



# ماهنامه علمی تخصصی پایا شهر

زمان چاپ: ۱۴۰۲/۱۲/۲۰

شماره مجوز مجله: ۸۰۴۰۰

## بررسی و تحلیل ویژگی ها و تاثیرات مولفه های رسانایی مقاومت-دما بتن آسفالتی

امیر شاطری\*

\*فارغ التحصیل مقطع کارشناسی پیوسته مهندسی برق موسسه آموزش عالی آپادانا شیراز؛ ایران

[Amir.sh197799@gmail.com](mailto:Amir.sh197799@gmail.com)

### چکیده

در این تحقیق و مقاله تغییرات مقاومت بتن آسفالتی رسانا در دماهای مختلف مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است و مدل ضریب دمایی مثبت برای تخمین تأثیر دما بر مقاومت به صورت کمی ایجاد شد، که تداخل با ارزیابی رسانایی ناشی از تغییرات دما را حذف کرد. در نهایت، با تجزیه و تحلیل دقیق نتایج آزمایش های حاصل تحقیق و مقاله در چرخه دما ثابت می شود که تغییرات ساختار شبکه نفوذی ناشی از تغییرات دما باعث ظهور ضریب دمایی مثبت بتن آسفالتی رسانا می شود.

**کلمات کلیدی:** بتن آسفالت رسانا؛ مقاومت الکتریکی؛ ضریب دمایی مثبت؛ شبکه نفوذ

### ۱- مقدمه

در فرآیند اختلاط بتن آسفالتی، افزودن نسبت معینی از مواد رسانا می تواند بتن آسفالت مرکب را به عنوان هادی رسانا کند [۱-۳]. این نوع جدید از کامپوزیت های رسانا دارای قابلیت رسانایی الکتریکی و حرارتی بود که بتن آسفالتی معمولی فاقد آن بود و زمانی که از آن به عنوان مصالح روسازی استفاده می شد، می توان از این قابلیت برای رسیدن به هدف ذوب برف، تشخیص آسیب و بسته شدن ترک استفاده کرد؛ چشم انداز کاربرد گسترده ای دارند [۴-۶]. بتن آسفالتی رسانا به ویژه به دمای محیط حساس بود و خواص رسانایی بتن آسفالتی معمولاً با دمای محیط تغییر می کرد [۷-۸]. تحقیقات قبلی نشان داده بود که ضریب دمایی مثبت تأثیر می گذارد که مقاومت بتن آسفالتی رسانا با افزایش دما افزایش می یابد و با کاهش دما در نزدیکی آستانه نفوذ مشاهده شد [۹]. روسازی آسفالت تحت تأثیر تناوب روز و شب و همچنین تغییر فصل، چرخه های سرمای گرمایشی را تجربه می کرد. بنابراین، هنگام تشخیص روسازی آسفالت رسانا [۱۰-۱۲]، تداخل با مقدار آزمایش ناشی از تغییرات دما باید در نظر گرفته شود. تنها در این صورت است که می توان تکامل آسیب در روسازی را به طور دقیق تعیین کرد. رابطه متناظر بین دما و رسانایی بتن آسفالتی رسانا در مطالعات قبلی ایجاد نشده است، به طوری که اثرات ضریب دمایی مثبت را نمی توان به صورت کمی ارزیابی کرد. این تحقیق و مقاله ویژگی های مقاومت بتن آسفالتی رسانا در دماهای مختلف مورد بررسی و تحلیل دقیق قرار گرفت. مدل ضریب دمایی مثبت برای ارزیابی تأثیر دما بر مقاومت ایجاد شد. در آزمایش چرخه دما، تغییرات مقاومتی روسازی آسفالت رسانا مشاهده شد و مکانیسم اثر دما بر روی مقاومت مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت.



# ماهنامه علمی تخصصی پایا شهر

## ۲- پیشینه تحقیق و پژوهش

بتن آسفالتی که به آن آسفالت می‌گویند، یک کامپوزیت یا ماده مرکب است که معمولاً برای روسازی جاده‌ها، پارکینگ‌ها، فرودگاه‌ها و همچنین هسته مرکزی سدهای خاکی از آن استفاده می‌شود. استفاده از آسفالت برای روسازی جاده‌ها از ابتدای قرن ۲۰ شروع شده است.

### ۱-۲- مخلوط آسفالتی داغ

این مخلوط با داغ کردن قیر برای کاهش ویسکوزیته آن و خشک کردن شن و ماسه و حذف رطوبت آن قبل از اختلاط شروع می‌شود. معمولاً اختلاط زمانی انجام می‌شود که دمای شن و ماسه حدوداً ۱۵۰ درجه سلسیوس و دمای قیر حدوداً ۹۵ درجه سلسیوس باشد. غلتک کشی و فشرده سازی باید زمانی انجام شود که دمای آسفالت به اندازه کافی بالا باشد. در بعضی کشورها مجوز آسفالت کاری فقط در فصل تابستان داده می‌شود، چرا که زیرکار سرد می‌تواند باعث سرد شدن آسفالت قبل از غلتک رانی و فشرده سازی مناسب شود. در اتوبان‌ها و جاده‌های پرترافیک، پیست‌های اتوموبیل رانی و باندهای فرودگاه معمولاً از مخلوط آسفالت داغ استفاده می‌شود.

### ۲-۲- مخلوط آسفالتی گرم

آسفالت گرم با افزودن ساینر زئولیت‌ها، موم‌ها، امولسیون‌های آسفالت، یا حتی بعضی مواقع آب به بایندر آسفالت ساخته می‌شود. این کار باعث کاهش زیاد دمای اختلاط و خواباندن آسفالت می‌شود.

### ۳-۲- مخلوط آسفالتی سرد

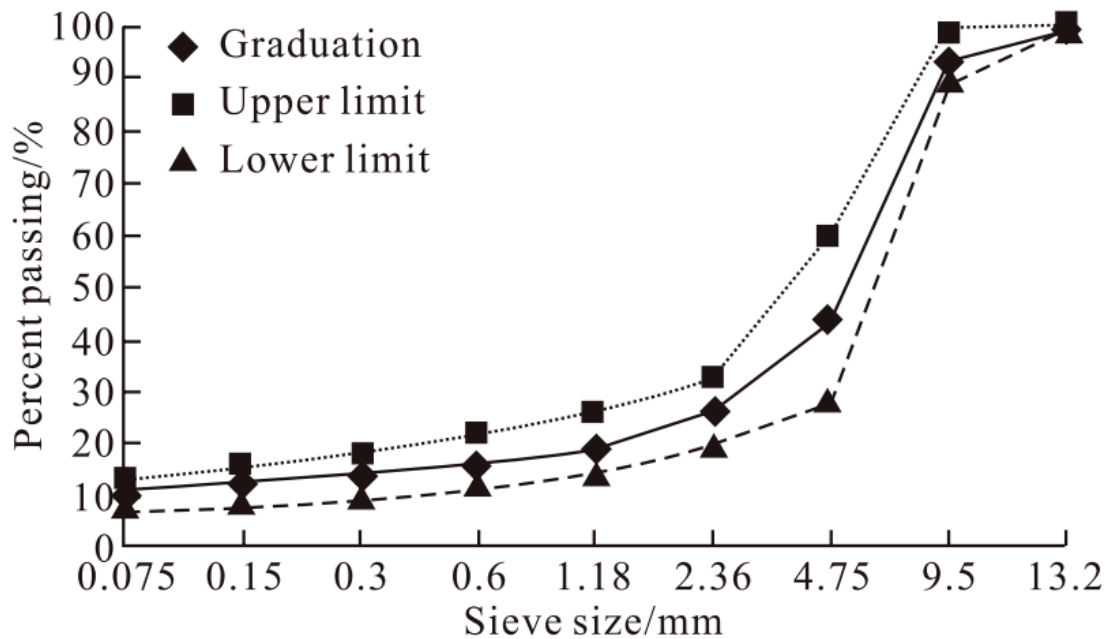
این آسفالت با امولسیون کردن قیر، در داخل آب توسط یک عامل امولسیون کننده، قبل از اختلاط با شن و ماسه ایجاد می‌شود. آسفالت در حالت امولسیون دارای ویسکوزیته کمتری بوده و در نتیجه کار و خواباندن با آن آسانتر است. این امولسیون پس از بخار شدن مقدار کافی از آب، از حالت امولسیون خارج شده و در حالت ایده‌آل این مخلوط سرد خواص مخلوط آسفالت گرم را پیدا خواهد کرد. از مخلوط آسفالتی سرد معمولاً برای لکه‌گیری جاده‌های با ترافیک کمتر استفاده می‌شود.

## ۳- جزئیات تحقیق و مقاله

ماده انتخاب شده برای آزمایش خستگی، مخلوط آسفالت درجه بندی شده با شکاف بود که الزامات آلیاژ حافظه شکل ۱۰ را برآورده می‌کرد (یعنی درجه بندی مخلوط آسفالت در شکل ۱ نشان داده شده است). این سنگدانه دارای اندازه اسمی ۹,۵ میلی متر و چسب آسفالت اصلاح شده استایرن-بوتادین-استایرن بود.



# ماهنامه علمی تخصصی پایا شهر



شکل ۱. درجه بندی مصالح.

جدول ۱. ویژگی های اصلی و مهم کربن سیاه.

مشخصات	واحد	مقدار
حداکثر مقاومت	اهم در سانتی متر	۸
اندازه اسمی	نانومتر	۱۲
وزن مخصوص	گرم بر سانتی متر مکعب	۱,۸
چگالی ظاهری	گرم بر سانتی متر مکعب	۰,۱۲
محتوای خاکستر	درصد	کمتر از ۰,۳
میزان رطوبت	درصد	کمتر از ۰,۵
مناطق خاص	متر مربع بر گرم	۱۲۵۰
حجم منافذ	سانتی متر مکعب بر ۱۰۰ گرم	۴۸۰ تا ۵۱۰
pH	-	۶,۵ تا ۷,۵

کربن سیاه با حداکثر مقاومت ۸ اهم در سانتی متر و اندازه اسمی ۱۲ نانومتر به عنوان پرکننده رسانا استفاده شد. مشخصات اساسی در جدول ۱ نشان داده شده است.

### ۳-۱- انتخاب محتوای کربن سیاه

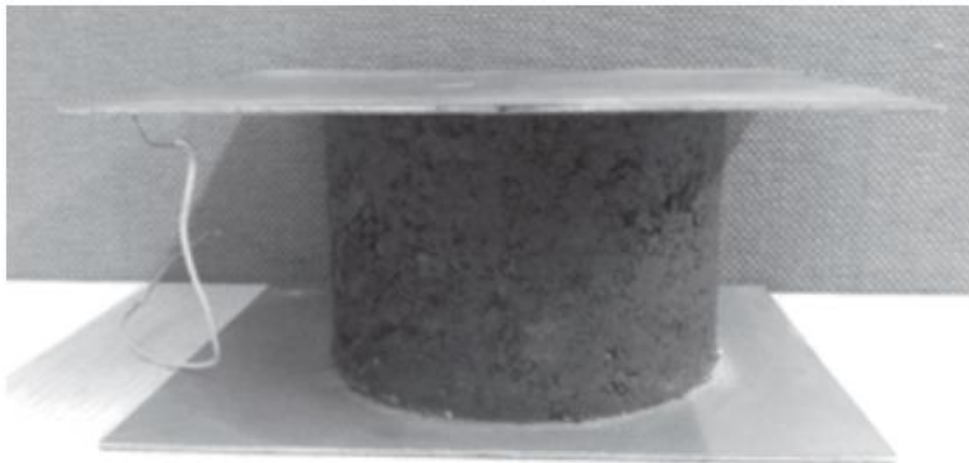
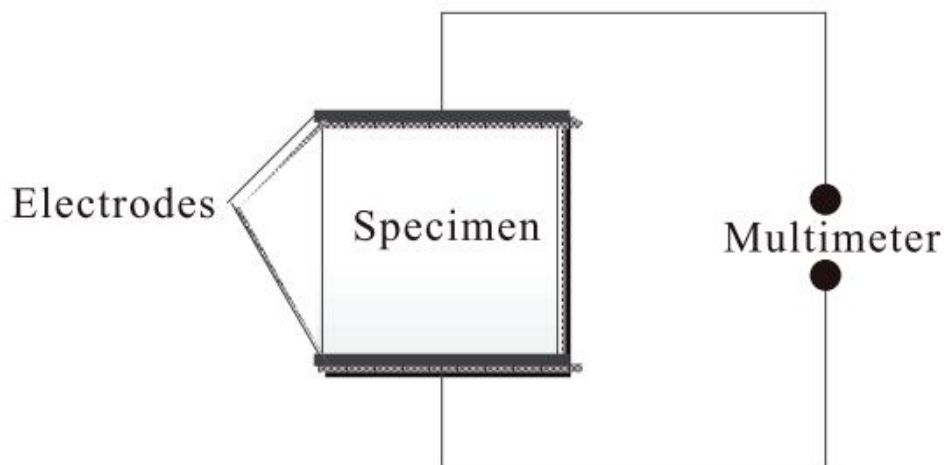
در ابتدا، یازده نوع مخلوط با کربن سیاه در ۰ درصد، ۱ درصد، ۲ درصد، ۳ درصد، ۴ درصد، ۵ درصد، ۶ درصد، ۷ درصد، ۸ درصد، ۹ درصد و ۱۰ درصد تهیه شد. کل محتوای کل درصد کربن سیاه بر اساس وزن کل سنگدانه محاسبه شد. هیچ طرح مخلوط جداگانه ای برای مخلوط های حاوی کربن سیاه انجام نشد. هنگامی که درصد کربن سیاه بیشتری اعمال شد، تنظیماتی برای کاهش بخش دانه های ریز از مخلوط کنترل انجام شد به طوری که مخلوط های با پرکننده های رسانا دارای درجه بندی و محتوای آسفالتی مشابه با مخلوط کنترل بودند [۱۳]. با محتوای خالی هوای ۴ درصد، محتوای آسفالت بهینه ۶,۱ درصد از وزن کل سنگدانه بود. بتن آسفالت توسط سیستم ارائه ابزارهای مورد نیاز برای مهندسان متراکم شد. هر نمونه یک استوانه به قطر ۱۰ سانتی متر و طول ۶,۳۵ سانتی متر بود. برای اندازه گیری مقاومت الکتریکی از یک منبع تغذیه جریان مستقیم تثبیت



# ماهنامه علمی تخصصی پایا شهر



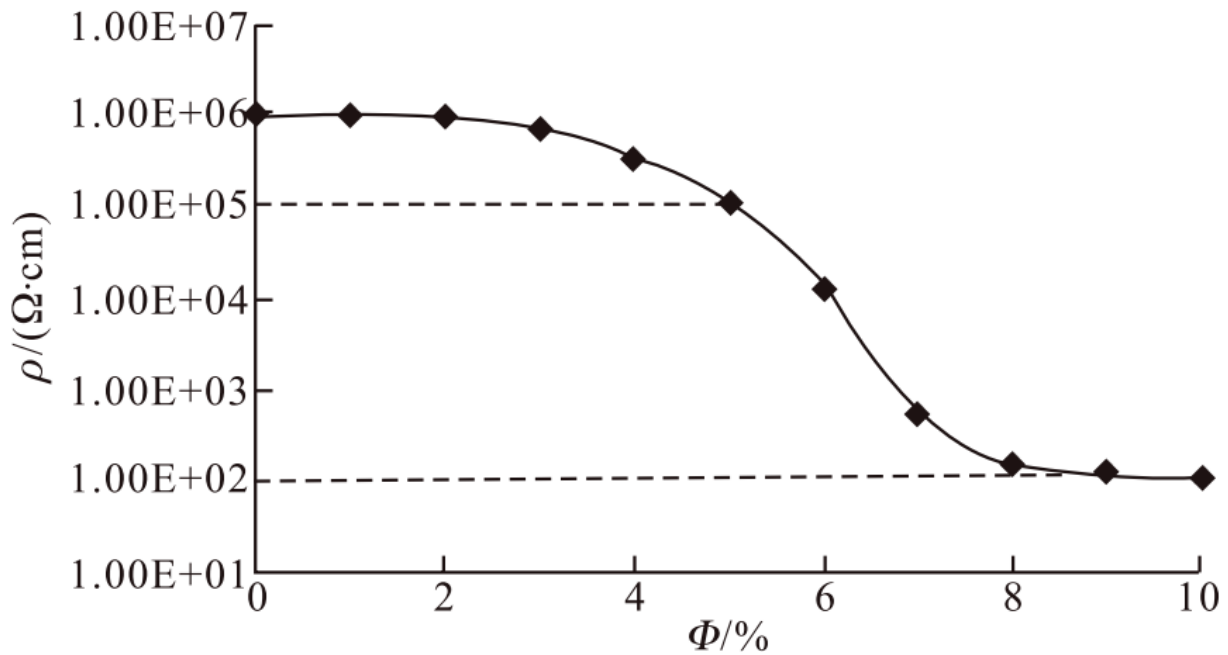
شده JWY-30F و دو مولتی متر دیجیتال UT33C استفاده شد. الکترودهای ساخته شده از ورق های مسی با رزین رسانا به پروفیل های متقاطع نمونه ها چسبانده شدند (شکل ۲ را ببینید). منبع تغذیه تثبیت شده جریان مستقیم و مولتی مترهای دیجیتال توسط سیم به الکترودها متصل شدند. مقاومت تماس طبق روش قبلی حذف شد [۱۴]. مقاومت محاسبه شده  $\rho$  با محتویات کربن سیاه متفاوت  $\Phi$  در شکل ۳ نشان داده شده است. همانطور که از شکل ۳ مشاهده می شود، مقاومت بتن آسفالتی با افزایش محتوای کربن سیاه کاهش یافت. در یک ناحیه باریکتر که محتوای کربن سیاه بین ۵ تا ۸ درصد بود، تغییر مقاومت به بیش از ۳ مرتبه بزرگی رسید. این ناحیه را می توان به عنوان "منطقه نفوذ" تعریف کرد و آستانه نفوذ در اینجا ظاهر شد [۱۵]. محتویات کربن سیاه انتخاب شده برای آزمایش دمای مقاومت، ۵، ۶، ۷ و ۸ درصد از کل محتوای سنگدانه، در این ناحیه بود.



شکل ۲. روش دو الکترودی.



# ماهنامه علمی تخصصی پایا شهر



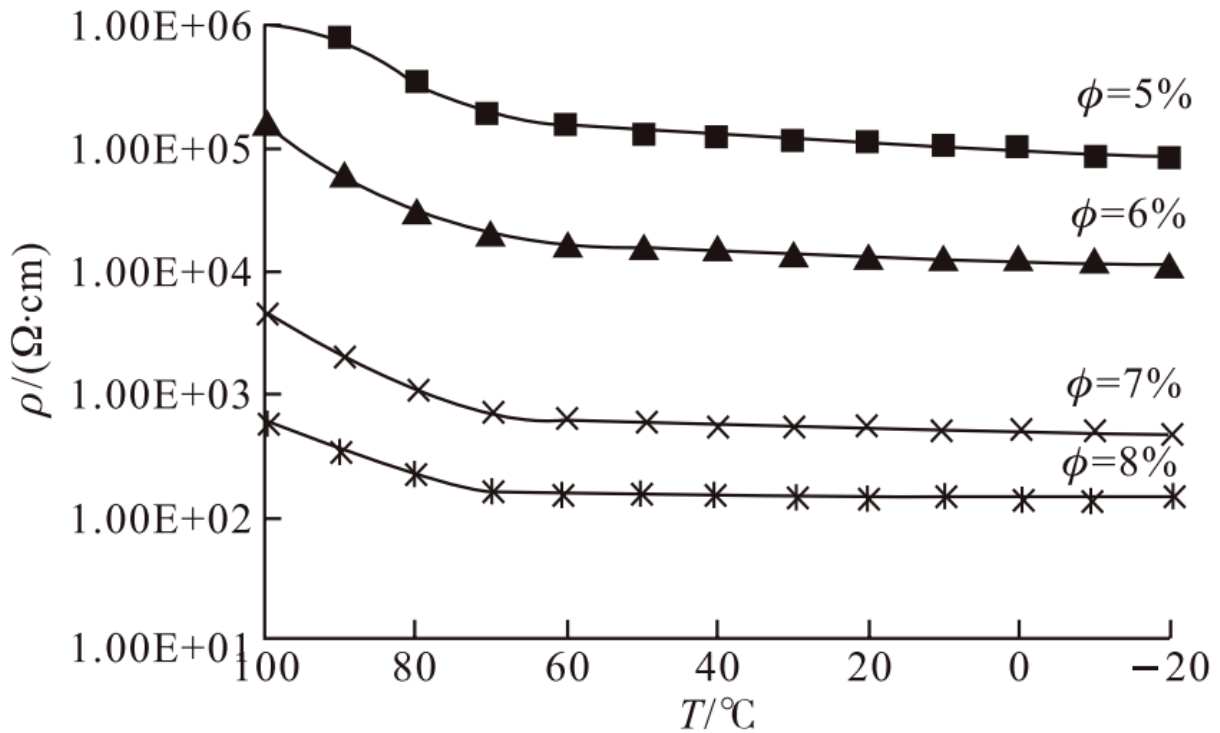
شکل ۳. محاسبه مقاومت با محتوای کربن سیاه مختلف.

### ۳-۲- ویژگی های دمای مقاومت با محتویات کربن سیاه مختلف

مقاومت نمونه های انتخاب شده در دماهای مختلف مورد آزمایش قرار گرفت. در ابتدا، مقاومت در فرآیند خنک سازی نمونه ها پس از قالب گیری مورد آزمایش قرار گرفت. سپس، زمانی که دمای نمونه به ۷۰ درجه سانتی گراد کاهش یافت، مخلوط سفت شد. به منظور حصول اطمینان از توزیع یکنواخت دما، نمونه به مدت ۶ ساعت قبل از آزمایش مقاومت در دمای ثابت در دستگاه کالورستات قرار داده شد. بنابراین دمای آزمایش را می توان به دو بخش تقسیم کرد: ۷۰ تا ۱۰۰ درجه سانتی گراد (بخش a، خنک کننده طبیعی)، و از ۲۰ تا ۷۰ درجه سانتی گراد (بخش b، کنترل کالریستات). ویژگی های دمای مقاومت با محتویات کربن سیاه متفاوت را می توان در شکل ۴ مشاهده کرد. همانطور که در شکل ۴ نشان داده شده است، با کاهش دما، تمام مقاومت به تدریج کاهش می یابد، که پدیده ضریب دمایی مثبت را نشان می دهد.



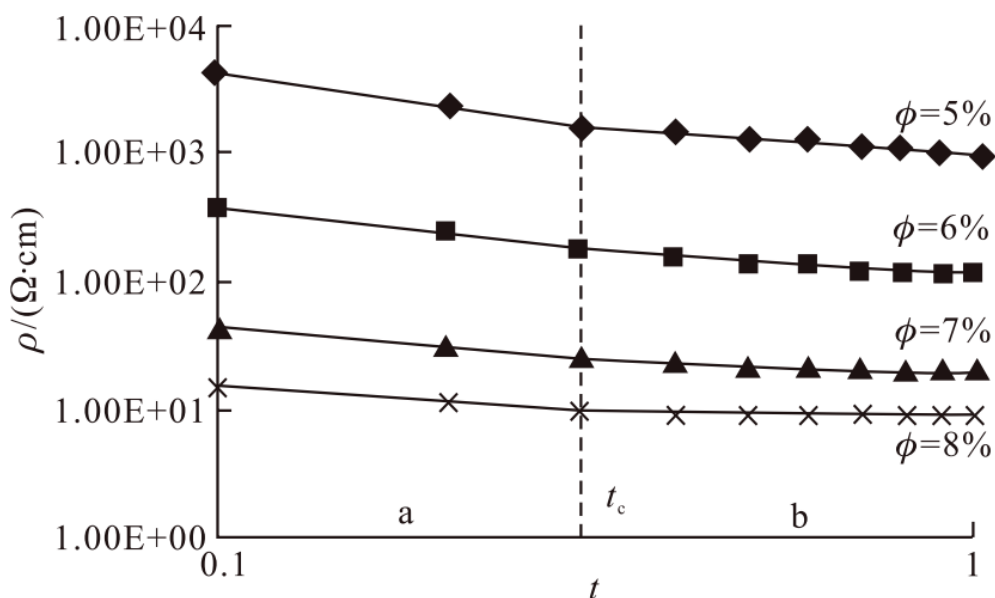
# ماهنامه علمی تخصصی پایا شهر



شکل ۴. ویژگی های دمایی مقاومت با محتوای کربن سیاه متفاوت.

## ۴- ایجاد مدل ضریب دمایی مثبت

به منظور مقایسه وابستگی به دمایی نمونه های مختلف، ۱۰۰ درجه سانتی گراد به عنوان دمایی حد  $T_0$ ، دمایی نسبی  $t$  به عنوان  $(T_0 - T)/T_0$  تعریف شد. مقاومت با دماهای نسبی مختلف  $t$  در شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل ۵. مقاومت با دمایی نسبی متفاوت  $t$ .



# ماهنامه علمی تخصصی پایا شهر



از شکل ۵، تحت شرایط هر محتوای کربن سیاه، زمانی که دمای نسبی  $t$  در نزدیکی نقطه نرم شدن آسفالت  $t_c$  قرار دارد، یک نقطه عطف روی منحنی دمای مقاومت ظاهر می شود. در نتیجه روند نزولی کندتر شد. در شکل ۵، لگاریتم مقاومت در هر دو طرف دمای نسبی به ترتیب یک رابطه خطی داشت. تمام منحنی ها را می توان با توجه به شیب ها به دو بخش ( $a$  و  $b$ ) طبقه بندی کرد. محتوای کربن سیاه تنها بر روی شیب خط مستقیم تأثیر داشت. در این دو بخش، وابستگی دمایی نمونه ها متفاوت بود که به ترتیب می توان آن ها را با اشکال رابطه های زیر نشان داد:

$$\rho_a = At^{-a}, (t < t_c) \quad (1)$$

$$\rho_b = Bt^{-b}, (t > t_c) \quad (2)$$

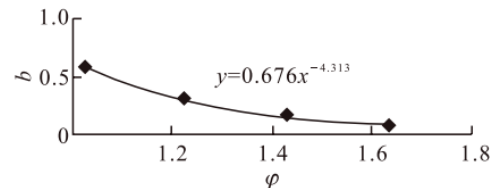
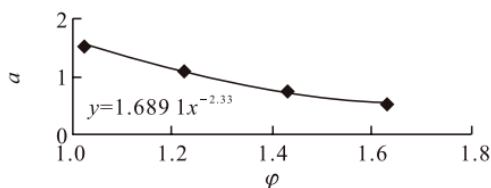
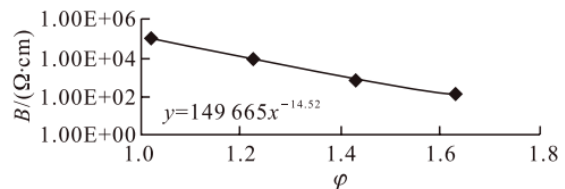
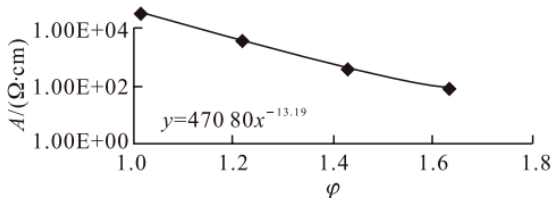
که در آن  $\rho_a$  مقاومت در بخش  $a$ ، اهم در سانتی متر است.  $\rho_b$  مقاومت در بخش  $b$ ، اهم در سانتی متر است. با رگرسیون داده های آزمون مطابق فرمول های بالا، می توان مقادیر چهار پارامتر  $A$ ،  $B$ ،  $a$  و  $b$  را به دست آورد. پارامترهای با محتوای کربن سیاه متفاوت در جدول ۲ نشان داده شده است.

جدول ۲. پارامترهایی با محتوای کربن سیاه متفاوت.

$\Phi$	$A/(\Omega.m)$	$a$	$B/(\Omega.m)$	$b$
۵	۳۲۰/۸۸	۱,۴۷۴	۹۸۳/۸۸	۰,۵۰۷
۶	۵۰۷/۵,۶	۱,۱۴۵	۱۲۱/۹۰	۰,۳۵۹
۷	۲۴۶/۸	۰,۸۴۲	۵۱۸/۲۱	۰,۱۷۵
۸	۹۱/۰,۴	۰,۴۷۴	۱۴۵/۵۷	۰,۰۶۵

با استفاده از مقادیر برازش پارامترهای ذکر شده در بالا، ویژگی های دمای مقاومت بتن آسفالتی رسانا با محتوای کربن سیاه خاص را می توان به خوبی بیان کرد. تمام مقادیر پارامترها به طور منظم با افزایش محتوای سیاه کربن کاهش می یابد. برای راحتی محاسبه، محتوای نسبی کربن سیاه  $\varphi$  به عنوان  $\Phi/\Phi_{c1}$  تعریف شد که  $\Phi_{c1}$  به میزان ۴,۹٪ بود. رابطه بین  $\varphi$  و چهار پارامتر در شکل ۶ نشان داده شده است. از شکل ۶، چهار پارامتر  $A$ ،  $B$ ،  $a$  و  $b$  و معادلات زیر را برآورده کرد:

$$A = A_0 \varphi^{-j} \quad (3)$$



شکل ۶. رابطه بین  $\Phi$  و چهار پارامتر.



# ماهنامه علمی تخصصی پایا شهر



$$a = a_0 \varphi^{-k} \quad (4)$$

$$B = B_0 \varphi^{-l} \quad (5)$$

$$b = b_0 \varphi^{-m} \quad (6)$$

با توجه به معادلات رگرسیون در شکل ۶، مقادیر پارامترهای  $A_0$ ،  $j$ ،  $a_0$ ،  $k$ ،  $B_0$ ،  $l$ ،  $b_0$ ، و  $m$  را می توان به دست آورد که در جدول ۳ نشان داده شده است.

جدول ۳. مقادیر پارامترها.

$A_0/(\Omega.cm)$	$j$	$a_0$	$k$	$B_0/(\Omega.cm)$	$l$	$b_0$	$m$
۴۷۰۸۰	۱۳,۱۹	۱,۶۸۹۱	۲,۳۳	۱۴۹۶۶۵	۱۴,۵۲	۰,۶۷۶	۴,۳۱۳

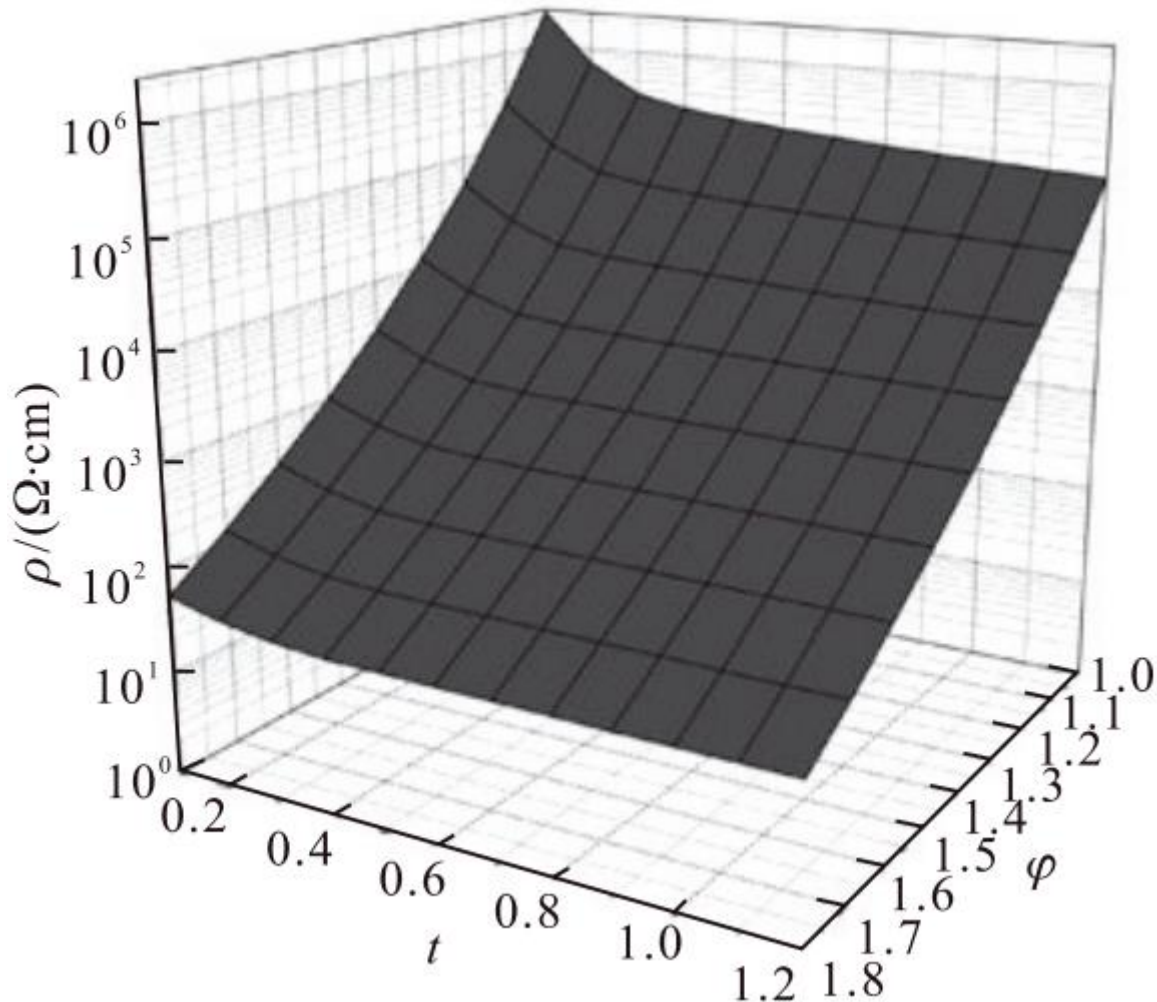
با قرار دادن معادلات ۳ و ۶ در معادلات ۱ و ۲، مدل ضریب دمایی مثبت را می توان به صورت زیر بدست آورد:

$$\rho_a = A_0 \varphi^{-j} t^{-a_0 \varphi^{-k}}, (t < t_c) \quad (7)$$

$$\rho_b = B_0 \varphi^{-l} t^{-b_0 \varphi^{-m}}, (t > t_c) \quad (8)$$

از فرمول های قبلی، این مدل بر اساس تجزیه و تحلیل آماری داده های آزمون بود. در این مدل، مقاومت عمدتاً تحت تأثیر دما و محتوای سیاه کربن است. با توجه به مقادیر برازش پارامترهای جدول ۳، مقاومت با تغییرات دما و مقدار کربن سیاه را می توان با مدل ضریب دمایی ثابت محاسبه کرد، همانطور که در شکل ۷ نشان داده شده است.



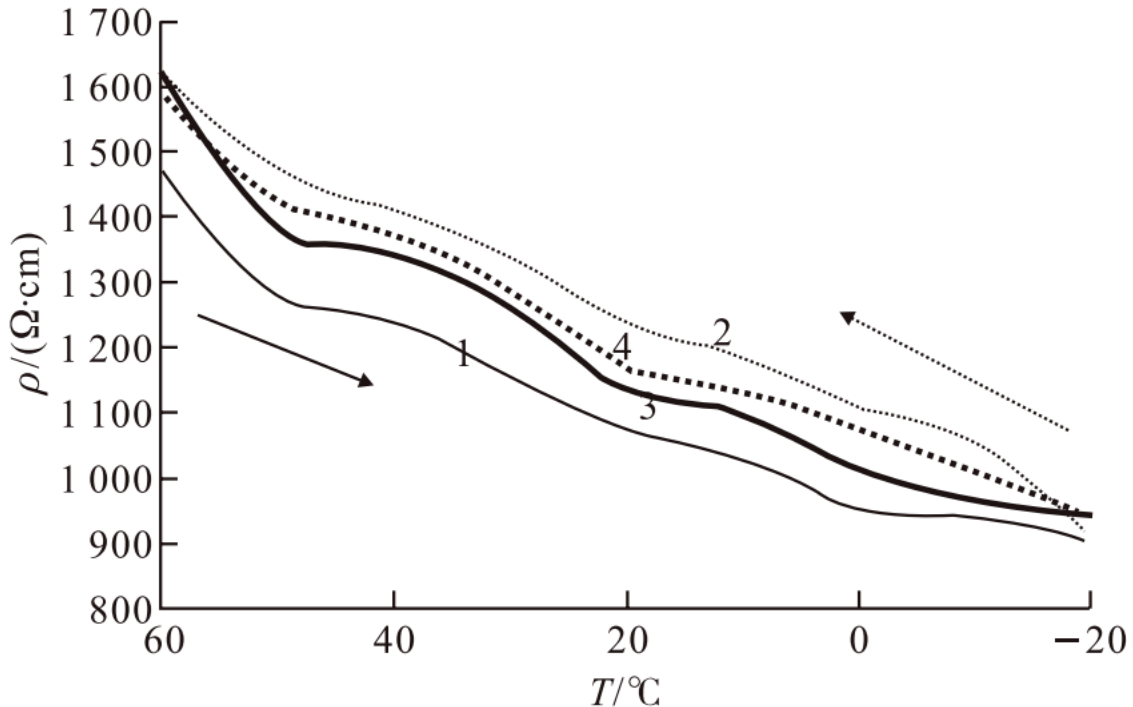


شکل ۷. مقاومت با تغییرات دما و محتوای کربن سیاه.

همانطور که از گرافیک سه بعدی بالا مشاهده می شود، زمانی که دمای نسبی و محتوای سیاه کربن به ترتیب افزایش یافت، مقاومت بتن آسفالت رسانا کاهش یافت. هنگامی که دو پارامتر به طور همزمان افزایش یافتند، روند نزولی مقاومت آشکارتر خواهد بود. اگر نوع پرکننده رسانا یا شبکه نفوذ اولیه تغییر کند، پارامترها در مدل ضریب دمایی ثابت تغییرات متناظری دارند. پارامترهای  $a$  و  $b$  در سیستم کامپوزیت گرافیت آلیاژ حافظه شکل کوچکتر از سیستم کامپوزیت آلیاژ حافظه شکل کربن سیاه بود که نشان داد روند نزولی منحنی دمای مقاومت سیستم کامپوزیت گرافیت آلیاژ حافظه شکل کمتر از سیستم کامپوزیت آلیاژ حافظه شکل کربن سیاه بود. و پارامترهای  $a$  و  $b$  در کامپوزیت گرافیت آلیاژ حافظه شکل ۱۳ کوچکتر از کامپوزیت گرافیت آلیاژ حافظه شکل ۱۰ بود که ناشی از اختلاف شبکه های نفوذ اولیه بود. اما با تغییر نوع پرکننده رسانا و شبکه نفوذ اولیه، تمام منحنی های دمای مقاومت با افزایش محتوای پرکننده رسانا کاهش یافت و تغییرات مقاومت با دما دارای ویژگی مشابهی بود که منحنی دمای مقاومت دارای یک نقطه عطف حول نقطه نرم شدن بود. آسفالت می توان نتیجه گرفت که منشاء فیزیکی اثر ضریب دمایی ثابت مستقل از نوع پرکننده رسانا و شبکه نفوذ اولیه است. مدل ضریب دمایی ثابت یک مدل آماری بود که رابطه بین مقاومت و دما را ایجاد کرد، اما این مدل نمی توانست مکانیسم اثر دما بر مقاومت را درگیر کند.

## ۵- مکانیسم اثر دما بر روی مقاومت

محیط دمای میدان روسازی با دو فرآیند گرمایش و سرمایش شبیه‌سازی شد که در آن دمای بین ۶۰ درجه سانتی‌گراد و ۲۰- درجه سانتی‌گراد بر روی نمونه اعمال شد. مشخصات دمای مقاومت در شکل ۸ نشان داده شده است.



شکل ۸. ویژگی‌های دمای مقاومت در چرخه دما (۶۶٪).

در شکل ۸، خط خاکی فرآیند خنک کردن را نشان می‌دهد، و خط نقطه چین نشان دهنده فرآیند گرمایش است. در فرآیند چرخه دما، فرآیندهای گرمایش و سرمایش نشان داده شده توسط دو منحنی تصادفی نبودند. در دور اول چرخه حرارتی، مقاومت ابتدا در فرآیند خنک‌سازی کاهش یافت و سپس با افزایش دما افزایش یافت. این دو منحنی در دمای ۲۰- درجه سانتی‌گراد همپوشانی داشتند. پس از آن، منحنی گرمایش از منحنی سرمایش منحرف شد. سپس در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد منحنی گرمایش با منحنی خنک‌کننده بعدی در دور دوم همپوشانی داشت، این منحنی خنک‌کننده به انحراف از آخرین منحنی گرمایش ادامه داد. این نشان داد که چرخه دما تأثیر خاصی بر مقاومت دارد. مقاومت پس از چرخه دما نتوانست به مقدار اولیه بازگردد و مقاومت غیرقابل برگشت بود. اما در مقایسه با دور اول سیکل حرارتی، درجه انحراف در دور دوم بسیار کمتر بود. نشان داده شده است که ویژگی‌های دمای مقاومت بتن آسفالت رسانا پس از چندین چرخه دمایی تثبیت می‌شود، تداخل چرخه دما کمتر خواهد بود. در فرآیند تغییرات دما، به دلیل عدم قطعیت حرکت حرارتی مولکولی، حالت تماس ذرات رسانا و بایندر آسفالت به طور تصادفی تغییر می‌کند. تغییرات موقعیت نسبی ذرات رسانا باعث تغییرات شبکه نفوذی شد. در نمای میکروسکوپی، بالا و پایین رفتن رسانایی بتن آسفالتی رسانا است. به همین دلیل است که منحنی‌های مقاومت-دما نقطه عطف حول نقطه نرم شدن آسفالت داشتند. زمانی که دما کمتر از نقطه نرم شدن آسفالت باشد، چون پرکننده رسانا و آسفالت دارای ضرایب انبساط حرارتی متفاوتی هستند، در فرآیند افزایش دما، اختلاف درجه انبساط حجمی بین دو فاز منجر به افزایش فاصله بین ذرات رسانا می‌شود. سپس برخی از کانال‌های رسانا قطع شده و شبکه نفوذ تا حدودی آسیب می‌بیند که باعث افزایش مقاومت سیستم کامپوزیت می‌شود. هنگامی که دما از نقطه نرم شدن آسفالت بیشتر می‌شود، حرکت حرارتی مولکول‌ها در سیستم کامپوزیت آلیاژ حافظه شکل سیاه کربن تشدید می‌شود. بخشی از بی‌نهایت خوشه‌های رسانا تجزیه شده و این منجر به گسست کانال‌های رسانا و



# ماهنامه علمی تخصصی پایا شهر

افزایش مقاومت کل سیستم می شود. ذرات رسانا در یک دمای معین با هم ترکیب شدند تا یک حالت پایدار محلی را تشکیل دهند. پس از یک چرخه دما، این بخش از ذرات رسانا ممکن است به ناحیه دیگری منتقل شود، این امر باعث می شود که ویژگی های دمایی مقاومتی تکرارپذیری ضعیفی در فرآیند چرخه دما داشته باشد. با این حال، با افزایش چرخه های دما، حذف ذرات رسانا نیز به حالت تکرار شدنی تمایل پیدا کرد. در نمای ماکروسکوپی، منحنی گرمایش و سرمایش تمایل به منطبق داشت.

## ۶- نتیجه گیری

ویژگی های مقاومت بتن آسفالتی رسانا در دماهای مختلف مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. با کاهش دما، تمام مقاومت به تدریج کاهش یافت، پدیده ضریب دمایی مثبت ارائه شد. تحت شرایط هر محتوای کربن سیاه، زمانی که دمای نسبی  $t$  در نزدیکی نقطه نرم شدن آسفالت  $t_c$  قرار می گیرد، یک نقطه عطف روی منحنی دمای مقاومت ظاهر می شود. منحنی های دمای مقاومت را می توان با توجه به شیب ها به دو بخش طبقه بندی کرد، سپس مدل ضریب دمایی مثبت را می توان بر اساس تجزیه و تحلیل آماری داده های آزمون ایجاد کرد. و تاثیر نوع پرکننده رسانا و شبکه نفوذ اولیه بر مدل ضریب دمایی مثبت مورد بحث قرار گرفت. بنابراین ویژگی های دمای مقاومت را می توان به صورت کمی ارزیابی کرد. چرخه دما تأثیر خاصی بر مقاومت داشت، مقاومت پس از چرخه دما نمی توانست به مقدار اولیه برگردد و مقاومت برگشت ناپذیر بود. اما ویژگی های دمای مقاومت بتن آسفالتی رسانا پس از چرخه های دمای زیاد تثبیت می شود. با تجزیه و تحلیل بیشتر، تغییرات ساختار شبکه نفوذی ناشی از تغییرات دما باعث ظهور ضریب دمایی مثبت بتن آسفالتی رسانا شد.

## منابع و مراجع

1. García Á, Schlangen E, Ven, et al. Electrical Conductivity of Asphalt Mortar Containing Conductive Fibers and Fillers[J]. Constr. Build. Mater., 2009, 23(10): 3 175-3 181.
2. Huang B, Cao J, Chen X, et al. Investigation into Electrically Conductive HMA Mixtures[J]. J. Assoc. Asphalt Pav. Technol., 2006, 75CD: 1137-1155.
3. Liu X, Wu S, Li N. Properties Evaluation of Asphalt-based Composites with Graphite and Mine Powder[J]. Constr. Build. Mater., 2008, 22(3):121-6.
4. Yehia S, Tua C. Thin Conductive Concrete Overlay for Bridge Deck Deicing and Anti-icing[J]. Transport. Res. Rec., 2000, (1698): 45-53.
5. García Á, Schlangen E, Ven M, et al. Induction Heating of Mastic Containing Conductive Fibers and Fillers[J]. Mater. Struct., 2011, 44(2): 499-508.
6. Wu S, Mo L, and Shui Z. Piezoresistivity of Graphite Modified Asphaltbased Composites[J]. Key Eng. Mater., 2003, 249.
7. Chen M, Wu S, Zhang Y, et al. Effects of Conductive Fillers on Temperature Distribution of Asphalt Pavements[J]. Physica Scripta Volume T, 2010, 2010(T139): 014046.
8. Wu S, Chen M, Wang H, et al. Laboratory Study on Solar Collector of Thermal Conductive Asphalt[J]. International Journal of Pavement Research and Technology, 2009, 2(4): 130-136.
9. Ding Q, Wu X, Liu X, et al. Electrical Performance of Conductive SMA Containing Graphite[J]. J. Build. Mater., 2009, 12(1): 121-125.
10. Liu X, Wu S. Research on the Conductive Asphalt Concrete's Piezoresistivity Effect and Its Mechanism[J]. Constr. Build. Mater., 2009, 23: 2 752-2 756.
11. Liu X, Wu S, Yang X. Smart Characteristics of Conductive Asphalt Concrete[J]. J. Cent. South Univ. (Science and Technology), 2009, 40(5): 1 465-1 470.
12. Liu X, Wu S. Study on the Graphite and Carbon Fiber Modified Asphalt Concrete[J]. Constr. Build. Mater., 2011, 25: 1807-1811.
13. Huang B, Chen X, Shu X. Effects of Electrically Conductive Additives on Laboratory-Measured Properties of Asphalt Mixtures[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2009, 21(10): 612-617.



# ماهنامه علمی تخصصی پایا شهر



14. Yang Q, Li X, Wang P. Resistivity Measurement of Conductive Asphalt Concrete Based on Two-electrode Method[J]. J. Cent. South Univ., 2013: 2 599-2 604.
15. Mo L, WU S, Liu X, et al. Percolation Model of Graphite-modified Asphalt Concrete[J]. J. Wuhan Univ. Technol. -Mater. Sci. Ed., 2005, 20(1): 111-113.