

بررسی امواج اولتراسونیک در بتن‌های معمولی با استفاده از نسبت‌های متفاوت آب به سیمان در تنش‌های مختلف

سیدحسین قاسم‌زاده موسوی‌نژاد*^۱ و بهنام رودی^۲

^۱ استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی، دانشگاه گیلان

^۲ دانشجوی کارشناسی ارشد سازه، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی، دانشگاه گیلان

(دریافت: ۹۵/۷/۱۸، پذیرش: ۹۷/۱۱/۲، نشر آنلاین: ۹۷/۱۱/۲)

چکیده

این پژوهش، مقادیر سرعت امواج اولتراسونیک را با در نظر گرفتن مؤلفه کرنش در تنش‌های مختلف مورد بررسی قرار می‌دهد. در این تحقیق، نمونه‌های بتنی ساخته شده در تنش‌های متفاوت (از حالت بدون بار تا لحظه آغاز ترک خوردگی) تحت بارگذاری فشاری قرار گرفته و سرعت عبور موج با استفاده از روش اولتراسونیک در بازه‌های نیرویی مشخص ثبت گردید. نمونه‌های مورد بررسی دارای عیار سیمان 400 kg/m^3 و w/c بین $0/3$ تا $0/5$ با گام‌های $0/2$ متغیر بوده و همچنین نسبت سنگدانه‌ها برابر در نظر گرفته شده است که معیار تأثیرگذار در نمونه‌های تحت بار برای ارزیابی رفتار بتن با استفاده از امواج فراصوت، تغییر نسبت آب به سیمان بوده است. با نگاهی موشکافانه بر روی آزمون‌های صورت گرفته می‌توان دریافت که نمونه‌های با سنین کمتر، دارای تغییرات سرعت موج کمتری بوده‌اند. تغییرات سرعت موج با افزایش بار، تشدید یافته و در ناحیه بار بحرانی (آغاز ترک خوردگی) بی‌نظمی‌ها افزایش می‌یابد. با توجه به ثابت بودن نسبت سنگدانه‌ها و عیار سیمان، و مشاهده نمودارهای سه‌بعدی چنین نتیجه گرفته شده است که تغییرات نسبت آب به سیمان نقش مؤثری را در ایجاد بی‌نظمی‌ها با شروع ترک خوردگی ایفا کرده است.

کلیدواژه‌ها: امواج اولتراسونیک، بارگذاری فشاری، نسبت آب به سیمان، بتن معمولی، منحنی سرعت موج

۱- مقدمه

۱۳۸۷؛ رنجبر و همکاران، ۱۳۸۵). کاربرد روش اولتراسونیک در ارزیابی مراحل گیرش توسط محققان زیادی انجام شده است. Reinhardt و Grosse (۲۰۰۴) گیرش ملات را مورد بررسی قرار دادند. مطالعات بر روی دو نوع سیمان تیپ I و Zود سخت شونده و با سه نسبت آب به سیمان $0/5$ ، $0/55$ و $0/6$ انجام گرفت. نتایج نشان داده است که در سیمان تیپ I، سرعت اولیه امواج در حدود 600 m/s بوده که بعد از گذشت ۲ ساعت به‌طور ناگهانی افزایش می‌یابد تا این‌که در زمان ۲۴ ساعت برای هر سه نسبت آب به سیمان به 3500 m/s می‌رسد. در این راستا تأثیر نسبت آب به سیمان روی سرعت امواج ناچیز بوده است. در سیمان Zود سخت شونده، سرعت اولیه امواج در حدود 600 m/s و در پایان ۲۴ ساعت برای نسبت آب به سیمان $0/5$ ، 4200 m/s و برای نسبت آب به سیمان $0/55$ ، 4000 m/s و برای نسبت آب به سیمان $0/6$ ، 3400 m/s به‌دست آمده است که نشان می‌دهد سیمان Zود سخت شونده به نسبت آب به سیمان حساس است. در تحقیق دیگر، Lee و همکارانش کاربرد روش اولتراسونیک را بر

محققان همواره به دنبال یافتن روش‌های دقیق‌تری برای بررسی خواص بتن بوده‌اند. در طی سالیان اخیر، استفاده از امواج اولتراسونیک^۱ برای ارزیابی خواص بتن از جمله زمان گیرش بتن مورد توجه قرار گرفته است که این روش به عنوان روش سرعت امواج اولتراسونیک نامیده شده و به عنوان یک روش غیرمخرب شناخته شده است. در این روش امواج فراصوت را از نمونه‌های موردنظر عبور داده و زمان عبور امواج را ثبت می‌کنند. زمان عبور امواج فراصوت که توسط یک مولد الکتریکی تولید می‌شوند حائز اهمیت بوده و با استفاده از این زمان و مسافتی که امواج طی کرده‌اند میزان سرعت امواج به‌دست می‌آید، که با بررسی این سرعت‌ها می‌توان خواص بتن را ارزیابی کرد. این روش، کم‌هزینه و با سرعت قابل انجام می‌باشد که این عوامل مناسب بودن روش مورد بحث را از هر جهت مورد ارزیابی و تأیید قرار می‌دهد (Bungey و همکاران، ۲۰۰۶؛ نویل، ۱۳۷۸؛ رنجبر و همکاران،

سرعت موج اولتراسونیک و شبکه عصبی مصنوعی (ANN)^۷ به واسطه تشخیص و پیش‌بینی اثر مقاومت فشاری در نمونه‌های بتنی سنگدانه‌ای سبک (LWAC)^۸ به کار گرفته شدند. شبکه عصبی مصنوعی برای پیش‌بینی مقاومت فشاری به‌وسیله سرعت موج اولتراسونیک مناسب تشخیص داده شد، به‌گونه‌ای که در تحقیقات آتی در اندازه‌گیری‌های غیرمخرب منجر به توصیف پدیده جداسازی در بتن سبک سنگدانه‌ای خواهد شد (Tenza- Abril و همکاران، ۲۰۱۸). در تحقیق دیگری، بتن سنگدانه مرجانی در سطحی گسترده از مقاومت فشاری متغیر بین ۳۰ تا ۷۵ مگاپاسکال قالب‌گیری شدند. سرعت موج اولتراسونیک، چکش اشمیت و آزمایش مقاومت فشاری در سن ۲۸ و ۹۰ روزه انجام شدند. نتایج نشان دادند که سنین عمل‌آوری، تأثیر بسزایی بر منحنی مقاومت آزمایش دارند (Tan و همکاران، ۲۰۱۸). از آنجایی‌که آزمایش اولتراسونیک در پژوهش‌های انجام شده روی بتن در شرایط بدون بار انجام شده‌اند و شرایط واقعی بتن سازه‌ای تحت بار را بیان نمی‌کنند، لذا با استفاده از روش اولتراسونیک هم‌زمان با فرآیند بارگذاری می‌توان به درک رفتار بتن و یافتن الگوهای مستقل از پارامترهای نیرو و جابه‌جایی جهت پایش سلامتی سازه‌ها کمک کرد که در این پژوهش با به‌کارگیری نمودارهای سه‌بعدی، سرعت امواج اولتراسونیک به صورت تابعی از کرنش‌های بتن در تنش‌های مختلف ارائه شده است.

۲- پژوهش آزمایشگاهی

۲-۱- خصوصیات مصالح

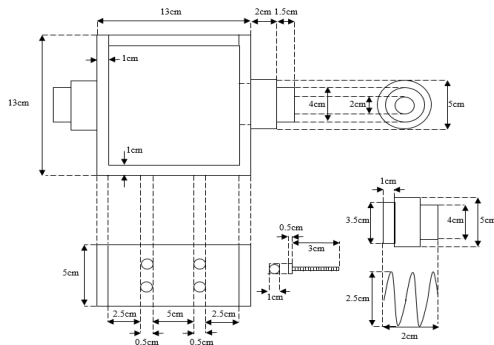
سیمان مورد استفاده در این پژوهش، سیمان تیپ II (Moderate Sulfate) با وزن مخصوص ۳۱۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب می‌باشد که از محصولات کارخانه سیمان دیلمان است. آب مورد استفاده قابل قبول، آب شرب بوده و آزمایش شیمیایی خاصی روی آن صورت نگرفته است (نوبل، ۱۳۷۸). مصالح سنگی از نوع رودخانه‌ای بوده که شن با وزن مخصوص ۲/۷۰ کیلوگرم بر مترمکعب و درصد جذب آب ۰/۷۷ و ماسه با وزن مخصوص ۲/۶۴ کیلوگرم بر مترمکعب و درصد جذب آب ۱/۷۳ بوده‌اند. در دانه بندی هریک از مصالح سنگی مصرفی الزامات آیین‌نامه ASTM C33-03 (ASTM C33-03، ۲۰۰۳) در نظر گرفته شده است. از فوق روان‌کننده نسل سوم فرکوپلاست^۹ P10-3R، که پایه پلی‌کربوکسیلات‌های اصلاح شده و محصول شرکت شیمی ساختمان می‌باشد استفاده شده است. این فوق روان‌کننده با خواص حفظ اسلامپ بتن در زمان طولانی تولید گردیده است.

روی بتن توانمند مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داده‌اند که منحنی‌های سرعت زمان برای همه ترکیبات شامل سه قسمت می‌باشند. در قسمت اول که دوره ساکن نامیده می‌شود سرعت امواج اولتراسونیک بسیار ناچیز می‌باشد. در قسمت دوم منحنی با توسعه روند هیدراتاسیون^۲ سرعت امواج اولتراسونیک به‌سرعت افزایش می‌یابد تا این‌که با پیدایش شبکه جامد روند افزایش سرعت کاهش می‌یابد که با قسمت سوم منحنی مشخص می‌گردد (Lee و همکاران، ۲۰۰۴). به‌علاوه، De Belie و همکاران (۲۰۰۵) روش اولتراسونیک را برای مشاهده گیرش ملات‌های حاوی تسریع کننده‌های مختلف برای شاکریت^۳ بررسی کردند. تأثیر نوع سیمان، نوع تسریع کننده و مقدار آن بر روی سرعت امواج مورد ارزیابی قرار گرفت. بدین منظور از دو نوع سیمان تیپ I و تیپ II و همچنین دو نوع تسریع کننده با نسبت‌های متفاوت (۰، ۰/۵، ۰/۷۵ و ۱ برابر حداکثر مقدار مجاز ۵۰ میلی‌لیتر به ازای هر کیلوگرم سیمان) استفاده گردید. نتایج حاصل از اندازه‌گیری سرعت امواج اولتراسونیک نشان داد که هر یک از پارامترهای در نظر گرفته شده بر سرعت امواج تأثیر می‌گذارند. تأثیر تسریع کننده AIS^۴ در سنین اولیه روی ملات‌های حاوی سیمان تیپ I نیز نسبت به ملات‌های سیمان تیپ II آشکارتر است. درحالی‌که تسریع کننده AIA^۵ تأثیر بیشتری روی ملات‌های حاوی سیمان تیپ II گذاشته است. طی تحقیقاتی روی اثر اندازه حداکثر سنگدانه‌ها (۵۰mm، ۳۷/۵mm، ۲۵mm، ۱۹mm، ۱۲/۵mm) بر سرعت امواج اولتراسونیک در بتن دریافت شده است که سرعت امواج اولتراسونیک عبوری از نمونه‌های بتنی رابطه مستقیمی با حداکثر اندازه سنگدانه‌ها دارند، به‌گونه‌ای که با افزایش اندازه سنگدانه‌ها، سرعت عبور امواج نیز افزایش می‌یابد (Mahmood، ۲۰۱۶).

با مطالعه بر روی شناسایی فرکانس‌های خاص مربوط به سنگدانه‌ها و خمیر سیمان در جریان هیدراتاسیون بتن نشان دادند که تشخیص رفتار خمیر سیمان و سنگدانه‌ها در محدوده فرکانس-های القایی امکان‌پذیر می‌باشد (Cosmes-López و همکاران، ۲۰۱۷). در تحقیقی، کنترل گیرش و سخت شدن بتن تازه را با استفاده از یک روش آکوستیک^۶ با سرعت انتقال بالا ارزیابی کردند و دریافتند که اندازه‌گیری سرعت موج می‌تواند سه مرحله را در فرآیند هیدراتاسیون بتن تازه به‌وضوح نشان دهد و دوره انتقالی فاز هیدرو آلومینات‌ها^۷ براساس ضریب میرایی قابل اندازه‌گیری است (Zhang و همکاران، ۲۰۱۵).

7. Hydroaluminate
8. Artificial Neural Network
9. Light Weight Aggregate Concrete
10. Ferrocoplast

2. Hydratation
3. Shotcrete
4. Aluminate Sulphate
5. Alkaline Aluminate
6. Acoustic



شکل ۲- ابعاد غلاف نگهداری سنسورهای دستگاه اولتراسونیک

آزمایش جذب آب طبق استاندارد ASTM C642 (ASTM G642، ۲۰۰۲) انجام گردید. در این آزمایش، آزمون‌های عمل-آوری شده، پس از خشک شدن در دمای معینی توسط گرم‌خانه در محیط آزمایشگاه توزین می‌شوند (وزن خشک اولیه). سپس نمونه‌ها با ثبت دقیق زمان به مدت تقریباً سه روز داخل آب غوطه‌ور می‌شوند تا به یک وزن ثابت برسند. در طی این مدت در بازه‌های زمانی مشخصی، از داخل آب خارج شده و سطح آن‌ها با یک پارچه خشک می‌گردد و سپس توزین می‌شوند. تمامی قرائت‌های دستگاه اولتراسونیک با رعایت الزامات استاندارد BS1881 انجام شد (BS 1881، ۱۹۸۶). آزمایش سرعت امواج اولتراسونیک با استفاده از دستگاه PUNDIT (Portable Ultrasonic Non-Destructive Digital Indicating Tester) صورت گرفت. در این مطالعه امواج ماورای صوت با از فرکانس ۵۴ کیلوهرتز ارسال استفاده گردید.

۴- نتایج آزمایش

۴-۱- نمودارهای نقطه‌ای

براساس شکل (۳) با افزایش چگالی در نسبت‌های آب به سیمان مختلف سرعت موج افزایش می‌یابد که این اختلاف سرعت در سن ۲۸ روزه به بیشترین حد خود می‌رسد. با کاهش نسبت آب به سیمان فاصله بین‌ذره‌ای کمی در ساختار بتن ایجاد می‌شود و خمیر سیمان با حضور w/c کمتر باعث اتصال بهتر بین ذرات موجود در ساختار بتن برای شکل‌دهی میکروساختار متراکم می‌گردد. این امر موجب سهولت انتشار امواج اولتراسونیک شده که سرعت موج را افزایش می‌دهد (Soltani و همکاران، ۲۰۱۳). از طرف دیگر کاهش w/c با ایجاد ساختار متراکم‌تر و پیوندهای قوی‌تر، بتن چگال‌تری را نیز ایجاد کرده که خلل و فرج کم‌تری را در ساختار خود دارد. در شکل (۴) همان‌گونه که دیده می‌شود کاهش نسبت آب به سیمان از ۰/۵ تا ۰/۳ در افزایش مقاومت تأثیر چشم‌گیری داشته که می‌توان افزایش حدود ۳۰٪ (از ۱۵ مگاپاسکال در نسبت‌های بالا با مقاومت ۴۷ مگاپاسکال در نسبت آب به سیمان ۰/۳) مشاهده نمود.

۲-۲- طرح آزمایش

طرح نسبت‌های مخلوط بتن معمولی بر مبنای آئین‌نامه ACI 211.1-91 (ACI 211.1-91، ۲۰۰۲) با در نظر گرفتن حداکثر اندازه اسمی سنگ‌دانه ۱۹mm و اسلامپ ۶۰mm در مخلوط‌های با w/c کمتر از ۰/۳۸ برای حفظ اسلامپ از فوق روان‌کننده با مقدار مناسب استفاده گردید. بعلاوه، برای بررسی بهتر نقش آب به سیمان پارامترهای نسبت سنگ‌دانه‌ها و عیار سیمان ثابت فرض شده‌اند. ابعاد نمونه‌ها به صورت $10 \times 10 \times 10$ سانتی‌متر بوده و هر طرح دارای ۹ نمونه شامل سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه هستند.

۳- روش آزمایش

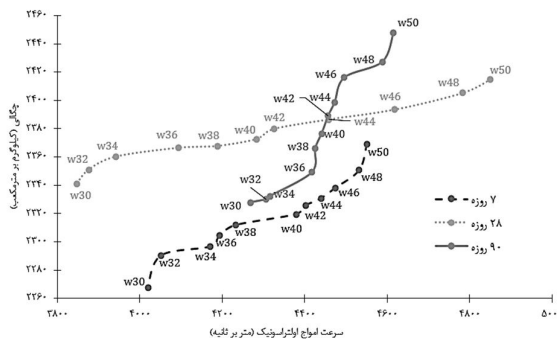
در جهت کاهش خطای این آزمایش و رسیدن به داده‌های دقیق‌تر، یک غلاف برای نگهداری سنسورهای دستگاه اولتراسونیک طراحی گردید تا هنگام آزمایش از خطای دست‌جولگیری نماید. چهارچوب اصلی غلاف از جنس فولاد و تکیه‌گاه‌های سنسورهای دستگاه از جنس آرتالون که طبق شکل (۱) و (۲) با استفاده از فنر موجود درون این تکیه‌گاه، سنسورها با فشار مناسب روی نمونه سوار شدند. پیچ‌ها نیز به‌گونه‌ای روی نمونه سوار شدند که بدون آسیب رساندن به نمونه، غلاف را دقیقاً در موقعیتی قرار می‌دهند که سنسورهای دستگاه در مرکز بدهای نمونه تکیه داده شوند. برای شروع آزمایش ابتدا مرکز بدهایی از نمونه‌ها را که قرار است سنسورها به آن متصل شوند را تعیین کرده و روی آن‌ها را به‌اندازه سطح سنسور به گریس آغشته کرده و سپس آن‌ها را در غلاف ساخته شده قرار داده و سنسورهای دستگاه اولتراسونیک را از قسمت تعبیه‌شده در غلاف به نمونه وصل کرده و مجموعه غلاف و نمونه زیر جک بارگذاری قرارداده شدند. قبل از بارگذاری، عدد دستگاه اولتراسونیک را قرائت و به عنوان عدد در شرایط نمونه بدون بارگذاری ثبت می‌شود. در مرحله بعدی گیج اندازه‌گیری کرنش به‌گونه‌ای روی صفحه بارگذاری قرار داده شد که هم‌زمان با قرائت عدد اولتراسونیک و عدد بارگذاری، عدد کرنش نیز به صورت هم‌زمان ثبت می‌شود. دستگاه بارگذاری را روشن کرده و سرعت بارگذاری را روی نرخ ثابتی قرار داده و اعداد اولتراسونیک و کرنش با میزان بار وارده با گام‌های ۵۰۰ کیلوگرمی توسط دوربین فیلم‌برداری با دقت بالا به‌طور هم‌زمان قرائت و ثبت گردید.



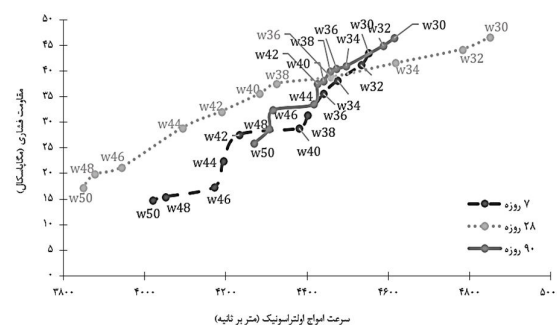
شکل ۱- غلاف نگهداری سنسورهای دستگاه اولتراسونیک

این که در سن ۹۰ روزه نیز تغییرات سرعت موج نسبتاً کم می-باشد، احتمال این موضوع که در سنین بالاتر فعالیت هیدراتاسیون کاهش یافته و ساختار کریستالی به ثبات قابل ملاحظه‌ای رسیده باشد تقویت می‌گردد. در واقع تغییرات مقاومت بعد از این سن به شدت کند می‌شود می‌تواند دلیلی بر تغییرات قابل توجه سرعت موج نسبت به تغییرات نسبت آب به سیمان باشد. همچنین در برخی از طرح‌های اولیه که نسبت آب به سیمان پایین تر می‌باشد مشاهده می‌شود که در نمونه‌های ۲۸ روزه سرعت امواج از نمونه-های ۹۰ روزه بیشتر می‌باشد. علت می‌تواند آن باشد که در نمونه-های ۲۸ روزه همچنان درصدهایی از آب اختلاط در نمونه موجود بوده و ساختار بتن به سختی و تردی نمونه‌های ۹۰ روزه نرسیده است و از این رو می‌توان نتیجه گرفت که در این طرح‌ها سرعت امواج نمونه‌های ۹۰ روزه نسبت به ۲۸ روزه‌ها به علت داشتن خلل و فرج بیشتر از سرعت کمتری برخوردار می‌باشند.

در نمودار شکل (۵) با افزایش نسبت آب به سیمان مقدار جذب آب افزایش قابل ملاحظه‌ای دارد که این اثر در سن ۹۰ روزه اندکی تشدید می‌شود. تغییرات سرعت موج مشابه شکل (۴) می-باشد. نمونه‌هایی که دارای نسبت آب به سیمان بیشتر هستند، برای تأمین آب مورد نیاز برای فرآیند هیدراتاسیون به آب بیشتری احتیاج دارند. اما نکته قابل توجه در این نمودار وجود جذب آب بیشتر برای نمونه‌های ۷ روزه نسبت به نمونه‌های ۲۸ روزه می‌باشد که علت آن می‌تواند نیاز به جذب آب بیشتر در سنین اولیه برای تشکیل میکروساختارها و پیوندهای موجود در بتن (G-S-H) طی فرآیند هیدراتاسیون باشد. این عمل حتی با افزایش مقاومت نیز همراه نیست اما می‌تواند سبب افزایش سرعت گردد (Byfors, ۱۹۸۰). در سن ۹۰ روزه روند جذب آب از کد طرح w44 که همان نسبت ۰/۴۴ می‌باشد نسبت به نمونه‌های ۷ روزه تغییر کرده و مقادیر بیشتری را نشان می‌دهند.



شکل ۳- سرعت موج اولتراسونیک- چگالی



شکل ۴- سرعت موج اولتراسونیک- مقاومت فشاری

آنچه که از نتایج آزمون اولتراسونیک برداشت می‌شود بیشترین تغییرات سرعت موج در سن ۲۸ روزه قابل مشاهده است. در سن ۷ روزه با توجه به فرآیند شکل‌گیری ماتریس سیمان (هیدراتاسیون) و تغییرات شدید ساختاری به نظر می‌رسد محتوای آب درون ماتریس نسبت به اثرات کریستال‌ها بر سرعت موج بیشترین تأثیر را داشته باشد و در نتیجه تغییرات سرعت موج با تغییرات نسبت آب به سیمان هم‌خوانی چندانی ندارد. با توجه به

جدول ۱- طرح نسبت‌های مخلوط بتن (kg/m³)

شماره طرح	کد طرح	نسبت آب به سیمان	سیمان (kg/m³)	آب آزاد (kg)*	ماسه (kg)	شن (kg)
۱	w30	۰/۳	۴۰۰	۱۲۰	۹۸۸/۲۴	۹۸۸/۲۴
۲	w32	۰/۳۲	۴۰۰	۱۲۸	۹۷۷/۷۴	۹۷۷/۷۴
۳	w34	۰/۳۴	۴۰۰	۱۳۶	۹۶۷/۲۴	۹۶۷/۲۴
۴	w36	۰/۳۶	۴۰۰	۱۴۴	۹۵۶/۷۵	۹۵۶/۷۵
۵	w38	۰/۳۸	۴۰۰	۱۵۲	۹۴۶/۲۵	۹۴۶/۲۵
۶	w40	۰/۴	۴۰۰	۱۶۰	۹۳۵/۷۵	۹۳۵/۷۵
۷	w42	۰/۴۲	۴۰۰	۱۶۸	۹۲۵/۲۵	۹۲۵/۲۵
۸	w44	۰/۴۴	۴۰۰	۱۷۶	۹۱۴/۷۵	۹۱۴/۷۵
۹	w46	۰/۴۶	۴۰۰	۱۸۴	۹۰۴/۲۵	۹۰۴/۲۵
۱۰	w48	۰/۴۸	۴۰۰	۱۹۲	۸۹۳/۷۵	۸۹۳/۷۵
۱۱	w50	۰/۵	۴۰۰	۲۰۰	۸۸۳/۲۵	۸۸۳/۲۵

* آب آزاد شامل آب جذب شده نمی‌باشد.

۴-۲- نمودارهای سه بعدی

نتایج نشان می‌دهد که افزایش سرعت موج با افزایش میزان بار رابطه مستقیم و غیرخطی دارد. همچنین رفتار نمودارها به شکل منحنی تمایل دارد. نمونه‌ای از نمودارهای به دست آمده مربوط به طرح ۱۱ در شکل (۷) ارائه شده است. در این نمودار، تغییرات سرعت امواج اولتراسونیک و کرنش طولی نسبت به بار اعمالی در سنین مختلف نشان داده شده است. با افزایش نسبت آب به سیمان قوس منحنی‌ها به تدریج افزایش می‌یابد و رفتار پلاستیک بیشتری را از خود به نمایش می‌گذارند. روند هموار شدن منحنی‌ها ادامه یافته و در تمامی سنین منحنی‌های تنش-کرنش روندی نسبتاً خطی از خود نشان داده‌اند. افزایش تثبیت کلی نمودارهای سه بعدی تا طرح ۷ ($w/c=0.42$) روند نسبتاً ثابتی را دنبال می‌کند اما تغییرات شیب غیرخطی نمودارها در طرح ۸ ($w/c=0.44$) بیانگر افزایش تأثیر نسبت آب به سیمان بر تغییرات سرعت موج است. بی‌نظمی‌هایی که در ابتدا و انتهای بازه بارگذاری دیده می‌شوند می‌تواند به دلیل خطاهای تکیه‌گاهی در ابتدا و ایجاد ترک‌های شکست مقطع در انتهای بارگذاری باشد. روند کند افزایش مقاومت در سن ۹۰ روزه با رشدی نمایی نشان‌دهنده عملکرد بتن با رفتاری نرم‌تر و با تغییرات سرعت موج خفیف‌تر در بازه بارگذاری می‌باشد که ساختار متخلخل این بتن باید یکی از دلایل اصلی در بروز چنین پدیده‌ای دانست. همچنین برای هر طرح و منحصرأ برای هر سن معادلاتی استخراج شده است که می‌تواند به پیش‌بینی رفتار بتن کمک شایانی نماید. معادلات در قالب چندجمله‌ای‌های مرتبه ۲ بوده که در هم‌پوشانی نقاط با معادلات با درجات بالاتر به میزان 0.06% تا 0.4% اختلاف دارند که قابل چشم‌پوشی می‌باشد. تمامی ضرایب با دقت ۹۵ درصدی در شرایط مرزی محاسبه شده‌اند. x نماد کرنش، y نماد مقاومت فشاری و $f(x,y)$ نماد سرعت امواج اولتراسونیک می‌باشد. به‌طور خلاصه معادلات چهار طرح ۱، ۷، ۸ و ۱۱ ارائه شده است.

طرح (۱)

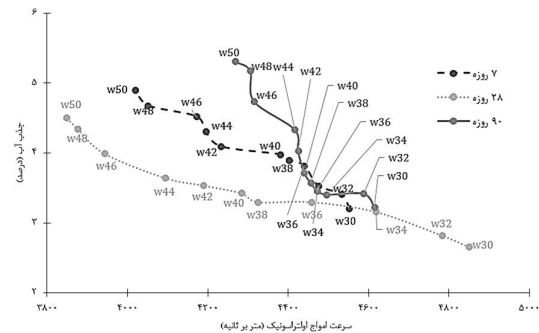
۷ روزه:

$$f(x, y) = -283.7 + 8.465 \times 10^5 x - 404.1y - 3.968 \times 10^7 x^2 + 3.949 \times 10^4 xy - 12.49y^2 \quad (1)$$

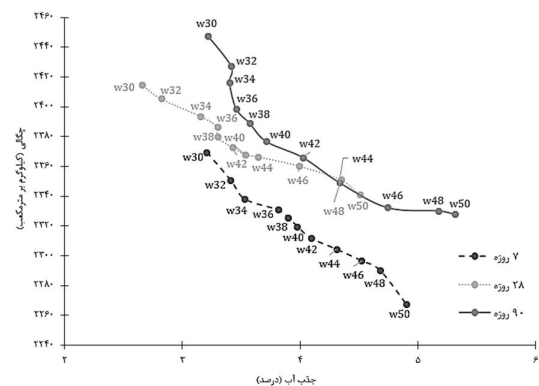
۲۸ روزه:

$$f(x, y) = -2660 + 3.946 \times 10^5 x + 327.7y + 6.835 \times 10^8 x^2 - 5.904 \times 10^5 xy + 118.1y^2 \quad (2)$$

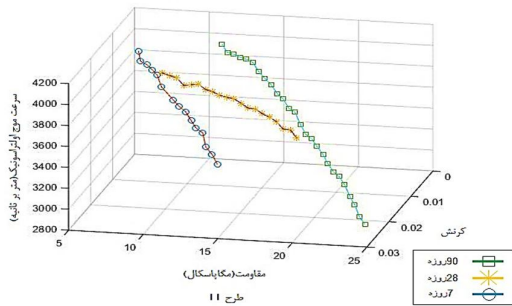
در واقع انتظار از میکروساختارهای بتن این است که با افزایش سن و نسبت آب به سیمان برای استمرار فرآیند هیدراتاسیون که سرعت کمتری هم به خود گرفته، جذب آب نیز افزایش یابد. در نمودار شکل (۶) روند نزولی چگالی و روند جذب آب با افزایش نسبت آب به سیمان دیده می‌شود. با افزایش سن نمونه‌ها از ۷ روزه به ۲۸ روزه کاهش جذب آب مشاهده می‌شود که دوباره با افزایش سن تا ۹۰ روزه افزایش جذب آب دیده می‌شود اما تغییرات چگالی از ۷ روزه به ۲۸ روزه روندی صعودی و از ۲۸ روزه تا ۹۰ روزه از نسبت 0.42 تا نسبت 0.5 کاهش چگالی مشاهده می‌شود که می‌توان تغییرات ساختاری ماتریس سیمان را عامل اصلی تغییرات چگالی دانست. تغییرات ساختاری ماتریس سیمان به‌گونه‌ای است که برای تأمین و ادامه فرآیند هیدراتاسیون نیاز به جذب آب وجود دارد که در شکل (۵) در مورد علت آن توضیح داده شده است. جذب آب و ادامه روند هیدراتاسیون سبب تشکیل پیوند قوی‌تر و متراکم‌تری می‌شود که نتیجه آن کاهش تخلخل در میکروساختار نمونه‌ها و در نهایت افزایش میزان چگالی را می‌توان مشاهده کرد.



شکل ۵- نمودار جذب آب- سرعت موج اولتراسونیک



شکل ۶- تأثیر نسبت آب به سیمان در نمودار جذب آب - چگالی



شکل ۷- نمودار سرعت امواج اولتراسونیک و کرنش طولی نسبت به بار اعمال شده در سنین مختلف (طرح ۱۱)

۴- نتیجه گیری

۱- روند هموارتر و قوسی شکل شدن نمودارهای سه بعدی تا طرح ۷ ($w/c=0/42$) روند نسبتاً ثابتی را دنبال می کند اما با تغییرات شیب غیر خطی نمودارها در طرح ۸ ($w/c=0/44$)، این روند شدت یافته که بیانگر افزایش تأثیر نسبت آب به سیمان بر تغییرات سرعت موج است.

۲- تغییرات سرعت امواج عبوری از نمونه ها با افزایش سن کاهش می یابد بطوری که این کاهش سرعت در سن ۹۰ روزه با اختلاف تغییرات ۷،۵٪ به حداکثر مقدار خود می رسد.

۳- کاهش نسبت آب به سیمان از ۰/۵ تا ۰/۳ در افزایش مقاومت تأثیر چشم گیری داشته که می توان افزایش حدود ۳۰۰٪ را مشاهده نمود. با توجه به نتایج آزمون اولتراسونیک، بیشترین تغییرات سرعت موج در سن ۲۸ روزه قابل رؤیت می باشند.

۴- با کاهش نسبت های آب به سیمان، چگالی افزایش و سرعت موج کاهش می یابد که این اختلاف سرعت در سن ۲۸ روزه به بیشترین حد خود رسیده است.

۵- برای کلیه سنین بتن، سرعت امواج با کاهش جذب آب رابطه مستقیم دارد و کمترین درصد جذب آب در نمونه های ۲۸ روزه مشاهده گردید. (تغییرات درصد جذب آب: ۷ روزه ها ۵۲،۸۵٪، ۲۸ روزه ها ۶۹،۴۲٪ و ۹۰ روزه ها ۶۵،۰۵٪ می باشد).

۶- در نمودارهای سه بعدی نتایج تمامی طرح ها بر روی خطوط منحنی نسبتاً منظمی قرار می گیرد که بیانگر ارتباط بسیار نزدیک و همبستگی بالای تغییرات سرعت موج با تغییرات تنش و کرنش (تغییرات سرعت در محور سوم عمود بر منحنی تنش-کرنش) می باشد.

۷- با استفاده از منحنی های سه بعدی به دست آمده، علاوه بر در اختیار گرفتن اطلاعات همبستگی مقاومت و سرعت، سرعت موج با استفاده از کرنش و تغییرات منحنی تنش-کرنش قابل پیش بینی است.

۸- معادلات استخراج شده برای سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه نشان می دهند که هر یک از پارامترهای کرنش، مقاومت فشاری و سرعت

۹۰ روزه:

$$f(x, y) = -1.939 \times 10^4 - 5.125 \times 10^6 x + 2682y - 8.113 \times 10^7 x^2 + 1.85 \times 10^5 xy - 62.01y^2 \quad (3)$$

طرح ۷

۷ روزه:

$$f(x, y) = 4654 - 1.773 \times 10^5 x - 10.98y + 1.004 \times 10^6 x^2 + 4394xy - 1.473y^2 \quad (4)$$

۲۸ روزه:

$$f(x, y) = 3825 + 1.072 \times 10^5 x - 8.807y - 8.987 \times 10^6 x^2 + 1098xy - 0.2229y^2 \quad (5)$$

۹۰ روزه:

$$f(x, y) = 53.49 - 2.259 \times 10^6 x + 1392y - 2.388 \times 10^8 x^2 + 3.234 \times 10^5 xy - 107.6y^2 \quad (6)$$

طرح ۸

۷ روزه:

$$f(x, y) = 3625 + 1.712 \times 10^5 x + 17.09y - 1.431 \times 10^8 x^2 + 2.004 \times 10^4 xy - 2.528y^2 \quad (7)$$

۲۸ روزه:

$$f(x, y) = 1240 + 9.436 \times 10^5 x - 121.1y - 9.371 \times 10^8 x^2 + 6.695 \times 10^5 xy - 124.1y^2 \quad (8)$$

۹۰ روزه:

$$f(x, y) = 4667 + 2.712 \times 10^5 x - 142.1y + 2.608 \times 10^8 x^2 - 3.368 \times 10^4 xy + 8.873y^2 \quad (9)$$

طرح ۱۱

۷ روزه:

$$f(x, y) = 4201 - 6816x - 22.97y - 5.087 \times 10^6 x^2 + 1.259 \times 10^4 xy - 10.33y^2 \quad (10)$$

۲۸ روزه:

$$f(x, y) = 4044 - 6.729 \times 10^5 x + 333.4y + 2.701 \times 10^8 x^2 - 2.437 \times 10^5 xy + 52.05y^2 \quad (11)$$

۹۰ روزه:

$$f(x, y) = -3822 - 1.307 \times 10^6 x + 2059y - 4.751 \times 10^7 x^2 + 1.547 \times 10^5 xy - 126.8y^2 \quad (12)$$

- Lee HK, Lee KM, Kim YH, Yim H, Bae DB, "Ultrasonic in-situ monitoring of setting process of high-performance concrete", *Cement and Concrete Research*, 2004, 34 (4), 631-640.
- Mohammed TU, Mahmood AH, "Effects of maximum aggregate size on UPV of brick aggregate concrete", *Ultrasonics*, 2016, 69, 129-36.
- Reinhardt HW, Grosse CU, "Continuous monitoring of setting and hardening of mortar and concrete", *Construction and building materials*, 2004, 18 (3), 145-154.
- Soltani F, Goueygou M, Lafhaj Z, Piwakowski B, "Relationship between ultrasonic Rayleigh wave propagation and capillary porosity in cement paste with variable water content", *NDT & E International*, 2013, 54, 75-83.
- Tan Y, Yu H, Mi R, Zhang Y, "Compressive strength evaluation of coral aggregate seawater concrete (CAC) by non-destructive techniques", *Engineering Structures*, 2018, 176, 293-302.
- Tenza-Abril AJ, Villacampa Y, Solak AM, Baeza-Brotons F, "Prediction and sensitivity analysis of compressive strength in segregated lightweight concrete based on artificial neural network using ultrasonic pulse velocity", *Construction and Building Materials*, 2018, 189, 1173-83.
- Zhang J, Fan T, Ma H, Li Z, "Monitoring setting and hardening of concrete by active acoustic method: effects of water-to-cement ratio and pozzolanic materials", *Construction and Building Materials*, 2015, 88, 118-25.
- امواج اولتراسونیک با همبستگی بالایی به صورت جداگانه قابل پیش‌بینی هستند.
- ### ۳- تشکر و قدردانی
- مؤلفین مراتب سپاس خود را نسبت به مسئولین آزمایشگاه بتن دانشگاه گیلان از جمله جناب آقای مهندس سرمست و سرکار خانم مهندس حاج جعفری و همچنین آقایان مهندس باران‌دوست و مهندس طهمورسی که همکاری‌های بسیاری در هماهنگی‌های این پروژه به عمل آورده‌اند، را دارند.
- ### ۵- مراجع
- رنجبر م م، مدن دوست ر، محمدپور نیک‌بین ا، "ارزیابی مقاومت بتن در دیوار بتن مسلح ساخته شده از بتن خود تراکم"، هفتمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران، ۱۳۸۵.
- رنجبر م م، مدن دوست ر، محمدپور نیک‌بین ا، "انتشار امواج اولتراسونیک در بتن خودتراکم و بررسی توزیع مدول الاستیسیته دینامیکی در اعضای بتنی"، چهارمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه تهران، ۱۳۸۷.
- نویل آ، ترجمه فامیلی ه، "خواص بتن"، انتشارات مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، ۱۳۷۸.
- ACI 211.1-91, "Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete", ACI, USA, 2002.
- ASTM C 33-03, "Standard Specification for Concrete Aggregates", ASTM, USA, 2003.
- ASTM C 642, "Standard test method for density, absorption, and voids in hardened concrete", in: *Annual Book of ASTM Standards*, vol. 04.02, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 2002.
- BS 1881: Part 203. Measurement of Velocity of Ultrasonic Pulses in Concrete, BSI, UK, 1986.
- Bungey JH, Grantham MG, Millard S, "Testing of concrete in structures", CRC Press, 2006.
- Byfors J, "Plain concrete at early ages" (No. 80), Swedish Cement and Concrete Research Institute, 1980.
- Cosmes-López MF, Castellanos F, Cano-Barrita PF, "Ultrasound frequency analysis for identification of aggregates and cement paste in concrete", *Ultrasonics*, 2017, 73, 88-95.
- De Belie N, Grosse CU, Kurz J, Reinhardt HW, "Ultrasound monitoring of the influence of different accelerating admixtures and cement types for shotcrete on setting and hardening behavior", *Cement and Concrete Research*, 2005, 35 (11), 2087-2094.

EXTENDED ABSTRACT

Study of Ultrasonic Pulse Wave Velocity in Plain Concrete Using Different Water to Cement Ratio at Different Stress Level

Seyed Hosein Ghasemzadeh Mousavinejad*, Behnam Rudy

Faculty of Civil Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran

Received: 10 October 2016; Accepted: 23 January 2019

Keywords:

Ultrasonic waves, Compressive loading, Plain concrete, Wave velocity curve, Water cement ratio.

1. Introduction

Ultrasonic pulse wave velocities as a non-destructive test method have been utilized for assessing concrete properties. Most studies in this context were performed on specimens with no externally applied load and only were expressed the pulse wave velocity in terms of other concrete characteristics. Reinhardt and Grosse (2004) study showed that pulse wave velocity changes with different water to cement ratios for different cement types after 24 hours (Reinhardt & Grosse et al., 2004). The objective of this research was to study the pulse wave velocity of structural concrete under real conditions subjected to different loading and different intervals of compressive stresses and strains. This can help to have a better understanding of concrete behavior and lead to an independent model from load-displacement parameter for health monitoring of concrete structures. To this aim, concrete cube specimens were prepared for cement content of 400 kg/m³, water to cement ratio from 0.3 to 0.5 with a varying increment of 0.02, and equal ratio of fine to coarse aggregate.

2. Methodology

2.1. Materials properties

In preparing specimens, type II cement from Deyleman cement factory (SG. 3.15) and river fine (max. 4.75 mm) and coarse aggregates (max. 19 mm) graded to ASTM C33-03 (2003) were being used. Moreover, superplasticizer P10-3R was added to a number of mixes for maintaining the workability of the mixes.

2.2. Design of mixtures

Mixtures were designed by ACI 21101-91 (2002) having a maximum aggregate size of 19 mm with a slump of about 60 mm (superplasticizer was used for mixes with a w/c ratio of less than 0.38). To have a better assessment of water to cement ratio, the proportion of fine to coarse aggregate and cement content were taken constant in all mixes. Cubic specimens of 10cm were tested for 7, 28, and 90 days.

2.3. Test method

For minimizing and achieving more accurate data for ultrasonic wave velocity, a resting-place case had been designed to hold transmitter and receiver probes in place. After placing the probes and the specimen in the compression test machine, ultrasonic wave velocity based on BS1881 (1986) was recorded first for specimen with no load. In the next step, the strain gauge was positioned in such a way that the strain

* Corresponding Author

E-mail addresses: h.mosavi@guilan.ac.ir (Seyed Hosein Ghasemzadeh Mosavinejad), behnam.rudi@gmail.com (Behnam Rudy).

measurement was recorded with wave velocity during loading by a highly accurate camera simultaneously. Wave velocity and strain measurements were recorded and plotted for a constant loading rate with an interval of 500 kg.

Table1. Mix design proportions (kg/m³)

Design No.	Design Code	w/c	cement	free water	Sand	Gravel
1	w30	0.3	400	120	988.24	988.24
2	w32	0.32	400	128	977.74	977.74
3	w34	0.34	400	136	967.24	967.24
4	w36	0.36	400	144	956.75	956.75
5	w38	0.38	400	152	946.25	946.25
6	w40	0.4	400	160	935.75	935.75
7	w42	0.42	400	168	925.25	925.25
8	w44	0.44	400	176	914.75	914.75
9	w46	0.46	400	184	904.25	904.25
10	w48	0.48	400	192	893.75	893.75
11	w50	0.5	400	200	883.25	883.25

*Free water or mixing water does not include absorbed water

3. Results and discussion

3.1. Two dimensional diagrams of strength, density and water absorption with ultrasonic wave velocity

Fig. 1 shows that a considerable increase in strength (300%) occurs with a reducing w/c ratio from 0.5 to 0.3 at 28 days. The most changes in wave velocity, which was observed for 28 days concrete can be attributed to the formation of crystal in the cement matrix. For 7 day concrete, the low wave velocity may result due to the existence of water and premature crystallization in the concrete matrix, and for 90 days may be due to reduced hydration activity resulting from significant crystalline structure formation in concrete.

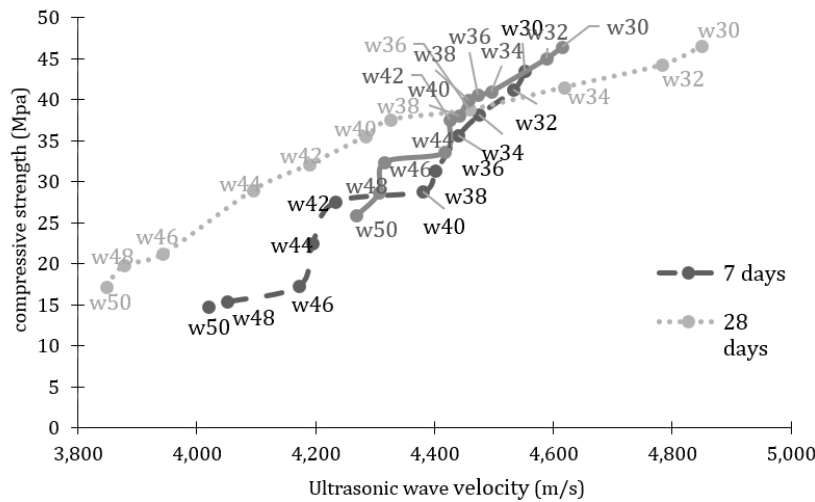


Fig. 1. Compressive strength VS. Ultrasonic wave velocity at different ages

3.2. Three-dimensional diagrams of stress, strain, and ultrasonic wave velocity

These diagrams (Fig. 3) show that wave velocity increases directly and non-linearly with load increase. Moreover, the curve arc increases gradually with an increase in w/c ratios and exhibit more plastic behavior. The curve smoothing trend is relatively continued to linear for all ages up to w/c ratio of 0.42. The non-linear slope change for the w/c ratio of 0.44 indicates its increasing effect on wave velocity.

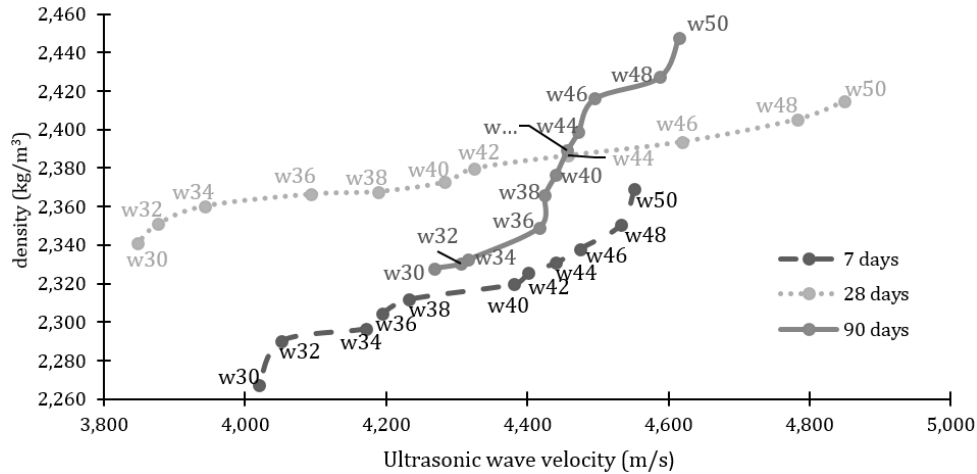


Fig. 2. Density vs. ultrasonic wave velocity at different ages

Irregularities observed at the beginning and end of the loading range can be attributed respectively to support slippage and formation of crack.

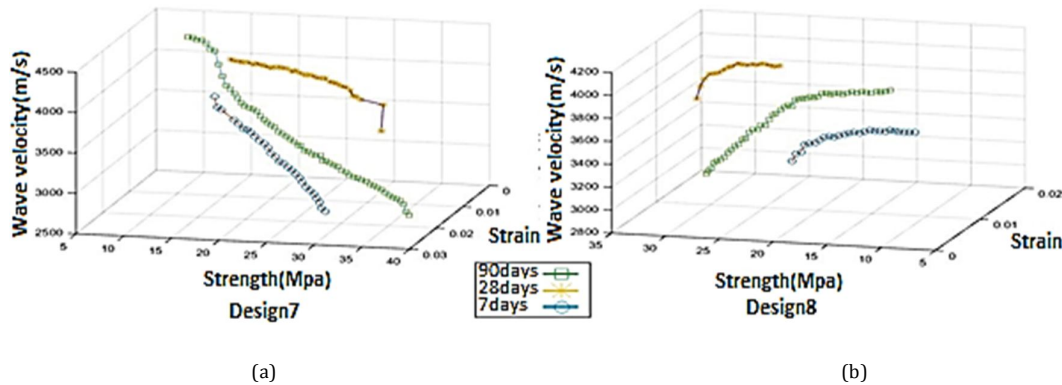


Fig. 3. Ultrasonic wave velocity vs. strength and strain: a) Design 7, b) Design 8

4. Conclusions

Results show that the smoothing trend of the curve arc is relatively followed by a constant path up to a w/c ratio of 0.42 for mix 7. This trend is further intensified for mix 8 (w/c=0.44) by a change in the slope of the non-linear curve. Changes in wave velocity are decreased with age increase, which is highest for 90 days. The results for all mixes in the three-dimensional diagrams indicate a higher correlation coefficient between strength and wave velocity. Finally, a high correlation wave velocity prediction relationship among parameters has been extracted separately for different mixes at various ages.

5. References

Reinhardt HW, Grosse CU, "Continuous monitoring of setting and hardening of mortar and concrete", Construction and building materials, 2004, 18 (3), 145-154.
 ASTM C 33-03, "Standard Specification for Concrete Aggregates", ASTM, USA, 2003.
 ACI 211.1-91, "Standard Practice for Selecting Proportions for Normal", Heavyweight, and Mass Concrete, ACI, USA, 2002.
 BS 1881: Part 203, "Measurement of velocity of Ultrasonic pulses in concrete", BSI, UK, 1986.