۴,۰۶	۷,۵



شکل ۱۱. نمودار مقاومت کششی بر حسب درصد های مختلف کیک کربنات کلسیم

خلاصه

در این تحقیق برای تعیین بهترین روش اضافه کردن کیک کربناته به بتن، کیک کربناته با سه روش متفاوت شامل حل کردن در آب طرح اختلاط، الک کردن وآسیاب کردن مورد استفاده قرار گرفت. پس از انجام آزمایش‌های آزمایشگاهی تعیین مقاومت های فشاری و کششی با درصدهای مختلف کیک کربناته نتایج ذیل حاصل شد:

- بدترین نتایج مربوط به نمونه های بتنی ساخته شده با کیک کربناته حل شده در آب می‌باشد. نتایج حاصله از مقاومت فشاری نمونه‌های ساخته شده با این روش حاکی از کاهش چشمگیر مقاومت فشاری نمونه‌ها با افزایش کیک کربناته به مخلوط بتن را دارد. به عنوان مثال نتایج نشان می‌دهند که مقاومت فشاری نمونه‌های ۲۸ و ۵۶ روزه با ۲۰ درصد پودر ضایعاتی اضافه شده با این روش نسبت به نمونه‌های شاهد بدون پودر، به ترتیب حدود ۴۷ و ۴۹ درصد کاهش یافته است.

- بهترین روش استفاده از کیک کربناته در بتن، استفاده از کیک کربناته آسیاب شده است و جایگزینی آن تا حداقل ۲۰ درصد وزنی سیمان، بدون کاهش چشمگیر مقاومت بتن امکان پذیر می‌باشد. به عنوان مثال در روش آسیاب شده، مقاومت فشاری نمونه‌های ۲۸ و ۵۶ روزه با ۲۰ درصد پودر ضایعاتی جایگزین سیمان نسبت به نمونه‌های شاهد بدون پودر، بترتیب حدود ۶,۵ و ۱۰درصد کاهش داشته است.
- مقاومت کششی نمونه‌های بتنی با افزایش پودر کیک کربناته نسبت به نمونه شاهد کاهش یافت اما این کاهش تا جایگزینی ۲۰ درصد وزنی کیک کربناته نسبت به بخش استحکام دهنده‌ی بتن چشم‌گیر نیست. به عنوان مثال مقاومت کششی نمونه های ۲۸ روزه با ۲۰ درصد پودر ضایعاتی جایگزین سیمان نسبت به نمونه‌های شاهد بدون پودر حدود ۵,۴ درصد کاهش داشته است.
- به نظر می‌رسد استفاده از کیک کربناته به دلیل خاصیت آهکی خود در مصالح دیگر ساختمانی نیز کاربرد داشته باشد و از این منظر قابل‌پیگیری است.

تقدیر و تشکر

نهایت تشکر و قدردانی به شرکت بنیاد بتن اصفهان بویژه مدیریت محترم شرکت،آقای دکترحاج رسولیها وآقای مهندس صادقی، همچنین کارشناسان و پرسنل آزمایشگاه بنیاد بتن بویژه آقایان مهندس سخنور،کوچک نژاد و محمدی و شرکت قند نقش جهان بویژه آقای دکتر دژبخش و آقای دکتر خیام و دیگر بزرگواران دست اندرکار تقدیم می‌گردد.

واژه نامه

Green Concrete	بتن سبز	Fine agg.	ریزدانه (ماسه)
CK	کیک کربناته	Environmental Impact	تأثیرات زیست‌محیطی -
PC	سیمان پرتلند	Recycling	بازیافت
Coarse agg	درشت دانه (شن)	Sugar factory waste	ضایعات کارخانه قند

فهرست منابع

1. J. A. Becerra-Duitama, D. Rojas-Avellaneda, "Pozzolans: A review, " *Engineering and Applied Science Research*, 49(4), 495-504, (2022).

2. C. B. Sisman, E. Gezer, "Performance characteristics of concrete containing natural and artificial pozzolans." *J Food Agr Env* 9, no. 2, 132-136, (2011):.

3. G. Pachideh, M. Gholhaki, H. Ketabdari, "Effect of pozzolanic wastes on mechanical properties, durability and microstructure of the cementitious mortars." *Journal of Building Engineering*, 29, 101178, (2020).

4. M. Gholhaki, M. Sharbatdar, G. Pachideh, "An experimental investigation into the mechanical performance and microstructure of cementitious mortars containing recycled waste materials subjected to various environments." *Journal of Building Engineering*, 61, 105275, (2022).

5. G. Huang, D. Pudasainee, R. Gupta, W. V. Liu, "Utilization and performance evaluation of molasses as a retarder and plasticizer for calcium sulfoaluminate cement-based mortar." *Construction and Building Materials*, 243, 118201, (2020).

6. X. Gao, Y. Yang, H. Deng, "Utilization of beet molasses as a grinding aid in blended cements." *Construction and Building Materials*, 25, no. 9, 3782-3789, (2011).

7. B. Ali, L. A. Qureshi, "Durability of recycled aggregate concrete modified with sugarcane molasses." *Construction and Building Materials*, 229, 116913, (2019).

8. P. Puligundla, C. Mok, "Valorization of sugar beet pulp through biotechnological approaches: recent developments." *Biotechnology Letters*, 43, no. 7, 1253-1263, (2021).

9. B. Joanna, B. Michal, D Piotr, W. Agnieszka, K. Dorota, W. Izabela, "Sugar beet pulp as a source of valuable biotechnological products." In *Advances in biotechnology for food industry*, pp. 359-392. Academic Press, (2018).

10. P. Borysiuk, I. Jenczyk-Tolloczko, R. Auriga, M. Kordzikowski, "Sugar beet pulp as raw material for particleboard production." *Industrial Crops and Products*, 141, 111829, (2019).

11. C. Caliceti, M. Malaguti, L. Marracino, M. C. Barbalace, P. Rizzo, S. Hrelia, "Agri-food waste from apple, pear, and sugar beet as a source of protective bioactive molecules for endothelial dysfunction and its major complications." *Antioxidants*, 11, no. 9, 1786, (2022).

12. M. Aljabri, S. Alharbi, R. |N. Al-Qthanin, F. M. Ismaeil, J. Chen, S. F. Abou-Elwafa, "Recycling of beet sugar byproducts and wastes enhances sugar beet productivity and salt redistribution in saline soils." *Environmental Science and Pollution Research*, 28, 45745-45755, (2021).

13. M. Benbati, M. El Hansali, E. El Azhari, M. Mounsif, A. Haddioui, B. Benjelloun, A. Keli, "Effects of the incorporation of ensiled sugar beet pulp in the diet on lambs fattening performance." *Options Méditerranéennes*, 125, 413-415, (2021).

14. H. Diao, A. Jiao, B. Yu, J. He, P. Zheng, J. Yu, D. Chen, "Beet pulp: an alternative to improve the gut health of growing pigs." *Animals*, 10, no. 10, 1860, (2020).

15. L. F. Wang, E. Beltranena, R. T. Zijlstra, "Diet nutrient digestibility and growth performance of weaned pigs fed sugar beet pulp." *Animal Feed Science and Technology*, 211, 145-152, (2016)

16. M. M. Salman, A. A. Muttar, "The mechanical properties of Lime Concrete." *Journal of Engineering and Sustainable Development*, 21, no. 2, 180-191, (2017).

17. M. Cao, X. Ming, K. He, L. Li, S. Shen, "Effect of macro-, micro-and nano-calcium carbonate on properties of cementitious composites—A review." *Materials*, 12, no. 5, 781, (2019).

18. I. Maruyama, W. Kotaka, B. N. Kien, R. Kurihara, M. Kanematsu, H. Hyodo, T. Noguchi, "A new concept of calcium carbonate concrete using demolished concrete and CO2." *Journal of Advanced Concrete Technology*, 19, no. 10, 1052-1060, (2021).

19. P. A. Adesina, F. A. Olutoge, "Structural properties of sustainable concrete developed using rice husk ash and hydrated lime." *Journal of Building Engineering*, 25, 100804, (2019).

20. M. Soleimani Dashtaki, A. Heydari, M. Fadaei Dah Cheshmeh, "The effect of limestone on compressive and bending strength of cement. " *Fifth National Conference on Applied Research in Civil Engineering,*

Architecture and Urban Management, K. N. Toosi University of Technology, Iran, December 2-3, (2018), (In Persian).

21. D. Mostofinejad, H. H. Nazari Monfared, "Adding slag and limestone powder to concrete to increase its durability in sulfate environment. " *Transportation research paper, scientific-research quarterly*, third year, number 2, summer, (2006), (In Persian).

22. K. Phuyal, U. Sharma, J. Mahar, K. Mondal, M. Mashal, "Reducing Carbon Footprint with Precipitated Calcium Carbonate (PCC) in Geotechnical Applications. " *Preprints*, 2023091674. doi:10.20944/preprints202309.1674.v1, (2023).

23. M. Soydal Ulku, M. Esen, "Evaluation of sugar mill lime waste in biobased epoxy composites." *Polymer Composites*, 39, no. 3, 924-935, (2018). doi:10.1001/pc.24019.

24. A. M. Rashad, M. Gharieb, H. Shoukry, M. M. Mokhtar, "Valorization of sugar beet waste as a foaming agent for metakaolin geopolymer activated with phosphoric acid." *Construction and Building Materials*, 344, 128240, (2022).

25. A. M. Rashad, S. R. Zeedan, M. Gharieb, "Appreciation of sugar beet waste in metakaolin geopolymer mortar for compressive strength and drying shrinkage." *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 37, 101429, (2024).

26. Z. Sapronova, S. Sverguzova, E. Fomina, E. Fokina, "Carbonate-containing precipitate of sugar production from sugar beet as filler for polymer concrete." In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 365, no. 3, p. 032042. IOP Publishing, (2018).

27. H. Li, W. Xu, X. Yang, J. Wu, "Preparation of Portland cement with sugar filter mud as lime-based raw material." *Journal of Cleaner Production*, 66, 107-112, (2014)

28. H. Karimi Dehkordi, A. Heydari, "Investigating the use of lime waste instead of sand in concrete. " *1st Urban Services and Environment Conference*, Ferdowsi University, Mashhad, Iran, October 8, (2013), (In Persian).

29. H. Karimi Dehkordi, A. Heydari, "Application of lime waste from sugar factories as stone material in concrete production." *1st International Conference on Environmental Crises and Its Solutions*, Islamic Azad University Science and Research, Khuzestan Branch, Ahvaz, February 13-14, (2012), (In Persian).

30. M. Gharieb, A. M. Rashad, "An initial study of using sugar-beet waste as a cementitious material." *Construction and Building Materials*, 250, 118843, (2020).

31. K. Phuyal, U. Sharma, J. Mahar, K. Mondal, M. Mashal, "A sustainable and environmentally friendly concrete for structural applications." *Sustainability*, 15, no. 20, 14694, (2023).

32. National Standard No. 302 - Characteristics of concrete aggregates, *Iran National Standards Organization*, Third Revision, (In Persian).

33. The National Method for Concrete Mix Design, *Road, Housing and Urban Development Research Center* ,Third Edition, (In Persian).

34. ACI 318-14 Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary.

35. ASTM C496-96 Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens.