INSO
17315
1st.Edition
Mar.2014

جمهوری اسلامی ایران
Islamic Republic of Iran
سازمان ملی استاندارد ایران
Iranian National Standardization Organization

استاندارد ملی ایران
۱۷۳۱۵
چاپ اول
اسفند ۱۳۹۲

اندازه‌گیری سرعت موج P و ضخامت صفحات بتنی توسط روش ضربه- بازتاب- روش آزمون

Measuring the P-Wave Speed and the Thickness of Concrete Plates Using the Impact-Echo Method- Test Method

ICS: 91.100.30

به نام خدا

آشنایی با سازمان ملی استاندارد ایران

مؤسسهٔ استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران به موجب بند یک مادهٔ۳ قانون اصلاح قوانین و مقررات مؤسسهٔ استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران، مصوب بهمن ماه ۱۳۷۱ تنها مرجع رسمی کشور است که وظیفه تعیین، تدوین و نشر استانداردهای ملی (رسمی) ایران را به عهده دارد.

نام موسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران به موجب یکصد و پنجاه و دومین جلسه شورای عالی اداری مورخ ۹۰/۶/۲۹ به سازمان ملی استاندارد ایران تغییر و طی نامه شماره ۲۰۶/۳۵۸۳۸ مورخ ۹۰/۷/۲۴ جهت اجرا ابلاغ شده است.

تدوین استاندارد در حوزه های مختلف در کمیسیون های فنی مرکب از کارشناسان سازمان، صاحب نظران مراکز و مؤسسات علمی، پژوهشی، تولیدی و اقتصادی آگاه و مرتبط انجام می شود وکوششی همگام با مصالح ملی و با توجه به شرایط تولیدی، فناوری و تجاری است که از مشارکت آگاهانه و منصفانهٔ صاحبان حق و نفع، شامل تولیدکنندگان، مصرف‌کنندگان، صادرکنندگان و وارد کنندگان، مراکز علمی و تخصصی، نهادها، سازمان های دولتی و غیر دولتی حاصل می شود . پیش نویس استانداردهای ملی ایران برای نظرخواهی به مراجع ذی نفع و اعضای کمیسیون های فنی مربوط ارسال می‌شود و پس از دریافت نظرها و پیشنهادها در کمیتهٔ ملی مرتبط با آن رشته طرح و در صورت تصویب به عنوان استاندارد ملی (رسمی) ایران چاپ و منتشر می شود.

پیش نویس استانداردهایی که مؤسسات و سازمان های علاقه مند و ذی صلاح نیز با رعایت ضوابط تعیین شده تهیه می کنند درکمیتهٔ ملی طرح و بررسی و درصورت تصویب، به عنوان استاندارد ملی ایران چاپ و منتشر می شود . بدین ترتیب، استانداردهایی ملی تلقی می شوند که بر اساس مفاد نوشته شده در استاندارد ملی ایران شمارهٔ ۵ تدوین و در کمیتهٔ ملی استاندارد مربوط که سازمان ملی استاندارد ایران تشکیل می‌دهد به تصویب رسیده باشد.

سازمان ملی استاندارد ایران از اعضای اصلی سازمان بین المللی استاندارد (ISO)[1]، کمیسیون بین المللی الکتروتکنیک (IEC)[2] و سازمان بین المللی اندازه شناسی قانونی (OIML)[3] است و به عنوان تنها رابط[4] کمیسیون کدکس غذایی (CAC)[5] در کشور فعالیت می کند. در تدوین استانداردهای ملی ایران ضمن توجه به شرایط کلی و نیازمندی های خاص کشور، از آخرین پیشرفت های علمی، فنی و صنعتی جهان و استانداردهای بین‌المللی بهره‌گیری می‌شود .

سازمان ملی استاندارد ایران می تواند با رعایت موازین پیش بینی شده در قانون، برای حمایت از مصرف کنندگان، حفظ سلامت و ایمنی فردی و عمومی، حصول اطمینان از کیفیت محصولات و ملاحظات زیست محیطی و اقتصادی، اجرای بعضی از استانداردهای ملی ایران را برای محصولات تولیدی داخل کشور و/ یا اقلام وارداتی، با تصویب شورای عالی استاندارد، اجباری نماید.

سازمان می تواند به منظور حفظ بازارهای بین المللی برای محصولات کشور، اجرای استاندارد کالاهای صادراتی و درجه‌بندی آن را اجباری نماید. همچنین برای اطمینان بخشیدن به استفاده کنندگان از خدمات سازمان ها و مؤسسات فعال در زمینهٔ مشاوره، آموزش، بازرسی، ممیزی و صدور گواهی سیستم های مدیریت کیفیت و مدیریت زیست‌محیطی، آزمایشگاه ها و مراکز کالیبراسیون (واسنجی) وسایل سنجش، سازمان ملی استاندارد ایران این گونه سازمان ها و مؤسسات را بر اساس ضوابط نظام تأیید صلاحیت ایران ارزیابی می کند و در صورت احراز شرایط لازم، گواهینامهٔ تأیید صلاحیت به آن ها اعطا و بر عملکرد آن ها نظارت می کند. ترویج دستگاه بین المللی یکاها، کالیبراسیون (واسنجی) وسایل سنجش، تعیین عیار فلزات گرانبها و انجام تحقیقات کاربردی برای ارتقای سطح استانداردهای ملی ایران از دیگر وظایف این سازمان است.

1- International Organization for Standardization
2 - International Electrotechnical Commission
3- International Organization of Legal Metrology (Organisation Internationale de Metrologie Legale)
4 - Contact point
5 - Codex Alimentarius Commission

کمیسیون فنی تدوین استاندارد

«اندازه‌گیری سرعت موج P و ضخامت صفحات بتنی توسط روش ضربه- بازتاب-روش آزمون»

رئیس:	**سمت و/یا نمایندگی**
سعادت، سینا (کارشناس ارشد مهندسی عمران)	دانشگاه آزاد اسلامی واحد بوشهر
دبیر:	
معافی، حسن (کارشناس مهندسی عمران)	اداره کل استاندارد استان فارس
اعضا: (اسامی به ترتیب حروف الفبا)	
توکلی، غلامرضا (کارشناس مهندسی عمران)	آزمایشگاه فنی ومکانیک خاک فارس
حاجی باقری، بنت الهدی (کارشناس مهندسی صنایع)	سازمان صنعت، معدن وتجارت فارس
خضرا، بابک (کارشناس مهندسی عمران)	اداره کل استاندارد فارس
خواجه پور، مهرداد (کارشناس مهندسی عمران)	اداره کل راه وشهرسازی استان فارس
خوش بیان، سهیل (کارشناس فیزیک)	شرکت بتن و بستر آزما
سعادت، مریم (کارشناس شیمی)	آزمایشگاه معیار گستر توس

شفیعی، امیر حسین (کارشناس ارشد مهندسی عمران)	دانشگاه شیراز
ظل انوار، محد علی (کارشناس مهندسی برق)	اداره کل استاندارد فارس
فهندژ سعدی، هورزاد (کارشناس ارشد فیزیک)	شرکت بتن و بستر آزما
کریم زاده، محمدامین (کارشناس ارشد مهندسی عمران)	آزمایشگاه فنی ومکانیک خاک فارس
مجرد، محمد (کارشناس مهندسی عمران)	شرکت بتن و بستر آزما
مصلایی، مهرداد (کارشناس ارشد شیمی- فیزیک)	اداره کل استاندارد فارس
منصوری، نادر (کارشناس مهندسی مکانیک)	اداره کل استاندارد فارس
واحدی، علی (کارشناس ارشد فیزیک)	شرکت بتن و بستر آزما

فهرست مندرجات

عنوان **صفحه**

آشنایی با سازمان ملی استاندارد ب
کمیسیون فنی تدوین استاندارد ج
پیش گفتار و
۱ هدف و دامنه کاربرد ۱
۲ مراجع الزامی ۱
۳ اصطلاحات و تعاریف ۲
۴ اهمیت و کاربرد ۵
۵ روش الف- اندازه‌گیری سرعت موج P ۶
۶ خلاصه روش آزمون ۶
۷ دستگاه آزمایش ۶
۸ آماده‌سازی دستگاه آزمایش ۸
۹ روش کار ۸
۱۰ تحلیل داده و محاسبات ۹
۱۱ روش ب- آزمون ضربه- بازتاب ۱۰
۱۲ خلاصه روش آزمون ۱۰
۱۳ دستگاه ۱۱
۱۴ آماده‌سازی سطح آزمون ۱۲
۱۵ روش کار ۱۲
۱۶ تحلیل داده‌ها ۱۴
۱۷ تفسیر نتایج (خطاهای سیستماتیک) ۱۴
۱۸ گزارش آزمون ۱۶
۱۹ دقت و انحراف ۱۷
پیوست الف (اطلاعاتی) خطاهای سیستماتیک ۱۸

پیش گفتار

استاندارد «اندازه‌گیری سرعت موج P و ضخامت صفحات بتنی توسط روش ضربه- بازتاب-روش آزمون» که پیش نویس آن در کمیسیون های مربوط توسط سازمان ملی استاندارد ایران تهیه و تدوین شده است و در چهارصد و هفتادمین اجلاس کمیته ملی استاندارد مهندسی ساختمان و مصالح و فرآورده‌های ساختمانی مورخ ۱۳۹۲/۱۱/۲۷ مورد تصویب قرار گرفته است، اینک به استناد بند یک ماده ۳ قانون اصلاح قوانین و مقررات موسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران، مصوب بهمن ماه ۱۳۷۱، به عنوان استاندارد ملی ایران منتشر می شود.

برای حفظ همگامی و هماهنگی با تحولات و پیشرفت های ملی و جهانی در زمینه صنایع، علوم و خدمات، استانداردهای ملی ایران در مواقع لزوم تجدید نظر خواهد شد و هر پیشنهادی که برای اصلاح و تکمیل این استانداردها ارائه شود، هنگام تجدید نظر در کمیسیون فنی مربوط مورد توجه قرار خواهد گرفت. بنابراین، باید همواره از آخرین تجدید نظر استانداردهای ملی استفاده کرد.

منبع و ماخذی که برای تهیه این استاندارد مورد استفاده قرار گرفته به شرح زیر است:

ASTM C1383-04(2010) Standard Test Method for Measuring the P-Wave Speed and the Thickness of Concrete Plates Using the Impact-Echo Method

اندازه‌گیری سرعت موج P[1] و ضخامت صفحات بتنی توسط روش ضربه- بازتاب

۱ هدف و دامنه کاربرد

هدف از تدوین این استاندارد تعیین ضخامت دال‌های بتنی، روسازی‌ها، عرشه پل‌ها، دیوارها یا سایر سازه‌های صفحه‌ای شکل توسط روش ضربه-بازتاب می‌باشد.

برای انجام این آزمون از دو روش استفاده می‌شود:

روش الف- اندازه‌گیری سرعت موج P

این روش زمان گذر موج P ناشی از ضربه نقطه‌ای کوتاه مدت بین دو مبدل با فاصله مشخص در راستای سطح سازه را اندازه می‌گیرد. سرعت موج P از تقسیم فاصله دو مبدل بر زمان گذر محاسبه می‌گردد.

روش ب- روش ضربه-بازتاب

این روش بسامد (فرکانس) موج P ناشی از ضربه نقطه‌ای کوتاه مدت که ما بین دو سطح موازی (مخالف) یک صفحه بازتابیده می‌شود، اندازه می‌گیرد. ضخامت با استفاده از این بسامد اندازه‌گیری شده و سرعت موج P حاصل از روش الف محاسبه می‌شود.

یادآوری- در صورت مشخص نبودن، هر دو روش الف و ب باید در هر نقطه برای تعیین ضخامت انجام شود.

۲ مراجع الزامی

مدارک الزامی زیر حاوی مقرراتی است که در متن این استاندارد ملی ایران به آن‌ها ارجاع داده شده است. بدین ترتیب آن مقررات جزئی از این استاندارد ملی ایران محسوب می‌شود.

در صورتی که به مدرکی با ذکر تاریخ انتشار ارجاع داده شده باشد، اصلاحیه ها و تجدید نظرهای بعدی آن مورد نظر این استاندارد ملی ایران نیست. در مورد مدارکی که بدون ذکر تاریخ انتشار به آن ها ارجاع داده شده است، همواره آخرین تجدید نظر و اصلاحیه های بعدی آن ها مورد نظر است.

استفاده از مراجع زیر برای این استاندارد الزامی است:

2-1 ASTM C597, Test Method for Pulse Velocity through Concrete

2-2 ASTM E1316, Terminology for Nondestructive Examinations

۳ اصطلاحات و تعاریف

در این استاندارد علاوه بر اصطلاحات و تعاریف استاندارد بند ۲-۲، اصطلاحات و تعاریف زیر نیز به کار می‌رود:

[1] Primary wave- اصطلاح موج P در سایر استانداردهای ملی ایران نیز به همین صورت آمده است.

۱-۳

امپدانس صوتی[1]

حاصل‌ضرب سرعت موج P در چگالی که در محاسبات خصوصیات بازتاب موج تنشی در مرزها استفاده می‌شود.

۲-۳

طیف دامنه

نمودار دامنه نسبی بر حسب بسامد که از شکل موج و با استفاده از روش تبدیل فوریه بدست می‌آید.

۳-۳

تبدیل فوریه

روشی عددی است که برای تبدیل شکل موج دیجیتال از دامنه زمانی به دامنه بسامدی به کار برده می‌شود.

یادآوری- نقاط پیک طیف دامنه متناظر با بسامد غالب موج هستند.

۴-۳

روش ضربه-بازتاب

یک روش آزمون غیرمخرب فرستنده-مبدلی است که بر پایه استفاده از یک ضربه مکانیکی کوتاه‌مدت برای تولید امواج تنشی گذرا و بکارگیری یک مبدل باند پهن در مجاورت نقطه ضربه بنا نهاده شده است.

یادآوری- موج‌ها به دامنه بسامدی تبدیل شده و طیف های دامنه حاصله تحلیل می‌شوند تا بسامدهای غالب در پاسخ سازه به ضربه تعیین گردند.

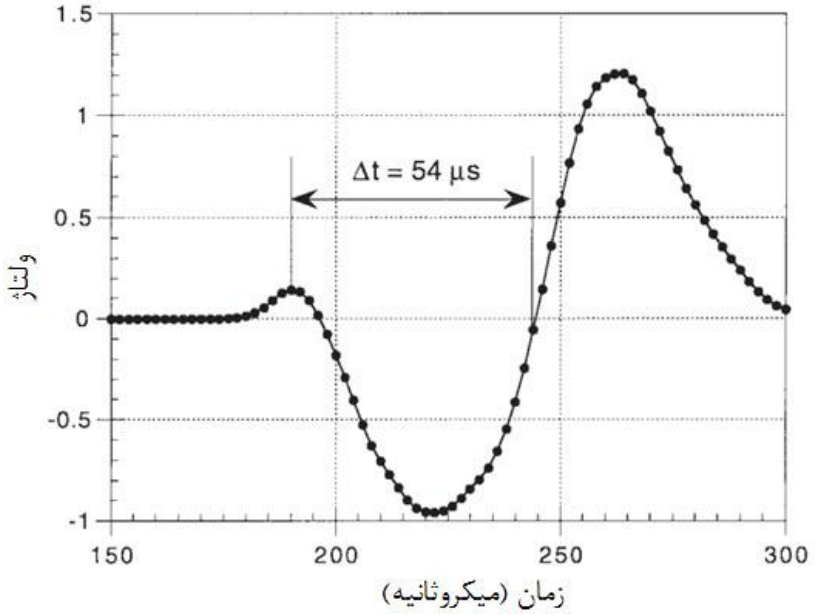
۵-۳

مدت ضربه

مدت زمانی است که کوبه تولیدکننده امواج تنشی، در تماس با سطح تحت آزمایش می‌باشد. زمان تماس نیز نامیده می‌شود.

یادآوری- مدت ضربه یک عامل اساسی در موفقیت دو روش دربرگرفته این استاندارد می‌باشد. مدت ضربه‌های توصیه شده ارائه گردیده اند. در عمل، مدت ضربه به نوع کوبه و وضعیت بتن در نقطه ضربه بستگی دارد. سطوح صاف، سخت مدت ضربه کوتاهتری نسبت به سطوح زبر نرم دارند. مصرف‌کننده موظف است که مطابقت مدت ضربه را با بازه توصیه‌شده بررسی نماید. اندازه تقریبی مدت ضربه را می‌توان از آن بخش موج که متناظر با موج سطحی ورودی است، بدست آورد. شکل (۱) مثالی از بخش موج سطحی و زمان تماس تقریبی را نشان می‌دهد.

[1] acoustic impedance



شکل ۱- نمایی بزرگ‌شده از بخش موج سطحی که عرض سیگنال موج سطحی را به عنوان تقریبی از زمان تماس ضربه نشان می‌دهد

۶-۳

موج P

موج اتساعی (طولی یا P) که سبب جابجایی ذرات در راستایی موازی با راستای انتشار موج می‌شود. این موج در حین انتشار تولید تنش‌های عمودی (کششی یا فشاری) می‌نماید.

۷-۳

سرعت موج P

سرعتی است که موج P با آن در محیط توپر نیمه-نامحدود منتشر می‌شود.

یادآوری- سرعت موج P همان سرعت ضربان (پالس) فشاری می‌باشد که در روش آزمون بند ۲-۱ اندازه‌گیری می‌شود.

۸-۳

بسامد نمونه‌برداری

نرخی است که در آن نقاط تشکیل‌دهنده شکل موج ثبت می‌شوند. معکوس بازه نمونه‌برداری، به صورت هرتز یا نمونه بیان می‌شود (نرخ نمونه‌برداری نیز خوانده می‌شود).

۹-۳

دوره تناوب نمونه‌برداری

مدت زمان شکل موج، که برابر است با حاصلضرب تعداد نقاط شکل موج در بازه نمونه‌برداری

۱۰-۳

بازه نمونه‌برداری

اختلاف زمان مابین هر دو نقطه مجاور در شکل موج

۱۱-۳

موج سطحی

موجی تنشی است که سبب حرکت بیضوی ذرات میشود. دامنه حرکت ذرات به سرعت در عمق کاهش می‌یابد. موج رایلی نیز نامیده می‌شود.

۱۲-۳

شکل موج

سیگنالی ثبت‌شده از مبدل است که به صورت نمودار ولتاژ بر حسب زمان ترسیم می‌شود.

۱۳-۳

سرعت ظاهری موج P در صفحه

پارامتری است که برابر ۰/۹۶ سرعت موج P می‌باشد:

$$C_{p,plate} = 0.96C_p \qquad (۱)$$

که در آن:

$C_{p,\ plate}$ سرعت ظاهری موج P در صفحه بر حسب متر بر ثانیه؛

C_p سرعت ظاهری موج P در بتن برحسب متر بر ثانیه که از روش الف بدست می‌آید.

یادآوری- این پارامتر در محاسبات ضخامت صفحات در اندازه‌گیری به روش ضربه-بازتاب بکار برده می‌شود. سرعت موج P در یک ماده (بتن) قابل تبدیل به سرعت ظاهری موج P در یک صفحه می‌باشد که در محاسبه ضخامت صفحه از طریق رابطه زیر استفاده می‌شود:

$$T = \frac{C_{P,plate}}{2f} \qquad (۲)$$

که در آن:

T ضخامت صفحه بر حسب متر

f بسامد مود ضخامت موج P صفحه می‌باشدکه از طیف دامنه تعیین می‌گردد (هرتز).

۱۴-۳

صفحه

هر سازه منشوری که در آن ابعاد جانبی حداقل ۶ برابر ضخامت آن باشند.

یادآوری-حداقل ابعاد جانبی جهت جلوگیری از تداخل نوسانات صفحه ای با شناسایی بسامد ضخامت در طیف دامنه ضروری می-باشد. حداقل ابعاد جانبی و دوره تناوب نمونه‌برداری قابل‌قبول، همانگونه که در یادآوری بند ۶-۲-۳-۳ نشان داده شده‌است، با هم مرتبط هستند.

۴ اهمیت و کاربرد

۴-۱ این روش آزمون را می‌توان به عنوان جایگزین یا به همراه روش مغزه‌گیری در تعیین ضخامت دال‌ها، روسازی‌ها، عرشه‌ها، دیوارها و یا سایر سازه‌های صفحه ای استفاده نمود. به علت ذات مجزای ثبت دیجیتال مورد استفاده، خطایی سیستماتیک با اندازه قطعی در محاسبات ضخامت وجود دارد. خطای سیستماتیک قطعی به ضخامت صفحه، بازه نمونه‌برداری و دوره تناوب نمونه‌برداری بستگی دارد.

۴-۲ از آنجایی که سرعت موج می‌تواند در هر نقطه سازه به دلیل تفاوت در عمر بتن یا تغییرپذیری بهر به بهر[1] بتن تغییر نماید، سرعت موج در هر نقطه که تعیین ضخامت (روش ب) مورد نیاز است، اندازه‌گیری می‌شود (روش الف).

۴-۳ حداکثر و حداقل ضخامت که قابل اندازه‌گیری می‌باشد با توجه به جزئیات دستگاه آزمایش (مشخصات پاسخ مبدل و کوبه مورد استفاده) محدود می‌شود. حدود فوق‌الذکر باید توسط تولیدکننده دستگاه مشخص گردد و هیچگاه نباید خارج از این محدوده از دستگاه استفاده نمود. چنانچه تجهیزات آزمایش به وسیله خود کاربر سرهم‌بندی شود، حدود ضخامت باید تعیین و مستند گردد.

۴-۴ این روش آزمون در سازه‌های صفحه ای رویه‌دار مانند عرشه بتنی پل با رویه آسفالت یا بتن سیمان پرتلند کاربرد ندارد. این روش بر این اساس استوار است که سرعت موج P در تمام عمق صفحه بتنی یکسان می‌باشد.

۴-۵ روش الف مختص بتنی است که با هوا خشک شده‌باشد، زیرا که میزان رطوبت سطحی بالا می‌تواند در نتایج تاثیر بگذارد.

۴-۶ روش ب مختص صفحه بتنی بر روی زیراساسی از خاک، شن، بتن آسفالتی نفوذپذیر یا بتن سیمان پرتلند مگر[2] می‌باشد، به شرط آنکه تفاوت محسوسی بین امپدانس صوتی بتن و لایه زیراساس[3] وجود داشته باشد و یا حفرات هوا به اندازه کافی در حدفاصل موجود باشد تا به این صورت بتوان بازتاب‌های قابل اندازه‌گیری را ایجاد نمود. اگر شرایط فوق‌الذکر فراهم نگردد، شکل‌موج با دامنه‌ای کوتاه همراه خواهد بود و طیف دامنه در بسامد متناظر با ضخامت فاقد نقطه پیک غالب خواهد بود (شکل ۲). اگر سطح تماس بین بتن و زیراساس زبر باشد، طیف دامنه یک پیک گرد بجای یک پیک تیز که متناظر با سطحی صاف است، خواهد داشت.

۴-۷ روش‌های ارائه‌شده تحت اثر نویز ترافیک یا نوسانات سازه‌ای با بسامد پایین که ناشی از حرکت معمول ترافیک روی سازه می‌باشند، قرار نمی‌گیرند.

---

[1] batch-to-batch-variability
[2] lean portland cement concrete
[3] subgrade

۴-۸ این روش‌ها در حضور موج مکانیکی ناشی از ضربه تجهیزات (مته چکشی، چکش صوتی، جاروهای مکانیکی و غیره) بر سازه کاربردی ندارند.

۴-۹ روش الف در حضور نویز الکتریکی با دامنه بالا از قبیل امواج حاصل از ژنراتورها یا سایر منابع، که به سامانه دریافت داده فرستاده می‌شود، کاربردی ندارد

۵ روش الف- اندازه‌گیری سرعت موج P

۵-۱ خلاصه روش آزمون

برای تولید امواج تنشی گذرا از ضربه‌ای بر روی سطح بتن استفاده می‌گردد. این امواج در راستای سطح بتن با عبور از دو مبدل بر روی خطی گذرا از نقطه ضربه و نقطه‌ای با فاصله‌ای مشخص از آن، منتشر می‌شود.

از اختلاف زمانی بین دریافت موج P (موج تنشی با بیشترین سرعت) در هر مبدل جهت تعیین سرعت موج P با تقسیم فاصله مشخص مبدل‌ها براختلاف زمانی استفاده می‌شود.

۵-۲ دستگاه آزمایش

۵-۲-۱ کوبه

کوبه باید کروی یا دارای نوک کروی باشد و بتواند مدت ضربه ۳۰ µs±۱۰µs را با انرژی کافی به منظور ایجاد جابجایی‌های سطحی ناشی از موج P که قابل ثبت توسط دو مبدل باشد، تولید نماید. کوبه باید به گونه‌ای قرار گیرد که بتواند بر خط مرکزی گذرنده از دو مبدل در فاصله ۱۵۰mm ± ۱۰mm از اولین مبدل ضربه وارد نماید.

یادآوری- مشاهده شده است که گوی‌های فولاد سخت با قطر بین ۵mm تا ۸mm و متصل به میله‌های ارتجاعی فولادی قادر هستند ضربات مناسبی را تولید نمایند.

۵-۲-۲ مبدل‌ها[1]

دو مبدل باند پهن‌که به جابجایی‌های عمود بر سطح پاسخ می‌دهند. این مبدل‌ها باید قادر باشند که جابجایی-های کوچک متناظر با رسیدن (ورود) موج P ضربه‌ای را که در راستای سطح حرکت می‌کند، شناسایی نماید. یک سطح تماس کوچک بین المان پیزوالکتریک و سطح بتن مورد نیاز است تا ورود موج P به دقت ثبت شود. برای اتصال مبدل به بتن از ماده مناسبی استفاده نمایید.

یادآوری- مشاهده شده است که مبدل جابجایی تجاری موجود که از المان پیزوالکتریک مخروطی با قطر نوک ۱٫۵mm و انتهای بزرگتر متصل به بلوکی از جنس برنج ساخته می‌شود، مناسب می‌باشد. صفحه‌ای سربی با ضخامت حدود ۰٫۲۵mm ماده اتصال دهنده مناسبی برای این نوع مبدل‌ها می‌باشد.

۵-۲-۲-۱ مبدل‌های قابل قبول باید از پیش به اثبات رسند تا بتوانند نتایج دقیقی برای ضخامت‌های صفحات مشابه همان‌هایی که در این روش آزمون اندازه‌گیری شده‌اند، ارائه دهند.

1 transducers

۵-۲-۳ وسیله جداساز

برای اینکه مبدل‌ها، ثابت در فاصله‌ای مشخص نگه داشته‌شوند، باید از وسیله‌ای جداساز استفاده نمود. این وسیله نباید در توانایی مبدل‌ها در اندازه‌گیری جابجایی سطحی خللی ایجاد نماید. همچنین باید به گونه‌ای ساخته شود که امکان گذر موج P از آن به حداقل برسد و در نتیجه بتوان از اختلال در اندازه‌گیری زمان حرکت موج P پیشگیری نمود. نوک مبدل باید ۳۰۰mm دورتر قرار گیرد.

یادآوری- چنانچه فاصله بین نوک‌های دو مبدل دقیقا مشخص نباشد، دقت اندازه‌گیری تحت تاثیر قرار می‌گیرد. مصالح و طرح جداساز باید به گونه‌ای انتخاب گردد که تغییر فاصله مبدل‌ها بر اثر تغییرات دمایی، حداقل گردد.

۵-۲-۴ سامانه دریافت داده

سخت‌افزار و نرم‌افزار دریافت، ثبت و فرآوری (داده‌پردازی) خروجی دومبدل می‌باشد. این سامانه می‌تواند یک رایانه قابل حمل با کارت دریافت داده دو-شبکه‌ای و یا یک تحلیلگر موج دو-شبکه‌ای قابل حمل باشد.

۵-۲-۴-۱ بسامد نمونه‌برداری هر شبکه باید ۵۰۰kHz یا بیشتر (بازه نمونه‌برداری ۲μs یا کمتر) باشد. سامانه باید بتواند با سیگنال یکی از شبکه‌های ثبت‌کننده شروع بکار نماید.

۵-۲-۴-۲ بازه و رزولوشن[1] ولتاژ سامانه دریافت داده باید با حساسیت مبدل‌ها هماهنگ شود به‌گونه‌ای که بتوان به دقت ورود موج P را تعیین نمود.

یادآوری- به عنوان مثال، مشاهده شده‌است که یک کارت دریافت داده رایانه با بازه ولتاژ ۲/۵v ± و رزولوشن ۱۲bit مناسب مبدل ذکر شده در یادآوری بند ۵-۲-۲ می‌باشد.

۵-۲-۴-۳ سامانه نمایشگر باید در برگیرنده مکان‌نما[2]، شامل قرائت زمان و ولتاژ متناظر باشد که می‌تواند در نقطه ای از هر شکل موج متناظر با ورودی امواج P قرار داده‌شود.

۵-۲-۴-۴ سامانه دریافت داده باید با یک منبع نیرو کار کند که نویز الکتریکی قابل شناسایی توسط مبدل‌ها و سامانه دریافت داده، وقتی که سامانه با حساسیت ولتاژ مورد نیاز برای تشخیص ورود موج P تنظیم شده است، ایجاد ننماید.

یادآوری-مشاهده شده‌است که سامانه‌های دریافت داده با منبع تغذیه باتری، مناسب می‌باشند.

۵-۲-۵ کابل‌ها و اتصالات

برای اتصال مبدل‌ها به سامانه دریافت داده استفاده می‌شوند. اتصالات باید دارای کیفیت بالا باشند و به کابل‌ها محکم متصل شده‌باشند. برای کاهش نویز الکتریکی کابل‌ها باید پوشش‌دار باشند.

۵-۲-۶ دستگاه بررسی کارکرد

---

[1] resolution

2 cursor

دستگاهی است که به منظور تایید اینکه تمامی اجزای سامانه آزمایش پیش از شروع آزمایش به‌خوبی عمل می‌کنند، استفاده می‌شود.

یادآوری- دستگاه بررسی کارکرد می‌تواند شامل یک نمونه آزمایشی مبنا باشد که پاسخ ضربه آن از پیش تعیین شده‌است و ازاین‌رو می‌تواند جهت مقایسه با خروجی سامانه آزمایش مورد استفاده قرار گیرد.

۵-۳ آماده‌سازی دستگاه آزمایش

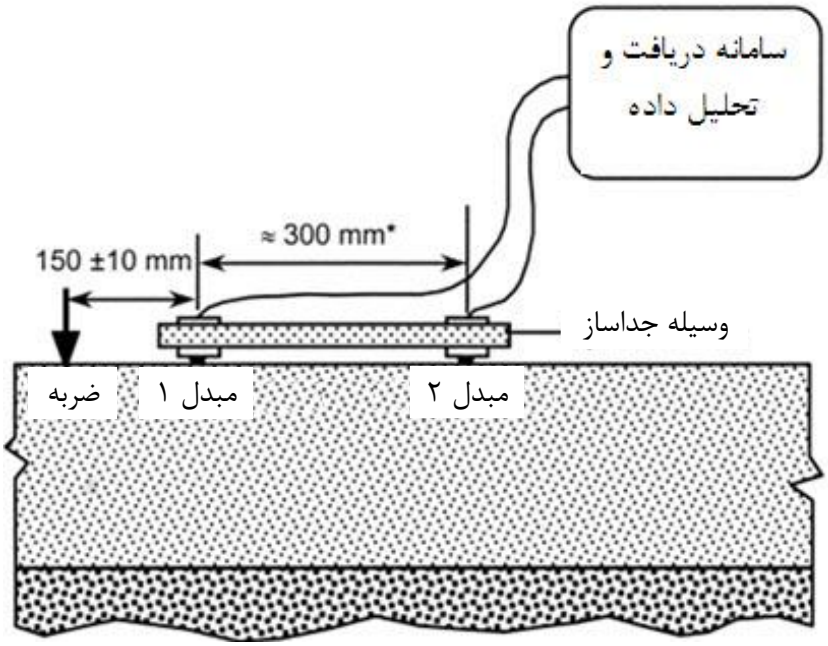
۵-۳-۱ سطح آزمایش باید خشک باشد. در محل اندازه‌گیری سرعت موج P، هرگونه گرد وخاک و آلودگی را از سطح برطرف نمایید.

۵-۳-۲ اگر سطح آزمایش به قدری زبر است که نوک‌های مبدل و بتن بخوبی متصل نمی‌شوند، به گونه‌ای سطح را بسایید که اتصال مناسب حاصل گردد. پیش از اتصال مبدل‌ها، مصالح ضعیف (سست) را از روی سطح پاک نمایید.

یادآوری-زبری سطح در هنگام آزمایش روسازی بزرگراه‌ها با سطوحی با بافت زبر یا شیاردار می‌تواند مشکل‌ساز باشد. در هنگام ساخت (روسازی) جدید، ترکیبات عمل‌آوری بتن را می‌توان از محل‌های آزمون برداشت تا مبدل‌ها بدرستی جفت شوند و ضربات کوتاه‌مدت بدست آید.

۵-۴ روش کار

۵-۴-۱ شکل (۲) تصویری شماتیک از ترتیب (جزئیات) آزمایش به روش الف را نشان می‌دهد.



شکل ۲- تصویری شماتیک از ترتیب (جزئیات) آزمایش به روش الف

۵-۴-۲ دستگاه (مبدل‌ها، وسیله جداساز، کوبه) را بهم ببندید (اسمبل کنید). صحت کارکرد صحیح سامانه آزمایش را بررسی نمایید. دستگاه را روی سطح بتن مستقر نموده و کوبه را به گونه‌ای قرار دهید که بر خط گذرا از دو مبدل ضربه وارد نماید و فاصله‌ای ۱۵۰mm ± ۱۰mm از اولین مبدل داشته باشد. چنانچه بر روی سطحی

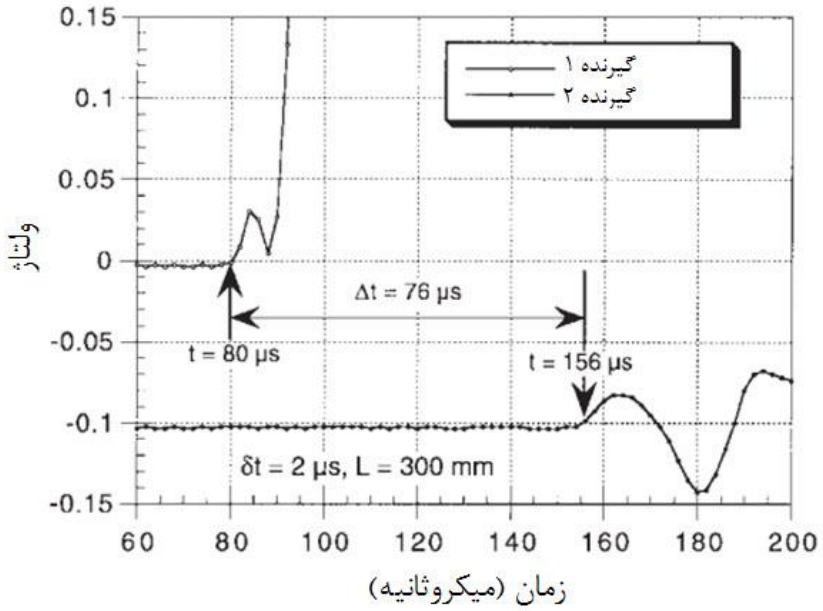
شیاردار آزمایش می‌نمایید، موازی با شیارها آزمایش را انجام دهید تا بدین صورت خط گذرا از مبدل‌ها و کوبه شیار را قطع نکند. در صورت وجود ترک، دستگاه را در جایی مستقر سازید که هیچ ترکی خط گذرا از نقطه ضربه و دو مبدل را قطع ننماید.

۵-۴-۳ سامانه دریافت داده را توسط پارامترهای صحیح دریافت داده (بسامد نمونه‌برداری، بازه ولتاژ، آستانه شروع، تاخیر و غیره) آماده نمایید.

یادآوری- برای بعضی سامانه‌ها، توصیه می‌شود که پارامترهای دریافت داده را به گونه‌ای تنظیم نمایید که قبل از نقطه آستانه شروع حداقل ۱۰۰ نقطه ثبت گردد. اطلاعات پیش-شروع اجازه ارزیابی مقدار خط شروع در شکل‌موج را پیش از ورود موج P می‌دهد. به دلیل نویز الکتریکی، ممکن است پیش از رسیدن موج P سیگنال دچار نوسان شود. دانستن دامنه آن نوسانات به شناسایی موج P کمک می‌کند.

۵-۴-۴ ضربه را وارد کنید. امواج دریافتی را بیازمایید. چنانچه شکل‌موج در هر دو مبدل موجود بود، داده را برای تحلیل‌های بعدی ذخیره نمایید. اگر ورود موج P را نتوان با قطعیت شناسایی کرد، آزمایش را در همان محل تکرار نمایید و یا به منظور اتصال مناسب بین مبدل‌ها و بتن، آزمایش را در محلی دیگر انجام دهید.

یادآوری- شکل ۳ مثالی از یک مجموعه معتبر شکل‌های موج را نشان می‌دهد که بردارها در نقاط متناظر با ورودی موج P در هر شکل موج قرار دارند. در این حالت ورود امواج P به محل مبدل‌ها به وضوح توسط صعود شکل‌های موج از تراز زمینه شناسایی می‌گردد. سرعت موج P برابر $\frac{0.3}{0.000076}=3950m/s$ محاسبه می‌شود که مقداری منطقی است.



شکل ۳-نمونه شکل موج حاصل از روش الف(فقط قسمت اولیه شکل موج ها ترسیم شده است)

۵-۵ تحلیل داده و محاسبات

۵-۵-۱ بر روی صفحه نمایش سامانه دریافت داده، شکل موج های دو مبدل را نمایش دهید تا بتوان آنها را بر روی یک محور زمانی ترسیم نمود.

۵-۵-۲ در هر شکل‌موج زمان ورود موج P مستقیم را شناسایی نمایید. ورود موج P در اولین نقطه‌ای که ولتاژ نسبت به مقدار پایه‌ای اش تغییر می‌کند، قابل شناسایی است (شکل ۳). برای نشان دادن ولتاژ و زمان قرائت در نقاط متناظر با ورود موج P، از علائم (مکان‌نما) استفاده نمایید. اختلاف زمانی (Δt) بین ورود موج P به هر شکل موج را تعیین نمایید. اختلاف زمان همان زمان گذر (عبوری) می‌باشد. شناسایی خودکار (اتوماتیک) ورود موج P در هر شکل موج به شرطی مجاز است که شکل‌موج‌ها پیش از ورود امواج P پایدار باشند (فاقد هرگونه نویزی باشند).

۵-۵-۳ با استفاده از زمان گذر اندازه‌گرفته‌شده (Δt) و فاصله اندازه‌گرفته‌شده بین مبدل‌ها (L)، سرعت موج P را محاسبه نمایید:

$$C_P = \frac{L}{\Delta t} \qquad (۳)$$

۵-۵-۴ در هر محل آزمایش دو نمونه آزمون انجام دهید. چنانچه در هر دو حالت زمان گذر (عبوری) اندازه-گرفته یکسان باشد، آنگاه برای آزمایش به سراغ سایر نقاط بروید. چنانچه دو زمان گذر (عبوری) اندازه‌گرفته به اندازه یک بازه نمونه‌گیری یا بیشتر تفاوت داشته‌باشند، آزمون سومی انجام داده و آن زمان گذر (عبوری) را که تکرار می‌شود، به عنوان مقدار صحیح بپذیرید. چنانچه دو از سه زمان گذر اندازه گرفته مطابق هم نباشند، از اتصال مناسب مبدل‌ها و سطح، اطمینان حاصل کرده و آزمون را تکرار نمایید.

۵-۵-۵ سرعت ظاهری موج P در صفحه را به کمک رابطه (۱) محاسبه نمایید.

۵-۵-۶ روش جایگزین

در مواقعی که اندازه‌گیری ضخامت با بیشترین دقت ضروری نیست، می‌توان سرعت ظاهری موج P در بتن را از طریق واسنجی مستقیم ضخامت اندازه‌گرفته در نقاطی از سازه تعیین نمود. ضخامت سازه را تعیین نمایید، بسامد ضخامت را بر طبق روش ب در همان نقطه تعیین نمایید و با استفاده از رابطه (۲) سرعت ظاهری موج را بدست آورید. متقاضی خدمات آزمون و انجام‌دهنده آزمایش باید با استفاده از روش جایگزین موافقت داشته-باشند. آنها همچنین باید با تعداد و مکان نقاط واسنجی و روش تعیین ضخامت بتن موافقت داشته‌باشند. هنگامی که این روش جایگزین بکار برده می‌شود، فرآیند تفسیر مندرج در بخش ۶-۶ کاربرد ندارد.

۶ روش ب- آزمون ضربه-بازتاب

۶-۱ خلاصه روش آزمون

۶-۱-۱ ضربه بر سطح بتن، امواج تنشی ایجاد می‌کند که موج P مهمترین آنها است. موج P به درون صفحه منشر شده و از سطح روبرو (مخالف) بازتابیده می‌شود.

۶-۱-۲ بازتاب‌های چندگانه موج P بین سطوح صفحه سبب ایجاد تشدید در بسامدی مرتبط با ضخامت صفحه می‌شود.

۶-۱-۳ یک مبدل مستقر در مجاورت نقطه ضربه، جابجایی صفحه ناشی از ورود امواج بازتابیده را ثبت می‌کند. خروجی این مبدل به صورت شکل‌موج در دامنه زمانی می‌باشد.

۶-۱-۴ شکل‌موج ثبت شده با استفاده از روش تبدیل فوریه به دامنه بسامدی تبدیل می‌شود و یک طیف دامنه بدست می‌آید. تشدید ضخامت، یک نقطه پیک غالب در طیف ایجاد می‌کند که به آسانی شناسایی می‌شود. مقدار بسامد این نقطه پیک به همراه سرعت ظاهری موج P بدست آمده از روش الف جهت محاسبه ضخامت صفحه توسط معادله (۲) استفاده می‌شود.

۶-۲ دستگاه

۶-۲-۱ کوبه

کوبه باید کروی یا دارای نوک کروی باشد و بتواند انرژی لازم را به یک صفحه توپر انتقال دهد به گونه‌ای که یک طیف دامنه مشخص با یک نقطه پیک منفرد غالب حاصل گردد. مدت ضربه (t_C)، باید کمتر از زمان گذر (عبوری) گرد شده موج P باشد (مراجعه به بخش ۳-۱-۵)، یعنی:

$$t_c < \frac{2T}{C_p} \qquad (۴)$$

یادآوری- گوی‌های فولاد سخت با قطرهای بین ۸mm تا ۱۶mm و متصل به میله‌های ارتجاعی فولادی و کوبه‌های مکانیکی نوک کروی به عنوان کوبه‌های مناسب برای روسازی‌های بزرگراه‌ها استفاده شده است.

۶-۲-۲ مبدل

مبدل‌ای باند پهن که به جابجایی عمود بر سطح پاسخ می‌دهد. این مبدل مشابه مبدل تعریف‌شده در روش الف می‌باشد.

۶-۲-۳ سامانه دریافت داده

به منظور دریافت، ثبت و داده‌پردازی خروجی مبدل استفاده می‌شود. این سامانه می‌تواند مشابه سامانه مورد استفاده در روش الف باشد.

۶-۲-۳-۱ بسامد نمونه‌برداری معمول بین ۵۰۰kHz کیلوهرتز (بازه ۲µs) و ۲۵۰kHz (بازه ۴µs) می‌باشد.

۶-۲-۳-۲ تعداد داده‌های معمول در شکل‌موج ثبت شده ۱۰۲۴ یا ۲۰۴۸ می‌باشد.

۶-۲-۳-۳ مدت معمول شکل‌موج ثبت‌شده (دوره تناوب نمونه‌برداری) برابر ۴۰۹۶µs یا ۸۱۹۲µs می‌باشد.

یادآوری- دوره تناوب نمونه‌برداری برابر حاصلضرب تعداد نقاط ثبت شده در بازه نمونه‌برداری می‌باشد. معکوس دوره تناوب نمونه‌برداری برابر بازه بسامد در طیف دامنه حاصل از روش تبدیل فوریه سریع می‌باشد. یک دوره تناوب نمونه‌برداری ۴۰۹۶µs متناظر با بازه بسامدی ۲۴۴Hz و یک دوره تناوب نمونه‌برداری ۸۱۹۲µs متناظر ۱۲۲Hz هرتز می‌باشد. بازه بسامدی کوچکتر سبب اندازه‌گیری دقیق‌تر ضخامت می‌شود. بااین‌وجود، دوره تناوب نمونه‌برداری باید با در نظرگرفتن ابعاد جانبی صفحه مرتبط با

ضخامت صفحه انتخاب گردد. چنانچه بعد جانبی کوچکتر حداقل ۱۰ برابر ضخامت باشد، از یک دوره تناوب نمونه‌برداری ۴۰۹۶ میکروثانیه‌ای می‌توان استفاده کرد. برای ابعاد جانبی کوچکتر، باید یک دوره تناوب نمونه‌برداری کوتاه‌تر استفاده‌گردد که موجب عدم قطعیت بیشتر در ضخامت اندازه‌گیری شده می‌گردد. این محدودیت‌ها برای حصول اطمینان از اینکه شکل‌موج شامل حرکت سایر مودهای نوسان نمی‌شود، که ممکن است در توانایی شناسایی بسامد ضخامت صفحه در طیف دامنه دخیل باشند نمی باشد.

۶-۲-۳-۴ بازه ولتاژ جهت دریافت داده باید به گونه‌ای باشد که دامنه شکل‌موج اجازه ارزیابی تصویری خصوصیات کلیدی آن مانند سیگنال موج سطحی و نوسانات بعدی را بدهد.

یادآوری- بازه ولتاژ که بیش از حد بالا باشد می‌تواند سبب ایجاد یک شکل‌موج با دامنه کوچک شود که ارزیابی را دچار مشکل می‌کند. چنانچه بازه ولتاژ بیش از حد پایین باشد می‌تواند سبب ناپیوستگی سیگنال مبدل شود. یک دیجیتالگر[1] با حداقل وضوح تصویر ۱۲بیت توصیه می‌گردد.

۶-۲-۳-۵ برای دریافت، ثبت، نمایش و تحلیل داده باید نرم‌افزاری مناسب تهیه گردد که بتواند از روی شکل‌موج ثبت شده، طیف دامنه را محاسبه نماید. طیف دامنه باید بلافاصله پس از دریافت شکل‌موج نمایش داده‌شود. یک مکان‌نما جهت تعیین دستی بسامد ضخامت باید موجود باشد. کاربرد نرم‌افزار برای تعیین بسامد ضخامت مجاز است.

۶-۲-۳-۶ سامانه دریافت داده باید توسط یک منبع انرژی کار کند که هنگام تنظیم سامانه در بازه ولتاژی مورد استفاده در آزمون (به یادآوری بند ۵-۲-۴-۴ رجوع کنید)، آن نویز الکتریکی که بوسیله مبدل و سامانه دریافت داده شناسایی می‌شود، تولید نکند.

۶-۲-۴ کابل‌ها و اتصالات، مشابه همان در روش الف.

۶-۲-۵ دستگاه بررسی کارکرد، مشابه همان در روش الف.

۶-۳ آماده‌سازی سطح آزمون

۶-۳-۱ در محل تعیین ضخامت، گرد و خاک را از روی سطح برطرف نمایید.

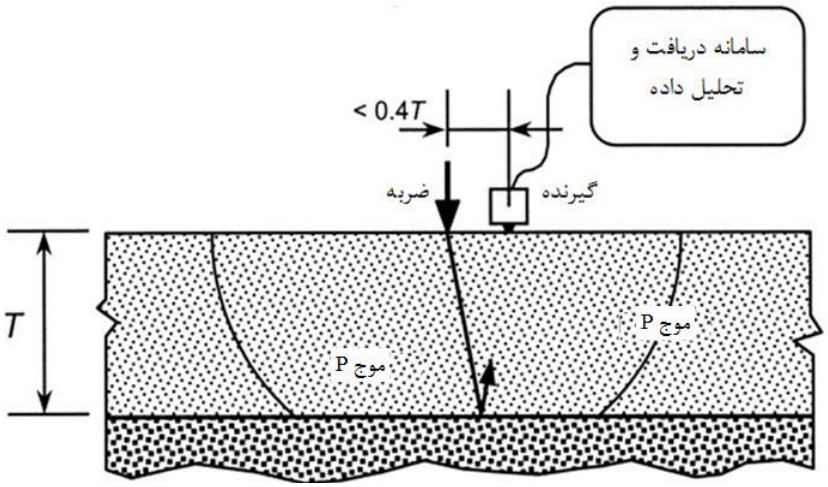
۶-۳-۲ اگر سطح آزمایش به قدری زبر است که نوک‌های مبدل و بتن بخوبی متصل نمی‌شوند، به گونه‌ای سطح را بسایید که اتصال مناسب حاصل گردد (به یادآوری ۷ رجوع کنید).

۶-۴ روش کار

۶-۴-۱ شکل ۴ تصویری شماتیک از یک آزمون ضربه-بازتاب روی یک صفحه را نشان می‌دهد.

۶-۴-۲ مبدل را در محل اندازه‌گیری ضخامت بر روی سطح بتن مستقر نمایید. کوبه را در جایی قرار دهید که ضربه به فاصله کمتر از ۰/۴ ضخامت اسمی صفحه از مبدل وارد شود.

1 digitizer



شکل ۴- تصویری شماتیک از یک آزمون ضربه-بازتاب (روش ب)

۶-۴-۳ سامانه دریافت داده را با پارامترهای دریافت داده صحیح (بسامد نمونه‌برداری، بازه ولتاژ، آستانه شروع، تاخیر و غیره) آماده نمایید. دریافت داده باید توسط سیگنال مبدل یا یک دستگاه ضربه شروع بکار نماید. در صورت لزوم، پارامترهای دریافت داده را بوسیله آزمون‌های آزمایشی تنظیم نمایید.

یادآوری- برای بعضی سامانه‌ها، توصیه می‌گردد که پارامترهای دریافت داده به گونه‌ای تنظیم شود که حدود ۱۰۰ نقطه پیش از نقطه شروع ثبت گردد. بخش اولیه شکل‌موج اطلاعاتی از زمان تماس کوبه فراهم می‌نماید و می‌تواند به شناسایی شکل‌موج‌های بی ارزش ناشی از اتصال نامناسب، نویز الکتریکی و سایر عوامل کمک نماید.

۶-۴-۴ ضربه را وارد نمایید. شکل‌موج دریافتی و طیف دامنه متناظرش را ارزیابی کنید. به منظور قضاوت در مورد اعتبار شکل‌موج، بررسی کنید که آیا آن بخش شکل‌موج متناظر با موج سطحی، شکل صحیحی دارا است و اینکه آیا در پی موج سطحی، نوسانات تناوبی متناظر با بازتاب‌های متعدد بین مرزهای صفحه وجود دارد یا خیر. طیف دامنه یک شکل‌موج معتبر در بسامد متناظر با ضخامت صفحه، دارای یک نقطه پیک غالب می‌باشد.

یادآوری- شکل ۵ نمونه‌ای از یک شکل‌موج دامنه زمانی و طیف دامنه متناظرش را برای آزمونی روی یک دال بتنی نشان می‌دهد. بازه نمونه‌برداری ۴μs و تعداد نقاط در شکل‌موج کامل (نشان داده نشده است) برابر ۲۰۴۸ می‌باشد.

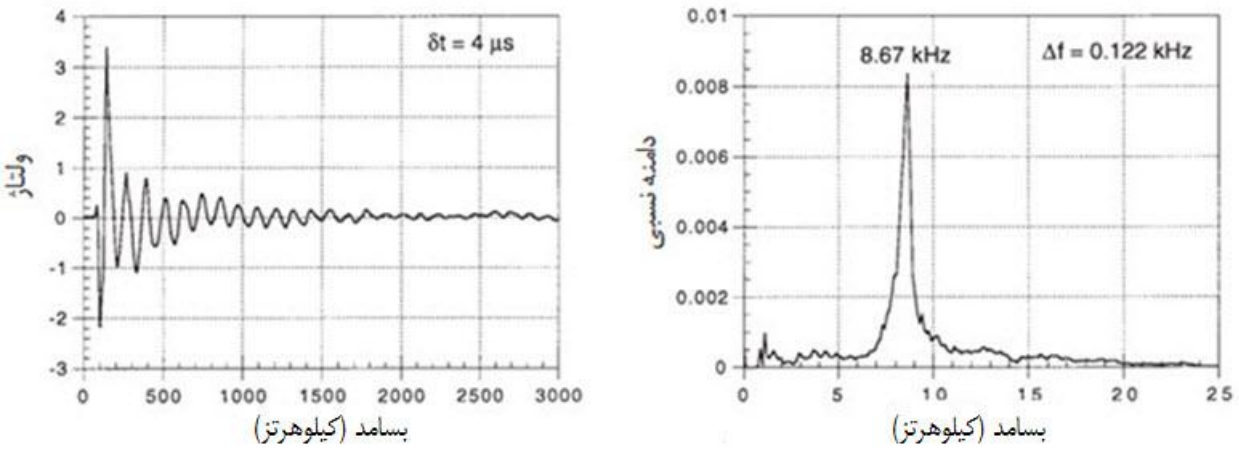
۶-۴-۵ در صورتی که یک طیف دامنه و شکل‌موج معتبر بدست آمد، آنها را ذخیره نمایید. برای تایید نتایج آزمون را تکرار نمایید. چنانچه نتایج تکرارشدنی و معتبر باشند، به سراغ نقطه آزمایش بعدی بروید. چنانچه طیف دامنه و شکل‌موج معتبر نباشند، بررسی کنید که سطح آزمون عاری از هرگونه گرد و خاک بوده و مبدل به طور مناسب به سطح آزمون متصل شده‌باشد. همچنین بررسی کنید که نقطه ضربه هموار و عاری از هرگونه گرد و خاک باشد و از کوبه‌ای با اندازه مناسب استفاده شده‌باشد. آزمون را تا حصول یک شکل‌موج و طیف دامنه معتبر تکرار نمایید.

یادآوری-شکل ۶ نمونه‌ای از نتایج آزمون بازتاب-ضربه غیرمعتبر را نشان می‌دهد. شکل‌موج فاقد نوسانات تناوبی است و طیف دامنه شامل یک نقطه پیک غالب نمی‌باشد.

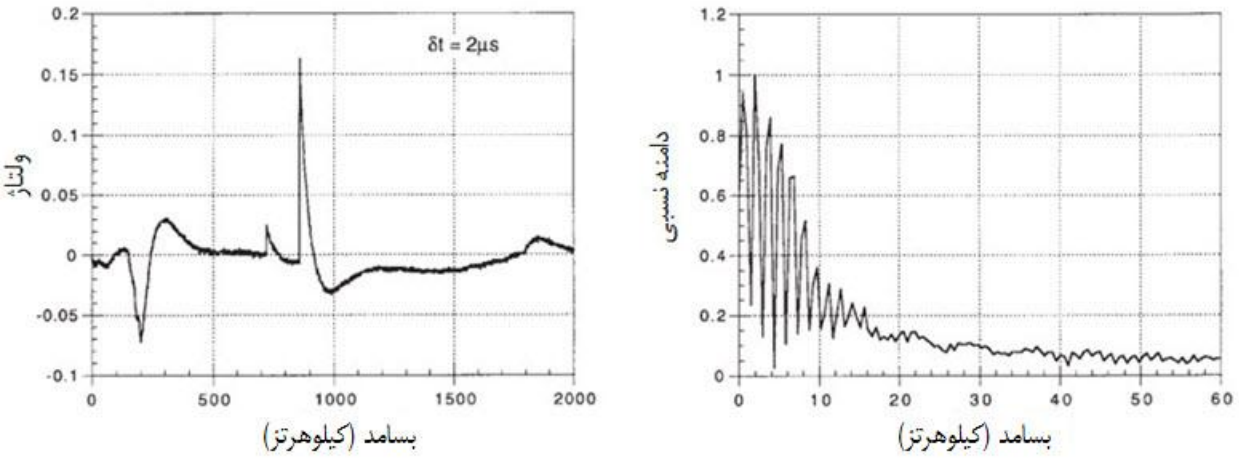
۶-۵ تحلیل داده‌ها

۶-۵-۱ بسامد نقطه پیک دامنه بالا را در طیف دامنه تعیین کنید.

۶-۵-۲ ضخامت صفحه را از طریق رابطه ۲ محاسبه نمایید.



شکل ۵- طیف دامنه و شکل‌موج برای یک آزمون ضربه-بازتاب معتبر در یک دال بتنی با ضخامت ۲۵۰ میلیمتر



شکل۶- نمونه‌ای از نتایج آزمون بازتاب-ضربه غیرمعتبر، شکل‌موج فاقد نوسانات تناوبی است و طیف دامنه شامل یک نقطه پیک غالب نمی‌باشد

۶-۶ تفسیر نتایج (خطاهای سیستماتیک)

۶-۶-۱ در تعیین سرعت موج و ضخامت صفحات بتنی خطاهایی سیستماتیک وجود دارد که دلیل آن ذات دیجیتال شکل‌موج و طیف دامنه می‌باشد. ازاین‌رو، یک خطای ذاتی سیستماتیک در سرعت موج p و ضخامت صفحه محاسبه شده، وجود دارد. نحوه بدست آوردن بیشینه خطاهای سیستماتیک در پیوست ارائه‌شده‌است.

۶-۶-۲ خطای سیستماتیک در روش آزمون الف. بیشینه خطای سیستماتیک در سرعت موج طولی محاسبه شده برابر است با:

$$e_p = \pm \frac{\delta t}{\Delta t} \qquad (۵)$$

که در آن:

δt بازه نمونه‌برداری، و

Δt زمان گذر موج طولی اندازه‌گیری شده

۶-۶-۲-۱ معادله ۵ بر پایه این فرض است که هیچگونه نویز الکتریکی در شکل‌موج وجود ندارد و در نتیجه عبور موج p به راحتی شناسایی می‌شود. شکل ۷ بیشینه خطای سیستماتیک ناشی از بازه نمونه‌برداری به صورت تابعی از زمان گذر را نشان می‌دهد. سرعت موج p محاسبه‌شده از معادله ۳ را به صورت زیر گزارش کنید:

$$C_p \pm e_p C_p \qquad (۶)$$

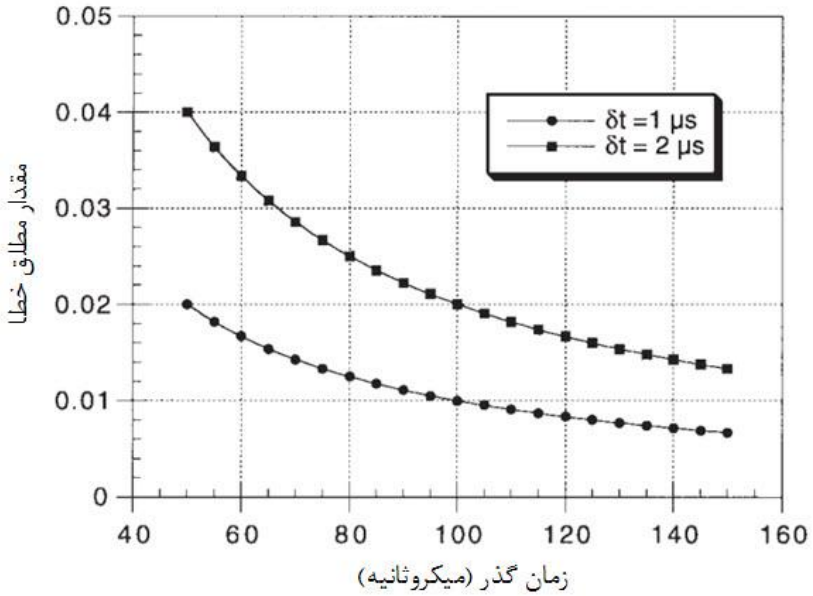
۶-۶-۳ خطای سیستماتیک در روش آزمون ب. بیشینه خطای سیستماتیک در ضخامت محاسبه شده ناشی از رزولوشن بسامد از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$e_f = \pm \frac{\Delta f}{2f} \qquad (۷)$$

که در آن:

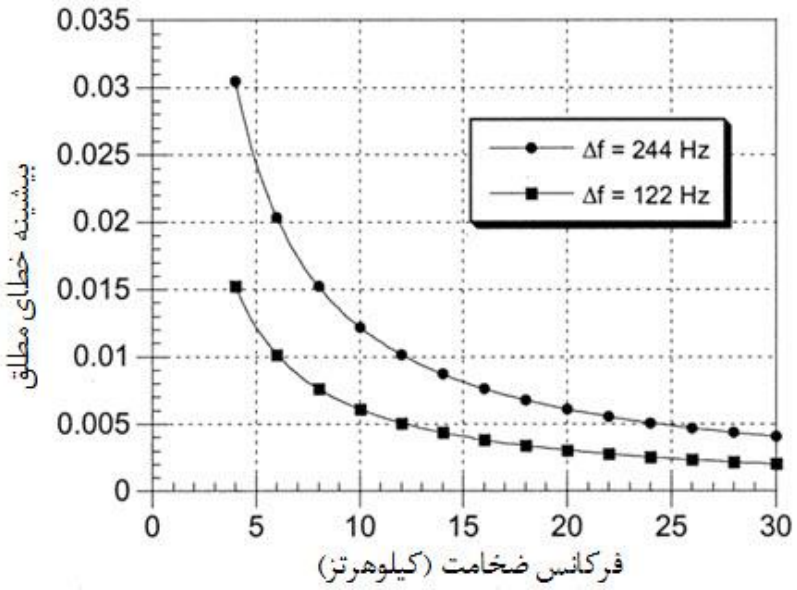
Δf بازه بسامد در طیف دامنه، و

f بسامد متناظر با نقطه پیک دامنه در طیف دامنه



شکل ۷- بیشینه خطای سیستماتیک ناشی از بازه نمونه‌برداری به صورت تابعی از زمان گذر

۶-۶-۳-۱ شکل ۸ بیشینه خطای سیستماتیک در ضخامت محاسبه شده ناشی از رزولوشن بسامد به صورت تابعی از بسامد اندازه‌گرفته را نشان می‌دهد. بسامد بالاتر متناظر با ضخامت کمتر می‌باشد و با کاهش ضخامت، میزان خطای سیستماتیک در محاسبه ضخامت کاهش می‌یابد.



شکل ۸- بیشینه خطای سیستماتیک ناشی از بازه بسامد به صورت تابعی از بسامد ضخامت

۶-۶-۴ خطای سیستماتیک ترکیبی- تخمینی از بیشینه خطای سیستماتیک مورد انتظار در محاسبه ضخامت که بر طبق معادله زیر شامل هر دو عامل خطا می‌گردد:

$$C = \sqrt{e_p^2 + e_f^2} \qquad (۸)$$

۶-۶-۵ ضخامت گزارشی- ضخامت صفحه را که از معادله ۲ بدست می‌آید، به صورت زیر گزارش کنید:

$$\boldsymbol{T \pm eT} \qquad (۹)$$

۷ گزارش آزمون

۷-۱ پارامترهای دریافت داده استفاده شده را گزارش کنید که شامل بازه نمونه‌برداری، بازه ولتاژ، رزولوشن ولتاژ، تعداد نقاط در شکل‌موج و بازه بسامد در طیف دامنه می‌شود.

۷-۲ مکان هر نقطه آزمون بر روی سازه، توصیفی از وضعیت سطح مورد آزمایش و ساییدن سطح (در صورت نیاز) را گزارش نمایید.

۷-۳ برای هر دال یا لایه بتنی، نوع مصالح تکیه‌گاه دال را (در صورت اطلاع) گزارش کنید.

۷-۴ سرعت موج P بر طبق ۶-۶-۲-۱را گزارش کنید.

۷-۵ ضخامت صفحه بر طبق ۶-۶-۵ را گزارش کنید.

۷-۶ چنانچه روش جایگزین ۵-۵-۶ برای بدست آوردن سرعت ظاهری موج P استفاده گردیده‌است، داده‌های واسنجی را تهیه و گزارش کنید که چگونه از داده ها برای تخمین ضخامت بتن استفاده کرده‌اید.

۸ دقت و انحراف

دقت وانحراف این روش آزمون تاکنون ناشناخته باقی مانده‌است. مقایسه طول‌های مغزه با ضخامت‌های روسازی نشان می‌دهد که تفاوت ضخامت روسازی از طریق اندازه‌گیری مغزه‌ها و این روش آزمون، برای ضخامت‌های ۲۰۰mm تا ۲۹۰mm مابین ۳٪± می‌باشد.

پیوست الف

(اطلاعاتی)

خطاهای سیستماتیک

الف-۱ خطاهای سیستماتیک

الف-۱-۱ کلیات

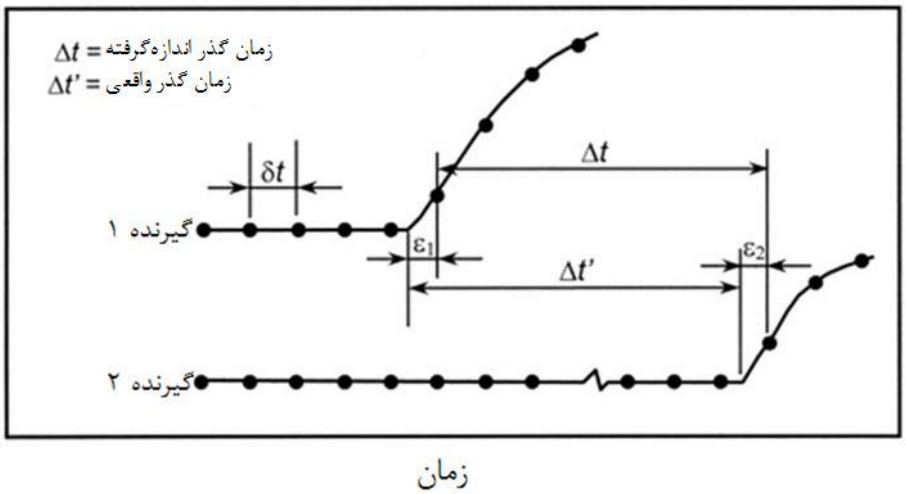
الف-۱-۱-۱ این روش آزمون بر پایه بکارگیری نمونه‌برداری دیجیتال و روش‌های تحلیل سیگنال دیجیتالی استوار می‌باشد. ازاین‌رو، شکل‌موجهای دامنه زمانی و طیفهای دامنه از نقاط مجزا با فواصل ثابت که به پارامترهای دریافت داده وابسته هستند، تشکیل شده‌اند. این امر خطاهایی سیستماتیک بین زمان گذر اندازه-گرفته یا بسامدهای ضخامت و مقادیر واقعی آنها ایجاد می‌کند. بخش‌های پیش‌رو نحوه تعیین مقادیر بیشینه این خطاهای سیستماتیک را شرح می‌دهد. به علت این خطاهای سیستماتیک، سرعت امواج P و ضخامت صفحات که از این روش آزمون بدست می‌آیند به صورت بازه‌ای از مقادیر، گزارش می‌شوند.

الف-۱-۲ خطای سیستماتیک در سرعت موج P

الف-۱-۲-۱ شکل الف-۱ تصویری شماتیک از بخش ابتدایی (زودهنگام) شکل‌موج (ولتاژ برحسب زمان) حاصل از دو مبدل در روش الف را نشان می‌دهد. دوایر توپر نشان‌دهنده نقاط ثبت‌شده توسط سامانه دریافت داده هستند. خطوط توپر جابجایی‌های سطحی واقعی را به صورت تابعی از زمان نشان می‌دهند. زمان گذر (عبوری) از اختلاف زمانی Δt بین دو نقطه که دارای ولتاژی بیش از مقادیر پس‌زمینه هستند، حاصل می‌شود. زمان گذر اندازه‌گرفته با زمان گذر واقعی $\Delta t'$ تفاوت دارد. با توجه به شکل الف-۱، می‌توان نشان داد که:

$$\Delta t = \Delta t' - \epsilon_1 + \epsilon_2 \quad \text{(الف-۱)}$$

$$\Delta t' - \Delta t = \epsilon_1 - \epsilon_2 \quad \text{(الف-۲)}$$



شکل الف-۱- تصویری شماتیک از بخش ابتدایی شکل‌موج در روش الف

خطای نسبی در محاسبه سرعت موج P ناشی از تفاوتهای مابین زمان گذر واقعی و اندازه‌گرفته را می‌توان از رابطه زیر بدست آورد:

$$e_p = \frac{C_p - C_P'}{C_P'} = \frac{\frac{L}{\Delta t} - \frac{L}{\Delta t'}}{\frac{L}{\Delta t'}} = \frac{\Delta t'}{\Delta t} - 1 = \frac{\Delta t' - \Delta t}{\Delta t} = \frac{\epsilon_1 - \epsilon_2}{\Delta t} \qquad \textbf{(الف-۳)}$$

بیشینه مقدار مطلق خطا e_p زمانی پیش می‌آید که $\varepsilon_1 = 0$ و $\varepsilon_2 = \delta t$ یا زمانی که $\varepsilon_1 = \delta t$ و$\varepsilon_2 = 0$. زمانی که $\varepsilon_1 = 0$ و $\varepsilon_2 = \delta t$ باشد، آنگاه:

$$e_p = \frac{-\hat{o}t}{\Delta t} \qquad \textbf{(الف-۴)}$$

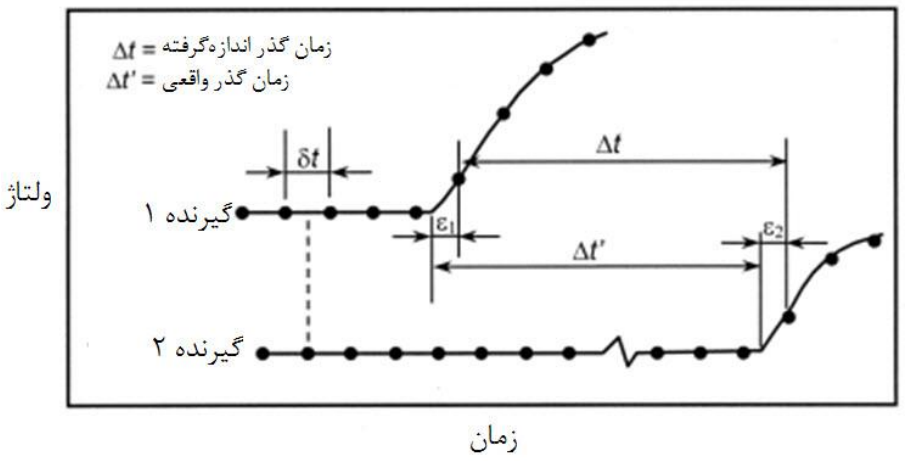
زمانی که $\varepsilon_1 = \delta t$ و $\varepsilon_2 = 0$ باشد، آنگاه:

$$e_p = \frac{+\hat{o}t}{\Delta t} \qquad \textbf{(الف-۵)}$$

بنابراین، بیشینه خطای سیستماتیک در سرعت موج P ناشی از نمونه‌برداری در بازه زمانی برابر است با:

$$e_p = \pm\frac{\hat{o}t}{\Delta t} \qquad \textbf{(الف-۶)}$$

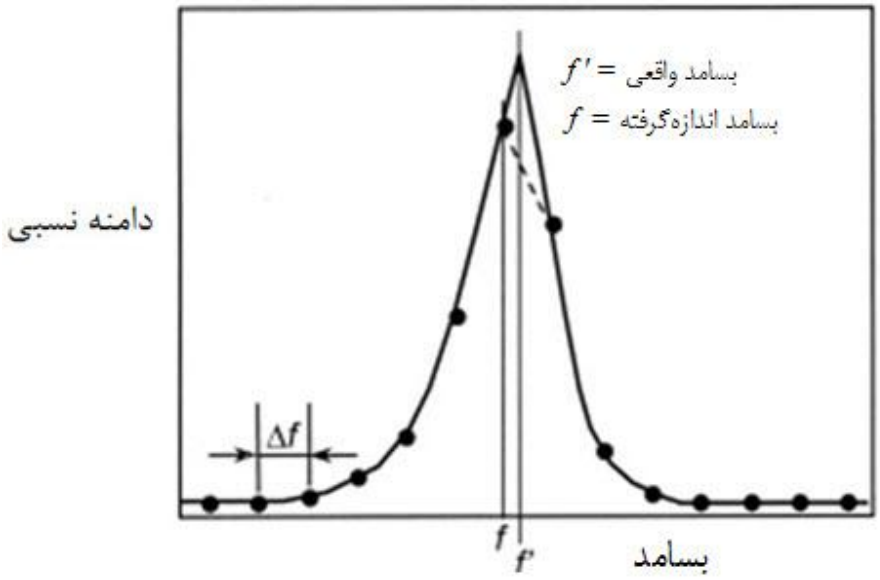
الف۱-۲-۲ روابط فوق بر این فرض استوار می‌باشند که دو شکل‌موج توسط نمونه‌برداری همزمان از دو کانال بدست آمده‌اند. شکل الف-۲ تصویری شماتیک از شکل‌موج‌های حاصل از سامانه دریافت داده، که بطور متناوب از دو کانال نمونه می‌گیرد، را نشان می دهد.می‌توان نشان داد که بیشینه خطای سیستماتیک همانی است که معادله الف-۶ ارائه می‌دهد البته به شرطی که بازه نمونه δt بازه زمانی بین نقاط مجاور در هر شکل‌موج باشد.



شکل الف-۲- تصویری شماتیک از بخش ابتدایی شکل‌موج‌های روش الف حاصل از سامانه دریافت داده‌ای که بطور متناوب از دو کانال نمونه می‌گیرد

الف-۱-۳ خطای سیستماتیک در ضخامت ناشی از بازه بسامد در طیف دامنه

الف۱-۳-۱شکل الف-۳ تصویر شماتیک طیف دامنه که از آزمون ضربه-بازتاب یک صفحه توپر بدست آمده‌است را نشان می‌دهد. نقطه پیک با دامنه بالا متناظر با بسامد ضخامت صفحه می‌باشد. دوایر توپر مقادیر دیجیتال هستند که بر روی صفحه نمایش رایانه نشان داده‌شده است و منحنی توپر نشان‌دهنده طیف دامنه واقعی می-باشد. بسامد اندازه‌گرفته f با بسامد واقعی f' متفاوت است. این تفاوت سبب ایجاد خطایی سیستماتیک در ضخامت محاسبه‌شده صفحه از طریق بسامد اندازه‌گرفته می‌گردد.



شکل الف-۳- تصویر شماتیک طیف دامنه ناشی از آزمون ضربه-بازتاب (روش ب) بر روی یک صفحه توپر

الف۱-۳-۲ خطای نسبی در ضخامت صفحه محاسبه شده از طریق رابطه زیر به بسامد اندازه‌گرفته و بسامد واقعی مرتبط است:

$$e_f = \frac{T-T'}{T'} = \frac{\frac{0.96C_p}{2f} - \frac{0.96C_p}{2f'}}{\frac{0.96C_p}{2f'}} = \frac{f'}{f} - 1 = \frac{f'-f}{f} \qquad \textbf{(الف-۷)}$$

که در آن:

T ضخامت اندازه‌گرفته بر پایه بسامد اندازه‌گرفته f

T' ضخامت محاسبه شده بر پایه بسامد واقعی f'

مقدار مطلق بیشترین تفاوت بین f و f' را $\Delta f/2$ می‌نامند. بنابراین، بیشینه خطای سیستماتیک در ضخامت محاسبه‌شده ناشی از بازه بسامد در طیف دامنه برابر است با:

$$e_f = \pm\frac{\Delta f}{2\mathrm{f}} \qquad \textbf{(الف-۸)}$$

الف۱-۳- ۳ معادله الف۱-۸ نشان می‌دهد که خطای سیستماتیک در بسامد محاسبه‌شده با کاهش بازه بسامد Δf، کاهش می‌یابد. همان‌گونه که در یادآوری بند ۶-۲-۳-۳، بازه بسامد توسط مدت زمان شکل‌موج، که همان

مدت زمان ثبت‌شده می‌باشد، کنترل می‌شود. بنابراین، در هنگام انجام آزمون ضربه-بازتاب برای اندازه‌گیری ضخامت صفحه، از طولانی‌ترین مدت زمان ثبت‌شده عملی استفاده کنید. با این وجود، مدت زمان ثبت‌شده نباید بیش از حد طولانی باشد، در غیر اینصورت ممکن است حرکات ناشی از سایر مودهای ورق، که از بازتاب مرزهای جانبی می‌رسد، بر شکل موج تأثیر گذارند. یادآوری بند ۶-۲-۳-۳ به همین نکته اشاره می‌کند.

الف۱-۴ خطای سیستماتیک در ضخامت محاسبه‌شده

الف۱-۴-۱ ضخامت محاسبه‌شده از سرعت موج P و بسامد بیشینه شامل دو منبع خطای سیستماتیک می‌باشند. خطای سیستماتیک ترکیبی e روش مورد استفاده در این آزمون را می‌توان از رابطه زیر بدست آورد:

$$e = \sqrt{{e_p}^2 + {e_f}^2} \qquad \text{(الف-۹)}$$

الف۱-۴-۲ خطای نسبی در ضخامت صفحه نایشی از هر دو منبع خطای سیستماتیک برابر است با:

$$\frac{T-T'}{T'} = \pm e \qquad \text{(الف-۱۰)}$$

که به صورت زیر نیز می‌توان نوشت:

$$T' = \frac{T}{1 \pm e} \qquad \text{(الف-۱۱)}$$

برای مقادیر کوچک $|e|$:

$$\frac{1}{1 \pm e} \approx 1 \pm e \qquad \text{(الف-۱۲)}$$

بنابراین برای محاسبه خطای سیستماتیک که در این روش آزمون نهفته است، ضخامت محاسبه‌شده از معادله ۲ را به صورت زیر گزارش کنید:

$$T \pm Te \qquad \text{(الف-۱۳)}$$