مجله انجمن زمین‌شناسی مهندسی ایران

بهار ۱٤۰۰، جلد چهاردهم، شماره ۱، صفحه ۲۹ تا ٤۲

تاثیر نوع سنگدانه ها بر ویژگی های مقاومتی بتن گوگردی و معمولی

شهرام قاسمی[۱]،محمدرضا نیکودل[*۲]، امیر مازیار رئیس قاسمی[۳]، فهیمه یوسف وند[٤]

دریافت مقاله: ۹۷/۰۸/۲۰ پذیرش مقاله: ۹۹/۰٦/۲۸

چکیده

بتن که پرکاربردترین ماده در سراسر جهان برای ساخت سازه‌ها می‌باشد. در بین خصوصیات بتن، مقاومت بتن یکی از ویژگی‌هایی می‌باشد که بیشترین ارزش را در بین مهندسان و طراحان دارد و از این رو با نسبت کیفی بالایی کنترل می‌شود. بتن از ترکیب چندین مصالح شامل سیمان، سنگدانه، مواد افزودنی و آب تشکیل شده است. تقریباً ٪۷۵ حجم بتن متعارف را سنگدانه‌ها تشکیل می‌دهند بدیهی است ماده متشکله‌ای که چنین درصد بزرگی از بتن را تشکیل می‌دهد باید نقش مهمی در خواص بتن تازه و سخت شده داشته باشد. در این تحقیق به منظور بررسی تأثیر ویژگی‌های انواع سنگدانه‌ها بر بتن‌های گوگردی و معمولی از ۷ نمونه سنگی که شامل مصالح معمولی، گرانیت، ۲ نمونه آهک، لوماشل، تراورتن و لیکا استفاده شده است. از این نمونه‌های سنگی، سنگدانه‌هایی با دانه‌بندی یکسان تهیه و ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی نمونه‌ها بدست آمده است. در مرحله بعد طرح اختلاط مناسبی مشخص گردید که برای هر ۲ نوع بتن معمولی و گوگردی قابل استفاده باشد و سپس نمونه‌ها ساخته شده و بررسی نتایج نشان داده است که مصالح سنگی که برای استفاده در بتن معمولی مناسب نمی‌باشند در بتن‌های گوگردی با تغییراتی که در طرح اختلاط داده شد، مقاومت مناسبی را کسب کرده، به عنوان مثال لوماشل از مقاومت ۱۷/٦ MPa در بتن‌های معمولی به ٤۳/٦ MPa در بتن‌های گوگردی رسیده است. همچنین تخلخل و بافت سطحی سنگدانه‌ها در بتن‌های گوگردی نقش پررنگتری دارند.

کلمات کلیدی: *بتن گوگردی ، سنگدانه، مقاومت بتن.*

۱- دکتری زمین‌شناسی مهندسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه تربیت مدرس، shahram.ghasemi@modares.ac.ir

۲ - دانشیار زمین شناسی مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده علوم پایه، nikudelm@yahoo.com

۳- دفتر خدمات مهندسی و آزمایشگاهی، مرکزتحقیقات راه، مسکن و شهرسازی

٤- فارق التحصیل کارشناسی ارشد زمین شناسی مهندسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه تربیت مدرس

*مسئول مکاتبات

۱. مقدمه

مواد سیمان کننده به طور یقین قدیمی‌ترین ماده تولید شده برای ساخت ساز می‌باشد، که به طور تقریبی استفاده از آن به حدود ۹ هزار سال قبل باز می‌گردد. امروزه، پرکاربردترین ماده ای که درساخت و ساز مورد استفاده قرار می‌گیرد بتن می‌باشد که از ترکیب چند فاز شامل خمیر سیمان، سنگدانه و ناحیه انتقال تشکیل شده است. در بین خصوصیات مختلف بتن، مقاوت یکی از ویژگی هایی می‌باشد که بیشترین ارزش را در بین مهندسان و طراحان دارد و از این رو با نسبت کیفی بالایی کنترل می‌شود (Alexander, 2005). برای تولید بتن‌های با مقاومت مختلف روش های متعددی وجود دارد که از آن جمله می‌توان به تغییر نسبت آب به سیمان در بتن‌های هیدرولیکی و دیگری تغییر نوع سیمان اشاره کرد به عنوان مثال گوگرد. امروزه با افزایش میزان مصرف سوخت های فسیلی و افزایش تقاضا، میزان بسیار بیشتری نفت خام پالایش شده است. یکی از محصولات جانبی حاصل از پالایش نفت خام گوگرد می‌باشد که به شدت تولید آن افزایش پیدا کرده است و میزان تولید از مصرف پیشی گرفته است. با توجه به مشکلات زیست محیطی و خطراتی که گوگرد دارد شرکت های نفتی با صرف هزینه های زیاد به دنبال یافتن راه حلی برای رفع این مشکل می باشند که یکی از این راهکارها استفاده از گوگرد در نوع جدیدی از بتن به نام بتن گوگردی می‌باشد (Mohamed and El-Gamal, 2010). در این نوع بتن از گوگرد به عنوان عامل متصل کننده استفاده می‌گردد. گوگرد اگر بطور خالص به عنوان سیمان استفاده گردد پس ازانجماد ترک خورده و باعث خرد شدن نمونه های ساخته شده می‌گردد علت این امر تغییر سیستم تبلوری است که در بتن‌های گوگردی رخ می‌دهد که در نتیجه کاهش حجم بلورهای حاصله، تنش‌هایی در بتن ایجاد شده و بتن در اثر نفوذ رطوبت تخریب می‌گردد(Vlahovic et al., 2011). برای حل این مشکل تحقیقات زیادی صورت پذیرفته که منجر به ساخت مواد افزدنی متعددی شده است که در این زنجیره تبدیل سیستم تبلوری اختلال ایجاد کرده است و با تولید بلورهای ریز در نهایت باعث ایجاد یک ماده پلاستیک با حفظ پایداری در طول زمان شده است در واقع پلیمرها مانع از رشد بلورهای درشت گوگرد می‌شود. راز دوام طولانی مدت گوگرد اصلاح شده در بلورهای ریز گوگرد نهفته شده است(Gannon et al., 1983). از جمله این تحقیقات می‌توان به مطالعات وروم ۱۹۷۷ اشاره کرد این محقق ماده پلی اولفینی به نام SRX را معرفی کرد که به عنوان یک ماده ایجاد کننده خاصیت پلاستیکی عمل می‌کرد و در زمینه تجاری نیز موفق عمل کرد و کارخانه ای برای تولید آن نیز احداث گردید(Emery, 1983).

تحقیقات اخیر در سراسر جهان نشان می‌دهد بتن‌های ساخته شده با گوگرد در برابر بتن‌های ساخته با سیمان پرتلند دارای مزیت‌های شیمیایی و فیزیکوشیمیایی از جمله "پایداری شیمیایی و مقاومت بسیار زیاد در محیط‌های خورنده، سخت-شدگی سریع و دست یابی به خصوصیات مورد نظر در مدت ۲٤ ساعت، قابل بازیافت بودن آن، قابلیت تولید در تمامی شرایط آب و هوایی می‌باشند (Mohamed and El-Gamal, 2009)، علاوه بر این میزان نفوذ پذیری بسیار کم بتن‌های ساخته شده از گوگرد به خاطر خاصیت عدم انحلال پذیری (هیدروفوبیک) گوگرد، این نوع بتن‌ها می‌توانند به عنوان یک ماده آبند نیز استفاده گردند(Mcbee and Sullivan, 1982).

در بتن‌های گوگردی برخلاف بتن‌های هیدرولیکی آب و سیمان پرتلند حذف شده است و به جای آن از سیمان گوگردی استفاده می‌گردد. اما فاز سنگدانه‌ای در بین این ۲ بتن مشترک می‌باشد. با توجه به اینکه سنگدانه‌ها حدود ٪۷۵ حجم بتن را تشکیل می‌دهند باید نقش مهمی را در خواص بتن همچون مقاومت، دوام و پایداری بتن داشته باشند (وادل.، دوبروولسکی.، ۱۳۸٤). تحقیقات زیادی در زمینه تاثیر سنگدانه‌های بر بتن های معمولی صورت گرفته است و نتایج نشان می‌دهد که همواره نوع سنگدانه بر مدول الاستیسیته بتن تاثیر گذار بوده است و سنگدانه‌های ضعیف‌تر بتن‌های نرم-تری را نسبت به سنگدانه‌های مقاوم تر ایجاد می‌کنند (Beshr et al., 2003) و سنگدانه‌های مقاوم بتن‌های با مقاومت بالاتر

نسبت به سنگدانه‌های ضعیف ایجاد می‌کنند(Lo et al., 2007). از اینرو استفاده از مصالح ضعیف و هوازده (شریفی و همکاران، ۱۳۸۷) و سنگدانه‌های با اشکال طویل و پولکی((American (ACI Concrete Institute -Committee-221 2007) در بتن توصیه نمی-گرد.

در زمینه تأثیر سیستم‌های سنگدانه‌ای بر روی بتن گوگردی در سال ۱۹۶۰ دله و لودویگ پیشگامانی بودند که بر روی این سیستم کار کردند و نشان دادن که برای رسیدن به حد مطلوب مقاومت باید از سنگدانه های خوب دانه‌بندی شده استفاده کرد(ACI,1993). بیتس و کروو در سال ۱۹۷۰ مطالعات دیگری انجام داده و نتایج آن‌ها نشان داد که قدرت یک مخلوط سنگدانه و گوگرد، بستگی به عواملی همچون مقاومت و دانه‌بندی سنگدانه‌ها دارد(Bates and Crow, 1970).

اولین طرح تحقیقاتی در ایران که می‌توان آن را به عنوان نقطه شروع تحقیقات بتن گوگردی در ایران دانست، گنجیان در دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی انجام شد و بتن گوگردی بدون ماده افزودنی تهیه شد و سپس خالو و غفوری در سال ۱۳۷۱ نیز به بررسی پارامترهای موثر در رفتار بتن گوگردی با در نظر گرفتن مقاومت فشاری به عنوان معیاری جهت بررسی متغیرها پرداختند و نتایج کار خود را با این صورت بیان کردند که بتن گوگردی در مقایسه با سیمان پرتلند مقاومت بیشتری را کسب می‌کند و ٪۹۰ مقاومت خود را در مدت ۱ تا ۳ ساعت پس از سرد شدن به دست می‌آورد و ناخالصی‌های ناشی از گوگرد تاثیری بر مقاومت فشاری بتن ندارد و در نهایت با افزودن فیلر مقاومت بتن گوگردی تا حد قابل ملاحظه ای افزایش پیدا می‌کند (خالو و غفوری، ۱۳۷۱). و در نهایت در سال ۱۳۹۰ میرغفاری به بررسی اثر مصالح سنگدانه ای لوماشل منطقه چابهار بر ویژگی‌های مقاومتی بتن گوگردی پرداخت و اعلام کرد که میزان جذب رطوبت این بتن کمتر از ٪۱ می باشد و در مقابل اسید دارای مقاومت بالایی می‌باشند و نمونه های ساخته شده در مقایسه با نمونه‌های بتن معمولی مقاومت بیشتری را کسب کرده اند (میرغفاری،۱۳۹۰).

با توجه ه مطالعات فوق سنگدانه‌ها هدف این تحقیق قرار گرفت و سعی شد تاثیر انواع مختلف سنگدانه‌ها بر مقاومت ۲ بتن گوگردی و بتن هیدرولیکی مورد مطالعه و بررسی قرار گیرد. در این تحقیق ۷ نمونه سنگدانه مختلف انتخاب و سپس خصوصیات فیزیکی و مکانیکی آن‌ها مشخص گردیده و نمونه‌ها بتن گوگردی و معمولی با طرح اختلاط یکسان تهیه شده و سپس ۷و۱۴و۲۸ روز پس از ساخت آزمایش‌های مقاومتی بر روی نمونه‌ها انجام گرفته است.

۲. مواد و روش‌ها

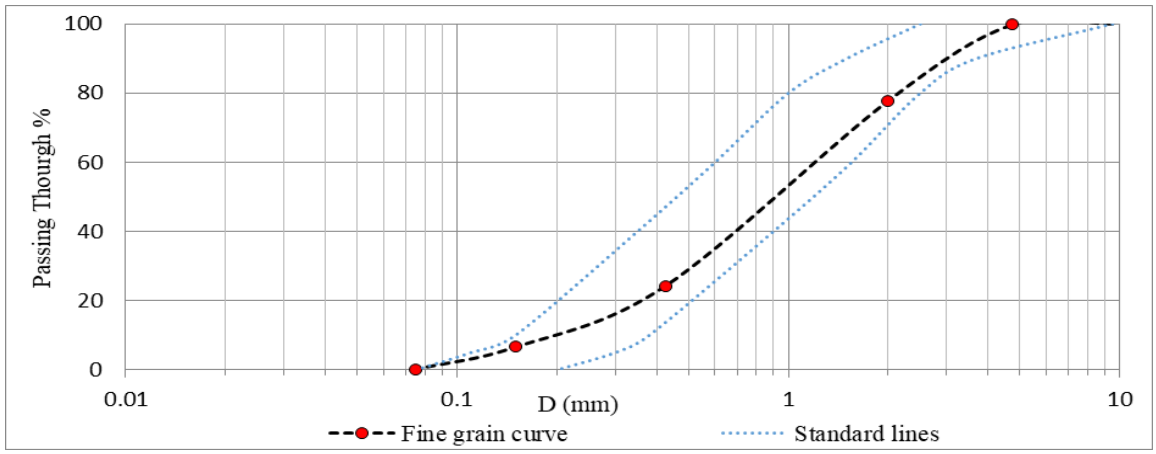
۲-۱. *آماده سازی نمونه*

در این مرحله از کار نمونه‌های سنگی مختلف و با استفاده از دستگاه سنگ شکن موجود در آزمایشگاه سنگدانه–هایی با دانه-بندی یکسان تهیه شده است که شامل لوماشل، ۲ نمونه آهک(با نام آهک سیاه و آهک ۱ در متن مشخص شده اند)، تراورتن، گرانیت و شن و ماسه معمولی می باشد و نمونه‌های لیکا نیز بصورت آماده خریداری شده است.

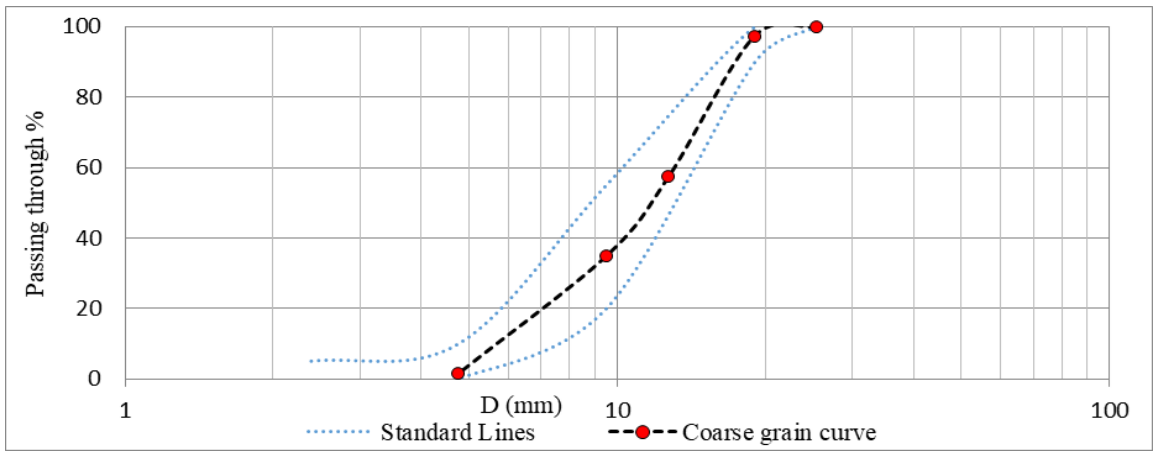
۲-۲. *سنگدانه‌ها*

۲-۲-۱ *دانه‌بندی*

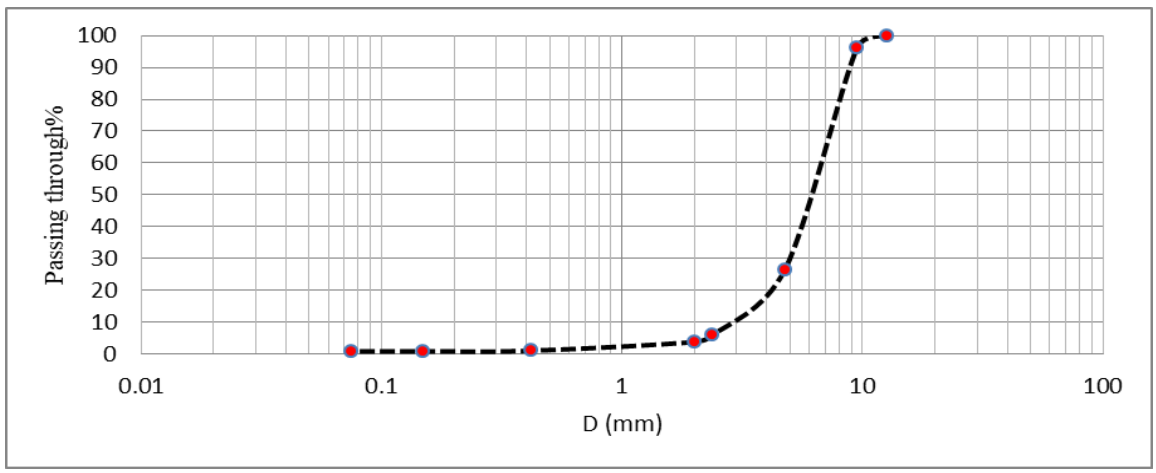
منظوراز دانه‌بندی، چگونگی توزیع قطر ذرات موجود در هر مخلوط برحسب درصد وزنی است. دانه‌بندی سنگدانه‌ها عموما بصورت یک منحنی به نام منحنی دانه‌بندی نشان داده می‌شود (رحیمی، ۱۳۸۸). دانه‌بندی مصالح طبق استاندارد C۱۳۶-۰۱ بوسیله الک انجام شده است و نتایج آن در شکل۲ و ۳ نشان داده شده است. مصالح انتخابی کوچکتر از ۱۹ میلیمتر می باشند. مدول نرمی محاسبه شده برای سنگدانه‌ها با استفاده از نمودار دانه‌بندی برابر با ۲.۹ می باشد . اما سنگدانه‌های لیکا که بصورت آماده تهیه شده اند و با توجه به اینه در صورت شکسته شدن مقاومت خود را از دست داده و قابل استفاده نمی‌باشند نمودار دانه بندی متفاوتی داشته که در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۱. نمودار دانه‌بندی سنگدانه‌های ریزدانه.



شکل ۲. نمودار دانه‌بندی سنگدانه‌های درشت‌دانه.



شکل ۳. نمودار دانه‌بندی لیکا.

سایر خصوصیات سنگدانه‌ها به همراه استاندارد مورد استفاده
در جدول شماره ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱. خصوصیات اندازه گیری شده سنگدانه‌ها.

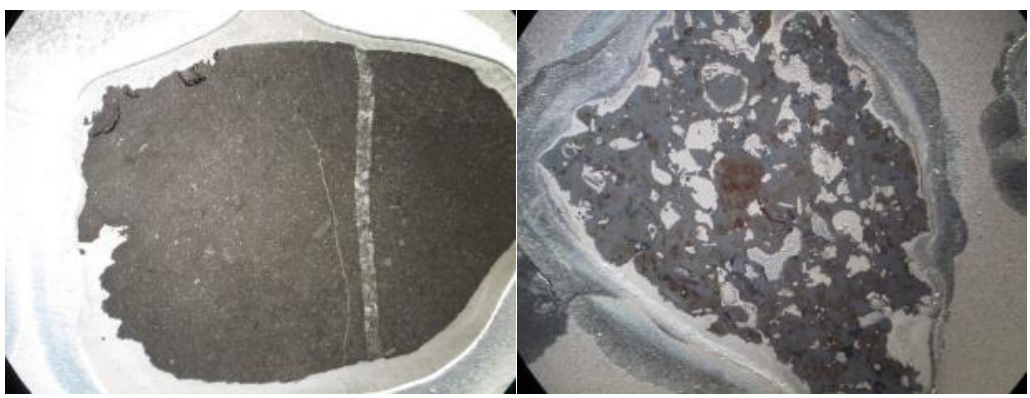
Physical Properties		coquina	Limestone 1	Expanded clay	Travertine	River Materials	Limestone 2	Granite	Standard
Porosity (%)		16.61	9.2	6.8	4.64	4.53	1.65	1.24	ASTM C97
Bulk density (kN/m^3)	Coarse grain	15.32	13.31	9.56	13.78	15.32	13.31	14.51	ASTM C29
	Fine grain	17.35	15.90	-	16.83	17.35	15.81	17.35	
Moisture absorption (%)	Coarse grain	7.4	4.4	3.5	1.9	2	.9	.7	ASTM C127
	Fine grain	12.7	8.5	-	2.9	2.5	1.9	1.7	ASTM C128
Impact value (%)		29.7	16.1	18.5	14.1	9.8	13.3	12.4	BS 812
Crushing value (%)		39.7	33.1	37.7	31.8	20.4	29.1	25.9	BS 812

۲-۲-۲ شکل سنگدانه‌ها

برای تعیین ضریب تطویل و تورق سنگدانه‌ها از استاندارد ASTM D 3398 استفاده شده است و مقادیر محاسبه شده نشان داده است که این ضرایب برای تمامی سنگدانه‌ها در مقدار استاندارد بوده است به غیر از سنگدانه‌های آهک سیاه که به دلیل شرایط خاص شکست آن‌ها در زیر دستگاه و همچنین سنگ‌هایی که از آن‌ها برای شکست استفاده شده است ضریب تورق به میزان بالایی بالاتر از حد استاندارد بوده و این مقدار برابر با ٦٧ درصد به دست آمده است اما ضریب تطویل برای تمامی نمونه‌ها و آهک سیاه پایین‌تر از حد استاندارد بوده و از این لحاظ سنگدانه‌ها مشکلی برای استفاده در بتن نداشته‌اند. برای تعیین بافت سطحی سنگدانه‌ها نیز این سنگدانه‌ها در زیر میکروسکوپ مورد بررسی قرار گرفته و نتایج حاصل از بررسی بافت سطحی سنگدانه‌ها در جدول ۲ ارائه شده‌اند.

جدول ۲. بررسی شکل و بافت سطحی سنگدانه‌ها.

Expanded clay(Lica)	Coquina	Travertine	Limestone 2	Limestone 1	Granite	River material	Aggregate type
Rounded	Angular	Angular	Angular	Angular	Angular	Semi angular	Shape
Smooth	Clastic(Highly porous)	Rough	Smooth	Rough	Granular	Rough	Texture



شکل ٤. تصویر سنگدانه لوماشل (راست) و آهک سیاه (چپ) در زیر میکروسکوپ.

۲-۲-۳ *بررسی میکروسکوپی سنگدانه‌ها*

شن و ماسه معمولی: دانه‌های تشکیل دهنده قطعات دارای ترکیب سیلیسی و خرده‌های پلاژیوکلاز می‌باشد. سنگ‌های قابل مشاهده شامل ماسه سنگ توفی، شیل و دیوریت می-باشند.

سنگدانه‌های گرانیت: قطعات از سنگ‌های آذرین نفوذی تشکیل شده است و کانی اصلی پلاژیوکلاز می‌باشد که در بعضی موارد اندکی تجزیه شده است.

آهک ۱: ترکیب کلی این مقطع کربناته است و از نظر کانی-شناسی عمدتا دارای ترکیب کانی کلسیت است.

تراورتن: در این نمونه‌ها تخلخل حفره‌ای قابل مشاهده است و قطعات دارای ۲ بافت است، بافت اولیه که به صورت میکرایت است و بخش تبلور یافته که بلورهای درشت کلسیت اسپاری است.

آهک سیاه: نام سنگ بایوکلاست پکستون می‌باشد. سنگ آهک دانه‌ریز با فسیل‌های پلاژیک می‌باشد و شکستگی‌های سنگ با سیمان کلسیتی پر شده است و تخلخل بسیار پایینی دارد.

لوماشل(کوکینا): اجزای تشکیل دهنده خرده‌های صدفی با ترکیب کربنات کلسیم (آراگونیت و کلسیت) دانه‌های تخریبی کوارتز، خرده‌های سنگی، اینترکلاست و خرده‌های فسیلی و جلبک است. تخلخل بین قطعات از نوع حفره‌ای می‌باشد.

لیکا: بافت سلولی دارد و متن دانه‌ها به صورت قهوه‌ای تیره تا سیاه می‌باشد. در اثر حرارت بافت اسفنجی پیدا کرده است و کانی قابل شناسایی پلاژیوکلاز است.

است و کانی قابل شناسایی پلاژیوکلاز است.

۲-۳. *بتن*

۲-۳-۱ *طرح اختلاط*

در این تحقیق برای انتخاب طرح اختلاط بتن سعی شده است بر اساس روش طرح ملی مخلوط بتن و راهنمایی‌های ACI 548-2 طرحی انتخاب گردد که برای هر دو نوع بتن گوگردی و بتن معمولی قابل کاربرد باشد. زیرا در بحث عملکرد تاثیر سنگدانه‌ها در خواص دو نوع بتن مورد بررسی، ثابت بودن حجم سنگدانه‌ها حائز اهمیت می‌باشد و از آنجائیکه ساختار بتن گوگردی و بتن معمولی از نظر خواص رئولوژی خمیر تشکیل دهنده متفاوت می‌باشد، دستیابی به طرحی که برای هر دو نوع بتن مناسب باشد بر پایه ساخت مخلوط‌های آزمایشی بود. بر همین اساس تا انتخاب طرح نهایی مراحل مختلف و طرح‌های مختلفی ساخته شده که در نهایت پس از ٤ مرحله منجر به انتخاب طرح نهایی گردید. طرح نهایی برای بتن گوگردی و بتن هیدرولیکی در جدول ۳ و ٤ برای بعضی از سنگدانه‌ها قرار داده شده است.

جدول ۳. طرح اختلاط بتن گوگردی.

Aggregate	Sulfur Cement (kg/m^3)	Fine grain (kg/m^3)	Coarse grain (kg/m^3)	Filler (kg/m^3)
Granite	496	865	774	91
Limestone 1	496	802	711	91
Coquina	496	699	611	91

جدول ٤. طرح اختلاط بتن معمولی

Aggregate	Cement (kg/m^3)	Water (kg/m^3)	Fine grain (kg/m^3)	Coarse grain (kg/m^3)	Filler (Kg/m^3)
River material	341	198	875	818	91
Granite	341	198	865	774	91
Limestone 1	341	198	802	711	91
Limestone 2	341	198	797	777	91
Travertine	341	198	849	734	91
Coquina	341	198	699	611	91
Expanded clay	341	198	582	534	91

۲-۳-۲ ساخت بتن

برای ساخت بتن از طرح اختلاط‌های ارائه شده استفاده شد. برای ساخت بتن هیدرولیکی از دستگاه بتونیر موجود در آزمایشگاه استفاده شده و سپس نمونه‌ها در قالب ریخته شده و ۱ روز پس از قالب گیری نمونه‌ها خارج و در مخزن‌های آب قرار داده شدند. برای ساخت بتن‌های گوگردی ابتدا دستگاهی طراحی شد که از یک مخزن ۲ جداره که بوسیله روغن پرشده بود و یک سیستم برای چرخش روغن و منبع حرارتی تشکیل شده است. دستگاه فوق این امکان را فراهم می‌آورد که گرما بصورت یکسان به تمامی قسمت ها رسیده و بتوان مخلوط همگنی به دست آورد و همچنین از بالا رفتن بیش از حد دما نیز جلوگیری شود. سپس هنگامی که دما به حد مورد نظر رسید سیمان گوگردی که مخلوطی از گوگرد و ماده افزودنی می‌باشد(در این آزمایش از SMZ به عنوان ماده افزودنی استفاده شده است) به سنگدانه‌ها اضافه شده و سپس اجازه داده شده تا کاملا ذوب شود و کاملا مخلوط گردند. در مرحله بعد از مخلوط مورد نظر نمونه‌هایی تهیه شده و پس از سرد شدن خارج شده و در محیط آزمایشگاهی نگه داری شده و در بازه‌های زمانی مشخص بر روی نمونه‌ها آزمایش-های مورد نظر انجام گرفت.

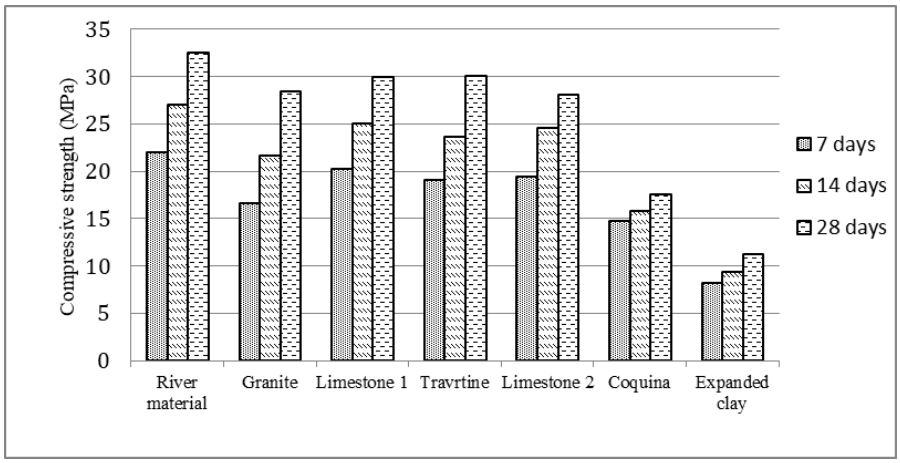
۳. نتایج

۳-۱. مقاومت فشاری بتن

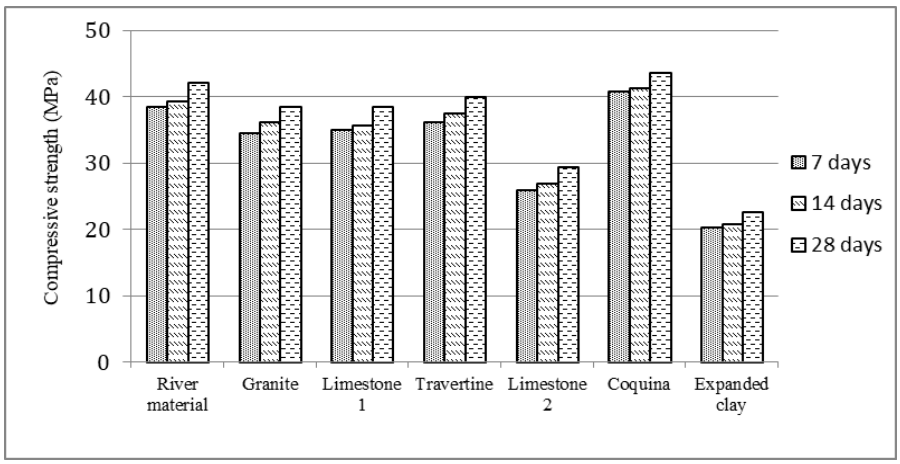
در این تحقیق نمونه بتن‌های ساخته شه در فواصل زمانی ۷، ١٤ و ۲۸ روز پس از ساخت بر طبق استاندارد ASTM C 39-01 مورد آزمایش قرار گرفته است. نتایج در شکل‌های ۵ و٦ و نتایج مدول الاستیسیته در شکل ۷ ارائه شده است.

۳-۲. مقاومت کششی برزیلی (دو نیم شدن)

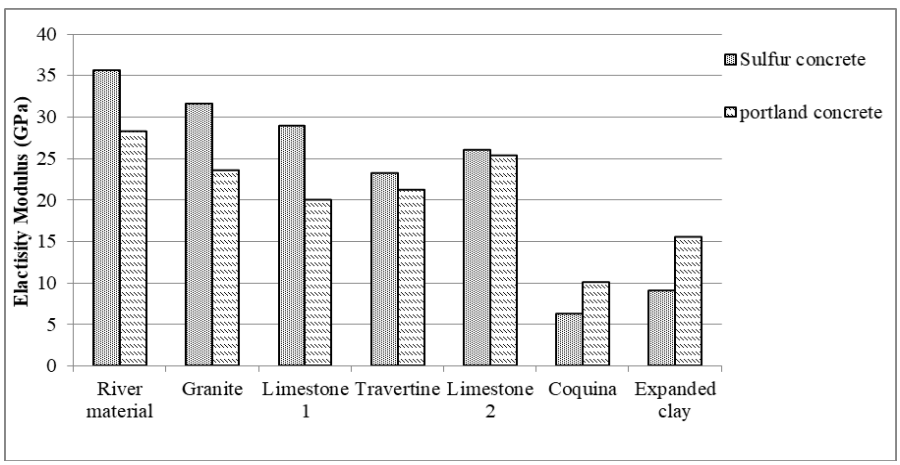
برای انجام این آزمایش از نمونه های ساخته شده پس از ١٤ روز و اطمینان از اینکه نمونه‌ها به حد کافی از مقاومت دست یافته‌اند، از نمونه‌های بتن گوگردی و معمولی مغزه‌گیری انجام گردید. پس از تهیه دو طرف نمونه ها برای ایجاد سطحی صاف برش داده شدند و سپس همانند نمونه‌های اصلی در شرایط عمل آوری سایر نمونه بتن‌ها قرار داده شدند. مغزه‌های تهیه شده علاوه بر اینکه برای ساخت نمونه‌های مناسب برای انجام آزمون برزیلی مورد استفاده قرار می‌گرفتند به خوبی وضعیت داخلی نمونه‌های ساخته شده را نیز نشان می‌دادند تصاویر مربوط به مغزه‌های آماده شده در شکل ۸ و ۹ نشان داده شده است. پس از آماده سازی نمونه‌ها این آزمون بر طبق آیین‌نامه ASTM C 496 در آزمایشگاه انجام شد و تصاویر و نتایج مربوط به این آزمون در ۱۰ نشان داده شده‌اند.



شکل ۵. نتایج آزمایش مقاومت تک محوری بتن‌های معمولی.



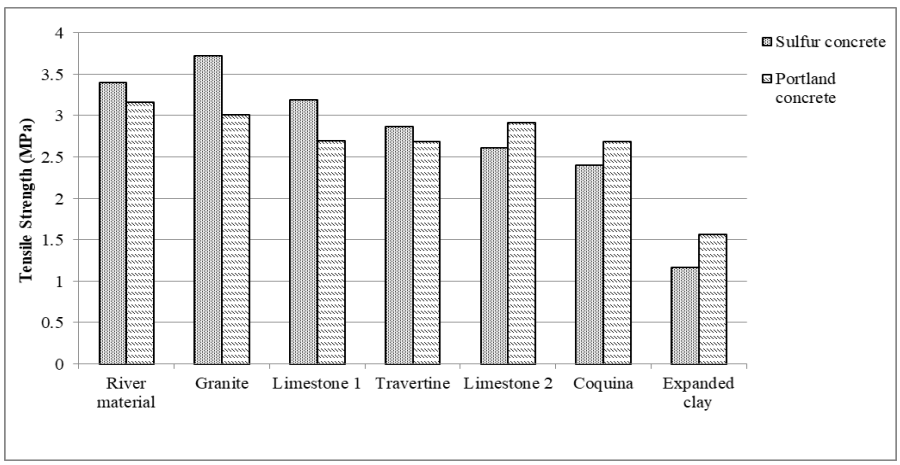
شکل ٦. نتایج آزمایش تک محوری نمونه‌های بتن گوگردی.



شکل ۷. مدول الاستیسیته بتن‌های ۲۸ روزه.

شکل ۸. مغزه‌های تهیه شده از بتن‌های معمولی.

شکل ۹. مغزه‌های تهیه شده از بتن‌های گوگردی.



شکل ۱۰ مقاومت کششی نمونه های در آزمایش برزیلی

٤. بحث وتحلیل نتایج

در این تحقیق تمامی نمونه‌ها بجز لیکا برای آماده سازی به وسیله دستگاه سنگ شکن خرد شده و بنابراین سنگدانه‌ها بصورت شکسته و زاویه دار مورد استفاده قرار گرفته که خود باعث افزایش چسبندگی و افزایش مقاومت بتن‌ها ساخته شده می‌گردد. و با توجه به نمودار دانه‌بندی مشاهده می‌گردد که لیکا دارای دانه‌بندی مناسب و در محدوده استاندارد نمی‌باشد و از این رو از ابتدا انتظار می‌رفت که بتن‌های ساخته شده با لیکا مقاومت پایینی داشته‌باشد. به طور کلی بتن های گوگردی نسبت به نمونه بتن‌های معمولی تا ۳۰٪ افزایش مقاومت برای سنگدانه‌های با تخلخل پایین و تا ۱۰۰٪ برای سنگدانه‌های با تخلخل بالا افزایش مقاومت داشته ایم.

در زمینه تاثیر شکل سنگدانه‌ها باید اشاره کرد که سنگدانه‌های لیکا بصورت کروی می‌باشند که باعث کاهش سطح مخصوص گردیده و مقاومت کاهش پیدا می‌کند(ACI, 1993). سنگدانه‌های آهک سیاه نیز به علت حالت خاص

شکست خود در زیر دستگاه سنگ شکن دارای ضریب تورق بالای حد استاندار می‌باشند که باعث کاهش مقاومت می-گردند با توجه به نتایج حاصله از آزمون فشاری بتن مشاهده می‌گردد که تاثیر این شاخص در بتن گوگردی بیشتر بوده است.

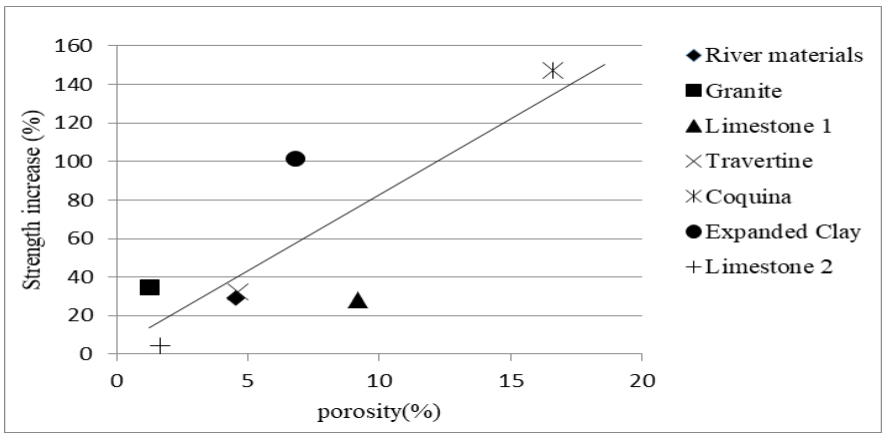
٤-۱. تاثیر شکل و بافت سنگدانه‌ها

با توجه به مطالعات میکروسکوپی صورت گرفته سنگدانه‌های به کار رفته در بتن دارای بافت صاف، کرمو، زبر و دانه‌ای می‌باشند. بر اساس نتایج حاصل از بتن‌های معمولی مشخص است که سنگدانه‌های دارای بافت سطحی زبر مقاومت نهایی بیشتری را نسبت به سنگدانه‌های با بافت صاف و کرمو نشان داده‌اند. سنگدانه لوماشل به دلیل داشتن بافت کرمو که باعث کاهش مقاومت این سنگدانه به مقدار زیاد و همچنین جذب زیاد آب توسط حفرات موجود می‌شود(شریفی، ۱۳۸۷)، باعث کاهش مقاومت بتن معمولی ساخته شده با این سنگدانه شده است. ولی در بتن گوگردی این بافت برای سنگدانه لوماشل می‌تواند در جهت مثبت نیز عمل کرده و باعث نفوذ سیمان گوگردی به درون سنگدانه شده و تا حدودی این کاهش مقاومت ناشی از بافت کرمو و متخلخل را که باعث کاهش مقاومت سنگدانه و در نتیجه بتن شده است را جبران کند. همان‌گونه که نتایج نیز نشان داده است در بتن گوگردی نیز سنگدانه‌های با بافت زبر مقاومت بیشتری را نشان داده‌اند.

٤-۲. تاثیر تخلخل سنگدانه

اهمیت تخلخل در سنگدانه‌ها بستگی به تأثیر آن در چگالی سنگدانه‌ها و در نتیجه تأثیر آن در چگالی بتن ساخته شده دارد که این عامل به طور غیر مستقیم با سختی و مقاومت بتن مرتبط می‌باشد. کانی‌های متخلخل، چگالی، مدول الاستیسیته و مقاومت پایین‌تری را نشان می‌دهند. با توجه به مقایسه مقاومت‌های حاصل از بتن‌های معمولی با تخلخل قابل مشاهده است سنگدانه‌های مانند لوماشل و لیکا با داشتن تخلخل بالا کمترین مقاومت را حاصل داده و بتن‌های ساخته شده با سنگدانه‌های با تخلخل کمتر همچون تراورتن، مصالح معمولی و گرانیت مقاومت‌های بالاتری را نشان داده‌اند.نتایج مشابهی در مورد بتن های گوگردی ساخته شده با سنگدانه لوماشل به دست آمده است(میرغفاری ، ۱۳۹۰؛یوسفوند ، ۱۳۹۳).

با مقایسه مقادیر به دست آمده از تخلخل سنگدانه‌ها با مقاومت حاصل از بتن‌های گوگردی و با توجه به شکل ۱۱ که در آن درصد افزایش مقاومت بتن گوگردی به معمولی را با توجه به افزایش درصد تخلخل سنگدانه‌ها نمایش داده است می‌توان نتیجه گرفت که افزایش تخلخل باعث افزایش مقاومت بتن گوگردی می‌گردد که به علت نفوذ سیمان گوگردی مذاب در این منافذ و در نتیجه قفل و بند بهتر می-باشد. ضریب همبستگی محاسبه شده برای این نمودار ۰/۸۱ می باشد که نشان دهنده ارتباط مستقیم بین درصد تخلخل و افزایش مقاومت بتن گوگردی می باشد.



شکل ۱۱. نسبت افزایش مقاومت بتن گوگردی به معمولی با افزایش تخلخل.

همان‌گونه که در نتایج قابل مشاهده است در حالیکه سنگدانه-های آهک ۱ و تراورتن شاخص‌های مقاومتی کمتری را نسبت به گرانیت نشان داده‌اند و تخلخل بیشتری دارند، مقاومت‌های حاصل از آن‌ها بیشتر از بتن گرانیتی می‌باشد و یکی از عوامل موثر در این افزایش مقاومت نیز همان‌گونه که گفته شد می‌تواند همین میزان نفوذ گوگرد و از طرفی بافت زبر این سنگدانه‌ها باشد. در این بین بتن‌های ساخته شده با لوماشل که بیشترین تخلخل را داشته است بیشترین مقاومت را نشان داده‌اند که این به دلیل اضافه کردن سیمان گوگردی در این بتن از ٪۲۱ وزنی به ٪۳۰ وزنی در هنگام ساخت می‌باشد. به علت اینکه با نسبت قبلی، میزان سیمان بسیار کم بوده و امکان نمونه گیری از آن وجود نداشته بنابراین به ناچار این مقدار افزوده شده است و همین مقدار نیز برای ساخت لیکا اضافه گردیده است. از طرف دیگر به این دلیل که سنگدانه‌های لوماشل بسیار متخلخل بوده و این حفرات نیز به یکدیگر در اکثر موارد مرتبط می‌باشد مقدار زیادی سیمان تا اعماق زیادی از سنگ نفوذ کرده و بنابراین مقاومت را تا حدود بسیار زیادی افزایش داده است بنابراین همراهی این عامل با افزایش مقدار سیمان مقاومت این بتن را نسبت به سایرین افزایش داده است.

علت نفوذ سیمان گوگردی در سنگدانه‌های لوماشل را می‌توان به این دلیل دانست که در هنگامی که گوگرد ذوب می‌گردد بسیار روان می‌باشد و علاوه بر این مدت زمانی که گوگرد به همراه سنگدانه‌ها حرارت داده می‌شود تا مخلوط همگن تولید گردد به نسبت بیشتر از مدت زمانی است که در بتن معمولی مخلوط تهیه می‌گردد. بنابراین با توجه به روانی بیشتر و بازه زمانی طولانی‌تر در بتن گوگردی این سیمان به درون سنگدانه‌ها همانند آنچه در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود نفوذ کرده و باعث افزایش مقاومت شده است.

شکل ۱۲ نفوذ سیمان گوگردی در حفرات موجود در سنگدانه لوماشل.

در این بین پایین بودن مقاومت آهک سیاه نیز قابل مشاهده است که در بخش‌های قبلی به آن اشاره شده است و تا حدودی کم بودن آن به شکل دانه‌ها نسبت داده شد. اما با توجه به مقایسه مقاومت بتن معمولی این سنگدانه با سایر بتن‌های معمولی و همچنین مقایسه بتن گوگردی آن با سایر نمونه های بتن‌های گوگردی می‌توان مشاهده کرد که با توجه به یکسان بودن شکل دانه‌ها در هر ۲ نمونه گوگردی و معمولی، در بتن‌های معمولی مقاومت حاصله تا حدود زیادی نزدیک به سایر بتن‌ها مانند تراورتن گرانیت می‌باشد اما در نمونه‌های گوگردی این اختلاف بسیار زیاد شده به گونه‌ای که جزء سنگدانه‌هایی که کمترین مقاومت را داده‌اند قرار می-گیرد. بنابراین با توجه به اینکه این سنگدانه کمترین تخلخل را در میان سنگدانه‌ها داشته می‌توان نقش تخلخل را در کاهش این مقاومت در بتن گوگردی مد نظر گرفته و حتی تأثیر آن را نیز بیش از شکل سنگدانه در نظر گرفت.

در مورد سنگدانه لیکا باید توجه داشت که این سنگدانه از حرارت دادن رس منبسط شونده حاصل شده و دور آن را لایه ای احاطه کرده است که نفوذ گوگرد و دوغاب سیمان را محدود می‌کند و به همین دلیل از نفوذ این مواد جلوگیری کرده و مقاومت آن مشابه دیگر سنگدانه‌های متخلخل افزایش

نداشته است. علاوه بر این همان‌گونه که در قبل هم اشاره شده است به دلیل شکل کروی این سنگدانه‌ها و در نتیجه کاهش سطح مخصوص مقاومت در بتن‌های ساخته شده در این نوع سنگدانه نیز کاهش می‌باشد.

٤-٣. تاثیر آزمون فشاری و ضربه ای

قدرت یک مخلوط سنگدانه و گوگرد، بستگی مقاومت و دانه‌بندی سنگدانه‌ها دارد(Bates and Crow, 1970). آزمون ارزش ضربه‌ای نشان دهنده مقاومت سنگدانه‌ها در برابر ضربات ناگهانی و آزمون ارزش فشاری که نشان دهنده مقاومت سنگدانه‌ها در برابر پودر شدن می‌باشد. نتایج این آزمون‌ها نشان داده است سنگدانه‌هایی که عملکرد بهتری را نشان داده‌اند به نسبت بتن‌هایی با مقاومت بهتری را حاصل داده‌اند. در این بین بهترین عملکرد مربوط به مصالح معمولی می‌باشد که در هر دو نوع بتن گوگردی و معمولی نیز بالاترین مقاومت‌ها را از خود نشان داده‌اند. در کنار نتایج حاصل از این آزمون‌ها عوامل مهم دیگری نیز دخالت داشته و مقاومت نهایی بتن را تعیین می‌کنند. همان‌گونه که نتایج نیز نشان داده است بعد از مصالح معمولی بهترین نتایج مربوط به گرانیت می‌باشد اما مقاومت بتن‌های ساخته شده با آهک یک و تراورتن با وجود اینکه شاخص‌های کیفی کمتری را در این آزمایش‌ها نشان داده‌اند مقاومت بالاتری را نسبت به گرانیت کسب کرده‌اند و این شاخص با وجود اهمیت بسیار زیاد آن‌ها نمی‌توانند نشان دهنده شرایط کلی سنگدانه‌ها باشد.

٤-٤. تاثیر ویژگی‌های سنگدانه‌ای بر مقاومت کششی

با توجه به نتایج حاصل از آزمون مقاومت کششی برزیلی بر روی نمونه‌های تهیه شده از بتن‌های معمولی و گوگردی می‌توان مشاهده کرد که سنگدانه‌هایی که شاخص کیفی بالاتری را در آزمایش‌های انجام شده بر سنگدانه‌ها کسب کرده‌اند مقاومت کششی بهتری را نیز حاصل داده‌اند. نکته‌ای که در نتایج حاصل قابل توجه است این نکته می‌باشد که با توجه به اختلاف تا حدود ٪۵۰ درصدی مقاومت تک محوری لوماشل در بتن‌های معمولی با سایر بتن ها مقدار به دست آمده در آزمون مقاومت کششی برای بتن‌های معمولی ساخته شده با این نمونه بسیار جالب توجه است و این مقدار حتی به نسبت بتن‌های آهکی و تراورتنی نیز بیشتر است. می‌توان دلیل این امر را با توجه به بافت و تخلخل این سنگدانه توجیه کرد که این سنگدانه با داشتن بافت کرمو و تخلخل بالا باعث افزایش مقاومت ناحیه انتقال شده و در نتیجه مقاومت کششی را افزایش دهد. با نگاهی به مقاومت کششی حاصل از بتن-های گوگردی می‌توان مشاهده کرد که مقاومت کششی بتن-های تراورتن و آهک ١ از مقاومت کششی بتن‌های آهک سیاه بالاتر است با وجود اینکه نتایج بهتری را این سنگدانه در آزمون‌های ارزش ضربه‌ای و ارزش فشاری به دست آورده است. در توجیه این مسئله نیز می‌توان همانند قبل اشاره کرد که زبر بودن بافت سطحی سنگدانه‌ها عامل اصلی این مساله بوده و در نتیجه مقاومت کششی با افزایش زبری سطح سنگدانه‌ها افزایش پیدا می‌کند. بتن‌های ساخته شده از لیکا نیز می‌توانند شاهدی بر این موضوع باشند چرا که با توجه به بافت سطحی صاف و شکل کروی خود به همان نسبت که مقاومت تک محوری پایین‌تری نشان داده‌اند مقاومت کششی پایین‌تری را نیز نشان داده‌اند. اما این مسئله همان طور که توضیح داده شده برای لوماشل صدق نمی‌کند.

٤-٥. تاثیر ویژگی‌های سنگدانه‌ها بر مدول الاستیسیته

با توجه به نتایج به دست آمده از مدول الاستیسیته بتن‌های مشخص است که هرچه بتن شاخص‌های بالاتری را در آزمون‌های ارزش ضربه‌ای و ارزش فشاری کسب کرده باشد مدول الاستیسیته بهتری را نشان می‌دهند و هرچه میزان تخلخل بیشتر بوده میزان مدول الاستیسیته کاهش پیدا کرده است. علاوه بر این پیداست که در تمامی نمونه‌ها به غیر از لوماشل و لیکا مدول الاستیسیته بتن گوگردی بیشتر از مدول الاستیسیته بتن معمولی می‌باشد. کم بودن مدول الاستیسیته در این ٢ نمونه را می‌توان احتمالا به این دلیل استفاده از مواد

افزودنی در ساخت سیمان گوگردی که برای جلوگیری از خاصیت ترد و شکنندگی گوگرد و تبدیل آن به یک ماده با خاصیت پلاستیک دانست. به همین دلیل سیمان گوگردی موجود میزان تغییر شکل بیشتری در زیر فشارها پیدا می‌کند و در این موارد همانند آنچه در نمونه‌های لوماشل مشاهده می-گردد با افزایش نسبت سیمان به سنگدانه‌ها، سیمان در بتن تاثیر گذارتر خواهد شد و در واقع با بالاتر رفتن عیار سیمان گوگردی خاصیت پلاستیک بتن نیز افزایش پیدا کرده است که می‌تواند دلیل کم بودن مدول الاستیسیته بتن گوگردی حاصله نسبت به بتن معمولی می‌باشد.

۵. نتیجه‌گیری

- مقاومت فشاری، مدول الاستیسیته و مقاومت کششی بتن‌های گوگردی نسبت به نمونه‌های مشابه بتن معمولی بیشتر می‌باشند. از اینرو از مصالح ضعیف مانند لوماشل و لیکا می‌توان بتن گوگردی با مقاومت قابل قبول تولید کرد. .
- بتن‌های گوگردی مدول الاستیسیته بیشتری را نسبت به بتن‌های معمولی نشان داده است اما با افزایش میزان گوگرد، مدول الاستیسیته کاهش پیدا کرده و از بتن معمولی کمتر می‌شود.
- بافت سطحی سنگدانه‌ها تأثیر قابل ملاحظه ای در مقاومت بتن‌ها دارد و این تأثیر در بتن‌های گوگردی بیشتر است. سنگدانه‌های با بافت سطحی زبر باعث افزایش مقاومت بتن می‌گردند و سنگدانه‌های دارای بافت درونی کرمو که تخلخل زیادی دارند، از طرفی با کاهش مقاومت سنگدانه‌ها باعث کاهش مقاومت بتن، بخصوص در بتن‌های معمولی شده و از طرف دیگر سیمان و گوگرد به این منافذ نفوذ کرده و باعث افزایش مقاومت می‌گردند که تأثیر این افزایش در بتن‌های گوگردی در صورت استفاده از مقدار صحیح گوگرد به دلیل روانی بالاتر گوگرد بیشتر است.
- سنگدانه‌هایی که خصوصیات مکانیکی بهتری داشتند در بتن نیز سبب افزایش مقاومت نسبت به دیگر نمونه‌ها شده‌اند.
- در کل به این دلیل که بتن‌های گوگردی مقاومت بیشتری را نسبت به بتن‌های معمولی کسب می‌کنند، ویژگی‌های سنگدانه‌ها در این نوع بتن‌ها بیشتر تأثیر گذار است.
- در هر ۲ نوع بتن، بالاترین مقاومت مرتبط با سنگدانه-هایی می‌باشد که علاوه بر خصوصیات مکانیکی بالا، دارای بافت سطحی زبر می‌باشند.

منابع

وادل.، دوبروولسکی.، ۱۳۸٤. دستنامه اجرای بتن، ترجمه رمضانیانپور ، ع.ا.، طاحونی، ش.، پیدایش، م.، انتشارات علم و ادب، چاپ سوم.

شریفی، ج.، ۱۳۸۷. بررس اثر جنس سنگدانه های مختلف بر خواص مقاومتی بتن، پایان–نامه کارشناسی ارشد زمین شناسی مهندسی،دانشگاه تربیت مدرس.

خالو، ع.، غفوری، ح.ر.، ۱۳۷۱. بررسی برخی از پارامترهای موثر در رفتار بتن سولفوره، کنفرانس بین المللی بتن تهران.

میرغفاری، ه.، ۱۳۹۰. بررسی اثر مصالح سنگدانه ای لوماشل منطقه چابهار بر مقاومت فشاری بتن گوگردی و اصلاح و بهبود آن به کمک پوزولان‌های مختلف، پایان نامه کارشناسی ارشد رشته مهندسی عمران–سازه، دانشگاه آزاد اسلامی واحد زاهدان.

رحیمی، ح.، ۱۳۸۸. مصالح ساختمانی، انتشارات دانشگاه تهران، چاپ سوم، تهران.

یوسفوند، ف.، ۱۳۹۳. تاثیر نوع سنگدانه در دوام بتن گوگردی، پایان نامه کارشناسی ازشد زمین شناسی مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران.

Alexander, M., Mindess, S., 2005. Aggregates in Concrete: CRC Press.

Bates, R., Crow, L., 1970. Strengths of sulfur-basalt concretes.

Beshr, H., Almusallam, A., Maslehuddin, M., 2003. Effect of coarse aggregate quality on the mechanical properties of high strength concrete. Construction and building materials, 17(2), 97-103.

ACI-committee-221., 2007. Guide for Use of Normal Weight and Heavyweight Aggregates in Concrete. American Concrete Institute.

ACI., 1993. Guide for mixing and placing sulfur concrete in construction: reported by ACI Committee 548. ACI 548.2R-93. American Concrete Institute.

Emery, J. J., 1983. Properties of Flexible Pavement Materials: A Symposium: ASTM International.

Gannon, C. R., Wombles, R. H., Hettinger, W., Watkins, W. D., 1983. New concepts and discoveries related to the strength characteristics of plasticized sulfur Properties of flexible pavement materials: ASTM International.

Lo, T. Y., Tang, W., Cui, H., 2007. The effects of aggregate properties on lightweight concrete. Building and Environment, 42(8), 3025-3029.

McBee, W. C., Sullivan, T. A., 1982. Modified sulfur cement: Google Patents.

Mohamed, A.-M. O., El-Gamal, M., 2010. Sulfur concrete for the construction industry: a sustainable development approach: J. Ross Publishing.

Mohamed, A.-M. O., El Gamal, M., 2009. Hydro-mechanical behavior of a newly developed sulfur polymer concrete. Cement and Concrete Composites, 31(3), 186-194.

Vlahovic, M. M., Martinovic, S. P., Boljanac, T. D., Jovanic, P. B., Volkov-Husovic, T. D., 2011. Durability of sulfur concrete in various aggressive environments. Construction and building materials, 25(10), 3926-3934.