استاندارد آزمایش سرعت پالس مافوق صوت

۱ـ هدف

این استاندارد توصیه‌هایی در بارهٔ آزمایش غیرمخرب اندازه‌گیری سرعت‌های پالس مافوق صوت نمونه‌های آزمایشی بتنی ساده، مسلح و پیش‌تنیده، قطعات پیش‌ساخته و سازه را ارائه می‌دهد.

۲ـ تعاریف

۲ـ۱ زمان انتقال[1]

مدت زمانی که طول می‌کشد تا پالس مافوق صوت از مولد فرستنده تا گیرنده، از میان بتن عبور کند.

۲ـ۲ آغازهٔ پالس[2]

زودترین قسمت پالس که توسط مولد گیرنده دریافت می‌شود.

۲ـ۳ طول مسیر[3]

مقدار طولی از بتن است که پالس از آن عبور می‌کند.

---

1 . Transit Time

۲ . On Set، دستگاه مافوق صوت باید قادر باشد که ورود اولین قسمت پالس را کشف کند، در غیر این صورت اختلال (پارازیت) در نتایج اثر می‌گذارد.

3 . Path Length

۳ـ دامنهٔ کاربرد

اندازه‌گیری پالس‌های مافوق صوت در بتن برای کاربردهایی به شرح زیر مورد استفاده قرار می‌گیرد:

الف ـ تعیین یکنواختی بتن در یک عضو یا بین اعضای سازه (بند ۸)،

ب ـ کشف وجود ترک و اندازه‌گیری عمق آن و دیگر نارسایی‌ها مانند منافذ (بند ۹)،

ج ـ اندازه‌گیری تغییرات خواص بتن با زمان (بند ۱۰)،

د ـ تعیین مقاومت بتن (بند ۱۱)،

ر ـ تعیین مدول الاستیسیته و ضریب پواسون دینامیکی (بند ۱۲)،

سرعت پالس مافوق صوت تحت

سرعت پالس مافوق صوت تحت‌تأثیر خواص الاستیک و مکانیکی بتن است. بنابراین متغیر بودن سرعت پالس در طول مسیرهای مختلف در سازه نشانهٔ تغییرات در کیفیت بتن می‌باشد (بند ۸). در مواردی که قسمتی از بتن تحت آزمایش، دارای تراکم کم، تخلخل زیاد، و آسیب‌دیدگی باشد، سرعت پالس کاهش یافته و در نتیجه تعیین وسعت نارسایی امکان‌پذیر است (بند ۹). تغییرات در ساختار بتن که به دلیل کسب مقاومت و یا آسیب‌دیدگی ایجاد می‌گردد، در سرعت پالس انعکاس می‌یابد و باعث افزایش یا کاهش آن می‌شود. بنابراین با اندازه‌گیری سرعت پالس در فواصل مناسب زمانی تشخیص تغییرات در ساختار بتن امکان‌پذیر است (بند ۱۰). اندازه‌گیری سرعت پالس به منظور کنترل کیفیت قابل استفاده است. در مقایسه با آزمایش مکانیکی روی نمونه‌های مکعبی و استوانه‌ای کنترل و از آنجا که نمونه‌های مکعبی و استوانه‌ای کنترل ممکن است نماینده بتن در سازه نباشند ولیکن آزمایش سرعت پالس مستقیماً با بتن در سازه ارتباط دارد. بنابراین اندازه‌گیری سرعت پالس در مقایسه با آزمایش مکانیکی روی نمونه‌های کنترل ارجحیت دارد چنانچه رابطهٔ بین سرعت پالس با خواص بتن در سازه مورد آزمایش به دست آید، نتایج حاصل از این آزمایش قابل اعتماد خواهد بود. (بند ۱۱).

برقراری رابطهٔ تجربی بین سرعت پالس با مدول الاستیسیته استاتیکی و دینامیکی و مقاومت بتن امکان‌پذیر است. ولی این روابط تحت‌تأثیر تعدادی عوامل شامل نوع سیمان، مقدار سیمان، مواد افزودنی، نوع و اندازهٔ سنگدانه‌ها، شرایط عمل‌آوری و سن بتن است. در بررسی نتایج سرعت پالس در تعیین خواص الاستیک و مقاومت بر اساس نتایج سرعت پالس باید دقت کرد، به خصوص در مواردی که مقاومت بتن بیشتر از ۶۰ MPa باشد.

۴ـ اساس کار دستگاه

مولد الکترو ـ صوتی، تولید کنندهٔ پالس ارتعاشات طولی است. این مولد روی سطح بتن تحت آزمایش قرار داده می‌شود. پس از عبور پالس از طول معین L از بتن، ارتعاشات پالس توسط مولد ثانویه (گیرنده) به علامت‌های الکتریکی تبدیل می‌گردد. مدار الکترونیکی دستگاه قادر است که زمان عبور پالس را بر حسب میکروثانیه T اندازه‌گیری کند. سرعت پالس V (بر حسب $\frac{Km}{s}$ یا $\frac{m}{s}$) از رابطهٔ زیر به دست می‌آید:

$$V=\frac{L}{T}$$

که در آن:

L = طول مسیر پالس

T = زمان عبور پالس، مدت زمانی که پالس از طول L عبور می‌کند.

به دلایل زیر از ارتعاشات پالس مافوق صوت به جای (بسامد[1]) صوت استفاده می‌شود:

الف ـ پالس‌ها به صورت دقیق و کامل در بتن منتقل شود.

ب ـ در امتداد توسعه پالس‌ها، حداکثر انرژی ایجاد گردد.

بتن از فازهای مختلف تشکیل شده است و وقتی که پالس به بتن اعمال شود، آن پالس در فازهای بتن، تحت بازتاب‌های مختلف قرار می‌گیرد. در نتیجه سیستم پیچیده‌ای از امواج ایجاد می‌شود که شامل موج طولی و برشی است.

۵ـ شرح دستگاه

۵ـ۱ کلیات

دستگاه شامل تولید کنندهٔ پالس الکتریکی، دو عدد مولد، تقویت کننده (آمپلی فایر) و وسیله‌ای الکترونیکی برای اندازه‌گیری زمان عبور پالس بین مولد فرستنده و گیرنده است.

۵ـ۲ خصوصیات دستگاه

خصوصیات دستگاه باید به شرح زیر باشد:

الف ـ دستگاه باید قابلیت اندازه‌گیری زمان عبور در طول ۱۰۰ میلیمتر تا ۳ میلیمتر را با دقت ۱± درصد داشته باشد.

1. Frequency

ب ـ دستگاه باید عملکرد خود را در محدودهٔ رطوبت، دما و ولتاژ که توسط سازنده اعلام شده است، حفظ کند.

۵ـ۳ مولدها

معمولاً بسامد طبیعی مولدها بین ۲۰ تا ۱۵۰ KHz است، هر چند بسامدهای کمتر، مانند ۱۰ KHz برای مسیر طولانی عبور و بسامدهای زیادتر تا ۱MHz برای ملات و دوغاب[1] مورد استفاده می‌گیرند.

پیشروی پالس‌های بسامد بالا در بتن، در ابتدا مناسب است ولی در حالی که از میان بتن عبور می‌کنند از مقدار پالس‌ها کاسته می‌شود و در مقایسه با پالس‌های بسامد پایین سرعت کاهش پالس‌ها بیشتر است. بنابراین، مولد با بسامد زیاد برای مسیر کوتاه و مولد با بسامد کم برای مسیر طولانی ترجیح داده می‌شود. در اکثر موارد، مولدهایی با بسامد ۵۰ تا ۶۰ KHz مناسب است.

۵ـ۴ تنظیم دستگاه

قبل از شروع آزمایش، ضروری است که دستگاه تنظیم و کالیبره شود. به عبارت دیگر، دستگاه روی قرائت مبنای صفر قرار داده شود به همین منظور مولدها در دو طرف میله مخصوص مرجع قرار داده می‌شوند و سپس بر اساس مدت زمان حکاکی شده بر روی آن میله، قرائت دستگاه تنظیم می‌گردد. چنانچه قرائت دستگاه مساوی با مدت زمان میله مرجع باشد، نشانهٔ تنظیم و کالیبره شدن دستگاه است. معمولاً میله‌هایی که برای تنظیم دستگاه مورد استفاده قرار می‌گیرد، دارای مدت زمان عبور پالس برابر با ۲۵μs است. برای برقراری ارتباط بین مولدها و میلهٔ مرجع باید از مواد مخصوص اتصال (بند ۶ـ۵) به حداقل مقدار ممکن استفاده نمود.

۵ـ۵ آزمایش دقت دستگاه

دقت در اندازه‌گیری زمان عبور پالس به دقیق بودن ابزار الکترونیکی بستگی دارد. برای

1 . Grout

آزمایش دقت دستگاه از دو میله مرجع استفاده می‌شود. زمان عبور پالس در میله‌های مرجع باید حدود ۲۵μs و ۱۰۰μs باشد. میلهٔ کوچکتر برای تنظیم و کالیبره کردن دستگاه مورد استفاده قرار می‌گیرد (مطابق بند ۵ ـ۴) میلهٔ بزرگتر برای آزمایش دقت دستگاه در اندازه‌گیری زمان عبور پالس به کار می‌رود.

معمولاً استفاده از میلهٔ بزرگ ضرورت ندارد زیرا فرض بر این است که دستگاه توسط سازنده مورد آزمایش قرار گرفته است. به هر حال نتایجی که با آزمایش میله‌ها به دست می‌آید نباید بیش از ۰/۵± درصد با مقادیر ذکر شده روی میله‌ها تفاوت داشته باشد.

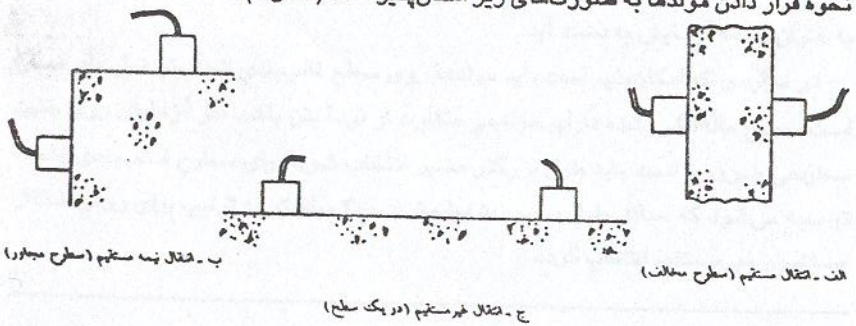
۵ـ۶ دقت در اندازه‌گیری طول مسیر

اندازه‌گیری طول مسیر پالس باید از دقتی بیشتر از ۱± درصد برخوردار باشد. در مواردی که عملاً اندازه‌گیری طول مسیر امکان‌پذیر نیست باید اندازه اسمی همراه با رواداری آن گزارش گردد.

۶ـ تعیین سرعت پالس

۶ـ۱ آرایش قرارگیری مولدها

مولد گیرنده آن قسمتی از پالس را کشف می‌کند که زودتر برسد. در واقع ارتعاشات پیش‌رونده طولی سریعتر می‌رسند. هر چند در امتداد عمود بر سطح مولد فرستنده، حداکثر انرژی به بتن منتقل می‌شود. ولی دریافت پالس‌ها در امتدادهای دیگر امکان‌پذیر است. بنابراین نحوهٔ قرار دادن مولدها به صورت‌های زیر امکان‌پذیر است (شکل ۱).



الف ـ انتقال مستقیم (سطوح مخالف)

ب ـ انتقال نیمه مستقیم (سطوح مجاور)

ج ـ انتقال غیرمستقیم (دو یک سطح)

شکل ۱ـ روش‌های انتقال و دریافت پالس‌های مافوق صوت

۶-۲ تعیین سرعت پالس در روش انتقال مستقیم

روش انتقال مستقیم مطلوب‌ترین آرایش قرارگیری مولدهاست و در مواردی که امکان‌پذیر است باید از این روش استفاده کرد زیرا حداکثر انرژی پالس‌ها منتقل و دریافت می‌شود. بنابراین تعیین دقیق سرعت پالس اساساً تابع دقت در اندازه‌گیری طول مسیر است. به عبارت دیگر، چنانچه طول مسیر با دقت اندازه‌گیری شود، سرعت پالس تعیین شده از دقت کافی برخوردار خواهد بود.

۶-۳ تعیین سرعت پالس در روش انتقال نیمه مستقیم

در مواردی که از این روش استفاده می‌شود نباید فاصلهٔ بین مولدها چندان زیاد باشد، در غیر این صورت امکان عدم دریافت پالس‌ها وجود دارد. برای تعیین طول مسیر باید فاصله بین مراکز مولدها اندازه‌گیری شود. این روش اندازه‌گیری از دقت کافی برخوردار است.

۶-۴ تعیین سرعت پالس در روش انتقال غیرمستقیم

روش انتقال غیرمستقیم باید در موارد زیر استفاده گردد:

الف ـ فقط یک طرف بتن قابل دسترسی است،

ب ـ عمق ترک باید تعیین گردد،

ج ـ ضخامت لایهٔ سطحی بتن که کیفیت نامطلوب دارد باید اندازه‌گیری شود.

دامنهٔ[1] علائمی که در این روش دریافت می‌شود فقط حدود ۳ درصد نسبت به روش مستقیم است.

بنابراین، روش انتقال غیرمستقیم نسبت به روشهای دیگر دارای حساسیت کمتری است. علاوه بر این، اندازه‌گیری سرعت پالس در این روش تحت اثر لایه سطحی بتن است. این ناحیه اغلب دارای ساختاری متفاوت از تودهٔ بتن بوده و ممکن است که نتایج حاصل نمایندهٔ کل بتن نباشد. سرعت غیرمستقیم کمتر از سرعت مستقیم در همان عضو سازه‌ای است. این اختلاف بسته به کیفیت بتن، بین ۵ تا ۲۰ درصد است. در مواردی که امکان‌پذیر است، باید با اندازه‌گیری در محل، اختلاف مذکور تعیین شود.

1 . Amplitude

در روش غیرمستقیم، اندازه‌گیری طول دقیق مسیر انتقال همراه با عدم قطعیت است. بنابراین برای دقت بیشتر باید یک سری اندازه‌گیری با تغییر دادن وضعیت مولدها، انجام شود. نحوهٔ آزمایش به این صورت است که ابتدا محل مولد فرستنده ثابت نگاهداشته می‌شود و محل مولد گیرنده در فواصل معین و در طول یک خط تغییر می‌یابد. هر دفعه که محل مولد تغییر می‌کند، زمان انتقال پالس اندازه‌گیری می‌شود. فاصلهٔ بین دو مولد در محور x و زمانهای انتقال پالس در محور y نمودار ترسیم می‌گردد. در واقع شیب خط بر اساس نمودار برابر با سرعت پالس است (شکل ۲). چنانچه خط رسم شده غیرپیوسته (غیرمستقیم) باشد نشانه وجود ترک در لایهٔ سطحی است و یا کیفیت لایهٔ سطحی بتن نامطلوب است.

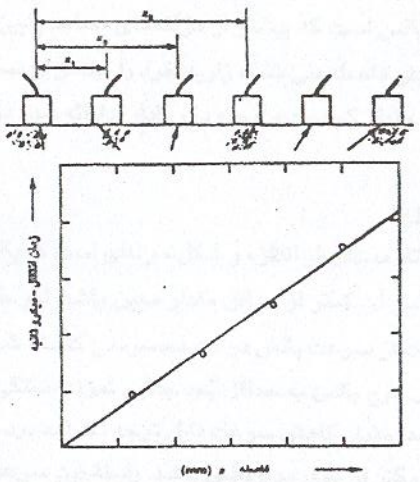
۶-۵ اتصال دادن مولدها بر سطح بتن

به منظور اطمینان از اینکه پالس‌های تولید شده در مولد فرستنده به درون بتن وارد می‌شود و سپس توسط مولد گیرنده دریافت می‌گردند، ضروری است که اتصال صوتی مناسب بین مولدها و سطح بتن برقرار باشد. در بسیاری از موارد، سطح پرداخت شده بتن به اندازه کافی صاف است و با استفاده از مادهٔ مخصوص اتصال و با فشار دادن مولدها روی سطح بتن، تماس صوتی برقرار می‌گردد. در صورت عدم تماس کافی بین مولدها و سطح بتن در سطح مشترک ممکن است حباب هوا ایجاد شود و باعث خطا در اندازه‌گیری زمان انتقال گردد.

مواد مخصوص اتصال تنوع زیادی دارند مانند وازلین، گریس، مایع صابون و خمیر کائولین- گلیسرول[1] که مناسب‌ترین آنها وازلین است. مواد اتصال باید تا حدامکان در ضخامت کم اعمال گردد و در یک محل باید چندین قرائت گرفته شود تا حداقل مقدار زمان انتقال به عنوان نتیجه آزمایش به دست آید.

در مواردی که امکان‌پذیر است باید مولدها روی سطح قالب‌بندی شده بتن قرار داد. ممکن است سطوح ماله‌کشی شده دارای خواصی متفاوت از تودهٔ بتن باشد. اگر آزمایش روی چنین سطوحی ضروری است باید طول بزرگتر مسیر انتخاب شود. برای سطوح قالب‌بندی نشده توصیه می‌شود که حداقل طول مسیر ۵۰ میلیمتر و ۴۰۰ میلیمتر به ترتیب برای روش انتقال مستقیم و غیرمستقیم انتخاب گردد.

1 . Kaolin - Glycerol



شکل ۲ـ تعیین سرعت پالس به روش انتقال غیرمستقیم

وقتی که سطح بتن زبر و ناهموار است، قسمتی از سطح بتن که قرار است مولدها روی آن قرار داده شود باید تراز و صاف گردد. روش دیگر استفاده از رزین اپوکسی و گچ با گیرش سریع است، ولی بین سطح بتن و این مواد صاف کننده باید چسبندگی مناسب باشد تا از انتقال سریع پالس به بتن اطمینان حاصل شود. ضخامت لایه صاف‌کننده باید حد امکان کم و نازک باشد. اگر به ناچار مادهٔ صاف کننده به ضخامت زیاد اعمال می‌شود، باید سرعت پالس در این مواد در محاسبه منظور گردد.

۷ـ عوامل مؤثر در اندازه‌گیری سرعت پالس

۷ـ۱ کلیات

اساساً مقدار سرعت پالس به خواص بتن تحت آزمایش بستگی دارد. ضروری است که عوامل مختلف که بر خواص بتن و سرعت پالس اثر می‌گذارند، در نظر گرفته شود.

۷ـ۲ مقدار رطوبت

مقدار رطوبت دو اثر فیزیکی و شیمیایی بر سرعت پالس دارد. این آثار در هنگام تخمین

مقاومت بتن بر اساس سرعت پالس مهم هستند. ممکن است سرعت پالس در نمونهٔ استاندارد و عضو سازه‌ای که از یک نوع بتن ساخته شده‌اند، تفاوت چشمگیری داشته باشد. قسمت عمده‌ای از این اختلاف به دلیل شرایط متفاوت عمل‌آوری و درجه هیدراتاسیون است و قسمتی از این اختلاف ناشی از وجود آب آزاد در منافذ است. در هنگام تخمین مقاومت این آثار باید در نظر گرفته شوند.

۷ـ۳ دمای بتن

تغییرات دمای بتن بین ۱۰ تا ۳۰°C اثر مهمی بر سرعت پالس ندارد. برای دمای خارج از این محدودهٔ باید سرعت پالس بر اساس جدول ۱ تصحیح گردد.

جدول ۱ـ ضرایب تصحیح اثر دما بر انتقال پالس

دما	درصد تصحیح مقادیر سرعت پالس اندازه‌گیری شده	
(°C)	بتن خشک	بتن اشباع
۶۰	+۵	+۴
۴۰	+۲	+۱/۷
۲۰	۰	۰
۰	۰/۵	-۱
-۴	-۱/۵	-۷/۵

۷ـ۴ طول مسیر

طول مسیری که سرعت پالس در آن اندازه‌گیری می‌شود باید به اندازه کافی طویل باشد به طوری که پالس تحت تأثیر ناهمگنی بتن قرار نگیرد. به جز در شرایطی که در بند ۷ـ۵ ارائه شده است، توصیه می‌شود که برای بتن با حداکثر اندازهٔ سنگدانه ۲۰ میلیمتر، حداقل طول مسیر ۱۰۰ میلیمتر و برای بتن حاوی حداکثر اندازهٔ سنگدانه بین ۲۰ تا ۴۰ میلیمتر حداقل طول مسیر ۱۵۰ میلیمتر انتخاب گردد. به طور کلی، سرعت پالس تحت تأثیر تغییرات طول مسیر قرار نمی‌گیرد. هر چند، ابزار الکترونیکی اندازه‌گیری زمان (این وسیله در دستگاه مافوق صوت تعبیه شده است) ممکن است با افزایش طول مسیر اندکی کاهش در سرعت را نشان دهد. دلیل این پدیده

مؤلفه‌های بسامد بالاتر پالس است که بیشتر از مؤلفه‌های بسامد پایین‌تر کاهش می‌یابند و شکل آغازهٔ پالس با افزایش فاصله طی شده، زاویه خود را بیشتر از دست می‌دهد. معمولاً این کاهش ظاهری سرعت به مقدار کم است و محدودهٔ رواداری ارائه شده در بند ۵ـ۲ است.

۵ـ۷ شکل و اندازهٔ نمونه

سرعت پالس‌های کوتاه مستقل از اندازه و شکل‌نمونه‌ای است که پالس از آن عبور می‌کند، مگر آنکه حداقل بُعد جانبی آن کمتر از حداقل مقدار معین باشد. اگر طول نمونه کمتر از حد مشخص باشد ممکن است از سرعت پالس در حد محسوسی کاسته شود. مقدار این کاهش به طور عمده به نسبت طول موج پالس به حداقل بُعد جانبی نمونه بستگی دارد. ولی اگر نسبت مذکور کمتر از واحد باشد، مقدار کاهش سرعت قابل توجه نخواهد بود. به عبارت دیگر، حداقل بُعد جانبی نمونه باید بزرگتر از طول موج پالس باشد. رابطهٔ بین سرعت پالس در بتن، بسامد مولد و حداقل مجاز بعد جانبی نمونه در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲ ـ اثر ابعاد نمونه بر انتقال پالس

بسامد مولد (KHz)	سرعت پالس در بتن (km/s)		
	V_c=۳/۵	V_c=۴	V_c=۴/۵
	حداقل مجاز بعدجانبی نمونه (mm)		
۲۴	۱۴۶	۱۶۷	۱۸۸
۵۴	۶۵	۷۴	۸۳
۸۲	۴۳	۴۹	۵۵
۱۵۰	۲۳	۲۷	۳۰

مقادیر مندرج در جدول ۲ از رابطه زیر به دست آمده است:

$$\lambda = \frac{V_c}{f}$$

که در آن:

λ = طول موج

V_c = سرعت پالس

f = بسامد ارتعاشات پالس

۶ـ۷ اثر آرماتور

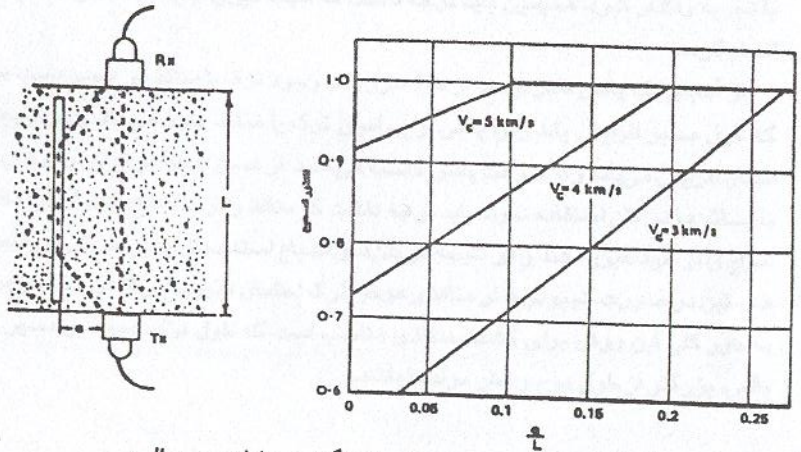
۱ـ۶ـ۷ کلیات

سرعت پالس در بتن مسلح بیشتر از بتن معمولی با همان نوع بتن است. به دلیل آنکه سرعت پالس در فولاد حدود دو برابر سرعت آن در بتن است و در مواردی که اولین پالس را مولد گیرنده دریافت می‌نماید بخشی از بتن و بخش دیگر از فولاد عبور می‌کند.

افزایش ظاهری در سرعت پالس به نزدیکی مولد به آرماتور، قطر و تعداد میلگردها و امتداد آنها نسبت به مسیر انتشار پالس بستگی دارد. به هر حال تصحیح اندازه‌گیری شده دقت تخمین سرعت را کاهش می‌دهد. بنابراین تا آنجایی که امکان دارد باید از نزدیک بودن مولدها به آرماتور اجتناب شود.

۲ـ۶ـ۷ محور آرماتور موازی با مسیر پالس

در مواردی که محور آرماتور به موازات مسیر پالس است، ضریب تصحیح از نمودار شکل ۳ به دست می‌آید. در این شکل، V_c سرعت واقعی پالس و V سرعت ظاهری پالس است.



شکل ۳ـ اثر میلگرد در سرعت پالس: میلگرد به موازات مسیر پالس

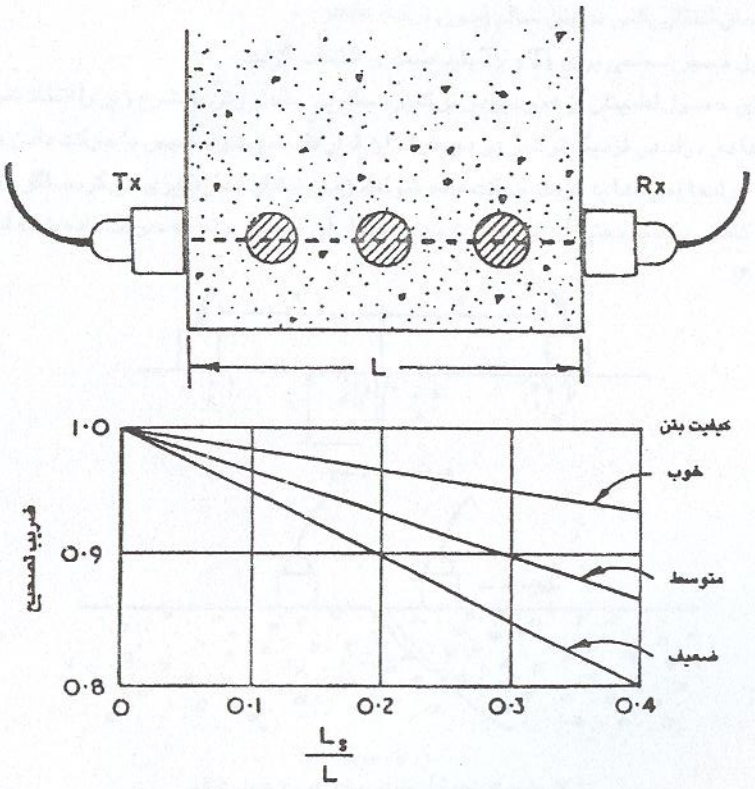
۳ـ۶ـ۷ محور آرماتور عمود بر مسیر پالس

چنانچه محور آرماتور عمود بر مسیر پالس است، ضرائب تصحیح از نمودار شکل ۴ به

دست می‌آید. در این شکل L_s طول مسیر پالس در آرماتور یا به عبارت دیگر مجموع قطر میلگردها می‌باشد. V_c و V در بند ۷ـ۶ـ۲ تعریف شده است.

۸ـ تعیین یکنواختی بتن

ناهمگنی بتن، در عضو یا اعضاء باعث تغییر در سرعت پالس می‌شود که به نوبهٔ خود نشانهٔ تغییر در کیفیت بتن است. اندازه‌گیری سرعت پالس می‌تواند وسیله‌ای باشد که بررسی همگنی بتن را فراهم کند، به همین منظور با توجه به حجم بتن، تعدادی نقاط سرعت پالس در سازه انتخاب می‌گردد.



شکل ۳ـ اثر میلگرد در سرعت پالس: میلگرد عمود بر مسیر پالس

تعداد نقاط آزمایش به اندازهٔ سازه، دقت مورد نیاز و محدودهٔ تغییرات در بتن بستگی دارد. معمولاً محدودهٔ آزمایش در شبکه‌ای ۱ متری (متر۱×۱) کافی است ولی در مواردی که عضو کوچک است یا تغییرات کیفی بتن زیاد می‌باشد، بهتر است شبکه‌ای کوچکتر انتخاب گردد. می‌توان زمان انتقال اندازه‌گیری شده را برای ارزیابی یکنواختی مورد استفاده قرار داد، که در این صورت نیاز به محاسبه سرعت پالس نیست. این روش بخصوص در مواردی که اندازه‌گیری با روش غیرمستقیم انجام می‌شود، مناسب است.

همگنی در بتن را می‌توان به صورت پارامتر آماری، مانند انحراف معیار یا ضریب تغییرات سرعت پالس در محدودهٔ شبکه آزمایش نشان داد. هر چند، این پارامترها فقط در مواردی کاربرد دارند که تغییرات در اعضای بتنی با ابعاد مشابه تحت بررسی می‌باشد.

۹ـ کشف نارسائی‌ها در بتن

۹ـ۱ کلیات

استفاده از روش مافوق صوت برای کشف و وسعت آسیب‌دیدگی بتن باید منحصراً به افراد با تجربه واگذار شود. همچنین باید توجه داشت که نتیجه‌گیری نباید بر اساس فقط یک قرائت انجام گردد.

از آنجایی که پالس قادر نیست از هوا عبور کند، وجود ترک یا منافذ در مسیر سبب می‌گردد که طول مسیر افزایش یابد زیرا پالس از پیرامون ترک یا منافذ عبور می‌کند و در نتیجه زمان انتقال افزایش می‌یابد و از سرعت پالس کاسته می‌شود. از همین پدیده می‌توان برای بررسی این نارسائی‌ها در بتن استفاده نمود. باید توجه داشت که منافذ و ترک اشباع شده از آب قادرند که امواج را از خود عبور دهند و در نتیجه در بتن‌های اشباع استفاده از این روش توصیه نمی‌شود. همچنین در صورت کم بودن قطر منافذ و عرض ترک احتمال عبور پالس از آن منافذ وجود دارد. به طور کلی این روش برای کشف منافذی مناسب است که طول ترک عمود بر مسیر حرکت پالس، بزرگتر از طول موج و قطر مولدها باشد.

۹ـ۲ کشف منافذ و حفره‌ها

برای کشف حفره بزرگ در بتن، شبکه‌ای بر سطح بتن باید رسم گردد و سپس چندین نقطه از شبکه تحت آزمایش به روش مستقیم انجام شود. در صورت وجود حفره در نقطه مورد نظر، سرعت پالس کاهش می‌یابد. تخمین اندازهٔ حفره بر این اصل استوار است که پالس‌ها از

کوتاهترین مسیر عبور می‌کنند و از پیرامون حفره می‌گذرند.

۳-۹ تخمین عمق ترک سطحی

برای تخمین عمق ترک عمود بر سطح بتن، از روش انتقال غیرمستقیم استفاده می‌گردد. دو مولد گیرنده و فرستنده در دو طرف ترک در فاصله‌ای مساوی X بر سطح بتن قرار داده می‌شود (شکل ۵). با استفاده از رابطه زیر عمق ترک قابل محاسبه است :

$$h=\left(\frac{X}{T_2^2}\right)\left(T_1^2-T_2^2\right)^{1/2}$$

X= فاصله مولد از ترک، mm

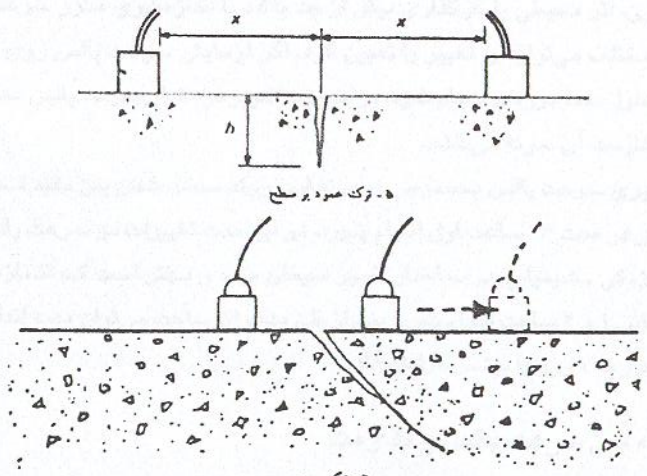
T_1= زمان انتقال پالس در بتن ترک خورده، μsec

T_2= زمان انتقال پالس در بتن سالم (بدون ترک)، μsec

طول مسیر سطحی برای T_1 و T_2 باید مساوی انتخاب گردد.

برای حصول اطمینان از عمود بودن ترک بر سطح بتن باید روش به شرح زیر را اتخاذ نمود :

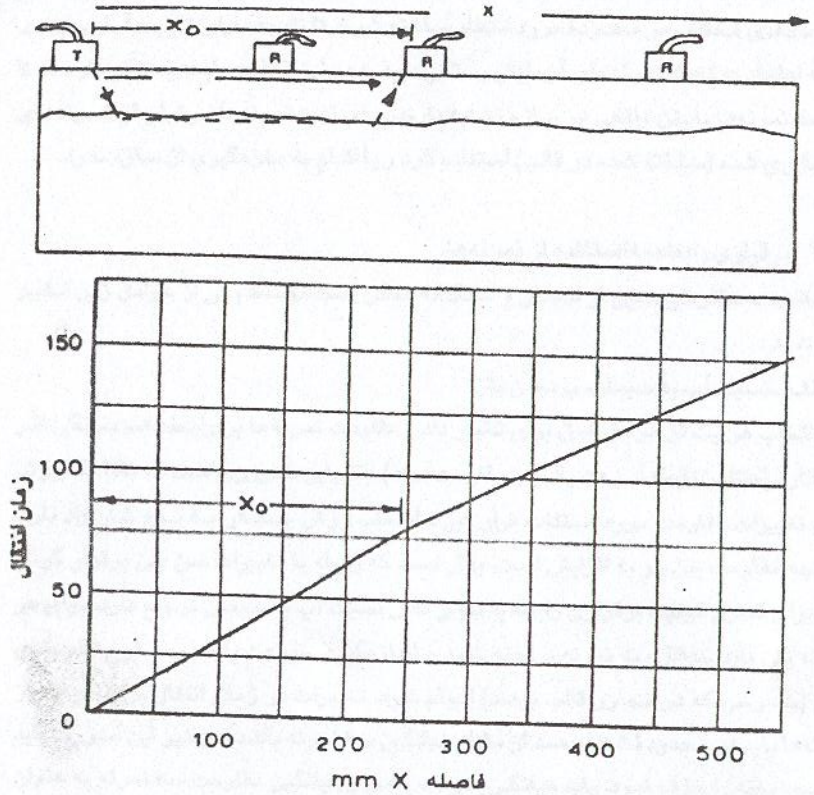
ابتدا دو مولد در نزدیک ترک و در دو طرف آن قرار داده می‌شود. سپس با حرکت دادن فقط یکی‌از مولدها (مولدها به نوبت حرکت داده شوند)، زمان انتقال اندازه‌گیری می‌گردد. اگر زمان انتقال کاهش یابد به معنی آن است که ترک در امتداد آن مولدی بوده که حرکت داده شده است (شکل ۶).



شکل ۵ و ۶- نحوهٔ آزمایش برای تعیین عمق ترک

۴-۹ تخمین عمق لایه آسیب‌دیده

ممکن است لایهٔ سطحی بتن دارای کیفیت نامطلوب باشد. این پدیده ممکن است به دلیل ساخت نامناسب یا به دلیل آسیب‌دیدگی ناشی از آتش‌سوزی، یخ‌زدگی، حمله سولفاتها و غیره باشد. ضخامت لایهٔ آسیب دیده را می‌توان با استفاده از اندازه‌گیری مافوق صوت محاسبه نمود.



شکل ۷- نحوهٔ آزمایش تعیین عمق لایه آسیب‌دیده و نمودار مربوط

مطابق بند ۶-۳ و بر اساس روش انتقال غیرمستقیم، مولدها بر روی سطح بتن قرار داده

می‌شوند و زمان انتقال اندازه‌گیری می‌شود، سپس تغییر دادن فاصله مولدها و اندازه‌گیری زمان انتقال به دفعات تکرار می‌گردد. نتایج حاصل به صورت نمودار، مانند شکل ۷ ترسیم می‌شود. موقعی که مولدها در فاصله کم از یکدیگر قرار دارند، پالس از میان لایه سطحی عبور می‌کند و شیب خط نمودار نشانهٔ سرعت پالس در لایه سطحی است. اما با افزایش فاصله مولدها از مقداری معین، پالس از لایه عمیق با کیفیت بهتر بتنی عبور می‌کند و شیب خط به دست آمده، سرعت پالس در آن لایه را نشان می‌دهد. ضخامت لایه ضعیف t از رابطه زیر به دست می‌آید :

$$t=\frac{X_0}{2}\sqrt{\frac{V_s - V_d}{V_s + V_d}}$$

که در آن :

X_0 = فاصله‌ای که شیب خط تغییر کرده است (mm)

V_s = سرعت پالس در بتن سالم (لایهٔ زیرین) $(\frac{Km}{S})$

V_d = سرعت پالس در بتن آسیب دیده (لایهٔ سطحی) $(\frac{Km}{S})$

۱۰ـ تعیین تغییرات در خواص بتن

چنانچه در خواص بتن تغییری با گذشت زمان ایجاد گردد و دلیل آن تغییر، فرآیند هیدراتاسیون، اثر محیطی یا بارگذاری بیش از حد باشد با اندازه‌گیری مکرر سرعت پالس در زمان‌های مختلف می‌توان آن تغییر را تعیین کرد. اگر آزمایش سرعت پالس روی یک نمونه معین و در طول مدت دوره‌ای انجام شود، در صورت تغییر در مقدار سرعت پالس معمولاً نشانهٔ تغییر در مقاومت آن نمونه می‌باشد.

اندازه‌گیری سرعت پالس بخصوص برای تعقیب روند سخت شدن بتن مفید است، به ویژه اگر آزمایش در مدت ۳۶ ساعت اول انجام پذیرد. در این مدت تغییرات در سرعت پالس به دلیل تغییرات فیزیکی ـ شیمیایی در ساختار خمیر سیمان بوده و بهتر است که اندازه‌گیری در فواصل زمانی ۱ و ۲ ساعت انجام شود. پس از طی مدت ۳۶ ساعت می‌توان مدت اندازه‌گیری را طولانی کرد و به ۱ روز یا بیشتر افزایش داد.

۱۱ـ رابطه بین سرعت پالس و مقاومت

۱ـ۱۱ کلیات

معمولاً کیفیت بتن، بر حسب مقاومت آن ذکر می‌شود، بنابراین اندازه‌گیری سرعت پالس

برای تخمین مقاومت گاهی اوقات مفید واقع می‌شود.

رابطه بین سرعت پالس و مقاومت تحت‌تأثیر تعدادی عوامل مانند سن، شرایط محیط، شرایط رطوبت، نسبت‌های مخلوط، نوع سنگدانه و سیمان می‌باشد. اگر نیاز به تعیین مقاومت است ضروری است که بین مقاومت و سرعت رابطه‌ای برای نوع بتن تحت آزمایش برقرار گردد. برای برقرار کردن رابطه باید بر روی تعداد نمونه کافی آزمایش انجام شود. نمونه‌ها باید با مقاومت‌های مختلف در محدودهٔ مورد انتظار ساخته شوند تا نتیجه دارای قابلیت آماری باشد. درجه اعتماد به تعداد نمونه‌های آزمایش بستگی دارد. همچنین قابلیت رابطه بستگی دارد که تا چه حد نمونه‌ها با بتن واقعی در سازه تشابه دارند. برای تهیه نمونه‌ها می‌توان از نمونه‌های قالب‌گیری شده (ساخته شده در قالب) استفاده کرد و یا اقدام به مغزه‌گیری از سازه نمود.

۲ـ۱۱ برقراری رابطه با استفاده از نمونه‌ها

مقاومت مخلوطی معین از سیمان و سنگدانه ممکن است توسط یکی از عوامل زیر تغییر داده شود :

الف ـ نسبت آب به سیمان، ب ـ سن بتن

انتخاب هر یک از عوامل فوق برای تغییر دادن مقاومت نمونه‌ها بر رابطه همبستگی اثر می‌گذارد (منظور رابطه سرعت پالس و مقاومت است). بنابراین ضروری است که فقط یک روش برای تغییرات مقاومت مورد استفاده قرار گیرد. انتخاب روش بستگی به نوع کاربرد دارد. چنانچه مقاومت بتن رو به افزایش است، بهتر است که رابطه با تغییرات سن بتن برقرار گردد. ولی برای کنترل کیفیت برقراری رابطه با تغییر دادن نسبت آب به سیمان ترجیح دارد. برای هر پیمانه بتن باید حداقل سه نمونه ساخته شود و اندازه‌گیری سرعت باید در سطوح قالب‌بندی شده (سطوحی که در مجاور قالب بودند) انجام شود. تغییرات در زمان انتقال برای هر یک از نمونه‌ها باید در محدودهٔ ۵± درصد از مقدار میانگین سه نمونه باشد، در غیر این صورت باید آن سه نمونه را حذف نمود. باید میانگین سرعت پالس و میانگین مقاومت سه نمونه به عنوان یک نقطه از منحنی رابطه مورد استفاده قرار گیرد.

۳ـ۱۱ برقراری رابطه با استفاده از مغزه‌ها

معمولاً در مواردی که رابطه همبستگی بر مبنای مغزه‌ها به دست می‌آید امکان تغییرات

اختیاری مقاومت بتن وجود ندارد. بنابراین باید آزمایش سرعت پالس در نقاط مختلف سازه انجام شود تا محل‌هایی که کیفیت متفاوت دارند مشخص شوند، سپس از آن نقاط مغزه‌گیری می‌گردد. قبل از انجام دادن آزمایش مقاومت فشاری روی مغزه‌ها باید اجرا گردد، سپس منحنی رابطه بین مقاومت فشاری و سرعت پالس ترسیم شود. برای تهیه و آماده‌سازی مغزه‌ها به استاندارد شمارهٔ ...؟؟؟ مراجعه شود.

۱۱-۳ تخمین مقاومت قطعات پیش‌ساخته

وقتی که تطابق مقاومت قطعات پیش‌ساخته با مقدار مقاومت مورد نظر ضروری است می‌توان از منحنی رابطه همبستگی استفاده کرد. سرعت پالس باید در نقاطی از قطعه اندازه‌گیری شود که آن نقاط حساسیت بیشتری دارند و در هنگام بارگذاری تحت تنش بیشتری قرار می‌گیرد. روش به دست آوردن منحنی رابطه طبق بند ۱۱-۲ می‌باشد.

۱۲-تعیین مدول الاستیسیته و نسبت پواسون دینامیکی

رابطه بین مدول الاستیسیته و سرعت پالس مافوق صوت از فرمول زیر به دست می‌آید :

$$Ed=\rho V^2 \frac{(1+\mu)(1-2\mu)}{(1-\mu)}$$

که در آن :

Ed=مدول الاستیسیته دینامیکی $(\frac{MN}{m^2})$، μ=نسبت پواسون دینامیکی، ρ=دانسیته بتن $(\frac{Kg}{m^3})$ و V = سرعت پالس $(\frac{Km}{S})$

اگر مقادیر ρ و V مشخص باشد می‌توان مقدار Ed را از فرمول فوق به دست آورد.

همین‌طور چنانچه مقادیر Ed و ρ معلوم باشد می‌توان V را محاسبه کرد.

از آنجایی که برای بتن معمولی تغییرات V و ρ نامحسوس است در این صورت با تعیین سرعت پالس V می‌توان Ed را به آسانی محاسبه نمود.

با تعیین مدول دینامیکی و با استفاده از جدول ۳ می‌توان مدول استاتیک را به دست آورد. مقادیر مندرج در جدول ۳ بر پایه تجربی به دست آمده است و فقط برای بتن‌های معمولی کاربرد دارد. تخمین مدول‌ها بر اساس جدول ۳ دارای دقت ۱۰± درصد است.

جدول ۳- رابطه تجربی بین مدول الاستیسیته استاتیک و دینامیک و سرعت پالس

سرعت پالس $(\frac{Km}{s})$	مدول الاستیک الاستیسیته	
	دینامیک $\frac{MN}{m^2}$ بتن خشک	استاتیک $\frac{MN}{m^2}$
۳/۶	۲۳۰۰۰	۱۳۰۰۰
۳/۸	۲۶۰۰۰	۱۵۰۰۰
۴/۰	۲۹۰۰۰	۱۸۰۰۰
۴/۲	۳۲۰۰۰	۲۲۰۰۰
۴/۴	۳۶۰۰۰	۲۷۰۰۰
۴/۶	۴۲۰۰۰	۳۴۰۰۰
۴/۸	۴۹۰۰۰	۴۳۰۰۰
۵/۰	۵۸۰۰۰	۵۲۰۰۰

۱۳-گزارش

گزارش سرعت مافوق صوت باید حاوی اطلاعات به شرح زیر باشد :

الف - تاریخ، زمان و مکان آزمایش

ب - ترکیب بتن شامل :

۱- نوع سیمان

۲- مقدار سیمان

۳- نسبت آب به سیمان

۴- نوع و اندازه سنگدانه

۵- نوع مواد افزودنی

ج - شرایط عمل‌آوری، دما و سن بتن در هنگام آزمایش

د - شرایط محیطی که بتن برای آن طراحی شده است.

هـ - شکل محل موقعیت مولدها. در صورت وجود آرماتور باید در شکل، محل آن مشخص باشد.

و - شرایط سطح آزمایش (مثلاً صاف، زبر، ماله‌کشی شده، وجود ترک سطحی و غیره)

ز ـ تخمین شرایط رطوبت بتن (مثلاً مرطوب، اشباع و خشک)

ح ـ طول مسیر انتقال و روش آزمایش (مستقیم و غیره)

ط ـ مقادیر سرعت پالس و در صورت تصحیح مقادیر به دلیل وجود آرماتور باید ذکر گردد.

مراجع :

1- ASTM, C597-83. "Pulse Velocity, Through Concrete", American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1990.

2- BS 1881, Part 203. "Recommendations for Measurement of Velocity of Ultrasonic Pulses in Concrete", British Standards Institation, London, 1986.

3- Bungey, G.H. "The Testing of Concrete in Structure", Surrey University Press, New York, 1989.