

## ارزیابی قابلیت رادار نفوذی زمین در تعیین درصد فضای خالی مصالح سنگی لایه آسفالتی اجرا شده

### مقاله علمی - پژوهشی

محمود رضا کی منش<sup>\*</sup>، دانشیار، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

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

پیمان رشیدیان، دانشجوی دکتری، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

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

دریافت: ۱۴۰۳/۰۱/۲۰ - پذیرش: ۱۴۰۳/۰۵/۲۵

صفحه ۳۶۴-۳۴۹

### چکیده

یکی از پارامترهای تاثیرگذار در نفوذپذیری و استحکام آسفالت گرم اجرا شده درصد فضای خالی مصالح سنگی می باشد. در حال حاضر برای تعیین درصد فضای خالی مصالح سنگی آسفالت اجرا شده جهت مشخص کردن پارامترهای مورد نیاز رابطه محاسبه درصد فضای خالی مصالح سنگی باید مغزه گیری انجام شود که این روش وقت گیر و هزینه بر است و همچنین مشخصات کیفی لایه آسفالتی را در یک نقطه تعیین می کند. در این مقاله تعیین درصد فضای خالی مصالح سنگی آسفالت اجرا شده با استفاده از دستگاه رادار نفوذی به زمین ارزیابی شده. در این پژوهش بخشی از یک راه اجرا شده به عنوان قطعه آزمایشی انتخاب سپس اقدام به بررسی مکانیزه به کمک دستگاه گردید، و در ادامه از محل هایی به طور تصادفی نمونه های مغزه گرفته شده و تحت آزمایشات تعیین چگالی، درصد قیر جهت محاسبه درصد فضای خالی مصالح سنگی قرار داده شدند. در مقایسه نتایج پیمایش مکانیزه حاصل از دستگاه رادار نفوذی زمین با آزمایشات مخرب مشخص گردید با کم شدن فضای خالی مصالح سنگی مقدار عددی دی الکتریک خروجی از دستگاه رادار نفوذی زمین افزایش و همچنین در صورت افزایش فضای خالی مصالح سنگی دی الکتریک کاهش می یابد. به طوری که با کاهش درصد فضای خالی مصالح سنگی کمتر و مساوی ۱۷،۴ درصد افزایش مقدار ثابت دی الکتریک از عدد ۵،۹ ناشی از ارزیابی غیر مخرب مشاهده شد. بنابراین با استفاده از نتایج خروجی رادار می توان پروفیل پیوسته ای از وضعیت فضای خالی مصالح سنگی آسفالت اجرا شده محور مورد مطالعه به دست آورد.

واژه های کلیدی: درصد فضای خالی مصالح سنگی، رادار نفوذی زمین، طول موج، فرکانس

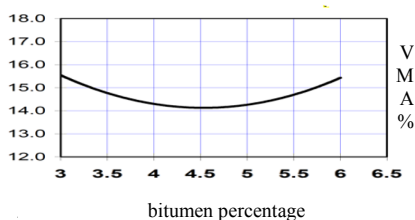
### ۱- مقدمه

آسفالتی در شرایط آب و هوای مختلف با آمد شد زیاد و بار محوری سنگین می باشد. غنی زاده و حیدرآبادی زاده و ضیائی (۱۴۰۰) اگر درصد فضای خالی مصالح سنگی بیشتر از حد مشخصه باشد، رطوبت می تواند به راحتی در داخل مصالح نفوذ کند کاندهال و همکاران (۱۹۹۳). یکی از هدف های طرح مخلوط های آسفالتی تعیین قیر بهینه به تناسب درصد فضای خالی مصالح سنگی است. اسلامی

درصد فضای خالی مصالح سنگی مخلوط آسفالتی یکی از پارامترهای مهم در ساختار مخلوط آسفالتی است که باید از یک مقدار مشخص بیشتر باشد، در صورت کم بودن فضای خالی و اشباع شدن توسط قیر، قیر زدگی اتفاق می افتد که این امر منجر به کاهش کیفیت عملکرد لایه آسفالتی اجرا شده می شود. اهداف اولیه طرح و اجرای روسازی های آسفالتی حصول عملکرد بهینه روسازی

محاسبه مدول دینامیکی مخلوط‌های آسفالتی که توسط سخایی فر و همکاران توسعه یافته، مدول دینامیکی رابطه عکس با میزان فضای خالی دارد به طوری که با افزایش میزان فضای خالی مدول دینامیکی کاهش می‌یابد. سخایی فر و همکاران (۱۳۹۴)

با توجه به نمودار شماره ۱ آزمایش مارشال رابطه (درصد قیر- فضای خالی مصالح سنگی) با افزایش درصد قیر درصد فضای خالی مصالح سنگی ابتدا کاهش سپس افزایش می‌یابد که علت این امر افزایش ضخامت اندود قیری دور دانه‌های مصالح سنگی است که سبب می‌شود زاویه اصطکاک داخلی مصالح سنگی بتن آسفالتی کاسته شود. طباطبایی (۱۳۹۶)



شکل ۱. تغییرات درصد فضای خالی مصالح سنگی نسبت به درصد قیر

میزان فضای خالی مصالح سنگی و درصد فضای خالی که با قیر پر می‌شود در عملکرد لایه‌های روسازی تأثیر زیادی دارد بنابراین اندازه‌گیری صحیح درصد فضای خالی مصالح سنگی مخلوط‌های آسفالتی برای کنترل و تضمین کیفیت، تشخیص پتانسیل و کنترل خرابی لایه‌های آسفالتی اجرا شده ضروری است. امیری و همکاران (۱۳۹۴) استفاده از معیارهای حجمی در طراحی روسازی بتن آسفالتی را نخستین بار در دهه ۵۰ میلادی مک لود کانادایی مطرح کرد. وی برای بار نخست معیار حداقل فضای خالی مصالح سنگی را در طراحی مخلوط‌های آسفالتی در قشر رویه را پیشنهاد داد، با این فرض که فضای خالی مصالح سنگی نقش کنترل کننده بر رفتار بتن آسفالتی دارد و رفتار آن را در اختیار می‌گیرد مک لود (۱۹۵۶). وی پیشنهاد داد که بر اساس روابط حجمی باید حداقل فضای خالی مصالح سنگی ۱۵ درصد، حجم فضای خالی مخلوط آسفالتی (۳-۵) درصد، حجم پر شده با قیر

و خبیری و خانی سانچ (۱۳۹۷). عوامل متعددی در عریان شدگی مصالح سنگی رویه‌های بتن آسفالتی اجرا شده وجود دارد که یکی از آنها درصد فضای خالی مصالح سنگی است. عبدی و همکاران (۱۳۹۵)

اگر در طول فرایند ساخت مخلوط آسفالتی در درصد قیر بهینه دمای تراکم کنترل شود ولی تراکم میدانی مناسب صورت نگیرد به علت کاهش وزن مخصوص درصد فضای خالی مصالح سنگی زیاد خواهد شد که نتیجه آن باعث بوجود آمدن خرابی ناشی از رطوبت از جمله کاهش دوام و عریان شدگی خواهد بود. شعبانی و کیانفر و محمدی ویژه (۱۳۹۶)

تراکم ناکافی لایه آسفالتی موجب به وجود آمدن عریان شدگی زود هنگام در مخلوط‌های آسفالتی می‌شود. مطالعات نشان می‌دهند که اگر درصد فضای خالی مخلوط آسفالتی کمتر از ۴٪ باشد مخلوط عملاً در برابر آب نفوذناپذیر است و در این ناحیه آب بی‌تأثیر است و اگر درصد فضای خالی بیشتر از حدود ۱۳-۱۴٪ باشد، مقاومت مخلوط کمتر تحت تأثیر رطوبت قرار می‌گیرد زیرا روسازی بصورت زهکش عمل می‌کند. اما اگر درصد فضای خالی بین این مقادیر باشد مخلوط آسفالتی در منطقه بحرانی قرار می‌گیرد، زیرا میزان فضای خالی در محدوده قیر بهینه قرار دارد و مخلوط آسفالتی از لحاظ آسیب رطوبتی در بحرانی‌ترین وضعیت قرار خواهد گرفت. خاوندی و حیدری و دهقانی (۱۳۹۸)

از بین رفتن چسبندگی قیر به علت نرم شدگی قیر پر کننده‌ای است که در مخلوط آسفالتی وجود دارد. در نتیجه افزایش مقدار فضای خالی مصالح سنگی و کاهش فضای خالی پر شده با قیر و نفوذ راحت تر آب مقاومت در برابر آسیب رطوبتی کاهش می‌یابد، که این موضوع از علل کاهش دوام لایه آسفالتی است. طاهرخانی و افروزه (۱۳۹۶)

درصد فضای خالی مصالح سنگی مخلوط آسفالتی پارامتری است که در تعیین برخی از مشخصات مهم روسازی آسفالتی کاربرد دارد از جمله مدل‌سازی عدد جریان مخلوط‌های آسفالتی با استفاده از روش رگرسیون چند جمله‌ای تکاملی غنی زاده و حیدرآبادی زاده و ضیائی (۱۴۰۰)

پیمایشی معمول در طراحی و پروژه‌های ترمیم و نوسازی در فنلاند تبدیل شده است. در اواخر دهه ۱۹۸۰ و اوایل دهه ۱۹۹۰، عمده کاربردها در مطالعات زیرسازی در آمریکای شمالی بر اندازه‌گیری تعیین فضاهای خالی زیر قالب‌های بتنی و ضخامت آسفالت متمرکز گردید و در فرانسه نیز روش رادار نفوذی زمین بیشتر بر ارزیابی وضعیت آسفالت متمرکز می‌باشد. بالارد (۱۹۹۲)

در سال ۱۴۰۱ مطالعه‌ای توسط رشیدیان، کی‌منش و زینالزاده صورت گرفت که در آن ارتباط درصد فضای خالی موجود در لایه آسفالت اجرا شده با دی الکتریک خروجی از رادار بررسی شد و در نهایت نموداری به دست آمد که طی آن مشخص شد نقاطی که دارای درصد فضای خالی کمتر از ۹ درصد هستند مقادیر ثابت دی الکتریک بیشتر از ۵ می‌باشد. رشیدیان و کی‌منش و زینالزاده (۱۴۰۱)

امروزه روش رادار نفوذی زمین 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 و سرعت امواج، تعیین مقادیر دامنه بازتاب شده از لایه آسفالتی و محاسبه ضریب دی الکتریک مواد، مشخصاتی از لایه مورد ارزیابی را در اختیار کارشناسان قرار می‌دهد.

اگرچه امروزه دستگاه‌های متعددی برای کنترل پتانسیل اغلب خرابی‌های لایه آسفالتی اجرا شده وجود دارند، اما هیچکدام قابلیت استفاده کارگاهی مناسبی ندارند. همچنین اغلب پرهزینه هستند. مجموع موارد ذکر شده لزوم ارائه روشی ساده که بتواند در مدت زمانی کوتاه و با هزینه کم و دقت بالا درصد فضای خالی مصالح سنگی لایه آسفالتی اجرا شده را تعیین نماید، آشکار می‌سازد.

درصد، باشد. او در کامل کردن نظریه خود، فضای خالی مصالح سنگی را متناسب با بیشترین اندازه اسمی دانه‌ها دانست به طوری که در مصالح ریز دانه، فضای خالی مصالح سنگی از ۱۵ درصد بیشتر و در مصالح درشت دانه از ۱۵ درصد کمتر است اسمیت و هسپ (۲۰۰۲) گلچین، علیان و مشک آبادی ویژگی‌های مخلوط آسفالت بازایافتی مسلح شده با الیاف پارافایبر را بررسی کرده و نشان دادند الیاف پارافایبر موجب کاهش فضای خالی مصالح سنگی نمونه مارشال و فضای خالی آسفالت می‌شود. گلچین و همکاران (۱۴۰۲)

در حال حاضر متداول‌ترین روش برای اندازه‌گیری درصد فضای خالی مصالح سنگی لایه آسفالتی مبتنی بر رابطه ریاضی است با تکیه بر نتایج آزمایش گاهی تعیین وزن مخصوص حقیقی وزن مخصوص مخلوط مصالح سنگی و تعیین درصد مصالح سنگی می‌باشد. این روش زمان بر است و شاید منفی‌ترین وجه آن مدت زمان زیادی است که صرف آن می‌شود و اطلاعات پیوسته‌ای از درصد فضای خالی مصالح سنگی بتن آسفالتی محور مورد مطالعه ارائه نمی‌دهد ولی در صورت استفاده از رادار نفوذی زمین می‌توان به اطلاعات پیوسته‌ای از درصد فضای خالی مصالح سنگی بتن آسفالتی اجرا شده رسید. سیستم‌های راداری به دلیل ویژگی‌های منحصر بفرد خود از قابلیت عبور از موانعی نظیر مه و ابر، به تفاوت‌های موجود در حجم رطوبت خاک توانایی ارائه اطلاعاتی پیرامون موقعیت، اندازه، و حتی ساختار جسم، ابزاری دارای اهمیت در بین ابزارهای شناخت پدیده‌ها محسوب می‌شوند. دادرس جوان وطوسی و محمدی ویژه (۱۳۹۷)

تاریخچه استفاده از روش در بررسی میدانی روسازی وزیر - سازی جاده‌ها و ابنه‌هایی از این قبیل به اواسط دهه ۱۹۷۰ برمی‌گردد. اتحادیه مدیریت بزرگراه‌های کشور آمریکا قابلیت اجرای روش را در ارزیابی وضعیت تونل‌ها و پس از آن در ارزیابی وضعیت پل‌ها مورد آزمایش قرار دادند. در اوایل دهه ۱۹۸۰، پیمایش‌های در کانادا نیز آغاز شد. اولین آزمایش جهت مطالعات راهسازی در سال ۱۹۸۶ شروع و بعد از آن آزمایش‌های بیشتری در فنلاند انجام شد، بدینگونه که روش به سرعت به یک ابزار

## ۲- ارزیابی غیرمخرب با دستگاه رادار نفوذی به زمین ۲-۱- تعیین سرعت امواج در لایه آسفالتی

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

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

که در این رابطه  $c$  سرعت نور در خلاء،  $\epsilon_r$  گذردهی دی الکتریک نسبی،  $\mu_r$  گذردهی مغناطیسی نسبی  $\sigma$  رسانایی الکتریکی و 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 راه سازی کنترل می‌کند گذردهی دی الکتریک نسبی است، با فرضیات بالا رابطه سرعت به صورت زیر خلاصه می‌شود. لوکین (۲۰۰۷)

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

## ۲-۲- تعیین مقادیر دامنه لایه آسفالتی

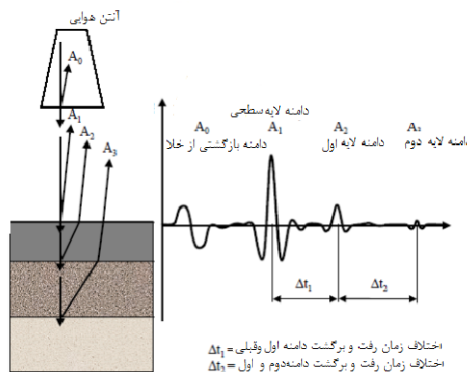
مقادیر دامنه لایه آسفالتی، مقادیر بازتاب عددی هر کدام از لایه‌ها به آنتن می‌باشند. شکل ۲ نشان دهنده مکانیزم عملکرد آنتن دو تایی هوایی را نشان می‌دهد. یانجیان (۲۰۰۸) همانگونه که در شکل مشاهده می‌شود،  $A_1$ ،  $A_2$  و  $A_3$  بترتیب بازتاب‌های لایه‌های سطحی اول و دوم آسفالت می‌باشند. رابطه زیر مقدار 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 ( $3 \times 10^8$  متر بر ثانیه) به سطح آسفالت برخورد نموده سپس انعکاس می‌یابد، مقدار این دامنه جهت محاسبات روسازی قابل استفاده نیست. حجت (۱۳۹۳)

## ۲-۳- تعیین مقادیر گذردهی دی الکتریک نسبی لایه آسفالتی

گذردهی دی الکتریک آسفالت تابعی از گذردهی دی الکتریک و درصد حجمی مولفه‌های تشکیل دهنده آن است 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 راه‌سازی تغییرات ناچیزی دارد و تغییرات آنها تاثیر چندانی روی گذردهی دی الکتریک 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 در آسفالت بیشتر باشد، دانسیته و گذردهی دی الکتریک آن کمتر می‌شود.



شکل ۲. مکانیزم عملکرد آنتن دو تایی هوایی

فرستنده و گیرنده تداخل می‌کند و تعیین گذردهی دی الکتریک آسفالت را دشوار می‌سازد.

۳- در این روش از مقادیر پیش تعیین شدهی گذردهی دی الکتریک مواد استفاده می‌شود مطابق با جدول شماره ۱.

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

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

### ۳- روش تحقیق

هدف کلی از این پژوهش تعیین درصد فضای خالی مصالح سنگی لایه آسفالتی اجرا شده با استفاده از دستگاه رادار نفوذی زمین می‌باشد. در این پژوهش سعی بر آن است تا با تکیه بر نتایج به دست آمده از انجام آزمایش‌های مخرب تعیین دانسیته و درصد فضای خالی مصالح سنگی از نمونه‌های اخذ شده بعد از اجرای لایه آسفالتی و برداشت‌های میدانی توسط دستگاه رادار نفوذی زمین و مقایسه فنی بین نتایج به دست آمده از دو روش شناخت مسئله صورت پذیرد. در نهایت از نتایج به دست آمده از آزمایشات استفاده و روابط مورد استفاده جهت تعیین مقدار درصد فضای خالی مصالح سنگی لایه آسفالتی اجرا شده از روی دی الکتریک خروجی از دستگاه رادار نفوذی زمین ارائه گردند.

#### ۳-۱- مشخصات دستگاه پیمایش میدانی

داده‌های رادار نفوذی زمین مورد استفاده در این پژوهش با استفاده از آنتن ۲ گیگاهرتز برداشت شده‌اند. این آنتن از نوع هورن بوده و قابلیت برداشت داده‌ها با فاصله از سطح زمین را دارا است.

محدوده تبیین گذردهی دی الکتریک نسبی آسفالت بین ۴ تا ۷ است. گذر دهی دی الکتریک پایین‌تر 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 می‌تواند به دلیل رطوبت در آسفالت باشد. در رادار نفوذی سه روش اصلی برای تعیین گذر دهی دی الکتریک آسفالت وجود دارد.

۱- تعیین گذر دهی دی الکتریک با استفاده از روش CMP (Common Mid point): در این روش آنتن‌های فرستنده و گیرنده در دو طرف یک نقطه ثابت حرکت داده شده و از هم دور می‌شوند. با رسم نمودار فاصله بین فرستنده و گیرنده (X)-زمان (t) که به شکل یک هذلولی است می‌توان سرعت پالس را در آن محیط تخمین زد و سپس با استفاده از رابطه زیر گذر دهی دی الکتریک را بدست آورد: سارنکتو (۲۰۰۶)

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

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 می‌توان گذر دهی الکتریک نسبی آسفالت را با کمک رابطه زیر بدست آورد: سارنکتو (۲۰۰۶)

$$\sqrt{\epsilon_r} = \frac{A_m + A_1}{A_m - A_1} \quad (5)$$

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 آنتن‌های جفت شده هوایی می‌توان استفاده کرد ولی در آنتن‌های زمینی این روش قابل استفاده نیست. چرا که در این آنتن‌ها انعکاس از سطح آسفالت با کوپلینگ بین

که با تغییر وضعیت و خواص آسفالت، تغییری در این آنتن‌ها ایجاد نمی‌شود. سارنکتو و همکاران (۲۰۰۰)

### ۲-۳- انتخاب محورهای مورد مطالعه

بخشی از مسیر رفت محور کرمان - بافت در استان کرمان برای انجام آزمایش‌های میدانی در این پژوهش انتخاب شده است. جدول شماره ۲ مشخصات مسیر را نشان می‌دهد.

استفاده از سیستم‌های رادار نفوذی زمین دوتایی-هوایی رشد سریعی در جهت ارزیابی بخش بالایی ساختار آسفالت و راه داشته است. این تجهیزات سیگنال‌هایی بی نقص تولید می‌کنند؛ که در نتیجه میتوان در سرعت‌های نزدیک به سرعت مجاز در بزرگراهها، عملیات برداشت سیستم رادار نفوذی زمین را انجام داد. محدوده فرکانسی سیستمهای آنتن دوتایی-هوایی، بین ۵۰۰ مگا هرتز تا ۲,۵ گیگا هرتز هستند که عمق نفوذشان در محدوده ۵۰ تا ۹۰ سانتی متر است. از مهم‌ترین مزایای این سیستم این است

جدول ۲. مشخصات محور مورد ارزیابی

نام محور	طول محور	مشخصات محور
مسیر رفت کرمان -بافت	۴ کیلومتر	دارای ۲ خط عبور اصلی درجه ۱

### ۳-۳- جمع‌آوری داده‌ها و اطلاعات

تعیین دانسیته، درصد قیر، درصد مصالح سنگی صورت گرفت که در جدول شماره ۴ نتایج آزمایشات مخرب و دی الکتریک خروجی از دستگاه در نقاطی که مغزه‌گیری انجام شده آورده شده است.

جمع‌آوری داده‌ها و اطلاعات در این پژوهش، از نوع آزمایشگاهی و میدانی می‌باشد. جهت برداشت پیمایشی بخشی از یک راه اجرا شده مورد مطالعه قرار گرفت که پس از برداشت با دستگاه رادار نفوذی به زمین از همان محور مغزه‌گیری برای انجام آزمایشات مخرب جهت

### ۳-۳-۱- انجام آزمایش‌های مکانیکی

تعیین درصد قیر

روش آزمایش مطابق استاندارد ASTM D2172 می‌باشد و درصد قیر از رابطه ۶ محاسبه شد.

$$b = \frac{A-D}{A} * 100$$

$$D = C - E$$

(۶)

$b$ : درصد قیر

$A$ : وزن کل نمونه

$D$ : وزن مصالح بدون قیر

$C$ : وزن پیاله به همراه مخلوط آسفالت

$E$ : وزن پیاله خالی

نتایج آزمایش‌های تعیین درصد قیر تک تک مغزه‌ها در جدول شماره ۴، ارائه شده است.

تعیین دانسیته واقعی مخلوط آسفالتی

روش آزمایش مطابق استاندارد [AASHTO.† T166] می‌باشد و دانسیته واقعی از رابطه ۷ محاسبه می‌شود.

(۷)

$$G_{mb} = \frac{W_a}{w_a - w_w}$$

شماره ۲، توزین نمونه‌های آسفالتی در هوا و آب را نشان می‌دهد.

در این رابطه  $W_a$  وزن نمونه‌ها در هوا،  $w_w$  وزن نمونه در آب و  $G_{mb}$  وزن مخصوص واقعی آسفالت می‌باشد. شکل



شکل ۳. توزین نمونه‌های آسفالتی در هوا و آب

نتایج آزمایش‌های تعیین مقادیر وزن مخصوص واقعی مغزه اخذ شده از آسفالت اجرا شده در جدول شماره ۴، ارائه شده است.

#### تعیین وزن مخصوص مخلوط مصالح سنگی

AASHTO-T84، ASHTO-T100 مشخص شد که نتایج آن در جدول شماره ۳ آورده شده است سپس درصد هرکدام از مصالح (درشت، ریز، فیلر) در هریک از مغزه‌ها مشخص و مطابق رابطه شماره ۸ وزن مخصوص مخلوط مصالح سنگی محاسبه شد که نتایج آن در جدول شماره ۴ ارائه شده است.

وزن مخصوص مصالح سنگی در فضای خالی آسفالت کوبیده شده و فضای خالی مصالح سنگی اثر قابل ملاحظه ای دارد. علت این تاثیر تخلخل دانه های مصالح سنگی و جذب قیر در مصالح سنگی می‌باشد. در این پژوهش وزن مخصوص مصالح سنگی درشت، ریز و فیلر به ترتیب مطابق استانداردهای AASHTO-T85

$$G_{sb} = \frac{P_1 + P_2 + P_3}{\frac{P_1}{G_1} + \frac{P_2}{G_2} + \frac{P_3}{G_3}} \quad (۸)$$

$P_3, P_2, P_1$ : به ترتیب درصد مصالح درشت دانه، ریزدانه و فیلر  
 $G_3, G_2, G_1$ : به ترتیب وزن مخصوص مصالح درشت دانه، ریزدانه و فیلر

جدول ۳. وزن مخصوص مصالح سنگی

مشخصه	وزن مخصوص حقیقی (گرم/سانتی متر مکعب)
مصالح سنگی مانده روی الک ۸	۲/۶۹۴
مصالح سنگی رد شده از الک شماره ۸ و مانده روی الک شماره ۲۰۰	۲/۶۶۷
مصالح سنگی رد شده از الک شماره ۲۰۰	۲/۷۴۱
وزن مخصوص مخلوط مصالح سنگی $G_{sb}$	۲/۶۸۱

تعیین درصد فضای خالی مصالح سنگی مخلوط آسفالتی

نمونه بیان می‌گردد و از رابطه شماره ۹ محاسبه می‌شود. نتایج آزمایشهای تعیین درصد فضای خالی مصالح سنگی تک تک مغزه‌ها در جدول شماره ۴، ارائه شده است.

فضای خالی مصالح سنگی مخلوط آسفالتی حجمی از فضای خالی بین ذرات مصالح سنگی یک مخلوط آسفالتی متراکم شده است که شامل فضای خالی مخلوط آسفالتی و مقدار قیر موثر می‌باشد و به صورت درصدی از کل حجم

$$vma = 100 - \left( \frac{G_{mb}}{G_{sb}} \right) * P_s \quad (9)$$

$G_{mb}$ : وزن مخصوص آسفالت

$G_{sb}$ : وزن مخصوص مخلوط مصالح سنگی

$G_{sb}$ : درصد سنگی مصالح

جدول ۴. مقادیر وزن مخصوص واقعی، درصد قیر، درصد مصالح سنگی، درصد فضای خالی

مصالح سنگی مغزه اخذ شده از آسفالت اجرا شده

ردیف	شماره نمونه	دانشسته واقعی مطابق استاندارد AASHTO T166	درصد قیر	درصد سنگی مصالح	وزن مخصوص حقیقی مصالح سنگی (گرم/سانتی متر مکعب)	درصد فضای خالی مصالح سنگی مخلوط آسفالتی
۱	A۱	۲/۳۲۸	۴/۲۶	۹۵/۷۴	۲/۶۸۴	۱۶/۹۶
۲	A۲	۲/۳۳۲	۴/۶۵	۹۵/۳۵	۲/۶۸۴	۱۷/۱۵
۳	A۳	۲/۲۹۷	۴/۲۵	۹۵/۷۵	۲/۶۸۴	۱۸/۰۶
۴	A۴	۲/۳۱۲	۴/۵۱	۹۵/۴۹	۲/۶۸	۱۷/۶۲
۵	A۵	۲/۳۰۱	۴/۷	۹۵/۳	۲/۶۸۴	۱۸/۳۰
۶	A۶	۲/۳۴۱	۴/۱	۹۵/۹	۲/۶۸۸	۱۶/۴۸
۷	A۷	۲/۳۵۹	۴/۴	۹۵/۶	۲/۶۸۳	۱۵/۹۴
۸	A۸	۲/۳۶۷	۴/۵۶	۹۵/۴۴	۲/۶۹۷	۱۵/۶۸
۹	A۹	۲/۳۱۳	۴/۱۴	۹۵/۸۶	۲/۶۸۱	۱۷/۳
۱۰	A۱۰	۲/۳۲۳	۴/۴۹	۹۵/۵۱	۲/۶۷۷	۱۷/۱۲
۱۱	A۱۱	۲/۳۴	۴/۳۲	۹۵/۶۸	۲/۶۸۶	۱۶/۶۵
۱۲	A۱۲	۲/۳۶۷	۴/۵۶	۹۵/۴۴	۲/۶۷۹	۱۵/۶۸
۱۳	A۱۳	۲/۳۱۵	۳/۶۲	۹۶/۳۸	۲/۶۸۷	۱۶/۹۶
۱۴	A۱۴	۲/۳۴۲	۴/۴۱	۹۵/۵۹	۲/۶۸۳	۱۶/۵۶
۱۵	A۱۵	۲/۳۴۳	۴/۲۸	۹۵/۷۲	۲/۶۸۶	۱۶/۵۰
۱۶	A۱۶	۲/۳۲۳	۴/۴۹	۹۵/۵۱	۲/۶۷۷	۱۷/۱۲
۱۷	A۱۷	۲/۳۱۳	۴/۱۴	۹۵/۸۶	۲/۶۸۱	۱۷/۳۰
۱۸	A۱۸	۲/۳۱۵	۳/۶۲	۹۶/۳۸	۲/۶۸۷	۱۶/۹۶
۱۹	A۱۹	۲/۳۲۵	۳/۹۵	۹۶/۰۵	۲/۶۸۳	۱۶/۷۷
۲۰	A۲۰	۲/۳۲۴	۴/۰۸	۹۵/۹۲	۲/۶۷۹	۱۶/۷۹
۲۱	A۲۱	۲/۳۴۲	۴/۴۱	۹۵/۵۹	۲/۶۸۳	۱۶/۵۶
۲۲	A۲۲	۲/۳۱۳	۴/۱۴	۹۵/۸۶	۲/۶۸۱	۱۷/۳۰
۲۳	A۲۳	۲/۳۴۸	۴/۲۸	۹۵/۷۲	۲/۶۷۳	۱۵/۹۲
۲۴	A۲۴	۲/۳۴۲	۴/۴۱	۹۵/۵۹	۲/۶۸۳	۱۶/۵۶
۲۵	A۲۵	۲/۳۱۵	۳/۶۲	۹۶/۳۸	۲/۶۸۷	۱۶/۹۶
۲۶	A۲۶	۲/۳۰۷	۴/۵	۹۵/۵	۲/۶۷۵	۱۷/۶۴
۲۷	A۲۷	۲/۳۶۷	۴/۵۶	۹۵/۴۴	۲/۶۷۹	۱۵/۶۸
۲۸	A۲۸	۲/۲۹۷	۴/۱۵	۹۵/۸۵	۲/۶۷۴	۱۷/۶۶
۲۹	A۲۹	۲/۳۴۱	۴/۱	۹۵/۹	۲/۶۸۸	۱۶/۴۸
۳۰	A۳۰	۲/۳۱۳	۴/۱۴	۹۵/۸۶	۲/۶۸۱	۱۷/۳۰

جدول ۵. مقادیر دی الکترونیک خروجی رادار و درصد فضای خالی مصالح سنگی محاسبه شده از رابطه ارائه شده پژوهش

ردیف	شماره نمونه	دی الکترونیک	درصد فضای خالی مصالح سنگی مطابق رابطه به دست آمده از پژوهش
۱	A۱	۵/۹۷	۱۶/۹۷۵
۲	A۲	۶/۰۲۵	۱۶/۶۴۸
۳	A۳	۵/۸۳۴	۱۷/۷۸۲
۴	A۴	۵/۹۱۶	۱۷/۲۹۵
۵	A۵	۵/۸۵۶	۱۷/۶۵۱
۶	A۶	۶/۰۷۵	۱۶/۳۵۲
۷	A۷	۶/۱۷۳	۱۵/۷۷۱
۸	A۸	۶/۱۶۰	۱۵/۸۴۸
۹	A۹	۵/۹۲۱	۱۷/۲۶۵
۱۰	A۱۰	۵/۹۷۶	۱۶/۹۳۹
۱۱	A۱۱	۶/۰۶۹	۱۶/۳۸۷
۱۲	A۱۲	۶/۱۵۰	۱۵/۹۰۷
۱۳	A۱۳	۵/۹۳۲	۱۷/۲۰۰
۱۴	A۱۴	۶/۰۸۰	۱۶/۳۲۲
۱۵	A۱۵	۶/۰۸۵	۱۶/۲۹۳
۱۶	A۱۶	۵/۹۲۰	۱۷/۲۷۱
۱۷	A۱۷	۵/۹۲۱	۱۷/۲۶۵
۱۸	A۱۸	۵/۸۷۰	۱۷/۵۶۸
۱۹	A۱۹	۵/۹۸۷	۱۶/۸۷۴
۲۰	A۲۰	۵/۹۲۰	۱۷/۲۷۱
۲۱	A۲۱	۶/۰۲۰	۱۶/۶۷۸
۲۲	A۲۲	۵/۹۲۱	۱۷/۲۶۵
۲۳	A۲۳	۶/۰۶	۱۶/۴۴۱
۲۴	A۲۴	۶/۰۸۰	۱۶/۳۲۲
۲۵	A۲۵	۵/۹۳۲	۱۷/۲۰۰
۲۶	A۲۶	۵/۸۸۹	۱۷/۴۵۵
۲۷	A۲۷	۶/۱۴۰	۱۵/۹۶۶
۲۸	A۲۸	۵/۸۳۴	۱۷/۷۸۲
۲۹	A۲۹	۶/۰۷۵	۱۶/۳۵۲
۳۰	A۳۰	۵/۸۹۰	۱۷/۴۹۹

#### ۴- تحلیل و بررسی نتایج

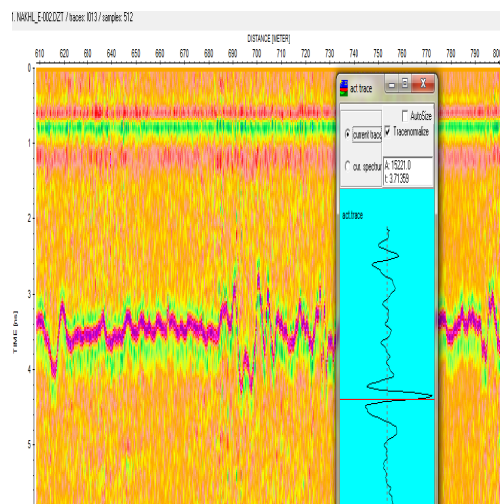
##### ۴-۱- تفسیر کیفی

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 مفسر در واقع شکل و کیفیت بازتابها را نسبت به بازتابهای

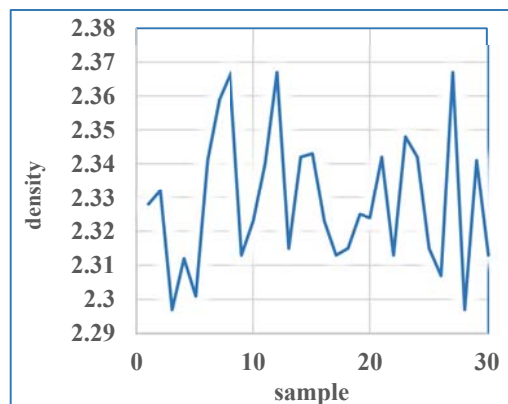
تفسیر پروفیل های رادار بعد از پردازشهای مناسب دادهها انجام شد که این روش تفسیر به تفسیر گرافیکی معروف می باشد. این تفسیر با استفاده از مشخصات بارز روی مقاطع رادار نفوذی زمین صورت می گیرد. به این ترتیب که مقاطع

درصد فضای خالی لایه آسفالتی اجرا شده است. با مقایسه نمودارهای شکل شماره ۴ و ۵ مشاهده می‌شود گراف خروجی از نتایج تحلیل رادار که نشان دهنده غیر یکنواختی شدید در لایه آسفالتی است با چگالی واقعی اندازه‌گیری شده مطابق استاندارد AASHTO T166 مطابقت دارد

مجاور تشخیص داده و با توجه به خصوصیات این باز تاب‌ها از جمله پیوستگی، بزرگی و گسترش آنها، این رویدادها را از یکدیگر متمایز می‌کند. شکل شماره ۴ پروفیل محور مورد مطالعه به همراه خروجی گرافیکی و مقدار پیک دامنه را نشان می‌دهد. همانگونه که مشاهده می‌شود غیر یکنواختی شدیدی در لایه آسفالتی اجرا شده وجود دارد که ناشی از تفکیک شدن، کاهش چگالی و افزایش



شکل ۴- پروفیل برداشت شده محور مورد مطالعه توسط رادار



شکل ۵. نمودار رابطه چگالی واقعی و شماره نمونه در محور مورد مطالعه

دانشیته واقعی نسبت مستقیم دارد. به طوری که با افزایش ثابت دی الکتریک خروجی از رادار دانشیته واقعی لایه آسفالتی افزایش و با کاهش ثابت دی الکتریک خروجی از رادار دانشیته واقعی لایه آسفالتی کاهش می‌یابد و نمودار

#### ۴-۲- ارتباط ثابت دی الکتریک با چگالی واقعی

با مقایسه ثابت دی الکتریک خروجی از رادار با دانشیته واقعی محاسبه شده مطابق استاندارد [AASHTO.<sup>۲</sup> T166] مشاهده شد ثابت دی الکتریک با

#### ۴-۴- ارتباط ثابت دی الکتریک با درصد فضای خالی مصالح سنگی

وجود بیش از حد فضای خالی مصالح سنگی در میزان قیر بهینه در لایه آسفالتی اجرا شده نشان دهنده تراکم غیرکافی مصالح آسفالتی است که باعث به وجود آمدن برخی از خرابی‌های عملکردی از جمله جدا شدن دانه‌ها، شیارشدگی و کاهش دوام می‌شود. با مقایسه درصد فضای خالی مصالح سنگی لایه آسفالتی اجرا شده با ثابت دی الکتریک خروجی از رادار مطابق نمودار شکل شماره ۸ درصد فضای خالی مصالح سنگی با ثابت دی الکتریک نسبت عکس دارد به طوری که با افزایش دی الکتریک خروجی از رادار درصد فضای خالی مصالح سنگی کاهش و با کاهش دی الکتریک درصد فضای خالی مصالح سنگی افزایش می‌یابد.

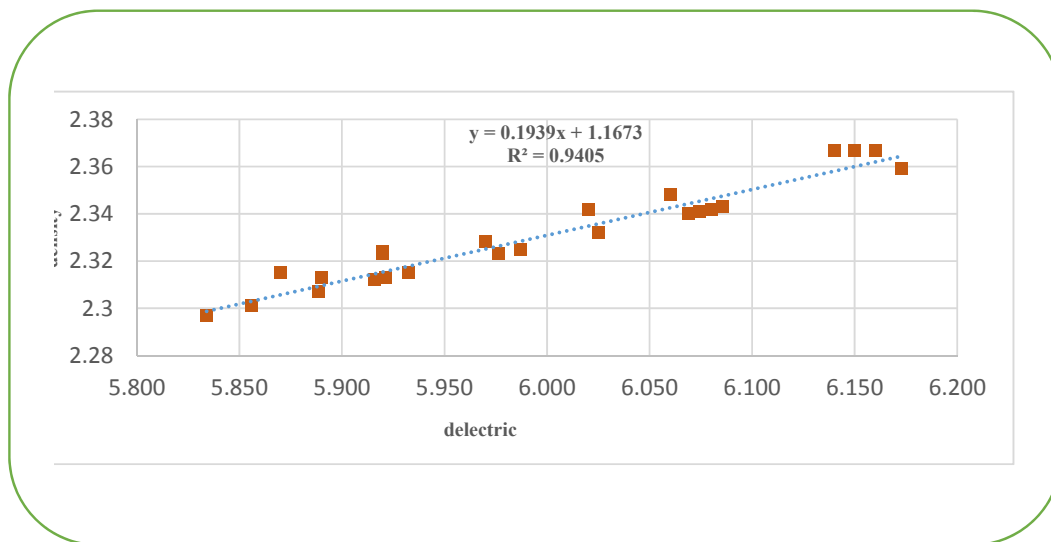
نمودار شکل شماره ۸ ارتباط ثابت دی الکتریک و درصد فضای خالی مصالح سنگی را یک تابع خطی با ضریب همبستگی ۰٫۸۱ و  $y = -5.9322x + 52.39$  را نشان می‌دهد. می‌توان با جای‌گذاری مقدار دی الکتریک خروجی از رادار از نقاط برداشتی لایه آسفالتی اجرا شده در مقدار X درصد فضای خالی مصالح سنگی لایه آسفالتی اجرا شده را محاسبه کرد.

شکل شماره ۶ ارتباط ثابت دی الکتریک و دانسیته واقعی را یک تابع خطی با ضریب همبستگی ۰٫۹۴ و رابطه  $y = 0.1939x + 1.1673$  را نشان می‌دهد. می‌توان با جای‌گذاری مقدار ثابت دی الکتریک خروجی از رادار نفوذی زمین از نقاط برداشتی لایه آسفالتی اجرا شده در مقدار X دانسیته واقعی لایه آسفالتی را محاسبه کرد.

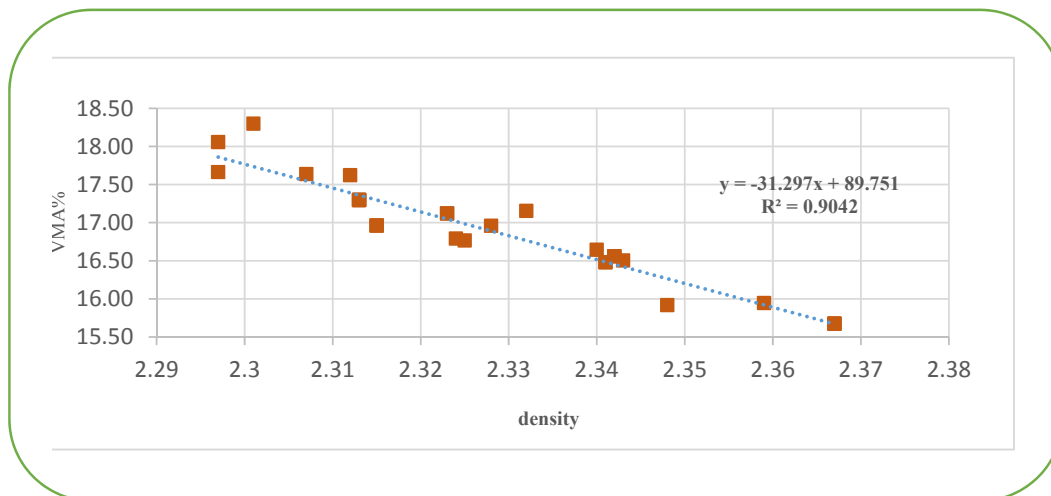
#### ۴-۳- ارتباط چگالی واقعی و درصد فضای خالی مصالح سنگی

با مقایسه چگالی واقعی محاسبه شده مطابق استاندارد [AASHTO, T166] با درصد فضای خالی مصالح سنگی مطابق نمودار شکل شماره ۷ درصد فضای خالی مصالح سنگی با دانسیته واقعی رابطه عکس دارد. به طوری که با افزایش دانسیته درصد فضای خالی مصالح سنگی کاهش و با کاهش دانسیته واقعی درصد فضای خالی مصالح سنگی افزایش می‌یابد. نمودار شکل شماره ۷ ارتباط دانسیته واقعی با درصد فضای خالی مصالح سنگی را یک تابع خطی با ضریب همبستگی ۰٫۹۰ و رابطه  $y = -31.297x + 89.751$  را نشان می‌دهد.

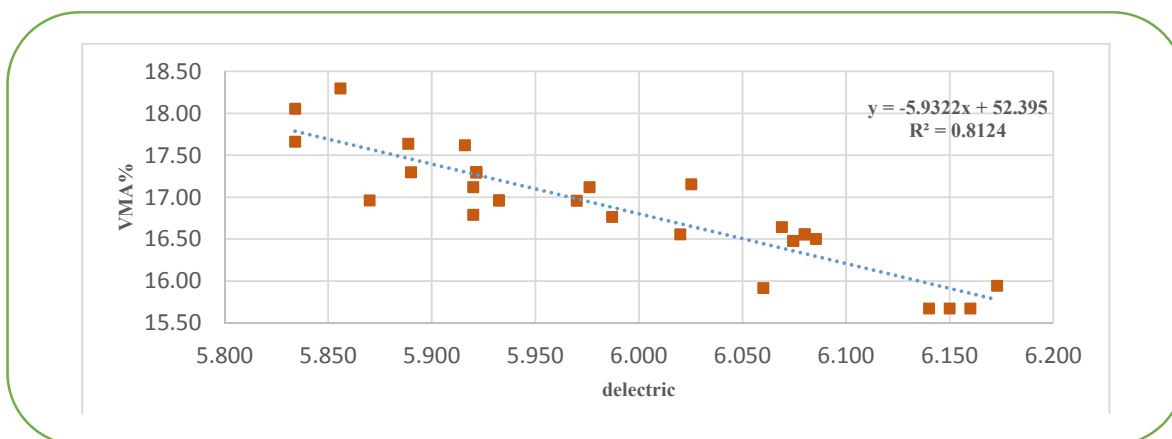
شکل ۶. نمودار رابطه بین دی الکتریک و چگالی واقعی



شکل ۷. نمودار رابطه بین چگالی واقعی و درصد فضای خالی مصالح سنگی



شکل ۸. نمودار رابطه بین دی الکتریک و درصد فضای خالی مصالح سنگی



سنگی محاسبه شده مطابق رابطه ۹ با درصد فضای خالی مصالح سنگی محاسبه شده مطابق رابطه به دست آمده از پژوهش ۰,۰۳۸ است. این میزان اختلاف در مقایسه با نسبت فایده استفاده از رادار در تعیین درصد فضای خالی مصالح سنگی که پروفیل پیوسته ای از درصد فضای خالی مصالح سنگی در طول محور مورد مطالعه ارائه می دهد ناچیز است.

مقادیر محاسبه درصد فضای خالی مصالح سنگی با استفاده از رابطه شماره ۹ با مقادیر درصد فضای خالی مصالح سنگی لایه آسفالتی اجرا شده مطابق رابطه به دست آمده از پژوهش با هم مقایسه شد که نتایج آن در جدول شماره ۶ آورده شده است. همانطور که ملاحظه می شود اختلاف میان ضریب تغییرات درصد فضای خالی مصالح

جدول ۹. مقایسه آماری نتایج حاصل از آزمایش ها

ضرب تغییرات	ضرب تغییرات	انحراف از معیار	انحراف از معیار	میانگین درصد	میانگین درصد	ردیف
درصد فضای خالی مصالح سنگی محاسبه شده مطابق رابطه به دست آمده از پژوهش	درصد فضای خالی مصالح سنگی محاسبه شده مطابق فرمول مربوطه	درصد فضای خالی مصالح سنگی محاسبه شده مطابق رابطه به دست آمده از پژوهش	درصد فضای خالی مصالح سنگی محاسبه شده مطابق فرمول مربوطه	فضای خالی مصالح سنگی محاسبه شده مطابق رابطه به دست آمده از پژوهش	فضای خالی مصالح سنگی محاسبه شده مطابق فرمول مربوطه	۱
۰/۰۳۵۸۶	۰/۰۳۹۷۳	۰/۶۰۴	۰/۶۷۰	۱۶/۸۶۰	۱۶/۸۶۵	

### ۵- نتیجه گیری

- دادرس جوان، فرزانه و احمد طوسی (۱۳۹۷). مروری بر مبانی رادار نفوذپذیر در زمین و روش های مدل سازی سه بعدی اجسام مدفون شده در خاک به کمک آنها. نشریه علمی- ترویجی مهندسی نقشه برداری و اطلاعات مکانی. شماره ۱، ۲۸-۱۳.

- رشیدیان، پیمان، محمودرضا، کیمنش و زینالزاده، مسلم (۱۴۰۱). ارزیابی قابلیت رادار نفوذی زمین در شناخت پتانسیل کاهش دوام لایه آسفالتی اجرا شده مطالعه موردی استان کرمان. فصلنامه علمی پژوهشنامه حمل و نقل. شماره ۷۴، ۶۸-۵۵.

- شعبانی، شاهین، کیانفر، کیوان و محمدی ویژه، مهدی (۱۳۹۶). تشخیص ارتباط پارامترهای عریان شدگی در عمق آسفالت به کمک روش رادار نفوذی به زمین مطالعه موردی منطقه ۲۲ تهران. پژوهش های ژئوفیزیک کاربردی شماره ۲، ۲۳۴-۲۲۹.

- طباطبایی، امیر محمد (۱۳۹۶). روسازی راه. مرکز نشر دانشگاهی.

- طاهرخانی، حسن و افروزی، سیامک (۱۳۹۶). ارزیابی شیار افتادگی و حساسیت رطوبتی بتن آسفالتی گرم حاوی الیاف نایلونی. فصلنامه مهندسی حمل و نقل. شماره ۴، ۵۸۷-۵۶۷.

- عبدی، علی، کاووسی، امیر، آدرسی، مصطفی و میربها، بابک (۱۳۹۵). ارزیابی عریان شدگی مصالح سنگی در رویه های بتن آسفالتی با روش های آزمایشگاهی. مجله علمی- پژوهشی مهندسی عمران مدرس. شماره ۱، ۱۴۴-۱۳۵.

با توجه به رابطه ارائه شده در بند ۴-۴ که نشان می دهد درصد فضای خالی مصالح سنگی لایه آسفالتی اجرا شده یک تابع خطی با ضریب همبستگی ۰/۸۱ می باشد. می توان با جایگذاری مقدار دی الکترونیک خروجی از دستگاه رادار نفوذی در هنگام پیمایش میدانی لایه آسفالتی اجرا شده در مقدار X درصد فضای خالی مصالح سنگی لایه آسفالتی را محاسبه کرد، در نتیجه پروفیل پیوسته ای از درصد فضای خالی مصالح سنگی لایه آسفالتی اجرا شده در کل مسیر مورد مطالعه قابل دسترسی است. در صورتی که درصد فضای خالی اندازه گیری شده کمتر و یا بیشتر از مقادیر استاندارد مورد قبول باشد. قطع به یقین پتانسیل خرابی های مرتبط با کاهش یا افزایش درصد فضای خالی مصالح سنگی در لایه آسفالتی بیشتر خواهد شد.

### ۶- مراجع

- اسلامی شهر بابکی، پوریا، خیبری، محمد مهدی و خانی سانج، حامد (۱۳۹۷). آنالیز حساسیت و ارایه مدل ریاضی برای تعیین درصد قیر بهینه در آسفالت با استخوان بندی سنگ دانه ای. فصلنامه علمی- ترویجی جاده، شماره ۹۳، ۱۲-۱.

- حجت، آزاده (۱۳۹۳). مسائل کاربردی در ژئوفیزیک اکتشافی.

- خاوندی، علیرضا، حیدری، محبوب و دهقانی، احمد (۱۳۹۸). بررسی اثر افزودنی های ضد عریان شدگی و نوع مصالح سنگ دانه ای بر مقاومت مخلوط های آسفالتی در برابر آسیب های مطالعه موردی استان اردبیل. فصلنامه مهندسی حمل و نقل. شماره ۱۴، ۸۶۵-۸۵۱.

- Loken, M., (2007). Use of ground penetrating radar to evaluate Minnesota roads.
- MCleod, N. W., (1956). Relation ship Between Density, Bitument Content, and Voids properties of compacted Bituminous paving Mixtures. *Proceedings of Highway Research Board*.
- Sakhaeifar, M. S., Kim, Y. R. and Kabir, P., (2015). New predictive models for the dynamic modulus of hot mix asphalt. *Construction and Building Materials*, No. 76, 221-231.  
**doi: org/10.1016/j.conbuildmat.2014.11.011**
- Saarenketo, T., van Deusen, D. and Maijala, P., (2000), Minnesota GPR Project 1998 testing ground penetrating radar technology on innesota roads and highways. *In 8 International Conference on Ground Penetrating Radar*. International Society for Optics and Photonics, 396-401.
- Saarenketo, T., (2006). Electrical properties ofpavement material.
- Smith, B. J., Hesp, s., (2002), crack pinning In Asphalt Mastic and concrete Regular Fatigue studies. *Journal of Transportation Research Board*. Vol. 3, No. 1728, 75-81.
- Yuejian Cao. et.al., (2008). Pavement Evaluation Using Ground Penetrating Radar. *Department of Civil Engineering University of Minnesota 500*.
- غنی زاده، علیرضا، حیدر آبادی زاده، نسرین، ضیایی، آرش. (۱۴۰۰). مدل‌سازی عددجریان مخلوط‌های آسفالتی با استفاده از روش رگرسیون چند جمله‌ای تکاملی. *پژوهشنامه حمل و نقل*. شماره ۶۸، ۲۸-۱۶.
- گلچین، بابک، علیان، محمد و مشک آبادی رامین (۱۴۰۲). بررسی اثر الیاف پارافیر بر مشخصات فنی مخلوط‌های آسفالت بازیافتی گرم کارخانه‌ای و انتخاب یک ترکیب مناسب. *پژوهشنامه حمل و نقل*. شماره ۷۶، ص. ۸۵-۱۰۲.
- معاونت‌برنامه 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 و نظارت راهبردی ریاست جمهوری (۱۳۹۲). مشخصات فنی عمومی راه، نشریه ۱۰۱ تجدیدنظر دوم.
- AASHTO T 166-16, (2016). Standard Method of Test for Bulk Specific Gravity (Gmb) of Compacted Hot Mix Asphalt (HMA) Using Saturated Surface-Dry Specimens.
- ASTM D2041 - 03a - (2016). 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.
- Kandhal, P.S., N.A.P. Association, and N.C.F.A. (1992). Technology ,Moisture susceptibility of HMA mixes: identification of problem and recommended solutions. *National Asphalt Pavement*.

# Evaluation Ability Ground Penetration Radar In Determining Empty Space Stone Materials of The Applied Asphalt Layer

Mahmoud Reza Keymanesh, *Associate Professor, Civil Engineering Group,  
Payam-e-Noor University, Tehran, Iran.*

Jalal Ayoubinejad, *Assistant Professor, Civil Engineering Group,  
Payam-e-Noor University, Tehran, Iran.*

Peyman Rashidian, *Ph.D., Student, Civil Engineering Group,  
Payam-e-Noor University, Tehran, Iran.*

*E-mail: mrkeymanesh@pnu.ac.ir*

Received: June 2024- Accepted: September 2024

## **ABSTRACT**

One of the influential parameters of the permeability and strength of hot asphalt is the empty space of stone materials. At present, to determine the percentage of empty space stone materials of the implemented asphalt, to specify required parameters for calculating the percentage empty space stone materials, coring should be done. This method is time consuming and expensive and also determines the quality characteristics of the asphalt layer at one point. In the present article, determination of empty space stone materials in asphalt implemented by using a ground penetrating radar device is evaluated. In the research, a part of an implemented road selected for study, then evaluated mechanized with the help of a device (GPR) done. In the following, taken core samples from locations randomly and then experiments determine the density, percentage of bitumen to calculate the percentage of empty space stone material were placed. In comparison, results of destructive experiments with mechanized scrolling transpire by decreasing the percentage of empty space stone materials of the implemented asphalt layer increase dielectric. So that by decreasing the percentage of empty space stone materials less and equal to 17.4%, an increase in dielectric constant value of 5.9 due to non-destructive evaluation observed. So the using output results of radar can be obtained continuous profile from status percentage empty space stone materials in implemented asphalt layer the project study.

**Keywords:** Empty Space Stone Materials, Ground Penetration Radar, Wavelength, Frequency