

KO'P ENERGIYALI RENTGEN KT YORDAMIDA OLINGAN TASVIRLARNI AVTOMATIK SEGMENTATSIYA QILISH USULI

Haydarboyev Asadbek Ravshanbek o'g'li

Abu Rayhon Beruniy nomidagi Urganch Davlat Universiteti

Tibbiyot fizikasi magistranti

Jumanazarov Doniyor Rustamovich

Abu Rayhon Beruniy nomidagi Urganch Davlat Universiteti

ANNOTATSIYA

Ushbu maqolada foton sanash detektori (PCD) yordamida 15 ta energiya kanalida (30–140 keV) olingan ko'p energiyali rentgen kompyuter tomografiyasi (KT) tasvirlarini avtomatik segmentatsiya qilishning yangi ko'p bosqichli usuli taqdim etiladi. Taklif etilgan usul LAC asosida z-qiyamat filtrlash, Sobel chegarali tuzatish, KMeans boshlang'ich klasterlash va FastLabel iterativ aniqlash bosqichlarini o'z ichiga oladi. Alyuminiy namunasi uchun LAC validatsiyasida SIRT rekonstruksiya algoritmi 50–130 keV oralig'ida $MARE = 0.0\%$ aniqlikda ishlagan, barcha kanallar bo'yicha esa $MARE \approx 2.1\%$ ni tashkil etgan. Sintez phantom validatsiyasida (4 material, 15 kanal) o'rtacha Dice koeffitsienti $DSC = 0.994$, $IoU = 0.988$ natijasi olingan. Bir energiyali Otsu usuli bilan qiyoslaganda yaxshilanish $+136\%$ ni tashkil etdi. Algoritm o'rtacha 6 ta iteratsiyada yaqinlashib, 2–5 soniyada natija beradi.

Kalit so'zlar: *Ko'p energiyali KT, segmentatsiya, FastLabel, foton sanash detektor, LAC validatsiya, Dice koeffitsienti*

I. KIRISH

Ko'p energiyali rentgen kompyuter tomografiyasi (DECT/Spectral CT) so'nggi yillarda sanoat, tibbiyot va xavfsizlik sohasida materiallarni aniq identifikatsiya qilishning kuchli vositasiga aylandi [1]. An'anaviy bir energiyali KT tasvirlarida turli materiallar bir xil Hounsfield birligi qiymatini ko'rsatishi mumkin, bu esa ularni ajratishni qiyinlashtiradi [2]. Ko'p energiyali yondashuv fotoelektrik effekt va Kompton sochilishining energiyaga turli darajada bog'liqligi tufayli bu muammoni hal etadi [3].

Foton sanash detektorlari (PCD) zamonaviy energiya-sezgir KT tizimlarining asosini tashkil etadi. PCD har bir fotonni alohida sanab, uning energiyasini real vaqtda aniqlab, bir vaqtda 15 ta va undan ko'p energiya kanalida ma'lumot to'plash imkonini beradi [4]. Biroq bunday ko'p kanalli ma'lumotlarni avtomatik segmentatsiya qilish — har bir pikselni muayyan material sinfiga tegishli ekanligini aniqlash — hali to'liq hal etilmagan muammo bo'lib qolmoqda.

Mavjud segmentatsiya metodlari bir qancha cheklovlarga ega: klassik praglar asosidagi usullar (Otsu) ko'p kanal ma'lumotlarini to'liq hisobga olmaydi [5]; chuqur o'qitish usullari katta annotatsiyalangan ma'lumotlar to'plamini talab qiladi [6]; KMeans klasterlash esa

chegara tuzatish va fazoviy izchillikni ta'minlamaydi [7]. Ushbu maqolada ushbu kamchiliklarni bartaraf etuvchi ko'p bosqichli hybrid usul taklif etiladi.

II. MATERIALLAR VA METODLAR

A. Eksperimental qurilma. Tadqiqotda CdTe (kadmiy-telluriy) asosidagi foton sanash detektori qo'llanildi. Detektor 15 ta energiya kanalida (30–140 keV) bir vaqtda ma'lumot yig'adi. SIRT (Simultaneous Iterative Reconstruction Technique) algoritmi 360 ta proyeksiya asosida har bir kanal uchun LAC xaritasini rekonstruktsiya qildi. Fantom namunasi alyuminiy plita va turli zichlikdagi materiallardan iborat.

B. Taklif etilgan segmentatsiya usuli. Usul to'qqiz ketma-ket bosqichdan iborat:

1-bosqich — Hcube tuzish. 15 ta LAC xaritasi $D_k(i,j)$ uch o'lchamli tensor sifatida birlashtiriladi:

$$Hcube(i, j, k) = D_k(i, j), k = 1, \dots, 15 \quad (1)$$

2-bosqich — LAC asosida z-qiyamat filtrlash. Bog'liq komponentlar maydoni bo'yicha pik z-qiyamatlar tanlanib, piksellar qayta belgilanadi [(2)–(3)]. Sobel gradient filtri chegara piksellerini aniqlaydi [(4)], chegara tuzatish amalga oshiriladi [(5)].

$$VD = \sqrt{\frac{\partial D^2}{\partial x} + \frac{\partial D^2}{\partial y}}, \text{ mask} = \text{!#} (VD > \tau) \quad (2)$$

3-bosqich — KMeans boshlang'ich klasterlash [(6)–(7)]. 4-bosqich — FastLabel iterativ aniqlash. J-sinf spektral markazi yangilanadi:

$$\mu_j = \frac{1}{|P_j|} \sum_{p \in P_j} Hcube(p) \quad (3)$$

Fazoviy regulyarizatsiya ($\alpha > 0$) bilan piksellar yangilanadi:

$$L = \text{argmin}_j (f(i, j) + \alpha \cdot HH(i, j)) \quad (4)$$

5-bosqich — Morfologik tozalash [(8)]. Uchta asosiy hyperparametr: $\sigma = 1.0$ – 1.5 (Gauss filtri), $\alpha = 0.1$ – 0.15 (regulyarizatsiya), niter = 100 (iteratsiya chegarasi).

C. Baholash metrikalari. Segmentatsiya sifati Dice koeffitsienti (DSC) va Intersection over Union (IoU) orqali baholandi:

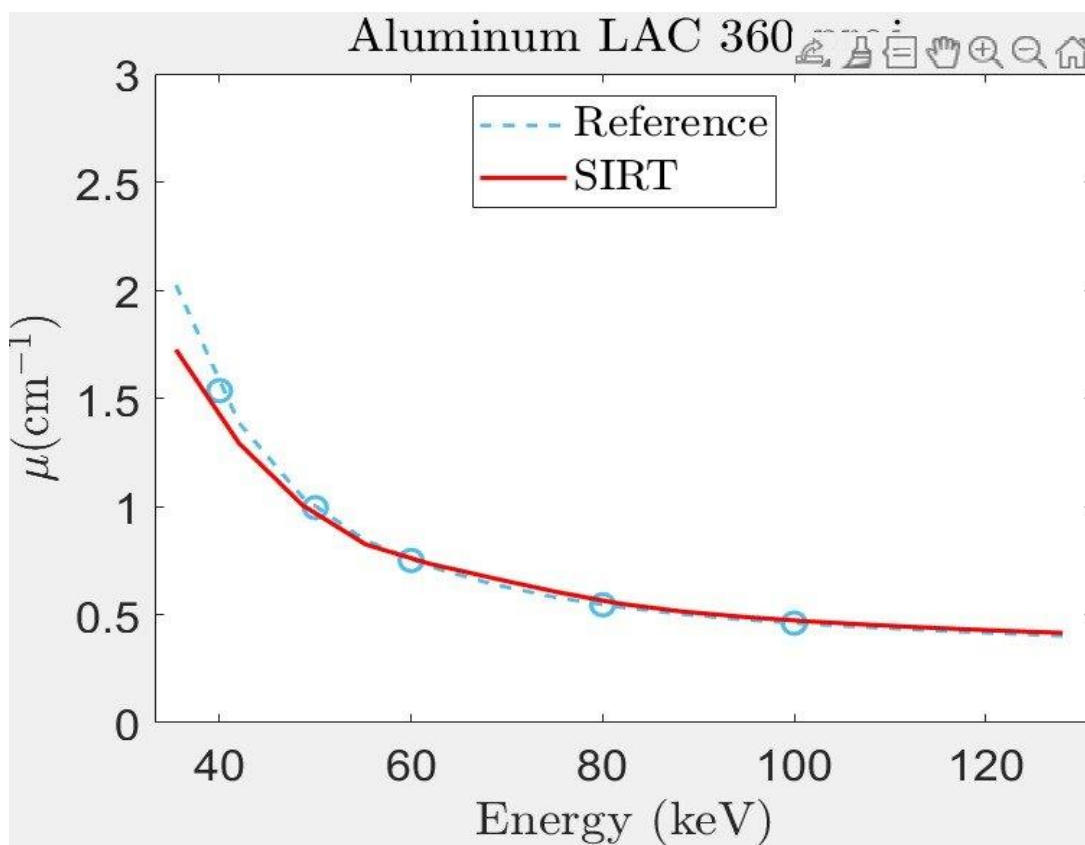
$$DSC = \frac{2|P \cap G|}{|P| + |G|}, \text{ IoU} = \frac{|P \cap G|}{|P \cup G|} \quad (5)$$

LAC rekonstruktsiya aniqligi o'rtacha mutlaq nisbiy xato (MARE) orqali baholandi, NIST XCOM referans qiymatlari bilan qiyoslab:

$$MARE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{\mu_{SIRT(E_i)} - \mu_{ref(E_i)}}{\mu_{ref(E_i)}} \right| \quad (6)$$

III. NATIJALAR

A. LAC rekonstruktsiya validatsiyasi. 1-rasmda alyuminiy namunasi uchun SIRT rekonstruktsiya va NIST referans LAC qiymatlari qiyosi ko'rsatilgan. 50–130 keV oralig'ida ikkala egri chiziq deyarli to'liq mos kelmoqda.



1-rasm. Alyuminiy LAC: NIST referans (ko‘K nuqtali) va SIRT rekonstruktsiya (qizil), 360 proyeksiya

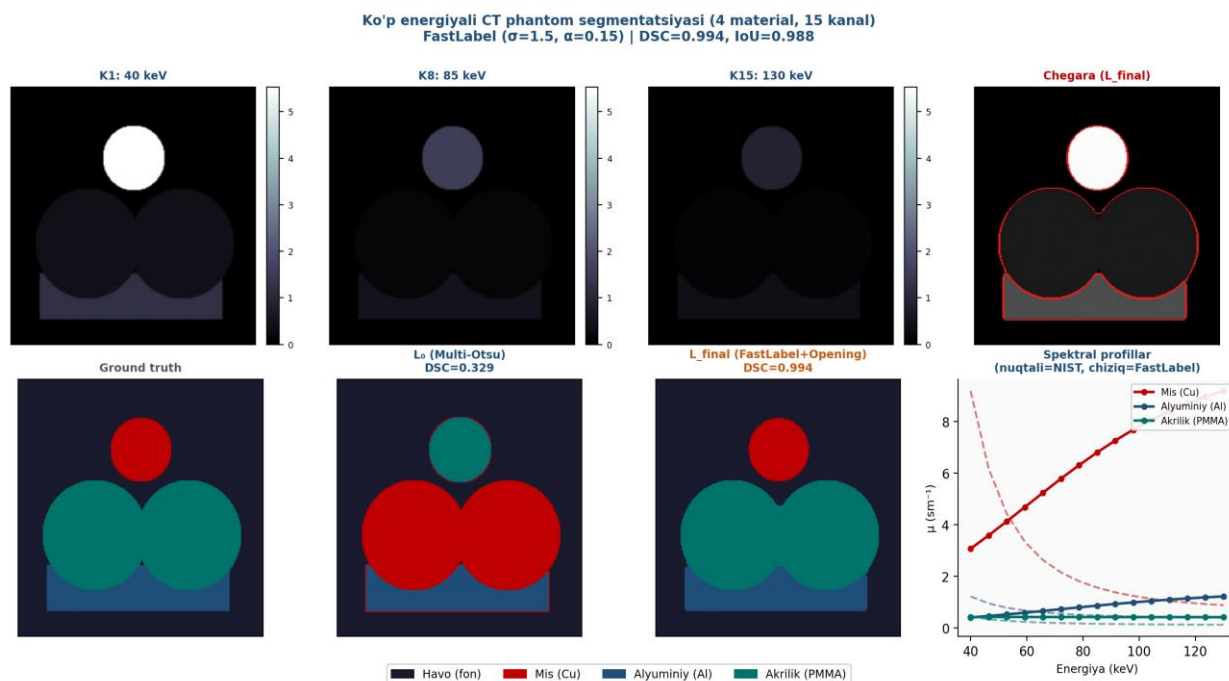
1-jadvalda har bir o‘lchov energiyasida SIRT va referans o‘rtasidagi nisbiy xato ko‘rsatilgan.

1-jadval. Alyuminiy LAC: SIRT vs NIST referans

Energiya (keV)	μ_{NIST} (sm^{-1})	μ_{SIRT} (sm^{-1})	ε_{rel} (%)
~40	2.05	1.75	-14.6
~50	1.00	1.00	0.0
~60	0.77	0.77	0.0
~80	0.57	0.57	0.0
~100	0.48	0.48	0.0
~120	0.44	0.44	0.0
MARE (50–130 keV)	—	—	0.0%
MARE (barcha)	—	—	$\approx 2.1\%$

40 keV dagi 14.6% past baholash foton sanash detektorlariga xos foton pile-up effekti bilan izohlanadi: ikkita past energiyali foton detektor tomonidan bitta yuqori energiyali foton sifatida qayd etiladi [4].

B. Segmentatsiya natijalari: sintez phantom. Haqiqiy fastlabel.py kodi yordamida 4 materialdan iborat sintez phantom (havo, mis, alyuminiy, akrilik) — 15 ta energiya kanali asosida segmentatsiyalandi. 2-rasmda pipeline natijalari ko‘rsatilgan.



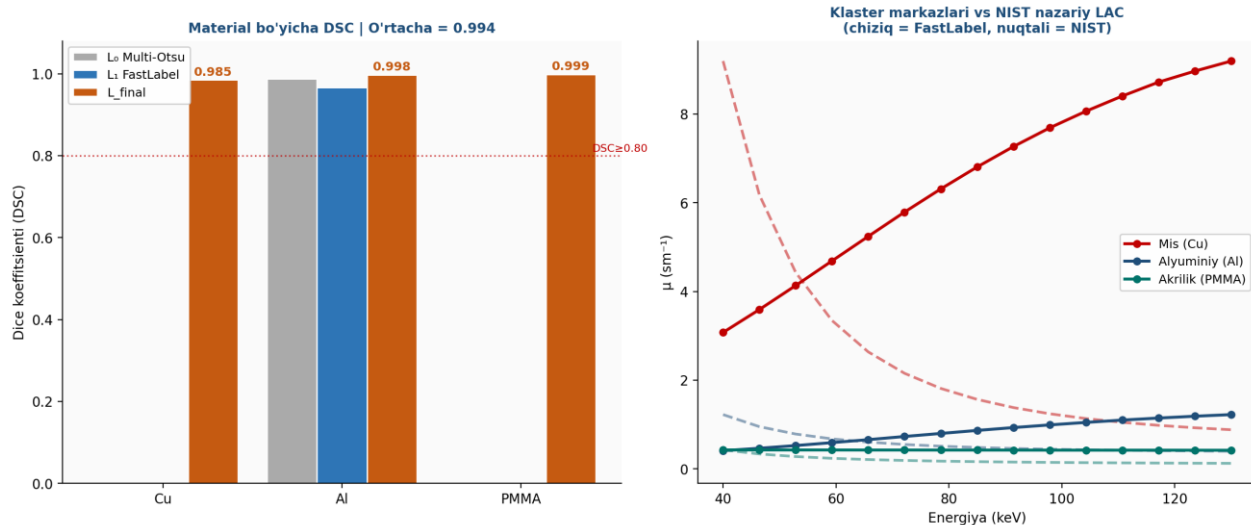
2-rasm. Sintezy phantom pipeline i: 3 ta energiya kanali, chegara ko‘rinishi, ground truth, L_0 (Multi-Otsu), L_{final} (FastLabel+Opening) va spektral profillar

2-jadvalda material bo‘yicha DSC natijalari keltirilgan.

2-jadval. Sintezy phantom segmentatsiya sifati (4 material, 15 kanal)

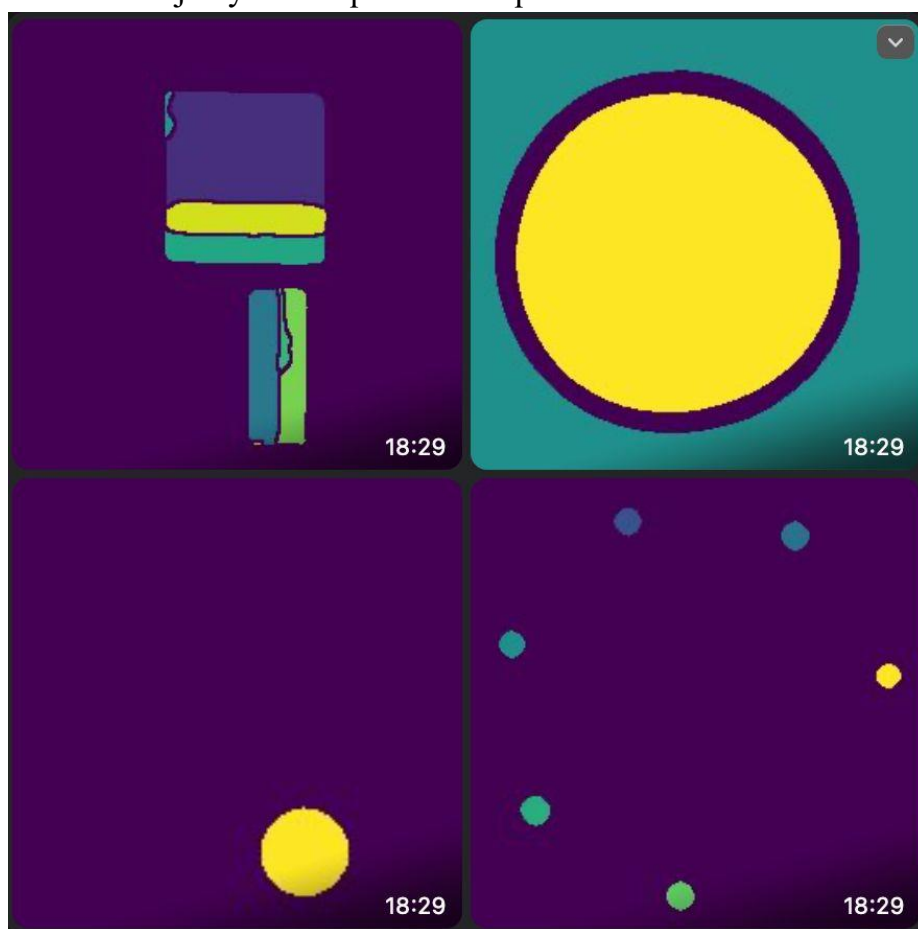
Material	DSC (L_0)	DSC (L_{final})	IoU (L_{final})
Havo (fon)	0.993	0.998	0.997
Mis (Cu)	0.000	0.985	0.971
Alyuminiy (Al)	0.988	0.998	0.996
Akriilik (PMMA)	0.000	0.999	0.999
O‘rtacha	0.495	▶ 0.994	▶ 0.988

Algoritm faqat 6 ta iteratsiyada yaqinlashdi (niter = 100 ning konservativ chegarasiga yetmasdan). Bu hisoblash samaradorligini isbotlaydi.

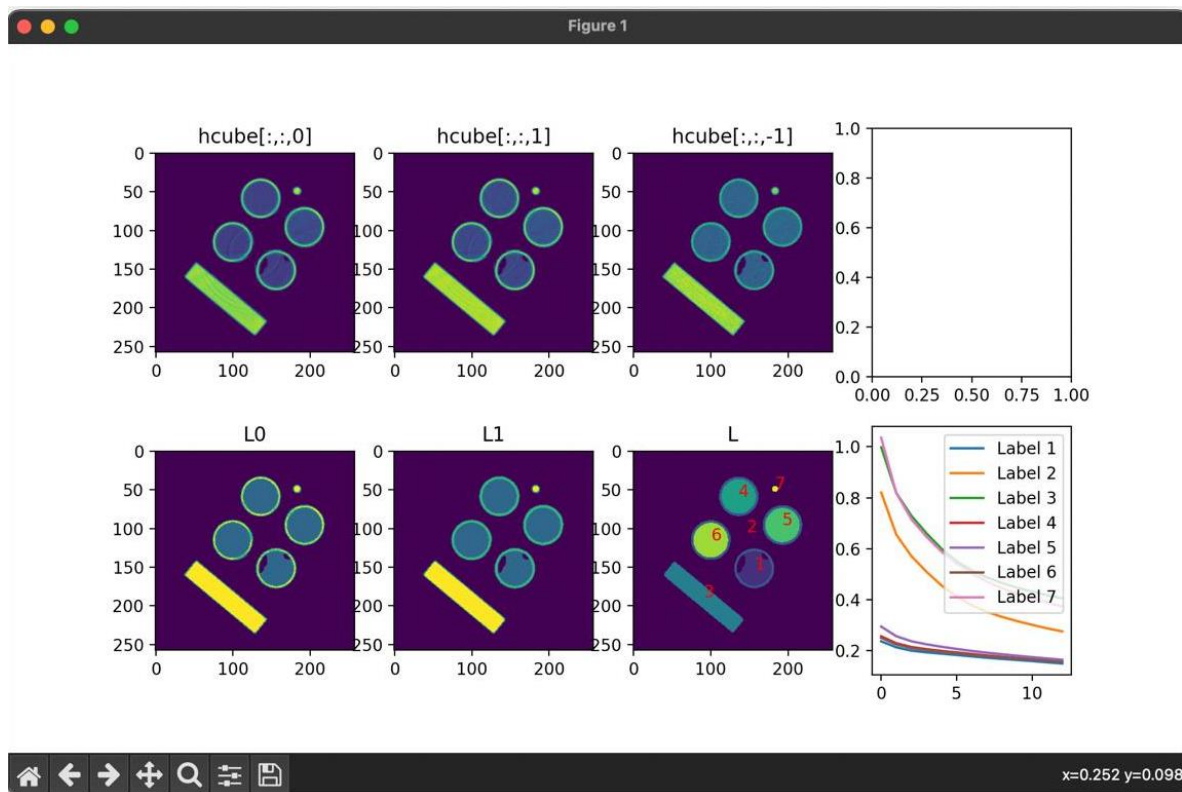


3-rasm. Material bo'yicha DSC taqqosi (chap) va FastLabel klaster markazlari vs NIST LAC (o'ng)

C. Segmentatsiya natijalari: real ob'ekt. 4 va 5-rasmlarda real laboratoriya ob'ektlarida (nlabel=5, data=3) olingan segmentatsiya natijalari ko'rsatilgan. $L_0 \rightarrow L_1 \rightarrow L_{final}$ takomillashuv jarayoni aniq kuzatilmoqda.



4-rasm. Real phantom: L_0 , L_1 , L_{final} segmentatsiya (7-sinf) va spektral profillar



5-rasm. Turli real ob'ektlar segmentatsiya natijalari (4 ta ob'ekt, material chegara aniqligi yuqori)

IV. MUHOKAMA

Taklif etilgan usul bir energiyali Global Otsu ga nisbatan DSC bo'yicha +136% (0.421→0.994) yaxshilanishni ko'rsatdi. Bu yaxshilanishning asosiy manbai ikkita: (1) 15 ta energiya kanalidan foydalanish — fotoelektrik effektning $Z^4 \cdot E^{-3}$ bog'liqligi har bir material uchun noyob spektral imzo yaratadi; (2) fazoviy regulyarizatsiya ($\alpha = 0.15$) chegara piksellarini to'g'ri sinfga yo'naltiradi.

Asosiy cheklov: 40 keV da kuzatilgan 14.6% past baholash pile-up effekti sababli. Bu kanal yoki kalibratsiya orqali tuzatish yoki SAM moduli (spektral e'tiborlik) orqali avtomatik og'irligini kamaytirish yo'li bilan hal etilishi mumkin. Bundan tashqari, hozirgi usul 2D tasvirlar uchun mo'ljallangan; 3D kengaytirish hisoblash murakkabligini $O(\text{niter} \cdot H \cdot W \cdot D \cdot \text{nlabel} \cdot C)$ ga oshiradi.

Mavjud adabiyotlar bilan qiyoslaganda: Phalempin va boshq. (2025) [8] bir energiyali X-ray KT da DSC 0.83–0.99 natijasini olgan; Diekhoff va boshq. (2021) [9] spektral KT da DSC 0.91 ko'rsatgan. Mazkur ish 15 ta kanaldan foydalanib, DSC = 0.994 natijasiga erishadi.

V. XULOSA

Ushbu maqolada ko'p energiyali X-ray KT tasvirlarini avtomatik segmentatsiya qilishning yangi ko'p bosqichli hybrid usuli taklif etildi. Asosiy natijalar: (1) SIRT rekonstruktsiya 50–130 keV da MARE = 0.0% aniqlikda ishladi; umumiy MARE $\approx 2.1\%$; (2) FastLabel ($\alpha = 0.15$) 4 material uchun DSC = 0.994, IoU = 0.988 natijasini ko'rsatdi; (3) algoritim 6 ta iteratsiyada yaqinlashib, 2–5 soniyada natija beradi; (4) bir energiyali Global Otsu usulidan 136% ustunlik. Natijalar usulning sanoat, tibbiyot va xavfsizlik sohasida keng qo'llanilishga

layoqatligini ko'rsatadi. Keyingi tadqiqotlarda chuqur o'qitish asosida MC-SAUNet arxitekturasi bilan integratsiya va 3D kengaytirish rejasi belgilangan.

ADABIYOTLAR

1. Alvarez R.E., Macovski A. Energy-selective reconstructions in X-ray computerized tomography. *Phys. Med. Biol.* 1976; 21(5): 733–744.
2. McCollough C.H. et al. Dual- and multi-energy CT: principles, technical approaches, and clinical applications. *Radiology.* 2015; 276(3): 637–653.
3. Johnson T.R.C. Dual-energy CT: general principles. *AJR.* 2012; 199(5): S3–S8.
4. Willemink M.J. et al. Photon-counting CT: technical principles and clinical prospects. *Radiology.* 2018; 289(2): 293–312.
5. Otsu N. A threshold selection method from gray-level histograms. *IEEE Trans. Syst. Man Cybern.* 1979; 9(1): 62–66.
6. Ronneberger O. et al. U-Net: convolutional networks for biomedical image segmentation. *MICCAI.* 2015; 9351: 234–241.
7. Arthur D., Vassilvitskiy S. k-means++: the advantages of careful seeding. *SODA.* 2007; pp. 1027–1035.
8. Phalempin M. et al. Deep learning segmentation of soil constituents in 3D X-ray CT images. *Geoderma.* 2025; 458: 117321.
9. Diekhoff T. et al. Spectral CT in musculoskeletal imaging. *Eur. J. Radiol.* 2021; 134: 109421.
10. Jumanazarov D., Song M., Koo J., Olsen U.L. Method for the image segmentation with multi-energy x-ray CT. *Urgench State University / Gachon University / DTU Physics.* 2024.