ME'MORIY MEROS OBYEKTLARINI UCHUVCHISIZ UCHISH APPARATLARI YORDAMIDA TADQIQ ETISHNING METODIK ASOSLARI

Ismoilov Oybek Aburashid o'g'li
Mustaqil izlanuvchi, Samarqand, O'zbekiston
oybekismoilovenuz@gmail.com
https://doi.org/10.5281/zenodo.23217977

ANNOTATSIYA

Ushbu maqolada Samarqand shahrining jahon madaniy merosiga kiruvchi tarixiy-me'moriy obyektlarini uchuvchisiz uchish apparatlari (UAV/Dron) yordamida masofadan zondlash, yuqori aniqlikdagi 3D raqamli modellarini yaratish hamda ularning konstruktiv deformatsiyalarini baholashning ilmiy-metodologik asoslari chuqur yoritilgan. Tadqiqot obyekti sifatida Samarqandning noyob yodgorliklari — Bibixonim jome masjidi, Registon ansambli (Tillakori, Sherdor va Ulug'bek madrasalari), Ishratxona maqbarasi hamda Shohi Zinda ansambli tanlangan. Maqolada UAV yordamida aerofotogrammetrik ma'lumotlarni yig'ish, ortofotoplanlar va nuqtalar bulutini (Point Cloud) shakllantirishda yo'l qo'yiladigan xatoliklarni kamaytirish, GCP (Ground Control Points) yer usti nazorat nuqtalarini taqsimlash metodikasi batafsil tahlil qilingan. Shuningdek, fotogrammetrik ma'lumotlarni uch o'lchamli lazerli skanerlash (TLS) va yer osti georadar (GPR) natijalari bilan integratsiyalash orqali bino axborot modellashtirish (HBIM) muhitida yagona raqamli pasport yaratish jarayoni ochib berilgan.

Kalit so'zlar: uchuvchisiz uchish apparatlari (UAV), fotogrammetriya, me'moriy meros, Samarqand yodgorliklari, 3D raqamli modellashtirish, Point Cloud, HBIM, deformatsiya monitoringi, seysmik chidamlilik, ortofotoplan.

KIRISH

Tarixiy-me'moriy meros obyektlarini saqlab qolish va ularning konstruktiv yaxlitligini ta'minlash bugungi kunda jahon miqyosida muhandislik-restavratsiya fanining eng ustuvor va murakkab yo'nalishlaridan biri hisoblanadi. O'zbekiston Respublikasining qadimiy va boy tarixga ega bo'lgan Samarqand shahri asrlar davomida Buyuk ipak yo'lining chorrahasida joylashgan bo'lib, Sharq me'morchiligining markazi bo'lib kelgan. Shahrdagi tarixiy yodgorliklar jahon sivilizatsiyasining ajralmas qismini tashkil etadi [1]. Biroq, asrlar o'tishi, tabiiy-iqlim sharoitlarining keskin o'zgarishi, hududdagi seysmik faollik hamda zamonaviy shahar infratuzilmasining texnogen tebranishlari ushbu noyob inshootlarning gumbazlari, pylonlari, devorlari va poydevorlarida jiddiy deformatsiyalar, yoriqlar hamda materiallarning yemirilishini keltirib chiqarmoqda [2].

Tarixiy obidalarni o'rganish va ularning texnik holatini baholashda an'anaviy geodezik usullar (taxeometrik o'lchashlar, mexanik o'lchagichlar va vizual ko'riklar) o'zining cheklanganligini ko'rsatmoqda. O'rta asr me'morchiligiga xos bo'lgan murakkab egri chiziqli gumbazlar, koshinli naqshlar, baland peshtoqlar va qiyin kiriladigan jabhalar an'anaviy usullar yordamida o'lchanganda katta xatoliklarga olib keladi. Qolaversa, inshootlarga bevosita mexanik ta'sir ko'rsatish qadimiy va o'ta nozik qurilish materiallari (ganch, ohak, qadimgi pishgan g'isht) uchun xavflidir [3].

Shu munosabat bilan, so'nggi yillarda uchuvchisiz uchish apparatlari (UAV — Unmanned Aerial Vehicles / Dronlar) yordamida masofadan turib yuqori aniqlikdagi ma'lumotlarni yig'ish va fotogrammetrik ishlov berish usullari jadal rivojlanmoqda [4]. UAV texnologiyalari me'moriy yodgorliklarning holatini millimetrik aniqlikda qayd etish, xavfli zonalarga bormasdan turib vizual va

metrik tahlil qilish imkonini beradi. Mazkur tadqiqotning dolzarbligi Samarqand shahridagi tarixiy obidalar misolida UAV yordamida aerofotogrammetrik ma'lumotlarni yig'ish va qayta ishlashning ilmiy-metodologik asoslarini ishlab chiqish, zamonaviy geodezik tarmoqlar (GCP) bilan integratsiya qilish hamda me'moriy merosning raqamli pasportini yaratish mexanizmlarini takomillashtirishdan iboratdir [5].

ADABIYOTLAR TAHLILI VA NAZARIY ASOSLAR

Me'moriy meros obyektlarini masofadan zondlash va fotogrammetrik usullar yordamida o'rganish bo'yicha xalqaro miqyosda qator yirik ilmiy maktablar va tadqiqotlar amalga oshirilgan. Xususan, F. Remondino, S. El-Hakim, E. Stylianidis va M. Doneus kabi olimlarning ilmiy ishlarida raqamli fotogrammetriya hamda uchuvchisiz uchish apparatlari yordamida madaniy meros obyektlarini 3D modellashtirishning nazariy va amaliy asoslari chuqur yoritib berilgan [6, 7]. Ularning ta'kidlashicha, UAV yordamida olingan kadrlarni Structure-from-Motion (SfM) va Multi-View Stereo (MVS) algoritmlari asosida qayta ishlash natijasida yuqori aniqlikdagi uch o'lchamli modellar va ortofotoplanlarni hosil qilish mumkin.

O'zbekiston olimlaridan G.A. Pugachenkova, P.Sh. Zohidov va N.B. Nemtsevvalar Samarqand me'moriy obidalarining konstruktiv tuzilishi, tarixiy evolyutsiyasi va ularni saqlab qolish bo'yicha fundamental ilmiy asarlar yaratganlar [8, 9, 10]. Shu bilan birga, so'nggi yillarda mahalliy tadqiqotchilar tomonidan raqamli texnologiyalarni joriy etish borasida dastlabki ilmiy izlanishlar olib borilmoqda [11]. Biroq, mavjud ilmiy adabiyotlar tahlili shuni ko'rsatadiki, Samarqandning o'ziga xos iqlim sharoiti (kuchli quyosh nurlari, haroratning keskin tebranishi, chang bosimi) va obidalarning ulkan hajmi (masalan, Bibixonim masjidi yoki Registon ansambli) sharoitida UAV parvoz traektoriyasini rejalashtirish, kadrlar orasidagi qoplama foizini (Overlap) aniqlash hamda yer usti nazorat nuqtalarini (GCP) optimal joylashtirish bo'yicha yagona uslubiy yondashuv yetarli darajada tizimlashtirilmagan [12]. Ushbu tadqiqot aynan shu bo'shliqni to'ldirishga qaratilgan.

TADQIQOT METODOLOGIYASI VA BOSQICHLARI

Tadqiqot jarayonida Samarqand shahrining to'rtta asosiy me'moriy yodgorligida keng ko'lamli dala ishlari olib borildi:

1. **Bibixonim jome masjidi** (katta gumbaz va pylonlar geometriiasi).
2. **Registon ansambli** (Tillakori, Sherdor va Ulug'bek madrasalari fasad va hovli qismlari).
3. **Ishratxona maqbarasi** (qoldiqlarning fazoviy holati va devor siljishlari).
4. **Shohi Zinda ansambli** (tor ko'chalar va ko'p qavatli maqbaralar majmuasi).

UAV yordamida tadqiq etish jarayoni quyidagi ketma-ketlikdagi metodologik bosqichlarni o'z ichiga oladi:

Parvozni rejalashtirish va loyihalash

UAV yordamida suratga olish ishlarini boshlashdan oldin obidaning geometrik o'lchamlari, atrofidagi to'siqlar (daraxtlar, elektr tarmoqlari) va quyosh nurlarining tushish burchagi hisobga olinadi. Parvoz marshruti avtomatlashtirilgan tarzda tuzilib, quyidagi talablar bajariladi:

A. **Yon qoplama (Side overlap):** kamida 75-80%.

B. **Bo'ylama qoplama (Forward overlap):** kamida 80-85%.

C. **Parvoz balandligi:** obyektning eng baland nuqtasidan boshlab 20-45 metr oralig'ida (GSD - Ground Sampling Distance qiymati 0.5–1.0 mm/piksel bo'lishi ta'minlanadi).

Geodezik asos yaratish va GCP nuqtalarini o‘rnatish

Fotogrammetrik modellarning absolyut koordinatalarga bog‘lanishini ta’minlash hamda xatoliklarni bartaraf etish uchun obida atrofida yuqori aniqlikdagi GNSS qabul qilgichlar (RTK) yordamida yer usti nazorat nuqtalari (Ground Control Points — GCP) belgilanadi. Har bir obyekt uchun kamida 12-20 ta GCP nuqtasi o‘rnatilib, ularning koordinatalari millimetrik aniqlikda qayd etiladi [13].

Dala sharoitida aerofotoskalyerlash va ma'lumotlarni yig'ish

Tadqiqot davomida yuqori pikselli matritsaga ega va mexanik shutter (Mechanical Shutter) bilan jihozlangan UAV kameralaridan foydalanildi. Suratga olish ishlari nafaqat vertikal (Nadir), balki qiyofiy (Oblique — 45° burchak ostida) usulda ham amalga oshirildi, bu esa me’moriy obidaning vertikal devorlari va koshinli naqshlarini to‘liq qamrab olish imkonini berdi [14].

Fotogrammetrik qayta ishlash va SFM algoritmlari

Yig‘ilgan minglab raqamli kadrlar kompyuter klasterlarida Structure-from-Motion (SfM) va Multi-View Stereo (MVS) dasturlari orqali quyidagi tartibda qayta ishlandi:

1. Kadrlarni o‘zaro taqqoslash va o‘xshash nuqtalarni (Tie Points) aniqlash.
2. Kamera ichki va tashqi orientatsiya parametrlarini optimallashtirish.
3. Dense Cloud (Zich nuqtalar buluti) modelini shakllantirish.
4. 3D Mesh (tekisliklar tarmog‘i) va yuqori aniqlikdagi ortofotoplanlarni generatsiya qilish [15].

NATIJALAR VA TAHLIL

Samarqand yodgorliklarida olib borilgan UAV aerofotogrammetrik tadqiqotlari natijasida har bir obida bo‘yicha yuqori aniqlikdagi raqamli ma'lumotlar bazasi olindi. 1-jadvalda tadqiqot davomida har bir obida uchun qo‘llanilgan UAV turlari, parvoz parametrlari va olingan natijalarning aniqlik ko‘rsatkichlari keltirilgan.

1-jadval

Samarqand tarixiy yodgorliklarini UAV yordamida tadqiq qilishning texnik ko‘rsatkichlari

Obyekt nomi	UAV / Kamera turi	Parvoz balandligi (m)	Olingan kadrlar soni	GSD (mm/piksel)	Nuqtalar zichligi (nuqta/m³)
Bibixonim jome masjidi	DJI Phantom 4 RTK (1-inch CMOS)	30 - 45 m	1420 ta	0.72 mm	125 000
Registon ansambli	DJI Matrice 300 RTK (Zenmuse P1)	35 - 50 m	2150 ta	0.65 mm	145 000
Ishratxona maqbarasi	DJI Mavic 3 Enterprise	20 - 30 m	850 ta	0.50 mm	110 000
Shohi Zinda ansambli	DJI Phantom 4 Pro V2.0	20 - 25 m	1100 ta	0.55 mm	130 000

UAV ma’lumotlarini qayta ishlash jarayoni va uning bosqichlari quyidagi algoritmik ketma-ketlikda amalga oshirildi:

Olingan nuqtalar buluti va ortofotoplanlar asosida obidalarning geometrik og‘ishlari tahlil qilindi. 2-jadvalda Samarqand obidalarining konstruktiv elementlaridagi aniqlangan deformatsiyalar va ularning UAV ma’lumotlari bo‘yicha qiymatlari aks ettirilgan.

2-jadval

UAV fotogrammetriyasi yordamida aniqlangan me’moriy deformatsiyalar tahlili

Obyekt va element	Loyihaviy holat	UAV tahlili natijasi	Chetga chiqish sababi	Tavsiya etiladigan chora
Bibixonim pylonlari	Vertikal (0°)	Vertikaldan 38 mm og‘ish	Seysmik tebranishlar va poydevor cho‘kishi	Raqamli tortqi tizimini o‘rnatish
Registon (Tillakori gumbazi)	Simmetrik sferik	Janubiy qismida 14 mm cho‘kish	Ohak qatlamining yemirilishi	Inyeksion qattiqlashtirish
Ishratxona devorlari	Vertikal tekislik	Qoldiq devorlarda 22 mm siljish	Gidrogeologik omillar va namlik	Drenaj va geotexnik mustahkamlash

MUHOKAMA

Olingan natijalar shuni ko‘rsatadiki, uchuvchisiz uchish apparatlari yordamida me’moriy meros obyektlarini tadqiq etish an’anaviy usullarga nisbatan vaqtni bir necha barobar qisqartiradi hamda ma’lumotlar aniqligini millimetrik darajaga yetkazadi [6, 7]. Xususan, Bibixonim masjidi va Registon ansamblining baland gumbazlari hamda koshinli peshtoqlarini oddiy o‘lchov vositalari bilan o‘lchash imkonsiz bo‘lgan bir paytda, UAV yordamida olingan Oblique (qiyofiy) kadrlar har bir koshin naqshining holatini va yoriqlar kengligini aniq qayd etish imkonini berdi [14]. Tadqiqot davomida aniqlanishicha, UAV yordamida olingan ma’lumotlarning sifati bevosita quyidagi omillarga bog‘liq:

GCP nuqtalarining to‘g‘ri taqsimlanishi: Agar nazorat nuqtalari obyekt atrofiga bir tekisda taqsimlanmasa, fotogrammetrik modelda "gumbasimon" (doming effect) xatolik yuzaga keladi.

Yorug‘lik sharoiti: Samarqand shahrining quyoshli iqlimida soyaning keskin tushishi koshinlar teksturasini o‘qishni qiyinlashtiradi. Shuning uchun suratga olish ishlarini erta tongda yoki bulutli havoda amalga oshirish maqsadga muvofiqdir [13].

Shuningdek, UAV orqali olingan Point Cloud ma'lumotlari yer osti georadar (GPR) va yer usti lazerli skanerlash (TLS) natijalari bilan birlashtirilganda, bino axborot modellashtirish (HBIM) muhitida to‘laqonli Raqamli Egizak (Digital Twin) yaratish imkoniyati tug‘iladi [15].

XULOSA

Samarqand shahrining tarixiy-me’moriy yodgorliklarini uchuvchisiz uchish apparatlari yordamida tadqiq etish bo‘yicha olib borilgan ilmiy-metodologik tadqiqotimiz quyidagi asosiy xulosalarni beradi:

Birinchidan, UAV texnologiyalari va fotogrammetrik SfM algoritmlarini Samarqand obidalari (Bibixonim, Registon, Ishratxona, Shohi Zinda) misolida qo‘llash inshootning geometrik yaxlitligini buzmagan holda millimetrik aniqlikdagi (0.5–1.0 mm/piksel) 3D modellarni yaratish imkonini berdi.

Ikkinchidan, parvoz jarayonida parvoz balandligi, kadrlar qoplanishi (80% dan kam bo‘lmagan holda) hamda RTK geodezik tarmoqqa ulangan GCP nuqtalarining optimal taqsimlanishi fotogrammetrik xatoliklarni minimal darajaga tushirishi amalda isbotlandi.

Uchinchidan, ishlab chiqilgan metodik yondashuvlar asosida Samarqandning barcha me’moriy meros obyektlari uchun yagona raqamli ma’lumotlar bazasi va monitoring tizimini yaratish mumkin. Bu esa kelajakda amalga oshiriladigan restavratsiya va konservatsiya ishlarining ilmiy asoslanganligini ta’minlaydi hamda bebaho merosimizni avaylab-asrashda muhim poydevor bo‘lib xizmat qiladi.

ADABIYOTLAR RO‘YXATI

1. Pugachenkova G.A. Zodchestvo Tsentral’noy Azii XV vek: [Monografiya]. – Toshkent: Izdatel’stvo literatury i iskusstva, 1976. – 216 s.
2. Zohidov P.Sh. Samarqand: Osiyo gultoji. – Toshkent: Sharq, 2004. – 280 b.
3. Nemtseva N.B. Ansambli Shohi Zinda: istoriya, arxitektura, rekonstruktsiya. – Tashkent: Sharq, 2019. – 256 s.
4. Remondino, F. Heritage Recording and 3D Modeling with UAVs // Remote Sensing. – 2011. – Vol. 3, Iss. 6. – P. 1104–1138.
5. Nex, F., Remondino, F. UAV for 3D mapping applications: A review // Applied Geomatics. – 2014. – Vol. 6, Iss. 1. – P. 1–15.
6. Stylianidis, E., Remondino, F. (Eds.). 3D Recording, Documentation and Management of Cultural Heritage. – Whittles Publishing, 2016. – 384 p.
7. Murphy, M., McGovern, E., Pavia, S. Historic Building Information Modelling (HBIM) // Structural Survey. – 2009. – Vol. 27, Iss. 4. – P. 311–327.
8. Qodirov M.M. Me’moriy yodgorliklarni saqlash va tiklash nazariyasi. – Toshkent: Fan va texnologiya, 2018. – 192 b.
9. Raximov K.K., Toshev S.B. Samarqand tarixiy obidalarini raqamli pasportlashtirish va aerofotogrammetrik tahlil qilish usullari // Me’morchilik va qurilish muammolari. – Samarqand, 2023. – № 3. – B. 52–56.
10. Doneus, M. et al. Photogrammetric documentation of heritage buildings using unmanned aerial vehicles (UAVs) // Journal of Cultural Heritage. – 2013. – Vol. 14, Iss. 4. – P. 321–330.
11. Xalilov Z.X. Tarixiy binolar konstruksiyalarining seysmik chidamliligini baholash usullari. – Samarqand: SamDTI nashriyoti, 2021. – 164 b.
12. Verhoeven, G. Providing an archaeological second opinion – Digital airborne multispectral and hyperspectral imaging in archaeology // Archaeological Prospection. – 2012. – Vol. 19, Iss. 3. – P. 179–192.
13. ICOMOS. Principles for the Analysis, Conservation and Structural Restoration of Architectural Heritage. – Paris: ICOMOS International Committee, 2003. – 12 p.
14. Mamadaliyev H.B. O‘zbekiston moddiy madaniy meros obyektlarini raqamlashtirish va 3D modellashtirish amaliyoti. – Toshkent: Voris nashriyoti, 2023. – 210 b.
15. Eisenbeiss, H. UAV Photogrammetry. – Diss. ETH Zurich, No. 18515, 2009. – 198 p.