

ارزیابی مراحل گیرش بتن تازه حاوی خاکستر پوسته شلتوک برنج با استفاده از روش اولتراسونیک

رحمت مدندوست^{۱*} و سیده فاطمه شهبابی^۲

^۱ دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه گیلان

^۲ کارشناس ارشد سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه گیلان

چکیده

گیرش از خواص مهم بتن تازه در سنین اولیه محسوب می‌شود که بر رفتار آن در دراز مدت اثر می‌گذارد. آزمایش‌های استاندارد تعیین زمان گیرش، تنها بر روی خمیر سیمان و ملات قابل انجام هستند و مستقیماً روی بتن انجام نمی‌شوند. در این مطالعه از روش اولتراسونیک در ارزیابی مراحل گیرش بتن‌های معمولی و همچنین بتن‌های حاوی خاکستر پوسته شلتوک برنج (۵-۲۰ درصد) در نسبت‌های مختلف آب به مواد سیمانی (۰/۴، ۰/۵ و ۰/۶) استفاده شده است. نتایج به دست آمده نشان داده‌اند که روش اولتراسونیک برخلاف روش‌های موجود تصویر کاملی از مراحل گیرش بتن ارائه می‌دهد. در طی مراحل گیرش بتن، منحنی‌های سرعت امواج اولتراسونیک-زمان برای همه ترکیبات مشابه بوده و شامل سه مرحله کلی می‌باشند. در مرحله اول که دوره غیر فعال نامیده می‌شود، سرعت بسیار ناچیز و تقریباً ثابت است. در مرحله دوم با افزایش محصولات هیدراتاسیون و افزایش حجم مواد جامد، سرعت به طور ناگهانی افزایش می‌یابد و پس از چند ساعت با آغاز مرحله سوم و با پیدایش شبکه جامد به هم پیوسته، روند افزایش سرعت کاهش می‌یابد. افزایش نسبت آب به سیمان و خاکستر پوسته شلتوک برنج روند فرایند هیدراتاسیون و تشکیل ریزساختار بتن را با تأخیر همراه می‌سازد. همچنین با بررسی نتایج آزمایش مقاومت نفوذ انجام شده بر روی نمونه‌ها به نظر می‌رسد که می‌توان ارتباط مناسبی بین نتایج آزمایش اولتراسونیک و مقاومت نفوذ در تعیین زمان گیرش بتن پیدا نمود.

واژگان کلیدی: بتن، گیرش، اولتراسونیک، مقاومت نفوذ، خاکستر پوسته شلتوک برنج.

۱- مقدمه

سطحی و زمان باز کردن قالب‌ها جستجو نمود. همچنین اطلاعاتی از این دست جهت تصمیم‌گیری در خصوص استفاده و یا عدم استفاده از افزودنی‌های تندگیر کننده و یا کندگیر کننده بسیار ضروری است. روش‌های مختلفی در استانداردها از جمله آزمایش سوزن ویکات (ASTM C191) [۲] و آزمایش مقاومت در برابر نفوذ میله (ASTM C403) [۳] برای بررسی گیرش مواد سیمانی پیشنهاد شده است. اما این روش‌ها مختص سیمان و ملات بوده و مستقیماً روی بتن قابل انجام نیستند و نیز به دلیل محدودیت‌هایی که دارند برای توصیف مراحل گیرش کاربردی نخواهند بود. محدودیت‌های عمده این روش‌ها را می‌توان به شرح زیر بر شمرد:

- آزمایش سوزن ویکات تنها بر روی خمیر سیمان و در نسبت آب به سیمان پایین قابل انجام است. در حالی که نسبت آب به سیمان فاکتور مهمی در روند سخت شدن سیمان می‌باشد.
- آزمایش مقاومت نفوذ صرفاً بر روی ملات انجام می‌شود. در آزمایش مقاومت نفوذ، مقادیری که به عنوان مقاومت نفوذ

توسعه ساختار میکروسکوپی بتن از مهم‌ترین مشخصه‌های آن در سنین اولیه به شمار می‌رود که مستقیماً در ارزیابی خواص فیزیکی، مکانیکی و دوام آن تاثیرگذار است [۱]. توسعه مقاومت بتن عمدتاً طی واکنش‌های شیمیایی که هیدراتاسیون نامیده می‌شود، صورت می‌گیرد. از واکنش سیمان و آب، محصول اصلی واکنش هیدراتاسیون که ژل سیمان است ایجاد می‌شود. در طول اولین ساعات پس از اختلاط، خواص بتن به طور محسوس تغییر می‌کند. در ابتدا مخلوط به حالت خمیری است که قابلیت شکل‌پذیری بالایی دارد. با گذشت زمان و با ادامه یافتن روند هیدراتاسیون بتن سفت شده و تغییر حالت تدریجی پیدا می‌کند. این پیشرفت تدریجی در سفت شدن بتن، که از خواص مهم بتن تازه محسوب می‌شود گیرش نامیده می‌شود. در عمل واژه گیرش به صورت گیرش اولیه و نهایی به کار می‌رود. آگاهی از زمان گیرش اولیه و نهایی بتن از لحاظ اجرایی بسیار حائز اهمیت می‌باشد. اهمیت آن را می‌توان در برنامه‌ریزی‌های مختلف عملیات اجرایی بتن از قبیل انتقال، قالب‌گیری، متراکم کردن، پرداخت

Voigt و همکاران آزمایش اولتراسونیک را به دو صورت انتقال امواج (امواج طولی) و بازتاب امواج (امواج برشی) برای مشاهده روند هیدراتاسیون به کار بردند [۸]. Zhang و همکاران ویژگی-های قالب ساخته شده توسط Reinhardt را به منظور ارزیابی تأثیر دماهای مختلف بر نتایج بهبود بخشیدند و به بررسی بتن-های حاوی مواد افزودنی مختلف شامل خاکستر بادی، سرباره کوره ذوب آهن و میکروسیلیس و همچنین تأثیر وجود الیاف فولادی پرداختند. نتایج نشان داد که افزودن میکروسیلیس و همچنین دماهای بالاتر نگهداری بتن به دلیل تسریع هیدراتاسیون روند تغییرات میکروسکوپی را افزایش می‌دهد. در حالی که استفاده از خاکستر بادی و سرباره کوره ذوب آهن عکس این نتیجه را به دنبال دارد. همچنین افزودن الیاف فولادی به ویژه در درصدهای بالاتر روند گیرش را با تأخیر بیشتری مواجه می‌کند [۱].

در این مطالعه، قالب مورد نیاز برای انجام آزمایش بر اساس سیستم Reinhardt و Grosse [۵] ساخته شده و از آن در ارزیابی مراحل گیرش بتن‌های مختلف به ویژه حاوی خاکستر پوسته شلتوک برنج استفاده شده است. به طور کلی نتایج حاصل از آزمایش قابل قبول و قابل مقایسه با نتایج سایر محققین بوده است. همچنین بر اساس نتایج این روش و نیز آزمایش مقاومت نفوذ ارتباط مناسبی برای تعیین زمان گیرش اولیه و نهایی از روی منحنی سرعت امواج-سن بتن پیشنهاد شده است. هر چند با توجه به گزارش‌های مختلفی که در خصوص تعیین این زمان از روی نمودارهای به دست آمده وجود دارد، بررسی‌های بیشتری مورد نیاز می‌باشد.

۲- برنامه آزمایشگاهی

۲-۱- مواد مصرفی

در تهیه نمونه‌ها از دو نوع سیمان پرتلند معمولی نوع ۱ و پرتلند پوزولانی حاوی ۱۵٪ پوزولان طبیعی محصول کارخانه سیمان خزر استفاده شده است. همچنین نمونه‌هایی حاوی درصدهای مختلف ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد خاکستر پوسته شلتوک برنج^۱ با جایگزینی وزنی سیمان تهیه شده است. خاکستر پوسته شلتوک برنج از منطقه شمال ایران تهیه شده که بیش از ۹۰ درصد وزن آن را سیلیس تشکیل می‌دهد. جهت تهیه آن، ابتدا پوسته شلتوک برنج در کوره آجری سوزانیده شده و سپس خاکستر باقی‌مانده در کوره برقی در درجه حرارت ۶۵۰ درجه

در زمان گیرش اولیه و نهایی در نظر گرفته می‌شوند، معیار مناسبی به شمار نمی‌آیند. چرا که این مقادیر صرف نظر از ترکیبات بتن، ثابت فرض شده‌اند و نمی‌توانند به خواص فیزیکی و تغییرات در ساختار میکروسکوپی مربوط شوند [۴].

• در هیچ یک از این روش‌ها امکان مشاهده پیوسته از روند هیدراتاسیون و توسعه مراحل گیرش وجود ندارد.

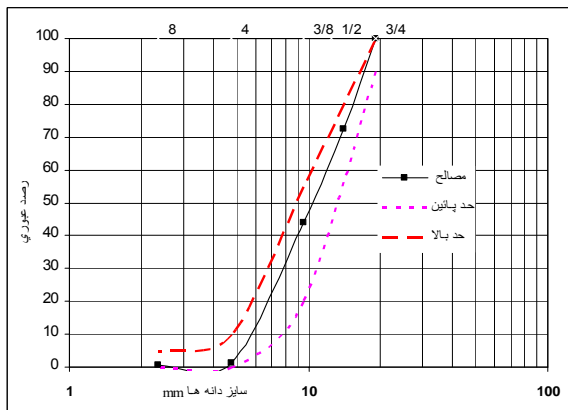
روش سرعت امواج اولتراسونیک از جمله روش‌های غیر مخرب به شمار می‌رود که بدون وارد آوردن آسیبی به بتن می‌تواند در زمینه ارزیابی خواص بتن به کار گرفته شود. در سال-های اخیر مطالعات انجام شده نشان داده است که از این روش می‌توان در تعیین زمان گیرش خمیر سیمان، ملات و همچنین بتن استفاده نمود. استفاده از روش اولتراسونیک با استفاده از قالب مخصوص موسوم به Freshcon که توسط پروفیسور Reinhardt در دانشگاه اشتوتگارت در سال ۲۰۰۰ ساخته شد، توجهات بسیاری را در جهان به خود جلب کرد. اولین مطالعات توسط Reinhardt و Grosse بر روی ملات و بتن انجام گرفت [۵]. به عقیده این محققان زمان گیرش اولیه متناظر با نقطه‌ای است که اولین افزایش خمیدگی در منحنی سرعت امواج-زمان به وجود می‌آید. با این حال زمان گیرش نهایی به دقت قابل تعیین نیست. اما آزمایشات تجربی نشان می‌دهند که برای ملات‌ها زمان نظیر سرعت 1500 m/s می‌تواند زمان گیرش نهایی تلقی شود. Lee و همکاران کاربرد این روش را برای تعیین زمان گیرش بتن توانمند مورد بررسی قرار دادند [۴]. بررسی آن‌ها نشان داد که سرعت امواج اولتراسونیک در بتن در ساعات اولیه شبیه ملات با همان نسبت آب به سیمان می‌باشد. ولی با گذشت زمان و با افزایش سرعت امواج، اختلاف بیشتر می‌شود. این اختلاف به دلیل وجود سنگدانه‌های درشت در بتن می‌باشد که منجر به پیدایش ساختار متراکم‌تری نسبت به ملات می‌گردد. چنین نتیجه‌ای در رابطه با ملات‌های معمولی و ملات-های حاوی خاکستر بادی در نسبت آب به سیمان یکسان دیده شده است. Robeyst و همکاران تأثیر سرباره کوره ذوب آهن را بر گیرش بتن به کمک امواج طولی بررسی کردند و دریافتند که با جایگزینی بیش از ۳۰٪ سیمان با سرباره ذوب آهن، سرعت امواج اولتراسونیک کاهش یافته و زمان گیرش به تأخیر می‌افتد [۶]. Trtnik و همکاران با استفاده از روش اولتراسونیک، تأثیر پارامترهای مختلف از جمله نوع سیمان، نسبت آب به سیمان، دما را بر زمان گیرش اولیه خمیر سیمان بررسی کردند [۷]. نتایج آن‌ها نشان داد که درجه حرارت بالا در ساعات اولیه منجر به افزایش سرعت شده ولی در پایان، تأثیر چندانی نداشته است.

استفاده شد. مصالح سنگی مصرفی از نوع ریزدانه و درشت‌دانه به ترتیب رودخانه‌ای و شکسته بوده که مشخصات فیزیکی آن در جدول (۲) ارائه شده است. همچنین منحنی‌های دانه‌بندی مصالح ریزدانه و درشت‌دانه با رعایت الزامات آیین‌نامه ASTM C33-03 [۹] در شکل (۱-الف) و (۱-ب) آورده شده است. مجموعاً ۱۵ نوع بتن با سیمان پرتلند نوع ۱ و ۳ نوع بتن با سیمان پرتلند پوزولانی برای نسبت آب به مواد سیمانی (سیمان + ماده پوزولانی) در محدوده ۰/۴-۰/۶ ساخته شده است. مقادیر مصالح مصرفی در هر متر مکعب بتن مطابق آیین‌نامه ACI 211.1-91 [۱۰] تعیین و در جدول (۳) خلاصه شده است.

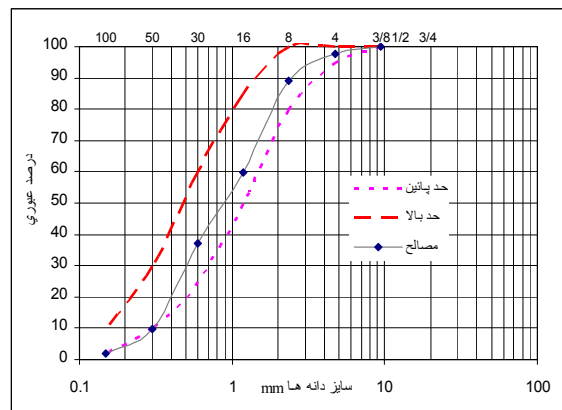
سانتی‌گراد سوزانده شده است. خاکستر به دست آمده از این مرحله در آسیاب بال‌میل آسیاب شده تا به نرمی و سطح مخصوص مناسبی برسد. جدول (۱) ترکیبات شیمیایی و مشخصات فیزیکی سیمان‌های مصرفی و خاکستر پوسته شلتوک برنج را نشان می‌دهد. از آن جایی که جایگزینی سیمان با خاکستر پوسته شلتوک برنج منجر به افزایش آب مورد نیاز در نمونه‌های بتنی به دلیل افزایش سطح مخصوص می‌شود و همچنین برای ثابت نگه‌داشتن اسلامپ، از فوق روان کننده سولفونات پلی‌اتیلن با قابلیت حل شدن در آب و با وزن مخصوص 1080 kg m^{-3} ، PH برابر ۶ و حجم کلر کمتر از ۰/۱٪

جدول ۱- ترکیبات شیمیایی و مشخصات فیزیکی سیمان و خاکستر پوسته شلتوک برنج

مواد مصرفی	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	L.O.I	f. lime	Blaine fineness (m ² kg ⁻¹)	Pozzolanic Activity Index (%)
سیمان معمولی	۶۲/۴	۲۱/۳۵	۵/۰۲	۳/۹۸	۳/۳۴	۱/۵	۰/۷۲	۰/۳۸	۱/۲۹	۱/۸۹	۲۹۶/۵	-
سیمان پوزولانی	۶۰/۴	۲۳/۴	۵/۱	۳/۱۵	۳/۴۵	۱/۹۵	۰/۳۶	۰/۶۵	۱/۴۵	۱/۶	۳۱۷/۶	-
خاکستر پوسته برنج	۰/۸	۹۰/۹	۰/۸۳	۰/۶	۰/۵۶	-	-	-	-	-	۳۷۶/۵	۸۱/۵



(ب)



(الف)

شکل ۱- منحنی دانه‌بندی مصالح سنگی: الف) ریزدانه، ب) درشت‌دانه

جدول ۲- مشخصات فیزیکی مصالح سنگی مصرفی

درشت‌دانه	ریزدانه	خواص فیزیکی
۲/۵۸	۲/۶۰	وزن مخصوص ظاهری ⁺
۰/۷	۱/۵۳	جذب آب (٪)
۱۶۳۰	۱۷۳۰	وزن مخصوص توده‌ای (kgm ⁻³)
-	۳/۰۱	مدول نرمی
		⁺ درون اشباع با سطح خشک

جدول ۳- مقادیر مصالح مصرفی در یک متر مکعب بتن

نام طرح	درشت دانه (kg)	ریز دانه (kg)	سیمان (kg)		خاکستر پوسته شلتوک برنج		آب (kg)	نسبت آب به مواد سیمانی	فوق روان کننده (%)
			نوع ۱	پوزولانی	(%)	(kg)			
C04R00-OPC	۸۷۵	۸۷۵	۴۵۰	-	-	-	۱۸۰	۰/۴	-
C04R05-OPC	۸۷۵	۸۷۵	۴۲۷/۵	-	۵	۲۲/۵	۱۸۰	۰/۴	۱/۸
C04R10-OPC	۸۷۵	۸۷۵	۴۰۵	-	۱۰	۴۵	۱۸۰	۰/۴	۱/۹
C04R15-OPC	۸۷۵	۸۷۵	۳۸۲/۵	-	۱۵	۶۷/۵	۱۸۰	۰/۴	۲
C04R20-OPC	۸۷۵	۸۷۵	۳۶۰	-	۲۰	۹۰	۱۸۰	۰/۴	۲/۱
C05R00-OPC	۹۲۰	۹۲۰	۳۶۰	-	-	-	۱۸۰	۰/۵	-
C05R05-OPC	۹۲۰	۹۲۰	۳۴۲	-	۵	۱۸	۱۸۰	۰/۵	۱/۸
C05R10-OPC	۹۲۰	۹۲۰	۳۲۴	-	۱۰	۳۶	۱۸۰	۰/۵	۱/۹
C05R15-OPC	۹۲۰	۹۲۰	۳۰۶	-	۱۵	۵۴	۱۸۰	۰/۵	۲
C05R20-OPC	۹۲۰	۹۲۰	۲۸۸	-	۲۰	۷۲	۱۸۰	۰/۵	۲/۱
C06R00-OPC	۹۵۰	۹۵۰	۳۰۰	-	-	-	۱۸۰	۰/۶	-
C06R05-OPC	۹۵۰	۹۵۰	۲۸۵	-	۵	۱۵	۱۸۰	۰/۶	۱/۸
C06R10-OPC	۹۵۰	۹۵۰	۲۷۰	-	۱۰	۳۰	۱۸۰	۰/۶	۱/۹
C06R15-OPC	۹۵۰	۹۵۰	۲۵۵	-	۱۵	۴۵	۱۸۰	۰/۶	۲
C06R20-OPC	۹۵۰	۹۵۰	۲۴۰	-	۲۰	۶۰	۱۸۰	۰/۶	۲/۱
C04R00-P.P.	۸۷۶	۸۷۶	-	۴۷۵	-	-	۱۹۰	۰/۴	-
C05R00-P.P.	۹۰۵	۹۰۵	-	۳۸۰	-	-	۱۹۰	۰/۵	-
C06R00-P.P.	۹۳۷	۹۳۷	-	۳۱۷	-	-	۱۹۰	۰/۶	-

۲-۲- ساخت قالب آزمایش گیرش

قالب مورد استفاده برای تعیین زمان گیرش بتن به کمک روش اولتراسونیک به طریقی که بتوان سرعت امواج را در هر بازه زمانی دلخواه بلافاصله بعد از ریختن بتن، اندازه گیری نمود با پیروی از سیستم ارائه شده توسط Reinhardt و Grosse [۵] ساخته شده است. این قالب شامل دو ورق اکریلیک PMMA به ابعاد $500 \times 200 \times 40$ mm می باشد که به فاصله ۱۵ cm از هم قرار گرفته و به کمک چهار شفت به هم متصل اند. طول ورق ها باید به اندازه کافی طویل بوده به طوری که امواج از اطراف نمونه عبور نکنند. مطابق شکل (۲) اسفنج لاستیکی U شکل به ابعاد $500 \times 150 \times 30$ mm بین ورق ها قرار می گیرد به طوری که بعد داخلی در امتداد طولی جداره قالب ۱۲۰ mm می باشد.

اسفنج لاستیکی از پراکندگی امواج از درون قالب جلوگیری می کند. در مرکز هر ورق سوراخی به عمق ۲۰ mm و به قطر ۳۴ mm تعبیه شده است که از این طریق مبدل های فرستنده و گیرنده دستگاه اولتراسونیک درون سوراخ تعبیه شده و در تماس با سطح ورق قرار می گیرند. از ویژگی های قالب ساخته شده می توان به موارد زیر اشاره نمود.

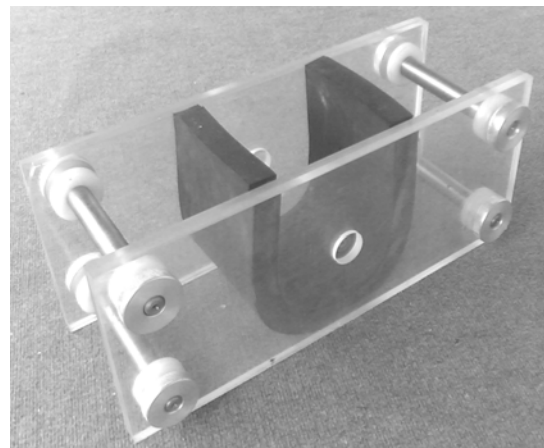
- امواج طولی قادرند به طور مستقیم از نمونه عبور کنند.
- استفاده از اسفنج لاستیکی و ورق اکریلیک از انتشار بیپهوده امواج جلوگیری می کنند.
- استفاده از قالب هم برای ریختن نمونه در قالب و انجام آزمایش بر روی آن و هم نگه داشتن گیرنده و فرستنده دستگاه اولتراسونیک بسیار آسان است.

۲-۳- آماده سازی نمونه ها و آزمایش های لازم

بتن تازه در داخل قالب ساخته شده ریخته شده و به روش دستی متراکم گردید. به دنبال آن آزمایش اولتراسونیک در یک ساعت اولیه در هر ۱۵ دقیقه و بعد از آن در فواصل زمانی ۳۰ دقیقه با رعایت الزامات BS 1881 [۱۱] با استفاده از دستگاه PUNDIT و فرکانس مبنای ۵۴ kHz انجام گرفت.

۳- ارائه و تحلیل نتایج

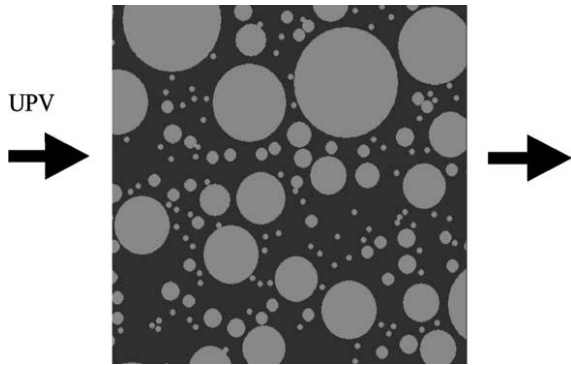
روند شماتیک تغییرات سرعت امواج اولتراسونیک با گذشت زمان در سنین اولیه که شامل سه مرحله و به شکل S می باشد در شکل (۳) نشان داده شده است.



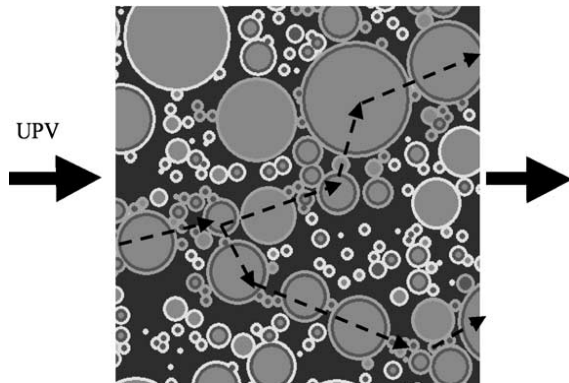
شکل ۲- قالب ساخته شده برای آزمایش گیرش

مرحله اول

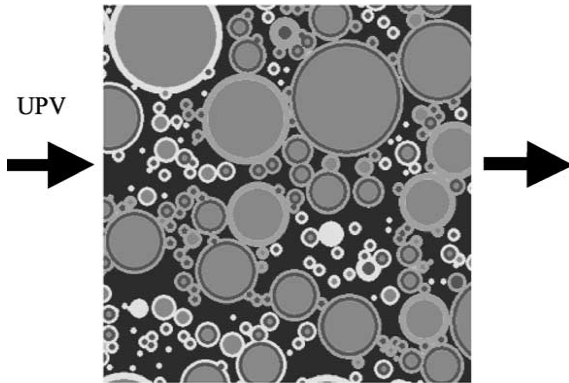
در مرحله اول (ناحیه A→B) بلافاصله بعد از اختلاط، سرعت تقریباً ثابت و بسیار کم می‌باشد و اغلب به کمتر از 600 m/s می‌رسد. این در حالی است که امواج اولتراسونیک می‌توانند از میان آب با سرعت تقریبی 1500 m/s عبور کنند [۴-۶]. این دوره می‌تواند مربوط به دوره غیر فعال در روند هیدراتاسیون سیمان باشد که عمدتاً تحت تأثیر دمای عمل‌آوری است. در آغاز این دوره ذرات سیمان به طور اتفاقی در یک حجم پراکنده شده‌اند و سیمان هنوز هیدراته نشده است.



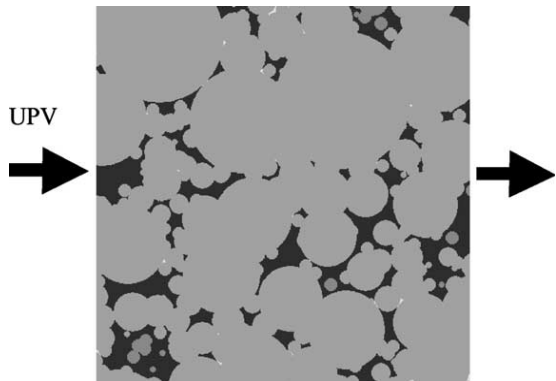
(الف)



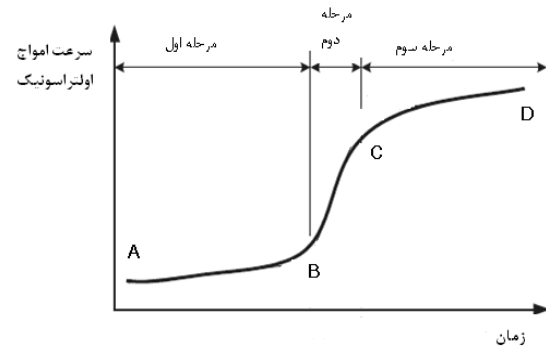
(ب)



(ج)



(د)



شکل ۳- نمایش شماتیکی از ارزیابی سرعت امواج اولتراسونیک [۴]

شکل (۴-الف) (با در نظر گرفتن خمیر سیمان) نشان می‌دهد که در این مرحله، ذرات سیمان از یکدیگر جدا هستند. در حالی که فضاهای مویینه مملو از آب به هم پیوسته‌اند. سرعت امواج اولتراسونیک به شدت تحت تأثیر وجود حباب‌های ریز هوا در مخلوط تازه تضعیف می‌گردد. به عقیده محققان، علت این امر طولانی بودن مسیر امواج به دلیل نوسانات ذرات هیدراته نشده سیمان و یا وجود حباب‌های هوا که در هنگام اختلاط درون مخلوط به دام افتاده‌اند، می‌باشد [۴-۶، ۱۲ و ۱۳]. به عبارت دیگر در انتهای این دوره (نقطه B) ذرات کوچک‌تر سیمان حل می‌شوند و در سطح خارجی ذرات بزرگ‌تر احاطه می‌گردند و یک مجموعه مجزای کوچکی از جسم جامد شکل می‌گیرد. این مجموعه مجزای کوچک، مبنای پیدایش شبکه جامد می‌باشند که به تدریج گسترش می‌یابند تا زمانی که از میان مصالح به هم متصل شوند. در این هنگام یک مسیر جامد برای عبور امواج اولتراسونیک شکل می‌گیرد که این امر موجب افزایش سرعت امواج می‌گردد. شکل (۴-ب) این مرحله از هیدراتاسیون را نشان می‌دهد. این مرحله، مرحله غیر فعال^۱ نامیده می‌شود.

شکل ۴-الف) ابتدای مرحله اول، معلق بودن ذرات سیمان (ب) انتهای مرحله اول و آغاز مرحله دوم، پیدایش مسیر جامد، (ج) مرحله دوم، اتصال شبکه جامد، (د) اتصال کامل شبکه جامد

مرحله دوم

در مرحله دوم (ناحیه B→C) بعد از دوره غیر فعال، سرعت امواج اولتراسونیک به سرعت می‌تواند از ۶۰۰ m/s به ۳۵۰۰ m/s افزایش یابد. این دوره می‌تواند حداقل ۱۰ تا ۶۰ ساعت ادامه یابد که مدت زمان آن به دمای عمل‌آوری و نوع سیمان و پارامترهای دیگر وابسته است [۱۲]. همان‌طور که در شکل (۴-ج) نشان داده شده است، وقتی که محصولات هیدراتاسیون بیشتر و بیشتر شکل می‌گیرند، به یکدیگر متصل می‌شوند و حجم مواد جامد به سرعت افزایش می‌یابد و امواج می‌توانند از میان توده جامد بیشتری عبور کنند و افزایش قابل توجهی در سرعت امواج در مرحله دوم مشاهده می‌شود. بنابر این افزایش در سرعت می‌تواند به دلیل توسعه روند هیدراتاسیون و محصولات آن مانند اترینگایت^۱ باشد که حفرات را پر کرده و موجب کاهش تخلخل و افزایش سرعت می‌گردد. بیشترین افزایش در سرعت زمانی رخ می‌دهد که ذرات سیمان هیدراته شده و مسیر کاملی برای عبور امواج اولتراسونیک ایجاد می‌گردد. لذا کسب مقاومت در بتن آغاز می‌شود و به تدریج تبدیل به جسم جامد می‌گردد. به این مرحله، مرحله شتاب^۲ گفته می‌شود.

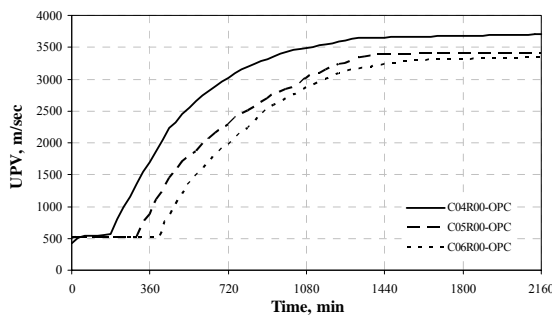
مرحله سوم

در مرحله سوم (ناحیه C→D) سرعت به کندی افزایش می‌یابد که این حالت به دلیل افزایش در تولید محصولات هیدراتاسیون در طول هیدراته شدن سیمان می‌باشد. در این مرحله تمام ذرات سیمان هیدراته شده به هم متصل می‌شوند و بخش اعظم هیدراتاسیون انجام شده و فضاهای خالی با محصولات هیدراتاسیون پر شده است و شبکه جامد پیوسته شکل می‌گیرد (شکل (۴-د)). سرعت امواج به تدریج به مقدار مجانبی^۳ خود می‌رسد. به این مرحله، مرحله کاهش سرعت^۴ گفته می‌شود.

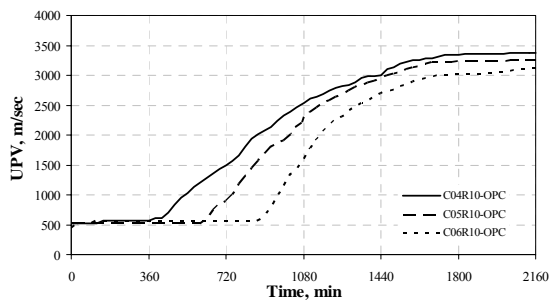
با توجه به موارد بحث شده می‌توان گفت که زمان رسیدن به آستانه نفوذ امواج در جسم جامد (نقطه B) و مرحله اتصال کامل همه ذرات در جسم جامد (نقطه C) دو مشخصه بسیار مهم در بیان تغییر ساختار میکروسکوپی بتن در سنین اولیه به حساب می‌آیند.

۳-۱- تأثیر نسبت آب به مواد سیمانی

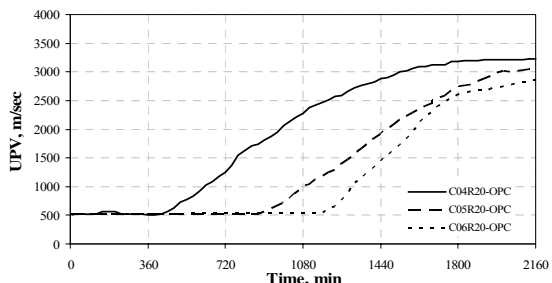
در شکل (۵) تأثیر نسبت آب به مواد سیمانی (۰/۴، ۰/۵ و ۰/۶) بر سرعت امواج اولتراسونیک در ۳۶ ساعت اولیه پس از اختلاط برای بتن‌های حاوی ۰، ۱۰ و ۲۰ درصد خاکستر پوسته شلتوک برنج نشان داده شده است. نمودارهای به دست آمده نشان می‌دهند که بلافاصله پس از اختلاط، در محدوده غیر فعال سرعت امواج اولتراسونیک در نسبت‌های مختلف آب به مواد سیمانی، نزدیک به هم و کم‌تر از ۶۰۰ m/s می‌باشد. به نظر می‌رسد طول دوره غیر فعال با افزایش نسبت آب به مواد سیمانی افزایش می‌یابد. به طوری که این مقدار برای بتن حاوی ۲۰٪ خاکستر پوسته شلتوک برنج در نسبت‌های ۰/۴ تا ۰/۶ به ترتیب از ۴۵۰ دقیقه به ۱۲۰۰ دقیقه افزایش می‌یابد.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۵- تأثیر نسبت آب به مواد سیمانی بر سرعت امواج

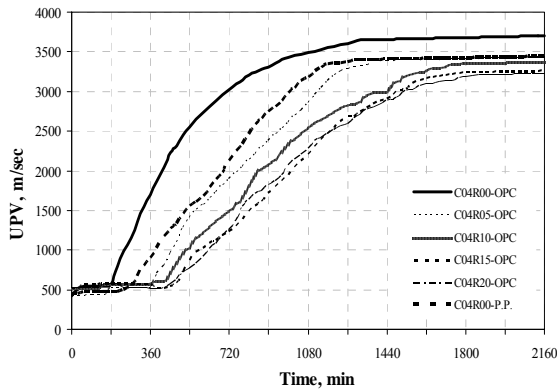
اولتراسونیک، الف) بتن بدون خاکستر پوسته شلتوک برنج،

ب) بتن با ۱۰٪ خاکستر پوسته شلتوک برنج،

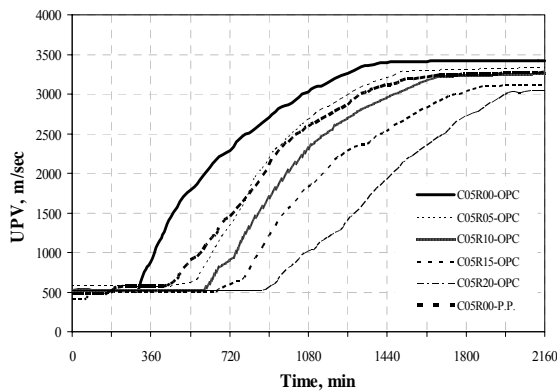
ج) بتن با ۲۰٪ خاکستر پوسته شلتوک برنج

- 1- Ettringite
- 2- Acceleration period
- 3- Asymptotic value
- 4- Deceleration period

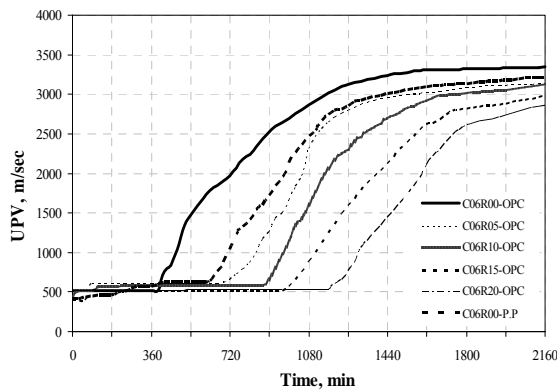
۹۳۰ دقیقه افزایش می‌یابد. به نظر می‌رسد این موضوع به دلیل سرعت واکنش‌های هیدراتاسیون باشد که در سیمان‌های پوزولانی و حاوی خاکستر پوسته شلتوک برنج این واکنش‌ها به کندی انجام می‌گیرد.



(الف)



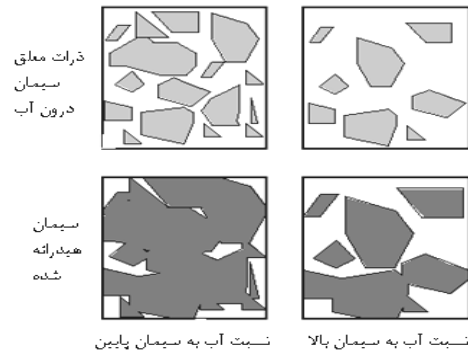
(ب)



(ج)

شکل ۷- تأثیر نوع سیمان و درصد‌های مختلف خاکستر پوسته شلتوک برنج بر سرعت امواج اولتراسونیک در نسبت‌های آب به مواد سیمانی: (الف) ۰/۴، (ب) ۰/۵، (ج) ۰/۶

علت این امر را می‌توان به کمک شکل (۶) توجیه نمود. در این شکل، در نسبت آب به مواد سیمانی پایین، فاصله بین ذرات کمتر بوده و در زمان کوتاه‌تری به هم متصل می‌شوند. پس از دوره غیرفعال، سرعت امواج اولتراسونیک برای نسبت آب به مواد سیمانی کمتر، مقدار بزرگ‌تری دارد. این پدیده می‌تواند به دلیل پیوستگی بیشتر توده جامد باشد که مسیر کوتاه‌تری برای عبور امواج ایجاد می‌کند. با گذشت زمان، پس از مرحله دوم سرعت امواج اولتراسونیک برای نسبت‌های بیشتر آب به مواد سیمانی مقدار نهایی کمتری را نشان می‌دهد. به طوری که این مقدار در بتن فاقد خاکستر پوسته شلتوک برنج در نسبت‌های ۰/۴ تا ۰/۶ به ترتیب از ۳۷۰۴ m/s به ۳۳۴۲ m/s کاهش می‌یابد.



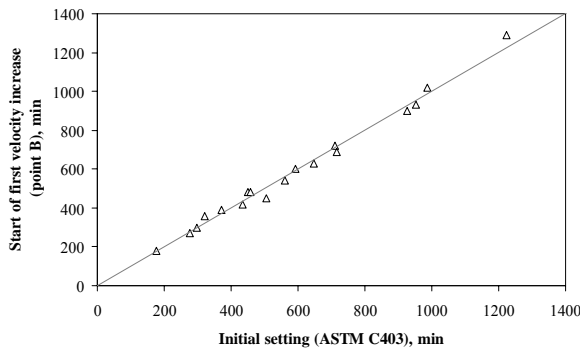
شکل ۶- تأثیر نسبت آب به سیمان بر ساختار میکروسکوپی بتن

۳-۲- تأثیر نوع سیمان و درصد‌های مختلف خاکستر پوسته شلتوک برنج

تغییرات سرعت امواج اولتراسونیک به صورت تابعی از زمان برای بتن‌های حاوی دو نوع سیمان و درصد‌های مختلف خاکستر پوسته شلتوک برنج در شکل (۷) نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که حضور خاکستر پوسته شلتوک برنج تأثیر زیادی بر روند تکامل ریز ساختار بتن در سنین اولیه دارد.

سرعت امواج اولتراسونیک در دوره غیر فعال (A→B) برای همه ترکیبات تقریباً نزدیک به یکدیگر می‌باشد و تفاوت چندانی در نوع سیمان دیده نمی‌شود. از طرفی طول دوره غیر فعال در سیمان پوزولانی بیشتر از سیمان نوع ۱ نتیجه شده است. این موضوع در خصوص سیمان‌های حاوی خاکستر هم به خوبی دیده می‌شود به طوری که با افزایش درصد خاکستر طول دوره غیر فعال افزایش بیشتری از خود نشان داده است. به طوری که در نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۵ این دوره برای بتن‌های بدون و با ۲۰٪ خاکستر پوسته شلتوک برنج به ترتیب از ۳۰۰ دقیقه به

(۸) همبستگی نتایج به دست آمده از آزمایش مقاومت نفوذ با سرعت امواج اولتراسونیک را در ارزیابی زمان گیرش اولیه نشان می‌دهد. علت این پدیده را می‌توان این گونه بیان کرد که، با پیدایش اولین محصولات هیدراتاسیون، سرعت امواج اولتراسونیک افزایش می‌یابد. این محصولات فضاهای خالی بتن را پر نموده و ساختار متراکم ایجاد می‌کنند.



شکل ۸- همبستگی بین زمان گیرش اولیه از آزمایش مقاومت نفوذ و زمان نظیر اولین افزایش در سرعت امواج اولتراسونیک

این عامل موجب افزایش مدول الاستیسیته بتن می‌شوند و می‌توان طبق رابطه (۱) [۱۴] افزایش سرعت امواج را توجیه نمود. در این رابطه E مدول الاستیسیته، ρ وزن مخصوص و U ضریب پواسون می‌باشد.

$$v = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (1)$$

با توجه به بررسی‌های انجام شده در خصوص تعیین زمان گیرش نهایی، نمودارهای دیفرانسیلی سرعت- زمان برای نتایج به دست آمده، استخراج شده است که این نمودارها بر اساس معادله (۲)، معادله گوسی^۱، هموار شده‌اند. فرم معادله به بررسی‌های مختلف انجام شده بر روی نتایج، انتخاب شده است. این هموارسازی بر اساس یک و یا ترکیب چند معادله گوسی انجام شده به طوری که بهترین همبستگی را از خود نشان دهد. پارامترهای a_i ، b_i و c_i ضرایب مجهولی هستند که طی این مرحله به کمک الگوریتم‌های غیرخطی مثل T-R^۲ و (L-V)^۳ قابل دستیابی هستند. نتایج حاصل از آزمایش‌های انجام شده در شکل (۹) (برای نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۵) و جدول (۴) خلاصه شده‌اند.

با گذشت زمان بعد از دوره غیر فعال، منحنی‌ها از هم مجزا می‌شوند. به طوری که در یک نسبت آب به مواد سیمانی ثابت، سرعت امواج در بتن با درصد خاکستر بیشتر به ترتیب خیلی کمتر از بتن با سیمان پوزولانی و سیمان نوع ۱ نتیجه شده است. همچنین مقدار نهایی سرعت امواج اولتراسونیک در بتن بدون خاکستر بیشترین مقدار را داراست که این مقدار با افزایش درصد خاکستر پوسته شلتوک برنج کاهش می‌یابد. به عنوان نمونه برای بتن‌های با ۲۰٪ خاکستر و نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۴ و ۰/۶ این کاهش به ترتیب برابر ۱۳٪ و ۱۵٪ نتیجه شده است. علت این پدیده را می‌توان در فعالیت پوزولانی خاکستر پوسته شلتوک برنج در به تأخیر انداختن تکامل ریز ساختار بتن در نتیجه کاهش مقدار $Ca(OH)_2$ نسبت به بتن معمولی جستجو کرد.

۳-۳- زمان گیرش اولیه و نهایی

برای کاربرد عملی از نتایج لازم است که زمان گیرش اولیه و نهایی بتن مورد بررسی قرار گیرد. انتظار می‌رود که با شروع گیرش امکان اختلاط بیشتر وجود نداشته باشد و نیز بعد از خاتمه گیرش مخلوط کارایی لازم را نداشته باشد [۵].

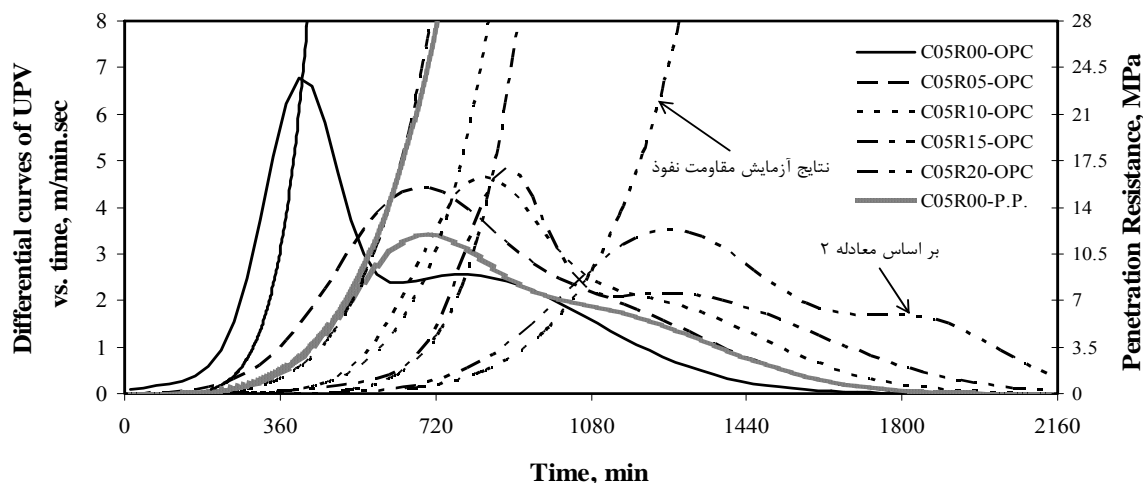
در خصوص تعیین زمان‌های گیرش براساس نتایج آزمایش اولتراسونیک گزارشات متناقضی ارائه شده است. Reinhardt و Grosse بیان کردند که اولین بیشینه انحناء در نمودار سرعت امواج- زمان مطابق با گیرش اولیه است که با دقت زیاد و با روش محاسباتی قابل ارزیابی است. اما در خصوص گیرش نهایی عنوان کردند که بر اساس مشاهدات تجربی به دست آمده برای ملات، این زمان را می‌توان با زمان نظیر سرعت ۱۵۰۰ m/s تعریف نمود [۵]. Robeyst و همکاران گیرش بتن‌های حاوی سرباره کوره آهن را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان دادند که زمان گیرش اولیه مطابق با نقطه عطف منحنی سرعت امواج- زمان است در حالی که زمان گیرش نهایی نقطه ایست که سرعت امواج به مقدار مجانبی خود می‌رسد [۶].

در مطالعه حاضر علاوه بر آزمایش اولتراسونیک، آزمایش مقاومت نفوذ مطابق ASTM C403 [۳] بر روی ملات‌های جدا شده از بتن، انجام شده است. زمان‌های گیرش اولیه و نهایی به ترتیب بر اساس زمان نظیر مقاومت نفوذ ۳/۵ MPa و ۲۷/۶ MPa به دست آمده که در جدول (۴) خلاصه شده است. نتایج حاکی از آن هستند که در همه نمونه‌ها، زمان نظیر اولین افزایش سرعت امواج اولتراسونیک (نقطه B)، با زمان گیرش اولیه به دست آمده از آزمایش مقاومت نفوذ مطابقت مطلوبی دارد. شکل

1- Gaussian
2- Trust-Region
3- Levenberg-Marquardt

جدول ۴- نتایج آزمایش اولتراسونیک و مقاومت نفوذ

آزمایش مقاومت نفوذ		زمان متناظر با بیشینه نمودار دیفرانسیلی سرعت امواج-زمان (min)	طول دوره غیرفعال (min) (A→B)	نام طرح
زمان گیرش اولیه (min)	زمان گیرش نهایی (min)			
۱۷۶	۳۲۱	۳۳۰	۱۸۰	C04R00-OPC
۳۲۰	۵۴۸	۵۴۰	۲۶۰	C04R05-OPC
۴۳۴	۶۷۶	۶۹۰	۴۲۰	C04R10-OPC
۴۵۱	۷۱۳	۷۲۰	۴۸۰	C04R15-OPC
۵۶۰	۹۳۶	۹۲۰	۵۴۰	C04R20-OPC
۲۹۸	۴۲۲	۴۱۰	۳۰۰	C05R00-OPC
۴۵۸	۷۰۸	۶۹۰	۴۸۰	C05R05-OPC
۵۹۳	۸۳۷	۸۳۰	۶۰۰	C05R10-OPC
۷۱۱	۹۱۶	۸۹۰	۷۲۰	C05R15-OPC
۹۵۲	۱۳۱۱	۱۲۵۰	۹۳۰	C05R20-OPC
۳۷۰	۵۵۲	۵۶۰	۳۹۰	C06R00-OPC
۷۱۵	۸۰۱	۸۲۰	۶۹۰	C06R05-OPC
۹۲۷	۱۱۴۳	۱۱۳۰	۹۰۰	C06R10-OPC
۹۸۶	۱۳۰۱	۱۳۲۰	۱۰۲۰	C06R15-OPC
۱۲۲۴	۱۵۶۷	۱۵۴۰	۱۲۹۰	C06R20-OPC
۲۷۶	۶۱۸	۵۹۰	۲۷۰	C04R00-P.P.
۵۰۴	۷۲۴	۷۱۰	۴۵۰	C05R00-P.P.
۶۴۷	۸۶۹	۸۶۰	۶۳۰	C06R00-P.P.



شکل ۹- منحنی‌های دیفرانسیلی هموار شده سرعت امواج اولتراسونیک-زمان به همراه نتایج آزمایش مقاومت نفوذ برای بتن‌های مختلف با نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۵

مشابهی توسط Zhang و همکاران گزارش شده است [۱]. شکل (۱۰) همبستگی نتایج به دست آمده از آزمایش مقاومت نفوذ و سرعت امواج اولتراسونیک را در ارزیابی زمان گیرش نهایی نشان می‌دهد. بنابر این می‌توان گفت زمان‌های گیرش بتن با توجه به آزمایش اولتراسونیک و منحنی‌های دیفرانسیلی آن قابل ارزیابی است.

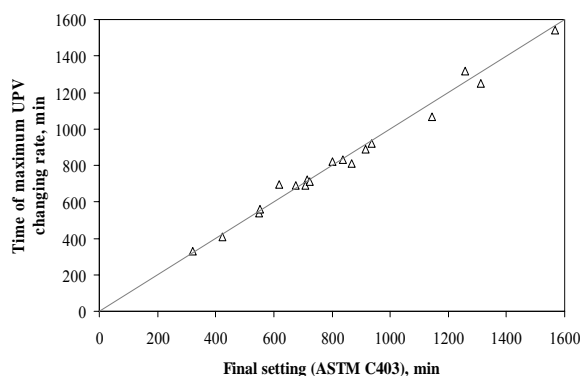
$$v(t) = \sum a_i \exp \left[- \left(\frac{t - b_i}{c_i} \right)^2 \right] \quad (2)$$

نتایج نشان می‌دهند که در همه نمونه‌ها، زمان گیرش نهایی حاصل از آزمایش مقاومت نفوذ، مطابقت زیادی با زمان متناظر با بیشینه نرخ تغییر سرعت (بیشینه نمودار دیفرانسیلی در منحنی‌های سرعت امواج اولتراسونیک-زمان) دارد. نتیجه

۴- با مقایسه نتایج آزمایش‌های اولتراسونیک و مقاومت نفوذ به نظر می‌رسد زمان‌های گیرش بتن بر اساس آزمایش اولتراسونیک و منحنی‌های دیفرانسیلی آن قابل ارزیابی هستند.

۵- مراجع

- [1] Zhang, Y., Zhang, W., She, W., Ma, L., Zhu, W., "Ultrasound Monitoring of Setting and Hardening Process of Ultra-High Performance Cementitious Materials", NDT & E International 2012, 47, 177-184.
- [2] ASTM C 191, "Standard Test Method for Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle", ASTM, US, 2000.
- [3] ASTM C 403 "Standard Test Method for Time of Setting of Concrete Mixtures by Penetration Resistance", ASTM, US, 2000.
- [4] Lee, H. K., Lee, K. M., Kim, Y. H., Yim, H., Bae, D. B., "Ultrasonic In-Situ Monitoring of Setting Process of High-Performance Concrete", Cement and Concrete Research, 2004, 34, 631-640.
- [5] Reinhardt, H. W., Grosse, C. U., "Continuous Monitoring of Setting and Hardening of Mortar and Concrete", Construction and Building Materials, 2004, 18, 145-154.
- [6] Robeyst, N., Gruyaert, E., Grosse, C. U., Belie, N. D., "Monitoring the Setting of Concrete Containing Blast-Furnace Slag by Measuring the Ultrasonic P-Wave Velocity", Cement and Concrete Research, 2008, 38, 1169-1176.
- [7] Trtnik, G., Turk, G., Kavcic, F., Bosiljkov, V. B., "Possibilities of Using the Ultrasonic Wave Transmission Method to Estimate Initial Setting Time of Cement Paste", Cement and Concrete Research, 2008, 38, 1336-1342.
- [8] Voigt, Th., Ye, G., Sun, Z., Shah, S. P., "Comparison of Ultrasonic Wave Transmission and Reflection Measurements with P-and S-Waves on Early Age Mortar and Concrete", Materials and Structures, 2005, 38, 729-738.
- [9] ASTM C 33-03, "Standard Specification for Concrete Aggregates", ASTM, US, 2003.
- [10] ACI 211.1-91, "Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete", ACI Manual of Concrete Practice, ACI, USA, 2002.



شکل ۱۰- همبستگی بین زمان گیرش نهایی از آزمایش مقاومت نفوذ و زمان نظیر پیشینه نرخ تغییر سرعت امواج اولتراسونیک

۴- نتیجه‌گیری

در این مطالعه، کاربرد روش اولتراسونیک برای ارزیابی مراحل گیرش بتن در سنین اولیه مورد بررسی قرار گرفته است. روش اولتراسونیک می‌تواند تصویر کاملی از روند هیدراتاسیون و پیدایش ساختار بتن با ترکیب دلخواه را نشان دهد. از بررسی‌های انجام شده در این مطالعه، نتایج زیر قابل استنتاج هستند:

۱- در طی مراحل گیرش بتن، منحنی‌های سرعت امواج اولتراسونیک-زمان برای همه ترکیبات مشابه بوده و شامل سه مرحله می‌باشند. در مرحله اول که دوره غیر فعال نامیده می‌شود سرعت بسیار ناچیز و تقریباً ثابت است. این مرحله مربوط به هیدراتاسیون اولیه سیمان می‌باشد. در مرحله دوم با افزایش محصولات هیدراتاسیون و افزایش حجم مواد جامد، سرعت به طور ناگهانی افزایش می‌یابد و پس از چند ساعت با آغاز مرحله سوم و با پیدایش شبکه جامد به هم پیوسته، روند افزایش سرعت کاهش می‌یابد.

۲- افزایش نسبت آب به مواد سیمانی، زمان گیرش اولیه و نهایی را به تأخیر می‌اندازد. این پدیده می‌تواند به دلیل پیوستگی بیشتر توده جامد در نسبت آب به مواد سیمانی کمتر باشد که مسیر کوتاه‌تری برای عبور امواج ایجاد می‌کند.

۳- افزایش درصد خاکستر پوسته شلتوک برنج، زمان گیرش اولیه و نهایی را به تأخیر می‌اندازد. همچنین زمان گیرش اولیه و نهایی در بتن با سیمان پوزولانی بیشتر از بتن با سیمان نوع ۱ می‌باشد. این پدیده را می‌توان با توجه به فعالیت پوزولانی در به تأخیر انداختن تکامل ریز ساختار بتن، در نتیجه کاهش مقدار Ca(OH)_2 نسبت به بتن معمولی بیان کرد.

- [13] Liu, Z., Zhang, Y., Jiang, Q., Sun, G., Zhang, W., "In Situ Continuously Monitoring the Early Age Microstructure Evolution of Cementitious Materials Using Ultrasonic Measurement", *Construction and Building Materials*, 2011, 25, 3998-4005.
- [14] Neville, A. M., "Properties of Concrete", 4th Edition, John Wiley and Sons, Inc., New York, 1996.
- [11] BS 1881: Part 203, "Measurement of Velocity of Ultrasonic Pulses in Concrete", BSI, UK, 1986.
- [12] Ye, G., Lura, P., Van Breugel, K., Fraaij, A. L. A., "Study on the Development of the Microstructure in Cement-Based Materials by Means of Numerical Simulation and Ultrasonic Pulse Velocity Measurement", *Cement & Concrete Composites*, 2004, 26, 491-497.

EXTENDED ABSTRACT

Evaluating the Setting Process of fresh Concrete Containing Rice Husk Ash using Ultrasonic Method

Rahmat Madandoust*, Seyyede Fatemeh Shahabi

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

Received: 18 June 2013; **Accepted:** 08 January 2014

Keywords: Concrete, Setting, Ultrasonic, Penetration resistance, Rice husk ash.

1. Introduction

Setting is considered as one of the important properties of concrete at early ages which affects the long-term behavior of concrete. Standard tests are available for monitoring the setting process of cement paste and mortar which do not consider the concrete. In this study, ultrasonic pulse velocity (UPV) method has been used to evaluate the setting process of concrete made without/with rice husk ash (5%, 10%, 15% and 20% by weight) and different water-to-binder ratios (0.4, 0.5 and 0.6). By following Reinhardt and Grosse [1] scheme, a specially ultrasonic monitoring apparatus was made which can measure the UPV at any desired intervals after casting. Moreover, by concerning the results obtained from penetration resistance test along with UPV findings, a good coherence is derived in evaluating the setting times of concrete.

2. Experimental study

2.1. Materials

Totally, 18 different mixtures containing 0-20% RHA with water-to-binder ratios of 0.4 - 0.6 were prepared in this study. Type I Portland cement (OPC) and natural pozzolanic Portland cement (PPC) produced in Khazar cement factory, Guilan, Iran, was used. The required RHA was supplied from the north of Iran. This product had a high content of silica (>90%) by weight and was obtained by burning at relatively high temperatures in the range of 650°C following the recommendations found in the literature. The fine and coarse aggregates were washed river sand and crushed limestone, respectively. The utilized superplasticiser was a polyethylene sulphonate.

2.2. Testing device

A monitoring system, which can measure the UPV at any desired intervals after casting, was constructed by following Reinhardt and Grosse [1]. As shown in Fig. 1, this system consists of two 500×200×40-mm acrylic plates, a 500×150×30-mm U-shaped rubber foam container, a commercial UPV measurement device and two ultrasonic transducers. Each acrylic plate had a circular hole of 34 mm diameter and 20 mm depth at its mid-height. A transducer was fitted into the hole and pushed. Fresh concrete was then poured in the container and compacted. Then, measurements started immediately after casting and continued for 36 hours.

3. Results and discussion

3.1. UPV curves

The schematic diagram of the UPV measurement is illustrated in Fig. 2. It can be seen that the UPV curve is S-shape and can be clearly identified into three stages [2]. In stage I (A→B), the UPV value is almost constant and not changed significantly. This stage is known as dormant period. In stage II (B→C), the water-saturated porous solid structure becomes more and more connected as newly formed hydration products fill in the pores; thus, the UPV increases. This stage is known as acceleration period. Finally, in stage III (C→D), as the volume of pores is

* Corresponding Author

E-mail addresses: rmadandoust@guilan.ac.ir (Rahmat Madandoust), f_s_h990@guilan.ac.ir (Seyyede Fatemeh Shahabi).

decreased by filling of hydration products, the UPV levels off and approaches its asymptotic value in the solid structure. This stage is referred as deceleration period.

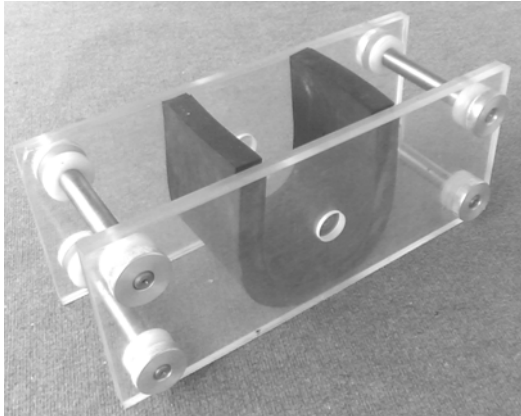


Fig. 1. A view of testing device

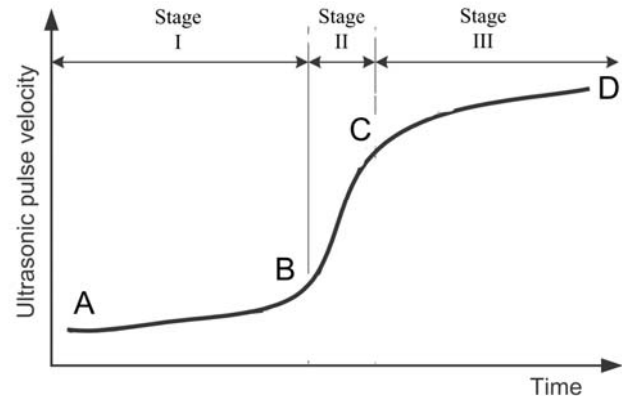


Fig. 2. The schematic diagram of the UPV measurement [2]

3.3. Effect of w/b

According to the experimental results obtained, it could be generally stated that the concretes with different w/b ratios exhibit similar trend. The UPV values keep almost constant during dormant stage. This fact was explained based on the theory that ultrasonic waves propagate through the phase of viscous suspension, which is initially common among all specimens. After point B, UPV values rapidly increased with time at different rates to point C, and finally come near to an asymptotic value gradually. In general, a shorter dormant period and larger ultimate UPV value can be observed for concretes with lower w/b ratios at later age.

3.4. Effect of cement type and RHA

The results showed that the changes of UPV values for OPC concretes with different RHA replacement and PPC concretes are not significant at very early ages. Generally it can be stated that the control OPC concrete (without RHA) has a shorter dormant period and higher UPV value than PPC concrete. This trend for RHA concretes is more notable with an increase in RHA content. This is to be expected to be because replacing cement by RHA retards the hydration reaction. Thus, the setting retardation of RHA concretes may depend on the RHA content.

3.3. Setting time

The development of methods to determine the setting times of fresh concrete benefits its practical application. For mortar or concrete, the setting time is determined by penetration resistance test on the sieved mortar according to the ASTM 403 [3]. The differential calculation is performed on various concretes as has already been proposed in Ref. [4]. The UPV differential curves and penetration resistance test are shown in Fig. 3. Generally, it can be stated that the lasting times for dormant stage and arrival time at maximum UPV changing rate are almost equal to the initial and final settings, respectively. Therefore, the setting time might be distinguished by the UPV curves and relating differential curves.

4. Conclusions

An ultrasonic monitoring system has been used to successfully measure the UPV of fresh concrete. The UPV development curves of all specimens resembled a curve that consists of three recognizable stages. At very early ages in first stage, the UPV values of all concretes were almost equal and constant. This was theoretically explained that ultrasonic waves propagate through the phase of viscous suspension, which is initially common among all specimens. The UPV profiles at later ages (stages II and III) differed from each other because of higher values of water-to-binder ratios and rice husk ash additions lead to higher degree of retardation in the hydration and the microstructure formation processes of concrete. Moreover, it can be stated that the control OPC concrete (without RHA) has a shorter dormant period and higher UPV value than PPC concrete. Finally, the results showed that the setting times might be determined by the UPV curves and their differential curves.

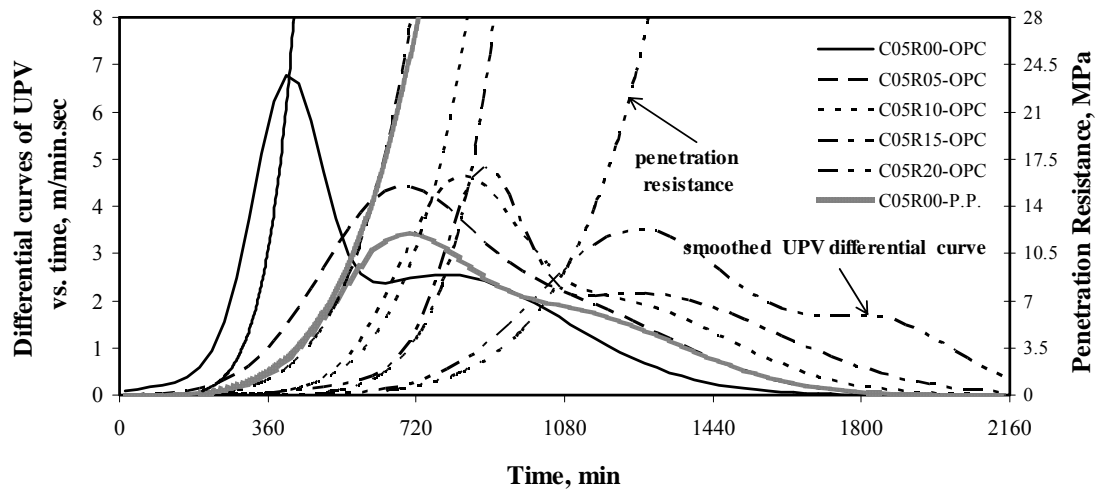


Fig. 3. Typical UPV differential and penetration resistance test curves.

5. References

- [1] Reinhardt, H. W., Grosse, C. U., "Continuous Monitoring of Setting and Hardening of Mortar and Concrete", *Construction and Building Materials*, 2004, 18, 145-154.
- [2] Lee, H. K., Lee, K. M., Kim, Y. H., Yim, H., Bae, D. B., "Ultrasonic In-Situ Monitoring of Setting Process of High-Performance Concrete", *Cement and Concrete Research*, 2004, 34, 631-640.
- [3] ASTM C 403 "Standard Test Method for Time of Setting of Concrete Mixtures by Penetration Resistance", ASTM, US, 2000.
- [4] Zhang, Y., Zhang, W., She, W., Ma, L., Zhu, W., "Ultrasound Monitoring of Setting and Hardening Process of Ultra-High Performance Cementitious Materials", *NDT & E International* 2012, 47, 177-184.