ارایه معیاری برای انتخاب سنگدانه‌های طبیعی در بتن

جواد شریفی [۱] و محمدرضا نیکودل [۲*]

[۱] کارشناسی ارشد، گروه زمین‌شناسی مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
[۲] استادیار، گروه زمین‌شناسی مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۰۴/۰۹ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۱۱/۲۳

چکیده

با توجه به رشد روزافزون سازه‌ها و نیاز به مصالح سنگدانه‌ای، ضروری است که منابع قرضه بیشتری در اختیار گرفته شود و روش‌های مناسب برای شناسایی و اکتشاف سریع این منابع ارایه شود. به دلیل اهمیت متغیرهای زمین‌شناسی مهندسی در اکتشاف و تعیین کیفیت منابع قرضه، در این پژوهش با توجه به مطالعات میدانی و آزمایشگاهی انجام شده، متغیرها و ضوابطی برای این مهم تعیین شده و در ادامه نتایج حاصل به‌صورت معیاری ساده و کاربردی ارایه شده است. برای این منظور ابتدا مطالعات میدانی انجام شده و پس از نمونه‌برداری از معادن و انتقال آنها به آزمایشگاه، آزمایش‌های مربوط طبق استانداردهای موجود روی آن انجام و سپس از مصالح موجود بتن تهیه شده است. در ادامه نتایج حاصل از آزمایش‌های انجام شده روی مصالح سنگی و بتنی تجزیه و تحلیل شده، متغیرهایی که نقش بیشتری در کیفیت بتن داشته مورد رده‌بندی قرار گرفته و به‌صورت معیاری ارایه شده است. با توجه به دقت و آسانی این معیار، کاربرد آن برای انتخاب مصالح مطلوب است؛ به گونه‌ای که با کمترین تعداد آزمایش‌های لازم، معادن قرضه مناسب شناسایی می‌شود و همچنین این معیار برآوردی از مقاومت پایانی بتن ساخته شده در اختیار مهندسین مربوط قرار می‌دهد. این معیار با توجه به جنس و گوناگونی نمونه‌های مورد استفاده، دامنه کاربرد به نسبت گسترده‌ای دارد و در مناطق مختلف جغرافیایی قابل استفاده است.

کلیدواژه‌ها: بتن، سنگدانه، منابع قرضه، معیار.

***نویسنده مسئول:** محمدرضا نیکودل
E-mail: Nikudelm@modares.ac.ir

۱- پیش‌نوشتار

یکی از مهم‌ترین و متداول‌ترین مصالح ساختمانی بتن است که به علت داشتن ویژگی‌هایی از جمله شکل‌پذیری، مقاومت خوب در برابر آتش‌سوزی، دسترسی آسان به مصالح آن و مقاومت فشاری بالا، استفاده از آن با مقبولیت عمومی روبرو است. بتن مصالحی شبیه به سنگ است که از مخلوط کردن مقدار مناسبی از سیمان، شن، ماسه، آب و افزودنی‌های دیگر به دست می‌آید. توده اصلی بتن سنگدانه‌های درشت و ریز است که کنش و واکنش شیمیایی میان آب و سیمان به‌صورت شیره‌ای اطراف سنگدانه‌ها را پوشانیده و سبب یکپارچه شدن و چسبیدن سنگدانه‌ها به یکدیگر می‌شود. این سنگدانه‌ها اسکلت اصلی بتن را تشکیل می‌دهند و نیروی وارد بر بتن را تحمل می‌کنند (رمضانیان‌پور و همکاران، ۱۳۸۰). سنگدانه‌ها نه تنها در مقاومت بتن مؤثرند، بلکه دوام و پایداری بتن تا حد زیادی تحت تأثیر آنها قرار دارد. وظیفه این مصالح در بتن، تحمل و انتقال بارهای اعمالی (توسط ذرات درشت) و پر کردن فضای خالی (توسط ذرات ریزدانه) میان دیگر اجزای سازنده آن است (فامیلی، ۱۳۷۸).

ویژگی‌های زمین‌شناسی و سنگ‌شناسی مصالح سنگدانه‌ای بتن از جمله مواردی است که تأثیر عمده‌ای بر مقاومت بتن، بهینه کردن طرح اختلاط و دیگر ویژگی‌های انواع بتن دارد. با توجه به نقش مهم منابع قرضه در کیفیت مصالح بتنی و عدم وجود مطالعات گسترده و بنیادین در این مورد از دید زمین‌شناسی مهندسی و اهمیت بسزای آن در پروژه‌های گوناگون، بررسی در این زمینه دارای اهمیت و ضروری است. مطالعات بنیادین و کارآمد در این زمینه سبب مطلوب بودن ویژگی‌های بتن، کاهش هزینه و زمان در مطالعه و اکتشاف معادن قرضه می‌شود.

هدف اصلی این پژوهش ارایه روش‌های مناسب و دقیق در پی‌جویی و شناسایی منابع قرضه بتن است. برای این هدف، ابتدا سنگدانه‌هایی از منابع قرضه مختلف گردآوری و متغیرهای آن در آزمایشگاه تعیین شده است. سنگدانه‌ها به‌صورتی انتخاب شده که ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی متفاوتی داشته باشند. هر متغیر سنگدانه به وسیله استاندارد مرجعی در آزمایشگاه اندازه‌گیری و با توجه به نتایج آزمایش به ۵ رده تقسیم شده است. در ادامه از سنگدانه‌های مورد مطالعه طبق طرح اختلاط ثابتی، بتن تهیه و آزمایش‌های مربوط روی آن انجام شده است. در پایان با توجه به مقاومت بتن ساخته شده و نتایج آزمایش‌ها، هر متغیر امتیازدهی و در ۵ دسته به عنوان معیاری برای تعیین کیفیت منابع قرضه در مصارف بتنی ارایه شده است.

۲- بررسی‌های میدانی

در این پژوهش طی بررسی‌های میدانی، سنگدانه‌هایی از معادن قرضه مختلف انتخاب و به آزمایشگاه منتقل شده است. در انتخاب سنگدانه‌ها دقت شده است که از گروه‌های مختلف و همچنین دارای ویژگی‌های فیزیکی و مقاومتی متفاوت باشند. با توجه به منشأ پیدایش سنگدانه‌ها، نمونه‌ها از گروه‌های آذرین، رسوبی و دگرگونی انتخاب شده است. سنگدانه‌های آذرین به کار گرفته شده شامل آندزیت، گرانیت، دیوریت، بازالت، توف و سنگ‌های رسوبی شامل لوماشل، ماسه‌سنگ و دولومیت است. نمونه‌های گنایس و مرمر نیز در رده سنگ‌های دگرگونی قرار می‌گیرند. موقعیت جغرافیایی محل برداشت نمونه‌ها در شکل ۱ نشان داده شده است. سنگ‌های انتخاب شده به‌صورت لاشه (کوهی) بوده که به وسیله سنگ‌شکن آزمایشگاهی به اندازه شن و ماسه خرد شده است. به دلیل اینکه ذرات رودخانه‌ای دارای گردشدگی مختلفی هستند و در هر منطقه نیز این گردشدگی متفاوت است، بنابراین از سنگ شکسته استفاده شده است. بدین منظور، برای شکست همه نمونه‌ها از یک سنگ‌شکن استفاده شد تا تأثیر شکل سنگدانه‌ها و خطاهای آزمایش ناشی از تفاوت شکل سنگدانه‌ها بر متغیرهای بتن به کمترین مقدار برسد.

۳- بررسی‌های آزمایشگاهی

در ابتدا ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی سنگ‌های انتخاب شده از معادن بررسی و تعیین شده و در مرحله بعد سنگ‌های موجود به ذراتی در اندازه شن و ماسه شکسته شده‌اند. در این مرحله برخی از ویژگی‌های آنها مانند زبری، حجم فضای خالی میان دانه‌ها، سطح مخصوص دانه‌ها و دانه‌بندی آنها نیز تعیین شد. سپس با استفاده از طرح اختلاط ثابتی از نمونه‌های موجود بتن تهیه و ویژگی‌های مکانیکی و شیمیایی

آن همچون مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته پس از گذشت ۷، ۲۸ و ۹۰ روز اندازه‌گیری شده است.

برای رده‌بندی و تنظیم داده‌ها از جدول توزیع فراوانی استفاده شده است. بدین صورت که ابتدا دامنه تغییرات با استفاده از نتایج آزمایشگاهی محاسبه و در ادامه شمار رده‌ها تعیین شده است. برای جلوگیری از از دست رفتن اطلاعات، شمار رده‌ها (طبقات) پنج در نظر گرفته شده است. در محاسبه رده‌ها، عدد اعشاری حاصل همواره به سوی بالا گرد شده است. در ادامه طول دسته از تقسیم دامنه تغییرات به تعداد رده‌ها محاسبه شده است (بهبودیان، ۱۳۹۰). پس از نوشتن رده‌ها (طبقات)، فراوانی هر رده نیز به‌صورت نام سنگ نشان داده شده است.

۳– ۱. ویژگی‌های سنگ‌شناسی سنگدانه‌ها

با بررسی‌های سنگ‌شناسی، ترکیب کانی‌شناختی مصالح سنگدانه‌ای مشخص می‌شود. به کمک این بررسی، بینشی در مورد نوع دانه‌ها، روابط متقابل یا بافت آنها، نوع پوشش سطحی دانه‌ها و میزان هرگونه دگرسانی به دست می‌آید. این بررسی‌ها تشخیص وجود کانی‌های مضری را که حضور آنها در بتن سبب واکنش‌های شیمیایی می‌شود، نیز ممکن می‌سازند. در بررسی‌های ماکروسکوپی ویژگی‌های فیزیکی چون رنگ، سختی، رخ و خط اثر مورد نظر است که نتیجه آن تشخیص تک‌تک اعضای کانی‌های سازنده مواد سنگدانه است. در زیر میکروسکوپ اندازه و شکل دانه‌ها، بافت و ویژگی‌های نوری هر کانی قابل مطالعه است. بافت و ترکیب کانی رابطه‌ای مستقیم با استحکام و خردشوندگی سنگدانه دارد (فامیلی، ۱۳۷۸). در بررسی‌های میکروسکوپی کانی‌های سازنده سنگ نیز مشخص می‌شود. افزون بر شکل دانه‌ها، رابطه پیوندی میان آنها و نوع مواد پرکننده روزنه‌های سنگدانه نیز تعیین می‌شود. همچنین مواد مضر موجود مانند مواد آلی، گل سفید، رس، میکا، کانی‌های سولفیدی و کربنات‌ها قابل شناسایی است. وجود مواد مضر آسیب‌های مختلفی را در بتن به وجود می‌آورد، برای نمونه وجود رس، مقدار آب لازم برای بتن‌سازی را افزایش می‌دهد که سبب تغییر حجم و کاهش استحکام بتن می‌شود. وجود چرت، کانی‌های سولفیدی و کربنات‌ها سبب بروز واکنش با بتن، به مرور تغییرات حجمی در بتن و متلاشی شدن بتن می‌شوند (عقیلی، ۱۳۷۹؛ قدوسی و همکاران، ۱۳۷۸).

برای مطالعه بافت و ویژگی‌های سنگ‌شناسی، از نمونه‌ها مقطع نازک تهیه و مطالعات میکروسکوپی انجام شد. در شکل‌های ۲ و ۳ تصویر دو سنگدانه مورد مطالعه در زیر میکروسکوپ نشان داده شده است. در بررسی مقاطع میکروسکوپی، بافت، ساخت و دگرسانی نیز مطالعه شد. برای بررسی کانی‌های سازنده و مطالعه بیشتر، تجزیه شیمیایی نیز روی نمونه‌ها انجام و نام سنگ‌شناسی سنگ مادر مشخص شده است. در ادامه از مطالعات سنگ‌شناسی در بررسی‌های شیمیایی (مواد زیان‌آور و واکنش‌زا) و ویژگی‌های فیزیکی (بافت، هوازدگی و دگرسانی) سنگدانه‌ها استفاده شده است (شریفی و نیکودل، ۱۳۸۹).

۳– ۲. ویژگی‌های شیمیایی سنگدانه‌ها

برخی سنگدانه‌ها دارای ذرات معدنی هستند و در شرایطی که بتن نمایان است سبب تغییر حجم اضافی و در نتیجه تخریب سطح بتن می‌شوند یا تنش داخلی کافی برای ایجاد ترک‌خوردگی و آسیب زدن به انسجام سازه‌ای بتن را به وجود می‌آورند. در برخی شرایط محیطی امکان دارد که تأثیر همین مواد معدنی قابل چشم‌پوشی باشد. در برخی سنگ‌ها، تر و خشک‌شدن یا اشباع شدن با آب، همزمان با یخ زدن و آب شدن عامل تخریب است. مورد اخیر در چرت‌های متخلخل، ماسه‌سنگ‌های به شدت رسی و برخی شیل‌ها کاملا صادق است. حجم آب درون خلل و فرج هنگام یخ زدن حدود ۱۰ درصد افزایش می‌یابد و در سنگدانه‌هایی که نمی‌توانند چنین افزایش حجمی را تحمل کنند، سبب خرابی شدید می‌شود. با توجه به حضور مواد زیانبار در ترکیب شیمیایی برخی از سنگدانه‌ها، مطالعه و شناسایی این مواد پیش از هر گونه بررسی دیگر لازم است (شاه‌نظری و سحاب، ۱۳۷۱؛ رمضانیان‌پور و همکاران، ۱۳۸۰).

– **مواد زیانبار چرتی و شیلی:** مصالح زیانبار شبه رسی به شکل پوشش روی سنگ‌ها یا به‌صورت پراکنده درون سنگ‌هایی مانند آهک و ماسه‌سنگ رسی، به دلیل اینکه حجم سنگ تحت تأثیر میزان رطوبت قرار می‌گیرد، مطلوب نیستند. حد مجاز مواد زیان‌آور موجود در ریز دانه‌ها و درشت‌دانه‌ها در استاندارد سنگدانه‌های بتن، ASTM C33 (1990) آمده است. این استاندارد میزان مواد شیلی و چرتی در سنگدانه‌های قابل مصرف در بتن را تا ۳ تا ۸ درصد مجاز دانسته است (سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور، ۱۳۷۹). بنابراین برای بررسی تأثیر این مصالح روی بتن، درصد مصالح چرت و شیلی سنگدانه‌های مورد مطالعه در آزمایشگاه تعیین و طبق جدول ۱ رده‌بندی شده است.

– **مصالح ریزدانه سنگدانه‌ها:** معایب افزایش درصد مصالح ریز سنگدانه‌ها، افزایش تورم‌پذیری بتن است. تورم عبارت است از افزایش در حجم جرم معینی از مصالح بتن در اثر قشرهای نازکی از آب که ذرات را از دور از یکدیگر نگه می‌دارد. مقدار تورم به کانی‌های رسی، درصد رطوبت و نرمی مصالح نیز بستگی دارد. برای تعیین مواد ریزدانه طبق ASTM C33-03 (1990)، سنگدانه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در آب قرار می‌گیرند و سپس از آب خارج، میان انگشتان و کف دست مالیده و سپس با شستشو الک می‌شوند. در ادامه پس از خشک شدن، مقدار رد شده از الک ۲۰۰ تعیین و بر حسب درصد گزارش می‌شود که مقدار ۳ تا ۵ درصد برای سنگدانه‌های ریز و ۲ تا ۱۰ درصد برای سنگدانه‌های درشت مجاز است (سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور، ۱۳۷۹). حد بالای این معیار برای سنگدانه‌هایی است که به وسیله سنگ‌شکن خرد شده است (سامع، ۱۳۷۷؛ شریفی و همکاران، ۱۳۸۷). با توجه به موارد یادشده، مقدار مصالح ریزدانه سنگدانه‌های مورد مطالعه انجام و پس از رده‌بندی در جدول ۲ نشان داده شده است.

آزمایش ارزش ماسه‌ای یکی دیگر از آزمایش‌هایی است که برای تعیین نسبت ذرات ریز یا مواد رس‌گونه در خاک‌ها یا مصالح دانه‌بندی شده به کار برده می‌شود. این آزمایش طبق استاندارد ASTM D2419 & -09 (1990) یا آیین‌نامه بتن ایران (سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور، ۱۳۷۹) انجام می‌شود. بنابراین طبق آیین‌نامه بتن ایران این ارزش نباید کمتر از ۷۵ درصد باشد.

– **سنگدانه‌های واکنش‌زا:** رده دیگری از سنگ‌ها با قلیایی سیمان واکنش مخربی انجام می‌دهند که سبب فعالیت قلیایی یا فعالیت کربناتی سنگدانه می‌شوند. واکنش دسته اول در بتن‌هایی که در معرض شرایط محیطی مرطوب قرار داشته‌اند و سنگدانه دارای میزان کافی اپال، کلسدونی، تریدمیت، کریستوبالیت، ریولیت، آندزیت یا داسیت‌ها بوده‌اند سبب انبساط شدید و مخربی گشته است. دسته بعدی شامل واکنش‌هایی است که میان سنگدانه‌های دولومیتی و قلیایی‌های موجود در سیمان رخ می‌دهد که فعالیت کربناتی نامیده می‌شود (قدوسی و همکاران، ۱۳۷۸). برای تعیین واکنش‌پذیری سنگدانه‌ها طبق آیین‌نامه ASTM C289-07 & 94 (1990) و ASTM C294 & -5 (1990)، نمونه‌ای از سنگدانه‌های دانه‌بندی شده در یک محلول اشباع شده هیدرواکسید سدیم قرار داده می‌شود و پس از نگهداری در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد، اسیدیته آن اندازه‌گیری و مقدار سیلیس حل شده سنجیده می‌شود. ابزارهای مورد نیاز برای انجام آزمایش در شکل ۴ نشان داده شده است. تفسیر نتایج این آزمایش با استفاده از نموداری که در این استاندارد آمده است صورت می‌گیرد (فامیلی، ۱۳۷۸).

سنگدانه‌هایی که مستعد واکنش قلیایی هستند به شدت با محلول واکنش می‌دهند و در صورت کاربرد در بتن، سبب انبساط زیادی خواهند شد. با توجه به تأثیر طولانی‌مدت این متغیر در نتایج کیفیت بتن و همچنین زمان‌بر بودن آزمایش‌ها، با استفاده از مطالعات سنگ‌شناسی کانی‌های بالقوه واکنش‌زا طبق استاندارد ASTM C294 & -5 (1990) شناسایی و در جدول ۳ رده‌بندی شده است. بنابراین در صورتی که ترکیب‌های جدول ۳ در سنگدانه حضور داشته باشند باید آزمایش قلیایی

طبق استاندارد ASTM C289-07 & 94 (1990) به روش شیمیایی انجام گیرد. اگر باز استعداد قلیایی مشاهده شد، لازم است سنگدانه‌ها برای آزمایش‌های تکمیلی طبق استاندارد ASTM C1260-07 (1990) مورد آزمایش قرار گیرند.

– **شاخص دوام سنگدانه‌ها:** شاخص دوام و وارفتگی درشت‌دانه یک آزمایش برای تعیین سلامت سنگدانه‌هاست که در آیین‌نامه ASTM D4644-08 (1990) و انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ تجویز شده است. این آزمایش برای تعیین میزان مقاومت یک نمونه سنگی است که تحت تأثیر دو مرحله تر و خشک شدن متوالی قرار می‌گیرد. انجام این آزمایش روی بتن‌هایی که در بدنه یا کرانه‌های سد قرار دارند و همچنین بتن‌های به کار رفته در موج‌شکن‌ها الزامی است (فامیلی، ۱۳۷۸). پس از آماده‌سازی نمونه‌های مورد مطالعه، شاخص دوام طبق استاندارد یادشده در آزمایشگاه روی آنها انجام و بر پایه افت وزنی مرتب و در جدول ۴ رده‌بندی شده است.

– **سلامت سنگدانه‌ها:** برای تعیین سلامت سنگدانه‌ها آزمایش دیگر ساندنس است که در BS EN 1367-2 (1998) و ASTM C88-05 (1990) تجویز شده است. در این آزمایش، میزان افت وزنی از سنگدانه که در ۵ چرخه متناوب قرار گرفتن در محلول اشباع شده سولفات منیزیم و خشک شدن در گرمخانه خرد می‌شود تعیین می‌شود. مقدار کاهش درصد جرم اولیه در این آزمایش محاسبه و به نام شاخص سلامت سنگدانه نامیده می‌شود (فامیلی، ۱۳۷۸). هر چه مقدار این شاخص بیشتر باشد میزان فرسایش، انحلال و خرد شدن سنگ در برابر هوازدگی کمتر است. این آزمایش طبق استاندارد ASTM C88-05 (1990) روی سنگدانه‌های مورد مطالعه انجام و در جدول ۵ به ۵ رده از افت وزنی ۴ تا ۱۶ درصد رده‌بندی شده است.

– **مواد زیان‌آور آلی:** گاهی ناخالصی آلی روند هیدراسیون سیمان و در نتیجه نرخ کسب مقاومت بتن را کند می‌کند. معمولاً با رویه‌برداری توده به‌صورت کامل و شستشوی شدید ماسه از چنین ناخالصی‌هایی پرهیز می‌شود. وجود ناخالصی آلی فراوان نیز در مصالح ریزدانه به کمک آزمایش کلری‌متری هیدراکسید سدیم طبق استاندارد ASTM C40 / C40M – 11 (1990) مشخص می‌شود (فامیلی، ۱۳۷۸). در این آزمایش مقدار ۳ درصد هیدرواکسید سدیم به همراه مقداری سنگدانه در آب حل و به مدت ۲۴ ساعت به حال خود گذاشته می‌شود. سپس مقداری دی کرومات پتاسیم در اسید سولفوریک حل (زرد کم رنگ) و با رنگ محلول دارای سنگدانه مقایسه می‌شود؛ اگر رنگ مایع تیره‌تر بود مواد عالی موجود است. این استاندارد نیز مقادیر ذرات زغال‌سنگی را میان ۰/۵ تا ۱ درصد مجاز دانسته است. با توجه به استاندارد، میزان مواد زیان‌آور آلی در سنگدانه‌های مورد مطالعه تعیین و در جدول ۶ رده‌بندی شده است.

۳– ۳. ویژگی‌های فیزیکی سنگدانه‌ها

– **شکل سنگدانه:** شکل سنگدانه عامل مهم در کنترل عملکرد ویژگی‌های مهندسی آن است. این عامل نقش مهمی در کارایی، درآمیختن مخلوط بتن، مشخصات اصطکاکی دانه‌های سازنده مخلوط و استحکام بتن دارد. دانه‌های سازنده سنگدانه، شکل خود را از سنگ مادر به ارث می‌برند. یعنی سنگ‌هایی که نواربندی گنایسی، شیست‌سانی یا رخ دارند، دانه‌هایی با شکل پهن ایجاد می‌کنند و سنگ‌هایی چون گرانیت، کوارتز و گابرو دانه‌هایی هم‌بعد به وجود می‌آورند. جنبه اول از شکل سنگدانه‌های درشت، میزان گردگوشگی آنهاست. این مشخصه بیشتر توسط مقاومت فشاری و سایشی سنگ مادر کنترل می‌شود و به مقدار سایشی که ذرات در معرض آن قرار گرفته‌اند نیز بستگی دارد. شکل نمادین گردشدگی ذرات در شکل ۵ نشان داده شده است.

یک رده‌بندی کلی از دید گردشدگی ذرات که در ایالات متحده به کار می‌رود، در جدول ۷ نشان داده شده است. رده‌بندی دیگری که بر پایه BS EN (2012) 3-933 به کار می‌رود، سنگدانه‌ها را به ذرات کاملاً گردگوشه، گردگوشه، نیمه‌گردگوشه، نیمه‌گوشه‌دار و گوشه‌دار رده‌بندی می‌کند که در جدول ۸ نشان داده شده است (فامیلی، ۱۳۷۸). استفاده از دانه‌های تیز گوشه با سطح جانبی زبر سبب درگیری و قفل و بست بهتر اجزای بتن و افزایش مقاومت فشاری خواهد شد (Scrivener et al., 1988).

چنانچه منبع سنگدانه‌ها رودخانه‌ای و طبیعی نباشد، سنگ‌های استخراج شده از معدن باید به اندازه‌های قابل استفاده در بتن خرد شوند که این کار به وسیله ماشین‌آلات سنگ‌شکنی انجام می‌شود. ساختار کلی این ماشین‌آلات به‌صورت فکی، مخروطی، استوانه‌ای- غلتکی، چکشی و ضربه‌ای است. در این امر باید تعیین شود که آیا دستگاه مورد نظر سنگ‌ها را به قطعات دراز و پولکی می‌شکند یا مکعبی یا بلوکی؛ چرا که بلوکی بودن برای استفاده در بتن مناسب‌تر است، چون مقدار تخلخل آنها کم است و نیاز به سیمان و آب کمتری دارند. بیشتر متخصصان بر این باورند که سنگ‌شکن‌هایی که برای شکستن سنگ از ضربه استفاده می‌کنند، مانند سنگ‌شکن‌های چکشی یا ضربه‌ای، نسبت به سنگ‌شکن‌هایی که از فشار برای خرد کردن استفاده می‌کنند، محصولات مناسب‌تری را فراهم می‌آورند. سنگدانه‌های خرد شده با سنگ‌شکن از دید سطح شکست نیز به رده‌های کاملاً مضرس، نیمه‌مضرس، نامنظم، نیمه‌صاف و کاملاً صاف رده‌بندی می‌شوند. در مورد این سنگدانه‌ها، شکل ذرات نه تنها به ماهیت جنس سنگ مادر، بلکه به نوع سنگ‌شکن و ضریب خردکنندگی آن بستگی دارد (رمضانیان‌پور و همکاران، ۱۳۸۰).

عامل مؤثر دیگر شکل سنگدانه‌ها در ویژگی‌های بتن، ضریب تورق و ضریب تطویل سنگدانه است که بر پایه آیین‌نامه‌های BS 812-105.2 (1990) و BS EN 933-3 (2012) قابل انجام است. آیین‌نامه بریتانیایی ضریب تورق سنگدانه‌های درشت را برای شن طبیعی به ۵۰ و برای دانه‌های درشت کاملاً یا بخشی خرد شده به ۴۰ محدود می‌کند. البته برای سطوح تحت سایش، مقادیر کمتری از ضریب تورق مورد نیاز است (فامیلی، ۱۳۷۸؛ سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور، ۱۳۷۹). استاندارد ASTM D3398-00 (1990) نیز برای ارزیابی شکل ریزدانه‌ها و درشت‌دانه‌ها در بتن، بیشینه دانه‌های پولکی و طویل را به ۱۰ تا ۱۵ درصد وزن درشت‌دانه‌ها محدود کرده است (رمضانیان‌پور و همکاران، ۱۳۸۰). شکل‌های ۶ و ۷ ابزار تعیین ضریب تورق و ضریب تطویل به همراه برخی از نمونه‌ها نشان می‌دهند.

پس از تعیین درصد تورق و تطویل سنگدانه‌های مورد مطالعه، مشخص شد به دلیل این که برای شکستن نمونه‌ها از یک نوع سنگ‌شکن استفاده شده، شکل سنگدانه‌ها تفاوت چندانی نداشته و ضریب تورق و ضریب تطویل آنها کمتر از ۴۰ است. گفتنی است که برخی از سنگدانه‌ها به دلیل طویل شکل بودن کانی‌های سازنده و وجود خاصیت شیست‌سانی و رخ، در هنگام شکستن دارای خاصیت تورق و طویل‌شدگی بوده‌اند که این مورد در سنگدانه گنایس به خوبی قابل مشاهده است. بنابراین برای به کمترین مقدار رساندن تأثیر دیگر متغیرها بر مقاومت بتن، سنگدانه‌های طویل و پولکی به میزان ۱۰ تا ۱۵ درصد وزن درشتدانه‌ها محدود شده است؛ با این حال تأثیر شکل سنگدانه‌ها بر ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی بتن در این مطالعه ناچیز است، چنانچه شکل سنگدانه هم متفاوت باشد، با توجه به جدول‌های ۷ و ۸ قابل رده‌بندی است.

– **بافت سطحی:** بافت سطحی سنگدانه بر پیوستگی آن با خمیر سیمان و همچنین بر مقدار آب لازم برای مخلوط تأثیر می‌گذارد. رده‌بندی بافت سطحی بر پایه درجه صیقلی یا مات و صاف یا خشن بودن سطوح دانه‌هاست (فامیلی، ۱۳۷۸؛ سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور، ۱۳۷۹). آیین‌نامه BS 812-105 (1989) بافت سطحی سنگدانه‌ها را به گروه‌های شیشه‌ای، صاف، زبر، خشن و کرمو رده‌بندی کرده است. با توجه به استاندارد یادشده، بافت سطحی سنگدانه‌های مورد مطالعه بررسی و به‌صورت نمادین در شکل ۸ نشان داده شده است. این رده‌بندی با توجه به شکل سنگدانه‌های مورد مطالعه در زیر میکروسکوپ است که نتایج آن در جدول ۹ نشان داده شده است. دانه‌های صاف سبب ایجاد ترک در تنش‌های کمتری نسبت به

سنگدانه‌های خرد شده، خشن و گوشه‌دار می‌شوند. بنابراین استفاده از سنگدانه‌های با سطح خارجی کاملاً صاف سبب مقاومت فشاری کمتری می‌شود. میزان تأثیر نوع سنگدانه‌های درشت بر مقاومت بتن متغیر بوده و به نسبت آب به سیمان بستگی دارد (Basheer et al., 2005; Pereira et al., 2009).

– **هوازدگی و دگرسانی:** هوازدگی و دگرسانی مصالح سنگدانه‌ای نیز با میکروسکوپ پلاریزان مطالعه شد. در ادامه، میزان هوازدگی در رده‌های خیلی هوازده، متوسط هوازده، کم هوازده و بدون هوازدگی قرار گرفته و پس از امتیازدهی، در جدول ۱۰ نشان داده شده است. هوازدگی سنگدانه‌ها نیز بر ویژگی‌های فیزیکی و مقاومتی بتن تأثیر بسزایی دارد؛ برای نمونه هوازدگی سبب می‌شود که تخلخل لایه خارجی دانه‌های شنی بیشتر شود و آب زیادتری جذب کند (Rivard & Saint-Pierre, 2009).

کمی کردن میزان هوازدگی و دگرسانی طبق نظر پژوهشگران مختلف انجام شده است که در ادامه به‌صورت خلاصه خواهد آمد. این پژوهشگران میزان هوازدگی و دگرسانی را به ۵ رده تقسیم‌بندی کرده‌اند (Hoek & Brown, 1980; Ayakwah et al., 2009). گفتنی است، اگرچه پدیده هوازدگی و دگرسانی از دید زمین‌شناسی تفاوتی بنیادین و مفهومی در شکل و چگونگی ایجاد دارد، ولی از دید فناوری بتن، عملکرد پایانی آن روی سنگدانه‌ها و تأثیر آن بر بتن مشابه است.

- **رده یک– خیلی هوازده:** هیچ پیریتی در سنگ باقی نمانده است. اکسید و هیدرواکسیدهای آهن موجود در سنگ به رنگ زرد و سرخ دیده می‌شود و کانی‌های رسی نیز حضور دارند. کلسیت، کلریت و اپیدوت در ترکیب سنگ موجود نیست و سنگدانه‌ها گرد شده و نیمه گرد شده هستند.
- **رده دو– هوازدگی زیاد:** پیریت خیلی اکسیده و هوازده شده است، اکسید و هیدرواکسیدهای آهن به رنگ قهوه‌ای روشن، زرد و نارنجی حضور دارند. هیچ کلسیت، اپیدوت و کلریتی در نمونه‌ها موجود نیست. حضور کانی‌های رسی نیز قابل توجه است. بافت اولیه سنگ را هنوز می‌توان دید.
- **رده سه– هوازدگی متوسط:** پیریت از قهوه‌ای روشن تا نارنجی تیره تا خاکستری اکسیده شده است. حضور کلریت دگرسان شده به همراه اپیدوت و کلسیت دگرسان شده مشخص است. بافت اولیه سنگ کمی بر جا مانده است.
- **رده چهار– هوازدگی کم:** کانی‌ها مانند پیریت کم هوازده یا هوازده نشده و سنگ‌ها گوشه‌دار یا نیمه گوشه‌دار هستند. کلریت، اپیدوت و کلسیت در سنگ وجود دارد. بافت اولیه سنگ‌ها تا حدی باقی مانده است.
- **رده پنج– بدون هوازدگی:** سنگ‌های آذرین به رنگ خاکستری و قهوه‌ای تیره تا خاکستری تیره هستند. مقدار پیریت هوازده شده کم است، سنگ دارای کلسیت، کلرید و اپیدوت در سنگ‌های گرمابی است. بافت اولیه سنگ‌های آذرین حفظ شده است.

– **دانه‌بندی:** دانه‌بندی مصالح به وسیله الک انجام شده است. معمولاً ۹ الک برای دانه‌بندی و گروه‌بندی مصالح به کار می‌رود که ۵ الک آن در محدوده ماسه، ۱ الک در مرز شن و ماسه و ۳ الک در محدوده شن است. شکل‌های ۹ و ۱۰ منحنی دانه‌بندی شن و ماسه مصرفی به همراه محدوده طبق استاندارد ASTM C33 (1990) را نشان می‌دهند.

چنانچه دانه‌بندی مصالح سنگی استاندارد باشد، میزان فضای خالی میان دانه‌ها کمترین مقدار خواهد بود و در این صورت خمیر سیمان با آغشته کردن پیرامون دانه‌های سنگی، یکپارچگی مناسب در بتن ایجاد می‌کند که سبب دست‌یابی به مقاومت فشاری بیشینه می‌شود (Scrivener et al., 1988). بیشترین اندازه مصالح سنگی نیز باید طبق موارد مصرف که در استانداردهای مربوط به آن اشاره شده است، در نظر گرفته شود. در نمونه‌های که مورد آزمایش تک‌محوری قرار می‌گیرند، ترک‌های قائم در نمونه تحت باری برابر با ۵۰ تا ۷۵ درصد بار پایانی شروع می‌شوند. مقدار تنشی که در آن ترک‌ها به وجود می‌آید، بیشتر به اندازه و ویژگی‌های سنگدانه‌های درشت بستگی دارد (فامیلی، ۱۳۷۸؛ رمضانیان‌پور و همکاران، ۱۳۸۰).

– **وزن مخصوص:** اگر حجم مواد جامد به‌گونه‌ای در نظر گرفته شود که شامل منافذ غیر قابل نفوذ، ولی بدون لوله‌های مویینه شود، وزن مخصوص حاصل را وزن مخصوص ظاهری می‌گویند (فامیلی، ۱۳۷۸؛ رمضانیان‌پور و همکاران، ۱۳۸۰). معمولاً این محاسبات در مورد سنگدانه‌ها بر پایه حالت درون اشباع و سطح خارجی خشک صورت می‌گیرد؛ زیرا رطوبتی که در همه منافذ سنگدانه‌ها وجود دارد در واکنش‌های شیمیایی سیمان نقش خواهد داشت و بنابراین آن را به عنوان بخشی از سنگدانه‌ها در نظر می‌گیرند. با توجه به نقش وزن مخصوص ریزدانه در طرح اختلاط، آزمایش طبق استاندارد ASTM C128-07 (1990) روی نمونه‌ها انجام شد و نتایج در جدول ۱۱ مورد رده‌بندی قرار گرفت.

– **چگالی خردسنگ‌ها:** چگالی سنگ طبق انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ تعیین شده است. این آزمایش با غوطه‌ور کردن سنگ در آب و خشک کردن سطح خارجی آن تعیین می‌شود (Brown, 1981). چگالی ذرات دانه‌درشت یا خردسنگ‌ها برای ساخت بتن سبک در جایی که وزن بار مرده کمتری مورد نیاز است، مؤثر واقع می‌شود. همچنین در ساخت سدهای بتنی وزنی که وزن بار مرده بیشتری مورد نیاز است نیز کاربرد دارد (Yasar et al., 2003). بر این اساس، رده‌بندی چگالی سنگدانه‌های درشت در آزمایشگاه انجام شد که در جدول ۱۲ نشان داده شده است.

– **تخلخل و جذب آب سنگدانه‌ها:** تخلخل، نفوذپذیری و جذب آب سنگدانه‌ها بر ویژگی‌هایی مانند، پیوستگی به خمیر سیمان، مقاومت بتن در برابر یخ زدن و آب شدن، ثبات شیمیایی و مقاومت در برابر سایش آنها اثر دارد. این متغیر شاخص خوبی برای مقاومت در برابر هوازدگی و زوال بتن خواهد بود. روش انجام آزمایش در استانداردهای ASTM D2216-10 (1990) و BS EN 15414-3 (2011) شرح داده شده است. همچنین انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ نیز روش دیگر این آزمایش را شرح داده است (Brown, 1981). جدول ۱۳ رده‌بندی جذب آب سنگدانه‌ها را مطابق با استاندارد یادشده نشان می‌دهد.

– **تعیین سرعت صوت:** برای تعیین سرعت صوت، از دستگاه اندازه‌گیری سرعت موج فشاری استفاده و طبق استاندارد جهانی مکانیک سنگ این آزمایش روی نمونه‌های استوانه‌ای در حالت خشک و اشباع با سطح خشک انجام شد. روش کار در این آزمایش عبارت است از فرستادن امواج فشاری به درون نمونه و اندازه‌گیری سرعت آن (Del Rio et al., 2004; Brown, 1981). نتایج نشان داد که تعیین سرعت صوت هنگامی که سنگدانه‌ها در حالت اشباع با سطح خشک هستند، ارتباط بهتری با ویژگی‌های مقاومتی بتن برقرار می‌کند (شریفی و همکاران، ۱۳۸۸). بنابراین سرعت صوت سنگدانه‌های مورد مطالعه در حالت اشباع با سطح خشک رده‌بندی و در جدول ۱۴ ارایه شده است.

– **مقاومت در برابر آتش:** بتن ماده‌ای با رفتار مناسب تحت شرایط حریق است که ویژگی‌های عدم احتراق و ضریب هدایت گرمایی از استحکام آن حمایت می‌کند. با توجه به نقش کلیدی سنگدانه‌ها در پایداری و استحکام سازه‌های بتنی، برآوردی صحیح از مقاومت گرمایی آنها ضروری است. با توجه به آزمایش‌های شیمیایی XRF و استاندارد ASTM C1508-01 (1990)، افت در آتش برای هر سنگدانه تعیین و در جدول ۱۵ نشان داده شده است.

– **مقاومت در برابر یخ زدن و ذوب شدن:** استانداردهای AASHTO T 103 (2008) و ASTM C666 / C666M – 03 (1990) روشی توصیف می‌کنند که مقاومت سنگدانه‌ها در برابر چرخه‌های یخ زدن و آب شدن را تعیین می‌کند، که آزمایش مهمی برای شرایط آب‌وهوایی یخبندان است. این روش می‌تواند در قضاوت سلامت سنگدانه‌ها در برابر هوازدگی مؤثر باشد. چرخه‌های یخ و ذوب شدن ۶، ۲۵ و ۵۰ چرخه به وسیله استاندارد AASHTO T 103 (2008) توصیه شده است. در این آزمایش کاهش وزن ذرات پس از چرخه‌های یادشده به عنوان مقاومت بیان می‌شود.

آزمایش مقاومت در برابر یخ زدن و ذوب شدن برای سنگدانه‌های مورد بررسی طبق استاندارد AASHTO T 103 (2008) برای ۲۵ چرخه انجام و در جدول ۱۶ نشان داده شده است.

۳– ۴. ویژگی‌های مکانیکی سنگدانه‌ها

آزمایش‌های گوناگونی برای تعیین مقاومت سنگ مادر انجام شده است که می‌توان به آزمایش برزیلی، آزمایش چکش اشمیت و آزمایش فشاری تک‌محوری اشاره کرد. نخست برای این کار از نمونه‌ها، مغزه‌هایی با قطر ۵۴ میلی‌متر تهیه و پس از آماده‌سازی مغزه‌ها، آزمایش‌های یادشده در شرایط خشک و اشباع روی آنها انجام شده است. در مورد سنگدانه‌های رودخانه‌ای که امکان تهیه سنگ مادر وجود ندارد می‌توان به آزمایش بار نقطه‌ای و یا در صورت بزرگ‌تر بودن نمونه، به آزمایش مقاومت کششی بسنده کرد.

– **آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری:** مقاومت فشاری تک‌محوری به عنوان آزمایش پایه در بیشتر پروژه‌های مهندسی انجام می‌شود و کمتر پیش می‌آید که در طرحی، مقاومت فشاری تک‌محوری مورد نیاز نباشد. با استفاده از نتایج این آزمایش، متغیرهای مقاومت تک‌محوری مانند مدول الاستیسته، ضریب پواسون و رده‌بندی مهندسی توده سنگ انجام می‌شود. جزییات آزمایش تعیین مقاومت تک‌محوری در استانداردهای جهانی مکانیک سنگ، ASTM D2938-95 (1990)، ASTM C180-72 (1990)، BS EN 12504-1 (2000) و ASTM D3148-02 (1990) شرح داده شده است (فامیلی، ۱۳۷۸؛ رمضانیان‌پور و همکاران، ۱۳۸۰). آزمایش مقاومت تک‌محوری طبق روش پیشنهادی استاندارد جهانی مکانیک سنگ روی نمونه‌های استوانه‌ای انجام شده است (شکل ۱۱). نمونه مورد آزمایش پس از جایگیری در دستگاه با سرعت ۰/۱ تا ۰/۳ مگاپاسکال در ثانیه تا حد گسیختگی بارگذاری می‌شود (Brown, 1981). پس از انجام این آزمایش روی سنگدانه‌های مورد مطالعه، نتایج آن مورد ارزیابی قرار گرفت که در جدول ۱۷ رده‌بندی آن ارایه شده است.

– **آزمایش برزیلی:** آزمایش برزیلی برای به دست آوردن مقاومت کششی سنگ به روش کشش غیر مستقیم به کار می‌رود. استاندارد این آزمایش در بخش ۱۱۷ آیین‌نامه‌های BS EN 12390-6 (2009)، استاندارد جهانی مکانیک سنگ و ASTM C496 & C496 / C496M-11 (1990) توصیف شده است. در این پژوهش، آزمایش برزیلی بر پایه روش پیشنهادی استاندارد جهانی مکانیک سنگ روی نمونه‌هایی با نسبت طول به قطر ۰/۵ در حالت اشباع با سطح خشک انجام شد (Brown, 1981) که نتایج آن در جدول ۱۸ رده‌بندی شده است.

– **شاخص بار نقطه‌ای:** این آزمایش به وسیله Broch & Franklin (استاندارد جهانی مکانیک سنگ) شرح داده شده است. نمونه‌های با قطر ۱۰ تا ۷۰ میلی‌متر با این روش آزمایش می‌شوند. شاخص بار نقطه‌ای با ضریبی قابل تبدیل به مقاومت تک‌محوری فشارشی است. آزمایش بار نقطه‌ای بیشتر به عنوان روش غیر مستقیم برای اندازه‌گیری مقاومت کششی یا فشاری سنگ گزارش می‌شود. این آزمایش به دلیل سادگی، راحت بودن آماده‌سازی نمونه‌ها و کاربردی بودن به‌طور گسترده انجام می‌شود. این آزمایش طبق روش پیشنهادی استاندارد جهانی مکانیک سنگ روی نمونه‌ها انجام شد (Brown, 1981). در جدول ۱۹ نتایج رده‌بندی مربوط به این متغیر دیده می‌شود.

– **آزمایش ارزش فشاری:** آزمایش ارزش فشاری سنگدانه‌ها در مواردی که سنگدانه در ساختار جاده مصرف می‌شود و یا در معرض سایش زیاد قرار دارد مفید خواهد بود. مشروح کامل این آزمایش در آیین‌نامه BS 812:111 (1990) آمده است. این آزمایش طبق استاندارد یادشده روی نمونه‌ها به‌صورت خشک و اشباع انجام شده است. جدول ۲۰ رده‌بندی انجام شده مطابق با این آزمایش را در شرایط اشباع نشان می‌دهد. آزمایش دیگر ارزش ۱۰ درصد دانه‌ریز است که در استاندارد BS 812:110 (1990) توصیف شده است. در این آزمایش، نیروی لازم برای تولید ژرفای مشخصی فرورفتگی به وسیله پیستون دستگاه سنجیده می‌شود.

– **ارزش ضربه‌ای سنگدانه‌ها:** در آیین‌نامه BS 812:112 (1990)، آزمایشی برای تعیین ویژگی‌های خرد شدن مجموعه سنگدانه‌ها توصیه شده است. این آزمایش که ارزش ضربه‌ای نامیده می‌شود، سنجشی برای مقاومت در برابر پودر شدن سنگدانه‌هاست. این آزمایش طبق استاندارد یادشده در شرایط اشباع با سطح خشک روی سنگدانه‌های مورد مطالعه انجام شد که نتایج آن در جدول ۲۱ رده‌بندی شده است.

– **تعیین سختی با استفاده از چکش اشمیت:** آزمایش چکش برجهندگی اشمیت از دیرین‌ترین آزمایش‌های غیر مخرب است که هنوز به میزان گسترده‌ای برای تعیین سختی مصالح به کار می‌رود. سختی اشمیت کاربردهای مختلفی در رده‌بندی سنگ‌ها و تعیین ویژگی‌های مهندسی مصالح دارد. مشروح این آزمایش در استاندارد بین‌المللی مکانیک سنگ آمده است. آزمایش چکش اشمیت مطابق با استاندارد بین‌المللی مکانیک سنگ روی سطح صاف نمونه‌های سنگ مادر انجام شد. نوع چکش به کار رفته N34 بوده که دارای انرژی برخوردی ۲/۲۰۷ نیوتن متر است (شریفی و همکاران، ۱۳۹۰). جدول ۲۲ رده‌بندی انجام شده مطابق با این آزمایش را در شرایط اشباع با سطح خشک نشان می‌دهد.

– **مقاومت در برابر سایش:** افزون بر مقاومت و سختی، مقاومت در برابر سایش نیز یک خاصیت مهم سنگدانه مصرف شده در جاده‌ها و کف‌هایی است که در معرض آمد و شد زیاد قرار می‌گیرند. در این رابطه چندین آزمایش وجود دارند؛ آزمایش ارزش سایش، ضریب میکرودوال، آزمایش فرسایش اصطکاکی و آزمایش سایش لوس‌آنجلس چهار نمونه از آزمایش‌های مقاومت در برابر سایش است. آزمایش ارزش سایش روی ذرات سنگدانه‌ها BS EN 1097-1 (2011) و ASTM D6928-10 (1990) تجویز شده است. نمونه در یک دستگاه سایش استاندارد شده که در چرخش سایش آن ۵۰۰ دور چرخانیده و روی آن به‌طور مداوم ماسه با روند توصیه شده‌ای ریخته می‌شود، مورد آزمایش قرار می‌گیرد.

آزمایش فرسایش اصطکاکی نیز سنگدانه‌ها را به‌صورت مجموعه‌ای مورد آزمایش قرار می‌دهد. از معایب این آزمایش آن است که اختلاف عددی کمی را میان سنگدانه‌هایی که بسیار متفاوت‌اند، به دست می‌دهد.

استانداردهای AASHTO TP 58-00 (2008) و ASTM C670-10 (1990) روش به دست آوردن آنچه را که ضریب میکرودوال نامیده می‌شود، توصیف می‌کنند که خود سنجشی برای سنگدانه‌های میان ۱۰ تا ۱۴ میلی‌متر است که از اصطکاک میان آن ذرات و گلوله‌های ساینده موجود در یک بشکه گردنده تولید می‌شوند. این ضریب نشان‌دهنده افت درصد جرمی برای ذراتی است که اندازه آنها تا حد کمتر از ۱/۶ میلی‌متر کاهش یافته است. آزمایش میکرودوال طبق استاندارد ASTM C670-10 (1990) روی سنگدانه‌های مورد مطالعه انجام شد که نتایج آن در جدول ۲۳ رده‌بندی شده است.

آزمایش سایش لوس‌آنجلس نیز بیشتر در ایالات متحده برای ارزیابی کلی کیفیت سازه‌ای درشت‌دانه مورد استفاده قرار می‌گیرد که روش سودمندی برای تشخیص درستی ساختاری سنگدانه است. چگونگی انجام این آزمایش در آیین‌نامه ASTM C131-03 (1990) شرح داده شده است. این آزمایش به تعداد ۵۰۰ دور روی نمونه‌ها انجام شد که نتایج آن در جدول ۲۴ دیده می‌شود.

۳– ۵. ساخت بتن

پس از معرفی ویژگی‌های و معیارهای سنگدانه‌هایی مصرفی در بتن، لازم است از سنگدانه‌ها بتن تهیه شود و کیفیت بتن ساخته شده مورد ارزیابی قرار گیرد تا معیار ارایه شده مورد تصدیق و اعتبارسنجی قرار گیرد. به وسیله ساخت بتن و آزمایش‌های انجام شده روی آن، کیفیت سنگدانه‌ها برای ساخت بتن مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. برای این منظور، ابتدا طرح اختلاطی طراحی شده و در ادامه از سنگدانه‌های موجود طبق این طرح بتن ساخته شده است. طرح اختلاطی طراحی شده در این پژوهش بر پایه انجمن بتن آمریکا (ACI Committee 211, 2009) در جدول ۲۵ نشان

داده شده است. در این طرح، 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 ۱ درصد در نظر گرفته شده است (مستوفی‌نژاد، ۱۳۸۵؛ سامع، ۱۳۷۷).

پس از تعیین ویژگی‌های مصالح و طرح اختلاط، ساخت بتن بر پایه نسبت وزنی مصالح مختلف در آزمایشگاه و به وسیله دستگاه مخلوط‌کن انجام شد. پیش از انتقال بتن به درون قالب (نمونه‌گیری) مقداری از آن برای آزمایش اسلامپ جدا می‌شود (سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور، ۱۳۷۹). آزمایش اسلامپ مطابق ASTM C143 / C 143M -08 & 010 (1990) برای هر طرح اختلاط انجام شده است. مقدار اسلامپ اندازه‌گیری شده برای هر مخلوط بتنی میان ۲۵ تا ۳۵ میلی‌متر متغیر بوده است. شکل ۱۲ چگونگی آزمایش اسلامپ را نشان می‌دهد. پس از آزمایش اسلامپ، نمونه‌گیری از بتن ساخته شده در قالب‌های مکعبی و استوانه‌ای طبق استانداردهای مربوط انجام شد.

در ادامه سطح بیرونی نمونه‌ها تا ۲۴ ساعت در دمای آزمایشگاه و به وسیله گونی پوشش داده شد و در پایان این مدت، نمونه‌ها از قالب بیرون آورده و درحوضچه بتن که دارای آب با دمای ۲±۲۲ درجه سانتی‌گراد بود، تا زمان انجام آزمایش‌های فشاری و کششی نگهداری شدند (مستوفی‌نژاد، ۱۳۸۵؛ شاه‌نظری و سحاب، ۱۳۷۱).

– **آزمایش مقاومت فشاری بتن:** نمونه‌های مکعبی استاندارد تهیه شده در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه در حالت اشباع با سطح خشک تحت آزمایش فشاری طبق BS EN 12390-3 (2009) قرار گرفته است (شکل ۱۳). نیرو به‌طور یکنواخت، ممتد و بدون ضربه با آهنگ ازدیاد تنش ۰/۱ تا ۰/۳ مگاپاسکال در ثانیه روی نمونه اعمال شده است. رده‌بندی مقاومت فشاری بتن ساخته شده در جدول ۲۶ نشان داده شده است.

– **آزمایش مقاومت کششی بتن:** مقاومت کششی نیز به وسیله دستگاه برزیلی طبق BS EN 12390-6 (2009) روی نمونه‌های استوانه‌ای انجام گرفته است که نتایج رده‌بندی آن در جدول ۲۷ نشان داده شده است.

– **مدول الاستیسیته بتن:** مقاومت و الاستیسیته سنگدانه‌ها به ترکیبات، بافت و ساختار آنها بستگی دارد. بنابراین مقاومت کم سنگدانه‌ها ممکن است ناشی از ضعیف بودن ذرات سازنده آنها باشد و یا اینکه ممکن است ذرات مقاومت کافی داشته باشند ولی خوب به یکدیگر بافته نشده و به هم نچسبیده باشند. مقاومت بتن نیز به مقاومت سنگدانه‌ها و به مقاومت ناحیه اتصال سنگدانه به خمیر سیمان بستگی دارد که این خود با جنس سنگدانه‌ها ارتباط مستقیم دارد (Scrivener et al., 1988).

پس از انجام آزمون مقاومت فشاری تک‌محوری، از تقسیم بار بیشینه بر سطح مقطع نمونه، مقاومت به دست می‌آید و سپس منحنی تنش- کرنش رسم می‌شود (BS 1881-114, 1983). با استفاده از نتایج این آزمایش، مقاومت تک‌محوری بتن و مدول الاستیسته آن تعیین می‌شود. پس از انجام آزمون مقاومت فشاری تک‌محوری و رسم منحنی‌های تنش- کرنش، مدول الاستیسیته نمونه‌ها در سنین مختلف تعیین شده است. تعیین مدول الاستیسیته به روش مماسی (۵۰ درصد مقاومت پایانی) انجام شده است (جدول ۲۸).

۴– ارزیابی نتایج و ارایه معیار

پس از تعیین ویژگی‌های مختلف سنگدانه‌ها در آزمایشگاه، آنها بر پایه روش‌های آماری به ۵ رده رده‌بندی و در جدول‌هایی ارایه شدند. در این جدول‌ها بیشتر از ۲۰ مورد از ویژگی‌های مهم سنگدانه‌ها بررسی و هر ویژگی‌های به ۵ رده از خیلی ضعیف تا خیلی خوب تقسیم‌بندی شده است. رده I برای ویژگی‌های ضعیف (امتیاز ۱) و رده V برای ویژگی‌های خیلی خوب (امتیاز ۵) تعیین شده است. در ادامه ویژگی‌های مشابه در یک گروه قرار داده شده که این گروه‌ها شامل ویژگی‌های مقاومتی، سایش و طاقت، چگالی و تخلخل، شکل و بافت و دوام و پایداری است و هر گروه چهار خاصیت مهم دارد. در مراحل بعد برای رسیدن به امتیاز پایانی، گروه‌های مختلف ویژگی‌های سنگدانه‌ها کنار هم گذاشته و برای آنها وزنی در نظر گرفته شد. در ادامه وزن هر گروه مشخص شد تا بر پایه امتیاز هر رده، امتیاز گروه مشخص و در پایان امتیاز پایانی برای کیفیت سنگدانه‌ها تعیین شود. بنابراین باید مشخص شود کدام خاصیت از سنگدانه بیشترین تأثیر را بر مقاومت بتن دارد که بیشترین وزن به آن داده شود. برای این مهم از مطالعات آماری انجام شده روی سنگدانه‌های مختلف (Basheer et al., 2005؛ Pereira et al., 2009؛ شریفی و همکاران، ۱۳۹۲) کمک گرفته شد. این پژوهشگران با انجام آزمایش‌هایی روی سنگدانه‌های مختلف، تأثیر هر یک از ویژگی‌های سنگدانه بر مقاومت بتن را تعیین کرده‌اند. بر پایه مطالعات انجام شده توسط این پژوهشگران، سهم ویژگی‌های مقاومتی سنگدانه‌ها بر مقاومت بتن ۳۰ درصد، سایش و طاقت ۲۵ درصد، چگالی و تخلخل ۲۰ درصد، شکل و بافت ۱۵ درصد و دوام و پایداری ۱۰ درصد گزارش شده است. با توجه به اهمیت هر ویژگی، وزن هر گروه به گونه‌ای تعیین شد که امتیاز پایانی میان ۰ تا ۱۰۰ به دست آید. برای نمونه در گروه ویژگی‌های مقاومتی به رده خیلی ضعیف امتیاز ۶ (امتیاز ۱ و وزن ۶) و در گروه دوام و پایداری به رده خیلی ضعیف امتیاز ۲ (امتیاز ۱ و وزن ۲) داده شده است.

نکته مهم برای کاربرد معیار این است که باید با توجه به ویژگی‌های مقاومتی، سایش و طاقت، چگالی و تخلخل، شکل و بافت و دوام و پایداری از هر گروه دست کم یک گزینه انتخاب، ویژگی‌های آن در آزمایشگاه بررسی و با توجه به عدد به دست آمده در آزمایشگاه به آن امتیاز داده شود. در ادامه مجموع امتیازات به دست آمده به عنوان جمع کلی امتیاز گزارش می‌شود. چنانچه در هر گروه بیشتر از یک گزینه استفاده شود، باید امتیازات با هم جمع و میانگین آنها به عنوان امتیاز گروه در نظر گرفته شود. با توجه به مقاومت طراحی که ۲۵ مگاپاسکال در نظر گرفته شده است، نتیجه‌گیری می‌شود که بتن‌های رده خوب و خیلی خوب دارای مقاومتی بالاتر از مقاومت طراحی و رده ضعیف و خیلی ضعیف دارای مقاومتی پایین‌تر از مقاومت طراحی هستند. بنابراین مقاومت بتن تهیه شده با هر عیاری از سیمان که باشد، اگر ویژگی‌های سنگدانه ها در رده خوب و خیلی خوب قرار گیرد، مقاومت بتن ساخته شده بالاتر از مقاومت طراحی خواهد شد.

پیش از استفاده از این معیار ابتدا باید محدودیت‌ها و ضوابط یادشده در بخش پایین جدول ۲۹ بررسی شود؛ چنانچه سنگدانه‌ها دست کم یکی از ۷ محدودیت یادشده را داشته باشند، از دید کیفی مورد تأیید این معیار و مناسب برای ساخت بتن نیستند. در این پژوهش ویژگی‌های سنگ‌شناسی سنگدانه‌ها با استفاده از میکروسکوپ انجام و سبب شناسایی سنگدانه‌های بالقوه واکنش‌زا شد که در بخش محدودیت‌ها به آن اشاره شده است. به‌طور کلی محدودیت‌های ارایه شده شرط اولیه ساخت بتن است و قابل رده‌بندی نیست. اگر سنگدانه‌ای واکنش‌زا و یا دارای یکی از محدودیت‌ها باشد، برای استفاده در بتن مطلوب نیست و مورد امتیازدهی قرار نمی‌گیرد.

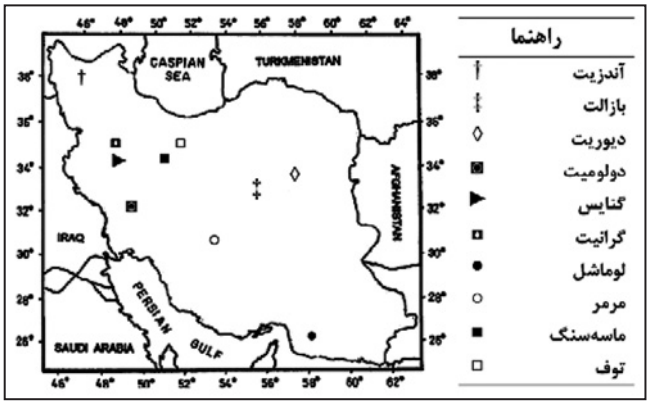
در دسته دوام و پایداری، گزینه‌های مختلفی ارایه شده است که با توجه به کاربرد بتن در مناطق سردسیر، در موج شکن‌ها و در مواقعی که نیاز به پایداری در برابر آتش است، کارشناس مربوط می‌تواند یکی از آنها را انتخاب و استفاده کند. البته گفتنی است که دوام و پایداری ممکن است در مقاومت کوتاه‌مدت بتن خیلی مؤثر نباشد ولی در مقاومت درازمدت و پایداری آن مؤثر است. پس در مواقعی که دوام و پایداری بتن مورد نظر است، می‌توان به این گروه وزن بالاتری داد و از گروه‌های دیگر کاست، به‌گونه‌ای که امتیاز کل معیار بیشتر از ۱۰۰ نشود.

۵– نتیجه‌گیری

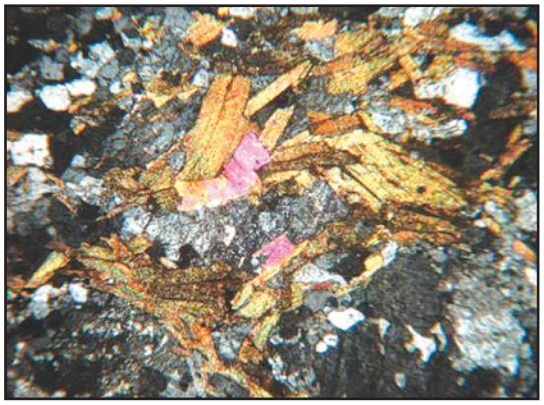
در این پژوهش با توجه به مطالعات میدانی و بررسی‌های آزمایشگاهی، معیاری برای

انتخاب مصالح طبیعی قابل مصرف در بتن ارایه شد. این معیار با توجه به ۲۰۰ نمونه بتنی و بیش از ۱۰۰۰ کیلوگرم سنگدانه ارایه شده است؛ سنگدانه‌ها از سه گروه سنگ‌های موجود و از ۱۰ معدن از نقاط مختلف ایران گردآوری شده‌اند. منابع موجود، معادنی بوده که نقش مهمی در منابع قرضه آن منطقه داشته است و از آنها برای ساخت سازه‌های بتنی استفاده می‌شود. برخی از این سنگدانه‌ها با وجود داشتن ویژگی‌های نامطلوب، به علت کم‌هزینه بودن و در دسترس نبودن دیگر منابع در هر منطقه، مورد استفاده قرار گرفته می‌شود.

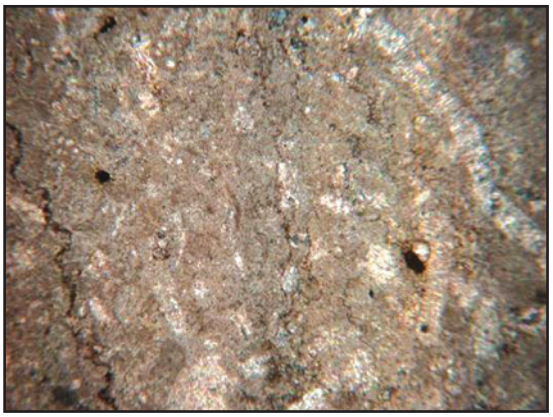
برای استفاده از این معیار نیاز است که با توجه به کاربرد بتن، دست کم یک مورد از هر گروه انتخاب و طبق استاندارد آزمایش‌های مربوط روی آن انجام شود تا امتیاز رده آن مشخص شود. در ادامه با توجه به امتیاز به دست آمده از هر رده، جمع امتیازات تعیین و به ویژگی‌های کلی بتن پی برده می‌شود. با توجه به دقت و آسانی این معیار، کاربرد آن برای انتخاب مصالح مطلوب است؛ به‌گونه‌ای که با کمترین تعداد آزمایش‌های لازم، معادن قرضه مناسب شناسایی می‌شود و همچنین برآوردی از مقاومت پایانی بتن ساخته شده در اختیار مهندسین مربوط قرار می‌گیرد. این معیار با توجه به جنس و گوناگونی نمونه‌های مورد استفاده، دارای دامنه کاربرد گسترده‌ای بوده و در مناطق مختلف جغرافیایی قابل کاربرد است.



شکل ۱- محل نمونه‌برداری مصالح استفاده شده.

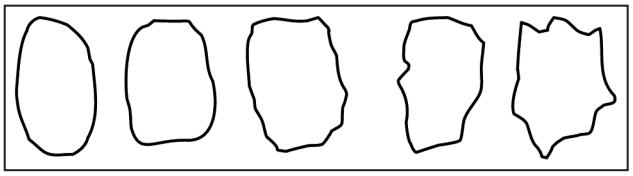


شکل ۲- تصویر میکروسکوپی گنایس با بزرگنمایی ۱۶ برابر.



شکل ۳- تصویر میکروسکوپی دولومیت با بزرگنمایی ۱۶ برابر.

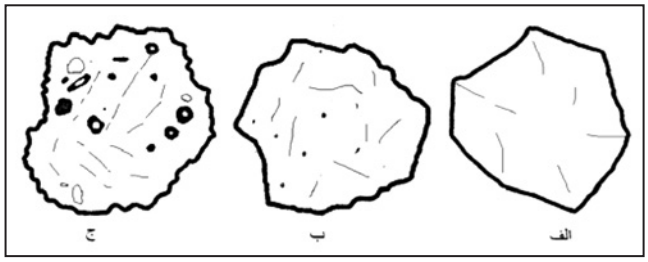
شکل ۴- ابزار آزمایش واکنش‌پذیری سنگدانه‌ها طبق ASTM C289.



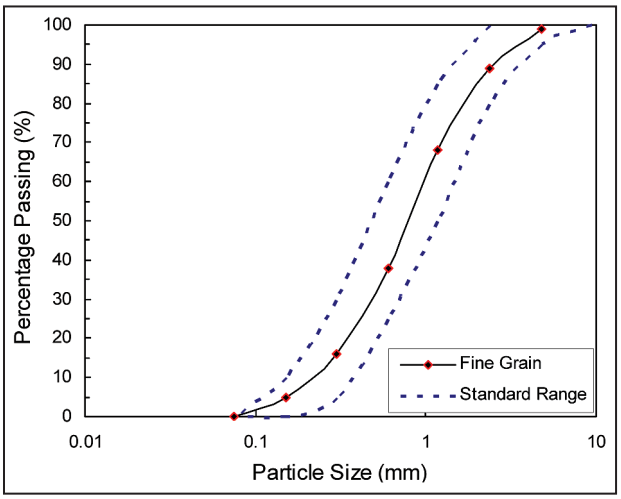
شکل ۵- گردشدگی ذرات (افزایش گردشدگی از راست به چپ).

شکل ۶- ابزار تعیین ضریب تورق.

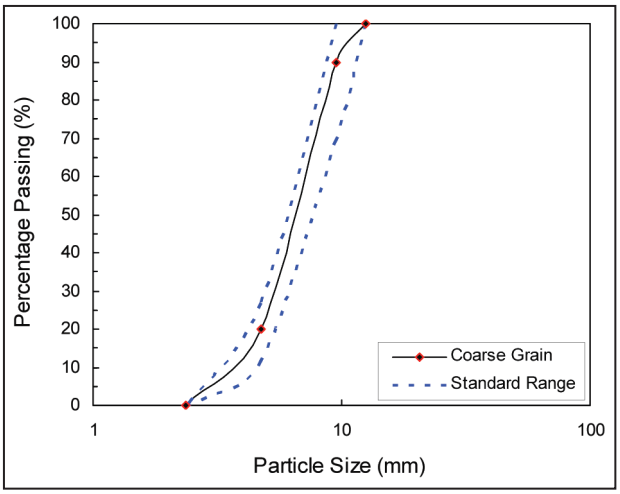
شکل ۷- ابزار تعیین ضریب تطویل.



شکل ۸- بافت سطحی سنگدانه‌ها: الف) شیشه‌ای؛ ب) زبر؛ ج) کرمو.



شکل ۹- دانه‌بندی مصالح ریزدانه (ASTM C33-03).



شکل ۱۰- دانه‌بندی مصالح درشت‌دانه (ASTM C33-03).

شکل ۱۱- انجام آزمایش مقاومت تک‌محوری سنگ مادر.

شکل ۱۲- انجام آزمایش اسلامپ.

شکل ۱۳- انجام آزمایش مقاومت تک‌محوری فشاری بتن.

جدول ۱- رده‌بندی سنگدانه‌ها بر پایه درصد چرت و شیل.

رده	مقدار (٪)	نوع سنگدانه
I	بیشتر از ۵	ماسه‌سنگ رس‌دار
II	۵-۴	لوماشل
III	۴-۳	دولومیت
IV	۳-۲	توف، مرمر
V	کمتر از ۲	گنایس، گرانیت، آندزیت، بازالت، دیوریت

جدول ۲- رده‌بندی مصالح ریزدانه سنگدانه‌ها.

رده	مقدار (٪)	نوع سنگدانه
I	بیشتر از ۸	ماسه‌سنگ رس‌دار
II	۸-۶	لوماشل
III	۶-۴	دولومیت
IV	۴-۲	توف، مرمر
V	کمتر از ۲	گنایس، گرانیت، بازالت، آندزیت، دیوریت

جدول ۳- کانی‌ها و سنگ‌های واکنش‌زا طبق استاندارد ASTM C294.

ردیف	کانی/سنگ	نوع واکنش
۱	اپال، کلسدونی، کریستوبالیت، تریدیمایت، چرت	بالقوه قلیایی سیلیسی
۲	ژیپس، انیدرایت	حمله سولفاته
۳	آبسیدین، پومیس، داسیت	بالقوه قلیایی سیلیسی
۴	آرژیلیت، سیلستون، شیل	یخ و آب‌شدگی
۵	دولومیت، میکریت، مارن، سنگ گچ	قلیایی کربناتی
۶	جاسپار، فیلینت، نواکلیت	بالقوه قلیایی سیلیسی
۷	فیلیت، اسلیت، شیست	بالقوه قلیایی سیلیسی

جدول ۴- شاخص دوام سنگدانه‌ها.

رده	شاخص دوام (٪)	نوع سنگدانه
I	کمتر از ۸۰	لوماشل، ماسه‌سنگ رس‌دار
II	۸۵-۸۰	مرمر
III	۹۰-۸۵	دولومیت
IV	۹۵-۹۰	توف، بازالت، دیوریت
V	بیشتر از ۹۵	گنایس، گرانیت، آندزیت

جدول ۵- سلامت سنگدانه‌ها در سولفات منیزیم (۵ چرخه).

رده	افت وزنی (٪)	نوع سنگدانه
I	بیشتر از ۱۶	لوماشل، ماسه‌سنگ رس‌دار
II	۱۶-۱۲	دولومیت
III	۱۲-۸	مرمر
IV	۸-۴	توف، آندزیت، بازالت
V	کمتر از ۴	گنایس، گرانیت، دیوریت

جدول ۶- رده‌بندی مواد زیان‌آور آلی.

رده	مواد زیان‌آور (٪)	نوع سنگدانه
I	بیشتر از ۲/۵	لوماشل
II	۲/۵-۲	-
III	۲-۱/۵	ماسه‌سنگ رس‌دار
IV	۱/۵-۱	دولومیت، مرمر
V	کمتر از ۱	توف، گرانیت، بازالت، گنایس، دیوریت

جدول ۷- رده‌بندی کلی گردشدگی ذرات (ASTM D3398).

رده	شکل	توصیف
I	کاملاً کروی	هیچ یک از سطوح اصلی آن باقی نمانده باشد
II	نیمه کروی	سطوح اولیه تقریباً محو شده باشد
III	گوشه‌دار	سایش قابل ملاحظه و کاهش مساحت سطوح
IV	ورقه‌ای و گوشه‌دار	قدری سایش رخ داده، اما سطوح دست نخورده‌اند
V	ورقه‌ای و دراز	آثار کمی از سایش وجود داشته باشد

جدول ۸- رده‌بندی کلی گردشدگی بر اساس BS EN 933-3:2012.

رده	شکل	توصیف
I	کاملاً گرد گوشه	هیچ یک از سطوح اصلی آن باقی نمانده باشد
II	گرد گوشه	سطوح اولیه تقریباً محو شده باشد
III	نیمه گرد گوشه	سایش قابل ملاحظه و مساحت سطوح کاهش یافته باشد
IV	نیمه گوشه‌دار	قدری سایش رخ داده، اما سطوح دست نخورده‌اند
V	گوشه‌دار	آثار کمی از سایش وجود داشته باشد

جدول ۹- رده‌بندی بافت سطحی سنگدانه‌های مورد مطالعه.

رده	بافت سطحی	نوع سنگدانه
I	کرمو	لوماشل
II	خشن	دولومیت
III	زبر	توف، ماسه‌سنگ رس‌دار
IV	صاف	آندزیت، بازالت، مرمر
V	شیشه‌ای	گرانیت، دیوریت، گنایس

جدول ۱۰- رده‌بندی هوازدگی و دگرسانی.

رده	هوازدگی/دگرسانی	نوع سنگدانه
I	هوازدگی خیلی زیاد	لوماشل
II	هوازدگی زیاد	گنایس، ماسه‌سنگ رس‌دار
III	هوازدگی متوسط	بازالت، دیوریت
IV	هوازدگی کم	توف، دولومیت، آندزیت
V	بدون هوازدگی	مرمر، گرانیت

جدول ۱۱- رده‌بندی وزن مخصوص.

رده	وزن مخصوص	نوع سنگدانه
I	کمتر از ۲/۴۰	لوماشل، دیوریت
II	۲/۴۰ -۲/۵۰	ماسه‌سنگ رس‌دار، توف
III	۲/۵۰ -۲/۶۰	آندزیت
IV	۲/۶۰ -۲/۷۰	گنایس،گرانیت، مرمر
V	بیشتر از ۲/۷۰	دولومیت، بازالت

جدول ۱۲- رده‌بندی چگالی خردسنگ‌ها.

رده	چگالی (kg/m^3)	نوع سنگدانه
I	کمتر از ۲۲۰۰	لوماشل، دیوریت
II	۲۲۰۰ -۲۳۰۰	ماسه‌سنگ رس‌دار
III	۲۳۰۰ -۲۴۰۰	آندزیت
IV	۲۴۰۰ -۲۵۰۰	گنایس،گرانیت، مرمر، توف
V	بیشتر از ۲۵۰۰	دولومیت، بازالت

جدول ۱۳- رده‌بندی جذب آب.

رده	جذب آب (٪)	نوع سنگدانه
I	بیشتر از ۶	لوماشل
II	۶-۵	دیوریت
III	۵-۴	توف، آندزیت، ماسه‌سنگ رس‌دار
IV	۴-۳	گنایس
V	کمتر از ۳	مرمر، بازالت، دولومیت، گرانیت

جدول ۱۴- رده‌بندی سرعت صوت.

رده	سرعت صوت (m/s)	نوع سنگدانه
I	کمتر از ۴۰۰۰	لوماشل، آندزیت، ماسه‌سنگ
II	۴۰۰۰-۴۵۰۰	دیوریت، توف
III	۴۵۰۰-۵۰۰۰	گنایس
IV	۵۰۰۰-۵۵۰۰	گرانیت
V	بیشتر از ۶۰۰۰	بازالت، مرمر، دولومیت

جدول ۱۵- مقاومت در برابر آتش.

رده	درصد قابل اشتعال	نوع سنگدانه
I	بیشتر از ۱۵	مرمر، دولومیت،لوماشل
II	۱۵-۷	ماسه‌سنگ رس‌دار
III	۷-۳	گنایس، دیوریت
IV	۳-۱	آندزیت، توف
V	کمتر از ۱	گرانیت، بازالت

جدول ۱۶- مقاومت در یخ زدن و ذوب شدن (۲۵ چرخه).

رده	افت وزنی (٪)	نوع سنگدانه
I	بیشتر از ۳	لوماشل
II	۳-۲	ماسه‌سنگ رس‌دار، توف
III	۲-۱	گنایس، دیوریت، بازالت
IV	۱-۰/۵	آندزیت، مرمر، دولومیت
V	کمتر از ۰/۵	گرانیت

جدول ۱۷- رده‌بندی مقاومت فشاری.

رده	مقاومت فشاری (MPa)	نوع سنگدانه
I	کمتر از ۲۰	لوماشل، دیوریت
II	۲۰-۵۰	ماسه‌سنگ رس‌دار
III	۵۰-۸۰	بازالت، گنایس، آندزیت
IV	۸۰-۱۱۰	توف، گرانیت، ماربل، بازالت
V	بیشتر از ۱۱۰	-

جدول ۱۸- رده‌بندی مقاومت کششی.

رده	مقاومت کششی (MPa)	نوع سنگدانه
I	کمتر از ۲	لوماشل، دیوریت
II	۴-۲	ماسه‌سنگ رس‌دار
III	۶-۴	بازالت، گنایس، آندزیت
IV	۸-۶	توف، گرانیت، مرمر، بازالت
V	بیشتر از ۸	-

جدول ۱۹- رده‌بندی شاخص بار نقطه‌ای.

رده	بار نقطه‌ای (MPa)	نوع سنگدانه
I	کمتر از ۲	لوماشل
II	۲-۳	دیوریت
III	۳-۴	ماسه‌سنگ رس‌دار
IV	۴-۵	مرمر، گنایس، بازالت، آندزیت
V	بیشتر از ۵	دولومیت، توف، گرانیت

جدول ۲۰- رده‌بندی ارزش فشاری.

رده	ارزش فشاری (٪)	نوع سنگدانه
I	بیشتر از ۵۰	لوماشل
II	۴۰-۵۰	دیوریت، ماسه‌سنگ رس‌دار
III	۳۰-۴۰	مرمر، گنایس، آندزیت
IV	۲۰-۳۰	بازالت، دولومیت
V	کمتر از ۲۰	گرانیت، توف

جدول ۲۱- رده‌بندی ارزش ضربه.

رده	ارزش ضربه (٪)	نوع سنگدانه
I	بیشتر از ۴۰	لوماشل
II	۳۰-۴۰	ماسه‌سنگ رس‌دار
III	۲۰-۳۰	دیوریت، مرمر
IV	۱۰-۲۰	گنایس، آندزیت
V	کمتر از ۱۰	توف، دولومیت، بازالت، گرانیت

جدول ۲۲- رده‌بندی سختی اشمیت.

رده	سختی اشمیت (ضربه)	نوع سنگدانه
I	کمتر از ۱۰	لوماشل
II	۱۰-۲۰	دیوریت
III	۲۰-۳۰	ماسه‌سنگ رس‌دار
IV	۳۰-۴۰	مرمر، گنایس، بازالت، آندزیت
V	بیشتر از ۴۰	دولومیت، توف، گرانیت

جدول ۲۳- رده‌بندی مقاومت در برابر سایش میکرودوال.

رده	افت (٪)	نوع سنگدانه
I	بیشتر از ۵۰	لوماشل
II	۴۰-۵۰	ماسه‌سنگ رس‌دار
III	۳۰-۴۰	مرمر، توف، دولومیت
IV	۲۰-۳۰	دیوریت، آندزیت
V	کمتر از ۲۰	بازالت، گنایس، گرانیت

جدول ۲۴- رده‌بندی مقاومت در برابر سایش لوس‌آنجلس.

رده	افت (٪)	نوع سنگدانه
I	بیشتر از ۵۰	لوماشل
II	۴۰-۵۰	ماسه‌سنگ رس‌دار
III	۳۰-۴۰	مرمر، توف، دولومیت
IV	۲۰-۳۰	دیوریت، گنایس
V	کمتر از ۲۰	بازالت، آندزیت، گرانیت

جدول ۲۵- نسبت آمیختگی مصالح.

نوع مصالح	میزان اختلاط	واحد
سیمان	۳۳۶	kg/m^3
آب	۱۵۰	kg/m^3
هوا	۱	٪
ماسه	۸۵۰	kg/m^3
شن	۹۶۰	kg/m^3

جدول ۲۶- رده‌بندی مقاومت فشاری بتن.

رده	مقاومت فشاری (MPa)	نوع سنگدانه
I	کمتر از ۱۵	لوماشل، دیوریت
II	۱۵-۲۰	ماسه‌سنگ رس‌دار، آندزیت
III	۲۰-۲۵	بازالت، گرانیت
IV	۲۵-۳۰	توف، مرمر، گنایس
V	بیشتر از ۳۰	دولومیت

جدول ۲۷- رده‌بندی مقاومت کششی بتن.

رده	مقاومت کششی (MPa)	نوع سنگدانه
I	کمتر از ۲	لوماشل، دیوریت
II	۲-۲/۵	ماسه‌سنگ رس‌دار، آندزیت
III	۲/۵-۳	بازالت، گرانیت، گنایس
IV	۳-۳/۵	توف، مرمر
V	بیشتر از ۳/۵	دولومیت

جدول ۲۸- رده‌بندی مدول الاستیسیته بتن.

رده	مدول الاستیسیته (GPa)	نوع سنگدانه
I	کمتر از ۱۵	لوماشل، دیوریت
II	۱۵-۲۰	ماسه‌سنگ‌رس‌دار، آندزیت، بازالت
III	۲۰-۲۵	مرمر، گرانیت، گنایس، توف
IV	۲۵-۳۰	دولومیت
V	بیشتر از ۳۰	-

جدول ۲۹- معیار کیفیت منابع قرضه جهت مصرف در بتن.

عنوان			ارزش و کیفیت (رده)				
			I	II	III	IV	V
گروه	ردیف	متغیرهای سنگدانه	سنگدانه خیلی‌ضعیف	سنگدانه ضعیف	سنگدانه متوسط	سنگدانه مناسب	سنگدانه خوب
خواص مقاومتی	۱	مقاومت فشاری (MPa)	کمتر از ۲۰	۲۰-۵۰	۵۰-۸۰	۸۰-۱۱۰	بیشتر از ۱۱۰
	۲	مقاومت کششی (MPa)	کمتر از ۲	۲-۴	۴-۶	۶-۸	بیشتر از ۸
	۳	بار نقطه‌ای (MPa)	کمتر از ۲	۲-۳	۳-۴	۴-۵	بیشتر از ۵
	۴	سختی اشمیت (ضربه)	کمتر از ۱۰	۱۰-۲۰	۲۰-۳۰	۳۰-۴۰	بیشتر از ۴۰
		امتیاز رده	**۶**	**۱۲**	**۱۸**	**۲۴**	**۳۰**
سایش و طاقت	۵	ارزش فشاری (٪)	بیشتر از ۵۰	۴۰-۵۰	۳۰-۴۰	۲۰-۳۰	کمتر از ۲۰
	۶	ارزش ضربه (٪)	بیشتر از ۴۰	۳۰-۴۰	۲۰-۳۰	۱۰-۲۰	کمتر از ۱۰
	۷	میکرودوال (٪)	بیشتر از ۵۰	۵۰-۴۰	۴۰-۳۰	۳۰-۲۰	کمتر از ۲۰
	۸	سایش لوس‌آنجلس (٪)	بیشتر از ۶۰	۵۰-۶۰	۴۰-۵۰	۳۰-۴۰	کمتر از ۳۰
		امتیاز رده	**۵**	**۱۰**	**۱۵**	**۲۰**	**۲۵**
چگالی و تخلخل	۹	چگالی سنگ مادر(kg/m^3)	کمتر از ۲۲۰۰	۲۲۰۰-۲۳۰۰	۲۳۰۰-۲۴۰۰	۲۴۰۰-۲۵۰۰	بیشتر از ۲۵۰۰
	۱۰	وزن مخصوص	کمتر از ۲/۴۰	۲/۴۰-۲/۵۰	۲/۵۰-۲/۶۰	۲/۶۰-۲/۷۰	بیشتر از ۲/۷۰
	۱۱	جذب آب (٪)	بیشتر از ۶	۵-۶	۴-۵	۳-۴	کمتر از ۳
	۱۲	سرعت صوت (m/s)	کمتر از ۴۰۰۰	۴۰۰۰-۴۵۰۰	۴۵۰۰-۵۰۰۰	۵۰۰۰-۵۵۰۰	بیشتر از ۶۰۰۰
		امتیاز رده	**۴**	**۸**	**۱۲**	**۱۶**	**۲۰**
شکل و بافت	۱۳	شاخص کروی بودن	ورقه‌ای و دراز	ورقه‌ای‌وگوشه‌دار	گوشه‌دار	نیمه کروی	کاملاً کروی
	۱۴	شاخص گوشه‌داری	کاملاً گردگوشه	گردگوشه	نیمه‌گردگوشه	نیمه‌گوشه‌دار	گوشه‌دار
	۱۵	سطح شکست	کاملاً مضرس	نیمه مضرس	نامنظم	نیمه‌صاف	کاملاً صاف
	۱۶	بافت سطحی	کرمو	خشن	زبر	صاف	شیشه‌ای
		امتیاز رده	**۳**	**۶**	**۹**	**۱۲**	**۱۵**
دوام و پایداری	۱۷	شاخص دوام و وارفتگی(٪)	کمتر از ۸۰	۸۰-۸۵	۸۵-۹۰	۹۰-۹۵	بیشتر از ۹۵
	۱۸	افت در سولفات منیزیم (٪)	بیشتر از ۱۶	۱۶-۱۲	۱۲-۸	۸-۴	کمتر از ۴
	۱۹	افت در یخ وذوب شدن (٪)	بیشتر از ۳	۳-۲	۲-۱	۱-۰/۵	کمتر از ۰/۵
	۲۰	میزان افت در آتش (٪)	بیشتر از ۳۰	۱۵-۷	۷-۳	۳-۱	کمتر از ۱
		امتیاز رده	**۲**	**۴**	**۶**	**۸**	**۱۰**
جمع کلی امتیاز			**۰-۲۰**	**۲۰-۴۰**	**۴۰-۶۰**	**۶۰-۸۰**	**۸۰-۱۰۰**
مقاومت بتن (مگاپاسکال)			**کمتر از ۱۵**	**۱۵-۲۰**	**۲۰-۲۵**	**۲۵-۳۰**	**بیشتر از ۳۰**
خواص کلی بتن			**خیلی ضعیف**	**ضعیف**	**متوسط**	**خوب**	**خیلی خوب**

ضوابط و محدودیت‌ها

۱- مقدار شیل، چرت، اوپال، کلسدونی و دیگر سنگدانه‌های آمورف و شیشه‌ای تا ۳ تا ۸ درصد و مقادیر ذرات زغال سنگی بین ۰/۵ تا ۱ درصد مجاز است.
۲- مصالح رد شده از الک ۲۰۰ به مقدار ۳ تا ۵ درصد برای سنگدانه‌های ریز و ۲ تا ۱۰ درصد برای سنگدانه‌های درشت مجاز است.
۳- بیشترین دانه‌های پولکی و طویل به میزان ۱۰ تا ۱۵ درصد وزن درشت‌دانه‌ها محدود شود.
۴- هوازدگی و دگرسانی کانی‌های سازنده به میزان کمی مجاز است (رده خوب و خیلی خوب).
۵- ارزش ماسه‌ای سنگدانه‌ها به ۷۵ درصد محدود شود.
۶- با توجه به آزمایش‌های سنگ‌شناسی، سنگدانه‌های مشکوک به واکنش قلیایی مشخص شده و باید مورد آزمایش‌های تکمیلی قرار گیرند.
۷- مقاومت طراحی بتن ۲۵ مگاپاسکال در نظر گرفته شده است (رده خوب و خیلی خوب همیشه بالای مقاومت طراحی است).

کتابنگاری

بهبودیان، ج.، ۱۳۹۰- آمار و احتمال مقدماتی، آستان قدس رضوی، دانشگاه امام رضا، چاپ سیزدهم، مشهد.

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

سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور، ۱۳۷۹- آیین‌نامه بتن ایران (آبا)، مرکز مدارک علمی و انتشارات، معاونت امور فنی، دفتر امور فنی و تدوین معیارها، ویرایش سوم، تهران.

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

شاه‌نظری، م. و سحاب، م. ق.، ۱۳۷۱- دستورالعمل آزمایشگاه بتن، انتشارات علم و صنعت ۱۱۰، چاپ اول، تهران.

شریفی، ج. و نیکودل، م. ر.، ۱۳۸۹- بررسی تأثیر کانی شناسی سنگدانه‌ها بر کیفیت بتن، نشریه زمین‌شناسی مهندسی، دانشگاه تربیت معلم، تهران، جلد چهارم، شماره دو، ص. ۹۷۱ تا ۹۸۶.

شریفی، ج.، نیکودل، م. ر. و ایزدی، ه.، ۱۳۹۰- مدل‌سازی اعداد چکش اشمیت با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی برای پیش‌بینی دقیق‌تر مقاومت بتن، مجموعه مقالات ششمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان.

شریفی، ج.، نیکودل، م. ر. و یزدانی، م.، ۱۳۹۲- تأثیر خصوصیات زمین‌شناسی مهندسی سنگدانه‌ها بر مقاومت بتن ، مجله انجمن زمین‌شناسی مهندسی ایران، بهار و تابستان ۱۳۹۲، جلد ششم، شماره ۱ و ۲، ص. ۶۷ تا ۸۲.

شریفی، ج.، نیکودل، م. ر. و یزدانی م.، ۱۳۸۷- بررسی ویژگی‌های نامطلوب مصالح سنگدانه‌ای چابهار بر خواص بتن، مجموعه مقالات چهارمین کنگره ملی مهندسی عمران، جلد دوم، دانشگاه تهران، تهران.

شریفی، ج.، نیکودل، م. ر. و یزدانی م.، ۱۳۸۸- تأثیر جنس سنگدانه‌ها بر سرعت انتشار امواج فشاری در بتن، مجموعه مقالات هشتمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران، دانشگاه شیراز، شیراز.

عقیلی، ج.، ۱۳۷۹- اشکالات بتن علل و علاج، انتشارات سیمای دانش، چاپ اول، تهران.

فامیلی، ه.، ۱۳۷۸- خواص بتن، ترجمه کتاب Concrete technology نوشته Neville, A. M، انتشارات ابوریحان بیرونی، چاپ اول، تهران.

قدوسی، پ.، گنجیان، ا.، پرهیزکار، ط. و رمضانیان‌پور، ع. ا.، ۱۳۷۸- فن‌آوری بتن در شرایط محیطی خلیج فارس آسیب‌شناسی و ارزیابی آن، انتشارات مرکز تحقیقات مسکن، چاپ اول، تهران.

مستوفی‌نژاد، د.، ۱۳۸۵- تکنولوژی و طرح اختلاط بتن، انتشارات ارکان دانش، چاپ یازدهم، اصفهان.

References

AASHTO T 103, 2008- Standard Method of Test for Soundness of Aggregates by Freezing and Thawing, American Association of State Highway and Transportation.

AASHTO TP 58-00, 2008- Standard Test Method for Resistance of Coarse Aggregate to Degradation by Abrasion in the Micro-Deval Apparatus, American Association of State Highway and Transportation.

ACI Committee 211, 2009- Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight and Mass Concrete, American Concrete Institute.

ASTM C1260 - 07, 1990- Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates (Mortar-Bar Method), Annual Book of ASTM Standards, vol. 4.02, ASTM, Philadelphia, PA.

ASTM C128 - 07, 1990- Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Fine Aggregate, Annual Book of ASTM Standards, vol. 04.02, ASTM, Philadelphia, PA.

ASTM C131-03, 1990- Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine, Annual Book of ASTM Standards, vol. 04.02, ASTM, Philadelphia, PA.

ASTM C143 / C 143M - 08, 1990- Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete, Annual Book of ASTM Standards, vol. 4.08, ASTM, Philadelphia, PA.

ASTM C143 / C143M - 10, 1990- Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete, Annual Book of ASTM Standards, vol. 04.02, ASTM, Philadelphia, PA.

ASTM C1508 - 01, 1990- Standard Test Method for Determination of Bromine and Chlorine in UF6 and Uranyl Nitrate by X-Ray Fluorescence (XRF) Spectroscopy, Annual Book of ASTM Standards, vol 12.01, ASTM, Philadelphia, PA.

ASTM C180-72, 1990- Standard Method of Panel Spalling Testing Fireclay Plastic Refractories, Annual Book of ASTM Standards, vol. 04.02, ASTM, Philadelphia, PA.

ASTM C289 - 07, 1990- Standard Test Method for Potential Alkali-Silica Reactivity of Aggregates (Chemical Method), Annual Book of ASTM Standards, vol. 04.02, ASTM, Philadelphia, PA.

ASTM C289-94, 1990- Standard Test Method for Potential Alkali-Silica Reactivity of Aggregates (Chemical Method), Annual Book of ASTM Standards, vol. 4.08, ASTM, Philadelphia, PA.

ASTM C294 - 05, 1990- Standard Descriptive Nomenclature for Constituents of Concrete Aggregates, Annual Book of ASTM Standards, vol. 04.02, ASTM, Philadelphia, PA.

ASTM C294, 1990- Standard Test Method for Potential Alkali-Silica Reactivity of Aggregates (Chemical Method), Annual Book of ASTM Standards, vol. 4.08, ASTM, Philadelphia, PA.

ASTM C33, 1990- Standard Specification for Concrete Aggregates, Annual Book of ASTM Standards, vol. 4.08, ASTM, Philadelphia, PA.

ASTM C33-03, 1990- Standard Specification for Concrete Aggregates, Annual Book of ASTM Standards, vol. 04.02, ASTM, Philadelphia, PA.

ASTM C40 / C40M - 11, 1990- Standard Test Method for Organic Impurities in Fine Aggregates for Concrete, Annual Book of ASTM Standards, vol. 04.02, 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. 04.02, ASTM, Philadelphia, PA.

ASTM C496, 1990- Standard Test Method for Tensile Splitting Strength, Annual Book of ASTM Standards, vol. 4.08, ASTM, Philadelphia, PA.

ASTM C666 / C666M - 03, 1990- Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing, Annual Book of ASTM Standards, vol. 04.02, ASTM, Philadelphia, PA.

ASTM C670 - 10, 1990- Standard Practice for Preparing Precision and Bias Statements for Test Methods for Construction Materials, Annual Book of ASTM Standards, vol. 04.02, ASTM, Philadelphia, PA.

ASTM C88 - 05, 1990- Standard Test Method for Soundness of Aggregates by Use of Sodium Sulfate or Magnesium Sulfate, Annual Book of ASTM Standards, vol. 04.02, ASTM, Philadelphia, PA.

ASTM D2216 - 10, 1990a- Standard Specification for Lightweight Aggregates for Structural Concrete, Annual Book of ASTM Standards, vol. 04.02, ASTM, Philadelphia, PA.

ASTM D2216 - 10, 1990b- Standard Test Methods for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass, Annual Book of ASTM Standards, vol. 04.08, ASTM, Philadelphia, PA.

ASTM D2419 - 09, 1990- Standard Test Method for Sand Equivalent Value of Soils and Fine Aggregate, Annual Book of ASTM Standards, vol. 04.03, ASTM, Philadelphia, PA.

ASTM D2419, 1990- Standard Test Method for Potential Alkali-Silica Reactivity of Aggregates (Chemical Method), Annual Book of ASTM Standards, vol. 4.08, ASTM, Philadelphia, PA.

ASTM D2938-95, 1990- Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Intact Rock Core Specimens, Annual Book of ASTM Standards, vol. 04.03, ASTM, Philadelphia, PA.

ASTM D3148-02, 1990- Standard Test Method for Elastic Moduli of Intact Rock Core Specimens in Uniaxial Compression, Annual Book of ASTM Standards, vol. 04.03, ASTM, Philadelphia, PA.

ASTM D3398 - 00, 1990- Standard Test Method for Index of Aggregate Particle Shape and Texture, Annual Book of ASTM Standards, vol. 04.03, ASTM, Philadelphia, PA.

ASTM D4644 - 08, 1990- Standard Test Method for Slake Durability of Shales and Similar Weak Rocks, Annual Book of ASTM Standards, vol. 04.08, ASTM, Philadelphia, PA.

ASTM D6928-10, 1990- Standard Test Method for Resistance of Coarse Aggregate to Degradation by Abrasion in the Micro-Deval Apparatus, Annual Book of ASTM Standards, vol 04-03, ASTM, Philadelphia, PA.

Ayakwah, G. F., McLemore, V. T., Fakhimi, A., Viterbo, V. C., Morenci, F. M. I. & Dickens, A. K., 2009- EFFECTS OF WEATHERING AND ALTERATION ON POINT LOAD AND SLAKE DURABILITY INDICES OF QUESTA MINE MATERIALS, NEW MEXICO, SME Annual Meeting, Feb. 22-Feb. 25, Denver.

Basheer, P., Basheer, L., Lange, D. A. & Long, A. E., 2005- Influence of coarse aggregate on the permeation, durability and the microstructure characteristics of ordinary Portland cement concrete, Construction and Building Materials 19, 682–690.

Brown, E. T., 1981- Rock characterization testing and monitoring, published for the Commission on Testing Methods, International Society for Rock Mechanics by Pergamon Press, Oxford, New York.

BS 1881-114, 1983- Method for determination of static modulus of elasticity in compression. London, UK, British Standards Institution.

BS 812-105.2, 1990-Testing aggregates. Methods for determination of particle shape. Elongation index of coarse aggregate, British Standards Institution.

BS 812-105: 1989- Methods for Determination of Particle Shape - Section 1: Flakiness Index. London, UK, British Standards Institution.

BS 812-110, 1990- Methods for sampling and testing aggregates - Aggregate crushing value, British Standards Institution.

BS 812-111, 1990- Methods for sampling and testing aggregates - Aggregate crushing value, British Standards Institution.

BS 812-112:1990-Testing aggregates, Method for determination of aggregate impact value (AIV), British Standards Institution.

BS EN 1097-1:2011- Tests for mechanical and physical properties of aggregates. Determination of the resistance to wear (micro-Deval), British Standards Institution.

BS EN 12390-3, 2009a- Method for determination of compressive strength of concrete cubes. London, UK, British Standards Institution.

BS EN 12390-3, 2009b- Testing hardened concrete. Compressive strength of test specimens, British Standards Institution.

BS EN 12390-6, 2009a- Tensile Splitting Strength, London, UK, British Standards Institution.

BS EN 12390-6, 2009b- Testing hardened concrete. Tensile splitting strength of test specimens, British Standards Institution.

BS EN 12504-1, 2000- Testing Concrete - Part 120: Method for Determination of Compressive Strength of Concrete Cores, British Standards Institution.

BS EN 1367-2, 1998- Tests for thermal and weathering properties of aggregates, Magnesium sulfate test, British Standards Institution.

BS EN 15414-3, 2011- Testing aggregates. Methods for determination of particle size and shape, British Standards Institution.

BS EN 933-3, 2012- Tests for geometrical properties of aggregates, Determination of particle shape, Flakiness index, British Standards Institution.

Del Rio, L. M., Jim, A., Opez, F., Rosa, F. J., Rufo, M. M. & Paniagua, J. M., 2004- Characterization and hardening of concrete with ultrasonic testing, Ultrasonics 42, 527–530.

Hoek, E. & Brown, E. T., 1980- Underground excavations in rock.The Institution of Mining and Metallurgy, London.

Pereira, C. G., Castro-Gomes, J. & Oliveira, L. P. D., 2009- Review Influence of natural coarse aggregate size, mineralogy and water content on the permeability of structural concrete, Construction and Building Materials 23, 602–608.

Rivard, P. & Saint-Pierre, P., 2009- Assessing alkali-silica reaction damage to concrete with non-destructive, Construction and Building Materials, 23, 902–909.

Scrivener, K. L., Crumbie, A. K. & Pratt, P. L., 1988- A study of the interfacial region between cement paste and aggregate in concrete, bonding in cementatious composites, Proc Mat Res Soc Sympos, 114:87–9.

Yasar, E., Duran, Y., Kilic, A. & Gulsen, H., 2003- Strength properties of lightweight concrete made with basaltic pumice and fly ash, Materials Letters 57, 2267– 2270.

A Criterion for Selection of Natural Aggregates in Concrete

J. Sharifi [1] & M. R. Nikudel [2*]

[1] M. Sc., Deparetment of Engineering Geology, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

[2] Assistant Professor, Deparetment of Engineering Geology, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

Received: 2011 June 30 Accepted: 2013 February 11

Abstract

By fast growing of structures and need for aggregates materials, more quarry resources should be provided and rapid identification and exploration of these resources should be introduced. Because of the importance of engineering geology parameters in exploration of aggregate quarries sources, based to in-situ and laboratory studies in this research, the parameters and criteria were determined and the results are presented as a simple applicable criterion. For this purpose, first site investigation was carried out and then samples and specimens from different selected mines were taken. Laboratory tests were carried out in accordance with relevant standards, and finally concrete samples were prepared using these materials. The results of tests on aggregates and concrete have been analyzed, and parameters involved in the quality of the concrete were classified and presented as a criterion. According to accuracy and ease application of this criterion, it is applicable for selecting the materials with minimum experiments, the desirable mines identification and an estimate of the ultimate strength of concrete will be provided for the engineers. The criteria according to type and kinds of the samples, is applicable with a broad scope in different geographical areas.

Keywords: Concrete, Aggregate, Quarries Resource, Criterion.

For Persian Version see pages 3 to 16

*Corresponding author: M. R. Nikudel; E-mail: Nikudelm@modares.ac.ir