MIKROSKOPIK TASVIRLARDA ZARRACHALARNING GEOMETRIK, TEKSTURAVIY VA STATISTIK BELGILARINI SHAKLLANTIRISH ALGORITMI

Mamatov Narzullo Solijanovich[1], Asqarov Qudrat Azatbayevich[2]

[1]Toshkent irrigatsiya va qishloq xo'jaligini mexanizatsiyalash muhandislari institute milliy tadqiqot universiteti,n t.f.d. professor,
[2]Toshkent irrigatsiya va qishloq xo'jaligini mexanizatsiyalash muhandislari institute milliy tadqiqot universiteti tayanch doktoranti,
E-mail: m_narzullo@mail.ru, k.askarov@tiiame.uz

K E Y W O R D S

mikroskopik tasvir, havodagi zarrachalar, belgilarni shakllantirish, geometrik belgilar, tekstura, GLCM, LBP, belgilar barqarorligi

A B S T R A C T

Mazkur maqolada mikroskopik tasvirlarda segmentlangan zarrachalarni tavsiflovchi belgilarni shakllantirish algoritmi taklif etilgan. Algoritm har bir zarracha uchun geometrik (o'lcham, shakl, kontur murakkabligi), teksturaviy (GLCM, LBP, Gabor) va statistik (yorqinlik taqsimoti, fon bilan kontrast, chegara keskinligi) belgilarni mikrometr birligida hisoblaydi. Mayda zarrachalarda tekstura ishonchsiz bo'lgani uchun ularga "tekstura yo'q" bayrog'i qo'yiladi, tasvir darajasida esa yorug'lik so'nishi va massaga mutanosib umumlashgan belgilar hisoblanadi. Algoritm etalon niqoblari mavjud 75 ta elektron mikroskop tasvirida sinovdan o'tkazildi. To'g'ri aniqlangan 464 ta zarrachada ekvivalent diametr etalon qiymatlar bilan yuqori moslik ko'rsatdi ($r = 0,993$, nisbiy xato 9,3 %). 1625 ta zarracha bo'yicha barqarorlik tahlili o'lcham va yorqinlik belgilari burilish, masshtab va shovqinga barqaror ekanligini (Spirmen $\rho \geq 0,99$), teksturaviy belgilar esa barqaror emasligini ko'rsatdi. Olingan natijalar o'lcham va statistik belgilarni zarrachalar o'lcham taqsimoti va so'nish koeffitsiyentini baholashda asosiy belgilar sifatida qo'llash maqsadga muvofiqligini asoslaydi.

1. Kirish

Havodagi qattiq zarrachalar, ayniqsa diametri 2,5 mkm dan kichik bo'lgan PM2.5 fraksiyasi, inson salomatligiga eng katta xavf soluvchi ifloslantiruvchilardan biri hisoblanadi [1]. Zarrachalarning sog'liqqa va atmosferaga ta'siri faqat ularning konsentratsiyasiga emas, balki o'lchami, shakli va kelib chiqish manbasiga ham bog'liq. Masalan, zarrachaning yorug'likni so'ndirish qobiliyati diametrining kvadratiga, massasi esa diametrining kubiga mutanosib [2, 3]. Shu sababli zarrachalarni faqat sanash emas, balki ularni har tomonlama tavsiflash muhim ahamiyatga ega.

Zarrachalarning o'lchami va shakli haqidagi eng to'liq ma'lumotni mikroskopik tasvirlar beradi. Biroq tasvirlarni qo'lda tahlil qilish ko'p vaqt talab qiladi va natija tahlilchiga bog'liq bo'ladi. Shuning uchun tasvirdan zarrachalarni avtomatik ajratish va ularni sonli belgilar bilan tavsiflash zarur. Zarracha shakli va o'lchamini ifodalash usullari xalqaro standartlarda belgilangan [4], kukun materiallarini tasvir belgilari asosida tavsiflash ham faol o'rganilmoqda [5].

Zarrachalarni tavsiflash uchun belgilarning uch guruhi keng qo'llaniladi. Geometrik belgilarga yuza, ekvivalent diametr, doirasimonlik, cho'zilganlik, solidlik, M.K.Hu ning o'zgarmas momentlari [6] va Furye deskriptorlari [7] kiradi. Teksturaviy belgilar R.Haralick taklif etgan birgalikda uchrash matritsasi (GLCM) [8], T.Ojala va hammualliflarining lokal ikkilik andozalari (LBP) [9] hamda Gabor filtrlari [10] yordamida

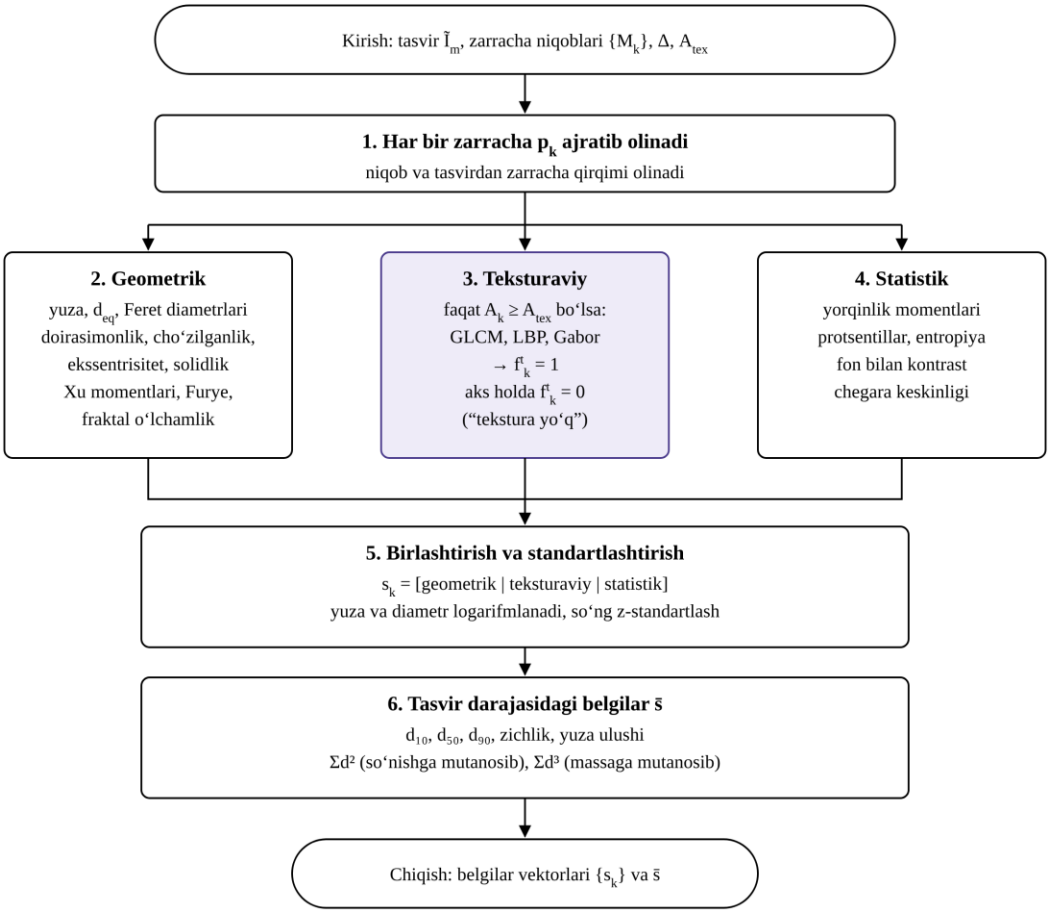
(cc) BY

hisoblanadi. Statistik belgilar zarracha ichidagi yorqinlik taqsimotini ifodalaydi. Bu guruhlar alohida-alohida yaxshi o‘rganilgan, ammo ularni yagona tartibda birlashtirish, ayniqsa mayda zarrachalarda teksturaning ishonchsizligini hisobga olish masalasi yetarlicha ko‘rib chiqilmagan. Bundan tashqari, belgilarning tasvir burilishi, masshtabi va shovqinga barqarorligi kamdan-kam tekshiriladi, holbuki bir xil zarracha turli tasvirlarda turlicha tavsiflansa, keyingi tanib olish bosqichi ishonchsiz bo‘ladi.

Mazkur tadqiqotda mikroskopik tasvirlarda segmentlangan zarrachalarning geometrik, teksturaviy va statistik belgilarini yagona tartibda shakllantiruvchi algoritm taklif etilgan. Algoritmda belgilar mikrometr birligida hisoblanadi, mayda zarrachalar uchun “tekstura yo‘q” bayrog‘i kiritilgan va tasvir darajasida yorug‘lik so‘nishi hamda massaga mutanosib umumlashgan belgilar hisoblanadi. Belgilarning aniqligi etalon niqoblar bilan, barqarorligi esa burilish, masshtab va shovqin ta’sirida tekshirilgan.

2. Usullar

Taklif etilgan algoritmning kirishiga dastlabki ishlovdan o‘tgan tasvir, segmentlash natijasida olingan zarracha niqoblari va piksel o‘lchami beriladi, chiqishida esa har bir zarrachaning belgilar vektori hamda tasvir darajasidagi umumlashgan belgilar olinadi. Algoritmning umumiy tuzilmasi quyidagi rasmda keltirilgan.



1-rasm. Zarrachalar belgilarini shakllantirish algoritmining umumiy tuzilmasi

Algoritm olti bosqichdan iborat bo‘lib, ular quyida batafsil yoritilgan.

2.1. Ma’lumotlar to‘plami. Tadqiqotda har bir zarrachasi alohida belgilangan etalon niqoblari mavjud bo‘lgan Electron Microscopy Particle

CC BY

Segmentation to‘plamidan [13] foydalanildi. To‘plam kukun va nanomateriallarning 465 ta skanerlovchi va o‘tkazuvchi elektron mikroskop tasvirlaridan iborat bo‘lib, ulardan tasodifiy ravishda 75 tasi tanlab olindi. Tasvirlar kattalashtirish darajasi, materiali va foni bo‘yicha farq qiladi, ko‘plarida zarrachalar bir-biriga tegib turadi. Tasvirlar shovqinni kamaytirish va kontrastni tekislash bo‘yicha dastlabki ishlovdan o‘tkazildi [15], zarrachalar esa marker asosidagi suv ayirgich algoritmi [11] bilan segmentlandi.

2.2. Geometrik belgilar. Geometrik belgilar faqat zarracha niqobi bo‘yicha hisoblanadi. Zarracha yuzasi va ekvivalent diametri quyidagicha aniqlanadi:

$$A_k = |p_k|\,\Delta^2, \qquad d_{eq,k} = 2\sqrt{\frac{A_k}{\pi}}, \tag{1}$$

bu yerda $|p_k|$ – k-zarrachadagi piksellar soni, Δ – piksel o‘lchami (mkm/piksel).

Zarrachaning shakli doirasimonlik, solidlik va cho‘zilganlik belgilari bilan ifodalanadi:

$$Circ_k = \frac{4\pi A_k}{P_k^2}, \tag{2}$$

$$Sol_k = \frac{A_k}{A_k^{conv}}, \tag{3}$$

$$Elong_k = \sqrt{\frac{\lambda_1}{\lambda_2}}, \tag{4}$$

bu yerda P_k – zarracha perimetri, A_k^{conv} – zarrachani o‘rab turuvchi qavariq qobiq yuzasi, $\lambda_1 \geq \lambda_2$ – zarracha piksellari koordinatalari kovariatsiya matritsasining xos qiymatlari. Doirasimonlik doira uchun 1 ga teng bo‘lib, cho‘zinchoq va notekis shakllarda kamayadi; solidlik zarracha chetida botiqlar bo‘lganda kamayadi.

Shuningdek, Feret diametrlari (zarrachaning eng katta va eng kichik eni), ekssentrisitet, Xu o‘zgarmas momentlari [6], Furye deskriptorlari [7] va fraktal o‘lchamlik [12] hisoblanadi. Barcha o‘lcham belgilari mikrometr birligida ifodalanadi, bu esa turli kattalashtirishda olingan tasvirlardagi zarrachalarni bevosita solishtirish imkonini beradi.

2.3. Teksturaviy belgilar. Teksturaviy belgilar zarracha ichidagi yorqinlik naqshini ifodalaydi va faqat niqob ichidagi piksellar bo‘yicha hisoblanadi. GLCM matritsasi $P(i,j)$ yonma-yon joylashgan piksellar juftligi yorqinliklarining birgalikda uchrash chastotasini ifodalaydi [8]. Undan kontrast, bir jinslilik, energiya, entropiya va korrelyatsiya belgilari olinadi va to‘rt yo‘nalish bo‘yicha o‘rtachalanadi. Masalan, kontrast va entropiya quyidagicha hisoblanadi:

$$Con = \sum_i \sum_j (i-j)^2\, P(i,j), \qquad H = -\sum_i \sum_j P\,(i,j) log P(i,j). \tag{5}$$

LBP belgisi har bir pikselni uning sakkizta qo‘shnisi bilan solishtirish orqali hosil qilinadi [9]:

$$LBP_8 = \sum_{q=0}^{7} u\left(g_q - g_c\right)2^q, \qquad u(x) = \begin{cases} 1, & x \geq 0, \\ 0, & x < 0, \end{cases} \tag{6}$$

bu yerda g_c – markaziy piksel yorqinligi, g_q – qo‘shni piksellar yorqinligi. Zarracha bo‘yicha burilishga bardoshli bir tekis LBP kodlari gistogrammasi olinadi. Gabor filtrlari [10] esa ma’lum yo‘nalish va chastotadagi naqshlarga sezgir bo‘lib, ularning javob energiyasi belgi sifatida olinadi.

Mayda zarrachalarda piksellar soni kam va ularning katta qismi chegarada joylashgan, shuning uchun teksturaviy belgilar asosan shovqinni aks ettiradi. Buni hisobga olish uchun tekstura bayrog‘i kiritildi:

$$f_k^t = \begin{cases} 1, & A_k \geq A_{tex}, \\ 0, & A_k < A_{tex}, \end{cases} \tag{7}$$

bu yerda A_{tex} – teksturani hisoblash uchun eng kichik yuza. $f_k^t = 0$ bo‘lgan zarrachalar uchun teksturaviy belgilar hisoblanmaydi va keyingi tanib olish bosqichida faqat geometrik hamda statistik belgilar ishlatiladi. Bu PM2.5 uchun ayniqsa muhim, chunki ushbu fraksiyani aynan eng mayda zarrachalar tashkil etadi.

(cc) BY

2.4. Statistik belgilar. Statistik belgilar zarracha ichidagi yorqinlik taqsimotini ifodalaydi: o‘rtacha qiymat, dispersiya, asimmetriya, ekssess, protsentillar va entropiya. Bulardan tashqari, zarrachaning atrofdagi fon bilan kontrasti va chegara keskinligi hisoblanadi. Chegara keskinligi fokusdan tashqarida turgan zarrachalarda past bo‘ladi, shuning uchun u tasvir sifatini ham qisman aks ettiradi.

2.5. Belgilarni birlashtirish va tasvir darajasidagi belgilar. Barcha belgilar bitta s_k vektoriga birlashtiriladi. Belgilar turli shkalalarda bo‘lgani uchun yuza va diametr avval logarifmlanadi, so‘ngra har bir belgi standartlashtiriladi:

$$z = \frac{x-\mu}{\sigma}, \qquad (8)$$

bu yerda μ va σ – belgining o‘quv to‘plamidagi o‘rtacha qiymati va standart og‘ishi. Statistikalarni faqat o‘quv qismidan olish sinov ma’lumotlari haqidagi axborotning modelga “oqib o‘tishi”ning oldini oladi.

Tasvir darajasida zarrachalar zichligi, ular egallagan yuza ulushi, diametr kvantillari d_{10}, d_{50}, d_{90} hamda quyidagi yig‘indilar hisoblanadi:

$$S_2 = \sum_k d_{eq,k}^2, \qquad S_3 = \sum_k d_{eq,k}^3. \qquad (9)$$

S_2 yorug‘lik so‘nishiga, S_3 esa zarrachalar massasiga mutanosib [2, 3]. Bu belgilar mikroskopik tasvir natijalarini atmosfera tasvirlari va PM2.5 konsentratsiyasi bilan bog‘lash imkonini beradi.

2.6. Baholash usuli. Belgilar ikki jihatdan baholandi. Aniqlik tekshiruvida segmentlash natijasidan va etalon niqobdan hisoblangan belgilar faqat to‘g‘ri aniqlangan zarrachalar (etalon bilan kesishma/birlashma nisbati IoU ≥ 0,5) uchun solishtirildi; o‘rtacha mutlaq xato va Pirson korrelyatsiyasi r hisoblandi. Barqarorlik tekshiruvida segmentlash xatosi natijaga ta’sir qilmasligi uchun etalon niqoblardan foydalanildi: tasvir chegarasiga tegmagan va yuzasi kamida 50 piksel bo‘lgan 1625 ta zarracha olindi. Har bir zarracha 30°, 45° va 90° ga burildi, 0,5; 0,75 va 1,5 marta masshtablandi hamda unga Gauss shovqini ($\sigma = 10$ va 20) qo‘shildi. Asl va o‘zgartirilgan qiymatlar orasidagi moslik Spirmen korrelyatsiyasi bilan baholandi [14]:

$$\rho = 1 - \frac{6\sum_{i=1}^{n} D_i^2}{n(n^2-1)}, \qquad (10)$$

bu yerda D_i – i-zarrachaning asl va o‘zgartirilgan belgi qiymatlari bo‘yicha o‘rinlari farqi, n – zarrachalar soni. Barcha o‘zgartirishlarda ρ ≥ 0,9 bo‘lgan belgi barqaror deb hisoblandi.

3. Natijalar va muhokama

Etalon niqoblarda jami 2077 ta zarracha mavjud bo‘lib, segmentlash algoritmi 922 ta zarrachani ajratdi, ulardan 464 tasi to‘g‘ri aniqlandi. Shu zarrachalar uchun geometrik belgilarning aniqligi quyidagi jadvalda keltirilgan.

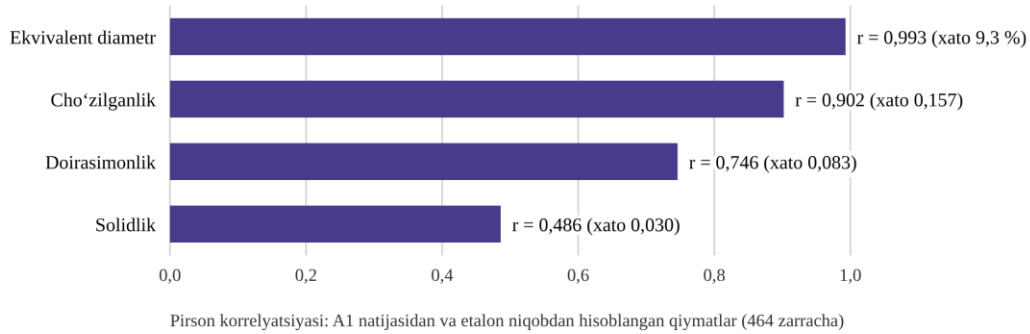
1-jadval

Geometrik belgilarning aniqligi (464 ta zarracha)

Belgi	O‘rtacha mutlaq xato	Pirson korrelyatsiyasi, r
Ekvivalent diametr	9,3 % (nisbiy)	0,993
Doirasimonlik	0,083	0,746
Cho‘zilganlik	0,157	0,902
Solidlik	0,030	0,486

Natijalar quyidagi rasmda ham ko‘rsatilgan.

(cc) BY



2-rasm. Geometrik belgilarning aniqligi

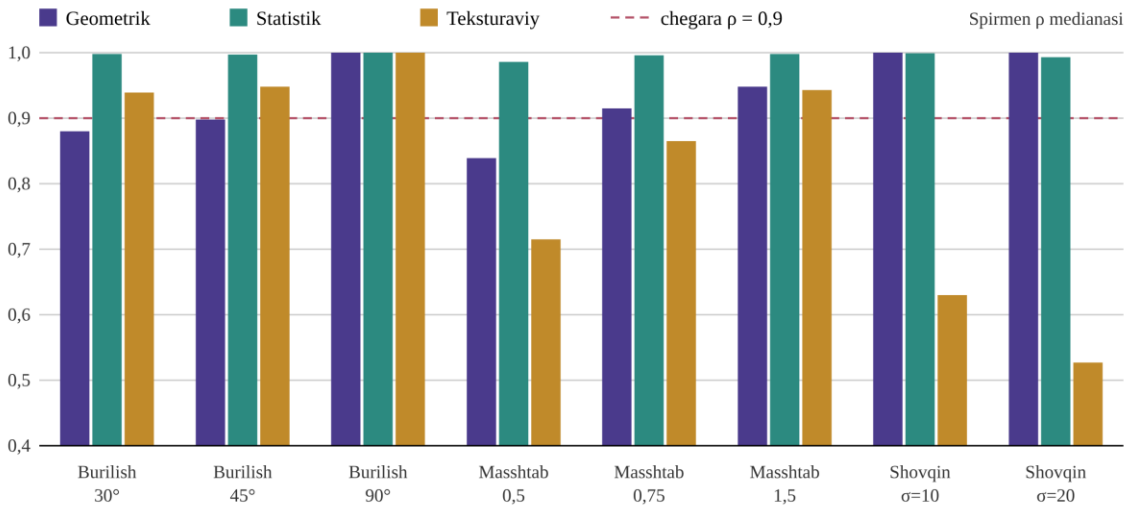
To‘g‘ri aniqlangan zarrachalarda ekvivalent diametr (r = 0,993) va cho‘zilganlik (r = 0,902) yaxshi tiklandi. Doirasimonlik va ayniqsa solidlik chegara aniqligiga sezgir bo‘ldi (r = 0,746 va 0,486), chunki ular perimetr va chegaradagi botiqlarga bog‘liq. Shu bilan birga, etalon zarrachalarning taxminan 22 foizigina to‘g‘ri aniqlangani va zarrachalar soni bo‘yicha o‘rtacha mutlaq xato bir tasvirda 19 tani tashkil etgani (Spirmen korrelyatsiyasi 0,45) ma’lum bo‘ldi. Bu zich tasvirlarda zarrachalarning bir qismi birlashib ketishini va o‘lcham taqsimoti yirik zarrachalar tomon siljishi mumkinligini ko‘rsatadi.

Belgilar guruhlarining barqarorligi quyidagi jadvalda keltirilgan.

Belgilar guruhlarining barqarorligi (1625 ta zarracha, Spirmen ρ medianasi)

O‘zgartirish	Geometrik	Statistik	Teksturaviy
Burilish 30°	0,880	0,998	0,939
Burilish 45°	0,898	0,997	0,948
Burilish 90°	1,000	1,000	1,000
Masshtab 0,5	0,839	0,986	0,715
Masshtab 0,75	0,915	0,996	0,865
Masshtab 1,5	0,948	0,998	0,943
Shovqin σ = 10	1,000	0,999	0,630
Shovqin σ = 20	1,000	0,993	0,527
Barqaror belgilar soni	**10 / 26**	**9 / 10**	**0 / 19**

2-jadval



3-rasm. Belgilar guruhlarining burilish, masshtab va shovqinga barqarorligi

(cc) BY

Zarracha o‘lchamini ifodalovchi belgilar (yuza, ekvivalent diametr, Feret diametrlari) va yorqinlik statistikasi (o‘rtacha qiymat, protsentillar, fon bilan kontrast) barcha o‘zgartirishlarda yuqori barqarorlik ko‘rsatdi ($\rho \geq 0{,}99$). Cho‘zilganlik, ekssentrisitet va doirasimonlik ham asosan barqaror bo‘ldi ($\rho \geq 0{,}92$), yuqori tartibli Xu momentlari, fraktal o‘lchamlik va yuqori garmonikali Furye deskriptorlari esa diskretlashga sezgir ekanligi aniqlandi. Teksturaviy belgilardan birortasi ham barcha o‘zgartirishlarda barqaror chiqmadi: shovqin qo‘shilganda ρ medianasi 0,53–0,63 gacha, tasvir ikki marta kichraytirilganda 0,72 gacha pasaydi. Bu natija mayda zarrachalar uchun “tekstura yo‘q” bayrog‘ini kiritish va teksturaviy belgilarni ikkinchi darajali deb qarash to‘g‘ri ekanligini tasdiqlaydi.

Tadqiqotning ayrim cheklovlarini ham qayd etish lozim. Birinchidan, shovqin qo‘shilganda niqoblar qayta hisoblanmagan, shuning uchun geometrik belgilarning shovqinga to‘liq barqarorligi ($\rho = 1{,}000$) segmentlash xatosi hisobga olinmaganidan kelib chiqadi. 90° burilishda barcha guruhlarda $\rho = 1{,}000$ bo‘lishi ham kutilgan natija, chunki bunday burilish piksel to‘rida interpolyatsiyasiz bajariladi. Ikkinchidan, burilish va masshtab interpolyatsiya yordamida modellashtirilgan va haqiqiy mikroskopdagi fokus o‘zgarishlarini to‘liq aks ettirmaydi. Uchinchidan, belgilarning zarracha turlarini ajrata olish qobiliyati turlar bo‘yicha yorliqlangan to‘plam bo‘lmagani sababli tekshirilmagan.

4. Xulosa

Mazkur tadqiqotda mikroskopik tasvirlarda segmentlangan zarrachalarning geometrik, teksturaviy va statistik belgilarini shakllantirish algoritmi ishlab chiqildi va tajribada tekshirildi. Olingan natijalar asosida quyidagi xulosalar shakllandi:

1. Taklif etilgan algoritm zarrachalarning geometrik, teksturaviy va statistik belgilarini yagona tartibda mikrometr birligida hisoblaydi. Bu turli kattalashtirishda olingan tasvirlardagi zarrachalarni bevosita solishtirish imkonini beradi.

2. Mayda zarrachalar uchun “tekstura yo‘q” bayrog‘i va tasvir darajasidagi so‘nish hamda massaga mutanosib belgilar (S_2, S_3) kiritildi. Ular mikroskopik tahlil natijalarini havo sifatini baholash masalasi bilan bog‘laydi.

3. To‘g‘ri aniqlangan zarrachalarda ekvivalent diametr etalon qiymatlar bilan yuqori moslik ko‘rsatdi ($r = 0{,}993$, nisbiy xato 9,3 %), cho‘zilganlik ham yaxshi tiklandi ($r = 0{,}902$). Biroq zich tasvirlarda etalon zarrachalarning faqat 22 foizi to‘g‘ri ajratildi, ya’ni yakuniy aniqlik ko‘p jihatdan segmentlash sifatiga bog‘liq.

4. O‘lcham va yorqinlik belgilari burilish, masshtab va shovqinga barqaror ($\rho \geq 0{,}99$), teksturaviy belgilar esa barqaror emas (ρ 0,53 gacha pasayadi). Shu sababli o‘lcham taqsimoti va so‘nish koeffitsiyentini baholashda asosan o‘lcham va statistik belgilardan foydalanish maqsadga muvofiq.

5. Keyingi tadqiqotlarda zarracha turlari bo‘yicha yorliqlangan to‘plamda belgilarning ajratish qobiliyatini tekshirish hamda zich joylashgan zarrachalarni ajratishni takomillashtirish rejalashtirilgan.

Foydalanilgan adabiyotlar ro‘yxati

1. Pope, C.A., Dockery, D.W. (2006). Health effects of fine particulate air pollution: lines that connect. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 56(6), 709–742.
2. Hinds, W.C. (1999). *Aerosol Technology: Properties, Behavior, and Measurement of Airborne Particles*. 2nd ed. New York: Wiley.
3. Seinfeld, J.H., Pandis, S.N. (2016). *Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change*. 3rd ed. Hoboken: Wiley.
4. ISO 9276-6:2008. *Representation of results of particle size analysis — Part 6: Descriptive and quantitative representation of particle shape and morphology*. Geneva: ISO.
5. DeCost, B.L., Holm, E.A. (2017). Characterizing powder materials using

keypoint-based computer vision methods. *Computational Materials Science*, 126, 438–445.
6. Hu, M.K. (1962). Visual pattern recognition by moment invariants. *IRE Transactions on Information Theory*, 8(2), 179–187.
7. Zahn, C.T., Roskies, R.Z. (1972). Fourier descriptors for plane closed curves. *IEEE Transactions on Computers*, C-21(3), 269–281.
8. Haralick, R.M., Shanmugam, K., Dinstein, I. (1973). Textural features for image classification. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, SMC-3(6), 610–621.
9. Ojala, T., Pietikäinen, M., Mäenpää, T. (2002). Multiresolution gray-scale and rotation invariant texture classification with local binary patterns. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 24(7), 971–987.
10. Jain, A.K., Farrokhnia, F. (1991). Unsupervised texture segmentation using Gabor filters. *Pattern Recognition*, 24(12), 1167–1186.
11. Vincent, L., Soille, P. (1991). Watersheds in digital spaces: an efficient algorithm based on immersion simulations. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 13(6), 583–598.
12. Mandelbrot, B.B. (1982). *The Fractal Geometry of Nature*. San Francisco: W.H. Freeman.
13. [Mualliflar] ([yil]). *Electron Microscopy Particle Segmentation* [ma'lumotlar to'plami]. [To'liq havola], murojaat sanasi: [kk.oo.yyyy].
14. Spearman, C. (1904). The proof and measurement of association between two things. *The American Journal of Psychology*, 15(1), 72–101.
15. Mamatov, N.S., Niyozmatova, N.A., Jalelova, M.M., Samijonov, A.N., Tojiboyeva, Sh.X. (2023). Methods for improving contrast of agricultural images. *E3S Web of Conferences*, 401, 04020. doi: 10.1051/e3sconf/202340104020.

(cc) BY