مجله انجمن زمین‌شناسی مهندسی ایران
بهار و تابستان ۱۳۹۲، جلد ششم، شماره ۱ و۲، صفحه ٦٧ تا ٨٢

تأثیر خصوصیات زمین‌شناسی مهندسی سنگدانه‌ها بر مقاومت بتن

جواد شریفی[۱]، محمدرضا نیکودل[۲*]، محمود یزدانی[۳]

دریافت مقاله: ۸۹/۰٦/۰۲ پذیرش مقاله: ۹۲/۰٦/۰٦

چکیده

در این تحقیق به منظور ارزیابی خواص مهندسی سنگدانه‌ها در بتن، سنگ‌هایی از معادن مختلف 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 ضربه، ارزش فشاری و دانه‌بندی آنها تعیین شده است. سپس با استفاده از 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.

کلید واژه‌ها: *سنگدانه، طرح اختلاط بتن، خواص فیزیکی، خواص مکانیکی، سنگ‌شناسی*

۱. دانش‌آموخته زمین‌شناسی مهندسی دانشگاه تربیت مدرس
۲. استادیار زمین‌شناسی مهندسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه تربیت مدرس، تهران Nikoudelm@modares.ac.ir
۳. استادیار عمران – خاک و پی دانشگاه تربیت مدرس
* مسئول مکاتبات

۱. مقدمه

بتن به عنوان یکی از ترکیباتی که برای ساخت سازه‌های بتنی در پروژه‌های عمرانی از آن استفاده می‌شود، از اهمیت زیادی برخوردار می‌باشد. مواد و مصالح تشکیل دهنده بتن شامل سیمان، سنگدانه، آب و مواد افزودنی است که کارایی، مقاومت و سایر خصوصیات بتن تابع مواد تشکیل دهنده آن می‌باشد. یکی از اجزای تشکیل دهنده 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. وظیفه این مصالح در بتن، تحمل و انتقال بارهای اعمالی (توسط ذرات درشت) و پر نمودن فضای خالی (توسط ذرات ریزدانه) بین دیگر اجزای تشکیل دهنده آن می‌باشد. سنگدانه‌ها بر خواص بسیار مهم بتن سخت شده نظیر پایداری حجمی و کنترل جمع شدگی، 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 از سنگدانه‌های طبیعی بر اساس استاندارد بریتانیایی(BS) شامل گروه بازالت، گروه گرانیت، گروه آهک، گروه شیست، گروه ماسه‌سنگ، گروه پورفیری، گروه گابرو و گروه کوارتزیت می‌باشد (رمضانیان‌پور و همکاران،۱۳۸۰، سامع، ۱۳۷۷). استاندارد ASTM نیز طبقه‌بندی برای کانی‌ها ارایه داده است که این طبقه‌بندی شامل کانی‌های کربناتی، فلدسپات، سولفاتی، فرو منیزیم، میکایی، سولفید آهن، رسی، زئولیت‌ها، اکسیدهای آهن و سیلیسی می‌شود (به نقل از فامیلی، ۱۳۷۸). همچنین طبق تعریف موسسه بتن آمریکا (ACI)، سنگدانه‌ها مصالح دانه‌ای نظیر شن، ماسه، سنگ شکسته، بتن با سیمان آبی خرد شده یا روباره فلزی (Steel Slag) که به کمک سیمان هیدرولیکی جهت ساخت بتن یا ملات به کار می‌رود (رمضانیان‌پور و همکاران، ۱۳۸۰).

بررسی خواص زمین‌شناسی و سنگ‌شناسی مصالح سنگدانه‌ای بتن از جمله مواردی است که تاثیر 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 پروژه‌های 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 (شریفی، ۱۳۸۷). محققان بسیاری در مورد تاثیر خواص سنگدانه‌ها بر بتن مطالعاتی را انجام داده‌اند، برخی از این مطالعات در ارتباط با مسایل اجرایی بتن، طرح اختلاط، تاثیر کانی‌شناسی سنگدانه‌ها بر کیفیت بتن، تاثیر جنس سنگدانه‌ها بر سرعت انتشار امواج فشاری در بتن، تاثیر اندازه سنگدانه‌ها بر کیفیت بتن، تاثیر مصالح ریزدانه در بتن، تاثیر سنگدانه‌ها در کارایی بتن و تاثیر جنس و شکل درشت دانه‌ها بر کیفیت بتن می‌باشد (Gambhir, 1986; Beshr et al., 2003; Stroeven et al., 2009).

در این تحقیق در جهت تکمیل مطالعات گذشته، نمونه‌ها به صورتی انتخاب شده که اولا در برگیرنده گروه‌های مختلفی از سنگدانه‌ها باشد و دوم، کلیه خواص سنگدانه‌ها با پارامترهای مکانیکی بتن برازش شده و سوم این که سهم و درصد هر یک از خواص سنگدانه‌ها بر خواص مکانیکی بتن تعیین شده است (شریفی و همکاران، ۱۳۹۰).

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 روش‌ها

۲-۱. سیمان

سیمان مورد استفاده جهت ساخت بتن، سیمان پرتلند پوزولانی ساخت شرکت سیمان تهران تحت عنوان سیمان‌های آمیخته مطابق با استاندارد ASTM C 959 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 (Gambhir, 1986) مقایسه شده است.

جدول ۱. خصوصیات فیزیکی و شیمیایی سیمان مورد استفاده

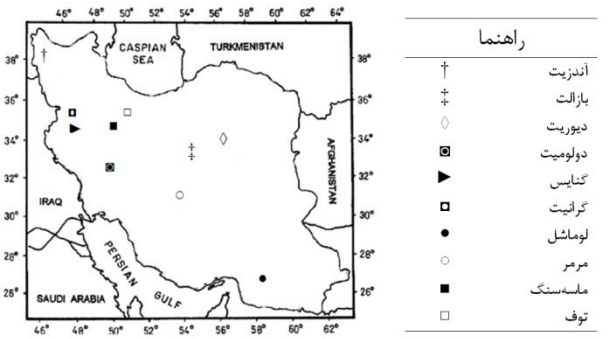
خواص فیزیکی و مکانیکی		ترکیب شیمیایی		
نام ویژگی	ویژگی استاندارد	ویژگی سیمان استفاده شده	نام ترکیب	مقدار (درصد)
نرمی (متر مربع بر کیلوگرم)	۳۰۰	۳٤۰	L.O.I	۱/۵۰
سلامت			Na2O	۰/۵۳
انبساط کلی (میلی‌متر)	۱/۰حداکثر	۰/۹۸	MgO	۲/۸٤
انبساط در کوره (درصد)	۰/۸ حداکثر	۰/۰۷۷	Al2O3	٤/۵۷
زمان گیرش (دقیقه)			SiO2	۲۲/۵
اولیه	۳۰ حداقل	۱۱۰	P2O5	۰/۱
نهایی	٦۰۰ حداکثر	۱٦۰	SO3	۲/۰۱
مقاومت فشاری (مگاپاسکال)			K2O	۰/۹٦
۳ روزه	۱٦حداقل	۳۳	CaO	٦۲/۱۲
۷ روزه	۲۲ حداقل	٤۱	TiO2	۰/۲۳
۲۸ روزه	۳۳ حداقل	۵۲	MnO	۰/۱۵
–	-	-	Fe2O3	۲/٤۹

۲-۲. سنگدانه‌ها

سنگدانه‌های استفاده شده در این تحقیق طبق تقسیم‌بندی انجمن بتن آمریکا (رمضانیان‌پور و همکاران، ۱۳۸۰)، سنگ شکسته می‌باشند که از فرآیند سنگ‌شکنی سنگ‌هایی که در ادامه توصیف می‌شوند، بدست آمده است.

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 به کار 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 بسته‌بندی به آزمایشگاه انتقال یافته است. موقعیت جغرافیایی محل برداشت نمونه‌ها در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱. محل نمونه‌برداری مصالح استفاده شده

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 (شریفی، ۱۳۸۷). آنالیز XRF نمونه‌ها و دیگر خواص سنگدانه‌ها در مقاطع نازک و نمونه دستی مطالعه و نام سنگ مشخص گردید. خصوصیات سنگ‌شناسی و کانی‌شناسی سنگدانه‌های استفاده شده در جدول ۲ و ۳ نشان داده شده است.

جدول ۲. خصوصیات سنگ‌شناسی سنگدانه‌ها

نام تجاری	لوماشل	توف	ماسه‌سنگ	آندزیت	دیوریت
نام پترولوژی	آواری-زیستی	توف	ماسه‌سنگ	تراکی داسیت	کوارتز مونزونیت
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
	اشپار	پلاژیوکلاز	اشپار	فلدسپات	فلدسپات

جدول۳. 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	آلکالی فلدسپات	میکریت	بیوتیت
کانی های عمده	پیروکسین	میکریت	پلاژیوکلاز	اشپار	کوارتز
	آلکالی فلدسپات	اشپار	بیوتیت		پلاژیوکلاز

۲-۲-۲. *خصوصیات فیزیکی سنگدانه‌ها*

الف- شکل سنگدانه: سنگدانه‌های طبیعی از لحاظ زمین‌شناسی براساس اندیس گردشدگی و کرویت تقسیم‌بندی می‌شوند. روش آنالیز شکل سنگدانه‌ها در فضای دو بعدی توسط Rittenhouse (1943) پیشنهاد شده است. این روش بر پایه روش توسعه یافته توسط Wadell (1935) می‌باشد که روشی دقیق و استاندارد شده‌ای برای تعیین شکل سنگدانه‌ها می‌باشد (Stroeven, 2007). در این مطالعه از سنگدانه‌های شکسته استفاده شده است. به دلیل تاثیر شکل سنگدانه‌ها از خصوصیات دستگاه سنگ‌شکن، 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 سنگ‌شکن و همچنین میزان مطلوبیت سنگ مادر به انجام آزمایش‌های تورق و تطویل بسنده شده است. تعیین ضریب تورق و ضریب تطویل سنگدانه بر اساس BS EN 933-4:2008 و BS 812-105.1:1989 انجام شده است. از آنجایی که همه نمونه‌ها با یک دستگاه سنگ‌شکن شکسته شده‌اند، ضریب تورق و ضریب تطویل آنها اختلاف کمی نشان داده و کمتر از ٤٠ 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.

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 ٤/٧٥ (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 ۱۲/۵ میلی‌متر (شن) به صورت چشمی مطالعه گردید. 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 همه سنگدانه‌ها، به هر بافت امتیازی نسبت داده شد. در این طبقه‌بندی به بافت صیقلی سنگدانه امتیاز ۲۵، صاف امتیاز۵۰، 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 ۲ نتایج این آزمایش در زیر میکروسکوپ و نمونه دستی را نشان می‌دهد. در این شکل با توجه به سطح دانه‌ها ٤ 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 الاستیسیته سنگدانه‌ها به ترکیبات، بافت، ساختار و هوازدگی آنها بستگی دارد. بنابراین مقاومت کم سنگدانه‌ها ممکن است ناشی از ضعیف بودن ذرات تشکیل دهنده 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 بر خواص فیزیکی و مقاومتی بتن تاثیر بسزایی دارد، برای نمونه هوازدگی سبب می‌شود که تخلخل لایه خارجی دانه‌های شنی بیشتر گردد و آب زیادتری جذب نماید (نقل از فامیلی، ۱۳۷۸). در نتیجه همه عوامل ذکر شده، بتن ساخته شده با این سنگدانه‌ها از نظر مقاومت و دوام در سطح نامطلوبی قرار خواهد داشت.

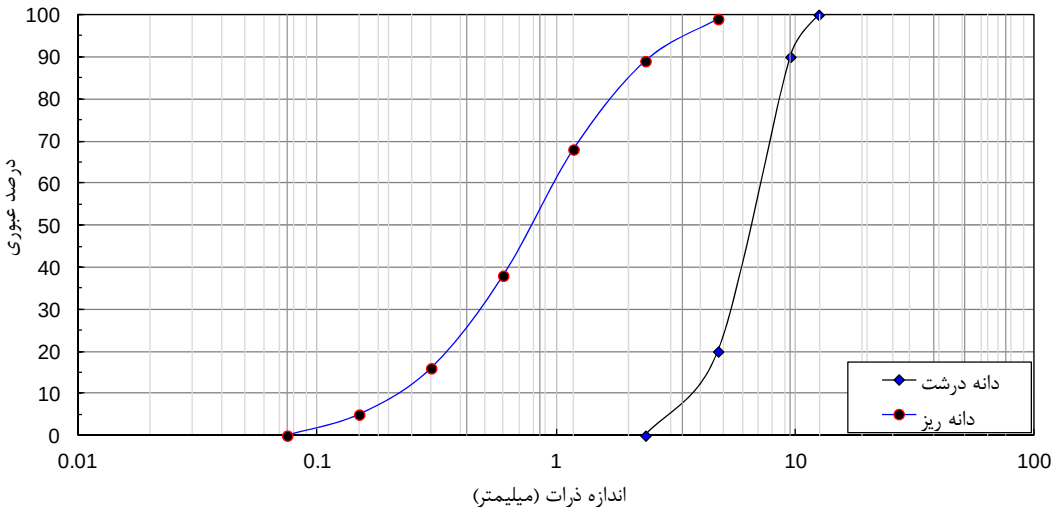
امتیاز	شکل بافت
۲۵ (صیقلی)	
۵۰ (صاف)	
۷۵ (زبر)	
۱۰۰ (ناهموار)	

شکل ۲. کمی نمودن بافت سنگدانه‌ها

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 رده 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 (شریفی و نیکودل، ۱۳۸۹).

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 BS 812:1975 (EN 1097-6:2000) تعیین شد.

ه- دانه‌بندی: دانه‌بندی مصالح بوسیله الک انجام شده است. معمولا تعداد ۹ الک برای دانه‌بندی و گروه‌بندی مصالح به کار می‌رود که پنج الک آن در محدوده ماسه، یک الک مرز شن و ماسه و سه الک در محدوده شن می‌باشد. شکل ۳ منحنی دانه‌بندی شن و ماسه مصرفی به همراه محدوده استاندارد آن را نشان می‌دهد. ضریب نرمی ماسه نیز ۲/۸۶ بدست آمد که طبق آیین‌نامه ASTM C 33 در محدوده مجاز می‌باشد. ممکن است دانه‌بندی‌های مختلف تاثیر 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.



شکل ۳. منحنی دانه‌بندی مصالح ریز دانه و درشت دانه

و- مواد زیان‌آور: برخی از سنگ‌ها با قلیایی سیمان واکنش مخربی انجام می‌دهند که منجر به فعالیت قلیایی یا فعالیت کربناتی سنگدانه می‌شوند. واکنش دسته اول در بتن‌هایی که در معرض شرایط محیطی مرطوب قرار داشته‌اند و سنگدانه حاوی میزان کافی اپال، کلسدونی، تریدمیت، 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 نمونه‌ای از سنگدانه‌های دانه‌بندی شده در یک محلول اشباع شده هیدرواکسید سدیم قرار داده می‌شود و بعد از نگهداری در دمای ۸۰ درجه سلسیوس، اسیدیته آن اندازه‌گیری و مقدار سیلیس حل شده سنجیده می‌شود (نقل از فامیلی، ۱۳۷۸). تفسیر نتایج طبق استاندارد مذکور انجام شده و سنگدانه مشکوک به واکنش سیلیسی- قلیایی مشاهده نگردید (ASTM C 294). 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 1981 بر روی نمونه‌ها استوانه‌ای در حالت خشک و اشباع با سطح خشک انجام گردید. 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 ٤ نشان داده شده است.

جدول٤. خصوصیات فیزیکی سنگدانه‌ها

نام	بافت (٪)	هوازدگی (٪)	تخلخل (٪)	جذب آب (٪)		وزن مخصوص		سرعت موج فشاری (m/s)	
شرایط	درشت	درشت	درشت	درشت	ریز	درشت	ریز	خشک	اشباع
توف	۷۹	۲۵	۱٦	٤/۱٤	۹/۲۷	۲/۵۰	۲/٤۰	٤۲٦۳	٤۳۱۷
ماسه سنگ	۸۰	۹۵	۱۰	٤/۱۲	٦/٤۵	۲/٦۰	۲/۵۰	٤۱۳٤	٤۲۱۵
مرمر	۳۰	۵	۷	۲/۱۳	۲/٤۰	۲/٦۸	۲/٦٤	٦۵٦۱	٦۸٤۵
لوماشل	۹۵	۹۵	۲۵	٦/۰۰	۱۰/۰۰	۲/۷۹	۲/۵۵	۳۰۰۸	۳۳۵۱
گرانیت	۱۰	۵	۷	۲/۳۰	۳/٤۱	۲/٦۷	۲/٦۵	٤٦۸۷	٤۹۱۸
گنایس	۱۵	۹۵	۹	۳/۱۰	۵/۷۸	۲/۷۹	۲/٦٦	۲۸۰۸	۳۵۵۱
دولومیت	۷۰	۲۵	۱٦	۲/۵۸	۲/۷٤	۲/۷٤	۲/٦۷	٦۰۵۰	٦۱۷۲
دیوریت	۲۰	۹۵	۱٦	۵/۰۰	٦/٤۱	۲/٤۰	۲/۳۵	٤۰۲۳	٤۱۳٤
بازالت	۲۵	۷۵	۱۱	۲/٦۸	۳/۷۳	۲/۹۰	۲/۷۹	٦۰۷٦	٦۲۹۹
آندزیت	۳۵	۲۵	۲۸	٤/۱٤	٦/٤۵	۲/۵۵	۲/۵۰	۳۳۲٦	۳۹۹۵

۲-۲-۳. *خصوصیات مکانیکی سنگدانه‌ها*

جهت کسب خواص مکانیکی سنگدانه‌ها آزمایش‌های متعددی انجام شده است. در ابتدا از نمونه‌ها مغزه‌هایی با قطر ٥٤ میلی‌متر با ارتفاع ۱۲ سانتی‌متر تهیه شده است. پس از آماده‌سازی مغزه‌ها، آزمایش‌های لازم در شرایط خشک و اشباع بر روی آنها صورت گرفته است (جدول ۵).

الف- مقاومت فشاری تک‌محوری سنگدانه‌ها: برای انجام آزمایش مقاومت تک محوری فشاری طبق روش پیشنهادی ISRM 1981، 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 1981 بر روی نمونه‌هایی با نسبت طول به قطر ۰/۵ در دو حالت خشک و اشباع انجام شده است.

جدول ۵. خصوصیات مکانیکی سنگدانه‌ها

نام	مقاومت فشاری (MPa)		مقاومت کششی (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	۹/۹٤	۱۲/۳۱	۱۷/۲۱	۱۳/۳۳	۱۵/۰۲	٤۹	٤۷
ماسه سنگ	۱۷/۰۰	۱۵/۰۰	۳/۵۰	۳/۲۰	۲٤/۰۰	۲۸/۰۰	۲۹/۰۰	۳۱/۰۰	۲۸	۲۵
مرمر	۹۷/۷٤	٦۸/۷۸	۸/۱۵	۵/۷۳	۲٦/۹۹	۳۱/۸۳	۳٦/۱۱	۳۹/۲۷	۳۳	۳۰
لوماشل	۱۱/٤۰	٦/۲۸	۱/٦۰	۱/۱۰	٤٦/۰۲	۵۳/۲۰	٦٦/۲۳	۷۰/٦۸	۱۳	۱۰
گرانیت	۱۲۰/۳۲	۱۱۵/٦۰	۱۱/٦٦	۸/٦۵	۱۷/۵٦	۱۸/۵٦	۲۰/٤٤	۲۰/۸۱	۳۲	۲۹
گنایس	٦۹/۹۰	۵۳/۳۰	۷/٦۸	٦/۹٤	۱۷/۹۱	۲۱/۱۱	۳۰/۸۰	۳۳/٤٤	۳۹	۳۷
دولومیت	۸۹/۵٦	٦۹/۲۹	۷/۰۸	۵/٤۷	۱۲/۳۲	۱٦/۰۸	۲٤/۵٤	۳۰/۸۳	٤۸	٤٦
دیوریت	۳۵/۰۰	۲۸/۰۰	۲/۹۰	۲/۷۰	۲٦/٦۸	۲۹/۰۱	٤٤/۸۱	٤۸/٦٦	۱٤	۱۱
بازالت	۹۲/۰۰	۷۸/۰۰	۱۰/۲٦	۷/٦۹	۱۳/۱۷	۱۵/۱۹	۲۵/٦۲	۲۹/۸٤	۳۷	۳۵
آندزیت	٦۷/۷۱	۵٦/۷۹	۹/۰۱	۷/۰۸	۱۸/٦۲	۲۱/۳٤	۳۳/۸۲	۳۸/٤۱	٤۲	٤۰

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

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

ه- سختی واجهشی چکش اشمیت سنگدانه‌ها: آزمایش سختی واجهشی چکش اشمیت مطابق با ISRM 1981 بر روی سطح صاف نمونه‌های سنگ بکر انجام شده است. نوع چکش به کار رفته N34 بوده که دارای انرژی برخوردی ۰/۷٤ و عمود بر نمونه انجام شده است (نقل از فامیلی، ۱۳۷۸).

۲-۳. آب

برای ساخت بتن از آب شهر تهران 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 می‌باشد. همچنین آب عاری از مواد روغنی، جلبک و مواد زاید دیگر بوده است (رمضانیان‌پور و همکاران،۱۳۸۰، سامع، ۱۳۷۷).

۳. ساخت بتن

در این تحقیق نسبت اختلاط مصالح جهت ساخت بتن بر اساس روش حجمی جهت همه سنگدانه‌ها یکسان بوده است، این طرح پس از تبدیل به وزنی جهت هر سنگدانه در جدول ٦ نشان داده شده است. در این طرح اختلاط، نسبت آب به سیمان برابر با ۰/٤٤ 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 (شریفی، ۱۳۸۷).

جدول ٦. طرح اختلاط وزنی جهت هر سنگدانه

نوع مصالح	سیمان (kg)	آب (kg)	هوا (%)	ماسه (kg)	شن (kg)
توف	۱۰٦	۱۵۰	۱	۷۷۰	۸۹٦
ماسه سنگ	۱۰٦	۱۵۰	۱	۸۰۲	۹۳۱
مرمر	۱۰٦	۱۵۰	۱	۸٤۷	۹٦۰
لوماشل	۱۰٦	۱۵۰	۱	۸۱۹	۹۹۸
گرانیت	۱۰٦	۱۵۰	۱	۸۵۰	۹۵۵
گنایس	۱۰٦	۱۵۰	۱	۸۵۳	۹۹۹
دولومیت	۱۰٦	۱۵۰	۱	۸۵۵	۹۸۱
دیوریت	۱۰٦	۱۵۰	۱	۷۵٤	۸٦۰
بازالت	۱۰٦	۱۵۰	۱	۸۹٦	۱۰۳۸
آندزیت	۱۰٦	۱۵۰	۱	۸۰۲	۹۱۳

پس از تعیین مشخصات مصالح و طرح اختلاط، ساخت بتن بر اساس نسبت وزنی مصالح مختلف در آزمایشگاه و به وسیله دستگاه مخلوط‌کن انجام گرفت. آزمایش اسلامپ مطابق ASTM C 143-90 برای هر طرح اختلاط انجام شده است (ASTM C143). مقدار اسلامپ اندازه‌گیری شده برای هر مخلوط بتنی بین ۲۸ تا ۳۲ میلی‌متر متغیر بوده است. پس از نمونه‌گیری، سطح خارجی نمونه‌ها تا ۲٤ 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 با دمای ۲±۲۲ درجه سانتی‌گراد بود، تا زمان انجام آزمایش‌های فشاری و کششی نگهداری شده است (نقل از فامیلی، ۱۳۷۸).

الف- مقاومت فشاری تک‌محوری بتن: نمونه‌های مکعبی استاندارد تهیه در روزهای ۷، ۲۸ و۹۰ روزه در حالت اشباع با سطح خشک تحت نیروی فشاری طبق استاندارد-BS 1881 116:1983 (BS EN 12390-3:2002)قرار گرفته است. 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.

ب- مقاومت کششی برزیلی بتن: مقاومت کششی نیز به وسیله دستگاه برزیلی طبق استانداردASTM C496 / C496M 11 – بر روی نمونه‌های استوانه‌ای انجام گرفته است.

ج- مدول الاستیسیته بتن: پس از انجام آزمون مقاومت فشاری تک‌محوری و ترسیم منحنی‌های تنش-کرنش، مدول

الاستیسیته نمونه‌ها در سنین مختلف تعیین شده است (نقل از فامیلی، ۱۳۷۸). تعیین مدول الاستیسیته به روش مماسی (۵۰ درصد مقاومت نهایی) بوده و برای سه دوره عمل‌آوری تعیین شده است. در نهایت نتایج آزمایش‌های مکانیکی انجام شده بر روی بتن در جدول ۷ ارایه شده است.

جدول ۷. نتایج آزمایش های انجام شده 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	۱۷/۱۶	۲۶/۰۰	۳۴/۲۲	۲/۹۶	۲/۱۰	۱/۵۰	۲۷/۵۴	۱۸/۹۷	۱۲/۲۴	۲۵	۲۳	۱۸
ماسه سنگ	۱۳/۳۳	۱۵/۱۱	۲۶/۶۷	۲/۷۲	۲/۰۰	۱/۸۰	۲۲/۰۳	۱۵/۵۰	۱۰/۶۱	۲۵	۱۸	۱۷
مرمر	۲۰/۰۰	۲۷/۳۳	۳۴/۲۲	۳/۷۷	۳/۱۰	۲/۰۹	۳۱/۰۱	۲۶/۳۱	۱۷/۹۵	۳۰	۲۳	۱۸
لوماشل	۸/۲۹	۱۳/۰۰	۱۸/۴۲	۲/۱۰	۱/۶۰	۱/۲۰	۱۴/۰۸	۸/۹۸	۶/۱۲	۲۸	۱۹	۱۷
گرانیت	۱۶/۳۶	۲۵/۳۳	۳۳/۳۳	۲/۹۹	۲/۲۳	۱/۹۱	۲۴/۴۸	۱۸/۳۶	۱۵/۵۰	۲۹	۲۶	۱۷
گنایس	۲۰/۲۲	۲۸/۴۴	۳۲/۸۹	۳/۶۸	۲/۳۰	۱/۸۶	۲۷/۵۴	۱۹/۸۳	۱۲/۸۵	۳۲	۲۶	۲۱
دولومیت	۱۸/۶۷	۳۲/۴۴	۳۷/۳۳	۴/۲۳	۳/۸۰	۲/۹۵	۳۰/۶۰	۲۶/۳۲	۱۸/۹۳	۳۱	۲۴	۱۹
دیوریت	۴/۴۰	۱۴/۴۴	۲۳/۷۸	۲/۱۰	۱/۸۰	۱/۰۵	۲۲/۸۵	۱۰/۵۱	۵/۳۹	۲۳	۱۷	۱۵
بازالت	۱۲/۰۰	۲۲/۶۷	۳۰/۲۲	۳/۳۳	۲/۴۰	۱/۸۰	۲۵/۷۰	۲۳/۲۶	۱۴/۰۴	۲۷	۱۹	۱۶
آندزیت	۱۶/۰۰	۱۸/۶۷	۲۸/۲۸۰	۲/۵۱	۲/۰۰	۱/۷۰	۳۱/۲۱	۲۰/۸۱	۱۴/۰۸	۲۷	۱۶	۱۵

۴. تجزیه و تحلیل نتایج

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

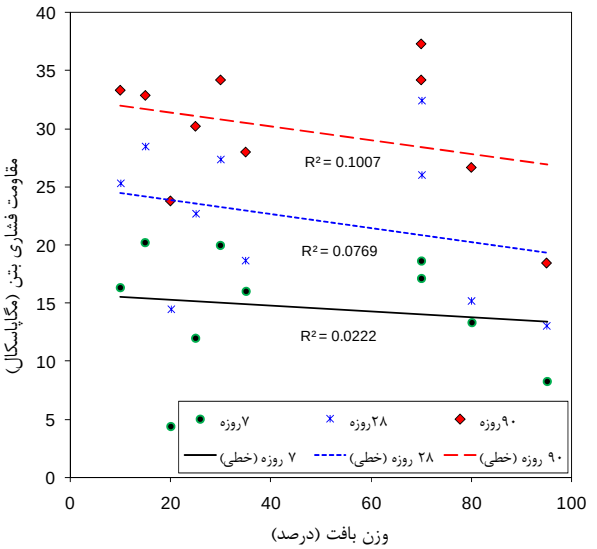
۴-۱. تاثیر خصوصیات سنگ‌شناسی سنگدانه‌ها بر خواص بتن

بررسی‌های سنگ‌شناسی نشان می‌دهد که سنگدانه‌هایی که حاوی کانی‌های صفحه‌ای مثل میکا و بیوتیت می‌باشند، نمی‌توانند پیوستگی مناسبی با خمیر سیمان برقرار نمایند که این عامل در سنگدانه آذرین (گرانیت، بازالت) مشهود است. همچنین نتایج نشان داد که کانی‌های 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 (شریفی و همکاران، ۱۳۹۰).

۴-۲. تاثیر خصوصیات فیزیکی سنگدانه‌ها بر خواص بتن

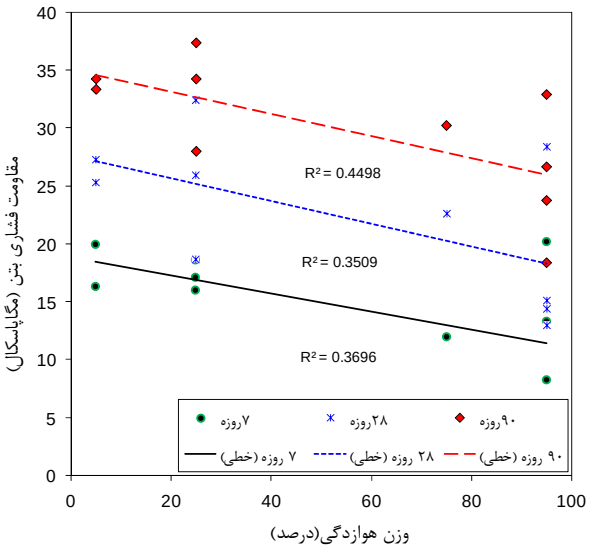
الف- بافت سطحی سنگدانه‌ها: بافت سطحی سنگدانه‌ها پس از امتیازدهی به صورت کمی درآمده و با عدد مقاومت فشاری تک‌محوری ۲۸ روزه بتن برازش داده شد که در شکل ۴ مشاهده می‌شود. امتیاز نسبت داده شده به بافت با افزایش ناصافی و کرموشدگی سنگدانه افزایش می‌یابد. به نظر می‌رسد که در سنین پایین کرمو بودن بافت سنگدانه‌ها باعث کاهش مقاومت بتن نشده و سبب افزایش مقاومت فصل مشترک سنگدانه و بتن نیز می‌شود. اما در سنین بالا کرمو بودن سنگدانه‌ها 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 (Kuo-Yu et al., 2004).



شکل ٤. ارتباط بافت سنگدانه‌ها با مقاومت فشاری بتن

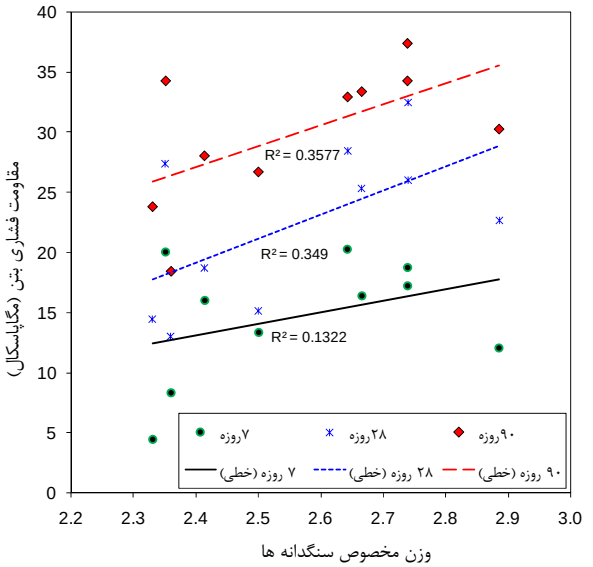
ب- هوازدگی و دگرسانی: پس از کمی نمودن هوازدگی و دگرسانی سنگدانه‌ها، تاثیر این پارامتر بر ویژگی‌های مکانیکی بتن نیز بررسی شده است (شکل ۵). هوازدگی و دگرسانی از طریق مطالعه بافت و ساخت سنگدانه‌ها بر روی مقاطع نازک، آنالیز شیمیایی توسط XRF و مطالعه نمونه دستی بدست آمده است.



شکل ۵. ارتباط هوازدگی سنگدانه‌ها با مقاومت فشاری بتن

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. شکل ٦ تاثیر وزن مخصوص سنگدانه‌ها بر مقاومت فشاری تک‌محوری 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 تک‌محوری بتن ساخته شده با این سنگدانه‌ها نیز بیشتر می‌شود.

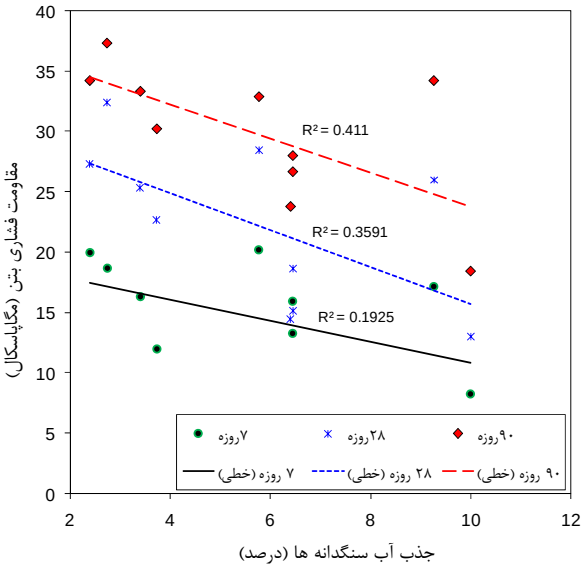
چگالی و وزن مخصوص در ساخت بتن سبک از اهمیت زیادی برخوردار می‌باشد و استفاده از آن سبب کاهش بار مرده در سازه‌ها می‌شود. در بعضی از کانی‌ها مثل بازالت به دلیل وجود عناصر فلزی در ترکیب آن دارای چگالی و وزن مخصوص زیادتری است. به طور کلی هر چه وزن مخصوص سنگدانه‌ها کمتر باشد وزن مخصوص بتن ساخته شده نیز کمتر می‌شود (Mehmet et al., 2006).



شکل٦. ارتباط وزن مخصوص سنگدانه و مقاومت فشاری بتن

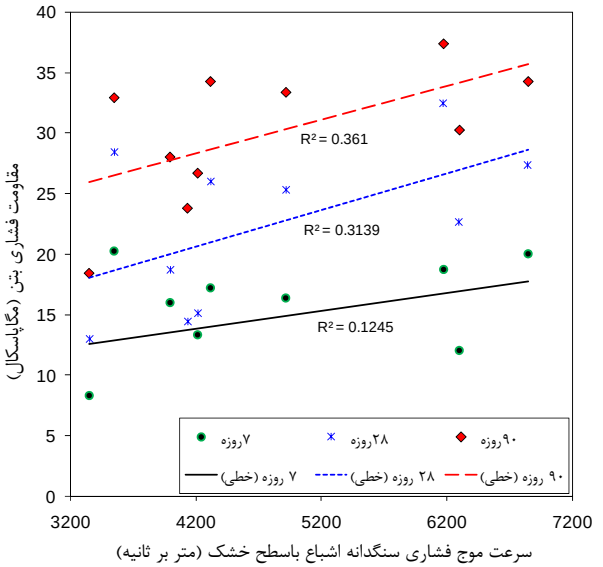
د- تخلخل و جذب آب سنگدانه‌ها: میزان تاثیر و ارتباط تخلخل و جذب آب سنگدانه‌ها نیز بر مقاومت بتن بررسی

شده است. این پارامتر برای سنگدانه‌های ریز و درشت مطالعه شده است. شکل ۷ 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 ۷. ارتباط جذب آب سنگدانه‌ها با مقاومت فشاری بتن

هـ- سرعت موج فشاری سنگدانه‌ها: شکل ۸ ارتباط بین سرعت موج فشاری و مقاومت فشاری تک‌محوری بتن را نشان می‌دهد. این پارامتر در دو حالت خشک و اشباع با سطح خشک تعیین شده است. نتایج نشان داد که در حالت اشباع با سطح خشک همبستگی بیشتری با خواص بتن را نشان می‌دهد. افزایش سرعت صوت مربوط به تخلخل بتن بوده که در حالت اشباع همبستگی بهتری با نتایج مقاومتی بتن سخت شده نشان می‌دهد. با افزایش سرعت صوت و ثابت‌های الاستیک دینامیکی سنگدانه‌ها، مقدار مقاومت نهایی بتن بیشتر 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. افزایش تخلخل و جذب بالای آب در سنگدانه‌هایی مثل لوماشل، توف و ماسه‌سنگ نیز باعث افزایش سرعت موج می‌شود (شریفی و همکاران، ۱۳۸۸).



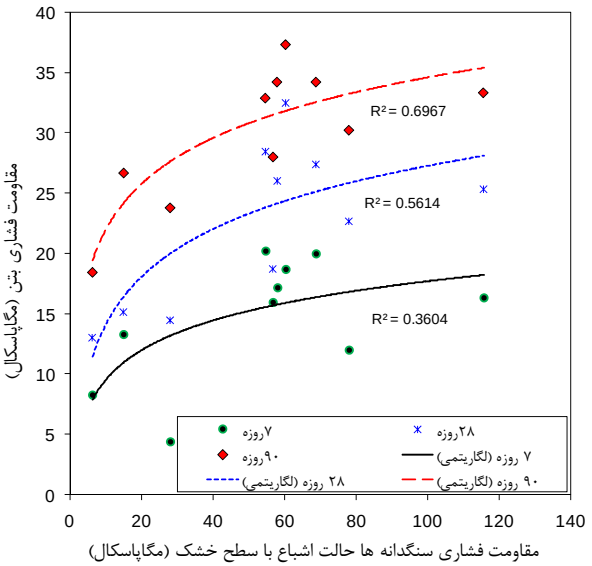
شکل ۸. ارتباط سرعت موج سنگدانه‌ها با مقاومت فشاری بتن

٤-٣. خصوصیات مکانیکی سنگدانه‌ها بر خواص بتن

آزمایش‌های گوناگونی در آزمایشگاه برای تعیین خواص مکانیکی سنگ انجام شد که در اینجا تاثیر 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.

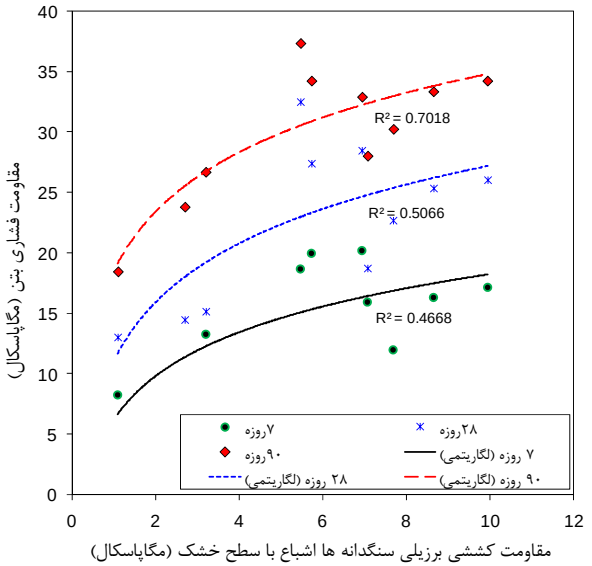
الف- مقاومت فشاری تک‌محوری: شکل ۹ ارتباط مقاومت فشاری تک‌محوری سنگ بکر (در حالت اشباع با سطح خشک) با مقاومت فشاری تک‌محوری بتن‌های ساخته شده را نشان می‌دهد. در این نمودار سنگدانه‌های مرمر، گرانیت، توف، گنایس و بازالت همبستگی خوبی نشان می‌دهند. افزایش مقاومت فشاری تک محوری تا حد معینی باعث افزایش مقاومت 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 حد۳۰ و ٤٠ 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 (شریفی، ۱۳۸۷).



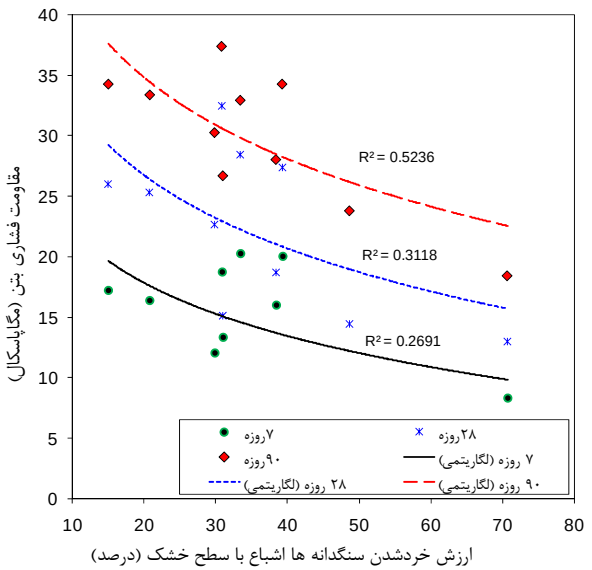
شکل ۹. ارتباط مقاومت فشاری سنگدانه ومقاومت فشاری بتن

ب- مقاومت کششی برزیلی: در شکل ۱۰ رابطه بین مقاومت کششی برزیلی سنگدانه با مقاومت فشاری تک‌محوری بتن نشان داده شده است. مقاومت کششی سنگدانه در شرایط اشباع با سطح خشک بوده است که برای سه دوره عمل‌آوری 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.



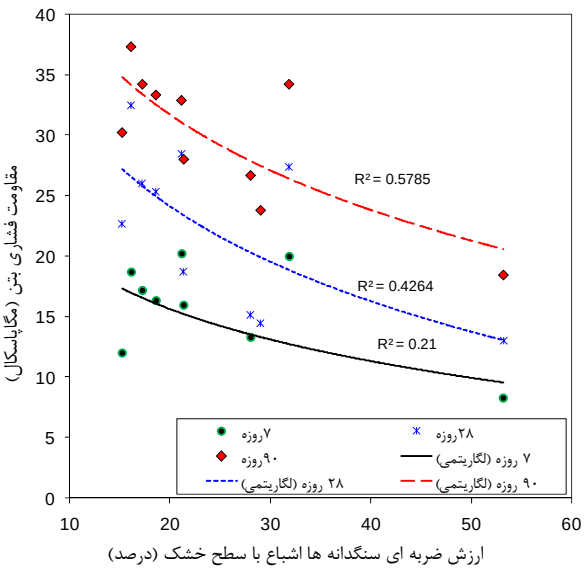
شکل ۱۰. ارتباط‌مقاومت کششی سنگدانه بامقاومت‌فشاری بتن

ج- ارزش خردشدن سنگدانه‌ها: برای ارتباط بین مقاومت فشاری تک‌محوری بتن و ارزش خردشدن سنگدانه‌ها از همبستگی لگاریتمی استفاده شد که در شکل ۱۱ 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.



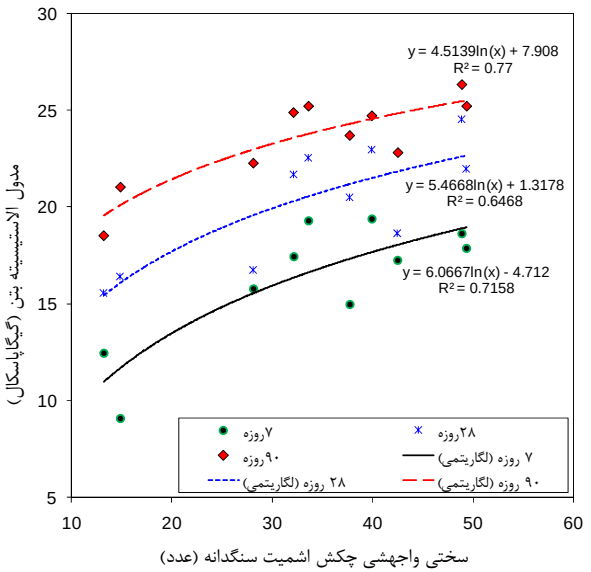
شکل ۱۱. ارتباط ارزش‌خردشدن‌سنگدانه‌هاومقاومت بتن

د- ارزش ضربه‌ای سنگدانه‌ها: ارتباط مقدار ارزش ضربه‌ای سنگدانه با مقاومت نهایی بتن در سنین مختلف در شکل ۱۲ 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 ماشین‌آلات قرار می‌گیرد. مصالحی که دارای ارزش ضربه و ارزش فشاری پایینی هستند برای مصارف راهسازی، کف‌سازی و مکان‌های که بتن تحت تاثیر سایش قرار می‌گیرد، مناسب نمی‌باشند (رمضانیان‌پور و همکاران، ۱۳۸۰، سامع، ۱۳۷۷).

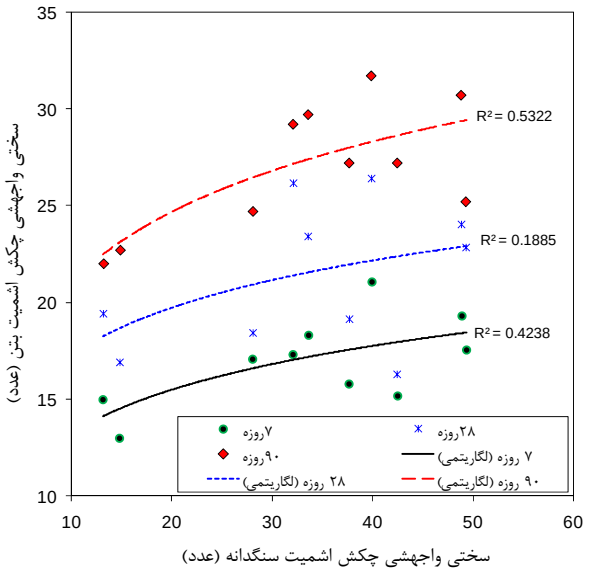


شکل ۱۲. ارتباط ارزش ضربه‌ای سنگدانه با مقاومت بتن

ه- سختی واجهشی چکش اشمیت: نتایج همبستگی بین عدد عدد سختی واجهشی چکش اشمیت سنگدانه با مقاومت فشاری تک‌محوری بتن و همچنین رابطه عدد سختی واجهشی چکش اشمیت سنگدانه با عدد سختی واجهشی چکش اشمیت بتن به ترتیب در شکل ۱۳ و ۱٤ 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.



شکل ۱۳. ارتباط عدد چکش اشمیت سنگدانه با مقاومت بتن



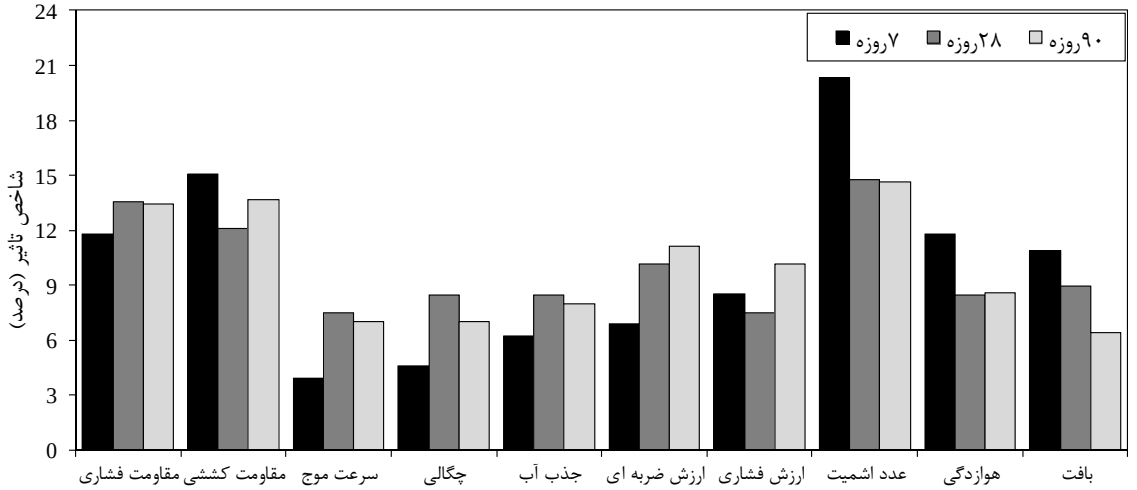
شکل ۱٤. ارتباط عدد اشمیت سنگدانه با عدد اشمیت بتن

٤-٤. ارزیابی نتایج

پس از تجزیه و تحلیل نتایج آزمایش‌ها از طریق برازش با خواص مقاومتی بتن، همبستگی‌های هر پارامتر با مقاومت فشاری تک محوری بتن تعیین و به صورت نمودار ارایه

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 ۱۵ ارایه شده است. 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.

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. 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 ۱۳ درصد از سهم مقاومت بتن را به خود اختصاص داده است. همچنین در این شکل بعضی از پارامترهای سنگدانه که تاثیر زیادی بر مقاومت بتن نداشته است نیز مشاهده می‌شود.



شکل ۱۵. عوامل موثر بر مقاومت بتن

۵. نتیجه‌گیری

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

- به طور کلی خواص مکانیکی بتن به وسیله ویژگی‌های سنگدانه‌ها کنترل می‌شود و پارامترهای موثر سنگدانه 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.
- هر چه چگالی و وزن مخصوص سنگدانه‌ها بیشتر می‌شود، مقاومت بتن ساخته شده با این سنگدانه‌ها نیز بیشتر می‌شود. در بعضی از کانی‌ها مثل بازالت به دلیل وجود عناصر فلزی در ترکیب آن دارای وزن مخصوص زیادتری است.
- در سنین پایین عمر بتن، ناهموار و متخلخل بودن بافت سنگدانه‌ها سبب کاهش مقاومت بتن نشده، بلکه سبب افزایش مقاومت بتن نیز می‌شود. اما در سنین بالای عمر بتن، متخلخل بودن بافت سنگدانه‌ها باعث کاهش مقاومت بتن می‌شود.
- 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.

– افزایش مقاومت فشاری تک‌محوری سنگدانه‌ها تا حد معینی باعث افزایش مقاومت نهایی بتن می‌شود و بعد از آن حد معین، دیگر با افزایش مقاومت فشاری تک‌محوری سنگدانه‌ها، مقاومت نهایی بتن افزایش نمی‌یابد.

– با افزایش ارزش ضربه و ارزش فشاری سنگدانه‌ها، مقاومت بتن و مدول الاستیسیته آن نیز افزایش می‌یابد. مصالحی که دارای ارزش ضربه و ارزش فشاری پایینی می‌باشند برای مصارف راهسازی، کف‌سازی و مکان‌های که بتن تحت تاثیر سایش قرار می‌گیرد، مناسب نمی‌باشند.

– 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.

تقدیر و تشکر

مولفین بر خود لازم می‌دانند از اساتید گروه زمین‌شناسی مهندسی دانشگاه تربیت مدرس و همچنین از آقای مهندس ابراهیم انصاری به خاطر همکاری‌های صمیمانه، تشکر و قدردانی کنند.

منابع

رمضانیان‌پور، ع.ا.، طاحونی، ش.، پیدایش، م.، ۱۳۸۰. دستنامه اجرای بتن، موسسه انتشارات و چاپ دانشگاه تهران، چاپ اول، تهران.

سامع، س.ع.، کیفیت و طرح اختلاط بتن، ۱۳۷۷. انتشارات جهاد دانشگاهی واحد صنعتی اصفهان، چاپ اول، اصفهان.

شریفی، ج.، احمدی، م.ج.، نیکودل، م.ر.، خامه چیان، م.، ۱۳۹۰. ارزیابی خواص نامطلوب ماسه‌سنگ‌های قرمز فوقانی و روش‌های بهسازی آن جهت استفاده در بتن، مجموعه مقالات هفتمین کنفرانس زمین شناسی مهندسی و محیط زیست ایران، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ۱۵ تا ۱۷ شهریور.

شریفی، ج.، ۱۳۸۷. بررسی اثر جنس سنگدانه-های مختلف بر خواص مقاومتی بتن، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، زمین‌شناسی مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران.

شریفی، ج.، نیکودل، م.ر.، ۱۳۹۰. تاثیرخواص مهندسی سنگدانه‌ها درکیفیت بتن، مجموعه مقالات هفتمین کنفرانس زمین شناسی مهندسی و محیط زیست ایران، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ۱۵ تا ۱۷ شهریور.

شریفی، ج.، نیکودل، م.ر.، ایزدی، ه.، ۱۳۹۰. مدل سازی اعداد چکش اشمیت با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی برای پیش‌بینی دقیق‌تر مقاومت بتن، مجموعه مقالات ششمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ٦تا ۷ اردیبهشت.

شریفی، ج.، نیکودل، م.ر.، ۱۳۸۹. بررسی تاثیر کانی شناسی سنگدانه‌ها بر کیفیت بتن، نشریه زمین شناسی مهندسی، دانشگاه تربیت معلم، تهران، جلد چهارم، شماره دو، ص. ۹۷۱-۹۸٦.

شریفی، ج.، نیکودل، م.ر.، یزدانی، م.، ۱۳۸۸. تاثیر جنس سنگدانه‌ها بر سرعت انتشار امواج فشاری در بتن، مجموعه مقالات هشتمین کنگره بین المللی مهندسی عمران، ۲۱تا ۲۳ اردیبهشت، دانشگاه شیراز، شیراز.

شریفی، ج.، نیکودل، م.ر.، یزدانی، م.، ۱۳۷۸. بررسی ویژگی‌های نامطلوب مصالح سنگدانه‌ای چابهار بر خواص بتن، مجموعه مقالات چهارمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه تهران، جلد دوم، ص. ۵۲۳-۵۳۱.

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

نویل، ا.م.، بروکس، ج.ج.، ۱۳۷۸. خواص بتن، ترجمه هرمز فامیلی، انتشارات ابوریحان بیرونی، چاپ اول، تهران.

ACI 221R, 1996. Guide for Use of Normal Weight and Heavyweight Aggregate in Concrete, American Concrete Institute, Michigan, USA.

ACI Committee 308 American Concrete Institute Recommended Practice for Selecting Proportions for Concrete, Farmington Hills, USA.

ASTM C 294, 1990. Standard Descriptive Nomenclature for Constituents of Concrete Aggregates, Annual Book of ASTM Standards, vol. 4.08, ASTM, Philadelphia, PA.

ASTM C 33, 1990. Standard Specification for Concrete Aggregates, Annual Book of ASTM Standards, vol. 4.08, ASTM, Philadelphia, PA.

ASTM C143 / C143M – 12, 1990. Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete, Annual Book of ASTM Standards, vol. 4.08, ASTM, Philadelphia, PA.

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

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

British Standard Institution, BS 1881-116:1983 (BS EN 12390-3:2002), Testing hardened concrete, Compressive strength of test specimens, London.

British Standard Institution, BS 812-105.1:1989 (BS EN 933-4:2008), Methods for determination of particle shape. Flakiness index, London.

BS 1881-121:1983, Testing concrete, Method for determination of static modulus of elasticity in compression, London.

Donza, H., Cabrera, O., Irassar, E.F., 2002. High-strength concrete with different fine aggregate. Cement and Concrete Research, 32: 1755–1761.

El-Dash, K.M., Ramadan, M.O., 2006. Effect of aggregate on the performance of confined concrete. Cement and Concrete Research, 36: 599 – 605.

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

ISRM, in: E.T. Brown (Ed.), 1981. Rock Characterization Testing and Monitoring-ISRM Suggested Methods, Pergamon, Oxford, 211 pp.

Kuo-Yu Liao, Ping-Kun Chang, Yaw-Nan Peng, Chih-Chang Yang, 2004. A study on characteristics of interfacial transition zone in concrete. Cement and Concrete Research, 34: 977–989.

Mehmet, G., Turan, O., Erhan, Gu., 2006. Effects of cold-bonded fly ash aggregate properties on the shrinkage cracking of lightweight concretes. Cement and Concrete Composites, 28: 598–605.

Rittenhouse G, 1943. A visual method of estimating 2-dimensional sphericity. Journal of Sedimentary Petrolology. 13(2):79–81.

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

Taleb, A., Eyad, M., Erol,T., Pan, T., 2007. Evaluation of image analysis techniques for quantifying aggregate shape characteristics. Construction and Building Materials, 21: 978–990.

Wadell, H., 1932. Volume, shape and roundness of rock particles. Journal of geology. 40:443–51.

Wu, K.R., Chen, B., Yao, W., Zhang, D., 2001. Effect of coarse aggregate type on mechanical properties of high-performance concrete. Cement and Concrete Research, 31: 1421–1425.