

ارزیابی قابلیت رادار نفوذی زمین (GPR) در تعیین مقاومت کششی لایه آسفالتی اجرا شده

علمی - پژوهشی

پیمان رشیدیان، دانشجوی دکتری، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

محمود رضا کی منش*، دانشیار، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

جلال ایوبی نژاد، استادیار، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: mrkeymanesh@pnu.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۲/۰۲/۱۵ - پذیرش: ۱۴۰۲/۰۷/۲۵

صفحه ۱۵۴-۱۴۳

چکیده

مقاومت کششی لایه آسفالتی از عوامل تاثیرگذار در خرابی‌های بوجود آمده در لایه آسفالتی است. از این جهت معیاری برای سنجش کیفیت لایه آسفالتی اجرا شده در پروژه‌های راهسازی می باشد. روش معمول برای اندازه‌گیری آن مغزه‌گیری است که این روش هزینه بر و وقت گیر است و همچنین خصوصیات کیفی لایه آسفالتی را در یک نقطه مشخص می‌کند. در این مقاله تعیین مقاومت کششی لایه آسفالتی اجرا شده با استفاده از دستگاه رادار نفوذی به زمین (Ground penetrating Radar) بررسی شده است. در این پژوهش ابتدا بخشی از یک راه اجرا شده در استان کرمان به عنوان قطعه آزمایشی انتخاب سپس اقدام به ارزیابی مکانیزه به کمک دستگاه (GPR) گردیده و در ادامه از محل‌هایی به طور تصادفی نمونه‌های مغزه گرفته شده و تحت آزمایش تعیین مقاومت کششی غیر مستقیم قرار داده شده‌اند. در مقایسه نتایج و تجزیه و تحلیل آزمایشات مخرب با پیمایش مکانیزه حاصل از دستگاه (GPR) مشخص گردید با کم‌شدن مقاومت کششی مغزه‌ها مقدار عددی دی الکتریک خروجی از دستگاه (GPR) کاهش و همچنین در صورت افزایش مقاومت کششی مغزه‌ها دی الکتریک افزایش می‌یابد. به طوری که با کاهش مقاومت کششی کمتر و مساوی ۸۷۰ کیلو پاسکال کاهش مقدار ثابت دی الکتریک از عدد ۵ ناشی از ارزیابی غیر مخرب مشاهده شد. بنابراین با استفاده از نتایج خروجی رادار می توان پروفیل پیوسته‌ای از وضعیت مقاومت کششی محور مورد مطالعه به دست آورد.

واژه‌های کلیدی: مقاومت کششی، رادار نفوذی زمین، طول موج، فرکانس، مغزه گیری

۱-مقدمه

[Behbahani and Ayazi and Shojaei,2016]. امروزه، روسازی‌های آسفالتی به دلیل افزایش شدت و تکرار بارهای ترافیکی در راه‌های با ظرفیت بالا، تحت بارگذاری‌های شدید قرار دارند که این عامل منجر به بروز خرابی شیار شدگی می‌گردد [PIARC,2006]. شیارشدگی عمر مفید روسازی را کاهش داده و بر کیفیت جابه‌جایی وسیله نقلیه اثر می‌گذارد. درحالی که وظیفه اصلی

مقاومت کششی از مهمترین پارامترهای تاثیر گذار در ساختار مخلوط آسفالتی است. یک مخلوط آسفالتی با داشتن طرح اختلاط و مقاومت کششی مناسب از بروز شیار افتادگی ناشی از جریان پلاستیک و کاهش شکنندگی آن جلوگیری خواهد کرد. تردد وسایل نقلیه و وارد آمدن بار محوری زیاد به روسازی به مرور زمان باعث بوجود آمدن خرابی‌ها تغییرات دانسیته و شیار شدگی در مسیر چرخ‌ها می‌شود.

تاریخچه استفاده از روش (GPR) در ارزیابی روسازی و زیرسازی جاده‌ها و ابنیه‌هایی از این قبیل به واسطه دهه ۱۹۷۰ برمی‌گردد. اتحادیه مدیریت بزرگراه‌های کشور آمریکا امکان پذیری قابلیت اجرای روش را در بررسی وضعیت تونل‌ها و پس از آن در ارزیابی وضعیت پل‌ها مورد آزمایش قرار دادند. در اوایل دهه ۱۹۸۰، پیمایش‌های (GPR) در کانادا نیز آغاز شد. اولین آزمایش (GPR) جهت مطالعات راهسازی در سال ۱۹۸۶ شروع و بعد از آن آزمایش‌های بیشتری در فنلاند انجام شد، بدینگونه که روش (GPR) به سرعت به یک ابزار پیمایشی معمول در طراحی و پروژه‌های ترمیم و نوسازی در فنلاند تبدیل شده است.

در اواخر دهه ۱۹۸۰ و اوایل دهه ۱۹۹۰، اکثر کاربردها در مطالعات زیر سازی در آمریکای شمالی براندازه‌گیری ضخامت آسفالت، تعیین فضاهای خالی زیر قالب‌های بتنی و تعیین نواحی در حال تخریب در پل‌ها متمرکز گردید و در فرانسه نیز روش (GPR) بیشتر بر ارزیابی وضعیت آسفالت متمرکز می‌باشد. [Ballard, 1992]

امروزه روش رادار نفوذی زمین (GPR) جایگاه ویژه‌ای در میان روش‌های ارزیابی غیر مخرب مهندسی راه پیدا کرده است.

در این روش از امواج الکترومغناطیسی جهت کاوش لایه‌های مختلف زمین و روسازی راه استفاده می‌شود، که با استفاده از محاسبه زمان رفت و برگشت امواج و محاسبه ضریب دی الکتریک مواد، مشخصاتی از لایه مورد ارزیابی را در اختیار کارشناسان قرار می‌دهد.

۲- پیشینه تحقیق

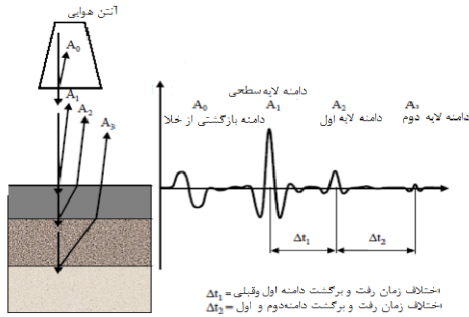
افزایش وسعت و شدت خرابی‌های مرتبط با کم بودن مقاومت کششی از جمله شیار شدگی اخیر نگرانی‌هایی را در ارتباط با عملکرد روسازی‌های آسفالتی به وجود آورده است. این نوع خرابی قابلیت بهره‌برداری را کاهش داده و خطر تأثیرات رطوبت و یخ زدگی را به علت تجمع آب درشیار جای چرخ، افزایش می‌دهد [Fwa and Pasindu and Ong, 2012] بعلاوه، این پدیده سبب ایجاد قیرزدگی نیز می‌شود که طی آن قیر به سطح روسازی آمده و با کاهش اصطکاک، بستر مناسبی برای بروز حوادث رانندگی را مهیا می‌سازد [Divandari et al, 2013] تأثیر دیگر شیار

رویه ایجاد سطحی برای رانندگی مطلوب با مقاومت لغزشی مناسب می‌باشد. [Torabi khodashahri et al, 2015] در روسازی‌های انعطاف پذیر، کم بودن مقاومت کششی باعث ایجاد شیار شدگی در مسیر چرخ‌ها در اثر تجمع تغییر شکل‌های پلاستیک در مصالح لایه‌های روسازی رخ می‌دهد. که یکی از علل آن درصد فضای خالی بیش از اندازه لایه آسفالتی است که این خرابی علاوه بر کاهش ایمنی و راحتی در رانندگی باعث پیشرفت سایر خرابی‌ها می‌گردد. [Taherkhani and Khobre, 2017]

با توجه به رابطه مستقیم مقاومت کششی لایه آسفالتی به درصد فضای خالی آن درصد فضای خالی باید به اندازه‌ای کم باشد تا از نفوذ هوا و آب جلوگیری کند و نیز به اندازه کافی زیاد باشد. تا از بروز جریان پلاستیک در مخلوط آسفالتی پس از عبور ترافیک بعد از گذشت چند سال جلوگیری کند. بنابراین اندازه‌گیری صحیح درصد فضای خالی مخلوط‌های آسفالتی برای کنترل و تضمین کیفیت، ضروری است. در حال حاضر متداول‌ترین روش برای تعیین مقاومت کششی غیر مستقیم لایه آسفالتی آزمایش [ASTM D6931] می‌باشد که یک روش اثبات شده جهت تعیین مقاومت کششی لایه آسفالتی مد نظر است. اما این روش مخرب است و چاله‌های حاصل از مغزه‌گیری باید وصله و مرمت شوند و همچنین دارای سختی کار و زمان بر است. شاید منفی‌ترین وجه مغزه‌گیری مدت زمان زیادی است که صرف آن می‌شود و پروفیل پیوسته‌ای از مقاومت کششی محور مورد مطالعه را ارائه نمی‌دهد. ولی در مقابل با استفاده از دستگاه رادار نفوذی زمین می‌توان به پروفیل پیوسته‌ای از مقاومت کششی محور مورد مطالعه رسید.

سیستم‌های راداری به دلیل ویژگی‌های منحصر به فرد خود از قبیل قابلیت استفاده در شب، انرژی بالا (به دلیل داشتن طول موج در حد چند سانتی‌متر) قابلیت عبور از موانعی نظیر ابر و مه، توانایی تشخیص تغییرات جزئی توپوگرافی زمین، حساسیت به تفاوت‌های موجود در حجم رطوبت خاک، سرعت بالای انتشار امواج آن و توانایی ارائه اطلاعاتی پیرامون موقعیت، اندازه، توجیه، سرعت و حتی طبیعت جسم، ابزاری حائز اهمیت در بین ابزارهای شناخت پدیده‌ها محسوب می‌شوند. [Dadrasjavan and Toosi

Mohamadyvezhe, 2018]



شکل ۱. مکانیسم عملکرد آنتن دوتایی هوایی

$$V = \frac{C}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (2)$$

۲-۲- تعیین مقادیر دامنه لایه آسفالتی

مقادیر دامنه لایه آسفالتی، مقادیر بازتاب عددی هر کدام از لایه‌ها به آنتن می‌باشند. شکل ۱ نشان دهنده مکانیسم عملکرد آنتن دو تایی هوایی را نشان می‌دهد. [Yaejian et.al,2008] همانگونه که در شکل مشاهده می‌شود، A1، A2، A3 و ترتیب بازتاب‌های لایه‌های سطحی اول و دوم آسفالت می‌باشند. رابطه زیر مقدار محاسبه دامنه را نشان می‌دهد.

$$A = \frac{V}{F} \quad (3)$$

در این رابطه A دامنه (طول موج) بر حسب میلی ولت، V سرعت موج در عمق مورد نظر و F فرکانس دستگاه می‌باشد. با توجه به اینکه امواج در خلاء با سرعت نور (3×10^8 متر بر ثانیه) به سطح آسفالت برخورد نموده سپس انعکاس می‌یابد، مقدار این دامنه جهت محاسبات روسازی قابل استفاده نیست. [Hojat,2014]

۳-۳- تعیین مقادیر گذر دهی دی الکتریک نسبی لایه آسفالتی

گذردهی دی الکتریک آسفالت تابعی از گذردهی دی الکتریک و درصد حجمی مولفه‌های تشکیل دهنده آن است که این مولفه‌ها شامل خرده سنگ، قیر و هوا است. می‌توان فرض کرد که درصد حجمی دو مولفه خرده سنگ و قیر در یک پروژه راه سازی تغییرات ناچیزی دارد و تغییرات آنها تاثیرچندانی روی گذردهی دی الکتریک

شدگی، کاهش ضخامت روسازی است که باعث افزایش احتمال شکست روسازی بر اثر ترک‌های خستگی می‌گردد [Bahuguna,2003]. اگرچه امروزه دستگاه‌های متعددی برای کنترل پتانسیل شیارشدگی به کارگرفته شده‌اند، اما هیچ کدام دارای قابلیت‌های کارگاهی مناسبی برای استفاده نیستند. روش‌های موجود کنترل پتانسیل شیارشدگی مخلوط‌های آسفالتی اغلب پرهزینه بوده و انجام آنها مستلزم صرف زمان زیادی است. مجموع موارد ذکر شده لزوم ارائه روشی ساده که ضمن دارا بودن دقت لازم، بتواند در مدت زمان کوتاه و با هزینه‌ای اندک مقاومت کششی لایه آسفالتی اجرا شده را مشخص نماید، آشکار می‌سازد.

۳-۳- ارزیابی غیرمخرب با دستگاه رادار نفوذی

به زمین

۳-۱- تعیین سرعت امواج در لایه آسفالتی

در روش GPR از پالس‌های الکترومغناطیسی کوتاه استفاده می‌شود، سه ویژگی اصلی که انتشار پالس‌های الکترومغناطیسی را در محیط کنترل می‌کند شامل: گذر دهی دی الکتریک نسبی، گذر دهی مغناطیسی نسبی و رسانایی الکتریکی است. به طوری که سرعت پالس الکترو مغناطیس از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$V = \frac{C}{\sqrt{\epsilon_r \mu_r \left(1 + \frac{\sigma^2}{\omega^2}\right)}} \quad (1)$$

که در این رابطه C سرعت نور در خلاء، ϵ_r گذر دهی دی الکتریک نسبی، μ_r گذر دهی مغناطیسی نسبی σ رسانایی الکتریکی و ω بسامد زاویه‌ای هستند. در مورد استفاده در راه سازی گذردهی مغناطیسی نسبی نزدیک به یک و رسانایی الکتریکی در بسیاری موارد نزدیک به صفر است. بنابراین، مهمترین ویژگی که سرعت پالس را در مورد راه‌سازی کنترل می‌کند، گذردهی دی الکتریک نسبی است، با فرضیات بالا رابطه سرعت به صورت زیر خلاصه می‌شود. [Loken, 2003]

تخمین زد و سپس با استفاده از رابطه زیر گذردهی دی الکتریک را بدست آورد: [Saarenketo,2006]

$$\epsilon_r = \left(\frac{c}{V}\right)^2 \quad (4)$$

۲- تعیین گذر دهی دی الکتریک با استفاده از دامنه سیگنال انعکاس یافته از سطح آسفالت: در این روش با مقایسه دامنه انعکاس از سطح آسفالت و دامنه انعکاس یافته از یک صفحه فلزی می توان گذر دهی الکتریک نسبی آسفالت را با کمک رابطه بدست آورد. [Saarenketo,2006]

که در این رابطه A_m دامنه انعکاس از صفحه فلزی و A_1 دامنه انعکاس از سطح آسفالت است.

نکته مهم در این روش این است که از این معادله فقط در مورد آنتن های جفت شده هوایی می توان استفاده کرد ولی در آنتن های زمینی این روش قابل استفاده نیست، چرا که در این آنتن ها انعکاس از سطح آسفالت با کوپلینگ بین فرستنده و گیرنده تداخل می کند و تعیین گذردهی دی الکتریک آسفالت را دشوار می سازد.

۳- در این روش از مقادیر پیش تعیین شده ی گذردهی دی الکتریک مواد استفاده می شود مطابق با جدول ۱ است.

جدول ۱. مقادیر گذر دهی دی الکتریک برخی از مواد مورد

گذر دهی دی الکتریک	مواد
هوا	۱
آب	۸۱-۱۰
ماسه خشک	۱۰-۵
رس	۳۵-۵
ماسه بادی	۳۰-۲۰

۴- آنتن های مورد استفاده در سیستم (GPR)

در اندازه گیری به روش (GPR) از یک آنتن فرستنده امواج رادیویی در محدوده فرکانسی متغییر (با توجه به عمق منطقه مورد مطالعه) و یک حسگر گیرنده امواج بازتابی از عمق زمین استفاده می شود، که در راستای تعیین و تشخیص عمق، شکل، دی الکتریک و جنس هدف مورد مطالعه به کار

آسفالت ندارد و از طرفی دیگر درصد حجمی حفرات هوای موجود در آسفالت بیشترین تاثیر را در گذردهی دی الکتریک آسفالت دارد. در واقع هرچه مقدار حفرات موجود موجود در آسفالت بیشتر باشد، دانسیته و گذردهی دی الکتریک آن کمتر می شود.

محدوده تیپیک گذردهی دی الکتریک نسبی آسفالت بین ۴ تا ۷ است. گذردهی دی الکتریک پایین تر از این محدوده نشان دهنده تراکم و دانسیته پایین و وجود حفرات هوای زیاد در آسفالت است و گذردهی دی الکتریک نسبی بالاتر این محدوده می تواند به دلیل رطوبت در آسفالت باشد. در GPR سه روش اصلی برای تعیین گذر دهی دی الکتریک آسفالت وجود دارد.

تعیین گذردهی دی الکتریک با استفاده از روش CMP (Common Mid point): در این روش آنتن های گذر دهی دی الکتریک آسفالت تابعی از گذردهی دی الکتریک و درصد حجمی مولفه های تشکیل دهنده آن است است که این مولفه ها شامل خرده سنگ، قیر و هوا است. می توان فرض کرد که درصد حجمی دو مولفه خرده سنگ و قیر در یک پروژه راه سازی تغییرات ناچیزی دارد و تغییرات آنها تاثیر چندانی روی گذردهی دی الکتریک آسفالت ندارد و از طرفی دیگر درصد حجمی حفرات هوا ی موجود در آسفالت بیشترین تاثیر را در گذردهی دی الکتریک آسفالت دارد. در واقع هرچه مقدار حفرات موجود موجود در آسفالت بیشتر باشد، دانسیته و گذردهی دی الکتریک آن کمتر می شود. محدوده تیپیک گذر دهی دی الکتریک نسبی آسفالت بین ۴ تا ۷ است. گذردهی دی الکتریک پایین تر از این محدوده نشان دهنده تراکم و دانسیته پایین و وجود حفرات هوای زیاد در آسفالت است و گذر دهی دی الکتریک نسبی بالاتر این محدوده می تواند به دلیل رطوبت در آسفالت باشد. در GPR سه روش اصلی برای تعیین گذردهی دی الکتریک آسفالت وجود دارد.

۱- تعیین گذردهی دی الکتریک با استفاده از روش CMP (Common Mid point):

در این روش آنتن های فرستنده و گیرنده در دو طرف یک نقطه ثابت حرکت داده شده و از هم دور می شوند. با رسم نمودار فاصله بین فرستنده و گیرنده (X) زمان (t) که به شکل یک هذلولی است می توان سرعت پالس را در آن محیط

داده‌ها با استفاده از سیستم دوتایی زمینی به طور نرمال بین ۳۰ تا ۵۰ کیلومتر بر ساعت می‌باشد. [Saarenketo,2006]

کاربردهای روش (GPR) در مطالعات راه

کاربردهای روش (GPR) در مطالعات راه به طور کلی به ۴ دسته تقسیم بندی می‌شوند.

-مطالعات انجام شده در طراحی یک راه جدید
-پیمایش مطالعات مورد نیاز برای طراحی نوسازی از محورهای موجود

-کنترل کیفی یا مطالعات تضمین کیفی برای یک پروژه جاده‌ای

-مطالعات و پیمایش‌ها برای سیستم‌های مدیریت روسازی

دستگاه‌های اصلی GPR و لوازم جانبی

وسایل اصلی GPR بر روی یک خود رو نصب می‌شود و به طور نرمال جهت پیمایش و برداشت روسازی شامل تجهیزات زیر می‌باشد.

- آنتن دوتایی زمینی و یا آنتن دو تایی هوایی

- کابل‌ها

- احد کنترل GPR

- رمز گذار پالس‌ها و دستگاه‌های موقعیت‌یابی GPS معمولاً یک واحد پیمایش جاده‌ای GPR یک واحد کنترل اضافی و یک PC دارد که جهت استفاده همزمان دستگاه GPR و تجهیزات یدکی و یا فایل‌های ترسیم می‌باشد. این سیستم اجازه اتصال داده‌ها به یکدیگر را می‌دهد. شکل ۲ و ۳ اجزای تشکیل دهنده دستگاه را نشان می‌دهد.

می‌رود. آنتن‌های مورد استفاده در سیستم (GPR) به دو نوع تقسیم‌بندی می‌شوند.

۱ - سیستم‌های دوتایی هوایی

۲ - سیستم‌های دوتایی زمینی

سیستم‌های دوتایی هوایی

این آنتن‌ها سیگنال‌های بی‌نقص تولید می‌کنند، که در نتیجه می‌توان در سرعت‌های نزدیک به سرعت مجاز در بزرگراه‌ها عملیات برداشت GPR را انجام داد. بعلاوه با یک خطای مجاز در مطالعات آسفالت می‌توان سیگنال‌ها را پردازش کرد. محدوده فرکانسی سیستم‌های دو تایی هوایی بین ۵۰۰ مگا هرتز تا ۵٫۲ گیگا هرتز هستند که عمق نفوذشان در محدوده (۵۰-۹۰) سانتی متر می‌باشد. اما فرکانسی که بیشتر جهت محاسبه دی الکتریک لایه‌ها و همین طور تعیین ضخامت لایه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد ۱ گیگا هرتز می‌باشد. در هنگام برداشت داده‌ها این آنتن‌ها با ارتفاع بین ۳۰ تا ۵۰ سانتی متر با سطح آسفالت به صورت معلق قرار می‌گیرند. از مهمترین مزایای این سیستم اینست که با تغییر وضعیت و خواص آسفالت تغییری در این آنتن‌ها ایجاد نمی‌شود، و اجازه اندازه‌گیری تغییرات در مشخصات مواد تشکیل دهنده را می‌دهد. مزیت دیگر این است که با استفاده از این آنتن‌ها با یک سرعت مناسب به گونه‌ای که راه‌بندان ایجاد نشود داده‌برداری انجام می‌شود (بیش از ۷۰ کیلومتر در ساعت) [Saarenketo,2006].

سیستم‌های دوتایی زمینی

آنتن‌های دو تایی زمینی در یک رنج وسیعی از فرکانس‌های ۸۰ تا ۱۵۰۰ مگا هرتز به کارگرفته می‌شوند. عمق نفوذ این سیگنال‌ها در حدود ۲۰ تا ۳۰ متر می‌باشد. مزیت مهم این آنتن‌ها این است که سیگنال بهتری را در مقایسه با آنتن‌های دو تایی هوایی به درون زمین انتقال می‌دهند. برای مثال می‌توان به کاربردهای آن در تعیین محل شکستگی‌های آسفالت، کابل‌ها و آرماتورهای به کار گرفته شده در سازه‌های بتنی اشاره کرد. سرعت مجاز در جمع آوری



شکل ۲. یک سیستم GRP برای پیمایش جاده‌ای

که پس از برداشت با دستگاه رادار نفوذی به زمین از همان محور مغزه‌گیری برای انجام آزمایشات مخرب جهت تعیین مقاومت کششی غیر مستقیم صورت گرفته که در جدول دی الکتریک خروجی از دستگاه در نقاطی که از آنها مغزه‌گیری انجام گرفته آورده شده است.



شکل ۳. واحد کنترل

۴-مراحل پژوهش

هدف کلی از این پژوهش ارزیابی قابلیت استفاده از دستگاه رادار نفوذی زمین (GPR) در تعیین مقاومت کششی لایه آسفالتی اجرا شده می باشد. در این پژوهش سعی بر آن است تا با تکیه بر نتایج به دست آمده از برداشت‌های میدانی توسط دستگاه رادار نفوذی زمین (GPR) و انجام آزمایشات مخرب جهت تعیین مقاومت کششی و مقایسه فنی بین این دو روش، شناخت مسئله صورت پذیرد. در نهایت از نتایج به دست آمده از آزمایشات استفاده و روابط مورد استفاده جهت تعیین مقدار مقاومت کششی از روی دی الکتریک خروجی از دستگاه (GPR) ارائه گردند.

۴-۱-انتخاب محور مورد مطالعه

بخشی از مسیر برگشت محور بم - کرمان واقع در استان کرمان جهت انجام این پژوهش انتخاب گردید جدول شماره ۲ مشخصات مسیر را نشان می‌دهد.

جدول ۲. مشخصات محور مورد ارزیابی

نام محور	طول محور	مشخصات محور
مسیر برگشت بم - کرمان	۳ کیلومتر	دارای ۲ خط عبور اصلی درجه ۱

۴-۲- جمع آوری داده‌ها و اطلاعات

جمع‌آوری داده‌ها و اطلاعات در این پژوهش هم از نوع پیمایشی و هم از نوع آزمایشی می‌باشد، جهت برداشت پیمایشی بخشی از یک راه اجرا شده مورد مطالعه قرار گرفته

۴-۲-۱- انجام آزمایش های مکانیکی

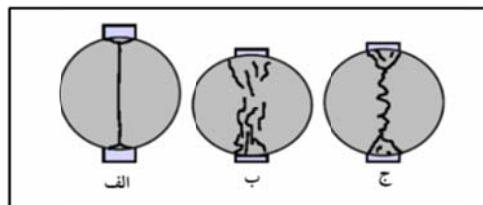
پس از انجام پیمایش میدانی واخذ نمونه های مغزه از محور مورد ارز یابی نوبت انجام آزمایش های مخرب می‌باشد.

۴-۲-۲- آزمایش مقاومت کششی غیر مستقیم

یکی از ویژگی‌های مهم بتن آسفالتی، مقاومت آن در برابر بارهای کششی و در نتیجه ترک خوردگی است. مقاومت کششی بتن آسفالتی از طریق آزمایش کشش غیر مستقیم تعیین می‌شود. روش استاندارد [ASTM D6931] برای ارزیابی مقاومت کششی غیر مستقیم مخلوط‌های آسفالتی مورد استفاده قرار گرفت. این آزمایش در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد و با جک مارشال دارای سرعت ۵۰ میلی‌متر بر دقیقه انجام گرفت. معادله ۶ برای محاسبه مقدار مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌ها استفاده گردید.

$$st = \left(\frac{2p}{\pi tD} \right) \quad (6)$$

در این رابطه st : مقاومت کششی (کیلوپاسکال)، p حداکثر بار اعمالی (kn) : t ارتفاع نمونه (میلی متر) و D قطر نمونه (میلی متر) است. نتایج آزمایش‌های مقاومت و مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌های مارشال و مغزه اخذ شده از آسفالت اجرا شده در جدول شماره ۱ و ۲ ارائه شده است. تا اثر اختلاف محاسبه درصد فضای خالی در دو حالت ذکر شده در این پژوهش بر روند تغییرات مقاومت کششی بررسی شود.



شکل ۴. نحوه شکست نمونه‌ها در آزمایش کششی غیرمستقیم (Sunarjono, 2007)

جدول ۳. مقادیر مقاومت مارشال، مقاومت کششی غیرمستقیم و دی الکتریک مغزه‌های گرفته شده از محور مورد مطالعه

ردیف	شماره نمونه	مقاومت مارشال مطابق استاندارد ASTM D1559 (kn)	مقاومت کششی غیر مستقیم مطابق استاندارد ASTM D6931 (kpa)	دی الکتریک	مقاومت کششی غیرمستقیم مطابق رابطه به دست آمده از پژوهش
۱	A1	۷,۹۱	۸۵۹,۳۵	۴,۹۵	۸۶۵,۶۶
۲	A2	۷,۹۶	۸۶۴,۶۵	۴,۹۱	۸۶۳,۱۷
۳	A3	۷,۹۴	۸۶۲,۵	۴,۹۸	۸۶۷,۵۳
۴	A4	۸,۰۰	۸۶۸,۸۵	۴,۹۶	۸۶۶,۲۶
۵	A5	۸,۰۰	۸۶۹,۲۰	۴,۹۴	۸۶۵,۰۴
۶	A6	۸,۲	۸۹۰,۲۰	۵,۰۹	۸۷۴,۳۸
۷	A7	۸,۳۸	۹۱۰	۵,۶۳	۹۰۸,۰۴
۸	A8	۸,۳۸	۹۱۰	۵,۶۳	۹۰۸,۰۴
۹	A9	۸,۲۴	۸۹۵	۵,۵۲	۹۰۱,۱۸
۱۰	A10	۷,۸۸	۸۵۵,۵	۴,۹	۸۶۲,۵۴
۱۱	A11	۷,۸۸	۸۵۶,۲	۴,۹۴	۸۶۵,۰۴
۱۲	A12	۷,۹۷	۸۵۶,۲۰	۴,۹۵	۸۶۵,۶۶
۱۳	A13	۸,۲	۸۹۰,۵۱	۵,۰۸	۸۷۳,۷۶
۱۴	A14	۸,۰۰	۸۶۸,۳۰	۴,۹۳	۸۶۴,۴۱
۱۵	A15	۸,۰۱	۸۷۰,۳۵	۵,۱۵	۸۷۸,۱۲
۱۶	A16	۷,۹۳	۸۶۱,۵	۴,۹۷	۸۶۶,۹۱
۱۷	A17	۸,۲۲	۸۹۲,۶۵	۵,۰۱	۸۶۶,۲۸
۱۸	A18	۷,۹۹	۸۶۷,۶۴	۴,۹۶	۸۶۶,۲۸
۱۹	A19	۷,۹۶	۸۶۴,۳۲	۴,۹۵	۸۶۵,۶۶
۲۰	A20	۷,۹۴	۸۶۱,۸۴	۴,۹۵	۸۶۵,۶۶
۲۱	A21	۷,۹۵	۸۶۳,۴۵	۵,۱۸	۸۷۹,۹۹
۲۲	A22	۷,۹۵	۸۶۳,۶۱	۴,۹۶	۸۶۶,۲۸
۲۳	A23	۷,۹۷	۸۶۵	۵,۱	۸۷۵,۰۱
۲۴	A24	۸,۲	۸۹۰,۲۰	۵,۳۱	۸۸۸,۰۹
۲۵	A25	۸,۲۲	۸۹۲,۳۰	۵,۵	۸۹۹,۹۴
۲۶	A26	۸,۰۰	۸۶۹,۲۱	۴,۹۱	۸۶۳,۱۷
۲۷	A27	۸,۴۷	۹۲۰	۵,۷۶	۹۱۶,۱۴
۲۸	A28	۸,۴۷	۹۲۰	۵,۷۵	۹۱۵,۵۲
۲۹	A29	۷,۹۲	۸۶۰,۳۵	۴,۹۵	۸۶۵,۶۶
۳۰	A30	۷,۹۹	۸۶۷,۸۵	۴,۹۶	۸۶۶,۲۸

تحلیل و بررسی نتایج

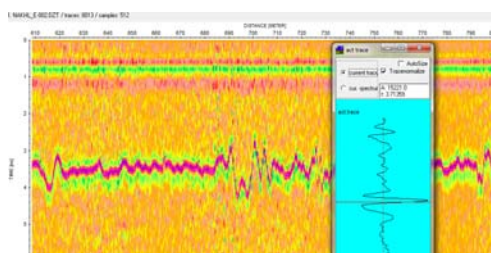
بعد از پردازش‌های مناسب داده‌ها تفسیر پروفیل‌های رادار انجام شد که این روش تفسیر به تفسیر گرافیکی معروف می‌باشد. این تفسیر با استفاده از مشخصات بارز روی مقاطع رادار صورت می‌گیرد. به این ترتیب که مقاطع زمانی به دست آمده ممکن است با استفاده از سرعت امواج رادار، در محیط زیر سطحی به مقاطع عمقی تبدیل شوند و یا اینکه به صورت مستقیم در دست تفسیر قرار گیرند. در این تفسیر در واقع کیفیت و شکل بازتاب‌ها را نسبت به بازتاب‌های مجاور تشخیص داده و با توجه به ویژگی این بازتاب‌ها از جمله پیوستگی، بزرگی و گسترش آنها، این رویدادها را از یکدیگر تفکیک می‌کند. شکل شماره ۵ پروفیل محور مورد مطالعه به همراه خروجی گرافیکی و مقدار پیک دامنه را نشان می‌دهد [Rashyadian and keymanesh and zeynaly, 2023]

همانگونه که مشاهده می‌شود غیر یکنواختی شدیدی در لایه آسفالتی اجرا شده وجود دارد که ناشی از تفکیک شدن، کاهش چکالی و افزایش درصد فضای خالی و کاهش

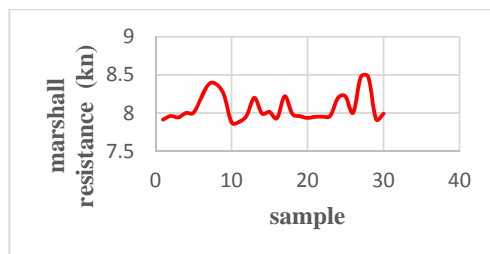
استحکام لایه آسفالتی اجرا شده است. با مقایسه نمودارهای شکل شماره ۶ و ۷ مشاهده می‌شود، گراف خروجی از نتایج تحلیل رادار که نشان دهنده غیر یکنواختی شدید در لایه آسفالتی است با مقاومت کششی اندازه‌گیری شده مطابق استاندارد ASTM D6921 مطابقت دارد.

ارتباط مقاومت مارشال با ثابت دی الکتریک

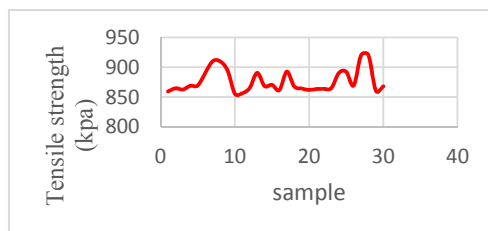
با مقایسه مقاومت مارشال محاسبه شده مطابق استاندارد ASTM D1559 با دی الکتریک خروجی از رادار مشاهده شد مطابق نمودار شکل شماره ۸ مقاومت مارشال با ثابت دی الکتریک رابطه مستقیم دارد. به طوری که با افزایش دی الکتریک خروجی از رادار مقاومت مارشال لایه آسفالتی اجرا شده افزایش می‌یابد و نمودار شکل شماره ۸ ارتباط مقاومت مارشال و ثابت دی الکتریک را یک تابع خطی با ضریب همبستگی 0.8 و رابطه $y = 1.3943x - 6.1292$ را نشان می‌دهد، می‌توان با جایگذاری مقدار دی الکتریک خروجی از دستگاه (GPR) در هنگام برداشت لایه آسفالتی اجرا شده در مقدار y مقاومت مارشال لایه آسفالتی را محاسبه کرد.



شکل ۵. پروفیل برداشت شده دستگاه مکانیزه محور مورد مطالعه



شکل ۶. نمودار رابطه مقاومت مارشال و شماره نمونه در محور مورد مطالعه



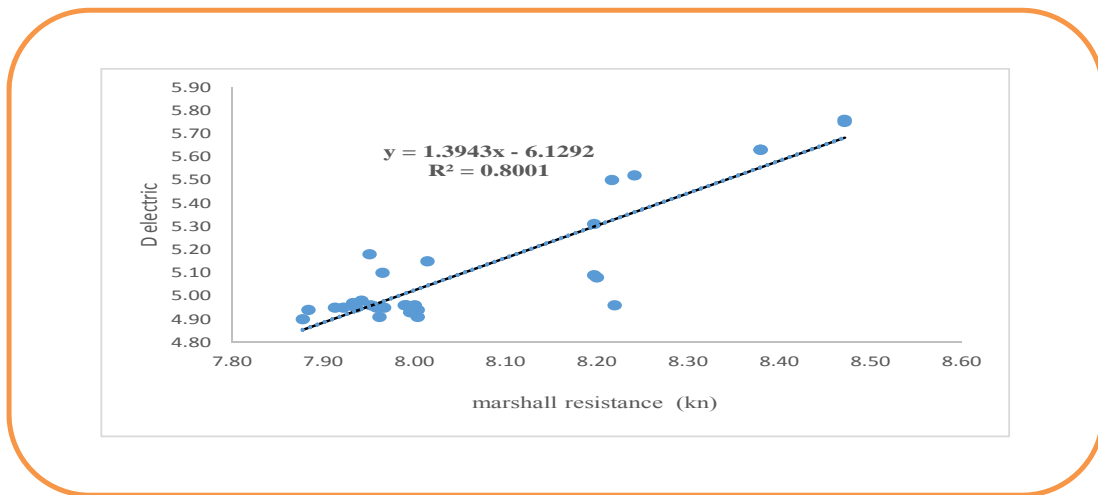
شکل ۷. نمودار رابطه مقاومت کششی و شماره نمونه در محور مورد مطالعه

ارتباط مقاومت کششی غیرمستقیم با ثابت دی الکتریک

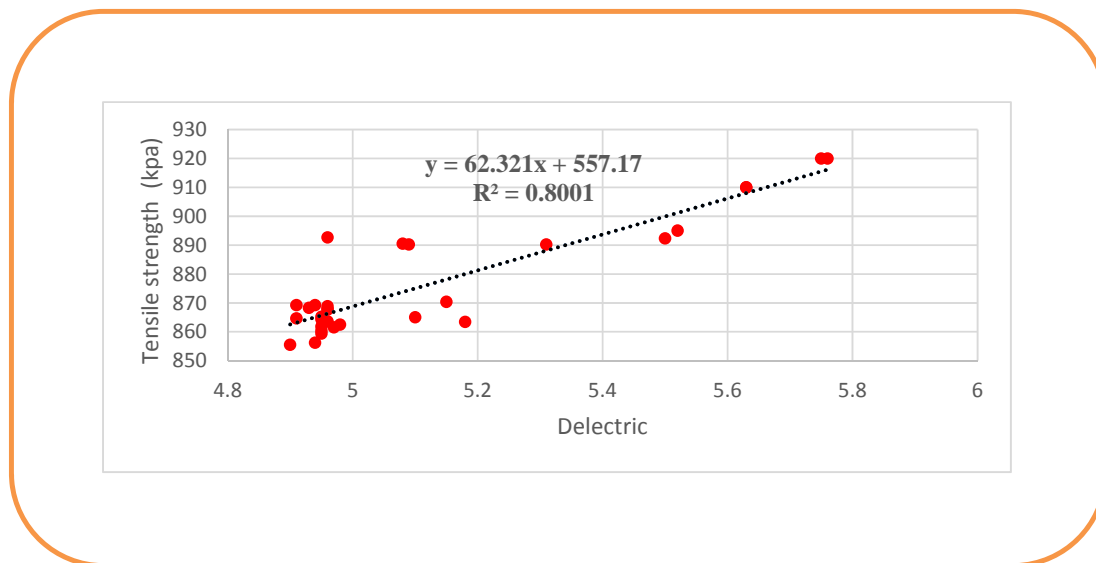
مقاومت کششی غیر مستقیم و ثابت دی الکتریک را یک تابع خطی با ضریب همبستگی 0.8 و $y = 62.321x + 557.17$ را نشان می دهد. می توان با جایگذاری مقدار دی الکتریک خروجی از دستگاه (GPR) از نقاط برداشتی لایه آسفالتی اجرا شده در مقدار X مقاومت کششی غیرمستقیم لایه آسفالتی را محاسبه کرد.

با مقایسه مقاومت کششی غیر مستقیم محاسبه شده مطابق استاندارد ASTM D6931 با ثابت دی الکتریک خروجی از رادار مشاهده شد مطابق نمودار شکل شماره ۹ مقاومت کششی غیرمستقیم با ثابت دی الکتریک نسبت مستقیم دارد. به طوری که با افزایش دی الکتریک خروجی از رادار مقاومت کششی غیرمستقیم لایه آسفالتی افزایش و با کاهش دی الکتریک خروجی از رادار مقاومت کششی غیرمستقیم لایه آسفالتی کاهش می یابد و نمودار شکل شماره ۹ ارتباط

شکل ۸. نمودار رابطه بین دی الکتریک و مقاومت مارشال



شکل ۹. نمودار رابطه بین دی الکتریک و مقاومت کششی غیرمستقیم



مقایسه آماری

D6931 با ضریب تغییرات تعیین مقاومت کششی غیرمستقیم مطابق رابطه به دست آمده از پژوهش ۰,۰۳ است که این میزان اختلاف در مقایسه با نسبت فایده استفاده از رادار در تعیین مقاومت کششی غیر مستقیم که پروفیل پیوسته ای از مقاومت کششی در طول محور مورد مطالعه ارائه می کند، ناچیز است.

نتایج حاصل از آزمایش تعیین مقاومت کششی غیر مستقیم مطابق استاندارد ASTM D6931 با نتایج تعیین مقاومت کششی مطابق رابطه به دست آمده از پژوهش با هم مقایسه شد که نتایج آن در جدول شماره ۴ آورده شده است. همانطور که ملاحظه می شود اختلاف میان ضریب تغییرات تعیین مقاومت کششی غیر مستقیم مطابق استاندارد ASTM

جدول ۴. مقایسه آماری نتایج حاصل از آزمایش ها

ضریب تغییرات مقاومت کششی غیر مستقیم محاسبه شده مطابق رابطه به دست آمده از پژوهش	ضریب تغییرات مقاومت کششی غیر مستقیم محاسبه شده مطابق استاندارد ASTM D6931	انحراف از معیار مقاومت کششی غیر مستقیم محاسبه شده مطابق رابطه به دست آمده از پژوهش	انحراف از معیار مقاومت کششی غیر مستقیم محاسبه شده مطابق استاندارد ASTM D6931	میانگین مقاومت کششی غیر مستقیم محاسبه شده مطابق رابطه به دست آمده از پژوهش	میانگین مقاومت کششی غیر مستقیم محاسبه شده مطابق استاندارد ASTM D6931	ردیف
۰,۰۱۹	۰,۰۲۲	۱۷,۲۶	۱۹,۳	۸۷۶,۵۲	۸۷۶,۵۲	۱

۵- نتیجه گیری

شده در کل مسیر مورد مطالعه قابل دسترسی است. در صورتی که مقاومت کششی اندازه گیری شده کمتر از مقادیر استاندارد مورد قبول باشد. قطع به یقین پتانسیل خرابی های مرتبط با کاهش مقاومت کششی در لایه آسفالتی بیشتر خواهد شد.

با توجه به رابطه ارائه شده مقاومت کششی غیرمستقیم لایه آسفالتی یک تابع خطی با ضریب همبستگی ۰,۸ می باشد نشان می دهد، می توان با جایگذاری مقدار دی الکتریک خروجی از دستگاه (GPR) در هنگام برداشت لایه آسفالتی اجرا شده در مقدار X مقاومت کششی لایه آسفالتی را محاسبه کرد، در نتیجه پروفیل پیوسته ای از مقاومت کششی لایه آسفالتی اجرا

۶- پی نوشت ها

1. Laboratoire Central Des Ponts Et Chaussees Wheel Tracker
2. American Society for Testing and Materials
3. American Association of State Highway and Transportation Officials

۷-مراجع

- AASHTO T166. Standard method of test for bulk specific gravity of compacted hot-mix mix Asphalt using saturated surface – dry specimens.
- ASTM D., 2041-03a-Standard Test method for theoretical maximum specific gravity and density of bituminous paving mixtures.
- ASTM D., 1559-03a-Standard test method for theoretical maximum specific gravity and density of bituminous paving mixtures.
- ASTM D., 6931-03a-Standard test method for theoretical maximum specific gravity and density of bituminous paving mixtures.
- Ballard, G. (1992). Under the skin. World Highways/Routes du Monde. *Jan/Feb*, 37-39.
- Bahuguna, S. (2003). Permanent deformation and rate effects in *Asphalt concrete: constitutive modeling and numerical implementation* [Doctoral Thesis, Case Western Reserve University].
- Drakos, C., Roque, R., Birgisson, B., & Novak, M. (2005). Identification of a physical model to evaluate rutting performance of asphalt mixtures. *Journal of ASTM International*, 2(3), 1-21.
- Fwa, T. F., Pasindu, H. R., & Ong, G.P. (2012). Critical rut depth for pavement maintenance based on vehicle skidding and hydroplaning Consideration. *Journal of Transportation Engineering*, 138(4), 423-429.
- Hojat, A. (2014). Booklet Study Ground Penetrating Radar. Faculty of Mining Engineering, University of Kerman.
- Loken, M. (2007). Use of ground penetrating radar to evaluate Minnesota roads.
- Onyango, M. (2009). Verification of mechanistic prediction models for permanent deformation in Asphalt mixes using accelerated pavement testing [Doctoral Thesis, *The Kansas State University*].
- Pardhan, M. M. (1995). Permanent deformation characteristics of Asphalt – aggregate mixture using varied material and modeling procedure with Marshall method [Doctoral Thesis, *The Montana University*].
- PIARC (permanent International Association of Road congresses) World Road Association. (2006). Bituminous materials with a high resistance to flow rutting [The Bureau of Technology and Safety Studies], *PIARC Secretariat in Iran*.
- Saarenketo, T., (2006). Electrical properties of pavement material.
- بهبهانی، حمید، ایازی، محمد جواد، شجاعی، محمد حسین (۱۳۹۵). ارزیابی آزمایشگاهی حساسیت رطوبتی پتانسیل شیار شدگی مخلوط‌های آسفالتی نیمه گرم. فصل نامه مهندسی حمل و نقل. ۷(۳)، ۴۰۵-۴۱۸.
- ترابی خدشهری، حامد و همکاران (۱۳۹۴). ارزیابی آزمایشگاهی کاهش اثرشیار افتادگی مخلوط‌های آسفالتی در روسازی راه با استفاده از آسفالت سیمان دار. *کنفرانس ملی مهندسی معماری، عمران و توسعه شهری*.
- دیواندری، حسن و همکاران (۱۳۹۴). ارائه مدل شیارشدگی آسفالتی با استفاده از نتایج آزمایش مقاومت کششی غیر مستقیم و پارامترهای مارشال. *مهندسی زیرساخت‌های حمل و نقل*، ۱(۲)، ۵۴-۴۱.
- طاهرخانی، حسن و خبره، الهه (۱۳۹۶). بررسی شیار شدگی و ترک‌های بالا به پایین در روسازی‌های ترکیبی ساخته شده با بتن غلتکی با استفاده از روش المان محدود. *مهندسی حمل و نقل*، ۹(۱)، ۸۸-۶۹.
- طباطبایی، امیر محمد (۱۳۹۴). روسازی راه. تهران، مرکز نشر دانشگاهی.
- دادرس جوان، فرزانه، طوسی، احمد (۱۳۹۷). مروری برمبانی رادار نفوذ پذیر در زمین و روش‌های مدل سازی سه بعدی اجسام مدفون شده در خاک به کمک آنها. *نشریه مهندسی نقشه برداری و اطلاعات مکانی*، ۱۰(۱)، ۲۸-۱۳.
- رشیدیان، پیمان، کی منش، محمودرضا کی منش، زینال زاده، مسلم (۱۴۰۲). ارزیابی قابلیت رادار نفوذی زمین در شناخت پتانسیل کاهش دوام لایه آسفالتی اجرا شده مطالعه موردی استان کرمان. *فصلنامه علمی پژوهشنامه حمل و نقل*، ۲۰(۱)، ۶۸-۵۵.
- معاونت برنامه ریزی و نظارت راهبردی ریاست جمهوری (۱۳۹۰). آیین‌نامه روسازی راه‌های آسفالتی ایران نشریه شماره ۲۳۴ وزارت راه و شهرسازی. پژوهشکده حمل و نقل موسسه قیر و آسفالت ایران، تجدید نظر اول.
- معاونت برنامه ریزی و نظارت راهبردی ریاست جمهوری (۱۳۹۲). مشخصات فنی عمومی راه، نشریه ۱۰۱ تجدید نظر دوم.

Evaluation Diagnosis Potential Groove Failure Implemented Asphalt Layer by Method Non Destructively

*Peyman Rashydian, Ph.D., Student, Department, Faculty of Engineering,
Payam Noor University of Tehran, Tehran, Iran.*

*Mahmood Reza Keymanesh, Associate Professor, Transportation Department,
Faculty of Engineering, Payam Noor University of Tehran, Tehran, Iran.*

*Jalal Ayoubinejad, Assistant Professor, Transportation Department, Faculty of Engineering,
Payam Noor University of Tehran, Tehran, Iran.*

E-mail: mrkeymanesh@pnu.ac.ir

Received: June 2023- Accepted: November 2023

ABSTRACT

One of the influencing factors in failure asphalt layer percentage empty space. For that reason validate benchmark for assessing and evaluating the quality of asphalt in road projects. Coring is the usual method for measuring quality of asphalt layer in the implemented road projects. But the mentioned method is costly and time-consuming and also shows the quality of asphalt layer in a specific point. In the present article determine percentage empty space and also detection potential failure of the implemented asphalt layer with using the device GPR (Ground Penetrating Radar) reviewed. In the research firstly a part of Tehran network roads selected as a sample for study then evaluated mechanized with the help device GPR done. In the following taken core samples from locations rand only and then experiments determine percentage empty space and density done on them. In comparison results destructive experiments with mechanized scrolling transpire by increase percentage empty space in the asphalt layer decreases dielectric.so the using output results radar can be obtained continuous profile from status percentage empty space the project study that this profiles obtained make useful in diagnosis potential groove failure implemented asphalt layer.

Keywords: Ground Penetrating Radar, Coring, Percentage Empty Space, Frequency, Wavelength