

ارزیابی عملکرد سیستم زهکشی روسازی آسفالتی با تحلیل نتایج آزمایش GPR

مرتضی اسماعیلی، دانشیار، دانشکده مهندسی راه‌آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران
سجاد دلیری لیاولی، دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب
مهرداد قاسمی‌زاده، دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران
فاطمه خطیبی*، دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی راه‌آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

f_khatibi@iust.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۴/۰۴/۰۷ - پذیرش: ۱۳۹۴/۱۰/۱۳

چکیده

از جمله پارامترهای مهم در ارزیابی وضعیت روسازی آسفالتی راه‌ها، بررسی شرایط زهکشی لایه‌های اساس و زیراساس است. تکنیک غیرمخرب رادار نفوذی زمین (GPR) می‌تواند به عنوان ابزاری کاربردی در این راستا مورد استفاده قرار گیرد. در این پژوهش، ارتباط میان داده‌های به‌دست آمده از تصاویر ثبت شده توسط دستگاه GPR و درصد رطوبت سیستم روسازی آسفالتی مورد بررسی قرار گرفته است. تعداد ۱۸ نمونه استوانه‌ای با قطر و ارتفاع ۸۰ سانتی‌متر و متشکل از لایه‌های آسفالت، اساس، زیراساس، بستر متراکم و بستر طبیعی در سه درصد رطوبت مختلف تهیه و متراکم شدند. سپس، برداشت تصاویر از نمونه‌ها با کمک یک دستگاه GPR با آنتن ۲۵۰ مگاهرتز صورت گرفته و تصاویر ثبت شده در نرم‌افزار Labview مورد تحلیل و پردازش آماری قرار گرفته‌اند. بررسی پارامترهای آماری به‌دست آمده از تصاویر نشان داد که توزیع پارامتر کشیدگی، علاوه بر برخورداری از توزیعی مشابه توزیع نرمال، روند تغییرات منظم و قابل تفسیری با درصد رطوبت داراست. بر این اساس، با برازش یک منحنی خطی میان پارامتر کشیدگی و درصد رطوبت رابطه‌ای به‌دست آمده است که به کمک آن می‌توان درصد رطوبت لایه‌های روسازی را با دقت مناسبی بر اساس خروجی آزمایش GPR تخمین زد.

واژه‌های کلیدی: رادار نفوذی زمین، آزمایش غیرمخرب، زهکشی روسازی آسفالتی، رطوبت سیستم روسازی.

۱. مقدمه

لایه‌های مختلف روسازی شده و بروز خرابی‌هایی نظیر روتراشی، وارفتگی و ایجاد چاله در سطح روسازی را به همراه دارد. همچنین، در مواردی، تورم بیش از حد خاک بستر، بالا آمدن قسمتی از سطح رویه آسفالتی را به دنبال

زهکشی آب‌های سطحی و زیرسطحی، از جمله مباحث مهم حوزه طراحی و بهره‌برداری از روسازی انعطاف‌پذیر راه می‌باشد. زهکشی نامناسب باعث گیر افتادن آب در

دارد. بنابراین، آگاهی از وضعیت زهکشی روسازی آسفالتی و میزان آب موجود در لایه‌های مختلف آن، نقش مهمی در برنامه‌ریزی و مدیریت نگهداری روسازی دارد. بررسی عملکرد صحیح لایه‌های زهکش از پیچیدگی‌های خاصی برخوردار است و اغلب از طریق حفاری و نمونه‌گیری و آزمون‌های مخرب صورت می‌پذیرد. نمونه‌برداری به کمک حفاری و سونداژ از جمله روش‌های معمول تعیین درصد رطوبت و به‌طور کلی ارزیابی وضعیت لایه‌های روسازی و زیرسازی راه محسوب می‌شود. این روش‌ها علاوه بر ایجاد یک نقطه ضعیف در سیستم روسازی، مستلزم صرف هزینه و زمان قابل توجه نیز هستند. لذا، در سال‌های اخیر، استفاده از روش‌های غیرمخرب برای ارزیابی شرایط روسازی بیشتر مورد توجه قرار گرفته است. این روش‌ها، علاوه بر عدم ایجاد دستخوردگی در روسازی، از مزایایی همچون سرعت قابل ملاحظه در برداشت اطلاعات و صرفه‌جویی مالی نیز برخوردارند. از میان روش‌های غیرمخرب ارزیابی روسازی‌های صلب و انعطاف‌پذیر، روش رادار نفوذی زمین (GPR) به‌طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار گرفته است. در این روش، امواج الکترومغناطیس با فرکانس‌های مختلف به لایه مورد بررسی ارسال شده و بازتاب امواج ثبت می‌گردد. بسته به جنس مصالح، مقدار رطوبت، تراکم و بعضی مشخصات امواج بازگشتی متفاوت خواهند بود. زمان بازگشت امواج به‌طور مستقیم به ثابت دی‌الکتریک مصالح وابسته است. با تحلیل اطلاعات ثبت شده توسط دستگاه، مشخصاتی از روسازی نظیر ضخامت لایه، جنس لایه، تراکم، میزان رطوبت و همچنین ترک‌ها و سایر خرابی‌های لایه رویی قابل دستیابی خواهند بود (جول، ۲۰۰۸).

تاریخچه استفاده از روش GPR در ارزیابی روسازی، زیرسازی و ابنیه فنی راه به اواسط دهه ۱۹۷۰ برمی‌گردد. اتحادیه مدیریت بزرگراه‌های کشور آمریکا (FHWA) امکان‌پذیری و قابلیت به‌کارگیری GPR را در بررسی وضعیت تونل‌ها و پس از آن در ارزیابی وضعیت پل‌ها مورد آزمایش قرار داده است (اکروز، ۱۹۸۹). اولین آزمایش GPR جهت مطالعات راه‌سازی در سال ۱۹۸۶ در فنلاند انجام شد (الهارتی و لانگ، ۱۹۸۷) و به سرعت کاربرد آن به عنوان ابزار پیمایش در طراحی و ساخت جاده و پروژه‌های ترمیم و نوسازی توسعه یافت (سارنکتو و اسکولیون، ۱۹۹۴). تشخیص نوع خاک، میزان تراکم خاک، عمق لایه باربر و همچنین میزان حساسیت بستر به یخ‌زدگی از جمله مواردی هستند که با استفاده از نتایج آزمایش GPR مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند (سارنکتو و اسکولیون، ۲۰۰۰).

با توجه به اهمیت مسئله زهکشی، مطالعات مختلفی در خصوص بررسی عملکرد سیستم زهکش روسازی راه‌ها به کمک روش GPR صورت گرفته است. حرکت آب در خاک در محدوده روسازی و همچنین بستر آن، با کمک این روش بررسی شده و نتایج به‌دست آمده با داده‌های حاصل از حفاری و نمونه‌گیری در محل کنترل شده‌اند (سارنکتو و همکاران، ۱۹۹۴). در تحقیقات دیگر، از روش GPR برای شناسایی ترک‌های ناشی از تراوش آب در روسازی صلب استفاده شده و صحت نتایج به‌دست آمده از طریق مقایسه با نتایج آزمایش‌های ژئوتکنیک انجام شده در محل، کنترل شده است (چرن و همکاران، ۲۰۰۵). تکنیک‌های مختلف رادار نفوذی زمین برای اندازه‌گیری حجم آب موجود در لایه‌های سنگدانه‌ای زیرآسفالت مورد استفاده قرار گرفته‌اند (گروت و همکاران، ۲۰۰۵). تحقیقات نشان داده است که مناطقی که

سنجی نتایج در این نوع تحقیقات عموماً از طریق نمونه-گیری در محل و مقایسه نتایج صورت گرفته است. در این تحقیق، تلاش شده است تا با انجام آزمایش GPR روی نمونه‌هایی با درصد رطوبت مشخص، یک رابطه ریاضی میان پارامترهای خروجی GPR و درصد رطوبت استخراج شود، به‌صورتی که بتوان با دقت قابل قبولی، از روی خروجی آزمایش GPR، درصد رطوبت لایه‌های مورد بررسی را تخمین زد. به این منظور، ۱۸ نمونه استوانه‌ای متشکل از آسفالت، اساس، زیراساس، بستر متراکم و بستر طبیعی ساخته شده و در سه درصد رطوبت مختلف متراکم گردیده‌اند. با در اختیار داشتن اطلاعات اولیه در خصوص هر یک از نمونه‌ها، آزمایش GPR روی نمونه‌ها انجام شده و تصاویر ثبت شده به کمک نرم‌افزار Labview 2010 پردازش شده‌اند. در نهایت، به منظور تعیین یک ارتباط معنی‌دار میان درصد رطوبت و تصاویر برداشت شده، بررسی‌های آماری روی خروجی‌های نرم‌افزار صورت گرفته است.

۲. برنامه آزمایش‌ها

در این تحقیق، آزمایش GPR روی نمونه‌های استوانه‌ای متشکل از لایه‌هایی روسازی با مقادیر معلوم درصد رطوبت صورت گرفته است. در ادامه، جزئیات بیشتری از مشخصات مصالح و مراحل آماده‌سازی نمونه‌ها و همچنین نحوه‌ی اجرای آزمایش‌ها ارائه شده است.

۲-۱. آماده‌سازی نمونه‌ها

برای آماده‌سازی نمونه‌های استوانه‌ای از قالب‌های بتنی مطابق شکل ۱ استفاده شده است. قطر داخلی هر قالب بتنی ۸۰ سانتی‌متر و ارتفاع آن ۳۰ سانتی‌متر می‌باشد. با قرار دادن سه قالب روی یکدیگر، تهیه نمونه با ارتفاع ۸۰

به دلیل تغییرات درصد رطوبت لایه‌ها دارای ثابت دی-الکتریک متفاوت هستند، به‌وسیله GPR قابل شناسایی می‌باشند (دیفندر و همکاران، ۲۰۰۶). با توجه به این مطلب، روش GPR برای تخمین سریع میزان آب موجود در لایه‌های روسازی پس از بارندگی به کار رفته و نتایج به‌دست آمده با اندازه‌گیری‌های تجربی در محل کنترل شده است (هوانگ و همکاران، ۲۰۰۸). به طور مشابه، این روش در تعیین دقیق مقدار آب سطحی روسازی و استخراج رابطه میان درصد رطوبت و عدد ثابت دی-الکتریک مخلوط آسفالت نیز به کار رفته است (لی و همکاران، ۲۰۱۰).

با استفاده از یک تحلیل مبتنی بر پراکندگی موج رایلی روی داده‌های دستگاه GPR، که از نمونه‌های غیراشباع برداشت شده بود، و با استفاده از تئوری فرسِنل، مشخص گردید که بسته به میزان رطوبت نمونه‌های مورد آزمایش، فرکانس حداکثر پاسخ تغییر می‌یابد (بندتو، ۲۰۱۰). در تحقیقی دیگر، از تغییر مشخصات پاسخ دریافتی از دستگاه GPR متناسب با مشخصات لایه‌ها، برای تخمین میزان رس موجود در لایه‌های روسازی استفاده شده است. از آنجا که وجود رس می‌تواند موجب کاهش ظرفیت باربری، تغییرشکل‌های زیاد و ایجاد شیار یا ترک در سطح روسازی شود، داده‌های برداشت شده از نمونه‌های محتوی ۲ الی ۲۵ درصد رس بتونیت توسط دستگاه GPR مورد بررسی قرار گرفته‌اند (توستی و همکاران، ۲۰۱۳).

مروری بر تاریخچه کاربرد روش GPR در حوزه زهکشی روسازی راه نشان می‌دهد که محققین مختلفی از قابلیت تغییر ثابت دی‌الکتریک دستگاه با میزان رطوبت موجود در خاک استفاده نموده و این روش را برای تخمین میزان آب موجود در خاک به‌کار برده‌اند. صحت-

و مورد بررسی قرار داد. همچنین، قطر ۸۰ سانتی‌متری نمونه‌ها امکان استقرار دستگاه روی سطح نمونه و داده-برداری مناسب را فراهم می‌آورد. شکل ۲ شماتیکی از لایه‌های مصالح اجرا شده در مقطع نمونه‌ها را نشان می‌دهد.

سانتی‌متر ممکن گردیده است. با تأمین ارتفاع ۸۰ سانتی‌متر برای نمونه‌ها، می‌توان علاوه بر لایه‌های روسازی شامل ۶ سانتی‌متر آسفالت، ۱۵ سانتی‌متر اساس و ۱۵ سانتی‌متر زیراساس، یک لایه ۱۵ سانتی‌متری بستر متراکم و حدود ۳۰ سانتی‌متر از بستر خاکی را اجرا نموده

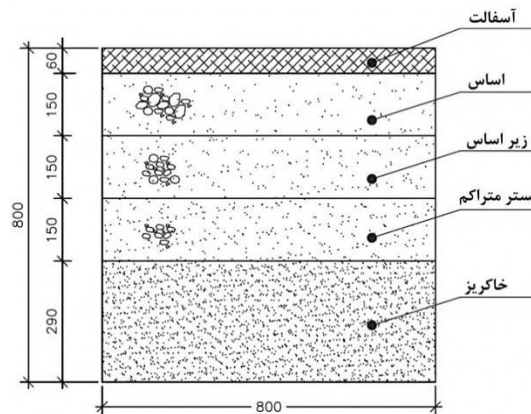


(ب)



(الف)

شکل ۱. آماده‌سازی نمونه‌های آزمایشگاهی: (الف) قالب‌های بتنی و (ب) نمونه‌های آماده شده



شکل ۲. شماتیک مقطع لایه‌بندی نمونه‌های آزمایشگاهی جهت انجام آزمایش GPR

خروج آب و تغییر درصد رطوبت مصالح، قالب‌ها با استفاده از چند لایه پلاستیک ضخیم آب‌بندی شده‌اند. سپس، مصالح در لایه‌های ۱۵ سانتی‌متری داخل قالب ریخته شده و پس از اضافه نمودن رطوبت، با استفاده از یک کمپکتور دستی با ابعاد ۴۰×۶۰ سانتی‌متر و بر اساس روش D استاندارد AASHTO-T180-01 متراکم شده‌اند

مصالح تهیه شده برای لایه‌های اساس و زیراساس، مطابق نشریه ۱۰۱ سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور "مشخصات فنی عمومی راه" و در سه تیپ A1، A2 و A3 می‌باشند. دانه‌بندی مصالح اساس و زیراساس مطابق استاندارد AASHTO M 145 صورت گرفته است. پس از تهیه مصالح با دانه‌بندی مشخص، ابتدا برای جلوگیری از

مطابق ASTM-D1883 تعیین شده است. مشخصات فیزیکی و مکانیکی مصالح خاکی مورد استفاده در تهیه نمونه‌ها در جدول ۱ ارائه شده است.

(شکل ۳). حداکثر تراکم هر لایه در حین عملیات با انجام آزمایش تعیین دانسیته کنترل شده است. شاخص CBR نمونه‌ها نیز در شرایط رطوبت بهینه و



(ب)



(الف)

شکل ۳. اجرای مصالح خاکی نمونه‌های آزمایشگاهی: الف) متراکم سازی نمونه‌ها و ب) سطح نمونه بعد از تراکم

جدول ۱. مشخصات مصالح مورد استفاده در تهیه نمونه‌ها

درصد رطوبت بهینه	نسبت تخلخل	شاخص نسبت باربری	چگالی ویژه	دانسیته خشک حداکثر	
$\omega_{opt}(\%)$	(e)	کالیفرنیا (CBR)	(G_s)	$Y_d \max$ (kN/m^3)	
۷/۶	۰/۱۹	۷۴/۲۳	۲/۵۹	۲/۱۸	A1
۵/۶	۰/۲۳	۹۸/۳۳	۲/۶۴	۲/۱۵	A2
۵/۵	۰/۲۷	۳۶/۵۵	۲/۶۸	۲/۱۱	A3
۵/۲	۰/۱۷	۴/۳۴	۲/۵۸	۲/۲۱	بستر

تهیه و ساخته شده است. پس از انجام آزمایش‌های بررسی مرغوبیت روی مصالح سنگی، با در نظر گرفتن محدوده دانه‌بندی شماره ۵ نشریه ۱۰۱، دانه‌بندی پیشنهادی طرح به‌دست آمده است. این دانه‌بندی در جدول ۲ ارائه شده است.

پس از آماده‌سازی و اجرای مصالح خاکی، لایه آسفالت به ضخامت ۶ سانتی‌متر روی اساس اجرا و متراکم شده است. بتن آسفالتی مورد استفاده در این پژوهش، بر اساس نشریه ۲۳۴ سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور "آیین‌نامه روسازی آسفالتی راه‌های ایران"

جدول ۲. دانه‌بندی رویه آسفالتی نمونه‌ها

$\frac{1}{2}$ in	$\frac{3}{8}$ in	4#	8#	50#	200#	اندازه الک
۱۰۰	۹۰-۱۰۰	۵۵-۸۵	۳۳-۶۷	۷-۲۳	۲-۱۰	حدود دانه‌بندی شماره ۵ نشریه ۱۰۱
۱۰۰	۹۶	۶۶	۴۵	۱۵	۶	دانه‌بندی استفاده شده در طرح

شده و از قیر با درجه نفوذ ۶۰-۷۰ استفاده شده است. نتایج آزمایش مارشال نمونه آسفالتی که بر اساس استاندارد ASTM D1559 و در دمای ۲۵ درجه سانتیگراد انجام شده، در جدول ۳ ارائه شده است.

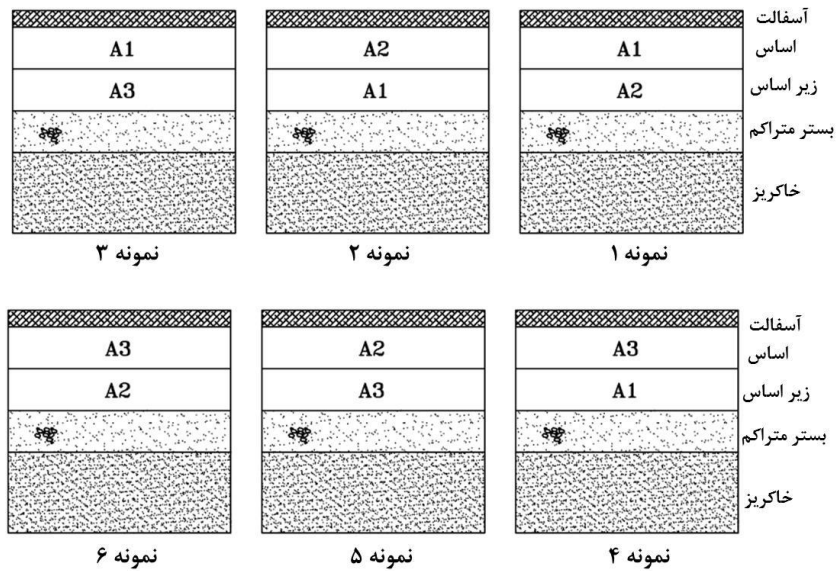
پس از تعیین طرح اختلاط مصالح سنگی، با ساخت سه نمونه آسفالتی با درصد‌های مختلف قیر و انجام آزمایش مارشال، درصد قیر بهینه تعیین شده است. در این تحقیق، مخلوط آسفالتی برای شرایط ترافیک سنگین تهیه

جدول ۳. نتایج آزمایش مارشال روی مخلوط آسفالتی طبق استاندارد ASTM D1559

مشخصات فنی آسفالت	درصد قیر نسبت به آسفالت	مقاومت مارشال آسفالت	درصد فضای خالی آسفالت	درصد فضای پر شده با قیر	درصد فضای خالی مصالح سنگی	روانی آسفالت	نسبت درصد وزنی فیبر به قیر	درصد شکستگی در دو جهه	وزن مخصوص نمونه مارشال	دمای آسفالت
واحد	%	kg	%	%	%	mm	-	%	gr/cm ³	°C
استاندارد	ASTM D2122	MS-2	MS-2	MS-2	MS-2	MS-2	-	ASTM D5821	MS-2	
مشخصات (نشریه ۲۳۴)	≥۵/۶	≥۸۰۰	≥۳	≥۶۰	≥۱۳	≥۲	≥۰/۶	≥۹۰	-	≥۱۲۰
	≤۶/۲		≤۵	≤۷۵		≤۳/۵	≤۱/۲			≤۱۶۳
نتایج آزمایش	۵/۸	۱۲۰۵	۴/۱	۶۷/۸	۱۵	۲/۶۷	۱/۲	۹۲	۲/۲۵	۱۴۵

درصد رطوبت بهینه و درصد رطوبت‌های متناظر درجه اشباع ۵۰ و ۱۰۰ درصد تهیه شده‌اند. به این ترتیب ۱۸ نمونه برای اجرای آزمایش‌ها آماده شده است.

با در نظر گرفتن چیدمان‌های مختلف برای لایه‌های اساس و زیراساس، ۶ ساختار مختلف برای نمونه‌ها تعریف شده است. شکل ۴ شماتیک نمونه‌های ساخته شده را نشان می‌دهد. هر یک از نمونه‌های ۱ تا ۶ در

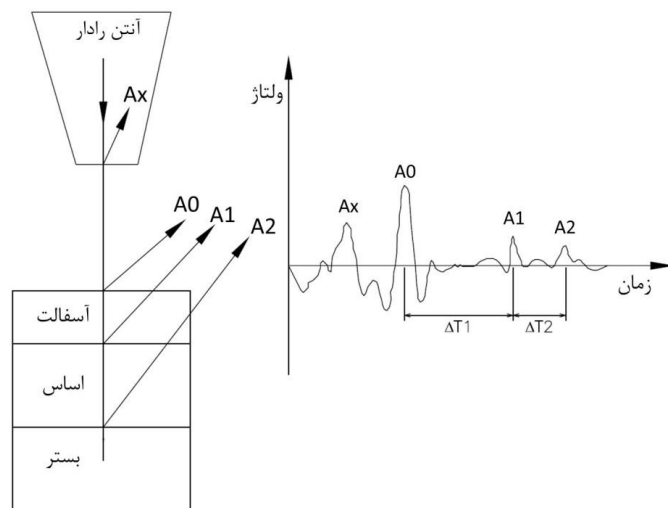


شکل ۴. شماتیک ساختار نمونه‌های آزمایشگاهی جهت انجام آزمایش GPR

۲-۲. برداشت زیرسطحی به کمک دستگاه GPR

رادار نفوذی زمین (GPR) یک فناوری غیرمخرب برای تعیین ضخامت و مشخصات دیگری مانند میزان رطوبت موجود لایه‌های روسازی و زیرسازی است. عملکرد این دستگاه مبتنی بر اصول فناوری راداری است. یک دستگاه GPR از فرستنده، گیرنده، پردازشگر و نمایشگر داده‌ها تشکیل شده است. با حرکت دستگاه روی سطح روسازی امواج الکترومغناطیس به لایه‌های زیرین ارسال می‌شود. زمانی که موج الکترومغناطیس به مرز دو لایه با مشخصات متفاوت می‌رسد، به دلیل اختلاف در ثابت دی-

الکتریک دو محیط، از محل مرز مشترک آنها منعکس می‌شود. موج منعکس شده توسط آنتن گیرنده دریافت شده و به سیگنال دیجیتال تبدیل می‌شود. شماتیک عملکرد دستگاه GPR روی یک روسازی سه لایه متشکل از لایه-های آسفالت، اساس و بستر در شکل ۵ نشان داده شده است. در این شکل، Ax دامنه موج ارسالی از دستگاه، A0 دامنه موج بازتاب یافته از سطح آسفالت، A1 دامنه بازتاب یافته از مرز مشترک آسفالت و اساس و A2 دامنه موج از بازتاب یافته از مرز مشترک اساس و بستر است.



شکل ۵. شماتیک عملکرد دستگاه GPR (برگرفته از ویل، ۱۹۹۲)

250 MHz (دارای آنتن ۲۵۰ مگاهرتز) می باشد (شکل ۶). با شروع به کار دستگاه، داده ها به طور خودکار در کامپیوتر دستگاه ذخیره شده و برای شناسایی مشخصات خاک محل و میزان رطوبت محیط مورد استفاده قرار می گیرند.

روابط تحلیلی تعیین مقدار ثابت دی الکتریک یک ماده معین براساس دامنه های A0، A1 و A2 و تعیین درصد رطوبت لایه بر اساس ثابت دی الکتریک توسط محققینی از جمله هوانگ و همکاران (۲۰۰۸) ارائه شده است. دستگاه GPR مورد استفاده در این تحقیق Noggin



(ب)

(الف)

شکل ۶. الف) دستگاه GPR شرکت Noggin با آنتن ۲۵۰ مگاهرتز و ب) استقرار دستگاه روی نمونه و داده برداری

پیکسل به پیکسل داده^۲ و ضریب وضوح تصویر^۳ صورت گیرد. عبارت اختصاری SPG برای دستگاه GPR بیانگر

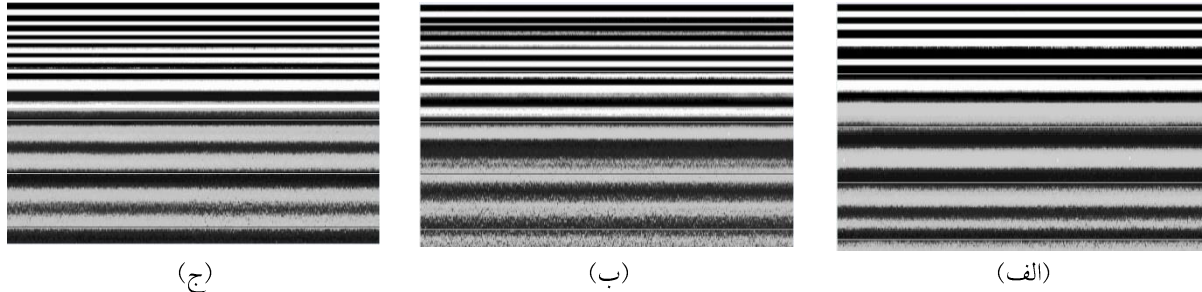
برای کار با دستگاه و برداشت اطلاعات، لازم است که تنظیمات مربوط به بازه ارسال امواج^۱، ضریب آنالیز

^۲ Plot interval

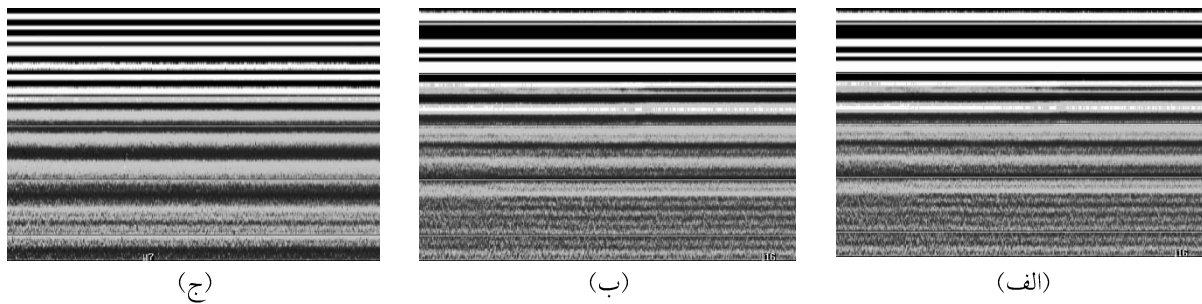
^۳ Gain

^۱ Station interval

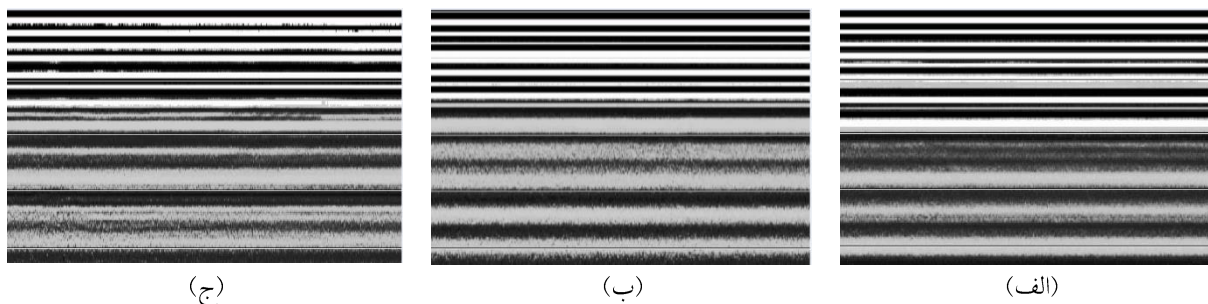
تنظیماتی است که برای این سه پارامتر صورت گرفته است. این تنظیمات در دقت برداشت‌های صورت گرفته توسط دستگاه تأثیرگذار هستند. نمونه‌هایی از خروجی‌های تصویری ثبت شده برای نمونه‌های ۱، ۲ و ۳ در درصدهای مختلف رطوبت به ترتیب در شکل‌های ۷، ۸ و ۹ نشان داده شده است.



شکل ۷. تصاویر برداشتی از نمونه ۱: (الف) رطوبت بهینه، (ب) رطوبت معادل اشباع ۵۰٪ و (ج) رطوبت معادل اشباع ۱۰۰٪



شکل ۸. تصاویر برداشتی از نمونه ۲: (الف) رطوبت بهینه، (ب) رطوبت معادل اشباع ۵۰٪ و (ج) رطوبت معادل اشباع ۱۰۰٪



شکل ۹. تصاویر برداشتی از نمونه ۳: (الف) رطوبت بهینه، (ب) رطوبت معادل اشباع ۵۰٪ و (ج) رطوبت معادل اشباع ۱۰۰٪

محیط نرم‌افزار Labview ۲۰۱۰ صورت گرفته است. بدین ترتیب می‌توان به ارتباط میان داده‌های برداشت شده و درصد رطوبت نمونه‌ها دست یافت. این مطلب گام اصلی در بررسی عملکرد سیستم زهکش لایه‌های روسازی با استفاده از دستگاه GPR است.

۳. پردازش اطلاعات تصاویر GPR

پس از دریافت امواج و ثبت تصاویر با استفاده از دستگاه GPR، لازم است که تصاویر برای دستیابی به اطلاعات مورد نیاز تحلیل شود. در تحقیق حاضر، تحلیل تصاویر در

۳-۱. کاربرد نرم‌افزار Labview در پردازش

تصویر

نرم‌افزار Labview (Laboratory virtual instrument) یک زبان برنامه‌نویسی گرافیکی است که به صورت گسترده در کاربردهای مختلف صنعتی، تحقیقاتی و آزمایشگاهی مورد استفاده قرار می‌گیرد. این نرم‌افزار به صورت یک مدل استاندارد جمع‌آوری و پردازش داده و همچنین وسیله‌ای جهت کنترل و شبیه‌سازی ابزارهای مجازی درآمده است. نحوه قرائت داده‌ها در نرم‌افزار به این صورت است که ابتدا تصویر به صورت پیکسلی به نرم‌افزار معرفی می‌گردد. در این نرم‌افزار، هر پیکسل به ۲۴ بیت تقسیم می‌گردد. پس از فراخوانی تصویر در نرم‌افزار، خروجی به صورت یک ماتریس دو بعدی نمایش داده می‌شود. هر درایه این ماتریس یک مشخصه پیکسل از صفر تا 2^{24} است. عدد صفر معرف رنگ سیاه و عدد 2^{24} معرف رنگ سفید است. با نرمالیزه کردن درایه‌های ماتریس و تبدیل آنها به صفر و یک، عدد صفر رنگ مشکی و عدد یک رنگ سفید را نشان می‌دهد.

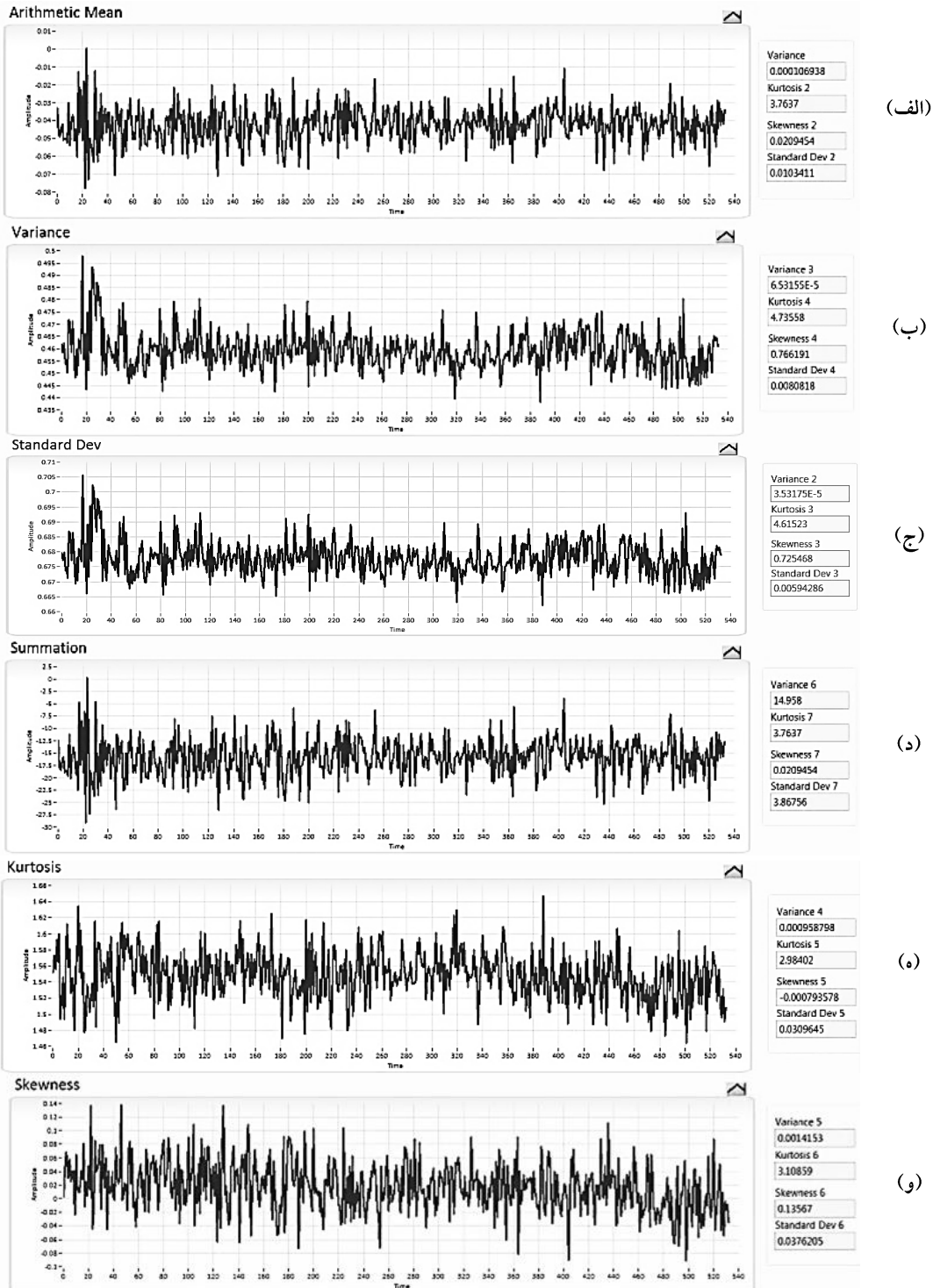
در تصاویر ثبت شده توسط GPR ذرات آب با رنگ مشکی ثبت می‌شوند. زیرا افزایش میزان آب باعث جذب بیشتر سیگنال‌ها در هر برداشت از نمونه شده و بازگشت سیگنال‌ها به میزان کمتری صورت می‌گیرد. بنابراین، درایه‌های صفر هر ماتریس بیانگر میزان رطوبت در بخشی از نمونه است که در تصویر مورد بررسی ثبت شده است. به عنوان مثال، اگر بازه ارسال امواج ۱/۵ میلی-متر تنظیم شده باشد، داده‌های به‌دست آمده از نرم‌افزار مربوط به ۱/۵ میلی‌متر از کل ارتفاع ۸۰ سانتی‌متری نمونه خواهد بود. در صورتی که کل عکس‌های برداشت شده از مقطع ارتفاعی نمونه پردازش شود، داده‌های مربوط به کل نمونه قابل دستیابی است.

نرم‌افزار Labview برای ارائه نتایج، نمودارهایی مشابه نمودارهای شکل ۹ را ارائه می‌دهد. محور افقی این نمودارها که به عنوان Time معرفی شده در حقیقت همان عکس‌هایی است که از مقطع ارتفاعی نمونه به طول ۸۰ سانتی‌متر برداشت شده است. محور قائم یکی از پارامترهای آماری مربوط به خروجی مورد نظر (درصد رطوبت) است. به عنوان مثال، نمودارهای مربوط به نمونه ۲ با درصد رطوبت بهینه در شکل ۹ نشان داده شده است. آخرین عدد روی محور افقی ۵۳۳ است که نشان می‌دهد نمودارهای مربوط به بازه ارسال موج ۱/۵ میلی‌متر هستند ($1/5 \times 533 \approx 80$). بر اساس نمودار شکل ۱۰-الف، در ارتفاع ۱۵۰ میلی‌متری از سطح نمونه ($1/5 \times 100$)، میانگین حسابی داده‌های مربوط به مقدار رطوبت ۰/۰۶- است. در همین تراز، طبق شکل ۱۰-ب، واریانس درصد رطوبت برابر ۰/۴۶ و طبق شکل ۱۰-ج انحراف معیار ۰/۶۷ است. طبق نمودار شکل ۱۰-د فراوانی تجمعی رطوبت برابر ۲۲/۵- است. نمودارهای ۱۰-ه و ۱۰-و به ترتیب دو پارامتر کشیدگی^۱ و چولگی^۲ را نشان می‌دهند. پارامتر کشیدگی نشان دهنده ارتفاع یا به عبارت دیگر معیاری از بلندی یک منحنی در نقطه ماکزیمم آن است. مقدار کشیدگی یک منحنی توزیع نرمال برابر ۳ است. کشیدگی مثبت برای یک تابع نشان دهنده بالاتر بودن قله آن نسبت به توزیع نرمال و کشیدگی منفی نشانه پایین‌تر بودن قله نسبت به توزیع نرمال است. چولگی معیاری از تقارن یا عدم تقارن تابع توزیع است. برای یک توزیع کاملاً متقارن چولگی صفر و برای یک توزیع نامتقارن متمایل به سمت داده‌های بزرگتر، چولگی مثبت بوده و برای یک توزیع نامتقارن متمایل به سمت داده‌های کوچکتر مقدار چولگی منفی است. طبق شکل ۱۰-ه در

¹Kurtosis

²Skewness

ارتفاع ۱۵۰ میلی متری از سطح نمونه، کشیدگی ۱/۶۶ و طبق شکل ۱۰- و چولگی برابر ۰/۰۸ می باشد.



شکل ۱۰. نمودارهای خروجی نرم افزار Labview برای نمونه ۲ با رطوبت بهینه. (الف) میانگین حسابی، (ب) واریانس، (ج) انحراف معیار، (د) فراوانی تجمعی، (ه) کشیدگی و (و) چولگی

۲-۳. روش تفسیر نتایج بر اساس توابع آماری

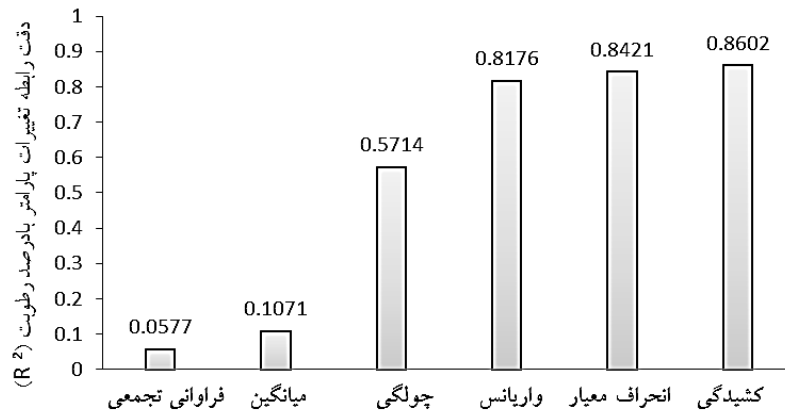
پس از پردازش تصاویر در نرم‌افزار، نمودارهای مربوط به توابع آماری میانگین، واریانس، انحراف معیار، کشیدگی و چولگی ترسیم می‌شود. همانطور که قبلاً اشاره شد، داده-برداری توسط دستگاه GPR در SPG-های مختلف صورت می‌گیرد. در این پژوهش، برداشت‌ها با تنظیمات مختلف برای دستگاه (G-های ۱، ۵ و ۹، P-های ۱ تا ۴ و S-های کوتاه (تا ۰/۰۲۵ متر) و ۰/۰۵ متر) صورت گرفته و تصاویر مختلفی در SPG-های مختلف (مثلاً S1P1G1 یا S2P2G5 و ...) ثبت شده‌اند. از مقایسه این تصاویر با یکدیگر می‌توان SPG بهینه برای استخراج تصویر بهینه، جهت تحلیل را تعیین نمود. منظور از تصویر بهینه، تصویری است که رطوبت موجود در خاک را با وضوح بیشتری نشان می‌دهد. به عبارت دیگر، در صورتی که از یک نمونه با درصد رطوبت مشخص تصاویری با SPG-های مختلف برداشت شود، SPG بهینه مربوط به تصویری است که درایه‌های صفر ماتریس دو بعدی آن بیشتر باشد. در بررسی‌های صورت گرفته در این تحقیق، S1P1G5 به عنوان SPG بهینه برای داده‌برداری تعیین گردید.

در گام بعدی، لازم است تابع آماری که قابلیت برقراری رابطه‌ای منطقی با درصد رطوبت را دارا باشد، استخراج گردد. برای این کار، از توابع آماری مربوط به

SPG بهینه هر نمونه در درصد رطوبت‌های مختلف با تابع توزیع نرمال مقایسه شده و نزدیکترین تابع به توزیع نرمال برای استخراج روابط مورد نیاز انتخاب شده است.

۴. نتایج و بحث

نمونه نتایج ارزیابی روند تغییر پارامترهای آماری با درصد رطوبت نمونه، بر اساس روش مورد اشاره در بخش تفسیر نتایج، برای نمونه‌ی شماره ۲ ارائه شده است. همانطور که قبلاً اشاره شد، کشیدگی یک توزیع نرمال برابر ۳ و چولگی آن برابر صفر می‌باشد. مقادیر مربوط به میانگین، کشیدگی و چولگی توابع آماری میانگین، واریانس، انحراف معیار، فراوانی جمعی، کشیدگی و چولگی، در سه درصد رطوبت مورد بررسی در جدول ۴ ارائه شده است. همانطور که داده‌های این جدول نشان می‌دهند، توابع آماری کشیدگی و چولگی، هر دو از هماهنگی خوبی با توزیع نرمال برخوردار هستند. از سوی دیگر، شکل ۱۱ دقت برازش منحنی میان توابع آماری مختلف با درصد رطوبت را برای نمونه شماره ۲ نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، بیشترین دقت از برازش منحنی میان کشیدگی و درصد رطوبت به دست می‌آید و برازش رابطه میان فراوانی جمعی و درصد رطوبت کمترین دقت را دارا می‌باشد.



شکل ۱۱. نمودار مقایسه دقت روابط قابل برازش میان میانگین پارامترهای آماری و درصد رطوبت نمونه

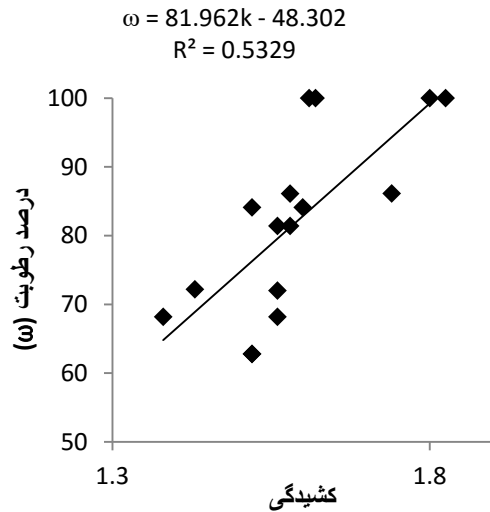
صرف نظر شده است. شکل ۱۲ تغییرات درصد رطوبت بر حسب مقدار میانگین پارامتر کشیدگی را برای نمونه شماره ۲ نشان می دهد.

لذا در ادامه، میانگین کشیدگی داده های حاصل از پردازش تصاویر GPR به عنوان مشخصه مورد نظر برای استخراج رابطه میان درصد رطوبت و نتایج آزمایش GPR انتخاب شده و از ارائه نمودارهای مربوط به سایر پارامترها

جدول ۴. توابع آماری نمونه شماره ۲

تابع آماری	رطوبت	میانگین تابع	کشیدگی تابع	متوسط کشیدگی تابع	چولگی تابع	متوسط کشیدگی تابع
میانگین	بهینه	۰/۰۲	۳/۷۶۳۷		$۲/۰۹۴۵۴ \times ۱۰^{-۱}$	
	معادل اشباع ۵۰٪	-۰/۰۹۸	۳/۳۳۶۶۲	۳/۶۵۷۸	$۲/۶۶۰۷۴ \times ۱۰^{-۱}$	$۲/۱۷۸۹ \times ۱۰^{-۱}$
	معادل اشباع ۱۰۰٪	-۰/۰۵۴	۳/۹۹۹۸		$۱/۷۸۱۶ \times ۱۰^{-۱}$	
واریانس	بهینه	۰/۸۷۳	۴/۷۳۵۵۸		$۷/۶۶۱۹۱ \times ۱۰^{-۱}$	
	معادل اشباع ۵۰٪	۰/۷۸۳	۳/۶۲۷۵۵	۴/۲۱۷۰	$۴/۰۴۲۴۷ \times ۱۰^{-۱}$	$۶/۲۷۵۱ \times ۱۰^{-۱}$
	معادل اشباع ۱۰۰٪	۰/۸۲۹	۴/۲۸۷۹۲		$۷/۱۲۰۸۵ \times ۱۰^{-۱}$	
انحراف معیار	بهینه	۰/۹۱۵	۴/۶۱۵۲۳		$۶/۲۵۴۶۸ \times ۱۰^{-۱}$	
	معادل اشباع ۵۰٪	۰/۸۸۴	۴/۲۰۸۰۴	۴/۱۳۵۹۸	$۶/۷۹۳۶۴ \times ۱۰^{-۱}$	$۵/۵۷۲۱۳ \times ۱۰^{-۱}$
	معادل اشباع ۱۰۰٪	۰/۹۱۱	۳/۵۸۴۶۷		$۳/۶۴۷۶۵ \times ۱۰^{-۱}$	
فراوانی تجمعی	بهینه	۷/۴۱۸	۳/۷۶۳۷		$۰/۲۰۹۴۵۴ \times ۱۰^{-۱}$	
	معادل اشباع ۵۰٪	-۱۹/۹۷۸	۳/۳۳۶۶۲	۳/۷۰۰۴	$۲/۶۶۰۷۴ \times ۱۰^{-۱}$	$۱/۵۵۰۶ \times ۱۰^{-۱}$
	معادل اشباع ۱۰۰٪	-۳۶/۰۷۸	۳/۹۹۹۸		$۱/۷۸۱۶ \times ۱۰^{-۱}$	
کشیدگی	بهینه	۱/۱۳۰	۲/۹۸۴۰۲		$۰/۰۰۷۹۳ \times ۱۰^{-۱}$	
	معادل اشباع ۵۰٪	۱/۲۱۸	۳/۲۶۷۲۷	۳/۳۲۳	$۰/۳۰۷۲۶ \times ۱۰^{-۱}$	$-۰/۶۸۵۸ \times ۱۰^{-۱}$
	معادل اشباع ۱۰۰٪	۱/۱۴۵	۳/۷۱۷۸۴		$-۲/۳۶۶۰۸ \times ۱۰^{-۱}$	
چولگی	بهینه	-۰/۰۴۵	۳/۱۰۸۵۹		$۱/۳۵۶۷ \times ۱۰^{-۱}$	
	معادل اشباع ۵۰٪	۰/۱۹۹	۲/۷۷۳۴	۲/۹۶۳۸	$۰/۴۱۵۱۱۵ \times ۱۰^{-۱}$	$-۰/۱۲۳۵ \times ۱۰^{-۱}$
	معادل اشباع ۱۰۰٪	۰/۱۰۷	۳/۰۰۹۲۶		$-۲/۱۴۲۲۹ \times ۱۰^{-۱}$	

درصد رطوبت‌های مربوط به درجه اشباع ۵۰٪، ۱۰۰٪ و رطوبت بهینه با یکدیگر مقایسه شده‌اند. این بار، از کل داده‌های موجود برای نمونه‌های ۱ تا ۶ استفاده شده است و یک معادله کلی میان پارامتر کشیدگی و درصد رطوبت مطابق شکل ۱۳ استخراج گردیده است.

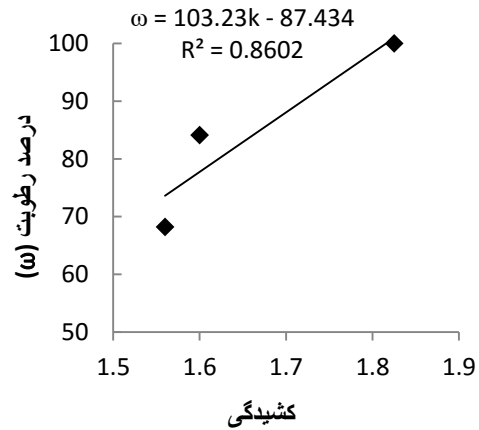


شکل ۱۳. معادله درونیابی میانگین پارامتر کشیدگی و رطوبت برای کل نمونه‌ها

لازم به ذکر است که در این مورد نیز به دلیل دقت کم روابط برازش یافته میان درصد رطوبت و پارامترهای آماری، غیر از کشیدگی، از ارائه آنها صرف‌نظر شده است. همانطور که در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود، پراکندگی پارامتر کشیدگی در کل نمونه‌ها مقدار محدودی بوده و همچنین با افزایش رطوبت در نمونه‌ها، یک سیر صعودی در تغییر این پارامتر مشاهده می‌گردد. این مطلب نشان‌دهنده یک توزیع نرمال برای این پارامتر است. برای تعیین رطوبت یک نمونه، صرف‌نظر از نوع دانه‌بندی، رابطه (۱) به صورت زیر پیشنهاد می‌گردد.

$$(1) \quad R^2 = 0.533 \quad -48.302$$

$$\omega = 81.96K$$



شکل ۱۲. نمودار مقایسه دقت روابط قابل برازش میان

میانگین پارامترهای آماری و درصد رطوبت نمونه

معادلات به‌دست آمده برای کلیه نمونه‌ها در جدول ۵ ارائه شده است. در این معادلات، متغیر k پارامتر کشیدگی و ω میزان رطوبت است. بر اساس جدول ۵، معادله مربوط به نمونه ۳ دقت کمی دارد، که به دلیل خطایی است که در فرایند ساخت نمونه به وجود آمده بود. لذا، در ادامه، به علت داشتن خطای زیاد، این معادله از نتایج کنار گذاشته می‌شود.

جدول ۵. روابط برازش یافته میان پارامتر کشیدگی و درصد

شماره نمونه	دقت (R^2)	معادله
۱	۰/۹۲۲۴	$\omega = 20.687K + 45.839$
۲	۰/۸۶۰۲	$\omega = 103.23K - 87.434$
۳	۰/۷۷	$\omega = 33.76K - 87.938$
۴	۰/۹۹۵۹	$\omega = 41.64K - 562.13$
۵	۰/۹۹۰۸	$\omega = 131.2K - 113.7$
۶	۰/۹۰۱۸	$\omega = 119.28K - 114.3$

در گام دیگر، جهت بررسی کل اطلاعات و دست‌یابی به یک نتیجه کلی، اطلاعات آماری مربوط به تمامی ۱۸ نمونه ساخته شده، صرف‌نظر از نوع دانه‌بندی لایه‌ها و

رابطه برای نمونه شماره ۳ به فرم $\omega=33/76K-87/938$ و با دقت $R^2=0/77$ به دست آمده است.

- برای تخمین درصد رطوبت لایه‌های روسازی آسفالتی از روی پارامتر کشیدگی استخراج شده از تحلیل تصاویر GPR، بدون در نظر گرفتن دانه‌بندی لایه‌های اساس و زیراساس، معادله $\omega=81/96K-48/302$ با دقت $R^2=0/5329$ توصیه می‌گردد. با توجه به محدودیت تعداد نمونه‌ها در این تحقیق، نتایج به دست آمده تنها جنبه راهنمایی داشته و دست‌یابی به روابط دقیق‌تر مستلزم انجام تحقیقات گسترده‌تر می‌باشد. در این راستا، پیشنهادها زیر برای تحقیق در این حوزه ارائه می‌گردد:

- لایه بتن آسفالتی با دانه‌بندی‌های مختلفی ساخته شده و با انجام بررسی‌های پارامتریک روی نمونه‌ها، اثرگذاری دانه‌بندی آسفالت بر داده‌های دستگاه GPR و درصد رطوبت محاسباتی بررسی گردد.

- لایه بتن آسفالتی با درصد‌های مختلف قیر تولید شده و با انجام بررسی‌های پارامتریک روی نمونه‌ها، اثرگذاری درصد قیر لایه آسفالت بر داده‌های دستگاه GPR و درصد رطوبت محاسباتی بررسی گردد.

- نمونه‌های روسازی، با دامنه گسترده‌تری از درصد رطوبت‌ها برای لایه‌های اساس و زیراساس ساخته شده و روابط میان پارامترهای آماری و درصد رطوبت استخراج گردد.

- با انجام عملیات سونداژ و نمونه‌گیری از روسازی‌های راه موجود، نتایج به دست آمده از تحلیل داده‌های GPR در تشخیص درصد رطوبت لایه‌ها اعتبارسنجی شوند.

در انتها، توجه به این نکته ضروری است که با توجه به تعداد محدود نمونه‌های مورد آزمایش در این پژوهش، روابط به دست آمده تنها جنبه راهنمایی داشته و دست‌یابی به نتایج دقیق‌تر مستلزم انجام آزمایش‌های بیشتر و تحقیقات گسترده‌تر است.

۵. نتیجه‌گیری

هدف اصلی تحقیق حاضر، توسعه مبانی یک مدل ریاضی مبتنی بر نتایج برداشت با GPR در روسازی‌های آسفالتی است، تا بتوان با کمک آن درصد رطوبت لایه‌های اساس و زیر اساس را تعیین نمود. به این منظور با ساخت ۱۸ نمونه آزمایشگاهی و برداشت توسط دستگاه GPR، پارامترهای مختلف آماری داده‌های برداشت شده محاسبه گردیده و رابطه ریاضی آنها با درصد رطوبت استخراج شده است. عمده نتایج به دست آمده از این تحقیق به شرح زیر است:

- از میان پارامترهای آماری میانگین، واریانس، انحراف معیار، فراوانی تجمعی، کشیدگی و چولگی، توزیع پارامتر کشیدگی نسبت به رطوبت موجود نمونه، بیشترین نزدیکی به توزیع نرمال را دارا می‌باشند.

- بهترین رابطه ریاضی قابل تعریف برای تخمین درصد رطوبت نمونه از پارامترهای آماری حاصل از تحلیل تصاویر GPR، از برآزش یک رابطه خطی میان پارامتر کشیدگی و درصد رطوبت به دست می‌آید.

- دقیق‌ترین رابطه میان پارامتر کشیدگی و درصد رطوبت در این تحقیق، برای نمونه شماره ۴ و به فرم $\omega=411/64K-562/13$ و با دقت $R^2=0/9959$ و ضعیف‌ترین

۶. مراجع

معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی ریاست جمهوری، ۱۳۸۱. "آیین‌نامه روسازی آسفالتی راه‌های ایران". نشریه ۲۳۴.

معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی ریاست جمهوری، ۱۳۸۲. "مشخصات فنی عمومی راه". نشریه ۱۰۱.

- AASHTO. 2001. "Moisture-density relations of soils: T180".
- AASHTO. 2003. "Soil classification: M 145".
- ASTM. 1991. "Standard test method for California bearing ratio (CBR) of laboratory-compacted soils: D1883".
- Alharthi, A. and Lange, J. 1987. "Soil water saturation: Dielectric determination". *J. Water Resour. Res.*, 23: 591-595.
- Diefenderfer, B. K., Mokarem, D. W. and Sharp, S. R. 2006. "Use of Nondestructive Evaluation to Detect Moisture in Flexible Pavements". Virginia Transportation Research Council, Final Report.
- Eckrose, R. 1989. "Ground Penetrating Radar Supplements Deflection Testing to Improve Airport Pavement Evaluations". 1st Int. Symp. Nondestructive Testing Pavements and Backcalculation Moduli, Baltimore, Maryland, June.
- Grote, K., Hubbard, S., Harvey, J. and Rubin, Y. 2005. "Evaluation of infiltration in layered pavements using surface GPR reflection techniques". *J. Appl. Geophys.*, 57: 129-153.
- Huang, X. C., Wang, Z. B. and Li, H. J. 2008. "Application of pavement radar in asphalt pavement draining and waterproofing". *Guangdong Highway Commun.*, 2: 1-4.
- Jol, H. 2008. "Ground penetrating radar: Theory and applications". Univ. of Wisconsin, Eau Claire.
- Li, C. L., Miao, L. C. and Yue, J. C. 2010. "Research on Detection to Moisture Content of Flexible Pavement by GPR". Proc. of the GeoShanghai 2010 Int. Conf., Paving Materials and Pavement Analysis, June 3-5, Shanghai, China, pp. 420-426.
- Saarenketo, T. and Scullion, T. 1994. "Ground Penetrating Radar Applications on Roads and Highways". Research Report, Texas Transportation Institute, College Station.
- Saarenketo, T., Nikkinen, T. and Lotvonen, S. 1994. "The Use of Ground Penetrating Radar for Monitoring Water Movement in Road Structures". 5th Int. Conf. of GPR, Kitchener, Ontario, Canada, June, 3: 1181-1192.
- Saarenketo, T. and Scullion, T. 2000. "Road evaluation with ground penetrating radar". *J. Appl. Geophys.*, 43(2-4): 119-138.
- Chern, S. G., Hu, R. F., Li, C. Y., Pei, K. C. and Lin, D. W. 2005. "A research combines geo-technique test and a three dimensional image GPR inspection for rigid pavement pumping failure". *J. Marine Sci. Technol.*, 13(1): 11-19.
- Tosti, F., Patriarca, C., Slob, E., Benedetto, A. and Lambot, S. 2013. "Clay content evaluation in soils through GPR signal processing". *J. Appl. Geophys.*, 97: 69-80.
- Weil, G. J. 1992. "Non-destructive Testing of Bridge, Highway and Airport Pavements". Proc. On the Non-destructive Evaluation of Civil Structures and Materials, Boulder, Colorado, May 11-13, pp. 385-394.