

تعیین پارامترهای کیفی روسازی راه با استفاده از روش زمین نفوذ (GPR)

احمد مزینانی^۱، ابوالقاسم کامکار روحانی^{۱*} و مهدی محمدی ویژه^۲

^۱دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود
^۲مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران

(تاریخ دریافت: ۹۳/۴/۷، تاریخ پذیرش: ۹۳/۱۱/۱۲)

چکیده

محتوای حفرات آسفالت و رطوبت اساس از ویژگی‌های مهم روسازی جاده‌ها هستند؛ روش سنتی برای کنترل کیفی روسازی مغزه‌گیری است؛ اما این روش علاوه بر وقت‌گیر و پرهزینه بودن، دارای داده‌های نقطه‌ای است. یکی از چالش‌هایی که مهندسان راه با آن مواجه‌اند، کنترل این پارامتر با استفاده از روش‌های غیر مخرب است. یکی از روش‌هایی که اخیراً در این زمینه مورد توجه قرار گرفته، روش GPR است. برخلاف روش‌های سنتی، GPR قادر است که با سرعت زیاد و هزینه کم داده‌های پیوسته‌ای را از روسازی به‌دست دهد. در این تحقیق درصد حفرات نمونه‌های آسفالت و میزان رطوبت نمونه‌های اساس به‌صورت آزمایشگاهی تعیین شده است. سپس ثابت دی‌الکتریک نمونه‌های آسفالت با استفاده از آنتن ۸۰۰ مگاهرتز پوششی (Shielded) و نمونه‌های اساس با استفاده از آنتن ۲۵۰ مگاهرتز پوششی به کمک روش بازتاب سطحی محاسبه شده است. در نهایت بین ثابت دی‌الکتریک محاسبه شده از روش GPR و درصد حفرات نمونه‌ها و همچنین رطوبت اساس به‌صورت جداگانه رابطه‌ای برقرار شده است. نتایج به‌دست آمده به خوبی نشان می‌دهد که با افزایش تراکم آسفالت و درصد رطوبت اساس، ثابت دی‌الکتریک آنها نیز افزایش می‌یابد. با این حال به علت کوچک بودن سطح نمونه‌ها، نتایج کمی به‌دست آمده با خطاهایی همراه است. ولی این تحقیق به‌خوبی نشان می‌دهد که چگونه رطوبت اساس و درصد حفرات موجود در آسفالت، به روش GPR قابل بررسی است.

واژه‌های کلیدی: رطوبت اساس، حفرات آسفالت، رادار نفوذی به زمین، بازتاب سطحی، ثابت دی‌الکتریک

Determination of qualitative parameters in pavements using ground penetrating radar (GPR) method

Ahmad Mazinani¹, Abolghasem Kamkar Rouhani^{1*} and Mehdi Mohammadi Vizheh²

¹School of Mining, Petroleum & Geophysics Engineering, Shahrood University of Technology

²Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran

(Received: 28 June 2014, accepted: 1 February 2015)

Summary

Voids of asphalt and water content of its base are among important properties of pavements that play significant roles in the bearing capacity of the pavements. A conventional method for quality control of pavements is to take cores. However, this method is time-consuming and expensive. In addition, it provides discontinuous data from the pavements. In this regard, one of the new challenges for engineers who construct roads is to determine qualitative parameters of pavements using non-destructive methods. Ground penetrating radar (GPR) is a non-destructive geophysical method that has been considered for this purpose. This method, opposite to the above-mentioned conventional method, is practically fast and relatively inexpensive. It also provides continuous data from pavements. In this method, a transmitter antenna sends an electromagnetic pulse to the ground reaching subsurface structures or anomalies. These pulses are reflected by electrical inhomogeneities or anomalies, and then, the reflections are received by a receiver antenna. One of the effective and recent applications of this method is the qualitative control of pavements although the primary aim of using this method in pavements is to determine the thicknesses of the layers below the pavements including asphalt, base and sub-base layers.

In this research work, 12 asphalt samples containing same materials but of different densities were prepared in laboratory. Void contents of the asphalt samples were determined using D2726 ASTM standard instructions. Similarly, 9 base samples containing same materials but of different moisture contents were also prepared in laboratory then, applying the surface reflection method, dielectric constant values of asphalt and base samples were calculated using 800 MHz and 250 MHz GPR shielded antennas, respectively finally, it was attempted to establish a mathematical relationship between dielectric constant values and void contents of the asphalt samples. In a similar manner, a mathematical relationship was established between dielectric constant values and moisture contents of the base samples our results demonstrated that the dielectric constant values of the asphalt samples increased exponentially with increasing the density values of the asphalt samples via decreasing the void contents of the asphalt samples and vice versa. Furthermore, the amounts of dielectric constant of the base samples increased with increasing the moisture contents of the samples linearly. This showed that as the moisture contents of a base sample increased, the attenuation of the electromagnetic waves, generated by the GPR transmitter antenna, intensified in the base sample and the depth of penetration of the electromagnetic waves was remarkably reduced.

It should be noted that the quantitative results, presented in this paper, contain reasonable errors, mainly because the surfaces of the samples are relatively small in comparison to the effective surface of the electromagnetic waves emitted from the GPR antenna. To obtain more accurate dielectric constant values from the tests, it is necessary to use GPR antennas with higher central frequencies than those used in this research work, and to use samples with larger surfaces than those used in the carried out experiments however, the results of this laboratory research work can be generalized to the real field work. Moreover, the results of this research work indicated that how engineering properties of pavements were well controlled and obtained by the use of non-destructive geophysical GPR method without needing to take cores from the pavements.

Keyword: Moisture content of base, asphalt voids, ground penetrating radar (GPR), surface reflection, dielectric constant

۱ مقدمه

که A_0 دامنه تپ بازتابی از سطح نمونه (در اینجا نمونه آسفالت یا اساس) و A_m دامنه تپ بازتابی از صفحه فلزی است. لازم به توضیح است که صفحه فلزی در این روش نقش بازتاب کننده کامل را دارد، به طوری که هیچ موجی از آن عبور نمی کند.

در روش GPR از تپ‌های الکترومغناطیس برای بررسی‌های زیرسطحی استفاده می‌شود. این تپ‌ها با استفاده از یک آنتن فرستنده به داخل زمین فرستاده می‌شوند و پس از برخورد به ناهمگنی‌های الکتریکی زیرسطحی بازتاب و با آنتن گیرنده دریافت و ثبت می‌شوند. ثابت دی‌الکتریک مهم‌ترین خصوصیت الکتریکی است که رفتار تپ‌ها و امواج الکترومغناطیس در محیط‌های زیرسطحی را کنترل می‌کند. این ویژگی میزان قابلیت جهت‌یافتگی دوقطبی‌های الکتریکی یک ماده را در حضور میدان الکتریکی خارجی نشان می‌دهد (نیل، ۲۰۰۳). در جدول ۱ ثابت دی‌الکتریک تعدادی از مواد که در کنترل روسازی راه حائز اهمیت هستند، داده شده است.

جدول ۱. مقادیر ثابت دی‌الکتریک برخی از مواد (سارنکتو و چن، ۲۰۰۲).

ماده	ثابت دی‌الکتریک (ϵ_r)
هوا	۱
آب	۸۱
رس	۵-۴۰
سیلت	۵-۳۰
ماسه سیلتی	۶-۱۷
ماسه خشک	۳-۵
ماسه اشباع	۲۰-۳۰
گراول	۴-۷
آسفالت	۲-۶
قیر	۲/۶-۲/۸

ثابت دی‌الکتریک یک ماده، تابعی از ثابت دی‌الکتریک تک‌تک اجزای تشکیل دهنده آن است. مطابق جدول ۱، به علت کوچک بودن ثابت دی‌الکتریک هوا، با افزایش درصد حفرات آسفالت، ثابت دی‌الکتریک آن کاهش می‌یابد. از طرف دیگر به علت بزرگ بودن ثابت دی‌الکتریک آب، محتوای رطوبت موجود در اساس راه مهم‌ترین عاملی است که ثابت دی‌الکتریک آن را تعیین می‌کند؛ به طوری که با افزایش درصد رطوبت اساس ثابت دی‌الکتریک آن افزایش می‌یابد.

برای تعیین غیر مستقیم ثابت دی‌الکتریک با استفاده از روش GPR، از روش بازتاب سطحی استفاده می‌شود. در این روش دامنه تپ بازتابی از سطح نمونه‌های آسفالت و اساس با دامنه تپ بازتابی از سطح یک صفحه فلزی مقایسه و با استفاده از رابطه زیر ثابت دی‌الکتریک نمونه محاسبه می‌شود (القادی و همکاران، ۲۰۱۰):

$$\epsilon_A = \left(\frac{A_m + A_0}{A_m - A_0} \right)^2, \quad (1)$$

۲ روش تحقیق

تحقیقات زیادی برای ایجاد ارتباط بین خصوصیات فیزیکی خاک و آسفالت و داده‌های GPR از سوی محققان گوناگون صورت گرفته است. علاوه بر این مدل‌های متفاوتی برای ایجاد ارتباط بین محتوای رطوبت خاک و ثابت دی‌الکتریک آن از طرف افراد گوناگون عرضه شده است که از بین آنها می‌توان به مدل تاپ و همکاران، مدل میلر و گاسکین اشاره کرد (متوالی و همکاران، ۲۰۰۷) استفاده از روش GPR برای بررسی‌های غیر تخریبی جاده‌های آسفالتی اولین بار در ۱۹۹۲ از سوی یک گروه تحقیقاتی در فنلاند و به سرپرستی سارنکتو گزارش شد (سارنکتو، ۱۹۹۲). او و همکارانش از این روش برای تعیین ضخامت لایه‌های روسازی و نیز تعیین میزان حفرات هوای آسفالت استفاده کردند. بر اساس نتایج

که درصد حفرات هوای ۸ درصد و بالاتر، باعث به وجود آمدن حفرات به هم پیوسته‌ای از هوا در داخل آسفالت می‌شود. وجود این حفرات به هم پیوسته موجب نفوذ هوا و رطوبت به داخل آسفالت و کاهش عمر روسازی می‌شود. از طرف دیگر اگر حفرات هوای آسفالت زیر ۳ درصد باشد، در آب و هوای گرم، فضای کافی برای انبساط قیر موجود در آسفالت وجود ندارد و در این حالت، آسفالت حالت پلاستیک و ناپایدار به خود می‌گیرد و اصطلاحاً قیرزده می‌شود (سارنکتو، ۲۰۰۶).

در این تحقیق، برای بررسی درصد حفرات آسفالت از ۱۲ نمونه استوانه‌ای آسفالت، با درجات متفاوت تراکم استفاده شد که مشخصات آنها در جدول ۲ آورده شده است. این نمونه‌ها براساس استاندارد ASTM D2041 تهیه شدند، به طوری که قطر هریک از این نمونه‌های آسفالتی ۱۵ سانتی‌متر و ارتفاع آنها به طور میانگین ۱۰ سانتی‌متر است.

برای مثال ارتفاع نمونه اول در جدول ۲، که با ۵ ضربه چکش متراکم شده، حدود ۱۳ سانتی‌متر و ارتفاع نمونه دوازدهم که با ۱۱۰ ضربه متراکم شده، حدود ۸ سانتی‌متر است. برای تعیین درصد حفرات نمونه‌ها ابتدا لازم است که وزن مخصوص هریک از آنها دقیقاً تعیین شود. تعیین وزن مخصوص نمونه‌ها با استفاده از روش استاندارد ASTM D2726 صورت گرفت. در این روش ابتدا وزن نمونه در هوا اندازه‌گیری شد. سپس نمونه مورد نظر در حالتی که کاملاً داخل آب قرار داشت، وزن شد. در این صورت وزن مخصوص نمونه از رابطه زیر به دست می‌آید (افلاکی، ۱۳۸۷):

$$G_{mb} = \left(\frac{W_a}{W_a - W_w} \right), \quad (3)$$

که G_{mb} وزن مخصوص توده آسفالتی، W_a وزن نمونه در هوا و W_w وزن آن در آب است.

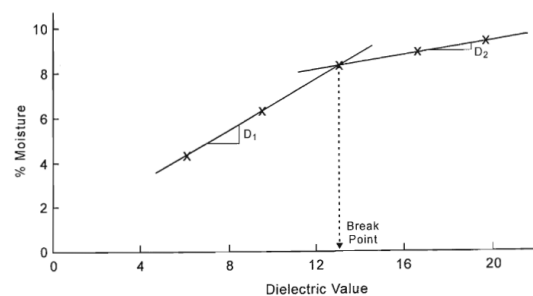
کار محققان فنلاندی بین ثابت دی‌الکتریک آسفالت و درصد حفرات آن یک رابطه‌ی نمایی به شکل زیر وجود دارد (سارنکتو، ۲۰۰۶):

$$V\% = ae^{-b\varepsilon}, \quad (2)$$

که V درصد حفرات هوای آسفالت، ε ثابت دی‌الکتریک آسفالت و a و b ضرایب ثابت هستند.

القادی با آنتن‌های GPR بسامد بالا بخش‌های حقیقی و موهومی گذردهی دی‌الکتریک آسفالت را تعیین کرد (القادی و همکاران، ۲۰۱۰). سارنکتو و چن از روش GPR برای تعیین محل نقاطی از آسفالت که در آنها پیوند بین دانه‌های آسفالت به علت نفوذ رطوبت و هوا گسیخته شده است، استفاده کردند (سارنکتو و چن، ۲۰۰۲).

در ۱۹۹۰، مجموعه‌ای از آزمایش‌ها روی محدوده خاصی از اساس آسفالت‌ها در تگزاس صورت گرفت. رابطه بین محتوای آب و ثابت دی‌الکتریک اساس راه به صورت دو بخش خطی مطابق با شکل ۱ به دست آمد (اسکالیون و سارنکتو، ۲۰۰۱).



شکل ۱. رابطه بین محتوای رطوبت اساس و ثابت دی‌الکتریک آن (سارنکتو، ۲۰۰۱).

۱-۲ تعیین رابطه بین درصد حفرات نمونه‌های آسفالت و ثابت دی‌الکتریک به دست آمده از روش GPR طبق قوانین مؤسسه آسفالت ایالات متحده، میزان حفرات هوای موجود در آسفالت باید بین ۳ تا ۷ درصد باشد. چرا

جدول ۲. محاسبه ثابت دی‌الکتریک نمونه‌های آسفالتی.

شماره نمونه	تعداد ضربات چکش تراکم	دامنه تپ بازتابی از صفحه فلزی	دامنه تپ بازتابی از سطح نمونه	ثابت دی‌الکتریک نمونه ϵ_A	وزن مخصوص نمونه G_{mb}	درصد حفرات $V\%$
۱	۵	۳۱	۱۳	۶	۱/۹۵۰	۲۱/۶
۲	۱۰	۲۹/۵	۱۳/۴	۷/۱	۲/۱۴۱	۵/۲
۳	۲۰	۲۷	۱۳/۷	۹/۴	۲/۲۳۰	۱۱/۷
۴	۳۰	۲۴/۴	۱۴/۱	۱۴	۲/۳۰۵	۸/۷
۵	۴۰	۲۳/۹	۱۴/۴	۱۶/۳	۲/۳۲۰	۶/۹
۶	۵۰	۲۳/۷	۱۴/۷	۱۸/۲	۲/۳۵۲	۵
۷	۶۰	۲۳/۵	۱۴/۸	۱۹/۳	۲/۳۹۹	۴/۸
۸	۷۰	۲۳/۴	۱۴/۸	۱۹/۷	۲/۴۰۵	۳/۶
۹	۸۰	۲۳/۲	۱۴/۸	۲۰/۵	۲/۴۳۵	۳/۳
۱۰	۹۰	۲۳/۲	۱۴/۵	۱۸/۸	۲/۴۴۴	۲/۷
۱۱	۱۰۰	۲۳	۱۴/۶	۲۰	۲/۴۵	۲/۶
۱۲	۱۱۰	۲۲/۹	۱۵	۲۳	۲/۴۵۸	۲/۵

درصد حفرات هوای نمونه‌ها مطابق با استاندارد ASTM D2041 و به کمک رابطه زیر محاسبه می‌شود (افلاکی، ۱۳۸۷):

$$V\% = \left(\frac{G_{mm} - G_{mb}}{G_{mm}} \right), \quad (۴)$$

که G_{mm} حداکثر وزن مخصوص آسفالت است و آزمایشگاه تهیه‌کننده نمونه‌ها آن را تعیین می‌کند. این کمیت برای نمونه‌های مورد استفاده در این تحقیق برابر با ۲/۵۲۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب به دست آمد.

در مرحله بعد برداشت داده‌ها با استفاده از روش GPR به این ترتیب صورت گرفت که، هریک از نمونه‌های استوانه‌ای در زیر آنتن و به فاصله چند سانتی‌متری از آن و روی یک صفحه سنگی قرار گرفت. به طوری که نقطه وسط بین آنتن فرستنده و گیرنده دقیقاً بر مرکز سطح مقطع دایره‌ای شکل نمونه‌ها منطبق شد. آنتن مورد استفاده در این تحقیق آنتن پوششی ۸۰۰ مگاهرتز است. برای جلوگیری از تداخل تپ مستقیم (منظور از تپ مستقیم، تپی است که به طور مستقیم از فرستنده به گیرنده آنتن می‌رسد) و تپ بازتاب شده از سطح نمونه، لازم است که آنتن در فاصله مناسبی از نمونه‌ها قرار گیرد؛ چراکه در غیر

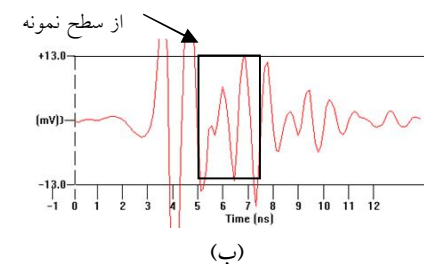
این صورت، اندازه‌گیری دامنه تپ بازتاب شده از سطح نمونه‌ها غیر ممکن می‌شود. پس از آزمایش‌های مکرر، ارتفاع آنتن از سطح نمونه حدود ۴۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شد (علت حدودی بودن این فاصله تغییرات کوچک در ارتفاع نمونه‌ها است).

برداشت داده‌ها برای هر نمونه در دو مرحله صورت گرفت. در مرحله اول چندین رد (Trace) مستقیماً از سطح نمونه برداشت و دامنه تپ بازتابی از آن ثبت می‌شود. سپس در مرحله بعدی یک صفحه فلزی (از جنس آلومینیوم) به قطر ۱۵ سانتی‌متر (برابر با قطر نمونه) روی سطح همان نمونه قرار داده شد و مجدداً چندین رد از سطح فلز برداشت و دامنه تپ بازتابی از آن اندازه‌گیری شد. این دو مرحله برای هر ۱۲ نمونه صورت گرفت. نحوه برداشت داده‌ها و قرارگیری نمونه‌ها در زیر آنتن در شکل ۲ نمایش داده شده است.

نکته مهم در برداشت داده‌ها این است که داده‌ها باید با انباشتگی (Stack) زیاد برداشت شوند. عمل انباشتگی شامل فرایندی است که در آن از تعداد زیادی رد برداشت شده میانگین‌گیری و مقدار میانگین در حکم نتیجه نهایی ذخیره می‌شود. این عمل موجب افزایش نسبت سیگنال به



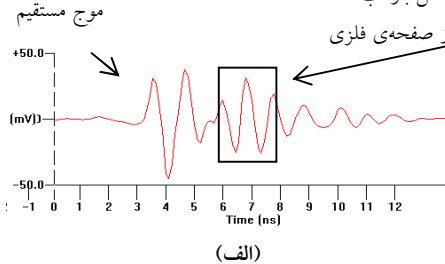
پالس بازتاب شده



(ب)



پالس بازتاب شده



(الف)

شکل ۲. (الف) برداشت ردها از صفحه فلزی قرار گرفته روی نمونه. (ب) برداشت ردها از روی نمونه.

سطح آنها بیشتر از دامنه تپ بازتابی از سطح نمونه‌های کم تراکم است، علت این امر آن است که نمونه‌های متراکم‌تر به سبب کمبود حفرات، ثابت دی‌الکتریک بالاتری دارند و در نتیجه دامنه تپ بازتابی از آنها بزرگ‌تر است. در حقیقت در این مورد عامل افزایش تراکم بر عامل افزایش فاصله بین سطح بازتابی و آنتن غلبه کرده است.

۲-۲ تعیین رابطه بین درصد رطوبت نمونه‌های اساس

و ثابت دی‌الکتریک به دست آمده از روش GPR محتوای رطوبت اساس از این لحاظ مهم است که ظرفیت باربری اساس به طور عمده با محتوای رطوبت آن کنترل می‌شود. بر مبنای استانداردها، پنج نوع اساس وجود دارد که از لحاظ دانه‌بندی با یکدیگر متفاوت‌اند. اساس استفاده شده در این تحقیق، اساس نوع چهارم و دانه‌بندی آن مطابق جدول ۳ است.

نوفه می‌شود و پایداری سیگنال را افزایش می‌دهد. نتایج به دست آمده از این برداشت‌ها در جدول ۱ آمده است. در این جدول، ثابت دی‌الکتریک هریک از نمونه‌ها با استفاده از رابطه (۱) و درصد حفرات آنها با استفاده از رابطه (۴) محاسبه شده است.

همان‌طور که در جدول ۱ ملاحظه می‌شود، دامنه تپ بازتابی از صفحه فلزی، با افزایش تراکم نمونه‌ها کاهش می‌یابد. علت این امر آن است که نمونه‌های متراکم‌تر، ارتفاع کمتری دارند و در نتیجه فاصله صفحه فلزی قرار گرفته روی آنها، تا آنتن افزایش می‌یابد. از طرف دیگر هرچه فاصله سطح بازتاب دهنده از آنتن بیشتر باشد، اتلاف انرژی در محیط بیشتر می‌شود و به دنبال آن دامنه تپ بازتابی از آن کاهش می‌یابد. در نهایت ثابت دی‌الکتریک به دست آمده از داده‌های GPR در مقابل درصد حفرات نمونه‌ها روی نمودار شکل ۳ به نمایش در آمده و یک منحنی نمایی بر آنها برازش یافته است.

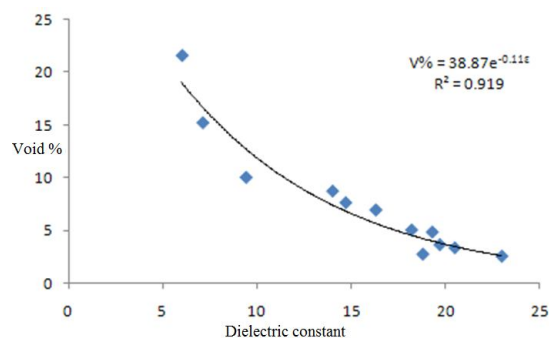
نمونه‌های متراکم‌تر با وجود اینکه ارتفاع کمتر و در نتیجه فاصله بیشتری با آنتن دارند، دامنه تپ بازتابی از

هر کدام از این نمونه‌ها داخل یک ظرف چوبی که طول، عرض و ارتفاع آن به ترتیب برابر با ۶۰، ۵۰ و ۳۰ سانتی‌متر بود، ریخته شد. آنتن GPR مورد استفاده در این بررسی آنتن پوششی ۲۵۰ مگاهرتز است. در این تحقیق، آنتن روی یک چهارپایه چوبی و در ارتفاع ۱۳۵ سانتی‌متری از سطح هریک از نمونه‌ها قرار گرفته است (شکل ۴). فاصله پیش بینی شده بین سطح نمونه اساس و آنتن به منظور تفکیک تپ‌های دریافتی از سطح نمونه و موج مستقیمی است که از راه هوا از آنتن فرستنده به آنتن گیرنده می‌رسد. در استفاده از آنتن‌های با بسامد بالاتر این فاصله را می‌تواند بسیار کوچک‌تر در نظر گرفت. تجربیات به دست آمده در هنگام برداشت داده‌ها نشان داد که اگر آنتن در فاصله ۱۳۵ سانتی‌متری از سطح نمونه‌ها قرار گیرد، هیچ‌گونه تداخلی بین تپ مستقیم و تپ بازتابی از سطح اساس صورت نمی‌گیرد. همچنین باید به این نکته توجه داشت که به علت آنکه فاصله سطح بالایی نمونه اساس تا آنتن در همه برداشت‌ها یکسان و برابر با ۱۳۵ سانتی‌متر است (برخلاف نمونه‌های آسفالتی در بخش پیش که ارتفاع متفاوتی داشتند)، یک مرحله برداشت از صفحه فلزی برای همه نمونه‌ها کافی است.



شکل ۴. نحوه قرارگیری آنتن و نمونه اساس برای برداشت داده‌ها.

به منظور حذف نوفه‌های محیطی و به دست آوردن یک رد با کیفیت از سطح نمونه، برانبارش (Stack) به میزان ۶۴ رد برای هریک از نمونه‌ها است. در این روش



شکل ۳. نمودار در صد حفرات هوا در مقابل ثابت دی‌الکتریک نمونه‌های آسفالت.

اساس استفاده شده در این تحقیق از ترکیب شن و ماسه مورد استفاده در مصالح ساختمانی و به نسبت‌های مشخص تشکیل شده است. برای دستیابی به اساس نوع چهار، درصد‌های مشخصی از شن و ماسه ساختمانی با یکدیگر ترکیب شد؛ به طوری که دانه‌بندی آنها در محدوده اساس نوع چهار قرار گیرد.

جدول ۳. محدوده دانه‌بندی اساس نوع ۴.

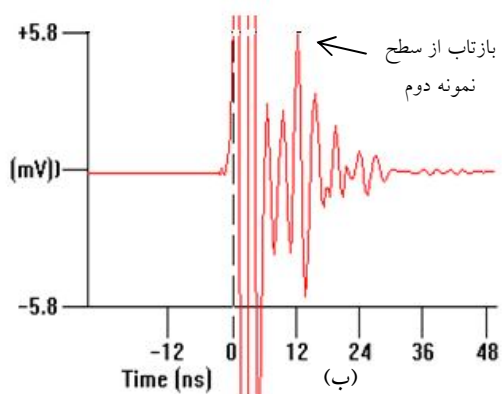
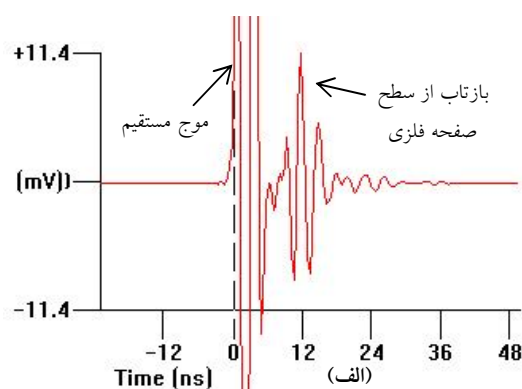
اندازه الک	درصد وزنی عبوری از هر الک
۲"	-
۱ ۱/۲"	۱۰۰
۱"	۷۰-۱۰۰
۳/۴"	۶۰-۹۰
۳/۸"	۴۵-۷۵
مش ۴	۳۰-۶۰
مش ۱۰	۲۰-۵۰
مش ۳۰	-
مش ۴۰	۱۰-۳۰
مش ۲۰۰	۲-۸

برای تعیین رابطه بین رطوبت اساس و ثابت دی‌الکتریک آن، ۹ نمونه از این اساس با درصد رطوبت‌های گوناگون و مطابق با ستون پنجم جدول ۴ تهیه شد. از آنجاکه هدف از این تحقیق، تعیین رابطه بین درصد رطوبت اساس و ثابت دی‌الکتریک آن است، لذا در هیچ‌یک از نمونه‌ها عمل تراکم صورت نگرفته است و می‌توان تراکم همه نمونه‌ها را ثابت و برابر در نظر گرفت.

دی‌الکتریک محاسبه شده برای آسفالت و اساس در این تحقیق بیشتر از حد معمول و طبیعی است. علت این امر، کوچک بودن سطح مقطع نمونه‌ها نسبت به سطح موثر امواج تابش شده از آنتن است. توضیح اینکه سطح موثر امواج تابش شده از آنتن به شکل یک بیضی است که قطر بزرگ آن از رابطه زیر به دست می‌آید (اسکانکتو، ۲۰۰۱)،

$$A = \frac{\lambda_c}{4} + \frac{D}{\sqrt{\epsilon + 1}}, \quad (6)$$

که λ_c طول موج مرکزی تب، D فاصله از آنتن و ϵ ثابت دی‌الکتریک محیطی است که تب در آن حرکت می‌کند.



شکل ۵. تب‌های دریافتی از سطح نمونه اساس ۲. (الف) با وجود صفحه فلزی. (ب) نبود صفحه فلزی.

ابتدا یک صفحه فلزی روی سطح نمونه قرار می‌گیرد و چندین رد از سطح آن برداشت می‌شود؛ سپس صفحه فلزی از روی سطح نمونه برداشته و دوباره چندین رد از سطح نمونه برداشت می‌شود. با استفاده از رابطه (۱) و دامنه ردهای برداشت شده از سطح نمونه و سطح صفحه فلزی، می‌توان ثابت دی‌الکتریک تک‌تک نمونه‌ها را به دست آورد. در شکل ۵ ردهای برداشتی از سطح نمونه ۲ با ۱/۵ درصد رطوبت با وجود صفحه فلزی و نبود صفحه فلزی آورده شده است. در نهایت نتایج حاصل از این کار برای همه نمونه‌ها در جدول ۴ آورده شده است. در این جدول، درصد رطوبت نمونه‌ها به همراه دامنه تب‌های دریافتی و ثابت دی‌الکتریک محاسبه شده برای هر یک از نمونه‌ها آمده است.

مطابق شکل ۶، رابطه به دست آمده بین ثابت

دی‌الکتریک و درصد رطوبت اساس به شکل زیر،

$$\text{Moisture}\% = 0.613\epsilon_b - 5.795, \quad (5)$$

که ϵ_b ثابت دی‌الکتریک اساس است.

۳ نتیجه‌گیری

بر اساس نتایج به دست آمده از جدول ۲، با افزایش درصد حفرات نمونه‌های آسفالتی، ثابت دی‌الکتریک آنها کاهش می‌یابد، که علت این امر کوچک بودن ثابت دی‌الکتریک هوا نسبت به سایر مصالح تشکیل‌دهنده آسفالت است. همچنین بر اساس نتایج حاصل از جدول ۴، با افزایش رطوبت اساس - حتی به مقدار جزئی - ثابت دی‌الکتریک افزایش قابل ملاحظه‌ای نشان می‌دهد. این امر از بزرگ بودن ثابت دی‌الکتریک آب نسبت به سایر مواد موجود در اساس ناشی می‌شود.

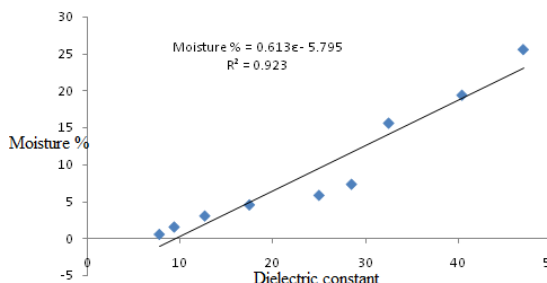
لازم به ذکر است که حد معمول مقادیر ثابت

دی‌الکتریک برای آسفالت حدود ۲ تا ۶ و برای اساس حدود ۵ تا ۱۷ است (سارنکتو، ۲۰۰۶). اما ثابت

جدول ۴. درصد رطوبت هریک از نمونه‌های اساس و ثابت دی‌الکتریک محاسبه شده آنها.

شماره نمونه	درصد رطوبت نمونه	دامنه تب بازتابی از صفحه فلزی (A_m)	دامنه تب بازتابی از سطح نمونه	ثابت دی‌الکتریک محاسبه شده (ϵ_r)
۱	۰/۵	۱۱/۴	۵/۴	۷/۸
۲	۱/۵	"	۵/۸	۹/۴
۳	۲/۵	"	۶/۴	۱۲/۷
۴	۳/۵	"	۷	۱۷/۵
۵	۴/۸	"	۷/۶	۲۵
۶	۶/۳	"	۷/۸	۲۸/۵
۷	۱۴/۶	"	۸	۳۲/۵
۸	۱۸/۴	"	۸/۳	۴۰/۴
۹	۲۴/۶	"	۸/۵	۴۷

مورد استفاده را به صورت غیر مخرب و بدون مغزه‌گیری کنترل کرد.



شکل ۶. نمودار خطی تغییرات ثابت دی‌الکتریک اساس نسبت به تغییرات درصد رطوبت.

۴ تشکر و قدردانی

نگارندگان لازم می‌دانند که از دانشگاه صنعتی شاهرود و همچنین سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور به خاطر مساعدت‌های لازم در فراهم کردن شرایط به انجام رسیدن این تحقیق تشکر و قدردانی کنند.

منابع

افلاکی، ا.، ۱۳۸۷، آزمایش‌های مکانیک خاک، جلد اول،

چاپ سوم: انتشارات پرهام - تهران.

Al-Qadi, I. L., Leng, Z., Lahouar, S., and Baek, J., 2010, HMA density estimation from ground penetrating radar: 89th Annual Meeting of Transportation Research Board, Washington, D. C., 19-27.

Metvaly, M., Ismail, A., and Matsushima, J., 2007, Evaluating some factors that affect feasibility using ground penetrating radar for landmine detection: Appl. Geophys, 4 (3), 221-230.

Neal, A., 2003, Ground penetrating radar and its use in sedimentology: Earth-science reviews, 66, 261-330.

Scullion, T., and Saarenketo, T., 2001, Use of ground penetrating radar for site investigation of low volume road ways and design recommendation: Texas Transportation Institute.

Saarenketo, T., 1992, Ground penetrating applications in road design and construction in Finnish Lapland: Geological Survey of

با توجه به اینکه طول موج آنتن ۸۰۰ مگاهرتز و ۲۵۰ مگاهرتز در هوا (λ_0) به ترتیب برابر با ۳۷/۵ و ۱۲۰ سانتی‌متر و ثابت دی‌الکتریک هوا (ϵ) برابر با ۱ است، شعاع بزرگ بیضی ردپا (A) در فاصله ۴۰ و ۱۳۵ سانتی‌متری از این دو به ترتیب برابر ۳۷ سانتی‌متر و ۱۲۶ سانتی‌متر خواهد بود. این درحالی است که قطر نمونه‌های آسفالتی ۱۵ سانتی‌متر و طول نمونه اساس ۶۰ سانتی‌متر است. در حقیقت هنگامی که مساحت صفحه فلزی کوچک‌تر از مساحت بیضی ردپا باشد، فقط بخشی از انرژی آنتن از صفحه فلزی به طور کامل بازتاب می‌یابد. در نتیجه مقدار A_m در رابطه (۱) کاهش پیدا می‌کند و به دنبال آن مقدار ثابت دی‌الکتریک بیشتر از حد طبیعی خواهد شد.

برای دستیابی به مقادیر واقعی ثابت دی‌الکتریک باید از آنتن‌هایی با بسامد مرکزی بزرگ‌تر و یا از نمونه‌های با سطح مقطع گسترده‌تر استفاده کرد. هرچند که این بررسی به صورت آزمایشگاهی و به صورت ایستا صورت گرفته است ولی نتایج حاصل از آن را می‌توان به برداشت‌های واقعی نیز تعمیم داد. به این ترتیب در نیم‌رخ‌زنی پیوسته نیز می‌توان رطوبت اساس روسازی و همچنین تراکم آسفالت

Saarenketo, T., and Chen, L., 2002, Using ground penetrating radar for real-time quality control measurements on new HMA: Sponsored by Texas Department of Transportation in cooperation with the US Department of Transportation.

Finland, Special Paper 15, 161-167.
Saarenketo, T., 2006, Electrical properties of road materials and subgrade soils and the use of ground penetrating radar in traffic infrastructure surveys: Faculty of Science of University of Oulu, Finland.