

## تشخیص ارتباط پارامترهای عریان شدگی در عمق آسفالت به کمک روش رادار نفوذی به زمین (مطالعه موردی منطقه ۲۲ تهران)

شاهین شعبانی<sup>۱</sup>، کیوان کیانفر<sup>۲\*</sup> و مهدی محمدی ویژه<sup>۳</sup>

- ۱- استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه پیام نور تهران
- ۲- کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه پیام نور تهران
- ۳- دانشجوی دکتری، مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران

دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۰۹/۰۶؛ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۰۲/۰۱

\* نویسنده مسئول مکاتبات: [keyvan.k570@gmail.com](mailto:keyvan.k570@gmail.com)

### چکیده

عریان شدگی از جمله خرابی‌های رایج است که در اغلب روسازی‌های آسفالتی به وقوع می‌پیوندد. منشأ این خرابی از رطوبت است. به نحوی که در اکثر مطالعات «عریان‌شدگی» و «آسیب رطوبتی» معمولاً به جای هم استفاده می‌شود. روش متداول برای شناخت این خرابی، مغزه گیری از نقاط مشکوک در سطح راه و انجام آزمایش‌های مخرب بر روی مغزه به دست آمده است. از جمله رایج‌ترین آزمایش‌ها، چگالی واقعی آسفالت، مقایسه نسبت تنش کششی غیرمستقیم نمونه‌ها در حالت اشباع به خشک و به دست آوردن میزان درصد فضای خالی آسفالت است؛ اما این قبیل از آزمایش‌ها، مخرب‌اند و چاله‌های به وجود آمده از مغزه گیری در سطح راه باید مرمت و وصله شوند. همچنین انجام این کار دشوار و دستیابی به نتایج حاصل از آزمایش‌های مخرب اغلب وقت‌گیر هستند. روش ارزیابی با رادار نفوذی به زمین (Ground Penetration Radar (GPR)) از جمله روش‌های غیر مخرب است، که امروزه کاربرد آن در مهندسی راه رو به افزایش است. در این پژوهش قطعاتی از مسیر شبکه راه‌های استان تهران، با انتخاب نقاطی از مسیر، پس از ارزیابی غیر مخرب، مغزه گیری شد و نتایج حاصل از تحلیل رادار با پارامترهای آزمایش‌های مخرب مقایسه شد. به طوری که با کاهش درصد فضای خالی کمتر از ۷ درصد، افزایش چگالی واقعی آسفالت، افزایش مقدار نسبت تنش کششی غیرمستقیم نمونه‌ها در حالت اشباع به خشک به بیش از ۰/۸ و در نهایت افزایش مقدار ثابت دی‌الکتریک ناشی از ارزیابی غیر مخرب مشاهده شد. در این پژوهش عدد ثابت دی‌الکتریک کمتر از ۵/۱۰، عریان شده و بیشتر از آن آسفالت سالم در عمق ۵ سانتی‌متر از سطح آسفالت و در سطوح زیرین آسفالت (از عمق ۵ تا عمق ۱۰ سانتی‌متری) ثابت دی‌الکتریک کمتر از ۵/۴۰ منطبق بر نواحی عریان شده و بالاتر از این مقدار منطبق بر آسفالت سالم است.

### واژگان کلیدی

عریان شدگی  
رادار نفوذی به زمین  
مغزه گیری  
آزمایش‌های مخرب

۱- مقدمه

«عریان شدگی» و «آسیب رطوبتی» معمولاً به جای هم استفاده می‌شود (زیاری و همکاران، ۱۳۹۴).

حساسیت رطوبتی، یک خرابی در مخلوط آسفالتی است، که در این پدیده، چسبندگی بین قیر و سنگدانه در اثر رطوبت از بین می‌رود. محل ایجاد حساسیت رطوبتی اغلب، در زیر چرخ‌ها و در محل‌هایی که سطح آب‌های زیرزمینی بالا است، پدید می‌آید. معمولاً عریان شدن از زیر لایه آسفالت شروع می‌شود و به سمت بالا حرکت می‌کند تا ساختمان روسازی ضعیف شود. اغلب این موضوع در شرایط جوی مرطوب و تبخیر ناشی از گرم شدن هوا در سطح آسفالت، شکل می‌گیرد. با ازدیاد ترافیک، ترک‌ها ظاهر می‌شوند و خرابی‌های دیگری مانند شن زدگی و ایجاد چاله را موجب می‌شوند. این خرابی نه تنها خود به عنوان یک خرابی مستقل محسوب می‌شود؛ بلکه می‌تواند مقدمه و رویکردی برای ایجاد خرابی‌های زود هنگام دیگر از جمله ترک خوردگی، شیار شدگی مسیر چرخ‌ها، بیرون پریدگی مصالح سنگی، چاله‌ها و ترک‌های پوست سوسماری باشد. در مطالعات،

۲- مروری بر ادبیات موضوع

روش‌های مختلفی برای شناخت حساسیت رطوبتی در مخلوط‌های آسفالتی به کار می‌رود؛ که متداول‌ترین آن‌ها مغزه گیری است. مغزه گیری و آزمایش‌های مکانیکی مخرب، روش‌های اثبات شده‌ای در تعیین حساسیت رطوبتی هستند و به عنوان معتبرترین و دقیق‌ترین روش تعیین عریان شدگی در مخلوط‌های آسفالتی مدنظر هستند. در جدول ۱ خلاصه آزمایش‌های انجام شده برای تشخیص حساسیت رطوبتی، در مخلوط‌های متراکم نمایش داده شده است (عامری و همکاران، ۱۳۹۴).

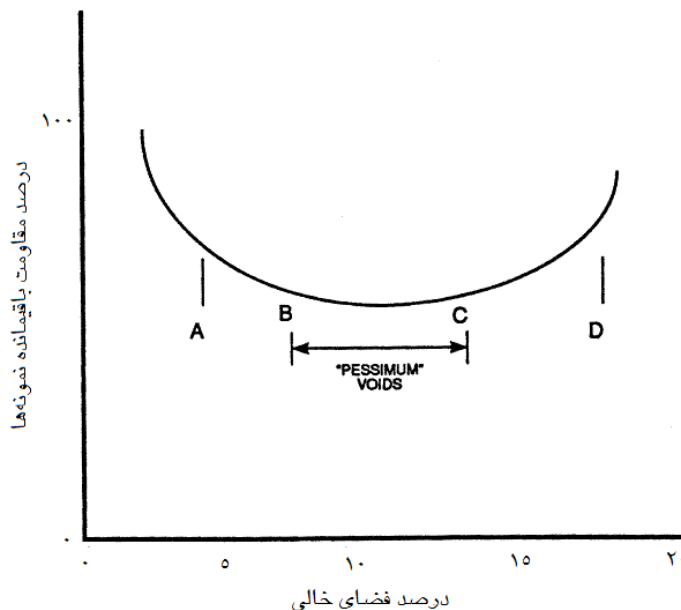
جدول ۱: خلاصه آزمایش‌های انجام شده برای تشخیص حساسیت رطوبتی، در مخلوط‌های متراکم (عامری و همکاران، ۱۳۹۴).

نام آزمایش	پارامترهای ارزیابی در آزمایش	رویکرد آزمایش	ارزیابی عملکرد آزمایش‌های
آزمایش پیشنهادی لاتمن	ارزیابی استقامت مقاومت کششی غیرمستقیم در ۹ نمونه قبل و بعد از شرایط اشباع رطوبتی با سیکل یخبندان و ذوب.	حداقل TSR پیشنهاد شده توسط لاتمن برابر ۰/۷ و مقادیر بین ۰/۷ تا ۰/۷۵ مرزهای حساسیت رطوبتی و غیر حساسیت رطوبتی می‌باشند.	انجام این آزمایش به دلیل سیکل‌های یخبندان و ذوب در آب گرم نمونه‌ها و ایجاد شرایط اشباع، سخت است.
مقاومت استاندارد تراکم - غوطه‌وری (AASHTO-T165)	ارزیابی مقاومت ۶ نمونه فشاری قبل و بعد از غوطه‌وری.	ارزیابی اثر خرابی رطوبتی بر استقامت مارشال.	عدم صراحت و دقت ناکافی، از اشکالات این روش است.
آزمایش تشدید شرایط محیطی Environmental Condition System (ECS)	ارزیابی نفوذپذیری مخلوط آسفالتی متراکم و تغییرات مدول ارتجاعی در طول اعمال سیکل‌های ذوب و یخبندان ۳ بار و بارگذاری سیکلی.	تمرکز بر روی اثر خرابی رطوبتی بر مدول ارتجاعی نمونه‌ها مهم‌ترین پارامتر در روسازی انعطاف‌پذیر در طول دو دهه قبل بوده است.	تکرارپذیری نتایج در مقایسه با آزمایش ITS بیشتر است.
آزمایش لاتمن اصلاح شده	ارزیابی نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم ۶ نمونه قبل و بعد از شرایط رویاری با رطوبت با سیکل ذوب و یخبندان.	بیانگر اثر خرابی رطوبتی بر مقاومت قطری که معیاری است از خرابی خستگی و ترک‌های رطوبتی.	حداقل TSR پیشنهاد شده توسط لاتمن برابر ۰/۸ چرخه ذوب و یخبندان در نتیجه آزمایش بی‌تأثیر است.
آزمایش استاندارد (Tunni cliff and Root NCHRP 274)	ارزیابی استقامت مقاومت کششی غیرمستقیم در ۶ نمونه قبل و بعد از شرایط اشباع رطوبتی بدون سیکل ذوب و یخبندان.	بیانگر اثر خرابی رطوبتی بر مقاومت قطری که معیاری است از خرابی خستگی و ترک‌های رطوبتی.	تطبيق معیار ۶۰٪ و ۶۷٪ در تعیین خرابی رطوبتی در برابر معیار ۷۰٪ و ۸۰٪ روش‌های اصلی و اصلاح شده لاتمن.

۲-۱- ارتباط درصد فضای خالی با عریان شدگی

توضیح داده می‌شود. این شکل ارتباط بین درصد فضای خالی و مقدار مقاومت باقیمانده مخلوط را نشان می‌دهد. لازم به توضیح است که مقدار کاهش مقاومت مخلوط به درصد فضای خالی مخلوط بستگی دارد. اگر درصد فضای خالی بیشتر از مرز D باشد، مخلوط تحت تأثیر رطوبت قرار نمی‌گیرد. زیرا روسازی همانند یک زه‌کش عمل می‌کند. اگر درصد فضای خالی کمتر از مرز A باشد، مخلوط در برابر رطوبت نفوذناپذیر است. بحرانی‌ترین ناحیه که در کاهش مقاومت مؤثر است، ناحیه B تا C است؛ که متأسفانه بیشتر جاده‌های ایران در این بازه قرار دارد. برای این‌که درصد فضای خالی روسازی در این محدوده قرار نگیرد، باید طراحی مخلوط و کنترل تراکم به خوبی صورت گیرد (Kandhal et al., 1992).

درصد فضای خالی زیاد در لایه‌های آسفالتی به آب اجازه می‌دهد در این حفره‌ها حرکت کند. اکثر طرح اختلاط‌ها ۳ تا ۵ درصد فضای خالی را پیشنهاد می‌دهند. وقتی درصد فضای خالی کمتر از ۵ درصد باشد، مواد مخلوط آسفالتی اکثراً در برابر آب غیرقابل نفوذ می‌باشند. اگر در طول فرایند ساخت، کنترل تراکم معمولاً به خوبی انجام نگیرد، درصد فضای خالی زیاد به دست می‌آید. پس از ۲ تا ۳ سال، بر اثر تراکم ناشی از ترافیک درصد فضای خالی مورد نظر شکل می‌گیرد. اگر درصد فضای خالی بیشتر از ۸ درصد باشد، آب می‌تواند به راحتی در داخل مصالح نفوذ کند. ترل و شات در سال ۱۹۸۹ مفهومی به نام درصد فضای خالی را ارائه نمودند که در شکل ۱



شکل ۱: ارتباط بین درصد فضای خالی و مقدار مقاومت (Kandhal et al., 1992).

در آسفالت استفاده کرد؛ زیرا لایه‌ای که دچار این خرابی می‌شود رطوبت یا درصد هوای آن و یا هر دوی آن‌ها زیاد شده؛ که منجر به تغییر سرعت امواج منتشر شده می‌گردد. همچنین آنان دریافتند که در صورت خرابی ناشی از رطوبت هم چگالی و هم مقدار ثابت دی‌الکتریک هر دو کاهش می‌یابد (Rmeili and Scullion, 1997). در سال ۲۰۰۵ پژوهشگران در ایالت جرجیا، با مقایسه مغزه‌های گرفته شده و آزمایش‌های مخرب با سایر روش‌های آزمایش‌های غیر مخرب نظیر  $FWD$  (Falling Weight Deflectometer) و رادار و ارزیابی لرزه‌ای دریافتند که به کمک ثابت دی‌الکتریک به دست آمده از امواج الکترومغناطیسی که از ارزیابی مکانیزه با رادار به دست می‌آید؛ قادر خواهند بود جنس مصالح و مقدار درصد رطوبت محبوس شده داخل مصالح آسفالت را تشخیص دهند (Hammons et al., 2005).

در سال ۲۰۱۵، مطالعه‌ای توسط Hoegh و همکاران صورت گرفت؛ که در آن ارتباط مقدار درصد فضای خالی موجود در آسفالت متراکم، در نقاطی که مغزه گیری شده با روش رادار و درصد فضای خالی مغزه‌های گرفته شده با آزمایش مخرب مقایسه شد. در نهایت نموداری به دست آمد؛ که طی آن در نقاطی که مقادیر ثابت دی‌الکتریک بیشتر از ۵ دارند، دارای درصد فضای خالی کمتر از ۹ درصد هستند (Hoegh, et al., 2015).

در سال ۲۰۱۴، نیز پژوهش‌هایی توسط Chen و همکاران انجام شد که در آن با ارزیابی محور مورد مطالعه و به دست آوردن دامنه بازتاب از سطح آسفالت، دامنه صفحه فلزی و محاسبه ثابت دی‌الکتریک، میزان درصد فضایی خالی به وسیله تابعی از متغیر ثابت دی‌الکتریک به دست آمد. در نهایت پروفیل درصد فضایی خالی در کیلومترهای مسیر، ترسیم شد. در این تحقیق مناطقی که دارای

### ۳- پیمایش مکانیزه با دستگاه رادار نفوذی به زمین

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 استفاده می‌شود؛ که با استفاده از محاسبه زمان رفت و برگشت امواج و محاسبه ضریب دی‌الکتریک مواد، مشخصاتی از لایه مورد ارزیابی در اختیار کارشناسان قرار می‌گیرد. تاریخچه استفاده از روش رادار در ارزیابی روسازی و زیرسازی جاده‌ها و ابنیه‌هایی از این قبیل، به اواسط دهه ۱۹۷۰ بازمی‌گردد. اتحادیه مدیریت بزرگراه‌های کشور آمریکا امکان‌پذیری قابلیت اجرای روش رادار (از این به بعد به جای واژه «رادار نفوذی به زمین» از کلمه مخفف شده «رادار» استفاده می‌شود). را در بررسی وضعیت تونل‌ها و پس از آن در ارزیابی وضعیت پل‌ها مورد آزمایش قرار دادند. در اوایل دهه ۱۹۸۰، پیمایش‌های رادار در کانادا نیز آغاز شد. اولین آزمایش رادار جهت مطالعات راه‌سازی، در سال ۱۹۸۶ شروع و بعد از آن آزمایش‌های بیشتری در فنلاند انجام شد؛ که بدین گونه روش رادار به سرعت به یک ابزار پیمایشی معمول در طراحی و ساخت جاده و پروژه‌های ترمیم و نوسازی در آن کشور تبدیل شد. در اواخر دهه ۱۹۸۰ و اوایل دهه ۱۹۹۰، اکثر کاربردها در مطالعات زیرسازی در آمریکای شمالی بر اندازه‌گیری‌های ضخامت آسفالت، تعیین فضاهای خالی زیر قالب‌های بتنی و تعیین نواحی در حال تخریب در پل‌ها متمرکز شد (Plati and Loizos, 2013).

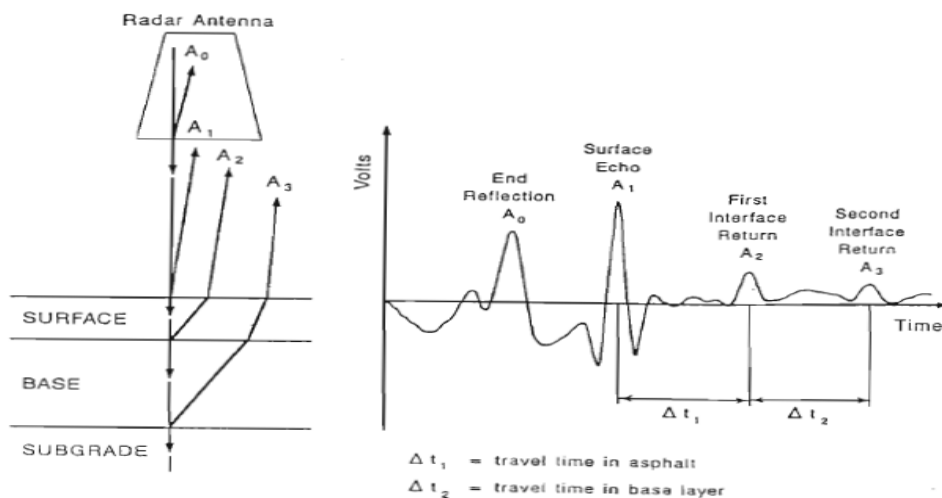
### ۳-۱- ارزیابی غیر مخرب خرابی آسفالت با دستگاه رادار

در سال ۱۹۹۷ در مطالعه‌ای در تگزاس، Rmeili و Scullion دریافتند که از خصوصیت رادار می‌توان برای تشخیص عریان‌شدگی

شعبانی و همکاران، تشخیص ارتباط پارامترهای عریان شدگی در عمق آسفالت به کمک روش رادار نفوذی به زمین (مطالعه موردی منطقه ۲۲ تهران)، صفحات ۲۴۳-۲۲۹.

### ۲-۳- تعیین مقادیر دامنه پالس از لایه‌های آسفالتی

مقادیر دامنه پالس‌های بازتابی از فصل مشترک لایه‌های مختلف آسفالتی، دامنه مؤلفه الکتریکی موج الکترومغناطیس رادار است؛ که از مرز لایه‌ها به آنتن گیرنده می‌رسد. شکل ۲ نشان دهنده مکانیسم عملکرد آنتن دوتایی هوایی را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌شود، A1، A2 و A3 دامنه پالس بازتابی، به ترتیب از سطوح لایه آسفالت فوقانی، اساس و زیر اساس می‌باشند.



شکل ۲: مکانیسم عملکرد آنتن دوتایی هوایی (Rmeili and Scullion, 1997).

(منتهی به دریاچه چیتگر) و بالعکس برای انجام این پژوهش انتخاب شد. آسفالت این مسیر در سال ۱۳۷۵ اجرا شده است. مشخصات آسفالت آن ضخامت کل ۱۰ سانتی‌متر است؛ که ۶ سانتی‌متر آن بیندر و ۴ سانتی‌متر باقیمانده لایه توپکا است. در سال ۱۳۸۹ به علت مشاهده خرابی در سطح روسازی‌های آسفالت، مجدداً روکشی به ضخامت ۶ سانتی‌متر به آن اضافه شده است.

با توجه به این‌که هدف این تحقیق تشخیص سریع و دقیق خرابی عریان شدگی در عمق مخلوط‌های آسفالتی و رابطه بین پارامترهای مؤثر در این خصوص است؛ نتایج این پژوهش به مهندسین راه را کمک خواهد نمود که عمق کمتری از سطح روسازی راه را تراشیده و روکش کنند و باعث صرفه‌جویی در زمان و هزینه ترمیم راه شوند. با توجه به آسفالتی بودن مسیر و اجرای تراش و روکش به علت خرابی ناشی از چرخه سرما و گرما در این مسیر و با انجام تحقیقات میدانی در این خصوص، تصمیم به اجرای این پژوهش در باند رفت و برگشت این مسیر گرفته شد.

### ۲-۴- مشخصات دستگاه و منطقه مورد مطالعه

داده‌های (GPR) مورد استفاده در این پژوهش با استفاده از آنتن ۲ گیگاهرتز پوششی شرکت GSSI ساخت کشور آمریکا برداشت

درصد فضای خالی بالای ۸ درصد بوده‌اند، پیشنهاد بازسازی، تعمیر و روکش آسفالت داده شد (Chen et al., 2014).

در سال ۱۳۹۳ نیز مزینانی و همکاران، پارامترهای کیفی روسازی راه از جمله، میزان حفرات آسفالت و میزان رطوبت اساس را به صورت آزمایشگاهی و با استفاده از روش رادار بررسی کردند. در این مطالعه با ارائه یک روش کاربردی برای اولین بار در کشور با استفاده از داده‌های رادار، مناطق دارای عریان شدگی آسفالت در یکی از خیابان‌های تهران مشخص شده است (مزینانی و همکاران، ۱۳۹۴).

### ۳-۳- تعیین ضریب دی‌الکتریک لایه‌های آسفالت

برای محاسبه ضریب دی‌الکتریک در لایه اول آسفالت از رابطه ۱ استفاده می‌شود؛ که در این رابطه D ضریب دی‌الکتریک، A1 دامنه سطح اولیه آسفالت و Am دامنه پالس بازگشتی از سطح صفحه فلزی است. در واقع مهم‌ترین عامل برای تشخیص حساسیت رطوبتی، ثابت دی‌الکتریک است. هرچه قدر حساسیت رطوبتی در لایه‌ای بالا باشد ثابت دی‌الکتریک کمتری را نشان می‌دهد (Hoegh et al., 2015).

$$D1 = \frac{\left(1 + \frac{A1}{Am}\right)}{\left(1 - \frac{A1}{Am}\right)} \quad (1)$$

### ۴- روش پژوهش

#### ۴-۱- انتخاب منطقه مورد مطالعه

مسیر رفت و برگشت بلوار امیرکبیر (در منطقه ۲۲ تهران) از سمت شرق به غرب حدفاصل بزرگراه آزادگان در شرق تا بلوار کاشان

در سرعت‌های نزدیک به سرعت مجاز در بزرگراه‌ها، عملیات برداشت GPR را انجام داد. محدوده فرکانسی سیستم‌های آنتن دوتایی- هوایی، بین ۵۰۰ مگاهرتز تا ۲/۵ گیگاهرتز هستند؛ که عمق نفوذشان در محدوده ۵۰ تا ۹۰ سانتی‌متر است. از مهم‌ترین مزایای این سیستم این است که با تغییر وضعیت و خواص آسفالت، تغییری در این آنتن‌ها ایجاد نمی‌شود (Saarenketo et al., 2000).

شکل ۳ یک سیستم GPR برای پیمایش جاده‌ای با آنتن دوتایی- هوایی را نشان می‌دهد. با تحقیقات میدانی و استعمال از سازمان هواشناسی دما در زمان پژوهش و مشخصات محور طبق مشخصات جدول ۲ نشان داده می‌شود.

شده‌اند. این آنتن از نوع هورن بوده (Horn) و قابلیت برداشت داده‌ها با فاصله از سطح زمین را دارا است. این پژوهش با همکاری شرکت تدبیر فرود راه که دارنده آنتن کوپل هوایی GSSI دو گیگا هرتز است؛ انجام گرفت. نحوه نصب آنتن به این ترتیب است که آنتن در جلو یا پشت وسیله نقلیه و با فاصله از سطح زمین به آن متصل می‌شود. واحد کنترل مرکزی، باتری‌ها و صفحه نمایش درون وسیله نقلیه قرار می‌گیرد. به این ترتیب داده‌ها در حین برداشت، توسط اپراتور قابل بازبینی و مشاهده است.

استفاده از سیستم‌های GPR دوتایی- هوایی رشد سریعی در جهت ارزیابی بخش بالایی ساختار آسفالت و راه داشته است. این تجهیزات سیگنال‌هایی بی‌نقص تولید می‌کنند؛ که در نتیجه می‌توان



شکل ۳: یک سیستم GPR پیمایش جاده‌ای با آنتن نوع هورن دو گیگا هرتز پوششی ساخت شرکت GSSI.

جدول ۲: مشخصات محور مورد ارزیابی در بلوار امیرکبیر.

نام محور	مشخصات محور	مختصات ابتدای مسیر	مختصات انتهایی مسیر	طول محور (در هر جهت)	دمای زمان پیمایش	تاریخ پیمایش
شرق به غرب امیرکبیر	دارای ۳ خط عبور بلوار اصلی شریانی درجه ۱	X=51253967 Y=35748820	X=51228847 Y=35746160	۲۳۵۰ متر	۱۷ درجه سانتی‌گراد	۱۳۹۲/۱۲/۲۰
غرب به شرق امیرکبیر	دارای ۳ خط عبور بلوار اصلی شریانی درجه ۱	X=51228847 Y=35746160	X=51253938 Y=35747992	۲۳۵۰ متر	۱۷ درجه سانتی‌گراد	۱۳۹۲/۱۲/۲۰

وسیله نقلیه قرار می‌گیرد. به این ترتیب داده‌ها در حین برداشت توسط اپراتور قابل بازبینی و مشاهده است.

در شکل ۴ قسمتی از مسیر شرق به غرب پروفیل GPR، در خیابان امیرکبیر که در این مطالعه مورد پیمایش قرار گرفت، به نمایش درآمده است. در شکل ۵ نیز پاسخ دامنه پالس GPR بر روی صفحه فلزی، به نمایش درآمده است. در این شکل‌ها، دامنه لایه اول A1 در شکل ۴ و دامنه صفحه فلزی Am در شکل ۵ مشخص شده‌اند. در هر کدام از شکل‌ها یک رد (trace) رادار به نمایش درآمده است. همان‌طور که انتظار می‌رود دامنه پالس بازتابی از سطح صفحه فلزی بزرگ‌تر از دامنه پالس بازگشتی از سطح زمین است.

#### ۴-۳- مطالعه با روش رادار

جهت انجام این پژوهش، مسیر رفت و برگشت بلوار امیرکبیر از سمت شرق به غرب، حدفاصل بزرگراه آزادگان در شرق، تا بلوار کاشان (منتهی به دریاچه چیتگر) و بالعکس انتخاب گردید. داده‌های GPR (مورد استفاده در این پژوهش، با استفاده از آنتن ۲ گیگاهرتز پوششی GSSI برداشت شده‌اند. این آنتن از نوع هورن بوده (Horn) و قابلیت برداشت داده‌ها با فاصله از سطح زمین را دارا است. به این ترتیب که آنتن در جلو وسیله نقلیه و با فاصله از سطح زمین به آن متصل می‌شود. واحد کنترل مرکزی، باتری‌ها و صفحه نمایش درون

## شعبانی و همکاران، تشخیص ارتباط پارامترهای عریان شدگی در عمق آسفالت به کمک روش رادار نفوذی به زمین (مطالعه موردی منطقه ۲۲ تهران)، صفحات ۲۴۳-۲۲۹.

حداکثری سیستم تعلیق نمایند. در نهایت همانند شکل ۵، یک بازتاب نوسانی شکل از سطح فلز ثبت می‌شود و دامنه بازتاب از سطح آن در فواصل مختلف آنتن با زمین ثبت می‌گردد. در نهایت بازتاب از سطح زمین با توجه به زمان رسید آن با میانگین بازتاب از سطح فلز در همان زمان رسید مقایسه می‌شود. در شکل ۵ علاوه بر موج بازتابیده از سطح فلز، بازتاب خفیف‌تری در زیر آن مشاهده می‌شود. این بازتاب اولین چندگانه (Multiple) از سطح فلز است؛ که فاصله مابین آنتن تا صفحه فلزی را دو برابر طی کرده است.

لازم به توضیح است که برای نمایش مقاطع شکل‌های ۴ و ۵، تنها از فیلتر بالا گذر به منظور حذف مقدار DC سیگنال استفاده شده و از کاربرد بهره و دیگر پردازش‌های موجود خودداری شده است. بدین ترتیب دامنه پالس بازتابی و در نهایت محاسبات به منظور استخراج ثابت دی‌الکتریک امکان‌پذیر شده است.

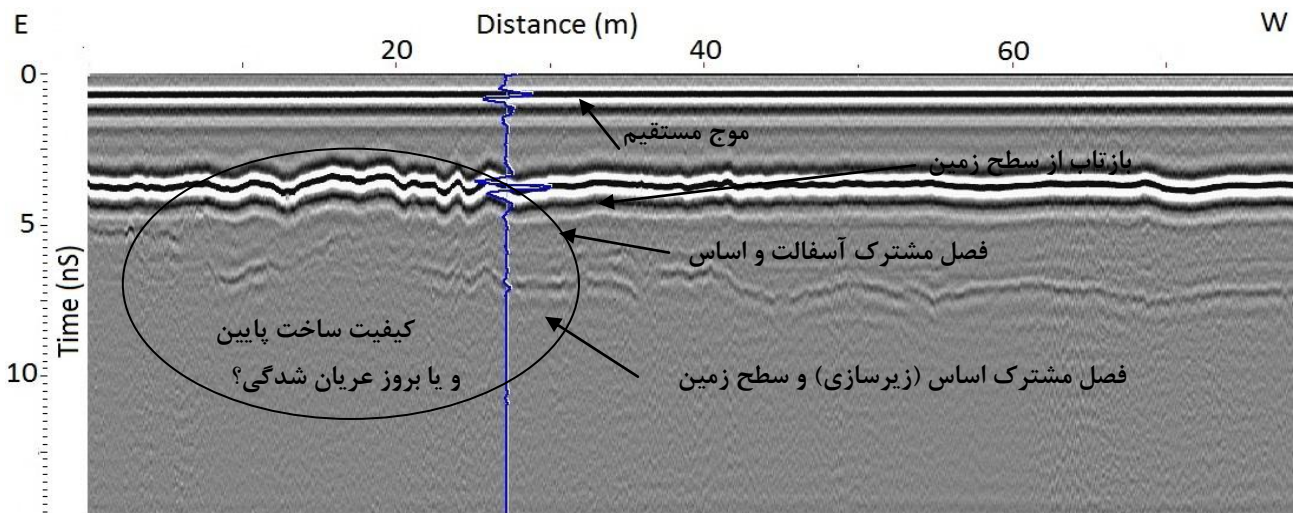
در نهایت به منظور تفسیر کمی داده‌های GPR، از مقادیر عددی دامنه پالس بازتابی از سطح آسفالت در مقایسه با دامنه پالس بازتابی از سطح فلز استفاده شده است. بدین منظور با انتخاب موج بازتابی از سطح آسفالت (Pick کردن) در نرم‌افزار مربوطه (ReflexW یا Radexplorer) مقدار عددی دامنه پالس بازتابی استخراج شده است. مقدار عددی دامنه پالس بازتابی از صفحه فلزی نیز همین‌طور استخراج می‌شود. سپس با استفاده از رابطه ۱ مقدار ثابت دی‌الکتریک در هر نقطه محاسبه می‌شود. به این ترتیب در هر نقطه از طول مسیر یک دامنه بازتابی در یک زمان رسید (Arrival Time) مشخص خواهد بود. با توجه به اهمیت موضوع لازم است، بدانیم که دامنه پالس بازتابی باید در زمان رسید آن با دامنه پالس بازتابی از صفحه فلزی مقایسه شود. از آنجا که تعداد ردهای برداشتی در طول مسیر زیاد بوده و ممکن است هر رد به تنهایی دستخوش نویزهای اتفاقی و مختلف شود، محاسبه ثابت دی‌الکتریک از تمامی ردهای برداشتی منجر به دست آمدن ثابت‌های دی‌الکتریک پراکنده در طول مسیر شود. بدین منظور با استفاده از یک روش ابتکاری (این روش در هیچ مطالعه‌ای گزارش نشده است) میانگین دامنه سیگنال بازتابی در هر یک متر از مسیر و میانگین زمان رسید آن‌ها به عنوان دامنه سیگنال و زمان رسید استفاده شده است. این راهکار برای وارد کردن مقدار دامنه پالس بازتابی از سطح فلز نیز به نوع دیگری استفاده شده است. به این ترتیب که در داده‌های مربوط به صفحه فلزی دامنه تمام ردهای با زمان رسید یکسان با یکدیگر میانگین‌گیری شده و برای هر زمان رسید از یک مقدار دامنه استفاده شده است. با استفاده از این ابتکار هر چند قدرت تفکیک جانبی تا یک متر کاهش یافته؛ ولی به جای آن نتایج به دست آمده از کیفیت مطلوب‌تری برخوردارند.

این مسئله ناشی از اختلاف قابل توجه امپدانس الکترومغناطیسی صفحه فلزی و هوا است. فلزات به عنوان بازتاب‌کننده کامل، تمامی انرژی پالس ارسالی از آنتن گیرنده را بازمی‌گردانند (محمدی ویژه و کامکار روحانی، ۱۳۹۲).

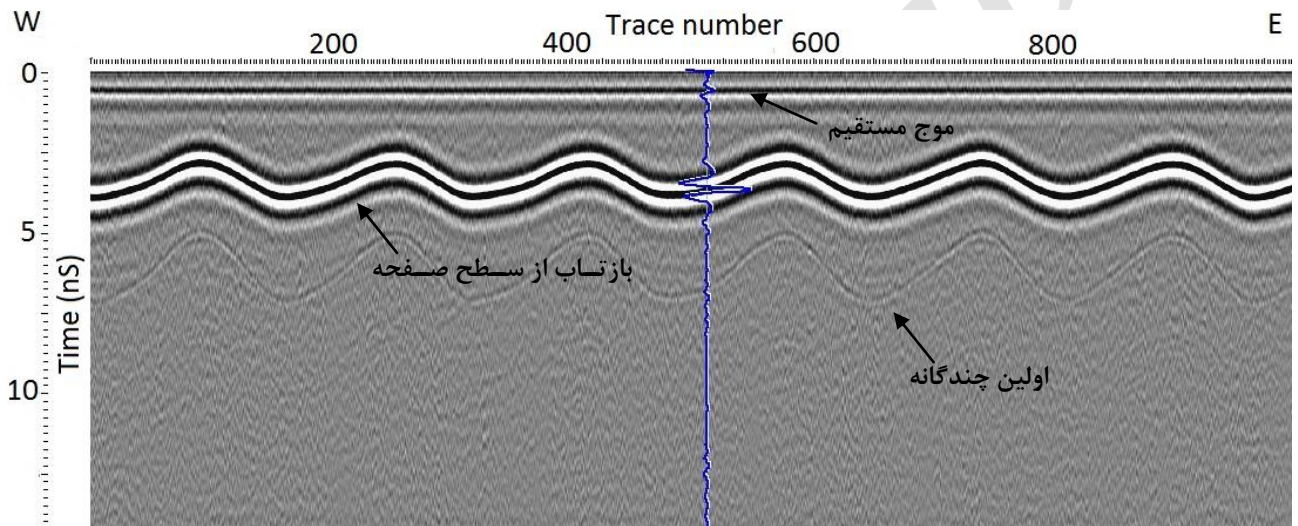
همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، علاوه بر بازتاب پالس رادار از سطح زمین، بازتابی با فاصله زمانی تقریباً ۵ نانوثانیه (تقریباً معادل ۲۰ سانتی‌متر) در قسمت‌های عمیق‌تر مقطع قابل تشخیص است. این پاسخ در قسمت‌های ابتدایی پروفیل (متراژ ۰ تا ۲۷ متری پروفیل) به سطح زمین نزدیک‌تر شده و نشان دهنده ضخامت کمتر اساس (زیرسازی) در قسمت‌های ابتدایی خیابان امیرکبیر است. علاوه بر ضخامت کم در این ناحیه، پاسخ ناشی از فصل مشترک مابین اساس و آسفالت در این ناحیه دارای اعوجاج بوده و در قسمت‌هایی از آن از بین رفته است. این مسئله هر چند می‌تواند ناشی از نامساعد بودن مسیر در این ناحیه و وجود اعوجاج در این قسمت از سطح مسیر باشد، ولی دلیل عمده ناپیوستگی در بازتاب مذکور می‌تواند از کیفیت ساخت پایین زیرسازی و یا پدیده عریان شدگی ثانویه در این ناحیه ناشی شده باشد. نمونه‌های مغزه‌گیری شده از سطح مسیر پدیده عریان شدگی حتی در قسمت‌های فوقانی لایه‌های آسفالت در برخی نقاط را نشان می‌دهند. پدیده عریان شدگی به این ترتیب که از عمق به واسطه رطوبت شروع شده و به قسمت‌های سطحی روسازی می‌رسد. این مسئله سبب می‌شود که اختلاف گذردهی بین دو ناحیه کمتر شده و علاوه بر آن با از بین رفتن مرز بین لایه‌ها، پاسخ آشکاری مشاهده نشود. این پدیده در موارد خیلی حاد تا سطح زمین رسیده و مرز بین لایه آسفالت و اساس را دستخوش خرابی‌هایی خواهد کرد؛ که با چشم به راحتی دیده می‌شوند. در استفاده از رابطه ۱ باید مقایسه بین دامنه سیگنال‌های ناشی از سطح صفحه فلزی و سطح راه در شرایط برابر صورت گیرد؛ به عبارت دیگر فاصله آنتن با زمین در حین برداشت باید ثابت باشد. با توجه به تکان‌های اتومبیل در طول خط برداشت در آنتن‌های کوپل هوایی و عملکرد سیستم تعلیق اتومبیل این امر غیرممکن است. از طرفی هر چه فاصله آنتن از زمین دورتر شود، با توجه به اتلاف ناشی از پخش هندسی دامنه پالس بازتابی کوچک‌تر خواهد بود (Reynolds, 2011).

بدین منظور برای مقایسه پالس‌ها، انطباق زمان رسیدشان بسیار مهم است. با لحاظ نکردن این مسئله خطاهای قابل توجهی در محاسبات کمی به وجود خواهند آمد. بدین منظور بعد از قرار دادن صفحه فلزی در زیر آنتن در حالت ایستا، سعی بر این است که برداشت داده‌ها با جابه‌جایی حداکثری سیستم تعلیق خودرو صورت گیرد. بدین منظور ممکن است در حین برداشت ایستا چند نفر درون خودرو قرار گرفته و با انجام تکان‌های عمودی سعی در جابه‌جایی





شکل ۴: نمونه‌ای از مقطع زمانی پروفیل برداشت حد فاصل ۰ تا ۸۰ متری شرق به غرب در خیابان امیرکبیر.

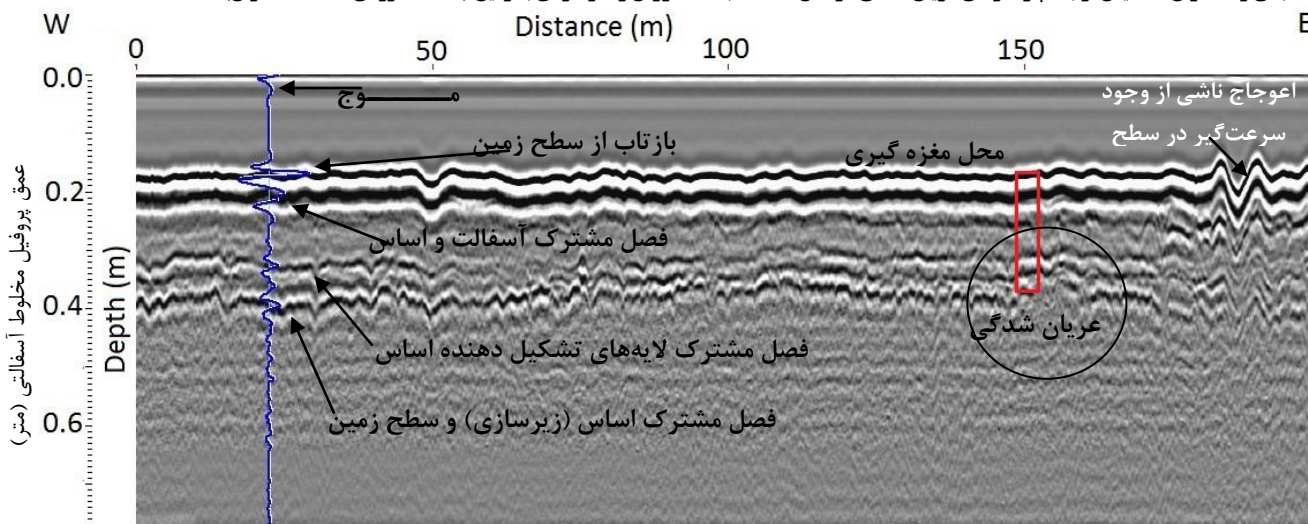


شکل ۵: نمونه‌ای از دامنه پالس بازگشتی از سطح صفحه فلزی در خیابان امیرکبیر.

مشاهده نیست. این مسئله احتمالاً ناشی از، از بین رفتن مرز ناگهانی و اختلاط مواد تشکیل دهنده اساس و سطح زمین به واسطه پدیده عریان شدگی باشد. لازم به توضیح است که آزمایش‌های مخرب مغزه، بروز عریان شدگی در این ناحیه را نشان می‌دهد. تشخیص این مسئله که عدم پیوستگی مرز مابین لایه‌ها ناشی از کیفیت پایین ساخت در زمان احداث بوده و یا ناشی از خرابی‌های ثانویه است؛ بسیار مشکل است. بدین منظور باید جاده‌های ساخته شده از همان مراحل اولیه ساخت مورد ارزیابی‌های غیر مخرب رادار قرار گیرند؛ تا در برداشت‌های آتی امکان بررسی‌های کیفی و کمی عوارض موجود در مقاطع در گذر زمان امکان‌پذیر باشد.

در شکل ۶ مقطع عمقی قسمتی از پروفیل برداشتی در مسیر غرب به شرق خیابان امیرکبیر آمده است. این پروفیل بر خلاف مقاطع قبلی، با اعمال پردازش‌هایی نظیر فیلترهای میان‌گذر، اعمال بهره، حذف مقدار زمینه و استفاده از فیلتر میانگین‌گیری ردها به نمایش درآمده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، لایه‌های مختلف روسازی راه در این پروفیل به خوبی قابل تشخیص است. در طول این پروفیل عملیات مغزه‌گیری در متر ۱۵۰ متری انجام شده و موقعیت آن با مستطیل قرمز رنگ مشخص شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در فاصله ۱۵۰ تا ۲۰۰ متری از این پروفیل پاسخ ناشی از فصل مشترک اساس و سطح زمین قابل

شعبانی و همکاران، تشخیص ارتباط پارامترهای عریان شدگی در عمق آسفالت به کمک روش رادار نفوذی به زمین (مطالعه موردی منطقه ۲۲ تهران)، صفحات ۲۴۳-۲۲۹.



شکل ۶: مقطع عمقی قسمتی از پروفیل برداشت رادار در خیابان امیرکبیر (مسیر غرب به شرق)، ۰ تا ۲۰۰ متری پروفیل.

با مقایسه این پروفیل با نمونه مغزه استخراج شده از سطح راه در نقطه ۱۵۰ متری شرق به غرب بلوار که در شکل ۸ نشان داده شد؛ می‌توان دریافت در عمق چهار سانتی‌متری از سطح مغزه و قسمت‌های زیرین آن عدم یکنواختی و وجود حفرات اضافی نسبت به سایر نقاط عمق مغزه، مشهودتر است؛ که این عدم یکنواختی به علت عدم اتصال مناسب لایه روکش شده جدید با سطح قدیم راه و وجود حفرات خالی اضافی هم در عمق چهار سانتی‌متری و هم در انتهای عمق مغزه است؛ که این خود عامل مستعدی جهت حضور رطوبت بین سنگدانه‌ها و وقوع خرابی است.

هرکدام از نقاط مشخص شده از سطح راه به طور چشمی نام‌گذاری شده و استخراج می‌گردند. جدول ۳ مشخصات مسیرهایی که برای ارزیابی چشمی مورد استفاده قرار گرفتند را نشان می‌دهد.

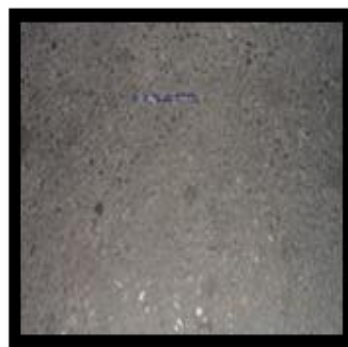
#### ۴-۴- انتخاب محل جهت انجام مغزه گیری

بر اساس بازدید چشمی سطح روسازی، نقاطی از سطح روسازی محور فوق‌الذکر را به طور آزمایشی انتخاب و بر اساس سطح ظاهری روسازی در نقاطی از سطح که وقوع خرابی مشهود است (اعم از هوازگی و عریان شدگی)؛ مغزه گیری در نقاط مشخصی انجام می‌شود. در نهایت، نتایج حاصل از آزمایش‌های مخرب صورت گرفته بر روی مغزه‌ها با نتایج برداشت داده‌های رادار مقایسه می‌شوند (Shahin, 2005).

شکل ۷ نمونه‌ای خرابی‌های با شدت کم و متوسط که بر اساس بازدید چشمی مشکوک به وقوع خرابی هستند؛ را در بلوار امیرکبیر نشان می‌دهد. به عنوان نمونه یکی از نقاطی که مغزه گیری صورت گرفته؛ در ۱۵۰ متری از مسیر غرب به شرق بلوار مذکور قرار دارد؛ که پروفیل متناظر برداشت رادار آن در شکل ۶ نشان داده شده است.



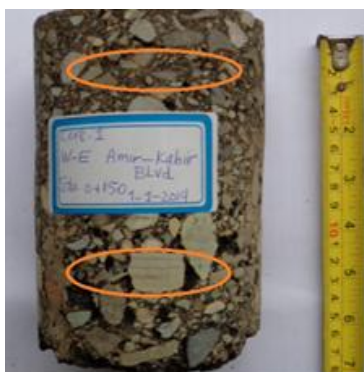
ب) خرابی با شدت زیاد



الف) خرابی با شدت کم

شکل ۷: شدت خرابی سطوح روسازی (Shahin, 2005).





شکل ۸: وجود عدم یکنواختی و فضای خالی اضافی در عمق چهار سانتی متری و قسمت‌های انتهایی از سطح مغزه در کیلومتر 0+150 غرب به شرق بلوار امیرکبیر.

جدول ۳: مشخصات مسیر ارزیابی به طور چشمی.

شماره نقطه	مشخصات نقطه
۱	۱۵۰ متری از مسیر غرب به شرق بلوار
۲	۷۵۰ متری از مسیر غرب به شرق بلوار
۳	۱۸۷۰ متری از مسیر غرب به شرق بلوار
۴	۲۲۳۰ متری از مسیر غرب به شرق بلوار
۵	۳۲۰ متری از مسیر شرق به غرب بلوار
۶	۲۰۲۰ متری از مسیر شرق به غرب بلوار
۷	۳۱۵ متری از مسیر شرق به غرب بلوار
۸	۷۱۵ متری از مسیر شرق به غرب بلوار

کیلومتر ۱۵۰، ۱۸۷۰، ۲۲۳۰، ۳۲۰، ۷۵۰ و ۷۱۵ خرابی عریان شدگی وجود دارد. این شاخص در عمق ده سانتی متری از سطح کیلومتر ۱۵۰، ۳۲۰، ۲۲۳۰، ۱۸۷۰ و ۷۱۵ است. در عمق پانزده سانتی متری از سطح نیز در کیلومتر ۳۲۰ و ۲۰۲۰ شاخص عریان شدگی کمتر از ۰٫۸ است.

#### ۵-۲- ارتباط در صد فضای خالی و چگالی واقعی آسفالت

با حساسیت رطوبتی در پنج سانتی متر سطح روسازی همان گونه که در شکل ۹ مشاهده می شود، در پنج سانتی متر سطح مغزه‌ها در نقاطی که درصد فضای خالی بالای ۷ درصد باشند؛ در آن نقاط خرابی رطوبتی وجود دارد (Chen et al., 2014). ضریب همبستگی در این شکل ۰/۶۷۹ است. علاوه بر این در شکل ۱۰ ارتباط چگالی واقعی آسفالت با شاخص TSR نشان داده شده است. رابطه چگالی با شاخص عریان شدگی خطی بوده و دارای ضریب همبستگی ۰/۷ است. با بررسی شکل ۱۰ می توان دریافت در نقاطی که مقدار چگالی واقعی کمتر از ۲/۳۰ بوده (۱ تا ۵ و ۸) مغزه‌های در مقابل رطوبت آسیب پذیر هستند. در واقع این نقاط در شکل درصد فضای خالی میزان فضای خالی بالاتر از ۷ درصد دارند.

#### ۵-۳- ارتباط ثابت دی الکتریک با چگالی واقعی و درصد

##### فضای خالی آسفالت

با توجه به شکل ۱۱، مقدار ثابت دی الکتریک در دو نقطه ۶ و ۷ (مطابق جدول ۴) مغزه‌های مقاوم (سالن) در مقابل حساسیت

#### ۵- نتایج و یافته‌های پژوهش

پس از برداشت با دستگاه رادار در نقاط مشخص شده، مغزه گیری انجام شد. در ابتدا هر کدام از دو مغزه استخراج شده از هر نقطه، به ضخامت پنج سانتی متر بریده می شوند. پس از برش هر کدام از مغزه‌ها، روی هر کدام شماره گذاری صورت می گیرد؛ به صورتی که هر کدام از مغزه‌ها دو به دو جهت ارزیابی در دو حالت خشک و اشباع با یکدیگر مقایسه می شوند. پس از آن چگالی واقعی Gmb بر اساس روش استاندارد ASTM 1188 هر کدام از نمونه‌ها به دست می آید. در مرحله بعد، با استاندارد AASHTO-T283 شاخص خرابی رطوبتی (TSR) (Tensile Strength Ratio) محاسبه گردیده (روش آزمایش لاتمن اصلاح شده) و مقادیر میزان درصد فضای خالی همه نمونه‌ها از طریق آزمایش رایس (ASTM 2041) پس از انجام AASHTO-T283 به دست می آید. جدول ۴ خلاصه نتایج آزمایش‌های مخرب و غیر مخرب را در پنج سانتی متری سطح مغزه، پنج سانتی متری دوم و پنج سانتی متری سوم را نشان می دهد. مطابق استاندارد AASHTO-T283، نمونه‌های که دارای TSR کمتری از ۰٫۸ باشند؛ نمونه‌های خراب در اثر رطوبت و عریان شده می باشند.

#### ۵-۱- تشخیص خرابی رطوبتی

بر اساس استاندارد AASHTO-T283 و محاسبه شاخص خرابی رطوبتی (TSR) در ایستگاه‌های (نقاط) ۱، ۲، ۳، ۴، ۵ و ۸ طبق جدول ۴، در سطح روسازی مقادیر TSR کمتر از ۰/۸ بوده و در

شعبانی و همکاران، تشخیص ارتباط پارامترهای عریان شدگی در عمق آسفالت به کمک روش رادار نفوذی به زمین (مطالعه موردی منطقه ۲۲ تهران)، صفحات ۲۴۳-۲۲۹.

خالی و TSR در عمق پنج سانتی متری دوم، ۰/۷۴ است. در ضمن با مقایسه چگالی به دست آمده در عمق پنج سانتی متر دوم از روسازی آسفالت در شکل ۱۳ می توان دریافت، نمونه هایی که کمترین درصد فضای خالی را دارند (۶ و ۷)؛ بیشترین مقدار چگالی را داشته و مقاوم ترین نمونه ها در مقابل حساسیت رطوبتی (نمونه های سالم) می باشند. همبستگی اعداد در این حالت ۰/۷۷ است.

#### ۵-۵- ارتباط ثابت دی الکتریک با چگالی واقعی و درصد فضای خالی آسفالت

با توجه به شکل ۱۴ مقدار ثابت دی الکتریک در سه نقطه ۶ و ۷ و ۲ (مطابق مقادیر جدول ۴) که مغزه های مقاوم (سالم) در مقابل حساسیت رطوبتی هستند؛ مقادیری به ترتیب برابر ۶/۲۵، ۶/۴۴ و ۵/۳۵ دارند. همچنین با مقایسه شکل های ۱۲ و ۱۳، فضای خالی و چگالی می توان دریافت در صورتی که درصد فضای خالی کمترین مقدار خود را دارا باشد (نقاط ۲، ۶ و ۷)، بیشترین میزان دی الکتریک و بیشترین میزان چگالی واقعی را خواهیم داشت؛ که این موضوع فرضیه ارتباط قابلیت ارزیابی حساسیت رطوبتی را با دستگاه رادار نیز ثابت می کند.

رطوبتی هستند، مقادیری به ترتیب ۵/۷۶ و ۶/۲۵ دارند. همچنین با مقایسه چگالی به دست آمده در پنج سانتی متری از سطح روسازی آسفالت می توان دریافت، در صورتی بیشترین میزان دی الکتریک به دست می آید؛ که میزان چگالی بالاترین مقدار باشد. همچنین در نقاطی که درصد فضای خالی کمترین مقدار خود را دارا باشد (نقاط ۶ و ۷)، بیشترین میزان دی الکتریک را خواهیم داشت؛ که این موضوع فرضیه ارتباط قابلیت ارزیابی حساسیت رطوبتی در پنج سانتی متری از سطح روسازی را با دستگاه رادار نیز ثابت می نماید.

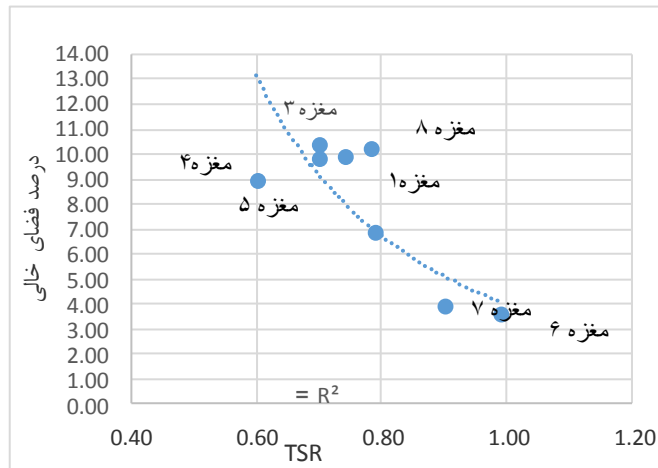
#### ۵-۴- ارتباط در صد فضای خالی و چگالی با حساسیت رطوبتی در پنج سانتی متر دوم از سطح روسازی

همان گونه که در شکل ۱۲ مشاهده می شود، در عمق پنج سانتی متر دوم سطح مغزه ها، در نقاطی که درصد فضای خالی بالای ۷ درصد باشند؛ در آن نقاط خرابی رطوبتی (عریان شدگی) وجود دارد (Chen et.al, 2014).

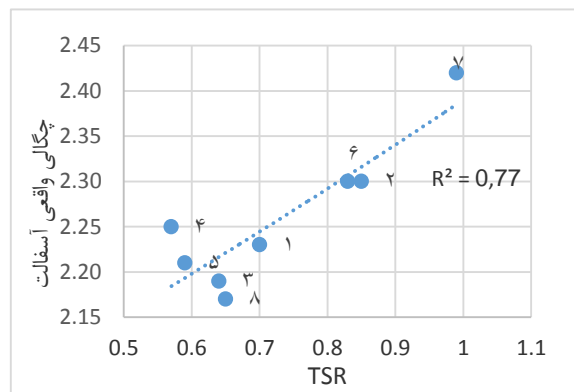
همچنین با توجه به اعداد جدول ۴، مغزه های شماره ۱، ۳، ۴، ۵ و ۸ در پنج سانتی متر دوم بر اساس شاخص رطوبتی مغزه های آسیب دیده در اثر رطوبت وجود دارند. ضریب همبستگی درصد فضای

جدول ۴: خلاصه نتایج آزمایش های مغرب و غیر مغرب در خیابان امیرکبیر.

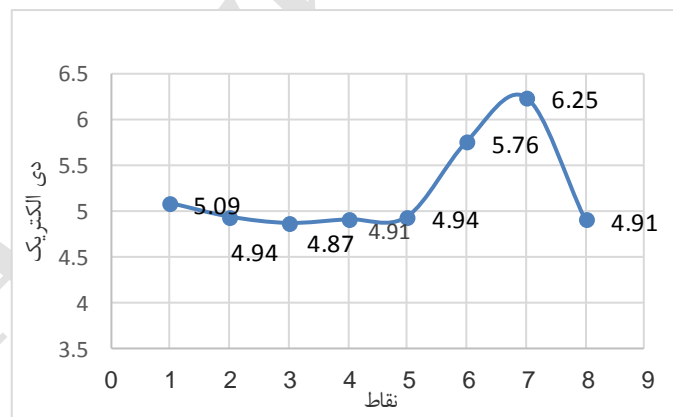
موقعیت	عمق مغزه	شماره نقاط	دی الکتریک	چگالی	TSR	درصد فضای خالی
۱۵۰ متری از مسیر غرب به شرق	پنج سانتی متر	۱	۵/۰۹	۲/۱۷	۰/۷۴	۹/۹۴
۷۵۰ متری از مسیر غرب به شرق	پنج سانتی متر	۲	۴/۹۴	۲/۲۰	۰/۷۹	۶/۹۰
۱۸۷۰ متری از مسیر غرب به شرق	پنج سانتی متر	۳	۴/۸۷	۲/۱۵	۰/۷	۱۰/۴۳
۲۲۳۰ متری از مسیر غرب به شرق	پنج سانتی متر	۴	۴/۹۱	۲/۱۸	۰/۶	۸/۹۶
۳۲۰ متری از مسیر شرق به غرب	پنج سانتی متر	۵	۴/۹۴	۲/۱۷	۰/۷	۹/۸۷
۲۰۲۰ متری از مسیر شرق به غرب	پنج سانتی متر	۶	۵/۷۶	۲/۳۰	۰/۹۹	۳/۶۱
۳۱۵ متری از مسیر شرق به غرب	پنج سانتی متر	۷	۶/۲۵	۲/۲۳	۰/۹	۳/۹۳
۷۱۵ متری از مسیر شرق به غرب	پنج سانتی متر	۸	۴/۹۱	۲/۱۶	۰/۷۸	۱۰/۲۷
۱۵۰ متری از مسیر غرب به شرق	ده سانتی متر	۱	۵/۳۳	۲/۲۳	۰/۷	۶/۹۰
۷۵۰ متری از مسیر غرب به شرق	ده سانتی متر	۲	۵/۳۵	۲/۳۰	۰/۸۳	۴/۵۰
۱۸۷۰ متری از مسیر غرب به شرق	ده سانتی متر	۳	۴/۵۹	۲/۱۹	۰/۶۴	۸/۲۸
۲۲۳۰ متری از مسیر غرب به شرق	ده سانتی متر	۴	۴/۳	۲/۲۵	۰/۵۷	۸/۶۰
۳۲۰ متری از مسیر شرق به غرب	ده سانتی متر	۵	۴/۹۴	۲/۲۱	۰/۵۹	۸/۸۱
۲۰۲۰ متری از مسیر شرق به غرب	ده سانتی متر	۶	۶/۲۵	۲/۳۰	۰/۸۵	۴/۰۰
۳۱۵ متری از مسیر شرق به غرب	ده سانتی متر	۷	۷/۴۴	۲/۴۲	۰/۹۹	۳/۷۰
۷۱۵ متری از مسیر شرق به غرب	ده سانتی متر	۸	۴/۹۷	۲/۱۷	۰/۶۵	۵/۴۳
۷۵۰ متری از مسیر غرب به شرق	پانزده سانتی متر	۲	۵/۳۳	۲/۲۴	۱/۰۱	۴/۴۴
۱۸۷۰ متری از مسیر غرب به شرق	پانزده سانتی متر	۳	۵/۰۹	۲/۲۱	۰/۸	۹/۰۰
۳۲۰ متری از مسیر شرق به غرب	پانزده سانتی متر	۵	۴/۹۴	۲/۲۲	۰/۵۹	۹/۷۷
۲۰۲۰ متری از مسیر شرق به غرب	پانزده سانتی متر	۶	۴/۸۷	۲/۰۸	۰/۴۶	۹/۹۰



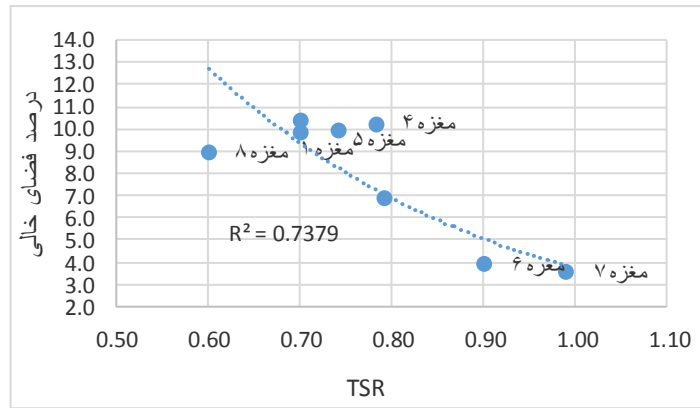
شکل ۹: رابطه TSR با درصد فضایی خالی.



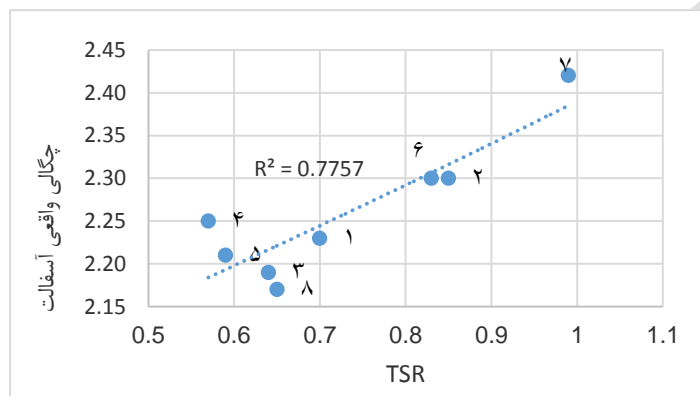
شکل ۱۰: رابطه TSR با چگالی واقعی آسفالت.



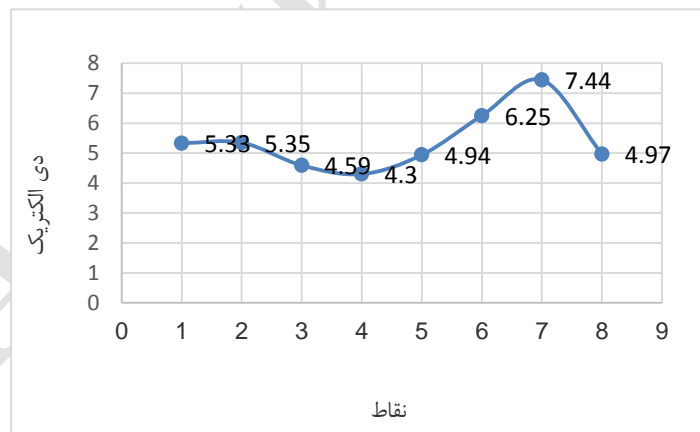
شکل ۱۱: مقادیر ثابت دی الکتریک در پنج سانتی متر اول نقاط.



شکل ۱۲: رابطه TSR با درصد فضایی خالی در پنج سانتی‌متر دوم نقاط.



شکل ۱۳: رابطه TSR با چگالی واقعی آسفالت در پنج سانتی‌متر دوم نقاط.



شکل ۱۴: مقادیر ثابت دی‌الکتریک در پنج سانتی‌متر دوم نقاط.

## ۶- نتیجه‌گیری

در این پژوهش مقادیر چگالی، درصد فضای خالی، شاخص عریان شدگی (TSR) و ... با انجام آزمایش‌های مخرب، با نتایج حاصل از مقدار ثابت دی‌الکتریک حاصل از ارزیابی با دستگاه رادار نفوذی به زمین در دو عمق پنج سانتی‌متر اولیه و پنج سانتی‌متر دوم از سطح روسازی، مقایسه و نتایج زیر به دست آمد.

- با کاهش درصد فضای خالی، افزایش چگالی واقعی آسفالت، افزایش مقدار ثابت دی‌الکتریک ناشی از ارزیابی غیر مخرب با دستگاه رادار و در نهایت نمونه در مقابل آسیب ناشی از رطوبت مقاوم خواهد بود.
- در صورت افزایش درصد فضای خالی اضافی به بیش از ۷ درصد، مقدار چگالی واقعی آسفالت کاهش، ثابت دی‌الکتریک

**نشریه پژوهش‌های ژئوفیزیک کاربردی، دوره ۳، شماره ۲، ۱۳۹۶.**

زمان مقایسه شده‌اند. برای به حداقل رساندن خطاهای تفسیر کمی پیشنهاد می‌شود که برای محاسبه ثابت کمی دی‌الکتریک از داده‌های رادار، تمامی بازتاب‌ها به یک سطح مبنا منتقل شوند. برای این منظور باید مقدار میرایی ناشی از پخش هندسی در محاسبات منظور شود.

در این پژوهش، در اعماق مختلف از سطح روسازی ارتباط معنی‌داری بین نتایج آزمایش‌های مخرب و ثابت دی‌الکتریک مشاهده شد. به طوری که با کاهش درصد فضای خالی کمتر از ۷ درصد، افزایش چگالی واقعی آسفالت، افزایش مقدار نسبت TSR به بیش از ۰/۸ و افزایش مقدار ثابت دی‌الکتریک ناشی از ارزیابی غیر مخرب با دستگاه رادار را در پی داشته است. در سطوح بالایی آسفالت، (عمق پنج سانتی‌متر) ثابت دی‌الکتریک کمتر از ۵/۱۰، عریان شده و بیشتر از آن سالم (عریان نشده) و در سطوح زیرین آسفالت، (تا عمق ده سانتی‌متری) ثابت دی‌الکتریک کمتر از ۵/۴۰، عریان شده و بالاتر از آن (۵/۴۰)، سالم است.

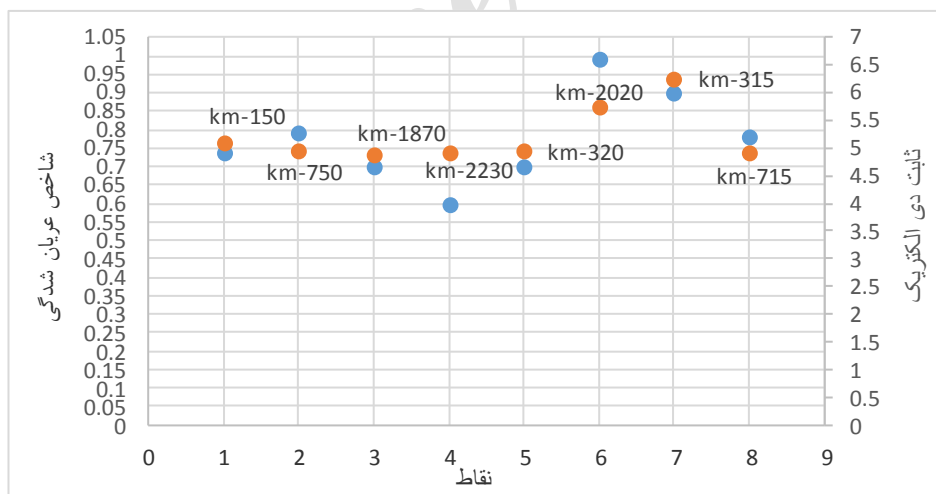
در پروفیل‌های اشکال ۱۵ و ۱۶ ارتباط مقادیر به دست آمده ناشی از روش مخرب در شناخت عریان شدگی (TSR) را با عدد ثابت دی‌الکتریک که توسط پیمایش مکانیزه غیر مخرب رادار، در نقاط مغزه‌گیری شده به دست آمده را نشان می‌دهد.

ناشی از ارزیابی غیر مخرب با دستگاه رادار کاهش و در نهایت نمونه در مقابل رطوبت آسیب‌پذیر خواهد بود.

• در این پژوهش مرز عریان شدگی (خرابی رطوبتی) در پنج سانتی‌متری اول سطح مغزه‌ها توسط دستگاه رادار نفوذی به زمین عدد ۵/۱۰ است. در واقع این بدان معنی است که مقادیر ثابت دی‌الکتریک بالاتر از ۵/۱۰ سالم و کمتر از این مقدار، نقاط (۱ تا ۵ و ۸) دارای خرابی رطوبتی می‌باشند. در عمق ۵ سانتی‌متری دوم از سطح مغزه‌ها در این پژوهش نیز مقدار ۵/۴۰ به عنوان مرز عریان شدگی به دست آمد. در واقع این بدان معنی است که مقادیر دی‌الکتریک بالاتر از ۵/۴۰ سالم و کمتر از این مقدار، نقاط (۱، ۳، ۴، ۵ و ۸) دارای خرابی رطوبتی می‌باشند.

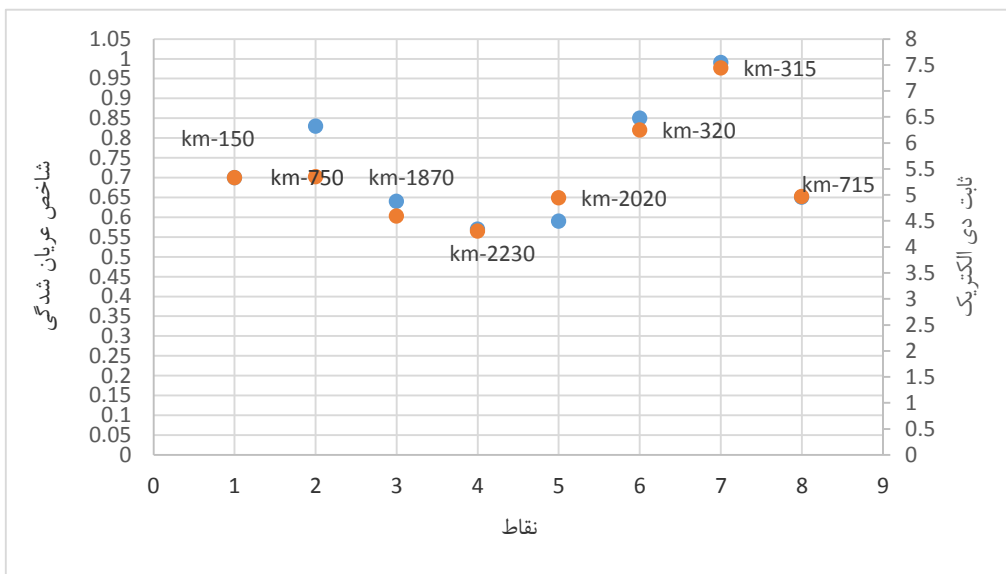
• با مقایسه شاخص عریان شدگی با مقدار دی‌الکتریک می‌توان ارتباط بین شاخص عریان شدگی و مقدار دی‌الکتریک را توسط شکل ۱۵ در پنج سانتی‌متری سطح روسازی و شکل ۱۶ در عمق ده سانتی‌متری از سطح روسازی نشان داد. در این اشکال، مرز شاخص عریان شدگی (TSR) طبق استاندارد ۰/۸ (STRIPPING INDEX) در سمت چپ شکل و سمت راست، مقدار متناظر ثابت دی‌الکتریک را نشان می‌دهد.

• در این مطالعه دامنه بازتاب اولیه از سطح آسفالت در زمان‌های مختلف با دامنه متناظر بازتاب از سطح فلز در همان



شکل ۱۵: رابطه TSR با ثابت دی‌الکتریک در پنج سانتی‌متر اول.





شکل ۱۶: رابطه TSR با ثابت دی الکتریک در پنج سانتی متر دوم.

GPR antenna array data, Case Studies in Nondestructive Testing and Evaluation, 3, 27-33.

Kandhal, P.S., 1992, Moisture susceptibility of HMA mixes: identification of problem and recommended solutions (No. NCAT 92-1), National Asphalt Pavement Association.

Plati, C. and Loizos, A., 2013, Estimation of in-situ density and moisture content in HMA pavements based on GPR trace reflection amplitude using different frequencies, Journal of Applied Geophysics, 97, 3-10.

Reynolds, J.M., 2011, An introduction to applied and environmental geophysics, John Wiley & Sons.

Rmeili, E. and Scullion, T., 1997, Detecting stripping in asphalt concrete layers using ground penetrating radar. Transportation Research Record, Journal of the Transportation Research Board, 1568, 165-174

Saarenketo, T., van Deusen, D. and Maijala, P., 2000, Minnesota GPR Project 1998: testing ground penetrating radar technology on Minnesota roads and highways, In 8<sup>th</sup> International Conference on Ground Penetrating Radar, International Society for Optics and Photonics, pp. 396-401.

Shahin, M.Y., 2005, Pavement management for airports, roads, and parking lots, Vol. 501, New York: Springer.

## ۷- مراجع

زیاری، ح.، دیواندری، ح. و کیانفر، ک.، ۱۳۹۴، ارتباط درصد فضای خالی با عریان شدگی در عمق مخلوط‌های آسفالتی، هفتمین همایش قیر و آسفالت ایران.

عامری، م.، جراحی، آ. و صادقی آواز، م.، ۱۳۹۴، تخمین بصری میزان عریان شدگی مخلوط آسفالتی با استفاده از روش پردازش تصویر، مجله علمی پژوهشی زیرساخت‌های حمل و نقل، ۱ (۱)، ۱-۱۰.

محمدی ویژه، م. و کامکار روحانی، ا.، ۱۳۹۲، آشکارسازی تأسیسات زیرسطحی و تحلیل مشخصه‌های پالس GPR، مجله ژئوفیزیک ایران، ۷ (۴)، ۱۱۷-۱۳۳.

مزیانی، ا.، کامکار روحانی، ا. و محمدی ویژه، م.، ۱۳۹۴، تعیین پارامترهای کیفی روسازی راه با استفاده از روش GPR، مجله ژئوفیزیک ایران، ۹ (۲)، ۳۰-۳۹.

Chen, D.H., Hong, F., Zhou, W. and Ying, P., 2014, Estimating the hotmix asphalt air voids from ground penetrating radar, NDT & E International, 68, 120-127.

Hammons, M.I., Maser, K. and Nazarian, S., 2005, Detection of Stripping In Hot-Mix Asphalt, Final Report, ARA Project No.16355.

Hoegh, K., Khazanovich, L., Dai, S. and Yu, T., 2015, Evaluating asphalt concrete air void variation via



## Determination of the relationship between parameters of the stripping in different depths of asphalt using GPR; A case study: District 22 of Tehran

Shahin Shabani<sup>1</sup>, Keyvan Kianfar<sup>2\*</sup> and Mehdi Mohammadi Vizeh<sup>3</sup>

1- Assistant Professor, School of Civil Engineering, P.N.U University, Tehran, Iran

2- M.Sc., School of Civil Engineering, P.N.U University, Tehran, Iran

3- PhD Candidate, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran

Received: 26 November 2016; Accepted: 21 April 2017

Corresponding author: keyvan.k570@gmail.com

### Keywords

Stripping  
Ground Penetrating Radar (GPR)  
Coring  
Destructive Tests

### Extended Abstract

#### Summary

Stripping is a common distress occurring on asphalt pavements. The source of this stress comes from moisture, thus, stripping and moisture damage are often used interchangeably. A common way to identify these failures is drilling and coring from road surfaces, and doing destructive tests. The most commonly used tests are bulk density, comparing indirect tensile stress in saturated to dry condition (TSR) , and finding air void percentage .These tests are destructive, and take time more than usual. In addition, we must repair and patch the asphalt pavements where drilled and cored. Ground penetrating radar (GPR) is a method, which is not only a non-destructive method but it also evaluates the roads continuously and provides us with results much quicker than the common destructive tests. In this study, parts of the road networks in Tehran are evaluated using GPR, then several points of the road surface are drilled and cored. Finally, the results of the GPR measurements and destructive tests are analyzed and compared with each other.

### Introduction

Moisture damage is a common distress that occurs in asphalt pavements. In this phenomenon, adhesion between bitumen and aggregates is ruined. It usually happens where the level of underground water is high, and it is seen along the wheel paths. Stripping starts at the sub base layer, and moves to the upper layer until it appears on the surface. This problem often occurs in the moisture condition when the pavement temperature increases. Cracks appear where traffic is heavier. Finally, it causes holing and showing.

### Methodology and Approaches

In this study, parts of the road network in Tehran (namely, Amir Kabir Boulevard) were evaluated using GPR, and then, several points of the road surface were drilled and cored. The cores were tested, and as a result, bulk density, TSR, and air void percentage were obtained. Finally, the analysis results of the GPR and destructive tests in different depths were compared.

### Results and Conclusions

As the amount of asphalt bulk density increases, the air void percentage decreases to less than 7%, and the TSR reaches over 0.8. Stripping is observed where dielectric constant becomes less than 5.10 in the upper 5 centimeters of asphalt depth, and also, stripping happens in the upper 10 centimeters of asphalt depth where dielectric constant reduces to less than 5.40.