

بررسی اثر جنس سنگدانه در سرعت امواج فراصوت و ریزساختار و ناحیه انتقال بتن مقاومت بالا

مرتضی حسن نژاد*

کارشناس ارشد مهندسی مدیریت و ساخت موسسه آموزش عالی طبری بابل

جواد برنجیان

استادیار موسسه آموزش عالی طبری بابل

چکیده

استفاده از مطالعات در ریزساختار، این امکان را می‌دهد که با شناخت خلل و فرج نسبت به چگال تر شدن و افزایش دوام و افزایش مقاومت بتن روی آورده. در این مطالعه که یک پژوهش آزمایشگاهی است، به بررسی مقاومت فشاری و سرعت امواج فراصوت در سنین مورد نظر و ریزساختار ناحیه انتقال بتن با استفاده از سنگدانه‌هایی از جنس سیلیس، دولومیت، آهک و گرانیت در سنین مورد نظر پرداخته شده است. با استفاده از دستگاه مولد امواج فراصوت (Ultrasonic) و میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) به مطالعه در ریزساختار ناحیه انتقال پرداخته شد. نتایج نشان داده است، جنس سنگدانه اثر زیادی در مقاومت فشاری این بتن دارد، و با افزایش مقاومت و تغییر جنس سنگدانه سرعت امواج فراصوت در این بتن تغییر می‌کند و نیز اثر آن در ریزساختار و ضخامت در اطراف ناحیه انتقال بسیار متفاوت است و با افزایش ضخامت ناحیه انتقال سرعت انتقال امواج فراصوت در بتن کاهش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: جنس سنگدانه، بتن مقاومت بالا، ریزساختار، ناحیه انتقال، امواج فراصوت

*نویسنده مسؤول: Manshoor65@gmail.com

^۱ Scanning Electron Microscope

۱- مقدمه

مقاومت فشاری به مقدار قابل توجهی به خواص کنای‌های سنگدانه بستگی دارد [۶]. بر اساس تحقیقات انجام شده دوزها و همکارانش با سنگدانه‌های آهکی و دولومیتی و ماسه طبیعی و شکسته و نیز گرانیت، که بیشترین مقاومت با سنگدانه گرانیتی و کمترین مقاومت با سنگدانه آهکی بوده است [۷]. ژو و همکارانش مطالعاتی در تأثیر شن در مقاومت فشاری بتن مقاومت بالا داشته‌اند. آنها گزارش دادند که سنگدانه‌های با مقاومت کم، بتنی با مقاومت کمتر تولید می‌کند [۸]. بیشار و همکارانش گزارشی در رابطه با نتیجه مطالعه بررسی اثر سنگدانه در مقاومت فشاری و کششی در بتن ارائه دادند. بر اساس آزمایش‌ها آنها، این نتیجه حاصل شد که کیفیت و مقاومت سنگدانه، در مقاومت کششی و فشاری بتن پارامتر بسیار تأثیر گذاری است. روبره‌های فولادین در آزمایش‌های آنها بیشترین مقاومت فشاری و کششی را نتیجه داده‌اند، در صورتی که از مصالح آهکی کمترین مقاومت کششی و فشاری حاصل شد [۹].

روش سرعت امواج فراصوت در ۶۰ سال اخیر به‌طور موفقیت‌آمیزی به منظور ارزیابی کیفیت بتن به کار برده شده است. از آنجایی که این روش کاملاً غیرمخرب بوده، می‌توان چندین بار در همان محل مورد آزمایش قرار گیرد. در طی دهه‌های متمادی متخصصان بتن علاقه‌مند به استفاده از روش‌های غیرمخرب جهت تعیین خواص بتن بوده‌اند [۱۰]. در آغاز دهه ۱۹۳۰ روش‌های بسیاری برای نمونه‌های آزمایشگاهی بر مبنای روش‌های ارتعاشی پیشنهاد گردید. جونز وسیله‌ای بنام دستگاه اولتراسونیک ساخت [۱۱]. مالهوترا لیست جامعی از مقالات چاپ شده در این باره را جمع‌آوری کرد [۱۲]. خادر رابطه بین سرعت امواج فراصوت و مقاومت فشاری بتن را به کمک مدل ریاضی بیان کرد [۱۳]. دیمبرگا رابطه بین سرعت امواج التراسونیک و مقاومت بتن با افزودنی‌های معدنی را بررسی کرده است [۱۴]. رنجبر و همکارانش توزیع مدول الاستیسیته دینامیکی در اعضای بتنی مورد به کمک روش التراسونیک را مورد بررسی قرار دادند [۱۵]. تخمین برخی خواص بتن‌های پر مقاومت با استفاده از تکنیک پالس فراصوت، توسط قربانی اقدم و همکارانش مورد مطالعه قرار گرفت و نتایج آنها نشان داد که، با افزایش مقاومت بتن، سرعت پالس افزایش می‌یابد [۱۶]. همچنین شریفی و همکارانش تأثیر جنس سنگدانه‌ها بر سرعت انتشار امواج فشاری

در مقیاس ریزساختار، پیچیدگی ذرات و ترکیبات طوری رخ نشان می‌دهد که دو فاز سنگدانه و خمیر نه خودشان همگن می‌باشند و نه به صورت همگن نیز پخش می‌شوند و در پاره‌ای از قسمت‌ها، خمیر سخت شده حتی متراکم‌تر از سنگدانه‌هاست، در حالی که در بخش دیگر بسیار متخلخل‌تر است. به هر حال، مطالعات ریزساختار، ساختار خمیر سیمان سخت شده مجاور سنگدانه‌های درشت را معمولاً بسیار متفاوت از ساختار خمیر به تنهایی و یا در ملات نشان می‌دهد. در حقیقت بسیاری از رفتارهای بتن تحت تنش، با در نظر گرفتن فاز سومی که همان فصل مشترک دانه و خمیر است و بنام ناحیه انتقال (ITZ)^۱ معروف است مشخص می‌گردد [۱۰ و ۱۱]. در رابطه با گسترش ترک در بتن با مقاومت بالا دیده می‌شود که به علت مشابهت زیاد مشخصات مکانیکی دانه‌ها و زمینه، ترک می‌تواند از داخل دانه‌ها نیز رد شود. در بتن با مقاومت بالا ترک‌های بسیار باریک‌تری نسبت به بتن نرمال ایجاد می‌شود که ترک‌ها منجر به شکست بتن می‌شود. تکنیک سرعت امواج فراصوت که بر اساس محاسبه سرعت انتقال امواج در بتن ارائه شده است، یکی از روش‌های آزمون‌های غیر مخرب است، که به کمک آن می‌توان برخی از خصوصیات بتن را تخمین زد [۳، ۴، ۵]. بنابراین در این مطالعه به بررسی اثر جنس سنگدانه در سرعت انتقال امواج فراصوت و ریزساختار ناحیه انتقال بتن مقاومت بالا با سنگدانه‌هایی از جنس سیلیس، دولومیت، گرانیت و آهک پرداخته شده است.

۲- پژوهش‌های پیشین

اثر انواع مختلف سنگدانه‌ها بر روی خواص این بتن، در مقالات متعدد آمده است. به عنوان مثال می‌توان بر اساس تحقیق آیتسن و مهتا که با به کار بردن چهار نوع مختلف مصالح سنگی شن سیلیسی، دیاباز، سنگ آهک و گرانیت و استفاده از یک طرح اختلاط ثابت (دارای نسبت آب به سیمان برابر ۰/۲۷) و مشخص به این نتیجه رسیده‌اند که بتن حاوی مصالح گرانیتی و دیاباز بالاترین مقاومت فشاری را داشته‌اند، که این تفاوت‌ها به نوع سنگدانه مربوط می‌شود و نتایج مطالعات آنها نشان داد که

^۱ Interface Transition zone

در بتن را در سنین مختلف مورد بررسی قرار دادند. در نتایج آزمایش آنها بتن حاوی سنگ گرانیت بیشترین سرعت پالس را نتیجه داد [۱۷].

۳- مطالعات آزمایشگاهی

۳-۱- مصالح و خصوصیات آنها

از سیمان نوع دو کارخانه سیمان مازندران، در این مطالعه استفاده گردید. دانسیته سیمان مذکور برابر $3/15 \text{ gf/cm}^3$ بوده، و مشخصات شیمیایی سیمان مذکور در جدول شماره ۱ ذکر شده است. میکروسیلیس استفاده شده در این پژوهش میکروسیلیس شرکت صنایع فروآلیاژ ایران "میکروسیلیکا" به صورت پودر هیدرولیکی متشکل از ذرات فعال SiO_2 آمورف و از محصولات کارخانه فروسیلیس ایران که دارای دانسیته فله‌ای 205 kg/m^3 بوده و به صورت خشک به مخلوط بتن اضافه شده است. رنگ آن خاکستری مایل به سفید و سطح ویژه میکروسیلیس مصرفی $14 \text{ m}^2/\text{gf}$ بوده است. در جدول شماره ۱ مشخصات فنی شیمیایی میکروسیلیس مصرفی آورده شده است.

جهت ساخت نمونه‌های آزمایشی از سنگدانه‌هایی با جنس گرانیت، دولومیت، آهک و سیلیس استفاده گردید. پس از مقایسه نتایج، دانه‌بندی کلیه سنگدانه‌ها به صورت یکسان با حداکثر اندازه ۱۹ میلی‌متر استفاده گردید. در ضمن در این تحقیق از دستگاه لرزاننده جهت الک نمودن دانه‌ها استفاده شد. همچنین خواص فیزیکی و شیمیایی سنگدانه‌های مصرفی به ترتیب در جدول شماره ۲ و شکل شماره ۱ و ۲ آورده شده است. فوق‌روان‌کننده شرکت وند شیمی با پایه پلی‌کربوکسیلات استفاده شده است. این ماده، قهوه‌ای تیره و در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد، وزن مخصوص آن ۱/۱ گرم بر سانتی‌متر مکعب می‌باشد و آب مصرفی نیز آب شرب شهرستان بابل بوده است.

۳-۲- طرح مخلوط بتن مقاومت بالا

ابتدا دانه‌های سنگی دوبارشوی را با توجه به وزن و حجم بتن مورد نیاز و منحنی دانه‌بندی که از پیش فرض کرده‌ایم با حداکثر اندازه سنگدانه ۱۹ mm و چهار طرح مخلوط با برنامه آزمایشگاهی ۹۰ روزه و با جای‌گزینی سنگدانه با

تاکنون چندین مدل برای ساختار ناحیه انتقال ارائه گردیده است. معروف‌ترین آنها این ناحیه را به صورت پوسته یک‌نواختی در نظر می‌گیرد [۱۸]. این ناحیه که به صورت هاله‌ای دور سنگدانه را در بر گرفته یکی از ضعیف‌ترین قسمت‌های بتن می‌باشد و ظرفیت زیادی برای آغاز ترک دارد [۱۹ و ۲۰]. مطالعات انجام شده حاکی از آن است که در ناحیه انتقال، میانگین تخلخل و مقدار سیمان هیدراته نشده^۱ نیز در مقایسه با خمیر سیمان، بسیار به مقدار هم نزدیک، ولی از آن کمتر است. همچنین اندازه و پخش دانه‌های سیمان، فاکتور مهمی در خصوصیات ناحیه انتقال می‌باشد. نسبت آب به مواد سیمانی نیز در ریزساختار ناحیه انتقال اثر کمی دارد. این نتایج که مربوط به امیر شریف و همکاران می‌باشد تشریح شده است [۲۱]. در مطالعات گونسکاران و همکارانش که در روی بتن‌هایی ساخته شده از جنس پوست نارگیل^۲ انجام گرفت مشخص شد، که ناحیه انتقال، ناحیه ناپوستگی^۳ سنگدانه و سیمان است که ضخامت تقریبی آن $52/31 \mu\text{m} - 88/27 \mu\text{m}$ و $41/72 \mu\text{m} - 47/96 \mu\text{m}$ و $24/94 - 26/63$ که به ترتیب در سن ۳ و ۷ و ۲۸ روزه می‌باشد، که این نشان‌دهنده آن است که شکاف بین سنگدانه و خمیر سیمان با گذشت زمان رو به کاهش می‌باشد [۲۲]. همچنین مطالعات نعمتی و همکارانش نشان داد که ضخامت ناحیه انتقال برای نسبت آب به سیمان ۴۰٪ به‌طور متوسط $35 - 54 \mu\text{m}$ می‌باشد [۲۳]. رمضانپور و همکارانش با استفاده از SEM به مطالعه در مقایسه اثرات نانو و میکروسیلیس بر روی ریزساختار و دوام نمونه‌های بتنی پرداختند، نتایج تحقیق آنها نشان داد که با افزایش نانو مواد مواد میزان هیدروکسید کلسیم موجود در ساختار خمیر سیمان کاهش می‌یابد، و در سن ۲۸ روزه تفاوت چندانی در مقایسه نمونه‌ها با این دو ماده وجود نداشت [۲۴]. بررسی مقصودی و همکارش بیان می‌کند که SEM نمونه‌های پوزولانی

^۱Unhydrated Cement(UH)

^۲ Coconut shell

^۳Debond

^۴Bulk density

اسلامپ ۴-۶ cm مطابق جدول شماره ۳ به نسبت‌های مناسب توزین کرده و از دانه‌های درشت به ریزتر در داخل مخلوط‌کن می‌ریزیم، سپس به مدت یک دقیقه آنها را در داخل مخلوط‌کن با یکدیگر مخلوط کرده و مقدار کمی آب به همراه فوق‌روان‌کننده (تقریباً ۱۰٪ کل آب مصرفی در طرح) و سیمان به همراه میکروسیلیس وزن شده را به مصالح سنگی اضافه می‌نماییم و تا مدت یک دقیقه آنها را با هم مخلوط می‌کنیم و بعد در همان هنگام که دستگاه مخلوط‌کن روشن می‌باشد مقداری از آب مانده که به

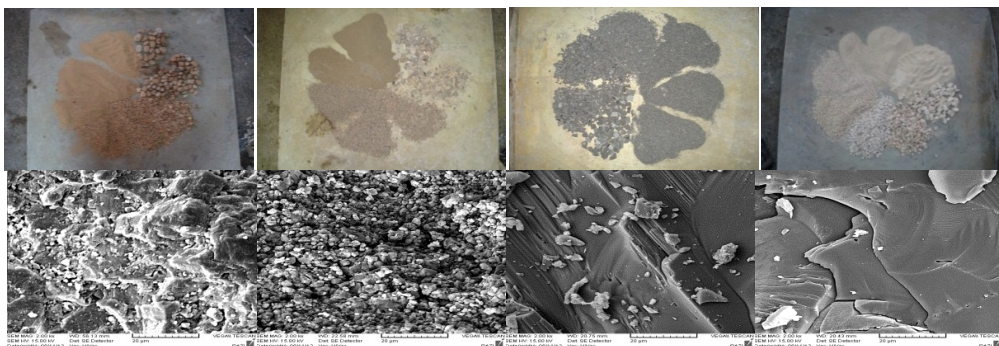
همراه فوق‌روان‌کننده است را به آن اضافه می‌کنیم. مدت زمان چرخش بتونیر برای تمامی مخلوط‌ها یکسان و به مدت تقریبی 4 ± 1 دقیقه در نظر گرفته شده است. بعد از اتمام زمان لازم جهت مخلوط شدن بتن آنها را در قالب‌های مکعبی که از قبل کاملاً تمیز و روغن کاری شده است در سه لایه می‌ریزیم، با میله استاندارد به هر لایه ۲۵ ضربه می‌زنیم تا متراکم شود.

جدول ۱- مشخصات شیمیایی سیمان نوع ۲ مازندران و میکروسیلیس مصرفی

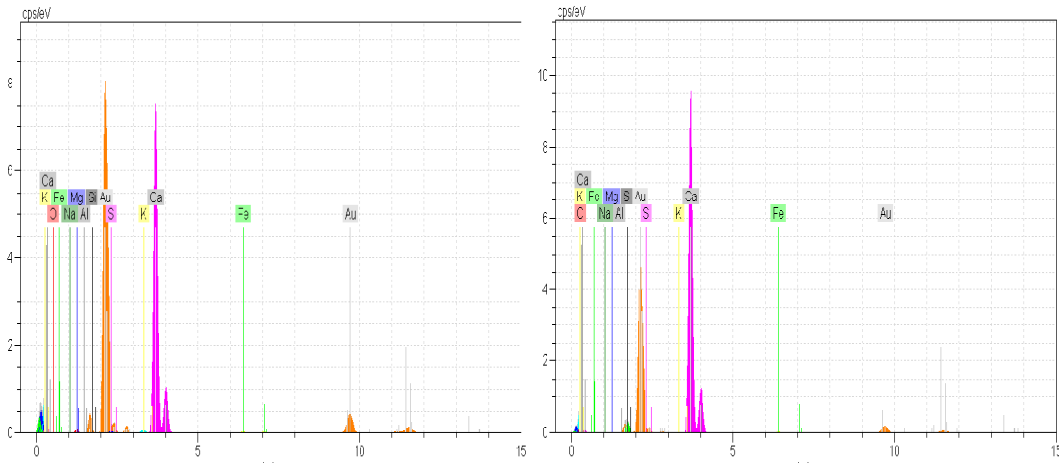
درصد در میکرو سیلیس	درصد در سیمان	ترکیب شیمیایی	درصد در میکرو سیلیس	درصد در سیمان	ترکیب شیمیایی
۱/۵-۰/۵	۶۴/۰۷	CaO	۹۵-۹۰	۲۱/۲۵	SiO ₂
۲-۰/۵	۱/۲۰	MgO	۱/۲-۰/۶	۴/۹۵	Al ₂ O ₃
.....	۲/۰۴	SO ₃	۱/۳-۰/۳	۳/۱۹	Fe ₂ O ₃
۰/۵-۰/۳	۰/۳۸	Na ₂ O	۰/۵-۰/۲	۰/۶۳	K ₂ O

جدول ۲- مشخصات فیزیکی مصالح سنگی به کار رفته

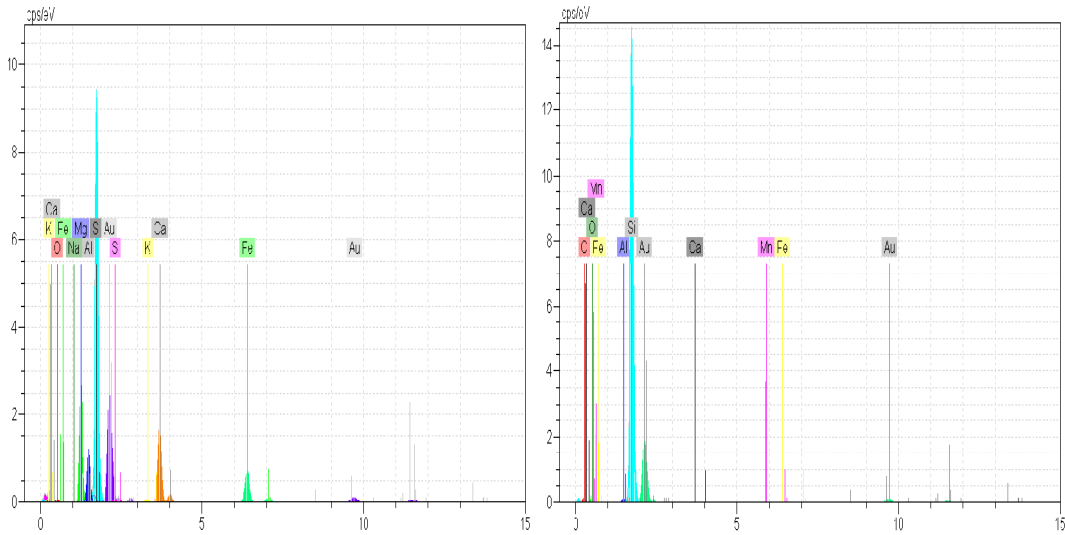
جنس سنگدانه	مقاومت فشاری kg/cm ²	وزن مخصوص توده‌ای kg/m ³	درصد جذب آب ۲۴ ساعته
دولومیتی	۸۴۰	۱/۷۳۶	۸/۵
آهکی	۵۴۰	۱/۵۶۵	۱۱/۸
گرانیتی	۹۳۰	۱/۹۰۲	۲/۷
سیلیسی	۸۹۰	۱/۸۳۲	۵/۸



شکل ۱- مشخصات ظاهری سنگ های مصرفی



الف) طیف آنالیز شیمیایی سنگدانه آهک (ب) طیف آنالیز شیمیایی سنگدانه دولومیت



ج) طیف آنالیز شیمیایی سنگدانه سیلیس (د) طیف آنالیز شیمیایی سنگدانه گرانیت

شکل ۲- آنالیز شیمیایی مصالح سنگی

جدول ۳- طرح مخلوط مصالح به کار رفته

مصالح	سیمان [kg/m ³]	آب [kg/m ³]	میکروسیلیس [kg/m ³]	فوق روان کننده [kg/m ³]	شن و ماسه [kg/m ³]	نسبت آب به مواد سیمانی
دولومیت (طرح ۱)	۶۰۰	۱۷۷/۹۰	۱۲۳/۵	۶/۹۶	۱۴۵۰	٪۲۳
آهک (طرح ۲)	۶۰۰	۱۷۷/۹۰	۱۲۳/۵	۶/۹۶	۱۴۵۰	٪۲۳
گرانیت (طرح ۳)	۶۰۰	۱۷۷/۹۰	۱۲۳/۵	۶/۹۶	۱۴۵۰	٪۲۳
سیلیس (طرح ۴)	۶۰۰	۱۷۷/۹۰	۱۲۳/۵	۶/۹۶	۱۴۵۰	٪۲۳

کلیه آزمایش‌ها جهت آنالیز شیمیایی و نیز SEM در مرکز پژوهش‌های متالورژی رازی (www.razi-centre.net) انجام گرفته است. دلیل وجود عنصر طلا (Au یا Gold) در همه نتایج آنالیز شیمیایی، پوشش‌دهی طلا در آزمایش SEM می‌باشد.



شکل ۳- نحوه قرارگیری مولدها (راست) ابعاد و مشخصات نمونه‌ها جهت آزمایش SEM پس از روکش طلا (چپ)

جهت عمل‌آوری تا زمان آزمایش، نمونه‌ها با دقت زیاد و بدون ضربه و پس از مدت تقریبی ۲۴ ساعت (این مدت برای تمامی نمونه‌ها ثابت در نظر گرفته شد) از قالب خارج گشته و تعدادی از نمونه‌ها در محیط اشباع (کاملاً غوطه‌ور در آب) و در دمای محیط طبیعی آزمایشگاه 27 ± 7 درجه سانتی‌گراد و تا مدت ۹۰ روز نگهداری می‌شوند.

۳-۳- آزمایش‌های انجام شده

با توجه به هدف این تحقیق که همان بررسی مقاومت فشاری نمونه ساخته شده در سنین ۷، ۱۴، ۲۸ و ۹۰ روزه تحت آزمایش فشاری توسط جک فشاری قرار گرفت. دستگاه بارگذاری الکترو هیدرولیکی دیجیتال و با ظرفیت ۲۰۰ کیلونیوتن با سرعت بارگذاری ثابت ۴ (مطابق با ASTM) مورد استفاده قرار گرفت و کلیه نمونه‌ها را دو ساعت قبل از انجام آزمایش در محیط آزمایشگاه قرار داده تا سطح آنها خشک شود و اثر منفی فشار آب منفذی داخل نمونه‌ها که منجر به کاهش مقاومت فشاری بتن خواهد شد به حداقل برسد. نمونه‌های مکعبی $10 \times 10 \times 10$ سانتی‌متری را از جهتی که سطح نمونه در تماس با قالب می‌باشد بین دو صفحه دستگاه قرار دادیم (جهت بارگذاری و بتن‌ریزی عمود بر یکدیگر می‌باشند). به‌طور خلاصه شرایط این آزمایش مطابق بر استاندارد BS 1881: Part 108: 1983 بوده است.

$$V = \frac{L}{T} \quad (1)$$

که در آن L طول مسیر پالس، T زمان عبور پالس و مدت زمانی است که پالس از طول L عبور می‌کند [۲۶].

در شکل شماره ۳ دستگاه مورد استفاده و نحوه قرارگیری مولدها به صورت عملی بر روی یکی از نمونه‌ها نشان داده شده است. قابل ذکر است که رطوبت بتن به صورت سطح خشک (۲۴ ساعت قبل در محیط آزمایشگاه و خارج از محیط اشباع قرار

¹Ultrasonic

گرفت) و دمای بتن هم دمای آزمایشگاه (27 ± 7) و طول مسیر نیز طول اندازه نمونه‌ها (۱۰ سانتیمتر) و نمونه‌ها مکعبی بوده است. فرکانس پالس‌های ارسالی از طرف دستگاه ۵۴ kHz بوده و مدت انتقال پالس برحسب میکروثانیه و با دقت ۰/۱ میکروثانیه، بر روی صفحه دیجیتالی دستگاه نمایش داده می‌شود. براساس تحقیقات دیگر محققان، استفاده از فرکانس ۴۸-۸۰ kHz برای ارزیابی بتن مناسب می‌باشد [۲۷]. بر روی هر نمونه به تعداد ۷ قرائت از زمان عبور پالس در نقاط مختلف سطح بتن انجام شد، تا این که تقریباً تمامی سطح نمونه و در نتیجه تمام حجم نمونه مورد آزمایش قرار گیرد. امواج برای هر نمونه، متوسط سرعت در دو جهت عمود بر هم در نظر گرفته شده است. پس از اتمام آزمون با میانگین گیری از نتایج، یک عدد به عنوان مدت زمان انتقال پالس برای نمونه مورد نظر ثبت شد.

جهت انجام آزمایش SEM نمونه‌های مورد استفاده پس از رسیدن به سن مورد نظر در این مطالعه به ابعاد تقریبی $2 \pm 0/5$ سانتیمتر و پس از روکش طلا بر روی آن در دستگاه میکروسکوپ الکترونی قرار داده شد (شکل شماره ۳). از جمله قابلیت‌های این آزمایش آنالیز شیمیایی نقطه‌ای^۱ می‌توان اشاره کرد، که در آن‌ها آنالیز شیمیایی عناصر مربوط به نمونه در یک نقطه دلخواه را می‌توان استخراج کرد. برای ایجاد تصویر در این میکروسکوپ‌ها از پرتوهای الکترونی که طول موج بسیار کوتاهی حدود ۰/۰۵ آنگستروم دارند استفاده می‌شود. نوع تصویر از نوع ثانویه^۲ بوده است.

جهت انجام آزمایش SEM نمونه‌های مورد استفاده پس از رسیدن به سن مورد نظر در این مطالعه به ابعاد تقریبی $2 \pm 0/5$ سانتیمتر و پس از روکش طلا بر روی آن در دستگاه میکروسکوپ الکترونی قرار داده شد (شکل شماره ۳). از جمله قابلیت‌های این آزمایش آنالیز شیمیایی نقطه‌ای^۱ می‌توان اشاره کرد، که در آن‌ها آنالیز شیمیایی عناصر مربوط به نمونه در یک نقطه دلخواه را می‌توان استخراج کرد. برای ایجاد تصویر در این میکروسکوپ‌ها از پرتوهای الکترونی که طول موج بسیار کوتاهی حدود ۰/۰۵ آنگستروم دارند استفاده می‌شود. نوع تصویر از نوع ثانویه^۲ بوده است.

همچنین برای مقایسه خصوصیات ظاهری ناحیه انتقال در سن ۲۸ روزه با توجه به عمل‌آوری از نمونه‌ها تصاویر SEM گرفته شده است که در شکل شماره ۶ نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است، بین تصاویر تفاوت قابل ملاحظه‌ای از نظر تراکم و یکنواختی در خمیر و ناحیه انتقال مشاهده می‌گردد. مقایسه تصاویر اخذ شده از نمونه‌های بتن حاوی سنگدانه‌های مختلف نشان می‌دهد، در سن ۲۸ روزه تراکم نمونه‌های خمیر سیمان ناحیه انتقال، نیز متأثر از جنس سنگدانه بوده که این موضوع ناشی از فعال‌تر بودن عناصر سیلیس و کلسیم نسبت به سایر عناصر در سنگدانه می‌باشد. می‌توان گفت افزودن سنگدانه گرانیت و سیلیس می‌تواند موجب کاهش ضخامت ناحیه انتقال و افزایش تعداد اتم‌ها و عناصر در آن ناحیه شود و در نتیجه موجب تقویت این ناحیه و افزایش واکنش شیمیایی آن و در نتیجه بهبود ریزساختار و یکنواخت‌تر شدن بتن شود. به این ترتیب می‌توان گفت استفاده سنگدانه مقاوم‌تر مانند سیلیس و گرانیت باعث بهبود ریزساختار نیز می‌شود.

همچنین برای مقایسه خواص شیمیایی ناحیه انتقال از فاصله $40 \mu\text{m}$ و $20 \mu\text{m}$ در خمیر سیمان آزمایش EDS^۳ و Point scan گرفته شده است که نتایج آن در شکل ۷ (الف تا خ) (د تا ذ) نشان داده شده است. با توجه به نتایج می‌توان تغییرات قابل ملاحظه‌ای در خصوصیات شیمیایی ناحیه انتقال مشاهده کرد.

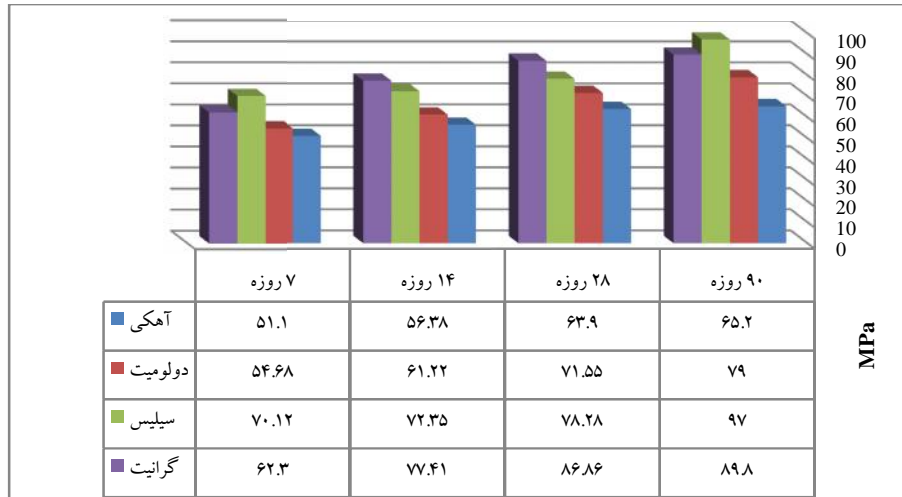
۴- نتایج آزمایش‌ها

نمونه‌های بتنی مورد آزمایش در این تحقیق با توجه به شرایط ارائه شده در قسمت‌های قبلی پس از عمل‌آوری مورد آزمایش قرار گرفتند. برای ۴ طرح اختلاط آزمایش مقاومت فشاری در سنین ۷، ۱۴، ۲۸، ۹۰ روزه و میانگین نتایج برای سه نمونه بوده که در محاسبات مستتر است، و نتایج حاصل از مقاومت فشاری نمونه‌ها با سنگدانه‌های مختلف در شکل شماره ۴ نشان داده شده است. از نتایج آزمایش دیده می‌شود که در تمام سنین با تغییر جنس سنگدانه، مقاومت فشاری نمونه‌ها تغییر می‌کند. در سنین

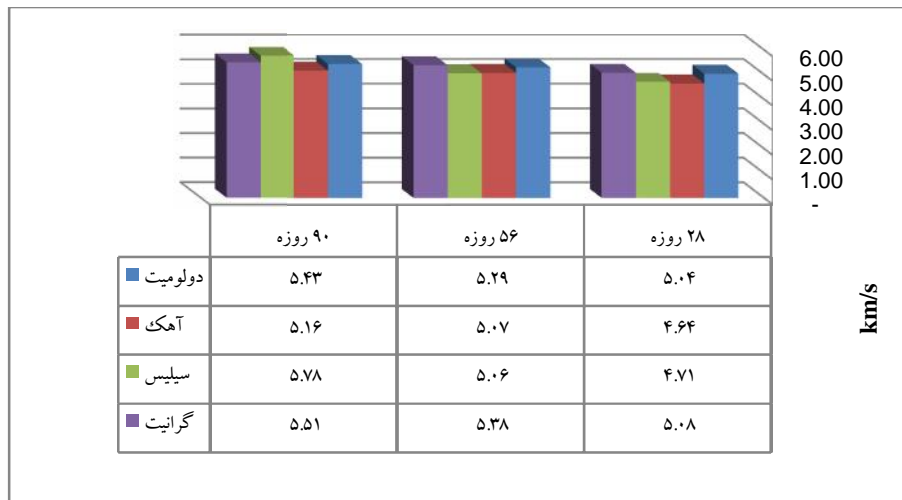
^۱ Point scan

^۲ Secondary

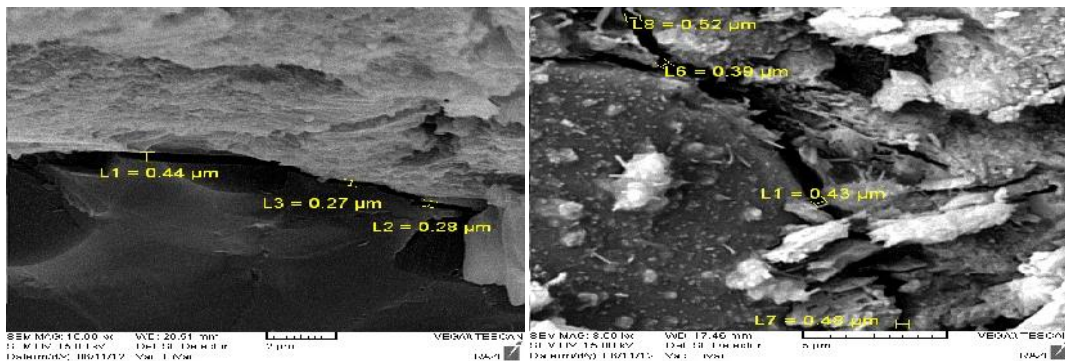
^۳ Energy Dispersive Spectroscopy



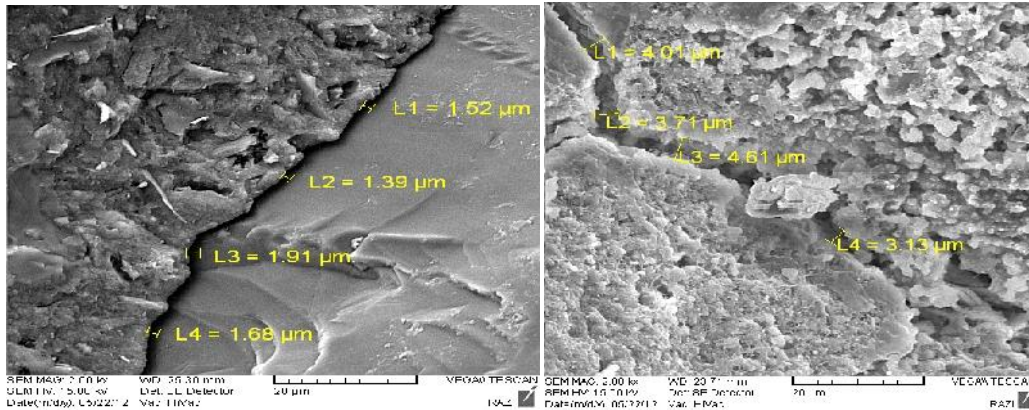
شکل ۴- نتایج آزمون‌های مقاومت فشاری برای نمونه بتن حاوی سنگدانه‌های مختلف (نگهداری در محیط اشباع)



شکل ۵- نتایج آزمون سرعت امواج فراصوت برای نمونه بتن حاوی سنگدانه‌های مختلف (نگهداری در محیط اشباع)



الف) ریزساختار ۲۸ روزه بتن حاوی سنگدانه سیلیسی نگهداری شده در آب (ب) ریزساختار ۲۸ روزه بتن حاوی گرانیت نگهداری شده در آب



ج) ریزساختار ۲۸ روزه بتن حاوی سنگدانه آهک نگهداری شده در آب؛ چ) ریزساختار ۲۸ روزه بتن حاوی سنگدانه دولومیت نگهداری شده در آب

شکل ۶- ریزساختار و ضخامت ناحیه انتقال بتن در سن ۲۸ روزه با سنگ‌های مختلف

Spectra: dolomite beton 28-40				
Element	Series	unn. C	norm. C	Atom. C
[wt.-%]	[wt.-%]	[at.-%]		
Oxygen	K series	2.57	3.35	8.31
Sodium	K series	0.00	0.00	0.00
Magnesium	K series	0.00	0.00	0.00
Aluminium	K series	1.15	1.51	2.22
Silicon	K series	21.33	27.80	39.31
Sulfur	K series	1.49	1.94	2.41
Potassium	K series	0.92	1.20	1.22
Calcium	K series	31.90	41.58	41.20
Iron	K series	1.19	1.54	1.10
Gold	M series	16.17	21.08	4.25
Total:		76.7 %		

Spectra: Beton 20 dolomit 28.spx				
Element	Series	unn. C	norm. C	Atom. C
[wt.-%]	[wt.-%]	[at.-%]		
Oxygen	K series	4.52	7.60	15.23
Sodium	K series	0.00	0.00	0.00
Magnesium	K series	0.00	0.00	0.00
Aluminium	K series	0.73	1.22	1.45
Silicon	K series	16.32	27.45	31.33
Sulfur	K series	4.95	8.33	8.33
Potassium	K series	0.47	0.79	0.65
Calcium	K series	30.72	51.68	41.33
Iron	K series	1.74	2.92	1.68
Total:		59.4 %		

الف) آنالیز شیمیایی بتن حاوی سنگدانه دولومیت در فاصله ۲۰ μm از ناحیه انتقال؛ ب) آنالیز شیمیایی بتن حاوی سنگدانه دولومیت در فاصله ۴۰ μm از ناحیه انتقال

Spectra: Ahak 40 boton				
Element	Series	unn.C	norm. C	Atom. C
[wt.-%]	[wt.-%]	[at.-%]		
Oxygen	K series	0.01	0.01	0.04
Sodium	K series	0.00	0.00	0.00
Magnesium	K series	0.00	0.00	0.00
Aluminium	K series	0.22	0.27	0.60
Silicon	K series	10.98	13.93	29.27
Sulfur	K series	0.00	0.00	0.00
Potassium	K series	1.32	1.68	2.53
Calcium	K series	26.55	33.70	49.61
Iron	K series	2.96	3.75	3.97
Gold	M series	36.77	46.66	13.98
Total:		78.8 %		

Spectra: beton Ahak 20				
Element	Series	unn. C	norm. C	Atom. C
[wt.-%]	[wt.-%]	[at.-%]		
Oxygen	K series	0.01	0.01	0.02
Sodium	K series	0.00	0.00	0.00
Magnesium	K series	0.00	0.00	0.00
Aluminium	K series	0.41	0.46	1.01
Silicon	K series	13.58	15.16	31.76
Sulfur	K series	0.58	0.65	1.19
Potassium	K series	0.36	0.40	0.60
Calcium	K series	30.77	34.35	50.44
Iron	K series	0.40	0.45	0.47
Gold	M series	43.47	48.53	14.50
Total:		89.6 %		

ج) آنالیز شیمیایی بتن حاوی سنگدانه آهک در فاصله ۲۰ μm از ناحیه انتقال؛ چ) آنالیز شیمیایی بتن حاوی سنگدانه آهک در فاصله ۴۰ μm از ناحیه انتقال

Spectra: granit 40				
Element	Series	unn.C	norm. C	Atom. C
[wt.-%]	[wt.-%]	[at.-%]		
Oxygen	K series	0.00	0.00	0.02
Sodium	K series	0.00	0.00	0.00
Magnesium	K series	0.00	0.00	0.00
Aluminium	K series	1.32	1.24	4.31
Sulfur	K series	0.00	0.00	0.00
Potassium	K series	0.54	0.51	1.23
Calcium	K series	26.69	25.09	58.64
Iron	K series	0.90	0.85	1.42
Gold	M series	76.92	72.30	34.38

Total: 106.4 %				

Spectra: granit 20				
Element	Series	unn.C	norm. C	Atom. C
[wt.-%]	[wt.-%]	[at.-%]		
Oxygen	K series	0.01	0.02	0.08
Sodium	K series	0.00	0.00	0.00
Magnesium	K series	0.00	0.00	0.00
Aluminium	K series	0.00	0.00	0.00
Silicon	K series	4.67	6.02	13.55
Sulfur	K series	0.00	0.00	0.00
Potassium	K series	0.00	0.00	0.00
Calcium	K series	34.44	44.38	70.01
Iron	K series	0.42	0.54	0.61
Gold	M series	38.06	49.04	15.74

Total: 77.6 %				

ح) آنالیز شیمیایی بتن حاوی سنگدانه گرانیت در فاصله $20 \mu m$ از ناحیه انتقال؛ خ) آنالیز شیمیایی بتن حاوی سنگدانه گرانیت در فاصله $40 \mu m$ از ناحیه انتقال

Spectra: silis-fasele 40				
Element	Series	unn. C	norm. C	Atom. C
[wt.-%]	[wt.-%]	[at.-%]		
Carbon	K series	2.86	3.71	14.82
Oxygen	K series	0.87	1.13	3.39
Sodium	K series	0.00	0.00	0.00
Magnesium	K series	0.00	0.00	0.00
Aluminium	K series	1.71	2.22	3.94
Silicon	K series	10.75	13.92	23.81
Sulfur	K series	1.28	1.66	2.48
Potassium	K series	0.47	0.61	0.75
Calcium	K series	24.19	31.33	37.55
Iron	K series	2.73	3.53	3.04
Gold	M series	32.34	41.89	10.21

Total: 77.2 %				

Spectra: silis-fasele 20				
Element	Series	unn. C	norm. C	Atom. C
[wt.-%]	[wt.-%]	[at.-%]		
Carbon	K series	3.33	4.34	15.66
Oxygen	K series	0.05	0.06	0.17
Sodium	K series	0.00	0.00	0.00
Magnesium	K series	0.00	0.00	0.00
Aluminium	K series	0.97	1.27	2.04
Silicon	K series	13.78	17.94	27.69
Sulfur	K series	1.68	2.19	2.96
Potassium	K series	1.55	2.01	2.23
Calcium	K series	27.68	36.02	38.98
Iron	K series	3.19	4.15	3.22
Gold	M series	24.61	32.03	7.05

Total: 76.8 %				

د) آنالیز شیمیایی بتن حاوی سنگدانه سیلیس در فاصله $20 \mu m$ از ناحیه انتقال؛ ذ) آنالیز شیمیایی بتن حاوی سنگدانه سیلیس در فاصله $40 \mu m$ از ناحیه انتقال

شکل ۷- نتایج آزمایش EDS و Point Scan در فاصله $20 \mu m$ و $40 \mu m$ از ناحیه انتقال در با سنگدانه‌های مختلف و با عمل آوری نمونه‌ها در آب در سن ۲۸ روزه

۵- نتیجه‌گیری

کسب کردند، در حالی که در سن ۹۰ روزه بیشترین مقاومت بر اساس تحقیقات صورت گرفته و با در نظر گرفتن این مطلب مربوط به بتن حاوی سنگدانه‌های سیلیسی حاصل شد (شکل شماره ۴). این امر را می‌توان به روند رو به رشد هیدراتاسیون خمیر سیمان و اندرکنش‌های بین سنگدانه و خمیر سیمان و نتیجتاً متراکم‌تر شدن بتن در گذر زمان نسبت داد.

با افزایش سرعت صوت و ثابت‌های الاستیک دینامیکی سنگدانه‌ها، مقدار مقاومت فشاری نهایی بتن بیشتر می‌شود، یعنی بتن حاوی سنگدانه‌های مقاوم‌تر، دارای سرعت امواج فراصوتی بیشتر بوده‌اند. بتن ساخته شده با سنگدانه‌های حاوی گرانیت و

بر اساس تحقیقات صورت گرفته و با در نظر گرفتن این مطلب که این نتایج منحصرأ مربوط به نمونه خاص سنگدانه‌های به کار رفته در این پروژه آزمایشگاهی بوده و در بسیاری موارد جهت اظهار نظر قطعی نیاز به برنامه آزمایشگاهی گسترده‌تری وجود دارد، موارد زیر قابل استنتاج و نتیجه‌گیری است:

عموماً در مطالعات انجام شده در تمامی موارد نمونه‌های با افزایش مقاومت سنگدانه، مقاومت بتن افزایش یافته و نمونه بتن با سنگدانه‌های گرانیتی بیشترین مقاومت فشاری در سن ۲۸ روزه را

مقدار درصد عنصر Si موجود در ملات افزایش یافته و مقدار درصد عنصر Ca کم شده است. ولی در مقابل در نمونه حاوی آهک درصد عنصر Si کاهش یافته و درصد Ca افزایش یافته است (شکل ۷ الف تا خ) (د تا ذ)). با افزایش مقاومت سنگدانه در بتن ناحیه انتقال نیز تقویت می شود و سیلیس موجود در سنگدانه ها با خاصیت کریستالی شدن و خاصیت خود موجب بهبود خواص ناحیه انتقال خمیر و سنگدانه ها می شود و چسبندگی ناحیه انتقال را بالا می برد. با افزایش درصد سیلیس در سنگ ها ضخامت ناحیه انتقال کاهش می یابد. با آزمایش های انجام شده می توان این چنین تفسیر کرد که سیلیس موجود در سنگدانه با کریستال های هیدروکسید کلسیم که در ناحیه انتقال تراکم بیشتری دارند، حاصل از هیدراتاسیون سیلیکات کلسیم واکنش داده و این هیدرات های شش ضلعی، درشت و ناپایدار $Ca(OH)_2$ را به هیدرات های سیلیکاتی سوزنی شکل پایدار C-S-H تبدیل می کند که کاهش اندازه و مقدار کریستال های هیدروکسید کلسیم و در نتیجه افزایش مقدار هیدرات های سیلیکاتی موجب استحکام ساختار $C-S-H$ و در نتیجه بهبود ناحیه انتقالی می شوند (شکل ۷ الف تا خ) (د تا ذ)).

۶- مراجع

- [۱]. پ. کومار مهتا - پائولو ج. م. مونتیه ئیرو. "ریز ساختار، خواص و اجزای بتن (تکنولوژی بتن پیشرفته)، ترجمه: اسماعیل گنجیان، علی اکبر رضایانپور، پرویز قدوسی، تهران، انتشارات دانشگاه صنعتی امیر کبیر، چاپ سوم، ۱۳۸۸.
- [2]. P. Kumar Mehta & Paulo J.M. Monteiro "CONCRETE Microstructure, Properties, and Materials" Third Edition, (2002).
- [۳]. مصباح نیمنی، م. قیومی. م. علاقه بندیان، ر. اثر "مقاومت و شکل پذیری فولاد در مقاومت ضربه ای قاب های با بتن پر مقاومت" مجموعه مقالات دهمین کنفرانس دانشجویان مهندسان عمران، دانشگاه صنعتی امیر کبیر، ۱۳۸۲.
- [4]. Michael A. Caldarone. "High Strength Concrete A Practical Guide", Taylor & Francis Publication, USA, (2009).
- [5]. WITTMANN F H, "Crack formation and fracture energy of normal and high strength concrete", Sadhana vol.27, part 4, pp.413-423, (2002).

سیلیس افزایش سرعت موج بیشتری نشان می دهند. در مقابل افزایش تخلخل در بتن حاوی سنگ های آهکی و نیز افزایش تخلخل و افزایش ضخامت ناحیه انتقال باعث کاهش سرعت موج می شود. و نیز افزایش جذب آب در بتن حاوی سنگدانه های آهکی و دولومیت باعث افزایش سرعت امواج می شود (علی رغم این که نمونه ها ۲۴ ساعت در دمای آزمایشگاه و خارج محیط اشباع نگهداری شدند)، با توجه به این موضوع می توان استدلال کرد که تغییرات چشم گیری در سرعت امواج فراصوت در این نمونه ها ملاحظه نمی شود.

نتایج SEM در شکل ها نشان می دهد که ریز ساختار بتن با تغییر جنس سنگدانه نیز تغییر می کند و با تغییر جنس سنگدانه ضخامت ناحیه انتقال تغییر می کند و با تغییر جنس سنگدانه و افزایش مقاومت سنگدانه، ضخامت ناحیه انتقال کاهش می یابد (شکل شماره ۶). تخلخل در ناحیه تماس بیشتر از خود خمیر سیمان است. در تمامی نمونه های اخذ شده ترک ها در ناحیه ITZ اتفاق افتاده است و همچنین ریز ترک ها در ناحیه تماس در حد قابل توجه هستند. علاوه بر وجود فضاهای مئینه بزرگ و بلورهای هیدروکسید کلسیم جهت دار در ناحیه انتقال، عامل اصلی مقاومت کم این ناحیه همانا وجود ترک های ریز است. میزان ترک های ریز به عواملی چون اندازه و دانه بندی سنگدانه ها، مقدار سیمان، نسبت آب به سیمان، درجه تراکم بتن تازه، شرایط عمل آوری، رطوبت نسبی محیط و تاریخچه حرارتی بتن بستگی دارد. با توجه به این که ناحیه انتقال مانند هاله ای دور سنگدانه و با نگهداری ۲۸ روز در محیط اشباع ضخامت $0.33 \mu m - 3.86 \mu m$ می باشد، که این مقدار برای بتن حاوی سنگدانه آهکی، گرانیتی، سیلیسی و دولومیتی به ترتیب $0.45 \mu m$ ، $0.33 \mu m$ ، $3.86 \mu m$ و $11/62 \mu m$ است، که تمامی ترک هایی با کمتر از این قطر که در حاشیه سنگدانه قرار گیرند در ناحیه ITZ واقع خواهند بود (شکل شماره ۶). بنابراین با توجه به تفاسیر فوق، می توان گفت علاوه بر مقاومت سنگدانه، کاهش ضخامت ناحیه انتقال تأثیر بسزایی بر خواص مکانیکی و سرعت امواج فراصوت بتن ایفا می کند.

به نظر می رسد با تغییر جنس سنگدانه، ناحیه انتقال نیز تقویت یا ضعیف می شود و در بتن حاوی سنگدانه های سیلیسی، گرانیتی و دولومیتی با عمل آوری در آب در فاصله $20 \mu m$ از ناحیه انتقال

- [18]. Ollivier, JP. Maso, JC and Bourdette, B. "Interfacial transition zone in concrete" *Adv cement-based Mater* 1995;2(1):30-8.
- [19]. Snyder, KA. Bentz, DP. Garboczi, EJ and Winslow, DN. "Interfacial zone percolation in cement-aggregate composites" Maso JC, editor. *Interfaces in cementitious composites*, RILEM Proceedings 18. E and FN spon; 1992. P. 259-68.
- [20]. Goldman, A and Bentur, A. "Effect of pozzolanic and non-reactive microfillers on the transition zone in high strength concretes." Maso JC, editor. *Interfaces in cementitious composites*, RILEM Proceedings 18. E and FN spon; 1992. P. 53-61.
- [21]. Amir Elsharief, Menashi D. Cohen*, Jan Olek "Influence of aggregate size, water cement ratio and age on the microstructure of the interfacial transition zone", *Cement and Concrete Research* 33 (2003) 1837-1849.
- [22]. Long term study on compressive and bond strength of coconut shell aggregate concrete, K. Gunasekaran, a, b, R. Annadurai, a, b, P.S. Kumar b, *Construction and Building Materials* 28 (2012) 208-215.
- [23]. K. Mostashar Nemati, "Mechanical Behavior and Percolation of Pore Space in the Interfacial Transition Zone of Concrete", 2nd International Conference on Concrete & Development, April 30th - May 2nd, 2005, Tehran, Iran.
- [24]. رمضانیاپور، علی اکبر. مروج جهرمی، سید مسعود. مهدی‌خانی، مهدی. "مقایسه اثرات نانوسیلیس و دوده سیلیس بر روی ریزساختار و دوام نمونه‌های بتنی" اولین کنفرانس بین‌المللی تکنولوژی بتن، تبریز، ۲۰۰۹.
- [25]. مقصودی، علی اکبر. پاشا زانوسی، عبدالله. "SEM میکروساختارها و مدول الاستیسته بتن‌های با عملکرد برتر مقاومت خیلی زیاد با و بدون پوزولان" اولین کنفرانس بین‌المللی تکنولوژی بتن، تبریز، ۲۰۰۹.
- [26]. مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، "استاندارد آزمایش‌های تعیین مقاومت بتن در سازه (آزمایش‌های غیر مخرب و نیمه مخرب بتن)" نشریه ض - ۳۱۶، تهران، چاپ چهارم، ۱۳۸۶.
- [27]. Saad A, Abo-Qudias "Effect of concrete mixing parameters on propagation of ultrasonic waves, *construction and building materials*, 19, pp 257-263-2005.
- [6]. Aitcin, P.C; Metha, P.K, "Effect of Coarse - Aggregate Characteristics on Mechanical Properties of High-Strength Concrete", *ACI-Mater-j*, 1990, V.87, NO.2, PP.103-107.
- [7]. Donza, O. Cabrera, E.F. Irassar, "High-strength concrete with different fine aggregate", *Cement and Concrete Research* 32 (2002).
- [8]. Zhou FP, Lydon FD, Barr BIG. Effect of coarse aggregate on elastic modulus and compressive strength of high performance concrete. *Cem Conc Res* 1995;25(1):177-86.
- [9]. Beshr H, Almusallam AA, Maslehuddin M. Effect of coarse aggregate quality on the mechanical properties of high strength concrete. *Construction and Building Materials* 2003;17:97-103.
- [۱۰]. آذریون، علیرضا. خانزادی، مصطفی. قهرمانی، غلامرضا. "کاربرد روش پالس اولتراسونیک در ارزیابی سازه‌های بتن مسلح" مجموعه مقالات اولین کنفرانس بین‌المللی بتن‌های ناتروا مخازن ذخیره آب شرب، گیلان، ۱۳۹۰
- [11]. Jones, R., "The Application of Ultrasonic to the Testing of Concrete", Research, London, 383. (1948).
- [12]. Malhotra, V.M., (1976), "Testing Hardened Concrete: Nondestructive Methods", *ACI Monograph 9 American Concrete Institute, Detroit, MI.*
- [13]. Kader G F, AlGabban A M and Abid S M, "mathematical model for the prediction of cement compressive strength at the age of 7 and 28 days within 24 hours" *Mater. struct.* 36, 2003, 693-701.
- [14]. Dimborga R, Turkmen I and Karakoc M B, "relationship between ultrasonic velocity and compressive strength for high-volume mineral-admixed concrete", *cement concr. Res.* 34, 2004, pp. 2329-2336.
- [۱۵]. رنجبر، ملک محمد. مدندوست، رحمت. محمدپور نیک‌بین، ایمان. "انتشار امواج التراسونیک در بتن خودتراکم و بررسی توزیع مدول الاستیسته دینامیکی در اعضای بتنی" مجموعه مقالات چهارمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه تهران، ۱۳۸۷.
- [۱۶]. ربانی اقدم، منصور. زرگری، وحداد. افشین، حسن. "تخمین برخی خواص بتن‌های با مقاومت بالا با استفاده از تکنیک پالس فراصوت" مجموعه مقالات چهارمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه تهران، ۱۳۸۷.
- [۱۷]. شریفی، جواد. نیکودل، محمدرضا، یزدانی، محمود. "تأثیر جنس سنگدانه‌ها بر سرعت امواج فشاری در بتن" مجموعه مقالات هشتمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران دانشگاه شیراز، ۱۳۸۸.

Investigation on Effect of Aggregate Type on Velocity of Ultrasonic Waves and Microstructure and Interface Transition Zone on High Strength Concrete

M. Hasnnejad*

M.Sc., Tabari Institute of Higher Education

J. Berenjian

Associate Professor, Tabari Institute of Higher Education

(Received: 2013/8/3 - Accepted: 2013/11/20)

Abstract

Use of the investigation on microstructure, have advantage that recognition on void and denser and durable and higher strength on concrete accorded. In this experimental study, investigated on compressive strength and velocity of ultrasonic waves and microstructure of interface transition zone on concrete with use of aggregates type of sillces, dolomite, limestone and granite on age of a polestar. By using of the Ultrasonic and Scanning Electron Microscope (SEM)set studied on microstructure on interface transition zone of concrete. The result shows the stuff of aggregate effect on compressive strength and so, the role of its on microstructures and thickness on interface transition zone. With increase of thickness of interface transition zone the velocity of ultrasonic waves on concrete decreased.

Keywords: Aggregate Type, High Strength Concrete, Microstructure, Interface Transition Zone, Ultrasonic Waves

* Corresponding author: Manshoor65@gmail.com