

Primljen / Received: 24.3.2023.

Ispravljen / Corrected: 10.6.2024.

Prihvaćen / Accepted: 7.8.2024.

Dostupno online / Available online: 10.10.2024.

# Modeliranje električne vodljivosti grafitom modificiranog asfaltbetona na temelju mikromehanike

## Autori:

Doc.dr.sc. **Yi Yang**, dipl.ing.građ.

Sveučilište za znanost i tehnologiju u Jiangxiu

Građevinski fakultet

Nanchang, Kina

[yangy@jxstnu.edu.cn](mailto:yangy@jxstnu.edu.cn)

Autor za korespondenciju

Izv.prof.dr.sc. **Canlong Wu**, dipl.ing.građ.

Sveučilište za znanost i tehnologiju u Jiangxiu

Fakultet za znanost o velikim podacima

Nanchang, Kina

[wucl@jxstnu.edu.cn](mailto:wucl@jxstnu.edu.cn)

Prethodno priopćenje

**Yi Yang, Canlong Wu**

## Modeliranje električne vodljivosti grafitom modificiranog asfaltbetona na temelju mikromehanike

U ovom je radu predložena nova teorija mikromehanike za modeliranje električne vodljivosti grafitom modificiranog asfaltnog betona. Ograničenje raspona električne vodljivosti izvedeno je prema Hashin–Shtrikmanovoj (H–S) metodi. Na temelju konzistentne metode (SC) i teorije perkolacije, izmijenjena samokonzistentna metoda (MSC) primijenjena je za razvoj modela električne vodljivosti. Rezultati predviđeni MSC modelom uspoređeni su s ispitnim podacima prilagođavanjem razmjera proporcija i potencije perkolacije. O ovoj novoj teoriji i njezinoj primjeni na grafitom modificiranom asfaltbetonu raspravlja se u ovom radu, a dokazano je da se pretpostavljene vrijednosti uvelike slažu s podacima ispitivanja.

### Ključne riječi:

asfaltbeton, grafit, električna vodljivost, mikromehanika, izmijenjena samokonzistentna metoda (MSC)

Research Paper

**Yi Yang, Canlong Wu**

## Modelling for the electrical conductivity of graphite-modified asphalt concrete based on micromechanics

This paper proposes a novel micromechanics theory to model the electrical conductivity of graphite-modified asphalt concrete. The constraint range of electrical conductivity was derived according to the Hashin–Shtrikman (H–S) method. Based on the self-consistent (SC) method and percolation theory, a modified self-consistent (MCS) method was used to develop the electrical conductivity model. The results predicted by the MSC model were compared with the test data by adjusting the aspect ratio and percolation exponent. We highlight this new theory and its application to graphite-modified asphalt concrete, and demonstrate that the predicted values are in close agreement with the test data.

### Key words:

asphalt concrete, graphite, electrical conductivity, micromechanics, modified self-consistent (MSC) method

## 1. Uvod

Asfaltbeton je dobar izolacijski materijal. Ugljična punila, poput grafitnih čestica, pomiješana s asfaltbetonom mogu značajno poboljšati njegovu električnu vodljivost. Dodavanjem punila mijenja se uobičajena izvedba asfaltbetona i poboljšavaju se njegova električna svojstva. Grafitom modificirani asfaltbeton može se upotrijebiti za topljenje leda na kolnicima i mostovima, čime se sprječavaju štetni učinci leda i osigurava veća sigurnost prometa. Čestice grafita, kao vodljiva punila, mogu značajno povećati vodljivost asfaltbetona. Kada se udio provodljivih čestica u mješavini poveća do određene mjere, čestice dolaze u doticaj jedna s drugom kako bi stvorile elektroprovodljivu mrežu, što dovodi do povećanja električne provodljivosti mješavine [1]. Grafit, uobičajeni anorganski materijal, pokazuje dobra svojstva vodljivosti. Također se upotrebljava kao sredstvo protiv trenja i materijal za podmazivanje. Zahvaljujući ovim svojstvima, grafit se može upotrijebiti kao električki vodljivo punilo za kompozitni materijal.

Primjenom grafita i karbonskih vlakana kao elektroprovodljivih materijala, Wu i sur. [2] koristeći skenirajući elektronski mikroskop (SEM) prikazali su sliku grafitom modificiranog asfaltbetona. Pan i sur. [3] pripremili su vodljivi asfaltbeton i analizirali svojstva grafita kao primarnog elektroprovodljivog materijala. Liu i sur. [4] analizirali su fraktalne dimenzije elektroprovodljivog asfaltbetona. Otkrili su da put električne vodljivosti vodljivog asfaltbetona pokazuje izvanredna fraktalna svojstva. Trendovi odstupanja fraktalne dimenzije i specifičnog otpora bili su slični onima za udio grafita. Međutim, ova se primjena temeljila na premisi potpunog razumijevanja mehanizma električne vodljivosti. Wang i sur. [5] proučavali su pripremu i vodljivost asfaltbetona koji sadrži grafen i karbonska vlakna. Grafen i karbonska vlakna dodani su asfaltbetonu kako bi se postigla električna i toplinska vodljivost. Grafen je imao komplementarnu ulogu tijekom procesa vodljivosti. Ren i sur. [6] istraživali su učinke kemijske alkalne ekscitacije, ultrazvučne vibracije i kombinirane aktivacije na vodljivi cementni kompozit koji se sastojao od bakrene zgure i nano-grafita. Četin [7, 8] je proučavao porozne asfaltne mješavine koje sadrže otpadnu gumu EPDM (etilen - propilen - dien - monomer) i učinke letećeg pepela i gašenog vapna na propadanje mješavine splitmastiksasfalta (SMA) uslijed vlage. Oner i sur. [9] istraživali su mješavine splitmastiks asfalta (SMA) koje sadrže tekstilni otpad koji se može upotrijebiti umjesto tradicionalnih vlakana. Gáspár i sur. [10] proučavali su ključne čimbenike koji pridonose većoj trajnosti i kvaliteti cestovnih kolnika.

Iako su trenutačna istraživanja koja se odnose na mjerenje električne vodljivosti grafitom modificiranog asfaltbetona provedena upotrebom eksperimentalnih podataka, do danas ne postoji sveobuhvatan mehanizam provodljivosti, koji bi objasnio intrinzična svojstva provodljivosti. Postoji nekoliko reprezentativnih teorija o električnoj vodljivosti, kao što su teorija efektivnog medija, teorija perkolacije i teorija tunelskog efekta. Međutim, složena vodljiva svojstva grafitom

modificiranog asfaltbetona ne mogu se objasniti pomoću ovih različitih metoda vodljivosti. Pal [11] je predstavio teoriju efektivnog medija za predviđanje vodljivosti čestica kompozita. U teorijskoj fizici, samokonzistentna (SC) metoda pojednostavljuje problem više čestica u problem jedne čestice, koji se može preciznije riješiti. [12-14]. Na temelju metode mikromehanike elipsoidnih inkluzija u kompozitnim materijalima, dodirna površina inkluzijske matrice, slučajni raspored smjera čestica i raspored veličine čestica mogu se dodatno uzeti u obzir. Mori-Tanaka metoda može se prilagoditi za predviđanje sveobuhvatne vodljivosti čestica ili vlaknima ojačanih kompozita neujednačenih veličina [15]. Nadalje, razvijeni su mikromehanički modeli za proučavanje stvaranja vodljivih mreža i učinaka prijenosa elektrona na vodljiva svojstva nanokompozita [16, 17]. Teorija kontinuuma predložena je za uspostavljanje vodljivog modela kompozita ugljikovih nanocijevi i nanokompozita grafena, uzimajući u obzir teoriju samokonzistentnosti idealnog sučelja, tankog sučelja s vodljivošću sučelja i statističku funkciju vodljivosti sučelja uslijed povećanja učinka elektronskog tuneliranja [18-21]. Jang i sur. [22] predložili su sveobuhvatan model temeljen na mikromehanici za razmatranje učinaka različitih sastava materijala na vodljivost vodom zasićenih ugljikovih nanocijevi i cementnih kompozita. Haghgooa i sur. [23] analizirali su učinak punila na električnu vodljivost i električni otpor čađe/polimernih nanokompozita ojačanih karbonskim vlaknima upotrebom modela perkolacijske električne mreže i dvostupanjskog analitičkog Mori-Tanaka mikromehaničkog modela. Kil i sur. [24] odredili su električnu vodljivost kompozita koji sadrže ugljikove nanocijevi i karbonska vlakna na temelju mikromehaničkog modela te su primijenili genetski algoritam za određivanje optimiziranih parametara modela. Rezultati su pokazali da je kombinacija modela i genetskog algoritma rezultirala boljom simulacijom. Dalje su istraženi učinci orijentacije vlakana, električne vodljivosti i razmjera proporcija na električnu vodljivost nanokompozita s više razmjera. Yang i sur. [25] analizirali su utjecaj oblika čestica grafita na vodljivost grafitnih kompozita u dvodimenzionalnom sustavu primjenom Eshelbyjevog pristupa višekutnih inkluzija. Zbog složenosti rješavanja trodimenzionalnog višekutnog inkluzijskog Eshelbyjevog tenzora, razmatrana je jednostavnija ravna sferna inkluzija za stvaranje vodljivog modela za grafitom modificirani asfaltbeton u trodimenzionalnom sustavu.

U ovom radu istražuje se mikromehanička teorija grafitom modificiranog asfaltbetona. Hashin-Shtrikmanova metoda pruža širok raspon granica električne vodljivosti. Izmijenjena samokonzistentna metoda (MSC) kombinira teoriju perkolacije i samokonzistentnu metodu (SC). Stoga je prikladnija za predviđanje električne vodljivosti grafitom modificiranog asfaltbetona. Izmijenjena samokonzistentna metoda (MSC) usvojena je za predviđanje električne vodljivosti i analizu utjecajnih čimbenika predložene metode. Ta metoda pruža podršku za temeljito istraživanje mehanizma vodljivosti kompozita čestica u budućnosti. Utjecaj eksponenta

perkolacije  $t$  na predviđenu vrijednost električne vodljivosti je važna. Ovaj je parametar povezan s dimenzijama sustava. U trodimenzionalnom sustavu, teorijska vrijednost  $t$  je u rasponu od 1,65 do 2,0. Zbog utjecaja oblika grafitnih čestica, stvarna vrijednost  $t$  obično prelazi prethodno navedeni raspon. Carmona i sur. [26] predložili su da bi vrijednost  $t$  grafitnog polimernog kompozita mogla doseći 3,1. Quivy i sur. [27] predložili su da bi vrijednost  $t$  mogla doseći čak 6,27. U ovom istraživanju odabrane vrijednosti  $t$  su 1,65, 2,0, 3,1 i 6,27 za MSC model.

Električna vodljivost grafitom modificiranog asfaltbetona uglavnom je analizirana testovima, a detaljnija teorijska i mehanička istraživanja znanstvenika iz srodnog područja ne postoje. U ovom je radu mikromehanička metoda predstavljena za teorijsko proučavanje granice perkolacije i učinaka veličine grafita na električnu vodljivost grafitom modificiranog asfaltbetona. Najprije je definiran raspon ograničenja električne vodljivosti istraživanjem Hashin-Shtrikmanove (H-S) metode. Razmatranje čestica grafita kao spljoštene sferoidne inkluzije realističnije je od sferne inkluzije. Eshelbyjev tenzor i teorija perkolacije primijenjeni su za prilagođavanje samokonzistentne metode. Zatim je korištena izmijenjena samokonzistentna metoda za razvoj modela električne vodljivosti. Na posljedku, rezultati predviđeni MSC modelom uspoređeni su s onima dobivenim iz ispitnih podataka podešavanjem razmjera proporcija i potencije perkolacije.

## 2. Teorija mikromehanike

Prije primjene teorije mikromehanike, definirane su sljedeće pretpostavke: pretpostavili smo da se heterogeni materijal sastoji od matrice faze i elipsoidnih nehomogenosti. U grafitom modificiranom asfaltbetonu, grafit je upotrijebljen kao inkluzijska faza, a asfaltbeton kao matrice faza. Prema Ohmovom zakonu može se dobiti izraz (1):

$$\mathbf{J} = \bar{\sigma} \mathbf{E} \quad (1)$$

pri čemu je  $\mathbf{J}$  vektor ukupnog električnog toka,  $\mathbf{E}$  je vektor ukupnog električnog polja, a  $\bar{\sigma}$  je električna vodljivost grafitom modificiranog asfaltbetona. Za izotropni medij, električna vodljivost je skalar, a za anizotropni medij, električna vodljivost je tenzor.

Grafitom modificirani asfaltbeton sastoji se od faze grafita visoke vodljivosti (vodljivost je  $\sigma_1$ ) i matrice niske vodljivosti (vodljivost je  $\sigma_0$ ).

Kada su u matrici (asfaltni beton) bile prisutne elipsoidne inkluzije (čestice grafita), dobiven je perturbirani vektor električnog toka, označen kao  $\mathbf{J}_1$ . Ukupni vektor električnog toka je zbroj dvaju vektora električnih tokova, tj.  $\mathbf{J}_0 + \mathbf{J}_1$ .

Primjenom Ohmovog zakona u poljima  $\Omega$  i  $D-\Omega$ , dobiveno je:

$$\mathbf{J} = \mathbf{J}_0 + \mathbf{J}_1 = \sigma_1 (\mathbf{E}_0 + \mathbf{E}_1^{pt}) \quad \text{u } \Omega \quad (2)$$

$$\mathbf{J} = \mathbf{J}_0 + \mathbf{J}_1 = \sigma_0 (\mathbf{E}_0 + \mathbf{E}_1^{pt}) \quad \text{u } D-\Omega \quad (3)$$

pri čemu su  $D$ ,  $\Omega$  i  $D-\Omega$  domene grafitom modificiranog asfaltbetona, grafitnih čestica i asfaltbetona. Vektor perturbiranog električnog polja označava se kao  $\mathbf{E}_1^{pt}$ .

Zatim je razmatrano homogeno tijelo  $D$  (graitom modificirani asfaltbeton) koje sadrži inkluziju  $\Omega$  (čestice grafita) s  $\mathbf{E}_1^*$ .  $\mathbf{E}_1^*$  je uveden za simulaciju nehomogenosti. Drugim riječima, stvoren je problem inkluzije, koji pravilnim prilagođavanjem vrijednosti  $\mathbf{E}_1^*$ , ima isto električno polje kao problem nehomogenosti [28]. Za problem inkluzije, prema Ohmovom zakonu dobivaju se izrazi (4) i (5):

$$\mathbf{J} = \mathbf{J}_0 + \mathbf{J}_1 = \sigma_0 (\mathbf{E}_0 + \mathbf{E}_1^{pt} - \mathbf{E}_1^*) \quad \text{za } \Omega \quad (4)$$

$$\mathbf{J} = \mathbf{J}_0 + \mathbf{J}_1 = \sigma_0 (\mathbf{E}_0 + \mathbf{E}_1^{pt}) \quad \text{za } D-\Omega \quad (5)$$

Kombiniranjem izraza (2) i (4) dobiveno je sljedeće:

$$\sigma_1 (\mathbf{E}_0 + \mathbf{E}_1^{pt}) = \sigma_0 (\mathbf{E}_0 + \mathbf{E}_1^{pt} - \mathbf{E}_1^*) \quad (6)$$

pri čemu je  $\mathbf{E}_1^*$  Eshelbyjev ekvivalentni transformacijski vektor električnog polja. Vektor perturbiranog električnog polja  $\mathbf{E}_1^{pt}$  odnosi se na  $\mathbf{E}_1^*$  kako slijedi:

$$\mathbf{E}_1^{pt} = \mathbf{S}_1 \mathbf{E}_1^* \quad (7)$$

pri čemu  $\mathbf{S}_1$  označava Eshelbyjev tenzor.

Zamjenom izraza (7) u izrazu (6) vrijedi,

$$\mathbf{E}_1^* = -[\mathbf{S}_1 + (\sigma_1 - \sigma_0)^{-1} \sigma_0]^{-1} \mathbf{E}_0 \quad (8)$$

Ukupni vektor električnog polja u inkluzijama može se izraziti kao

$$\mathbf{E}_1 = \mathbf{E}_0 + \mathbf{E}_1^{pt} = \mathbf{E}_0 + \mathbf{S}_1 \mathbf{E}_1^* = \mathbf{T}_1 \mathbf{E}_0 \quad (9)$$

pri čemu vrijedi:

$$\mathbf{T}_1 = [\mathbf{I} + \mathbf{S}_1 \sigma_0^{-1} (\sigma_1 - \sigma_0)]^{-1} \quad (10)$$

$\mathbf{T}_1$  se definira kao faktor koncentracije, a  $\mathbf{I}$  jedinični tenzor.

### 2.1. Hashin-Shtrikmanova metoda

Hashin-Shtrikmanova metoda postavlja gornja i donja ograničenja izvedena pomoću varijacijskih teorema. Ta se ograničenja mogu postići pomoću volumnih udjela i električne vodljivosti inkluzija. Ove su granice smatrane uskim ograničenjima električne vodljivosti kompozita. Prema Hashinu i sur. [29], gornje i donje granice električne vodljivosti za asfaltni beton modificiran grafitom,  $\bar{\sigma}_+$  i  $\bar{\sigma}_-$ , mogu se izraziti na sljedeći način:

$$\bar{\sigma}_- = \sigma_0 \left[ 1 - \frac{3\phi(\sigma_0 - \sigma_1)}{3\sigma_0 - (1-\phi)(\sigma_0 - \sigma_1)} \right] \quad (11)$$

$$\bar{\sigma}_i = \sigma_i \left[ 1 + \frac{3(1-\phi)(\sigma_0 - \sigma_i)}{3\sigma_i + \phi(\sigma_0 - \sigma_i)} \right] \quad (12)$$

gdje  $\phi$  je volumni udio čestica grafita.

## 2.2. Samokonzistentna metoda

Bit samokonzistentne metode sastoji se u tome da razmatra interakcije između inkluzija, pod pretpostavkom da inkluzije postoje samo u određenom ekvivalentnom mediju. Ovo je donekle jednako pretpostavci da su inkluzije u interakciji s matricom, koja uključuje nekoliko drugih inkluzija. Samokonzistentna (SC) teorija pretpostavlja da je vodljivo ponašanje grafitom modificiranog asfaltbetona povezano s vodljivim česticama (čestice grafita) i matricom (asfaltbeton). Morfologija grafitnih čestica i raspodjela faktora utječu na izvedbu grafitom modificiranog asfaltbetona. Kada je volumni udio vodljive faze vrlo nizak, vodljive čestice (čestice grafita) dobro su odijeljene matricom koja je prikladna za SC metodu. Budući da se radi o teoriji srednjeg polja, predviđene vrijednosti kritičnog volumnog udjela uvijek su veće od eksperimentalnih vrijednosti kritičnog volumnog udjela.

Primarna pretpostavka u ovom radu je da se grafitom modificirani asfaltbeton može smatrati uniformnim medijem. Stoga su čestice grafita smatrane jednom inkluzijskom fazom s električnom vodljivošću ( $\sigma_1$ ) u beskonačno uniformnom mediju električne vodljivosti ( $\bar{\sigma}$ ). Faktor koncentracije može se izraziti pomoću izraza (10):

$$\bar{T}_i = [I + \bar{S}_i \bar{\sigma} (\sigma_i - \bar{\sigma})]^{-1} \quad (13)$$

gdje je  $\bar{T}_i$  faktor koncentracije u uniformnom mediju, a  $\bar{S}_i$  Eshelbyjev tenzor u uniformnom mediju.

Pomoću SC metode dobivamo:

$$\bar{\sigma} = \sigma_0 + \phi(\sigma_1 - \sigma_0) \bar{T}_i \quad (14)$$

Zamjenom izraza (13) u izrazu (14):

$$\bar{\sigma} = \sigma_0 + \phi \bar{\sigma} (\sigma_1 - \sigma_0) [\bar{\sigma} + \bar{S}_i (\sigma_1 - \bar{\sigma})]^{-1} \quad (15)$$

Prema Quang i sur. [30], za sferne inkluzije vrijedi  $\bar{S}_i = 1/3$ . Stoga vrijedi:

$$\bar{T}_i = \frac{3\bar{\sigma}}{2\bar{\sigma} + \sigma_1} \quad (16)$$

$$\bar{\sigma} = \sigma_0 + \frac{3\phi\bar{\sigma}(\sigma_1 - \sigma_0)}{2\bar{\sigma} + \sigma_1} \quad (17)$$

## 2.3. Izmijenjena samokonzistentna metoda

Na temelju SC metode predstavljena je izmijenjena samokonzistentna metoda (MSC). Eshelbyjev tenzor povezan

je s oblikom inkluzije. Nadalje, stvarni oblik čestica grafita nije kuglast. U ovom istraživanju pretpostavljalo se da su ljuskave čestice grafita spljoštene sferoidne inkluzije. Prema Hiroshi i sur. [31], za spljoštenu sferoid vrijedi  $a_1 = a_2 > a_3$ . Elementi Eshelbyjevog tenzora mogu se izraziti na sljedeći način:

$$S_{11} = S_{22} = \frac{a_1^2 a_3}{2(a_1^2 - a_3^2)^{3/2}} \left\{ \cos^{-1} \frac{a_3}{a_1} - \frac{a_3}{a_1} \left( 1 - \frac{a_3^2}{a_1^2} \right)^{1/2} \right\} \quad (18)$$

$$S_{33} = 1 - 2S_{22} \quad (19)$$

Eshelbyjev tenzor može se primijeniti za uspostavljanje modela električne vodljivosti za grafitom modificirani asfaltbeton. Ovo se može pojednostaviti u dvodimenzionalni sustav. Eshelbyjev tenzor tada se može izraziti kao:

$$\bar{S} = \begin{bmatrix} S_{11} & 0 \\ 0 & S_{33} \end{bmatrix} \quad (20)$$

Nasumično raspoređene spljoštene sferoidne inkluzije mogu se razmotriti upotrebom transformacijske matrice u dvodimenzionalnom sustavu, pri čemu  $\alpha$  označava kut orijentacije faze inkluzije.

$$K = \begin{bmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha \\ -\sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \quad (21)$$

U dvodimenzionalnom sustavu, električna vodljivost grafitom modificiranog asfaltbetona može se izraziti na sljedeći način:

$$\bar{\sigma} = \sigma_0 + \frac{1}{2\pi} \phi \bar{\sigma} (\sigma_1 - \sigma_0) \int_0^{2\pi} [\bar{\sigma} + K^T \cdot \bar{S}_i \cdot K \cdot (\sigma_1 - \bar{\sigma})]^{-1} d\alpha \quad (22)$$

Na temelju teorije perkolacije vrijedi:

$$\bar{\sigma}^{nr} = \sigma_1^{nr} (\phi - \phi_c) \quad (23)$$

gdje  $\phi_c$  označava granicu perkolacije, a  $t$  je potencija perkolacije. Parametar  $t$  je potencija perkolacije, koja ovisi o dimenzijama sustava. Iz izraza (22) i izraza (23), MSC model dobiva se izraz (24):

$$\bar{\sigma}^{nr} = \sigma_0^{nr} + \frac{1}{2\pi} \phi \bar{\sigma}^{nr} (\sigma_1^{nr} - \sigma_0^{nr}) \int_0^{2\pi} [\bar{\sigma}^{nr} + K^T \cdot \bar{S}_i \cdot K \cdot (\sigma_1^{nr} - \bar{\sigma}^{nr})]^{-1} d\alpha \quad (24)$$

## 3. Materijali i metode

### 3.1. Materijali

Asfalt je materijal viskoelastičnih svojstava, na čiju izvedbu uglavnom utječu temperatura, opterećenje i stupanj nosivosti. U ovom je istraživanju upotrijebljeno asfaltno vezivo tipa AH-70 za velika opterećenja, s indeksom penetracije od 65,9 (0,1 mm na 25 °C, 100 g i 5 s), točkom razmekšanja od 49,5 °C i duktilnošću od 167,3 cm (pri 15 °C). Kao kolnički materijal, agregat bi trebao biti čist, suh, bez primjesa te posjedovati

Tablica 1. Parametri svojstava grafita

| Projekt    | Gustoća [g/cm <sup>3</sup> ] | Veličina čestice [μm] | Udio ugljika [%] | Vodljivost [S/m] | Udio pepela [%] | Udio željeza [%] |
|------------|------------------------------|-----------------------|------------------|------------------|-----------------|------------------|
| Indikatori | 2,1 – 2,3                    | 150                   | 98,9             | 10 <sup>5</sup>  | 0,2             | 0,03             |

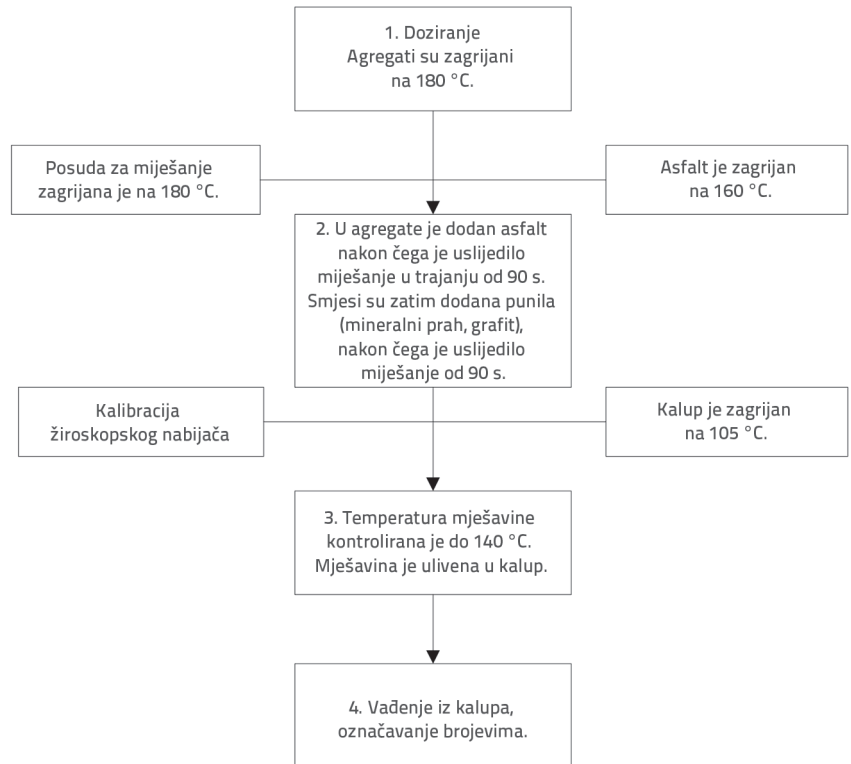
određenu čvrstoću i otpornost na trošenje. Primijenjeni agregat bio je bazaltni mineral gustoće od 2,98 g/cm<sup>3</sup> i najveće veličine zrna materijala 16 mm. Za definiranje mješavine agregata primijenjen je Superpave od 12,5.

Grafit pokazuje dobru električnu vodljivost i idealno je vodljivo punilo. Lamelarni oblik grafita pruža učinak podmazivanja i omogućuje ravnomjernu raspršenosti u asfaltbetonu. Ljuskasti (kristalni) grafit pokazuje izvrsnu električnu vodljivost, toplinsku vodljivost, svojstvo podmazivanja i otpornost na oksidaciju. Kao vodljiva faza upotrijebljen je ljuskasti grafit. Svojstva grafita navedeni su u tablici 1.

Asfalt djeluje kao vezivo i izolacijski materijal u grafitom modificiranom asfaltbetonu. Asfaltna mješavina zahtijeva dovoljnu količinu asfaltnog premaza kako bi se osigurala jaka čvrstoća prijanja. Materijali vodljive faze ne mogu poboljšati vodljivost asfaltbetona jer asfaltni film djeluje kao prepreka između vodljivih čestica da oblikuju vodljive putove. Potrebna je razumna količina asfalta da bi se osiguralo da obujam izvedbe asfaltbetona zadovoljava tehničke zahtjeve te da bi se postigao dobar električni učinak. Ljuskasti grafit pod mikroskopom je šesterokutnog kristalnog sustava koji sadrži gusto zbijene atome ugljika. Vezivna sila između atoma vrlo je jaka, no ona između slojeva je vrlo slaba. Agregati nemaju samo pojedinačne karakteristike, već i kombinirane karakteristike, odnosno agregati prolaze gradaciju s obzirom na različite veličine čestica. S obzirom na makroskopsku perspektivu, agregati različitih veličina čestica kombiniraju se s različitim skeletnim strukturama grafitom modificiranog asfaltbetona, što dovodi do stvaranja različitih vodljivih mreža. Prema tome, raspodjela vodljivih mreža vezana je uz ispunu vodljive asfaltno žbuke, koja je samim time povezana sa skeletnom strukturom grafitom modificiranog asfaltbetona.

### 3.2. Metode

U ovom je istraživanju pripremljena asfaltna mješavina Superpave 12.5 za mjerenje električne vodljivosti. Marshallovi uzorci upotrijebljeni su za mjerenje vodljivosti grafitom modificiranog asfaltbetona. Grafitom modificirani asfaltbeton



Slika 1. Specifični postupci miješanja i kalupljenja za grafitom modificirani asfaltni beton

zahtijeva prilagodbe procesa miješanja zbog ugradnje vodljivih materijala. Grafit se mora miješati s mineralnim prahom 90 sekundi nakon dodavanja asfalta zbog svojih svojstava apsorpcije ulja. Asfaltno mješavine zbijene su žiroskopskim nabijačem Superpave (SGC) radi postizanja stvarne vrijednosti zbijanja smjesa do gustoće postignute u stvarnim klimatskim uvjetima i uvjetima opterećenja na kolniku. Gustoća uzorka može se procijeniti iz mase materijala u kalupu, unutarnjeg promjera kalupa i visine uzorka tijekom zbijanja. Specifični procesi miješanja i kalupljenja prikazani su na slici 1.

Električna vodljivost mjerena je metodom dviju sondi pri sobnoj temperaturi od 25 °C. Uređajem za prikupljanje podataka izmjerena je električna vodljivost grafitom modificiranog asfaltbetona. Budući da grafitom modificirani asfaltbeton pokazuje loša svojstva vodljivosti, usvojena je ispitna metoda za mjerenje izolacijskog otpora materijala. Grafitom modificirani asfaltbeton imao je grubu površinu, a u ispitivanoj metodi postojao je veliki otpor između kontaktnih točaka elektrode i uzorka. Ako se ne postigne bliski kontakt, otpor na kontaktu bit će veći od otpora samog uzorka, a rezultat ispitivanja bit će neminovno veći od stvarnog otpora uzorka. Kako bi se postigao čvrst kontakt, površina uzorka pažljivo je očišćena i ispolirana. Na temelju operativnih metoda i troškova,

Tablica 2. Vrijednosti ispitivanja otpornosti grafitom modificiranog asfaltnog betona

| Uzorci   | Udio grafita [vol %] | Otpornost [ $\Omega\text{m}$ ] |                      |                   |                   |       |      |     |
|----------|----------------------|--------------------------------|----------------------|-------------------|-------------------|-------|------|-----|
|          |                      | 5,0                            | 7,8                  | 9,5               | 12,7              | 18,9  | 22,6 | 30  |
| Uzorak 1 |                      | $1,2 \times 10^{11}$           | $7,8 \times 10^9$    | $7,9 \times 10^8$ | $3,9 \times 10^3$ | 76,9  | 31,3 | 2,4 |
| Uzorak 2 |                      | $1,5 \times 10^{11}$           | $1,0 \times 10^{10}$ | $1,1 \times 10^9$ | $4,3 \times 10^3$ | 90,9  | 35,7 | 2,8 |
| Uzorak 3 |                      | $1,9 \times 10^{11}$           | $1,3 \times 10^{10}$ | $1,2 \times 10^9$ | $5,1 \times 10^3$ | 120,0 | 43,5 | 3,6 |
| Uzorak 4 |                      | $2,5 \times 10^{11}$           | $1,5 \times 10^{10}$ | $1,4 \times 10^9$ | $6,2 \times 10^3$ | 128,9 | 52,6 | 3,8 |

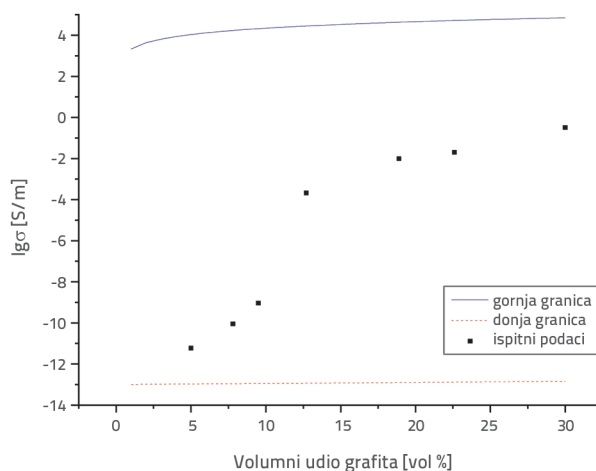
suha grafitna prašina manja od 0,075 mm u raspršenom obliku primijenjena je za popunjavanje razmaka između elektroda i uzoraka kako bi se osigurao savršen kontakt i minimizirale mjerne pogreške. Elektrode su izrađene od nehrđajućeg čelika. Električni otpor mjeren je pomoću uređaja Keithley 6517 za mjerenje visoke otpornosti (SAD). Otpornost se može izračunati iz izmjerenog otpora. Otpornost dobivena testom bila je prosječna vrijednost otpornosti četiriju uzoraka. Budući da su otpornost i vodljivost recipročni, dobivena je vodljivost grafitom modificiranog asfaltbetona. Dobivene vrijednosti električne otpornosti grafitom modificiranog asfaltbetona navedene su u tablici 2.

#### 4. Rezultati i rasprava

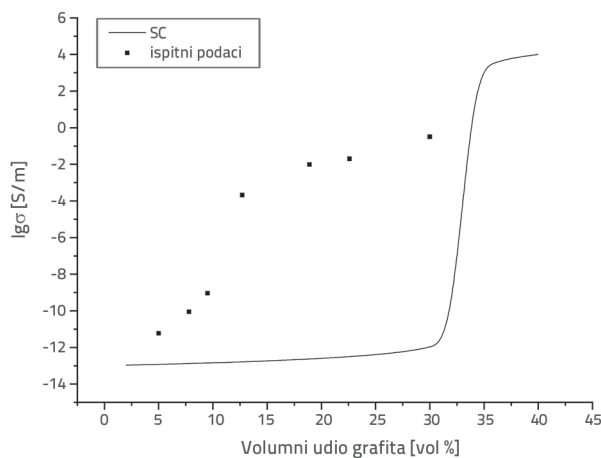
Prethodna istraživanja samo su predviđala električnu vodljivost kompozitnih materijala primjenom teoretskih formula, a samo je nekoliko njih potvrdilo rezultate pomoću podataka dobivenih ispitivanjima. U ovome istraživanju upotrijebljene su Hashin-Shtrikmanova (H-S), SC i MSC metoda za usporedbu rezultata s podacima ispitivanja. H-S metoda potvrdila je da su granice bile uobičajene i da se mogu primijeniti na sve makroskopski izotropne kompozite. Stoga bi električna vodljivost grafitom modificiranog asfaltbetona trebala biti unutar granica H-S metode. Granice mogu djelovati kao teorijske granice, jer se svaka predviđena vrijednost izvan H-S granica smatra nevažecom. Čestice grafita se prema SC metodi smatraju sfernim inkluzijama, što odstupa od stvarnog oblika čestica grafita. MSC metoda temelji se na SC metodi i teoriji perkolacije, koja razmatra utjecaj oblika čestica grafita prema Eshelbyjevom tenzoru.

Predviđene vrijednosti H-S granica mogu se izračunati pomoću izraza (11) i (12). Slika 2. prikazuje predviđene vrijednosti H-S granica i rezultate ispitivanja. Puna plava linija predstavlja izračunane vrijednosti gornje granice H-S, a crvena isprekidana linija predstavlja izračunane vrijednosti donje granice H-S. Kao što je prikazano na slici 1., svi se dobiveni podaci nalaze unutar granica. Međutim, raspon H-S granica je vrlo velik; stoga je električnu vodljivost grafitom modificiranog asfaltbetona teško predvidjeti. H-S granice mogu pružiti samo širok raspon ograničenja koja ne mogu točno predvidjeti električnu vodljivost. Izraz (17) primijenjen je za predviđanje vodljivosti na temelju samokonzistentne metode. Slika 3. prikazuje krivulje električne vodljivosti SC modela (kuglasta inkluzija) i ispitne podatke. Puna crna krivulja predstavlja vrijednosti izračunane primjenom SC modela. Kao što je prikazano na slici 3., podaci ispitivanja i

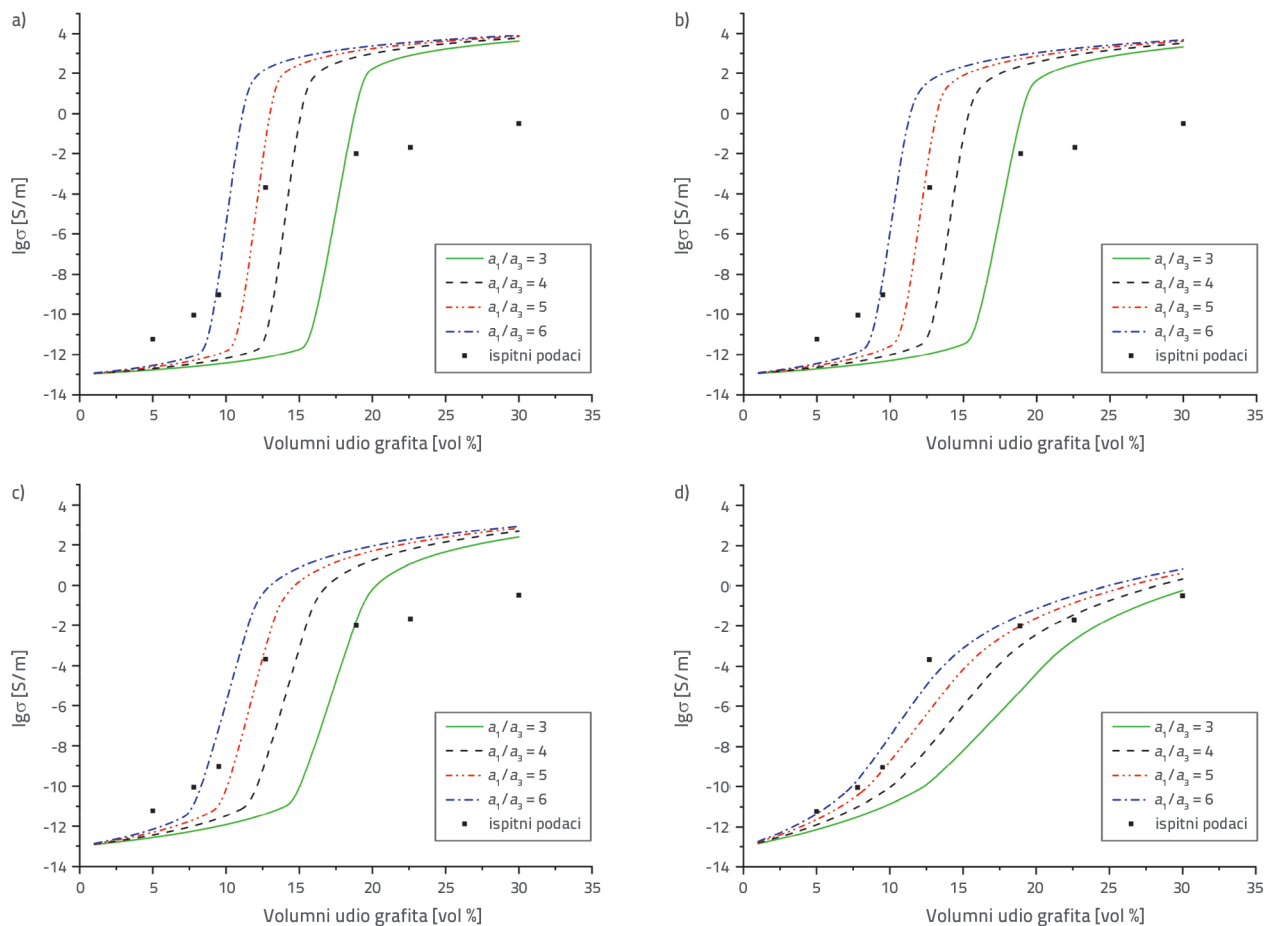
predviđene vrijednosti SC modela razlikuju se. Razmak volumnog udjela grafita SC modela iznosio je približno 34 %, a eksperimentalno dobiveni razmak volumnog udjela uvijek je bio između 9 % i 12 %. Stoga su rezultati dobiveni iz SC modela bili nedosljedni s onima dobivenim testom. SC model pretpostavlja da su vodljive čestice kuglaste inkluzije. Međutim, stvarne čestice grafita bile su ljuskaste u ovdje provedenim testovima. Stoga nije opravdano čestice grafita smatrati sfernim inkluzijama. Prema tome, mora se usvojiti druga metoda za uspostavljanje modela električne vodljivosti za grafitom modificirani asfaltbeton.



Slika 2. Granice električne vodljivosti prema metodi H-S



Slika 3. Krivulja električne vodljivosti SC metode



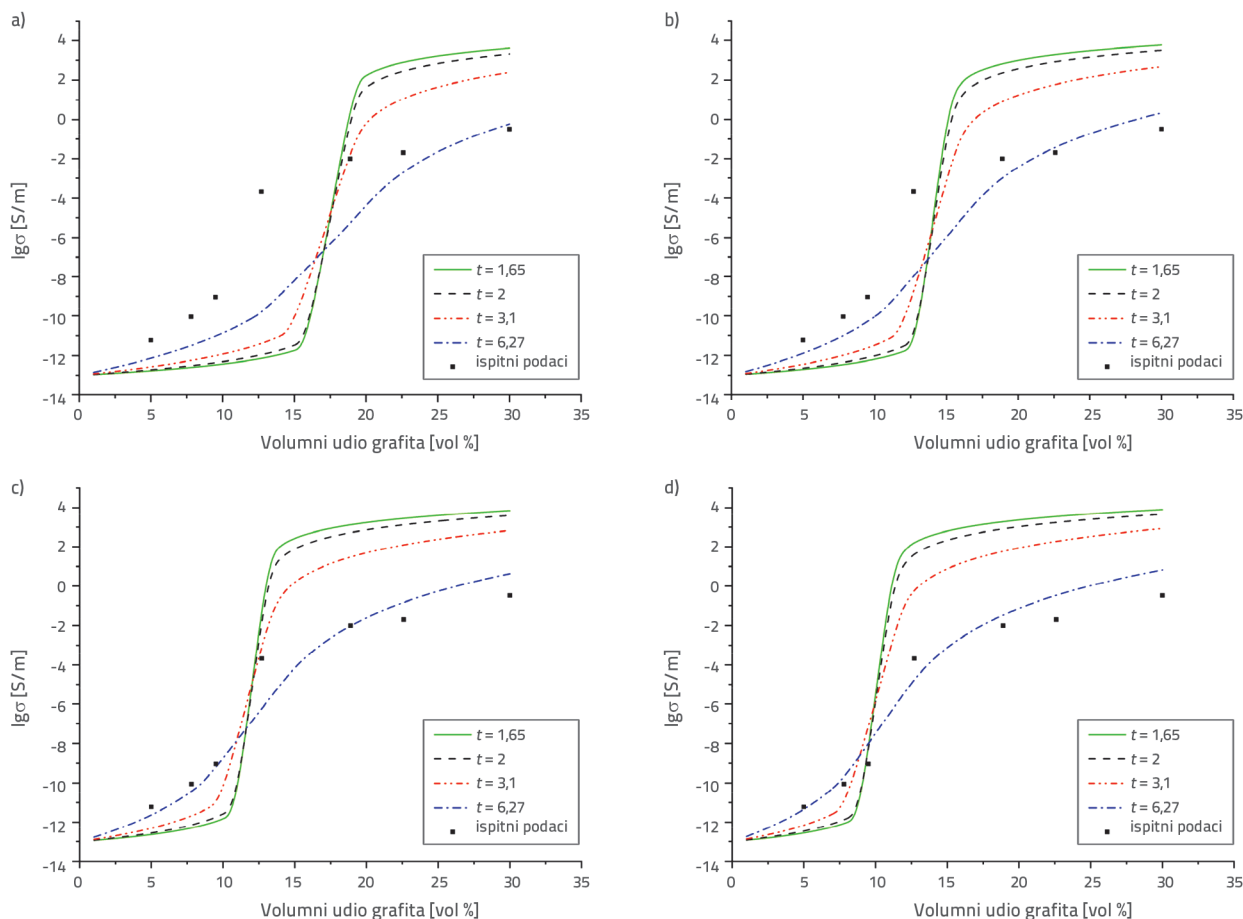
Slika 4. Krivulje električne vodljivosti MSC metode ovisno od težinskog koeficijenta ili potencije perkolacije t: a)  $t = 1,65$ ; b)  $t = 2$ ; c)  $t = 3,1$ ; d)  $t = 6,27$  (Puna zelena, crna isprekidana, crvena isprekidano-točkasta i plava isprekidano-točkasta krivulja predstavljaju izračunate vrijednosti s različitim razmjerima proporcije čestica grafita. Crni kvadrati predstavljaju podatke dobivene ispitivanjima.)

S obzirom na oblik inkluzije, Eshelbyjev tenzor može se izračunati pomoću izraza (18) do (20). Na temelju teorije perkolacije i SC metode, predviđene vrijednosti električne vodljivosti mogu se izračunati pomoću izraza (24) s različitim potencijama perkolacije. U prethodnom su ispitivanju kao potencije perkolacije odabrane vrijednosti 1,65, 2,0, 3,1 i 6,27 u MSC modelu. Slika 4. prikazuje krivulje električne vodljivosti MSC metode za različite potencije perkolacije. Kao što je prikazano na slici 4., oblici krivulja slični su za različite razmjere proporcija kad je potencija perkolacije  $t$  konstantna. Međutim, točka u kojoj se električna vodljivost prekida u svakoj od ovih krivulja očita je kada je vrijednost  $t$  mala. Povećanjem razmjera proporcije ( $a_1/a_3$ ), prag perkolacije postupno se smanjuje. Rezultati su pokazali da je razmjera proporcija čestica grafita izravno utjecao na prag perkolacije. Stoga se kod predviđanja električne vodljivosti grafitom modificiranog asfaltbetona mora uzeti u obzir oblik vodljive faze.

Nakon toga, predviđene vrijednosti i ispitni podaci uspoređeni su za različite razmjere proporcija. Slika 5. prikazuje krivulje električne vodljivosti dobivene primjenom MSC metode za različite razmjere proporcija. Kao što je prikazano na tim slikama,

predviđena vrijednost električne vodljivosti naglo je porasla kako se volumni udio grafita približavao pragu perkolacije. Nakon toga, daljnjim povećanjem volumnog udjela, predviđena vrijednost električne vodljivosti polako se povećavala. Kada je razmjera proporcija konstantan, drugačije  $t$  vrijednosti uvelike utječu na predviđanje električne vodljivosti. Predviđena vrijednost stupnja osjetljivosti potencije perkolacije,  $t$ , bila je veća od razmjera proporcije čestica grafita.

Na slikama 4. i 5., krivulje daju kvalitativan opis razlika u ponašanju vodljivosti u blizini praga perkolacije. Usporedba teorijskog izračuna i ispitnih podataka pokazuje da je trend podataka iz teorijskog izračuna slična onom iz podataka dobivenih ispitivanjima. Kada je potencija perkolacije  $t$  MSC modela imala vrijednosti 1,65, 2,0 i 3,1, podaci iz teorijskog izračuna i podaci iz ispitivanja imali su tendenciju da pokažu slično promjenjivo kretanje, međutim, brojčana odstupanja i dalje su bila velika. Kada je vrijednost  $t$  iznosila 6,27, tendencije su bile slične, međutim, predviđene vrijednosti bile su bliže vrijednostima iz ispitivanja. Na temelju teoretskih izračuna i ispitnih podataka razmjera proporcije čestica grafita bio je  $a_1/a_3 = 5$ . Odabrana potencija perkolacije  $t$  iznosila je 6,27. Potencija



Slika 5. Krivulje električne vodljivosti MSC metode ovisno od razmjera proporcije čestica grafita: a)  $a_1/a_3 = 3$ ; b)  $a_1/a_3 = 4$ ; c)  $a_1/a_3 = 5$ ; d)  $a_1/a_3 = 6$  (Puna zelena, crna isprekidana, crvena isprekidano-točkasta i plava isprekidano-točkasta krivulja predstavljaju izračunane vrijednosti s različitim potencijama perkolacije, Crni kvadratići predstavljaju podatke dobivene ispitivanjima.)

perkolacije ovisi o karakterističnom koeficijentu disperzije. Taj koeficijent ovisi o obliku čestice i orijentaciji ili slučajnosti disperzije. Različite vodljive faze također mogu utjecati na potencije perkolacije. Trenutačno se u većini slučajeva potencije perkolacije određuju eksperimentalno.

## 5. Zaključak

Električna vodljivost grafitom modificiranog asfaltbetona povezana je s nekoliko čimbenika: (i) svojstvima asfaltbetona; (ii) vodljivosti, oblikom i razmjerom proporcija čestica grafita, te (iii) metodama i tehnologijama usvojenim tijekom pripreme grafitom modificiranog asfaltbetona (što također donekle utječe na električnu vodljivost). U ovom istraživanju za ispitivanje električne vodljivosti pripremljena je asfaltna mješavina Superpave 12.5. Vodljiva faza sastoji se od ljuskastog grafita. Odabrani razmjer proporcija čestica ljuskastog grafita bio je  $a_1/a_3 = 5$ . Odabrana potencija perkolacije  $t$  iznosila je 6,27. Vodljivi mehanizmi grafitom modificiranog asfaltnog betona ispitan je metodama H-S, SC i MSC. Metoda H-S može se upotrijebiti samo za predviđanje približnog opsega električne

vodljivosti. Vrijednosti predviđene SC metodom značajno su odstupale od podataka ispitivanja. MSC metoda temelji se na SC metodi i teoriji perkolacije. Odabirom različitih vrijednosti za omjer proporcija grafitnih čestica i potencije perkolacije, modificirana je SC metoda. Stoga se samo MSC metoda može primijeniti za utvrđivanje pouzdanog modela vodljivosti za grafitom modificirani asfaltbeton. Odabir potencije perkolacije temeljio se na prethodnim istraživanjima. Stvarne čestice grafita su trodimenzionalni sustavi, ali su pojednostavljeni na dvodimenzionalni sustav temeljen na MSC metodi. Zbog toga u nekim točkama postoji određeno odstupanje između predviđenih i dobivenih vrijednosti. Stoga su potrebna daljnja istraživanja kako bi se dodatno povećala primjena MSC metode za modeliranje električne vodljivosti.

Ovo istraživanje pruža sveobuhvatnu teorijsku analizu (MSC metoda) električne vodljivosti grafitom modificiranog asfaltbetona i značajno je za ispitivanje otapanja snijega i odleđivanja kolnika. Buduća bi istraživanja trebala istražiti potenciju perkolacije pomoću brojnih testova i intrinzičnih mehanizama. Predviđanje učinkovite vodljivosti vodljivog asfaltbetona trenutačno uzima u obzir samo predviđanje



vodljivosti grafitom modificiranog asfaltbetona. Zasad se ne razmatra predviđanje električne vodljivosti istovremenim dodavanjem grafita, karbonatnih vlakana i drugih vodljivih punila. U inženjerskoj se praksi često odabire višestruki vodljivi asfaltbeton kako bi se bolje razumjela vodljiva svojstva vodljivog asfaltbetona koji se primjenjuje za otapanje snijega i leda na kolniku. Stoga će se predviđanje učinkovite vodljivosti višestrukog vodljivog asfaltbetona na temelju mikromehanike proučavati dalje u budućnosti.

## Zahvala

Ovo istraživanje financijski su podržali Zaklada za projekte u području znanosti i tehnologije Odjela za obrazovanje provincije Jiangxi (dotacija br. GJJ211129 i GJJ219301), Zaklada za doktorska istraživanja Sveučilišta za znanost i tehnologiju Jiangxi (dotacija br. 2017BSQD011) i Znanstveno-tehnološki projekt za izgradnju prometnica u zapadnoj Kini (potpora br. 2009318223056).

## LITERATURA

- [1] Liu, X.M., Wu, S.P.: Study on the graphite and carbon fiber modified asphalt concrete, *Construction and Building Materials*, 25 (2011) 4, pp. 1807-1811, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.11.082>
- [2] Wu, S.P., Mo, L.T., Shui, Z.H., Chen, Z.: Investigation of the conductivity of asphalt concrete containing conductive fillers, *Carbon*, 43 (2005), pp. 1358-1363, <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2004.12.033>
- [3] Pan, P., Wu, S.P., Chen, M., Tang, N.: A method for improvement of the heating efficiency of conductive asphalt pavement, *Journal of Testing and Evaluation*, 42 (2014) 5, pp. 1141-1147, <https://doi.org/10.1520/jte20130173>
- [4] Liu, X.M., Wang, C., Deng, Y.D., Cao, F. Computation of fractal dimension on conductive path of conductive asphalt concrete. *Construction and Building Materials*, 11 (2016) 5, pp. 699-704, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.051>
- [5] Wang, Y.Y., Tan, Y.Q., Liu, K, Xu, H.N. Preparation and electrical properties of conductive asphalt concretes containing graphene and carbon fibres *Construction and Building Materials*, 318 (2022), 125875, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125875>
- [6] Ren, Z.H., Sun, J.B., Zeng, X.T., Chen, X., Wang, Y.F., Tang, W.C., Wang, X.Y.: Research on the electrical conductivity and mechanical properties of copper slag multiphase nano-modified electrically conductive cementitious composite, *Construction and Building Materials*, 339 (2022), 127650, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127650>
- [7] Çetin, A.: The effect of filler additives on moisture damage in stone mastic asphalt (SMA) mixtures, *GRAĐEVINAR*, 73 (2021) 12, pp. 1209-1221, <https://doi.org/10.14256/JCE.3321.2021>
- [8] Çetin, A.: Laboratory performance of porous asphalt mixtures containing Ethylene Propylene Diene Monomer - EPDM, *GRAĐEVINAR*, 74 (2022) 1, pp. 1-8, <https://doi.org/10.14256/JCE.3309.2021>
- [9] Oner, J., Ozdas, F.: Investigation of textile waste usage in stone mastic asphalt (SMA) mixtures, *GRAĐEVINAR*, 73 (2021) 5, pp. 469-481, <https://doi.org/10.14256/JCE.3135.2020>
- [10] Gáspár, L., Bencze, Z.: Increasing the life expectancy of road pavements, *GRAĐEVINAR*, 72 (2020) 6, pp. 515-522, <https://doi.org/10.14256/JCE.2644.2019>
- [11] Pal, R.: On the electrical conductivity of particulate composites, *Journal of Composite Materials*, 41 (2007) 20, pp. 2499-2511, <https://doi.org/10.1177/0021998307076489>
- [12] Hori, M., Yonesawa, F.: Statistical theory of effective electrical, thermal, and magnetic properties of random heterogeneous materials. *Journal of Mathematical Physics*, 16 (1975) 2, pp. 352-364, <https://doi.org/10.1063/1.1666347>
- [13] Yonesawa, F., Cohen, M.: Granular effective medium approximation *Journal of Applied Physics*, 54 (1983) 6, pp. 2895-2899, <https://doi.org/10.1063/1.332490>
- [14] Moctesuma, B.A., Visice, A., Adler, P.M.: Macroscopic conductivity of vulgular porous media, *Transport in Porous Media*, 49 (2002), pp. 313-332, <https://doi.org/10.1023/A:1016297220013>
- [15] Helmut, J.B., Sergio, N.: Mori-Tanaka models for the thermal conductivity of composites with interfacial resistance and particle size distributions, *Composites Science and Technology*, 68 (2008) 5, pp. 1181-1187, <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2007.06.009>
- [16] Yu, J., Jr, T.E.L., Toghiani, H.: Micromechanically based effective thermal conductivity estimates for polymer nanocomposites, *Composites Part B: Engineering*, 53 (2013), pp. 267-273, <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.04.055>
- [17] Xiang, R., Gary, D.S.: Computational micromechanics modelling of inherent piezoresistivity in carbon nanotube- polymer nanocomposites, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 24 (2013) 12, pp. 1459-1483, <https://doi.org/10.1177/1045389X12471442>
- [18] Wang, Y., Weng, G.J., Meguid, S.A., Hamouda, A.M.: A continuum model with a percolation threshold and tunneling-assisted interfacial conductivity for carbon nanotube-based nanocomposites, *Journal of Applied Physics*, 115 (2014) 19, <https://doi.org/10.1063/1.4878195>
- [19] Wang, Y., Shan, J.W., Weng, G.J.: Percolation threshold and electrical conductivity of graphene-based nanocomposites with filler agglomeration and interfacial tunneling, *Journal of Applied Physics*, 118 (2015) 6, 065101, <https://doi.org/10.1063/1.4928293>
- [20] Xia, X.D., Wang, Y., Zhong, Z., Weng, G.J.: A theory of electrical conductivity, dielectric constant, and electromagnetic interference shielding for lightweight graphene composite foams, *Journal of Applied Physics*, 120 (2016) 8, 085102, <https://doi.org/10.1063/1.4961401>
- [21] Su, Y., Li, J.J., Weng, G.J.: Theory of thermal conductivity of graphene-polymer nanocomposites with interfacial Kapitza resistance and graphene-graphene contact resistance, *Carbon*, 137(2018), pp. 222-233, <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2018.05.033>

- [22] Jang, S.H., Hochstein, D.P., Kawashima, S.: Experiments and micromechanical modelling of electrical conductivity of carbon nanotube/cement composites with moisture, *Cement and Concrete Composites*, 77 (2017), pp. 49-59, <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2016.12.003>
- [23] Haghgooa, M., Ansari, R., Hassanzadeh-Aghdam M.K.: The effect of nanoparticle conglomeration on the overall conductivity of nanocomposites, *International Journal of Engineering Science*, 157 (2020), 103392, <https://doi.org/10.1016/j.ijengsci.2020.103392>
- [24] Kil, T., Jin, D.W., Yang, B., Lee, H.K.: A comprehensive micromechanical and experimental study of the electrical conductivity of polymeric composites incorporating carbon nanotube and carbon fiber, *Composite Structures* 268 (2021), 114002, <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.114002>
- [25] Yang, Y., Song, G.Q., Chen, Y.G.: Modified self-consistent model for the effective electrical conductivity of polygonal graphite composites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites* 34 (2015) 4, pp. 307-314, <https://doi.org/10.1177/0731684415571190>
- [26] Carmona, F., Canet, R., Delhaes, P.: Piezoresistivity of heterogeneous solids, *Journal of Applied Physics*, 61 (1987) 7, pp. 2550-2557, <https://doi.org/10.1063/1,337932>
- [27] Quivy, A., Deltour, R., Jansen, A.G.M., Transport phenomena in polymer-graphite composite materials, *Physical Review B*, 39 (1989) 2, pp. 1026-1030, <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.39.1026>
- [28] Qu, J.M., Cherkaoui, M.: Fundamentals of micromechanics of solids, John Wiley & Sons, Inc., 2006.
- [29] Hashin, Z., Shtrikman, S.: A variational approach to the theory of the effective magnetic permeability of multiphase materials, *Journal of Applied Physics*, 33 (1962) 10, pp. 3125-3130, <https://doi.org/10.1063/1,1728579>
- [30] Quang, H.L., He, Q.C., Zheng, Q.S: Some general properties of Eshelby's tensor fields in transport phenomena and anti-plane elasticity, *International Journal of Solids and Structures*, 45 (2008) 13, pp. 3845-3857, <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2007.10.030>
- [31] Hiroshi, H., Minoru, T.: Effective thermal conductivity of a misoriented short fiber composite, *Journal of Applied Physics*, 58 (1985) 7, pp. 2478-2486, <https://doi.org/10.1063/1,335924>