Archive of SID

PGICSC۱٤, ۱st Persian Gulf International Conference
on Sustainable Concrete ۱۷-۱۸
December ۲۰۱٤, Bandar Abbas

بررسی ارتباط سرعت امواج آلتراسونیک با مقاومت فشاری بتن به وسیله‌ی مقایسه‌ی طرح اختلاط‌های مختلف

محمدرضا محمدی‌زاده[۱]، فائزه السادات خادمی[۲]، سیدمحمدمهدی جمال[۳*]، رضا ترکمندی[۴]

۱-استادیار گروه عمران دانشگاه هرمزگان(mrzmohammadizadeh@yahoo.com)
۲-دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی سازه Illinois Institute of Technology (faezehossadat_khademi@yahoo.com)
۳-دانشجوی کارشناسی‌ارشد مهندسی سازه‌های دریایی دانشگاه هرمزگان(sayedmohammadmehdi_jamal@yahoo.com)
۴-کارشناسی ارشد مهندسی سازه‌های هیدرولیکی، دانشگاه هرمزگان(hamed.torkamandi@gmail.com)

چکیده

امروزه دستیابی به مقاومت فشاری بتن یکی از چالشهای اساسی تحقیقات دانشمندان بوده است. در این میان روش‌های مختلفی برای تعیین مقاومت فشاری بتن معرفی شده‌اند،که آزمایش سرعت امواج التراسونیک یکی از مهمترین روش‌ها در ارزیابی مقاومت فشاری بتن به شمار می‌رود. هدف از این تحقیق بررسی رابطه‌ی میان سرعت امواج التراسونیک و مقاومت فشاری بتن می‌باشد. در این مقاله، ابتدا تعداد ۹۰ نمونه‌ی بتنی برای طرح اختلاط‌های مختلف در آزمایشگاه ساخته شد وسپس سرعت امواج التراسونیک و مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن برای طرح اختلاط‌های مختلف بتن مورد ارزیابی قرار گرفت. همچنین این آزمایش به بررسی تاثیر نسبت‌های اختلاط بر روی سرعت‌های امواج پرداخته است. نتایج نشان می‌دهد که افزایش نسبت آب به سیمان منجر به کاهش سرعت امواج التراسونیک می‌گردد در حالیکه با افزایش نسبت سنگدانه ریز به درشت و نیز افزایش سن بتن سرعت امواج التراسونیک افزایش می‌یابد، همچنین با افزایش مقاومت فشاری بتن، سرعت امواج التراسونیک افزایش می‌یابد.

کلمات کلیدی: بتن، مقاومت فشاری، سرعت امواج التراسونیک، طرح اختلاط بتن

www.SID.ir

Archive of SID

مقدمه

بتن از اجزای مختلفی تشکیل شده است که خواص و ویژگی های بتن کاملاً مربوط به این اجزا است (مدندوست و همکاران، ۱۳۸۹). پارامترهای تشکیل دهنده ی بتن عبارت است از آب، سیمان، سنگدانه، و مواد افزاینده که هر کدام به طور جداگانه می تواند تاثیر به سزایی در بهبود ویژگی های مخلوط بتنی مورد نظر داشته باشد. یکی از این ویژگی ها مقاومت فشاری بتن می باشد.

دستیابی به مقاومت فشاری بتن، بدون آسیب رساندن نمونه ی بتنی همواره از دغدغه های اصلی دانشمندان بوده است. روش های متعددی نیز در این زمینه بیان شده است(Facaoaru, ۱۹۷۰; Gaydecki et al, ۱۹۹۲; Bogas et al, ۲۰۱۳). یکی از روش هایی که امروزه مورد توجه بسیاری از محققین قرار گرفته است، روش امواج آلتراسونیک می باشد. مطابق با این روش، با اندازه گیری سرعت امواج آلتراسونیک نمونه های بتنی مورد نظر و داشتن رابطه ی میان آن ها، می توان به مقاومت فشاری نمونه های بتنی مورد نظر بدون تخریب آن ها دست یافت.

لازم به ذکر است که فرمول مشخصی برای تعیین مقاومت فشاری بتن بر حسب سرعت امواج آلتراسونیک وجود ندارد. در حالت کلی، یک رابطه نمایی به فرم ۱ بین سرعت امواج آلتراسونیک و مقاومت فشاری بتن وجود دارد که بسته به طرح های اختلاط مختلف، ثابت های این فرمول نیز متفاوت خواهند بود. بنابراین با وجود اینکه نمی توان یک فرمول کلی برای همه ی طرح اختلاط های موجود در علم بتن یافت، ولی می توان برای هر طرح اختلاط مشخص، فرمولی را به صورت رابطه ی نمایی تخمین زد.

$$F_c = Ae^{BV} \qquad (۱)$$

مطابق با فرمول ۱، A و B ثابت های فرمول هستند که وابسته به طرح اختلاط انتخاب شده هستند. به این معنی که با تغییر طرح اختلاط، این اعداد نیز تغییر می کنند. بنا به این رابطه V سرعت امواج آلتراسونیک و Fc مقاومت فشاری بتن است.

سرعت امواج آلتراسونیک به عوامل مختلفی از جمله سن بتن، مواد افزاینده، نسبت آب به سیمان، نوع و کیفیت سیمان، میزان سنگدانه به کار رفته در بتن، سایز سنگدانه به کار رفته در بتن، و ... بستگی دارد. از آن جایی که آب همواره به عنوان کم هزینه ترین پارامتر تشکیل دهنده ی طرح اختلاط بتن، در بسیاری از مطالعات مورد توجه محققین قرار گرفته است. آگاهی داشتن به میزان مصرف آب برای رسیدن به سرعت امواج آلتراسونیک مطلوب، می تواند تاثیر به سزایی در کاهش هزینه ها داشته باشد.

سنگدانه حدود ۷۵ درصد از حجم بتن را به خود اختصاص می دهد، لذا تاثیر سایز و میزان سنگدانه های مورد استفاده در نمونه های بتنی سرعت امواج آلتراسونیک از جمله عواملی است که مورد توجه بسیاری از متخصصین قرار گرفته است.

لذا از آن جایی که نسبت آب به سیمان از عوامل موثر بر سرعت امواج آلتراسونیک به شمار می رود، در این تحقیق ابتدا به بررسی تاثیر نسبت آب به سیمان بر روی سرعت امواج آلتراسونیک پرداخته شده است. سپس به بررسی تاثیر سایز سنگدانه ها بر سرعت امواج آلتراسونیک آن پرداخته شده است . در انتها نیز رابطه ی میان مقاومت فشاری با سرعت امواج آلتراسونیک های بدست آمده مورد مطالعه قرار گرفته است و ثابت های فرمول (۱) برای این محدوده از طرح اختلاط های بتن، تخمین زده شده است.

www.SID.ir

Archive of SID

۲. روش آزمایش

۲-۱. تعیین طرح اختلاط بتن

طرح اختلاط بتن به این معنا است که نسبت های پارامترهای تشکیل دهنده ی بتن به گونه ای انتخاب شود که بتن تهیه شده، ویژگی های فیزیکی و مکانیکی مورد نظر از جمله مقاومت فشاری و سرعت امواج آلتراسونیک را که در این تحقیق مورد بررسی هستند را داشته باشد. بتن می تواند حاوی مواد افزاینده باشد. مواد افزاینده گونه های مختلفی دارند که کاربردهای متفاوتی نیز در صنعت بتن دارند. در این تحقیق از میکروسیلیس که یک ماده ی پوزولانی است، به عنوان ماده ی افزاینده استفاده شده است. کاربرد میکروسیلیس در بتن، عموماً به منظور افزایش مقاومت فشاری بتن می باشد.

در این آزمایش، پارامترهای تشکیل دهنده ی بتن شامل آب، سیمان، میکروسیلیس، شن، و ماسه بودند که دامنه ی تغییرات آن ها برحسب جرم در جدول زیر درج گردیده است. (جدول ۱)

جدول ۱- چگالی و دامنه ی تغییرات پارامترهای تشکیل دهنده ی درصدهای اختلاط

پارامترهای درصد اختلاط	دامنه ی تغییرات جرم(Kg/m۳)
آب	۱۵۰ الی ۲۰۰
سیمان	۲۰۰ الی ۴۰۰
میکروسیلیس	۴ الی ۶۰
شن	۱۰۰۰ الی ۱۱۵۰
ماسه	۶۰۰ الی ۹۰۰

۲-۲. آماده سازی نمونه ها

قالب استفاده شده در این آزمایش برای تمامی نمونه ها، قالب مکعبی (۱۵*۱۵*۱۵) سانتی متر بود. علت استفاده از قالب یکسان برای تمامی نمونه ها این است که شرایط آزمایش برای تمامی نمونه ها یکسان باشد که این امر منجر به بالا بردن دقت آزمایش می شود.

روش ساخت نمونه ها به این ترتیب است که ابتدا تراک میکسر را روشن کرده، سپس سیمان و آب را به صورت متوالی در آن ریخته و پس از آن میکروسیلیس، شن و ماسه به آن اضافه شد. به منظور همگن کردن مخلوط ساخته شده و ترکیب یکنواخت مواد با یکدیگر، تراک میکسر به مدّت ۲ دقیقه روشن بود.

www.SID.ir

Archive of SID

پس از آماده کردن مخلوط بتن در تراک میکسر، نوبت به ریختن بتن در قالب ها می رسد. در این مرحله، بتن ها باید در سه لایه در قالب بتنی ریخته و کوبیده شود. علّت سه لایه بودن این است که اگر بتن در یک لایه ریخته و سپس کوبیده شود، تراکم و مقاومت لازم را پیدا نکرده و حتی ممکن است پس از باز کردن قالب ها نمونه ی بتنی فرو ریخته و واژگون شود.

۲-۳. قرار دادن نمونه ها در حوضچه ی آب سرد

پس از قرار دادن آن ها به مدت ۲۴ ساعت در قالب، آن ها را از قالب بیرون آورده و مطابق شکل ۱ در حوضچه ی آب سرد قرار می دهیم. هدف از این تحقیق، ارزیابی سرعت امواج آلتراسونیک و مقاومت فشاری نمونه های بتنی بعد از ۲۸ روز است. لذا نمونه های بتنی به مدّت ۲۸ روز در حوضچه ی آب سرد قرار می گیرند تا برای هدف مذکور آماده شوند. لازم به ذکر است که در مدّت این ۲۸ روز باید مراقبت های لازم از نمونه های بتنی به عمل آید. از جمله این که دمای آب در این مدت باید ثابت نگه داشته شود. همچنین از آن جایی که نمونه های بتنی حاوی املاح و نمک هستند، این املاح و نمک ها وارد آب شده و باعث کاهش کیفیت آب می شود، لذا لازم است آب موجود در حوضچه ی آب سرد هر چند روز یک بار تعویض شود. این کار باعث کمک به بالا بردن دقت آزمایش می شود. (شکل ۱)

شکل ۱- نمونه های بتنی در حوضچه آب سرد

۲-۴. تست اندازه گیری سرعت امواج آلتراسونیک بتن

برای بالا بردن دقت در اندازه گیری سرعت امواج آلتراسونیک از وازلین جامد به عنوان رابط بین مبدل و بتن استفاده گردید.[۵] روش کار به این صورت است که ابتدا دستگاه اندازه گیری سرعت امواج آلتراسونیک مطابق شکل ۲ که قادر به نشان دادن اعداد به صورت دیجیتالی می باشد تهیه گردید. سپس بر روی دو سطح مخالف از نمونه ی مکعّبی که برای قرار دادن سنسورها روی آن درنظر گرفته شدند، وازلین زده شد. این کار برای صیقلی کردن سطح نمونه ی بتنی و به منظور بالا بردن دقت آزمایش انجام می شود. سپس دو سنسور مورد نظر بر روی این دو سطح قرار گرفته و پس از ثابت شدن عدد بر روی صفحه ی نمایشگر دیجیتال، عدد مشاهده شده به عنوان زمان انتقال موج آلتراسونیک ثبت می شود. سپس با داشتن بعد نمونه ی مکعبی برابر ۱۵ سانتی متر، سرعت امواج آلتراسونیک بدست می آید. سرعت امواج آلتراسونیک برای تمامی نمونه ها در روز ۲۸ ام اندازه گیری شد. در مقایسه با نتایج

www.SID.ir

Archive of SID

تحقیقات دیگر محققین در این رابطه، سرعت امواج بدست آمده در این مطالعه نیز مقداری کمتر از km/s ۶ داشت(Lee, ۲۰۰۴; Hwang & Sheen, ۱۹۹۱; Ye et al, ۲۰۰۴) (شکل ۲).

شکل ۲- دستگاه اندازه گیری سرعت امواج آلتراسونیک

همواره باید به این نکته توجّه شود که تست اندازه گیری سرعت امواج آلتراسونیک قبل از تست اندازه گیری مقاومت فشاری بتن انجام شود. زیرا با انجام تست مقاومت فشاری، نمونه ی بتنی تخریب می شود و دیگر قابل استفاده برای موارد دیگر نیست.

۲-۴. تست اندازه گیری مقاومت فشاری بتن

در آخرین مرحله از آزمایش، نمونه های بتنی به طور جداگانه زیر دستگاه اندازه گیری مقاومت فشاری قرار می گیرند. این دستگاه حاوی دو جک عمودی می باشد که نمونه های بتنی بین این دو جک قرار می گیرند. سپس دستگاه را روشن کرده و این دو جک آن قدر به هم نزدیک می شوند تا نمونه ی بتنی ترک بخورد. به محض مشاهده ی اولین ترک ها، دستگاه خاموش کرده و عدد مشاهده شده در صفحه ی نمایش به عنوان مقاومت فشاری بتن داخل دستگاه ثبت می شود. شکل ۳ دستگاه اندازه گیری مقاومت فشاری را نشان می دهد (شکل ۳).

شکل ۳- دستگاه اندازه گیری مقاومت فشاری بتن

www.SID.ir

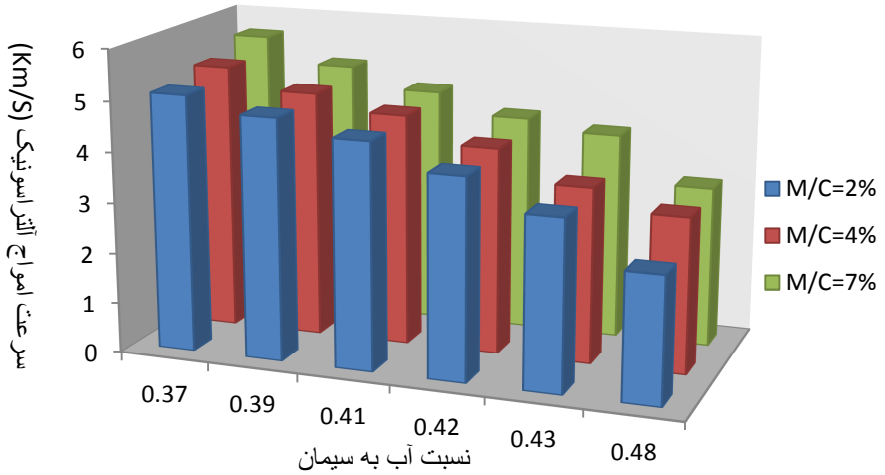
Archive of SID

۳. نتیجه گیری و بحث

در ادامه، ابتدا به بررسی تاثیر نسبت آب به سیمان بر سرعت امواج آلتراسونیک و تاثیر سنگدانه بر سرعت امواج آلتراسونیک بتن پرداخته شده است و سپس رابطه ی میان سرعت امواج آلتراسونیک بتن و مقاومت فشاری بتن مورد مطالعه قرار گرفته است.

۳-۱. تاثیر نسبت آب به سیمان بر سرعت امواج آلتراسونیک بتن

مطابق با شکل ۴، تاثیر نسبت آب به سیمان بر روی سرعت امواج آلتراسونیک، برای سه نسبت مختلف میکروسیلیس به سیمان نشان داده شده است. (شکل ۴)



شکل ۴- نمودار تاثیرنسبت آب به سیمان بر روی سرعت امواج آلتراسونیک بتن برای نسبت میکروسیلیس به سیمان های مختلف

همان طور که از شکل نیز پیداست، سرعت امواج آلتراسونیک با افزایش نسبت آب به سیمان کاهش می یابد. علّت این امر می تواند این باشد که با افزایش نسبت آب به سیمان، میکروترک ها و حجم منافذ موئینگی در خمیر سیمان افزایش می یابد(Carino,

www.SID.ir

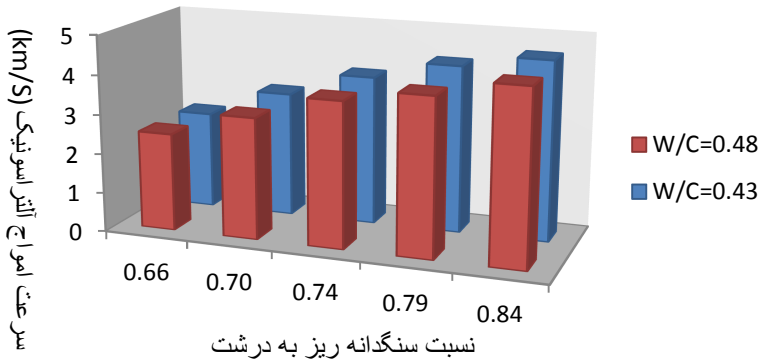
Archive of SID

۱۹۹۴). لذا با افزایش میکروترک ها و حجم منافذ موئینگی، توانایی بتن در انتقال امواج آلتراسونیک کاهش می یابد و لذا منجر به کاهش سرعت امواج آلتراسونیک می شود.

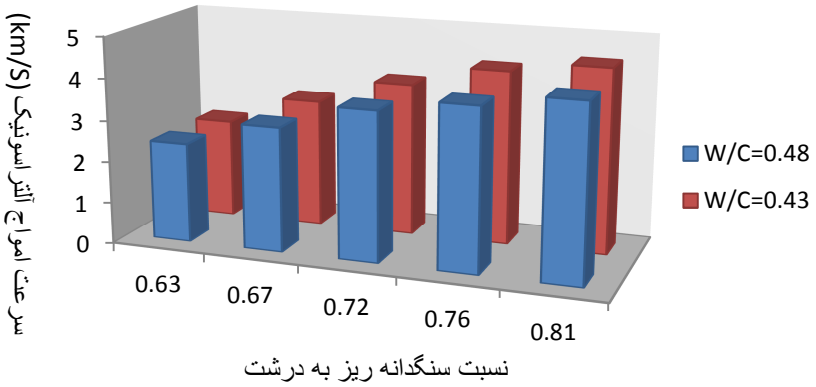
از طرف دیگر، با نگاه دقیق تر به نمودار این نکته برداشت می شود که میکروسیلیس نیز نقش موثری در تاثیرگذاری بر سرعت امواج آلتراسونیک ایفا می کند. مطابق با شکل ۱، با افزایش میزان نسبت میکروسیلیس به سیمان، سرعت امواج آلتراسونیک افزایش می یابد. لذا افزایش میزان میکروسیلیس موجب افزایش سرعت امواج آلتراسونیک در بتن می شود. علّت این امر می تواند این گونه بیان شود که افزایش میزان میکروسیلیس، سبب استحکام بافت بتنی و تراکم بیشتر نمونه ی بتنی شده، لذا مواد سازنده ی بتن با فاصله ی کمتری از یکدیگر قرار گرفته اند و لذا فضای خالی میان این مواد کاهش می یابد. کاهش این فضای خالی سبب بالا رفتن توانایی بتن در انتقال امواج آلتراسونیک و در نتیجه افزایش سرعت امواج آلتراسونیک بتن می شود.

۳-۲. تاثیر سایز سنگدانه بر سرعت امواج آلتراسونیک بتن

شکل های ۵، ۶، و ۷ نشان دهنده ی تاثیر سایز سنگدانه ها بر سرعت امواج آلتراسونیک بتن برای سه نسبت مختلف میکروسیلیس به سیمان ۲، ۴، و ۷ درصد و همچنین برای دو نسبت مختلف آب به سیمان ۰.۴۳ و ۰.۴۸ هستند.



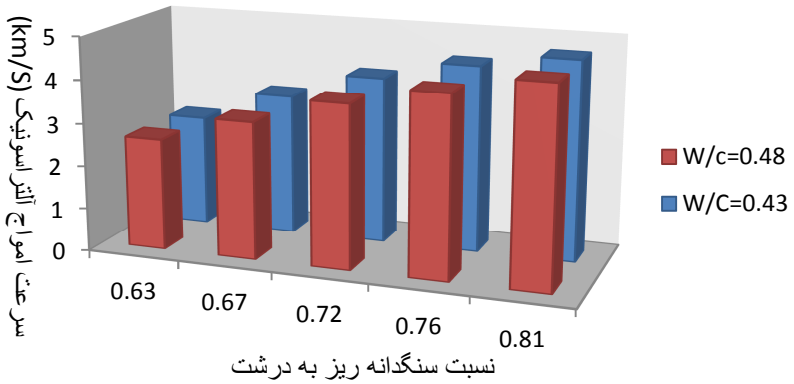
شکل ۵- نمودار تاثیرنسبت سنگدانه ریز به درشت بر روی سرعت امواج آلتراسونیک بتن برای نسبت میکروسیلیس به سیمان ۲ درصد



www.SID.ir

Archive of SID

شکل ۶- نمودار تاثیرنسبت سنگدانه ریز به درشت بر روی سرعت امواج آلتراسونیک بتن برای نسبت میکروسیلیس به سیمان ۴ درصد



شکل ۷- نمودار تاثیرنسبت سنگدانه ریز به درشت بر روی سرعت امواج آلتراسونیک بتن برای نسبت میکروسیلیس به سیمان ۷ درصد

با توجه به شکل های ۵، ۶، و ۷ مشاهده می شود که با افزایش نسبت سنگدانه ریز به درشت، سرعت امواج آلتراسونیک در بتن افزایش می یابد. به عبارت دیگر بین سایز سنگدانه با سرعت امواج آلتراسونیک بتن، رابطه ی عکس وجود دارد. علّت این امر این است که سنگدانه های بزرگتر، سبب ایجاد حفره ها و منافذ موئینگی بیشتری در ناحیه ی انتقال می شوند که سبب کاهش توانایی بتن در انتقال سرعت امواج آلتراسونیک می شود.

همچنین با نگاه دقیق تر به شکل ها، همانطور که در قسمت قبل نیز ذکر شد، این نکته بدست می آید که با افزایش نسبت آب به سیمان، سرعت امواج آلتراسونیک کاهش می یابد.

مقایسه ی شکل های ۵، ۶، و ۷ با یکدیگر، تاثیر میکروسیلیس را نیز مشخص می سازد. همانطور که از شکل ها پیداست، تاثیر میزان میکروسیلیس به سیمان در نمونه ی مشابه بتنی، سبب افزایش سرعت امواج آلتراسونیک می شود.

۳-۳. رابطه ی سرعت امواج آلتراسونیک و مقاومت فشاری بتن

با توجه به گسترش روز افزون استفاده از سازه های بتنی در ساختمان سازی ، لازم است پارامترهای سازه ای این ماده مورد بررسی بگیرند. با لازم به ذکر است از سال ۱۹۷۰ میلادی تا کنون روش های مختلفی به منظور تخمین مقاومت بتن ارائه شده است ولی

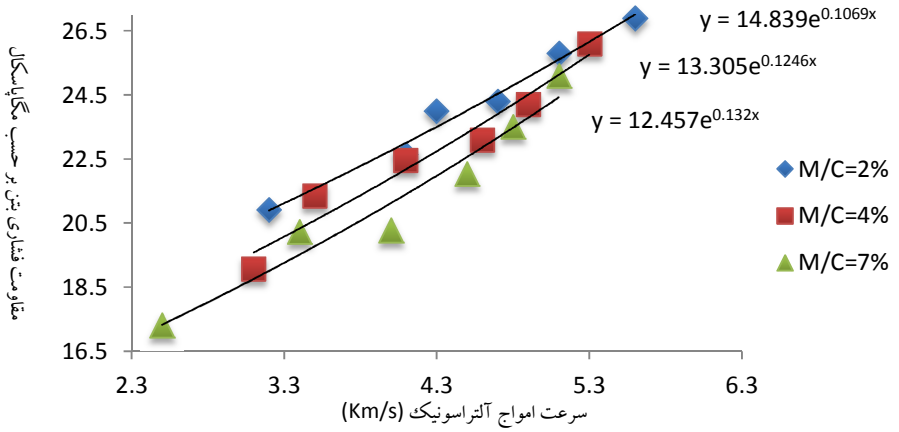
www.SID.ir

Archive of SID

هریک از این روش ها از محدودیت ها یی برخوردار ند که این محدودیت ها موجب گردید از اوایل حدود سال ۱۹۹۵ میلادی، با پیشرفت های چشمگیر بوجود آمده در تعیین سرعت موج مافوق صوت در اجسام، دانشمندان بر آن شدند با استفاده از تعیین سرعت موج در بتن ، رابطه ای میان مقاومت و دیگر مشخصه های بتن بر قرار نمایند (فرخ نژاد و جلیلوند، ۱۳۹۱). در این مطالعه سعی بر آن است با استفاده از روش دقیق تعیین مقاومت بتن با استفاده از نمونه های مکعبی ، ارتباط مشخصی میان روش مذکور با روش التراسونیک بتن بدست آورده شود.

۳-۳-۱. رابطه ی سرعت امواج آلتراسونیک و مقاومت فشاری بتن با توجه به تغییرات نسبت آب به سیمان

مطابق با شکل ۸، رابطه ی سرعت امواج آلتراسونیک با مقاومت فشاری ۲۸ روزه ی نمونه ها بر اساس تغییرات نسبت آب به سیمان نشان داده شده است. مطابق با این شکل، نتایج برای سه نسبت میکروسیلیس به سیمان ۲، ۴، و ۷ درصد رسم شده اند. در تمامی این نمودارها، بین سرعت امواج آلتراسونیک و مقاومت فشاری بتن یک رابطه ی صعودی بر قرار است. به علاوه، همانطور که قبلا گفته شد بین این دو پارامتر یک رابطه نمایی به فرم ۱ وجود دارد که ثابت های این رابطه بسته به طرح های اختلاط متفاوت هستند. مطابق با شکل ۸، یک رابطه ی نمایی برای این محدوده مشخص از تغییرات پارامتر ها ارائه شده است.(شکل ۸)



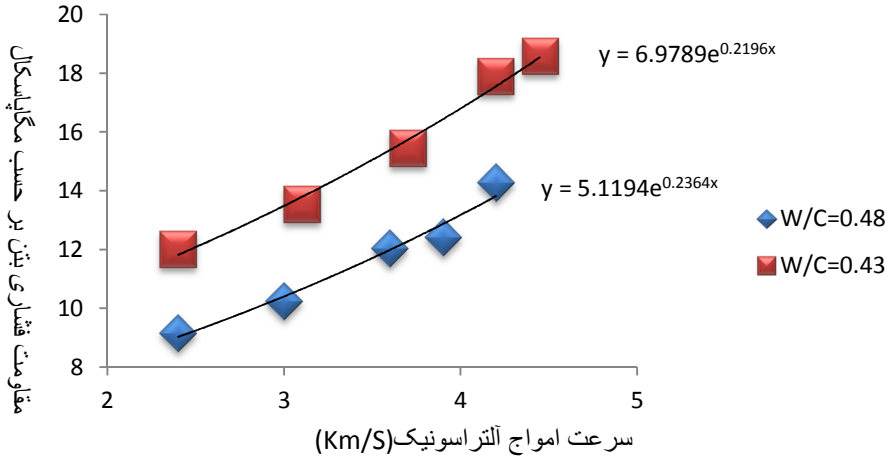
شکل ۸- نمودار رابطه ی سرعت امواج آلتراسونیک با مقاومت فشاری ۲۸ روزه ی بتن با در نظر گرفتن تغییرات نسبت آب به سیمان

۳-۳-۲. رابطه ی سرعت امواج آلتراسونیک و مقاومت فشاری بتن با توجه به سایز سنگدانه

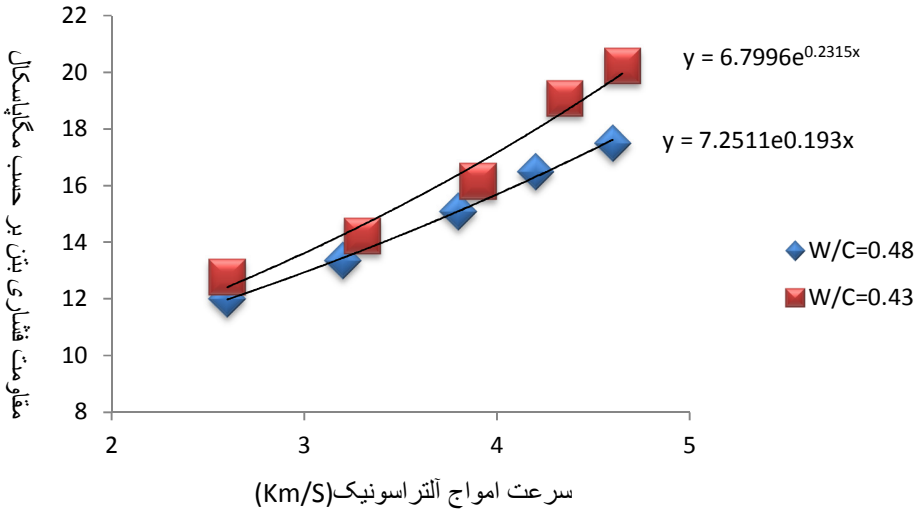
www.SID.ir

Archive of SID

شکل های ۹، ۱۰، و ۱۱، نشان دهنده ی رابطه ی سرعت امواج آلتراسونیک و مقاومت فشاری ۲۸ روزه ی بتن بر حسب تغییرات سایز سنگدانه برای سه نسبت مختلف میکروسیلیس به سیمان و دو نسبت مختلف آب به سیمان هستند. همانطور که پیداست، یک رابطه ی صعودی میان سرعت امواج آلتراسونیک و مقاومت فشاری بتن برای تمام حالت ها وجود دارد. همچنین رابطه هایی به صورت نمایی برای هر دسته از نمودارهای رسم شده ارائه شده است. ثابت های این رابطه های نمایی، بسته به محدوده های طرح اختلاط متفاوت هستند. همان طور که گفته شد نمی شود یک فرمول کلی برای رابطه ی سرعت امواج آلتراسونیک و مقاومت فشاری بتن همه ی طرح اختلاط ها بیان کرد، اما می توان با دسته بندی طرح اختلاط های مشابه، یک رابطه ی نمایی برای هر کدام از دسته ها تقریب زد.



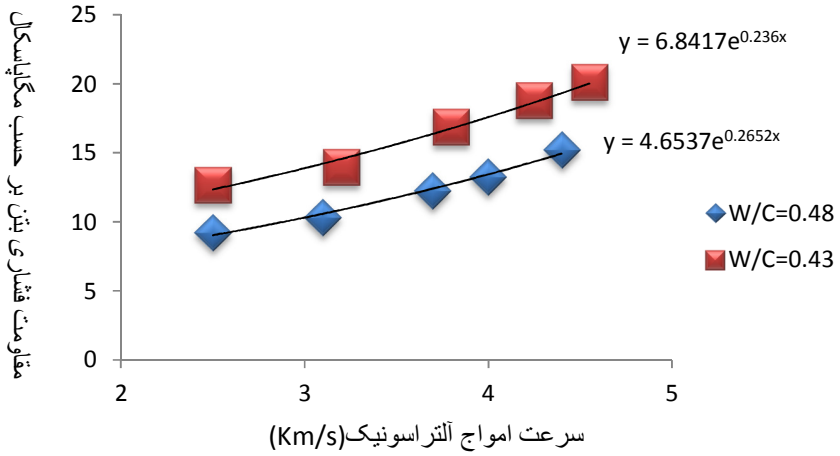
شکل ۹- نمودار رابطه سرعت امواج آلتراسونیک و مقاومت فشاری بتن برای نسبت میکروسیلیس به سیمان ۲ درصد با در نظر گرفتن تغییرات سایز سنگدانه



شکل ۱۰- نمودار رابطه سرعت امواج آلتراسونیک و مقاومت فشاری بتن برای نسبت میکروسیلیس به سیمان ۴ درصد با در نظر گرفتن تغییرات سایز سنگدانه

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۱۱- نمودار رابطه سرعت امواج آلتراسونیک و مقاومت فشاری بتن برای نسبت میکروسیلیس به سیمان ۷ درصد با در نظر گرفتن تغییرات سایز سنگدانه

با نگاه دقیق تر به شکل ها این نکته بر داشت می شود که افزایش میزان میکروسیلیس سبب افزایش سرعت امواج آلتراسونیک و در نتیجه افزایش مقاومت فشاری بتن می شود. همچنین در شکل هایی که میزان میکروسیلیس به سیمان آن ها ثابت است، افزایش میزان آب به سیمان، سبب کاهش سرعت امواج آلتراسونیک و مقاومت فشاری بتن شده است.

نتایج

هدف از این تحقیق بررسی تغییرات نسبت آب به سیمان و همچنین تغییرات سایز سنگدانه بر سرعت امواج آلتراسونیک و مقاومت فشاری بتن بود. همچنین بررسی رابطه ی سرعت امواج آلتراسونیک با مقاومت فشاری بتن، از دیگر عوامل این تحقیق محسوب می شود. همان طور که نشان داده شد با افزایش نسبت آب به سیمان سرعت امواج آلتراسونیک در بتن کاهش می یابد. از آنجایی که یک رابطه ی صعودی میان سرعت امواج آلتراسونیک و مقاومت فشاری بتن وجود دارد، با افزایش نسبت آب به سیمان، مقاومت فشاری بتن

www.SID.ir

Archive of SID

نیز کاهش می یابد. به عبارت دیگر میان نسبت آب به سیمان با سرعت امواج آلتراسونیک و مقاومت فشاری بتن یک رابطه ی عکس وجود دارد.

همچنین تاثیر سایز سنگدانه بر سرعت امواج آلتراسونیک و مقاومت فشاری بتن مورد بررسی قرار گرفت. همان طور که نشان داده شد، با کاهش قطر سنگدانه سرعت امواج آلتراسونیک و در نتیجه مقاومت فشاری بتن افزایش می یابد. این امر می تواند به این دلیل باشد که دانه های ریز تر باعث پر شدن فضای خالی میان اجزای تشکیل دهنده ی بتن می شوند و در نتیجه توانایی بتن را در انتقال امواج افزایش می دهند. از آن جایی که میان سرعت امواجآلتراسونیک و مقاومت فشاری بتن یک رابطه ی صعودی وجود دارد، مقاومت فشاری بتن نیز با افزایش سرعت امواج آلتراسونیک افزایش می یابد.

در انتها نیز رابطه ی میان سرعت امواج آلتراسونیک و مقاومت فشاری بتن مورد بررسی قرار گرفت. نشان داده شد که یک رابطه ی نمایی میان این دو پارامتر بر قرار است که ثابت های این رابطه برای طرح اختلاط های مختلف متفاوت خواهند بود. لذا برای طرح اختلاط های درج شده در این مطالعه، مقدار این ثابت ها بدست آمد. بنابراین با داشتن هر طرح اختلاط دیگری در این محدوده، می توان با داشتن سرعت امواج آلتراسونیک آن طرح اختلاط، مقاومت فشاری ۲۸ روزه ی آن تخمین زده شود.

مراجع

فرخ نژاد رضا، جلیلوند محمد مهدی، (۱۳۹۱). ارزیابی مقاومت بتن به روش امواج مافوق صوت(آلتراسونیک) با استفاده از رگرسیون خطی چند متغیره و مقایسه میان روش های متعارف. اولین کنفرانس ملّی صنعت بتن، ایران.

مدندوست رحمت، شهابی سیده فاطمه، قویدل رضا،(۱۳۸۹). ارزیابی مراحل گیرش و تعیین مقاومت بتن در سنین اولیه با استفاده از روش التراسونیک. پنجمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد ، ایران.

Bogas, J. A., Gomes, M. G., & Gomes, A. (۲۰۱۳). Compressive strength evaluation of structural lightweight concrete by non-destructive ultrasonic pulse velocity method. *Ultrasonics*, ٥۳(٥), ۹٦۲-۹۷۲.

Carino, N. J. (۱۹۹٤). Nondestructive testing of concrete: History and challenges. *ACI Special Publication*, ۱٤٤.

Facaoaru I. (۱۹۷۰). Non-destructive testing of concrete in Romania. Symposium on NDT of concrete and timber. London: Institute of Civil Engineers; p. ۳۹.

Gaydecki P, Burdekin F, Damaj W, John D, Payne P,(۱۹۹۲). The propagation and attenuation of mediumfrequency ultrasonicwaves in concrete, a signal analytical approach. Meas Sci Technol; ۳:۱۲٦–۳۳.

Hwang, C. L., & Shen, D. H. (۱۹۹۱). The effects of blast-furnace slag and fly ash on the hydration of Portland cement. *Cement and concrete research*, ۲۱(٤), ٤۱۰-٤۲٥.

www.SID.ir

Archive of SID

Lee, H. K., Lee, K. M., Kim, Y. H., Yim, H., & Bae, D. B. (٢٠٠٤). Ultrasonic in-situ monitoring of setting process of high-performance concrete. *Cement and Concrete Research*, ٣٤(٤), ٦٣١-٦٤٠.

Malhotra, V. M. (١٩٨٦). *Testing Hardened Concrete: Nondestructive Methods. ACI Monograph nº ٩*. The Iowa State University Press.

Ye, G., Lura, P., Van Breugel, K., & Fraaij, A. L. A. (٢٠٠٤). Study on the development of the microstructure in cement-based materials by means of numerical simulation and ultrasonic pulse velocity measurement. *Cement and Concrete Composites*, ٢٦(٥), ٤٩١-٤٩٧.

www.SID.ir