بسم الله الرحمن الرحیم

دانشکده مهندسی عمران

پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی راه و ترابری

مطالعه شکل‌گیری و توسعه ترکهای موئی در آسفالت با استفاده ازروش انتشار آکوستیک

نگارنده: متین قمری مقدم

اساتید راهنما

دکتر حسین قاسم زاده طهرانی

دکتر مجید نیکخواه

استاد مشاور

مهندس عباس محمدی

دی ماه ۱۳۹۸

شماره: ۹۹٫۱۵۹/ع ح
تاریخ: ۹۹/۲/۹

دانشگاه صنعتی شاهرود
مدیریت تحصیلات تکمیلی

باسمه‌تعالی

فرم شماره (۳) صورتجلسه نهایی دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

با نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد خانم متین قمری مقدم با شماره دانشجویی ۹۶۱۲۱۰۴ رشته مهندسی عمران گرایش راه و ترابری تحت عنوان مطالعه شکل گیری و گسترش ترکهای موئی در آسفالت با استفاده از روش انتشارآکوستیک که در تاریخ ۱۳۹۸/۱۱/۰۱ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

الف) درجه عالی: نمره ۲۰-۱۹ ☐ ب) درجه خیلی خوب: نمره ۱۸/۹۹ – ۱۸ ☑
ج) درجه خوب: نمره۱۷/۹۹ – ۱۶ ☐ د) درجه متوسط: نمره ۱۵/۹۹-۱۴ ☐
ه) کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول و نیاز به دفاع مجدد دارد ☐
نوع تحقیق: نظری ☐ عملی ■

عضو هیأت داوران	نام ونام خانوادگی	مرتبهٔ علمی	امضاء
۱ـ استادراهنمای اول	دکتر حسین قاسم زاده طهرانی	استادیار	
۲- استادراهنمای دوم	دکتر مجید نیکخواه	استادیار	
۳- استاد مشاور	مهندس عباس محمدی	مربی	
۴- نماینده تحصیلات تکمیلی	دکتر مهدی گلی	استادیار	
۵- استاد ممتحن اول	دکتر علی حسینی	استادیار	
۶ـ استاد ممتحن دوم	دکتر ایمان آقایان	استادیار	

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده:

تاریخ و امضاء و مهر دانشکده:

دانشکده مهندسی عمران
آموزش تحصیلات تکمیلی
دانشگاه صنعتی شاهرود

تبصره: در صورتی که کسی مردود شود حداکثر یکبار دیگر (در مدت مجاز تحصیل) می تواند از پایان نامه خود دفاع نماید (دفاع مجدد نباید زودتر از ۴ ماه برگزار شود).

تقدیم اثر

این اثر تقدیم به پدر و مادر عزیزم که با حمایت بی‌جانبه و زحمات بی دریغشان، آرامش روحی و آسایش فکری را فراهم نمودند تا در محیطی مطلوب، مراتب تحصیلی و نیز پایان نامه درسی را به نحو احسن به اتمام برسانم. پس خدایا توفیقم ده که هر لحظه شکر گزارشان باشم و با ادای دین، به خواسته‌ی آنان جامه عمل بپوشانم.

ر ا

اا ا ا ا اا ا ا اا ام ا ا ا ا ا م ا

ا ا ا ا ا ر اا ا ا ا ا ا اا ا اا ا ا ا ا ا

را ا ا ا اا ايم ا ر

ت ر

اینجانب **متین قمری مقدم** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته **راه و ترابری** دانشکده عمران دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان‌نامه **مطالعه شکل‌گیری و توسعه ترکهای موئی در آسفالت با استفاده از روش انتشارآکوستیک** تحت راهنمائی **دکتر حسین قاسم زاده طهرانی** 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 بوده اند در مقالات مستخرج از پایان‌نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا 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 .

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

ر

یکی از مهم‌ترین عیب و نقص‌ها در روسازی‌های آسفالتی که رایج‌ترین روسازی‌های در حال حاضر هستند ترکهای موئی می‌باشد. گسترش این عیب و نقص ریز که در ابتدای شکل‌گیری حتی با چشم قابل مشاهده نیست هزینه‌های مالی و غیرمالی زیادی به بار می‌آورد. به همین دلیل سالانه مطالعات زیادی برای پیداکردن روش مناسب در درک بهتر از شکل‌گیری و گسترش آن توسط محققین انجام می‌شود. یکی از روشهایی که به تازگی توجه زیادی را در رفتارنگاری آسفالت به خود جذب کرده روش انتشارآکوستیک است. روش انتشارآکوستیک یک روش ارزیابی غیرمخرب است که با بررسی امواج بوجود آمده ناشی از عیب و نقص اطلاعات مفیدی مانند محل شکل‌گیری، روند گسترش و ... را از عیب و نقص می‌دهد. در این مطالعه دو نمونه متفاوت و استاندارد مارشال و تیرچه خمشی تحت این روش مورد آزمایش قرار گرفته است و با نمودارهای حاصل از پارامترهای این روش و همچنین یکی از پر کاربردترین نمایش‌های آن، روند شکل گیری و گسترش ترک موئی در نمونه‌ها ارزیابی شده است. نتایج نشان داده است می‌توان با استفاده از پارامترهای این روش مراحل خرابی در هر نوع آسفالت را از ترک‌های موئی تا گسیختگی به سه قسمت کلی تقسیم کرد و همچنین محل و روند شکل‌گیری و گسترش ترک موئی تا گسیختگی در نمونه‌های تازه و کهنه آسفالت را با دقت بسیار بالا با استفاده از رخدادهای انتشارآکوستیک در نمونه‌ها نشان داد. بر مبنای نتایج می‌توان با این روش در هر زمان وضعیت موجود را در هر نوع آسفالت نشان داد که این همان کارآمدی بالا و مطمئن انتشارآکوستیک در پایش سلامت سازه‌ای در تعمیرات و نگهداری آسفالت، که در مطالعات متفاوت پیشین اثبات شده است را نشان می‌دهد.

کلمات کلیدی: انتشارآکوستیک، ترکهای موئی، مکانیابی منبع رخدادها، نمونه تیرچه خمشی، نمونه مارشال، پایش سلامت سازه‌ای

پیش گفتار

روسازی‌های آسفالتی که یکی از رایج‌ترین روسازی‌های در حال حاضر می‌باشد و دامنه کاربرد آن کشورهای زیادی را فرا گرفته است، در طول عمر بهره برداری خود دچار خرابی‌های زیادی می‌شود. یکی از شایع‌ترین مشکلات و خرابی‌های این روسازی‌های رایج، ترکها می‌باشند که گرچه در ابتدا اهمیت چندانی ندارند زیرا بسیار ریز بوده و ممکن است حتی با چشم قابل مشاهده نباشند، ولی به مرور زمان گسترش یافته و خرابی‌های بیشتری در روسازی به بار می‌آورند. لذا مطالعات زیادی با روشهای تجربی و تئوری به بررسی و ارزیابی آنها، پرداخته شده است. در این مطالعه ابتدا این عیب و نقص ریز ولی پر اهمیت، انواع عوامل ایجاد، روشهای گسترش آن و ... بیان شده است، سپس یکی از جدیدترین و گسترده‌ترین روشهای ارزیابی آن، روش انتشارآکوستیک که به تازگی در ارزیابی آسفالت مورد توجه خیلی از محققین قرارگرفته است معرفی می‌شود. انتشار آکوستیک یکی از روشهای ارزیابی غیرمخرب است که با بررسی امواج ناشی از به‌وجودآمدن عیب و نقص، اطلاعات مفیدی مانند محل شکل‌گیری، نحوه شکل‌گیری، نحوه گسترش آنها و ... را می‌دهد. این روش همانند سایر روشها، تجهیزات، مراحل، مزایا و معایب خاص خود را دارد که در ادامه به طور کامل توضیح داده خواهد شد. بعد از آن هم نحوه شکل‌گیری و گسترش ترکهای موئی با استفاده از این روش در دو مدل نمونه آسفالتی متفاوت بررسی و نتایج آن به طور کامل تفسیر و بیان خواهد شد.

فهرست مطالب

هرس او ر

فهرست اشکال

ل ليا

۱-۱ مقدمه

روسازی راه‌ها یکی از مهم‌ترین بخش‌های هر کشور است که سالانه مقدار زیادی از سرمایه‌های آن کشور صرف هزینه‌های ساخت، تعمیر و نگهداری آنها می‌شود. انواع روسازی راه‌ها به سه نوع صلب(بتنی)، انعطاف‌پذیر(آسفالتی) و یا ترکیبی از هر دو(روسازی مرکب) طبقه بندی می‌شوند.

روسازی‌های آسفالتی که یکی از رایج‌ترین روسازی‌های در حال حاضر است و دامنه استفاده از آنها را همه کشورها فرا گرفته‌است، در طول عمر بهره‌برداری خود دچار خرابی‌های متفاوتی می‌شوند که باید با جلوگیری از گسترش خرابی‌ها و نگهداری درست راه‌ها، هزینه‌های آنها را کاهش داد. ترکخوردگی-ها یکی از عیب و نقص‌های متداول در روسازی‌های آسفالتی می‌باشند که در ابتدا به صورت موئی و بسیار ریز بوده و سپس گسترش می‌یابند. این عیب و نقص‌های ریز که با چشم قابل مشاهده نیستند، بتدریج گسترده می‌شوند و خرابی‌های بیشتری در روسازی به بار می‌آورند که هزینه‌های تعمیر روسازی را به شدت افزایش می‌دهند. روش‌های ارزیابی روسازی ها انواع متفاوتی دارند که به دو دسته مخرب و غیر مخرب تقسیم می‌شوند. روشهای ارزیابی غیرمخرب روسازی راه‌ها که از قابل اعتمادترین روشهای ارزیابی هستند مزایایی همچون عدم دستخوردگی لایه‌ها، سرعت بیشتر و کم‌هزینه‌تر بودن را نسبت به روشهای مخرب دارا می‌باشند[1]. انتشار آکوستیک یکی از روشهای غیرمخرب ارزیابی است که با بررسی امواج ناشی از به‌وجودآمدن عیب و نقص، اطلاعات مفیدی مانند محل شکل‌گیری آنها، نحوه شکل گیری، گسترش آنها و ... را می‌دهد. این روش همانند سایر روشها، تجهیزات، مراحل، مزایا و معایب خاص خود را دارد که در ادامه به طور کامل توضیح و ترکهای موئی با استفاده از این روش بررسی خواهد شد[2].

۱-۲ سازوکار ترک خوردگی در آسفالت

انواع روسازی‌ها، اعم از صلب، انعطاف‌پذیر و یا مرکب، در طول عمر بهره‌برداری خود دچار خرابی‌های متفاوتی می‌شوند. این خرابی‌ها عبارتند از ترکها، تغییر شکل‌ها و اضمحلال‌ها. ترکها یکی از مهمترین عیب و نقص‌ها در روسازی هستند که وجود آنها در روسازی آسفالتی، زیرساخت های روسازی راه‌ها را در معرض مشکلات جدی قرار می‌دهد[3]. می‌توان با تشخیص و ترمیم به موقع آنها از گسترش خرابی‌ها در روسازی و همچنین افزایش هزینه‌ها جلوگیری کرد. ترکها در روسازی ممکن است به علل مختلف به وجود بیایند و بسته به علل آنها، نحوه شکل‌گیری و گسترش آنها متفاوت است.

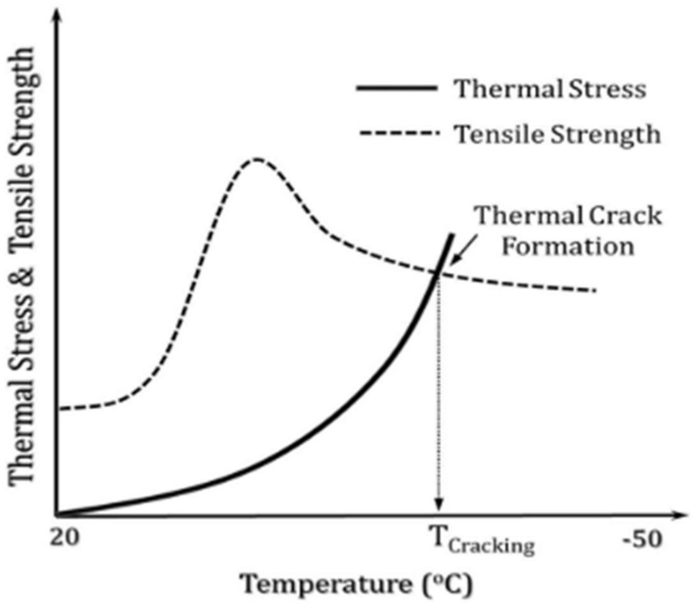
علل به وجودآمدن ترکها می‌تواند بار یا آب و هوا باشد. ترکهای ناشی از بار به علت عبور مکرر بار چرخ وسایل نقلیه بر روی روسازی ایجاد می‌شوند که به آنها ترکهای خستگی می‌گویند. این نوع ترکها، هم در روسازی های انعطاف پذیر(آسفالتی) وهم روسازی‌های صلب(بتنی) به وجود می‌آیند. ترکهای ناشی از آب‌وهوا که به آنها ترکهای حرارتی می‌گویند دو علت دارند، یا ناشی از آب‌وهوای سرد هستند که به آنها ترکهای برودتی ناشی از دمای پایین گویند، یا به علت تکرار سرد و گرم شدن روسازی می‌باشد (یعنی روسازی به طور مکرر سرد و گرم شود و این عمل آنقدر تکرار شود تا روسازی دچار آسیب شود) که به آن ترکهای خستگی حرارتی می‌گویند. ترکهای حرارتی چه ناشی از دمای پایین و چه ناشی از خستگی، فقط در روسازی‌های انعطاف پذیر(آسفالتی) به وجود می‌آیند[4].

این عوامل نه تنها باعث بوجود آمدن ترک می‌شوند بلکه بر روی گسترش آن نیز اثر می‌گذارند. به طور مثال بازشدگی دهانه ترک با دما نسبت عکس دارد. یعنی با کاهش دما، بازشدگی دهانه ترک افزایش می‌یابد و بالعکس[5].

قابل اشاره است ویژگیهای روسازی آسفالتی مانند مدول الاستیسیته، ضخامت لایه‌های آن و ... بر روی شکل‌گیری و گسترش ترکهای موئی اثر می‌گذارند. بطوری که ترکها به طور قابل ملاحظه‌ای با کاهش ضخامت لایه آسفالتی که مدول کمتری دارد افزایش می‌یابند ولی ضخامت لایه آسفالتی با

مدول الاستیسیته بالا تاثیر خیلی کمتری در روند ایجاد و گسترش ترکها دارد[3]. همینطور روسازی آسفالتی یک ماده مرکب از سنگدانه، فضای خالی و ... است و هر کدام از آنها نیز بر روی عملکرد روسازی و در نتیجه شکل‌گیری و گسترش ترک اثر می‌گذارد. به طور مثال فضای خالی و دمای اولیه تاثیر چشمگیری بر روی ترکهای ظاهر شده دارند بنحوی که کاهش فضای خالی باعث کاهش آسیب-های ناشی از خستگی در مخلوط آسفالتی می‌شود[6].

از نظر علم مهندسی ترک موئی زمانی به وجود می‌آید که کرنش در جسم به نقطه عطف خود برسد. در کل وقتی روسازی تحت تأثیر تحریک خارجی (چه بار و چه دما) قرار گیرد در آن تنش ایجاد می-شود. با افزایش زمان و تکرار این تحریک‌ها، تنش‌ها در روسازی افزایش می‌یابند و همزمان مقاومت روسازی (کششی یا فشار یا برش) کاهش می‌یابد. زمانی در جسم که مقاومت با تنش برابر می‌شود ترک در آن بوجود میِآید. شکل۱-۱ زمان شکل‌گیری ترک تحت تأثیر تحریک خارجی دما را نشان می‌دهد.



شکل ۱-۱. **زمان شکل‌گیری ترک در نمودار تنش- کرنش حین افزایش دما** [7]

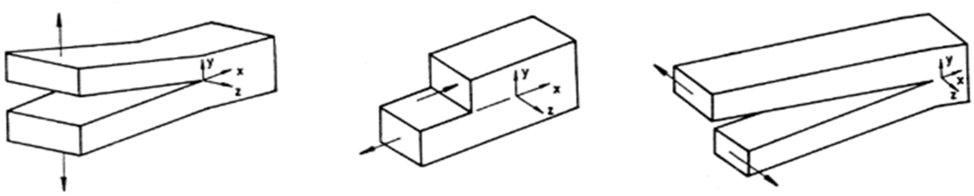
این خرابی‌ها می‌توانند از هر جای روسازی شکل گرفته و به سمت دیگر گسترش یابند . آنها از قسمتی در جسم که تنش در آن بیشتر است ایجاد و به سمت تنش کمتر گسترش می‌یابند. ممکن است در پایین‌ترین قسمت روسازی باشند و به بالا گسترش یابند که در ضخامت‌های کم رایج است و یا بالعکس که در روسازی‌های ضخیم رایج است.

ترکهای موئی بسته به نوع حرکت لبه‌های آنها ممکن است به سه حالت گسترش یابند:[8]

در اولین نوع آن دو لبه‌ی باز شده ترک موئی به علت کشش، بیشتر از هم فاصله می‌گیرند. (شکل ۱-۲سمت چپ)

در نوع دوم آن دو لبه باز شده ترک موئی به صورت برشی بر روی هم سر می‌خورند. (شکل ۱-۲وسط)

و در نوع سوم آن دولبه باز شده ترک موئی به صورت موازی و خلاف جهت از هم فاصله می‌گیرند. (شکل ۱-۲سمت راست)



شکل ۱-۲. انواع روش‌های اصلی بارگذاری و جابجایی مربوطه سطوح ترک[8]

گرچه ترکهای موئی در ابتدا بسیار ریز هستند و با چشم قابل مشاهده نمی‌باشند ولی با گسترش، سایر خرابی‌ها را در روسازی به وجود می‌آورند. این عیب و نقص‌های ریز، روسازی‌های آسفالتی و حتی زیرساخت‌های آنها را در معرض خطرهای بزرگتری قرار می‌دهند. از خرابی‌هایی که آنها به بار می‌آورند می‌توان به ترک انعکاسی، عریان‌شدگی و ... را نام برد. به عنوان مثال ترکهای انعکاسی همان ترک موئی از پایین به بالا است که در روسازی‌های آسفالتی با ضخامت کم رایج است و با گذشت زمان و بدتر شدن به ترک انعکاسی تبدیل شده‌اند[9] و یا وقتی میکروترک درسطح تماس سنگدانه و قیر به

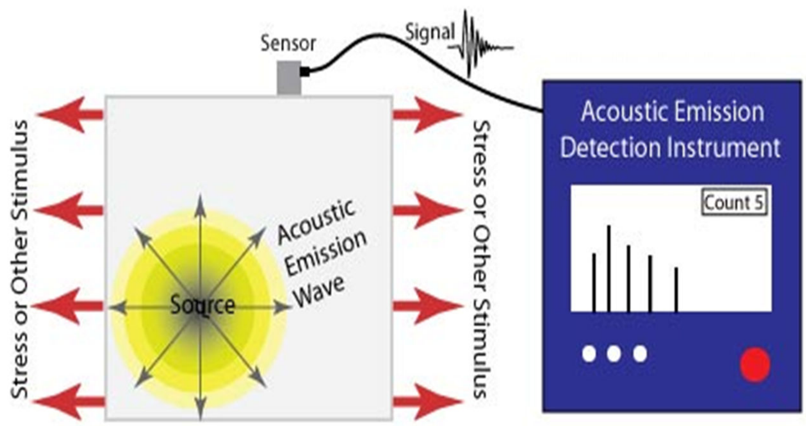
وجود می‌آید بعد از مدتی و با گسترش باعث می‌شود آب داخل روسازی نفوذ کرده، درنتیجه سنگدانه قیر را رها کرده و به آب متصل می‌شود و عریان‌شدگی به وجود می‌آید.

ترکهای موئی با گذشت زمان و تبدیل شدن به یک عیب و نقص بزرگ، پیامدهای زیان‌باری را به بار می‌آورند، در صورتی که می‌توان با ارزیابی صحیح و ترمیم به موقع با استفاده از روش‌های تعمیر و نگهداری آسفالت از هزینه‌ها وسایر پیامدهای آنان جلوگیری کرد. از مهم‌ترین پیامدهای عدم تعمیر و نگهداری آسفالت عبارتند از :

- سطح خدمت دهی روسازی را به شدت کاهش می دهند
- از دوام و مقاومت روسازی می کاهند
- باعث کاهش عمر بهره برداری و در نتیجه افزایش هزینه های تعمیر و نگهداری می-شوند[10]و.

۱-۳ معرفی انتشار آکوستیک

در هر جسمی، در اثر تنش یا کرنش امواج انرژی ایجاد می‌شود. این امواج که در محل اعمال تنش یا کرنش ایجاد شده‌اند، درون جسم انتشار می‌یابند تا به سطح جسم برسند و در آنجا توسط سنسورهای مناسب دریافت، بررسی و ثبت می‌شوند. شکل ۱-۴ به صورت شماتیک توضیحات بالا را نشان می‌دهد.



شکل ۱-۳. نمایی از روش انتشار آکوستیک[11]

تجهیزات این روش عبارتند از:

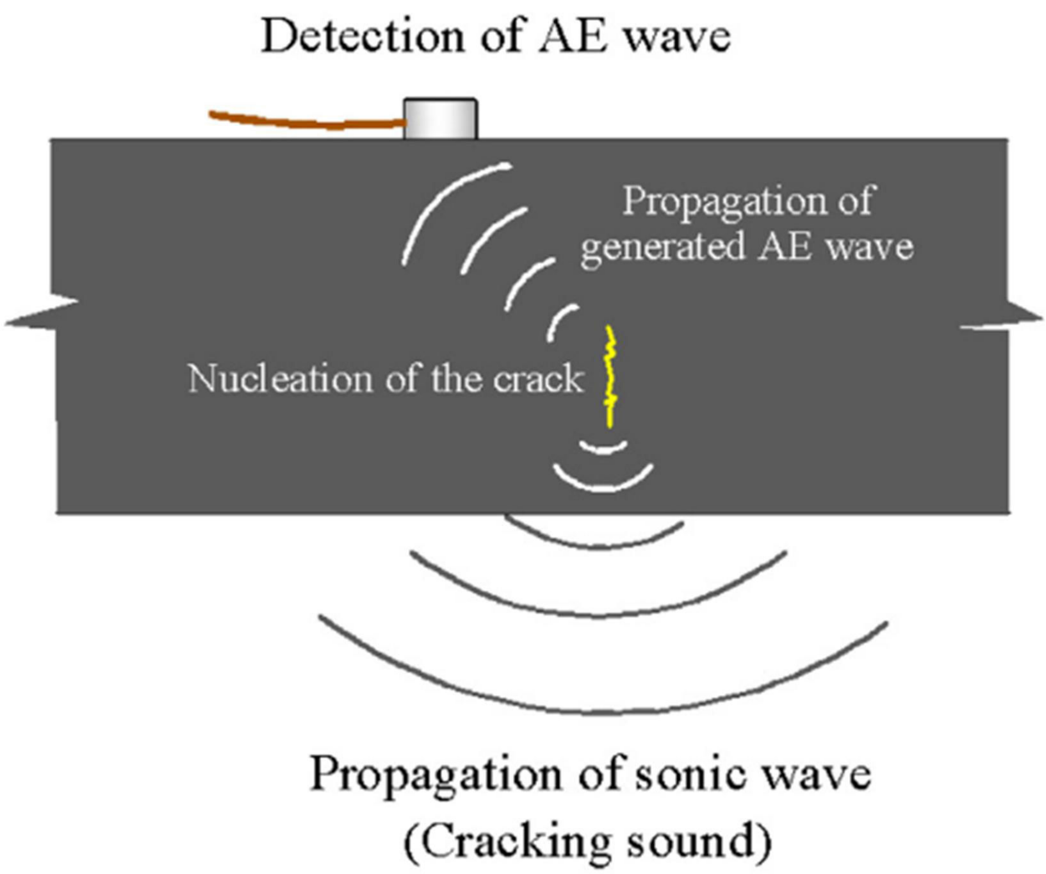
۱.سنسور ۲.پیش‌تقویت‌کننده ۳.فیلتر ۴.تبدیل کننده ۵. دستگاه‌های ثبت و ذخیره سازی سیگنال.

از قسمت فیلتر به بعد را به دلیل اینکه عمده فعالیت‌های این روش را در بر می‌گیرد تجهیزات اصلی این روش نیز می‌نامند. مراحل این روش به این ترتیب است که ابتدا سنسور امواج را از جسم مورد آزمایش که دارای تنش یا کرنش است، دریافت و آنها را به پیش تقویت‌کننده می‌فرستد. این امواج، پس از تقویت در پیش‌تقویت‌کننده‌ها، به فیلتر رفته و در آنجا سیگنالهای اضافی که به آنها نویز می‌گویند و ممکن است از محیط وارد امواج اصلی شده باشند حذف می‌شوند. فیلتر امواج را پس از حذف نویزها به تبدیل‌کننده می‌فرستد تا از آنالوگ به دیجیتال تبدیل شوند و در آخر این سیگنالهای اصلی در دستگاه‌های ثبت و ذخیره سازی با برنامه‌هایی همچون کاوشگر سیگنال برای ما قابل نمایش و بررسی می‌باشند.

۱-۴ بیان مسئله

هدف این مطالعه، بررسی شکل‌گیری و روند گسترش ترکهای موئی تا فرآیند خرابی در روسازی آسفالتی با استفاده از روش انتشارآکوستیک می‌باشد. همانطور که در قسمت‌های قبل گفته شد ترکهای موئی، ترک‌های ریزی هستند که در ابتدا حتی با چشم قابل مشاهده نیستند ولی اگر به موقع ترمیم نشوند خرابی‌های بیشتری به بار می‌آورند. این عیب ریز ولی پر اهمیت، توسط روش‌های متفاوت و زیادی قابل شناسایی و ارزیابی هستند. یکی از جدیدترین روشهایی که در بررسی شکل‌گیری و روند گسترش ترکهای موئی آسفالت مورد توجه قرار گرفته روش انتشار آکوستیک می‌باشد. در این روش ترک موئی با وجود خیلی ریز بودن و حتی دیده نشدن در هنگام شکل‌گیری، توسط این روش و سنسورهای حساس آن قابل شناسایی و ارزیابی است. برای این منظور از دو مدل نمونه‌ی استاندارد مارشال و تیرچه آسفالتی استفاده شده است. نمونه‌های مارشال، نمونه‌های تازه ساخته شده که دارای آسفالت نو و نمونه‌های تیرچه آسفالتی، نمونه‌های برش داده شده از سطح جاده که دارای

آسفالت کهنه شده هستند، می‌باشند. آزمایش‌های انجام شده، آزمایش استاندارد مارشال و خمش است که روند خرابی مشخصی دارند. در اینحا ابتدا به بررسی و مطالعه شکل‌گیری و رشد ترکهای موئی در روند خرابی با استفاده از نتایج حاصل از انتشارآکوستیک که دارای صحت و دقت بالایی می‌باشند پرداخته و سپس از یکی از بهترین نمایش‌های این روش که همان مکانیابی است، استفاده شده است. یکی از بهترین و رایج‌ترین کاربردهای این روش، نمایش و مکانیابی روند گسیختگی است که در اینجا در هر دو مدل نمونه به آن پرداخته شده است.



شکل ۱-۴. نمایی از ارزیابی ترکهای موئی با روش انتشارآکوستیک[12]

۱-۵ ضرورت تحقیق

همانطور که پیش از این اشاره شد، ترکهای موئی یکی از مهمترین عیب و نقص‌ها بشمار می‌روند که خرابی نتیجه‌ی شکل‌گیری و گسترش آنها هستند. روند گسیختگی با ترکهای موئی بسیار ریز که در خیلی از مواقع قابل مشاهده نیست شروع می‌شود و بررسی و اطلاع دقیق از روند آن با هیچ ارزیابی کار راحتی نیست به همین دلیل است که این عیب ریز از اهمیت زیادی برخوردار است تا بتوان با جلوگیری بموقع از گسترش آن، مانع از خرابی و ضرر بیشتر شد. در عین حال انتشار آکوستیک یکی از جدیدترین روشها در ارزیابی بشمار می‌رود که ابتدا در زلزله و سنگ کاربرد داشته است و با گذشت زمان و اثبات صحت، دقت و راحتی آن، دامنه کاربردش به سایر زمینه‌ها گسترش پیدا کرده است.

۱-۶ نوآوری تحقیق

همانطور که در فصل سوم پیشینه تحقیق اشاره شده است مطالعاتی که تاکنون انجام شده است تنها با یک نمونه و اثر عوامل مختلف بر روی نتایج انتشارآکوستیک بررسی و معمولاً از نمونه تازه ساخته شده آسفالتی استفاده شده است. در این مطالعه ضمن بررسی و مطالعه شکل‌گیری و گسترش ترکهای موئی در نمونه‌های آسفالتی تحت آزمایش‌های استاندارد مارشال و تیرچه آسفالتی دو نمونه با ماهیت‌های متفاوت که رفتارهای متفاوتی دارند استفاده شده است تا با پیدا کردن نقاط مشترک بین نتایج دقیق این روش که در پایش سلامت سازه‌ای بکار می‌رود بتوان در مورد روند شکل‌گیری ترک-های موئی و گسترش آنها تا گسیختگی به نتایج قطعی و ثابت رسید.

۱-۷ فرض‌های تحقیق

۱. انتشارآکوستیک در هر نوع ماده‌ای از جمله آسفالت رخ می‌دهد.
۲. در حین بارگذاری آسفالت، ابتدا ترکهای موئی داخل آن ابجاد می‌شود و با ایجاد این ترکهای موئی، رخداد انتشارآکوستیک در آن بوجود می آید.
۳. با استفاده از سنسورهای انتشارآکوستیک می‌توان ترکهای موئی داخل آسفالت، حین بارگذاری را مطالعه کرد.

۱-۸ فرضیه‌های تحقیق

۱. روند شکل‌گیری و توسعه ترکهای موئی تا گسیختگی با پارامترهای انتشارآکوستیک قابل مطالعه می‌باشد.
۲. نشان دادن محل شکل‌گیری و توسعه ترکهای موئی تا گسیختگی با رخدادهای انتشارآکوستیک
۳. انتشارآکوستیک برای پایش سلامت سازه‌ای در تعمیرات و نگهداری آسفالت کارآمد است.

۱-۹ معرفی ساختار پایان نامه

در این فصل تمامی موضوعات این مطالعه به طور خلاصه توضیح داده شده است تا مطالعه‌کنندگان برای شروع آشنایی با موضوعات داشته باشند. در فصل دوم روش آزمایش غیرمخرب انتشارآکوستیک که روش جدیدی است بطور کامل با همه جزئیات مانند مفهوم، تاریخچه، تجهیزات، مزایا و معایب به صورت سلیس و روان بیان شده است. در فصل سوم سعی شده است تا اکثر تحقیقاتی که از ابتدا تا زمان نوشتن این مطالعه، در این زمینه انجام شده است به صورت خلاصه و مفید جمع آوری گردد تا مطالعه‌کنندگان تا حد امکان نیاز کمتری به سایر منابع پیدا کنند که ضمن راحتی کار، در زمان آنان

نیز صرفه‌جویی شود. در فصل چهارم روش انجام تحقیق و نمونه‌ها و ویژگی‌های آنان بطور کامل به همراه عکس‌های متفاوت از روند ساخت و انجام آزمایش توضیح داده شده است. در فصل پنجم نتایج حاصل از آزمایشاتی که در فصل چهارم توضیح داده شده‌اند به صورت کامل تفسیر و تحلیل شده‌اند. در فصل آخر هم نتیجه گیری به صورت خلاصه‌وار بیان و چند پیشنهاد برای علاقه‌مندان به ادامه کار در این روش ذکر شده است. قابل اشاره است که داده‌های خام همه آزمایشات به صورت کامل به ترتیب آزمایش‌های انجام شده در پیوست‌ها آورده شده‌اند تا در صورت نیاز به راحتی قابل دسترس باشد.

فصل ۲ : مفاهیم روش انتشار آکوستیک

۲-۱ مقدمه

در این فصل یکی از جدیدترین و گسترده‌ترین روشهای ارزیابی غیر مخرب در رفتار نگاری آسفالت به طورمختصر و مفید معرفی شده است. انتشارآکوستیک یکی از روشهای ارزیابی غیرمخرب است که با بررسی امواج ناشی از به وجودآمدن عیب و نقص، اطلاعات مفیدی مانند محل شکل‌گیری آنها، نحوه شکل گیری، گسترش آنها و ... را می‌دهد و می‌تواند هر نوع مصالحی را مورد ارزیابی سریع و دقیق قرار دهد. این روش به دلیل قابلیتهای متنوع خود کاربردهای فراوانی دارد و آزمایشهای متفاوتی می-توان با آن انجام داد. همچنین روش انتشارآکوستیک همانند سایر روشها، تجهیزات، مراحل، مزایا و معایب خاص خود را دارد که در ادامه به طور کامل توضیح داده خواهد شد. پیش بینی می‌شود که در سالهای آینده با گسترش بیشتر تکنولوژی، کاربرد این روش رایج و جایگزین سایر روشها شود.

۲-۲ تاریخچه

آکوستیک[1] یک واژه انگلیسی است که معادل فارسی آن، آوا شنودی به معنای شنیدن آوا می‌باشد. با وجود اینکه در مورد تاریخچه پیدایش انتشارآکوستیک نظر قطعی در زمینه‌های مختلف وجود ندارد ولی دو فرض در ثبت آن وجود دارد. فرض اول به بررسی امواج ناشی از یک قطعه چوب تحت خمش که در نتیجه تنش ناشی از خمش ایجاد شده در آن، امواج به وجود آمده ثبت و بررسی شده‌اند مربوط می‌شود. این مطالعه توسط کیشینو[2] انجام و در سال ۱۹۳۳ در کنفرانس و دورهمی تحقیق در مورد زلزله که در دانشگاه توکیو برگذار شده، بیان شده است. فرض دیگر در بعضی از منابع، ثبت انتشار آکوستیک در دهه ۱۹۵۰ توسط جوزف کایزر[3] را بیان می‌کنند که امواج بوجود آمده را در طول

[1] Acoustic
[2] F.kishinoue
[3] Josef Kaiser

کشش در مواد متالیک بررسی کرده است و بعد از وی اسکافیلد[1] در سال ۱۹۶۱ مقالات وی را بررسی و این روش را تحت عنوان انتشار آکوستیک ثبت کرده است[13].

قابل اشاره است که دو فرضیه در این روش توسط کایزر بیان شده است که دومی به نام وی هم به ثبت رسیده است:

۱. اینکه انتشارآکوستیک در هر نوع ماده‌ای رخ میدهد.
۲. رخداد انتشارآکوستیک رخ نمیدهد مگر اینکه جسم به ماکزیمم تنش که در جسم قبلا ایجاد شده برسد و بعد از آن امواج انتشار آکوستیک ثبت خواهند شد (اثر کایزر).

به طور کلی انتشار آکوستیک ابتدا برای بررسی رفتار سنگ و زلزله و سپس در بتن و آخر از همه، به تازگی در آسفالت بکار گرفته شده است[13].

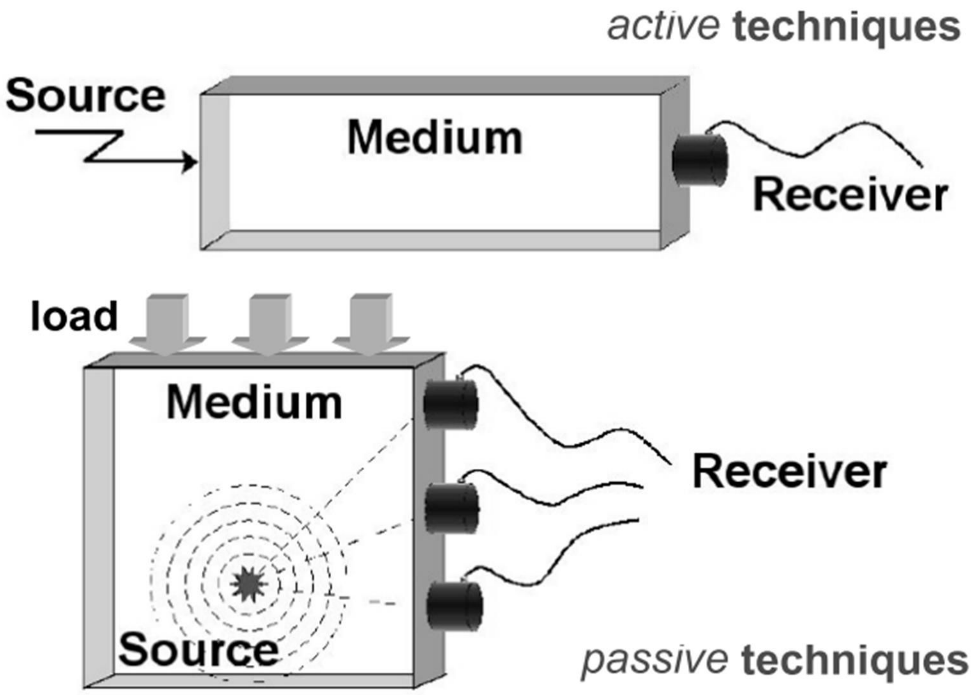
۲-۳ مفهوم انتشار آکوستیک

وقتی جسمی تحت تأثیر تحریک خارجی قرار می‌گیرد در خود تنش یا کرنش ایجاد می‌کند. طی این تغییر که بر اساس نوع ماده و یا نوع تحریک می‌تواند ماندگار یا گذرا باشد، جسم از خود امواج صوتی تولید می‌کند. این امواج که به صورت امواج الاستیک گذرا هستند در درون ماده انتشار می‌یابند تا به سطح جسم می‌رسند و در آنجا قابل دریافت و ثبت توسط سسنسورها می‌باشند. بعد از آن می‌توان با تحلیل این سیگنال‌ها و منبع آنها عیب و نقص درون آنها را بررسی کرد. از این روش تنها برای بررسی عیوب استفاده نمی‌شود بلکه برای تخمین عمر آنها نیز استفاده می‌شود[2].

روش انتشار آکوستیک یکی از روشهای ارزیابی غیرمخرب روسازی می‌باشد که با عملکرد مطمئن، به عنوان روشی در ارزیابی سلامت سازه‌ای[2] زیرساخت‌های مهندسی بکارگرفته می‌شود[14]. یکی از کاربردهای آن شناسایی و تعیین محل خرابی می‌باشد. روشهای ارزیابی غیر مخرب خود به دو روش

[1] Schofield
[2] Structural health monitoring

منفعل و فعال تقسیم‌بندی می‌شوند. روش انتشار آکوستیک یک روش منفعل در نظر گرفته می‌شود زیرا عیوب را زمانی شناسایی می‌کند که خود بخودی به وجود می‌آیند در حالیکه در روش فعال از یک منبع تحریک خارجی برای بوجود آوردن عیب و نقص در مواد استفاده می‌شود. شکل ۲-۱ این دو روش و تفاوت آن‌ها را نشان می‌دهد[13].



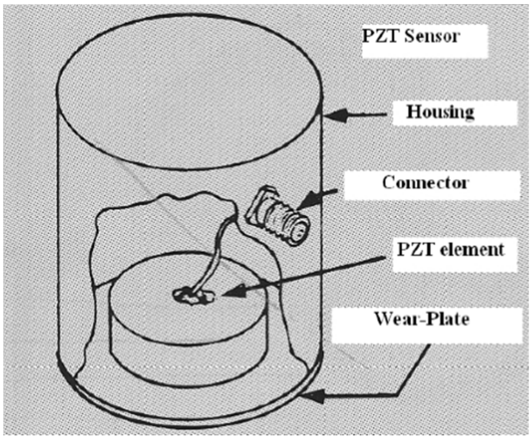
شکل ۲-۱. نمایی از روش‌های ارزیابی غیرمخرب[13]

۲-۴ تجهیزات انتشارآکوستیک

۲-۴-۱ سنسور

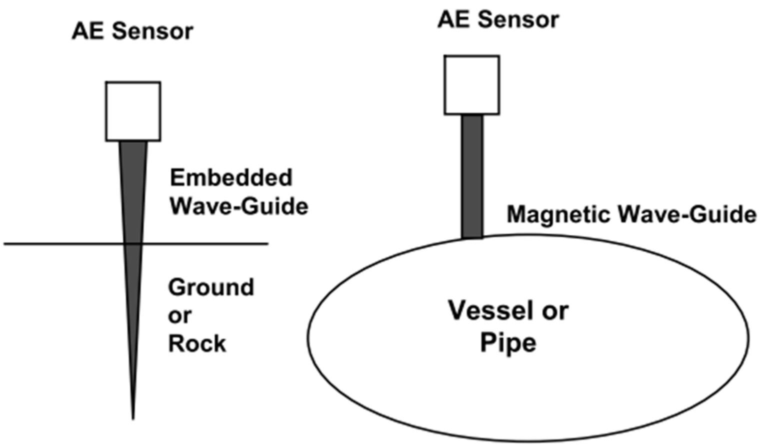
این ابزار یکی از اصلی‌ترین وسایل این روش است که امواجی را که از داخل جسم انتشار یافته و به سطح جسم رسیده اند را دریافت می‌کند. خود دو نوع دارد، پیزوالکتریک و اکستومتری. متداولترین و رایجترین سنسور روش انتشارآکوستیک، سنسور پیزوالکتریک است که همانطور که در شکل زیر نمایش داده شده است شامل یک المان پیزو الکتریک است که در یک محفظه محافظتی قرار می‌گیرد[13].

شکل ۲-۲. سنسور پیزوالکتریک[15]



شکل ۲-۳. اجزای داخل سنسور پیزوالکتریک [13]

انواع روش نصب سنسور نیز دو گونه است. بعضی از سنسورها مستقیماً روی سطح نصب می‌شوند و بعضی از سنسورها بنابر شرایط حاکم ممکن است نتوان روی جسم نصب کرد مانند جایی که دسترسی به آن مستقیماً وجود ندارد یا جسم دمای بسیار بالایی داشته باشد. در این موارد معمولاً از قطعه موجبر یا راهنمای موج کمک گرفته می‌شود. قطعه موجبر یا راهنمای موج یک قطعه یا مایع یا ... است که از یک طرف با سنسور و از طرف دیگر با جسم ارتباط دارد. در شکل زیر چند مدل از راهنمای موج‌ها و زمینه کاربرد آنها، به طور خلاصه نشان داده شده اند[13].



شکل ۲-۴. نمایش انواعی از راهنمای امواج در سنسورها [13]

نکته دیگری به جزء شرایط نصب که باید در انتخاب سنسور مدنظر قرار گیرد، طیف پاسخ آنهاست. سنسورهایی با طیف پاسخ رزونانس[1] دارای حساسیت بیشتری از سنسورهایی با طیف پاسخ بردبند[2] که دارای پهنای باند زیاد هستند، می‌باشند[13].

۲-۴-۲ پیش‌تقویت‌کننده‌ها[3]

این دستگاه برای بزرگنمایی امواج خارج شده از سنسور استفاده می‌شود. کابل اتصال بین سنسور و پیش تقویت‌کننده حتما باید کوتاه و با روکش باشد زیرا ممکن است در معرض نویزهای الکترومغناطیسی گوناگونی قرار گیرند. بهترین پیش تقویت‌کننده‌ها، پیش تقویت‌کننده‌های با دامنه پاسخ فرکانسی با پهنای باند زیادتر هستند. فرکانس تشدید به طور غیرمستقیم در این وسیله محدوده فضایی و فاصله سسنسورها را تعیین می‌کند چرا که فرکانس‌های بالا سریعتر ضعیف می‌شوند و فاصله شناسایی کوچکتری نیازدارند[13].

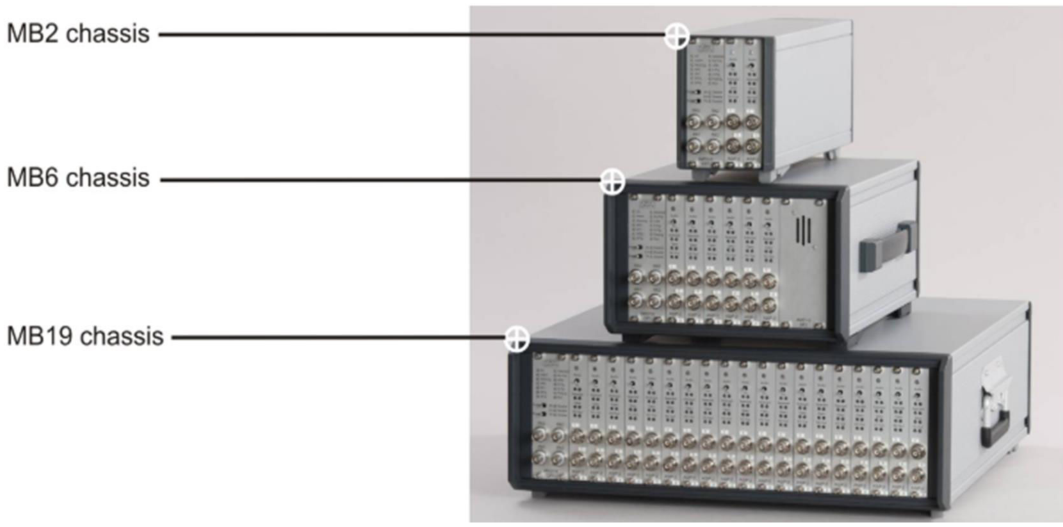
شکل ۲-۵. نمایش پیش‌تقویت‌کننده[16]

1 resonance
2 broadband
3 Preamplifier

۲-۴-۳ تجهیزات اصلی

چون فعالیتهای اصلی دریافت،پردازش و خروج و نمایش سیگنال توسط این قسمت صورت می‌گیرد به آنها تجهیزات اصلی می‌گویند. این تجهیزات شامل چند کارت پردازشگر سیگنال که بر روی یک شاسی نصب شده اند را شامل می‌شود که به ترتیب در شکل‌های زیر نشان داده شده اند[13].

شکل ۲-۶. کارت های پرداشگر سیگنال در تجهیزات انتشارآکوستیک[15]



شکل ۲-۷. شاسی در تجهیزات اصلی [16]

فعالیتهای اصلی دریافت،پردازش و خروج و سیگنال در تجهیزات اصلی شامل مراحل زیر می‌شود:

- **فیلتر**

وسیله‌ای است که برای حذف نویز استفاده می‌شود. یکی از مهمترین بخش‌های این روش فیلتر است که کمبود آن صحت و دقت این روش را زیر سوال می‌برد و انواع مختلفی دارد. در ادامه دو روش متداول آن به طور مختصر توضیح داده شده است[2]..

در فیلتر می‌توان با شناخت منبع نویزها و تفاوت آنها با منبع آکوستیک از ورود آنها جلوگیری یا با شناخت آنها، نویزها را از سیستم حذف کرد. از روشهای متداول می‌توان به تعیین آستانه تحریک یا استفاده از سسنسورهای محافظ اشاره کرد. در روش آستانه تحریک مقداری توسط اپراتور برای آستانه با توجه به تست تنظیم می‌شود، اگر سیگنال از آن فراتر رفته، مفید می‌باشد و ثبت می‌شود، در غیر این صورت ثبت نخواهد شد. (ولی روش دیگری برای فیلتر نیز متداول است که توسط تجهیزات اصلی انجام نمی‌شود که به آن سنسورهای محافظ می‌گویند. در روش سسنسورهای محافظ، محدوده بازرسی و خارج از محدوده بازرسی مشخص می‌شود. در محدوده بازرسی سسنسورهایی و در محدوده خارج از بازرسی سسنسورهای دیگری قرار داده می‌شوند که سسنسورهای آزمایش را احاطه می‌کنند. اگر سیگنال ابتدا به سنسورهای آزمایش برسند یعنی در محدوده آزمایش می‌باشند و ثبت و ضبط می‌شوند و در غیر این‌صورت حذف خواهند شد[2].

- **تقویت اصلی**

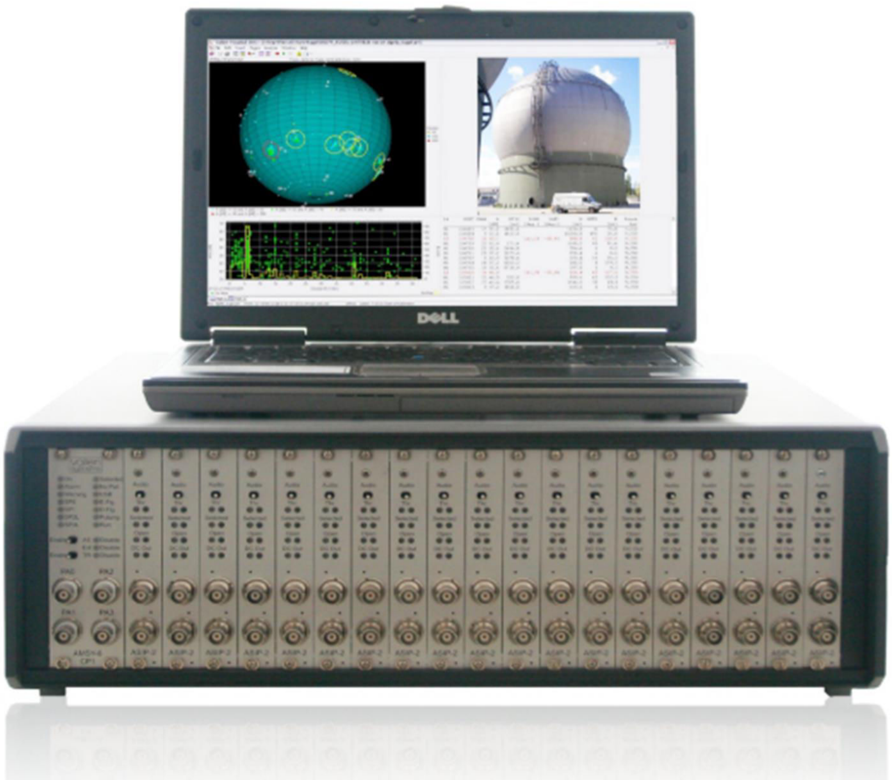
بعد از جداسازی سیگنالها توسط فیلتر، سیگنالهای مفید دوباره تقویت شده و به سیستم‌های نمایشی می‌روند[2].

- **تبدیل کننده‌ها**

امواج را از آنالوگ به دیجیتال تبدیل کرده و برای تحلیل و پردازش به سیستم‌های کسب و نشر میفرستد[2].

- **سیستم‌های کسب داده و نشر پارامتر**

همان کامپیوترهای شخصی را گویند که تحلیل و نمایش داده‌ها را انجام می‌دهند[13].



شکل ۲-۸.نمایش سیستم‌های کسب و نمایش داده در انتشارآکوستیک[13]

۵-۲ تحلیل داده‌ها در انتشارآکوستیک

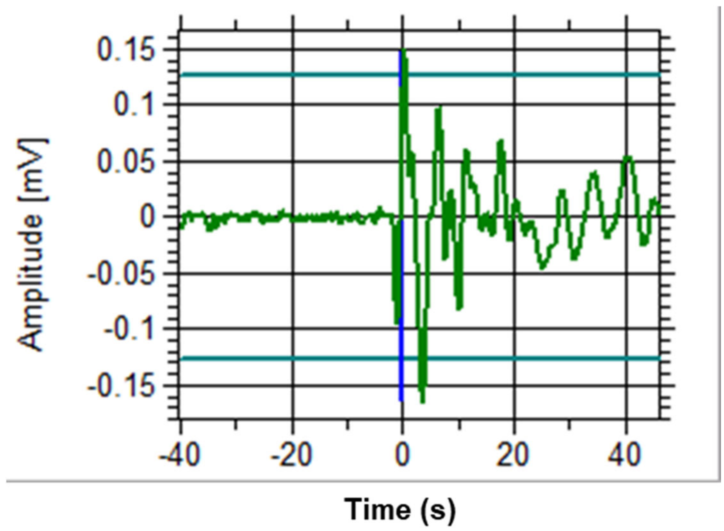
سنسور پس از دریافت امواج آن را به سیگنال الکتریکی تبدیل کرده که به آن سیگنال انتشارآکوستیک گویند. این سیگنال‌ها به دو نوع مفید و اضافی تقسیم می‌شود. نوع مفید آن سیگنالهای مورد نیاز در آزمایش هستند که در آخر بررسی می‌شوند و با بررسی آنها اطلاعات مورد نیاز بدست می‌آید. ولی نوع اضافی آنها که نویز گفته می‌شود نه تنها مورد نیاز نمی‌باشند بلکه وجود آنها صحت و دقت آزمایش را زیر سوال برده و باید حذف شوند. به روشهای حذف آنها در قسمت فیلتر اشاره شده است (منبع این سیگنالهای اضافی ممکن است در داخل یا خارج از جسم باشد و معمولاً دوره‌ای، مکانیکی، الکترومغناطیسی یا هیدرولیکی می‌باشند)[2]. در انتشار آکوستیک هر سیگنال که از آستانه تعریف شده بالاتر رود و منجر به جمع‌آوری داده شود را ضربه[1]، هر علتی که منجر به تولید امواج شود رخداد[2] انتشار آکوستیک، و محلی که امواج از آنجا انتشار می‌یابند یعنی محل رخدادها را منبع[3] امواج گویند[13]. خروجی‌های این روش بسته به نوع کاربرد و استفاده از این روش، به دو صورت نمایش شکل موج یا پارامترهایی از موج قابل دریافت هستند. روش پارامتری بعد از دریافت سیگنال تنها ویژگی‌هایی از سیگنال را ثبت می‌کند و دیگر سیگنال اصلی را نگه نمی‌دارد. این روش باعث خلاصه شدن اطلاعات می‌شود که گرچه مزایایی همچون اقتصادی بودن و سرعت بالا را دارد ولی معایبی همچون سختی فیلتر کردن و نداشتن سیگنال اصلی در صورت نیاز را دارد. روش شکل موج کاملاً برعکس این روش، سیگنال اصلی را نگه می‌دارد که می‌توان روی آن بعداً هر پردازش مورد نیاز را انجام داد ولی معایبی همچون نیاز به حافظه‌ی زیاد، زمانبر بودن و هزینه‌ی بالا را دارد[13].

بهترین وسایل و نرم افزارها در انتشارآکوستیک آنهایی هستند که بتواند ثبت هردو آنها را با هم انجام دهد. در شکل زیر نمایی از خروجی‌های پارامتریک و شکل موج آورده شده‌اند.

[1] Hit
[2] Event
[3] Source

Id	DSET	CHAN	A	R	D	CNTS	E	RMS	THR	HHMMSS	DAY	MSEC
			[dB]	[µs]	[µs]		[eu]	[µV]	[dB]	[hhmmss]		[ms.µs]
La	Label 1: 12:36 Resume											
Dt	Tuesday, July 16, 2019, Host Time: 12:36:05 PM											
La	Label 2: TimeZone: -07:00 (Pacific Standard Time)											
Ht	9	1	41.2	0.6	1.6	1	9.52E+00	4.1	40	12:36:07	16	116.8431
Ht	11	1	43.6	1.5	3	1	1.23E+01	4.4	40	12:36:07	16	145.2265
Ht	13	1	50.4	7.3	506.8	9	3.75E+02	5	40	12:36:07	16	177.3283
Ht	14	2	45.9	24.6	464	7	1.58E+02	4.5	40	12:36:07	16	177.3333
Ht	16	1	50.7	32.9	82.7	4	2.19E+02	5	40	12:36:07	16	214.9596
Ht	17	2	46.5	26	86.2	4	1.01E+02	4.6	40	12:36:07	16	214.9619
Ht	19	1	52.8	17.7	70.2	3	1.67E+02	5	40	12:36:07	16	223.9158
Ht	20	2	45.5	43.2	84.2	4	1.05E+02	4.6	40	12:36:07	16	223.9208
Ht	22	1	55.8	21.1	98.3	4	3.93E+02	5	40	12:36:07	16	231.4337
Ht	23	2	48.9	43.5	172.9	4	2.40E+02	4.6	40	12:36:07	16	231.4416
Ht	24	1	40.8	0.3	0.9	1	6.10E+00	5.6	40	12:36:07	16	239.9438
Ht	26	1	44.6	65.9	85.6	3	8.38E+01	5.1	40	12:36:07	16	323.6352
Ht	27	2	44.6	13.3	33.5	2	6.36E+01	4.6	40	12:36:07	16	323.6509
Ht	29	1	44.2	76.1	95.1	3	8.46E+01	5.1	40	12:36:07	16	341.1274
Ht	30	2	40.2	0.1	0.6	0	2.67E+01	4.6	40	12:36:07	16	341.1391
Ht	32	1	40.7	0.2	0.5	0	4.40E+00	4.7	40	12:36:07	16	385.9506
Ht	34	1	46.5	158.5	1096.1	9	4.17E+02	4.6	40	12:36:07	16	412.8953
Ht	36	2	42	0.6	58.7	1	4.08E+01	6.1	40	12:36:07	16	452.3853
Ht	37	1	49.5	9.4	78.5	3	1.75E+02	6.2	40	12:36:07	16	452.3967
Ht	40	1	53.9	8	630.2	7	9.75E+02	4.5	40	12:36:07	16	723.6125
Ht	41	2	51.2	10.8	211.2	6	5.36E+02	4.1	40	12:36:07	16	723.6166
Ht	43	1	44.3	70.3	91.4	3	1.16E+02	5.3	40	12:36:07	16	734.283
Ht	44	2	41.9	42.9	113.8	2	7.69E+01	4.9	40	12:36:07	16	734.3155
Ht	46	2	44.7	55.9	79.2	3	8.61E+01	4.2	40	12:36:07	16	815.7201
Ht	48	1	51.4	5.6	70.3	4	8.27E+01	5.8	40	12:36:07	16	823.5633
Ht	50	1	46.3	18.1	90.9	4	8.14E+01	5.6	40	12:36:07	16	850.4648

شکل ۲-۹.نمایش خروجی پارامتریک در انتشارآکوستیک



شکل ۲-۱۰.نمایش خروجی شکل موج در انتشارآکوستیک

۲-۶ پارامترهای سیگنال

دو روش برای بررسی و برداشت پارامترها وجود دارد. در روش اول که معمولاً برای امواج آنالوگ استفاده می‌شود، ولتاژی تحت عنوان آستانه شروع انتخاب می‌شود. هر سیگنالی که از آستانه شروع فراتر رود تحت عنوان سیگنال انتشارآکوستیک ثبت می‌شود. برای خاتمه دادن به هر سیگنال مدت زمانی تعریف می‌شود که در آن سیگنال دوباره آز آستانه تحریک فراتر نرفته باشد و توسط کاربر تعریف و یک مقدار ثابت است. ولی در روش امواج دیجیتالی جریان کمی متفاوت است، شرایط بسته به ظرفیت ذخیره‌سازی اطلاعات تغییر می‌کند. شروع روش همانند روش در آنالوگ است ولی مدت زمان مستقل از کاربر است، کاربر آستانه شروع ولتاژ، نرخ نمونه‌برداری را تعریف می‌کند. انواع پارامترهای یک سیگنال عبارتند از:

۲-۶-۱ پارامترهای کلاسیک[۱۳]

شمارش[1] (CNTS): تعداد پالسهایی است که از آستانه تحریک فراتر می‌روند و شمارش آنها به بزرگی رخداد منبع بستگی دارند و اغلب شدیداً به خواص آکوستیک و انعکاس طبیعی نمونه و سنسور بستگی دارد.

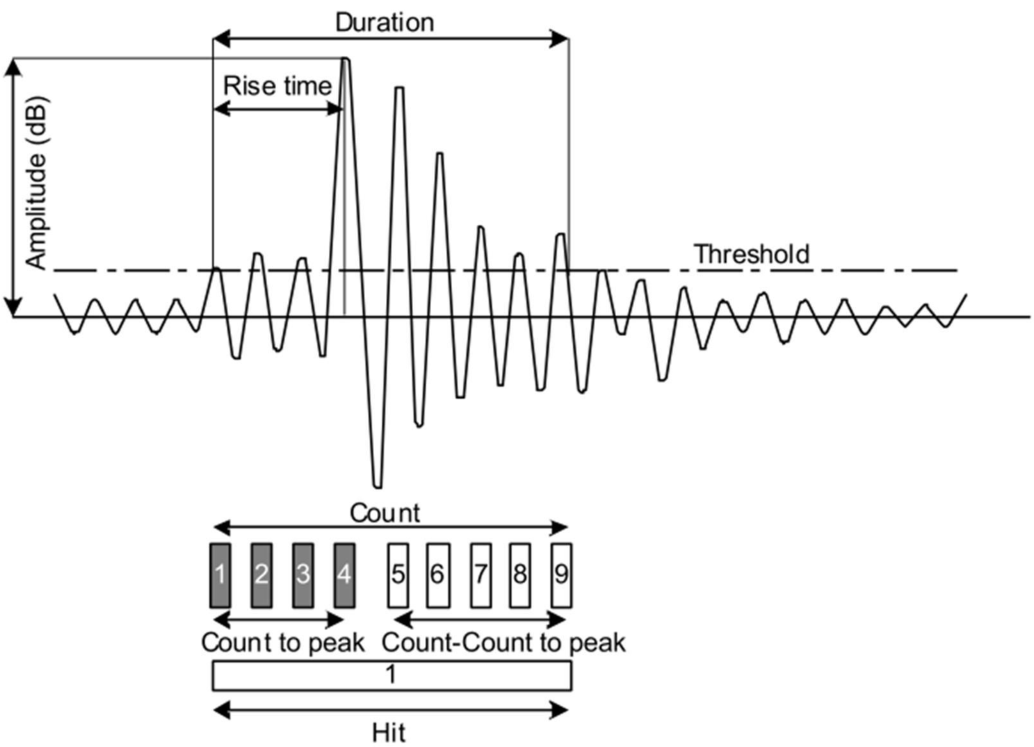
دامنه[2] (A) : بیشترین ولتاژی که یک سیگنال آکوستیک به آن می‌رسد، یک پارامتر خیلی مهم است زیرا مستقیماً قابلیت آشکارسازی رخدادها آکوستیک را تعیین می‌کند و با بزرگی رخدادی که در منبع رخ می‌دهد متناسب است.

مدت زمان[3] (D) : فاصله زمانی بین اولین و آخرین عبور از آستانه تحریک که به بزرگی رخداد آکوستیک و خواص انعکاس ماده بستگی دارد.

---
[1] Count
[2] Amplitude
[3] Duration

انرژی[1] (E) : فاصله اندازه‌گیری تحت پوشش سیگنالهای اصلاح شده است یا به عبارتی سطح زیر سیگنالهای تصحیح شده می‌باشد (گاهی اوقات به عنوان شمارش انرژی شناخته می‌شود). از جهاتی از دامنه و شمارش برتری دارد چرا که هم به دامنه و هم شمارش بستگی دارد و در عین حال به فرکانس آستانه تعیین شده وابستگی کمتری دارد.

زمان اوج[2] (R) : به فاصله زمانی بین اولین عبور از آستانه تحریک و راس دامنه گفته می‌شود و به خواص انتشار سیگنال در ماده بستگی دارد. این پارامتر برای اصلاح سیگنال و فیلتر کردن نویز استفاده می‌شود.



شکل ۲-۱۱. پارامترهای کلاسیک سیگنالهای انتشار آکوستیک[17]

---

[1] Energy
[2] Rise time

۲-۶-۲ پارامترهای فرکانسی[۱۳]

مرکز فرکانس: یک ویژگی فرکانس‌های محاسبه شده که واحد آن کیلوهرتزاست و برابر است با جمع تعداد دفعات فرکانس‌ها تقسیم بر تعداد کل که به عنوان اولین نقطه اینرسی شناخته می‌شود.

اوج فرکانس: نقطه‌ای در طیف فرکانس که بیشترین مقدار در آن نقطه مشاهده می‌شود که یک ویژگی فرکانس است و واحد آن کیلوهرتز می‌باشد.

۳-۶-۲ سایر پارامترها[۱۳]

فرکانس میانگین: نسبت شمارش به مدت زمان.

فرکانس شروع: نسبت شمارش از شروع تا اوج دامنه به بیشترین زمان.

فرکانس بازتاب : تعداد شمارش‌ها تا اوج تقسیم بر مدت زمان-زمان اوج.

شمارش RA : بیشترین زمان به دامنه.

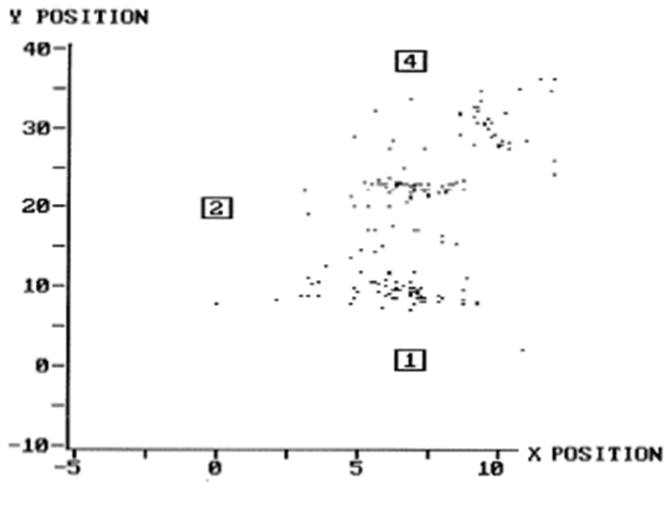
۷-۲ نمایش‌ها در انتشارآکوستیک

آشنا شدن با نمایش داده‌ها و یادگیری چگونه خواندن آنها در مهارت و یا تخصص استفاده‌کنندگان از انتشارآکوستیک بسیار مهم است. حتی افرادی که با بقیه روشهای غیرمخرب آشنا هستند در ابتدا نمایش‌های انتشارآکوستیک را بسیار عجیب می‌خوانند. به دلیل اینکه نتایج روش انتشارآکوستیک به جای عکس‌های قابل مشاهده یا نمایش‌هایی که بقیه روش‌های غیرمخرب از آن استفاده می‌کنند گرافهایی از داده‌های عددی هستند. در نمایش‌های انتشارآکوستیک ، معمولاً پارامترهایی مانند زمان، بار، جابجایی، کرنش و ... بر روی محور افقی و پارامترهای انتشارآکوستیک مانند دامنه، سیگنال، انرژی و ... بر روی محور عمودی قرار می‌گیرند. در این نمایش‌ها معمولاً از نمودارهای میله‌ای، طرح-

های نقطه‌ای، نمودارهای خطی و پله‌ای استفاده می‌شود به طوریکه معمولاً نمودارهای میله‌ای برای نشان دادن ارتباط پارامترهای انتشارآکوستیک با سایر پارامترها، طرح های نقطه‌ای برای نشان دادن ارتباط بین پارامترهای انتشارآکوستیک و نمودارهای خطی و پله‌ای برای نشان دادن ارتباط بین فعالیت‌های انتشارآکوستیک با سایر پارامترها استفاده می‌شود. در این آزمایش نمایش‌های سه بعدی هم، ترسیم و استفاده می‌شوند که معمولاً در آنها زمان سپری شده بر روی محور افقی، تعداد ضربه-های انتشار آکوستیک بر روی محور عمودی و دامنه سیگنال‌ها بر روی محور سوم واقع می‌شود[2]. نمایش داده‌های حاصل از سیگنال‌های این روش کاملا انتخابی است و میتوان بر اساس نیاز هر نمایشی را قبل از آزمایش تعریف کرد[18]. چهار نوع رایج نمایش‌ها عبارتند از: نمایش مکان، نمایش فعالیت، نمایش شدت، نمایش طرح[2].

۲-۷-۱ نمایش مکان

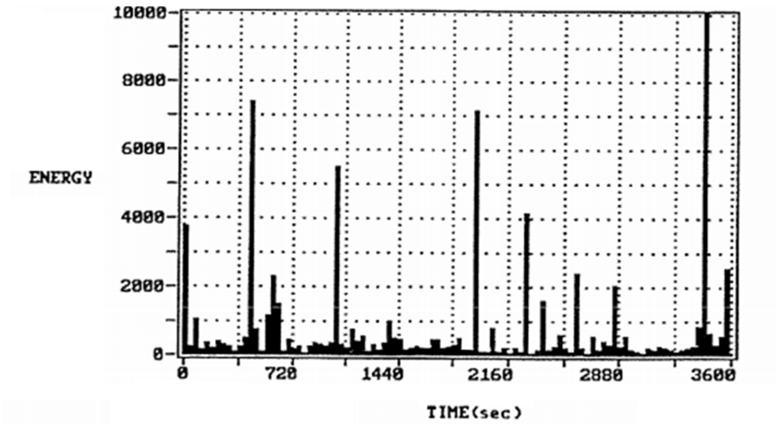
این نمایش که به طور گسترده‌ای استفاده می‌شود، نشان‌دهنده مکانی است که امواج از آنجا انتشار می‌یابند[2].



شکل ۲-۱۲. نمایش مکان [2]

۲-۷-۲ نمایش فعالیت

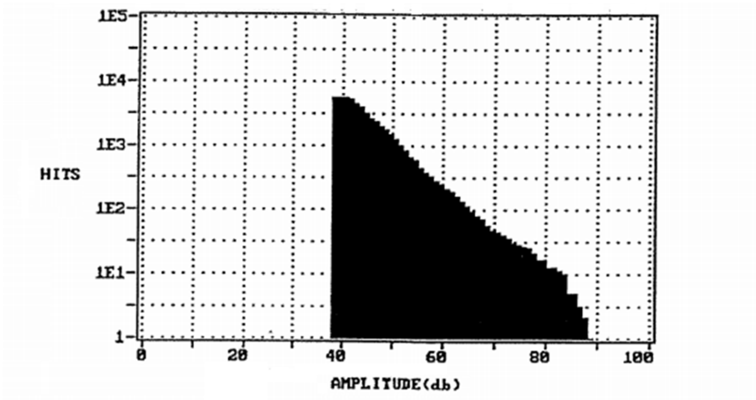
دومین نوع نمایش داده‌ها است که نشان می‌دهد زمانی که هر رخداد اتفاق می‌افتد در چه زمانی و چقدر می‌باشد[2].



شکل ۲-۱۳. نمایش فعالیت[2]

۳-۷-۲ نمایش شدت

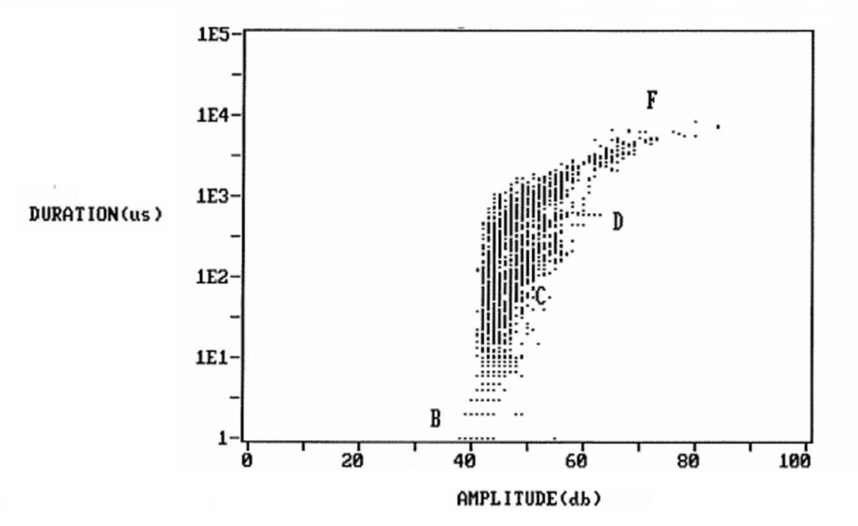
یکی از انواع نمایش انتشارآکوستیک است که اطلاعات استاتیکی مهمی در مورد اندازه سیگنالهای شناخته شده می‌دهد. این مهم است که مقدار زیادی انرژی سیگنال از تعداد کمی سیگنال بزرگ یا تعداد زیادی سیگنال کوچک نشات می‌گیرد. بهترین نوع این نمایش، نمایش ضربه به دامنه است که در شکل زیر نشان داده شده است[2].



شکل ۲-۱۴. نمایش شدت[2]

۲-۷-۴ نمایش طرح

یکی از نمایش‌های اصلی انتشارآکوستیک ، نمایش طرح است که درآن هر ضربه، نقطه‌ای بر روی نمایش است و یکی از انواع رایج آن دامنه ـ زمان است[2].



شکل ۲-۱۵. نمایش طرح [2]

۲-۸ مزایا و معایب انتشار آکوستیک

۲-۸-۱ مزایا:

- نیاز به نصب سنسور در همه قسمت‌ها نیست و با هر سنسور می‌توان قسمتی از جسم را تحت پوشش قرار داد
- نیاز به هیچ گونه تحریک یا عاملی برای ایجاد امواج نیست بلکه عیب و نقص خود امواج را تولید می کنند
- قادر به شناسایی عیوب خیلی ریز و عیوبی که در هنگام به وجود آمدن قابل رؤیت نیستند می‌باشد
- قابل استفاده در هر زمان، مثلا زمان رشد عیب و نقص، مانیتورینگ و حتی سرویس دهی می‌باشد
- با سرعت بالایی انجام می‌شود
- به دلیل قابلیت تنوع خود، کاربردهای فراوانی دارد و آزمایش‌های زیادی می‌توان با آن انجام داد
- مستقل از ابعاد و شکل هندسی جسم مورد آزمایش است **[2]**و[13].

۲-۸-۲ معایب:

- چون امواج ناشی از عیب بوجود می‌آیند و هر رخداد انتشار آکوستیک تنها یکبار اتفاق می-افتد نتایج قابل تکرار با بار یا شرایط مشابه نیست
- ممکن است سیگنالهای اضافی محیطی وارد آزمایش شده باشد که قابل حذف هستند ولی فیلتر و حذف آنها کار سختی است و از دقت آزمایش می‌کاهد
- هزینه بالایی دارد زیرا نیاز به تجهیزات گران قیمت است

- عیوبی که نه رشد می‌کنند و نه حرکت، قابل ارزیابی با این روش نیستند و عیوب موجود که ثابت‌اند را تشخیص نمی‌دهد
- همانند سایر روشها معیار و ملاکی برای سنجش داده‌ها در این روش وجود ندارد
- امواج با گذشت زمان ضعیف می‌شوند و نیاز به سنسورهای بیشتر برای رسیدن به جواب مطلوب است چون سنسور هرچه دورتر باشد از دقت آزمایش می‌کاهد
- این آزمایش زمانی بهتر انجام می‌شود و قابل کاربرد است که تاریخچه‌ای از بارگذاری جسم موجود باشد **[2]**و[13].

فصل ۳ : پیشینه تحقیق

۳-۱ مقدمه:

به طور کلی انتشار آکوستیک ابتدا برای بررسی رفتار سنگ و زلزله کاربرد داشته است. مزایای زیاد این روش همانند دقت بالای نتایج آن، راحتی، استفاده آن در هر زمان مانند سرویس دهی و ... نسبت به سایر روشهای متداول باعث شده تا دامنه استفاده آن به سایر گرایش‌های علوم مانند مواد، بتن و ... گسترش پیدا کند. یکی از زمینه‌هایی که در چند سال اخیر توجه زیادی از محققین را برای کاربرد انتشارآکوستیک به خود جلب کرده است، آسفالت است. از جمله موضوعاتی که در این مطالعات بکار گرفته شده‌اند می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

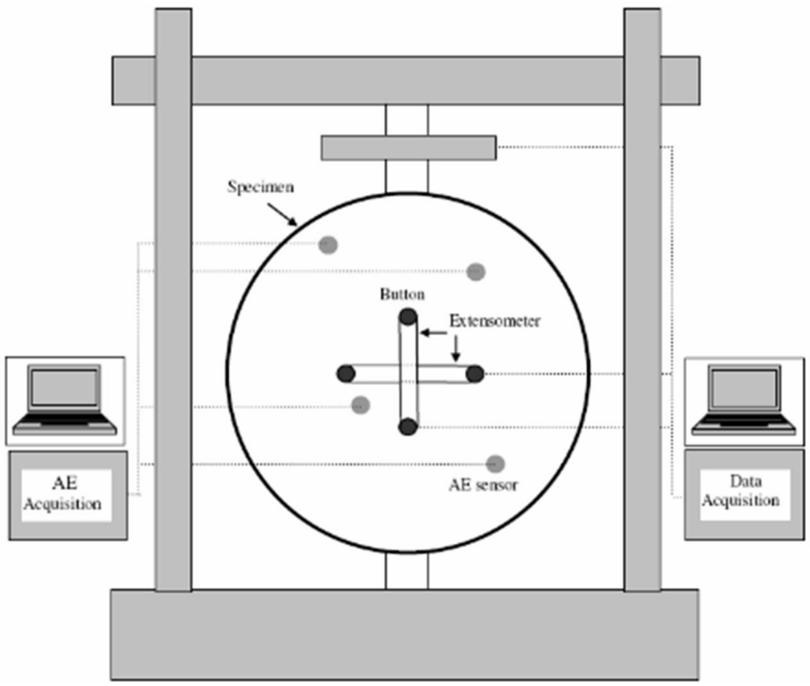
- بدست آوردن دمای ایجاد ترکهای برودتی در آسفالت با روش انتشارآکوستیک و مقایسه آن با سایر روشهای متداول
- بررسی عوامل مختلف در سایز منطقه گسیختگی با استفاده از رخدادهای انتشارآکوستیک
- بررسی پدیده‌هایی مانند خودترمیمی، خستگی و ... در آسفالت با استفاده از پارامترهای انتشارآکوستیک
- مطالعه اثر عوامل مختلف بر روی فرآیند خرابی در آسفالت نفوذپذیر با استفاده از پارامترهای انتشارآکوستیک
- ...

در این فصل، این مطالعات به ترتیب تحقیق انجام شده گردآوری و در ادامه بیان شده‌اند.

۳-۲ مطالعه لی[1] و ماراستینو[2] (۲۰۰۷)[۱۹]

دو محقق لی و ماراستینو که به بررسی مخلوط‌های آسفالتی در دمای پایین پرداخته اند، موضوع بررسی خود را ترکهای ناشی از دمای پایین که یکی از مهمترین خرابی ها در روسازی در آب و هوای سرد است بیان کرده‌اند. ترکهای حرارتی در آسفالت به دلیل تنش‌های حرارتی ناشی از افت ناگهانی دما در روسازی به وجود می‌آیند. جمع شدن تنش‌های حرارتی به حد خاصی منجر به شکل‌گیری ترکهای موئی در روسازی می‌شود که شکل‌گیری این ترکهای موئی با آزاد سازی انرژی زیادی همراه است. چون دو روش متداول ارزیابی ترکهای حرارتی درجه حرارت پایین در آشتو آزمایش خزش کششی غیرمستقیم و مقاومت کششی غیرمستقیم می‌باشد آنها نمونه‌های خود را تحت این دو آزمایش قرار دادند. نمونه‌ها حین بارگذاری تحت تأثیر کاهش دما در محفظه‌ای قرار گرفته بودند و حین بارگذاری و کاهش دما نیز با آزمایش انتشار آکوستیک مورد ارزیابی قرار گرفتند. . این نمونه‌ها، نمونه‌های استوانه‌ای با قطر۱۵۰ و ارتفاع۱۷۰ میلی‌متر هستند که با قیر PG ۵۸-۳۴، سنگدانه گرانیت، درصد هوا ۴ درصد ساخته شده و با استایرن بوتادین استایرن اصلاح شده است. این نمونه‌ها با استفاده از تراکم ژنراتوری متراکم و به سه قسمت با ارتفاع ۵۰ تایی تقسیم می‌شوند. در آزمایش خزش تراز بارهای متفاوت به نمونه اعمال می‌شود تا اثر بار برروی نمونه بررسی شود. بعد از آزمایش خزش، آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم در دمای یکسان بر روی نمونه‌ها انجام شده‌است. همچنین در هر طرف نمونه‌ها ۴ سنسور انتشار آکوستیک، یک اکستومتر برای اندازه‌گیری تغییر شکل مواد و یک سیستم کنترلی هم برای جمع آوری داده‌ها حین آزمایش نمونه روی آنها نصب شده است. دما و زمان نمونه‌ها که داخل منطقه‌ای تحت کاهش دما قرار گرفته‌اند با استفاده از وسایلی همچون ترمومتر و هم سیستم کنترلی ثبت می‌شود. دماهایی که آزمایش‌ها در آنها انجام می‌شود عبارتند از: ۱۲- ، ۲۴-، ۳۶-

[1] Xinjun Li
[2] Mihai Marasteanu

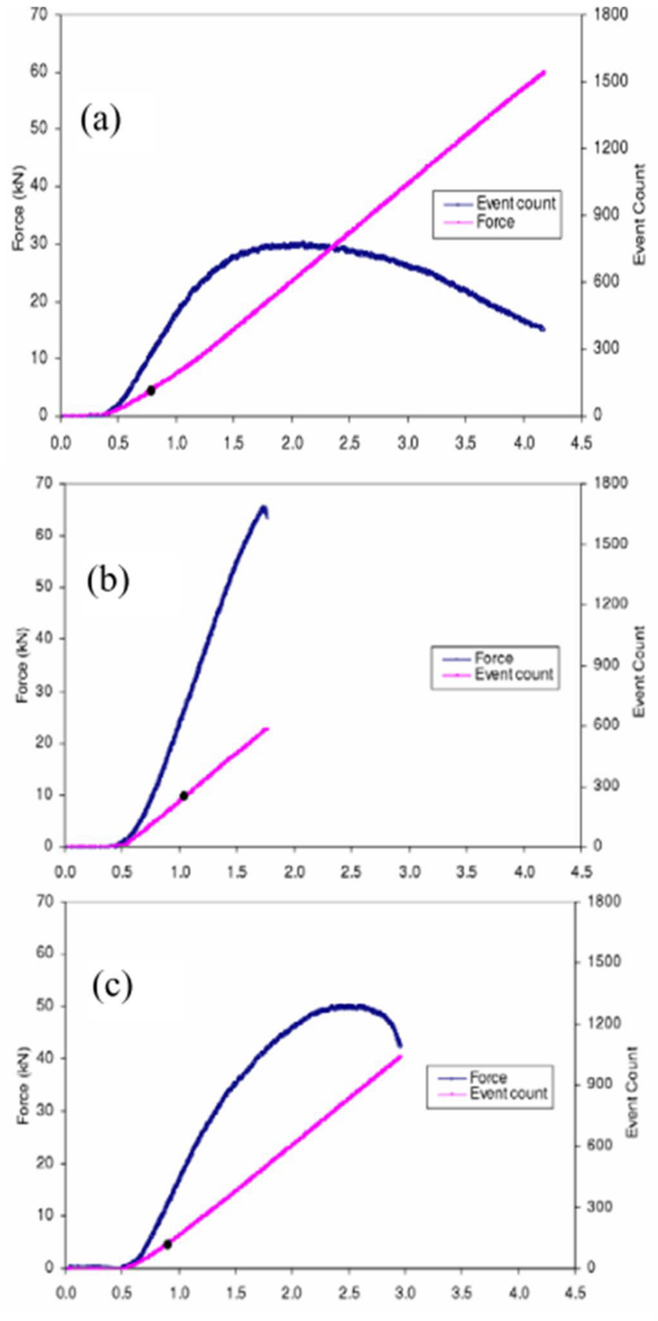


شکل ۳-۱. روند فرآیند آزمایش[19]

نتایجی که آنها بررسی کردند عبارت بودند از:

۱.پاسخ‌های دینامیکی: رابطه بار با رخدادهای انتشارآکوستیک در دماهای مختلف.

در دماهای بالا رفتار منعطف‌تری داشتند یعنی ماکزیمم بار کمتری تحمل کرده‌اند و جابجایی بیشتری داشتند. در دماهای پایین شکننده‌تر بودند یعنی ماکزیمم بار بیشتری تحمل کرده‌اند و جابجایی کمتری داشتند و در دمای متوسط رفتار بین این دو را از خود نشان دادند. در شکل ۳-۲ این موضوع نشان داده شده است، در شکل زیر محور عمودی سمت چپ بار، محور عمودی سمت راست مقدار رخدادها و محور افقی جابجایی است و نمودار صورتی رنگ، روند تغییرات بار و نمودار سرمه‌ای رنگ، روند تغییرات مقدار رخدادها را نشان می‌دهد.



شکل ۳-۲. نمودار بار به جابجایی با رخدادهای انتشارآکوستیک در دماهای متفاوت [19]

شکلa; **در دمای منفی ۱۲ درجه**

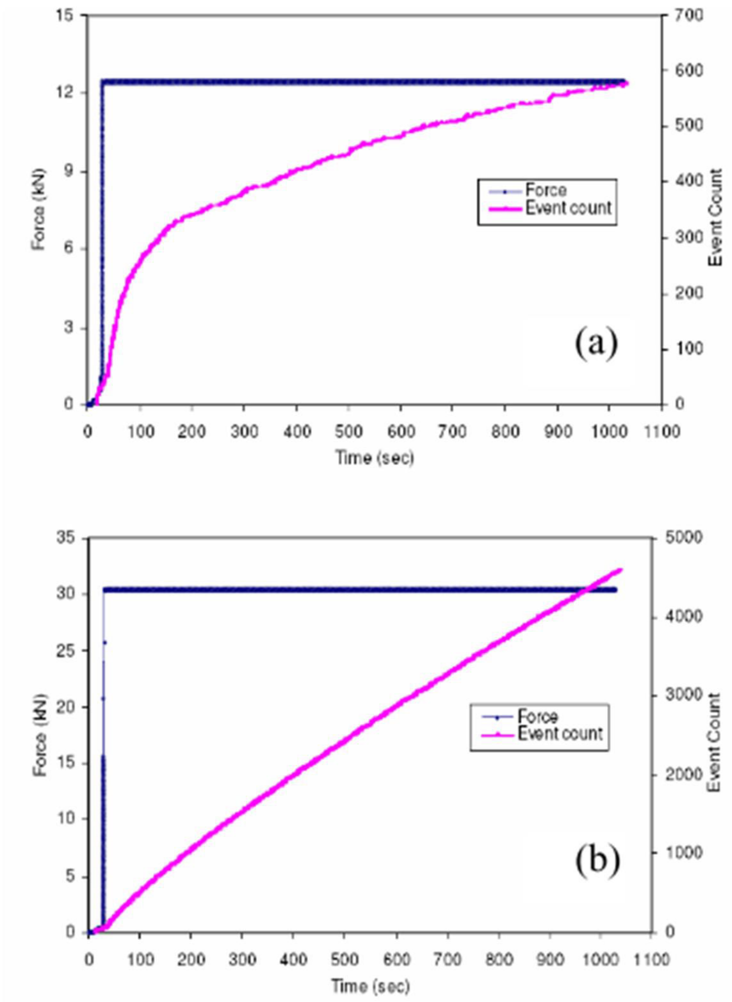
شکلb: **در دمای منفی ۲۴درجه**

شکلc: **دردمای منفی ۳۶درجه**

۲. شمارش رخدادهای انتشارآکوستیک: رابطه بار با رخدادهای انتشارآکوستیک در زمان.

رخدادهای انتشارآکوستیک در دماهای مختلف از یک الگوی مشابه پیروی کردند. رخدادهای انتشار آکوستیک در اول آزمایش کمتر و با گذشت زمان افزایش و تقریبا برابر ۷و۸ رخداد در هر

ثانیه می‌شود. در شکل ۳-۳ این موضوع نشان داده شده است، در شکل زیر محور عمودی سمت چپ بار، محور عمودی سمت راست مقدار رخدادها و محور افقی زمان است و نمودار سرمه‌ای رنگ، روند تغییرات بار و نمودار صورتی رنگ، روند تغییرات مقدار رخدادها را نشان می‌دهد.



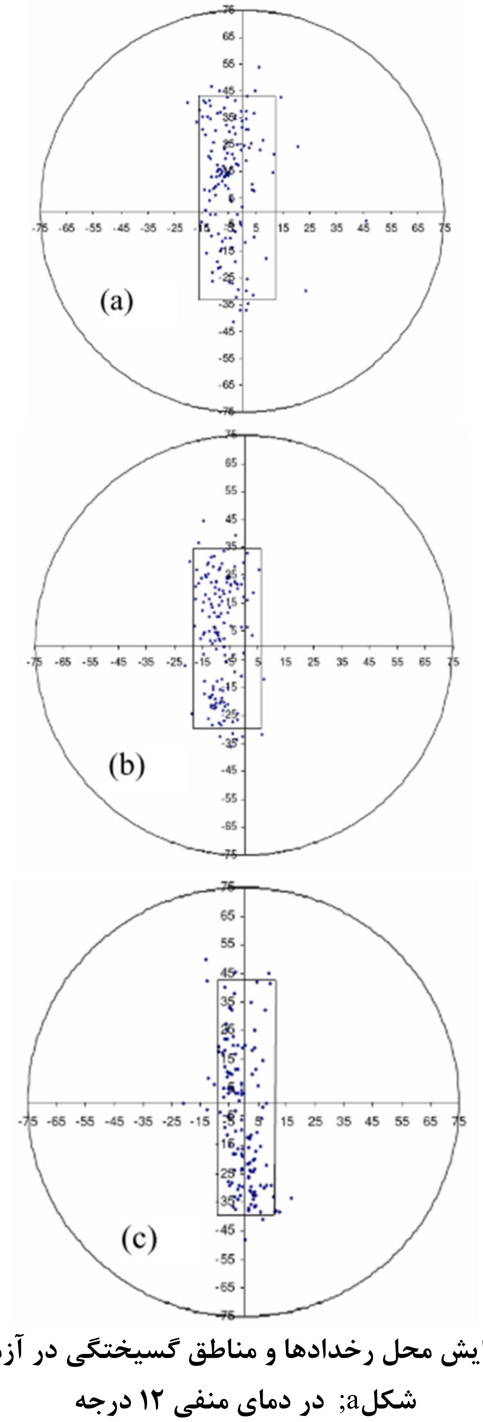
شکل ۳-۳. نمودار بار به رخدادهای انتشارآکوستیک با بارهای متفاوت[19]

شکلa; **بار ۱۲/۵ کیلونیوتن در دمای منفی ۲۴ درجه**

شکلb: **بار ۳۰ کیلونیوتن در دمای منفی ۲۴ درجه**

۳. محل رخدادهای انتشارآکوستیک: بررسی مکان رخدادهای انتشارآکوستیک و نیز نشان‌دادن محل گسیختگی نمونه‌ها با توجه به آنها

محل امواج با بررسی تفاوت زمان رسیدن سیگنال به سنسورهای قرارگرفته در قسمت‌های مختلف نمونه پیدا می‌شود. بنابراین نیاز است که زمان رسیدن امواج به هر سنسور ثبت شود.



شکل ۳-۴.نمایش محل رخدادها و مناطق گسیختگی در آزمایش مقاومت در[19]

شکلa; **در دمای منفی ۱۲ درجه**

شکلb: **در دمای منفی ۲۴درجه**

وشکلc: **دردمای منفی ۳۶درجه**

آنها با بررسی منطقه گسیختگی نتایج زیر را گرفتند که:

- نمونه‌های آسفالتی رفتار شکننده‌تری در دمای کمتر از خود نشان داده‌اند که این به دلیل ماهیت آسفالت امری واضح است.
- رخداد کمتر انتشار آکوستیک در اول آزمایش مقاومت و افزایش آن و تقریبا ۷ یا ۸ رخداد در هر ثانیه و همین روند رخدادها در اول آزمایش خزش که بار اعمال شده، دیده شده است ولی بعد از آن با زمان کاهش می‌یابد.
- در همه دماها بار بیشتر در آزمایش خزش منجر به رخدادهای انتشار آکوستیک بیشتر می‌شود.
- عرض منطقه گسیختگی در آزمایش مقاومت با کاهش دما کاهش می‌یابد ولی طول تغییرات چندانی ندارد، فقط در دمای خیلی پایین قابل مشاهده است که طول بیشتری دارد.
- افزایش عرض در منطقه گسیختگی با افزایش بار در آزمایش خزش افزایش می‌یابد و در کل، در بار کم سایز این منطقه با کاهش دما هم در طول و هم در عرض کاهش می‌یابد.
- در همه دماها سایز منطقه گسیختگی از آزمایش مقاومت تقریبا با سایز منطقه گسیختگی با آزمایش خزش برابر است.

۳-۳ مطالعه ریچاردکیم[1] و یونگوک سئو[2](۲۰۰۸) [۲۰]

این دو محقق در کره شمالی به کنترل خرابی ناشی از خستگی و همینطور بررسی پدیده خودترمیمی[3] با استفاده از انتشارآکوستیک پرداختند. آنها ضمن تعریف پدیده خودترمیمی به عنوان ویژگی از آسفالت که باعث بهتر شدن و بهبود شرایط خودش می‌شود ، دلیل مطالعه‌ی خود را اهمیت

[1] Richard Kim
[2] Youngguk Seo
[3] Self-healing

این پدیده و اینکه بعد از سالها هنوز به خوبی معرفی نشده، بیان کردند. یکی از نتایج جالبی که آنها در تحقیق خود بیان کردند نقض اثر کایزر بود. کایزر یکی از بنیانگذاران روش انتشار آکوستیک است که دو موضوع مهم زیر را در ضمن معرفی انتشارآکوستیک بیان کرد:

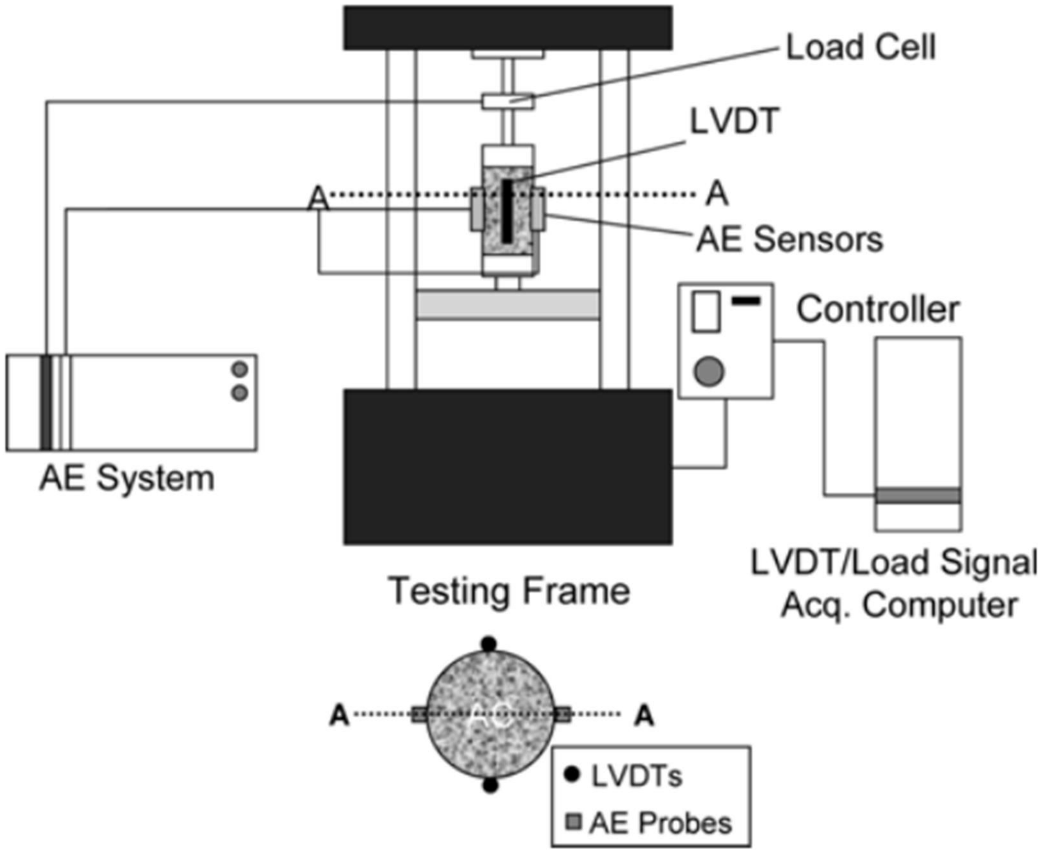
۳. اینکه انتشارآکوستیک در هر نوع مادهای رخ میدهد.

۴. رخداد انتشارآکوستیک رخ نمیدهد مگر اینکه جسم به ماکزیمم تنش که در جسم قبلا ایجاد شده برسد و بعد از آن امواج انتشار آکوستیک ثبت خواهند شد.

این محققان در این مطالعه خود عدم برقراری اثر دوم کایزر را در پدیده‌ی خستگی آسفالت بیان کردند که این موضوع به دلیل اینکه رفتار آسفالت رفتاری وابسته به زمان و دما است خیلی دور از انتظار نیست.

نمونه‌ی استفاده شده در این تحقیق، ۸ نمونه‌ی استوانه‌ای آسفالتی با قیر PG64-22 و با ابعاد قطر ۷۵ و ارتفاع ۱۵۰ میلی‌متر بود که معمولا درصد هوایی بین ۴/۵ تا ۵ درصد داشتند. همانطور که نحوه انجام آزمایش در شکل زیر مشخص است، در هر نمونه دو سنسور با فاصله‌ی ۱۸۰ درجه و دقیقا در وسط ارتفاع نمونه نصب شده است. آستانه‌ی شروع ۴۵ تنظیم بوده است. نمونه با دمای ۲۰ درجه سانتی گراد توسط دستگاه یونیورسال، تحت بار چرخه‌ای قرار می‌گیرد.

همچنین نحوه بارگذاری و زمان استراحت در بین بارگذاربها بر روی نمونه‌ها به ۴ صورت انجام شده که در جدول جدول ۳-۱ جزئیات آن آمده است.

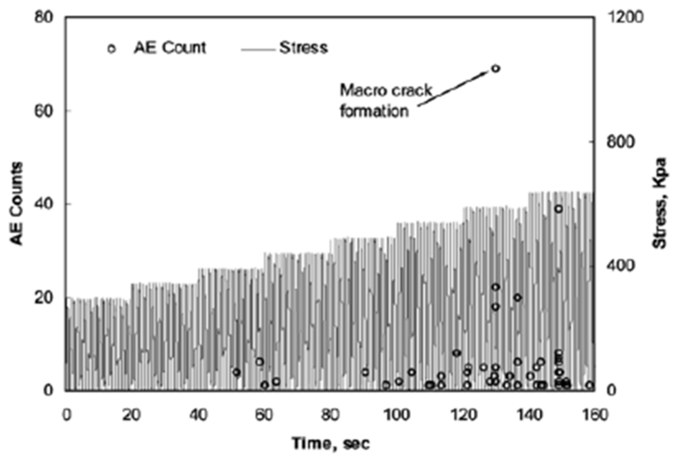


شکل ۳-۵.نمایش شماتیک نحوه انجام آزمایش[20]

جدول ۳-۱. جدول مقادیر بار و زمان‌های استراحت بین بارگذاری‌ها در ۴مدل آزمایش [20]

Test 1	Test 2		Test 3		Test 4	
Load (kN)	Load (kN)	Rest period (sec)	Load (kN)	Rest period (sec)	Load (kN)	Rest period (sec)
1.33	1.33	10	1.33	10	3.11	10
1.56	1.56	10	1.56	12	3.11	20
1.78	1.78	10	1.78	14	3.11	40
2.00	2.00	10	2.00	17	3.11	80
2.22	2.22	10	2.22	21	3.11	160
2.45	2.45	10	2.45	25	3.11	320
2.67	2.67	10	2.67	30	3.11	640
2.89	2.89	10	2.89	36	3.11	320
3.11	3.11	10	3.11	43	3.11	160
3.34	3.34	10	3.34	52	3.11	80
3.56	3.56	10	3.56	62	3.11	40
3.78	3.78	10	3.78	74	3.11	20
4.00	4.00	10	4.00	89	3.11	10
4.23	4.23	10	4.23	107		
4.45	4.45	10	4.45	128		
5.34	5.34	10	5.34	154		
6.23	6.23	10	6.23	185		
7.12	7.12	10	7.12	222		
	8.01	10	8.01	266		
	8.90	10	8.90	319		
	9.79	10	9.79	383		
	10.68	10	10.68	460		

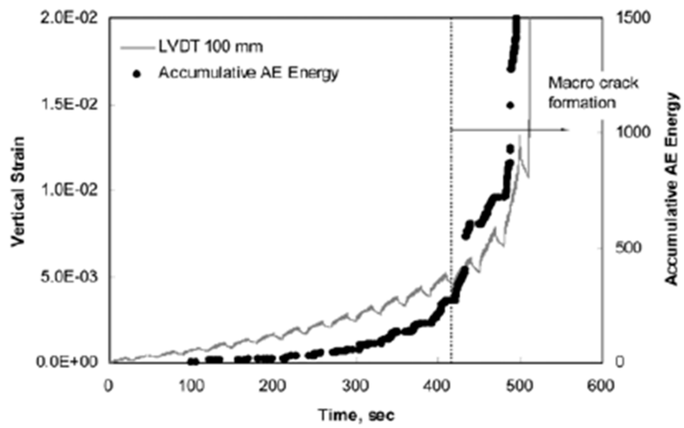
در حین آزمایش ضمن ثبت پارامترهای شمارش، انرژی، مدت زمان، دامنه و زمان اوج در انتشار آکوستیک، بار و جابجایی ثبت شده و با آنها نمودارهای زیر رسم و نتایج زیر گرفته شده است:



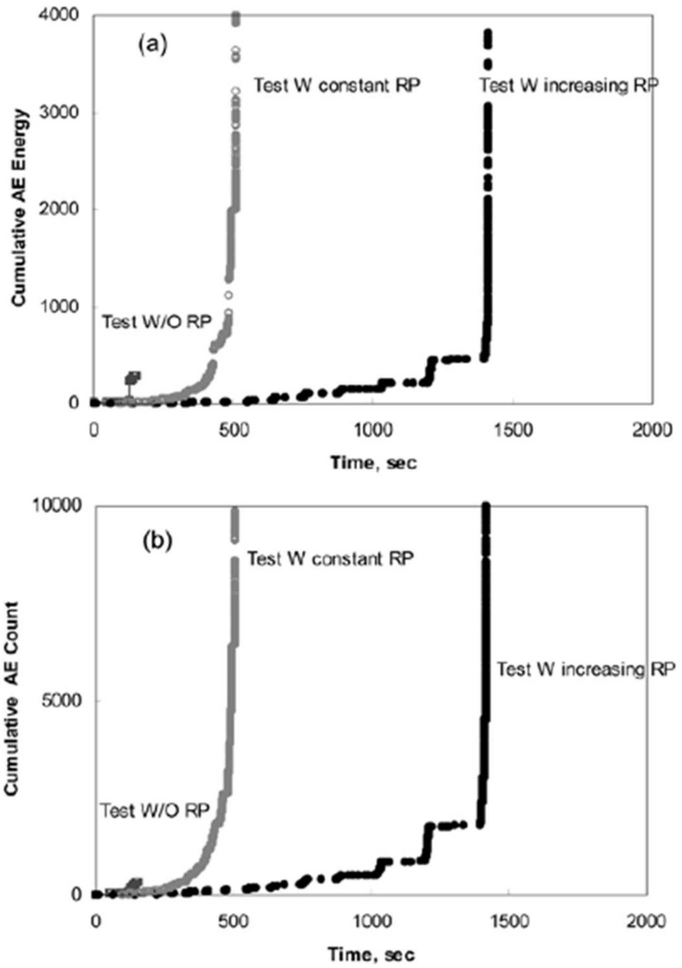
شکل ۳-۶.نمایش نتایج انتشارآکوستیک در آزمایش خستگی نوع ۱[20]

۱. زمان شکل گیری ترک‌ها بر اساس پارامتر شمارش انتشارآکوستیک، با جهش ناگهانی در این پارامتر تخمین زده شده است که در این آزمایش در نمونه نوع۱ در ثانیه حدود ۱۳۰ است.

۲. در آزمایش نوع۲ زمان شکل‌گیری ماکروترک بر اساس پارامتر تجمعی انرژی انتشارآکوستیک و به ثانیه ۴۲۰ افزایش یافته است.



شکل ۳-۷.نمایش انرژی تجمعی و کرنش عمودی با زمان در آزمایش خستگی نوع۲[20]

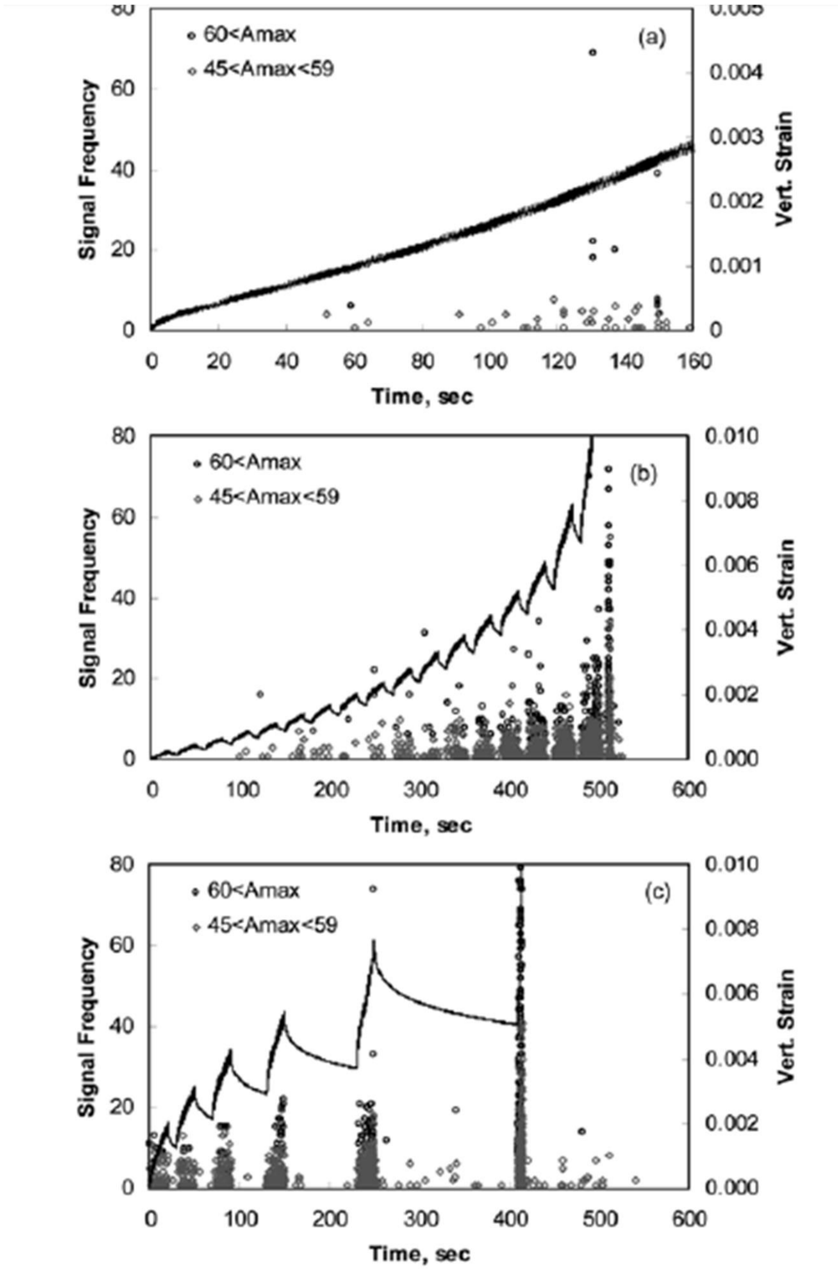


شکل ۳-۸.نمایش اثر زمان استراحت بر خستگی و خودترمیمی در آزمایش‌های نوع ۱و۲و۳[20]

a) **انرژی تجمعی انتشارآکوستیک**

b) **شمارش در انتشارآکوستیک**

۳. با افزایش زمان استراحت، عمر خستگی در نمونه ها افزایش و همینطور افزایش انرژی تجمعی کندتر می‌شود.



شکل ۳-۹.مقایسه حداقل و حداکثر دامنه فرکانسها در[20]

a) **آزمایش نوع ۱**

b) **آزمایش نوع ۲**

c) **آزمایش نوع ۴**

۴. با نتایج تحلیل دامنه-فرکانس امواج انتشارآکوستیک مشخص شده است که دامنه نمونه آسفالتی استفاده شده در این تحقیق رنجی بین ۴۵ تا ۵۹ داشته و دامنه بالاتر از ۶۰ نشانه‌ی پیدایش و شکل‌گیری ترکهاست.

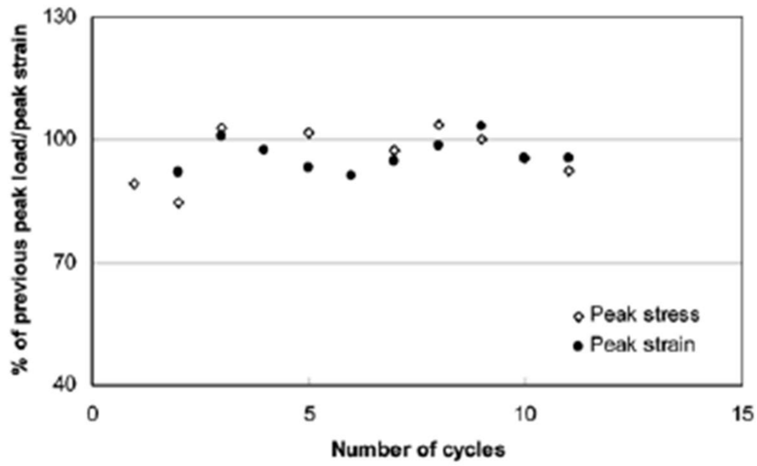


Fig. 9. Percentage of the Previous Maximum Stress and Strain Levels Showing Emissions in a Subsequent Cycle

شکل ۳-۱۰.نمایش درصد سطح کرنش و تنش ماکزیمم پیشین، برای انتشار در چرخه‌های متوالی[20]

۵. همانطور که قبلاً گفته شد کایزر که یکی از بنیانگذاران روش انتشار آکوستیک است در دومین فرض خود گفته است رخداد انتشارآکوستیک رخ نمی‌دهد مگر اینکه جسم به ماکزیمم تنش که در جسم قبلا ایجاد شده است، برسد و بعد از آن امواج انتشار آکوستیک ثبت خواهند شد و این فرض وی تحت عنوان اثر کایزر ثبت شده‌است. در این مطالعه نشان داده شده است که اثر کایزر در آسفالت برقرار نیست. همانطور که در شکل بالا (شکل ۳-۱۰) مشاهده می‌شود در آسفالت، برای اینکه رخدادهای انتشارآکوستیک شروع شوند، به جای رسیدن تنش به ماکزیمم تنش پیشین که قبلاً به نمونه وارد شده است، باید کرنش به کرنش ماکزیمم پیشین که قبلاً به نمونه وارد شده است برسد، تا رخدادهای انتشارآکوستیک شروع شوند.

۶. از پارامترهای انتشارآکوستیک، شمارش و انرژی تجمعی پارامترهای مفید و با ارزشی در شناسایی پدیده خودترمیمی و فرآیند خرابی خستگی در آسفالت می‌باشند.

۳-۴ مطالعه لی[1] و ماراستینو[2] (۲۰۱۰)[۲۱]

لی و ماراستینو به بررسی ناحیه گسیختگی در مخلوط‌های آسفالتی بر اساس ترکهای موئی ریز آنها و با استفاده روش انتشار آکوستیک پرداختند. علت مطالعه آنها مهم بودن ترکهای حرارتی ناشی از دمای پایین در آب و هوای شمالی بود که این خرابی‌ها، بدتر شدن وضعیت روسازی و نیاز به نگهداری و ترمیم زودتر از موعد پیش‌بینی شده را افزایش می‌دهند. در این مطالعه هفت مخلوط آسفالتی که فاکتورهای مهم و متفاوتی همچون نوع سنگدانه، درصد هوا و مقدار قیر را شامل می‌شدند تحت آزمایش گسیختگی نیم دایره قرار گرفتند. این آزمایش در سه نوع بارگذاری و با سه شکاف متفاوت در نمونه انجام شد تا تأثیر آنها نیز بررسی شود و این فرآیند شکست توسط سیستم انتشار آکوستیک با ۸ کانال متفاوت بررسی شد. روش مورد استفاده برای این مطالعه روشی بود که اوتسکو و همکاران در سالهای قبل برای بررسی رفتار ناحیه گسیختگی در مواد بتنی استفاده کرده بودند (روش آنها به این ترتیب بود که انرژی هر رخداد انتشار آکوستیک محاسبه و مستطیلی با محل رخداد انتشار آکوستیک هایی با بیشتر از ۹۵٪ انرژی محاسبه شده تمام رخداد ها، به عنوان ناحیه گسیختگی انتخاب شد). شبیه سازی عددی با نتایج آزمایش کشش غیر مستقیم انجام و با نتایج حاصل از آزمایش انتشار آکوستیک مقایسه شد، که نشان داد نتایج آنها با هم سازگاری و مطابقت دارد و اندکی تفاوت با توجه به محدودیت‌های روش شبیه سازی قابل توجیه بود. در این آزمایش سعی بر این شد که نمونه‌ها طوری طراحی شوند که فاکتورهایی که مهمترین تأثیر را دارند در مخلوط آسفالتی شامل و اثر سایر فاکتورها نیز حذف شود.

نمونه‌ها مخلوط‌های آسفالتی استوانه‌ای با قطر ۱۵۰ میلی متر و ارتفاع ۱۷۷ میلی متر بودند که با استفاده از روش تراکم ژیراتوری روسازی در آزمایشگاه متراکم شدند. هر کدام از نمونه‌ها از وسط به دو قسمت و همچنین از ارتفاع هم به نمونه‌هایی با ارتفاع ۲۵ میلی‌متر تقسیم شده‌اند تا نمونه‌های

[1] Xinjun Li
[2] Mihai Marasteanu

خمش نیم دایره‌ای به وجود بیاید و شکافهای با عرض ۲ و طول ۱۵ میلی‌متر نیز در آنها ایجاد شده-است. برای بررسی اثر شکاف در گسیختگی در نمونه ها شکافهایی با طول ۵ و ۳۰ میلی متر هم نیز ایجاد شد.

دماهای آزمایش عبارتند از:

TL: ۱۲ درجه زیر دمای TM

TM: دمای عملکردی پایین قیر ۱۰ +

TH: ۱۲ درجه بالای دمای TM

در این مطالعه سه نوع قیر با دو عملکرد متفاوت در این آزمایش استفاده شده است. قیر ۲۸-۵۸ ساده، قیر ۲۸-۶۴ ساده و اصلاح شده. دو نوع سنگدانه متفاوت گرانیت و آهک که خواص فیزیکی و مکانیکی متفاوتی دارند در این مخلوط‌ها بکار گرفته شده‌اند. بزرگترین اندازه سنگدانه‌ها 12/5 میلیمتر است. دو سطح فضای خالی ۴درصد و ۷درصد برای مطالعه اثر درصد فضای خالی بر گسیختگی انتخاب شده-است. دو مقدار درصد طراحی و درصد طراحی 0/5± برای بررسی اثر مقدارقیر به کار گرفته شده-است. همه‌ی مخلوط‌ها با استفاده از روش طراحی روسازی مشخص شده در sp2 وبا استفاده از تراکم ژیراتوری متراکم شدند.

جدول۳-۲ اجزای تشکیل‌دهنده این هفت مخلوط آسفالتی را نشان می‌دهد. قسمت اول حد بالای عملکردی قیر را و قسمت دوم ساده یا اصلاح شده بودن قیر را نشان می‌دهد. قسمت سوم درصد فضای خالی، قسمت چهارم نوع سنگدانه و پنجمین قسمت آن برای نشان دادن مخلوط ها با درصد قیر بیشتر از درصد طراحی می‌باشد.

جدول ۳-۲. اجزای تشکیل‌دهنده هفت مخلوط آسفالتی [21]

Mixture ID	Binder and modifier	Air voids		Asphalt content		Aggregate		Test temperature, °C
		4%	7%	Design	Design+0.5%	Granite	Limestone	
58:P:4:G	PG58-28 Plain	X		X		X		
58:P:4:G+0.5		X			X	X		
58:P:4:L		X		X			X	−6
58:P:4:L+0.5		X			X		X	−18
58:P:7:L			X	X			X	
64:P:4:L	PG64-28 Plain	X		X			X	−30
64:S:4:L	PG64-28 SBS	X		X			X	

جدول ۳-۳ نیز دانه بندی مصالح سنگی این هفت مخلوط آسفالتی را نشان می‌دهد:

جدول ۳-۳. دانه بندی مصالح سنگی نمونه‌ها[21]

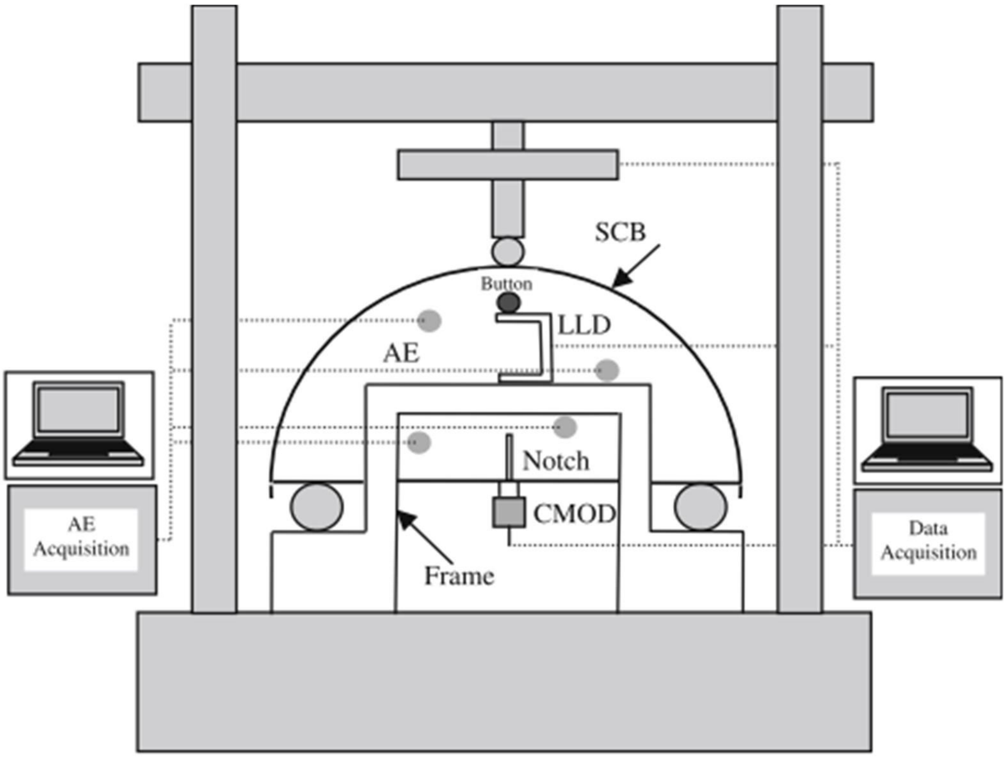
Sieve size (mm)	Percent passing	
	Granite	Limestone
19	100	100
12.5	95.2	97.2
9.5	83.5	79.1
4.75	65.2	59.6
2.36	47.1	48.6
1.18	33.4	38.6
0.60	23.8	28.8
0.30	12.5	16.9
0.15	7.0	9.2
0.075	5.1	5.4

آزمایش‌هایی که بر روی نمونه‌ها انجام شد:

آزمایش خمش نیم دایره،

آزمایش کشش غیرمستقیم،

آزمایش انتشار آکوستیک.



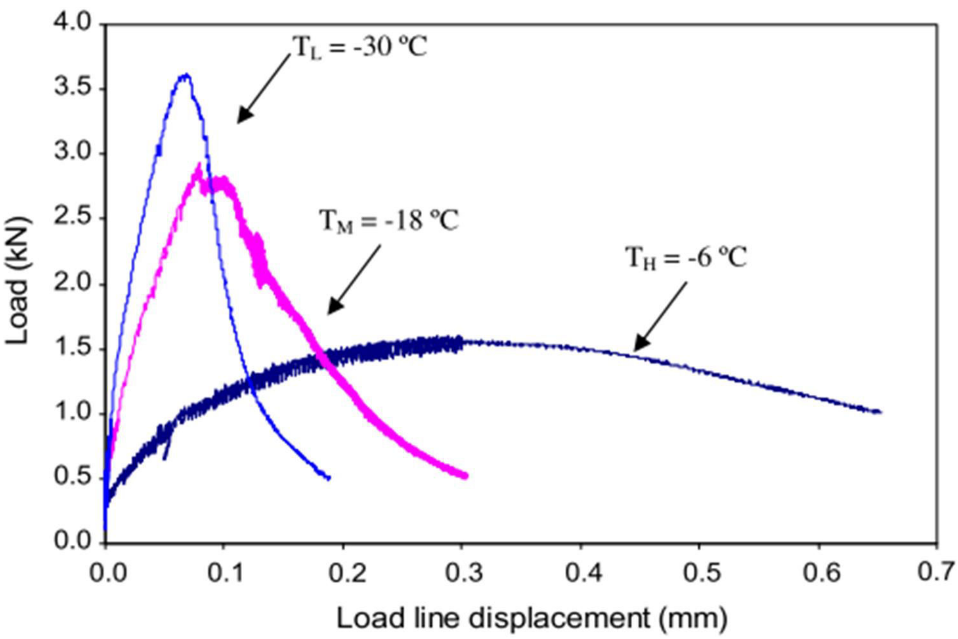
شکل ۳-۱۱. نمایی از روند آزمایش [21]

در طول آزمایش خمش نیم دایره، امواج رخداد انتشارآکوستیک توسط ۴کارت که هر کارت دو کانال غیر وابسته با ۸ سنسور پیزوالکتریک برای کسب امواج مشخص شده دارد، ثبت می‌شوند. هر ۴تا سنسور در یک طرف نمونه نصب شدند. تقویت امواج توسط هشت پیش تقویت‌کننده انجام و سپس امواج فیلتر شدند. محل امواج با بررسی تفاوت زمان بین رسیدن سیگنال به سنسورهای قرارگرفته در قسمت‌های مختلف نمونه پیدا می‌شود. بنابراین نیاز است که زمان رسیدن امواج به هر سنسور ثبت شود. امواج انتشار آکوستیک با آزادسازی انرژی از هر فرآیند آسیب در نمونه ایجاد می‌شوند و اندازه-گیری این انرژی به مقاومت گسیختگی ماده ربط داده می‌شود. انرژی الکتریکی امواج متناسب است با مربع ولتاژ و از رابطه زیر محاسبه می‌شود

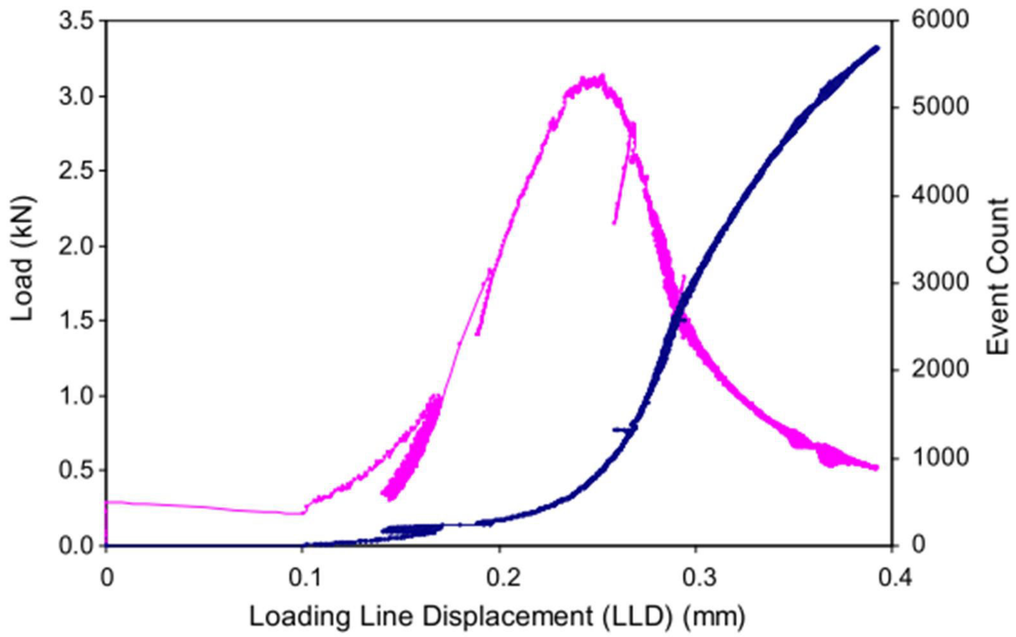
$$\square = \int_{0}^{t} \square^{2}\,(\square)\,\square \qquad (۱-۳)$$

نتایج:

۱.نتایج آزمایش‌های مکانیکی: بعد از انجام این آزمایش نمودارهای بار به جابجایی آنها هم در دماهای متفاوت و هم با نرخ رخدادهای انتشار آکوستیک آنها رسم شد. هر هفت نوع مخلوط تغییرات مشابهی در رفتار با دما و بارگذاری داشتند. در دماهای بالا رفتار منعطف تر و اوج بار کمتر و جابجایی بیشتری داشتند. در دماهای پایین شکننده‌تر بودند، اوج بار بیشتر و جابجایی کمتری داشتند و در دمای متوسط رفتاری بین این دو را از خود نشان دادند. همه مخلوط‌ها همچنین یک رفتار را با رخداد انتشار آکوستیک‌های ثبت شده نشان دادند. رخداد انتشار آکوستیک کمتری در دمای بالا ثبت شده و با کاهش دما افزایش یافته‌است. این نشان‌دهنده این حقیقت است که در دمای بالا قیر ویسکوز و منعطف‌تر است و گسیختگی آن تدریجی و رخداد انتشار آکوستیک کمتری دیده می‌شود.



شکل ۳-۱۲.نمودار‌باربه جابجایی در نتایج مکانیکی[21]



شکل ۳-۱۳.نمودار بار به جابجایی با رخدادهای انتشار آکوستیک در نتایج مکانیکی[21]

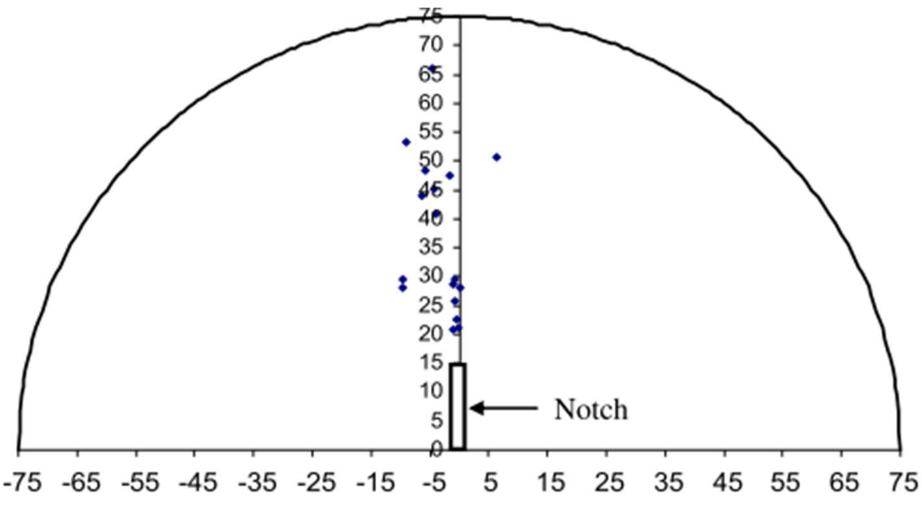
نتایج بررسی منطقه گسیختگی:

قبل از انجام این مطالعه این محققان دو روش را برای بدست آوردن منطقه گسیختگی درنظر گرفته بودند، اولی توسط لابوز[۱] و همکارش در سنگ[22] و دومی توسط اوتسوکا[۲] و همکارش در بتن[23] بکارگرفته شده بود. در نهایت در این مطالعه برای به دست آوردن سایز منطقه گسیختگی از انرژی رخدادها (روش اوتسوکا و همکارش) استفاده شد. انرژی هر رخداد انتشار آکوستیک به دست آورده شد و مستطیلی که بیشتر از ۹۵٪ انرژی‌های انتشار آکوستیک را در بر گرفته به عنوان منطقه گسیختگی در نظر گرفته شد[23]. بیشتر رخدادها انرژی کمی داشتند که نشان می‌داد مشارکت کمی در گسیختگی دارند. برای درک بهتر، انرژی را به چند سطح تقسیم کرده و رخدادها را بر اساس آن سطح انرژی‌ها تقسیم بندی کرده‌اند. در شکل‌های ۴تا ۷ به ترتیب محل شکل‌گیری رخدادها بر اساس انرژی E1,E2,E3,E4 را نشان داده است. همه شکل‌ها بیانگر این هستند که رخدادها با انرژی بیشتری تمایل به نزدیک بودن به خط خنثی (محلی که گسیختگی نهایی شکل می‌گیرد) را دارند. مگر اینکه

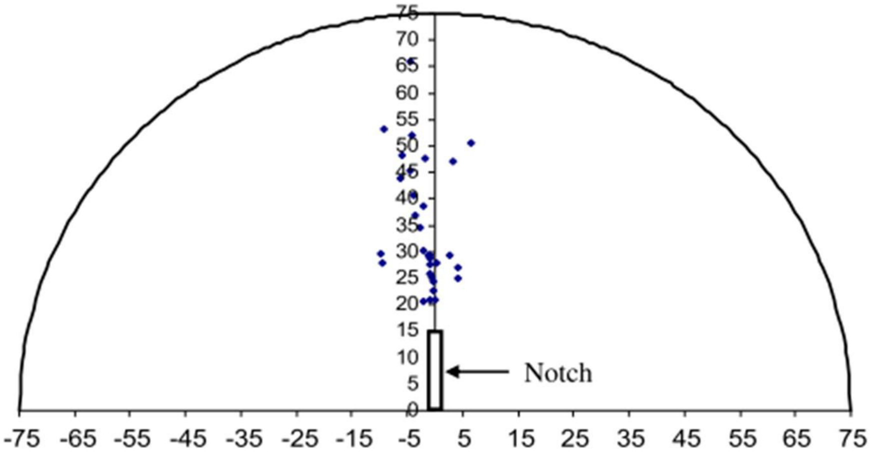
[1] J. F. Labuz
[2] K. Otsuka

جسم ناهمگن باشد که این محل اریب شود) تقریبا ۹۵٪ جمع کل انرژی انتشار آکوستیک قبل از اوج بار آزاد شده است. آنها با بررسی اثر فاکتورها بر روی سایز منطقه گسیختگی نتایج زیر را گرفتند:

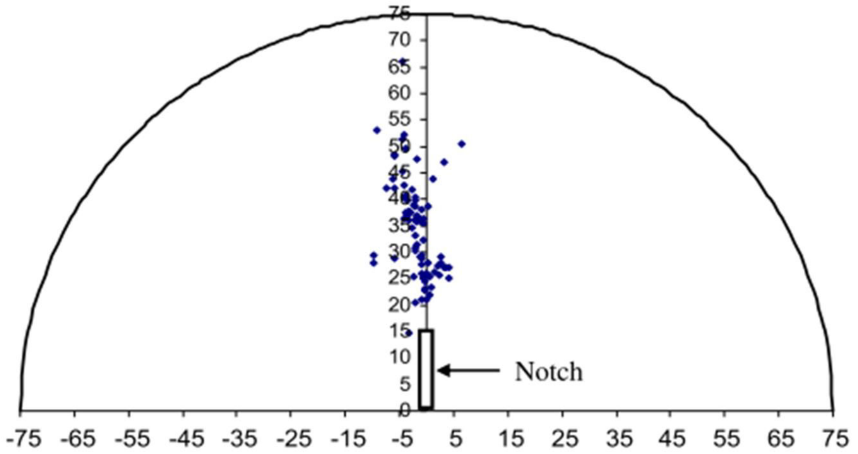
- منطقه گسیختگی در دماهای پایین نسبت به دماهای بالا دارای طول بیشتری است ولی در عرض تفاوت چندانی ندارند.
- این منطقه در سنگدانه‌هایی مانند سنگ آهک بسیار عریض‌تر از سنگدانه‌هایی مانند گرانیت است.
- منطقه گسیختگی در آسفالت با فضای خالی بیشتر بزرگتر از فضای خالی کمتر است.
- همچنین تفاوتی در منطقه گسیختگی‌های با درصدهای مختلف قیر مشاهده نشد.
- نرخ بارگذاری‌های متفاوت منطقه گسیختگی‌های یکسانی را هم در طول و هم در عرض بوجود آوردند.
- طول منطقه گسیختگی با کاهش طول شکاف به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش یافت.



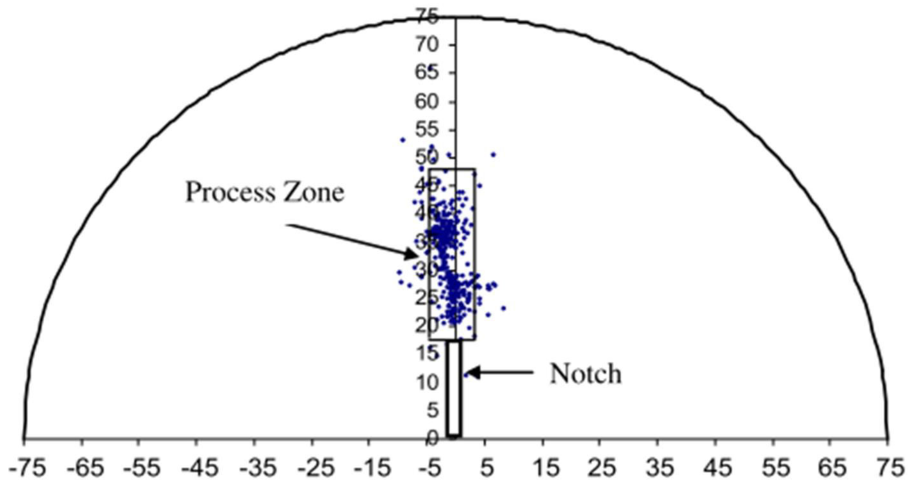
شکل ۳-۱۴.نمایی از منطقه گسیختگی در ۳۴درصد انرژی کل، قبل از حداکثر بارگذاری[21]



شکل ۳-۱۵.نمایی از منطقه گسیختگی در ۴۸درصد انرژی کل، قبل از حداکثر بارگذاری[21]



شکل ۳-۱۶.نمایی از منطقه گسیختگی در ۷۱درصد انرژی کل، قبل از حداکثر بارگذاری[21]



شکل ۳-۱۷.نمایی از منطقه گسیختگی در ۹۵درصد انرژی کل، قبل از حداکثر بارگذاری[21]

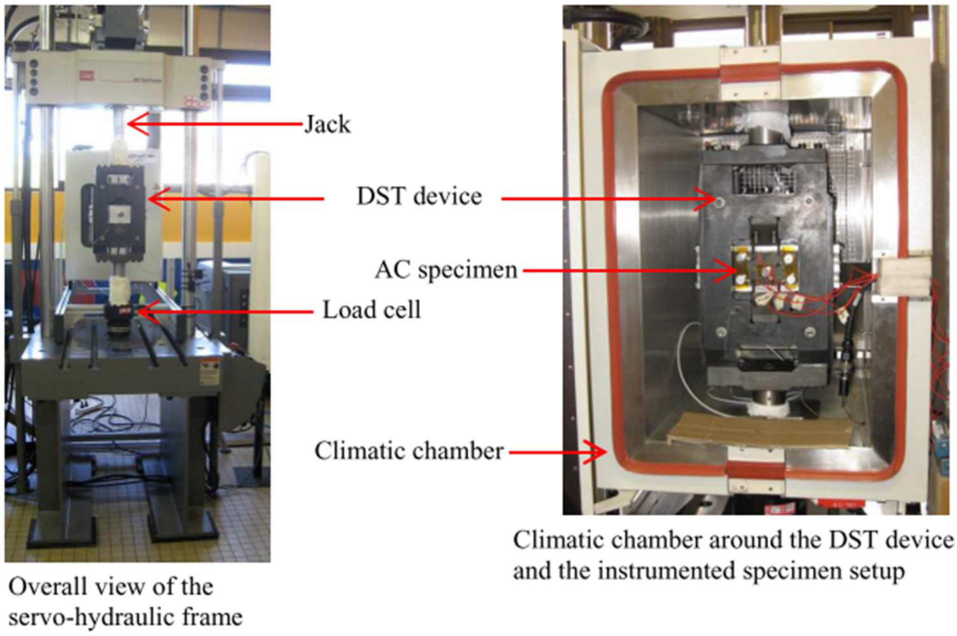
۳-۵ مطالعه نیکلاس لارچر[1] و همکاران (۲۰۱۲) [۲۴]

نیکلاس لارچر و همکاران با روش انتشار آکوستیک به بررسی سازوکار ترک‌های خستگی در مخلوط آسفالتی گرم پرداختند. آنها بیان کردند که پی بردن به سازوکار گسیختگی و ارزیابی خرابی آنها دو فاکتور مهم در طراحی بهتر سازه‌ها می‌باشد. آنها مطالعه خود را اولین تلاش تجربی برای استفاده از انتشار آکوستیک در تعیین مشخصات و رفتار بتن آسفالتی[2] تحت آزمایش بار گذاری سیکلی برشی دوبل بیان کردند.

در نمونه‌های مخلوط آسفالتی این مطالعه از قیر با درجه نفوذ ۳۵/۵۰ و بزرگترین اندازه سنگدانه ۶ میلی‌متر استفاده شده است که درصد قیر برابر 6/85 ٪ بوده است. این مخلوط آسفالتی بعد از اختلاط در دمای ۱۶۰ درجه سانتی گراد گرم شده و داخل قالب با ابعاد ۶۰۰، ۱۵۰ و ۴۰ میلی‌متر طول، ارتفاع و عرض ریخته شده و با استفاده از غلتک چرخ لاستیکی در ضخامت ۱۵۰ میلی متر متراکم شده است. سپس ازآن ۱۸ نمونه در ابعاد مشخص و مورد نیاز استخراج شده و شکافهایی با عمق ۱۰ میلیمتر در آنها ایجاد شده است.

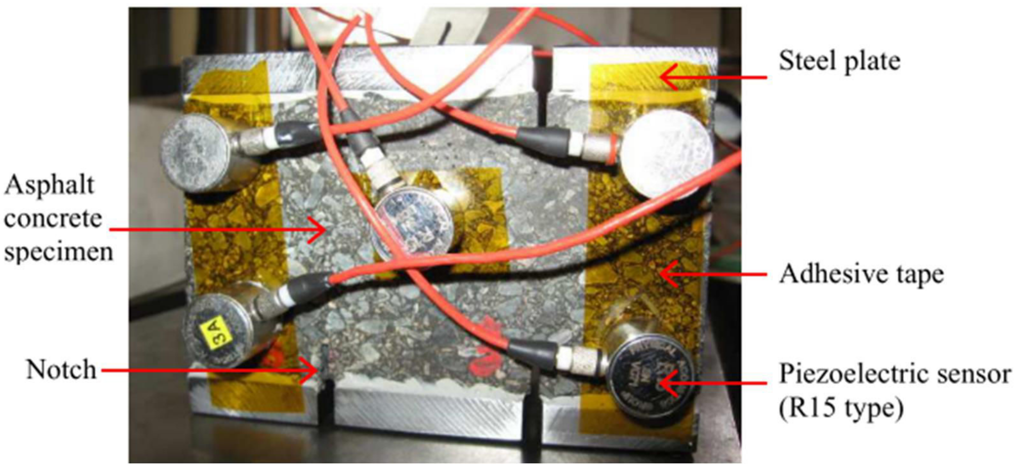
سپس بر روی نمونه‌ها آزمایش برشی دوبل انجام شده‌است. این ابزار در شکل زیر نشان داده شده‌است. نمونه از کناره‌ها ثابت و از وسط تحت بار سینوسی دینامیکی قرار گرفته‌است. آزمایش خستگی تحت کنترل نیرو ۱۰هرتز انجام شده است. مقدار نیرو با استفاده از سلول بار و مقدار جابجایی نسبی وسط و اطراف توسط یک اکستومتر اندازه گیری شده است. سیستم جمع آوری داده نیرو و جابجایی را ثبت می‌کند و همچنین دستگاه آزمایش در محفظه‌ای برای کنترل دما (که قرار است ۱۰درجه سانتی گراد باشد) قرار گرفته‌است.

---
[1] Nicolas Larcher
[2] Asphalt Concrete (AC)



شکل ۳-۱۸. نمایی از تجهیزات آزمایش[24]

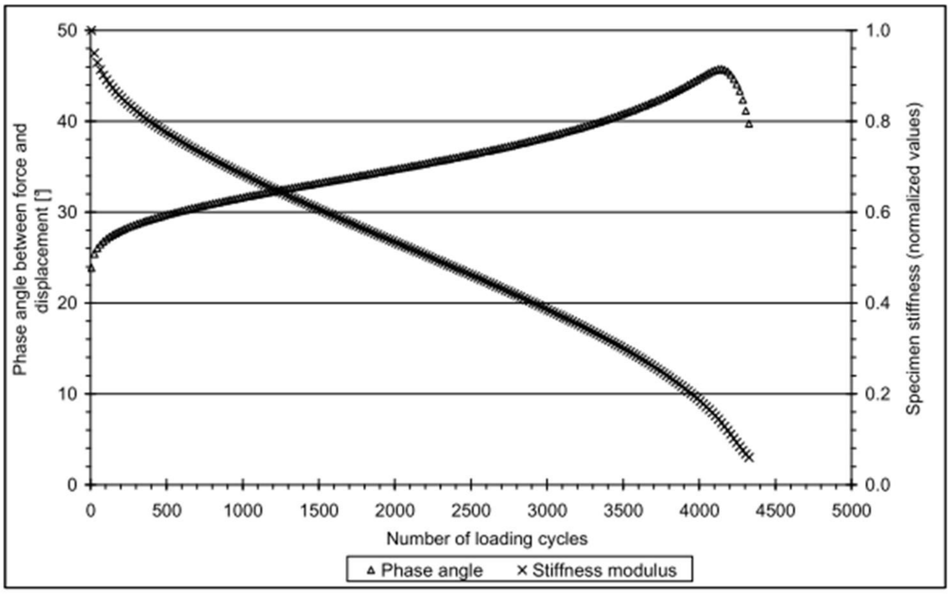
سیستم انتشار آکوستیکی که برای آزمایش استفاده شده‌است سیستم اکوستیک فیزیکی اروپایی که شامل ۵ سنسور بود. نحوه پیکربندی نمونه طوری انتخاب شده‌است که رخدادهای انتشارآکوستیک در صفحه xy و رشد ترکها در نزدیکی شکافها قابل بررسی باشد. این سیستم می‌تواند دمای بین ۶۵- تا ۱۷۵ درجه سانتی گراد و وزن ۳۴ گرم را کنترل کند.



شکل ۳-۱۹. نمونه آزمایش[24]

تحلیل مکانیکی:

در هر دوره بارگذاری در آزمایش سختی برشی اندازه گیری و محاسبه شده‌است. سپس نمودار بارگذاری به سختی آن رسم می‌شود. روند کاهش مدول سختی در آزمایش شامل سه قسمت می‌شود:



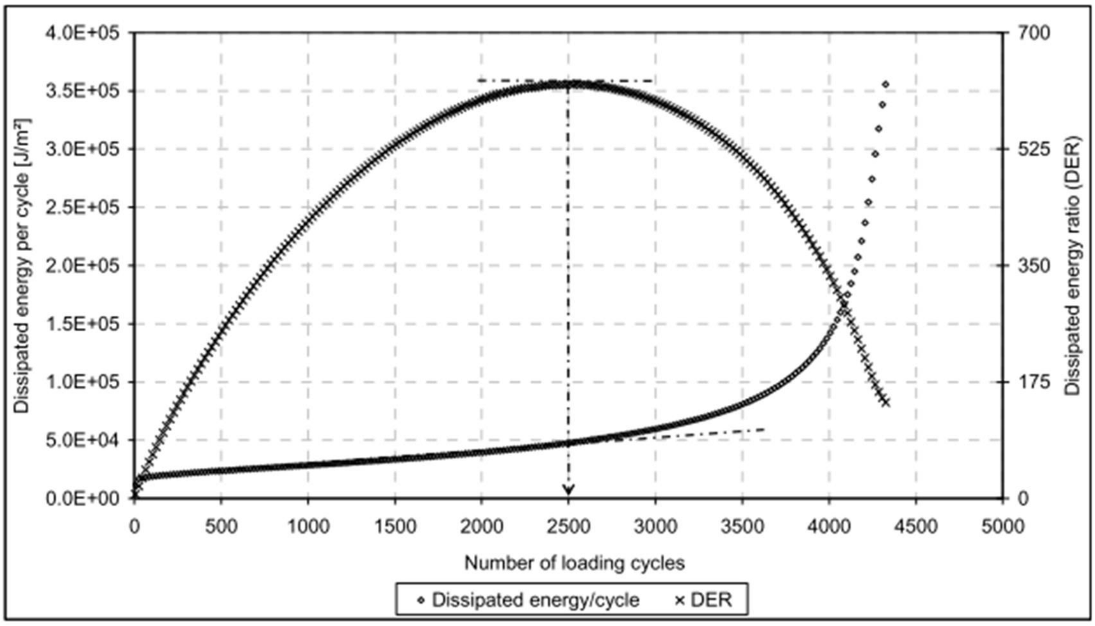
شکل ۳-۲۰.روند کاهش مدول سختی[24]

۱.کاهش سریع و افت به میزان تقریبا ۱۵٪ مقدار اولیه خود

۲.کاهش سختی برشی به آرامی و پیدایش ترکهای موئی

۳. این قسمت کوتاهتر از قسمت ۲ است که نشان‌دهنده کاهش سریع سختی خمشی و رشد سریع ترکها در آسفالت است

از این تحلیل برای رسم انرژی استهلاک شده در چرخه های بارگذاری استفاده شد. سپس از روند استهلاک انرژی برای بررسی تعداد چرخه های بار برای گسیختگی نمونه استفاده شده‌است. سپس انرژی مستهلک شده در هر دوره و نرخ استهلاک انرژی با تعداد چرخه‌های بارگذاری رسم شده‌است.



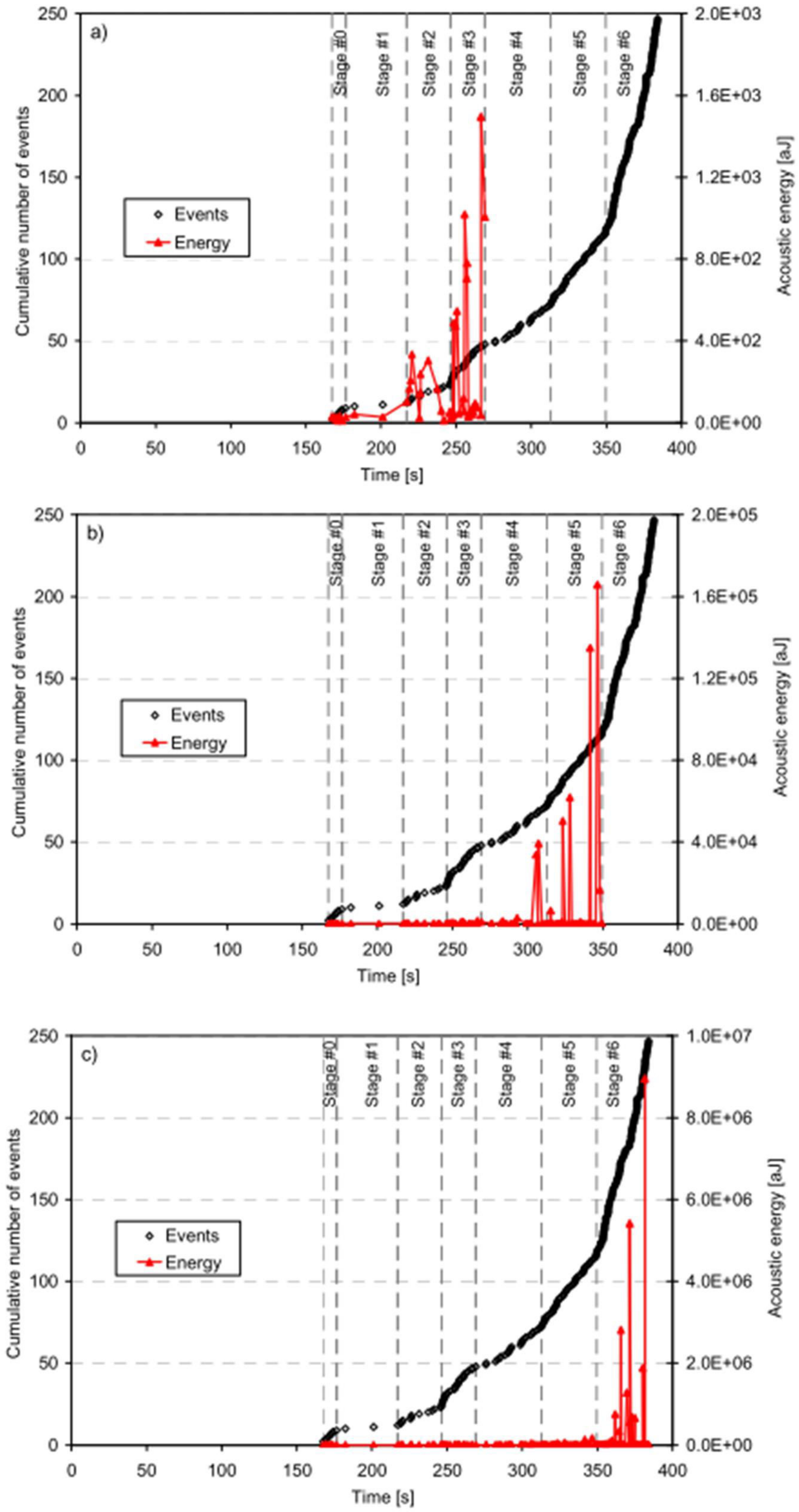
شکل ۳-۲۱. نمودار انرژی مستهلک شده در هر دوره و نرخ استهلاک انرژی[24]

درآخر تعداد چرخه های لازم برای گسیختگی نمونه به صورت زیر محاسبه شده است:

۱.بر اساس سختی خمشی: تعداد چرخه‌هایی که سختی به مقدار یک دوم اولیه خود می‌رسد.

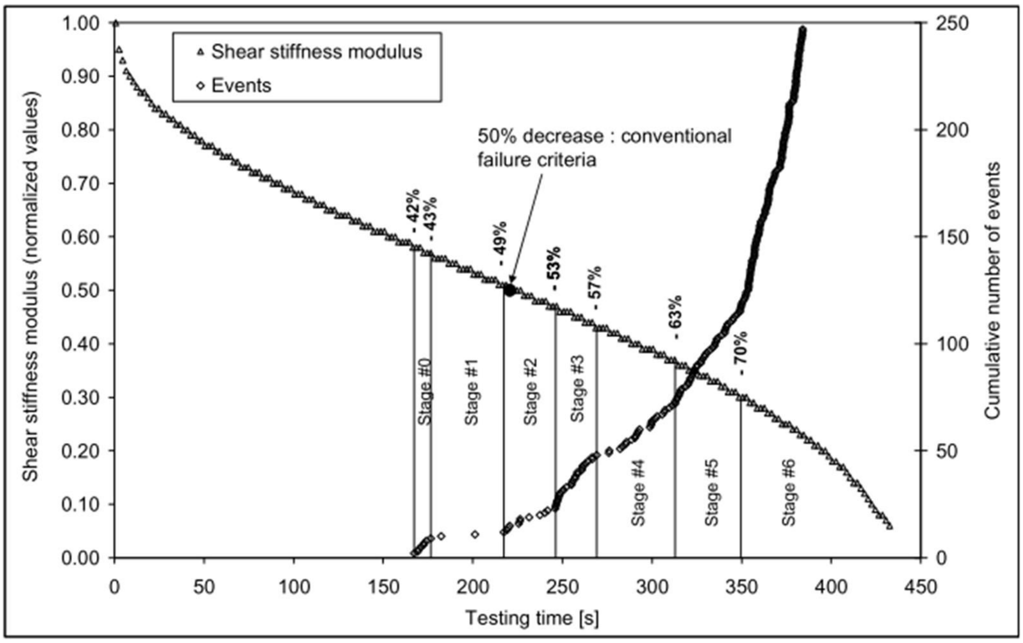
۲.بر اساس نرخ انرژی مستهلک شده: نقطه عطف نمودار که افزایش به کاهش تبدیل شده‌است.

تحلیل انتشار آکوستیک: در این تحلیل نمودار رخدادهای انتشارآکوستیک و انرژی آن با زمان رسم شده‌است. این نمودار دارای چندین بخش است که از هر مرحله به مرحله بعد با افزایش رخدادها و انرژی همراه است و دیده شده‌است که رخدادها با انرژی بیشتر در آخر آزمایش و در زمان پیدایش ترکهای موئی اتفاق افتاده است.



شکل ۳-۲۲. نمودار رخدادهای انتشار آکوستیک و انرژی آن با زمان[24]

در آخر این مطالعه نمودار زیر برای مقایسه دو تحلیل نتایج و ارتباط آنها رسم شده است:



شکل ۳-۲۳. نمودار تغییرات مدول سختی و رخدادهای انتشارآکوستیک به زمان[24]

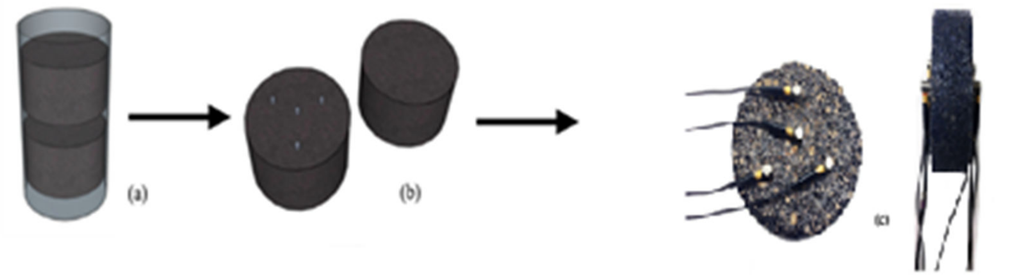
۳-۶ مطالعه سان[1] و همکاران (۲۰۱۶) [۲۵]

سان و همکاران در سال ۲۰۱۶ به بررسی اثر جوانسازها در بهبود دمای ایجاد ترکهای برودتی مخلوط-های آسفالتی پرداختند. آنها ترکهای ناشی از دمای پایین را بررسی کردند. علت مطالعه آنها این بود که یکی از اصلی‌ترین دلیل‌هایی که منجر به گسیختگی مخلوط‌های آسفالتی می‌شود کاهش چسبندگی بین سنگدانه و قیر است. این کاهش چسبندگی که به دلیل پیرشدن مخلوط آسفالتی است منجر به افزایش سختی و کاهش انعطاف پذیری در آسفالت می‌شود که در نتیجه آن مقاومت روسازی به طرز چشمگیری کاهش می‌یابد و باعث به وجود آمدن ترکها در روسازی می‌شود. سان و همکاران با استفاده از روش محل رخدادها در آزمایش انتشار آکوستیک، اثر جوانسازها را در آسفالتهای پیر شده با ۲ ، ۴ و ۶ و ۸ هفته ماندگاری بررسی کردند.

نمونه‌های مخلوط آسفالتی در این مطالعه با بزرگترین سایز سنگدانه ۱۹ میلی‌متر و مصالح سنگی متشکل از ۶۵درصد درشت دانه، ۲۳درصد ماسه مصنوعی، 10/5 درصد ماسه مصنوعی نوع دیگر و 1/5 درصد فیلر ساخته شدند. 5/9 درصد وزن کل مخلوط از قیر PG 64-22 برای ساخت نمونه استفاده شد. این ترکیب برای ۲ساعت در کوره قرار گرفته است تا به صورت کوتاه مدت پیرشدگی قیر شبیه سازی شود. بعد از پیری کوتاه مدت، مخلوط در ۴کفه ریخته شده است که بر روی سه کفه آنها پیر شدگی بلندمدت (به صورت ۳۶ساعت در دمای ۱۳۶ درجه سانتی گراد) انجام شد و نمونه آخر تحت عنوان دست نخورده عملی روی آن صورت نگرفت. این مخلوط بعد از آن در قالب‌های استوانه‌ای با قطر ۱۵۰ و ارتفاع ۱۲۰ میلی متر ریخته و متراکم شدند. بعد از سرد شدن و آماده شدن نمونه‌ها آنها را به نمونه‌هایی با ارتفاع ۵ سانتی متر برش داده شده‌اند. در آخر هم سطح نمونه‌ها صاف شد تا محل مناسبی برای سنسورها بوجود بیاید. قرارگیری سنسورها بر روی نمونه‌ها باید به نحوی باشد که همه قسمت‌های نمونه تحت کنترل قرار گیرد. جرم این نمونه‌ها اندازه‌گیری می‌شود که 5/9 درصد وزن هر

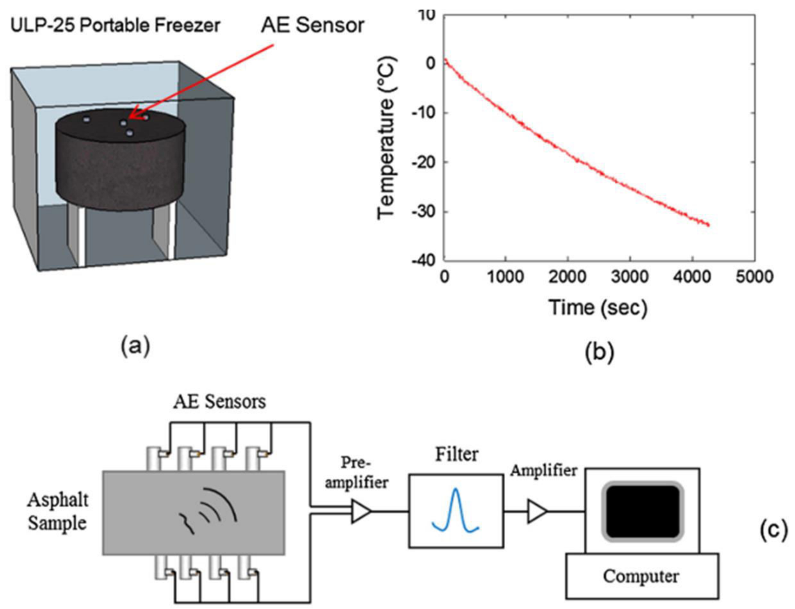
[1] Zhe Sun

نمونه قیر است و ۱۰درصد وزن قیر به آن جوانساز اضافه شود. سپس بر روی نمونه‌ها به ترتیب بعد از ۲، ۴، ۶ و ۸ هفته، آزمایش انتشارآکوستیک انجام شده است.



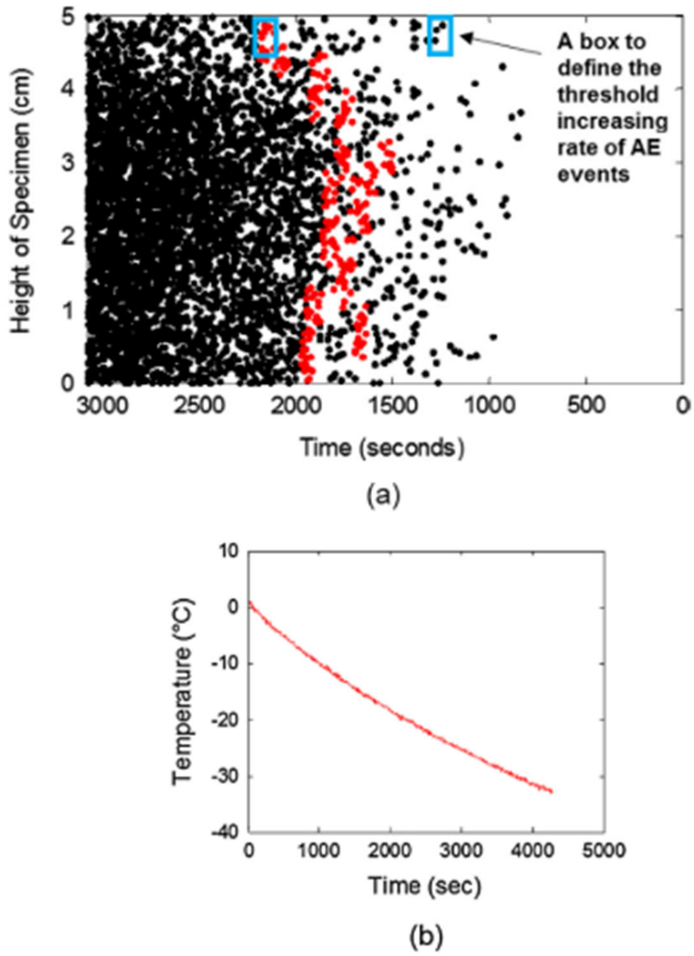
شکل ۳-۲۴.روند ساخت نمونه آزمایش[25]

آزمایش به این صورت انجام شد که نمونه در فریزر قرار گرفت تا دمای آن، از دمای اتاق به ۳۵- کاهش یابد. همزمان با کاهش دما، دمای نمونه توسط ترموکوپل‌های متصل به آن ثبت شد. در همین زمان امواج تولید شده در نمونه‌ها که به دلیل تنش‌های بوجود آمده ناشی از کاهش دما در نمونه بوجود آمدند توسط سنسورها دریافت و پس از فیلتر، تقویت و تبدیل از آنالوگ به دیجیتال، برای بررسی توسط نرم افزارهایی همچون کاوشگر سیگنال ثبت و نمایش داده شدند.



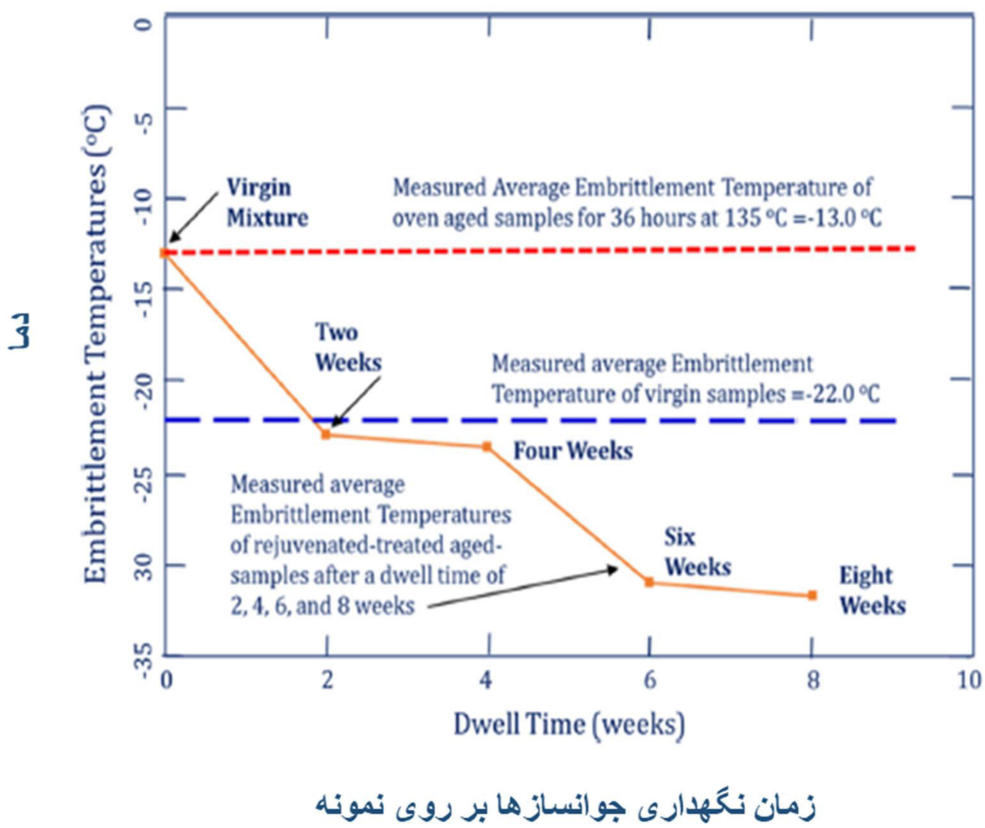
شکل ۳-۲۵. روند انجام آزمایش[25]

از اطلاعات امواج برای بدست آوردن مختصات محل منبع‌ها استفاده شد که برای اینکار دو روش خطی و غیرخطی وجود دارد. چون روش خطی معتبرتر است، در این آزمایش از این روش استفاده و محل منبع ها رسم شده‌است. از ابتدای رخدادها شروع به رسم مستطیلی با ابعاد 5 cm طول و ۶۰ ثانیه عرض شده است تا مستطیلی رسم شود که بتواند ۱۰ منبع رخداد انتشار آکوستیک را در بر گیرد. این مستطیل منطقه شروع افزایش نرخ رخدادهای انتشارآکوستیک است که دمای متناظر با ثانیه‌ی آن را از روی نمودار دما خوانده و به عنوان دمای ایجاد ترکهای برودتی در نظر گرفته شده است.



شکل ۳-۲۶. نحوه انتخاب دمای ایجاد ترکهای برودتی با توجه به رخدادهای انتشارآکوستیک و زمان[25]

نتایج محل منبع‌ها نشان داد که دمای ایجاد ترکهای برودتی نمونه مخلوط آسفالتی گرم ۳۶ ساعت پیر شده، برابر ۱۵- درجه سانتیگراد و دمای نمونه دست نخورده آن ۲۲- درجه سانتیگراد است. در زمانی که از جوانسازها استفاده می‌شود دوباره دمای ایجاد ترکهای برودتی آن بهبود یافته و کاهش می‌یابد به طوری که بعد از ۲ تا ۴ هفته نگهداری، دمای ایجاد ترکهای برودتی آن به حالت دست-نخورده بهبود یافته و حتی بعد از مدت نگهداری ۶ تا ۸ هفته دمای ایجاد ترکهای برودتی آن خیلی بیشتر بهبود می‌یابد و ۹ درجه کمتر از حالت دست نخورده آن و تقریباً برابر ۳۱ – درجه سانتیگراد خواهد شد.

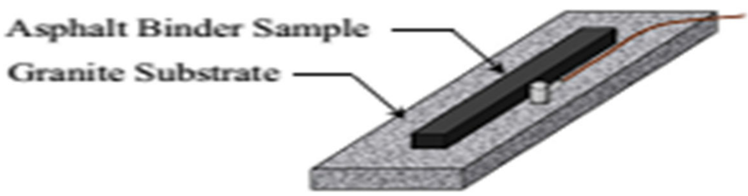


شکل ۳-۲۷. نمایی از روند بهبود دمای ایجاد ترکهای برودتی نمونه‌ها باگذشت زمان[25]

۳-۷ مطالعه بهنیا[1] و همکاران(۲۰۱۶) [۷]

بهنیا و همکاران در سال ۲۰۱۶ ضعف حرارتی مواد آسفالتی را با استفاده از روش انتشار آکوستیک ارزیابی کردند. بر اساس مطالعه آنها ترکها در روسازی یکی از رایج ترین خرابی‌ها هستند که منجر به وخامت و مرگ زودرس روسازی می‌شود و همچنین اگر به موقع ترمیم نشوند عمر روسازی را کاهش و هزینه های زیادی به بار می‌آورند. آنها با بکار بردن روش انتشار آکوستیک عملکرد قیر را در دمای پایین بررسی کردند.

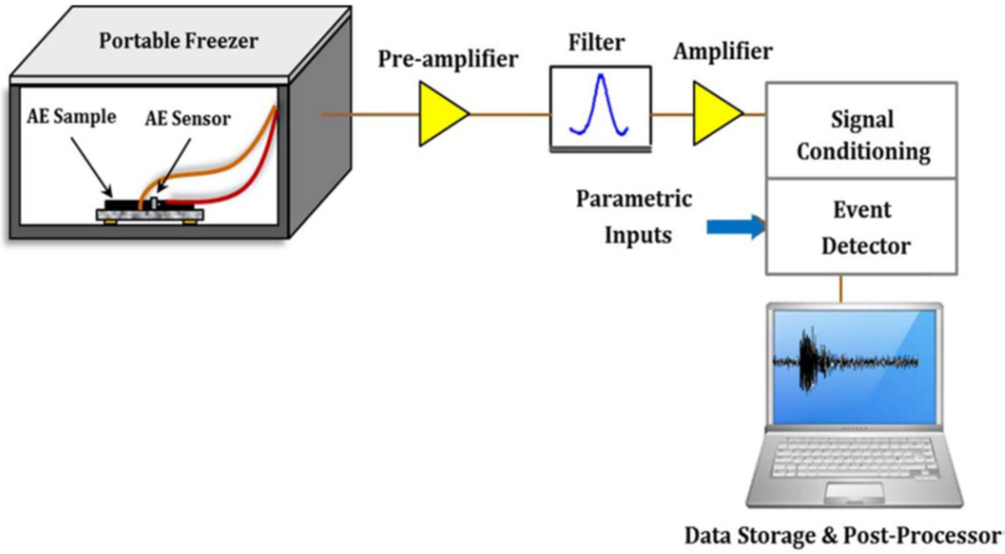
نمونه در آزمایش انشار آکوستیک شامل یک لایه نازک قیرآسفالتی که به یک لایه گرانیتی متصل شده‌است می‌شود. نمونه‌های آسفالتی انتشار آکوستیک (با۶ میلی‌متر ضخامت) در قالب‌های آلومینیومی یکسان با آزمایش رئومتر تیرچه خمشی[2] آماده شدند. یک دال گرانیتی (با ضخامت ۱۰میلی‌متر) به عنوان زیر لایه استفاده شد. برای اطمینان از اتصال این دو قطعه زیر لایه گرانیتی تا دمای ۱۳۵ درجه سانتی گراد گرم شد سپس لایه آسفالت هم که تا دمای ۱۳۵ درجه سانتی گراد گرم شده بود در قالب ریخته می‌شود. اجازه داده می‌شود تا نمونه آماده شده برای دو ساعت قبل از اینکه آزمایش انجام شود هم دمای اتاق سرد شود.



شکل ۳-۲۸. نمونه آزمایش[7]

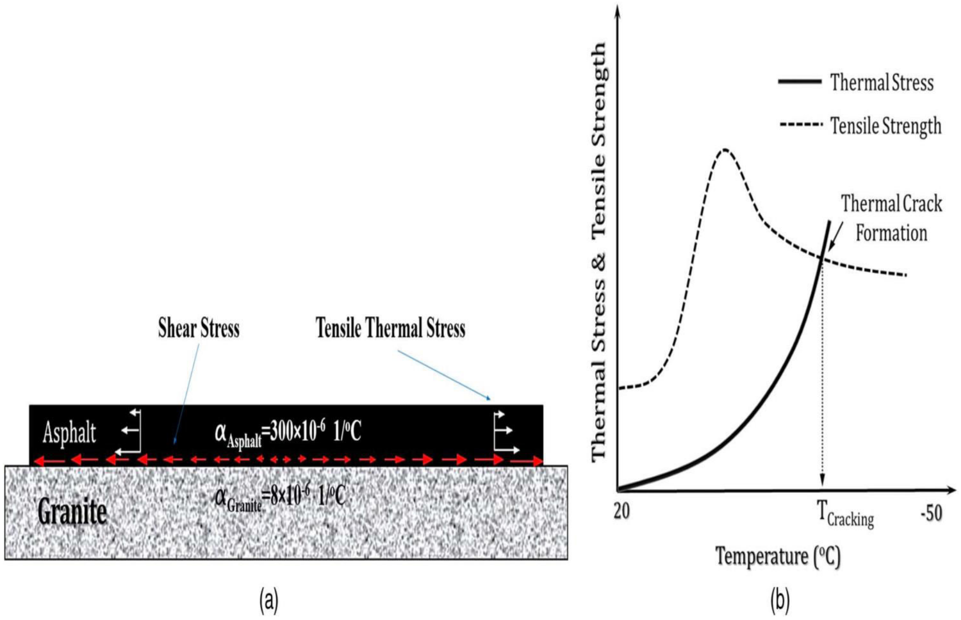
[1] Behzad Behnia
[2] Bending Beam Rheometer (BBR)

برای انجام این آزمایش نمونه آماده شده در فریزر قابل حمل قرار گرفته تا دمای آن از ۲۰ به ۵۰- کاهش داده شود و سپس فرآیند کاهش دما توسط سیستم انتشار آکوستیک کنترل شد.



شکل ۳-۲۹. روند آزمایش[7]

میانگین ضریب انقباض حرارتی لایه آسفالتی تقریبا ۳۸ مرتبه بزرگتر از لایه گرانیتی است. ناشی از این تفاوت بین ضرایب انقباض حرارتی لایه‌ها و با کاهش دمای نمونه تنش‌های ناشی از حرارت در نمونه به وجود می‌آید. شکل زیر تنش‌های برشی که ناشی از حرارت در نمونه وقتی در معرض کاهش دما قرار می‌گیرد بوجود آمدند را نشان می‌دهد. تنش‌هایی که به تدریج افزایش می‌یابند درآخر منجر به ایجاد ترکهای حرارتی می‌شوند که با آزادسازی انرژی کرنشی الاستیک در فرم امواج مکانیکی گذرا همراه هستند. شکل بعد تغییرات تنش حرارتی و مقاومت کششی در نمونه ناشی از کاهش دما را نشان می‌دهد. ترکهای حرارتی جهتدار معکوس در ماده وقتی تنش حرارتی با مقاومت کششی برابر می‌شود بوجود می‌آیند. به عبارت دیگر دمای بوجود آمدن ترک برابر است با دمای نقطه تقاطع دو منحنی تنش و مقاومت.

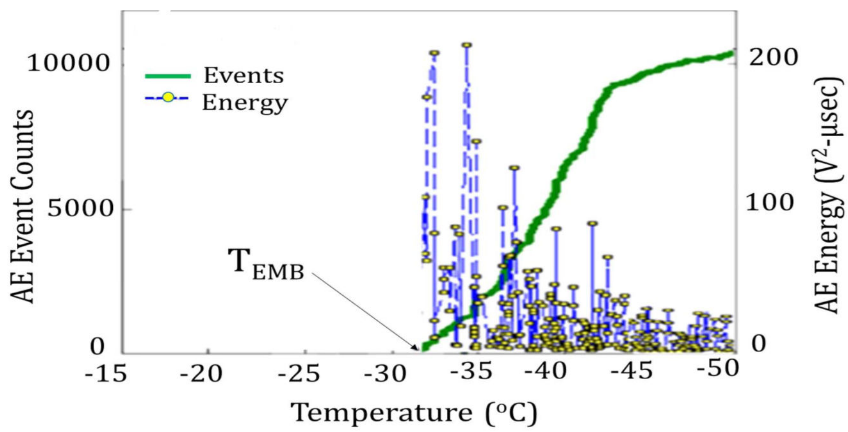


شکل ۳-۳۰. مکان و زمان پیدایش ترکهای حرارتی[7]

a) **مکان پیدایش ترکهای حرارتی در نمونه ناشی از تفاوت انقباض حرارتی**

b) **زمان پیدایش ترک حرارتی با توجه به تنش و مقاومت در نمونه**

آنها با ولتاژ هر سیگنال، انرژی آن و با انرژی هر سیگنال دمای ضعف حرارتی قیر را بدست آوردند. دمای متناظر با اولین رخداد انتشار آکوستیک به عنوان دمای ایجاد ترکهای برودتی تعریف شد.



شکل ۳-۳۱. نمایی از دمای ایجاد ترکهای برودتی در نمونه با انرژی و رخداد انتشارآکوستیک[7]

در این مطالعه نتایج حاصل از آزمایش انتشار آکوستیک با آزمایش‌های کشش مستقیم و آزمایش رئومتر تیرچه خمشی مقایسه شد. از مقایسه نتایج حاصل از آزمایش انتشارآکوستیک با آزمایش رئومتر تیرچه خمشی، دمای ایجاد ترکهای برودتی مقدار کمی کمتر از دمای بحرانی بدست آمده بود که نشان می‌دهد نتایج حاصل از روش انتشار آکوستیک دقیق‌تر و نسبت به سایر روش‌های موجود سریعتر می‌باشد. همچنین هیچکدام از روش‌های پیشنهادی یا موجود همه ویژگی‌های این آزمایش مانند قابل حمل بودن، مناسب برای انجام در محل و ... ندارند. برمبنای این مطالعه می‌توان گفت که روش انتشار آکوستیک می تواند جایگزین قابل اعتمادی برای روشهای ارزیابی آشتو در تعیین مشخصات ترکهای حرارتی باشد. مخصوصاً وقتی آزمایش کشش مستقیم نیاز است می‌تواند مزایای زیادی داشته باشد.

۳-۸ مطالعه یوبُ جیائو وهمکاران[1] (۲۰۱۸)[۲۶]

این محقق و همکارانش اعتقاد داشتند که آسفالت نفوذپذیر یک ماده روسازی موثر است که رواناب را در شهر کاهش می‌دهد و همچنین ارزیابی با انتشار آکوستیک می‌تواند ویژگی‌های خرابی مواد را تشخیص دهد تا از گسیختگی آنها جلوگیری کند. به همین دلیل در این مطالعه به ارزیابی فرآیند خرابی در آسفالت نفوذپذیر تحت آزمایش فشاری و کشش غیرمستقیم با استفاده از پارامترهای انتشار آکوستیک پرداختند. در ابتدا نمونه‌ها با استفاده از روش تراکم مارشال ساخته و سپس تحت آزمایش قرار می‌گیرند و همزمان با آزمایش امواج انتشار آکوستیک برای بدست آوردن پارامترهای سیگنال مانند دامنه، انرژی و... ثبت و تحلیل می‌شوند. سپس این پارامترها و تجمعی آنها با زمان و بار تحلیل می‌شوند تا فرآیند گسیختگی نمونه‌ها تحت آزمایش مشخص شود. در آخر هم اثر دما برروی گسیختگی نمونه‌ها بررسی شد. نتایج نشان داد که پارامترهای انتشارآکوستیک توانست حالت‌های خرابی برای نمونه‌ها در آزمایش را نشان دهد و همچنین انرژی انتشار آکوستیک یک پارامتر مطلوب برای نشان دادن فرآیند گسیختگی در نمونه‌ها است. پارامترهای تجمعی انتشار آکوستیک هم جز در چند نقطه نتایج رضایت بخشی را نشان داد. تغییرات عملکردی مکانیکی نمونه های آسفالت نفوذپذیر منجر شد تا اثر دما با استفاده از پارامترهای انتشارآکوستیک به واضحی قابل شناسایی باشد و در آخر هم نتیجه گرفته شد که انتشارآکوستیک پتانسیل خوبی برای مشخص کردن فرآیند خرابی در آسفالت نفوذپذیر دارد.

نمونه‌ها در این مطالعه نمونه‌های استاندارد مارشال از آسفالت نفوذپذیر با بتن آسفالتی متخلخل با درصد قیر بهینه 4/8 درصد، درصد هوا 20/8 درصد، ضریب نفوذپذیری 0/294 cm/s بوده است. اجزا این نمونه‌ها که در شکل زیر نشان داده‌اند، عبارت است از: درشت دانه+ریزدانه+فیلرمعدنی+اصلاح‌گر استایرن بوتادین استایرن.

[1] Yubo Jiao

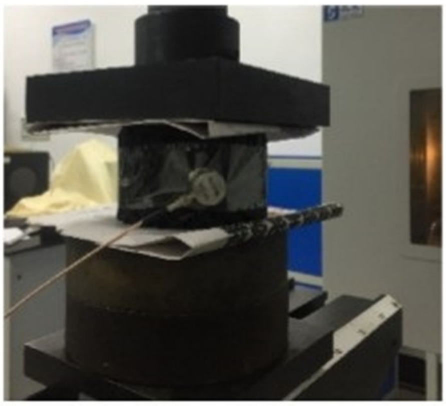
شکل ۳-۳۲. سمت چپ: شکل نمونه، سمت راست: نفوذپذیری نمونه[26]

دستگاهی که در این آزمایش استفاده شده دستگاه یونیورسال با مقدار بار ماکزیمم ۱۰۰کیلو نیوتن که در زیر نشان داده شده است. این دستگاه در یک محفظه‌ی دمایی برای کنترل دما بین ۲۰- تا۶۰ قرار گرفته تا آزمایش فشاری در دماهای۲۰ و۶۰ آزمایش کشش غیرمستقیم در دمای 10- و ۲۵ انجام شود. نمونه‌ها قبل از آزمایش به مدت ۶ ساعت در محفظه کنترل دما قرار می گرفتند تا از توزیع دمای یکنواخت در نمونه اطمینان حاصل شود. در یک طرف نمونه یک سنسور با سیگنال فرکانسی بین ۴۰۰تا۶۰کیلوهرتز قرار گرفت. آستانه شروع در این آزمایش برای ثبت امواج ۴۰دی بی[1] در نظر گرفته شده است و پارامترهایی که از انتشار آکوستیک برای بررسی ثبت شده‌اند عبارتند از: دامنه، شمارش، مدت زمان، اوج بار، انرژی

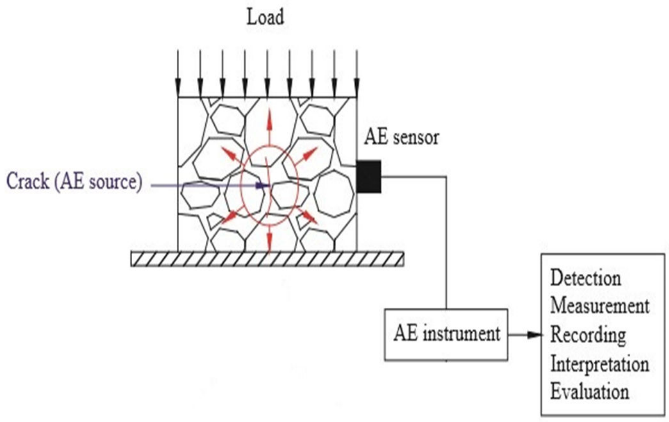
شکل ۳-۳۳. نمای دستگاه یونیورسال مورد استفاده در آزمایش[26]

[1] dB

آزمایش فشاری در دمای ۲۰ و ۶۰ درجه سانتی‌گراد انجام شده است. در طول آزمایش پارامترهای انتشارآکوستیک ثبت و سپس پارامترهای تجمعی آنان محاسبه شده است. برمبنای نتایج میانگین مقدار بار برای گسیختگی در دمای ۲۰و ۶۰ به ترتیب 35/15 و 10/21 کیلونیوتن بود. در شکل‌های زیر نمای واقعی از آزمایش و بعد هم روند شماتیک کار به ترتیب نمایش داده شده اند.

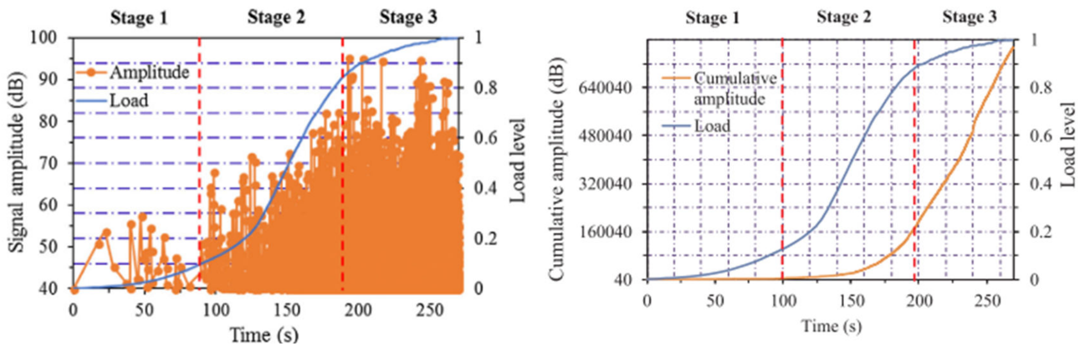


شکل ۳-۳۴. آزمایش فشاری انجام شده بر روی نمونه[26]

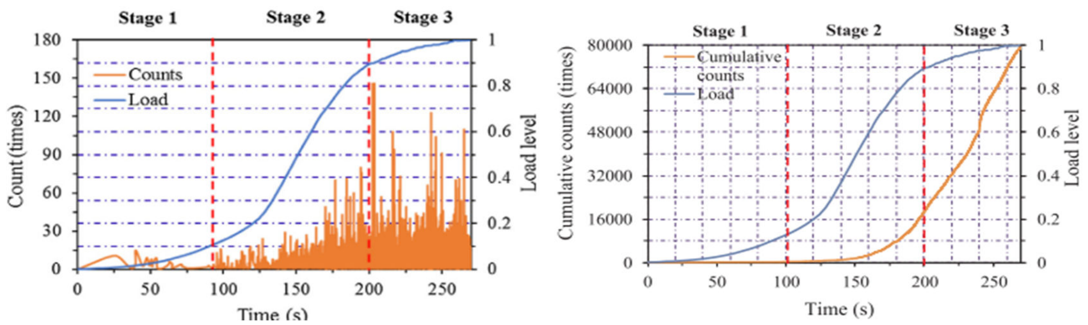


شکل ۳-۳۵. شکل شماتیک روند آزمایش فشاری انجام شده بر روی نمونه [26]

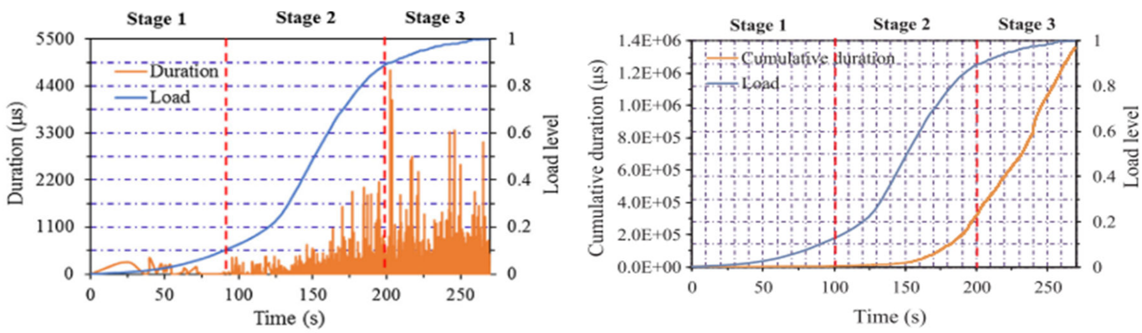
برای تعیین فرآیند خرابی نتایج وپارامترهای انتشارآکوستیک دردمای ۲۰ درجه ثبت شد و برای بررسی اثر دما، هم در ۲۰و هم در ۶۰ درجه سانتی‌گراد نتایج جمع آوری و مقایسه شد. آنها با نتایج حاصل از این آزمایش نمودارهای زیر را رسم کردند:



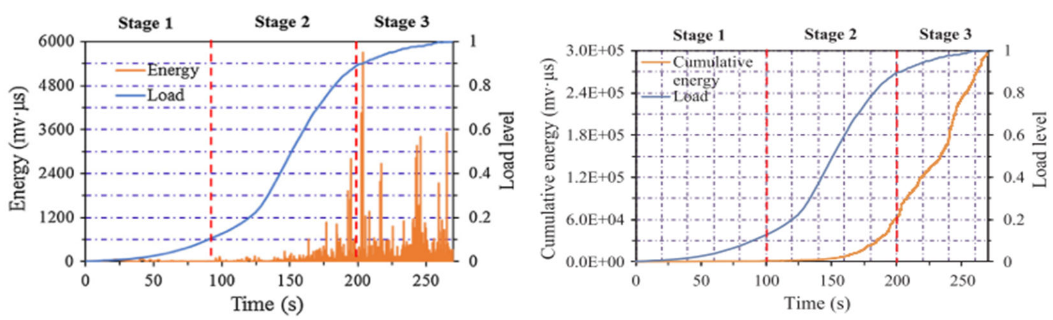
شکل ۳-۳۶. نمودار تغییرات پارامتر دامنه انتشار آکوستیک و تجمعی آن با بار و زمان[26]



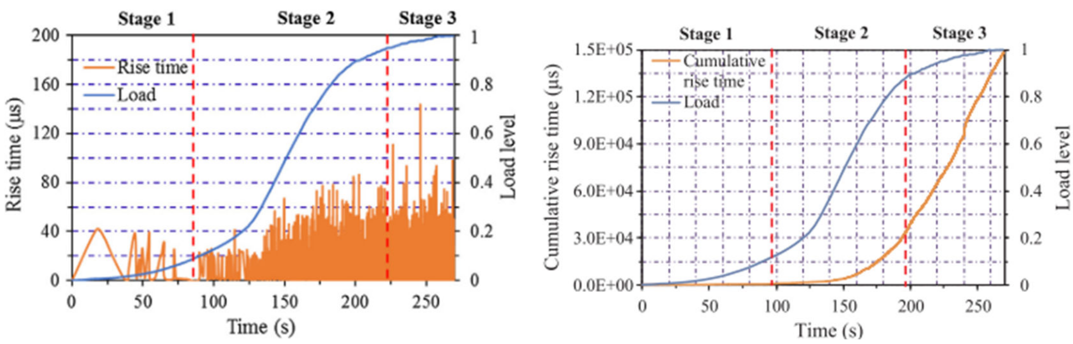
شکل ۳-۳۷. نمودار تغییرات پارامتر شمارش انتشار آکوستیک و تجمعی آن با بار و زمان[26]



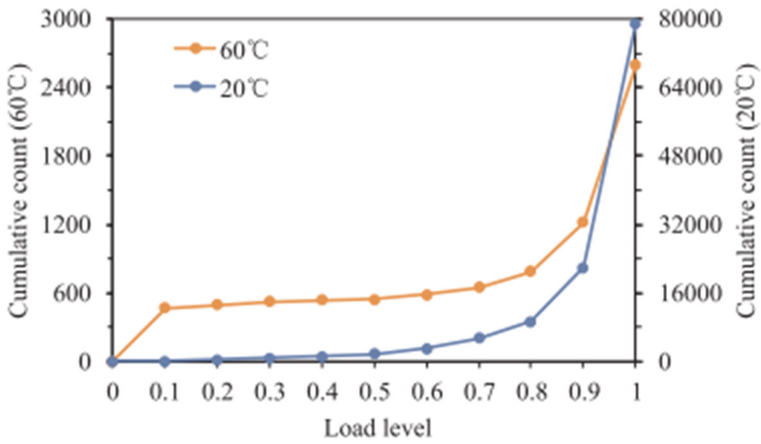
شکل ۳-۳۸. نمودار تغییرات پارامتر مدت زمان انتشار آکوستیک و تجمعی آن با بار و زمان[26]



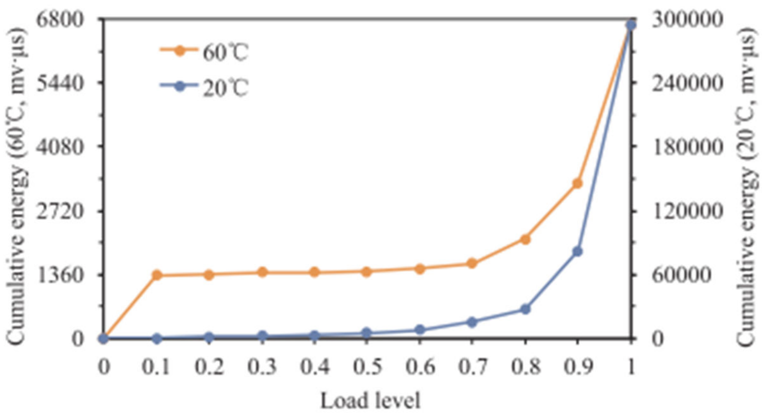
شکل ۳-۳۹. نمودار تغییرات پارامتر انرژی انتشار آکوستیک و تجمعی آن با بار و زمان[26]



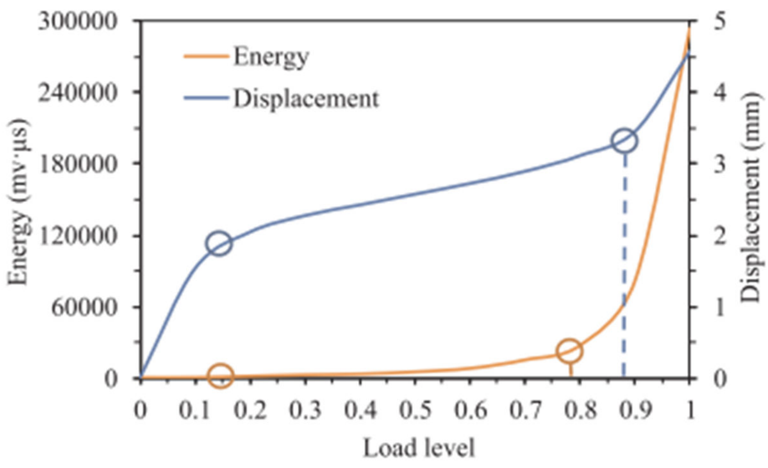
شکل ۳-۴۰. نمودار تغییرات پارامتر زمان اوج انتشار آکوستیک و تجمعی آن با بار و زمان[26]



شکل ۳-۴۱. نمودارمقایسه‌ای تغییرات تجمعی پارامتر شمارش با بار در دو دما[26]



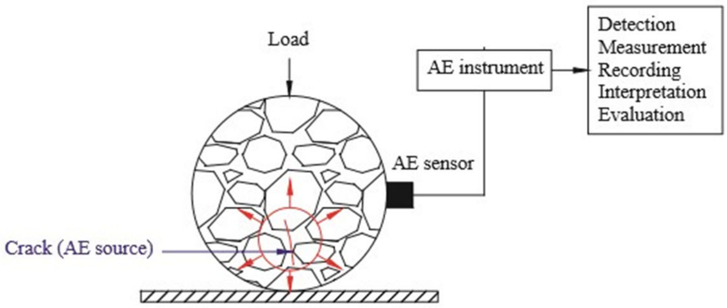
شکل ۳-۴۲. نمودارمقایسه‌ای تغییرات تجمعی پارامتر انرژی با بار در دو دما[26]



شکل ۳-۴۳. نمودار تغییرات پارامتر انرژی با بار در دو دما[26]

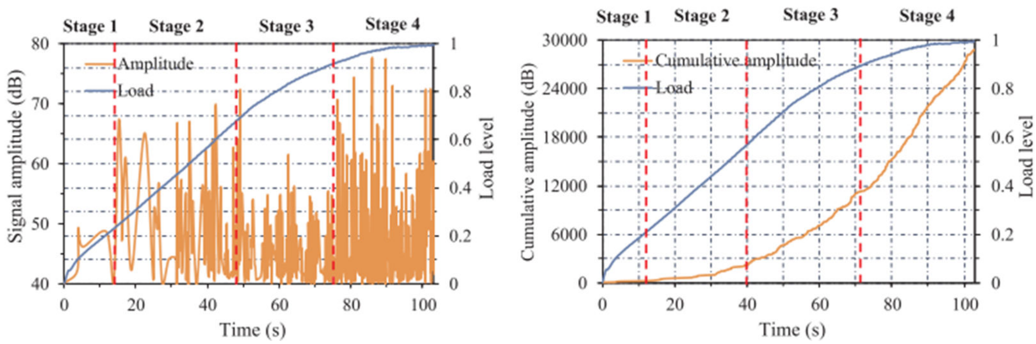
آزمایش کشش غیرمستقیم در دمای ۲۵ و ۱۰- انجام شده است. آنها درطول آزمایش پارامترهای انتشارآکوستیک را ثبت و سپس پارامترهای تجمعی آنان را رسم کردند. برمبنای نتایج آنان میانگین مقدار بار برای گسیختگی در دمای ۲۵و ۱۰- به ترتیب 4/02 و 19/17 کیلونیوتن بوده است. در شکل‌های زیر نمای واقعی از آزمایش و بعد هم روند شماتیک کار به ترتیب نمایش داده شده اند.

شکل ۳-۴۴. آزمایش کشش غیرمستقیم انجام شده بر روی نمونه[26]

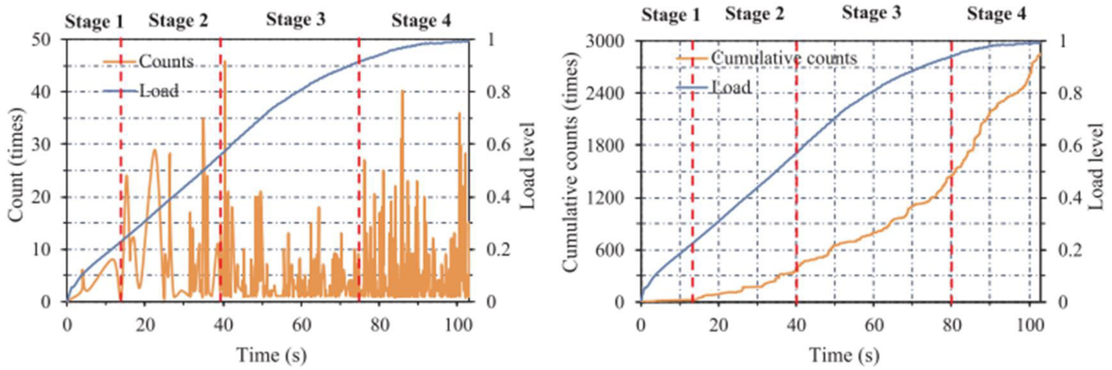


شکل ۳-۴۵. شکل شماتیک روند آزمایش کشش غیرمستقیم انجام شده [26]

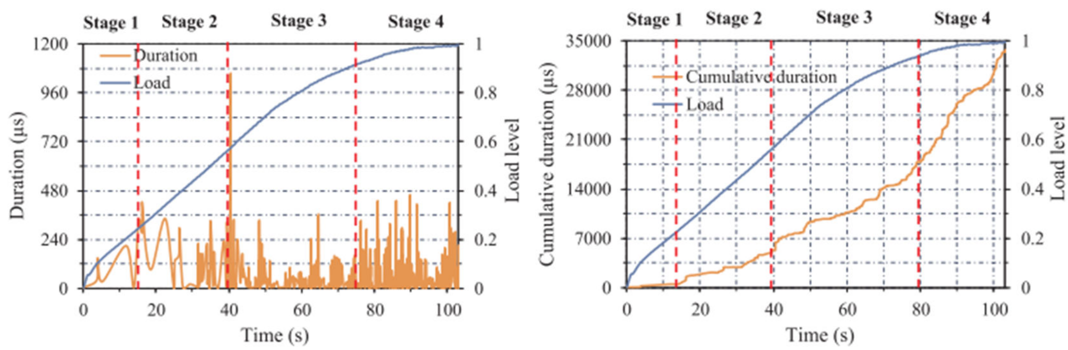
آنها برای تعیین فرآیند خرابی نتایج و پارامترهای انتشارآکوستیک دردمای ۲۵ درجه را ثبت و برای بررسی اثر دما هم در ۲۵و هم در ۱۰- درجه نتایج را جمع آوری و مقایسه کردند. آنها با نتایج حاصل از این آزمایش نمودارهای زیر را رسم کردند:



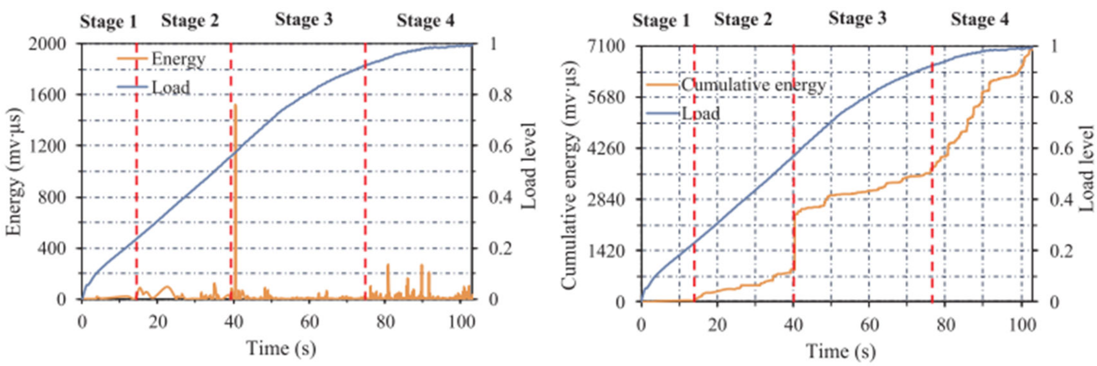
شکل ۳-۴۶. نمودار تغییرات پارامتر دامنه انتشار آکوستیک و تجمعی آن با بار و زمان[26]



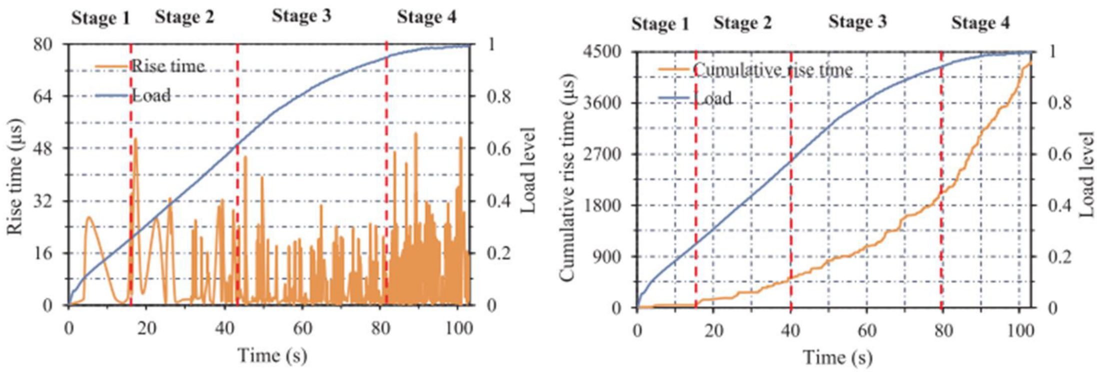
شکل ۳-۴۷. نمودار تغییرات پارامتر شمارش انتشار آکوستیک و تجمعی آن با بار و زمان[26]



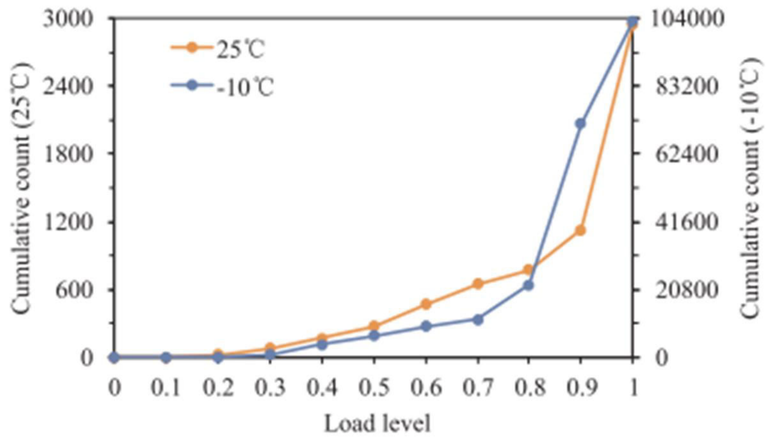
شکل ۳-۴۸. نمودار تغییرات پارامتر مدت زمان انتشار آکوستیک و تجمعی آن با بار و زمان[26]



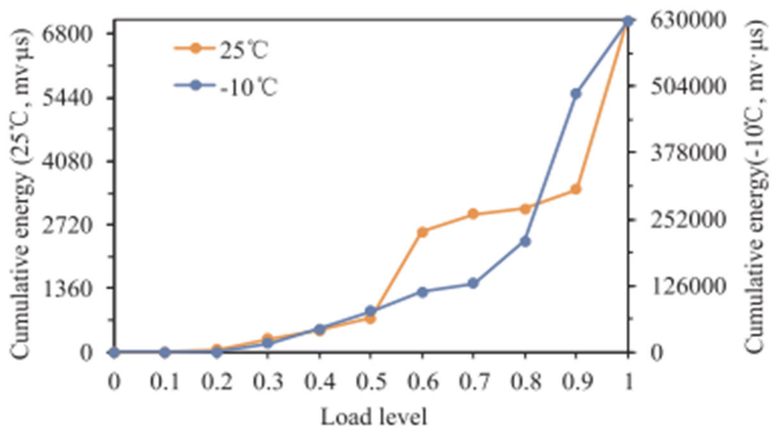
شکل ۳-۴۹. نمودار تغییرات پارامتر انرژی انتشار آکوستیک و تجمعی آن با بار و زمان[26]



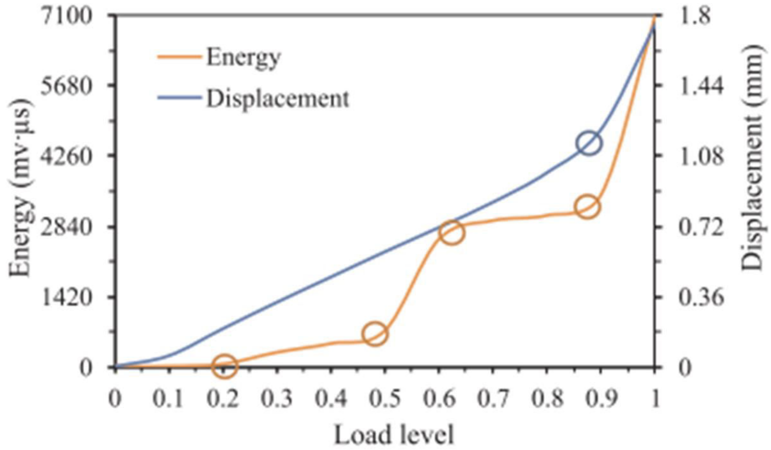
شکل ۳-۵۰. نمودار تغییرات پارامتر زمان اوج انتشار آکوستیک و تجمعی آن با بار و زمان[26]



شکل ۳-۵۱. نمودارمقایسه‌ای تغییرات تجمعی پارامتر شمارش با بار در دو دما [26]



شکل ۳-۵۲. نمودارمقایسه‌ای تغییرات تجمعی پارامتر انرژی شمارش با بار در دو دما[26]



شکل ۳-۵۳. نمودارمقایسه‌ای تغییرات پارامتر انرژی با بار در دو دما[26]

نتایج:

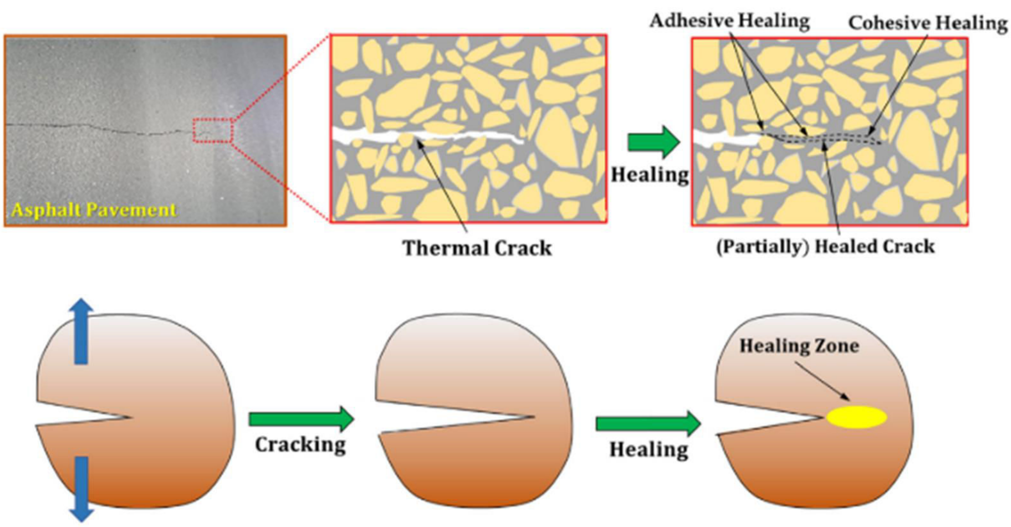
آنها دراین مطالعه سعی کردند تا با استفاده از پارامترهای انتشار آکوستیک فرآیند گسیختگی در نمونه ها را شناسایی کنند و در آخر تأثیر دما بر روی ویژگی های انتشار آکوستیک را بررسی کنند که در آخر نتیجه گرفتند:

- فرآیند گسیختگی تحت بار فشاری در دمای ۲۰ درجه سانتی گراد در نمودارهای پارامترهای انتشارآکوستیک و پارامترهای تجمعی آنها با زمان و بار به سه قسمت تقسیم می‌شود. آنها بعد از بررسی گسیختگی نمونه‌ها با پارامترهای انتشارآکوستیک نتیجه گرفتند که پارامتر انرژی نتایج خیلی مطلوبی داشته است در صورتی که پارامتر اوج زمان در انتشارآکوستیک در نشان دادن فرآیند گسیختگی نمونه‌ها نتایج رضایت بخشی نداشت. انرژی انتشارآکوستیک به خرابی داخلی بیشتر از جابجایی حساس است.
- فرآیند گسیختگی آسفالت نفوذپذیر در آزمایش کشش غیرمستقیم در دمای ۲۵ درجه براساس پارامترهای انتشارآکوستیک و تجمعی آنها با زمان به چهار بخش تقسیم شده است. که طبقه‌بندی نتایج بر مبنای انرژی و انرژی تجمعی واضحترین آنها بود.
- افزایش ناگهانی در نمودار تجمعی شمارش و انرژی در آسفالت نفوذپذیر در اول بار گذاری آزمایش فشاری و در متوسط بارگذاری آزمایش کشش غیرمستقیم دیده شده است. پارامترهای انتشارآکوستیک می‌توانند شناسایی خرابی‌های موضعی که بر اثر دما بوجود می-آیند را نشان دهند.

۳-۹ مطالعه هنریک ری‌ز[1] و بهزاد بهنیا[2] (۲۰۱۹) [۲۷]

این دو محقق عقیده داشتند که خودترمیمی[3] که یک خصوصیت ذاتی از آسفالت است، فرآیندی مهم و برعکس ترک‌خوردگی می‌باشد که عمر روسازی را افزایش می‌دهد و برخلاف همه‌ی مطالعاتی که در مورد آن انجام شده است پدیده‌ای است که هنوز به خوبی درک نشده و پیدا کردن روش مناسب برای بررسی دقیق آن مورد توجه است. به همین دلیل به بررسی پدیده خودترمیمی با استفاده از انتشارآکوستیک پرداختند. در مطالعه آنان خودترمیمی به صورت زیر تعریف شده است:

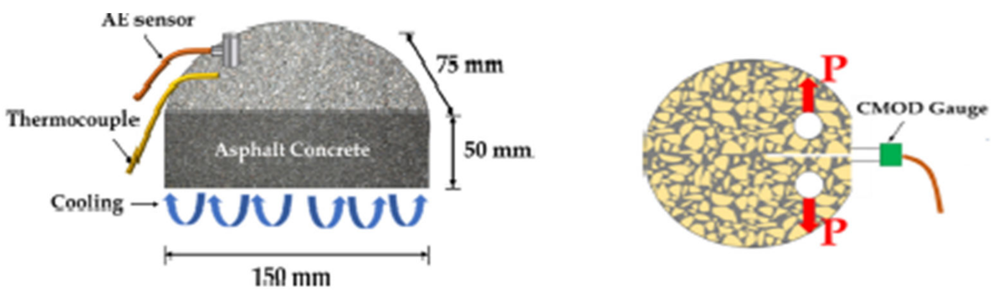
خودترمیمی که یک خصوصیت ذاتی در آسفالت است که در آب و هوای گرم و یا در زمان استراحت آسفالت اتفاق می‌افتد و همانطور که در شکل زیر نشان داده است همانند زیپی که بسته می‌شود، است. عوامل مختلفی بر روی این پدیده اثر می‌گذارد که به دو دسته تقسیم می‌شوند، عوامل داخلی و عوامل خارجی. عوامل داخلی مانند نوع قیر، درصد قیر،ساختار سنگدانه‌ها و... و عوامل خارجی مانند آب و هوا یا دما، درجه خرابی، دوره استراحت در آسفالت و ... .



شکل ۳-۵۴. نمایش شماتیک پدیده خودترمیمی و انواع آن در آسفالت[27]

---
[1] Henrique Reis
[2] Behzad Behnia
[3] Healing

در این مطالعه خودترمیمی در دو فاز بررسی شده است، ابتدا در مرحله‌ی شروع یا همان ترکهای موئی و با استفاده از روش انتشارآکوستیک و دیگری در مرحله‌ی ترکها یا گسیختگی و با استفاده از آزمایش کشش بر رو دیسک‌های متراکم آسفالتی[1](DCT) که در آنها نمونه‌های آسفالتی در معرض سردشدن قرار گرفتند و اثر زمان استراحت بین دوره‌ها بررسی شده است. ابعاد نمونه‌ها در شکل زیر مشخص است. این نمونه‌ها که دارای درصد قیر 5/9 می‌باشند، با قیر PG64-22 ساخته شده‌اند. هر نمونه ۸ دوره متوالی سرد شده و دمای آنها از ۲۰ به ۵۰- رسیده است. در دسته اول نمونه‌ها بدون استراحت در هر چرخه سرد می‌شدند در صورتی که در دسته دوم بین هر سردشدن ۱۲ ساعت به نمونه استراحت داده شده‌است. هر نمونه سه بار تکرار شده‌است و بررسی با انتشار آکوستیک در حین سرد شدن و DCT در پایان هر دوره‌ی سرد شدن انجام شده است.



شکل ۳-۵۵. نمای شماتیک نمونه در آزمایش[27]

نتایج حاصل از آزمایش در دو جدول زیر آورده شده است:

جدول ۳-۴. نتایج حاصل از DCT[27]

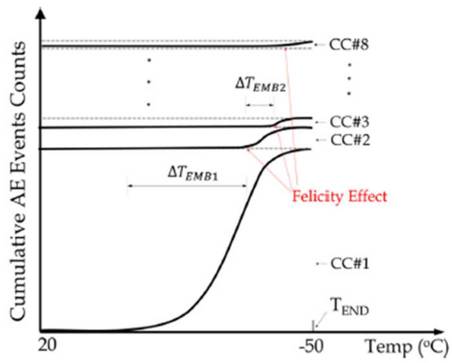
Resting Time = 0				Resting Time = 12 hrs			
Cooling Cycle#	Average Fracture Energy (J/m^2)	CoV%	%ΔG_f	Cooling Cycle#	Average Fracture Energy (J/m^2)	CoV%	%ΔG_f
CC0	633	7.39%	0.00%	CC0	633	7.39%	0.00%
CC1	569	6.28%	−10.16%	CC1	623	12.53%	−1.58%
CC2	555	10.49%	−12.32%	CC2	636	5.75%	0.47%
CC3	559	8.51%	−11.64%	CC3	629	7.50%	−0.63%
CC4	547	9.58%	−13.59%	CC4	641	10.76%	1.26%

[1] Disk-shaped Compact Tension

جدول ۳-۵. نتایج حاصل از انتشارآکوستیک[27]

Rep#	Resting Time = 0 h						Resting Time = 12 h					
	CC#	Number of AE Events	T_{EMB} (°C)	ΔT_{EMB} (°C)	Felicity Ratio	Healing Index (%)	CC#	Number of AE Events	T_{EMB} (°C)	ΔT_{EMB} (°C)	Felicity Ratio	Healing Index (%)
#1	CC1	96,430	−23.24	5.87	0.00	100%	CC1	90,385	−26.07	1.16	0.00	100%
	CC2	5791	−29.11	2.93	0.22	78.06%	CC2	63,309	−27.23	1.03	0.05	95.15%
	CC3	2477	−32.04	1.32	0.33	67.12%	CC3	52,833	−28.26	0.65	0.09	90.85%
	CC4	969	−33.36	0.73	0.38	62.18%	CC4	54,322	−28.91	0.31	0.12	88.13%
	CC5	451	−34.09	0.31	0.41	59.45%	CC5	45,703	−29.22	0.03	0.13	86.84%
	CC6	715	−34.40	0.22	0.42	58.30%	CC6	47,630	−29.25	0.31	0.13	86.71%
	CC7	122	−34.62	0.06	0.43	57.47%	CC7	41,225	−29.56	0.04	0.15	85.42%
	CC8	288	−34.68	–	0.43	57.25%	CC8	43,786	−29.60	–	0.15	85.25%
#2	CC1	79,695	−25.19	6.31	0.00	100%	CC1	103,227	−24.95	1.69	0.00	100%
	CC2	3182	−31.50	3.42	0.31	69.13%	CC2	98,034	−26.64	0.78	0.07	93.25%
	CC3	2368	−34.92	2.23	0.44	56.35%	CC3	104,445	−27.42	0.38	0.10	90.14%
	CC4	556	−37.15	1.11	0.52	48.02%	CC4	101,375	−27.80	0.21	0.11	88.62%
	CC5	852	−38.26	0.23	0.56	43.87%	CC5	91,082	−28.01	−0.17	0.12	87.78%
	CC6	603	−38.49	0.06	0.57	43.01%	CC6	85,463	−27.84	−0.09	0.12	88.46%
	CC7	307	−38.55	−0.24	0.57	42.79%	CC7	93,911	−27.75	0.19	0.11	88.82%
	CC8	96	−38.31	–	0.56	43.68%	CC8	80,591	−27.94	–	0.12	88.06%
#3	CC1	116,558	−24.78	6.69	0.00	100%	CC1	79,677	−25.62	1.36	0.00	100%
	CC2	4852	−31.96	2.03	0.33	67.41%	CC2	61,302	−26.73	1.1	0.05	95.45%
	CC3	689	−33.99	1.85	0.40	59.83%	CC3	57,290	−27.29	0.48	0.07	93.15%
	CC4	473	−34.58	1.21	0.42	57.62%	CC4	55,416	−27.59	0.12	0.08	91.92%
	CC5	742	−36.34	0.92	0.49	51.05%	CC5	48,111	−26.02	−0.12	0.02	98.36%
	CC6	561	−37.04	0.34	0.52	48.43%	CC6	52,404	−27.88	0.13	0.09	90.73%
	CC7	278	−37.38	−0.16	0.53	47.16%	CC7	45,100	−28.63	−0.05	0.12	87.65%
	CC8	191	−38.03	–	0.55	44.73%	CC8	37,649	−27.33	–	0.07	92.99%

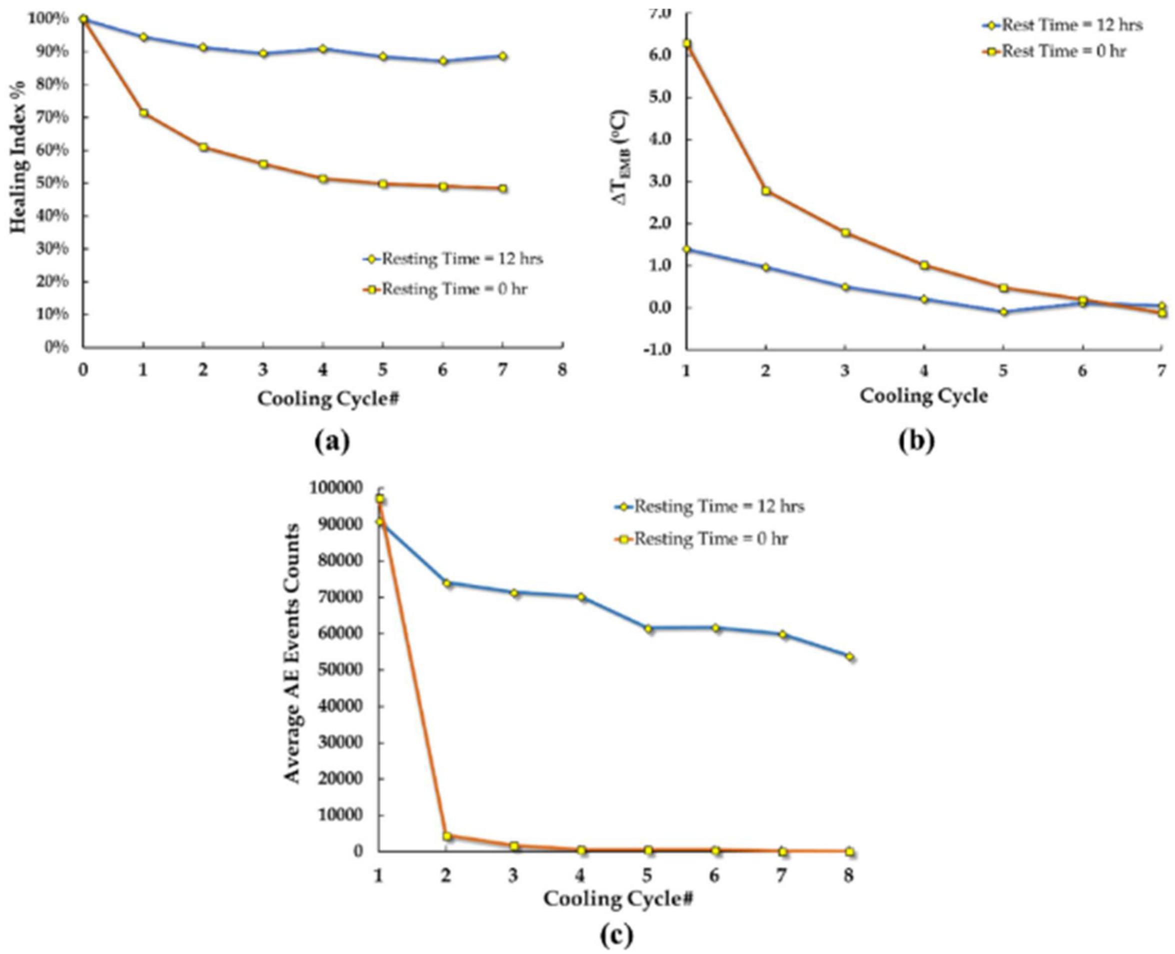
بعد از برداشت داده‌های دو جدول بالا نمودارهای زیر رسم و نتایج زیر گرفته شده است:



شکل ۳-۵۶. نمودار شمارش تجمعی با زمان برای ۸ چرخه[27]

۱. در چرخه‌های متوالی هر نمونه قبل از رسیدن به ماکزیمم درجه حرارت پیشین، در آن رخداد انتشار آکوستیک افتاده است. این پدیده را که به آن اثر فلسیتی[1] گویند نشان می‌دهد اتفاق افتادن پدیده خودترمیمی به صورت ذاتی و بدون اعمال شرایط خاص یا سخت در آسفالت است.

[1] Felicity effect



شکل ۳-۵۷. نمودارهای متفاوت در ۸ چرخه متوالی در دو نوع نمونه[27]

a) **شاخص خودترمیمی**

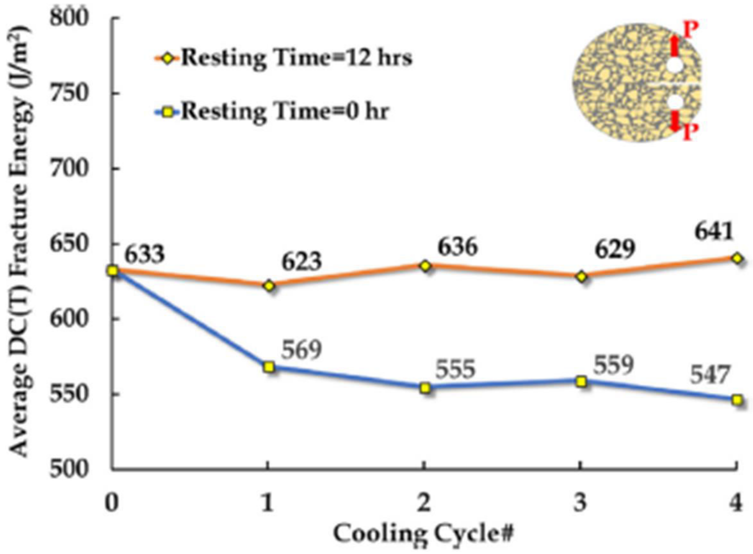
b) **تفاوت زمان ضعف حرارتی**

c) **میانگین پارامتر شمارش**

۲. پارامتر جدیدی تحت عنوان شاخص خودترمیمی در این مطالعه معرفی شد. نتایج نشان داد این شاخص با زمان استراحت ۱۲ ساعت تقریبا ۳۰ درصد افزایش یافته است.

بررسی تغییرات دمای ایجاد ترکهای برودتی در نمونه‌ها نشان داد که این تغییرات، در نمونه-هایی که ۱۲ساعت استراحت در بین چرخه‌ها داشتند بیشتر از نمونه‌های بدون زمان استراحت است و این موضوع بدلیل عدم زمان کافی برای اتفاق افتادن پدیده خودترمیمی است و باعث خرابی‌های بیشتر ناشی از دما در نمونه می‌شود.

همچنین تفاوت زیادی در شمارش فعالیت‌های رخداد آکوستیک بین دو دسته نمونه مشاهده می‌شود.



شکل ۳-۵۸. نمودار انرژی گسیختگی در چرخه‌ها برای دو نمونه[27]

۳. همانطور که در شکل بالا یعنی شکل ۳-۵۸ مشخص است، انرژی انتشارآکوستیک در نمونه‌ها با ۱۲ ساعت استراحت در همه‌ی چرخه‌ها تقریبا ثابت است، در صورتی که این انرژی در نمونه‌های بدون استراحت بعد از ۴ چرخه به مقدار ۱۳درصد کاهش یافته است.

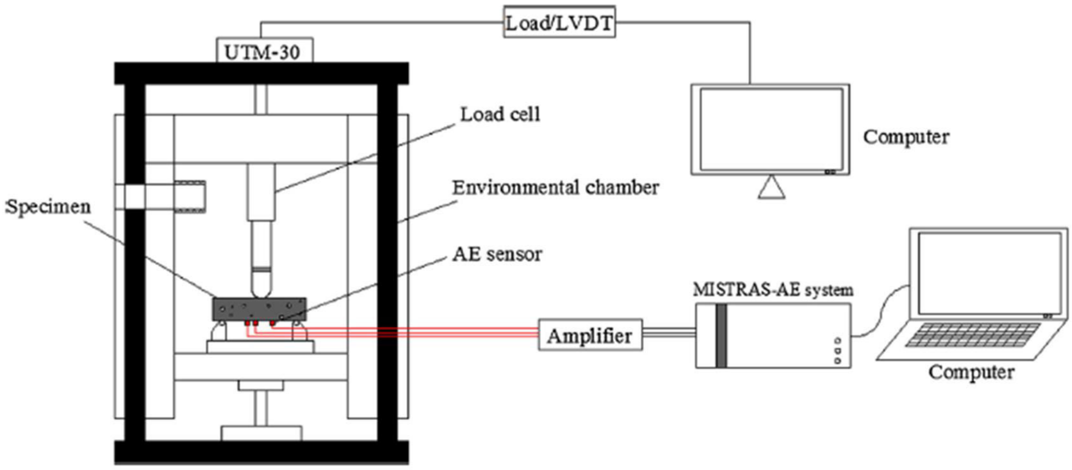
۴. در آخر، این تحقیق، روش انتشارآکوستیک را در بررسی پدیده خودترمیمی روشی بسیار کارآمد، دقیق و حساس معرفی و پیشنهاد کرده است.

۳-۱۰ مطالعه یانگ[1] و همکاران (۲۰۱۹) [۲۸]

یانگ و همکارانش در سال گذشته در کشور چین به بررسی و ارزیابی پیوسته‌ی آسفالت با استفاده از روش انتشارآکوستیک پرداختند.

[1] Qing Yang

آنها برای مطالعه‌ی خود نمونه‌ی آسفالتی با بزرگترین اندازه اسمی ۲۰ و درصد قیر ۴/۳ را که در دمای ۱۵۰ درجه سانتی گراد مخلوط کرده بودند در قالبی با ابعاد ۳۲۰ در ۲۶۰در ۶۰ و در دمای ۱۴۰درجه سانتی گراد متراکم کرده‌اند. آنها این نمونه‌ی آسفالت را به نمونه‌های کوچکتر خمش با ابعاد ۲۵۰ در ۴۰ در ۴۰ تقسیم بندی کردند تا آنها را تحت آزمایش خمش سه نقطه قرار دهند. شکل شماتیک این آزمایش در زیر مشخص است. نمونه‌ها در دمای ۲۵ درجه سانتی گراد با استفاده از دستگاه یونیورسال تحت دو نرخ بارگذاری ۲ و ۵ میلی متر بر دقیقه قرار گرفتند.



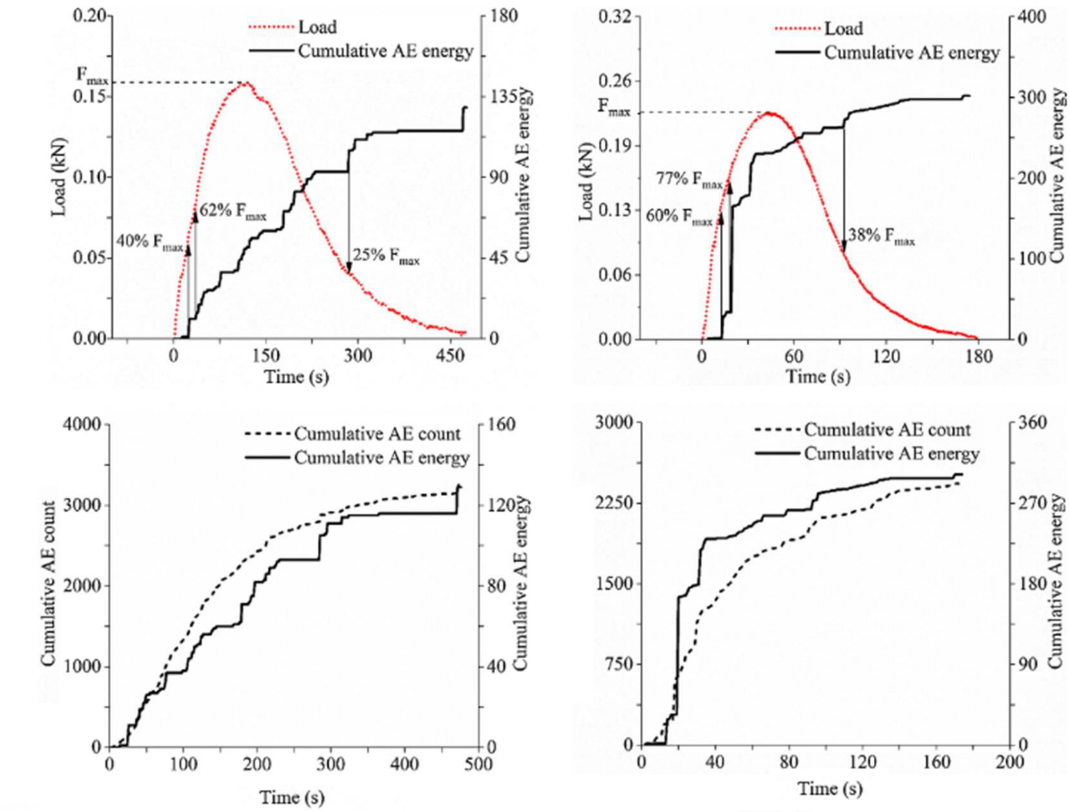
شکل ۳-۵۹. نحوه انجام آزمایش[28]

همانطور که در شکل هم مشخص است امواج از نمونه‌ها حین آزمایش توسط سیستم انتشارآکوستیک دریافت و ثبت شده است تا ارزیابی بر روی آنها صورت گیرد.

امواج حاصل از آزمایش به دو صورت هم شکل موج و هم پارامترهای حاصل از آنان ثبت شدند. بعد از ثبت و برداشت داده‌ها با استفاده از دو روش تبدیل موجک[1] و تحلیل هندسی ترک تحلیل شدند تا رابطه‌ی بین آنها با خرابی در آسفالت ارزیابی شود. بعد از ارزیابی نتایج زیر توسط این محققان گرفته شده است:

[1] Wavelet transform:

۱)تغییرات دوره‌ای انرژی تجمعی و شمارش تجمعی از پارامترهای انتشارآکوستیک با رفتار مکانیکی مخلوط‌های آسفالتی در ارتباط هستند، افزایش آنها بدلیل حساسیت آنها به سطح بارگذاری‌های متفاوت است و ایجاد خرابی در نمونه را تحت نرخ بارگذاری‌های متفاوت منعکس می‌کنند.



شکل ۳-۶۰. نمودارهای بار، انرژی و شمارش تجمعی با زمان در دو نرخ بارگذاری متفاوت[28]

۲) با بکاربردن تحلیل تبدیل موج پیوسته[1]، انواع ویژگی‌های امواج انتشارآکوستیک در زمان می‌توانند خرابی در مخلوط‌های آسفالتی را با نرخ بارگذاری‌های متفاوت منعکس کنند.

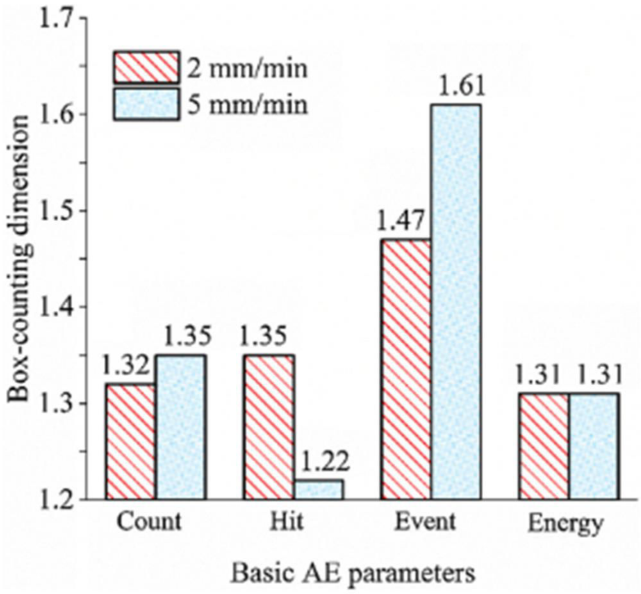
۳) با بکاربردن تحلیل تبدیل موج گسسته [2]، ناپیوستگی‌ها درجهش‌های دامنه در بررسی انرژی تجمعی امواج انتشارآکوستیک می‌تواند نشانه‌های مهمی از خرابی در مخلوط‌های آسفالتی را نشان دهد. همینطور این تحلیل در شناسایی دامنه و انرژی امواج متناظر با ایجاد و رشد ترک بسیار کارآمد

تبدیل موجک دسته‌ای از توابع ریاضی هستند که برای تجزیه سیگنال پیوسته به مؤلفه‌های فرکانسی آن بکار می‌رود که رزولوشن هر مؤلفه برابر با مقیاس آن است. تبدیل موجک تجزیه یک تابع بر مبنای توابع موجک می‌باشد. موجک‌ها (که به عنوان موجک‌های دختر شناخته می‌شوند) نمونه‌های انتقال یافته و مقیاس شده یک تابع (موجک مادر) با طول متناهی و نوسانی شدیداً میرا هستند.

[1] Continuous Wavelet transform
[2] Discrete Wavelet transform

است.

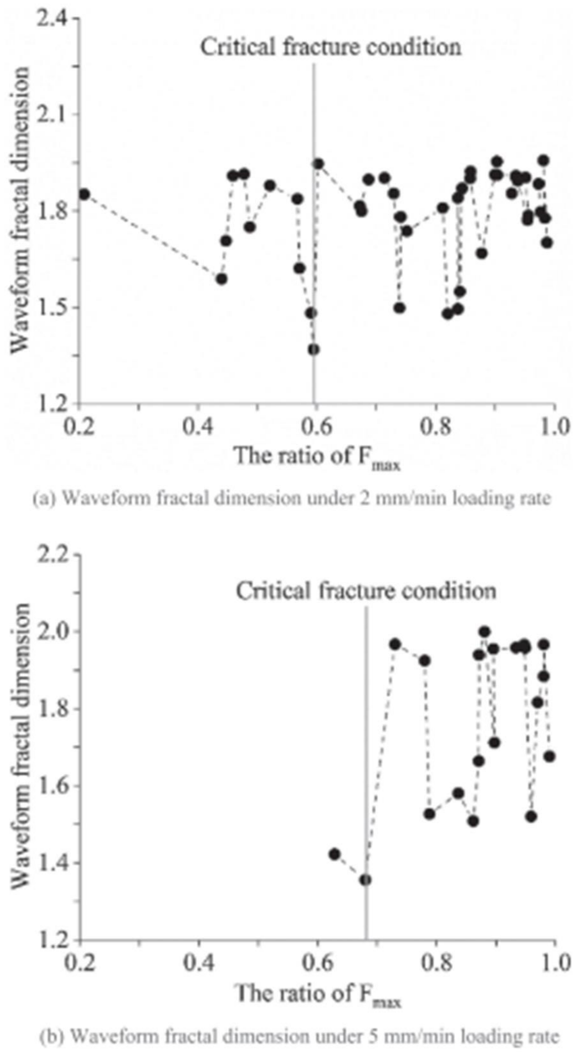
۴) مطابق با نتایج فرکتال، تحت بارگذاری‌های متفاوت، ابعاد فرکتال انرژی یکسان، در حالی که این اعداد در پارامترهای شمارش، دامنه و ... متفاوت است. که این موضوع نشان‌دهنده پاسخ با ثبات انرژی به فرآیند خرابی در مخلوط‌های آسفالتی است.



شکل ۳-۶۱. نمایش ابعاد تحلیل روش شمارش جعبه‌ای[1] در پارامترهای مختلف انتشارآکوستیک[28]

۵) مطابق با نتایج فرکتال، ابعاد فرکتال شکل سیگنال‌های امواج انتشارآکوستیک نشان‌دهنده خرابی-های بحرانی در مخلوط‌های آسفالتی است. بطوریکه هر جهش ناگهانی در این شکل موج‌ها نشان-دهنده شکل‌گیری یک منطقه گسیختگی در ماده است.

[1] Box- counting methode



شکل ۳-۶۲. نمای تحلیل ابعاد فرکتال شکل موج‌های انتشارآکوستیک در نرخ بارهای متفاوت[28]

فصل ۴ : روش انجام مطالعه شگل گیری و توسعه ترکهای موئی در آسفالت

۴-۱ مقدمه

برای بررسی هر عیبی، می‌توان هر جسمی را با هر آزمایش دلخواه، توسط روش انتشارآکوستیک مورد ارزیابی قرار داد و فرآیند شکل‌گیری و گسترش ترک موئی آن را بررسی کرد. کافی است سنسورهای حساس انتشارآکوستیک بر روی جسم نصب شوند، سپس جسم تحت فرآیند شکست هر آزمایش دلخواه قرار بگیرد تا امواج ناشی از به وجود آمدن و رشد ترک موئی توسط این روش بررسی شود. قابل ذکر است که متاسفانه ترک یا عیب و نقصی که قبل از آزمایش انتشارآکوستیک در جسم شکل گرفته باشد و در آزمایش انتشارآکوستیک هیچگونه رشد یا حرکتی نداشته باشد با این روش قابل بررسی نیست. علاوه بر آن به دلیل آنکه با گذشت زمان امواج ضعیفتر می‌شوند حتما باید سنسورهای این روش به صورتی نصب شوند که همه جسم را پوشش دهند، در غیر این صورت ممکن است به خوبی ارزیابی و حتی دریافت نشده و از دقت آزمایش به شدت کاسته شود. همینطور قابل اشاره است که این روش قابلیت این را دارد که هر جسم با هر ابعادی و مستقل از شکل هندسی آن مورد ارزیابی قرار دهد و یا حتی ارزیابی را می‌توان با هر فرآیند شکست و تحت هر آزمایش دلخواه انجام داد. پارامترهایی که می‌توان با این روش بررسی کرد نیز متفاوت و دامنه گسترده‌ای را در بر می‌گیرد. براساس تحقیقات انجام شده توسط محققین زیادی و مقایسه نتایج آنها از این روش با سایر روشها نشان داده است که استفاده از این روش در ارزیابی ترکهای موئی خیلی دقیق‌تر از سایر روشهای متداول است و در عین حال چون نتایج آن با نتایج سایر روشها سازگاری دارد استفاده از این روش بسیار توصیه می‌شود.

۴-۲ روند ساخت نمونه‌ها

در این مطالعه از دو نمونه استاندارد مارشال و تیرچه آسفالتی استفاده شده است. در کل ۱۵ نمونه یعنی ۱۲ نمونه مارشال و ۳ نمونه تیرچه آسفالتی در این آزمایش استفاده شده است. هر آزمایش اصلی با سه بار تکرار انجام شده است و سایر نمونه‌ها، نمونه‌های آزمایشی بوده‌اند که برای صحت از تنظیمات دستگاه، داده‌های ورودی تنظیمات و ... بکارگرفته شده‌اند.

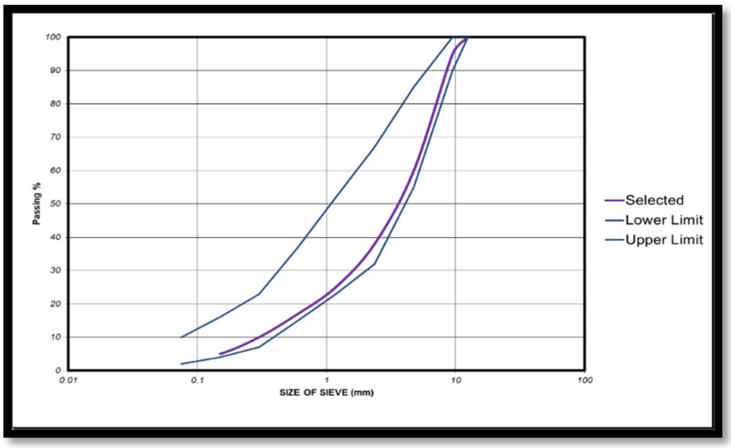
۴-۲-۱ نمونه‌های مارشال

نمونه‌های مارشال نمونه‌های استوانه ای با قطر ۱۰ و ارتفاع 6.5 سانتی‌متر هستند که برای ساخت آنها از مصالح سنگی و قیر استفاده شده است. در این مطالعه برای ساخت آنها از دانه‌بندی شماره ۵ آیین نامه و درصد قیر بهینه 5/2٪ استفاده شده است.

برای ساخت این نمونه ابتدا از آیین نامه روسازی آسفالتی راههای ایران(نشریه ۲۳۴) دانه‌بندی شماره ۵ را انتخاب و با توجه به حد بالا و پایین آن وزن سنگدانه‌ها انتخاب شد. در جدول و نمودار زیر دانه-بندی آیین‌نامه و دانه‌بندی انتخاب شده برای ساخت این نمونه‌ها آورده شده است.

جدول ۴-۱. دانه‌بندی مصالح نمونه‌های مارشال

حد بالای آیین نامه	حد پایین آیین نامه	درصد عبوری انتخابی	درصد عبوری محدوده آیین نامه ۲۳۴ دانه بندی شماره ۴	SIZE (mm)
۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۲.۵
۱۰۰	۹۰	۹۵	۹۰-۱۰۰	۹.۵
۸۵	۵۵	۶۰	۵۵-۸۵	۴.۷۵
۶۷	۳۲	۳۸	۳۲-۶۷	۲.۳۶
۵۲	۲۳	۲۵	۲۳-۵۲	۱.۱۸
۳۷	۱۵	۱۷	۱۵-۳۷	۰.۶
۲۳	۷	۱۰	۷-۲۳	۰.۳
۱۶	۴	۵	۴-۱۶	۰.۱۵
۱۰	۲	۳	۲-۱۰	۰.۰۷۵
۰	۰	۰	۰-۰	۰



شکل ۴-۱. منحنی دانه بندی مصالح سنگی نمونه های مارشال

برای تعیین مشخصات و خصوصیات مصالح سنگی از جمله ارزش ماسه‌ای ، درصد افت وزنی در مقابل سایش، حدود اتربرگ، درصد شکستگی، درصد تطویل و تورق و همچنین درصد افت وزنی در سولفات سدیم آزمایش‌های لازم انجام شد که نتایج آن در جدول ۴-۲ آمده است.

جدول ۴-۲. خصوصیات مصالح سنگی نمونه‌های مارشال

مشخصات سنگدانه ها	نتایج			
		مخلوط درشت دانه	ماسه 0-6 (میلی متر)	فیلر
ارزش ماسه اي			93	
درصد افت وزنی در مقابل سایش(لس آنجلس)	تعداد دور	500		
	درصد سایش	23		
حدود اتربرگ	دامنه خميري		N.P	N.P
	حد خميري			
	حد روانی		غیرقابل تعیین	غیرقابل تعیین
درصد شکستگی مصالح روي الک شماره 4	در یک وجه			
	در دو وجه	88		
درصد اندود قیر به مصالح سنگی		95		
درصد تطویل و تورق	تطویل	11		
	تورق	7		
درصد افت وزنی در سولفات سدیم	درشت دانه	61		
	ریزدانه		22	

قیر مصرفی در این پروژه قیر خالص با درجه نفوذ ۶۰/۷۰ می‌باشد و رده‌ی عملکردی آن PG64-22 است. آزمایشهای لازم بر روی این قیر انجام شد و نتایج آن در جدول ۴-۳ آورده شده است:

جدول ۴-۳. خصوصیات قیر استفاده شده در نمونه‌های مارشال

شرح آزمایش	روش آزمایش		مشخصات استاندارد آشتو M20		نتایج
	AASHTO	ASTM	حداقل	حداکثر	
درجه نفوذ در دمای 25 درجه	T-49	D-5	60	70	65
وزن مخصوص در دمای 25 درجه	T-228	D-70			1.015
مقدار کشش (بر حسب سانتیمتر) در دماي 25 درجه	T-51	D-113	100		100
نقطه نرمی (بر حسب درجه سانت یگراد)	T-53	D-36	49	56	51.7
حلالیت در تری‌کلرواتیلن (بر حسب درصد)	T-44	D-2042	99		99.3
درجه اشتعال روباز-کلوند (بر حسب درجه سانت یگراد)	T-48	D-92	232		302
ویسکوزیته در دماي 120 درجه (برحسب سانتی-استوکس)	T-201	D-2170			750
ویسکوزیته در دماي 135 درجه (برحسب سانتی-استوکس)	T-201	D-2170			350
ویسکوزیته در دماي 160 درجه (برحسب سانتی-استوکس)	T-201	D-2170			134
لعاب نازك قیر (5 ساعت در دماي 163 درجه سانتیگراد)					
افت حرارتی (برحسب درصد)	T-179	D-1756		0.8	0.02
درجه نفوذ (بعد از افت حرارتی)					41
نسبت درصد درجه نفوذ بعد از آزمایش به درجه نفوذ اولیه			54		63.1
مقدار کشش قیر بعد از آزمایش در دماي 25 درجه			50		50
حساسیت حرارتی قیر					
PI بر حسب درجه نفوذ در دماي 25 درجه و نقطه نرمی					-0.14
PVN برحسب درجه نفوذ در دماي 25 درجه ویسکوزیته بر حسب سانتی استوکس در دماي 135					-0.87

برای ساخت نمونه‌های مارشال بعد از اینکه دانه‌بندی انتخاب شد، مصالح مورد نیاز الک شدند و بعد از آن به مقدار مورد نیاز وزن کشی آنها انجام شد، سپس برای ۲۴ ساعت در گرمخانه قرار داده شدند تا بطور کامل خشک شوند. بین یک تا دو ساعت قبل از شروع به ساخت نمونه‌ها، قیر و قالب مارشال هم در گرمخانه قرار گرفتند. بعد از خشک شدن مصالح در دمای ۱۵۰ و گرم شدن قیر تا دمای ۱۳۵ درجه سانتی‌گراد، آنها را با هم مخلوط کرده به طوری که قیر سطح تمام سنگدانه‌ها را به طور کامل پوشش دهد و هیچ سنگدانه‌ای سفید باقی نماند. مخلوط آماده شده در قالب مارشال ریخته می‌شود تا با چکش مارشال متراکم شوند. بعد از چند ساعت از متراکم شدن که نمونه‌ها خشک شدند از قالب

بیرون آورده می‌شوند. نمونه‌های ساخته شده و همینطور مراحل ساخت به ترتیب در شکل‌های زیر نشان داده شده اند. در ابتدا ۴ نمونه با درصدهای ۴/۵، ۵، ۵/۵ و ۶ درصد ساخته شد و برای همه نمونه‌های ساخته شده با درصدهای مختلف قیر نمودارهای استقامت مارشال، روانی مارشال، وزن مخصوص واقعی، درصد فضای خالی مصالح سنگی، درصد فضای خالی پر شده با قیر و درصد فضای خالی آسفالت متراکم شده ترسیم شده است تا درصد قیر بهینه بدست آورده شود. مقدار قیر بهینه، میانگین مقادیری است که به ازای آن حداکثر استقامت مارشال، حداکثر وزن مخصوص و مناسبترین مقدار فضای خالی در آسفالت بدست آید. بر اساس روش انجمن ملی روسازی های آسفالتی درصد قیر بهینه مطابق با درصد هوای مناسب مخلوط آسفالتی تعیین میشود. در این روش پیشنهاد می‌گردد که مقدار میانه درصد هوای مخلوط ۴درصد به عنوان درصد قیر بهینه انتخاب شود. سپس مقدار درصد قیر بهینه با درصد هوای مخلوط ۴درصد برای دستیابی به مقاومت و وزن مخصوص حداکثر و روانی حداقل مقایسه می‌شود. در این مطالعه بعد از مقایسه و بررسی‌های لازم عدد ۵/۲ درصد به عنوان درصد قیر بهینه بدست آمد. بعد از بدست آوردن درصد قیر بهینه، ۱۲عدد نمونه مارشال با این درصد ساخته شد که نمونه‌های ساخته شده در شکل ۴-۲ نشان داده شده‌اند.

شکل ۴-۲. نمونه‌های ساخته شده مارشال

شکل ۴-۳. روند ساخت نمونه‌های مارشال

۴-۲-۲ نمونه‌های تیرچه آسفالتی

بعد از اینکه آزمایش‌ها انجام شد بنا به نتایج و دلایلی که در روند آزمایش توضیح داده خواهد شد، تصمیم به استفاده از نمونه های تیرچه آسفالتی علاوه بر نمونه‌های مارشال شد تا محل‌یابی با نتایج بهتر و با دقت بیشتری نشان داده شود. این نمونه‌ها مکعب مستطیل‌های با طول ۴۰ و عرض و ارتفاع به ترتیب ۶ و ۵ سانتی‌متر می‌باشند. این نمونه‌ها توسط دستگاه برش[1] از سطح جاده گرفته شده‌اند پس دارای قیر پیرشده هستند و رفتار ترد و شکننده‌تری هم نسبت به نمونه‌های مارشال از خود نشان خواهند داد.

شکل ۴-۴. روند تهیه نمونه‌های تیرچه آسفالتی

شکل ۴-۵. نمونه‌های تهیه شده تیرچه آسفالتی

[1] Cutter

۴-۳ روند انجام آزمایش

در این مطالعه دو تحلیل بر روی نمونه‌ها انجام شد:

۱.تحلیل وارزیابی با استفاده از پارامترهای انتشارآکوستیک

۲.ارزیابی و مکانیابی رخدادهای انتشارآکوستیک در نمونه‌ها

در شکل زیر تجهیزات انتشارآکوستیک استفاده شده در آزمایشات، نشان داده شده‌اند.

شکل ۴-۶. تجهیزات انتشارآکوستیک استفاده شده در آزمایش

چون این آزمایش برای اولین بار بود که در این دانشکده انجام می‌گرفت در ابتدا نمونه‌ی مارشال به صورت آزمایشی و تنها برای اطلاع از شرایط آزمایش انجام شد. در هر طرف نمونه یک سنسور که یکی در وسط و دیگری در طرف دیگر و در نیمه‌ی سمت راست نمونه نصب و در قالب بارگذاری مارشال قرار داده شد و قالب با نمونه در دستگاه بارگذاری قرار گرفته شد. در مطالعاتی که تاکنون با انتشارآکوستیک بر روی نمونه‌ی مارشال انجام شده، تاکید شده است که ابعاد آن بقدری کوچک است

که یک سنسور به راحتی کل نمونه را تحت پوشش قرار می‌دهد، در این آزمایش‌ها حداقل از دو سنسور استفاده شده است.

بطور کلی سرعت بارگذاری در آزمایش مارشال به صورت استاندارد ۲ اینچ یا 50/8 میلیمتر بر دقیقه است. به دلیل اینکه این آزمایش در آزمایشگاه مکانیک سنگ معدن انجام و سرعت بارگذاری دستگاه، کیلونیوتن بر دقیقه بود لذا بارگذاری به صورت آزمایشی با سرعت ۲ کیلونیوتن بر دقیقه انجام شد. در کل آزمایش نمودار بار به زمان دارای نوسان است که این نشان می‌دهد فنر موجود در قالب مارشال تا حدودی از بار وارده را متحمل می‌شده است.

شکل ۴-۷. نمونه در آزمایش با سرعت ۲کیلونیوتن بر دقیقه

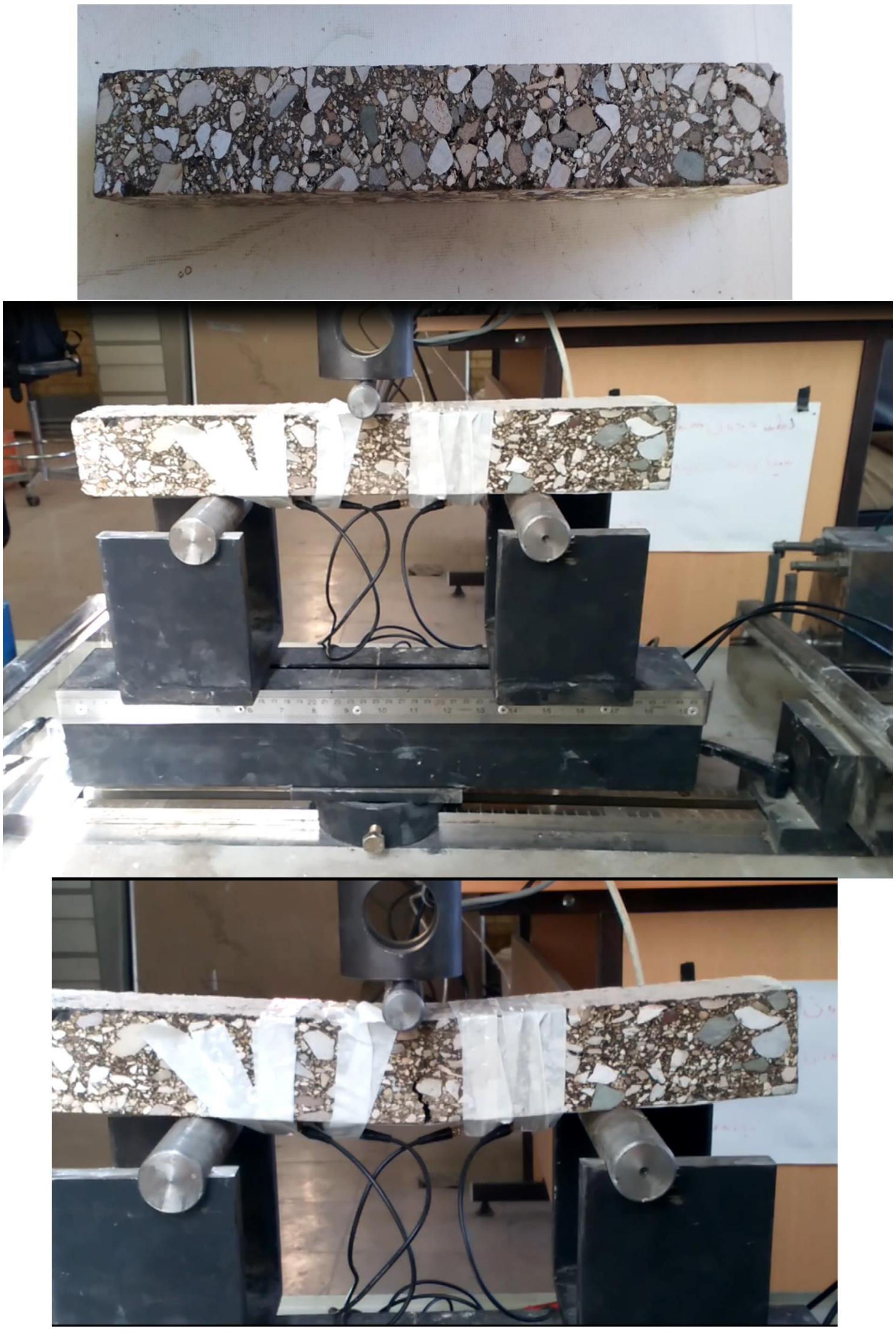
بعد از آنکه این آزمایش به صورت آزمایشی انجام و نتایج آن برداشت و تحلیل شد، دستگاه انتشارآکوستیک به آزمایشگاه عمران منتقل و این آزمایش با سرعت استاندارد مارشال انجام شد. آزمایش بارگذاری استاندارد مارشال با چندین بار تکرار انجام شد که در بعضی از نمونه‌ها هم تنظیمات دستگاه انتشارآکوستیک را تغییر داده تا اثر آن بر نتایج بررسی شود که همه آنها در فصل بعد در قسمت تحلیل داده‌ها به صورت کامل آورده شده‌اند. دراین نمونه‌ها نیز از دو سنسور استفاده شده است که هر سنسور در یک طرف و دقیقاً در وسط نمونه نصب شده‌اند. در شکل زیر هم دوباره نمایی از این نمونه‌ها آورده شده است.

شکل ۴-۸. نمونه مارشال در آزمایش با سرعت ۵۰/۸ میلی‌متر بر دقیقه

بعد از ارزیابی و تحلیل گسیختگی نمونه با پارامترهای انتشارآکوستیک، نوبت به آزمایش نمونه برای ارزیابی و مکانیابی گسیختگی نمونه است، قبلا از آن توضیح مکانیابی به صورت مفصل داده می‌شود تا دلیل اضافه شدن نمونه‌های تیرچه آسفالتی نیز قابل درک باشد.

در انتشارآکوستیک مکانیابی بر اساس تفاوت زمانی رسیدن سیگنالها به سنسورهای متفاوتی که بر روی نمونه نصب شده است بدست می‌آید که در اوایل پیدایش این روش با حل معادلاتی توسط خود محقق انجام می‌شد ولی الان این قابلیت به نرم افزارهای دستگاه اضافه و بر اساس همان تفاوت زمان رسیدن رخدادها، مکانیابی انجام می‌شود. توسط این نرم افزار مکانیابی به سه صورت خطی، دوبعدی (نمایش رخدادها در صفحه XY) و سه بعدی (نمایش رخدادها در صفحه XYZ) انجام می‌شود. حالت خطی به مبحث این مطالعه مربوط نمی‌شود. دوبعدی با حداقل سه سنسور و و سه‌بعدی با حداقل چهار سنسور قابل انجام است. برای نمونه‌های مارشال به دلیل ابعاد و شکل ظاهری‌اش سه بعدی مناسبتر بود که با وجود فک مارشال دور نمونه قابل انجام دادن نبود برای همین از دو بعدی استفاده شد و در نتیجه آن رخدادها در نمونه‌ها ثبت شد. برای این کار در یک طرف نمونه ۴ سنسور را در مشخصات تعریف شده نصب و بعد از تنظیمات و اینکه مختصات سنسورها در دستگاه ثبت شد، آزمایش انجام شد. بعد از آزمایش چون نمونه‌های مارشال در دمای محیط دچار تغییر شکل شده تا گسیخته شدند مکانیابی رخدادها به واضحی قابل مشاهده و مقایسه با آنچه در واقعیت اتفاق افتاده بود، نبود. لذا بعد از مکانیابی در نمونه‌های مارشال تصمیم گرفته شد که از نمونه‌های تیرچه آسفالتی نیز برای مکانیابی استفاده شود که هم ابعاد بهتری برای بررسی دو بعدی مکانیابی با توجه به تعداد سنسورها دارند و هم در عین حال شکننده‌تر هستند و محل گسیختگی در آنها واضحتر و قابلیت مقایسه و بررسی واقعیت با آنچه در انتشارآکوستیک افتاده است را دارد. عکس‌های زیر از مراحل آزمایش در مکانیابی‌ها آورده شده است:

شکل ۴-۹. نمونه مارشال در آزمایش مکانیابی



شکل ۴-۱۰. نمونه تیرچه آسفالتی در آزمایش مکانیابی

فصل ۵ : تفسیر و تحلیل نتایج

۵-۱ مقدمه

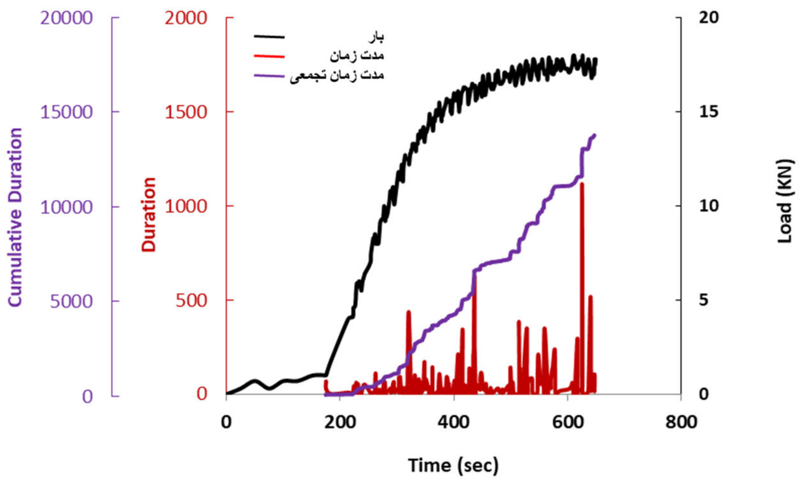
همانطور که پیش‌تر نیز گفته شد دو مدل نمونه برای آزمایش‌ها آماده و بر روی هر نمونه دو ارزیابی انجام داده شده است. در هر نمونه ابتدا با نتایج حاصل از امواج انتشارآکوستیک نمودارهای پارامترها رسم و فرآیند گسیختگی با استفاده از این پارامترها ارزیابی و سپس همین روند تغییرات فرآیند گسیختگی در نمونه‌ها با استفاده یکی از بهترین نمایشگرهای پرکاربرد این روش یعنی نمایش مکانیابی[1] تحلیل و بررسی شدند. آزمایش مارشال و تیرچه آسفالتی هر کدام حداقل با سه بار تکرار انجام شده‌اند. داده‌های خام حاصل از آزمایش‌ها که فقط یکی از آنها برای مثال در فصل قبل آورده شده‌است در پیوست آورده شده‌اند. در این فصل تنها نمایش‌ها و نمودارهای حاصل از داده‌های خام آورده شده‌اند. قابل اشاره است که همانطور که در قسمت نمایش‌های روش انتشارآکوستیک در فصل دوم به طور کامل توضیح داده شد با این ارزیابی غیرمخرب می‌توان هر نمودار و یا نمایش دلخواهی رسم کرد. فقط در قبل از شروع آزمایش با استفاده از پردازشگرها، آنها را تعریف کرده و در آخر برداشت می‌شوند. در هر یک از آزمایش‌ها چند مدل از آنها را نیز برداشت شده‌اند که آنها هم در ادامه آورده و توضیح داده شده‌اند.

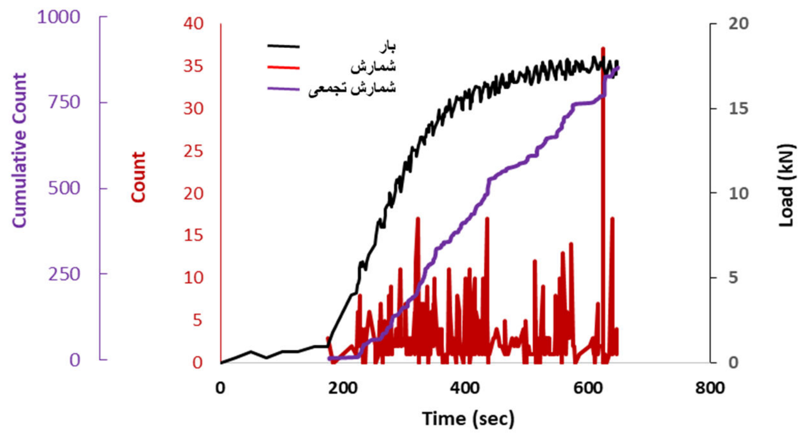
Source location[1]

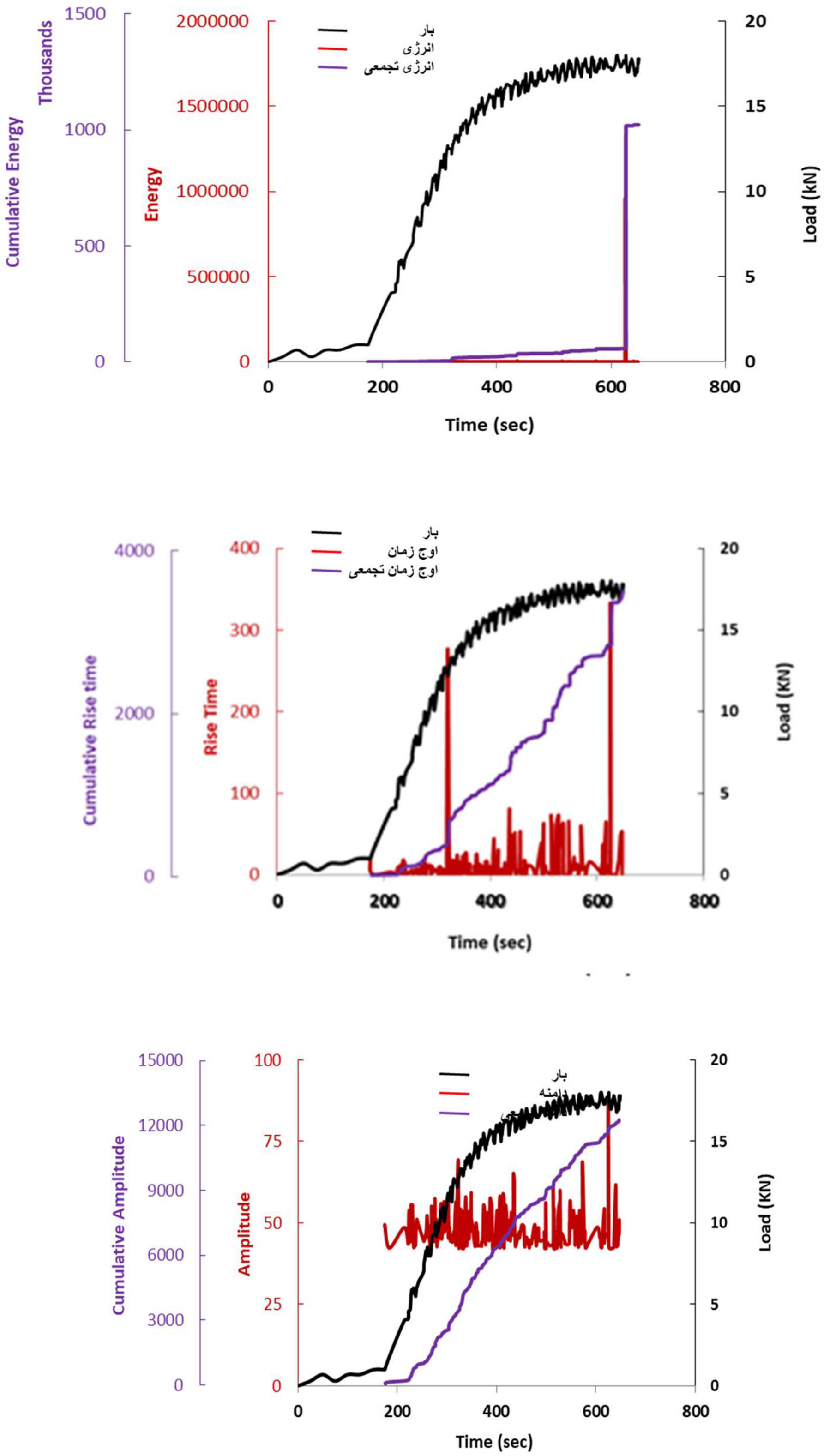
۵-۲ نمونه مارشال

۵-۲-۱ تحلیل پارامتری

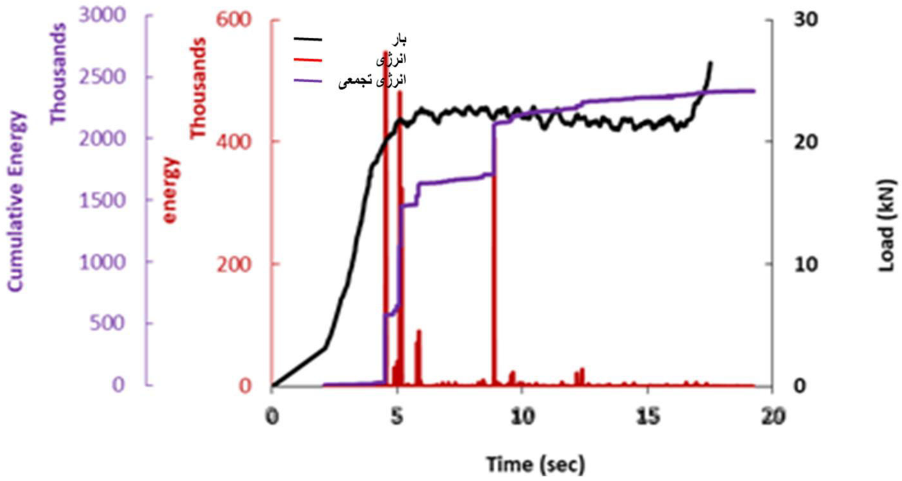
در این تحلیل برای رسم، نمودار همه‌ی پارامترهای حاصل از سیگنال‌های انتشارآکوستیک و تجمعی آنان با زمان رسم و سپس نمودار بار به زمان متناظر با آن مطابقت داده می‌شود. در شکل ۵-۱، نمودارهای اولین نمونه یعنی مربوط به نمونه مارشال آزمایشی با سرعت ۲ کیلونیوتن بر دقیقه و شکل زیر آن یعنی شکل ۵-۲، نمودارهای یکی از نمونه‌های آزمایش که با سرعت استاندارد مارشال یعنی ۵۰/۸ میلیمتر بر دقیقه انجام شد، آورده شده‌است.

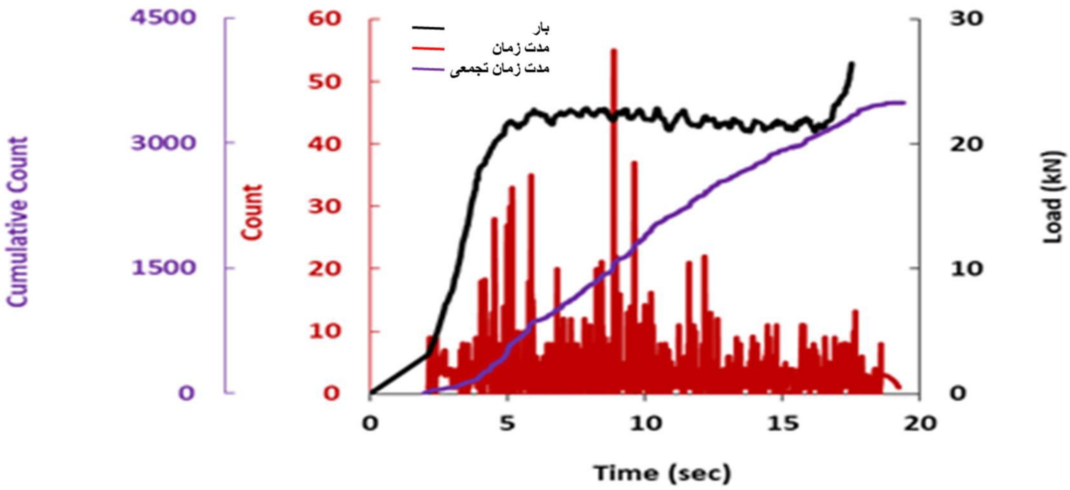


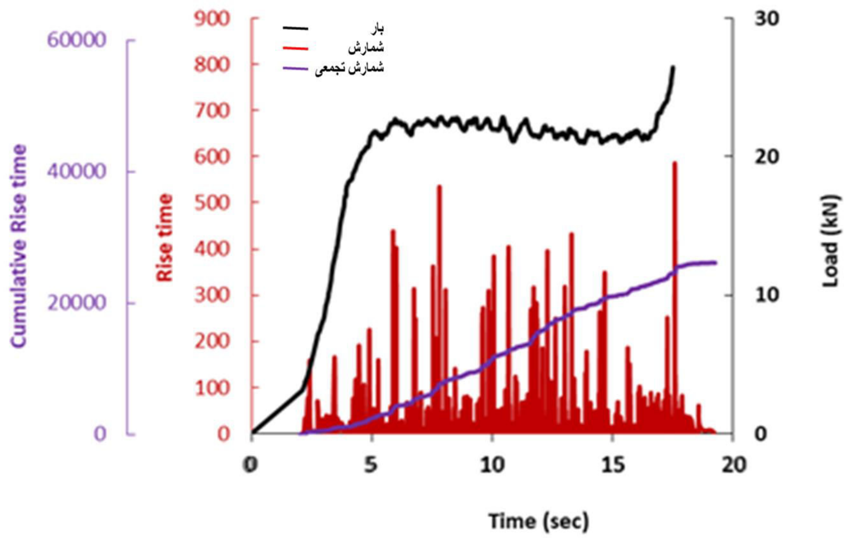


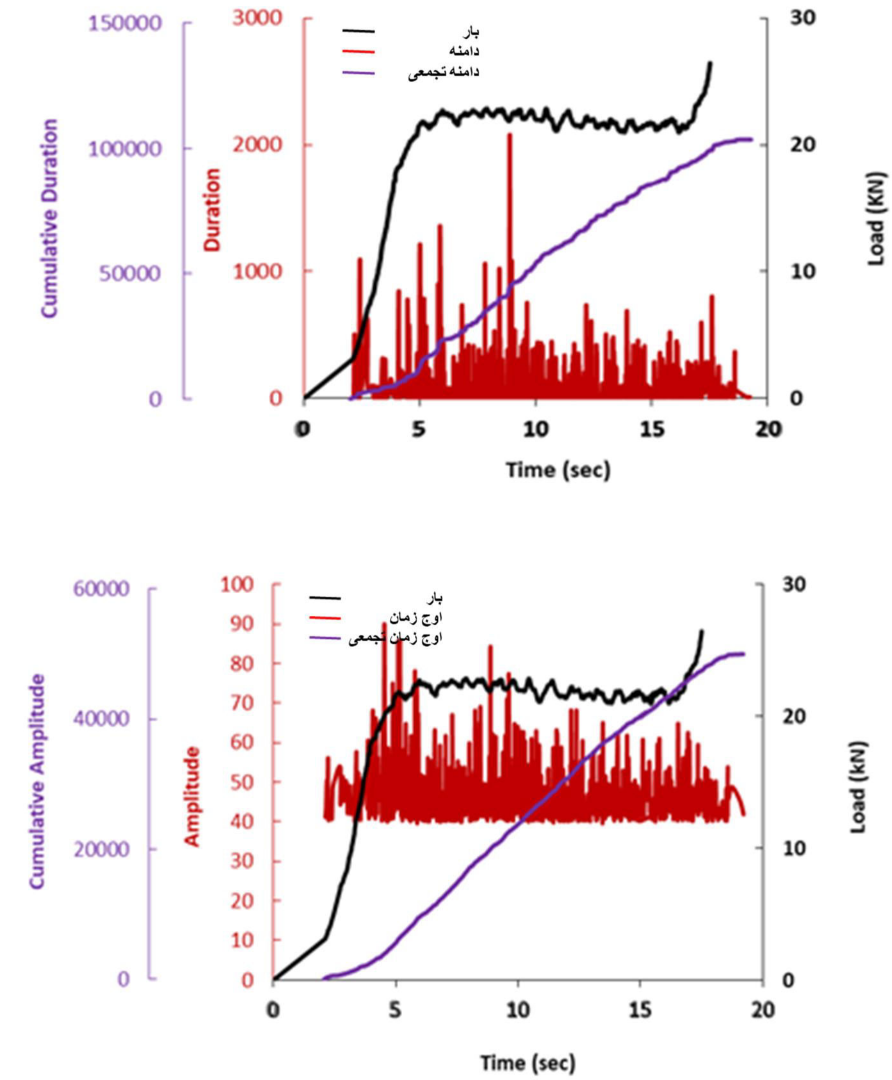


شکل ۵-۱. نمودارهای پارامترهای انتشارآکوستیک نمونه در آزمایش با سرعت ۲ کیلونیوتن بر دقیقه


بار
انرژی
انرژی تجمعی
Cumulative Energy
Thousands
energy
Thousands
Load (kN)
Time (sec)


بار
مدت زمان
مدت زمان تجمعی
Cumulative Count
Count
Load (kN)
Time (sec)


بار
شمارش
شمارش تجمعی
Cumulative Rise time
Rise time
Load (kN)
Time (sec)



شکل ۵-۲.نمودارهای پارامترهای انتشارآکوستیک نمونه در آزمایش مارشال با سرعت استاندارد

در همه نمودارهای دو شکل بالا یعنی شکل‌های ۵-۱ و۵-۲، نمودار مشکی رنگ، نمودار تغییرات بار به زمان و نمودار قرمز رنگ، نمودار تغییرات پارامترهای انتشارآکوستیک به زمان و نمودار بنفش رنگ، نمودار تجمعی پارامترهای انتشارآکوستیک به زمان را نشان می‌دهند. مطالعاتی که تاکنون انجام شده اشاره شده است که تنها پارامترهای شمارش و انرژی به خوبی روند گسیختگی را نشان می‌دهند، در اینجا نمودار همه پارامترها آورده شده‌اند. این موضوع در این مطالعه نیز برقرار است یعنی همانند سایر مطالعاتی که تاکنون با انتشارآکوستیک انجام شده است، بهترین پارامتر در این مطالعه نیز شمارش و

انرژی می‌باشد. در اینجا تنها برای هر آزمایش متفاوت، نمودار پارامترها آورده شده است ولی در صورت نیاز می‌توان برای رسم آزمایش‌های تکراری، به داده‌های خام در پیوست رجوع کرد. هدف در این قسمت اشاره به نکات مشترک بین آنها که مطابق با روند نمودارهای بار به زمان می‌باشد، است. در همه‌ی آنها مشاهده می‌شود که:

نمودار پارامتر انرژی انتشارآکوستیک دارای تغییرات خیلی کم و اکثر آنها فقط در حدود ۱۰۰ بار ماکزیمم یک جهش بزرگ با بیشترین مقدار انرژی را داشته‌اند.

در همه نمودارها چندین جهش بزرگ در مقادیر پارامترها مشاهده می‌شود که معمولاً ثانیه این جهش های بزرگ در نمودار همه پارامترها در یک نمونه یکسان است. این جهش‌ها نمودارها را به چندین قسمت تقسیم می‌کند که این قسمت‌ها نشان‌دهنده مراحل تغییر در نمونه می‌باشند. جهش‌ها در نمودار پارامترهای انتشارآکوستیک با تغییرات شیب نمودار بار به زمان مطابقت دارد به عبارتی می‌توان گفت هر تغییر شیب در نمودار بار به زمان، یک جهش ناگهانی در نمودار پارامترها می‌باشد که در صورت ثابت بودن شیب نمودار بار به زمان در هر قسمت، تغییر در مقدار پارامترها کم است. در نمودار همه پارامترها شروع اتفاق افتادن رخدادهای انتشارآکوستیک در ثانیه‌ای است که مقدار بار در آن ثانیه، بین ۵تا ۱۰درصد بار ماکزیمم است و اولین مرحله تغییر در نمونه می‌باشد. شیب در نمودار بار به زمان در مقداری بین ۱۰تا ۸۵ درصد ثابت و نشاندهنده دومین قسمت و مرحله تغییر در نمونه است. در بین ۸۵ تا ۱۰۰ درصد بار دومین تغییر شیب در نمودار بار به زمان اتفاق می‌افتد که نشاندهنده مرحله آخر تغییر در نمونه است و بعد از چند ثانیه که بار به مقدار ماکزیمم می‌رسد و نمونه به گسیختگی کامل رسیده است اتفاقات انتشارآکوستیک پایان خواهند یافت.

غیر از تغییر شیب در همه نمودارها یک نقطه وجود دارد که بیشترین مقدار را در هر پارامتر دارد. این نقطه همیشه در ۱۰۰درصد بار اتفاق افتاده است و اگر در همه پارامترها حدود یک زمان باشد می‌تواند نشان‌دهنده زمانی باشد که بیشترین درصد خرابی در آن زمان در نمونه اتفاق افتاده

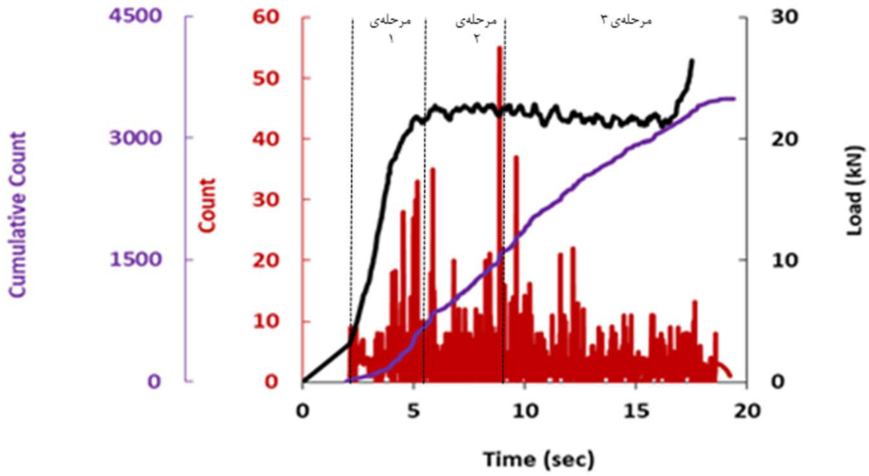
باشد.

می‌توان اشاره کرد که مراحل بالا را می‌توان به سه قسمت کلی زیر، همانند سایر مطالعاتی که بر روی آسفالت با انتشار آکوستیک انجام شده است (در فصل پیشینه تحقیق به آن اشاره شده است) تقسیم کرد:

مرحله‌ی۱: شروع ترک های موئی[1] و گسترش آنها

مرحله‌ی۲: شروع ترک‌های درشت[2] و گسترش آنها

مرحله‌ی۳: گسیختگی



شکل ۵-۳.مراحل رشد موئی تا گسیختگی در نمونه در آزمایش مارشال با سرعت استاندارد

برای تعیین مراحل بالا بدون در نظرگرفتن نمودار بار به زمان و تغییرات شیب در آنها، کافی است ثانیه‌هایی که جهش در همه نمودارهای پارامترها اتفاق افتاده است را در نظر گرفت، یعنی برای تعیین این مراحل کافی است در نمودار پارامترهای یک نمونه، جهش هایی که در همه پارامترها در یک زمان اتفاق افتاده است را به عنوان تعیین مراحل مختلف در همان نمونه در نظر گرفت.

[1] microcrack
[2] macrocrack

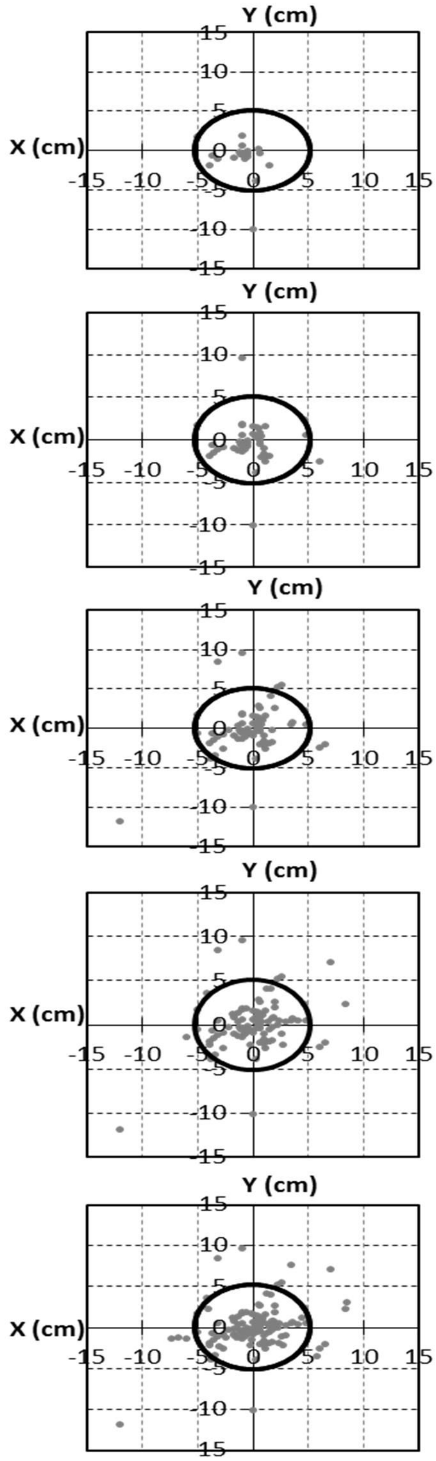
۵-۲-۲ تحلیل با نمایش مکانیابی

این نمایش جزء اولین نمایش‌های تنظیم شده در آزمایشات بود که به دو دلیل صحت آن زیر سوال می‌رفت:

۱. وجود نقاطی در خارج از نمونه

۲. نداشتن زمان وقوع دقیق از رخدادهای رسم شده

هرچند که محل رخدادهای انتشارآکوستیک با آنچه در واقعیت اتفاق افتاده بود، یکسان بودند و همه نمونه‌ها حین تغییرشکل از قسمت وسط برآمده شدند. در اینجا تصمیم به استفاده از نمونه‌های تیرچه آسفالتی شد که در آنها ضمن مقایسه دقیق نمونه با آنچه در نتایج اتفاق افتاده بود، دو مشکل ذکر شده در ابتدا نیز حل شد.

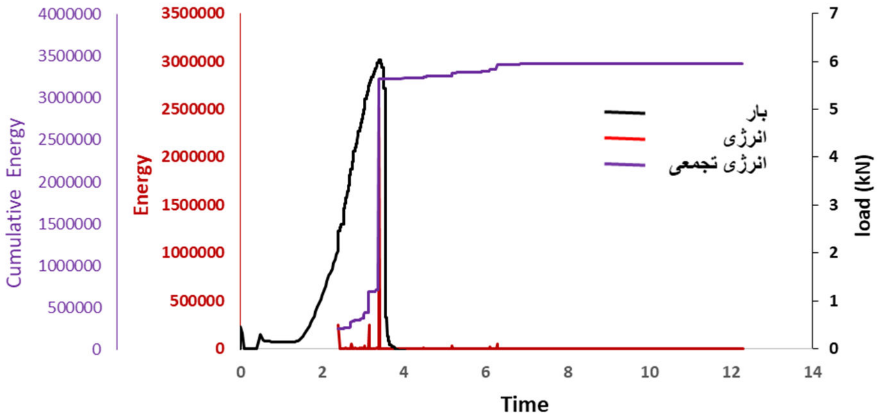


شکل ۵-۴.نمایش روند رخدادهای انتشار آکوستیک نمونه مارشال

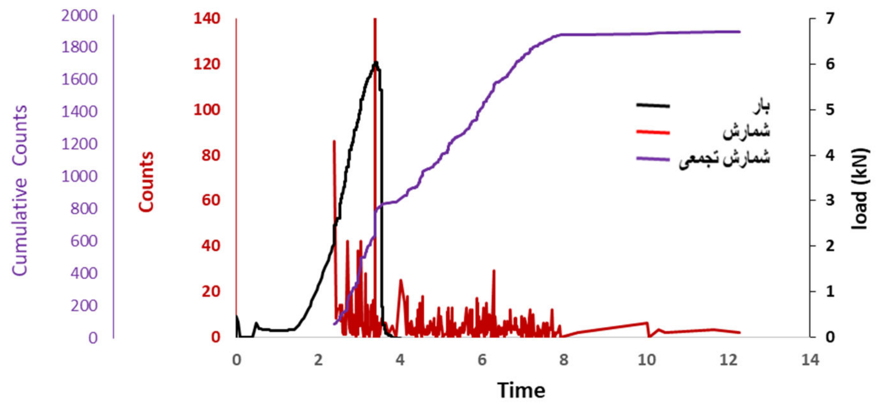
۵-۳ نمونه تیرچه آسفالتی

۵-۳-۱ تحلیل پارامتری

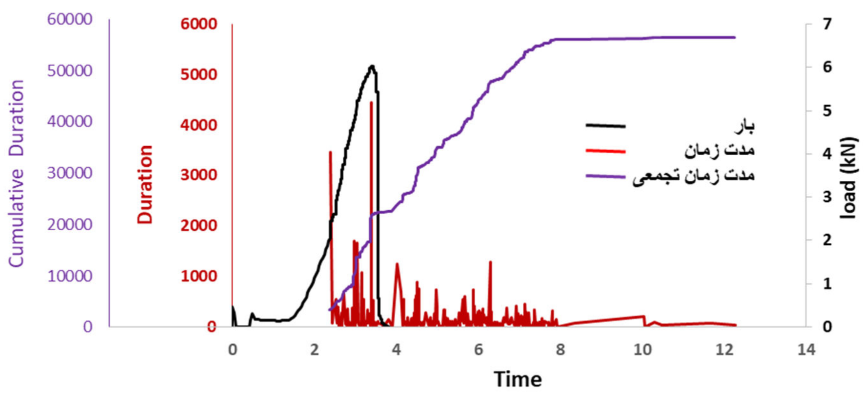
در این تحلیل نمودارهای همه‌ی پارامترهای حاصل از سیگنال‌های انتشارآکوستیک و تجمعی آنان با زمان رسم و سپس نمودار بار به زمان متناظر با آن مطابقت داده می‌شود. این نمودارها که همانند نمودارهای پارامتریک در نمونه‌های مارشال است، در شکل ۵-۵ آورده شده‌اند. در شکل ۵-۵ نیز در نمودار مشکی رنگ، نمودار تغییرات بار به زمان و نمودار قرمز رنگ، نمودار تغییرات پارامترهای انتشارآکوستیک به زمان و نمودار بنفش رنگ، نمودار تجمعی پارامترهای انتشارآکوستیک به زمان را نشان می‌دهند. این نمونه‌ها که از سطح جاده برش داده شده‌اند دارای قیر کهنه و به همین دلیل به نسبت نمونه‌های مارشال رفتار ترد و شکننده‌تری از خود نشان می‌دهند و تفاوت در نمودارهای بار به زمان آنها نسبت به نمونه‌های مارشال به دلیل ماهیت نمونه‌ها می‌باشد. ولی با این تفاوت باز هم نمودار پارامترهای انتشارآکوستیک آن با نمودار بار به زمان آن بخوبی مطابقت دارد. به طور کلی مراحل آن با مراحل کلی تعریف شده در بالا سازگار است فقط به همین دلیل رفتار شکننده هر کدام از مراحل بالا که در نمونه‌های مارشال به صورت بازه زمانی هستند در نمونه‌های تیرچه آسفالتی بسیار کوتاه شده‌اند. همچنین این نمونه‌ها در درصد بار بیشتری تقریبا (حدود ۳۰ درصد بار ماکزیمم) شروع به انتشارآکوستیک کرده‌اند که این موضوع می‌تواند ناشی از اثر کایزر باشد و احتمالا به ماکزیمم بار پیشین رسیده تا رخداد انتشارآکوستیک رخ دهد که تقریباً می‌توان گفت مرحله‌ی ترکهای موئی در این نمونه به دلیل اینکه آسفالت کهنه است و تا مقداری بار تحمل کرده حذف شده است. البته یکی از مطالعه‌هایی که در قسمت پیشینه تحقیق ذکر شد، اثر کایزر را کمی تغییر داد و ذکر کرد در آسفالت، باید به ماکزیمم کرنش پیشین خود برسد تا رخداد انتشارآکوستیک رخ دهد، در این مطالعه نمی‌توان در مورد این موضوع که کدام نظر در اینجا برقرار است اظهارنظر قطعی داد. در این قسمت هم با اینکه برای تنها برای یک نمونه نمودار آورده شده‌است ولی در صورت نیاز می‌توان برای رسم آزمایش‌های تکرار به داده‌های خام در پیوست رجوع کرد.



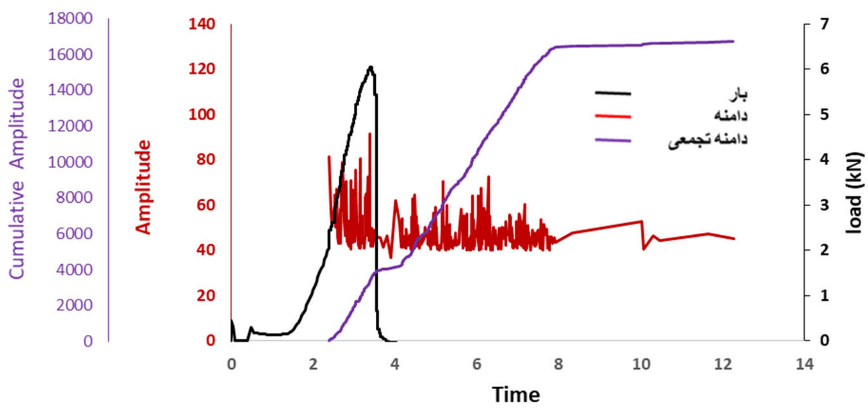
Cumulative Energy
Energy
load (kN)
Time
بار
انرژی
انرژی تجمعی



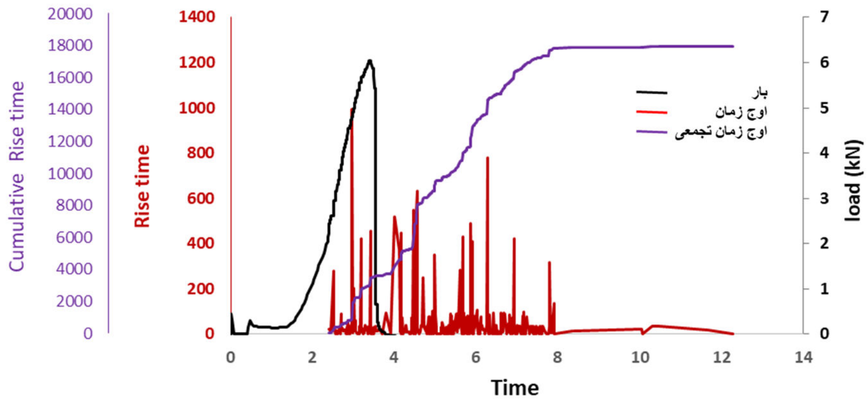
Cumulative Counts
Counts
load (kN)
Time
بار
شمارش
شمارش تجمعی



Cumulative Duration
Duration
load (kN)
Time
بار
مدت زمان
مدت زمان تجمعی



Cumulative Amplitude
Amplitude
load (kN)
Time
بار
دامنه
دامنه تجمعی



شکل ۵-۵.نمودارهای پارامترهای انتشارآکوستیک نمونه در آزمایش تیرچه آسفالتی

۵-۳-۲ بررسی نمایش مکانیابی

این نمایش از آخرین نمایش‌های تنظیم شده در آزمایشات بود که دو مشکل زیر که در نمایش‌های مکانیابی نمونه‌های مارشال موجود بود، در آن رفع شد:

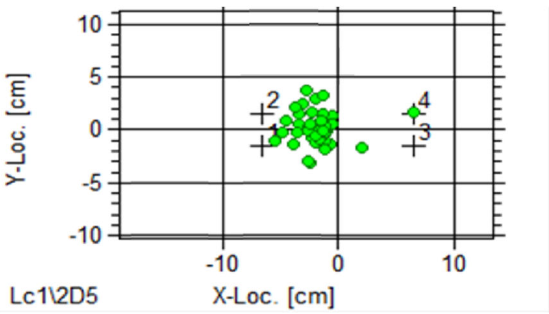
۱. وجود نقاطی در خارج از نمونه

۲. نداشتن زمان وقوع دقیق از رخدادهای رسم شده

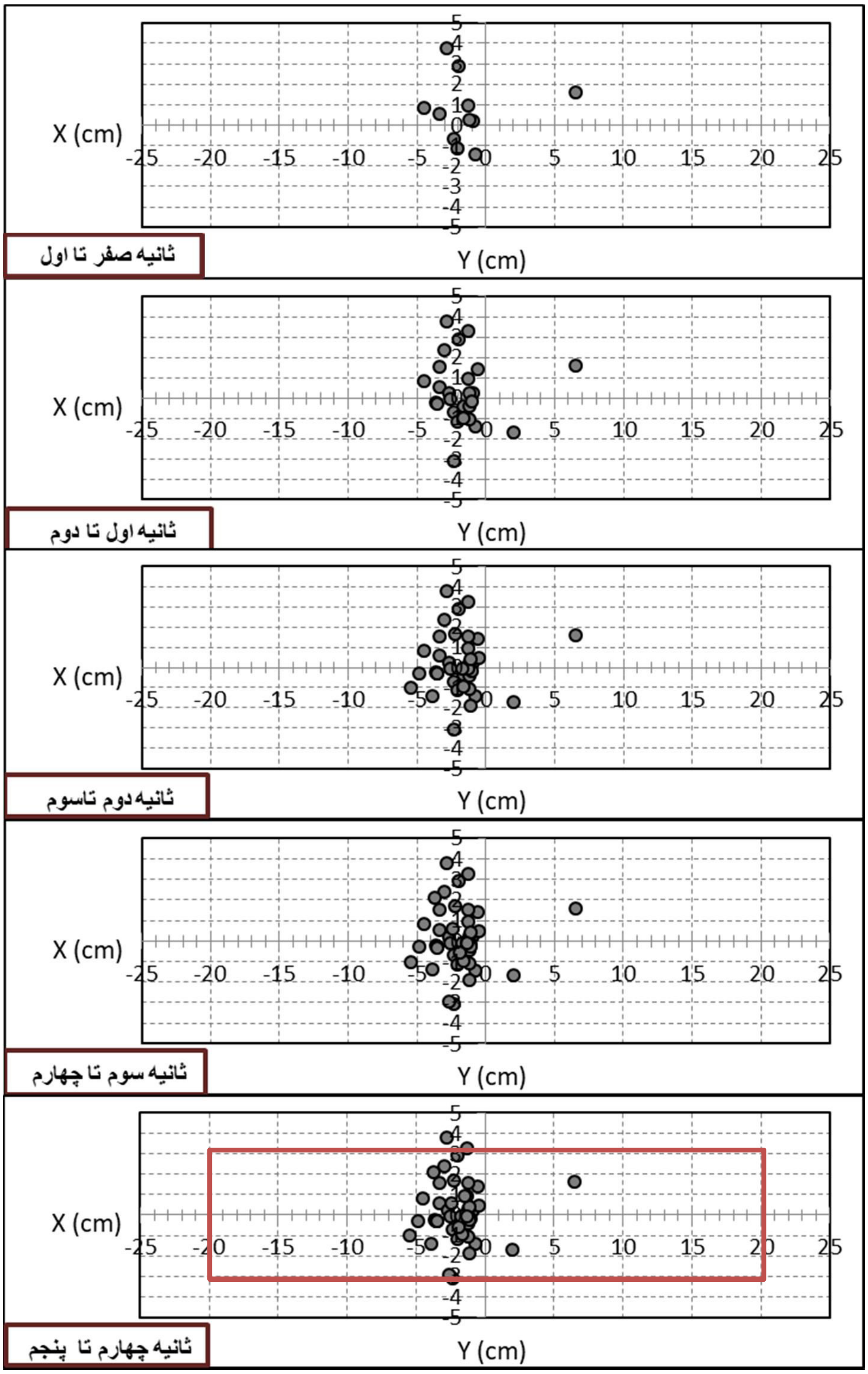
قبل از این نمایش، دو عکس از نمونه در حالتهای قبل و بعد از آزمایش گذاشته شده که نشان‌دهنده این است که محل رخدادهای انتشارآکوستیک به راحتی محل دقیق گسیختگی را نشان می‌دهند.

شکل ۵-۶.نمایش نمونه تیرچه آسفالتی قبل و بعد گسیختگی

شکل ۵-۷.نمایش نمونه تیرچه آسفالتی قبل و بعد گسیختگی

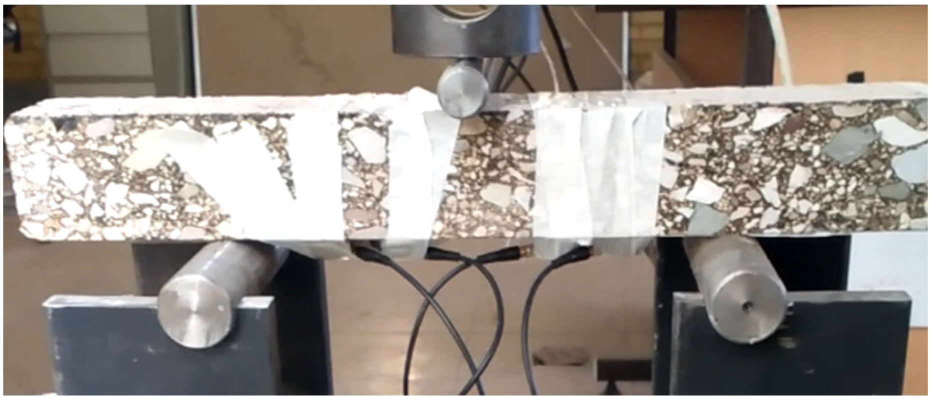


شکل ۵-۸.نمایش رخدادهای انتشار آکوستیک نمونه تیرچه آسفالتی

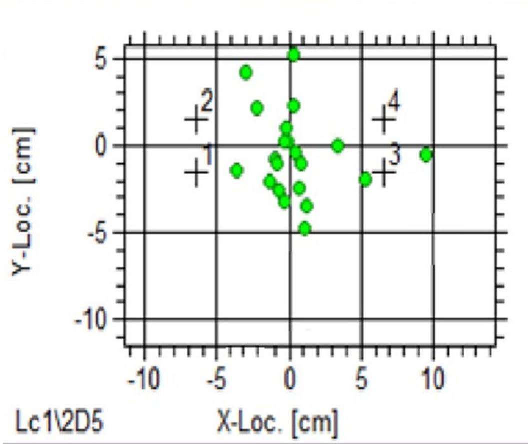


شکل ۵-۹.نمایش روند رخدادهای انتشار آکوستیک نمونه تیرچه آسفالتی

در انجام تکرار این آزمایش مشاهده شد که صفحه‌ای که برای نصب سنسور انتخاب می‌شود از اهمیت بالایی برخوردار است. صفحه اشتباه انتخاب شده تا حد زیادی امواج دریافت شده در صفحه را کاهش و دقت آزمایش را نیز به شدت کاهش می‌دهد. این موضوع در نمونه‌ای که سنسورها در صفحه زیر گذاشته شده است بخوبی نشان داده شده است. عکس‌های زیر این موضوع را نشان می‌دهد:



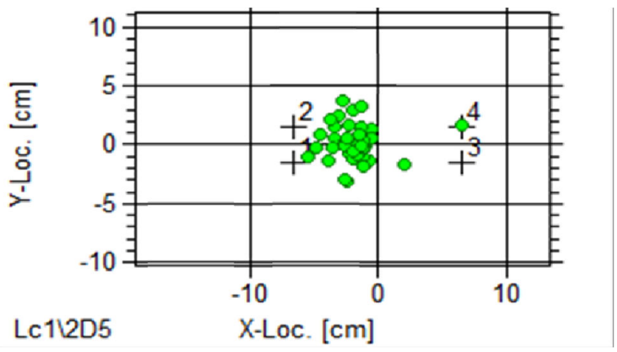
شکل ۵-۱۰.نمایش نمونه تیرچه آسفالتی حین آزمایش



شکل ۵-۱۱.نمایش رخدادهای انتشار آکوستیک نمونه تیرچه آسفالتی

۵-۴ تحلیل پارامتری انتخابی

همانطور که در قسمت (۲-۶) نمایشهای انتشارآکوستیک توضیح داده شد یکی از مزیت‌های انتشارآکوستیک این است که با اطلاعات کمی قبل از آزمایش می‌توان هر نمودار یا نمایش دلخواه را تنظیم کرد تا بعد از آزمایش نمایش دهد. نمایش‌های زیر چند نمودار انتخابی از پارامترهای انتشارآکوستیک است که مربوط به همین آخرین آزمایش است که در قسمت (۵-۳-۲) آورده شده بود است و توضیح داده خواهد شد.



شکل ۵-۱۲.نمای مکان رخدادهای انتشارآکوستیک در پایان آزمایش

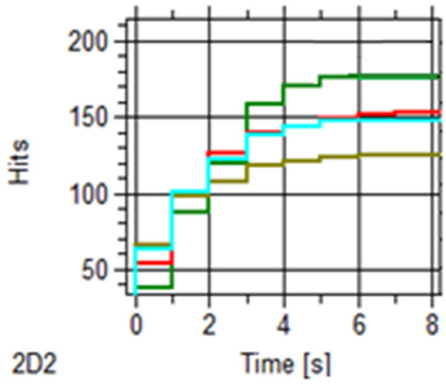
شکل ۵-۱۲ همانطور که قبلتر نیز توضیح داده شد نمایش مکانیابی است که انتشارآکوستیک ارائه می‌دهد. این نمایش مکان رخدادهای انتشارآکوستیک را می‌دهد که برای ایجاد آن تعریف محل دقیق سنسورهای نصب شده روی جسم نیاز است. یکی دیگر از مواردی که برای تنظیم این نمایش لازم است، سرعت انتشار امواج در جسم است. برای داشتن این عدد می‌توان از آزمایشهای دیگری همچون اولتراسونیک[۱] کمک گرفت. البته این دستگاه نیز قابلیت اینکه با کمک آزمایش شکستن قلم[۲] سرعت موج را در هر ماده دلخواه به ما بدهد، نیز دارد[29]و[15] . در اینجا این قلم موجود نبود برای همین تصمیم بر این شد که در اینجا از مطالعات دیگر و همچنین یکی از آزمایش‌های اولیه که سنسور در

[1] Ultrasonic
[2] PENCIL-LEAD BREAKS

دو طرف نمونه نصب شده است، با استفاده از زمان رسیدن[1] یک سیگنال که به دو سنسور رسیده بود و فاصله آنها که برابر ارتفاع نمونه است و کمک از فرمول زیر سرعت انتشار سیگنال را در نمونه‌های آزمایش بدست آورده شود. هر چند که این روش دقت را کاهش و در نتیجه استفاده از سایر روش‌ها توصیه می‌شود.

$$\square = \frac{\square_1 + \square_2}{\Delta \square} \qquad (۱-۵)$$

سرعت امواج در مواد مختلف متفاوت و به عوامل مختلفی مانند مواد تشکیل دهنده نمونه، درصد هوا، درصد رطوبت، شرایط موجود در محیط و ... بستگی دارد[30]. به همین دلیل برای صحت از دقت عدد بدست آمده در بعضی از آزمایشات کمی بالاتر و پایینتر از عدد بدست آمده قرار داده شد که نتیجه آن، عدم نمایش هیچ رخدادی و یا حتی نشان دادن منبع رخدادهای اشتباه بود.

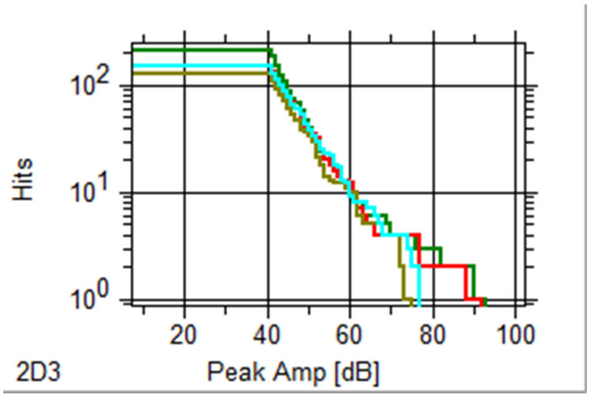


شکل ۵-۱۳.نمودارهای رخدادهای انتشارآکوستیک سنسورهای متفاوت با زمان

شکل ۵-۱۳ نمایش ضربه‌های امواج را نسبت به زمان نشان می‌دهد. بنابر تعریف ضربه (در فصل دوم:انتشارآکوستیک ذکرشد) که برابر است با سیگنالی که از آستانه شروع بالاتر رفته و باعث ثبت داده شود، این موضوع کاملا منطقی است که با افزایش بار تعداد امواج ثبت شده افزایش می‌یابد و بعد از رسیدن به خرابی دیگر این افزایش ادامه نخواهد داشت که همه سنسورها دارای یک روند، فقط نمودار سنسورهای دورتر، پایین‌تر قرار می‌گیرند. دلیل پایین‌تر بودن روند این سنسورها، دریافت کمتر

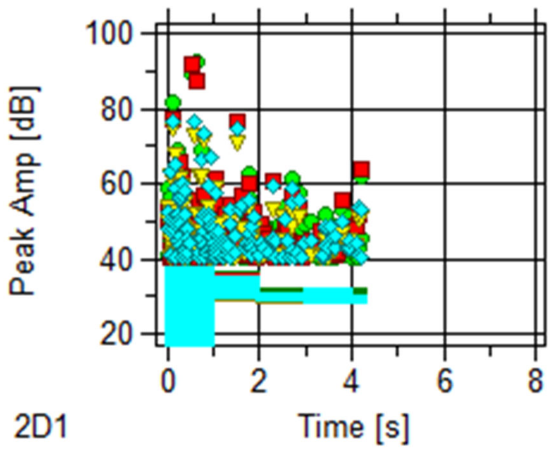
[1] Arrival time

امواج توسط سنسورهای دورتر می‌باشد زیرا سیگنال با گذشت زمان ضعیف‌تر می‌شود.



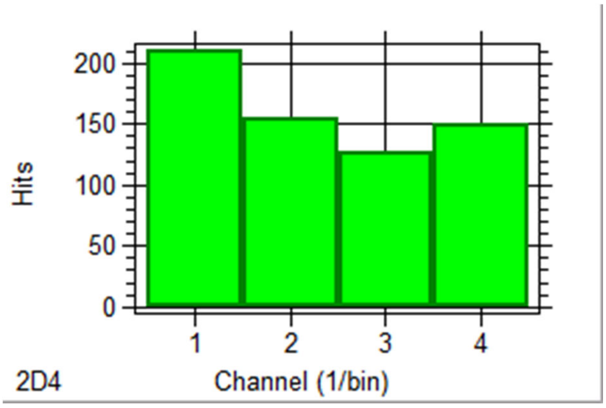
شکل ۵-۱۴.نمودارهای رابطه بین ضربه و اوج دامنه در نمونه تیرچه آسفالتی

در ابتدای آزمایش تعداد ضربه‌ها کم و با گذشت زمان و با افزایش بار تعداد امواج ثبت شده افزایش می‌یابد و بعد از رسیدن به خرابی دیگر این افزایش ادامه نخواهد داشت و کمی بعد از گسیختگی نیز به طور کامل قطع خواهد شد. در همین زمان دامنه امواج نیز از زمان شروع تا گسیختگی و اوج بار در بیشترین حالت خود قرار دارند و بعد از آن که تعداد ضربه‌های دریافت شده ثابت و بدون افزایش است دامنه نیز در حال کاهش است. این رابطه بین ضربه و اوج دامنه به خوبی در نمودارهای شکل ۵-۱۴ مشخص است.



شکل ۵-۱۵.نمایش اوج دامنه با زمان در نمونه تیرچه آسفالتی

با گذشت زمان و رسیدن به اوج بار، دامنه امواج نیز به بیشترین مقدار خود رسیده که با کاهش بار و زمان سپری شده بیشتر و با گسیختگی نمونه دامنه امواج نیز کاهش می‌یابند . همانطور که در شکل ۵-۹ نیز مشخص است اوج گسیختگی بنابر منبع رخدادها تا ثانیه ۲ بوده است. بیشترین دامنه ضربه-های دریافت شده در این ثانیه‌ها در شکل ۵-۱۵ نیز همین موضوع را نشان می‌دهد.



شکل ۵-۱۶.نمودارهای رخدادها در نمونه خمش برای سنسورهای متفاوت

همانطور که گفته شد این نمودارهای آزمایش آخر است که در قسمت 5-3-2 گذاشته شده است. بنابراین، اینکه سنسورهای نزدیکتر امواج بیشتر با شدت بیشتری دریافت کنند کاملا منطقی است. زیرا امواج با گذشت زمان ضعیفتر می‌شوند و دور بودن بعضی از سنسورها نیز باعث عدم دریافت بعضی امواج توسط آن سنسورها می‌شود. بنابر شکل ۵-۱۶ در این نمونه سنسور ۱ نزدیکترین سنسور به محل رخدادهای انتشارآکوستیک است. بعد از آن سنسور ۲ و ۴ به ترتیب و سنسور ۳ نیز بیشترین فاصله را از محل رخدادهای انتشارآکوستیک دارد که این موضوع با شکل ۵-۸ که محل سنسورها در آن مشخص است مطابقت دارد.

فصل ۶ نتیجه گیری و پیشنهادات

در این مطالعه، دو نمونه استاندارد آسفالتی مارشال تازه ساخته شده و تیرچه آسفالتی دارای قیر پیر شده که به دلیل ماهیت متفاوت، دارای رفتارهای متفاوت هستند، تحت بارگذاری قرار داده و شکل-گیری و گسترش ترکهای موئی در آنها با استفاده از روش انتشارآکوستیک بررسی و مطالعه شده است. دستگاه بارگذاری استفاده شده، دستگاه یونیورسال می‌باشد که بار استاندارد ۵۰/۸ میلیمتر بر دقیقه را بر روی نمونه‌ها اعمال کرده است و سیستم انتشارآکوستیک سیستم ۴ کاناله با نرم افزار ولن[1] ای-ام-اس وای۶[2] بوده است. بعد از انجام آزمایش با داده‌های برداشت شده از انتشارآکوستیک نمودار پارامترهای امواج با زمان رسم و با نمودار بار به زمان نمونه‌ها مطابقت داده شده‌اند. همچنین محل و نحوه شکل‌گیری و گسترش ترکهای موئی در آنها با استفاده از مکانیابی رخدادهای انتشارآکوستیک نشان داده شده است. در آخر با استفاده از نتایج حاصل از این مطالعه نتیجه‌گیری شده است که:

۱. می‌توان محل و روند گسترش ترکهای موئی تا گسیختگی در هر نوعی از آسفالت را با استفاده از مکان رخدادهای انتشارآکوستیک نشان داد. در آسفالت تازه ساخته شده مارشال که نمونه‌ها با گسیختگی دچار تغییر شکل و نمونه های تیرچه آسفالتی که به طور کامل شکسته شده‌اند، این موضوع کاملا صادق است.

۲. با استفاده از مطابقت نمودارهای پارامترهای انتشارآکوستیک به زمان با نمودارهای بار به زمان، روند گسترش ترکهای موئی تا گسیختگی در آسفالت به سه مرحله اساسی زیر تقسیم شده‌است:

- مرحله‌ی۱: شروع آن، شروع ترک موئی و بعد از آن گسترش ترکهای موئی
- مرحله‌ی۲: شروع آن، شروع ترک و بعد از آن گسترش ترکها
- مرحله‌ی۳: گسیختگی

این مراحل هم در نمونه‌های تازه ساخته شده و هم نمونه‌های کهنه و استفاده شده آسفالتی برقرار است، فقط در نمونه‌های کهنه و استفاده شده آسفالت است با توجه به

[1] Vallen-System
[2] AMSY-۶

ماکزیمم باری که قبلاً به نمونه وارد شده است، قسمتی از مراحل ۱و ۲ حذف شود. این موضوع به دلیل اثر کایزر که بیان می‌کند رخداد انتشارآکوستیک رخ نمی‌دهد مگر اینکه جسم به ماکزیمم تنش که در جسم قبلا ایجاد شده برسد و بعد از آن امواج انتشار آکوستیک ثبت خواهند شد،کاملا منطقی می‌باشد.

نمودار پارامتر انرژی انتشارآکوستیک تغییرات خیلی کم و اکثر آنها در حدود ۱۰۰ درصد بار ماکزیمم (یعنی در مرحله گسیختگی)، یک جهش بزرگ با بیشترین مقدار انرژی را داشته‌اند.

در همه نمودارها چند جهش ناگهانی بزرگ وجود دارد که نمودارها را به چندین قسمت تقسیم می‌کند. جهش‌ها در نمودار پارامترهای انتشارآکوستیک با تغییرات شیب نمودار بار به زمان مطابقت دارد به عبارتی می‌توان گفت هر تغییر شیب در نمودار بار به زمان، یک جهش ناگهانی در نمودار پارامترها می‌باشد که در صورت ثابت بودن شیب نمودار بار به زمان در هر قسمت تغییر در مقدار پارامترها کم است.

در نمونه‌های تازه ساخته شده مارشال در همه نمودارها یک نقطه وجود دارد که بیشترین مقدار را در هر پارامتر دارد. این نقطه همیشه در ۱۰۰درصد بار اتفاق افتاده است و اگر در همه پارامترها حدود یک زمان باشد می‌تواند نشاندهنده زمانی باشد که بیشترین درصد خرابی در آن زمان در نمونه اتفاق افتاده است.

در حین این مطالعه چندین موضوع مورد توجه قرار گرفت که برای ادامه‌ی کار پیشتهاد می‌شوند که عبارتند از:

- رسم نمودار تعداد رخدادهای انتشارآکوستیک به زمان آنها در نمونه‌های متفاوت و با تکرار، برای پیداکردن زمانی برای تخمین عمر نمونه آسفالتی تا شکست
- بررسی نقطه‌ای با بیشترین مقدار پارامترها که بعد از آن هم نمونه هنوز بار تحمل می‌کرده است برای پیدا کردن بهترین زمان تعمیر

- همچنین بررسی درصد سطح کرنش و تنش ماکزیم پیشین که در کدام یک رخداد انتشارآکوستیک دقیقاً در آن نقطه دوباره اتفاق می‌افتد، در نمونه‌های مختلف با تکرار، برای پیداکردن وضعیت و مرحله فعلی آسفالت و تخمین عمر آن تا گسیختگی.

مراجع

[1] M. Y. Shahin, "Pavement Management for Airports, Roads, and Parking Lots, 2nd Edition.pdf." .

[2] C. Hellier, "Handbook of Nondestructive Evaluation." Mcgraw-hill ., pp. 10.1-10.39, 2001.

[3] T. S. Jakub Gajewski, "Sensitivity analysis of crack propagation in pavement bituminous layered structures using a hybrid system integrating Artificial Neural Networks and Finite Element Method." Computational Materials Science journal-Published by Elsevier B, 2013.

[4] K. D. Smith *et al.*, *Rehabilitation coursenotes*, no. January. 1998.

[5] M. O. Frédéric Otto , Pengfei Liu, Zeyu Zhang, Dawei Wang, "Influence of temperature on the cracking behavior of asphalt base courses with structural weaknesses." International Journal of Transportation Science and Technology-Publishing Services by Elsevier, 2018.

[6] Y. T. Jing Hu , Pengfei Liu , Dawei Wang , Markus Oeser, "Investigation on fatigue damage of asphalt mixture with different air-voids using microstructural analysis." 2016.

[7] Behzad Behnia; William G. Buttlar; and Henrique Reis, "Nondestructive Low-Temperature Cracking Characterization of Asphalt Materials." 2016.

[8] منصور فخری، مهدی فرخی, "بررسي نحوه ي گسترش ترك هاي بالا به پايين ۱ در روسازي هاي آسفالتي، با استفاده از (TDC) ۱۳۸۹ نشريه مهندسی عمران مدرس, "فرضيه ي مكانيك شكست.

[9] ش. فلاح, "تأثیر ژئوگرید در به تاخیر انداختن ترکهای انعکاسی در روکشهای آسفالتی," دانشگاه صنعتی امیرکبیر, ۱۳۸٦.

[10] U. D. and M. S. Richard Robinson, *Road Maintenance Management*. MACMILLAN PRESS LTD, 1998.

[11] E. A. El, "Introduction to acoustic emission." The Collaboration for NDT Education, Iowa State University, www.ndt-ed.org., 2011.

[12] H. R. Behzad Behnia a,⇑, Eshan V. Dave b, William G. Buttlar c, "Characterization of embrittlement temperature of asphalt materials through implementation of acoustic emission technique." Elsevier Ltd, 2017.

[13] C. U. Grosse and M. Ohtsu, "Acoustic emission testing: Basics for Research-Applications in Civil Engineering," *Acoustic Emission Testing: Basics for Research-Applications in Civil Engineering*. pp. 1–404, 2008.

[14] F. ZOHORA, "Evaluation of material crack using acoustic emission technique," vol. 47. 2016.

[15] V. S. Gmbh, "AMSY-6 System Description," no. April, 2015.

[16] V. S. Gmbh, "AMSY-6 System Specification," 2017.

[17] T. S. Arash Behnia a, Hwa Kian Chai, "Advanced structural health monitoring of concrete structures with the aid of acoustic emission." Elsevier Ltd.Construction and Building Materials journal, 2014.

[18] V. S. Gmbh, "AMSY-6 Operation Manual," 2017.

[19] X. Li, M. O. Marasteanu, and J. F. Labuz, "Acoustic emission in asphalt mixtures at low temperature," *Proceedings of the 6th International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures*, vol. 3. pp. 1667–1672, 2007.

[20] Y. Seo and Y. R. Kim, “Using Acoustic Emission to monitor fatigue damage and healing in Asphalt Concrete,” *KSCE J. Civ. Eng.*, vol. 12, no. 4, pp. 237–243, 2008.
[21] M. M. Xinjun Li a, “The fracture process zone in asphalt mixture at low temperature.” Elsevier Ltd, pp. 1175–1190, 2010.
[22] W. K. Zietlow and J. F. Labuz, “Measurement of the Intrinsic Process Zone in Rock Using Acoustic Emission,” vol. 35, no. 3, pp. 291–299, 1998.
[23] K. Otsuka and H. Date, “Fracture process zone in concrete tension specimen,” *Eng. Fract. Mech.*, vol. 65, no. 2–3, pp. 111–131, 2000.
[24] C. P. Malick Diakhaté1, Nicolas Larcher2, Mokhfi Takarli2, Nicolas Angellier2, “Acoustic Techniques for Fatigue Cracking Mechanisms Characterization in Hot Mix Asphalt (HMA) Malick.” 2012.
[25] Z. Sun, B. Behnia, W. G. Buttlar, and H. Reis, “Acoustic emission quantitative evaluation of rejuvenators to restore embrittlement temperatures to oxidized asphalt mixtures,” *Construction and Building Materials*, vol. 126. pp. 913–923, 2016.
[26] Y. Jiao, L. Fu, W. Shan, and S. Liu, “Damage fracture characterization of pervious asphalt considering temperature effect based on acoustic emission parameters,” *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 210. pp. 147–159, 2019.
[27] B. Behnia and H. Reis, “Self-healing of thermal cracks in asphalt pavements,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 218, pp. 316–322, 2019.
[28] X. Qiu, J. Xu, S. Xiao, and Q. Yang, “Acoustic emission parameters and waveforms characteristics of fracture failure process of asphalt mixtures,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 215, pp. 135–147, 2019.
[29] M. Sause, “Investigation of pencil-lead breaks as acoustic emission sources,” *J. Acoust. Emiss.*, vol. 29, pp. 184–196, 2011.
[30] W. H. Pan, X. D. Sun, L. M. Wu, K. K. Yang, and N. Tang, “Damage detection of asphalt concrete using piezo-ultrasonicwave technology,” *Materials (Basel).*, vol. 12, no. 3, pp. 1–10, 2019.

Abstract

One of the most important defects in asphalt pavements, which are the most common pavements at present, are microCracks. Spreading this tiny flaw, which is not even visible to the eye at the beginning of its formation, will result in huge financial and non-financial costs. For this reason, many studies are carried out annually to find the appropriate method for better understanding of the formation and spread by researchers. One of the methods that has recently attracted much attention in asphalt behavior is acoustic emission. The acoustic emission method is a non-destructive evaluation method that examines the waves generated by the defect and gives useful information such as the location of formation, the process of expansion, and so on. In this study, two different specimens of standard Marshall and Bent joist were tested under this method and evaluated with the diagrams of the parameters of this method as well as one of its most applicable displays, the process of formation and expansion of microCracks in the specimens. The results show that by applying the parameters of this method, the breakdown stages of each type of asphalt can be divided into three general parts, from microCracks to fractures, as well as the location and process of formation and extension of cracks to fractures in the the new and old asphalts specimen showed with high accuracy using acoustic emission events. Based on the results, it can be demonstrated at any time the status of any type of asphalt, demonstrating the same high and reliable acoustic emission efficiency in structural health monitoring of asphalt repairs and maintenance, which has been demonstrated in various previous studies.

Keywords: Acoustic Emission, microCracks, Event Source location, Bent joist Specimen, Marshall Specimen, Structural health monitoring

Shahrood University of
Technology

Faculty of Civil Engineering

M.Sc. Thesis in Road and Transport Engineering

Study of Formation and Development of micro Cracks in Asphalt using Acoustic Emission Method

By: Matin Ghamari Moghadam

Supervisor:
Dr. Hossien Ghasem zade Tehrani
Dr. Majid Nik khah

Advisor:
Eng. Abbas Mohamadi

Jan.2020