تحقیقات بتن
سال سیزدهم، شمارهٔ سوم
پائیز ۹۹
ص ۱۲۴ – ۱۰۷
تاریخ دریافت: ۹۸/۱۱/۱۰
تاریخ پذیرش: ۹۹/۴/۳۰

بررسی خواص مهندسی سنگدانه‌های مختلف و تأثیر آن برخصوصیات مقاومتی بتن

فرهاد پیرمحمدی علیشاه *
گروه عمران،دانشکده فنی و مهندسی،دانشگاه آزاد اسلامی واحد شبستر، شبستر.

چکیده
در این تحقیق به منظور ارزیابی خواص مهندسی سنگدانه‌ها در بتن، سنگ‌هایی از معادن مختلف با توجه به ترکیب ژئوشیمیایی آنها، انتخاب و سپس برای ساخت بتن مورد استفاده قرار گرفته است. در ابتدا خصوصیات فیزیکی و مکانیکی سنگدانه‌های انتخاب شده در آزمایشگاه تعیین و در مراحل بعد مصالح موجود به سنگدانه‌هایی در اندازه شن و ماسه خرد شده و برخی خصوصیات سنگدانه‌ها مثل شکل، تخلخل، ارزش ضربه‌ای، ارزش فشاری و دانه‌بندی آنها تعیین شده است. سپس طرح اختلاط ثابتی از سنگدانه‌های موجود بتن تهیه و خصوصیات مکانیکی بتن تهیه شده از قبیل مقاومت فشاری، مقاومت کششی و مدول الاستیسیته بعد از گذشت ۷، ۲۸ و ۹۰ روز تعیین شده است. در ادامه نتایج بدست آمده مورد تحلیل و تجزیه قرار گرفته و درصد تاثیر هر یک از خواص سنگدانه‌ها بر مقاومت بتن مورد بررسی قرار گرفته است. این درصد تاثیر، راهنمای مفیدی برای شناسایی سنگدانه‌های مطلوب و همچنین آزمایش‌های مورد نیاز و ضروری برای اکتشاف منابع سنگدانه‌ای می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد که به ترتیب خواص مقاومتی، سایش، وزن مخصوص و تخلخل، شکل و بافت، دوام و پایداری سنگدانه‌ها بیشترین تاثیر را بر مقاومت بتن دارند.

واژه‌های کلیدی: **سنگدانه، طرح اختلاط، خصوصیات فیزیکی و مکانیکی، درصد تأثیر، بتن.**

* نویسنده مسئول: Petrofarhad@iaushab.ac.ir

۱- مقدمه

بتن به‌عنوان یکی از ترکیباتی که برای ساخت سازه‌های بتنی در پروژه‌های عمرانی از آن استفاده می‌شود، از اهمیت زیادی برخوردار می‌باشد. مواد و مصالح تشکیل دهندهٔ بتن شامل سیمان، سنگدانه، آب و مواد افزودنی است که کارایی، مقاومت و سایر خصوصیات بتن تابع مواد تشکیل‌دهندهٔ آن می‌باشد. یکی از اجزای تشکیل دهندهٔ بتن، سنگدانه‌ها می‌باشد که ۷۵ درصد حجم بتن را تشکیل می‌دهد. سنگدانه‌ها نه تنها در مقاومت بتن موثرند، بلکه دوام و پایداری بتن تا حد زیادی تحت تاثیر آنها قرار دارد. وظیفهٔ این مصالح در بتن، تحمل و انتقال بارهای اعمالی (توسط ذرات درشت) و پر نمودن فضای خالی (توسط ذرات ریزدانه) بین دیگر اجزای تشکیل‌دهندهٔ آن می‌باشد. سنگدانه‌ها بر خواص بسیار مهم بتن سخت شده نظیر پایداری حجمی و کنترل جمع‌شدگی، چگالی، مقاومت در برابر شرایط مخرب محیطی، خواص حرارتی و لغزندگی رویه بتنی و همچنین بر اقتصادی شدن بتن تأثیر می‌گذارند. از نقطه نظر سنگ‌شناسی، سنگدانه‌ها به گروه‌های متعددی که خواص تقریبا مشابهی دارند تقسیم می‌شوند. طبقه‌بندی برخی شامل (BS) سنگدانه‌های طبیعی بر اساس استاندارد بریتانیایی گروه بازالت، گروه گرانیت، گروه آهک، گروه شیست، گروه ماسه‌سنگ، گروه پورفیری، گروه گابرو و گروه کوارتزیت می‌باشد [۱].

استاندارد ASTM نیز طبقه‌بندی برای کانی‌ها ارائه داده است که این طبقه‌بندی شامل کانی‌های کربناتی، فلدسپات، سولفاتی، فرومنیزیم، میکایی، سولفیدآهن، رسی، زئولیت‌ها، اکسیدهای‌آهن و سیلیسی می‌شود[۲]. همچنین طبق تعریف موسسهٔ بتن آمریکا (ACI)، سنگدانه‌ها، دانه‌هایی نظیر شن، ماسه، سنگ شکسته، بتن با سیمان آبی خرد شده یا روبارهٔ فلزی (Steel Slag) که به کمک سیمان هیدرولیکی جهت ساخت بتن یا ملات به کار می‌رود [۱].

بررسی خواص زمین‌شناسی و سنگ‌شناسی مصالح سنگدانه‌ای بتن از جمله مواردی است که تأثیر عمده‌ای بر مقاومت بتن، بهینه کردن طرح اختلاط و دیگر خصوصیات انواع بتن دارد. عدم وجود مطالعات گسترده و اساسی در این مورد و اهمیت بسزای آن در پژوهش‌های گوناگون، باعث شده که بررسی در این زمینه حایز اهمیت و ضروری باشد. مطالعات اساسی و کارآمد در این زمینه باعث مطلوب بودن خواص بتن و جلوگیری از عوامل مضر سنگدانه‌ای در آن می‌شود [۲]. محققان بسیاری در مورد تأثیر خواص سنگدانه‌ها بر بتن مطالعاتی را انجام داده‌اند، برخی از این مطالعات در ارتباط با مسائل اجرایی بتن، طرح اختلاط، تأثیر کانی‌شناسی سنگدانه‌ها بر کیفیت بتن، تاثیر جنس سنگدانه‌ها بر سرعت انتشار امواج فشاری در بتن، تأثیر اندازه سنگدانه‌ها بر کیفیت بتن، تاثیر مصالح ریزدانه در بتن، تأثیر سنگدانه‌ها در کارایی بتن و تأثیر جنس و شکل درشت دانه‌ها بر کیفیت بتن می‌باشد [۳، ۴ و ۵].

در یک سری از تحقیقات نشان داده شده است که از نظر مقاومت نهایی بتن، اصولا بتنی که با سنگدانه‌های شکسته ساخته می‌شود به دلیل امکان درگیر شدن بهتر دانه‌ها با یکدیگر و برقراری اصطکاک بیشتر بین آنها مقاوم‌تر خواهد بود. به همین دلیل توصیه می‌شود که در مواردی که مقاومت خیلی بالا مورد نظر باشد از سنگدانه‌های شکسته استفاده شود. همچنین سنگدانه‌های پولکی و کشیده، مقاو مت فشاری بتن را کم می‌کند و این امر را می توان ناشی از اتصال ناکافی سنگدانه‌های پولکی با ملات سیمان دانست [۶].

در تحقیقی دیگر عنوان شده است که، مقاومت و دوام بتن مستقیماً متأثر از تعداد، نوع، اندازه و توزیع درصد منافذ در خمیر سیمان، سنگدانه و سطح مشترک بین خمیر سیمان و سنگدانه است. به عنوان مثال، مقاومت و مدول الاستیسیته بتن تحت تاثیر کل حجم منافذ موجود در بتن قرار دارد [۷]. در حالی که نفوذپذیری وابسته به تخلخل و اتصال منافذ موجود در خمیر سیمان و ریزترک‌های موجود منافذ موجود در بتن، خصوصاً در سطح مشترک بین خمیر سیمان و سنگدانه می‌باشد [۸].

با بکارگیری سه نوع شکل سنگدانه (با درجه گردی متفاوت) این نتیجه حاصل شده است که هر چه میزان گردی سنگدانه افزایش یابد بطور متناظر، میزان نفوذپذیری بتن نیز با افزایش در نسبت آب به سیمان برای سنگدانه‌های با درجه گردی بالاتر، بیشتر است [۹]. با افزایش درجه زبری سطحی و نسبت تحدب (گردی) سنگدانه بر مقاومت فشاری بتن افزوده می‌شود [۱۰].

اندازهٔ سنگدانه تأثیر به سزایی در نفوذپذیری و دوام بتن دارد بطوریکه مشاهده گردیده است که با کاهش اندازه سنگدانه، از میزان نفوذپذیری بتن نیز کاسته می‌شود [۹]. همچنین گفته شده است که با افزایش نسبت سنگدانه به سیمان، مقدار نفوذپذیری

بتن افزایش می‌یابد [۱۱]. در تحقیق دیگری دلیل بهبود پارامترهای مربوط به نفوذ پذیری بتن، بهبود خواص ناحیه انتقال و کاهش میزان خلل و فرج در سیستم منافذ بتن عنوان گردیده است [۱۲].

نوع کانی سنگدانه‌ها نیز در میزان نفوذپذیری بتن تأثیر به سزایی دارد. بعضی سنگدانه‌ها مانند بازالت و کوارتز در مقایسه با بعضی دیگر از جمله دولومیت پیوستگی کمتری با خمیره سیمان ایجاد می‌کنند و بر اثر جمع شدگی و یا تغییرات دما و رطوبت در بتن، ریزترک‌ها در نواحی پیوستگی خمیر و سنگدانه به سرعت گسترش می‌یابد و باعث افزایش نفوذپذیری می‌گردد. ذرات با اشکال پولکی و طویل می‌توانند به نحو نامطلوبی روی دوام بتن اثر بگذارند زیرا دانه‌های پولکی تمایل به قرار گرفتن در یک جهت دارند و سبب آب انداختگی بتن می‌شود و همچنین منافذ هوا در زیر این سطوح جمع می‌شوند [۱۳].

دانه‌بندی مناسب سنگدانه‌ها نیز از عوامل مهم در نفوذپذیری بتن می‌باشد، بطوریکه با کاهش یا عدم استفاده از ریزدانه (ماسه)، نفوذپذیری بتن افزایش می‌یابد [۱۴]. در ارتباط با شکل سنگدانه‌ها، دانه‌های گرد شن و ماسه طبیعی از دانه‌های زاویه‌دار به دست آمده از سنگ‌های خرد شده متمایزند.

اتصال سنگدانه به سیمان به ویژگی‌های مکانیکی همچون بافت سطحی سنگدانه مربوط است بطوریکه ملات سیمان چسبندگی بهتری با سنگدانه‌های زبر در مقایسه با سنگدانه‌های صاف و صیقلی دارد. این اتصال هیچ گاه پیوسته و مطلوب نبوده و آثار موضعی و ناپیوستگی‌ها همواره نمایان است. به عنوان مثال سطح سنگدانه‌های بازالت بسیار کم توسعه یافته و متبلور است و این یکی از دلایلی است که موجب می‌شود اتصال سنگدانه‌های بازالت به ماتریس معمولا در مقایسه با سنگ‌هایی نظیر ماسه سنگ، آهک و ... ضعیف بوده و ترک‌ها بیشتر آماده توسعه در سطح مشترک باشند. در سنگدانه‌های متخلخل ضمن جذب آب بیشتر، دوام بتن در مقابل تر و خشک شدن متناوب و یخ زدن و ذوب شدن یخ، کاهش می‌یابد [۱۳].

در این تحقیق در جهت تکمیل مطالعات گذشته، نمونه‌ها به صورتی انتخاب شده که در درجهٔ اول در برگیرنده گروه‌های مختلفی از سنگدانه‌ها باشد و در درجهٔ دوم، کلیهٔ خواص سنگدانه‌ها با پارامترهای مکانیکی بتن برازش شده و در درجهٔ سوم این که سهم و درصد هر یک از خواص سنگدانه‌ها بر خواص مکانیکی بتن تعیین شده است [۲]. مصالح سنگدانه‌ای استفاده شده برای ساخت بتن در این تحقیق از انواع مختلف سنگ‌ها بر اساس نحوه تشکیل آنها (رسوبی، آذرین و دگرگونی) و از مناطق مختلف جغرافیایی ایران گردآوری شده است. پس از انجام آزمایش‌های مربوطه بر روی سنگدانه‌ها، از آنها بتن تهیه و در ادامه خواص بتن ساخته شده مورد بررسی قرار گرفته است. سپس نتایج بدست آمده تجزیه و تحلیل شده و در ادامه برازش‌هایی بین خواص مهندسی سنگدانه‌ها و مقاومت بتن انجام شده است. در انتها نیز با استفاده از برنامه‌های آماری درصد تاثیر هر یک از خواص سنگدانه بر کیفیت بتن مشخص شده است. این درصد تاثیر، راهنمایی مفیدی برای شناسایی سنگدانه‌های مطلوب و همچنین آزمایش‌های مورد نیاز و ضروری برای اکتشاف منابع سنگدانه‌ای خواهد بود.

۲- مواد و روش

۲-۱- سیمان

سیمان مورد استفاده جهت ساخت بتن، سیمان پرتلند پوزولانی ساخت شرکت سیمان صوفیان تحت عنوان سیمان‌های آمیخته مطابق با استاندارد ASTM C 496 [۱۵] می‌باشد. جدول ۱ خصوصیات فیزیکی و شیمیایی سیمان مورد استفاده را نشان می‌دهد. این خواص در آزمایشگاه اندازه‌گیری شده و با خواص سیمان پرتلند پوزولانی استاندارد [۳] مقایسه شده است.

۲-۲- سنگدانه‌ها

سنگدانه‌های استفاده شده در این تحقیق طبق تقسیم‌بندی انجمن بتن آمریکا [۱] سنگ شکسته می‌باشند که از فرآیند سنگ‌شکنی سنگ‌هایی که در ادامه توصیف می‌شوند، بدست آمده است (شکل ۱، ۲ و ۳)

شکل ۱- تصویری از سنگدانه‌های آذرین مصرفی

شکل ۲- تصویری از سنگدانه‌های رسوبی مصرفی

شکل ۳- تصویری از سنگدانه‌های دگرگونی مصرفی

جدول ۱- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی سیمان مورد استفاده

خواص فیزیکی و مکانیکی بتن			ترکیب شیمیایی	
نام ویژگی	ویژگی استاندارد	ویژگی سیمان استفاده شده	نام ترکیب	مقدار درصد
نرمی (متر مربع بر کیلوگرم)	۳۰۰	۳۴۰	L.O.I	۱/۵۰
سلامت			Na_2O	۰/۵۳
انبساط کلی (میلی متر)	۱/۰حداکثر	۰/۹۸	MgO	۲/۸۴
انبساط در کوره (درصد)	۰/۸ حداکثر	۰/۰۷۷	Al_2O_3	۴/۵۷
زمان گیرش (دقیقه)			SiO_2	۲۲/۵
اولیه	۳۰ حداقل	۱۱۰	P_2O_5	۰/۱
نهایی	۶۰۰ حداکثر	۱۶۰	SO_3	۲/۰۱
مقاومت‌فشاری(مگاپاسکال)			K_2O	۰/۹۶
۳ روزه	۱۶ حداقل	۳۳	CaO	۶۲/۱۲
۷ روزه	۲۲ حداقل	۴۱	TiO_2	۰/۲۳
۲۸ روزه	۳۳ حداقل	۵۲	MnO	۰/۱۵
-	-	-	Fe_2O_3	۲/۴۹

۲-۲-۱- خواص سنگ‌شناسی سنگدانه‌ها

در انتخاب سنگدانه‌ها دقت شده است که از گروه‌های مختلف و همچنین دارای خواص فیزیکی و مقاومتی متفاوت باشد. سنگدانه‌های آذرین به‌کار گرفته شده شامل آندزیت، گرانیت، دیوریت، بازالت، توف و سنگ‌های رسوبی نیز شامل لوماشل، ماسه‌سنگ و دولومیت می‌باشد. نمونه‌های گنایس و مرمر نیز در رده سنگ‌های دگرگونی قرار می‌گیرند. پس از شناسایی ابتدایی سنگ‌ها در معدن، از آنها نمونه‌گیری شده و پس از بسته بندی به آزمایشگاه انتقال یافته است. این معادن در استان آذربایجان شرقی و در مناطق مختلف نظیر شبستر، تبریز، مراغه، اهر و مرند قرار دارند. برای مطالعه خواص سنگ‌شناسی از نمونه‌ها مقطع نازک تهیه و با میکروسکوپ مطالعه شد. در بررسی مقاطع میکروسکوپی، بافت، ساخت و دگرسانی مطالعه گردید. برای پی بردن به کانی‌های تشکیل دهنده و مطالعه بیشتر، آنالیز شیمیایی نیز از نمونه‌ها تهیه گردید [۲]. آنالیز XRF نمونه‌ها و دیگر خواص سنگدانه‌ها در مقاطع نازک و نمونه دستی مطالعه و نام سنگ مشخص گردید. خصوصیات سنگ‌شناسی وکانی‌شناسی سنگدانه‌های استفاده شده در جدول ۲ و ۳ نشان داده شده است.

۲-۲-۲- خصوصیات فیزیکی سنگدانه‌ها

الف- شکل سنگدانه: سنگدانه‌های طبیعی از لحاظ زمین‌شناسی براساس اندیس گردشدگی و کرویت تقسیم‌بندی می‌شوند.

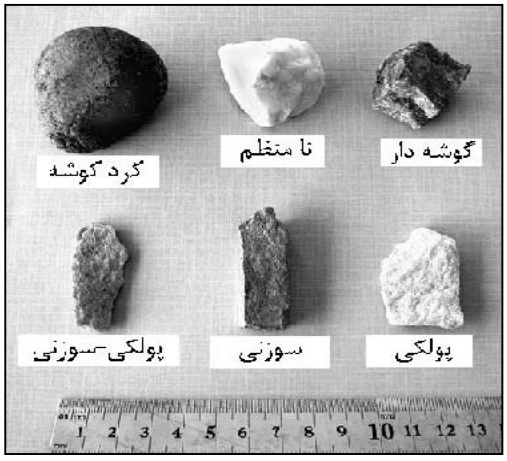
جدول ۲- خصوصیات سنگ شناسی سنگ‌دانه‌ها

نام تجاری	لوماشل	توف	ماسه‌سنگ	آندزیت	دیوریت
نام پترولوژی	آواری-زیستی	توف	ماسه‌سنگ	تراکی‌داسیت	کوارتزمونزونیت
دگرسانی و هوازدگی	هوازدگی زیاد	دگرسانی زیاد	هوازدگی زیاد	دگرسانی ناچیز	دگرسانی بیوتیت
رخ و شیستوزیته	ندارد	ندارد	ندارد	ندارد	ندارد
	کوارتز	کوارتز	کوارتز	پلاژیوکلاز	کوارتز
کانی‌های عمده	خرده صدف	فلدسپات	پلاژیوکلاز	بیوتیت	بیوتیت
	فلدسپار	پلاژیوکلاز	فلدسپار	فلدسپار	فلدسپار

جدول ۳- خصوصیات سنگ‌شناسی سنگ‌دانه‌ها

نام تجاری	بازالت	دولومیت	گرانیت	مرمر	گنایس
نام پترولوژی	بازالت	دولومیت	کوارتز مونزودیوریت	مرمر	کوارتز مونزونیت
دگرسانی و هوازدگی	دگرسانی کم	هوازدگی کم	دگرسانی کم	هوازدگی کم	دگرسانی زیاد
رخ و شیستوزیته	ندارد	ندارد	ندارد	ندارد	دارد
	آمفیبول	خرده صدف	آلکالی‌فلدسپات	کلسیت	بیوتیت
کانیهای عمده	پیروکسین	میکریت	پلاژیوکلاز		کوارتز
	آلکالی‌فلدسپار	فلدسپار	بیوتیت	فلدسپار	پلاژیوکلاز

روش آنالیز شکل سنگدانه‌ها در فضای دو بعدی توسط [۱۶] پیشنهاد شده است. این روش بر پایه روش توسعه یافته توسط [۱۷] می‌باشد که روشی دقیق و استاندارد شده‌ای برای تعیین شکل سنگدانه‌ها می‌باشد[۵]. در این مطالعه از سنگدانه‌های شکسته استفاده شده است. به دلیل تاثیر شکل سنگدانه‌ها از خصوصیات دستگاه سنگ شکن، از دستگاهی استفاده شده که ذرات را بطور تقریبی بصورت مکعبی خرد می‌نماید. هر چند که شکل ذرات شکسته شده به ناپیوستگی‌ها و یا رخ موجود در سنگ مادر بستگی دارد که این مسئله در سنگ‌های خرد شده و سنگ‌های دگرگونی که کانی‌های صفحه‌ای یا سوزنی دارند مشاهده می‌شود. برای کنترل دستگاه سنگ شکن و همچنین میزان مطلوبیت سنگ مادر به انجام آزمایش‌های تورق و تطویل بسنده شده است. تعیین ضریب تورق و تطویل سنگدانه‌ها بر اساس BS EN 933-4:2008 و BS 812-105:1:1989 [۱۸] انجام شده است. از آنجایی که همهٔ نمونه‌ها با یک دستگاه سنگ‌شکن شکسته شده‌اند، ضریب تورق و ضریب تطویل آنها اختلاف کمی نشان داده و کمتر از ۴۰ می‌باشد. همچنین جهت اطمینان از یکسان بودن شکل سنگدانه‌های استفاده شده، پس از شکستن سنگدانه‌ها و سرند کردن آنها، میزان ذرات پولکی شکل در سنگدانه‌های مورد استفاده به کمتر از ۵ درصد محدود شده است. دسته بندی سنگدانه ها از نظر شکل در جدول ۴ ارائه شده است (شکل ۴).



شکل ۴- انواع سنگدانه‌ها از نظر شکل

ب- بافت سطحی سنگدانه‌ها: شکل سنگدانه مطابق روش‌های یاد شده در مبحث قبل قابل انجام می‌باشد ولی برای بافت سنگدانه آزمایش قابل قبولی وجود ندارد. بنابراین از آنجایی که روش مشخص و دقیقی برای اندازه‌گیری بافت سطحی

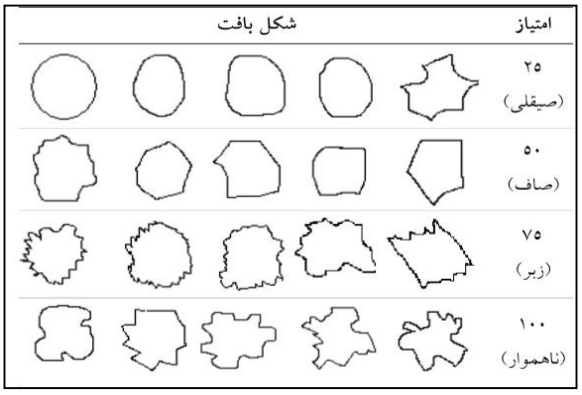
سنگدانه‌ها به صورت کمی وجود ندارد، در این تحقیق سعی شده است که روشی برای این مهم پیشنهاد شود. برای نیل به این هدف، ابتدا مقداری از سنگدانه رد شده از الک ۴/۷۵ (برای ماسه) بر روی لامل ریخته و در زیر میکروسکوپ با بزرگنمایی کم گذاشته شد. همچنین برای درشت دانه‌ها (شن) ذرات رد شده از الک ۱۲/۵میلی متر به صورت (شن)، چشمی مطالعه گردید.

جدول ۴- دسته بندی سنگدانه‌ها از نظر شکل

نوع سنگدانه	دسته‌بندی	توضیح
گرد گوشه	سایش کامل توسط آب یا تغییر شکل در اثر اصطکاک	شن رودخانه‌ای و کنار ساحل، ماسه بادی و ساحلی
بی شکل- نا منظم	قسمتی تغیر شکل یافته در اثر سایش با لبه های گرد	بعضی شن‌ها یا فلینت‌های حفره‌دار
پولکی	سنگ‌هایی که ضخامت کمی نسبت به دو بعد دیگر دارند	سنگ‌های لایه‌ای با ورقه‌ای
تیزگوشه	دارای لبه‌های مشخص در محل تقاطع	سنگ‌های شکسته از همه نوع در سرباره‌های خرد شده
طویل	نسبت به دو بعد دیگران زیاد است	.....
پولکی و طویل	موادی که طول آنها بزرگتر از عرض و عرض آنها بزرگتر از ضخامتشان می‌باشد	

در ادامه بافت سطحی را به چهار رده در محدوده‌های شیشه‌ای، صاف، خشن و ناهموار تقسیم گردید. این طبقه‌بندی بر مبنای شکل دانه‌ها در زیر میکروسکوپ یا بررسی چشمی می‌باشد. پس از انجام این طبقه‌بندی برای همهٔ سنگدانه‌ها، به هر بافت امتیازی نسبت، داده شد. در این طبقه‌بندی به بافت صیقلی سنگدانه امتیاز ۲۵، صاف امتیاز ۵۰ ، زبر امتیاز ۷۵ و به بافت ناهموار نیز امتیاز ۱۰۰ داده شده است. بزرگی و کوچکی امتیار در نتایج تاثیری نداشته و فقط برای مقایسه می‌باشد. بدین ترتیب بافت سطحی از حالت توصیفی به کمی تبدیل گردید. شکل ۵ نتایج این آزمایش در زیر میکروسکوپ و نمونهٔ دستی را نشان می‌دهد. در این شکل با توجه به سطح دانه ها ۴ نوع بافت صیقلی، صاف، زبر و ناهموار مشاهده می‌شود که هر کدام خود دارای اشکال مختلفی است.

ج- هوازدگی و دگرسانی: به طور کلی مقاومت و الاستیسیتهٔ سنگدانه‌ها به ترکیبات، بافت، ساختار و هوازدگی آنها بستگی دارد. بنابراین مقاومت کم سنگدانه‌ها ممکن است ناشی از ضعیف بودن ذرات تشکیل دهندهٔ آنها باشد و یا ممکن است ذرات مقاومت کافی داشته باشند ولی خوب به یکدیگر بافته نشده و به هم نچسبیده باشند. هوازدگی سنگدانه‌ها نیز برخواص فیزیکی و مقاومتی بتن تاثیر بسزایی دارد، برای نمونه هوازدگی سبب می شود که تخلخل لایهٔ خارجی دانه‌های شنی بیشتر گردد و آب زیادتری جذب نماید[۲]. در نتیجه همهٔ عوامل ذکر شده، بتن ساخته شده با این سنگدانه‌ها از نظر مقاومت و دوام در سطح نامطلوبی قرار خواهد داشت.



شکل ۵- کمی نمودن بافت سنگ‌ها

هوازدگی و دگرسانی کانی‌های سنگدانه‌ای نیز از طریق میکروسکوپ پلاریزان مطالعه گردید. به طور مشابه، میزان هوازدگی نیز در رده‌های خیلی هوازده، متوسط هوازده، کم هوازده و بدون هوازدگی قرار گرفت. برای مثال در ردهٔ خیلی

هوازده، هیچ پیریتی در سنگ باقی نمانده است. اکسید و هیدرواکسیدهای آهن موجود در سنگ به رنگ زرد و قرمز دیده می‌شود و کانی‌های رسی نیز حضور دارند. کلسیت، کلریت و اپیدوت در ترکیب سنگ موجود نمی‌باشد و سنگدانه‌ها گرد شده و نیمه گرد شده می‌باشند [۲].

د- وزن مخصوص و جذب آب: وزن مخصوص و جذب آب سنگدانه‌های ریز و درشت در حالت اشباع با سطح خشک(Saturated Surface Dry, SSD) به روش (EN BS 812:1975 1097-6:2000) [۱۹] تعیین شد.

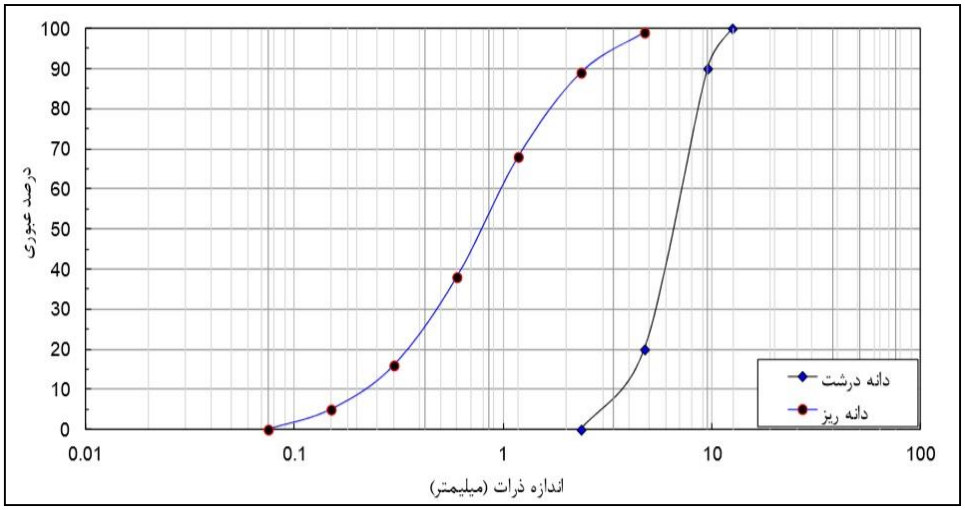
ه- دانه‌بندی: دانه‌بندی مصالح بوسیلهٔ الک انجام شده است. معمولا تعداد ۹ الک برای دانه‌بندی و گروه‌بندی مصالح به کار می رود که پنج الک آن در محدودهٔ ماسه، یک الک مرز شن و ماسه و سه الک در محدودهٔ شن می‌باشد (شکل ۶).

شکل ۶- الک و ویبراتور برای آزمایش دانه‌بندی خاک

شکل ۷ منحنی دانه بندی شن و ماسه مصرفی به همراه محدودهٔ استاندارد آن را نشان می‌دهد. ضریب نرمی ماسه نیز ۲/۸۶ بدست آمد که طبق آیین نامه ASTM C 33 [۲۰] در محدودهٔ مجاز می‌باشد. ممکن است دانه‌بندی‌های مختلف تأثیر متفاوتی بر روی مقاومت بتن داشته باشد. برای این منظور از دانه‌بندی یکسان استفاده شده است. در این راستا ابتدا منحنی استاندارد انتخاب شده و سپس شن و ماسه طبق منحنی دانه‌بندی ساخته شده است. ساخت دانه‌بندی بدین صورت بوده که ابتدا مصالح را به اندازه کافی با ۹ الک آماده شده و طبق منحنی دانه‌بندی به اندازه مشخص باهم مخلوط و دانه‌بندی دلخواه بدست آمده است.

و- مواد زیان‌آور: برخی از سنگ‌ها با قلیایی سیمان واکنش مخربی انجام می‌دهند که منجر به فعالیت قلیایی یا فعالیت کربناتی سنگدانه می‌شوند. واکنش دستهٔ اول در بتن‌هایی که در معرض شرایط محیطی مرطوب قرار داشته‌اند و سنگدانه حاوی میزان کافی اپال، کلسدونی، تریدیمیت، کریستوبالیت، ریولیت، آندزیت یا داسیت‌ها بوده‌اند منجر به انبساط شدید و مخربی گشته است. دسته بعدی شامل واکنش‌هایی است که بین سنگدانه‌های دولومیتی و قلیایی‌های موجود در سیمان رخ می‌دهد که فعالیت کربناتی نامیده می‌شود.

جهت تعیین واکنش‌پذیری سنگدانه‌ها طبق آیین‌نامه ASTM C289 و ASTM C294 [۲۲،۲۱] نمونه‌ای از سنگدانه‌های دانه‌بندی شده در یک محلول اشباع شده هیدرواکسید سدیم قرار داده می‌شود و بعد از نگهداری در دمای ۸۰ درجه سلسیوس، اسیدیتهٔ آن اندازه‌گیری و مقدار سیلیس حل شده سنجیده می‌شود. تفسیر نتایج طبق استاندارد مذکور انجام شده و سنگدانه مشکوک به واکنش سیلیسی - قلیایی مشاهده نگردید [۲۳]. همچنین سنگدانه‌ها عاری از مواد رسی و مواد آلی بوده است.



شکل ۷- منحنی دانه‌بندی مصالح ریزدانه و درشت‌دانه

جهت تعیین واکنش‌پذیری سنگدانه‌ها طبق آیین‌نامه ASTM C289 و ASTM C294 [۲۲،۲۱] نمونه‌ای از سنگدانه‌های دانه‌بندی شده در یک محلول اشباع شده هیدرواکسید سدیم قرار داده می‌شود و بعد از نگهداری در دمای ۸۰ درجه سلسیوس، اسیدیتهٔ آن اندازه‌گیری و مقدار سیلیس حل شده سنجیده می‌شود. تفسیر نتایج طبق استاندارد مذکور انجام شده و سنگدانه مشکوک به واکنش سیلیسی- قلیایی مشاهده نگردید [۲۳]. همچنین سنگدانه‌ها عاری از مواد رسی و مواد آلی بوده است.

ز- تعیین سرعت صوت: برای تعیین سرعت صوت، از دستگاه اندازه‌گیری سرعت موج فشاری برای سنگ بکر کمک گرفته شد و طبق استاندارد ISRM [۲۴] بر روی نمونه‌های استوانه‌ای در حالت خشک و اشباع با سطح خشک انجام گردید (شکل ۸).

شکل ۸- (الف) مغزه‌های آزمایش سرعت موج P (ب)دستگاه آزمایش به همراه نحوه اتصال مغزه به دیوسرها

روش کار در این آزمایش عبارت است از ارسال امواج فشاری به داخل نمونه و اندازه‌گیری سرعت آن می‌باشد. پس از انجام آزمایش‌های فیزیکی بر روی مصالح سنگدانه‌ای، نتایج آزمایش‌ها در جدول ۵ نشان داده شده است.

جدول ۵- خصوصیات فیزیکی سنگدانه‌ها

نام	بافت(٪)	هوازدگی(٪)	تخلخل(٪)	جذب آب(٪)		وزن مخصوص		سرعت‌موج‌فشاری(m/s)	
شرایط	درشت	درشت	درشت	درشت	ریز	درشت	ریز	خشک	اشباع
توف	۸۰	۲۷	۱۷	۵/۱۴	۸/۲۷	۲/۵۰	۲/۴۰	۴۲۶۳	۴۳۱۷
ماسه‌سنگ	۸۱	۹۶	۱۲	۵/۱۲	۵/۴۵	۲/۶۰	۲/۵۰	۴۱۳۴	۴۲۱۵
مرمر	۳۲	۸	۹	۳/۱۳	۳/۴۰	۲/۶۸	۲/۶۴	۶۵۶۱	۶۸۴۵
لوماشل	۹۶	۹۴	۲۳	۷/۰۰	۱۲	۲/۷۹	۲/۵۵	۳۰۰۸	۳۳۵۱
گرانیت	۱۱	۷	۸	۳/۳۰	۴/۱۴	۲/۶۷	۲/۶۵	۴۶۸۷	۴۹۱۸
گنایس	۱۶	۹۴	۱۰	۴/۱۰	۶/۷۸	۲/۷۹	۲/۶۶	۲۸۰۸	۳۵۵۱
دولومیت	۷۲	۲۳	۱۸	۳/۵۸	۳/۷۴	۲/۷۴	۲/۶۷	۶۰۵۰	۶۱۷۲
دیوریت	۲۱	۹۷	۱۷	۶/۰۰	۷/۴۱	۲/۴۰	۲/۳۵	۴۰۲۳	۴۱۳۴
بازالت	۲۷	۷۶	۱۲	۳/۶۸	۴/۷۳	۲/۹۰	۲/۷۹	۶۰۷۶	۶۲۹۹
آندزیت	۳۴	۲۴	۲۹	۵/۱۴	۷/۴۵	۲/۵۵	۲/۵۰	۳۳۲۶	۳۹۹۵

۲-۲-۳-خصوصیات مکانیکی سنگدانه‌ها

جهت کسب خواص مکانیکی سنگدانه‌ها آزمایش‌های متعددی انجام شده است. در ابتدا از نمونه‌ها مغزه‌هایی با قطر ۵۴ میلی متر با ارتفاع ۱۲ سانتی‌متر تهیه شده است. پس از آماده سازی مغزه‌ها، آزمایش‌های لازم در شرایط خشک و اشباع بر روی آنها صورت گرفته است (جدول ۶).

الف - مقاومت فشاری تک‌محوری سنگدانه‌ها: برای انجام آزمایش مقاومت تک محوری فشاری طبق روش پیشنهادی ISRM [۲۴]، از نمونه‌هایی به شکل استوانه‌ای با نسبت ارتفاع به قطر ۲ الی ۲/۵ استفاده شده است. نمونه مورد آزمایش پس از استقرار در دستگاه با سرعت ۰/۱ تا ۰/۳ مگاپاسکال در ثانیه تا حد گسیختگی بارگذاری می‌شود.

ب- مقاومت کششی برزیلی سنگدانه‌ها : این آزمایش بر اساس روش پیشنهادی [ISRM [۲۴ بر روی نمونه‌هایی با نسبت طول به قطر ۰/۵ در دو حالت خشک و اشباع انجام شده است.

ج- ارزش فشاری سنگدانه ها (ACV): این آزمایش طبق استاندارد (BS EN 1097-2:1998) BS 812-110:1990 بر روی نمونه‌ها به صورت خشک و اشباع انجام گرفته است [۱۹].

د-ارزش ضربه‌ای سنگدانه‌ها (AIV): این آزمایش نیز طبق (BS EN 1097-2:1998) BS 812-112:1990 انجام گرفته است [۱۹].

ه- سختی واجهشی چکش اشمیت سنگدانه‌ها: آزمایش سختی واجهشی چکش اشمیت مطابق با ISRM [۲۴] بر روی سطح صاف نمونه‌های سنگ بکر انجام شده است. نوع چکش به کار رفته N34 بوده که دارای انرژی برخوردی ۰/۷۴ و عمود بر نمونه انجام شده است، [۲].

جدول۶- خصوصیات مکانیکی سنگدانه‌ها

نام	مقاومت فشاری (MPa)		مقاومت‌کششی (MPa)		ارزش ضربه (٪)		ارزش فشاری (٪)		عدد سختی	چکش اشمیت
شرایط	خشک	اشباع	خشک	اشباع	خشک	اشباع	خشک	اشباع	خشک	اشباع
توف	۱۰۷/۰۳	۵۷/۸۸	۱۱/۵۰	۹/۹۴	۱۲/۳۱	۱۷/۲۱	۱۳/۳۳	۱۵/۰۲	۴۹	۴۷
ماسه‌سنگ	۱۷/۰۰	۱۵/۰۰	۳/۵۰	۳/۲۰	۲۴/۰۰	۲۸/۰۰	۲۹/۰۰	۳۱/۰۰	۲۸	۲۵
مرمر	۹۷/۷۴	۶۸/۷۸	۸/۱۵	۵/۷۳	۲۶/۹۹	۳۱/۸۳	۳۶/۱۱	۳۹/۲۷	۳۳	۳۰
لوماشل	۱۱/۴۰	۶/۲۸	۱/۶۰	۱/۱۰	۴۶/۰۲	۵۳/۲۰	۶۶/۲۳	۷۰/۶۸	۱۳	۱۰
گرانیت	۱۲۰/۳۲	۱۱۵/۶	۱۱/۶۶	۸/۶۵	۱۷/۵۹	۱۸/۵۶	۲۰/۴۴	۲۰/۸۱	۳۲	۲۹
گنایس	۶۹/۹۰	۵۳/۳۰	۷/۶۸	۶/۹۴	۱۷/۹۱	۲۱/۱۱	۳۰/۸۰	۳۳/۴۴	۳۹	۳۷
دولومیت	۸۹/۵۶	۶۹/۲۹	۷/۰۸	۵/۴۷	۱۲/۳۲	۱۶/۰۸	۲۴/۵۴	۳۰/۸۳	۴۸	۴۶
دیوریت	۳۵/۰۰	۲۸/۰۰	۲/۹۰	۲/۷۰	۲۶/۶۸	۲۹/۰۱	۴۴/۸۱	۴۸/۶۶	۱۴	۱۱
بازالت	۹۲/۰۰	۷۸/۰۰	۱۰/۲۶	۷/۶۹	۱۳/۱۷	۱۵/۱۹	۲۵/۶۲	۲۹/۸۴	۳۷	۳۵
آندزیت	۶۷/۷۱	۵۶/۷۹	۹/۰۱	۷/۰۸	۱۸/۶۲	۲۱/۳۴	۳۳/۸۲	۳۸/۴۱	۴۲	۴۰

۲-۳-آب

برای ساخت بتن از آب شهر شبستر استفاده شده است که طبق استاندارد (BS EN 1008:2002) BS 3148: 1990 این آب از لحاظ اسیدیته و یون کلر برای مصرف در بتن مناسب می-باشد [۱۸]. همچنین آب عاری از مواد روغنی، جلبک و مواد زاید دیگر بوده است [۱ و ۲۵].

۳- ساخت بتن

در این تحقیق نسبت اختلاط مصالح جهت ساخت بتن بر اساس روش حجمی جهت همه سنگ‌دانه ها یکسان بوده است، این طرح پس از تبدیل به وزنی جهت هر سنگدانه در جدول ۷ نشان داده شده است. در این طرح اختلاط، نسبت آب به سیمان برابر با ۰/۴۴ و مقاومت فشاری طراحی برابر با ۲۵ مگاپاسکال تعیین شده است. همچنین اسلامپ این طرح برابر با ۳۰ میلیمتر و درصد هوای غیر عمدی در بتن نیز یک درصد در نظر گرفته شده است [۲]. پس از تعیین مشخصات مصالح و طرح اختلاط، ساخت بتن بر اساس نسبت وزنی مصالح مختلف در آزمایشگاه و به وسیله دستگاه مخلوط کن انجام گرفت.

آزمایش اسلامپ مطابق ASTM C 143-90 [۲۳] برای هر طرح اختلاط انجام شده است (ASTM C143) [۲۳]. مقدار اسلامپ اندازه‌گیری شده برای هر مخلوط بتنی بین ۲۸ تا ۳۲ میلی متر متغیر بوده است. پس از نمونه‌گیری، سطح خارجی نمونه‌ها تا ۲۴ ساعت در دمای آزمایشگاه و به وسیله گونی پوشش داده شد و در پایان این مدت، نمونه‌ها از قالب خارج و درحوضچه بتن که حاوی آب ۲±۲۲ درجه سانتیگراد بود، تا زمان انجام آزمایش‌های فشاری و کششی نگهداری شده است(شکل ۹).

شکل ۹- تصویری از نمونه های بتنی ساخته شده در آزمایشگاه بتن و مراحل عمل آوری آنها

جدول۷- طرح اختلاط وزنی جهت هر سنگدانه

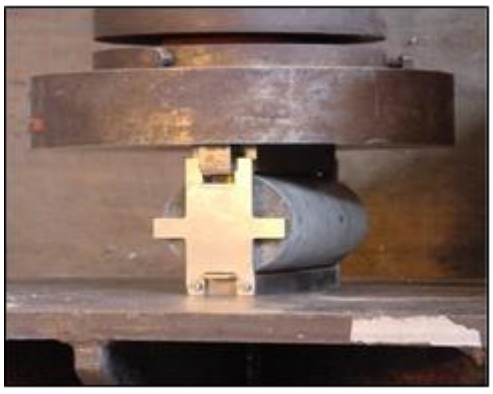
نوع مصالح	سیمان (kg)	آب (kg)	هوا (%)	ماسه (kg)	شن (kg)
توف	۳۴۰	۱۵۰	۱	۷۷۰	۸۹۶
ماسه‌سنگ	۳۴۰	۱۵۰	۱	۸۰۲	۹۳۱
مرمر	۳۴۰	۱۵۰	۱	۸۴۷	۹۶۰
لوماشل	۳۴۰	۱۵۰	۱	۸۱۹	۹۹۸
گرانیت	۳۴۰	۱۵۰	۱	۸۵۰	۹۵۵
گنایس	۳۴۰	۱۵۰	۱	۸۵۳	۹۹۹
دولومیت	۳۴۰	۱۵۰	۱	۸۵۵	۹۸۱
دیوریت	۳۴۰	۱۵۰	۱	۷۵۴	۸۶۰
بازالت	۳۴۰	۱۵۰	۱	۸۹۶	۱۰۳۸
آندزیت	۳۴۰	۱۵۰	۱	۸۰۲	۹۱۳

الف- مقاومت فشاری تک محوری بتن: نمونه‌های مکعبی استاندارد تهیه در روزهای ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه در حالت اشباع با سطح خشک تحت نیروی فشاری طبق استاندارد ، BS 1881-16:1983 (BS EN 12390-3:2002) قرار گرفته است[۱۸]. نیرو بطور یکنواخت، ممتد و بدون ضربه با آهنگ ازدیاد تنش ۰/۱ تا ۰/۳ مگاپاسکال در ثانیه بر روی نمونه اعمال شده است(شکل ۱۰).

ب- مقاومت کششی برزیلی بتن: مقاومت کششی نیز به وسیله دستگاه برزیلی طبق استاندارد ASTM C496 / C496M-11 [۱۵] بر روی نمونه‌های استوانه‌ای انجام گرفته است(شکل ۱۱).

ج- مدول الاستیسیته بتن: پس از انجام آزمون مقاومت فشاری تک محوری و ترسیم منحنی‌های تنش-کرنش، مدول الاستیسیته نمونه‌ها در سنین مختلف تعیین شده است [۲]. تعیین مدول الاستیسیته به روش مماسی (۵۰ درصد مقاومت نهایی) بوده و برای سه دوره عمل آوری تعیین شده است. در نهایت نتایج آزمایش های مکانیکی انجام شده بر روی بتن در جدول ۸ ارائه شده است.

شکل ۱۰- آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی



شکل ۱۱- آزمایش مقاومت برزیلی نمونه‌های بتن

پس از ساخت بتن، آزمایش‌های فیزیکی و مکانیکی بر روی آن انجام گردید. نتایج نشان داد که بین خواص مکانیکی بتن و خصوصیات سنگدانه ها ارتباط تنگاتنگی مشاهده می شود. در این مبحث ارتباط هر یک از ویژگی های سنگدانه‌ها با خواص فیزیکی و مکانیکی بتن تعیین و به صورت نمودارهایی نشان داده شده است.

٤- تجزیه و تحلیل نتایج

٤-١- تأثیر خصوصیات سنگ‌شناسی سنگ‌دانه‌ها بر خواص بتن

بررسی‌های سنگ‌شناسی نشان می‌دهد که سنگدانه‌هایی که حاوی کانی‌های صفحه‌ای مثل میکا و بیوتیت می‌باشند، نمی توانند پیوستگی مناسبی با خمیر سیمان برقرار نمایند که این عامل در سنگدانه آذرین (گرانیت، بازالت) مشهود است. همچنین نتایج نشان داد که کانی های موجود در سنگدانه‌ها نقش

مهمی در تعیین روانی و کارایی بتن تازه دارند. کانی‌هایی با بافت سطحی صاف و بدون هر گونه زبری سبب افزایش کارایی بتن و از طرفی دیگر سبب کاهش مقاومت پیوستگی می‌شود. این گونه سنگدانه‌ها سبب افزایش آب اضافی در بتن شده که خواص مقاومتی بتن سخت شده را تحت تاثیر قرار می‌دهد [۲۵].

جدول۸- نتایج آزمایش‌های انجام گرفته بر روی بتن

نام	مقاومت فشاری (MPa)			مقاومت کششی (MPa)			مدول الاستیسیته (GPa)			عدد سختی چکش اشمیت		
سن بتن	۷	۲۸	۹۰	۷	۲۸	۹۰	۷	۲۸	۹۰	۷	۲۸	۹۰
توف	۱۸/۱۶	۲۷/۰۰	۳۵/۲۲	۱/۶۰	۳/۱۰	۳/۹۶	۱۳/۲۴	۱۹/۹۷	۲۸/۵۴	۱۹	۲۴	۲۶
ماسه‌سنگ	۱۳/۳۳	۱۵/۱۱	۲۶/۶۷	۱/۸۰	۲/۰۰	۲/۷۲	۱۰/۶۱	۱۵/۵۰	۲۲/۰۳	۱۷	۱۸	۳۰
مرمر	۲۰/۰۰	۲۷/۳۳	۳۴/۲۲	۲/۰۹	۳/۱۰	۳/۷۷	۱۷/۹۵	۲۶/۳۱	۳۱/۰۱	۱۸	۲۳	۲۸
لوماشل	۸/۲۹	۱۳/۰۰	۱۸/۴۲	۱/۲۰	۱/۶۰	۲/۱۰	۶/۱۲	۸/۹۸	۱۴/۰۸	۱۷	۱۹	۲۹
گرانیت	۱۶/۳۶	۲۵/۳۳	۳۳/۳۳	۱/۹۱	۲/۲۳	۲/۹۹	۱۵/۵۰	۱۸/۳۶	۲۴/۴۸	۱۷	۲۶	۳۲
گنایس	۲۰/۲۲	۲۸/۴۴	۳۲/۸۹	۱/۸۶	۲/۳۰	۳/۶۸	۱۲/۸۵	۱۹/۸۳	۲۷/۵۴	۲۱	۲۶	۳۱
دولومیت	۱۸/۶۷	۳۲/۴۴	۳۷/۳۳	۲/۹۵	۳/۸۰	۴/۲۳	۱۸/۹۳	۲۶/۳۲	۳۰/۶۰	۱۹	۲۴	۲۳
دیوریت	۴/۴۰	۱۴/۴۴	۲۳/۷۸	۱/۰۵	۱/۸۰	۲/۱۰	۵/۳۹	۱۰/۵۱	۲۲/۸۵	۱۵	۱۷	۲۸
بازالت	۱۲/۰۰	۲۲/۶۷	۳۰/۲۲	۱/۸۰	۲/۴۰	۳/۳۳	۱۴/۰۴	۲۳/۲۶	۲۵/۷۰	۱۶	۱۹	۲۸
آندزیت	۱۷/۰۰	۱۹/۶۷	۲۹/۲۸	۱/۸۰	۲/۰۰	۲/۴۱	۱۵/۰۸	۲۱/۸۱	۳۲/۲۱	۱۶	۱۷	۲۸

٤-۲- تأثیر خصوصیات فیزیکی سنگدانه‌ها بر خواص بتن

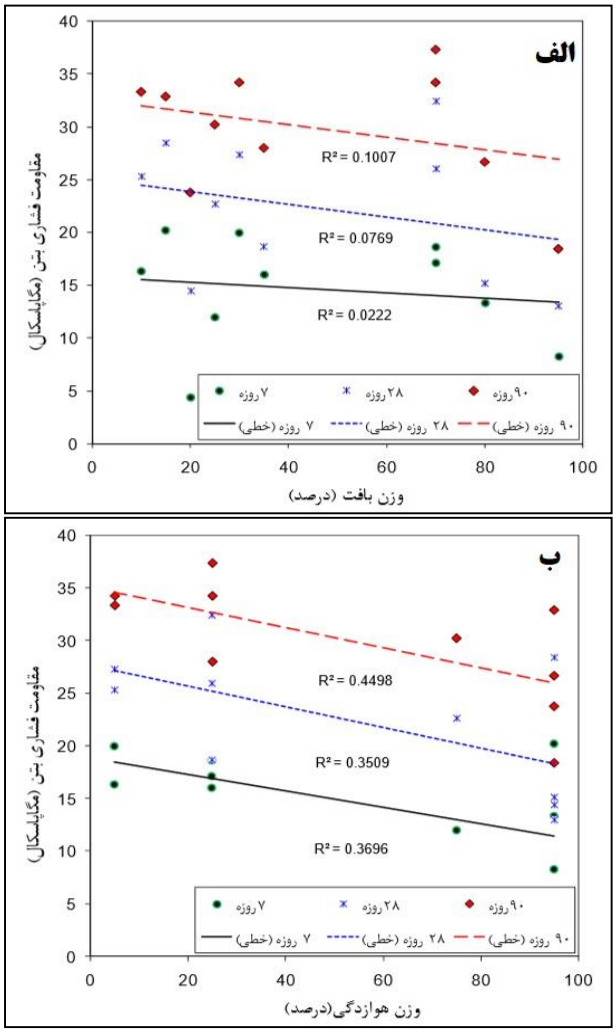
الف - بافت سطحی سنگدانه‌ها: بافت سطحی سنگدانه‌ها پس از امتیازدهی به‌صورت کمی درآمده و با عدد مقاومت فشاری تک محوری ۲۸ روزه بتن برازش داده شد که در (شکل ۱۲ الف) مشاهده می‌شود. امتیاز نسبت داده شده به بافت با افزایش ناصافی و کرموشدگی سنگدانه افزایش می‌یابد. به نظر می‌رسد که در سنین پایین کرمو بودن بافت سنگدانه‌ها باعث کاهش مقاومت بتن نشده و سبب افزایش مقاومت فصل مشترک سنگدانه و بتن نیز می‌شود. اما در سنین بالا کرمو بودن سنگدانه ها باعث کاهش مقاومت بتن می‌شود. ناهنجاری مشاهده شده در همبستگی نمودار مذکور مربوط به سنگدانه‌های گرانیت، توف و لوماشل می‌باشد. لازم به ذکر است که مقاومت بتن در سنین پایین به خصوصیات مقاومتی خمیر سیمان و نسبت آب به سیمان بستگی دارد و در سنین بالا بیشتر به مقاومت سنگدانه‌ها و پیوستگی خمیر سیمان و سنگدانه بستگی دارد [۲۶].

ب- هوازدگی و دگرسانی: پس از کمی نمودن هوازدگی و دگرسانی سنگدانه‌ها، تاثیر این پارامتر بر ویژگی‌های مکانیکی بتن نیز بررسی شده است (شکل ۱۲ب). هوازدگی و دگرسانی از طریق مطالعه بافت و ساخت سنگدانه‌ها بر روی مقاطع نازک، آنالیز شیمیایی توسط XRF، و مطالعه نمونه دستی بدست آمده است.

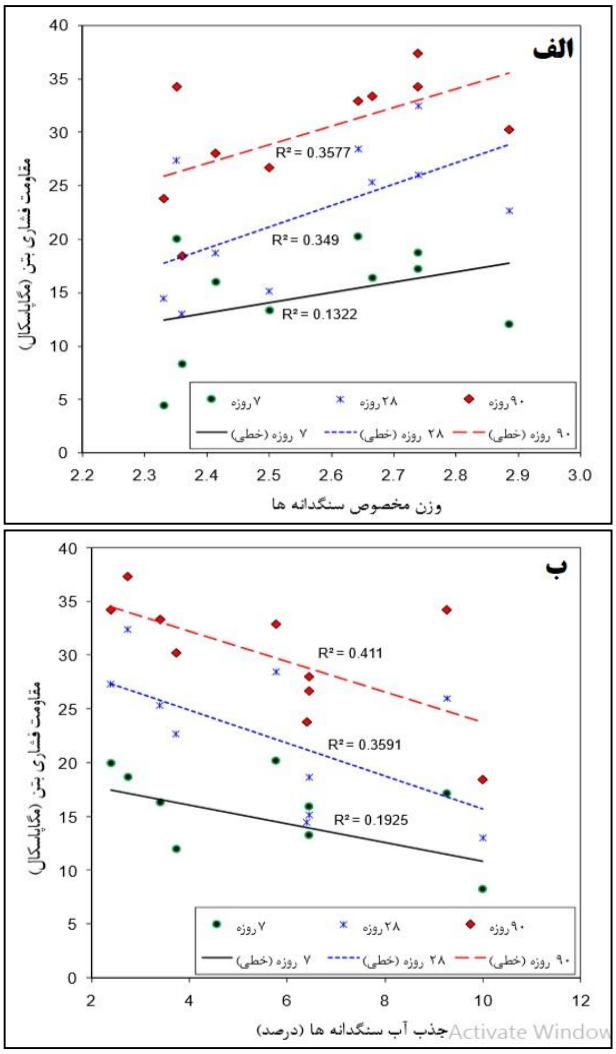
ج- وزن مخصوص سنگدانه‌ها: وزن مخصوص سنگدانه‌ها تابعی از بافت، ساخت، کانیها و تخلخل سنگ می‌باشد که تاثیر آن بر مقاومت بتن مورد تحلیل و تجزیه قرار گرفته شده است. (شکل۱۳الف) تاثیر وزن مخصوص سنگدانه‌ها بر مقاومت فشاری تک محوری بتن را نشان می‌دهد. وزن مخصوص به کار رفته در این همبستگی در حالت اشباع با سطح خشک بوده است. در این نمودار سنگدانه‌های گنایس، دولومیت، گرانیت و آندزیت همبستگی خوبی را نشان داده و از انحراف معیار پایین‌تری برخوردار هستند. یعنی هر چه وزن مخصوص این سنگدانه‌ها بیشتر می‌شود، مقاومت فشاری تک محوری بتن ساخته شده با این سنگدانه‌ها نیز بیشتر می‌شود. چگالی و وزن مخصوص در ساخت بتن سبک از اهمیت زیادی برخوردار می‌باشد و استفاده از آن سبب کاهش بار

مرده در سازه‌ها می‌شود. در بعضی از سنگدانه‌ها مثل بازالت به دلیل وجود عناصر فلزی در ترکیب آن دارای چگالی و وزن مخصوص زیادتری است. به طور کلی هر چه وزن مخصوص سنگدانه‌ها کمتر باشد وزن مخصوص بتن ساخته شده نیز کمتر می‌شود [۲۷].

د - تخلخل و جذب آب سنگدانه‌ها: میزان تاثیر و ارتباط تخلخل و جذب آب سنگدانه‌ها نیز بر مقاومت بتن بررسی شده است. این پارامتر برای سنگدانه‌های ریز و درشت مطالعه شده است. (شکل۱۳ب) ارتباط بین جذب آب سنگدانه‌ها با مقاومت فشاری تک‌محوری بتن را نشان می‌دهد. جذب آب ناشی از تخلخل زیاد سنگدانه بوده و باعث کاهش پارامترهای مقاومتی سنگدانه می‌شود. ناهنجاری مشاهده شده مربوط ماسه‌سنگ، دیوریت، گرانیت و لوماشل می‌باشد.



شکل ۱۲ - الف) ارتباط بافت سنگدانه‌ها با مقاومت فشاری بتن، ب) ارتباط هوازدگی سنگدانه‌ها با مقاومت فشاری بتن



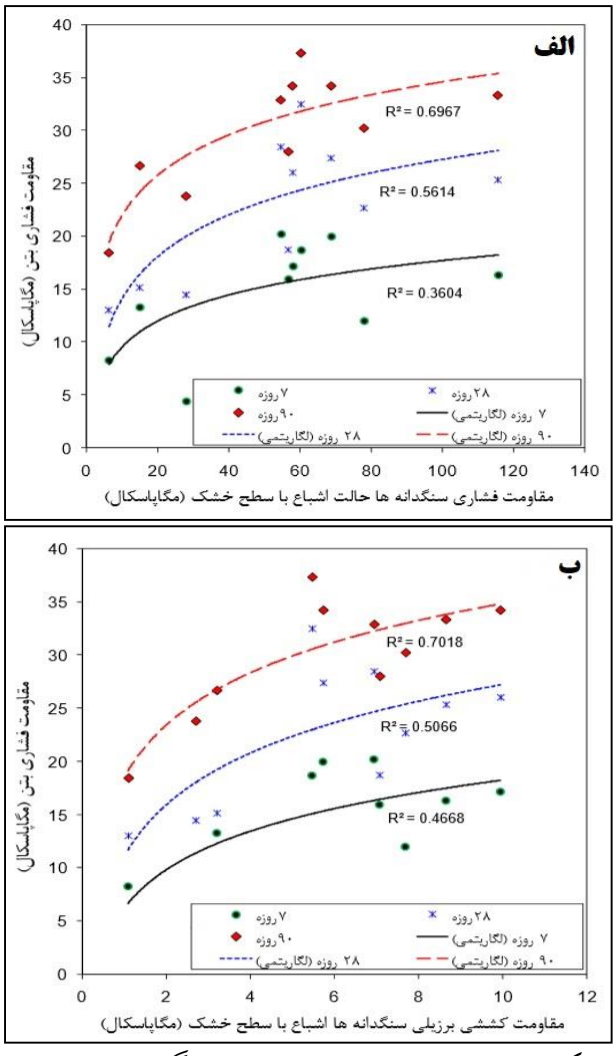
شکل ۱۳- الف) ارتباط وزن مخصوص سنگدانه و مقاومت فشاری بتن، ب) ارتباط جذب آب سنگدانه‌ها با مقاومت فشاری بتن

٤-۳- خصوصیات مکانیکی سنگدانه‌ها بر خواص بتن

آزمایش‌های گوناگونی در آزمایشگاه برای تعیین خواص مکانیکی سنگ انجام شد که در اینجا تأثیر هر یک بر خواص مکانیکی بتن ساخته شده بررسی می‌شود. این آزمایشها در شرایط خشک و اشباع انجام شده است. نتایج حاصله نشان داد که مصالح اشباع ارتباط بهتری با ویژگی‌های بتن سخت شده برقرار می‌کنند، از اینرو نمودارها و همبستگی‌های انجام شده بر اساس شرایط اشباع با سطح خشک سنگدانه می‌باشد[۲۸].

الف - مقاومت فشاری تک‌محوری: (شکل ۱۴ الف) ارتباط مقاومت فشاری تک محوری سنگ بکر (در حالت اشباع با سطح خشک) با مقاومت فشاری تک‌محوری بتن‌های ساخته شده را نشان می‌دهد. در این نمودار سنگدانه‌های مرمر، گرانیت، توف،

گنایس و بازالت همبستگی خوبی نشان می‌دهند. افزایش مقاومت فشاری تک محوری تا حد معینی باعث افزایش مقاومت نهایی بتن می‌شود و بعد از آن حد معین، نمودار دارای روند ثابتی بوده و دیگر با افزایش مقاومت تک‌محوری سنگدانه، مقاومت نهایی بتن افزایش نمی‌یابد. به عبارت دیگر مقاومت بتن تا حد ۳۰ و ۴۰ مگاپاسکال تحت تاثیر مقاومت سنگدانه‌ها است، بعد از این مقدار مقاومت بتن به تنش موجود در سطح مشترک خمیر سیمان و سنگدانه بستگی دارد، در صورتی که مقاومت سنگدانه از مقاومت فصل مشترک کمتر باشد مقاومت بتن تحت تاثیر مقاومت سنگدانه واقع شده و بتن در مقاومت سنگدانه شکسته می‌شود. لازم به ذکر است فصل مشترک قسمتی از بتن است که سنگدانه با خمیر سیمان در ارتباط است[۲۹].



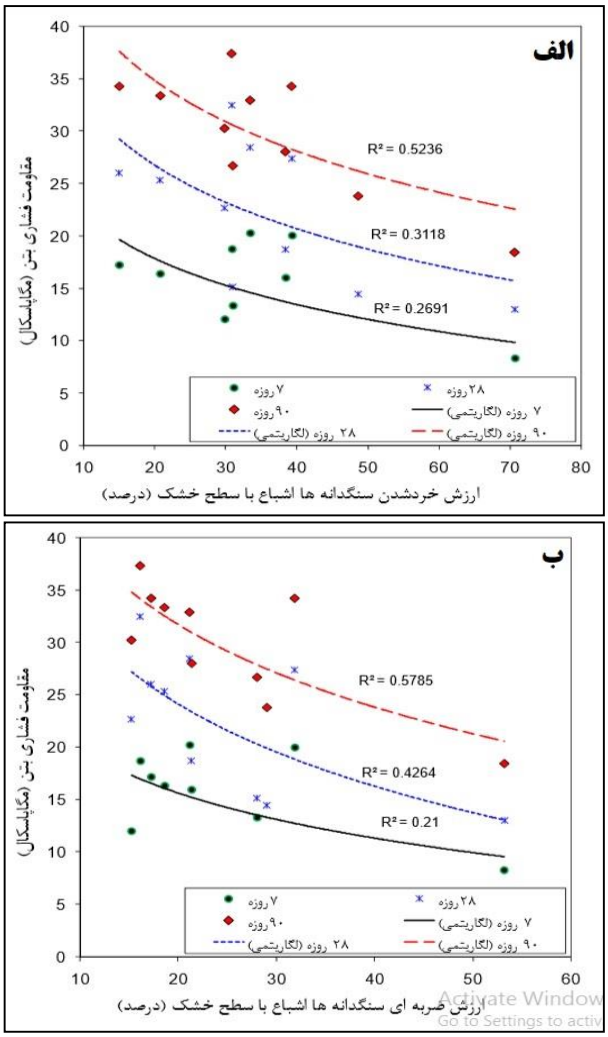
شکل۱۴-الف) ارتباط مقاومت فشاری سنگدانه و مقاومت فشاری بتن ب) ارتباط مقاومت کششی سنگدانه با مقاومت فشاری بتن

ب- مقاومت کششی برزیلی: در (شکل ۱۴ ب) رابطه بین مقاومت کششی برزیلی سنگدانه با مقاومت فشاری تک محوری بتن نشان داده شده است. مقاومت کششی سنگدانه در شرایط اشباع با سطح خشک بوده است که برای سه دوره عمل آوری مختلف نشان داده شده است. مقاومت کششی نیز مثل مقاومت فشاری بعد از حد معینی به مقدار ثابتی می‌رسد، یعنی دیگر با افزایش مقاومت کششی سنگدانه، مقاومت فشاری و کششی بتن بیشتر نمی‌شود. در این نمودار هم سنگدانه‌های مرمر، گرانیت، توف، گنایس و بازالت همبستگی خوبی نشان می‌دهند[۳۰].

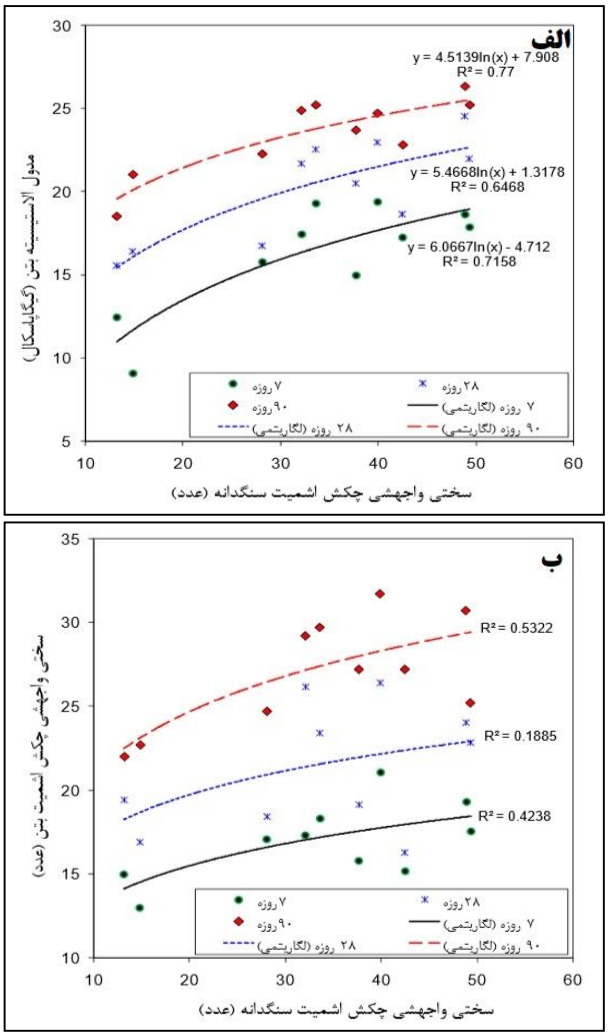
ج- ارزش خردشدن سنگدانه‌ها: برای ارتباط بین مقاومت فشاری تک‌محوری بتن و ارزش خردشدن سنگدانه‌ها از همبستگی لگاریتمی استفاده شد که در (شکل۱۵ الف) نشان داده شده است. در این نمودار گرانیت، توف، آندزیت و بازالت همبستگی خوبی را نشان می‌دهند. با افزایش ارزش خرد شدن سنگدانه‌ها مقاومت بتن و مدول الاستیسیته آن نیز افزایش می‌یابد[۳۱].

د - ارزش ضربه‌ای سنگدانه‌ها: ارتباط مقدار ارزش ضربه‌ای سنگدانه با مقاومت نهایی بتن در سنین مختلف در (شکل۱۵ ب) نشان داده شده است. در این نمودار نیز دولومیت، دیوریت، بازالت و ماسه‌سنگ انحراف معیار بیشتری نشان می‌دهند. کاربرد ارزش ضربه‌ای سنگدانه‌ها در مواردی است که بتن تحت تاثیر ضربه مثل موج شکن‌ها و یا شالوده ماشین آلات قرار می‌گیرد. مصالحی که دارای ارزش‌ضربه و ارزش فشاری پایینی هستند برای مصارف راهسازی، کف‌سازی و مکان‌های که بتن تحت تاثیر سایش قرار می‌گیرد، مناسب نمی‌باشند[۳۲].

ه- سختی واجهشی چکش اشمیت: نتایج همبستگی بین عدد عدد سختی واجهشی چکش اشمیت سنگدانه با مقاومت فشاری تک محوری بتن و همچنین رابطه عدد سختی واجهشی چکش اشمیت سنگدانه با عدد سختی واجهشی چکش اشمیت بتن به ترتیب در (شکل۱۶ الف و ب) نشان داده شده است. همانطور که در این نمودارها مشخص است، در مقاومت ۹۰ روزه همبستگی بیشتری مشاهده می‌شود. در این نمودار آندزیت، گنایس و دولومیت در مقاومت ۹۰ روزه انحراف از معیار بیشتری نشان می‌دهند. در مقاومت ۷ و ۲۸ روزه نیز لوماشل، دیوریت و آندزیت دارای انحراف از معیار بیشتری می‌باشند. به دلیل ساده و کم هزینه بودن این ابزار، از نتایج آن می‌توان برای کشف منابع سنگدانه‌ای و همچنین تخمین مقاومت بتن حاصله با کمی خطا استفاده نمود[۳۳].



شکل ۱۵- الف) ارتباط ارزش خردشدن سنگدانه‌ها و مقاومت بتن ب) ارتباط ارزش ضربه‌ای سنگدانه با مقاومت بتن



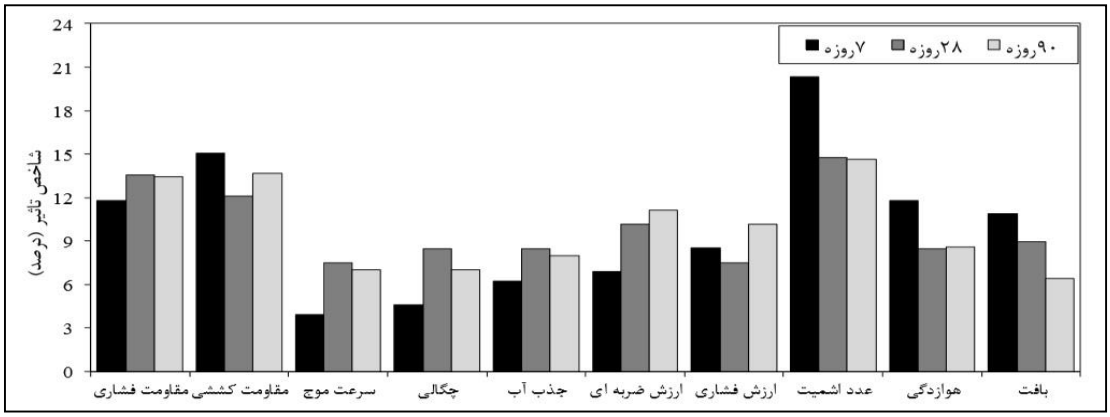
شکل ۱۶- الف) ارتباط عدد چکش اشمیت سنگدانه با مقاومت بتن ب) ارتباط عدد اشمیت سنگدانه با عدد اشمیت

٤-٤- ارزیابی نتایج

در تحلیل‌های چند متغیره آماری، شیوه‌های مختلف محاسباتی برای اندازه‌گیری وابستگی یا ارتباط بین دو متغیر تصادفی وجود دارد. منظور از همبستگی بین دو متغیر، قابلیت پیش‌بینی مقدار یکی برحسب دیگری است. البته باید توجه داشت که ضریب همبستگی بیانگر ارتباط علت و معلولی نیستند، بلکه فقط معیاری برای نشان دادن میزان وابستگی بین دو متغیر محسوب می‌شوند. ضریب همبستگی شاخصی بدون واحد است، لذا می‌توان بزرگی ضریب همبستگی متغیرها را بدون در نظر گرفتن واحد اندازه‌گیریشان، مقایسه کرد. پس از تجزیه و تحلیل نتایج آزمایش‌ها از طریق مقاسیه با خواص مقاومتی بتن، همبستگی‌های هر پارامتر با مقاومت فشاری تک محوری بتن تعیین و به صورت نمودار ارائه گردید.

سپس عدد همبستگی بدست آمده در هر نمودار به عنوان شاخص تاثیر آن پارامتر بر مقاومت بتن در نظر گرفته شده و نتایج حاصل از این روش آماری به صورت درصد مشخص و در شکل ۱۷ ارائه شده است[۳۴]. نام خواص به ترتیبی که در شکل مشاهده می‌شود از سمت راست به چپ، بافت، میزان هوازدگی سنگدانه‌ها، عدد سختی واجهشی چکش اشمیت سنگدانه‌ها، ارزش فشاری، ارزش ضربه، مقدار جذب آب سنگدانه‌های درشت و ریز، وزن مخصوص سنگدانه، سرعت موج فشاری سنگدانه، مقاومت کششی سنگدانه و مقاومت فشاری سنگدانه می‌باشد . با بررسی نتایج آزمایش‌های مختلف ملاحظه می‌گردد که این نتایج وابسته به یکدیگر می‌باشند. رابطهٔ بین نتایج حاصل از این پارامترها را می‌توان با استفاده از برازش منحنی و با تقریب مناسبی تعیین نمود و

ضریب همبستگی را برای نقاط مورد نظر محاسبه کرد. هر چه ضریب همبستگی به عدد یک نزدیکتر باشد، نشانهٔ این است که ارتباط بین متغیرها به منحنی نزدیک‌تر می‌باشد. در این نمودار درصد اختصاص داده شده به هر پارامتر بر مبنای عدد همبستگی آن با مقاومت نهایی بتن در سنین مختلف بوده است که با افزایش ضریب همبستگی امتیاز و درصد بیشتری نیز به آن تعلق گرفته است[۳۵]. برای مثال مقاومت فشاری تک محوری سنگدانه‌ها با مقاومت بتن ضریب همبستگی ۰/۷ را نشان می‌دهد و بیشترین تاثیر در مقاومت نهایی بتن داشته که در این نمودار نیز ۱۳درصد از سهم مقاومت بتن را به خود اختصاص داده است. همچنین در این شکل بعضی از پارامترهای سنگدانه که تأثیر زیادی بر مقاومت بتن نداشته است نیز مشاهده می‌شود.



شکل ۱۷- عوامل مؤثر بر مقاومت بتن

۵- نتیجه‌گیری

پس از تحلیل و تجزیه آزمایش‌های انجام شده، نتیجه تحقیق به شرح ذیل ارائه می‌شود:

- به‌طور کلی خواص مکانیکی بتن به‌وسیلهٔ ویژگی‌های سنگدانه‌ها کنترل می‌شود و پارامترهای ژئو شیمیایی مؤثر سنگدانه‌ها در این زمینه کانی‌شناسی، بافت، ساخت، رشد بلورها، ارتباط ذرات با یکدیگر و پیوندهای درون ذره‌ای و برون ذره‌ای می‌باشد و در نهایت خواص مکانیکی بتن را تحت تاثیر قرار می‌دهند.

- تاثیر وزن مخصوص سنگدانه‌ها بر مقاومت فشاری تک محوری بتن نشان می‌دهد، سنگدانه‌های گنایس، دولومیت، گرانیت و آندزیت همبستگی خوبی را نشان داده و از انحراف معیار پایین‌تری برخوردار هستند. یعنی هر چه وزن مخصوص این سنگدانه‌ها بیشتر می‌شود، مقاومت فشاری تک محوری بتن ساخته شده با این سنگدانه‌ها نیز بیشتر می‌شود.

- ارتباط مقاومت فشاری تک محوری سنگ بکر (در حالت اشباع با سطح خشک) با مقاومت فشاری تک‌محوری بتن‌های ساخته شده برای سنگدانه‌های مرمر، گرانیت، توف، گنایس و بازالت همبستگی خوبی نشان می‌دهند. افزایش مقاومت فشاری تک محوری تا حد معینی باعث افزایش مقاومت نهایی بتن می‌شود و بعد از آن حد معین، نمودار دارای روند ثابتی بوده و دیگر با افزایش مقاومت تک‌محوری سنگدانه، مقاومت نهایی بتن افزایش نمی‌یابد. به عبارت دیگر مقاومت بتن تا حد ۳۰ و ۴۰ مگاپاسکال تحت تاثیر مقاومت سنگدانه‌ها است، بعد از این مقدار مقاومت بتن به تنش موجود در سطح مشترک خمیر سیمان و سنگدانه بستگی دارد.برای مقاومت کششی برزیلی هم سنگدانه‌های مرمر، گرانیت، توف، گنایس و بازالت همبستگی خوبی نشان می‌دهند.

- جذب آب ناشی از تخلخل زیاد سنگدانه بوده و باعث کاهش پارامترهای مقاومتی سنگدانه می‌شود. بتن ساخته شده با سنگدانه‌های گرانیت، دولومیت، مرمر و بازالت افزایش سرعت موج بیشتری نشان می‌دهند. سرعت انتشار موج از میان منافذ پر آب بیشتر از منافذ هوادار است، که وضعیت رطوبتی بتن بر این پدیده اثر می‌گذارد.

- برای ارتباط بین مقاومت فشاری تک‌محوری بتن و ارزش خردشدن سنگدانه‌ها از همبستگی لگاریتمی استفاده شد، نتایج نشان داد گرانیت، توف، آندزیت و بازالت همبستگی خوبی را نشان می‌دهند. با افزایش ارزش خرد شدن سنگدانه‌ها مقاومت بتن و مدول الاستیسیته آن نیز افزایش می‌یابد.

- نتایج همبستگی بین عدد عدد سختی واجهشی چکش اشمیت سنگدانه با مقاومت فشاری تک محوری بتن و همچنین رابطه عدد سختی واجهشی چکش اشمیت سنگدانه با عدد سختی واجهشی چکش اشمیت بتن نشان می‌دهد، در مقاومت ۹۰ روزه همبستگی بیشتری مشاهده می‌شود. به‌طوریکه آندزیت، گنایس و دولومیت در مقاومت ۹۰ روزه انحراف از معیار بیشتری نشان می‌دهند. در مقاومت ۷ و ۲۸ روزه نیز لوماشل، دیوریت و آندزیت دارای انحراف از معیار بیشتری می‌باشند.

- نتایج نشان می‌دهد که به ترتیب خواص مقاومتی، سایش، وزن مخصوص و تخلخل، شکل و بافت، دوام و پایداری سنگدانه‌ها بیشترین تاثیر بر مقاومت بتن دارند.

- در انتها مشخص گردید که از بین سنگدانه‌های به کار رفته برای ساخت بتن در این تحقیق، به ترتیب سنگدانه‌های آهکی، دولومیتی، توفی، گرانیتی، گنایسی، بازالتی، آندزیتی، لوماشلی، ماسه سنگی و دیوریتی دارای خواص مطلوبی از نظر مقاومت و چسبندگی با خمیر سیمان برای استفاده در بتن می باشند.

- نتایج نشان داد که سنگدانه دولومیتی بیشترین مقاومت سطح اتصال و سنگدانه دیوریت و لوماشل کمترین مقاومت ناحیه اتصال دارند، که این مهم به طور زیادی توسط کانی شناسی، شکل و خواص سطحی سنگدانه‌ها و همچنین خواص سیمان کنترل می-شود. همچنین نتایج نشان داد که مقاومت سنگدانه‌ها نقش زیادی در مقاومت سطح اتصال دارند که این نقش در سن بالای بتن مشهودتر می‌باشد.

٦- قدردانی

اینجانب بر خود لازم می‌دانم از ریاست، معاونت پژوهشی و اساتید گروه عمران دانشگاه آزاد اسلامی واحد شبستر و همچنین از آقای مهندس طباطبایی، کارشناس آزمایشگاه بتن دانشگاه به خاطر همکاری‌های صمیمانه، تشکر و قدردانی نمایم.

۷- مراجع

[۱] رمضانیان پور، ع.ا.، طاحونی، ش.، پیدایش، م.، دستنامه اجرای بتن، موسسه انتشارات و چاپ دانشگاه تهران، چاپ اول، تهران، ۱۳۸۰.

[۲] پیرمحمدی،ف.، تقی‌پورف ب.، بررسی تاثیر شکل، ترکیب و نوع کانی‌های تشکیل دهنده سنگدانه‌ها بر مقاومت فشاری بتن، پایاننامه کارشناسی ارشد عمران- سازه،دانشگاه آزاد اسلامی واحد شبستر،۱۲۴ صفحه،۱۳۹۸

[3]Gambhir, M. L., Concrete technology,third edition, New Delhi, Tata McGraw-Hill,1986.

[4]Beshr, H., Almusallam, A.A., Maslehuddin, M.,Effect of coarse aggregate quality on the mechanical properties of high strength concrete, Construction and Building Materials 17, 97–103, 2003.

[5]Stroeven P et al., Shape assessment of particles in concrete technology: 2D image analysis and 3D stereological extrapolation. Cement and Concrete Composites, 31: 84-91, 2009.

[۶]- مستوفی نژاد، د.، تکنولوژی و طرح اختلاط بتن، انتشارات ارکان دانش، چاپ یازدهم، اصفهان.۱۳۸۵.

[7] Basheer, L. Kroop, J. and Cleland, D.J. Assessment of durability of concrete from its permeation properties: A Review. Construction and building materials, No. 15, pp. 93 – 103,2001.

[8] Banthia, N. Biparva, A. and Mindess, S. Permeability of concrete under stress. Cement and Concrete Research, No. 35, pp. 1651 – 1655,2005.

[9] Jain, A.K. Chauhan, J.S. Goliya, S.S.
Effect of shape and size of aggregate on permeability of pervious concrete. Journal of Engineering Research and Studies, Vol. II, October–December, pp 48-56,2011.

[10] Özen,M. Investigation of relationship between aggregate shape parameters and concrete strength using imaging techniques. Thesis MS.c. in Civil Engineering, University of Murat Özen,Turkey, 2007.

[11] Zhang, F. Guo, L. and Chi, N.M.X. Coarse aggregate effects on compressive strength and permeability coefficient of non-fine concrete. EJGE, Vol. 19, PP.8905-8913,2014.

[12] Ghiasvand, e. Zareee, b. Sharifi, p. Saraee, e. Effect variation of maximum of size of aggregate on permeability of common concretes", 7th annual national concrete conference, Tehran,2015.

[13] Naderi, M. Ways to improve and determine of laboratory and in-situ strength of concrete, (first vol.), published Roozbehan, Tehran,2009.

[14] Ammar, Y. and Kabagire K. New approach to proportion pervious concrete. Construction and Building Materials, vol. 62:38-46,2014.

[15]ASTM C496 / C496M - 11, Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens, Annual Book of ASTM Standards, vol. 4.08, ASTM, Philadelphia, PA,1990.

[16]Rittenhouse G,A, visual method of estimating 2-dimensional sphericity. Journal of Sedimentary Petrolology. 13(2):79–81.1943, 2006.

[17]Wadell, H.,Volume, shape and roundness of rock particles. Journal of geology. 40:443–511932, 2014.
[18]British Standard Institution BS116: (1983)(BS EN 12390-3:2002), Testing hardened concrete, Compressive strength of test specimens, London.1881
[19]British Standard Institution, BS 812-105.1:(1989) (BS EN 933-4), Methods for determination of particle shape. Flakiness index, London, 2008.
[20]BS 1881-121), Testing concrete, Method for determination of static modulus of elasticity in compression, London, 1983.
[21]ASTM C 33,Standard Specification for Concrete Aggregates, Annual Book of ASTM Standards, vol.4.08 ASTM, Philadelphia, PA, 1990.
[22]ASTM C 294,Standard Descriptive Nomenclature for Constituents of Concrete Aggregates, Annual Book of ASTM Standards, vol. 4.08, ASTM, Philadelphia, PA, 1990.
[23]ASTM C143 / C143M – 12, Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete, Annual Book of ASTM Standards, vol. 4.08, ASTM, Philadelphia, PA, 1990.
[24] ISRM, in: E.T. Brown (Ed.), Rock Characterization Testing and Monitoring-ISRM Suggested Methods, Pergamon, Oxford, 211 pp, 1981.
[۲۵] سامع، س.ع.، کیفیت و طرح اختلاط بتن، انتشارات جهاد دانشگاهی واحد صنعتی اصفهان، چاپ اول، اصفهان،۱۳۷۷.
[26] Kuo-Yu Liao, Ping-Kun Chang, Yaw-Nan Peng, Chih-Chang Yang, A study on characteristics of interfacial transition zone in concrete. Cement and Concrete Research, 34: 977–989, 2004.
[27] Mehmet, G., Turan, O., Erhan, Gu., Effects of cold-bonded fly ash aggregate properties on the shrinkage cracking of lightweight concretes. Cement and Concrete Composites, 28: 598–605.2006.
[28] ACI 221R, Guide for Use of Normal Weight and Heavyweight Aggregate in Concrete, American Concrete Institute, Michigan, USA, 2015.
[29] Donza, H., Cabrera, O., Irassar, E.F., High-strength concrete with different fine aggregate. Cement and Concrete Research, 32: 1755–1761, 2002.
[30] Taleb, A., Eyad, M., Erol,T., Pan, T., Evaluation of image analysis techniques for quantifying aggregate shape characteristics. Construction and Building Materials, 21: 978–990, 2007.
[31] El-Dash, K.M., Ramadan, M.O., Effect of aggregate on the performance of confined concrete. Cement and Concrete Research, 36: 599 – 605, 2006.
[32] Wu, K.R., Chen, B., Yao, W., Zhang, D., Effect of coarse aggregate type on mechanical properties of high-performance concrete. Cement and Concrete Research, 31: 1421–1425,2001.
[33] Hashemi, M.; Shafigh, P.; Bin Karim, M. R.; Atis, C. D.; "The effect of coarse to fine aggregate ratio on the fresh and hardened properties of roller-compacted concrete pavement", Journal of Construction and Building Materials, p.p. 553-556, 2018.
[۳۴] شریفی، ج.، نیکودل، م. ر. و.، یزدانی، م.، تاثیر خصوصیات زمین شناسی مهندسی سنگدانه‌ها بر مقاومت بتن، مجله انجمن زمین شناسی مهندسی ایران، جلد ششم، شماره ۱ و ۲، ص. ۶۷ تا ۸۲، ۱۳۹۲.
[۳۵] شریفی، ج. و نیکودل ، م. ر.، بررسی تأثیر کانی شناسی سنگدانه‌ها بر کیفیت بتن، نشریهٔ زمین شناسی مهندسی، دانشگاه تربیت معلم، تهران، جلد چهارم، شمارهٔ دو، ص. ۹۷۱تا ۹۸۶، ۱۳۸۹.

Engineering properties of different aggregates and their effect on concrete strength properties

Farhad Pirmohammadi Alishah *
Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Islamic Azad University University,Shabestar Branch,Shabestar.

Abstract

In this research, rocks were selected from different mines to evaluate the engineering properties of aggregates in concrete and then used for making concrete. At first, the physical and mechanical properties of the selected aggregates are determined in the laboratory, and then the aggregates are subdivided into sand-sized aggregates and some aggregate properties such as shape, porosity, impact value, compressive value and aggregation are determined. Then, using a fixed mixing scheme, the aggregates were prepared from concrete and the mechanical properties of the prepared concrete such as compressive strength, tensile strength and elastic modulus were determined after 7, 28 and 90 days. The effect of each of the aggregate properties on the concrete strength is investigated. This percentage is a useful guide for identifying the desired aggregates as well as the tests required to explore the aggregate resources. The results show that the resistance properties, abrasion, specific gravity and porosity, shape and texture, durability and stability of aggregates have the most effect on concrete strength, respectively.

Keywords: Aggregates, Mixing design, Physical and mechanical properties, Percentage, Concrete.

* Corresponding Author: Petrofarhad@iaushab.ac.ir