

Lazar Kopanja^{1,2*}, Ratko Ivković¹, Boris Lončar²,
Marin Tadić³

¹Alfa BK Univerzitet, Fakultet informacionih tehnologija, Beograd, Srbija, ²Univerzitet u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet, Beograd, Srbija, ³Univerzitet u Beogradu, Institut za nuklearne nauke "Vinča", Beograd, Srbija

Naučni rad

ISSN 0351-9465, E-ISSN 2466-2585

UDC:620.186/.187(n)

doi:10.5937/ZasMat1703400K



Zastita Materijala 58 (3)

400 - 406 (2017)

Kvantifikovanje oblika nanočestica: segmentacija i mera izduženosti

IZVOD

Uticao oblika nanočestica na magnetna svojstva nanočestičnih materijala je često istican, ali nije mnogo proučavan u literaturi. U cilju boljeg razumevanja magnetnih svojstava nanomaterijala veoma važan korak je merenje oblika korišćenjem deskriptora oblika. Kao jedan od najčešćih deskriptora korišćena je mera izduženosti nanočestica, dok su eksperimentalni rezultati dobijeni korišćenjem TEM slika nanočestica hematita. U cilju analize oblika slike su podvrgnute segmentaciji čime su dobijene izolovane nanočestice, a zatim je izmerena izduženost izdvojenih nanočestica. Mera izduženosti $\epsilon(S)$ koja je predložena i korišćena u eksperimentu daje intuitivno očekivane rezultate. Nasuprot tome, ukazano je na to da kao i svi drugi deskriptori oblika i mera $\epsilon(S)$ pored nesumnjivih prednosti ima i određene nedostatke. Stoga se predlaže korišćenje više različitih deskriptora što obezbeđuje bolju i precizniju karakterizaciju oblika nanočestica čime se mogu izbeći nedostaci koje pojedini deskriptori imaju.

Ključne reči: Analiza oblika, nanočestice, izduženost, deskriptori oblika, segmentacija.

1. UVOD

Zbog velikih mogućnosti za primenu proučavanja nanomaterijala zauzima veoma važno mesto u nauci o materijalima. Nanomaterijali su sistemi u kojima su veličine čestica manje od 100 nm. Smanjenjem veličine magnetnih čestica dolazi do promene magnetnih svojstava, tako da magnetni nanomaterijali pokazuju drugačija fizička svojstva: velika koercitivnost, superparamagnetizam, velika magnetna otpornost, niska ili visoka magnetizacija, smanjenje Kirijeve/Nelove temperature. Jedna od veoma važnih anizotropija nanočestica koja određuje magnetna svojstva nanočestičnog materijala je anizotropija oblika, koja je u direktnoj vezi sa oblikom nanočestica. Kod istih materijala vrednosti magnetnih parametara se mogu razlikovati i po desetak puta u zavisnosti od oblika nanočestica [1,2]. Uticaj oblika nanočestica na makroskopska magnetna svojstva nanomaterijala sve više se proučava u literaturi [3,4]. Kao jedno od važnih svojstava oblika izduženost oblika ima bitnu ulogu u razumevanju magnetnih svojstava nanočestičnih materijala (npr. poznato je da se koercitivnost

povećava s povećanjem izduženosti). Stoga je pored merenja fizičkih svojstava veoma važno imati način za merenje oblika, odnosno dodeljivanje obliku kvantitativnih vrednosti na osnovu kojih se oni mogu porediti i klasifikovati.

Polazna tačka za merenje oblika su mikroskopske slike nanočestičnih materijala koje se zatim analiziraju u cilju utvrđivanja kvantitativnih karakteristika nanočestica i njihovih međusobnih relacija. U postupcima analize slike segmentacija je jedan od prvih i najvažnijih koraka [5–8]. Kao deo naučne oblasti digitalne slike, koja zauzima sve veću primenu u različitim poljima istraživanja, segmentacija se ne može posmatrati bez uzimanja u obzir velikog boja parametara slike. Naime, za različite potrebe različito se definišu i segmenti, naravno, sve zavisno od situacije u kojoj se slika analizira. Neka da je bitno da se izdvoje samo svetliji delovi slike, pa je onda osnov za segmentaciju lumenca piksela. U drugom slučaju je bitno da se analiziraju segmenti sa određenim koncentracijama boja, pa su tada RGB komponente osnov za segmentaciju [9]. Ovih primera ima mnogo, a svi oni se svrstavaju u prvi uslov za segmentaciju - zajednička karakteristika pojedinačnih segmenata. Drugi uslov za segmentaciju se definiše u neprekidnosti piksela koji kao prvi detektovani čini jedan segment. Odnosno, segment slike definiše grupa piksela sa

*Autor za korespondenciju: Lazar Kopanja

E-mail: kopanja@yaho.com

Rad primljen: 29. 06. 2017.

Rad prihvaćen: 30. 07. 2017

Rad je dostupan na sajtu: www.idk.org.rs/casopis

zajedničkim karakteristikama koji nemaju prekid detekcije na posmatranom delu slike [6].

Nakon segmentacije potreban je matematički alat kojim bi se kvantitativno opisali oblici. Razvijaju se brojni deskriptori oblika koji daju odgovor na pitanje koliko je neki oblik sličan odgovarajućem posmatranom obliku kao što je krug (circularity), kvadrat (squareness), elipsa (ellipticity), trougao (triangularity), pravougaonik (rectangularity) [3,10–23]. Kako bi bio upotrebljiv svaki od deskriptora oblika treba da obezbedi da odgovarajuća mera bude invarijantna u odnosu na translaciju, rotaciju i skaliranje.

S obzirom na važnost izduženosti oblika i njihov uticaj na magnetna svojstva nanomaterijala u ovom radu za određivanje morfoloških karakteristika nanočestica predložena je mera izduženosti $\varepsilon(S)$. Ova mera daje odgovor na pitanje koliko je oblik nanočestice izdužen. Predložena mera je jasno definisana i relativno je jednostavna za korišćenje. Najmanju meru izduženosti ima krug čija je mera izduženosti jednaka 1. Predložena mera je nepromenljiva u odnosu na transformacije sličnosti. Programski paketu MATLAB je korišćen u procesu segmentacije, kao i u izračunavanju mere izduženosti pomoću predložene deskriptora.

2. EKSPERIMENTALNI DEO

2.1. Mera izduženosti

Mera izduženosti je često razmatrana u literaturi kao jedan od osnovnih deskriptora oblika. U ovom odeljku prezentovane su osnovne osobine i teorijske osnove predložene mere izduženosti.

Sa izduženosti oblika je usko povezana orijentacija oblika, prilikom čijeg računanja standardni

$$I(\varphi, S) = \sin^2 \varphi \iint_S x^2 dx dy - \sin 2\varphi \iint_S xy dx dy + \cos^2 \varphi \iint_S y^2 dx dy$$

Ako se centralni geometrijski momenti $\bar{m}_{p,q}(S)$ definišu sa

$$\bar{m}_{p,q}(S) = \iint_S (x - x_c(S))^p \cdot (y - y_c(S))^q dx dy$$

i pošto je pretpostavljeno $(x_c(S), y_c(S)) = (0,0)$, tada važi

$$I(\varphi, S) = (\sin \varphi)^2 \cdot \bar{m}_{2,0}(S) - \sin 2\varphi \cdot \bar{m}_{1,1}(S) + (\cos \varphi)^2 \cdot \bar{m}_{0,2}(S). \quad (2)$$

Minimum funkcije $I(\varphi, S)$ može jednostavno da se izračuna. Nađe se prvi izvod funkcije $I(\varphi, S)$

$$I'(\varphi, S) = 2 \cdot \sin \varphi \cdot \cos \varphi \cdot \bar{m}_{2,0}(S) - 2 \cdot \cos 2\varphi \cdot \bar{m}_{1,1}(S) - 2 \cdot \sin \varphi \cdot \cos \varphi \cdot \bar{m}_{0,2}(S),$$

a zatim izjednači sa 0, odnosno

$$I'(\varphi, S) = \sin 2\varphi \cdot (\bar{m}_{2,0}(S) - \bar{m}_{0,2}(S)) - 2 \cdot \cos 2\varphi \cdot \bar{m}_{1,1}(S) = 0.$$

Oдавde se dobija da traženi ugao φ , ali i $\varphi + \pi/2$, zadovoljava jednačinu

$$\frac{\sin 2\varphi}{\cos 2\varphi} = \frac{2\bar{m}_{1,1}(S)}{\bar{m}_{2,0}(S) - \bar{m}_{0,2}(S)} \quad (3)$$

pristup definiše orijentaciju sa tzv. osom najmanjeg momenta drugog reda [15,24,25]. To je prava koja minimizira integral kvadratnih rastojanja od tačaka koje pripadaju obliku do prave. Integral je

$$I(S, \varphi, \rho) = \iint_S r^2(x, y, \varphi, \rho) dx dy \quad (1)$$

gde je $r(x, y, \varphi, \rho)$ rastojanje od tačke (x, y) do prave date u obliku

$$x \cdot \cos \varphi - y \cdot \sin \varphi = \rho.$$

Prava koja minimizira integral $I(S, \varphi, \rho)$ prolazi kroz težište $(x_c(S), y_c(S))$ oblika S gde je

$$(x_c(S), y_c(S)) = \left(\frac{\iint_S x dx dy}{\iint_S dx dy}, \frac{\iint_S y dx dy}{\iint_S dx dy} \right).$$

Bez gubitka opštosti može se pretpostaviti da je koordinatni početak postavljen u težište. Takođe, tražena prava koja minimizira integral $I(S, \varphi, \rho)$ prolazi kroz koordinatni početak, odnosno: $\rho = 0$. Kvadrat rastojanja tačke (x, y) do prave $x \cdot \cos \varphi - y \cdot \sin \varphi = \rho$ jednak je $(x \cdot \sin \varphi - y \cdot \cos \varphi)^2$, pa se problem orijentacije može preformulisati na problem određivanja φ za koje funkcija $I(\varphi, S)$ definisana sa:

$$I(\varphi, S) = I(S, \varphi, \rho = 0) = \iint_S (x \cdot \sin \varphi - y \cdot \cos \varphi)^2 dx dy$$

dostiže minimum. Funkcija $I(\varphi, S)$ može da se napiše u obliku:

Korišćenjem trigonometrijskih identiteta:

$$\sin^2 \alpha = \frac{1 - \cos 2\alpha}{2} \quad \cos^2 \alpha = \frac{1 + \cos 2\alpha}{2} \quad \sin 2\alpha = \frac{\pm \operatorname{tg} 2\alpha}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 2\alpha}} \quad \cos 2\alpha = \frac{\pm 1}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 2\alpha}}$$

i jednačine (3) dobija se maksimum i minimum funkcije $I(\varphi, S)$:

$$\max\{I(\varphi, S) \mid \varphi \in [0, 2\pi]\} = \frac{\bar{m}_{2,0}(S) + \bar{m}_{0,2}(S) + \sqrt{4(\bar{m}_{1,1}(S))^2 + (\bar{m}_{2,0}(S) - \bar{m}_{0,2}(S))^2}}{2}$$

$$\min\{I(\varphi, S) \mid \varphi \in [0, 2\pi]\} = \frac{\bar{m}_{2,0}(S) + \bar{m}_{0,2}(S) - \sqrt{4(\bar{m}_{1,1}(S))^2 + (\bar{m}_{2,0}(S) - \bar{m}_{0,2}(S))^2}}{2}$$

Izduženost oblika S se dobija kao količnik

$$\max_{\varphi \in [0, 2\pi]} I(\varphi, S) \quad \text{i} \quad \min_{\varphi \in [0, 2\pi]} I(\varphi, S)$$

$$\varepsilon(S) = \frac{\max\{I(\varphi, S) \mid \varphi \in [0, 2\pi]\}}{\min\{I(\varphi, S) \mid \varphi \in [0, 2\pi]\}} \quad (4)$$

Centralni geometrijski momenti $\bar{m}_{p,q}(S)$ su kod digitalnih objekata zamenjeni su tzv. centralnim diskretnim momentima $\bar{\mu}_{p,q}(S)$ koji su definisani sa

$$\bar{\mu}_{p,q}(S) = \sum_{(i,j) \in S \cap Z^2} (j - x_{cd}(S))^p \cdot (j - y_{cd}(S))^q$$

gde je težište diskretnog oblika $S \cap Z^2$ dato sa

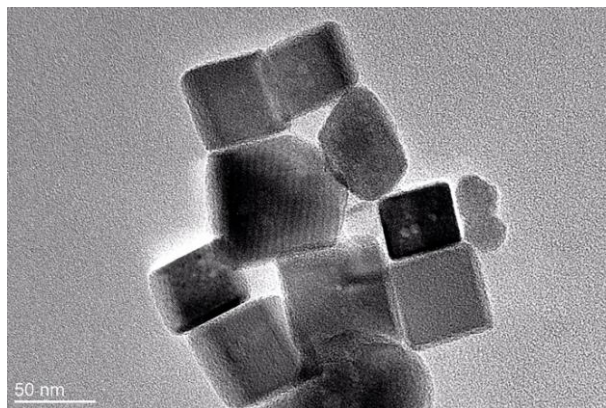
$$(x_{cd}(S), y_{cd}(S)) = \left(\frac{\sum_{(x,y) \in S \cap Z^2} x}{\sum_{(x,y) \in S \cap Z^2} 1}, \frac{\sum_{(x,y) \in S \cap Z^2} y}{\sum_{(x,y) \in S \cap Z^2} 1} \right)$$

Na osnovu ovoga jasno je da se postupak za izračunavanje izduženosti dobija iz prirodne definicije orijentacije oblika. Ovaj postupak je jednostavan i u realnom i u diskretnom slučaju, a mera izduženosti oblika je zasnovana na jednostavnom računu i standardnim algebarskim operacijama te je jednostavna za implementaciju.

2.2. Segmentacija

Iako koherentna, uobličena rezolucijom po x i y ravni, sinhronizovana (najčešće) u okviru tri komponente boja RGB, digitalna slika, kako je ljudsko oko vidi je sačinjena od segmenata. U zavisnosti od situacije u kojoj ih treba prepoznati segmenti su različito definisani te ih možemo tretirati na različite načine koji su proučavani u literaturi [26–29].

U ovom radu eksperimentalni rezultati dobijeni su korišćenjem TEM slike nanočestica hematita ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$), slika 1.



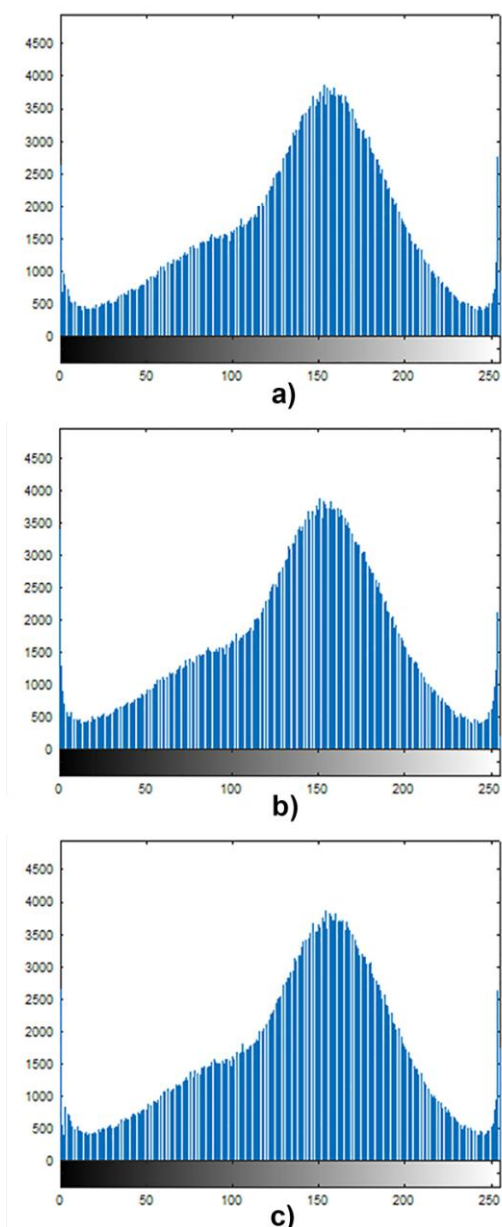
Slika 1. Mikroskopska slika nanočestica hematite
Figure 1. Microscopic image nanoparticles of hematite

Slika 2 prikazuje sliku 1 analiziranu kroz R, G i B kanal. Ako se slika 1 posmatra kroz RGB histograme može se utvrditi da nema bitnijih oscilacija između posmatranih kanala, pa se segmentacija ne može vršiti po analizi samih RGB kanala. Slika 2a-c to i potvrđuju jer stepen poklapanja po metodi strukturalne sličnosti (SSIM) iznosi između 96-98% u zavisnosti od toga koja se dva kanala porede.

Ono što se jasno može uočiti na slici 1 je da nijanse sive boje preovladavaju na kompletnoj slici. Pri tome, posmatrano iz ugla 8-bitne skale zapisa nijansi boja (od 0 do 255), svetlije nijanse pripadaju područjima izvan željenih segmenata (nanočestica). Pomoću softverskog paketa MatLab utvrđeno je da je vrednost ovih svetlijih nijansi koje pripadaju pozadini od 169 do 248. Nakon primene definisanog praga filtriranja dobijeni rezultat je prikazan na slici 3.

Drugi relevantan zaključak je da su okoline segmenata „uokvirene“ nijansama bele boje koje su na skali definisane vrednostima od 249 do 255. Ostali deo spektra pripada željenim segmentima. U postupku segmentacije uzeto je u obzir da se delovi nanočestica međusobno preklapaju. Ovi preklapajući delovi procesirani su metodom paralelne

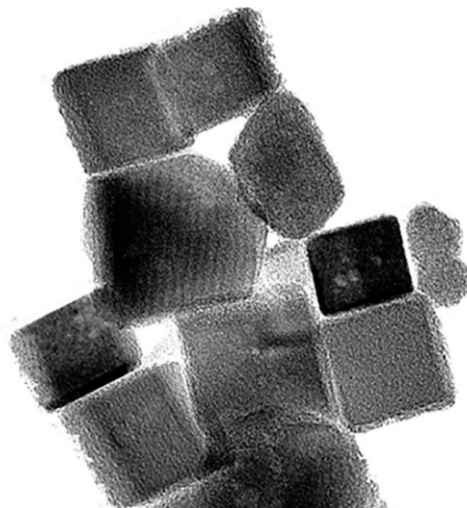
detekcije piksela koji je poznat u teoriji digitalne obrade slike, a izvodi se uz pomoć standardnih komandi u MatLab softverskom paketu, i koristi razlike u vrednostima kanala za jedan posmatrani piksel. Preciznost ove obrade zavisi od podmatrice i njene orijentacije koja je dobro poznata u teoriji. Minimalna preciznost u kome se vrši obrada je podmatrice formata 3x3, pa je preciznost detekcije ± 3 piksela. Sledeći korak uključuje Sobelov operator detekcije ivica, jer je baziran na gradijentu. Pošto je gradijent izvod funkcije u nekom pravcu, bilo je veoma važno da presek ima jasno definisan pravac.



Slika 2. Analiza slike 1 prikazana kroz a) R kanal, b) G kanal i c) B kanal

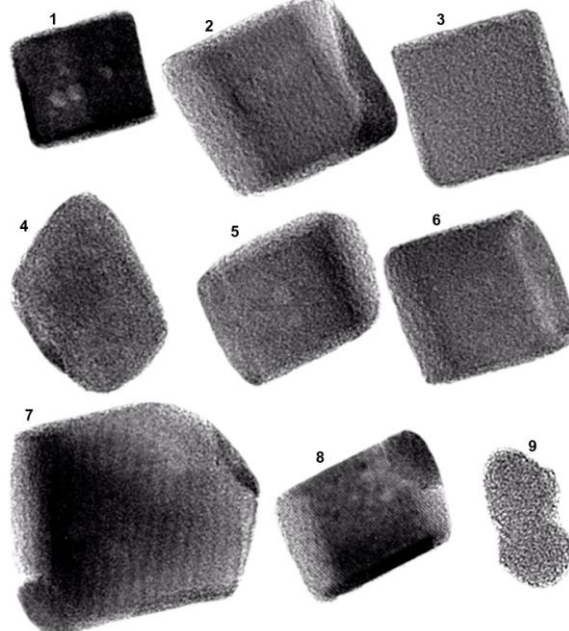
Figure 2. Analysis of Figure 1 shown through a) R channel b) G channel and c) B channel

Napominjemo da oblik nanočestica u donjem centralnom delu slike 1 nije nedvosmisleno definisan jer ove nanočestice pored toga što nisu kompletno vidljive na slici nemaju ni jasno izražene međusobne granice pa su one izostavljene iz analize.



Slika 3. Filtrirana mikroskopska slika nanočestica hematite
Figure 3. Filtered microscopic image nanoparticles of hematite

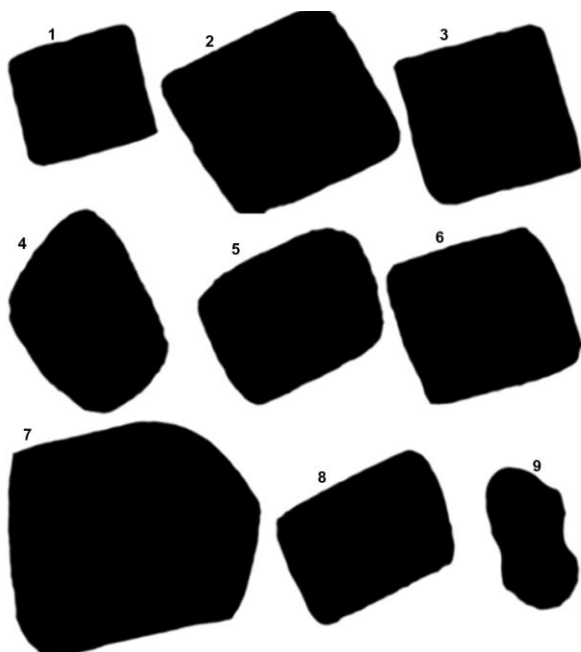
Dakle, kao ulazni parametar u prethodno opisanom postupku segmentacije korišćena je slika 1. Rezultat algoritma segmentacije je devet izolovanih nanočestica hematita koje su prikazane na slici 4 i numerisane brojevima (1-9).



Slika 4. Slike izolovanih nanočestica hematita sa slike 1

Figure 4. Images of isolated nanoparticles of hematite from Figure 1

U cilju dobijanja vrednosti mere izduženosti devet nanočestica hematita sa slike 4 je konvertovano u crno-bele slike (slika) koje su potom analizirane korišćenjem softverskog paketa MatLab.



Slika 5. Crno-bele slike nanočestica hematita sa slike 2

Figure 5. Black and white images of nanoparticles of hematite from Figure 2

3. REZULTATI I DISKUSIJA

Neka su sa N_1, N_2, \dots, N_9 označene odgovarajuće nanočestice sa slike 5. Vrednosti izduženosti $\varepsilon(S)$ ovih devet nanočestica prikazane su u tabeli 1.

Tabela 1. Izduženost nanočestica sa slike 3

Table 1. Elongation of nanoparticles from Figure 3

S	$\varepsilon(S)$
N_1	1.2708
N_2	1.3472
N_3	1.0673
N_4	2.0261
N_5	1.6952
N_6	1.2936
N_7	1.3634
N_8	1.9854
N_9	4.0865

Predložena mera izduženosti $\varepsilon(S)$ u pogledu izduženosti oblika nanočestica daje rezultate iste

vizuelno očekivanim. Naime, najmanje izdužena je nanočestica N_3 ($\varepsilon(N_3)=1.0673$) jer je njen oblik veoma blizu idealnog kvadrata. Sličan kvadratni oblik imaju i nanočestice N_1, N_2, N_6 čije se vrednosti izduženosti kreću od 1.2708 do 1.3472. Nešto veću izduženost ima nanočestica N_7 zbog ne tako pravilnog oblika sa jedne svoje strane. Nanočestice N_5 i N_8 imaju pravougaoni oblik a time i veću meru izduženosti, s tim da je zbog većeg odnosa dužine i širine nanočestica N_8 neznatno izduženija ($\varepsilon(N_8)=1.9854$). Za nanočestice N_4 i N_9 možemo reći da su elipsoidnog oblika, ali je očigledno da je nanočestica N_9 je "više eliptična" što se može videti i na osnovu vrednosti mere izduženosti ($\varepsilon(N_9)=4.0865$), ali i vizuelnim opažanjem nanočestica sa slike 5. Dakle, najizduženija nanočestica je N_9 , dok je najmanje izdužena N_3 .

S druge strane, treba naglasiti da bi za bolju karakterizaciju oblika korisno bilo uključiti i druge deskriptore (cirkularnost, eliptičnost, orijentabilnost) [10,21,30–31]. Kao primer možemo navesti veoma sličnu vrednost izduženosti nanočestica N_7 i N_2 dok seoblici ovih nanočestica ipak prilično razlikuju te mera izduženosti ne može biti jedini deskriptor koji se pouzdano može koristiti za karakterizaciju oblika.

4. ZAKLJUČAK

U ovom radu urađena je analiza TEM slike nanočestica hematita ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$). Opisan je postupak segmentacije slike kojim su dobijeni pojedinačni segmenti (nanočestice) kojima je dalje analiziran oblik korišćenjem mere izduženosti. Preciznost detekcije segmenata od ± 3 piksela govore da se rezultati mogu uzeti sa velikim stepenom tačnosti. Prezentovana je mera izduženosti zasnovane na računanju diskretnih momenata koja je predložena za karakterizaciju oblika nanočestica.

Ova mera zbog jednostavnosti u računanju i realizaciji dobar je kandidat za analizu nanočestica. Eksperimentalni rezultati su pokazali da u pogledu redosleda izduženosti čestica, ova mera daje intuitivno očekivane rezultate, što je poželjna osobina. Međutim, poznato je da ni jedan deskriptor nije dovoljno dobar za primenu u svim situacijama pa korišćenje svakog deskriptora oblika ima svoje prednosti i nedostatke. Zato se za precizniju karakterizaciju oblika nanočestica preporučuje korišćenje više različitih mera (cirkularnost, eliptičnost i orijentabilnost). U nauci o materijalima analiza oblika zahteva dalja istraživanja koja treba da omoguću precizniju karakterizaciju oblika nanočestica, a time i bolje shvatanje njihovog uticaja na fizičke osobine materijala.

LITERATURA

- [1] A.-H.Lu, E.L.Salabas, F.Schüth (2007) Magnetic nanoparticles: synthesis, protection, functionalization, and application., *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.*, 46, 1222–44.
- [2] A.Nagata, H.Sato, Y.Matsui, T.Kaneko, Y.Fujiwara (2013) Magnetic properties of carbon nanotubes filled with ferromagnetic metals, *Vacuum*, 87, 182–186.
- [3] L.Kopanja, D.Žunić, B.Lončar, S.Gyergyek, M.Tadić (2016) Quantifying shapes of nanoparticles using modified circularity and ellipticity measures, *Measurement*, 92, 252–263.
- [4] M.Mohammadkish (2014) Hydrothermal synthesis, characterization and optical properties of ellipsoid shape α -Fe₂O₃ nanocrystals, *Ceram. Int.*, 40, 1351–1358.
- [5] R.Ivković, M.Petrović, B.Jakšić, V.Cerić, M.Milošević (2016) Digital Image Fundamentals through Visible Spectrum, *INFOTEH 2016, XV međunarodni naučno-stručni simpozijum*, Jahorina, Bosna i Hercegovina, 15, 720–724.
- [6] R.Ivković, I.Milosević, B.Gara, M.Pavlović, D.Miljković (2015) Analysis of Digital Image Standard Deviation and Level of Detail, *INFOTEH 2015, XIV međunarodni naučno-stručni simpozijum*, Jahorina, Bosna i Hercegovina, 14, 600–603.
- [7] Y.-C.Chen, Y.-C.Chen, A.-S.Chiang (2008) Template-driven segmentation of confocal microscopy images, *Comput. Methods Programs Biomed.*, 89, 239–247.
- [8] L.Li, Q.An (2016) An in-depth study of tool wear monitoring technique based on image segmentation and texture analysis, *Measurement.*, 79, 44–52.
- [9] R.M.Haralick, L.G.Shapiro (1985) Image segmentation techniques, *Comput. Vision, Graph. Image Process.*, 29, 100–132.
- [10] M.Aktaş, J.Žunić (2011) Measuring shape ellipticity, *Comput. Anal. Images Patterns*, 170–177.
- [11] A.Boschetto, V.Giordano (2012) Powder sampling and characterization by digital image analysis, *Measurement.*, 45, 1023–1038.
- [12] E.S.Gadelmawla (2010) Simple and efficient algorithms for roundness evaluation from the coordinate measurement data, *Measurement.*, 43, 223–235.
- [13] A.M.Herrera-Navarro, H.Jiménez-Hernández, I.R.Terol-Villalobos (2013) Framework for characterizing circularity based on a probability distribution, *Measurement.*, 46, 4232–4243.
- [14] M.Ilić, I.Budak, M.Vučinić Vasić, A.Nagode, U.Kozmidis-Luburić, J.Hodolić, T. Puškar (2015) Size and shape particle analysis by applying image analysis and laser diffraction – Inhalable dust in a dental laboratory, *Measurement.*, 66, 109–117.
- [15] R.Klette, J.Žunić (1999) Digital approximation of moments of convex regions, *Graph. Model. Image Process.*, 61, 274–298.
- [16] P.L.Rosin (2003) Measuring shape: Ellipticity, rectangularity, and triangularity, *Mach. Vis. Appl.*, 14, 172–184.
- [17] P.L.Rosin, J.Žunić (2011) Measuring squareness and orientation of shapes, *J. Math. Imaging Vis.*, 39, 13–27.
- [18] A.B.Sekuler (1996) Axis of elongation can determine reference frames for object perception, *Can. J. Exp. Psychol. Can. Psychol. Expérimentale.*, 50, 270–279.
- [19] M.A.Taylor (2002) Quantitative measures for shape and size of particles, *Powder Technol.*, 124, 94–100.
- [20] J.Žunić, P.L.Rosin, L.Kopanja (2006) On the orientability of shapes., *IEEE Trans. Image Process.*, 15, 3478–3487.
- [21] J.Zunic, P.L.Rosin, L.Kopanja (2006) Shape Orientability, *Comput. Vis. ACCV*, 3852, 11–20.
- [22] J.Zunic, L.Kopanja (2005) On shape orientation when the standard method does not work, *Lect. Notes Comput. Sci.*, 3773, 825–836.
- [23] J.Žunić, L.Kopanja, J.E.J.Fieldsend (2006) Notes on shape orientation where the standard method does not work, *Pattern Recognit.*, 39, 856–865.
- [24] R.Mukundan, K.Ramakrishnan (1998) Moment functions in image analysis: theory and applications, Singapore: World Scientific.
- [25] M.Stojmenović, J.Žunić (2007) Measuring Elongation from Shape Boundary, *J. Math. Imaging Vis.*, 30, 73–85.
- [26] H.Yang, N.Ahuja (2014) Automatic segmentation of granular objects in images: Combining local density clustering and gradient-barrier watershed, *Pattern Recognit.*, 47, 2266–2279.
- [27] P.Muneesawang, C.Sirisathitkul (2015) Size Measurement of Nanoparticle Assembly Using Multilevel Segmented TEM Images, *J. Nanomater.*, 2015, 1–8.
- [28] A.F. de Siqueira, F.C.Cabrera, A.Pagamisse, A.E.Job (2014) Segmentation of scanning electron microscopy images from natural rubber samples with gold nanoparticles using starlet wavelets, *Microsc. Res. Tech.*, 77, 71–78.
- [29] B.Goris, T.Roelandts, K.J.Batenburg, H.Heidari Mezerji, S.Bals (2013) Advanced reconstruction algorithms for electron tomography: From comparison to combination, *Ultramicroscopy.*, 127, 40–47.
- [30] J.Žunić, K.Hirota, P.L.Rosin (2010) A Hu moment invariant as a shape circularity measure, *Pattern Recognit.*, 43, 47–57.
- [31] J.Žunić, K.Hirota, P.L.Rosin (2010) A Hu moment invariant as a shape circularity measure, *Pattern Recognit.*, 43, 47–57.

ABSTRACT

QUANTIFYING THE SHAPE OF NANOPARTICLES: SEGMENTATION AND ELONGATION MEASURE

The influence of the shape of nanoparticles on the magnetic properties of nanoparticle materials is often mentioned, but is not much studied in literature. In order to better understand the magnetic properties of nanomaterials a very important step is to measure shapes using the shape descriptors. As one of the most common descriptors, the elongation measure of nanoparticles was used, while experimental results were obtained using TEM images of hematite. With the goal of shape analysis the images were segmented to produce isolated nanoparticles and after that the elongation of separated nanoparticles was measured. The elongation measure $\varepsilon(S)$ proposed and used in the experiment gives intuitively expected results. On the opposite, it has been pointed out that, like all other shape descriptors $\varepsilon(S)$, besides the undoubted advantages, there are certain disadvantages. Therefore, it is proposed to use several different descriptors, which provide better and more precise characterization of nanoparticles, which can avoid the flaws that some descriptors have.

Keywords: Shape analysis, nanoparticles, elongation, shape descriptors, segmentation.

Scientific paper

Paper received: 29. 06. 2017.

Paper accepted: 30. 07. 2017.

Paper is available on the website: www.idk.org.rs/journal