





دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک

گروه نفت و ژئوفیزیک

پایان نامه کارشناسی ارشد

گرایش لرزه‌شناسی

عنوان:

ارزیابی کیفیت و پیوستگی سازه‌های بتنی با آزمون غیرمخرب «پاسخ ضربه»

مطالعه موردی: پل‌های بخشی از شبکه ریلی کشور دانمارک

نگارش:

امیر شاهمیری

استاد راهنما:

مهرداد سلیمانی منفرد

فرهنگ سرشکی

تقدیم بہ

شہیدان راہ آئین و مہین...

ہر چند قابل تقدیم نیست.

سپاس خالصانه می‌کنم از:

❖ آقای مهندس جسپر اس کلاوسن (Jesper S. Clausen) به سبب همراهی بی چشمداشت در طول انجام این پروژه و در اختیار قرار دادن داده‌های مربوط به انجام پایان‌نامه.

❖ برادر ارجمندم، آقای مهندس مسعود شاهمیری که بخش قابل توجهی از زحمات انجام این پروژه را بی‌منت بر عهده گرفت.

❖ خانواده عزیزم که تا به پایان رسیدن دوره تحصیلی مشفقانه در کنارم بودند و مرا از دعای خیر خود محروم نساختند.

تعهد نامه

اینجانب امیر شاهمیری (۹۰۲۲۶۹۴) دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته ژئوفیزیک - لرزه‌شناسی، دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان‌نامه ارزیابی کیفیت و پیوستگی سازه‌های بتنی با آزمون غیرمخرب «پاسخ ضربه» تحت راهنمایی دکتر مهرداد سلیمانی منفرد و دکتر فرهنگ سرشکی متعهد می‌شوم.

- تحقیقات در این پایان‌نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان‌نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام «دانشگاه صنعتی شاهرود» و یا «Shahrood University of Technology» به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان‌نامه تأثیرگذار بوده‌اند در مقالات مستخرج از پایان‌نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که از موجود زنده (بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

امضای دانشجو

تاریخ

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه‌های رایانه‌ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان‌نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

چکیده

آزمون‌های غیرمخرب به مجموعه‌ای از روش‌های ارزیابی و تعیین خواص دستگاه‌ها و قطعات ساخته شده گفته می‌شود که هیچ‌گونه آسیب یا تغییری در سامانه ایجاد نکنند. این آزمون‌ها امروزه در بسیاری از صنایع نقشی حیاتی را ایفا می‌کنند. به عنوان مثال اطمینان از سلامت و ایمنی هواپیماها، وسایل نقلیه، قطارها، خطوط لوله، پل‌ها و سایر سازه‌ها، نیروگاه‌ها، پالایشگاه‌ها، سکوی نفتی و هزاران نمونه‌ی دیگر را با استفاده از آزمون غیر مخرب مورد بررسی قرار می‌گیرند. در واقع آزمون غیرمخرب را می‌توان ابزاری برای مدیریت کیفیت دانست.

روش‌های مخربی که برای ارزیابی کیفیت و پیوستگی سازه‌های بتنی به کار می‌رود اغلب پرهزینه بوده و انجام آن‌ها زمان‌بر می‌باشد. علاوه بر این، نتیجه این آزمون‌ها را نمی‌توان با دقت قابل قبولی برای تمامی سازه تعمیم داد. در مقابل با استفاده از روش پاسخ ضربه که روشی غیرمخرب است، هم هزینه‌ها به مقدار زیادی کاهش می‌یابد، هم زمان ارزیابی کم‌تر می‌شود و هم می‌توان آزمون را در سرتاسر سازه انجام داد. آزمون‌های غیرمخرب انواع مختلف دارند و نوع آزمون مورد استفاده نسبت به شرایط و خواص فیزیکی مواد متغیر می‌باشد. آزمون مورد استفاده در این تحقیق مبنایی لرزه‌ای دارد به این مضمون که امواج تنشی توسط یک ضربه تولید شده و به داخل محیط تحت آزمایش فرستاده می‌شود. فرستنده یک چکش یک کیلوگرمی است که یک بارسنج داخل آن جاسازی شده است. با توجه به خواص الاستیک محدوده مورد آزمایش، می‌توان فشاری معادل ۵ تا ۵۰ مگاپاسکال را به وسیله چکش وارد کرد. پاسخ تنش ورودی توسط یک مبدل سرعت و یا به عبارتی ژئوفون دریافت می‌شود. پس از برداشت داده‌ها، پردازش روی آن‌ها انجام می‌شود و در نهایت با تهیه کردن نمودارهای کنتوری و تفسیر آن‌ها، کیفیت سازه‌ی تحت آزمون ارزیابی می‌شود.

در این پایان‌نامه قوس زیرین پل‌های بخشی از شبکه ریلی کشور دانمارک به عنوان مطالعه موردی بررسی شده است. پوشش قوس زیرین این پل‌ها عمدتاً آجری بوده و کیفیت پشتیبانی این لایه‌های آجری با استفاده از آزمون پاسخ ضربه مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج به‌دست آمده از این آزمون‌ها با توجه به شرایط مغزه‌های گرفته شده از پل‌ها نشان می‌دهد که آزمون کارایی لازم را داشته و نتایج آن کاملاً قابل اطمینان است.

فهرست مقالات مستخرج از پایان نامه:

۱- شامیری ا، سلیمانی منفرد م، سرشکی ف، (۱۳۹۲)، "ارزیابی پیوستگی شمع‌های بتنی درجا با استفاده از روش غیرمخرب پاسخ ضربه"، پنجمین کنفرانس ملی سالیانه بتن، تهران.

۲- شامیری ا، سرشکی ف، سلیمانی منفرد م، (۱۳۹۲)، "ارزیابی کیفیت پیوستگی بتن تزریقی پشت پوشش بتنی تونل با استفاده از روش غیرمخرب پاسخ ضربه"، کنفرانس بین‌المللی مهندسی عمران، معماری و توسعه پایدار فضاهاى شهری، تبریز.

فهرست عناوین

۱..... فصل اول: مقدمه

۲..... ۱-۱ مقدمه

۵..... فصل دوم: کلیات

۶..... ۱-۲ امواج تنشی

۶..... ۱-۱-۲ تعریف :

۶..... ۲-۱-۲ تولید امواج الاستیک:

۷..... ۳-۱-۲ رفتار امواج تنشی در مرزها:

۹..... ۴-۱-۲ بازتاب و عبور از مرز جامد/جامد

۱۱..... ۵-۱-۲ پراش

۱۲..... ۲-۲ شکل امواج تنشی

۱۴..... ۳-۲ تحلیل فرکانسها

۱۴..... ۱-۳-۲ انتقال یک موج سینوسی ساده از حوزه زمان به حوزه فرکانس

۱۷..... ۲-۳-۲ انتقال امواج به حوزه فرکانس

۲۱..... فصل سوم: معرفی و تشریح روش پاسخ ضربه

۲۲..... ۱-۳ مقدمه

۲۲..... ۲-۳ آزمون پاسخ ضربه

۲۸..... ۳-۳ اصول تفسیر منحنی پاسخ ضربه

۲۸..... ۱-۳-۳ مشخصات پویایی

۳۰..... ۲-۳-۳ اندازه گیری صلبیت (سفتی) شفت

۳۲..... ۴-۳ ملاحظات عملی

۳۲..... ۱-۴-۳ طول صوتی

۳۳..... ۲-۴-۳ شیفت فرکانسی نمودار پویایی

۳۳..... ۳-۴-۳ رابطه صلبیت استاتیکی و دینامیکی شمع

۳۴..... ۴-۴-۳ طبقه بندی سیگنالهای پاسخ

فصل چهارم: سابقه مطالعه ۳۹

۱-۴ ارزیابی پیوستگی شمعهای بتنی درجا ۴۰

۲-۴ ارزیابی کیفیت پیوستگی بتن تزریقی پشت پوشش بتنی تونل ۴۳

۱-۲-۴ فرآیند برداشت داده ۴۶

۲-۲-۴ تفسیر نتایج ۴۶

۴-۲-۴ نمونههای عملی ۴۷

۱-۴-۲-۴ تونل انتقال آب بوینس آیرس، آرژانتین ۴۷

فصل پنجم: مطالعه موردی ۵۱

۱-۵ مقدمه ۵۲

۲-۵ مطالعه موردی ۵۳

۳-۵ انجام آزمون ۵۶

۱-۳-۵ پل ۲۰۵۰۸ واقع در اسپانگو (Spang å) ۵۸

۲-۳-۵ پل ۲۰۵۱۶ واقع در برونستد مولیوای (Brøndsted Møllevej) ۶۱

۳-۳-۵ پل ۲۰۵۲۴ واقع در اسکیروپو (Skærup Å) ۶۵

۴-۳-۵ پل ۲۰۶۱۴ واقع در بردبال تیرسباکوی (Bredballe Tirsbækvej) ۶۸

۵-۳-۵ پل ۲۰۶۱۶ واقع در تیرسباک (Tirsbæk) ۷۲

۶-۳-۵ پل ۲۰۶۷۰ واقع در اولستد او (Ølsted å) ۷۵

۷-۳-۵ پل ۲۰۶۷۶ واقع در وندلوب (vandløb) ۷۸

۸-۳-۵ پل ۲۰۸۱۶ واقع در برینگ او (Bering å) ۸۱

۴-۵ خلاصه‌ی مطالعات ۸۵

فصل ششم: نتیجه‌گیری ۸۷

۱-۶ جمع‌بندی ۸۸

۲-۶ نتیجه‌گیری ۸۸

۳-۶ پیشنهادها ۸۹

پیوست ۱: تصاویر ۹۱

پیوست ۲: بخشی از داده‌ها ۱۰۱

مراجع ۱۰۴

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۲ : نمایش چگونگی عدم انتقال ضربه در موج فشاری ۷
- شکل ۲-۲ : بازتاب حرکت کروی یک موج در یک لایه (a) موج P اولیه که توسط ضربه ایجاد شده است، (b) رسیدن موج P به سطح لایه، (c) بازتاب موج P از سطح تحتانی لایه و تشکیل موج (2P)، (d) بازتاب موج P از سطح فوقانی لایه ۸
- شکل ۳-۲ : نمایش تغییر شکل‌ها در زمان‌های مختلف پس از ضربه (a) $125 \mu s$ ، (b) $150 \mu s$ ، (c) $200 \mu s$ و (d) $250 \mu s$ ۹
- شکل ۴-۲ : تغییر فاز در بازتاب امواج P؛ (a) تغییر فاز در هر دو مرز تماس، (b) تغییر فاز فقط در سطح فوقانی ۱۱
- شکل ۵-۲ : پراش امواج P از لبه یک ترک؛ (a) ابتدای موج P به ترک می‌رسد، (b) بازتاب امواج P از مرز ترک، (c) و (d) پراش امواج و تشکیل امواج P_dP و عبور آنها از ترک ۱۲
- شکل ۶-۲ : سیستم‌های دال؛ (a) سیستم دال ایده آل و (b) سیستم یک دال محدود ۱۲
- شکل ۷-۲ : آزمایش ضربه بر روی یک دال (a) بازتاب امواج P و (b) طیف امواج ۱۳
- شکل ۸-۲ : مود ضخامت یک صفحه ۱۴
- شکل ۹-۲ : سیگنال تشکیل شده از یک موج سینوسی (الف) و نمودار طیف دامنه مربوطه آن (ب) ۱۵
- شکل ۱۰-۲ : موج تشکیل شده از دو موج سینوسی با فرکانس‌ها و دامنه‌های متفاوت (الف) و نمودار طیف دامنه مربوطه آنها (ب) ۱۵
- شکل ۱۱-۲ : موج تشکیل شده از سه موج سینوسی با فرکانس‌ها و دامنه‌های متفاوت (الف) و نمودار طیف دامنه مربوطه آنها (ب) ۱۶
- شکل ۱۲-۲ : یک موج ضربه بر روی یک صفحه صلب (الف) و طیف دامنه مربوطه آن (ب) ۱۶
- شکل ۱۳-۲ : شکل توصیفی؛ (a) امواج R، (b) طیف مربوط به آن، (c) قسمتی از یک موج P و تغییر شکل آن، (d) طیف مربوطه، (e) موج کامل و (f) طیف مربوطه ۱۸

- شکل ۲-۱۴: نوسان زیاد موج R در شکل موج می‌تواند فرکانس پاسخ طیف را تحت تأثیر قرار دهد..... ۱۸
- شکل ۲-۱۵: شکل موج بعد از حذف موج R و طیف دامنه مربوطه آن..... ۱۹
- شکل ۲-۱۶: شکل موج بعد از بریدن موج ریلی و طیف مربوطه آن..... ۱۹
- شکل ۳-۱: مجموعه تجهیزات انجام آزمون ارتعاش بر روی یک شفت حفاری شده..... ۲۳
- شکل ۳-۲: تجهیزات کنترل و برداشت داده‌های آزمون ارتعاش، حوالی سال ۱۹۷۰..... ۲۴
- شکل ۳-۳: مجموعه تجهیزات MIMP در حال انجام آزمون روی یک شفت..... ۲۵
- شکل ۳-۴: واحد برداشت داده تجهیزات MIMP (بالایی) و چاپگر (پایینی)..... ۲۶
- شکل ۳-۵: تجهیزات MIMP به همراه بارسنج..... ۲۶
- شکل ۳-۶: تصویری شماتیک از آزمون پاسخ ضربه..... ۲۷
- شکل ۳-۷: مثالی از نتیجه آزمون پاسخ ضربه..... ۲۷
- شکل ۳-۸: پاسخ فرضی یک شفت تحت آزمون با شرایط پی خاکی با خاصیت کشسان..... ۲۹
- شکل ۳-۹: همپوشانی پاسخ پدیده میانی عامل تشدید با پاسخ پاشنه شفت..... ۳۲
- شکل ۳-۱۰: منحنی پاسخ ضربه؛ پویایی بر حسب فرکانس..... ۳۳
- شکل ۳-۱۳: مثالی از سیگنال پاسخ ضربه نوع صفر..... ۳۵
- شکل ۳-۱۴: مثالی از سیگنال پاسخ ضربه نوع یک..... ۳۶
- شکل ۳-۱۵: مثالی از سیگنال ساده پاسخ ضربه نوع دو..... ۳۷
- شکل ۳-۱۶: مثالی از سیگنال پیچیده‌ی پاسخ ضربه نوع دو..... ۳۷
- شکل ۴-۱: سه موقعیت اصلی که در انجام آزمون پاسخ ضربه روی شمعها به وجود می‌آید: الف) یک شمع پیوسته، ب) شمع با رخداد تغییر کیفیت، ج) شمع با سطح مقطع متغیر..... ۴۲
- شکل ۴-۲: مثالی از نمودار پویایی مربوط به انجام آزمون روی شمع الف) یک شمع پیوسته ب) یک شمع با تغییر سطح مقطع در عمق مشخص..... ۴۳

- شکل ۳-۴ نمودار پویایی بر حسب فرکانس ۴۶
- شکل ۴-۴ نمودار کنتوری شاخص صلبیت دینامیکی که واحد آن مگانیوتون بر میلی‌متر (MN/mm) است ۴۸
- شکل ۵-۴ نمودار کنتوری شاخص نسبت حفرات ۴۸
- شکل ۵-۱: تصویری از تجهیزات ساخته شده به منظور انجام آزمون پاسخ ضربه ۵۰
- شکل ۵-۲: نقشه کلی مربوط به محل هشت پل مورد مطالعه ۵۱
- شکل ۵-۳: نمونه‌ای از داده حاصل از انجام آزمون پاسخ ضربه در یک نقطه شامل داده‌های در واحد زمان (بالا) و نمودار پویایی به دست آمده پس از پردازش (پایین) ۵۲
- شکل ۵-۴: نمودار پویایی مربوط به یک محیط متراکم در مقایسه با یک محیط با پشتیبانی نامناسب ۵۳
- شکل ۵-۵: شمایی از محل نقاط اندازه‌گیری در قوس زیرین یک پل ۵۵
- شکل ۵-۶: پل ۲۰۵۰۸ واقع در اسپانگو (Spang å) ۵۷
- شکل ۵-۷: نمودار پویایی میانگین مربوط به پل ۲۰۵۰۸ ۵۷
- شکل ۵-۸: نمودار شاخص حفرات مربوط به پل ۲۰۵۰۸ ۵۸
- شکل ۵-۹: مغزه برداشته شده از قوس زیرین پل ۲۰۵۰۸ ۵۸
- شکل ۵-۱۰: پل ۲۰۵۱۶ واقع در برونستد مولیوای (Brøndsted Møllevej) ۵۹
- شکل ۵-۱۱: نمودار پویایی میانگین مربوط به پل ۲۰۵۱۶ ۶۰
- شکل ۵-۱۲: نمونه‌ای از قسمتهای ترمیم شده که در مطالعات چسبندگی ضعیفی بین لایه آجری و لایه زیرین دارد ۶۱
- شکل ۵-۱۳: نمودار شاخص حفرات مربوط به پل ۲۰۵۱۶ ۶۱
- شکل ۵-۱۴: محل مغزه گرفته شده از پل ۲۰۵۱۶، ترک در لایه‌ی دوم آجری دیده می‌شود ۶۲

- شکل ۵-۱۵: مغزه گرفته شده از پل ۲۰۵۱۶؛ قسمت‌های سفید رنگ نشان دهنده‌ی وجود نم و رطوبت در سازه است ۶۲
- شکل ۵-۱۶: پل ۲۰۵۲۴ واقع در اسکیروپو (Skærup Å) ۶۳
- شکل ۵-۱۷: نمودار پویایی میانگین مربوط به پل ۲۰۵۲۴ ۶۴
- شکل ۵-۱۸: نمونه‌های از محلی تعمیر شده از سازه؛ مطالعات نشان می‌دهد که چسبندگی ضعیفی بین لایه آجری با لایه‌ی زیرین آن وجود دارد. این بخش در نمودار شکل ۵-۱۵ به رنگ زرد نشان داده شده است. ۶۴
- شکل ۵-۱۹: نمودار شاخص حفرات مربوط به پل ۲۰۵۲۴ ۶۵
- شکل ۵-۲۰: مغزه‌ی برداشت شده از قوس زیرین پل ۲۰۵۲۴ ۶۶
- شکل ۵-۲۱: پل ۲۰۶۱۴ واقع در بردبال تیرسباکوی (Bredballe Tirsbækvej) ۶۶
- شکل ۵-۲۲: نمودار پویایی میانگین مربوط به پل ۲۰۶۱۴ ۶۷
- شکل ۵-۲۳: نمونه‌های از یک آجر که بخش خارجی آن دچار تورم شده است. بخش‌های سفید رنگ نشانگر وجود نم و رطوبت در سازه است ۶۸
- شکل ۵-۲۴: نمودار شاخص حفرات مربوط به پل ۲۰۶۱۴ ۶۸
- شکل ۵-۲۵: محل مغزه برداشت شده از قوس زیرین پل ۲۰۶۱۴ ۶۹
- شکل ۵-۲۶: مغزه برداشت شده از قوس زیرین پل ۲۰۶۱۴ ۶۹
- شکل ۵-۲۷: پل ۲۰۶۱۶ واقع در تیرسباک (Tirsbæk) ۷۰
- شکل ۵-۲۸: نمودار پویایی میانگین مربوط به پل ۲۰۶۱۶ ۷۱
- شکل ۵-۲۹: تصویری از قسمت غربی پل؛ تعداد محل‌های ترمیم شده قابل توجه است ۷۱
- شکل ۵-۳۰: نمودار شاخص حفرات مربوط به پل ۲۰۶۱۶ ۷۲
- شکل ۵-۳۱: پل ۲۰۶۷۰ واقع در اولتد او (Ølsted å) ۷۲
- شکل ۵-۳۲: نمودار پویایی میانگین مربوط به پل ۲۰۶۷۰ ۷۳

- شکل ۵-۳۳: تصویری از قسمت جنوبی سازه که ترمیم شده است ۷۴
- شکل ۵-۳۴: نمودار شاخص حفرات مربوط به پل ۲۰۶۷۰ ۷۴
- شکل ۵-۳۵: پل ۲۰۶۷۶ واقع در وندلوب (vandløb) ۷۵
- شکل ۵-۳۶: نمودار پویایی میانگین مربوط به پل ۲۰۶۷۶ ۷۵
- شکل ۵-۳۷: تصویری از محل انتخاب شده جهت برداشت مغزه؛ عملیات ترمیمی قبلاً در این ناحیه (به ویژه در سمت راست علامت زرد رنگ) انجام گرفته است ۷۶
- شکل ۵-۳۸: نمودار شاخص حفرات مربوط به پل ۲۰۶۷۶ ۷۷
- شکل ۵-۳۹: مغزه‌ی گرفته شده از قوس زیرین پل ۲۰۶۷۶؛ قسمت‌های سفید رنگ نشانگر عدم اتصال مناسب و وجود خلل و فرج در مواد به کار برده شده است ۷۷
- شکل ۵-۴۰: پل ۲۰۸۱۶ واقع در برینگ او (Bering å) ۷۸
- شکل ۵-۴۱: نمودار پویایی میانگین مربوط به پل ۲۰۸۱۶ ۷۹
- شکل ۵-۴۲: محل برداشت مغزه در دیوارهی سازه؛ سطح خارجی دیواره پولیش داده شده است ۸۰
- شکل ۵-۴۳: نمودار شاخص حفرات مربوط به پل ۲۰۸۱۶ ۸۰
- شکل ۵-۴۴: مغزه‌ی برداشت شده از قوس زیرین پل ۲۰۸۱۶ ۸۱

فهرست جدول‌ها

جدول ۵-۱: خلاصه اطلاعات مربوط به پل‌های بررسی شده-----۵۶

جدول ۵-۲: خلاصه نتایج مطالعات انجام گرفته روی هر پل-----۸۶

فصل اول:

مقدمه

۱-۱ مقدمه

امروزه بتن به یکی از مهم‌ترین محصولات در سرتاسر دنیا تبدیل شده است. تولید بتن همانند سایر محصولات دقت خاصی را می‌طلبد و از این رو آزمایش‌های خاصی بر روی نمونه بتن انجام می‌پذیرد که معرف کیفیت بتن تولیدی می‌باشد. این آزمایش‌ها به دو روش انجام می‌گیرد:

۱. روش مستقیم یا مخرب^۱

۲. روش غیر مستقیم یا غیر مخرب^۲

روش مستقیم به صورت بارگذاری بر روی آزمون بتنی و مشاهده نتایج حاصل از تغییر شکل و شکستگی آزمون انجام می‌شود و به همین دلیل آن را آزمایش مخرب می‌نامند.

عمده‌ی این آزمایش‌ها مستلزم ساخت آزمون‌ها و یا مغزه‌گیری از بتن‌های سازه‌ای است که مشکلاتی را به همراه داشته است. به همین دلیل تحقیق در مورد آزمایش‌های غیرمستقیم بر روی بتن شروع شد. بیش از سه دهه از انجام اولین سری آزمایش‌های غیر مخرب بر اساس تولید امواج تنشی و دریافت آن‌ها بر روی بتن نگذشته است و سرعت پیشرفت آن رو به افزایش است. آزمایش‌های اولیه به صورت ارسال امواج فرا صوت^۳ بر سطح قطعه بتنی و تحلیل امواج عبوری از بتن و امواج جذب‌شده توسط آن صورت گرفت که هم‌اکنون نیز به عنوان یکی از بهترین روش‌های آزمایش غیر مخرب بر روی بتن شناخته می‌شود.

روشی که در این پایان‌نامه به آن پرداخته شده است، «پاسخ ضربه^۴» نام دارد. مبنای نظری این روش بر اساس نظریه‌ی تولید امواج تنشی و انتشار آن‌ها در یک محیط پیوسته و بازتاب آن‌ها از ناهمگنی‌های محیطی که امواج در آن‌ها انتشار می‌یابد، می‌باشد.

با بررسی امواج تنشی در داخل بتن که امواجی طولی هستند و به دست آوردن معادله حاکم بر انتشار این امواج بر اساس خواصی همچون مدول‌های الاستیسیته، چگالی حجمی و نسبت پواسون که خواص ذاتی بتن تولیدی هستند، آزمایش‌های غیر مخرب شکل تازه‌ای به خود گرفت.

در این پایان‌نامه در ابتدا به کلیاتی در مورد امواج و چگونگی انتشار و رفتار آن‌ها در سازه‌های بتنی پرداخته شده است. همچنین توضیحاتی در مورد سرعت امواج و تحلیل آن‌ها بیان شده است.

¹ Destructive test

² Non-Destructive test

³ Ultrasonic

⁴ Impulse Response

در ادامه به معرفی روش پاسخ ضربه و تشریح نسبتاً مفصّل آن پرداخته شده و در فصل چهارم مواردی به عنوان سابقه‌ی مطالعه بررسی شده است. در پایان هم مطالعه‌ی موردی و بعد از آن نتیجه‌گیری و جمع‌بندی آورده شده است.

فصل دوم:

کلیات

۲-۱ امواج تنشی^۱

۲-۱-۱ تعریف :

وقتی نیرویی به یک نقطه از یک جسم صلب وارد می‌شود، در داخل جسم یک تغییر شکل ایجاد می‌نماید. چنانچه جسم دارای خاصیت الاستیک باشد و زمان اعمال نیرو کم باشد، این نیرو ایجاد امواج تنشی در داخل جسم می‌نماید. این امواج شامل موج فشاری یا اولیه (امواج P) و دیگری با نام امواج برشی یا ثانویه (امواج S) شناخته می‌شود. نوع دیگری از امواج نیز وجود دارد که ترکیبی از امواج P و S است و در سطح پخش می‌شود که تحت نام امواج ریلی R خوانده می‌شوند.

۲-۱-۲ تولید امواج الاستیک:

امواج P امواجی فشاری یا کششی هستند و تغییر شکل آنها در راستای انتشار موج خواهد بود. امواج S امواجی برشی هستند و تغییر شکل آنها عمود بر مسیر انتشار است. امواج ریلی R امواجی مختلط هستند که فقط در سطح محیط منتشر می‌شوند.

در روش "پاسخ ضربه" فقط امواج P مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرند.

سرعت امواج P و S بر طبق روابط مربوط به یک جسم نامحدود به صورت زیر به دست می‌آید:

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

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

که در آنها E مدول الاستیسته جسم، ν ضریب پواسون و ρ چگالی جسم است. C_P سرعت امواج P و C_S سرعت امواج S هستند. به وضوح مشخص است که سرعت امواج S بسیار کمتر از امواج P می‌باشد و در حدود ۰/۶۲ برابر سرعت امواج P است. نسبت سرعت امواج R به امواج P در بتن در حدود ۰/۵۷ است.

¹ Stress Waves

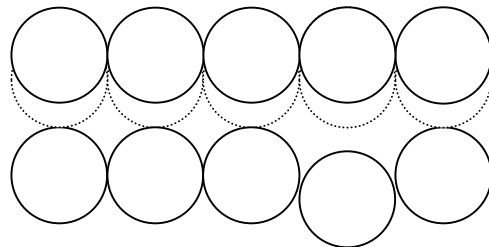
ضریب پواسون در بتن در حدود $0/18$ می‌باشد. بنابراین در بتن‌های معمولی، سرعت امواج P بتن بین 3000 m/s تا 5500 m/s تغییر می‌کند.

بر اساس روابط فیزیکی، رابطه بین سرعت (c)، فرکانس (f) و طول موج (λ) به صورت است:

$$C = f \cdot \lambda \quad (3-2)$$

بررسی تأثیر ناپیوستگی‌های داخل بتن با امواج تنشی، به طول موج و عمق و مقدار عرض بازشدگی ناپیوستگی در بتن مربوط است. در واقع، امواجی با طول موج λ ، از سطوحی که عرض بازشدگی ناپیوستگی آنها مساوی یا بیشتر از λ باشد بازتاب می‌شود. به بیان دیگر برای آنکه بفهمیم یک ناپیوستگی به ضخامت a در بتن وجود دارد، کفایت امواجی با طول موج کمتر از a در بتن ایجاد کنیم. مشکلی که در اینجا حاصل می‌شود آن است که ترک‌های بسیار ریز (ریز ترک‌ها) به علت وجود سنگدانه در بتن وجود دارد. به عنوان مثال چنانچه امواج با فرکانس بالاتر از 80 KHz تولید شود (با فرض سرعت 4000 m/s ، طول موج این امواج حدود 5 cm خواهد بود)، برای اینکه این امواج توسط ناپیوستگی موجود در بتن متفرق گردند، بایستی بُعد این ناپیوستگی بزرگتر از 5 cm باشد.

شکل ۱-۲ معرف انتقال حرکت ذره در حد فاصل ناپیوستگی است. در واقع چنانچه $\lambda > a$ باشد (λ معرف طول موج و a فاصله بین ذرات است) ذره اول به ذره دوم نمی‌رسد تا ضربه بتواند منتقل شود.



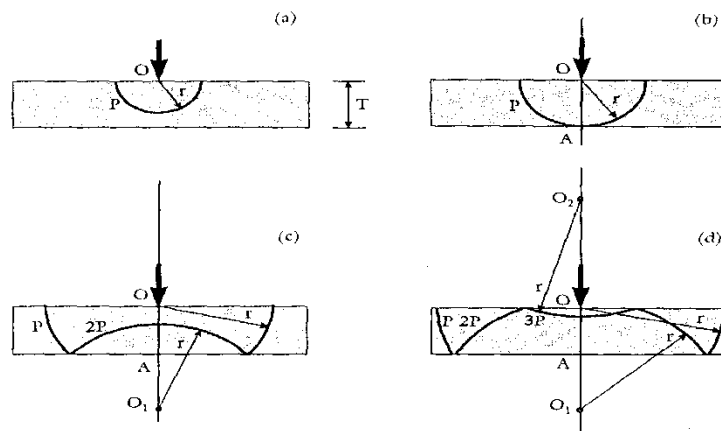
شکل ۱-۲: نمایش چگونگی عدم انتقال ضربه در موج فشاری [۱]

۳-۱-۲ رفتار امواج تنشی در مرزها:

یک مرز عبارت است از صفحه‌ای که بین دو ماده با مشخصات آکوستیک متفاوت وجود دارد. این دو ماده می‌توانند خصوصیات مشابه داشته باشند (مانند بتنی که پس از تعمیرات بر روی سازه قدیمی پاشیده

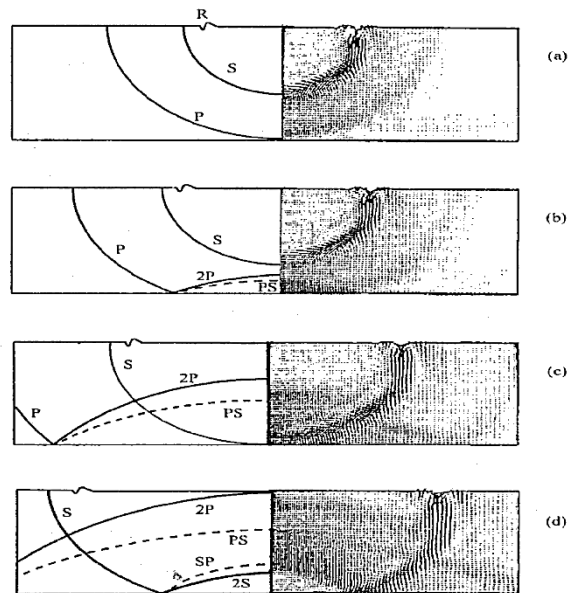
می‌شود) و یا بسیار متفاوت باشد (مانند بتن و هوا). خاصیتی که رفتار امواج را در مرز مشخص می‌کند مقاومت صوتی و یا امپدانس آکوستیک نام دارد (امپدانس عبارت است از حاصل ضرب چگالی در سرعت موج). وقتی دو ماده با خصوصیات امپدانس متفاوت وجود دارد، هم در اثر برخورد تنش به سطح و هم در هنگام ورود موج تنشی به جسم دوم بازتاب ایجاد می‌شود. در زیر به بررسی امواج P در سطوح انعکاس می‌پردازیم.

فرض کنید یک موج P از سطح یک جسم به درون آن منتشر می‌شود. این امواج در سطح دیگر جسم بازتاب می‌شوند. این امواج بازتاب شده را به ترتیب با $2P$ ، $3P$ و ... نمایش می‌دهیم. چنانچه مرکز دایره موج خروجی از سطح بتن را با O نمایش دهیم، در مرحله اول بازتاب، امواج P، O_1 و در مرحله دوم O_2 و به همین ترتیب مراکز مختلف خواهیم داشت. در شکل ۲-۲ می‌توان این مراکز و مشخصات امواج بازتاب شده را مشاهده کرد. به راحتی می‌توان دریافت که شعاع تابش و بازتاب امواج، r ، برای بازتاب‌های متوالی تفاوتی نمی‌کند اگرچه با زمان در حال افزایش است.



شکل ۲-۲: بازتاب حرکت کروی یک موج در یک لایه (a) موج P اولیه که توسط ضربه ایجاد شده است، (b) رسیدن موج P به سطح لایه، (c) بازتاب موج P از سطح تحتانی لایه و تشکیل موج $2P$ ، (d) بازتاب موج P از سطح فوقانی لایه [۱]

در شکل ۲-۳ اثر موج ضربه بر روی نمونه بتنی که به وسیله تحلیل اجزاء محدود به دست آمده است مشاهده می‌شود.



شکل ۲-۳: نمایش تغییر شکل‌ها در زمان‌های مختلف پس از ضربه (a) $125 \mu s$ ، (b) $150 \mu s$ ، (c) $200 \mu s$ و (d) $250 \mu s$ [۱]

سرعت موج را در این حالت 4000 m/s فرض نموده‌ایم و ضخامت لایه 0.5 متر است و بنابراین زمان عبور موج تنشی از ضخامت لایه $125 \mu s$ است. بر این اساس زمان‌های تا $250 \mu s$ معرف حرکت موج از یک سمت به سمت دیگر است. باید توجه نمود که در اینجا سرعت موج برشی S تقریباً 0.66 سرعت موج عمودی P است. با کمی دقت در می‌یابیم که در اثر بازتاب موج P از سطح نمونه و برخورد به موج S که هنوز بازتاب نشده است، موج‌هایی تحت نام PS ایجاد می‌شود که حاصل برهم‌کنش موج‌های P و S است.

۲-۱-۴ بازتاب و عبور از مرز جامد/جامد

هنگام برخورد یک موج به یک سطح در محل تماس جامد/هوا، تقریباً تمام انرژی در سطح جامد بازتاب می‌شود. ولی با توجه به رفتار موج P به راحتی می‌توان دریافت که در مرز جامد/جامد بسته به امپدانس

دو ماده، (در حالتی که موج P تابانیده شده بر مرز تماس عمود باشد) درصدی از انرژی بازتاب و درصدی از مرز خارج شده و وارد جسم دیگر می‌شود که از معادلات زیر به دست می‌آید:

$$R_{\text{بازتاب}} = \frac{(Z_2 - Z_1)}{(Z_2 + Z_1)} \quad (4-2)$$

$$R_{\text{شکست}} = \frac{2Z_1}{(Z_2 + Z_1)} \quad (5-2)$$

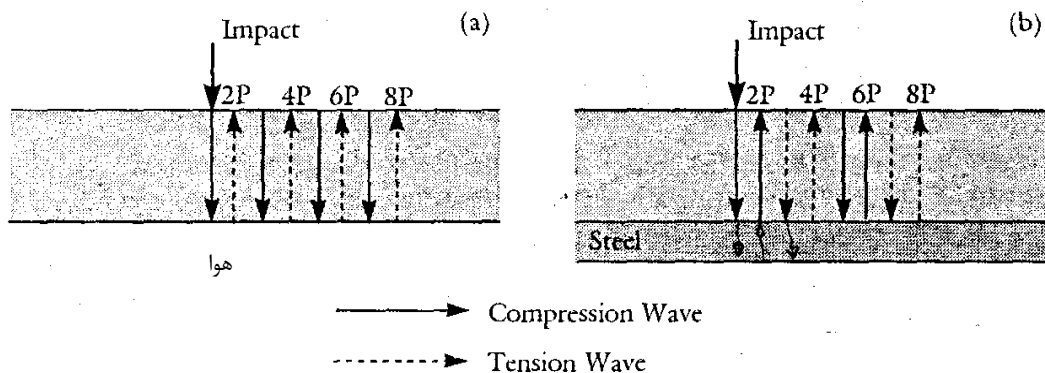
$$Z = \rho \cdot C \quad (6-2)$$

که در آن Z_1 امپدانس محیطی است که موج در آن عبور می‌کند و Z_2 امپدانس محیطی است که موج به آن وارد می‌شود و R معرف درصدی از موج است که بازتاب شده و یا شکسته می‌شود. ρ چگالی جسم صلب و C سرعت موج فشاری یا برشی است. چنانچه $Z_2 \ll Z_1$ باشد همانند سطح بتن - هوا (حرکت موج از بتن به هوا)، ضریب بازتاب برابر با ۱- می‌شود. و ضریب شکست برابر صفر می‌شود.

در صورتی که $Z_2 \gg Z_1$ باشد، همانند سطح تماس بتن - فولاد (حرکت موج از بتن به فولاد)، ضریب بازتاب برابر ۱+ و ضریب شکست برابر صفر می‌شود. در اثر این شکسته شدن یا بازتاب، موج تغییر فازی نمی‌دهد. (لازم به ذکر است که ضریب امپدانس فولاد نسبت به یک بتن معمولی حدوداً ۵ تا ۶ برابر است).

چنانچه دو ماده دارای امپدانس‌های تقریباً برابر باشند، ($Z_1 \cong Z_2$)، ضریب بازتاب برابر صفر و ضریب شکست برابر ۱ می‌شود. این حالت وقتی به وجود می‌آید که هر دو ماده بتن باشد یا بتن و سنگی که امپدانس‌های تقریباً برابر دارند. در این حالت تقریباً تمام انرژی از مرز تماس عبور کرده و وارد محیط دیگر می‌شود. مطالعات نشان می‌دهد که برای تشخیص اثرات بازتاب از مرز تماس بایستی ضریب بازتاب در حدود ۰/۲۴ یا بیشتر باشد.

چنانچه ضریب بازتاب منفی شود، موج ضمن بازتاب تغییر فاز می‌دهد. یعنی موج فشاری به موج کششی تبدیل می‌شود و بالعکس. تغییرات فاز در شکل ۴-۲ مشخص شده است. خطوط خط چین معرف امواج کششی و خط ممتد معرف امواج فشاری است.

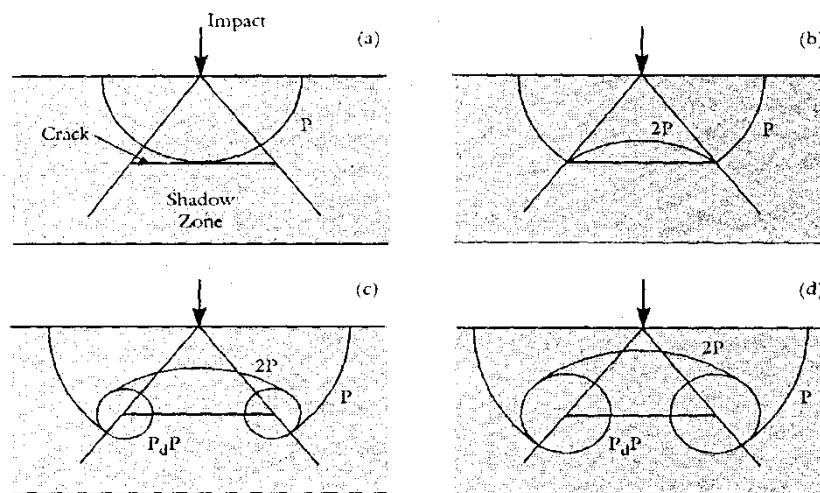


شکل ۴-۲: تغییر فاز در بازتاب امواج P؛ (a) تغییر فاز در هر دو مرز تماس، (b) تغییر فاز فقط در سطح فوقانی [۱]

از اینجا می‌توان تفاوت میان یک شکاف هوا و یک لایه که معرف آرماتور و بتن است را دریافت.

۵-۱-۲ پراش

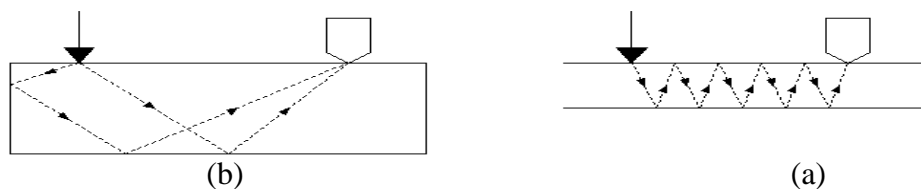
وقتی امواج P ضمن عبور با یک ترک مواجه می‌شوند، مطابق شکل ۵-۲ در اطراف آن دچار پراش می‌شوند، و به صورت دایره‌ای در محیط پخش می‌شوند که مرکز آن گوشه ترک است. این امواج تحت نام امواج $P_d P$ خوانده می‌شوند. پراش امواج P_d در تشخیص ترک‌ها نقش بسیار مهمی دارند. این امواج در شکل ۵-۲ نشان داده شده‌اند.



شکل ۲-۵: پراش امواج P از لبه یک ترک؛ (a) ابتدای موج P به ترک می‌رسد، (b) بازتاب امواج P از مرز ترک، (c) و (d) پراش امواج و تشکیل امواج PdP و عبور آنها از ترک [۱]

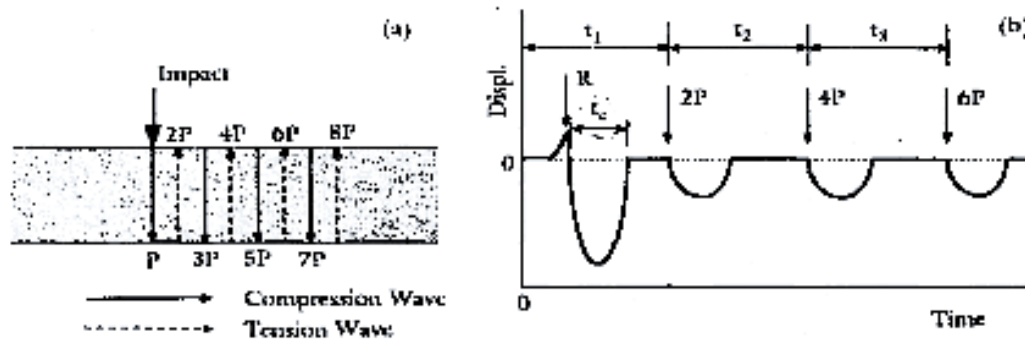
۲-۲ شکل امواج تنشی

یک دال مناسب‌ترین شکل نمونه آزمایش است. دال بتنی (به فرانسوی: Dalle)، یک عضو سازه‌ای در ساختمان‌های امروزی است که معمولاً دارای ضخامتی بین ۱۰ تا ۵۰ سانتی‌متر بوده و عمدتاً در سقف طبقات به کار برده می‌شوند. یک دال ایده آل عبارت است از دالی که در دو جهت گسترده شده و نسبت ابعاد آن به ضخامتش آن قدر زیاد باشد تا امواج بازتاب شده از وجوه دیگر، در ضمن دریافت اطلاعات توسط دریافت‌کننده به آن نرسد (شکل ۲-۶-۱). در شکل (۲-۶-۲) سیستم دال محدود نشان داده شده است.



شکل ۲-۶ سیستم‌های دال؛ (a) سیستم دال ایده آل و (b) سیستم یک دال محدود [۱]

در واقع در سیستم دال ایده آل امواج صرفاً بین دو سطح دال در رفت و برگشت هستند. یک دال در مجاورت هوا به ضخامت T را در نظر می‌گیریم که یک ضربه به سطح آن برخورد کرده و امواج P در آن مرتباً بازتاب می‌شوند. بدیهی است در سطح دال امواج R وجود دارند. چنانچه ابعاد دال بزرگ باشد، در زمان دریافت اطلاعات، بازتاب امواج R از لبه‌های دال به عنوان دریافت نخست ما ثبت نخواهد شد. معمولاً رسیدن امواج R اولیه جابجایی زیادی در حرکت ذرات ایجاد می‌کند (شکل ۷-۲).



شکل ۷-۲: آزمایش ضربه بر روی یک دال (a) بازتاب امواج P و (b) طیف امواج [۱]

در شکل ۷-۲ زمان ضربه (t_c) عبارت است از فاصله زمانی بین دو لحظه که در لحظه اول امواج R دریافت شده و در لحظه بعد که پس از تغییر شکل است و لذا دستگاه به صفر رسیده است. در واقع در اثر جابجایی ایجاد شده در دریافت‌کننده، جریان الکتریسیته ایجاد می‌شود.

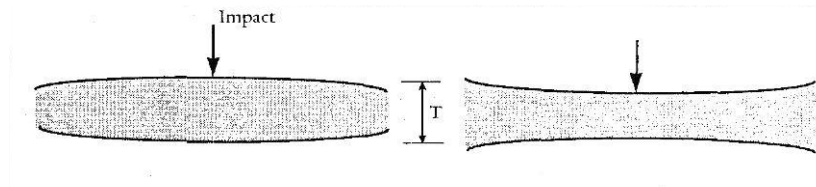
چنانچه در شکل، زمان رسیدن اولین موج را به دریافت‌کننده t_1 بنامیم، در واقع در این زمان موج توانسته است یک‌بار ضخامت T را رفته و بازگردد. بنابراین به این ترتیب می‌توان فرکانس را به دست آورد.

$$f = \frac{1}{t_1} = \frac{C_p}{2T} \quad (7-2)$$

که در آن C_p سرعت موج P و T ضخامت نمونه است. از آنجا که بازتاب‌های پی در پی امواج تنشی بر مود ارتعاش صفحه اثر می‌گذارد، نسبت مقادیر واقعی به مقادیر تئوری حدود ۰/۹۶ است. بنابراین یک ضریب $\beta = 0.96$ برای صفحه در رابطه بالا ضرب می‌شود.

$$f = \frac{\beta C_p}{2T} \xrightarrow{\beta=0.96} f = \frac{0.96 C_p}{2T} \quad (8-2)$$

علت ایجاد این ضریب که به تغییر شکل‌های صفحه مرتبط است در شکل ۸-۲ مشاهده می‌شود.



شکل ۸-۲: مود ضخامت یک صفحه [۱]

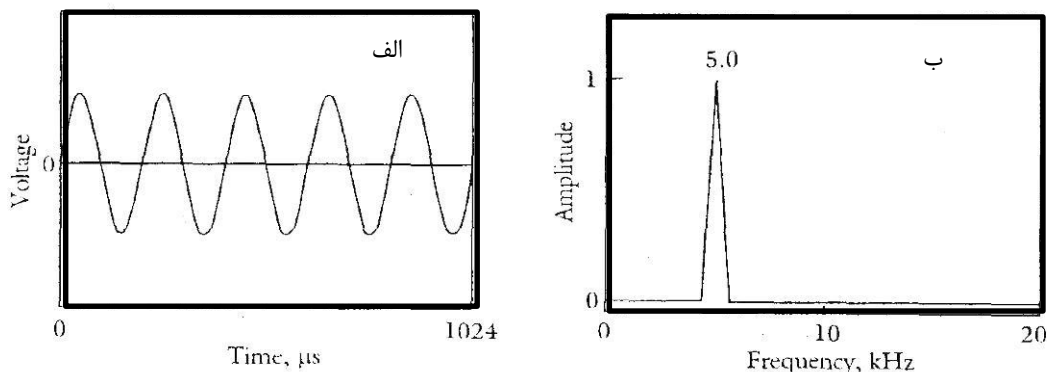
در واقع ضریب β به مشخصات هندسی جسم بر می‌گردد که برای یک صفحه حدود ۰/۹۶ است.

۳-۲ تحلیل فرکانس‌ها

در یک جسم به دلیل وجود حفرات و لبه‌ها و... انواع بازتاب‌ها توسط دریافت‌کننده ثبت می‌شود و ایجاد موجی را می‌کند که غالباً به صورت مختلط است. جدا کردن مشخصات موج اصلی که معرف مشخصات جسم است یا مشکل است و یا به کلی غیرممکن. بنابراین شکل موج ثبت شده، از حوزه زمان به حوزه فرکانس برده شده که در آن امواج با فرکانس‌های خود به صورت پیک‌های جداگانه و با بزرگنمایی‌های مختلف مشخص می‌شوند.

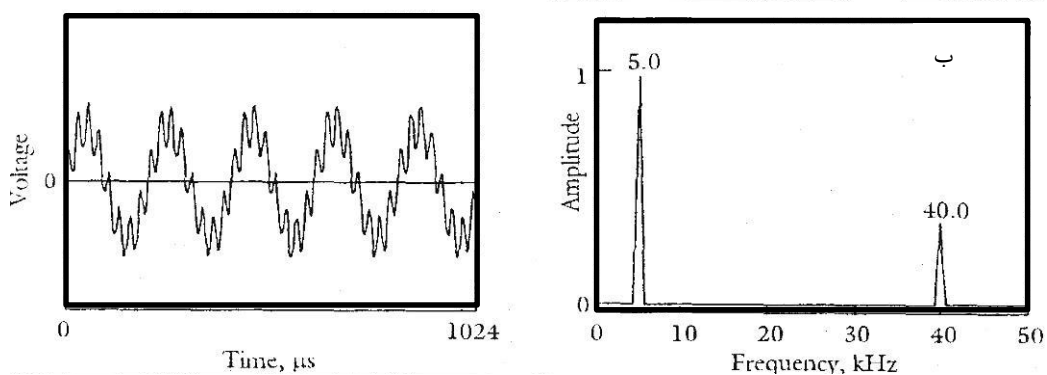
۱-۳-۲ انتقال یک موج سینوسی ساده از حوزه زمان به حوزه فرکانس

در شکل ۹-۲ تصویر یک موج سینوسی ساده مشاهده می‌شود که دارای دامنه ۱/۰ است و فرکانس آن ۵ KHz بوده که در حوزه فرکانس به صورت یک پیک نشان داده شده است.



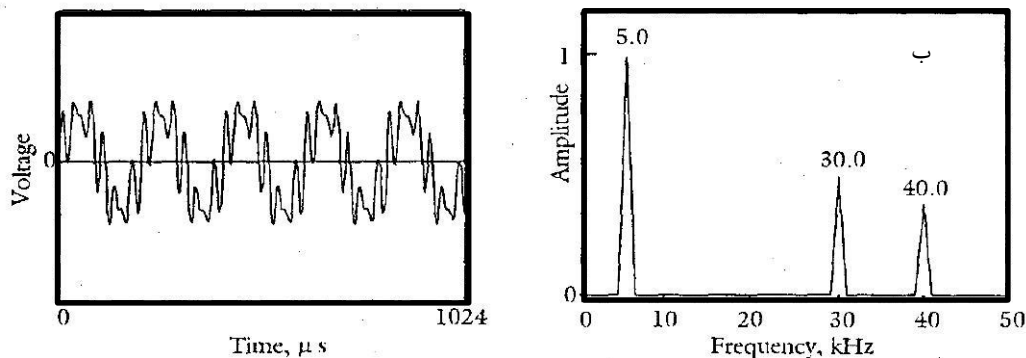
شکل ۲-۹: سیگنال تشکیل شده از یک موج سینوسی (الف) و نمودار طیف دامنه مربوطه آن (ب) [۱]

در شکل ۲-۱۰ منحنی موجی را مشاهده می‌کنید که از دو موج سینوسی با فرکانس‌های ۵ KHz و ۴۰ KHz تشکیل شده است. که بزرگنمایی آنها (بزرگنمایی ولتاژ جریان دستگاه است که متناسب با دامنه موج است) به ترتیب برابر با ۱/۰ و ۰/۴ است. توجه نمایید بزرگنمایی مشخصه تغییر شکل موج است و به فرکانس موج ارتباطی ندارد. چنانچه موج در حوزه فرکانس رسم نماییم دو پیک در فرکانس‌های موج مشاهده می‌شود (شکل ۲-۱۰).



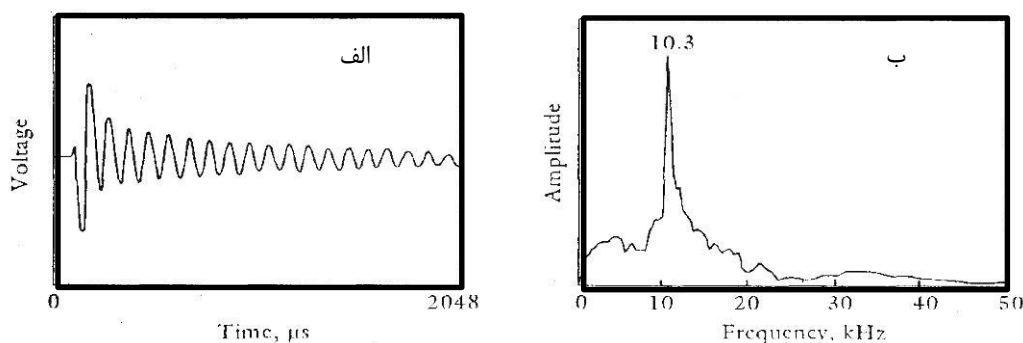
شکل ۲-۱۰: موج تشکیل شده از دو موج سینوسی با فرکانس‌ها و دامنه‌های متفاوت (الف) و نمودار طیف دامنه مربوطه آنها (ب) [۱]

شکل ۲-۱۱ یک موج متشکل از سه موج سینوسی را که با یکدیگر تلفیق شده‌اند، نشان می‌دهد و فرکانس‌های آنها هم در همین نمودار قابل مشاهده است. باید توجه داشت که بزرگنمایی موج‌های KHz ۵ و ۴۰ همانند نمودار قبل می‌باشد.



شکل ۲-۱۱: موج تشکیل شده از سه موج سینوسی با فرکانس‌ها و دامنه‌های متفاوت (الف) و نمودار طیف دامنه مربوطه آنها (ب) [۱]

در عمل نمودار موج به صورت‌های منظم سینوسی که در بالا آمده است، نخواهد بود. در شکل ۲-۱۲ موجی با سرعت 4290 m/s از یک نمونه دال بتنی به ضخامت 20 cm عبور می‌نماید.



شکل ۲-۱۲: یک موج ضربه بر روی یک صفحه صلب (الف) و طیف دامنه مربوطه آن (ب) [۱]

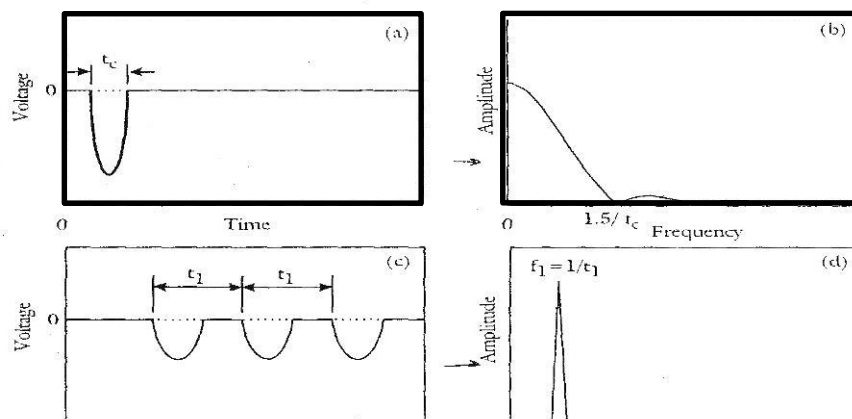
ملاحظه می‌شود که طیف موج حاصل یک طیف مستهلک شونده است و نیز در حوزه فرکانس، به صورت یک پیک تنها مشاهده نمی‌شود. علت این امر وجود طیفی از فرکانس‌هاست که در بتن تولید شده و بازتاب می‌گردد. فرکانس پیک این نمونه به صورت زیر محاسبه می‌شود. که در شکل ۲-۱۲ قابل مشاهده است.

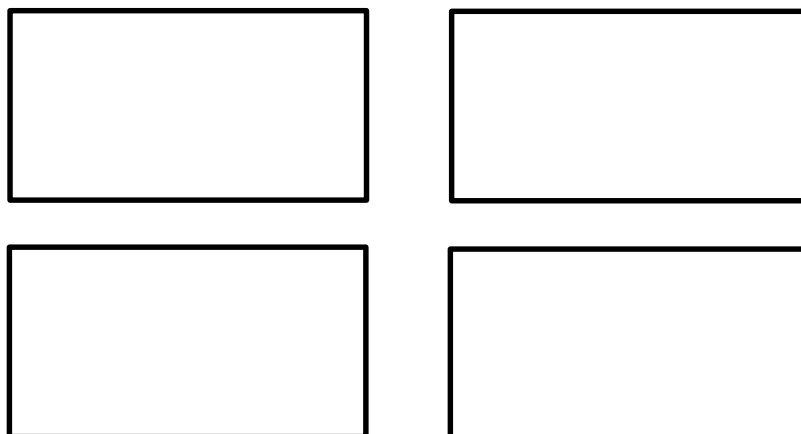
$$f = \frac{0.96 \times 4290 \text{ m/s}}{2 \times 0.2 \text{ m}} = 10.3 \text{ KHz}$$

۲-۳-۲ انتقال امواج به حوزه فرکانس

اگرچه امواج ریلی اثری در برآورد اطلاعات در بتن ندارد، تغییر مکانی که توسط امواج ریلی ایجاد می‌شود، بر طیف امواج حاصل اثرات مهمی خواهد گذاشت. وقتی طیف یک موج در حوزه فرکانس رسم می‌شود، طیف حاصل شامل دامنه فرکانس‌های وسیعی از تابع نیرو - زمان ضربه است (شکل ۲-۱۳).

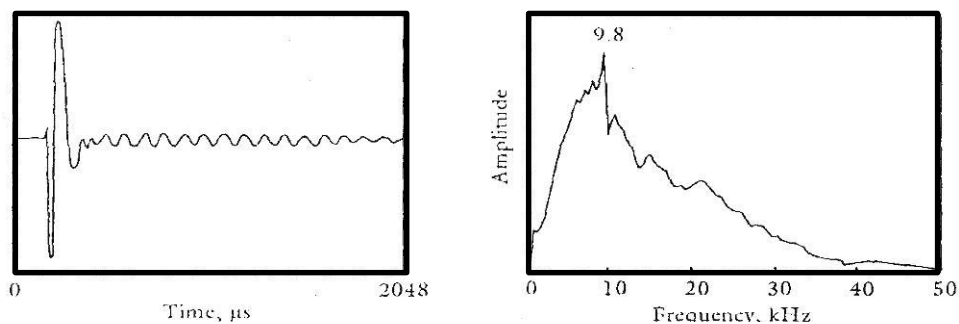
در نمودار a منحنی یک موج ریلی و منحنی فرکانس آن در نمودار b نشان داده شده است. در نمودار c منحنی یک موج فشاری و منحنی فرکانسی آن در نمودار d مشاهده می‌شود. در نمودار e منحنی ترکیبی این دو موج و در نمودار f طیف فرکانس مربوطه آن دیده می‌شود.



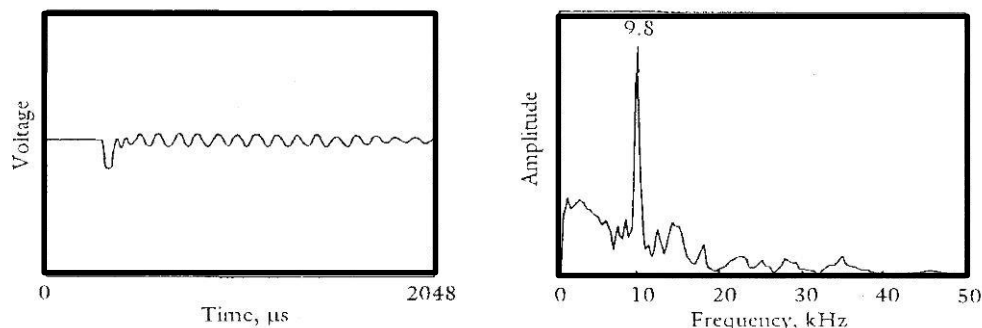


شکل ۲-۱۳: شکل توصیفی؛ (a) امواج R، (b) طیف مربوط به آن، (c) قسمتی از یک موج P و تغییر شکل آن، (d) طیف مربوطه، (e) موج کامل و (f) طیف مربوطه [۱]

در اشکال ۲-۱۴ و ۲-۱۵ طیف‌های مربوط به یک موج مشاهده می‌شود. در شکل ۲-۱۴، موج حاصل شامل امواج ریلی و فشاری است که در شکل ۲-۱۵، موج ریلی مربوطه حذف شده است. از اینجا می‌توان دریافت که چرا بایستی اثر امواج ریلی را برای یافتن مشخصات نمونه حذف نمود.

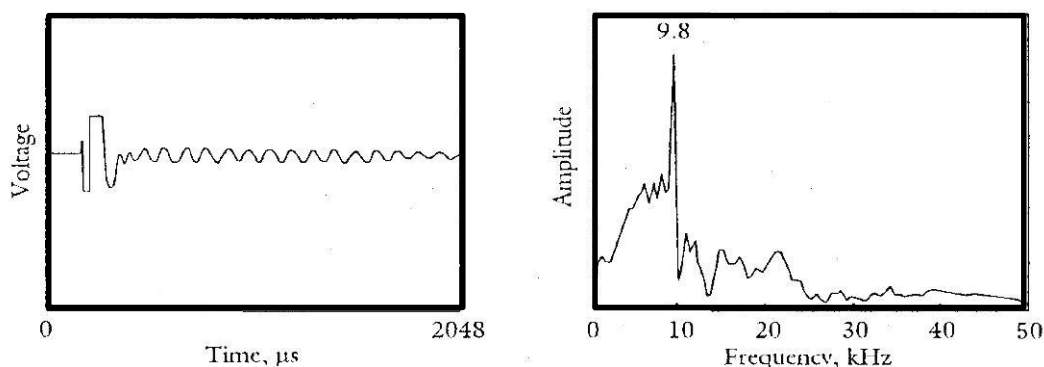


شکل ۲-۱۴: نوسان زیاد موج R در شکل موج می‌تواند فرکانس پاسخ طیف را تحت تأثیر قرار دهد [۱]



شکل ۲-۱۵: شکل موج بعد از حذف موج R و طیف دامنه مربوطه آن [۱]

از مقایسه این دو نمودار مشاهده می‌شود که بزرگنمایی حاصل از امواج ریلی بسیار نزدیک به امواج فشاری بوده و در برخی شرایط ممکن است در محاسبه فرکانس غالب نمونه مسئله‌ساز شود. جدا کردن امواج ریلی عمدتاً با بریدن مقادیر زیاد ولتاژ در منحنی موج بر حسب زمان انجام می‌شود. به عبارت دیگر نقاط پیک منحنی ولتاژ - زمان موج را حذف می‌نمایند و به منحنی فرکانسی موج دست می‌یابند که در آن اثر امواج ریلی تا حدود زیادی حذف شده است در شکل ۲-۱۶ بریدن امواج ریلی نسبت به شکل ۲-۱۴ ملاحظه می‌شود.



شکل ۲-۱۶: شکل موج بعد از بریدن موج ریلی و طیف مربوطه آن [۱]

فصل سوم:

معرفی و تشریح روش

پاسخ ضربه

۳-۱ مقدمه

اولین کاربرد و هدف اصلی روش غیر مخرب پاسخ ضربه، بررسی پیوستگی شمع‌ها و شفت‌های بتنی است. هرچند که کاربردهای بسیار دیگری نیز برای این روش آورده شده است. به همین منظور مبانی این روش بر اساس این کاربرد بیان شده است. در این فصل ابتدا به تاریخچه‌ی این روش پرداخته شده و در ادامه اصول آن به شکلی تقریباً مفصلاً آورده شده است.

۳-۲ آزمون پاسخ ضربه

آزمون پاسخ ضربه یا پویایی صوتی نخستین بار با نام فرانسوی «La Methode d'Admittance Mecanique» در سال ۱۹۶۸ در فرانسه معرفی شد و به صورت «روش پویایی مکانیکی» ترجمه شد. تجهیزات مورد استفاده در این آزمون، در آن زمان تنها محدود به فناوری آنالوگ می‌شد؛ یعنی سر شمع بتنی به وسیله لرزاننده‌های با فرکانس جاروب که بر روی سطح سازه شفت نصب می‌گردید، مرتعش می‌شد. این آزمون که بعدها از آن با نام «آزمون ارتعاش» یاد شد، در دهه ۱۹۷۰ با ساخته شدن رایانه‌های قابل حمل در محل سایت و اختصاص یافتن نرم‌افزار مخصوص این روش اصلاح شد. در این روش اصلاح شده استفاده از ابزارهای ضربه زن به جای لرزاننده‌های سنگین ممکن شد. از آن زمان روش پویایی صوتی نام‌های بسیاری پیدا کرد که می‌توان نام‌های «شوک»، «پاسخ گذرای دینامیکی (TDR^۱)»، «پاسخ ضربه» و «طیف پاسخ ضربه (IRS^۲)» و بسیاری نام دیگر را ذکر کرد. بعدها طبق تحقیقاتی که صورت گرفت نشان داده شد که بهترین روش بررسی پیوستگی برای شمع‌های بتنی و یا شفت‌های حفاری شده، تحلیل پاسخ ارتعاش در حوزه فرکانس می‌باشد؛ به ویژه زمانی که نقایص سازه در چند متر ابتدایی سازه قرار داشته باشند. از آن زمان به بعد، بین روش‌های «حوزه فرکانس» که در فرانسه توسعه یافت و در بریتانیا غالباً برای سازه‌های به صورت شفت‌های حفاری شده مورد استفاده قرار گرفت [۲، ۳]، با روش‌های «حوزه زمان» که در هلند و کشورهای اسکاندیناوی برای شمع‌های پیش‌ساخته با سطح مقطع ثابت مورد استفاده قرار داشت، واگرایی ایجاد شد [۴، ۵]. فاکتوری که گاهی اوقات در انتخاب یکی از این دو روش تأثیرگذار بود این بود که آزمون ارتعاش نیاز به آماده سازی اولیه سطح بالایی شفت برای نصب لرزاننده و گیرنده داشت درحالی‌که آزمون پژواک صوتی در مقایسه با آزمون ارتعاش به آماده سازی کمتری نیاز داشت.

¹ Transient Dynamic Response

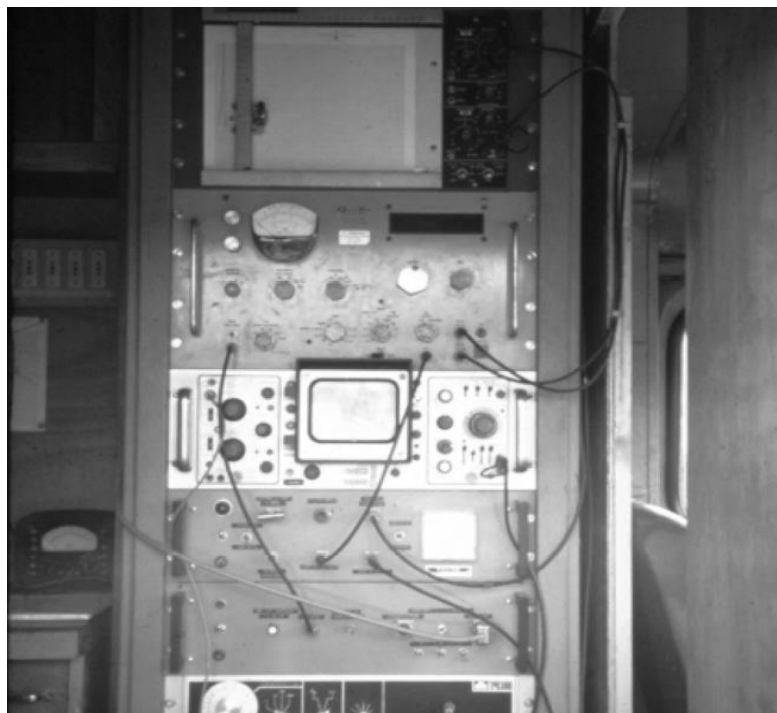
² Impulse Response Spectrum

در همین مورد می‌توان به پرحجم و سنگین بودن سیستم کنترل و برداشت داده تجهیزات آنالوگ در قیاس با تجهیزات مدرن الکترونیکی معادل آن اشاره کرد. تجهیزات آزمون ارتعاش یک قفسه ۱۹ اینچی را به طور کامل اشغال می‌کرد و به دلیل حجم بالای آن معمولاً با کامیون حمل و نقل می‌شد.



شکل ۳-۱ مجموعه تجهیزات انجام آزمون ارتعاش بر روی یک شفت حفاری شده [۶]

در دهه ۱۹۷۰، هم تحقیقات نظری و هم بخش عملیاتی آزمون ارتعاش که به بررسی پیوستگی شمع‌های بتنی می‌پرداخت، ادامه یافت [۳، ۷، ۸]. به تدریج این روش غیر مخرب، هم به ابزاری برای کنترل کیفیت سازه‌های بتنی نو و هم ابزاری برای بررسی‌های پس از ساخت شفت‌های بتنی عمیق که دارای مشکل هستند، تبدیل شد.



شکل ۳-۲ تجهیزات کنترل و برداشت داده‌های آزمون ارتعاش، حوالی سال ۱۹۷۰ [۶]

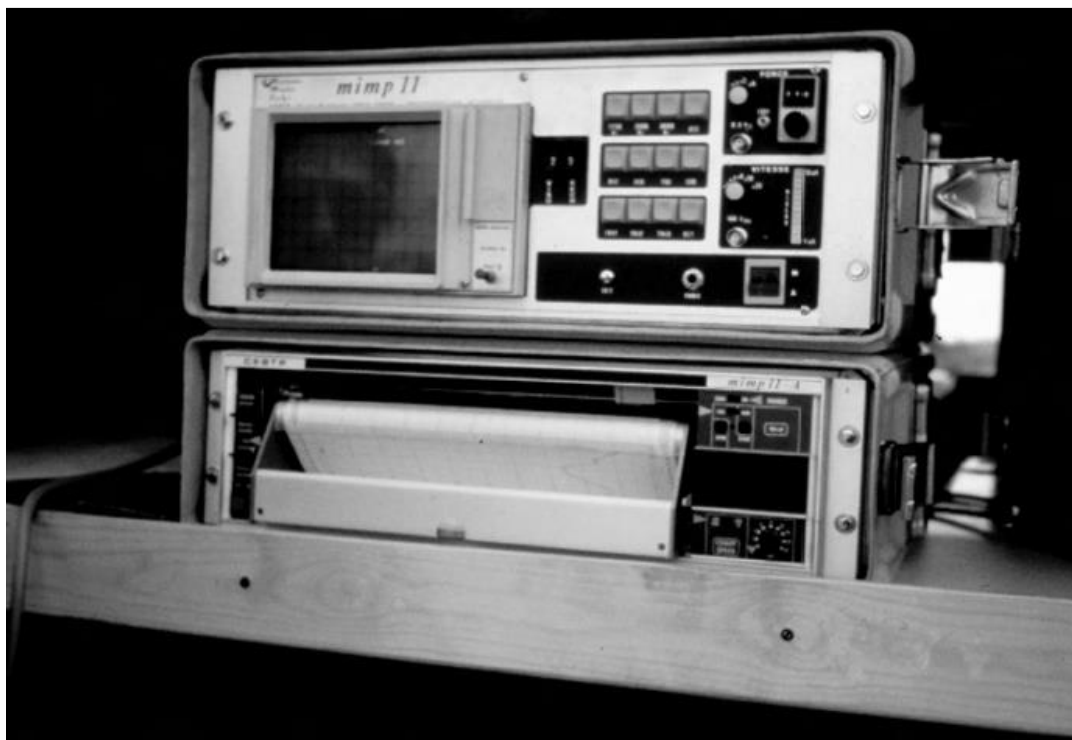
در سال ۱۹۷۴ طرحی مبنی بر کاربرد الگوریتم تبدیل فوریه سریع در آزمون ارتعاش برای شفت‌های فنداسیون ساختمان ارائه شد. در این طرح یک ضربه با نیروی لحظه‌ای مانند ضربه چکش را در نظر گرفته شد که به سطح بالایی شفت وارد می‌شود و پاسخ آن ضربه به وسیله یک مبدل سیگنال سرعت (ژئوفون) در سطح ثبت می‌شود. در واقع در این طرح سیستم ثبت پاسخ ضربه مانند حالت انجام آزمون با فرکانس جاروب بود و تفاوتی نکرده بود. در مرحله بعد نیرو و سرعت ثبت شده در حوزه زمان با انجام تبدیل فوریه به حوزه فرکانس منتقل می‌شوند. در زمانی که این طرح ارائه شد هنوز پردازنده‌های دیجیتال برای انجام مراحل پردازش وجود نداشتند و اولین دستگاه «ضربه» در سال ۱۹۷۷ در محل سایت به صورت برج‌مورد استفاده قرار گرفت [۹، ۱۰]. این تجهیزات MIMP نام گرفت که این نام از ابتدای نام فرانسوی روش (Method IMPulsionelle) اخذ شده بود. این تجهیزات با اینکه با توجه به استانداردهای جدید، هنوز دارای حجم زیادی بود، ولی با این حال در آن زمان جزو دستگاه‌های قابل حمل به حساب می‌آمد.



شکل ۳-۳ مجموعه تجهیزات MIMP در حال انجام آزمون روی یک شفت [۶]

در روش تحلیل فرکانسی، تمام مزایای قبلی حفظ شده بودند به علاوه اینکه آماده سازی سطح بالایی شفت هم در حد اطمینان از سالم بودن و درزه و ترک نداشتن سطح بتنی شفت، کاهش یافته بود. رایانه پردازش کننده داده‌ها یک دستگاه دیجیتال PDP-11 بود که در واحدی که به همین منظور ساخته شده بود، جای گرفته بود و شامل یک دستگاه چاپگر بود و البته قابلیت ذخیره داده را نداشت. یک بارسنج روی سطح شمع قرار داده می‌شد و ضربه به وسیله یک چکش یک کیلوگرمی به نزدیکی بارسنج وارد می‌شد. بارسنج بخشی از چرخه برداشت داده به حساب می‌آمد؛ نقشی که اکنون نیز دارد با این تفاوت که امروزه بارسنج در داخل سر چکش جاسازی می‌شود.

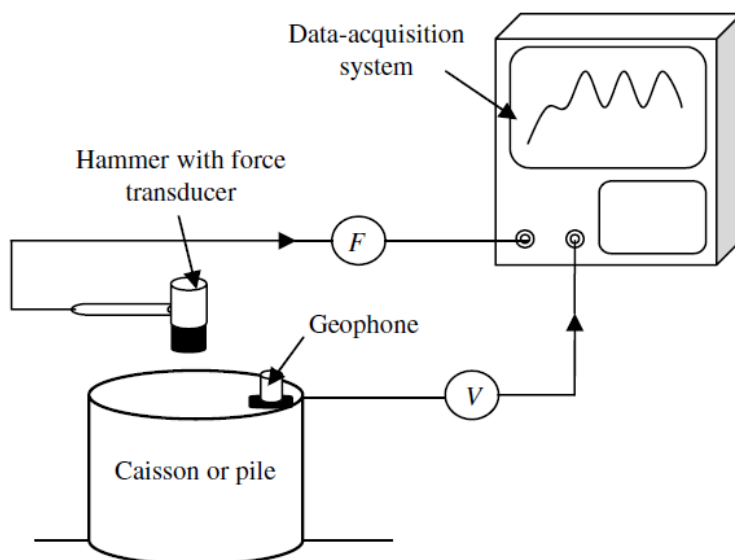
این تجهیزات در مقایسه با تجهیزات با فرکانس جاروب، فرآیند آزمون را تسریع کرد و همچنین از لحاظ هزینه، عملیات را بسیار اقتصادی تر کرد و به این ترتیب بود که روش «پاسخ ضربه» متولد شد [۱۱، ۱۲]. با توسعه علمی مباحث تحلیل ارتعاشات، روش تحلیل طیف از سال ۱۹۸۵ مورد اقبال محققان در این زمینه قرار گرفت [۱۳] و چندین شرکت تجهیزات ابزار دقیق و انجام آزمون غیر مخرب، روش پاسخ ضربه را در همان ساختار یا ساختار جدیدی در دستور کار خود قرار دادند [۱۴، ۱۵].



شکل ۳-۴ واحد برداشت داده تجهیزات MIMP (بالایی) و چاپگر (پایینی) [۶]

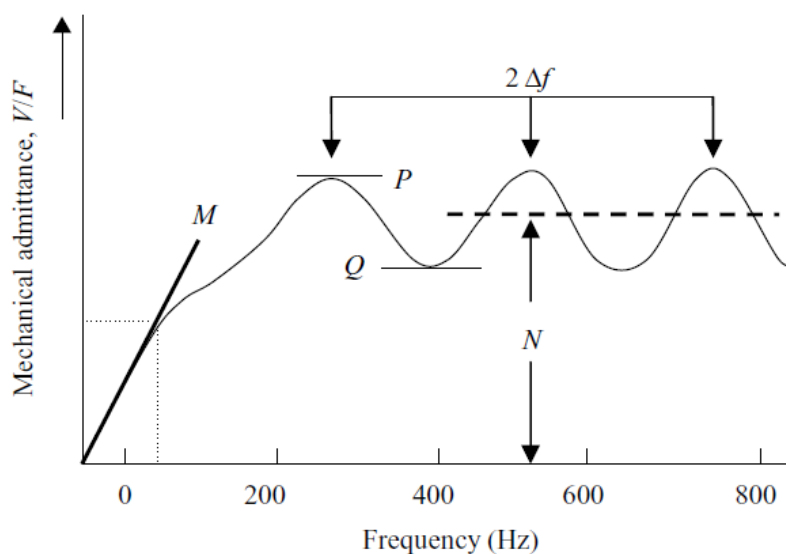


شکل ۳-۵ تجهیزات MIMP به همراه بارسنج [۶]



شکل ۳-۶ تصویری شماتیک از آزمون پاسخ ضربه [۶]

برخی روش‌های شبیه‌سازی شفت‌های فنداسیون که از سال ۱۹۷۰ معرفی شد نیاز به رقومی (دیجیتالی) کردن پاسخ آزمون‌های واقعی انجام‌شده روی فنداسیون داشت تا بتوان نتایج شبیه‌سازی را با آن مقایسه کرد [۸] و تنها با آمدن امکانات ذخیره‌سازی دیجیتالی پاسخ آزمون‌های واقعی، امکان بهره‌برداری کامل از این روش‌های شبیه‌سازی فراهم شد [۱۶]. امکانات جدید مدل‌سازی به عنوان یکی از نتایج سیستم ذخیره کامل داده، باعث توسعه روش «پروفیل زنی نمودار مقاومت ظاهری» یا به عبارتی بررسی به وسیله نمودارهای کنتوری هم شد [۱۵، ۱۷].



شکل ۳-۷ مثالی از نتیجه آزمون پاسخ ضربه [۶]

برای درک کامل مزایا و محدودیت‌های این روش، هنگامی که برای آزمایش ساختارهای عمقی به کار می‌رود، لازم است که نظریه پس زمینه روش پاسخ ضربه تشریح شود.

۳-۳ اصول تفسیر منحنی پاسخ ضربه

۳-۳-۱ مشخصات پویایی

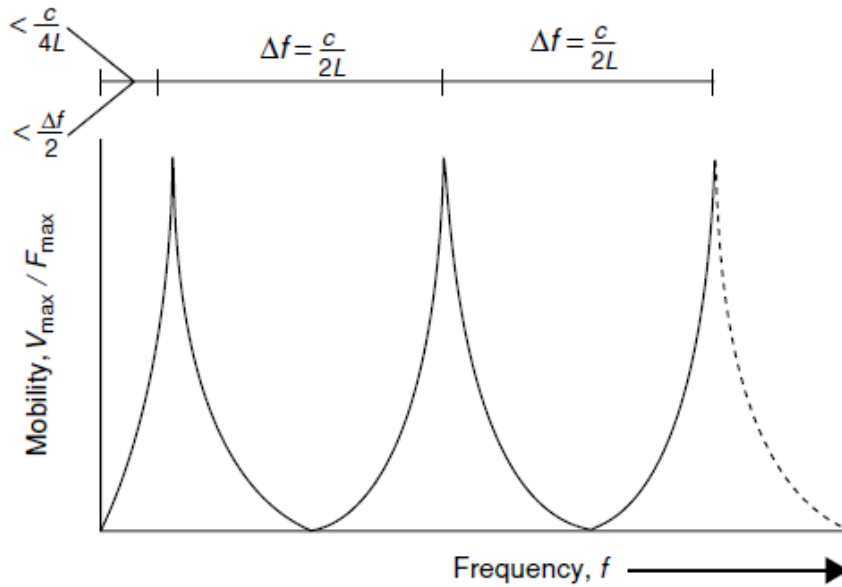
یک شفت استوانه‌ای آزاد با طول L را در نظر بگیرید که روی یک پی با خاصیت کشسان قرار گرفته است. اگر یک نیروی ثابت بیشینه به مقدار F_0 به سطح بالایی شفت اعمال شود و سرعت بیشینه موج در سطح شفت که همان V_0 است، در فرکانس‌های مختلف اندازه‌گیری شود، مشاهده خواهد شد که تشدیدهای منحنی پاسخ در طول طیف فرکانس، در بازه‌های یکسانی قرار خواهند گرفت:

$$\Delta f = v_c / 2L \quad (۱-۳)$$

که در آن v_c سرعت انتشار موج در طول شفت است.

در مورد پی کاملاً صلب با خاصیت کشسان، کمترین فرکانس تشدید مقداری برابر $v_c/4L$ خواهد داشت. در مقابل، در موردی که شفت روی یک پی کاملاً انعطاف‌پذیر قرار گرفته باشد، در ابتدا تشدید در فرکانس‌های بسیار پایین و نزدیک به صفر رخ می‌دهد. هنگامی که پی شفت، خاکی با خاصیت کشسان و انعطاف‌پذیری متوسط باشد، پایین‌ترین فرکانس تشدید در یک موقعیت بینابین، بین حالت کاملاً صلب و کاملاً انعطاف‌پذیر، قرار می‌گیرد که در شکل ۳-۸ نشان داده شده است.

هنگامی که شفت در داخل خاک احاطه شده باشد، حرکت موج در شفت به دلیل حضور خاک میرا می‌شود. در این حالت منحنی پاسخ $|V_0/F_0|$ میرا می‌شود و شکل این منحنی به صورتی که در شکل ۳-۷ نمایش داده شده است، در می‌آید. هرچه خاک چگال‌تر باشد و طول شفت بیشتر باشد، میزان میرایی بیشتر خواهد بود؛ بنابراین تفاضل بین بیشینه و کمینه در منحنی پاسخ کاهش می‌یابد.



شکل ۳-۸ پاسخ فرضی یک شفت تحت آزمون با شرایط پی خاکی با خاصیت کشسان [۶]

فاکتوری که میزان اثر میرا کنندگی خاک را بیان کند، به صورت زیر ارائه شد [۷]:

$$\sigma = (\rho' \beta l) / (\rho_c v_c r) \quad (۲-۳)$$

مقدار میانگین $|V_0/F_0|$ در قسمتی از منحنی پاسخ که حالت پایدار دارد، به عنوان «پذیرفتاری مکانیکی» یا «پویایی میانگین» شناخته می‌شود و با N نشان داده می‌شود و به صورت نظری از طریق رابطه زیر بیان می‌شود:

$$N = I / (\rho_c v_c A c) \quad (۳-۳)$$

این مفهوم، معکوس مفهوم «مقاومت ظاهری مکانیکی» است. اگر مقدار بیشینه پاسخ را با P و مقدار کمینه آن را با Q نشان دهیم، می‌توان این مقادیر را به صورت تابعی از عامل میرا کنندگی خاک (σ) ، پویایی میانگین (N) و طول شفت (L) بیان کرد:

$$P = N \coth(\sigma L) \quad (۴-۳)$$

$$Q = N \tanh(\sigma L) \quad (۵-۳)$$

با داشتن این تعاریف، می‌توان پویایی میانگین را به صورت تابعی از Q و P بیان کرد:

$$N = \sqrt{PQ} \quad (۶-۳)$$

و همچنین:

$$\coth(\sigma L) = \sqrt{P/Q} \quad (۷-۳)$$

اگر طول دقیق شفت مشخص باشد، می‌توان v_c را با اندازه گرفتن Δf و جایگزین کردن آن در معادله ۱-۲ به دست آورد. سرعت انتشار موج به مدول‌های کشسان و همچنین چگالی بتن بستگی دارد و بنابراین تعیین v_c در واقع تعیین میزان کیفیت بتن است. برعکس، اگر میانگین کیفیت بتن، مثلاً با اندازه‌گیری سرعت موج در مغزه‌هایی که از سازه بتنی تهیه شده‌اند، معلوم باشد، می‌توان طول مؤثر شفت را با اندازه گرفتن Δf تعیین کرد. بعداً می‌توان این مقدار به دست آمده را با مقدار واقعی مطابقت داد.

اگر شفت ناپیوسته و یا به صورت متناوب دارای شکستگی باشد، فقط می‌توان میزان طول را تا آن ناپیوستگی به دست آورد. این مورد برای حالاتی هم که شفت حفاری شده دارای نقایصی به شکل گردنه و یا حباب‌های هوا باشند هم صادق است و به عبارت دیگر، در این حالات هم نمی‌توان طول کلی شفت را محاسبه کرد.

با توجه به اثر تجمعی میرا کنندگی خاک دربرگیرنده در یک شفت طویل، انجام این آزمون روی یک شفت با نسبت طول به قطر (L/d) بزرگ تر از ۳۰ نتایج خیلی قطعی به ما نمی‌دهد؛ مگر این که شفت توسط خاکی نرم احاطه شده باشد و پی آن کاملاً صلب باشد.

مساحت سطح مقطع شفت از معادله ۳ محاسبه می‌شود که البته در این معادله مقادیر ρ_c و v_c باید معلوم باشند. اگر طول به دست آمده از مقدار Δf با مقدار واقعی طول شفت تقریباً برابر باشد، آنگاه مقدار v_c را می‌توان به دست آورد. مقدار به دست آمده N غالباً تابعی از مشخصات بخش بالایی شفت است. اگر مقدار واقعی N بسیار بزرگ تر از مقدار محاسبه شده آن باشد، بدان معناست که بخش بالایی شفت دچار نقص است. البته این موضوع می‌تواند ناشی از محصور بودن سطح مقطع و یا نامرغوب بودن بتن هم باشد.

اگر رابطه‌های ۱-۳ و ۲-۳ با هم ترکیب شوند، رابطه‌ای برای به دست آوردن جرم شفت حاصل می‌شود که این رابطه فقط شامل پارامترهایی است که از منحنی پاسخ به دست می‌آیند:

$$M_p = L A_c \rho_c = I / (2\Delta f N) \quad (۸-۳)$$

۳-۳-۲ اندازه‌گیری صلبیت (سفتی) شفت

هنگامی که شفت در فرکانس‌های پایین مرتعش می‌شود، اثرات اینرسی بسیار ناچیز است و مجموعه شفت - خاک به صورت یک فنر رفتار می‌کند و در ابتدای منحنی $|V_0/F_0|$ پاسخ به شکل یک خط مستقیم خواهد بود. معکوس شیب این خط مستقیم، در واقع مقدار صلبیت دینامیکی ظاهری مربوط به سطح بالایی شفت است. صلبیت دینامیکی از طریق رابطه زیر به دست می‌آید:

$$E' = (2\pi f M) / |V_0/F_0| M \quad (۹-۳)$$

که در آن f_M و $V_0/F_0/M$ مختصات نقطه M روی منحنی پاسخ هستند و E' مربوط به شیب مدول تانژانت بخش ابتدایی نمودار نیرو - جابجایی است که از انجام آزمون نیروی استاتیک روی یک شفت به دست آمده است. می توان از این پارامتر برای مقایسه قابلیت تحمل نیروی مجموعه ای از شفت ها روی یک سایت استفاده کرد.

صلبیت ظاهری سطح شفت تابعی است از:

- صلبیت بتن داخل شفت، E_c .
 - صلبیت خاک دربرگیرنده شفت که توسط میرایی تناوب ها روی منحنی پاسخ نشان داده می شود و با عامل میرا کنندگی اندازه گرفته می شود.
 - صلبیت خاکی که به عنوان پی شفت قرار دارد.
- با دانستن دو مشخصه اول، می توان صلبیت ظاهری که در سطح شفت اندازه گرفته شده است را در دو مورد اکسترمم زیر تعیین نمود.

اول موردی که شفت روی یک پی کاملاً صلب قرار گرفته است، بیشترین صلبیت ممکن را خواهیم داشت و مقدار آن از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$E'_{max} = E'_{\infty} \coth(\sigma L) = E'_{\infty} \sqrt{P/Q} \quad (10-3)$$

که در آن:

$$E'_{\infty} = (A_c E_c \sigma L) / L \quad (11-3)$$

و موردی که شفت فاقد پی باشد، کمترین صلبیت ممکن را خواهیم داشت و مقدار آن را از طریق رابطه زیر محاسبه می کنیم:

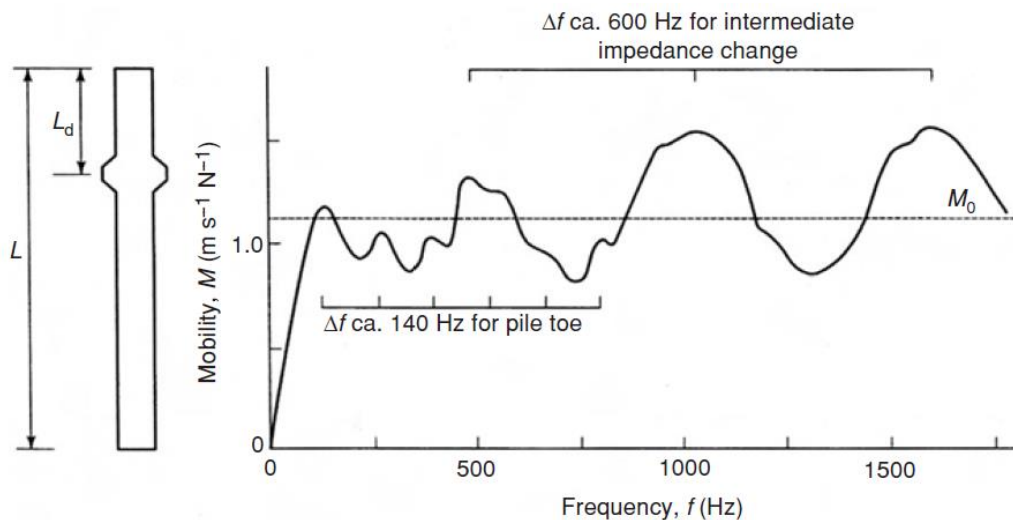
$$E'_{min} = E'_{\infty} \tanh(\sigma L) = E'_{\infty} \sqrt{P/Q} \quad (12-3)$$

این دو مقدار کران های بالا و پایین صلبیت می باشند و می توانند با مقدار واقعی اندازه گیری شده صلبیت (E') مقایسه شوند.

۴-۳ ملاحظات عملی

۳-۴-۱ طول صوتی

طول به دست آمده از تشدید (L) و عمق پدیده‌ای از شفت که باعث ایجاد تشدید در منحنی پاسخ شده است، می‌تواند از انجام میدانی آزمون و نمودار پویایی حاصله و در ادامه استفاده از رابطه ۳-۱ محاسبه شود. در واقع با اندازه گرفتن فاصله بین فرکانس‌های تشدید در منحنی پاسخ (Δf) می‌توان این پارامتر را به دست آورد. با توجه به رابطه ۳-۱، بدیهی است که هرچه فاصله بین فرکانس‌های تشدید کوچک‌تر باشد، عمق پدیده‌ای که عامل تشدید شده است، بیشتر خواهد بود؛ بنابراین، اگر پدیده عامل تشدید بالاتر از پاشنه شفت باشد، مقدار Δf آن بیشتر از مقدار Δf مربوط به طول کل شفت خواهد بود. اگر این پدیده به گونه‌ای باشد که باعث بازتاب تقریباً تمام انرژی موج تابشی به سمت پایین شفت شود، باعث خواهد شد که تمام پدیده‌های عامل تشدید که زیر این پدیده قرار دارند، پوشیده شوند که البته پاشنه شفت هم یکی از این پدیده‌ها خواهد بود. هر چند اگر اولین پدیده عامل تشدید، فقط بخشی از انرژی موج تابشی را بازتاب دهد (که معمولاً به علت نقص یا فقدان بخشی از بدنه شفت رخ می‌دهد)، مابقی انرژی موج تابشی به سمت پایین شفت می‌رود و به پاشنه شفت می‌رسد و از آنجا به سمت بالای شفت بازتاب می‌شود. سپس این دو جبهه موج با هم تداخل کرده و در رد لرزه پویایی - فرکانس، یکی از آن‌ها با دیگری همپوشانی می‌کند (شکل ۳-۹). هنگامی که این اتفاق رخ می‌دهد، تجربه حرف اول را در تفسیر رد لرزه حاصل می‌زند.



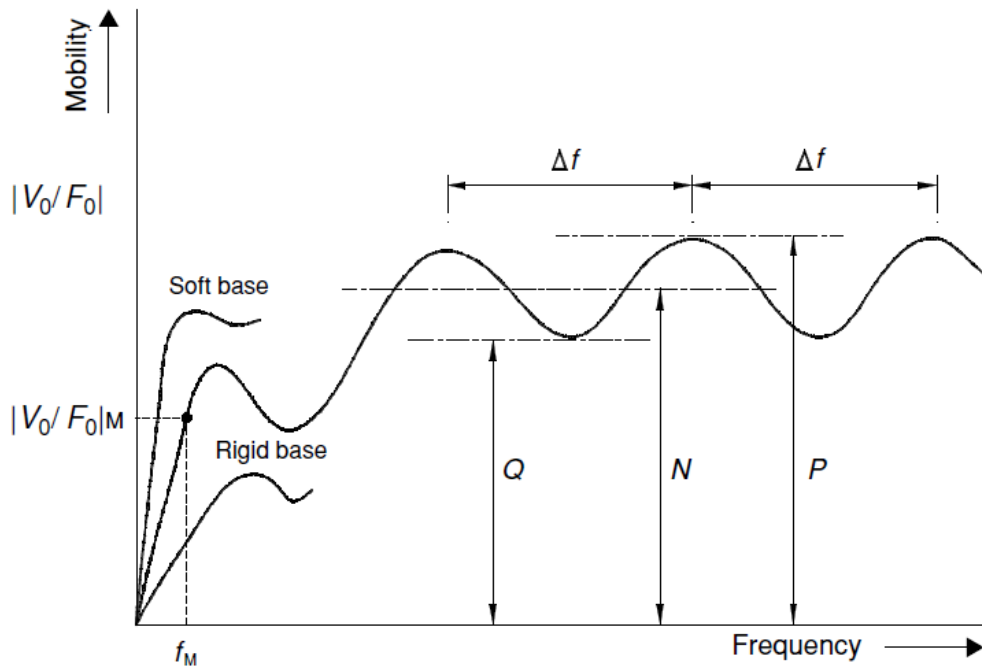
شکل ۳-۹ همپوشانی پاسخ پدیده میانی عامل تشدید با پاسخ پاشنه شفت [۶]

۳-۴-۲ شیفت فرکانسی نمودار پویایی

در هر سازه بتنی از قبیل شمع، تغییر مقاومت ظاهری (امپدانس) که می‌تواند در پاشنه شفت و یا هر گونه پدیده میانی مثل حباب هوا و یا فقدان بخشی از سازه رخ دهد، می‌تواند از محلّ بیشینه‌های تشدید نسبت به مبدأ تشخیص داده شود [۸]. اگر اولین بیشینه تشدید در فاصله Δf و یا ضریبی از Δf نسبت به مبدأ قرار داشته باشد، می‌توان دریافت که این بازتاب از نوع کلی است؛ یعنی ناپیوستگی تمام سطح مقطع را شامل می‌شود و به صورت بخشی نیست. در طرف مقابل، اگر بیشینه‌های تشدید در محلّ $\Delta f/2$ از مبدأ قرار داشته باشند، بدین معناست که ناپیوستگی از نوع گشاد شدگی شفت و یا حفره‌ای پر شده از مواد با صلبیت بسیار بالا می‌باشد (شکل ۳-۱۰).

۳-۴-۳ رابطه صلبیت استاتیکی و دینامیکی شمع

رابطه‌ای بین مقدار صلبیت دینامیکی اندازه‌گیری شده از آزمون پاسخ ضربه در فرکانس‌های پایین، با صلبیت استاتیکی به دست آمده از بخش ابتدایی منحنی الاستیک بار - نشست برای آزمون بارگذاری سازه‌های عمیق، هنگامی که ۱۰۰ درصد بازبایی اتفاق افتاده باشد، ارائه شده است [۸]. در این رابطه تصریح شده است که صلبیت دینامیکی با یک ضریب k بزرگ‌تر از صلبیت استاتیکی است.



شکل ۳-۱۰ منحنی پاسخ ضربه؛ پویایی بر حسب فرکانس [۶]

عامل k به شرایط خاک سایت، نوع شفت فنداسیون و مشخصات هندسی سازه (نسبت L/d) بستگی دارد و میزان آن بین $1/5$ تا 2 تغییر می‌کند. دلیل بزرگ تر بودن صلیبیت دینامیکی، کرنش‌های کوچک‌تری است که در آزمون دینامیکی به وجود می‌آید؛ به علاوه سهم کوچکی که از تفاضل نرخ کرنش‌ها در این دو آزمون وجود خواهد داشت.

۳-۴-۴ طبقه‌بندی سیگنال‌های پاسخ

تفسیر جزئی پاسخ‌های سیگنال آزمون‌های پاسخ ضربه، همواره یکی از حوزه‌های فعالیت متخصصان مجرب و کار آزموده بوده است. هرچند هنگامی که این آزمون‌ها برای کنترل کیفیت‌های معمول استفاده می‌شود، انتظار می‌رود که بیشتر سیگنال‌ها برای مهندسين غيرمتخصص هم قابل فهم باشد. مسئله مهم دیگر اعتبار نتایج به دست آمده است که در گرو تفسیر صحیح سیگنال پاسخ است.

باید به این نکته نیز توجه کرد که نتایج یک آزمون پیوستگی به تنهایی برای اظهار نظر قطعی در مورد یک شفت کافی نیست. بلکه شاخص‌های دیگر مثل پروفیل خاک، مشخصات سازه و مشاهدات دیگر هم باید مورد بررسی قرار بگیرند. مؤسسه تحقیقات و اطلاعات سازه‌های صنعتی بریتانیا، یک سیستم طبقه‌بندی سیگنال برای نتایج هر دو آزمون پژواک صوتی^۱ و پاسخ ضربه پیشنهاد کرده است تا بتوان نتایج ساده‌تر را از نتایجی که پیچیدگی بیشتری دارند، متمایز کرد. این مؤسسه پیشنهاد کرد که سیگنال‌های پاسخ یک شفت فنداسیون را می‌توان در یک تا سه دسته اصلی طبقه‌بندی کرد. این طبقه‌بندی بر اساس ارزیابی تعداد تغییرات قابل توجه امپدانس که در طول شفت قابل شناسایی هستند، صورت گرفت. این تغییرات قابل توجه در قسمت‌هایی به وجود می‌آیند که امواج از محل آن‌ها به سمت بالای شفت بازتاب می‌شوند. این سه نوع سیگنال پاسخ تحت عنوان دسته صفر، دسته یک و دسته دو طبقه‌بندی شده‌اند و در ادامه تشریح می‌شوند.

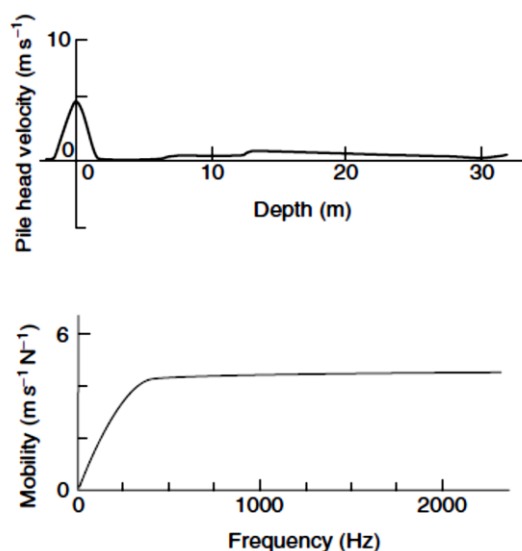
سیگنال نوع صفر

یک سیگنال نوع صفر، سیگنالی است که در آن اثر میرا کنندگی خاک دربرگیرنده، هر گونه سیگنال بازگشتی را میرا می‌کند تا حدی که پاشنه شفت قابل شناسایی نخواهد بود؛ بنابراین هیچ تغییر امپدانس قابل ملاحظه‌ای که بتواند عامل بازتاب موج در محدوده عمق نفوذ مؤثر در شفت شود، وجود ندارد. شکل ۳-۱۳ مثال‌های شاخصی از سیگنال نوع صفر را برای سیستم زمانی و فرکانسی نشان می‌دهد.

¹ Impact-Echo

سیگنال نوع یک

سیگنالی از این نوع شامل یک پاسخ اصلی روشن است که نشان از پاسخ شفت به یک ورودی از نوع امواج صوتی می‌باشد. این نوع سیگنال مربوط به یک شفت با یک تغییر امپدانس اصلی است که در پاشنه شفت و یا هر بخش دیگری از آن رخ می‌دهد. در این نوع سیگنال هیچ پاسخ مهم دیگری در طول رد لرزه قابل مشاهده نخواهد بود. سیگنال پاسخ نوع یک بسیار شبیه به سیگنال ساده فرضی است که انتظار می‌رود به عنوان پاسخ انجام این آزمون به دست آید و به آسانی قابل فهم بوده و قابلیت شبیه‌سازی آن با رایانه وجود دارد. این نوع از سیگنال پاسخ شبیه به چیزی است که در شکل ۳-۱۴ نشان داده شده است.



شکل ۳-۱۳ مثالی از سیگنال پاسخ ضربه نوع صفر [۶]

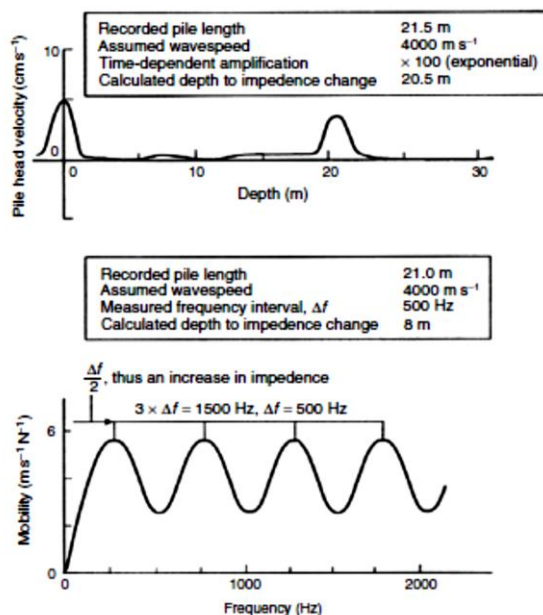
سیگنال نوع دو

یک سیگنال نوع دو، سیگنالی است که بیش از یک پاسخ اصلی را شامل می‌شود. در این نوع سیگنال، تداخل پاسخ‌هایی که از بخش‌های مختلف شفت بازتاب شده‌اند، کار تفسیر پاسخ نهایی را با پیچیدگی‌هایی روبرو می‌کند. از یک سو سیگنال‌های نوع دو یک پاسخ اصلی واضح از تمام طول شفت ارائه می‌دهند که به صورت یک واحد صوتی اصلی است و پاسخ‌هایی میانی که مربوط به تغییرات امپدانس در طول شفت می‌باشد، در ضمن آن واحد اصلی به چشم می‌خورند (شکل ۳-۱۵). از طرف دیگر ممکن است سیگنال‌های نوع دو هیچ‌گونه پاسخ اصلی که نشان‌دهنده‌ی پاسخی از تمام طول شفت باشند را شامل نباشند (شکل ۳-۱۶).

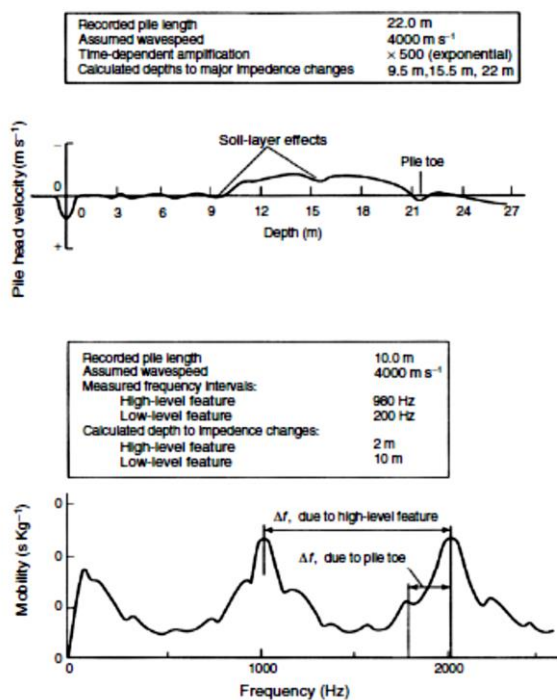
نیاز است که یک سیگنال نوع دو به وسیله‌ی یک متخصص تفسیر شود، چرا که معمولاً با پاسخ‌های ساده سر و کار نخواهیم داشت.

مؤسسه CIRIA برای انواع پیچیده‌تر سیگنال‌های پاسخ که از شفت‌های یک سایت مشخص به دست آمده بود، یک طبقه‌بندی پیشنهاد کرد که به وسیله‌ی آن بتوان ارزیابی مناسبی از نتایج حاصل از انجام آزمون روی شفت‌های یک سایت ارائه کرد. مطابق این طبقه‌بندی کیفیت آزمون به موارد زیر بستگی دارد:

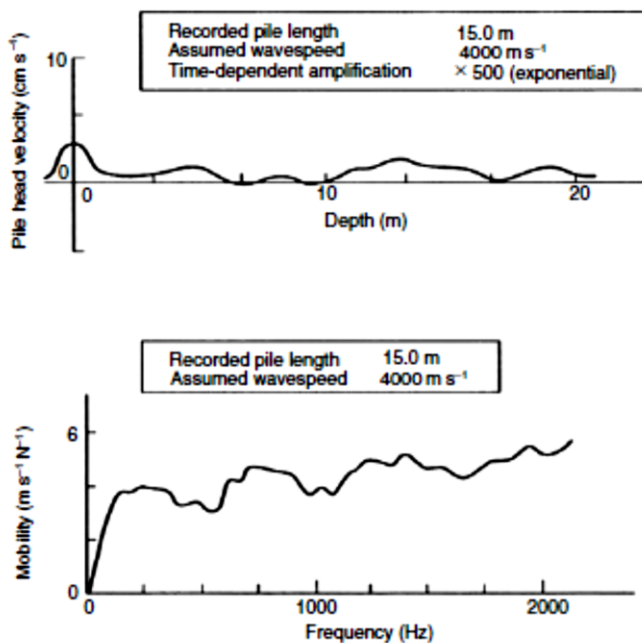
- مشخصات سیستم آزمون، به‌ویژه بازه‌ی دینامیکی، دقت تفکیک‌پذیری و نسبت سیگنال به نوفه آزمون.
- مشخصات شفت، به‌ویژه نسبت طول به قطر، کیفیت مواد بکار رفته و شکل شفت.
- ماهیت خاک دربرگیرنده: هرچه خاک صلب‌تر باشد میرا کنندگی آن بیشتر خواهد بود. به علاوه مرز بین خاک‌های با صلبیت متفاوت به عنوان یک لایه‌ی بازتاب‌کننده عمل می‌کند. همچنین تفاوت امپدانس بین سیستم خاک-شفت هم همین خاصیت را دارد.



شکل ۳-۱۴ مثالی از سیگنال پاسخ ضربه نوع یک [۶]



شکل ۳-۱۵ مثالی از سیگنال ساده پاسخ ضربه نوع دو [۶]



شکل ۳-۱۶ مثالی از سیگنال پیچیده‌ی پاسخ ضربه نوع دو [۶]

تمام آزمون‌های غیر مخرب در تعریف، مسیری غیرمستقیم برای آزمایش خواص مواد سازنده‌ی یک سازه ارائه می‌دهند. برای اطمینان از اعتبار نتایج تفسیر شده‌ی این آزمون‌ها، باید آن‌ها را تحت شرایط کنترل شده و با مراقبت کامل انجام داد. در مطالعات ژئوتکنیکی، آزمون‌های غیر مخرب به عنوان مطالعات اصلی شناخته می‌شوند. همچنین در بسیاری از مطالعات دیگر، آزمون‌های غیر مخرب بخش مهم و غیرقابل حذف از مطالعات است.

روش پاسخ ضربه در موارد متعددی به کار گرفته شده است. از بیشتر این موارد می‌توان نتیجه گرفت که روش‌های آزمایش مبتنی بر انتشار امواج تنشی از سطح شفت (روش‌های پاسخ ضربه و پژواک صوتی) هنگامی که نسبت طول به قطر شفت، به ویژه در خاک‌های صلب، بزرگ باشد، با محدودیت‌هایی روبرو می‌شوند. در گزارش مطالعات اداره کل بزرگراه‌های فدرال آمریکا (FHWA)¹ نتیجه گرفته شده است که این روش‌ها برای کنترل کیفیت سازه‌های جدیدی که بر شمع‌ها و شفت‌هایی که بارگذاری بحرانی در پایه‌ی آن‌ها انجام گرفته است بنا می‌شوند، به کار نمی‌آید؛ چرا که اطلاعاتی که از پیوستگی پایه‌ی آن‌ها به دست آمده است قابل اطمینان نیست [۱۸]. در نتیجه در آمریکای شمالی، این روش‌ها معمولاً برای کنترل کیفیت به کار نمی‌روند ولی هنوز کاربرد گسترده‌ای در اروپا و آسیا دارند.

¹ US Federal Highway Administration

فصل چهارم:

سابقه مطالعه

۴-۱ ارزیابی پیوستگی شمع‌های بتنی درجا

همان طور که اشاره شد، یکی از کاربردهای اصلی روش پاسخ ضربه، ارزیابی پیوستگی انواع شمع‌های بتنی است. یکی از روش‌های تحکیم و پایداری انواع سازه‌ها در زمین‌هایی که دارای خاک سست هستند، استفاده از شمع‌ها می‌باشد. شمع‌های بتنی به دو روش اجرا می‌شوند:

۱. شمع درجا

۲. شمع‌های پیش‌ساخته

اجرای شمع‌های درجا که در اینجا به ارزیابی پیوستگی آنها می‌پردازیم، به صورت حفاری و بتن‌ریزی در محل می‌باشد. اجرای شمع‌های بتنی درجا، همواره با تردید در یکپارچگی محصول نهایی روبروست چراکه امکان بازرسی مستقیم شمع پس از اجرا وجود ندارد. البته کنترل‌های اولیه از قبیل نمونه برداری از بتن قبل از تخلیه در چاه یا ثبت حجم بتن ریخته شده برای شمع، در تمامی پروژه‌های شمع‌ریزی انجام می‌گیرند ولی همواره برخی مشکلات نظیر رانش یا ریزش دیواره‌ی چاه و ایجاد یک ناحیه باریک در مقطع شمع و یا بروز اختلال یا توقف در حین عملیات حفاری و بتن‌ریزی، انجام آزمون‌های بعدی را به منظور ارزیابی پیوستگی شمع ضروری می‌سازد.

سلامت شمع‌های درجاریز در مطالعات ژئوتکنیک از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. به همین منظور، بررسی سلامت سازه‌ای شمع و کنترل عملیات اجرایی جهت انتقال نیروی بارگذاری به زمین از مراحل اصلی اجرای شمع‌های درجاریز می‌باشد. سه شاخص مهم در طراحی شمع‌های درجاریز، مقاومت، نشست و ظرفیت باربری سازه است. ظرفیت باربری شمع‌های بتنی درجاریز، شاخص مهمی است که به صورت تجربی با کاهش یا افزایش قطر مقطع شمع در ارتباط است. معمولاً فرآیند اجرای شمع‌های درجاریز با مشکلاتی مواجه است که کیفیت آنها را تحت تأثیر قرار داده و بازرسی آنها را امری اجتناب‌ناپذیر می‌سازد. رانش یا ریزش دیواره چاه و ایجاد یک ناحیه باریک در مقطع شمع، عدم دستیابی به طول نهایی حفاری در اثر اشتباه گروه اجرایی و یا عدم رعایت دستورالعمل‌ها، عدم استفاده یا استفاده ناصحیح از لوله ترمی برای بتن‌ریزی و بروز اختلال یا توقف در حین عملیات حفاری و بتن‌ریزی، برخی از این مشکلات می‌باشد. از این جهت، تشخیص تغییر قطر مقطع شمع در طول آن و یا تشخیص طول نهایی شمع به طور دقیق، برای تعیین کیفیت شمع بسیار با اهمیت است [۱۹].

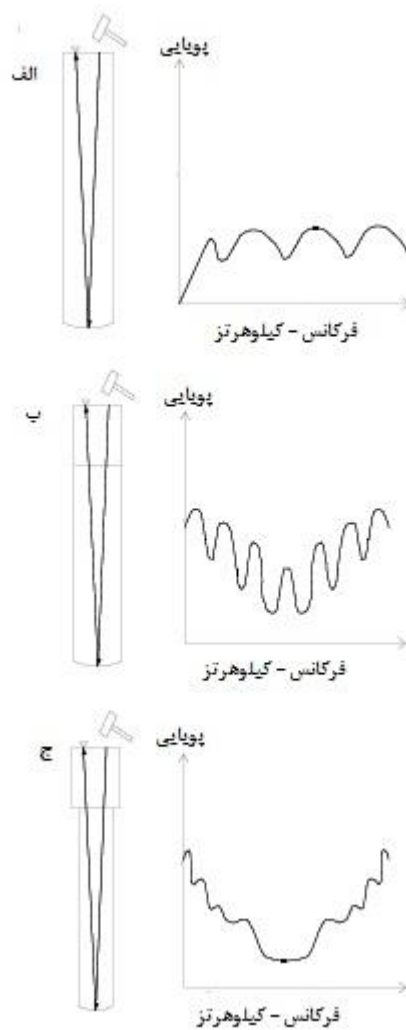
به طور کلی، برای اطمینان از صحت سلامت شمع‌ها و همچنین کنترل کیفیت آنها، انجام آزمون‌های غیرمخرب به عنوان روش‌هایی سریع، کم هزینه و علمی معمول است. در بین روش‌های غیرمخرب، روش «پاسخ ضربه» یکی از روش‌های لرزه‌ای است که با به‌کارگیری آن می‌توان به سادگی و با دقتی قابل قبول به طول شمع، مساحت مقطع شمع و همچنین کیفیت بتن شمع دست پیدا کرد.

سه موقعیت اصلی که در انجام آزمون غیرمخرب پاسخ ضربه روی شمع‌ها ممکن است پیش بیاید، به همراه نمودار پویایی نتیجه شده از آزمون در شکل ۴-۱ نشان داده شده است. در شکل ۴-۱-الف موقعیت یک شمع پیوسته با سطح مقطع ثابت و کیفیت یکسان به صورت تابعی از پویایی و فرکانس نمایش داده شده است. در این مورد، موج تنشی از پاشنه‌ی شمع بازتاب کرده و به سمت سطح شمع می‌رود و توسط ژئوفون ثبت می‌شود. به همین دلیل طول محاسبه شده از این روش در این موقعیت، همان طول واقعی شمع است. بخشی از منحنی پویایی در این حالت به صورت متوالی تکرار می‌شود. بر مبنای این نمودار، با به دست آوردن مقدار بازه‌ی فرکانسی بین نقاط دارای بیشینه‌ی پویایی، به سادگی می‌توان طول صحیح شمع را محاسبه کرد.

در موقعیتی که در شکل ۴-۱-ب دیده می‌شود، سیگنال پاسخ دریافت شده از شمع‌ی که دارای کیفیت متفاوت در بخش‌هایی از آن است، به ژئوفون رسیده است. تفاوت این نمودار با نمودار حالت قبل، تعداد بیشتر بیشینه‌های پویایی و بی‌رویه بودن منحنی است. با اندازه گرفتن اختلاف فرکانس بین دو بیشینه‌ی متوالی، عمق رخداد تغییر کیفیت را می‌توان تعیین نمود.

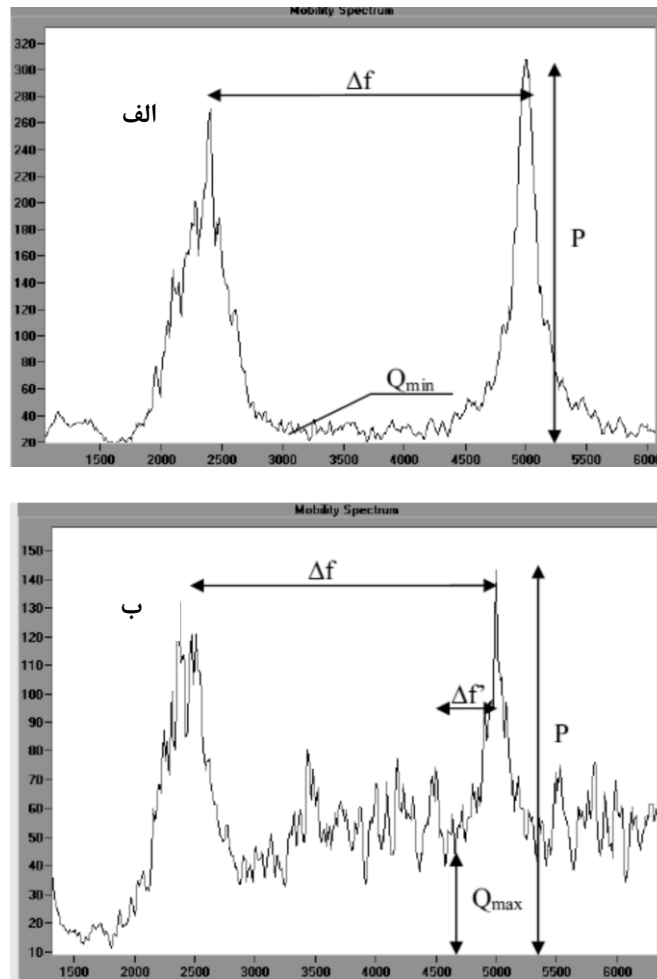
سیگنال پاسخی که تغییر در سطح مقطع شمع را نمایش می‌دهد، در شکل ۴-۱-ج نشان داده شده است. در این مورد هیچ یک از بیشینه‌های پویایی با قاعده و مطابق انتظار رخ نمی‌دهند. منحنی پویایی بر حسب فرکانس در این مورد هم کاملاً بی‌رویه است.

نمونه‌ای از نمودار پویایی حاصل از انجام آزمون پاسخ ضربه روی یک شمع پیوسته در شکل ۴-۲-الف دیده می‌شود. مهم‌ترین مشخصه در تفسیر نتایج در این گونه موارد، شکل منحنی است. در این نمودار نقاط بیشینه‌ی پویایی به طرز منظم، باقاعده، مشخص و تکرارپذیر قرار گرفته‌اند. همچنین بیشینه‌ای در فاصله‌ی بین دو بیشینه‌ی اصلی به چشم نمی‌خورد. با اندازه گرفتن بازه‌ی فرکانسی بین دو بیشینه‌ی اصلی و استفاده از فرمول مربوطه می‌توان به سادگی طول شمع (۱۰ متر) را محاسبه کرد.



شکل ۴-۱ سه موقعیت اصلی که در انجام آزمون پاسخ ضربه روی شمع‌ها به وجود می‌آید:
 الف) یک شمع پیوسته، ب) شمع با رخداد تغییر کیفیت، ج) شمع با سطح مقطع متغیر [۲۰]

نمونه‌ی مربوط به نمودار پویایی حاصل از انجام آزمون روی یک شمع با سطح مقطع متغیر را هم در شکل ۴-۲-ب مشاهده می‌کنید. در این مورد، بیشینه‌هایی در بازه‌ی بین دو بیشینه‌ی پویایی اصلی دیده می‌شود که در واقع وجود این بیشینه‌ها مؤید تغییر سطح مقطع در عمقی مشخص از شمع است. با توجه به این نمودار و با استفاده از فرمول مربوطه می‌توان دریافت که تغییر سطح مقطع در عمق ۸۰ سانتی‌متری به وقوع پیوسته است.



شکل ۴-۲ مثالی از نمودار پویایی مربوط به انجام آزمون روی شمع [۲۰]
 الف) یک شمع پیوسته ب) یک شمع با تغییر سطح مقطع در عمق مشخص

۴-۲ ارزیابی کیفیت پیوستگی بتن تزریقی پشت پوشش بتنی تونل

پس از انجام عملیات حفر تونل، به منظور تأمین نیازهای کاربری، اطمینان از پایداری فضا در درازمدت، ایجاد یک سطح صاف و جلوگیری (یا کنترل) ورود آب‌های زیرزمینی به داخل تونل، جداره داخلی تونل به وسیله‌ی پوشش بتنی پوشیده می‌شود. یکی از اهداف اصلی اجرای پوشش بتنی تونل، انتقال تنش از خاک دربرگیرنده به بدنه‌ی سازه است. این پوشش‌های بتنی به گونه‌ای طراحی و اجرا می‌شوند که فشار خاک خارجی تا حد ممکن به صورت یکنواخت روی بدنه‌ی سازه توزیع شود. برای دستیابی به این هدف، عموماً فضای حلقوی که بین خاک دربرگیرنده و بدنه‌ی تونل ایجاد شده است، با تزریق دوغاب سیمان

بنیان - که در این نوشتار از آن با اصطلاح بتن نام برده می‌شود - به وسیله‌ی پمپ‌های هیدرولیکی پُر می‌شود. وجود هرگونه ناپیوستگی در بتن تزریق شده در این حدفاصل، تأثیر منفی بر نتیجه کار خواهد گذاشت. کنترل کیفیت و کارآمدی عملیات تزریق بتن در پشت پوشش بتنی تونل، کار ساده‌ای نیست؛ چراکه نتیجه‌ی نهایی عملیات به صورت مستقیم قابل مشاهده و پایش نیست. در مواردی که سطح مقطع تونل از مقدار مشخصی بزرگ‌تر باشد، مرحله‌ی کنترل کیفیت پیوستگی با استفاده از روش‌های مخرب صورت می‌گیرد. مقصود از روش مخرب، تهیه‌ی مغزه از پوشش بتنی تونل در فواصل معین و ارزیابی پیوستگی با استفاده از نتیجه‌ی به دست آمده از بررسی این مغزه‌هاست. این روش علاوه بر اینکه هزینه‌های قابل توجهی در پی خواهد داشت، به زمان نسبتاً زیادی نیز نیازمند است و همچنین دید بسیار محدودی از شرایط نهایی پشت پوشش بتنی به دست می‌دهد.

در این میان، مزایای آزمون‌های غیرمخرب در کنترل کیفیت پیوستگی بتن تزریقی می‌تواند تعیین کننده باشد. مهم‌ترین این مزایا هزینه‌ی کمتر، سرعت بالاتر و از همه مهم‌تر آسیب نرساندن به سازه است؛ هرچند این روش‌ها هم باید مورد اعتبار سنجی قرار بگیرند. بدین معنی که مهندسیین باید اطمینان حاصل کنند که نتایج آزمون‌های غیرمخرب با آزمون‌های مستقیم معادل همخوانی داشته باشد. اطلاعات مفیدی که در این راستا می‌توان از نمودار پویایی-فرکانس استخراج کرد و از آنها برای ارزیابی پیوستگی بتن تزریقی پشت لاینینگ بهره برد، عبارتند از:

- **پویایی میانگین^۱:** میانگین مقادیر پویایی در فاصله‌ی فرکانسی ۱۰۰ تا ۸۰۰ هرتز را پویایی میانگین می‌گویند. این پارامتر در شکل شماره ۴-۳ به صورت خط چین نشان داده شده است. مقدار این شاخص رابطه‌ی معناداری با چگالی و ضخامت سازه‌ی تحت آزمون دارد. در واقع کاهش ضخامت سازه‌ی صفحه‌ای باعث افزایش در مقدار پویایی میانگین خواهد شد. به عنوان مثال، اگر پس از تزریق بتن به پشت پوشش تونل، در قسمتی از تونل مقدار بتن تزریقی کمتر از قسمت‌های دیگر باشد، پس از انجام آزمون در آن محل خواهیم دید که مقدار پویایی میانگین در آن قسمت بیشتر خواهد بود. به عبارت دیگر، با انجام آزمون در محیطی با خواص ظاهراً یکسان و همگن، مقدار بزرگ‌تر پویایی میانگین در مقایسه با سایر مقادیر نشانگر کاهش ضخامت در آن محل است.

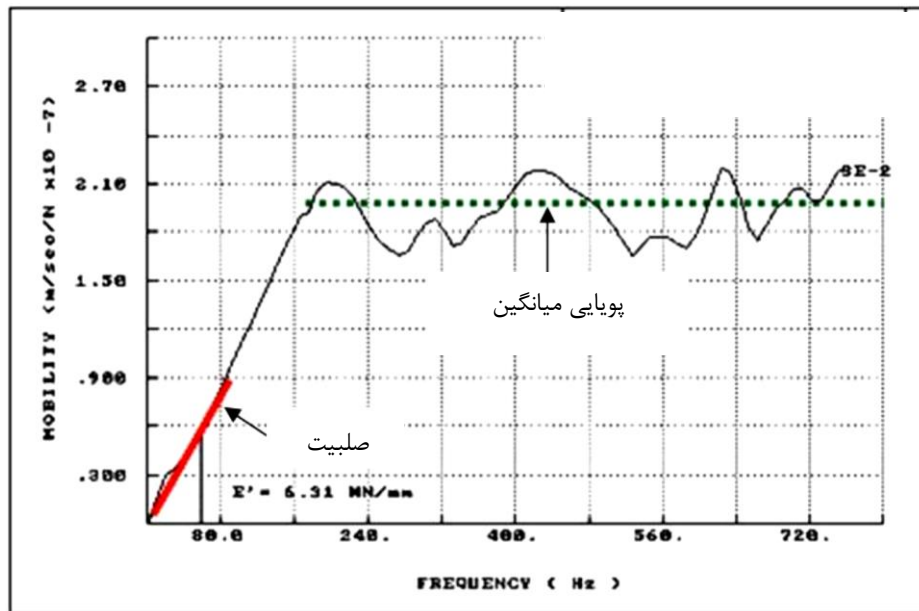
¹ "average mobility" or "mean mobility"

- **صلبیت دینامیکی^۱**: شیب بخشی از نمودار پویایی که در حد فاصل فرکانسی صفر تا ۵۰ هرتز (یا ۸۰ هرتز) قرار دارد نشانگر پارامتر «انعطاف‌پذیری^۲» در اطراف نقطه‌ای است که آزمون در آن نقطه انجام گرفته است. این بخش در شکل شماره ۳-۴ با خط توپر در ابتدای نمودار مشخص شده است. در واقع این پارامتر معکوس شاخص صلبیت دینامیکی سازه در اطراف نقطه‌ی انجام آزمون است. صلبیت سازه نشان دهنده‌ی کیفیت بتن، ضخامت سازه و شرایط پشتیبانی سازه می‌باشد. از این شاخص می‌توان به خوبی در تشخیص شرایط پشتیبانی در پوشش بتنی استفاده کرد.
- **نسبت حفرات^۳**: این شاخص به صورت نسبت مقدار پویایی اولیه به مقدار پویایی میانگین تعریف می‌شود. هنگامی که سازه‌های بتنی در قسمت‌های پایین‌تر دارای کیفیت کمتری باشند و یا پشتیبانی سازه‌های صفحه‌ای در مواردی مانند پوشش بتنی تونل در یک قسمت شرایط مناسبی نداشته باشد، کیفیت بخش‌هایی از سازه که به سطح نزدیک‌تر هستند در نتیجه‌ی آزمون تعیین کننده‌تر خواهند بود. در این شرایط علاوه بر اینکه مقدار پویایی میانگین افزایش می‌یابد، کاهش قابل توجهی هم در مقدار صلبیت دینامیکی خواهیم داشت. در واقع کاهش صلبیت دینامیکی به معنای افزایش اولیه در مقدار پویایی می‌باشد و در چنین شرایطی این مقدار از مقدار پویایی میانگین بزرگ‌تر خواهد بود. نسبت حفرات شاخص کیفیت کمتر بتن در قسمت‌های پایین‌تر سازه و یا فقدان پشتیبانی مناسب در پشت سازه‌های صفحه‌ای می‌باشد. می‌توان از این شاخص در بررسی کیفیت پیوستگی بتن تزریقی در پشت پوشش بتنی تونل به خوبی استفاده کرد.

¹ dynamic stiffness

² flexibility

³ “Voids ratio” or “Voids index”



شکل ۴-۳ نمودار پویایی بر حسب فرکانس [۲۱]

۴-۲-۱ فرآیند برداشت داده

تجهیزات انجام این آزمون قابل حمل بوده و می‌تواند به آسانی در داخل تونل مورد استفاده قرار بگیرد. برداشت داده‌ها باید با هندسه‌ی مشخص و از پیش تعیین شده‌ای صورت بگیرد. برای برداشت داده در تونل‌ها، چندین مقطع از تونل با فواصل مشخص (مثلاً هر ۵ متر) در نظر گرفته می‌شوند و در هر مقطع چند نقطه تحت آزمون قرار می‌گیرند. به طور معمول، موقعیت نقطه‌ها در مقاطع به صورت موقعیت آن‌ها در ساعت مشخص می‌شود؛ مثلاً در هر مقطع در موقعیت‌های ساعت ۱، ۳، ۹ و ۱۱ آزمون انجام می‌گیرد. اگر در هنگام انجام آزمون به یک آنومالی برخورد کنیم، می‌توان نقاط آزمون را به هم نزدیک‌تر کرد تا بتوان نقطه‌ی مورد نظر را به طور دقیق‌تری مورد بررسی قرار داد. پس از اینکه انجام آزمون به پایان رسید، پارامترهای مورد نظر از نمودارهای پویایی هر نقطه استخراج می‌شود و به صورت نقشه‌های کننتوری برای تمام تونل رسم می‌شود. در واقع نتیجه‌ی نهایی آزمون پاسخ ضربه همین نقشه‌های کننتوری است که در نهایت حاصل می‌شوند و باید تفسیر شوند.

۴-۲-۲ تفسیر نتایج

در ارزیابی کیفیت پیوستگی بتن تزریقی پشت پوشش بتنی تونل با استفاده از آزمون پاسخ ضربه، شاخص‌هایی که تعیین کننده‌ی شرایط پشتیبانی سازه‌های صفحه‌ای هستند از اهمیت ویژه‌ای

برخورد دارند. از شاخص «صلبیت دینامیکی» و شاخص «نسبت حفرات» می‌توان به این منظور استفاده کرد. با رسم نقشه‌های کنطوری این دو شاخص می‌توان نقطه‌هایی که دارای پشتیبانی کمتری هستند مشخص کرد تا اقدامات لازم برای تقویت آنها صورت پذیرد.

۴-۲-۴ نمونه‌های عملی

۴-۲-۴-۱ تونل انتقال آب بوینس آیرس، آرژانتین

این تونل با طول تقریبی ۱۷ کیلومتر در پایتخت کشور آرژانتین ساخته شده است. پوشش داخلی این تونل از نوع قطعات پیش ساخته‌ی بتنی می‌باشد که پشت آن با تزریق بتن استحکام یافته است و طول عمر این تونل ۱۰۰ سال تخمین زده شده است. خاک در برگیرنده‌ی سازه تقریباً در تمام طول تونل از جنس گل‌سنگ سخت همراه با رُس می‌باشد. در طول فرآیند نصب پوشش بتنی گزارش‌هایی مبنی بر به وجود آمدن اشکالاتی در روند تزریق بتن ثبت شده بود. این اشکالات به علّت وجود حفرات در پشت قطعات پیش ساخته بود. به همین منظور، انجام این آزمون غیرمخرب با هدف تشخیص محل ناپیوستگی‌ها و حفرات در پشت پوشش بتنی پیش ساخته در تونل صورت گرفت.

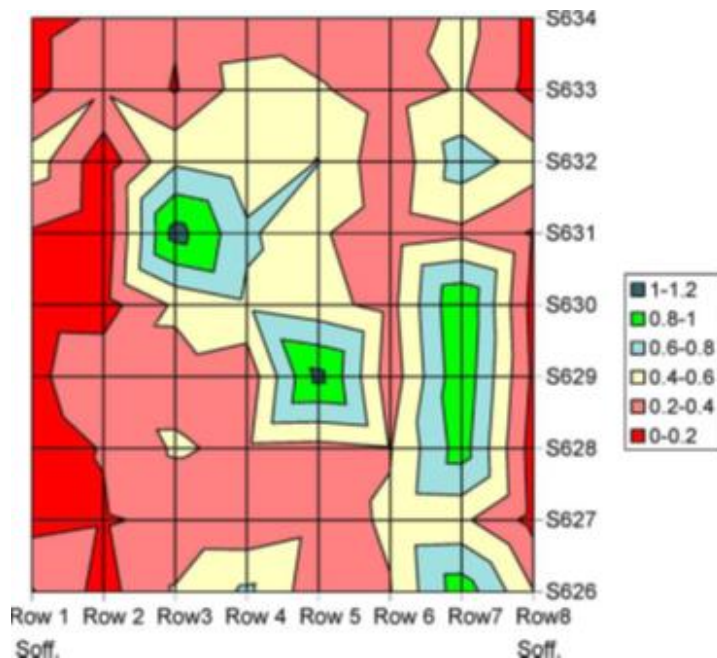
برداشت داده‌ها در این تونل در ۵ مقطع مختلف و در هر مقطع، در ۷ نقطه، در موقعیت‌های ساعت ۱۲:۰۰، ۱:۳۰، ۳:۰۰، ۴:۳۰، ۷:۳۰، ۹:۰۰ و ۱۰:۳۰ صورت گرفته است. پس از به دست آوردن مقدار عددی شاخص‌های مورد نظر در هر نقطه، نمودارهای کنطوری هر یک از این شاخص‌ها برای بخشی از تونل که تحت آزمون قرار گرفته بود، ترسیم شد. گام بعدی، تفسیر این نمودارها به منظور تشخیص محل حفرات و ناپیوستگی‌ها در پشت قطعات پیش ساخته و یا به عبارت دیگر تشخیص قسمت‌های با پشتیبانی کمتر است.

مقدار پویایی میانگین برای قطعات پیش ساخته صفحه‌ای با ضخامت ۲۰۰ میلی‌متر که دارای شرایط پشتیبانی مناسبی هستند، معمولاً بین ۱۶ تا ۲۰ ($m/N/s \times 10^{-7}$) می‌باشند. هرگونه افزایش در این مقدار می‌تواند نشان دهنده ضخامت کمتر قطعه‌ی پیش ساخته در محل انجام آزمون و یا وجود حفره و یا عدم پشتیبانی مناسب در پشت قطعات پیش ساخته باشد. جایی که مقدار پویایی میانگین از ۲۲ بزرگتر شود، می‌تواند بیانگر وجود حفرات و ناپیوستگی‌ها در پشت قطعات پیش ساخته باشد.

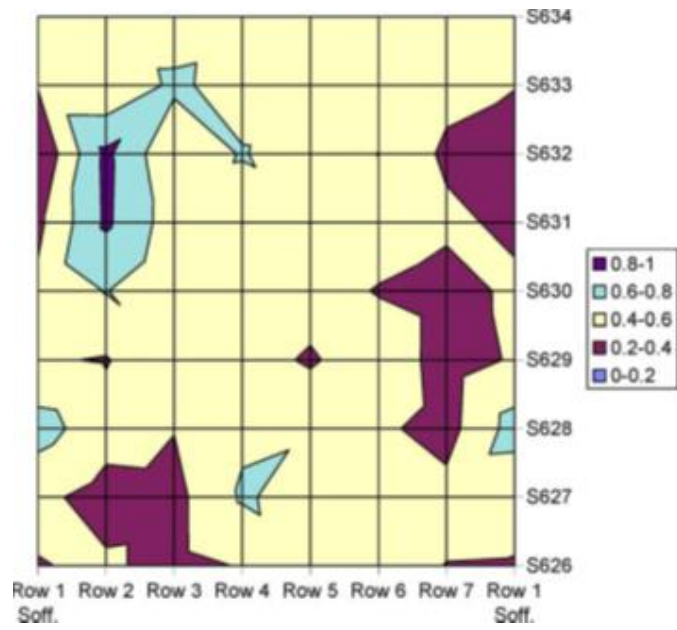
سه شاخصی که در انجام آزمون پاسخ ضربه در هر نقطه اندازه گرفته شده است، شاخص‌های پویایی میانگین، صلبیت دینامیکی و نسبت حفرات می‌باشد. اگر قطعات پیش ساخته‌ی پوشش تونل به صورت یک واحد یکپارچه عمل کند و تنش در تمام حلقه‌ی تونل به صورت یکنواخت وارد شود، در این صورت

مقدار صلبیت در پیرامون تونل تغییر می‌کند. در این حالت، نسبت حفرات تا مقدار واحد کاهش پیدا می‌کند و وجود هرگونه عدم پشتیبانی با استفاده از تغییرات پویایی میانگین قابل تشخیص خواهد بود. ولی اگر تنش اعمال شده به حلقه‌ی تونل یکنواخت نباشد، مقدار صلبیت برای هر قطعه‌ی پیش ساخته در پیرامون تونل یک مقدار تقریباً ثابت خواهد بود و در این حالت وجود هرگونه حفره و ناپیوستگی در پشت قطعات پیش ساخته با افزایش در شاخص نسبت حفرات مشخص خواهد شد. در صورت وجود عدم پشتیبانی مناسب در پشت قطعات پیش ساخته، معمولاً میزان شاخص نسبت حفرات از عدد ۲ بزرگتر خواهد بود.

در مورد این تونل، حالت اول پیش آمده است. یعنی مقادیر به دست آمده برای شاخص نسبت حفرات، همگی کمتر از مقدار واحد هستند و مقدار شاخص صلبیت در پیرامون حلقه‌ی تونل دچار تغییرات شده است. در چنین حالتی، همان طور که ذکر شد، وجود حفرات و ناپیوستگی‌ها با تغییرات پویایی میانگین تشخیص داده شده است. نمودارهای مربوط به شاخص‌های «صلبیت دینامیکی» و «نسبت حفرات» در شکل‌های ۴-۴ و ۴-۵ نمایش داده شده است [۲۲].



شکل ۴-۴ نمودار کنتوری شاخص صلبیت دینامیکی که واحد آن مگانیوتون بر میلیمتر (MN/mm) است [۲۲]



شکل ۴-۵ نمودار کنتوری شاخص نسبت حفرات [۲۲]

فصل پنجم:

مطالعه‌ی موردی

۵-۱ مقدمه

به منظور انجام مطالعه موردی برای این پایان‌نامه، از ابتدای کار قرار بر این شد که دستگاه مربوط به این آزمون در کشور ساخته شود و به وسیله دستگاه ساخته شده، برداشت داده در تونل متروی خط هفت تهران صورت گیرد. هماهنگی‌های مرتبط با برداشت داده در تونل در حال ساخت خط هفت متروی تهران نیز با مسئولین امر انجام شد و موافقت اولیه از ایشان اخذ شد و متعاقب آن مراحل ساخت دستگاه آغاز شد.

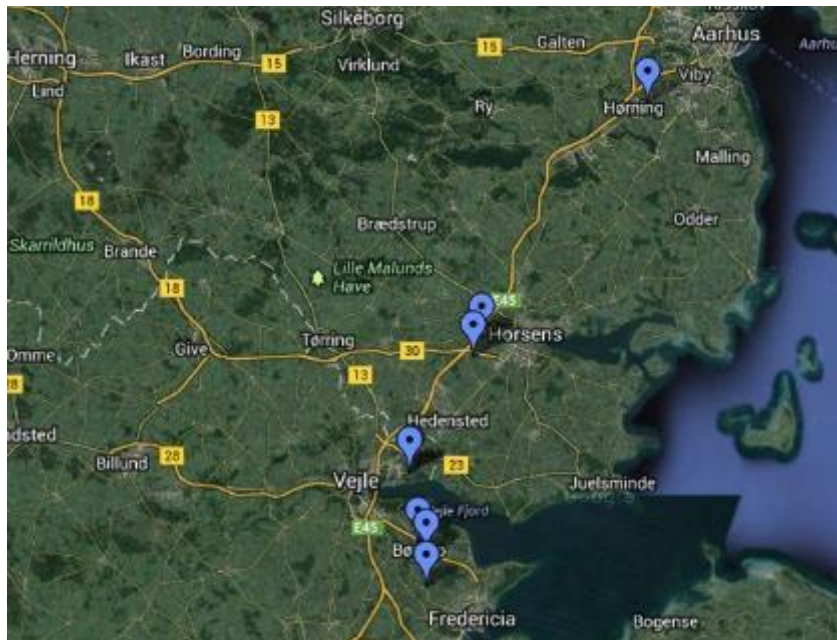
برای ساخت دستگاه نیاز به همکاری با متخصصینی در حوزه الکترونیک و ابزار دقیق وجود داشت. به همین منظور با شرکت کنترل دیجیتال نوین که سابقه اجرای پروژه‌های ابزار دقیق در مقیاس صنعتی را داشت، رایزنی‌هایی انجام شد و طرح اولیه پروژه ریخته شد. با تهیه سنسورهای مربوطه شامل یک عدد بارسنج با ظرفیت ۱۵۰ کیلوگرم و یک عدد ژئوفون لرزه‌نگاری و همچنین برد برداشت داده با سرعت ۱۰۰۰۰ نمونه بر ثانیه و سایر لوازم الکترونیکی مورد نیاز، اولین گام عملی در ساخت دستگاه برداشته شد. فرایند ساخت این دستگاه نزدیک به ۱۵ ماه به طول انجامید و هزینه‌ای بالغ بر هفت میلیون ریال برای ساخت آن انجام شد تا دستگاه به شکل کنونی درآید. به منظور تکمیل فرآیند ساخت نیاز بود که هزینه بیشتری صورت بگیرد که متأسفانه به دلیل عدم تأمین بودجه از طرف مسئولین دانشگاه، مراحل ساخت دستگاه متوقف شد. به همین دلیل و با همفکری با اساتید محترم راهنما تصمیم بر آن شد که به عنوان مطالعه‌ی موردی این پایان‌نامه، از داده‌های خارجی استفاده شود. در شکل ۵-۱ تصویری از تجهیزات انجام آزمون غیر مخرب پاسخ ضربه که مراحل ساخت آن توسط نگارنده انجام شده است، دیده می‌شود.



شکل ۵-۱: تصویری از تجهیزات ساخته شده به منظور انجام آزمون پاسخ ضربه

۵-۲ مطالعه موردی

در این بخش به عنوان مطالعه موردی، به بررسی کیفیت و پیوستگی ساختار قوس زیرین هشت پل بتنی که مربوط شبکه راه آهن کشور دانمارک می باشد، پرداخته شده است. داده های این پایان نامه در روزهای هفدهم تا بیستم ژوئن سال ۲۰۱۳ میلادی در کشور دانمارک توسط آقای مهندس جسپر اس کلاوسن و همکاران ایشان برداشت شده است و به صورت خام در اختیار نگارنده قرار گرفته است. پس از پردازش، پارامترهای مورد نیاز از نمودارهای پویایی استخراج و نمودارهای کنتوری هر یک از این پارامترها به دست آورده شده است. همان طور که در شکل ۵-۱ مشاهده می شود، این پل ها در بخشی از خط آهن بین شهرهای Fredericia و Århus قرار گرفته اند. در شمال منطقه Vejle به نام Hedensted به دلیل اینکه پل ها خیلی نزدیک هم هستند، فقط از یک نشانه برای مشخص کردن هر دو پل بر روی نقشه استفاده شده است.

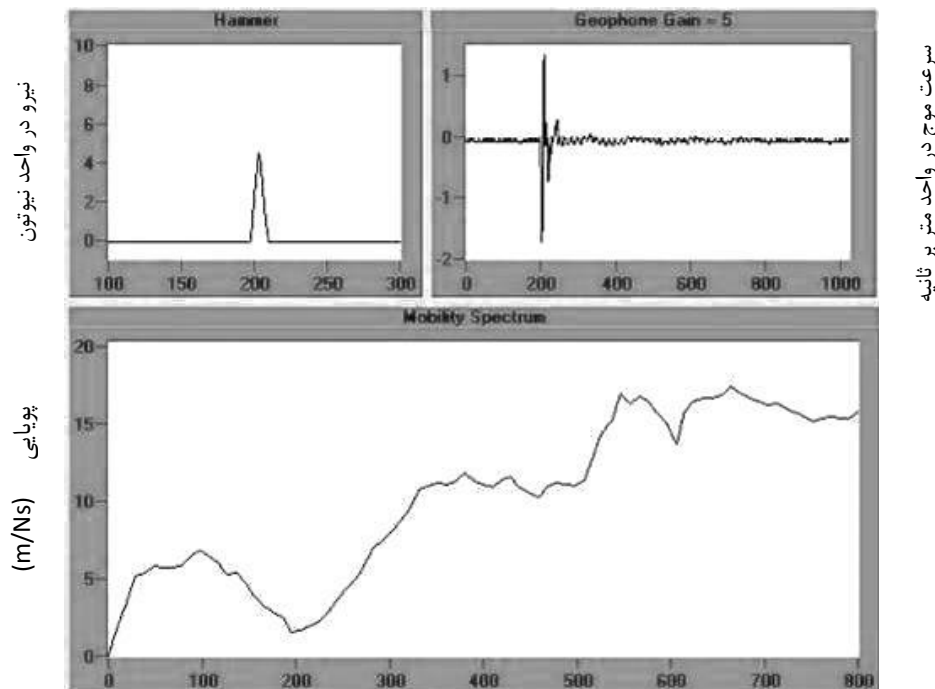


شکل ۵-۲: نقشه کلی مربوط به محل هشت پل مورد مطالعه

هدف از این مطالعه، بررسی کیفیت و پیوستگی ناحیه زیرین پل های قوسی شبکه راه آهن در منطقه مذکور است. نتایج این مطالعه منجر به شناخت بخش های با چسبندگی ضعیف تر بین آجرها و یا تشخیص سطحی یا عمقی بودن خرابی ها خواهد شد. با دانستن این موارد می توان بهترین راهکارهای ترمیمی را به کار بست.

همان‌طور که پیش‌تر هم اشاره شد روند انجام آزمون به این شکل است که امواج تنش‌ی تولید شده به داخل سازه فرستاده می‌شوند و پس از برخورد با حفره‌ها یا مرزها به سمت بالا بازتاب می‌شوند و در سطح توسط گیرنده دریافت و ثبت می‌گردند. داده‌های ورودی این آزمون که باید در مراحل بعدی مورد پردازش و تفسیر قرار بگیرند، دو سری داده در حوزه زمان می‌باشد. یکی مقدار نیروی وارده به سازه بر اثر اعمال ضربه در واحد زمان و دیگری سرعت موج دریافت شده در سطح که آن هم در واحد زمان می‌باشد.

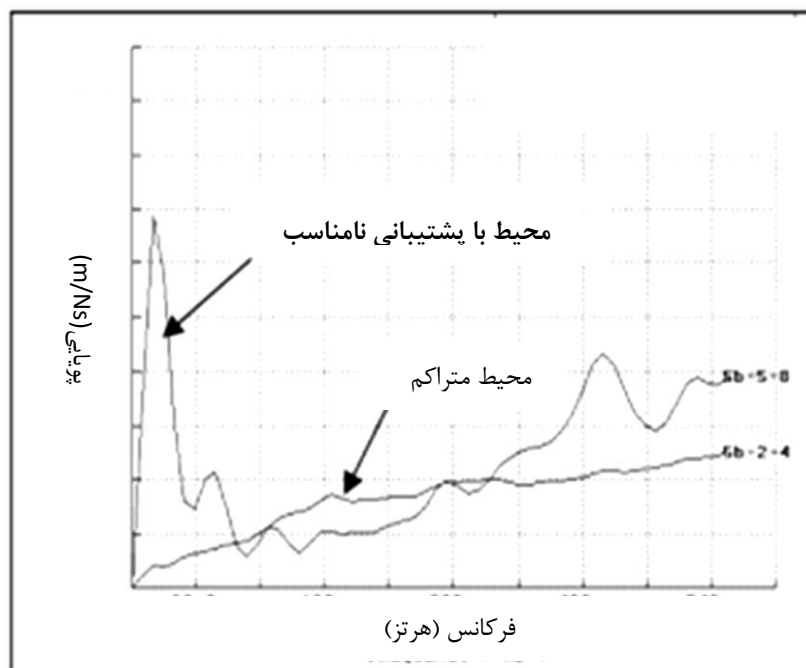
پردازش داده‌ها از این مرحله آغاز می‌شود. نخستین گام در این مرحله انتقال داده‌ها از حوزه‌ی زمان به حوزه فرکانس است. به این منظور هم داده‌های مربوط به نیرو و هم داده‌های پاسخ ژئوفون (سرعت) به وسیله‌ی الگوریتم تبدیل فوریه سریع^۱ (FFT) از حوزه‌ی زمان به حوزه‌ی فرکانس منتقل می‌شوند و طیف نیرو و طیف سرعت حاصل می‌شود. سپس طیف سرعت را بر طیف نیرو تقسیم می‌کنیم تا یک تابع تبدیل به دست آید که حاصل این تابع نشان دهنده مشخصه‌ای از سازه‌ی بتنی است که «پویایی (mobility)» نام دارد. اگر نمودار پویایی را بر حسب فرکانس از صفر تا ۸۰۰ هرتز رسم کنیم، این نمودار شامل اطلاعات مفیدی از شرایط سازه‌ی تحت آزمون خواهد بود (شکل ۵-۲).



شکل ۵-۳: نمونه‌ای از داده حاصل از انجام آزمون پاسخ ضربه در یک نقطه شامل داده‌های در واحد زمان (بالا) و نمودار پویایی به دست آمده پس از پردازش (پایین)

¹ fast Fourier transform (FFT)

در بررسی ساختارهای قوسی شکل زیر این پل‌ها روی دو شاخصه «پویایی میانگین» و «نسبت یا شاخص حفرات» به عنوان معیار استاندارد متمرکز می‌شویم. پویایی میانگین در واقع میانگین مقادیر پویایی بین فرکانس‌های ۱۰۰ تا ۸۰۰ هرتز است. مقدار پویایی در این بازه فرکانسی به طور مستقیم با تراکم و ضخامت ماده تحت آزمون در ارتباط است. کاهش در ضخامت ساختار لایه‌ای منجر به افزایش در مقدار پویایی میانگین خواهد شد. اگر ساختار بخش بالایی یک لایه به طور کامل (یا تقریباً کامل) نسبت به بخش‌های عمیق‌تر تخریب یا پوسته پوسته شده باشد، پویایی میانگین افزایش نشان خواهد داد. مقدار بیشتر پویایی میانگین در یک نقطه در مقایسه با مقادیر اندازه‌گیری در محیط‌های همگن و متراکم می‌تواند به عنوان شاخص تخریب و لایه لایه شدگی باشد. نسبت حفرات یا شاخص حفرات هم نسبت پویایی بیشینه اولیه (در کمتر از ۱۰۰ هرتز) به پویایی میانگین است. اگر محیط تحت آزمون دچار لایه لایه شدگی و یا ضعف پشتیبانی باشد، مقدار پویایی میانگین در ابتدای نمودار و در فرکانس‌های کمتر از ۱۰۰ هرتز (اولین بیشینه نمودار) بسیار بزرگ‌تر از پویایی میانگین خواهد بود. به طور معمول اگر در نقطه‌ای شاخص حفرات بزرگ‌تر از ۲ تا ۴ باشد، می‌تواند نشانه‌ای از یک محیط دارای خرابی بالقوه باشد. شکل ۵-۳ تفاوت نمودار پویایی مربوط به یک محیط متراکم را در مقایسه با یک محیط با پشتیبانی نامناسب نشان می‌دهد.



شکل ۵-۴: نمودار پویایی مربوط به یک محیط متراکم در مقایسه با یک محیط با پشتیبانی نامناسب

پس از این که این شاخص‌ها برای تمام نقاط یک سازه به دست آمد، نمودار کنٹوری هر شاخص برای آن سازه ترسیم می‌شود و با تفسیر نمودار، مکان‌هایی که با خطر آسیب احتمالی مواجه هستند مشخص می‌گردد.

۳-۵ انجام آزمون

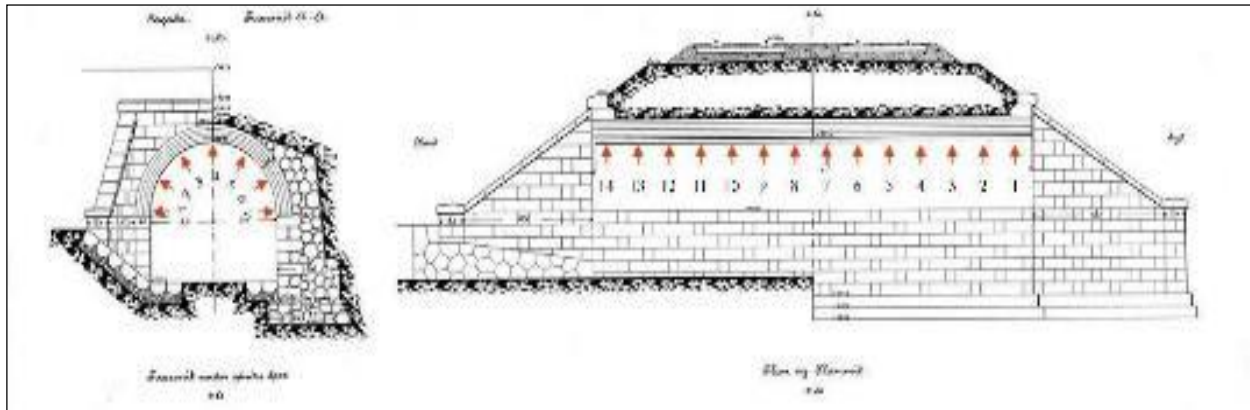
بررسی‌های صورت گرفته روی هشت پل به صورت خلاصه در جدول ۵-۱ شرح داده شده است.

جدول ۵-۱: خلاصه اطلاعات مربوط به پل‌های بررسی شده

ردیف	محل پل در خط آهن (Km)	نام محل پل	نوع پل	ارتفاع پل	سطح آب
20508	6,967	UF af Spang Å	بدنه‌ی قوس: آجری ابتدا و انتها: بتنی	4,4 m	1,2 m
20516	10,69	UF af Brøndsted Møllevej	بدنه‌ی قوس: آجری ابتدا و انتها: آجری	3,7 m	-
20524	12,50	UF af Skærup Å	بدنه‌ی قوس: آجری ابتدا و انتها: بتنی	2,5 m	-
20614	32,83	UF af Bredballe Tirsbækvej	بدنه‌ی قوس: آجری ابتدا و انتها به صورت ناپیوسته با سقف	4,3 m	-
20616	32,98	UF af Tirsbæk(vandløb)	بدنه‌ی قوس: آجری ابتدا و انتها به صورت ناپیوسته با سقف	1,9 m	0,3 m
20670	49,47	UF af Ølsted Å	بدنه‌ی قوس: آجری ابتدا و انتها: بتنی	4,4 m	0,8 m
20676	51,65	UF af vandløb	بدنه‌ی قوس: آجری ابتدا و انتها: بتنی	3,4 m	0,4 m
20816	95,88	UF af Bering Å	بدنه‌ی قوس: آجری	5,2 m	0,7 m

به طور کلی برای تمامی پل‌ها یک شبکه‌بندی با ابعاد تقریبی ۱ متر در ۱ متر در قوس زیرین پل‌ها به منظور انجام اندازه‌گیری ایجاد شد. اندازه‌گیری هم در ساختارهای قوسی شکل و هم در صورت امکان در

قسمت‌های بتنی ابتدایی و انتهایی قوس صورت پذیرفت. اولین و آخرین ستون از شبکه اندازه‌گیری در فاصله تقریبی $0/2$ تا $0/3$ متر از دو بخش انتهایی قوس زیرین پل انتخاب شده اند؛ چراکه تجربه نشان داده است که این نوع از خرابی در بخش‌های ابتدایی و انتهایی قوس بیشتر به چشم می‌خورد. در شکل ۴-۵ به عنوان مثال شمایی از یک پل قوسی نمایش داده شده است. محل نقاط انجام آزمون در پیرامون قوس و در طول پل با پیکان‌هایی نشان داده شده اند.



شکل ۵-۵: شمایی از محل نقاط اندازه‌گیری در قوس زیرین یک پل

در ادامه فصل بررسی‌های مربوط به هر یک از پل‌ها در بخش‌های جداگانه آمده است. به این ترتیب که ابتدا تصویری از جبهه‌ی قوس زیرین پل، جایی که اندازه‌گیری‌ها آغاز شده، نمایش داده شده است. این تصویر بیانگر محل و راستای نقاط اندازه‌گیری پیرامون قوس است که با پیکان‌های قرمز رنگ مشخص شده‌اند. در برخی از پل‌ها دسترسی به تمام نقاط مدنظر امکان پذیر نبوده و این نقاط با پیکان‌های مشکی رنگ مشخص گردیده‌اند.

نتایج بررسی داده‌های مربوط به آزمون پاسخ ضربه همیشه به صورت نمودارهای رنگی نمایش داده می‌شوند تا درک آن‌ها ساده‌تر باشد. در تصویر هر نمودار، پیکان‌های مربوط به جهات جغرافیایی وجود دارد که بتوان جهت شمال را تشخیص داد. محور افقی یا همان محور X نشانگر فاصله در واحد متر است که اندازه‌گیری آن از جبهه‌ی ساختار قوسی شکل زیر پل آغاز شده است. در محور عمودی یا همان محور Y هم شماره‌ی ردیف نقاط اندازه‌گیری در پیرامون قوس زیرین پل دیده می‌شود. این اعداد همیشه به شکل ساعت‌گرد در گرداگرد قوس شماره گذاری می‌شوند.

مقیاس ثبت شده بر روی نمودارهای رنگی برای تمام پل‌های مطالعه شده یکسان است؛ بنابراین می‌توان همه نمودارها را مستقیماً با هم مقایسه کرد. به طور کلی رنگ‌های نمودارها به شکل زیر توصیف می‌شوند:

- بخش‌های سفید و سبز: بدون آسیب
- بخش‌های زرد: آثار ضعیفی از آسیب احتمالی
- بخش‌های بنفش، قرمز و آبی: آثار واضح آسیب

بخش‌های ابتدایی و انتهایی پل در نمودارهای رنگی در واقع همان محورهای افقی نمودار می‌باشند. محل برداشت مغزه‌ها نیز در نمودارهای رنگی مشخص شده‌اند. مکان برداشت مغزه‌ها بلافاصله پس از انجام آزمون روی پل و پردازش و تفسیر داده‌ها مشخص می‌شود. طبیعتاً مکان برداشت مغزه در قسمت‌های ابتدایی و انتهایی نخواهد بود و از بخش آجری قوس مغزه‌گیری شده است.

اگر در محلی از قوس به ناحیه‌ی آسیب دیده‌ی نسبتاً بزرگی برخورد کردیم، می‌توان با تغییر مقیاس نقشه حساسیت بیشتری برای دستیابی به مکان دقیق آسیب ایجاد کرد. البته با چنین موردی در این مطالعه برخورد نشده است.

در پایان، چند تصویر از هر پل به همراه توضیحاتی برای هریک آنها در قالب یک پیوست آمده است. مشاهده و دقت در این تصاویر و توضیحات آنها کمک بسزایی در درک کلیات و جزئیات انجام این آزمون خواهد کرد.

۵-۳-۱ پل ۲۰۵۰۸ واقع در اسپانگو (Spang å)

در این بخش نتایج داده‌های حاصل از انجام آزمون پاسخ ضربه بر رزوی پل ۲۰۵۰۸ آورده شده است. کناره‌های این پل بتنی بوده و سقف قوس آن آجری می‌باشد. آزمون در بخش فوقانی قوس (که با پیکان-های مشکی رنگ در شکل ۵-۵ مشخص شده است) به علت دسترسی مشکل انجام نگرفته است. در این پل در ۱۵۲ نقطه آزمون پاسخ ضربه انجام گرفته است.

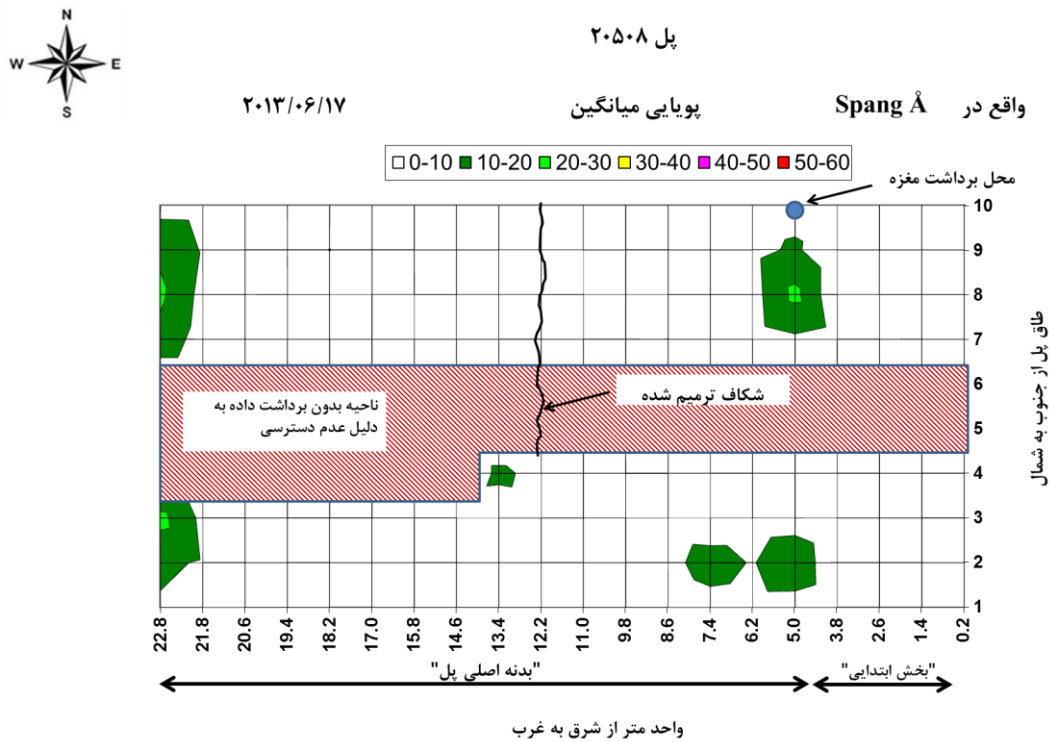
در شکل ۵-۶ نمودار رنگی شاخص پویایی میانگین مربوط به این پل آورده شده است. همان طور که در این نمودار دیده می‌شود نشانه‌ای از آسیب در سرتاسر محیط تحت آزمون به چشم نمی‌خورد.

در شکل ۵-۷ هم نمودار رنگی شاخص حفرات مربوط به پل آمده است. در محل‌هایی از محیط تحت آزمون آثار بسیار خفیفی از احتمال لایه لایه شدگی در پشت لایه‌ی آجری به چشم می‌خورد که به رنگ سبز روشن در نمودار مشخص است.

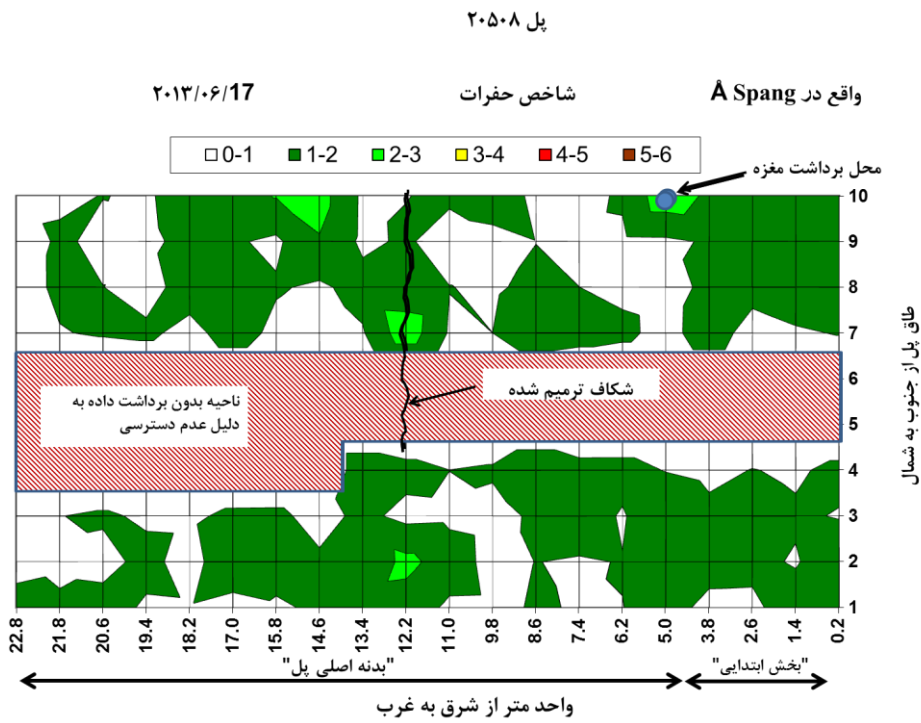
محل برداشت مغزه به منظور اعتبارسنجی داده‌ها روی نمودارها مشخص شده است. این محل در جایی انتخاب شده است که روی نمودار شاخص حفرات، احتمال آسیب وجود داشت. آثار خفیفی از آسیب روی مغزه برداشت شده دیده می‌شود که در شکل ۵-۸ قابل مشاهده است.



شکل ۵-۶: پل ۲۰۵۰۸ واقع در اسپانگو (Spang Å)



شکل ۵-۷: نمودار پویایی میانگین مربوط به پل ۲۰۵۰۸



شکل ۵-۸: نمودار شاخص حفرات مربوط به پل ۲۰۵۰۸



شکل ۵-۹: مغزه برداشته شده از قوس زیرین پل ۲۰۵۰۸

۵-۳-۲ پل ۲۰۵۱۶ واقع در برونستد مولیوای (Brøndsted Møllevej)

در این بخش نتایج داده‌های حاصل از انجام آزمون غیرمخرب پاسخ ضربه بر روی قوس زیرین پل شماره ۲۰۵۱۶ آورده شده است. این پل هم از دو بخش سقف و کناره تشکیل شده است که کناره‌های آن آجری است.



شکل ۵-۱۰: پل ۲۰۵۱۶ واقع در برونستد مولیوای (Brøndsted Møllevej)

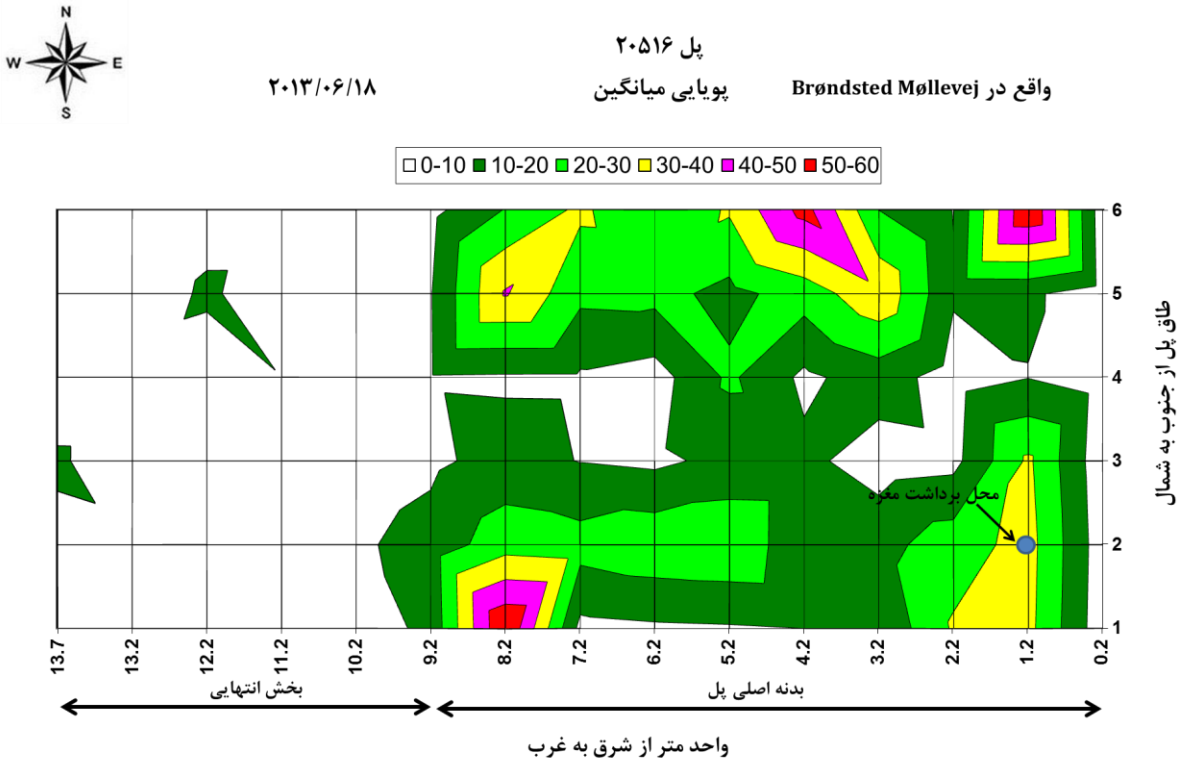
نمودار پویایی میانگین مربوط به این پل در شکل ۵-۱۰ آورده شده است. در بخش‌های قابل توجهی از نمودار قسمت‌های زرد و قرمز به چشم می‌خورد. این قسمت‌ها مکان‌هایی هستند که در آن‌ها لایه بالایی با لایه زیرین یا به هم نچسبیده‌اند و یا ارتباط ضعیفی دارند. به نظر می‌رسد در همه‌ی این قسمت‌ها پیش‌تر تعمیر و ترمیمی صورت پذیرفته است. یک مورد از این تعمیرات را می‌توانید در شکل ۵-۱۱ مشاهده کنید. علائم ظاهری از آسیب و تخریب به شکل ترک یا پوسته پوسته شدن در قوس پل دیده نمی‌شود.

در شکل ۵-۱۲ نمودار شاخص حفرات مربوط به این پل آورده شده است. در این نمودار آثاری از تخریب و آسیب عمیق و ریشه‌ای در لایه‌ی زیرین بخش آجری دیده نمی‌شود.

محل برداشت مغزه‌ها به منظور اعتبارسنجی داده‌ها بر روی نمودارها مشخص شده است. مغزه‌ها از محل برداشت شده‌اند که مقدار پویایی میانگین در آن‌ها حاکی از احتمال ضعیف لایه لایه شدگی است. البته محل برداشت مغزه در بخش‌هایی که تعمیر شده‌اند، انتخاب نشده‌اند.

در بیرونی‌ترین بخش لایه‌ی آجری آثار کمی از آسیب دیده می‌شود ولی در ۱ تا ۲ سانتی‌متری بیرونی لایه‌ی زیرین آثاری از ترک‌هایی موازی و سطحی به چشم می‌خورد. در این ترک‌ها قسمت‌های سفید رنگی دیده می‌شود که به دلیل وجود نم و رطوبت در ساختار پل به وجود آمده‌اند. شکل‌های ۵-۱۳ و ۵-۱۴ نمونه‌هایی از این قسمت‌ها می‌باشند. این علائم نم و رطوبت در نزدیکی یکی از دهانه‌های قوس زیرین پل دیده شدند.

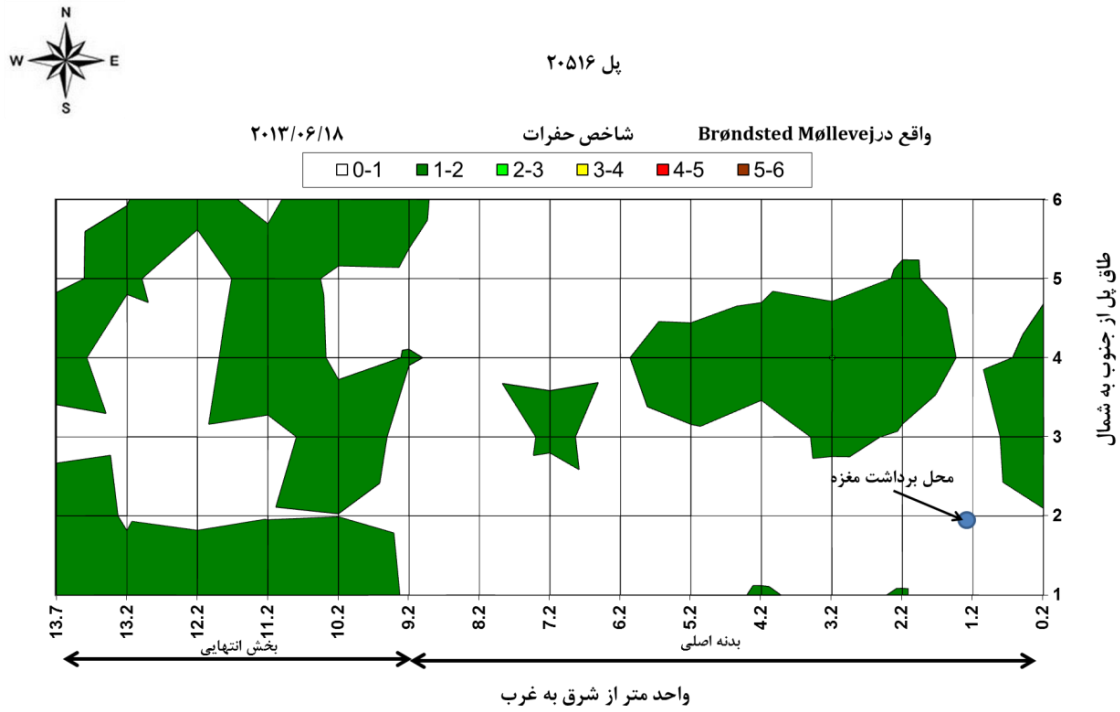
بخش‌های ابتدایی و انتهای این سازه به طور کلی در شرایط نسبتاً مطلوبی به سر می‌برد. در بخش اصلی سازه قسمت‌هایی با چسبندگی نسبتاً ضعیف (بخش‌های تعمیر شده) وجود دارد و در گوشه‌ی جنوب شرقی محیط تحت آزمون پتانسیل خرابی در آینده وجود دارد. مغزه‌های حفاری شده ترک‌های سطحی موازی و علائم نم و رطوبت موجود در سازه را به خوبی نشان می‌دهند.



شکل ۵-۱۱: نمودار پویایی میانگین مربوط به پل ۲۰۵۱۶



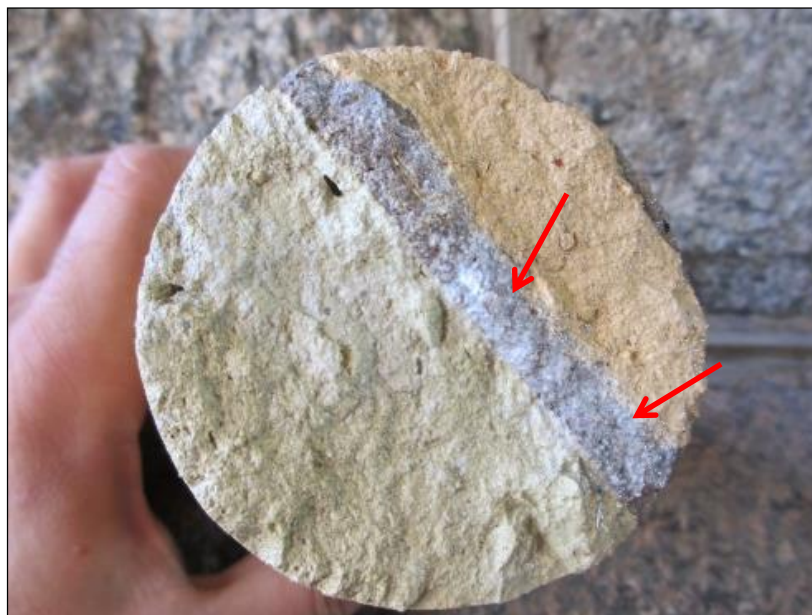
شکل ۵-۱۲: نمونه‌ای از قسمت‌های ترمیم شده که در مطالعات چسبندگی ضعیفی بین لایه آجری و لایه زیرین دارد



شکل ۵-۱۳: نمودار شاخص حفرات مربوط به پل ۲۰۵۱۶



شکل ۵-۱۴: محل مغزه گرفته شده از پل ۲۰۵۱۶، ترک در لایه‌ی دوم آجری دیده می‌شود



شکل ۵-۱۵: مغزه گرفته شده از پل ۲۰۵۱۶ : قسمت‌های سفید رنگ نشان دهنده‌ی وجود نم و رطوبت در سازه است

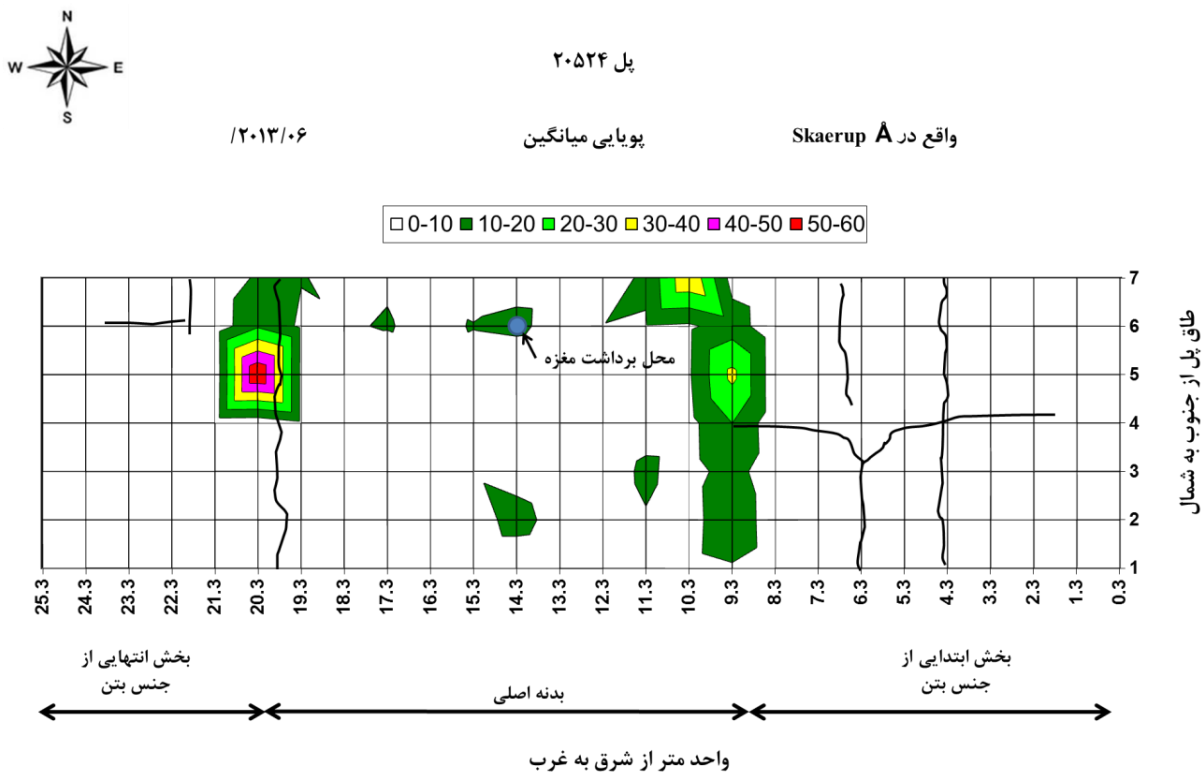
۵-۳-۳ پل ۲۰۵۲۴ واقع در اسکیروپو (Skærup Å)

در این بخش نتایج داده‌های حاصل از انجام آزمون غیرمخرب پاسخ ضربه بر روی قوس زیرین پل شماره ۲۰۵۲۴ آورده شده است. این سازه از سه بخش تشکیل شده است؛ بخش میانی که بخش اصلی پل نیز می‌باشد آجری است و بخش‌های ابتدایی و انتهایی آن از بتن ساخته شده است. در مجموع ۱۸۲ اندازه‌گیری به طور کامل در این مجموعه انجام گرفته است.



شکل ۵-۱۶: پل ۲۰۵۲۴ واقع در اسکیروپو (Skærup Å)

در شکل ۵-۱۶ نمودار پویایی میانگین مربوط به پل ۲۰۵۲۴ نشان داده شده است. آثار آسیب‌های واضحی در بخش‌های ابتدایی و انتهایی سازه دیده می‌شود. این مکان‌ها محلی هستند که در آنها لایه‌ی بالایی با لایه‌ی زیرین چسبندگی مناسبی ندارند. به نظر می‌رسد در تمامی این ناحیه‌ها قبلاً عملیات ترمیمی صورت پذیرفته است که یک نمونه از آن را در شکل ۵-۱۷ مشاهده می‌کنید. بخش قرمز رنگ در این نمودار محلی را نشان می‌دهد که یک ترک ترمیم شده در خلاف جهت دهانه‌ی شرقی پل در آنجا وجود دارد. همچنین علائمی از آسیب مانند ترک و پوسته پوسته شدگی در سرتاسر قوس زیر پل دیده می‌شود.



شکل ۵-۱۷: نمودار پویایی میانگین مربوط به پل ۲۰۵۲۴

نمودار شاخص حفرات مربوط به این پل در شکل ۵-۱۸ آورده شده است. آثاری از تخریب یا آسیب عمقی در لایه‌ی زیرین لایه‌ی آجری در این سازه به چشم نمی‌خورد. محل برداشت مغزه به منظور اعتبارسنجی داده‌ها بر روی نمودارها مشخص شده است. مغزه از محلی برداشت شده است که در نمودار پویایی میانگین احتمال خفیفی از لایه لایه شدگی وجود داشت. همان‌طور که انتظار می‌رفت علامتی از تخریب در مغزه دیده نشد. به شکل ۵-۱۹ نگاه کنید. سازه به طور کلی در شرایط مطلوبی به سر می‌برد. فقط علائمی عمومی از آسیب‌های قدیمی پیرامون بخش ابتدایی و انتهایی پل به چشم می‌خورد که تلاش‌هایی هم برای ترمیم آنها انجام شده است.



شکل ۵-۱۸: نمونه‌ای از محلی تعمیر شده از سازه؛ مطالعات نشان می‌دهد که چسبندگی ضعیفی بین لایه آجری با لایه‌ی زیرین آن وجود دارد. این بخش در نمودار شکل ۵-۱۵ به رنگ زرد نشان داده شده است.

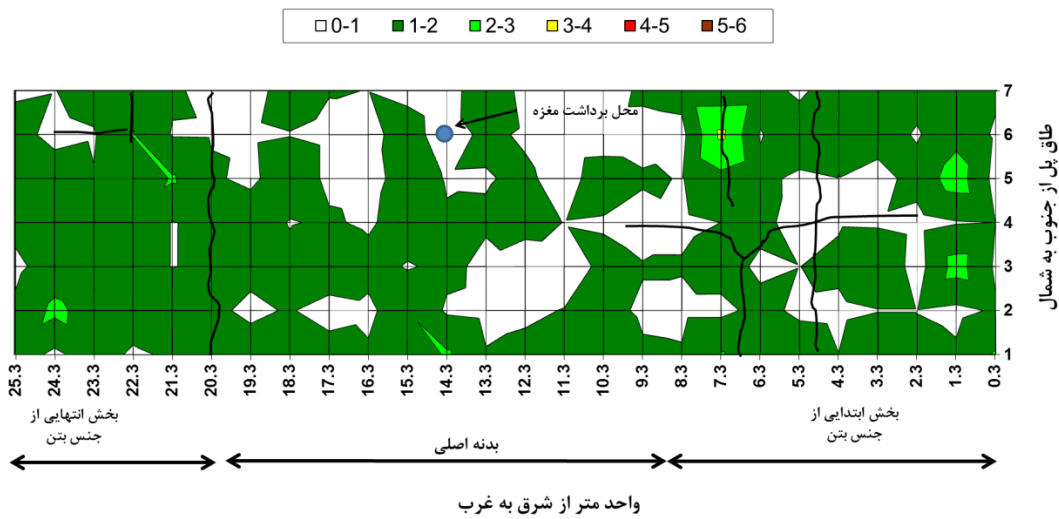


۲۰۱۳/۰۶/۱۸

پل ۲۰۵۲۴

شاخص حفرات

واقع در Skaerup Å



شکل ۵-۱۹: نمودار شاخص حفرات مربوط به پل ۲۰۵۲۴



شکل ۵-۲۰: مغزه‌ی برداشت شده از قوس زیرین پل ۲۰۵۲۴

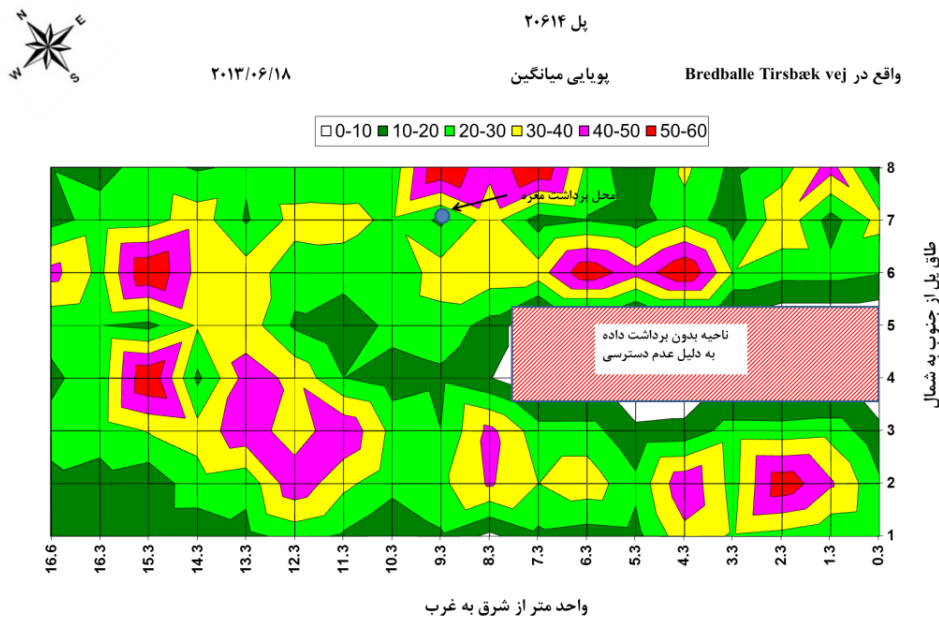
۵-۳-۴- پل ۲۰۶۱۴ واقع در بردبال تیرسباکوی (Bredballe Tirsbækvej)

در این بخش نتایج حاصل از داده‌های آزمون پاسخ ضربه که بر روی پل ۲۰۶۱۴ انجام گرفته است، آمده است. تمامی این پل به طور یکدست آجری می‌باشد و بخش‌های ابتدایی و انتهایی آن متفاوت نیست. شایان ذکر است امکان دسترسی به بخش بالایی انتهای غربی قوس زیرین پل وجود نداشت و در نتیجه در این بخش آزمونی انجام نشد. در مجموع ۱۲۸ آزمون پاسخ ضربه روی این سازه انجام گرفت.



شکل ۵-۲۱: پل ۲۰۶۱۴ واقع در بردبال تیرسباکوی (Bredballe Tirsbækvej)

در شکل ۵-۲۱ نمودار پویایی میانگین مربوط به این پل آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود بخش‌های قرمز رنگ در این نمودار بیشتر به چشم می‌خورد. در واقع این نقاط محل‌هایی هستند که لایه-ی بالایی با لایه‌ی زیرین چسبندگی کمتری دارند و یا به طور کلی دو لایه از هم منفک شده‌اند. در این بخش‌ها یک تا دو سانتی‌متر بیرونی آجرها دچار تورم شده است و تولید قسمتی سفید رنگ (گچک) کرده‌اند. نمونه‌ای از این مورد را در شکل ۵-۲۲ می‌توانید ببینید. همچنین در این بخش‌ها درزها دوباره سیمان‌کاری شده‌اند و یا حتی آجرها تعویض شده‌اند.



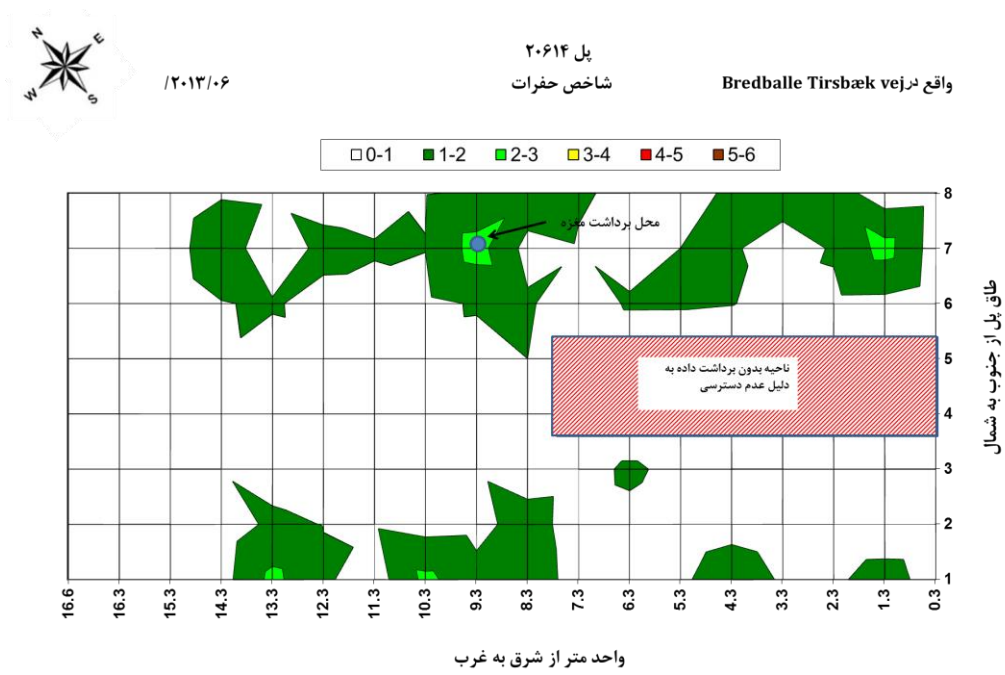
شکل ۵-۲۲: نمودار پویایی میانگین مربوط به پل ۲۰۶۱۴

در شکل ۵-۲۳ هم نمودار مربوط به شاخص حفرات این سازه آورده شده است. از آنچه که از این نمودار بدست می‌آید متوجه می‌شویم که آثاری از آسیب عمقی (پشت لایه‌ی آجری نخست) به چشم نمی‌خورد. محل برداشت مغزه از قوس زیرین پل در نمودارها مشخص شده است. این مغزه از جایی برداشته شده است که در نمودار شاخص حفرات، به عنوان محلی با آسیب احتمالی لایه لایه شدگی مشخص شده است. محل برداشت مغزه به طور عمدی در محلی انتخاب شده است که پیش‌تر ترمیم نشده باشد. همان‌طور که انتظار می‌رفت اثری از آسیب عمقی در مغزه و محل برداشت آن دیده نمی‌شود. به شکل‌های ۵-۲۴ و ۵-۲۵ نگاه کنید.

در این سازه به دلیل تردد بیش از اندازه کامیون‌ها و ماشین‌های کشاورزی شاهد فرسودگی بیشتری در ساختار پل هستیم. به همین دلیل برخی اقدامات ترمیمی به ویژه سیمان‌کاری مجدد درزها و تعویض بعضی از آجرها انجام گرفته است. همچنین شاهد پوسته پوسته شدن در بیرونی‌ترین بخش لایه‌ی آجری هستیم و در این قسمت‌ها گچک‌هایی نیز به وجود آمده که حاکی از وجود نم و رطوبت در سازه است و این خود بزرگ‌ترین مخاطره برای این پل می‌باشد.



شکل ۵-۲۳: نمونه‌ای از یک آجر که بخش خارجی آن دچار تورم شده است. بخش‌های سفید رنگ نشانگر وجود نم و رطوبت در سازه است



شکل ۵-۲۴: نمودار شاخص حفرات مربوط به پل ۲۰۶۱۴



شکل ۵-۲۵: محل مغزه برداشت شده از قوس زیرین پل ۲۰۶۱۴



شکل ۵-۲۶: مغزه برداشت شده از قوس زیرین پل ۲۰۶۱۴

۵-۳-۵ پل ۲۰۶۱۶ واقع در تیرسباک (Tirsbæk)

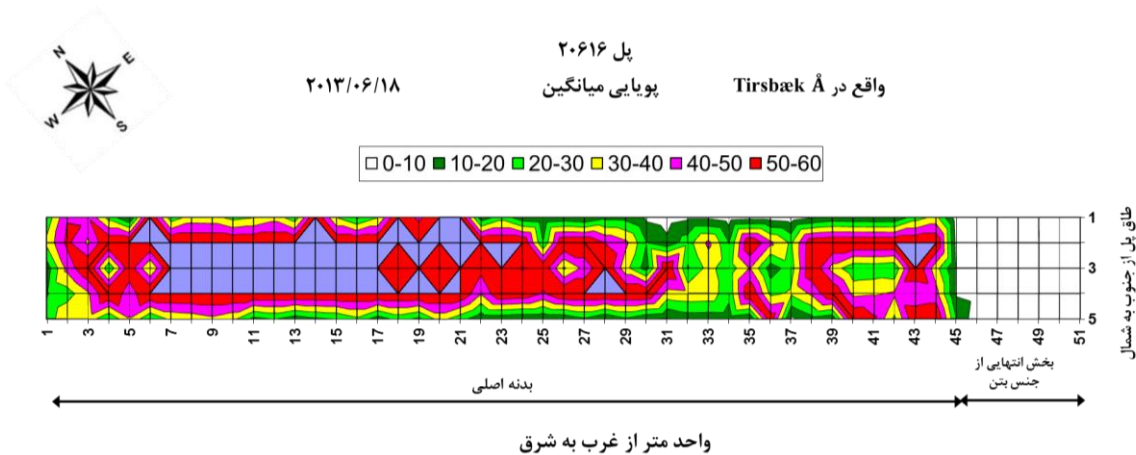
در این بخش نتایج حاصل از انجام آزمون پاسخ ضربه بر روی قوس زیرین پل ۲۰۶۱۶ آمده است. بخش اصلی این پل ساختار آجری دارد و فقط دهانه‌ی غربی آن از جنس بتن است. در مجموع بر روی این سازه در ۲۵۵ نقطه این آزمون انجام گرفت.



شکل ۵-۲۷: پل ۲۰۶۱۶ واقع در تیرسباک (Tirsbæk)

در شکل شماره ۲۷-۵ نمودار مربوط به پویایی میانگین این پل مشاهده می‌شود. در این نمودار تقریباً ۸۰٪ از قوس زیرین پل به رنگ قرمز دیده می‌شود. این در حالی است که تعداد زیادی از اندازه‌گیری‌ها در مقیاسی فراتر از مقیاس معمول انجام شده است. تعداد بالای نقاط برداشت نیز به همین دلیل است. آثار ترمیم در بخش‌های بسیاری از قوس به چشم می‌خورد و در بسیاری از قسمت‌ها چسبندگی لازم بین بین لایه‌ی آجری با لایه‌ی زیرین وجود ندارد. یک نمونه از بخش‌هایی که ترمیم شده‌اند در شکل ۲۸-۵ دیده می‌شود.

لازم به ذکر است که به دلیل نبود نور کافی، امکان بازرسی چشمی به منظور تشخیص آسیب‌های قابل مشاهده فراهم نشد.

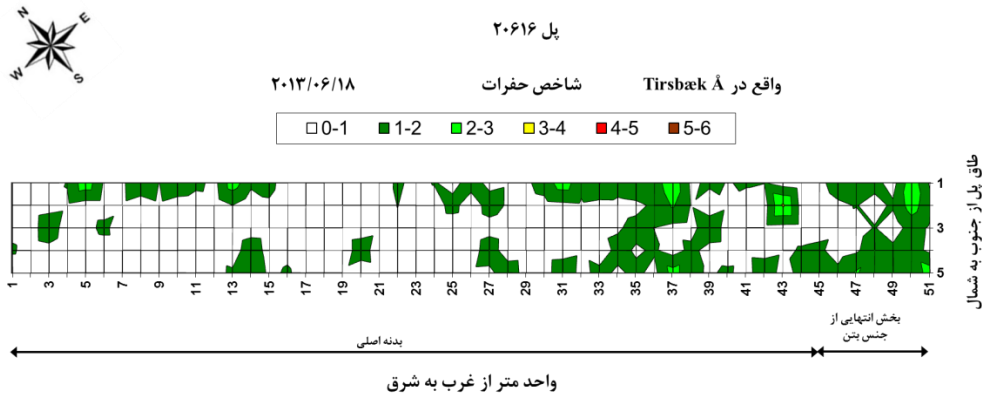


شکل ۵-۲۸: نمودار پویایی میانگین مربوط به پل ۲۰۶۱۶

نمودار شاخص حفرات مربوط به این پل در شکل ۵-۲۹ آورده شده است. همان طور که از این نمودار قابل استنباط است، آثاری از آسیب‌های عمقی در پشت لایه‌ی آجری به چشم نمی‌خورد. با توجه به اینکه کاملاً واضح است که در بیشتر بخش‌های این چسبندگی مناسبی بین لایه‌ی اول و لایه‌ی زیرین وجود ندارد، تصمیم بر آن شد که از این سازه مغزه‌ای برداشت نشود. در نگاه اول به نظر می‌رسد که با توجه به ترمیم‌های صورت گرفته، پل شرایط مناسبی داشته باشد. ولی در واقع چنین نیست و شرایط به‌ویژه در سطح لایه‌ی زیرین به هیچ وجه مناسب نیست.



شکل ۵-۲۹: تصویری از قسمت غربی پل؛ تعداد محل‌های ترمیم شده قابل توجه است



شکل ۵-۳۰: نمودار شاخص حفرات مربوط به پل ۲۰۶۱۶

۵-۳-۶ پل ۲۰۶۷۰ واقع در اولستد او (Ølsted å)

در این قسمت به بررسی داده‌های حاصل از انجام آزمون روی قوس زیرین پل ۲۰۶۷۰ پرداخته شده است. دهانه‌ی این پل در قسمت غربی بتنی بوده و مابقی سازه آجری است. همان گونه که در شکل ۵-۳۰ با پیکان مشکی رنگ مشخص شده است، آزمون روی بخش بالایی قوس به دلیل عدم امکان دسترسی انجام نگرفته است. به طور کلی در ۳۸۴ نقطه از این پل، آزمون پاسخ ضربه انجام گرفته است.



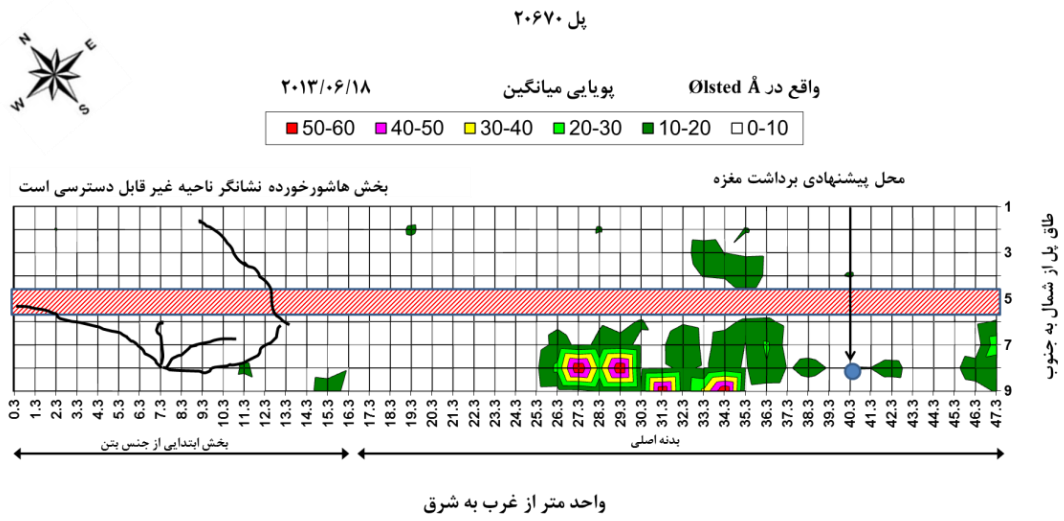
شکل ۵-۳۱: پل ۲۰۶۷۰ واقع در اولتد او (Ølsted å)

نمودار پویایی میانگین مربوط به این سازه در شکل ۵-۳۱ نشان داده شده است. این نمودار نشان می‌دهد که سازه به طور کلی در شرایط مطلوبی به سر می‌برد. فقط در یک ناحیه به نظر می‌رسد که احتمال آسیب در بخش بیرونی قوس وجود داشته باشد. در واقع این ناحیه محلی است که ترمیم در آن صورت گرفته است و به نظر می‌رسد که بخش ترمیمی به خوبی به بخش زیرین خود نچسبیده است. تصویر محل ترمیم شده در شکل ۵-۳۲ آمده است.

نمودار شاخص حفرات این پل هم در شکل ۵-۳۳ آمده است. مطابق آنچه که از این نمودار برمی‌آید تقریباً هیچ آثاری از آسیب‌های عمقی (در لایه‌ی زیرین لایه‌ی آجری) به چشم نمی‌خورد. تنها در دو نقطه (در فاصله تقریبی ۴۰ متر از دهانه‌ی غربی) احتمال ضعیف وجود آسیب عمقی وجود دارد.

برای این پل تصمیم گرفته شد که همزمان با انجام آزمون، مغزه‌ای برداشت نشود؛ چراکه به علت واقع شدن این سازه در میان مزارع ذرت، انتقال تجهیزات حفاری به محل عملاً ممکن نبود. بنابراین برداشت مغزه به بعد از برداشت محصولات مزارع موکول شد.

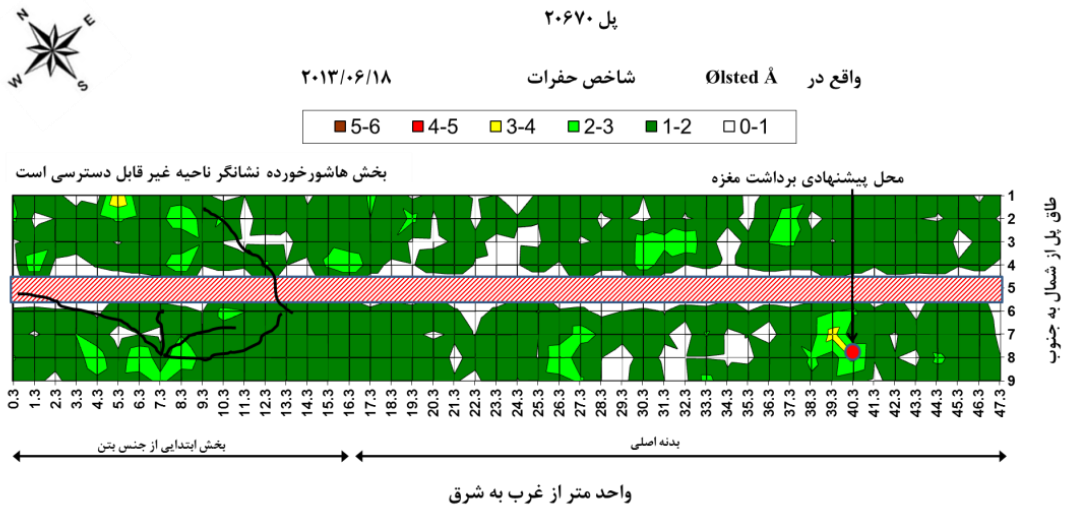
همان‌طور که اشاره شد به طور کلی این سازه در شرایط مطلوبی به سر می‌برد و فقط احتمال لایه‌لایه شدگی در محل ترمیم شده وجود دارد.



شکل ۵-۳۲: نمودار پویایی میانگین مربوط به پل ۲۰۶۷۰



شکل ۵-۳۳: تصویری از قسمت جنوبی سازه که ترمیم شده است



شکل ۵-۳۴: نمودار شاخص حفرات مربوط به پل ۲۰۶۷۰

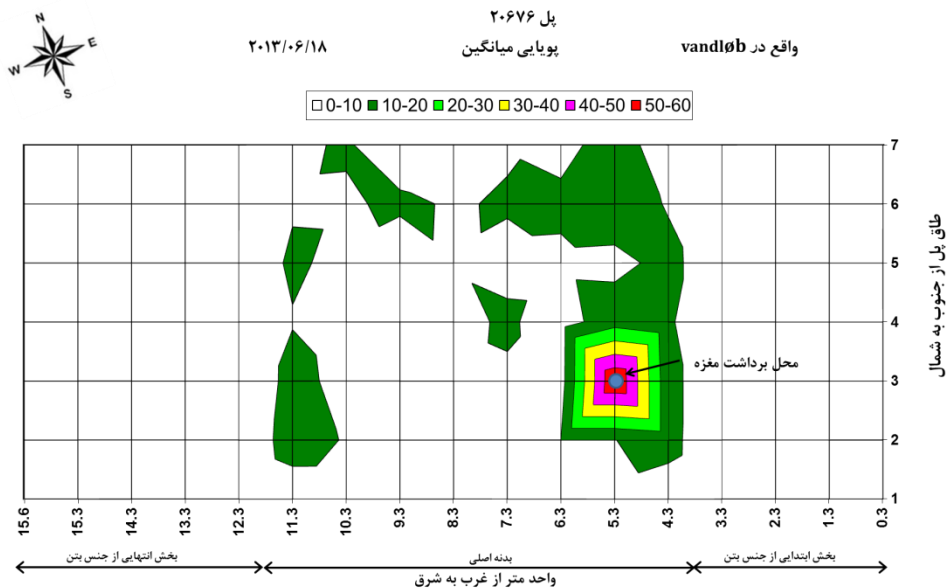
۵-۳-۷ پل ۲۰۶۷۶ واقع در وندلوب (vandløb)

بررسی داده‌های مربوط به انجام آزمون غیرمخرب پاسخ ضربه روی قوس زیر پل ۲۰۶۷۶ در این بخش آمده است. به جز دو بخش ابتدایی و انتهایی قوس که بتنی هستند، مابقی سازه آجری می‌باشد. در مجموع ۱۱۹ نقطه از این پل تحت آزمون قرار گرفته است.



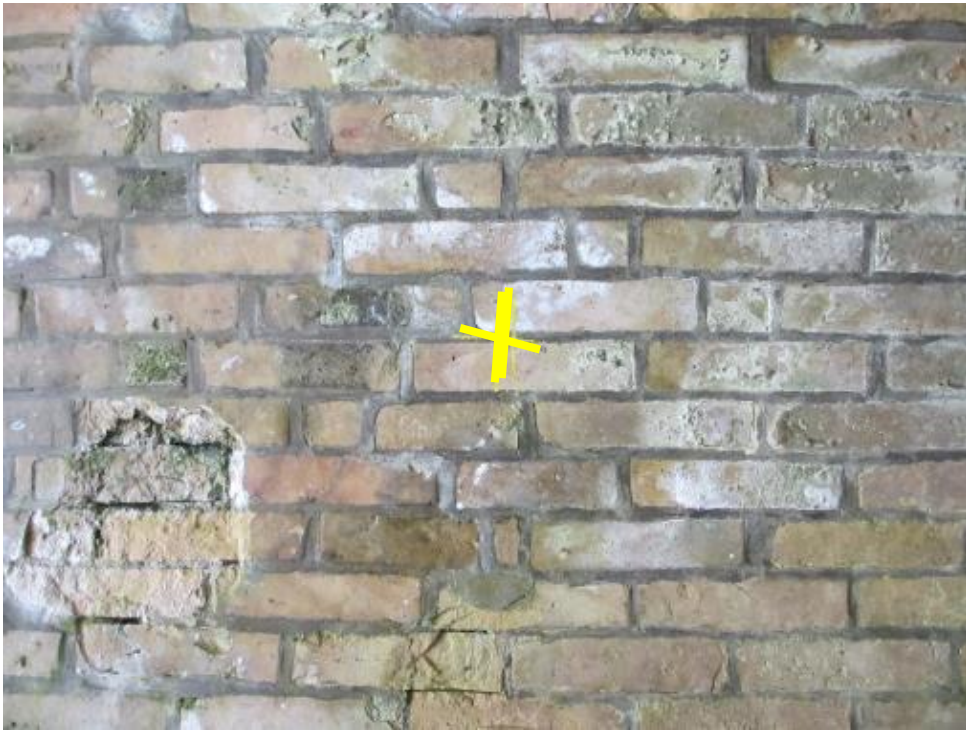
شکل ۵-۳۵: پل ۲۰۶۷۶ واقع در وندلوب (vandløb)

نمودار پویایی میانگین مربوط به این سازه در شکل ۵-۳۵ آورده شده است. به استثنای یک نقطه، آثاری از آسیب در قوس زیرین این پل دیده نمی‌شود. در آن یک نقطه که اتفاقاً آثاری از انجام ترمیمات قبلی نیز در آن به چشم می‌خورد، چسبندگی ضعیف بین لایه‌ی آجری با لایه‌ی زیرین آن آشکار است (شکل ۵-۳۶).

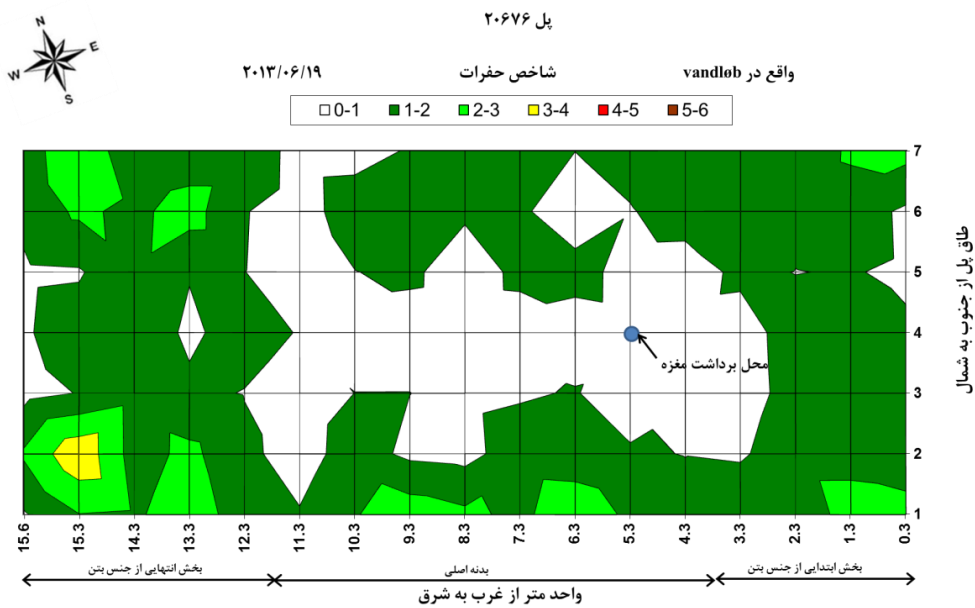


شکل ۵-۳۶: نمودار پویایی میانگین مربوط به پل ۲۰۶۷۶

در شکل ۵-۳۷ نمودار شاخص حفرات مربوط به این پل مشاهده می‌شود. آثاری از آسیب‌های عمقی در لایه‌های زیرین آجری در این نمودار به چشم نمی‌خورد. تنها در دهانه‌ی غربی پل که بتنی هم هست، احتمال ضعیفی از وجود آسیب‌های عمقی هست (ناحیه‌ی زرد رنگ در نمودار). محل برداشت مغزه به منظور اعتبارسنجی داده‌های آزمون بر روی نمودارها مشخص شده است. این محل در جایی انتخاب شده است که مقدار پویایی میانگین در آن نشانگر احتمال بالای آسیب و لایه‌لایه شدگی است. همان‌طور که با مشاهده‌ی مغزه کاملاً مشخص است، قسمت‌های سفید رنگ در محل اتصال نشان دهنده‌ی چسبندگی ضعیف در آن بخش‌هاست. تصویر مغزه در شکل ۵-۳۸ آورده شده است.



شکل ۵-۳۷: تصویری از محل انتخاب شده جهت برداشت مغزه؛ عملیات ترمیمی قبلاً در این ناحیه (به ویژه در سمت راست علامت زرد رنگ) انجام گرفته است.



شکل ۵-۳۸: نمودار شاخص حفرات مربوط به پیل ۲۰۶۷۶

این سازه به طور کلی شرایط خوبی دارد و به استثنای یک نقطه که قبلاً هم مورد ترمیم قرار گرفته است، آثاری از آسیب در بدنه‌ی این سازه وجود ندارد.



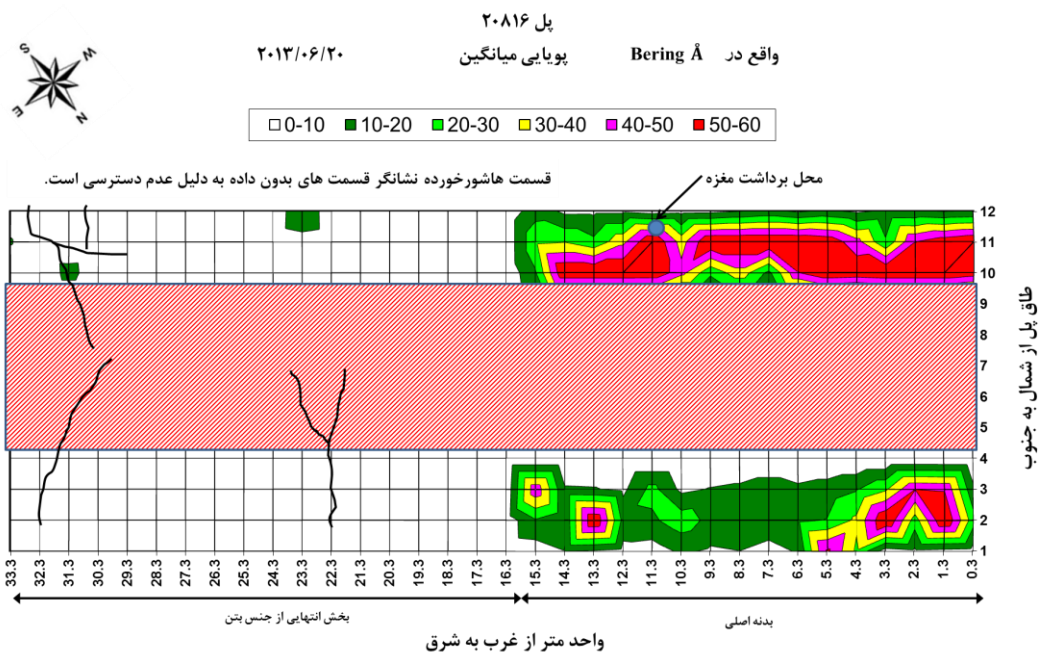
شکل ۵-۳۹: مغزه‌ی گرفته شده از قوس زیرین پل ۲۰۶۷۶؛ قسمت‌های سفید رنگ نشان‌گر عدم اتصال مناسب و وجود خلل و فرج در مواد به کار برده شده است

۵-۳-۸ پل ۲۰۸۱۶ واقع در برینگ او (Bering å)

در این بخش نتایج حاصل از بررسی داده‌های آزمون پاسخ ضربه بر روی قوس زیرین پل ۲۰۸۱۶ آورده شده است. قسمت‌های ابتدایی و انتهایی این سازه بتنی بوده و در قسمت میانی از سنگ برای پوشاندن دیوار استفاده شده است. به دلیل عدم امکان دسترسی و شرایط ویژه‌ی ارتفاعی، به طور تقریبی فقط نیمی از قوس تحت آزمون قرار گرفته است. در مجموع در ۲۰۴ نقطه از این سازه آزمون انجام شده است. در شکل ۵-۴۰ نمودار پویایی میانگین مربوط به این پل نشان داده شده است. بیشتر نقاط قرمز رنگ در قسمت جنوب غربی نمودار واقع شده است. در واقع این بخش‌ها نقاطی هستند که در آنها لایه‌ی خارجی (لایه‌ی سنگی) چسبندگی مطلوبی با لایه‌ی زیرین خود ندارند. در اکثر این نواحی دیوار پولیش‌کاری و رنگ‌آمیزی شده است و در نقاط محدودی می‌توان نشانه‌ای از ترمیم پیدا کرد. به عبارت دیگر آثار واضحی از آسیب در بدنه‌ی سازه به چشم نمی‌خورد. در شکل ۵-۴۱ محل برداشت مغزه نشان داده شده است.



شکل ۵-۴۰: پل ۲۰۸۱۶ واقع در برینگ او (Bering å)



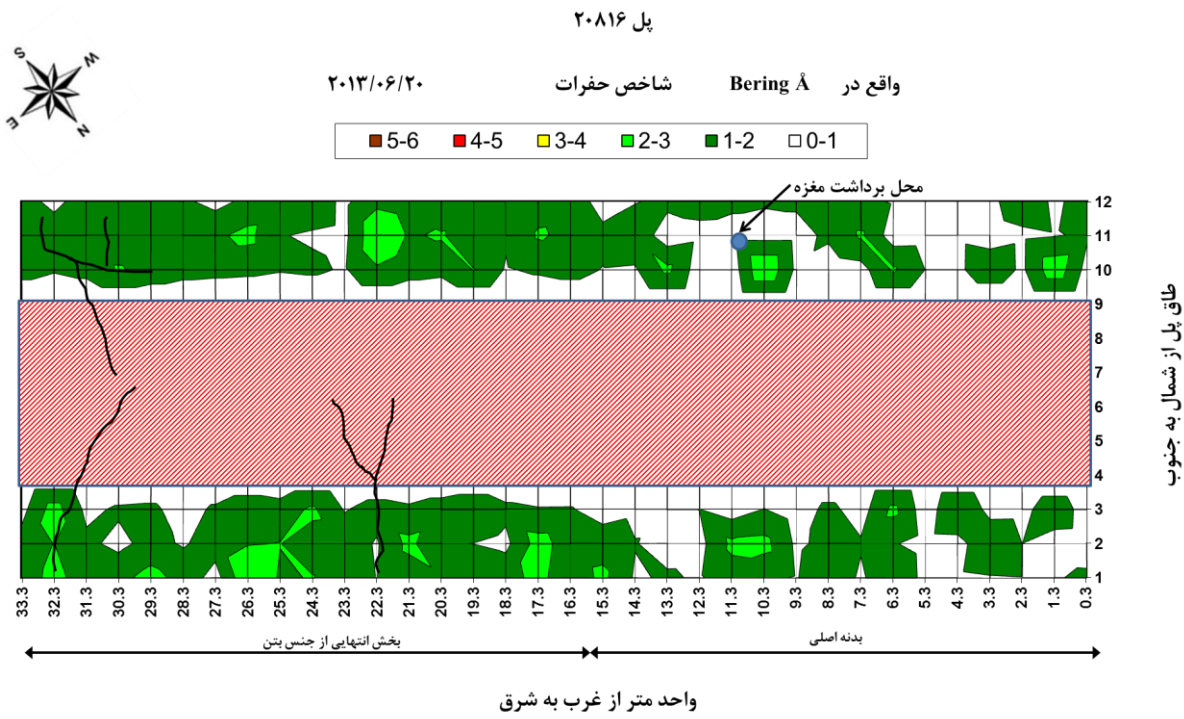
شکل ۵-۴۱: نمودار یویایی میانگین مربوط به پل ۲۰۸۱۶

نمودار شاخص حفرات در شکل ۵-۴۲ آمده است. مشاهده می‌شود که آثاری از آسیب عمقی در این سازه وجود ندارد.

محل برداشت مغزه روی نمودارها مشخص شده است. این محل در جایی انتخاب شده است که مقدار پویایی میانگین حاکی از احتمال لایه‌لایه شدگی در آن نقطه است. این محل به طور عمدی در جایی انتخاب شده است که قبلاً تعمیراتی در آن نقطه صورت گرفته است. محل اتصال در این مغزه به طور کامل پر نشده است و آثاری از تخریب در بخش سنگی به چشم می‌خورد (شکل ۵-۴۳).



شکل ۵-۴۲: محل برداشت مغزه در دیواره‌ی سازه؛ سطح خارجی دیواره پولیش داده شده است



شکل ۵-۴۳: نمودار شاخص حفرات مربوط به پل ۲۰۸۱۶



شکل ۵-۴۴: مغزه‌ای برداشت شده از قوس زیرین پل ۲۰۸۱۶

۴-۵ خلاصه‌ی مطالعات

در مجموع می‌توان نتیجه گرفت که نتایجی که از تفسیر داده‌های مربوط به انجام آزمون غیرمخرب پاسخ ضربه به دست آمده است، دید خوبی از شرایط واقعی داخل سازه ارائه می‌دهد. این امر توسط مغزه‌هایی که از سازه‌ها گرفته شده‌اند قابل تأیید است.

در نگاه اول و با بررسی چشمی پل‌ها مشاهده می‌شود که شرایط نسبتاً مساعدی بر سازه‌ها حاکم است. این در حالی است که نتایج آزمون‌ها از آسیب‌هایی حکایت دارد که در لایه‌های زیرین به وجود آمده‌اند و به صورت چشمی قابل تشخیص نیستند. بنابراین ترکیبی از بررسی‌های چشمی و آزمون غیرمخرب می‌تواند چشم‌انداز مناسبی از شرایط واقعی سازه را ارائه کند.

شرایط در هر یک از پل‌ها بسیار متفاوت و متغیر است. نکته‌ای که بسیار حائز اهمیت است این است که قسمت‌هایی که قبلاً ترمیم شده‌اند، اغلب چسبندگی قابل قبولی با لایه‌ی زیرین خود پیدا نکرده‌اند. معمولاً آسیب ظاهری در این بخش‌ها به چشم نمی‌خورد در حالی که در محل اتصال به لایه‌ی زیرین دچار مشکل هستند. اگر آب به این بخش‌ها راه پیدا کند، احتمال به وجود آمدن آسیب‌های جدی‌تر در زیر لایه‌ی ترمیم شده افزایش خواهد یافت. وجود مواد سفید رنگی (گچک) روی سنگ‌ها و آثار دیگری در برخی از پل‌ها نشان دهنده‌ی وجود رطوبت در آن سازه‌هاست.

جدول ۴-۵ خلاصه‌ای از شرایط کلی هر پل را به اختصار بیان می‌کند.

جدول ۵-۲: خلاصه نتایج مطالعات انجام گرفته روی هر پل

شماره پل	واقع در	برآورد شرایط
۲۰۵۰۸	Spang Å	سازه به طوره کلی در نقاطی که آزمون انجام شده است شرایط مطلوبی دارد و آثاری از آسیب در آن دیده نمی‌شود. تفاوتی بین شرایط بدنه‌ی اصلی سازه و بخش‌های ابتدایی و انتهایی وجود ندارد.
۲۰۵۱۶	Brøndsted Møllevvej	سازه در بخش‌های ابتدایی و انتهایی شرایط مناسبی دارد. در بخش اصلی و در قسمت‌هایی که قبلاً ترمیم شده‌اند چسبندگی کمی بین لایه‌ی آجری و لایه‌ی زیرین وجود دارد. در گوشه‌ی جنوب شرقی سازه احتمال آسیب‌های جدی در آینده وجود دارد و مغزه‌ی برداشت شده از آن به علت وجود ترک‌های موازی و همچنین وجود رطوبت این موضوع را تایید می‌کند.
۲۰۵۲۴	Skærup Å	شرایط عمومی سازه شرایط مطلوبی است. تنها آثاری از آسیب در دهانه‌ی اصلی طاق وجود دارد که پیش‌تر ترمیم شده است. به نظر می‌رسد که عمق این آسیب بعد از لایه‌ی آجری دوم باشد.
۲۰۶۱۴	Bredballe Tirsbækvej	این سازه به دلیل بارگذاری بیش از حد که به خاطر عبور و مرور زیاد کامیون‌ها و ماشین‌های سنگین کشاورزی ایجاد شده است، آسیب‌های قابل توجهی دیده است. به همین علت در محل‌های زیادی به صورت جزئی تعمیرات صورت گرفته و حتی آجرها تعویض شده‌اند. تقریباً در همه‌ی این مکان‌ها چسبندگی مناسبی با لایه‌ی زیرین وجود ندارد. عمق آسیب‌ها در بین دو لایه‌ی آجری برآورد می‌شود. با توجه به مواد سفیدرنگ ایجاد شده در لایه‌ی آجری می‌توان گفت که رطوبت قابل توجهی به سازه نفوذ کرده است و این امر احتمال آسیب‌های بعدی افزایش می‌دهد.
۲۰۶۱۶	Tirsbæk	در نقاط متعددی از این سازه قبلاً ترمیم صورت گرفته است. این ترمیم‌ها در بعضی نقاط با تعویض آجرها و در بعضی نقاط به وسیله‌ی بتن انجام شده است. در این مورد هم محل‌های ترمیم شده در ظاهر حالت عادی و حتی خوب دارند در صورتی که در چسبندگی با لایه‌ی زیرین دچار مشکل هستند.
۲۰۶۷۰	Ølsted Å	به طور کلی سازه در شرایط مطلوبی به سر می‌برد و فقط پدیده‌ی لایه‌لایه شدگی در بخش تعمیر شده احتمال می‌رود. عمق این آسیب هم بین دو لایه‌ی ابتدایی است.
۲۰۶۷۶	vandløb	شرایط عمومی سازه شرایط قابل قبولی است و به استثنای یک نقطه، آثار آسیب در هیچ کجای بدنه به چشم نمی‌خورد. این نقطه هم مکانی است که پیش‌تر در آن ترمیم صورت گرفته است. عمق آسیب در این مورد هم بعد از لایه‌ی آجری اول تخمین زده می‌شود.
۲۰۸۱۶	Bering Å	در این سازه به دلیل شرایط ویژه‌ی ارتفاعی حدود پنجاه درصد از سازه تحت آزمون قرار نگرفت. در بخش جنوبی سازه شرایط کمی نامساعد است به طوری که چسبندگی قابل قبولی بین لایه‌ی سنگی و بخش زیرین آن وجود ندارد. در بسیاری از این بخش دیوار رنگ‌آمیزی شده و آثار تعمیرات قبلی به درستی قابل تشخیص نیست. همچنین به دلیل پولیش‌کاری صورت گرفته نشانه‌ای از آسیب‌های سطحی را هم نمی‌توان یافت. بخشی که احتمال می‌رود لایه‌لایه شده باشد (چسبندگی مناسبی با لایه‌ی زیرین خود نداشته باشد) در سمت جنوب غربی سازه می‌باشد.

فصل ششم:

نتیجه گیری

۶-۱ جمع‌بندی

در این پایان‌نامه روش پاسخ ضربه به عنوان روشی غیرمخرب برای ارزیابی کیفیت و پیوستگی سازه‌های بتنی معرفی شده است. در این روش یک موج تنشی - که از اصابت ضربه یک چکش ایجاد می‌شود - به درون سازه بتنی ارسال می‌شود و به وسیله یک ژئوفون سرعت‌نگار در سطح سازه دریافت می‌شود. داده مربوط به فرستنده، مقدار نیروی وارد شده به سطح سازه توسط چکش در واحد زمان است. همچنین داده مربوط به گیرنده، مقدار سرعت ثبت شده توسط ژئوفون در واحد زمان می‌باشد. در مرحله بعد داده‌ها پردازش می‌شوند. فرآیند پردازش به این صورت است که ابتدا با استفاده از الگوریتم تبدیل فوریه سریع، داده‌های مربوط به فرستنده و گیرنده به حوزه فرکانس منتقل می‌شوند. سپس با تقسیم طیف سرعت بر طیف نیرو، نمودار پویایی بر حسب فرکانس به دست می‌آید. در ادامه پارامترهایی با تعاریف مشخص از این نمودار استخراج می‌شود. این پارامترها برای هر نقطه‌ای که آزمون در آن نقطه انجام گرفته است به صورت جداگانه به دست می‌آیند. با توجه به این که پیش از آغاز فرآیند ارزیابی و انجام آزمون‌ها، در سازه شبکه‌بندی صورت می‌گیرد و در هر نقطه (گره) از شبکه، آزمون پاسخ ضربه انجام می‌شود، در نتیجه برای هر نقطه از شبکه پارامترهای به دست آمده از نمودار پویایی میانگین را خواهیم داشت. به این ترتیب می‌توان برای هر یک از این پارامترها، یک نمودار کنتوری رسم کرد. در واقع با تفسیر این نمودارهای کنتوری می‌توان شرایط سازه را از نظر کیفیت و پیوستگی ارزیابی کرد.

۶-۲ نتیجه‌گیری

یکی از مزایای روشن و بارز استفاده از آزمون‌های غیر مخرب، آشکارسازی عیوبی است که عدم شناسایی آنها می‌تواند شکست فاجعه بار سازه و در نتیجه زیان‌های مالی و احتمالاً جانی بسیار زیادی به بار آورد. البته به کارگیری این روش‌های بازرسی به دلایل دیگری نیز سودمند می‌باشد. انجام آزمون‌های کنترلی علاوه بر اینکه از اهمیت بسیاری برخوردار است، هزینه‌های قابل توجهی را هم در پی دارند. استفاده از آزمون‌های غیرمخرب، استانداردهای جدیدی را در این فرایند به مهندسين معرفی کرده است که علاوه بر کنترل هزینه‌ها، زمان انجام فرایند را نیز مقدار چشمگیری کاهش داده است. هرچند نتایج این آزمون‌ها باید اعتبار سنجی شوند تا بتوان به آنها اتکا کرد. آزمون «پاسخ ضربه» یکی از این آزمون‌هاست.

در این پایان‌نامه با ارائه چند مثال عملی، در حقیقت اعتبار نتایج این آزمون به عنوان یک روش جایگزین برای روش‌های پرهزینه و زمان‌بر ثابت شده است و روش پاسخ‌ضربه به عنوان یک روش کاملاً اقتصادی و سریع در این راستا معرفی شده است.

نگارنده امیدوار است به زودی با تهیه تجهیزات این آزمون، شاهد انجام آن در سایت‌های عمرانی کشور باشیم و فرایندهای کنترلی در فعالیتهای عمرانی را با به کارگیری این روش اصلاح کنیم.

۳-۶ پیشنهادها

همواره ورود به عرصه‌های جدید پژوهش با چالش‌هایی همراه خواهد بود. این آزمون غیرمخرب علی‌رغم این‌که در دنیا موضوع چندان جدیدی به شمار نمی‌رود، در کشور ما موضوعی کاملاً جدید است. با توجه به این امر، پژوهش در این باب برای نخستین بار بدون شک با کاستی‌هایی همراه می‌باشد. برای به انجام رساندن این پایان‌نامه تلاش شد که تجهیزات این آزمون در کشور ساخته شود و با استفاده از این تجهیزات برداشت داده صورت پذیرد. برای این کار تلاش‌های بسیاری صورت گرفت و تا حدودی هم پیشرفت حاصل شد. ولی متأسفانه به دلایلی تکمیل این فرایند ممکن نشد.

به منظور تکمیل این پروژه، پیشنهاد می‌شود که تجهیزات مربوط به این آزمون در کشور ساخته شود تا با معرفی این آزمون به بخش عمران کشور، گام مهمی در راستای پیشرفت فرایندهای کنترلی برداشته شود.

پيوسٽ ۱

تصاویر

پل ۲۰۵۰۸ واقع در Spang å



۲- نمای شرقی



۱- حدفاصل بین بخش ابتدایی و بدنه‌ی اصلی سازه



۴- در میانه‌ی سازه یک ترک بزرگ مشهود است که تا وسط طاق پیش‌روی کرده است



۳- ترک ترمیم شده است ولی هنوز آثاری از آسیب به چشم می‌خورد



۵- سازه به طور کلی شرایط مناسبی دارد

پل ۲۰۵۱۶ واقع در Brøndsted Møllevej



۲- نمای شرقی



۱- نمای غربی



۴- طاق سازه



۳- حدفاصل بخش ابتدایی سازه با بدنه اصلی؛ یک ترک در طاق بدنه اصلی به فاصله‌ی حدود ۲۰ سانتی‌متر از دهانه‌ی قدیمی به چشم می‌خورد



۶- نمونه‌ای از بخش‌های ترمیم شده؛ این بخش‌ها چسبندگی خوبی با لایه‌ی زیرین ندارند



۵- گوشه‌ی جنوب شرقی سازه که نم و رطوبت در آن مشاهده شد

پل ۲۰۵۲۴ واقع در Skærup Å



۲- نمای شرقی



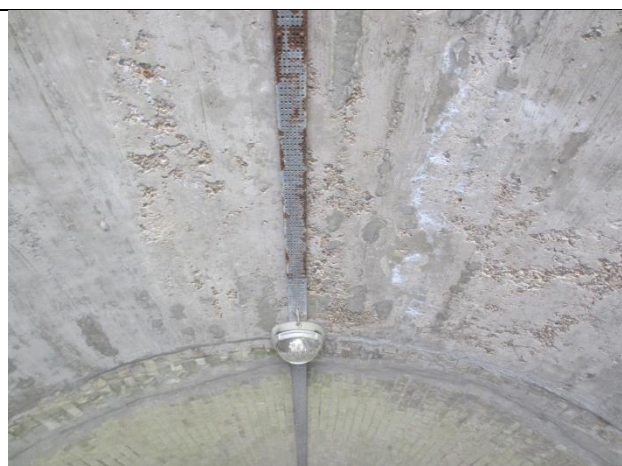
۱- نمای غربی



۴- بدنه‌ی اصلی سازه؛ سمت راست (قسمت مشخص شده) ترمیم شده است



۳- دیواره‌ی شمالی سازه؛ نفوذ آب به سازه در این قسمت مشاهده می‌شود



۶- دهانه‌ی غربی پل؛ مواد سفید رنگ در ترک ایجاد شده نشان دهنده‌ی نفوذ آب است



۵- انتهای غربی پل؛ لایه لایه شدگی در این بخش ایجاد شده است

پل ۲۰۶۱۴ واقع در Bredballe Tirsbækvej



۲- دهانه‌ی شرقی



۱- طاق سازه



۴- طاق سازه در انتهای غربی



۳- مواد سفید رنگ به وجود آمده نشان دهنده‌ی نفوذ رطوبت است



۶- مواد سفید ایجاد شده در بندها = رطوبت و نم



۵- ترک نسبتاً بزرگ که در فاصله‌ی ۸ متری دهانه‌ی شرقی ایجاد شده است

پل ۲۰۶۱۶ واقع در Tirsbæk



۲- نمای غربی



۱- نمای شرقی



۴- انتهای غربی سازه؛ تعداد زیادی نقاط ترمیم شده که به تازگی ترمیم شده اند



۳- بخش میانی؛ ترمیم‌های قدیمی تر و لکه گیری با بتن در این بخش مشاهده می‌شود



۶- انتهای شرقی



۵- بخش ابتدایی شرقی که بتنی است

پل ۲۰۶۷۰ واقع در Ølsted å



۲- دهانه‌ی غربی



۱- دهانه‌ی شرقی



۴- طاق بخش ابتدایی غربی که از جنس بتن است؛ ترک و رطوبت به وجود آمده در آن در تصویر دیده می‌شود



۳- انتهای شرقی سازه؛ رطوبت در دیواره‌ها و حتی تا سقف هم نفوذ کرده است



۶- وضعیت بسیار نامناسب سازه در این محل مشاهده می‌شود



۵- ترمیم‌های ایجاد شده در دیواره‌ی جنوبی

پل ۲۰۶۷۶ واقع در vandløb



۲- نمای شرقی



۱- بخش ابتدایی شرقی از جنس بتن



۴- بدنه‌ی اصلی با ترمیم‌های جزئی



۳- نفوذ رطوبت در برخی قسمت‌ها به‌ویژه در انتهای شرقی



۶- طاق سازه؛ بخش‌هایی به صورت محلی ترمیم شده‌اند



۵- بخش ابتدایی غربی از جنس بتن

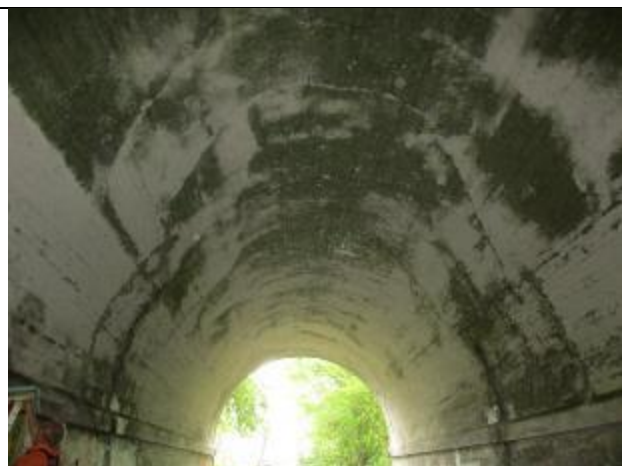
پل ۲۰۸۱۶ واقع در Bering å



۲- نمای غربی؛ تقریباً دو متر ابتدایی از جنس بتن است



۱- نمای شرقی؛ بخش انتهایی از جنس بتن



۴- طاق بخش انتهایی شرقی؛ ترک‌هایی در این بخش قابل مشاهده است



۳- تقریباً در فاصله ۲۳ متری از دهانه‌ی غربی ترک ترمیم شده‌ای دیده می‌شود



۶- نمای شرقی - غربی سازه؛ نفوذ آب در سقف و دیواره به چشم می‌خورد



۵- انتهای شرقی پل؛ ترک نسبتاً بزرگی در فاصله‌ی حدود ۲ متری از انتها مشاهده می‌شود

پیوست ۲

بخشی از داده‌ها

در این بخش داده‌های مربوط به دو شاخصه «پویایی میانگین» و «نسبت حفرات» که مربوط به پیل ۲۰۵۰۸ می‌باشد آورده شده است.

Average Mobility										
0.2	1.4	2.6	3.8	5.0	6.2	7.4	8.6	9.8	11.0	12.2
3.936945	2.97171	2.037192	3.1952	6.139326	4.844428	5.605612	4.655399	4.072105	5.200306	3.7718
4.950049	3.085584	2.976887	1.805707	11.56997	7.027768	7.749431	8.127882	9.203247	5.095572	6.130371
3.779941	3.485678	1.976933	1.788388	22.6376	6.079695	4.644554	5.385085	4.883174	4.322705	8.871887
4.534589	2.253916	2.533657	5.270325	8.249699	4.891942	4.597697	5.845369	7.583051	5.075849	8.002316
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3.000057	1.856481	2.809142	1.968407	7.539637	6.683193	4.431949	9.542122	6.062263	6.208531	6.727046
3.405159	3.101476	2.181155	1.683359	5.790855	5.030055	4.792106	5.511405	5.732944	6.906108	5.282846
4.378014	2.782299	2.71048	2.874733	16.50573	9.422087	13.13796	7.797274	9.45519	7.283588	6.482462
4.260663	3.462669	3.100619	3.256881	6.241885	6.418663	7.223162	4.941562	7.940736	6.132427	3.475167
Voids Index										
0.2	1.4	2.6	3.8	5.0	6.2	7.4	8.6	9.8	11.0	12.2
1.114	1.044	1.042	1.796	2.647	1.141	0.667	0.801	1.546	1.186	0.973
1.324	1.148	1.279	1.086	0.838	0.815	0.755	0.985	0.687	0.542	1.129
1.114	1.725	1.394	1.244	0.6	0.756	1.002	1.214	0.882	1.017	1.265
1.058	0.862	0.547	1.581	0.629	1.253	1.442	1.632	1	0.9	2.625
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1.267	0.855	1.031	0.723	0.955	1.378	1.37	1.802	1.139	1.005	1.31
0.938	1.139	1.345	1.289	1.959	0.895	1.56	1.178	0.635	0.787	0.727
1.765	0.905	1.252	1.262	1.077	1.032	0.918	1.014	0.675	1.507	2.276
1.526	1.534	0.795	0.818	1.267	0.989	0.948	1.072	0.809	0.827	1.529

Average Mobility								
13.4	14.6	15.8	17.0	18.2	19.4	20.6	21.8	22.8
6.569788	4.761955	4.996138	5.495518	3.327266	5.468994	3.103566	5.856312	6.221679
6.034156	5.989459	7.137808	6.584176	10.09224	7.109457	8.673961	9.122269	18.20072
5.055047	6.48468	4.466813	5.167434	5.419403	4.371702	6.914316	6.873622	21.8026
8.275647	5.966059	3.658762	6.789545	5.023327	5.764942	5.084524	5.286259	16.95734
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
12.08863	0	0	0	0	0	0	0	0
3.841428	4.812769	4.142631	6.564387	5.299138	4.829539	4.964574	7.431972	23.07463
6.996325	7.580207	9.696571	6.755227	7.291016	6.59113	7.092731	9.106424	11.79674
6.088892	8.047009	7.374881	6.924766	6.657241	5.525463	5.419035	4.89566	8.923531
Voids Index								
13.4	14.6	15.8	17.0	18.2	19.4	20.6	21.8	22.8
0.828	2.385	2.054	1.578	1.44	0.883	1.024	0.808	0.726
0.808	1.922	0.82	1.104	1.234	0.824	0.741	1.175	0.338
1.346	0.841	1.093	1.218	1.491	0.589	1.011	1.169	0.606
0.916	0.529	0.755	1.477	0.67	1.201	1.092	0.956	0.348
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
1.601	0	0	0	0	0	0	0	0
1.245	0.644	1.219	1.207	0.826	0.853	1.137	0.98	0.531
1.179	1.154	1.414	1.802	0.588	1.292	0.67	0.759	0.556
1.622	1.16	0.859	0.607	0.918	0.878	1.385	1.17	1.491

مراجع

۱. تجری م، (۱۳۸۵)، پایان نامه کارشناسی ارشد: " بررسی خواص بتن سخت شده با استفاده از روش Impact-Echo به عنوان یک روش غیر مخرب"، دانشکده عمران، دانشگاه تهران.
2. Davis, A. and S. Robertson, *Economic pile testing*. Ground Engineering, 1975. **8**(3).
3. Davis, A. and S. Robertson, *Vibration testing of piles*. J. Struct. Eng, 1976. **54**(6): p. A7-A10.
4. Reiding, F., P. Middendorp, and P. Van Brederode. *A digital approach to sonic pile testing*. in *Proceedings of the Second International Conference of the Application of Stress Wave Theory on Piles*. 1984.
5. van Weele, A., P. Middendorp, and F. Reiding. *Detection of pile defects with digital integrity testing equipment: Proc Int Conference on Foundations and Tunnels, London 24–26 March 1987V1, P235–240*. Publ Edinburgh: Engineering Technics Press, 1987. in *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*. 1989. Pergamon.
6. Hertlein, B. and A. Davis, *Nondestructive testing of deep foundations*. 2007: John Wiley & Sons.
7. Briard, M., *Controle des pieux par la methode des vibrations*. Annls Inst. Tech. Batim., 23rd, 1970(270): p. 105-107.
8. Davis, A.G. and C. Dunn. *FROM THEORY TO FIELD EXPERIENCE WITH THE NON-DESTRUCTIVE VIBRATION TESTING OF PILES*. in *ICE Proceedings*. 1974. Thomas Telford.
9. Davis, A. *The Nondestructive Testing of Piles by Mechanical Impedance*. in *Proc. mt. Conf Soil Mech. & Found. Engng., Stockholm*. 1981.
10. Higgs, J. and S.A. Robertson, *Integrity testing of concrete piles by shock method*. Concrete, 1979. **13**(10).
11. Stain, R.T. and A.G. Davis. *Nondestructive Testing of Bored Concrete Piles – Some Case Histories*. in *First International Conference on Nondestructive Testing*. 1983. London, UK.
12. Swann, L.H. *The Use of Vibration Testing for the Quality Control of Driven Cast in-situ Piles*. in *the International Conference on Nondestructive Testing*. 1983. London, UK.
13. Bracewell, R.N., *Fourier transform and its applications*. 1986, McGraw Hill: New York, NY, USA.
14. Ellway, K. *Practical guidance on the use of integrity tests for the quality control of cast-in-situ piles: Proc Int Conference on Foundations and Tunnels, London, 24–26 March 1987V1, P228–234*. Publ Edinburgh: Engineering Technics Press, 1987. in *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*. 1989. Pergamon.
15. Olson, L.D. and C.C. Wright. *Nondestructive testing of deep foundations with sonic methods*. in *Foundation Engineering@ sCurrent Principles and Practices*. 1989. ASCE.

16. Davis, A.G., *Evaluation of deep foundations beneath buildings damaged during the 1994 Northridge earthquake*. ACI Special Publication, 1997. **168**.
17. Davis, A.G. and B.H. Hertlein, *DEVELOPMENT OF NONDESTRUCTIVE SMALL-STRAIN METHODS FOR TESTING DEEP FOUNDATIONS: A REVIEW*. Transportation Research Record, 1991(1331).
18. Baker, C.N., *Drilled shafts for bridge foundations*. 1993: Federal Highway Administration.
۱۹. قنواتیان م، حسینی نژاد م، (۱۳۹۰)، "تحلیل رفتار و کنترل سلامت شمع‌های بتنی در جاریز با استفاده از نتایج آزمایش PIT بر مبنای استاندارد ASTM D5882"، کنفرانس ملی توسعه پایدار و عمران شهری، تهران.
20. Rybak, J., U. Sadowski, and K. Schabowicz, *NON-DESTRUCTIVE IMPULSE RESPONSE S'MASH METHOD FOR CONCRETE PILE TESTING*, in *mezinárodní konference DEFEKTOSKOPIE 2008*. 2009: Brno.
21. Clausen, J.S. and A. Knudsen, *Nondestructive Testing of Bridge Decks and Tunnel Linings Using Impulse-Response*. ACI Special Publication, 2009. **261**.
22. Davis, A.G., M.K. Lim, and C.G. Petersen, *Rapid and economical evaluation of concrete tunnel linings with impulse response and impulse radar non-destructive methods*. NDT & E International, 2005. **38**(3): p. 181-186.

Abstract

Non-destructive testing (NDT) is a wide group of analysis techniques used in science and industry to evaluate the properties of a material, component or system without causing damage. Nowadays, Non-destructive tests play an important role in many industries. For example evaluating the safety of air craft, vehicles, trains, pipe lines, bridges and other structures, powerhouses, Refineries, oil platforms and many other examples is done with NDT. Indeed, we can say that NDT is a quality control instrument.

The destructive methods which are used to evaluate the quality and integrity of concrete structures are almost costly and doing them spends much time. In addition, the result of the test couldn't be generalized for the all of structure. But by using impulse response method, which is a non-destructive method, we can reduce costs, reduce spending time and also do it for the all-over of the structure.

Non-destructive tests are so diverse and are in depended to physical properties and conditions of the under test material. This test that is an in situ test has a seismic base. In this test, a low-strain impact sends stress waves through the pile. The impactor is usually a 1-kg sledgehammer with a built-in load cell in the hammerhead. According to the elastic properties of the under test element, we can impact a strike with a pressure varying between 5 to 50 MPa. Response to the input stress is normally measured using a velocity transducer (geophone). After data acquisition, we should process the data and finally we should obtain counter graphs and by interpreting them, we can estimate the conditions of the under test structure.

In this thesis, we have studied the bridge arches of a part of the Denmark's railway network as the case study. These arches are usually constructed by bricks and we have evaluated the support of brick layers using impulse response method. The obtained results from this test, according to the terms of the drilled cores, shows that Impulse response non-destructive test has a good performance and its results are completely reliable.



Shahrood University of Technology

Faculty of mining, petroleum and Geophysics Engineering

Evaluation of quality and integrity of concrete structures using “impulse response” non-destructive method – case study: the bridges of a part of Denmark’s railway network

Amir Shahmiri

Supervisors:

Dr. Mehrdad Soleymani

Dr. Farhang Sereshki

June 2014