



Óbudai
Egyetem
ALBA REGIA KAR
SZÉKESFEHÉRVÁR

GISOPEN 30

KONFERENCIA KIADVÁNY
CONFERENCE PUBLICATION



Szerkesztette: Kulcsár Attila

© Bekk Tímea (4. és 6.), Bujdosó Márkó Dániel (5.), Györök András György (1.), Prof. Dr. Jancsó Tamás (2.), Dr. Katona János (5.), Négyesi Imre (4.), Dr. habil. Pogátsnik Monika (3.), Szabó Anna (6.), Dr. Tarsoly Péter (7.), TolnerNikoletta (3.), Veres Richárd (8.)

Szakmai lektorok: Bekk Tímea, Dr. Beszédes Bertalan, Dr. Katona János, László Gergely, Módné Takács Judit, Dr. habil. Pődör Andrea

2026.

ISBN 978-963-449-424-9

Felelős kiadó: Prof. Dr. Györök György

Felelős szerkesztő: Dr. habil. Pődör Andrea

Tartalom

Magyar szekció.....	1
1. LiDAR, IMU és SLAM alapú robotlokalizáció speciális, fénytelen környezetekben.....	2
2. UAV felmérés pontosságát befolyásoló tényezők.....	7
3. Az online számonkérések kockázatainak feltérképezése hallgatói FMEA-elemzés segítségével.....	20
Angol szekció.....	31
4. Ethical Challenges and Practical Experiences with Generative Artificial Intelligence in Technical Education in Hungary.....	32
5. Robust Estimation Methods for Cadastral Error Correction: A Theoretical Perspective.....	44
6. Cost-effective 3D condominium cadastre using open-source software.....	51
7. DETERMINATION OF THE VOLUME OF WOOL-SACK CAVES.....	60
8. The Potential Role of AI in Urban Development through a Review of the Literature.....	68

Magyar szekció

1. LiDAR, IMU és SLAM alapú robotlokalizáció speciális, fénytelen környezetekben

Györök András György
Óbudai Egyetem Alba Regia Kar
gyorok.andras@uni-obuda.hu
Udvardy Péter
Óbudai Egyetem Alba Regia Kar
udvardy.peter@amk.uni-obuda.hu

Absztrakt – Az autonóm mobil robotok egyre szélesebb körben kerülnek alkalmazásra olyan környezetekben, ahol a hagyományos optikai érzékelési módszerek korlátozottan működnek. Ilyen környezetek például a bányák, föld alatti infrastruktúra-rendszerek, ipari létesítmények vagy katasztrófavédelmi művelési területek. Jelen tanulmány egy LiDAR-szenzorokra, inerciális mérőegységekre (IMU) és SLAM-algoritmusokra épülő robotlokalizációs rendszer koncepcióját mutatja be. A LiDAR aktív lézeres méréssel, a környezet megvilágításától függetlenül szolgáltat térbeli információt, míg az IMU a gyorsulás és szögsebesség mérésével támogatja a mozgás folytonos becslését. A laboratóriumi mérési eredmények alapján a LiDAR–IMU SLAM rendszer teljes sötétségben is megbízható, centiméteres nagyságrendű lokalizációs pontosságot biztosít.

Kulcsszavak – LiDAR, IMU, SLAM, robotlokalizáció, szenzorfüzió, fénytelen környezet

I. BEVEZETÉS

Az autonóm robotok navigációja komplex érzékelési és adatfeldolgozási feladat, amely a robot környezetének folyamatos megfigyelését és a robot saját pozíciójának meghatározását igényli. A robotlokalizáció és térképezés problémája a robotika egyik alapvető kutatási területe.

Számos navigációs rendszer kamerákra épül, amelyek képfeldolgozási algoritmusok segítségével határozzák meg a robot mozgását és a környezet szerkezetét. Ezek a rendszerek azonban erősen függenek a megvilágítástól, ezért bányákban, alagutakban vagy katasztrófa sújtotta területeken használhatóságuk korlátozott.

Alternatív megoldást jelentenek az aktív érzékelők, például a LiDAR-szenzorok, amelyek lézerimpulzusok segítségével mérik a környezetben található objektumok távolságát. Az IMU ezzel párhuzamosan a gyorsulást és a szögsebességet méri, ezért a LiDAR–IMU szenzorfüzió különösen alkalmas fénytelen környezetekben történő navigációra.

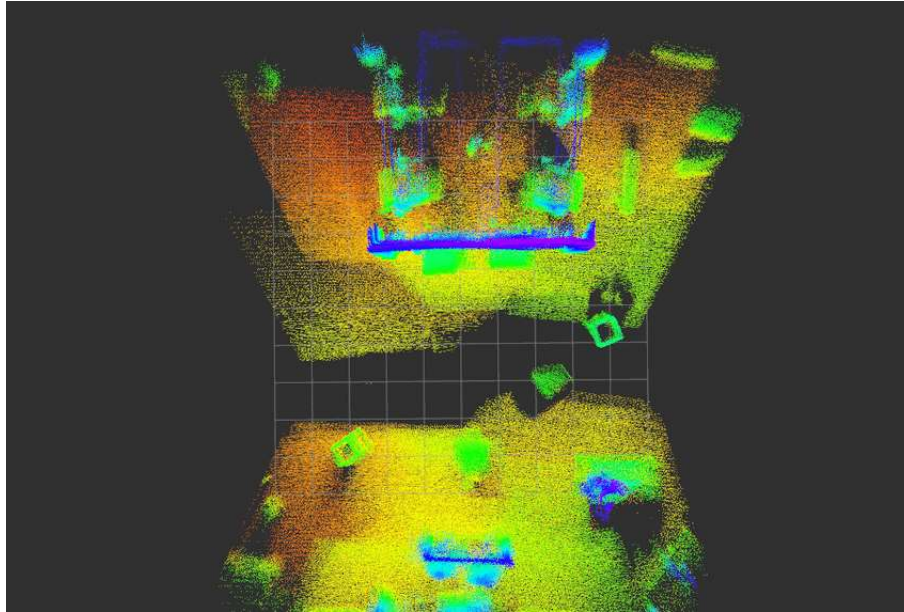
II. LIDAR SENZOROK SZEREPE A ROBOTNAVIGÁCIÓBAN

A LiDAR (Light Detection and Ranging) szenzorok lézerimpulzusok kibocsátásával és a visszaverődési idő mérésével határozzák meg a környezetben található objektumok távolságát. A távolság ideális esetben az alábbi összefüggéssel írható le:

$$d = (c \cdot t) / 2$$

ahol d a távolság, c a fénysebesség, t pedig a lézerimpulzus oda-vissza terjedési ideje.

A LiDAR egyik legfontosabb előnye, hogy nem igényel külső megvilágítást, mivel saját lézerforrással rendelkezik. A modern eszközök másodpercenként több százezer mérési pontot is előállíthatnak, így részletes háromdimenziós pontfelhő generálható.



1. ábra LiDAR szenzor által generált pontfelhő reprezentáció.

III. INERCIÁLIS MÉRŐEGYSÉGEK

Az IMU szenzorok három tengely mentén mérik a lineáris gyorsulást és a szögsebességet. Egy tipikus egység három gyorsulásmérőt és három giroszkópot tartalmaz, amelyek adatai alapján becsülhető a robot orientációja, sebessége és rövid idejű pozícióváltozása.

Az IMU előnye a magas mintavételi frekvencia, amely gyakran meghaladja a 100–1000 Hz tartományt. Hátránya ugyanakkor a drift, ezért hosszabb idejű pontos lokalizációhoz célszerű LiDAR-mérésekkel kombinálni.

IV. LIDAR SENZOROK ÖSSZEHASONLÍTÁSA

1. táblázat Gyakori LiDAR szenzorok

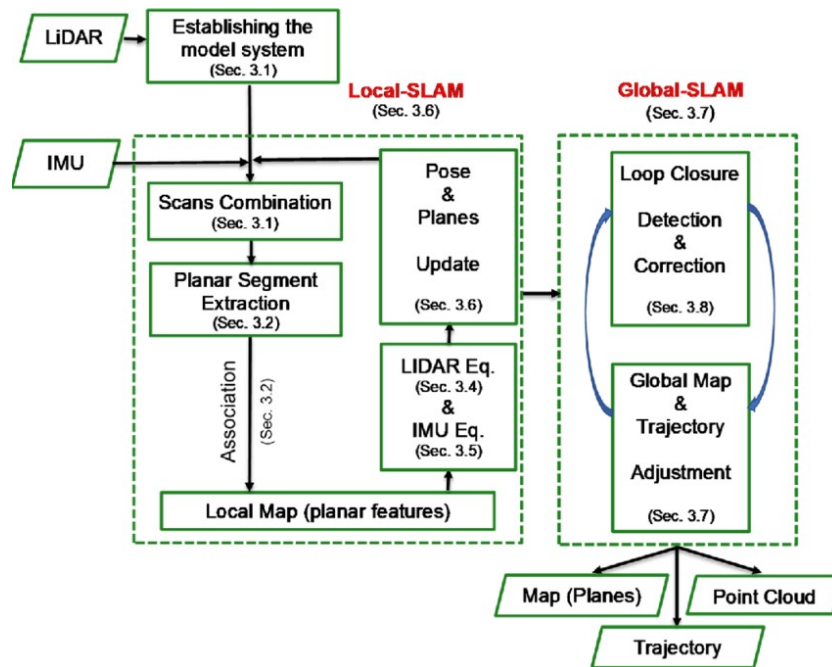
Szenzor	Hatótáv	Felbontás	Látómező	Alkalmazás
Velodyne VLP-16	100 m	0,2°	360°	robotika
Ouster OS1	120 m	0,18°	360°	autonóm járművek
Hokuyo UST-10LX	10 m	0,25°	270°	beltéri robotika
RPLIDAR A3	25 m	0,4°	360°	oktatás, robotika
Livox Mid-70	70 m	0,1°	70°	SLAM

A nagy teljesítményű LiDAR-szenzorok részletes pontfelhőket generálnak, amelyek lehetővé teszik a pontos térképezést, ugyanakkor költségük és energiaigényük a választott típustól függően jelentősen eltérhet.

V. LIDAR-IMU SLAM ALGORITMUSOK

A SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) algoritmusok lehetővé teszik, hogy a robot egyszerre építse fel környezetének térképét és határozza meg saját pozícióját.

A LiDAR–IMU SLAM rendszerek a LiDAR pontfelhő adatait kombinálják az IMU mozgásadataival. Ismert algoritmusok közé tartozik a LOAM, a LIO-SAM, a Cartographer és a FAST-LIO. Az IMU adatok segítik a gyors robotmozgások becslését, míg a LiDAR biztosítja a környezet pontos térbeli reprezentációját.

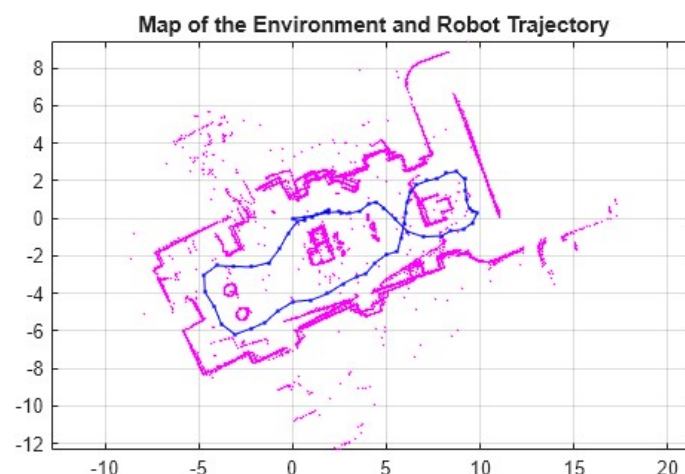


2. ábra LiDAR–IMU alapú lokalizációs architektúra vázlatja.

VI. KÍSÉRLETI KÖRNYEZET

A méréseket laboratóriumi környezetben végeztük, amely sötét ipari környezetet szimulált. A mérési tér mérete $20\text{ m} \times 15\text{ m}$ volt, és ipari polcrendszereket, fémszerkezeteket, valamint mozgó akadályokat tartalmazott.

A robotplatform LiDAR és IMU szenzorral volt felszerelve. A LiDAR hatótávolsága 25 m , frissítési frekvenciája $10\text{--}20\text{ Hz}$, az IMU mintavételezése pedig 200 Hz volt.



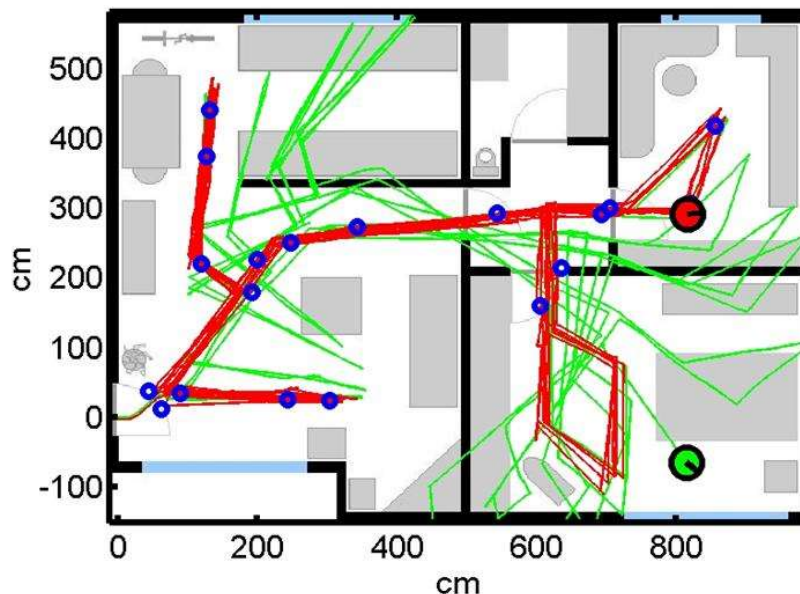
3. ábra SLAM algoritmus által létrehozott térkép és robotpálya.

VII. MÉRÉSI EREDMÉNYEK

II. táblázat Lokalizációs pontosság

Módszer	Átlagos hiba
IMU odometria	20 cm
LiDAR SLAM	5 cm
LiDAR + IMU SLAM	2–3 cm

Az eredmények azt mutatják, hogy a LiDAR és IMU szenzorok kombinációja jelentősen javítja a robot lokalizációs pontosságát. A szenzorfüzió csökkenti az IMU drift hatását, miközben a LiDAR pontfelhő stabil térbeli referenciát biztosít.



4. ábra A robot becsült trajektóriája SLAM algoritmus használata során.

VIII. MEGVITATÁS

A LiDAR–IMU alapú navigáció egyik legfontosabb előnye, hogy teljesen független a környezet megvilágításától. Ez lehetővé teszi a robotok megbízható működését sötét vagy alacsony megvilágítású környezetekben is.

A módszer korlátja, hogy erősen poros vagy ködös környezetben a LiDAR mérések zajosabbá válhatnak. Ilyen esetekben radaros, kamerás vagy további inerciális szenzorokkal kiegészített fúziós megoldások javíthatják a robusztusságot.

IX. JÖVŐBELI KUTATÁSI IRÁNYOK

A jövőbeli kutatások egyik fontos iránya a szenzorfüzió fejlesztése. Kiemelt lehetőség a LiDAR + radar navigáció, a LiDAR + kamera szenzorfüzió, a több robotból álló SLAM rendszerek és a mélytanulási alapú térképezés vizsgálata.

X. KÖVETKEZTETÉSEK

A tanulmány bemutatta a LiDAR, IMU és SLAM technológiák kombinációján alapuló robotlokalizációs rendszer koncepcióját. Az eredmények alapján a LiDAR–IMU alapú SLAM rendszerek teljes sötétségben is képesek megbízható navigációt biztosítani.

A módszer különösen alkalmas bányászati robotikai, mentési robotikai, ipari automatizálási és föld alatti infrastruktúra-felügyeleti alkalmazásokban.

IRODALOM

- [1] S. Thrun, W. Burgard és D. Fox: Probabilistic Robotics. MIT Press, Cambridge, MA, 2005.
- [2] H. Durrant-Whyte és T. Bailey: Simultaneous Localization and Mapping (SLAM): Part I. IEEE Robotics & Automation Magazine, 13(2), pp. 99–110, 2006.
- [3] T. Bailey és H. Durrant-Whyte: Simultaneous Localization and Mapping (SLAM): Part II. IEEE Robotics & Automation Magazine, 13(3), pp. 108–117, 2006.
- [4] J. Zhang és S. Singh: LOAM: LiDAR Odometry and Mapping in Real-Time. Robotics: Science and Systems, 2014.
- [5] T. Shan és B. Englot: LIO-SAM: Tightly-coupled LiDAR Inertial Odometry via Smoothing and Mapping. IEEE/RSJ IROS, 2020.
- [6] W. Hess, D. Kohler, H. Rapp és D. Andor: Real-Time Loop Closure in 2D LiDAR SLAM. IEEE ICRA, 2016.
- [7] J. Behley és C. Stachniss: Efficient Surfel-Based SLAM Using 3D Laser Range Data. Robotics and Autonomous Systems, 87, pp. 314–325, 2017.
- [8] F. Pomerleau, F. Colas és R. Siegwart: A Review of Point Cloud Registration Algorithms for Mobile Robotics. Foundations and Trends in Robotics, 4(1), pp. 1–104, 2015.
- [9] C. Cadena et al.: Past, Present, and Future of Simultaneous Localization and Mapping. IEEE Transactions on Robotics, 32(6), pp. 1309–1332, 2016.
- [10] R. Siegwart, I. Nourbakhsh és D. Scaramuzza: Introduction to Autonomous Mobile Robots. MIT Press, 2011.
- [11] Bertalan, Beszédes. Reliable Presence and Intrusion Detection with Collaborative Sensor Modules in Electronic Property Protection Systems. In: IEEE (szerk.) 2019 IEEE 17TH WORLD SYMPOSIUM ON APPLIED MACHINE INTELLIGENCE AND INFORMATICS (SAMI 2019). Herlany, Szlovákia : Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) (2019) pp. 354-360.
- [12]. György Györök, Bertalan Beszédes. Artificial Education Process Environment for Embedded Systems. In: Orosz, Gábor Tamás (szerk.) 9th International Symposium on Applied Informatics and Related Areas - AIS2014. Székesfehérvár, Magyarország : Óbudai Egyetem (2014) pp. 37-42.

2. UAV felmérés pontosságát befolyásoló tényezők

Jancsó Tamás
Alba Regia Kar
Óbudai Egyetem
jancso.tamas@amk.uni-obuda.hu

Absztrakt – A pilóta nélküli légi járművek (Unmanned Aerial Vehicle – UAV) alkalmazása az elmúlt évtizedben a fotogrammetriai adatgyűjtés egyik legfontosabb technológiájává vált. A drónalapú felmérések gyors, költséghatékony és nagyfelbontású adatgyűjtést tesznek lehetővé, azonban a végtermékek pontosságát számos tényező együttesen befolyásolja. A fotogrammetriai feldolgozás során a végső térbeli koordináták meghatározása a képi mérések, a repülési geometria, a kamerakalibráció, a geodéziai kontroll és a navigációs rendszerek pontosságának eredőjeként alakul ki.

A cikk áttekinti a drónos fotogrammetria pontosságát befolyásoló legfontosabb tényezőket, különös tekintettel a képminőségre, a repülési paraméterekre, a kamera kalibrációjára, az illesztőpontok szerepére, valamint a GNSS/INS alapú georeferenciára. Bemutatásra kerülnek azok a gyakorlati szempontok és tapasztalati szabályok is, amelyek segítségével a felmérések pontossága növelhető.

A tanulmány célja, hogy rendszerezett áttekintést adjon a drónos fotogrammetria pontosságát meghatározó főbb tényezőkről, valamint iránymutatást nyújtson a felmérések tervezéséhez és végrehajtásához.

Kulcsszavak – UAV, fotogrammetria, pontosság, GCP, kamerakalibráció

I. BEVEZETÉS

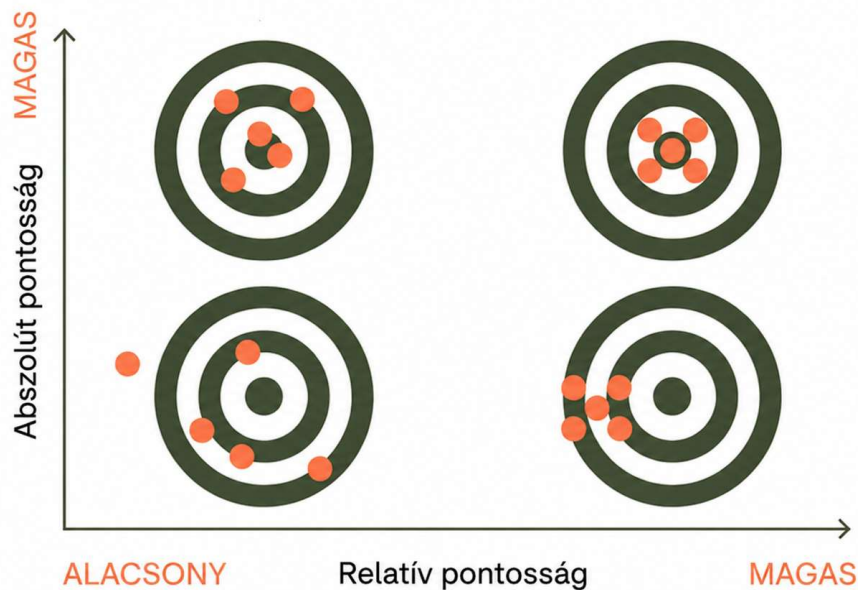
A pilóta nélküli légi járművek (Unmanned Aerial Vehicle – UAV) alkalmazása az elmúlt években a fotogrammetriai adatgyűjtés egyik legdinamikusabban fejlődő technológiájává vált [2]. A drónplatformok elterjedése lehetővé tette, hogy viszonylag kis költséggel, gyorsan és nagy felbontásban gyűjtsünk térbeli adatokat. Ennek eredményeként az UAV-alapú felmérések széles körben alkalmazhatók különböző mérnöki és térinformatikai feladatokban, például térképezésben, építőipari monitoringban, térfogat-számításokban vagy környezeti vizsgálatokban [5].

A drónos fotogrammetria egyik legfontosabb kérdése a végtermékek pontossága. A fotogrammetriai feldolgozás során előállított ortofotók, digitális felszínmodellek vagy háromdimenziós pontfelhők minőségét számos tényező befolyásolja. A térbeli pontok koordinátáinak meghatározása képi mérésekből történik, amelyeket geometriai modellek és statisztikai kiegyenlítési eljárások segítségével alakítanak át terepi koordinátákká. A pontosság ezért nem egyetlen paramétertől függ, hanem a teljes mérési és feldolgozási folyamat eredőjeként alakul ki.

A drónos fotogrammetria pontosságát több egymással összefüggő tényező határozza meg. Ide tartozik a felvételek minősége és felbontása, a repülési geometria és a képek közötti átfedések mértéke, a kamera belső tájékozási paramétereinek pontossága, valamint a földi illesztőpontok szerepe a fotogrammetriai blokk georeferálásában. Emellett egyre nagyobb jelentőséget kapnak a navigációs rendszerek, különösen az RTK GNSS és az inerciális

mérőrendszerek (INS), amelyek a kamera külső tájékozásának meghatározásában játszanak fontos szerepet.

A fotogrammetriai pontosság szempontjából különbséget kell tenni relatív és abszolút pontosság között. A relatív pontosság a modell belső geometriai konzisztenciáját jelenti, míg az abszolút pontosság azt mutatja meg, hogy a modell mennyire illeszkedik a valós koordináta-rendszerhez. A gyakorlatban gyakran előfordul, hogy a modell relatív pontossága jó, de a georeferencia hiányosságai miatt az abszolút pontosság jelentősen romlik (1. ábra).



1. ábra: A relatív és abszolút pontosság összehasonlítása

A jelen tanulmány célja, hogy áttekintést adjon a drónos fotogrammetria pontosságát befolyásoló legfontosabb tényezőkről. A cikk rendszerezten mutatja be a képminőség, a repülési geometria, a kamerakalibráció, az illesztőpontok elrendezése, valamint a GNSS/INS alapú georeferencia szerepét a fotogrammetriai feldolgozásban. A bemutatott összefüggések és gyakorlati tapasztalatok segítséget nyújthatnak a drónos felmérések tervezésében és a kívánt pontosság elérésében.

II. A DRÓNOS FOTOGRAMMETRIA PONTOSSÁGÁNAK ALAPMODELLJE

A drónos fotogrammetria során a térbeli pontok koordinátáinak meghatározása képi mérésekből történik, amelyeket geometriai és statisztikai modellek segítségével alakítanak át terepi koordinátákká [9],[10]. A végső pontosság ezért több egymással összefüggő tényező eredőjeként alakul ki, és nem vezethető vissza egyetlen paraméterre. A fotogrammetriai feldolgozás során a képek közötti geometriai kapcsolatokat a perspektív vetítés törvényei írják le, míg a különböző mérési hibák hatását kiegyenlítési eljárások segítségével minimalizálják.

A fotogrammetriai modell alapját a képi koordináták és a terepi koordináták közötti matematikai kapcsolat adja.

$$x - x_0 = -f \frac{r_{11}(X - X_0) + r_{12}(Y - Y_0) + r_{13}(Z - Z_0)}{r_{31}(X - X_0) + r_{32}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)}$$
$$y - y_0 = -f \frac{r_{21}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) + r_{23}(Z - Z_0)}{r_{31}(X - X_0) + r_{32}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)}$$

ahol

- x, y – képi koordináták
- x_0, y_0 – főpont koordinátái
- f – fókusztávolság
- X, Y, Z – terepi koordináták
- X_0, Y_0, Z_0 – kamera pozíciója
- r_{ij} – orientációs mátrix elemei

A perspektív vetítés egyenletei alapján a képen mért pontokból meghatározható a térbeli pontok helyzete, amennyiben ismert a kamera belső és külső tájékozása [10].

A képfeldolgozás során az azonos terepi pontokat több felvételen azonosítják, majd ezekből a képsugarak metszésével határozzák meg a térbeli koordinátákat. A folyamat stabilitását és pontosságát a fotogrammetriai háromszögelés, illetve a bundle adjustment kiegyenlítési eljárás biztosítja [3].

A pontosságot befolyásoló tényezők a fotogrammetriai feldolgozás különböző lépéseiben jelennek meg. Az egyik legfontosabb tényező a képi mérési pontosság, amely a képek felbontásától, élességétől és zajszintjétől függ. A gyakorlatban a képi pontmérés pontossága általában a pixelméret töredéke, tipikusan 0,3–0,5 pixel nagyságrendű [4].

Ebből következik, hogy a terepen is megadható a várható helyzeti pontosság:

$$m_{XY} \approx (0.3 - 0.5) \cdot GSD$$

ahol

- m_{XY} – vízszintes pontosság
- GSD – földi pixelméret

Maga a GSD egyszerűen kiszámítható:

$$GSD = \frac{h \cdot p}{f}$$

ahol

- h – repülési magasság
- p – pixelméret a szenzoron
- f – fókusz távolság

Ez a képi pontosság a terepen a felvétel földi felbontásával (Ground Sampling Distance – GSD) arányosan jelenik meg, ezért a vízszintes irányú pontosság közelítően a GSD néhány tizedének felel meg.

A térbeli pontosság másik meghatározó tényezője a felvételek geometriai elrendezése. A térbeli pontok meghatározása két vagy több képsugár metszésén alapul, ezért a metszés pontosságát befolyásolja a kameraállások közötti távolság, azaz a felvételi bázis, valamint a repülési magasság. A magassági koordináták pontossága közelítően arányos a repülési magasság és a felvételi bázis arányával, ezért a kedvező bázis–magasság arány kulcsfontosságú a pontos térbeli meghatározáshoz.

A fotogrammetriai blokk abszolút pontosságát a geodéziai kontroll határozza meg. A földi illesztőpontok (Ground Control Points – GCP) a modellt a valós koordináta-rendszerhez kapcsolják, és lehetővé teszik a blokk torzulásainak korrigálását. A pontosság szempontjából fontos, hogy a GCP-k koordinátáinak pontossága jelentősen jobb legyen, mint a képfelvételek felbontása, valamint hogy térbeli eloszlásuk megfelelően lefedje a teljes felmérési területet.

Az utóbbi években a navigációs rendszerek fejlődése új lehetőségeket nyitott a fotogrammetriai georeferencia területén. Az RTK vagy PPK GNSS rendszerekkel felszerelt drónok képesek centiméteres pontossággal meghatározni a kamera vetítési centrumának helyzetét. Amennyiben a GNSS adatokat inerciális mérőrendszerekkel (INS) kombinálják, lehetőség nyílik a kamera orientációjának közvetlen meghatározására is, amely a direkt georeferencia alapját képezi. A navigációs adatok pontossága azonban nagymértékben függ az IMU orientációs pontosságától, a szenzorok közötti geometriai kapcsolatok (boresight és lever arm) ismeretétől, valamint az időszinkronizáció pontosságától.

A fentiek alapján megállapítható, hogy a drónos fotogrammetria pontossága rendszerszintű tulajdonság. A végső térbeli koordináták pontosságát egyaránt befolyásolja a képminőség, a repülési geometria, a kamera kalibrációja, a geodéziai kontroll és a navigációs rendszer pontossága. A következő fejezetek részletesen bemutatják ezeket a tényezőket, valamint azok hatását a fotogrammetriai feldolgozás során elérhető pontosságra.

III. A KÉPMINŐSÉG ÉS A FELBONTÁS SZEREPE A FOTOGRAMMETRIAI PONTOSSÁGBAN

A drónos fotogrammetria során a térbeli pontok koordinátáinak meghatározása a felvételeken végzett képi méréseken alapul. A fotogrammetriai feldolgozás első lépése az azonos terepi pontok azonosítása több képen, majd ezekből a képsugarak metszésével határozzák meg a pontok térbeli koordinátáit. Ennek következtében a képfelvételek minősége közvetlenül befolyásolja a végső térbeli pontosságot, és a képi mérési pontosság gyakran a fotogrammetriai modell pontosságának alsó korlátját jelenti.

A képi mérési pontosság egyik legfontosabb tényezője a felvételek felbontása, amelyet a földi pixelméret, vagyis a Ground Sampling Distance (GSD) jellemez. A GSD azt fejezi ki, hogy a terepen mekkora távolságnak felel meg egy pixel a képen. A GSD értéke a kamera

szenzorának felbontásától, a fókusztávolságtól és a repülési magasságtól függ. Minél kisebb a GSD értéke, annál részletesebb a felvétel, és annál pontosabban határozhatók meg a képi koordináták.

A fotogrammetriai gyakorlatban a képi pontmérés pontossága általában a pixelméret töredéke [4]. Jó minőségű felvételek esetén a képi mérési pontosság tipikusan 0,3–0,5 pixel nagyságrendű. Ez azt jelenti, hogy a vízszintes irányú terepi pontosság közelítőleg a GSD néhány tizedének felel meg. Például 5 cm-es GSD esetén a vízszintes koordináták pontossága általában néhány centiméter nagyságrendű lehet, feltéve, hogy a többi feltétel – például a repülési geometria és a geodéziai kontroll – is megfelelő.

A képminőséget azonban nemcsak a felbontás határozza meg. A képi mérési pontosságot jelentősen befolyásolja a képélesség, a zajszint, valamint a felvételeken megjelenő felszíni textúra is. Elmosódott vagy zajos képek esetén a pontok azonosítása bizonytalanabbá válik, ami növeli a képi mérési hibát. A képélesség romlását gyakran a drón mozgása, a túl hosszú expozíciós idő vagy a platform vibrációja okozza. Ezért a felvételek készítésekor fontos a megfelelő zárídó és a stabil repülési körülmények biztosítása.

A felszín textúrája szintén fontos szerepet játszik a képi pontmérésben. Olyan felszíneken, ahol kevés jellegzetes mintázat található – például vízfelületen, hóval borított területeken vagy homogén mezőgazdasági területeken – a kapcsolópontok automatikus felismerése nehezebb, ami csökkentheti a fotogrammetriai blokk stabilitását. Ezzel szemben a jól textúrált felszínek – például városi környezet vagy heterogén természetes felszínek – kedvezőbb feltételeket biztosítanak a képi pontazonosításhoz.

A képminőséget a környezeti feltételek is befolyásolják. A megvilágítás, az árnyékok és a légköri viszonyok hatással lehetnek a felvételek kontrasztjára és részletgazdagságára. Erős árnyékok vagy túl alacsony kontraszt esetén a képi pontmérés pontossága romolhat. Ezért a fotogrammetriai felvételeket célszerű egyenletes megvilágítási viszonyok között, lehetőség szerint derült, de nem túl kontrasztos fényviszonyok mellett készíteni.

Összességében megállapítható, hogy a képminőség és a felbontás alapvető szerepet játszik a drónos fotogrammetria pontosságának meghatározásában. A megfelelő GSD, az éles és zajmentes felvételek, valamint a jól textúrált felszínek mind hozzájárulnak a képi mérési pontosság javításához. Mivel a fotogrammetriai feldolgozás a képfelvételeken végzett mérésekre épül, a képminőség optimalizálása a pontos térbeli modell előállításának egyik legfontosabb feltétele.

IV. A REPÜLÉSI GEOMETRIA ÉS A BLOKKGEOMETRIA SZEREPE

A drónos fotogrammetria pontosságát a képminőség mellett jelentős mértékben befolyásolja a felvételek geometriai elrendezése is. A térbeli pontok meghatározása több képsugár metszésével történik, ezért a kameraállások térbeli elhelyezkedése alapvetően meghatározza a metszés stabilitását és pontosságát [10]. A repülési geometria legfontosabb paraméterei közé tartozik a repülési magasság, a felvételi bázis és annak aránya a repülési magassághoz képest, valamint a felvételek közötti átfedés mértéke. Ezek együttesen határozzák meg a fotogrammetriai blokk geometriáját.

- Repülési magasság

A repülési magasság közvetlenül befolyásolja a felvételek földi felbontását (GSD), ezáltal a fotogrammetriai modell részletességét és pontosságát. Nagyobb repülési magasság esetén egy pixel nagyobb terepi területet fed le, ezért a képi mérési hiba nagyobb terepi hibává alakul. Ezzel szemben alacsonyabb repülési magasság mellett kisebb GSD érhető el, ami általában pontosabb térbeli meghatározást tesz lehetővé.

A repülési magasság megválasztásakor azonban figyelembe kell venni a lefedett terület nagyságát és a szükséges képszámot is. Alacsony repülési magasság esetén ugyan nagyobb felbontás érhető el, de a teljes terület lefedéséhez több felvételre és repülési sávra van szükség, ami növeli az adatgyűjtés és a feldolgozás időigényét.

- Bázisviszony

A térbeli pontok meghatározása két vagy több felvételen azonosított pontok képsugarainak metszésével történik. A metszés pontosságát jelentősen befolyásolja a felvételi bázis, vagyis a két exponálási hely közötti távolság. A repülési magasság és a bázis arányát bázis–magasság aránynak nevezzük, amely fontos szerepet játszik a térbeli koordináták pontosságában.

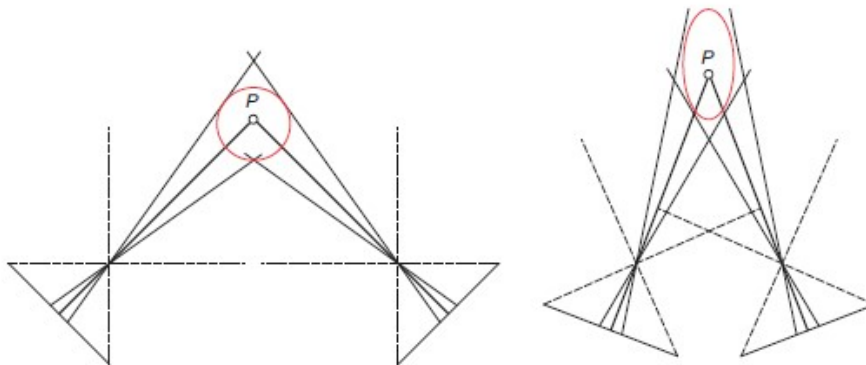
A magassági pontosság közelítően arányos a repülési magasság és a felvételi bázis arányával [9].

$$m_z \approx m_{xy} \frac{H}{B}$$

ahol

- m_z – magassági pontosság
- H – repülési magasság
- B – felvételi bázis

Ha a bázis túl kicsi a repülési magassághoz képest, akkor a képsugarak metszési szöge kicsi lesz, ami bizonytalanabb magassági meghatározáshoz vezet. Nagyobb bázis esetén a metszési szög kedvezőbb, ami javítja a magassági koordináták pontosságát (2. ábra).



2. ábra: Bázisviszony hatása a pontosságra

- Átfedések

A fotogrammetriai feldolgozás során minden terepi pontot több felvételen kell azonosítani, ezért a felvételek közötti átfedés kulcsfontosságú. A repülési irányban mért átfedést hosszátfedésnek, a szomszédos repülési sávok közöttit pedig oldalátfedésnek nevezzük.

A drónos fotogrammetriai felmérésekben általában 75–85% hosszátfedést és 60–80% oldalátfedést alkalmaznak. A nagy átfedés növeli a redundanciát, több kapcsolópontot eredményez, és stabilabb fotogrammetriai blokkot hoz létre. Ugyanakkor a túl nagy átfedés csökkenti az egymást követő felvételek közötti bázist, ami kedvezőtlen hatással lehet a magassági pontosságra. Ezért az átfedések megválasztásakor kompromisszumot kell találni a blokk stabilitása és a kedvező bázisviszony között.

- Terepkövető repülés

Dombos vagy hegyvidéki területeken a terep magassága jelentősen változhat a felmérési területen belül. Ha a drón állandó repülési magasságon repül a tengerszinhez vagy a felszállási ponthoz viszonyítva, akkor a kamera és a terep közötti távolság a különböző területeken eltérő lesz. Ennek következtében a GSD és a felvételek átfedése is változhat, ami a pontosság térbeli egyenlőtlenségéhez vezethet.

A terepkövető repülési mód alkalmazásával a drón a terepfelszínhez viszonyított közel állandó magasságot tart. Ez biztosítja, hogy a GSD és az átfedések a teljes területen közel azonosak maradjanak, ami kedvezőbb és homogénebb pontosságot eredményez a fotogrammetriai modellben.

Összességében a repülési és blokkgeometria megfelelő megtervezése alapvető feltétele a pontos fotogrammetriai feldolgozásnak. A repülési magasság, a bázisviszony és az átfedések optimális megválasztása, valamint domborzatos területen a terepkövető repülés alkalmazása jelentősen hozzájárulhat a térbeli koordináták pontosságának javításához.

V. KAMERA KALIBRÁCIÓ ÉS A BELSŐ TÁJÉKOZÁSI PARAMÉTEREK

A fotogrammetriai feldolgozás során a térbeli pontok meghatározása a kamera geometriai modelljén alapul. A kamera modelljét a belső tájékozási paraméterek írják le, amelyek meghatározzák a képi koordináták és a vetítési sugarak iránya közötti kapcsolatot. A pontos fotogrammetriai feldolgozás egyik alapfeltétele, hogy ezek a paraméterek megfelelő pontossággal ismertek legyenek. A kamerakalibráció célja ezért a kamera belső geometriai paramétereinek meghatározása és a lencserendszer torzításainak modellezése.

- Torzítások

A valós kamerák optikai rendszere nem ideális, ezért a képkoordináták torzulhatnak az ideális perspektív vetítéshez képest [7]. A legjelentősebb torzítás a radiális torzítás, amely a kép középpontjától mért távolsággal növekszik. A radiális torzítás hatására a képpontok sugárirányban elmozdulnak a főpont felé vagy attól kifelé. Ezt általában többparaméteres polinommal modellezzik.

$$\Delta r = k_1 r^3 + k_2 r^5 + k_3 r^7$$

ahol

- r – távolság a főponttól
- k_1, k_2, k_3 – torzítási paraméterek

A radiális torzítás mellett tangenciális torzítás is felléphet, amely a lencserendszer mechanikai pontatlanságaiból vagy az optikai elemek enyhe eltolódásából származik. Ez a torzítás a képpontok aszimmetrikus elmozdulását okozza a képsíkon. A modern fotogrammetriai feldolgozó szoftverek a radiális és tangenciális torzítások együttes modelljét alkalmazzák, amely lehetővé teszi a kamera geometriai hibáinak hatékony korrigálását.

- Tesztmező

A kamera kalibrációja történhet laboratóriumi körülmények között kialakított tesztmező segítségével, vagy a fotogrammetriai blokk kiegyenlítése során végzett önkalibrációval. A tesztmező olyan ismert koordinátájú pontokból álló referenciahálózat, amely lehetővé teszi a kamera belső paramétereinek meghatározását [4].

A kalibráció stabilitása szempontjából fontos, hogy a tesztmező pontjai ne egy síkban helyezkedjenek el, hanem megfelelő mélységi kiterjedéssel rendelkezzenek. Ha a pontok csak egy síkban helyezkednek el, akkor bizonyos paraméterek – például a fókusz távolság és a radiális torzítás – erősen korrelálhatnak egymással, ami instabil paraméterbecsléshez vezethet. A gyakorlatban ezért célszerű olyan háromdimenziós tesztmezőt alkalmazni, amelyben a pontok különböző távolságokban helyezkednek el a kamerától.

- Paraméterkorreláció

A kamerakalibráció során a belső tájékozási paramétereket általában a fotogrammetriai blokk kiegyenlítésével, úgynevezett önkalibrációs eljárással becsülik. A paraméterek becslése azonban nem minden esetben egyértelmű, mivel egyes paraméterek között erős statisztikai korreláció alakulhat ki.

Különösen gyakori a korreláció a fókusz távolság és a radiális torzítás paramétere között, valamint a tangenciális torzítás és a kamera orientációs paramétere között [8]. Ha a felvételek geometriai elrendezése nem megfelelő, akkor ezek a korrelációk instabil vagy torz paraméterbecsléshez vezethetnek. A stabil kalibráció érdekében célszerű változatos felvételi geometriát alkalmazni, például különböző irányból és dőlésszöggel készített felvételekkel.

A megfelelő kamerakalibráció alapvető feltétele a pontos fotogrammetriai feldolgozásnak. A torzítások helyes modellezése, a megfelelően kialakított tesztmező és a kedvező felvételi geometria mind hozzájárulnak ahhoz, hogy a belső tájékozási paraméterek megbízhatóan meghatározhatók legyenek, és ezáltal a fotogrammetriai modell pontossága javuljon.

VI. ILLESZTŐPONTOK SZEREPE ÉS ELRENDEZÉSE

A fotogrammetriai blokk abszolút georeferenciáját a földi illesztőpontok (Ground Control Points – GCP) biztosítják [10]. Ezek olyan terepi pontok, amelyek koordinátái geodéziai módszerekkel nagy pontossággal meghatározottak, és amelyek a felvételeken egyértelműen azonosíthatók. A GCP-k lehetővé teszik a fotogrammetriai modell illesztését a valós koordinátarendszerhez, valamint hozzájárulnak a blokk geometriai stabilitásához és a torzulások csökkentéséhez.

- GCP pontosság

A GCP-k koordinátáinak pontossága alapvető hatással van a fotogrammetriai modell abszolút pontosságára. Ha a GCP-k koordinátái jelentős hibát tartalmaznak, akkor ezek a hibák közvetlenül beépülhetnek a kiegyenlítésbe, és torzíthatják a modell geometriáját. Ezért fontos, hogy a GCP-k meghatározási pontossága jelentősen jobb legyen, mint a felvételek földi felbontása [4].

A gyakorlatban gyakran alkalmazott tapasztalati szabály, hogy a GCP koordináták középpontjában legfeljebb a GSD tizede legyen, azaz:

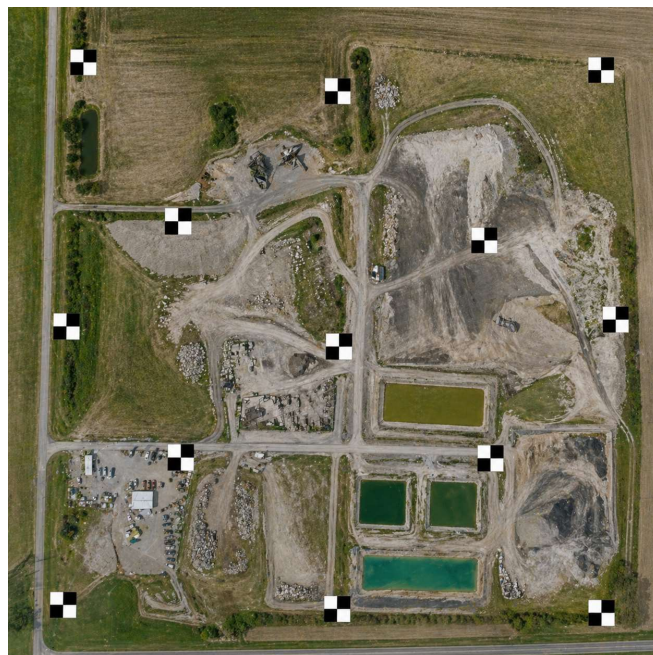
$$\sigma_{GCP} \leq \frac{GSD}{10}$$

Ez biztosítja, hogy a geodéziai kontroll pontossága ne korlátozza a fotogrammetriai feldolgozás során elérhető pontosságot.

- GCP háló tervezése

A GCP-k elrendezése legalább olyan fontos, mint azok pontossága. A pontok térbeli eloszlásának biztosítani kell a fotogrammetriai blokk megfelelő geometriai stabilitását. Minimum konfigurációként gyakran alkalmazzák a terület sarkaiban és a blokk középpontjában elhelyezett GCP-ket, ami összesen öt pontot jelent. Ez a konfiguráció biztosítja a blokk alapvető georeferálását és orientációját.

Nagyobb pontossági igény esetén azonban további GCP-k telepítése szükséges. Célszerű a pontokat a terület szélein és a blokk belsejében egyenletesen elosztani. Gyakorlati tapasztalatok szerint a GCP-k közötti távolság nem haladhatja meg a repülési bázis többszörösét, általában körülbelül 4–6 bázisnyi távolság tekinthető megfelelőnek. Ez segít csökkenteni a blokk lokális torzulásait és javítja a modell geometriai stabilitását (3. ábra).



3. ábra: Illesztőpontok egyenletes elosztása a felméréendő területen

Domborzatilag változatos területeken különösen fontos a GCP-k megfelelő magassági eloszlása. Ilyen esetekben célszerű a felmérési területet különböző magassági zónákra osztani, és biztosítani, hogy minden zónában elegendő számú illesztőpont álljon rendelkezésre. Ez segít megelőzni a modell magassági torzulásait, és javítja a térbeli koordináták pontosságát.

- Ellenőrző pontok

A fotogrammetriai modell pontosságának objektív értékeléséhez ellenőrzőpontokat (checkpoint) is alkalmaznak. Ezek olyan terepi pontok, amelyek koordinátái szintén ismert pontosságú geodéziai mérésekből származnak, azonban a fotogrammetriai kiegyenlítés során nem használják fel őket illesztőpontként.

Az ellenőrző pontok szerepe a modell pontosságának független ellenőrzése. A fotogrammetriai feldolgozás után a checkpointok fotogrammetriai úton számított koordinátáit összehasonlítják a geodéziai mért koordinátákkal, és a különbségek alapján meghatározható a modell tényleges pontossága. A gyakorlatban általában néhány, a teljes területen egyenletesen elosztott ellenőrzőpont elegendő a pontosság megbízható becsléséhez.

A megfelelő pontosságú és jól elrendezett GCP-hálózat, valamint az ellenőrzőpontok alkalmazása alapvető feltétele a drónos fotogrammetriai felmérések megbízható georeferenciájának és pontosságértékelésének.

VII. GNSS/INS ÉS A DIREKT GEOREFERENCIA

A drónos fotogrammetria hagyományosan földi illesztőpontokra (GCP) támaszkodik a fotogrammetriai blokk georeferálásához. Az utóbbi években azonban a navigációs rendszerek fejlődése lehetővé tette, hogy a kamera külső tájékozási paraméterei közvetlenül a repülési szenzorok adataiból is meghatározhatók legyenek [2]. Ezt az eljárást direkt georeferenciának nevezzük. A direkt georeferencia során a kamera vetítési centrumának helyzetét a GNSS rendszer határozza meg, míg a kamera orientációját az inerciális mérőrendszer (INS) szolgáltatja.

A módszer egyik legfontosabb előnye, hogy jelentősen csökkentheti a terepen telepítendő illesztőpontok számát, illetve bizonyos esetekben akár teljesen kiválthatja azok használatát. A direkt georeferencia pontossága azonban nagymértékben függ a navigációs szenzorok pontosságától, valamint a szenzorok közötti geometriai kapcsolatok pontos ismeretétől.

- RTK

A drónplatformok egyre gyakrabban rendelkeznek RTK (Real Time Kinematic) GNSS vevővel, amely lehetővé teszi a kamera vetítési centrumának centiméteres pontosságú meghatározását [1], [6]. Az RTK technológia a műholdas helymeghatározás relatív mérési elvén alapul, amely valós időben képes korrigálni a GNSS mérési hibákat egy referenciaállomás adatai alapján.

RTK alkalmazásával a kamera pozíciója általában néhány centiméteres pontossággal meghatározható. Ez jelentősen javítja a fotogrammetriai blokk abszolút georeferenciáját, és csökkentheti a szükséges GCP-k számát. Ugyanakkor a kamera pozíciójának pontos ismerete önmagában nem elegendő a teljes külső tájékozás meghatározásához, mivel a kamera orientációja továbbra is kritikus tényező marad.

- Orientáció pontossága

A kamera orientációját a drón fedélzetén elhelyezett inerciális mérőrendszer (INS) szolgáltatja. Az INS gyorsulásmérők és giroszkópok segítségével méri a platform mozgását és orientációját, amelyből meghatározható a kamera térbeli irányultsága.

A fotogrammetriai pontosság szempontjából az orientáció pontossága különösen fontos. Már nagyon kis szögeltérés is jelentős terepi pozícióhibát eredményezhet, különösen nagyobb repülési magasság esetén.

$$e \approx H \cdot \sigma_{\theta}$$

ahol

- e – terepi pozícióhiba
- H – repülési magasság
- σ_{θ} – orientáció hiba

Példa:

100 m magasság esetén

0.01° → kb. 1.7 cm hiba

A drónokban alkalmazott MEMS típusú inerciális szenzorok orientációs pontossága általában néhány század fok nagyságrendű, ami sok esetben elegendő a fotogrammetriai feldolgozáshoz, de a centiméteres pontosságú direkt georeferencia eléréséhez gyakran korlátozó tényező lehet.

- Boresight

A direkt georeferencia során fontos figyelembe venni a különböző szenzorok koordinátarendszerei közötti eltéréseket. A boresight a kamera és az inerciális mérőrendszer koordinátarendszere közötti szögeltérést jelenti. Ez a három kis szögből álló paraméterhalmaz határozza meg, hogy a kamera optikai tengelye milyen irányban helyezkedik el az INS által meghatározott tengelyrendszerhez képest.

A boresight paraméterek meghatározása általában rendszerkalibrációval történik, amely során ismert geometriájú fotogrammetriai blokkot dolgoznak fel. A boresight hibája közvetlenül befolyásolja a kamera orientációjának pontosságát, és így a térbeli pontok koordinátáit is.

- Lever arm

A lever arm a GNSS antenna és a kamera vetítési centruma közötti térbeli eltolást jelenti. Mivel a GNSS vevő az antenna helyzetét méri, a kamera pozíciójának meghatározásához ismerni kell a két pont közötti távolságot és annak irányát.

A lever arm vektor hibája a kamera pozíciójának meghatározásában jelenik meg, ami közvetlenül hat a fotogrammetriai blokk georeferenciájára. Ezért a lever arm paramétereket rendszerint pontos mechanikai méréssel vagy kalibrációs eljárással határozzák meg.

Összességében a GNSS/INS rendszerek alkalmazása jelentősen javíthatja a drónos fotogrammetriai felmérések hatékonyságát és csökkentheti a terepi munkát. A direkt

georeferencia pontossága azonban a navigációs szenzorok pontosságától, valamint a boresight és lever arm paraméterek pontos meghatározásától függ. A gyakorlatban ezért gyakran alkalmaznak olyan megoldást, amely a direkt georeferenciát néhány földi illesztőponttal kombinálja a kívánt pontosság biztosítása érdekében.

VIII. ÖSSZEFOGLALÁS

A drónos fotogrammetria az elmúlt években a térbeli adatgyűjtés egyik legfontosabb eszközévé vált, amely gyors és nagy felbontású felméréseket tesz lehetővé. A technológia széles körű alkalmazhatósága mellett azonban kiemelten fontos a fotogrammetriai termékek pontosságának vizsgálata, mivel a különböző mérnöki és térinformatikai feladatok gyakran centiméteres pontosságot igényelnek.

A tanulmány bemutatta azokat a főbb tényezőket, amelyek befolyásolják a drónos fotogrammetria pontosságát. A fotogrammetriai feldolgozás pontossága alapvetően a képfelvételeken végzett mérések pontosságára épül, ezért a képminőség és a felbontás kulcsszerepet játszik a térbeli koordináták meghatározásában. A megfelelő földi felbontás (GSD), az éles és zajmentes felvételek, valamint a megfelelő felszíni textúra mind hozzájárulnak a képi mérési pontosság javításához.

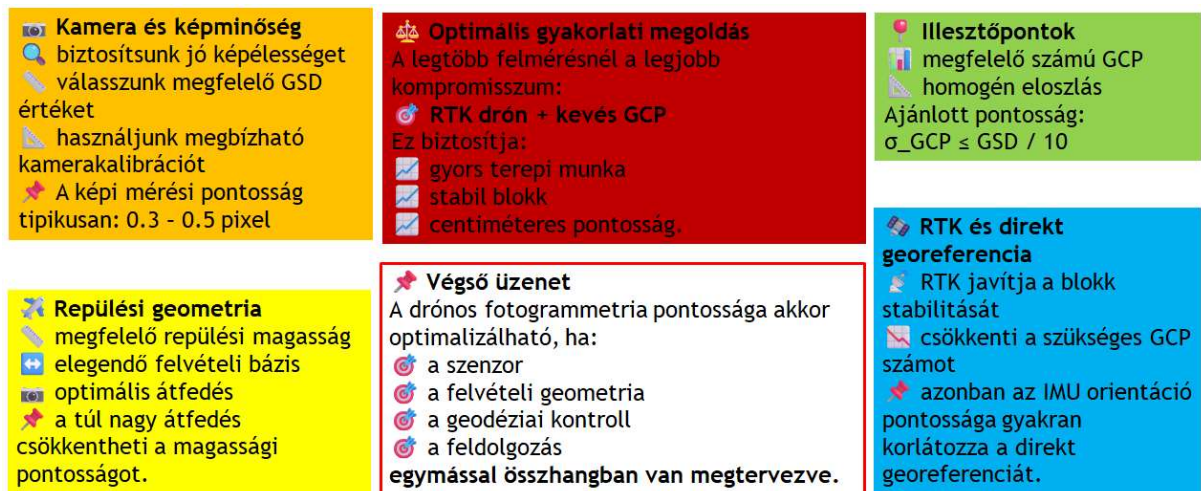
A repülési és blokkgeometria szintén meghatározó szerepet tölt be a fotogrammetriai pontosság kialakulásában. A repülési magasság, a felvételi bázis és a felvételek közötti átfedések közvetlenül befolyásolják a képsugarak metszési geometriáját, ezáltal a térbeli koordináták pontosságát. Domborzatilag változatos területeken a terepkövető repülés alkalmazása hozzájárulhat a homogénebb felbontás és pontosság biztosításához.

A kamera kalibrációja szintén alapvető feltétele a pontos fotogrammetriai feldolgozásnak. A kamera belső tájékozási paramétereinek meghatározása és az optikai torzítások modellezése elengedhetetlen a képi koordináták és a vetítési sugarak közötti pontos kapcsolat megteremtéséhez. A megfelelő kalibrációhoz fontos a megfelelő geometriai kialakítású tesztmező és a paraméterkorrelációk minimalizálása.

A fotogrammetriai blokk abszolút pontosságát a földi illesztőpontok biztosítják. A megfelelő pontosságú és megfelelően elosztott GCP-hálózat stabil georeferenciát tesz lehetővé, és csökkenti a blokk torzulásainak kialakulását. A modell pontosságának objektív értékeléséhez ellenőrzőpontok alkalmazása is szükséges, amelyek lehetővé teszik a fotogrammetriai eredmények független pontosságvizsgálatát.

A navigációs rendszerek fejlődése új lehetőségeket teremtett a fotogrammetriai georeferencia területén. Az RTK GNSS és az inerciális mérőrendszerek kombinációja lehetővé teszi a kamera külső tájékozási paramétereinek közvetlen meghatározását, amely a direkt georeferencia alapját képezi. A módszer jelentősen csökkentheti a terepi munkaigényt, ugyanakkor pontossága nagymértékben függ az orientáció meghatározásának pontosságától, valamint a szenzorok közötti geometriai kapcsolatok – például a boresight és a lever arm – pontos ismeretétől.

Mindezeket a szempontokat a 4. ábra foglalja össze.



4. ábra: UAV felmérés pontosságát befolyásoló tényezők

Összességében megállapítható, hogy a drónos fotogrammetria pontossága rendszerszintű tulajdonság, amelyet a mérési és feldolgozási folyamat több eleme együttesen határoz meg. A képminőség, a repülési geometria, a kamerakalibráció, a geodéziai kontroll és a navigációs rendszer pontosságának összehangolt megtervezése alapvető feltétele a megbízható és pontos fotogrammetriai eredmények előállításának.

IRODALOM

- [1] Agisoft LLC (2022): Agisoft Metashape Professional Edition User Manual. Version 2.0, Agisoft LLC, St. Petersburg.
- [2] Colomina, I., Molina, P. (2014): Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 92, pp. 79–97.
<https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2014.02.013>
- [3] Förstner, W., Wrobel, B. (2016): Photogrammetric Computer Vision: Statistics, Geometry, Orientation and Reconstruction. Springer, Cham.
- [4] Luhmann, T., Robson, S., Kyle, S., Harley, I. (2020): Close-Range Photogrammetry and 3D Imaging. 3rd Edition, De Gruyter, Berlin.
- [5] Nex, F., Remondino, F. (2014): UAV for 3D mapping applications: A review. Applied Geomatics, 6(1), pp. 1–15.
<https://doi.org/10.1007/s12518-013-0120-x>
- [6] Pix4D SA (2021): Pix4Dmapper User Manual. Pix4D SA, Lausanne.
- [7] Remondino, F., Fraser, C. (2006): Digital camera calibration methods: considerations and comparisons. ISPRS Commission V Symposium, Dresden.
- [8] Roncella, R., Forlani, G., Remondino, F., Nex, F. (2021): UAV block geometry design and camera calibration: A simulation study. Sensors, 21(18), 6090.
<https://doi.org/10.3390/s21186090>
- [9] Schenk, T. (2005): Introduction to Photogrammetry. The Ohio State University, Columbus.
- [10] Wolf, P. R., Dewitt, B. A., Wilkinson, B. E. (2014): Elements of Photogrammetry with Applications in GIS. 4th Edition, McGraw-Hill, New York.

3. Az online számonkérések kockázatainak feltérképezése hallgatói FMEA-elemzés segítségével

Tolner Nikoletta
Alba Regia kar
Óbudai Egyetem
tolner.nikoletta@amk.uni-obuda.hu

Pogátsnik Monika
Alba Regia kar
Óbudai Egyetem
pogatsnik.monika@amk.uni-obuda.hu

Absztrakt – Az online számonkérések a felsőoktatásban egyre elterjedtebbé váltak, ugyanakkor számos technikai, integritási és adatvédelmi kockázatot hordoznak. A tanulmány célja az online számonkérések során megjelenő kockázati tényezők feltárása és elemzése hallgatói percepciók alapján, Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) módszer alkalmazásával. A kutatás az online számonkéréseket biztonságtudományi megközelítésben, komplex rendszerként vizsgálja. A vizsgálat kérdőíves adatfelvételen alapult, amely az online számonkérésekhez kapcsolódó technikai problémákat, csalási lehetőségeket, adatvédelmi aggályokat és humán tényezőket elemzi. Az FMEA módszer segítségével a kockázatok súlyossága, előfordulási valószínűsége és észlelhetősége alapján kockázati prioritási értékek kerültek meghatározásra. Az eredmények rámutatnak arra, hogy a hallgatók a számonkérés kérdéseinek vagy megoldásainak kiszivárgását, külső források vagy AI-eszközök (pl. ChatGPT) használatát érzékelik a legkritikusabb kockázatokként. A kutatás hozzájárulhat olyan kockázatkezelési és kontrollmechanizmusok kialakításához, amelyek támogatják az online számonkérések biztonságosabb és megbízhatóbb működését.

Kulcsszavak – online számonkérés, online vizsga, FMEA, kockázatelemzés, akadémiai integritás, proktorálás, digitális értékelés

I. BEVEZETÉS

1. Az online számonkérések digitális környezete

A felsőoktatás digitalizációja az elmúlt években jelentős mértékben felgyorsult, különösen a COVID-19 világjárvány következtében, amely világszerte az online oktatási és értékelési megoldások gyors bevezetését eredményezte. Az online számonkérések az elektronikus tanulási környezetek (Learning Management Systems – LMS) integrált részévé váltak, és ma már nem csupán rendkívüli helyzetekben alkalmazott megoldásként jelennek meg, hanem számos intézményben a hagyományos értékelési formák alternatívájaként is funkcionálnak [1]. Az online számonkérések körébe tartoznak többek között az elektronikus tesztek, a távoli vizsgák, a videókapcsolattal felügyelt vizsgák, valamint az automatizált vagy mesterséges intelligenciát alkalmazó proktorálási rendszerek. Az online számonkérési rendszerek olyan komplex rendszereknek tekinthetők, amelyek működését egyszerre befolyásolják technológiai, emberi és szervezeti tényezők. A rendszerek megbízható működésének biztosítása nem kizárólag informatikai kérdés, hanem a felhasználók viselkedésével, a szabályozási környezettel és az intézményi kontrollmechanizmusokkal is szoros összefüggésben áll. A szakirodalom rámutat arra, hogy az online értékelések egyik legfontosabb kihívása az akadémiai integritás fenntartása, mivel a digitális környezet új lehetőségeket teremt a szabályszegő magatartások számára [2], [3]. A digitális vizsgarendszerek előnyei között gyakran említik a rugalmasságot, a gyors értékelési lehetőségeket, valamint az adminisztratív folyamatok egyszerűsödését, ugyanakkor az online környezetben jelentkező technikai és

biztonsági problémák új típusú kockázatokat is generálnak [4]. Ezek közé tartoznak a rendszermeghibásodások, az internetkapcsolati problémák, az adatvédelmi incidensek, valamint a csalási lehetőségek növekedése [1].

2. Az online számonkérések kockázatai

2.1. Technikai kockázatok

Az online számonkérések során a technikai infrastruktúra megbízhatósága kulcsfontosságú tényező. A rendszerleállások, az internetkapcsolat megszakadása, a szerverek túlterheltsége vagy a kompatibilitási problémák jelentős mértékben veszélyeztethetik a számonkérések folyamatosságát és hitelességét. A szakirodalom hangsúlyozza, hogy az online vizsgák során a rendelkezésre állás (availability) és a rendszer megbízhatósága (reliability) alapvető biztonsági követelménynek tekinthető [1]. A technikai problémák nemcsak az értékelési folyamat megszakadásához vezethetnek, hanem pszichológiai terhelést és stresszt is okozhatnak a hallgatók számára, ami negatívan befolyásolhatja teljesítményüket és az online vizsgákkal kapcsolatos attitűdjeiket [5]. Az online vizsgarendszerek rezilienciája ezért kiemelt jelentőségű, mivel a rendszereknek képesnek kell lenniük a váratlan eseményekhez való alkalmazkodásra és a működés gyors helyreállítására.

2.2. Integritási és csalási kockázatok

Az online számonkérések egyik leggyakrabban vizsgált problémája az akadémiai integritás fenntartása. A digitális környezet sajátosságai miatt a hallgatók számára könnyebben hozzáférhetők külső segítségnyújtási lehetőségek, például chatalkalmazások, mesterséges intelligencián alapuló eszközök vagy más személyek közreműködése. A szakirodalom szerint az online számonkérések során leggyakrabban előforduló csalási formák közé tartozik az impersonáció, a kérdések megosztása, a tiltott kommunikáció és a külső források használata [6]. A mesterséges intelligencia alapú eszközök, például a ChatGPT megjelenése tovább növelte az online számonkérések integritásával kapcsolatos aggályokat. Az AI-eszközök képesek gyors és komplex válaszok generálására, amely új kihívások elé állítja az oktatási intézményeket. Ezzel párhuzamosan az automatizált csalásfelismerő rendszerek és a viselkedéselemző algoritmusok alkalmazása is egyre gyakoribbá vált [7]. A szakirodalom ugyanakkor rámutat arra is, hogy az online csalás nem kizárólag technikai probléma, hanem jelentős humán és pszichológiai komponensekkel rendelkezik [8]. A hallgatók csalási hajlandóságát befolyásolhatja a teljesítménykényszer, az igazságtalanság érzése vagy az a percepció, hogy más hallgatók is szabálytalan eszközöket használnak, illetve a szerintük alacsonyabb lebukás veszélye.

2.3. Adatvédelmi és etikai kockázatok

Az online proktorálási rendszerek alkalmazása jelentős adatvédelmi és etikai vitákat generált az elmúlt években. A kamerás megfigyelés, a képernyőrögzítés, az arcfelismerés vagy a környezeti hangok monitorozása számos hallgató számára túlzott megfigyelésként jelenik meg, amely sértheti a magánszférához való jogot [9]. A kutatások szerint a proktorálási rendszerek fokozhatják a hallgatók stressz-szintjét, valamint növelhetik az online vizsgák igazságtalanságával kapcsolatos percepciókat. Egyes tanulmányok arra is rámutatnak, hogy a mesterséges intelligencia alapú megfigyelőrendszerek működésében torzítások jelenhetnek meg, például bizonyos etnikai csoportok vagy speciális szükségletű hallgatók esetében [9]. Az adatvédelmi kérdések különösen fontosak az európai felsőoktatási intézményekben, ahol a

GDPR-szabályozás szigorú követelményeket fogalmaz meg a személyes adatok kezelésére vonatkozóan. Ennek következtében az intézményeknek egyensúlyt kell teremteniük a vizsgabiztonság és a hallgatói jogok védelme között [10].

2.4. Humán és szervezeti kockázatok

Az online számonkérések biztonságát jelentős mértékben befolyásolják a humán tényezők és a szervezeti háttér. A digitális kompetencia hiánya, a nem megfelelő technikai felkészültség vagy az online rendszerek használatával kapcsolatos bizonytalanság növelheti a hibák és incidensek valószínűségét [11]. Emellett az intézményi szabályozás hiányosságai, az egyértelmű iránymutatások hiánya vagy a nem megfelelő kommunikáció szintén biztonsági kockázatot jelenthetnek [12]. A szakirodalom hangsúlyozza, hogy az online számonkérések biztonsága nem biztosítható kizárólag technikai kontrollok alkalmazásával. Legalább ilyen fontos az oktatók és hallgatók megfelelő tájékoztatása, a digitális kompetenciák fejlesztése és az intézményi szabályozási környezet kialakítása [6].

3. Kockázatelemzés és az FMEA alkalmazhatósága

A biztonság tudományi megközelítés szerint a kockázat olyan nemkívánatos eseményként értelmezhető, amely veszélyezteti egy rendszer működését, integritását vagy megbízhatóságát. Az online számonkérési rendszerek esetében a kockázatok technikai, humán és szervezeti eredetű tényezők összetett kölcsönhatásából alakulnak ki. Az online vizsgák biztonságának vizsgálata ezért nem korlátozódhat kizárólag technológiai aspektusokra, hanem figyelembe kell venni az emberi tényezőket, a szabályozási környezetet és az intézményi kontrollmechanizmusokat is [3], [12]. A szakirodalomban a kockázatelemzés a biztonságmenedzsment egyik alapvető eszközeként jelenik meg, amely lehetővé teszi a potenciális fenyegetések azonosítását, a sebezhetőségek feltárását, valamint a megfelelő kontrollintézkedések meghatározását [2]. A digitális rendszerek esetében különösen fontos a rendszerintegritás, a rendelkezésre állás és a megbízhatóság biztosítása, mivel ezek hiánya közvetlenül veszélyeztetheti az értékelési folyamat hitelességét [13]. A Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) olyan strukturált kockázatelemzési módszer, amelynek célja a lehetséges hibamódok azonosítása, azok hatásainak értékelése és a kritikus kockázatok prioritizálása [1]. Az FMEA eredetileg az ipari és mérnöki rendszerek megbízhatóságának növelésére szolgált, azonban az elmúlt években egyre szélesebb körben alkalmazzák információs rendszerek, egészségügyi folyamatok és komplex rendszerek vizsgálatára is [14].

Az FMEA módszer három fő dimenzió mentén értékeli a kockázatokat:

- a hiba bekövetkezésének valószínűsége (Occurrence),
- a hiba következményeinek súlyossága (Severity),
- valamint a hiba észlelhetősége (Detection).

E három tényező szorzataként határozható meg az ún. Risk Priority Number (RPN), amely lehetővé teszi a különböző kockázatok összehasonlítását és rangsorolását [1]. Az online számonkérések vizsgálata során az FMEA különösen alkalmas módszernek tekinthető, mivel egyaránt képes kezelni:

- a technikai hibákat (pl. rendszerleállás, internetkapcsolati problémák),
- a humán tényezőkből eredő kockázatokat (pl. csalás, digitális kompetencia hiánya),
- valamint a szervezeti és adatvédelmi problémákat [6].

A módszer előnye, hogy nemcsak az egyes kockázatok jelenlétét vizsgálja, hanem azok relatív jelentőségét is képes meghatározni. Ez különösen fontos az online számonkérések

esetében, ahol az intézményeknek korlátozott erőforrások mellett kell dönteniük arról, mely biztonsági problémák kezelését tekintik prioritásnak [9]. A jelen kutatásban az FMEA hallgatói percepciókon alapuló adaptációja kerül alkalmazásra. A módszer lehetővé teszi annak feltárását, hogy a hallgatók mely kockázatokat érzékelik a legkritikusabbnak az online számonkérések során, valamint mely tényezők veszélyeztetik leginkább az értékelési folyamat integritását, megbízhatóságát és igazságosságát.

II. KUTATÁS

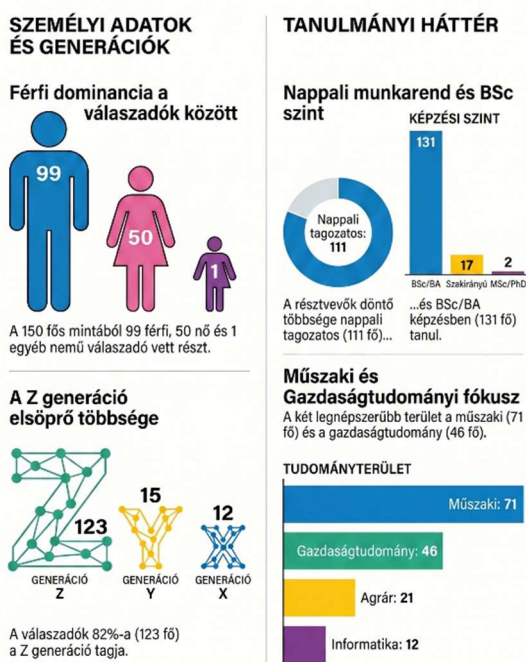
1. Kutatási célok és kérdések

A kutatás elsődleges célja az online számonkérések biztonságtudományi aspektusú vizsgálata a hallgatói percepciók tükrében. A tanulmány az FMEA (Failure Mode and Effects Analysis) módszertanát alkalmazza a kockázatok számszerűsítésére és rangsorolására, meghatározva azok prioritási értékeit (RPN) a súlyosság, az előfordulási gyakoriság és az észlelhetőség dimenziói mentén. A vizsgálat kiemelt figyelmet fordít a demográfiai összefüggésekre, feltárva, hogy a nem, az életkori generációk és a különböző tudományterületek miként befolyásolják az egyes veszélyforrások megítélését. Végül soron a kutatás olyan gyakorlati kockázatkezelési kontrollmechanizmusokat határoz meg, amelyek hatékonyan támogatják a digitális számonkérési rendszerek biztonságosabb és megbízhatóbb működését. A kutatás központi kérdése, hogy a hallgatói prioritási számok (RPN) tükrében melyek tekinthetők az online számonkérések legkritikusabb kockázati tényezőinek (K1), különös tekintettel arra, hogy milyen észlelhetőségi különbségek mutatkoznak a könnyebben detektálható technikai hibák és a rejtettebb, akadémiai integritást sértő visszaélések között (K2). Ezzel szoros összefüggésben a kutatás arra is választ keres, hogy a különböző demográfiai jellemzők – mint a nem, a generációs besorolás vagy a munkarend – miként befolyásolják ezen kockázatok súlyosságának és gyakoriságának egyéni megítélését (K3). A tanulmány kiemelten kezeli a generatív mesterséges intelligencia, például a ChatGPT megjelenését, vizsgálva annak hallgatók által érzékelt hatását az online vizsgák hitelességére és integritására (K4). Végezetül a kutatási kérdések sorát az zárja, hogy a hallgatói visszajelzések alapján mely konkrét kontrollintézkedések és módszertani fejlesztések bizonyulhatnak a leghatékonyabbnak a kockázatok érdemi csökkentése, valamint a számonkérések igazságosságának és biztonságának növelése érdekében (K5).

2. Módszertan és minta

A kutatás során kvantitatív adatgyűjtési módszerként online kérdőíves felmérést alkalmaztunk. A kérdőív célja az online számonkérésekhez kapcsolódó biztonsági, technikai és integritási kockázatok hallgatói percepcióinak feltárása volt. Az adatfelvétel során összesen 150 értékelhető hallgatói válasz érkezett be, amelyek a saját felsőoktatási intézményünk hallgatóitól származnak, és 2026 első félévében gyűjtöttük a válaszokat. A mintavétel nem reprezentatív, célzott elérésen és önkéntes részvételen alapult, ezért az eredmények általánosíthatósága korlátozott. Ugyanakkor a vizsgálat alkalmas arra, hogy feltáró jelleggel azonosítsa az online számonkérések során megjelenő legfontosabb biztonsági és működési kockázatokat, valamint a hallgatók által érzékelt kritikus problématerületeket. A kérdőív összeállítása során kiemelt szempont volt az online számonkérések biztonságtudományi megközelítése, különös tekintettel az akadémiai integritásra, a technikai megbízhatóságra, az adatvédelmi kérdésekre és a humán tényezőkre. Az adatfeldolgozás anonim módon történt, a válaszadók személyes adatainak gyűjtése nélkül.

A demográfiai kérdések (1. ábra) alapján a válaszadók kétharmada férfi (99 fő), a nők száma 50, míg 1 fő nem kívánt válaszolni. A minta nagy részét a Z generáció adja (123 fő), mellettük 15-en az Y és 12-en az X generáció tagjai. A hallgatók 74%-a (111 fő) nappali tagozatos, 26%-uk (39 fő) pedig levelező munkarendben tanul. Kimagasló az alapképzésben (BSc/BA) részt vevők aránya (131 fő), a szakirányú továbbképzést pedig 17-en jelölték meg, illetve 1 mesterképzésben, és 1 doktori képzésben részt vevő hallgató is válaszolt. A legtöbben a műszaki (71 fő) és a gazdaságtudományi (46 fő) területről érkeztek, az agrártudomány 21 főt, az informatika pedig 12 főt számlál.



1. ábra Demográfiai adatok összefoglaló táblázata (N=150) (forrás: saját prompt alapján AI generált kép)

3. Vizsgált kockázatok

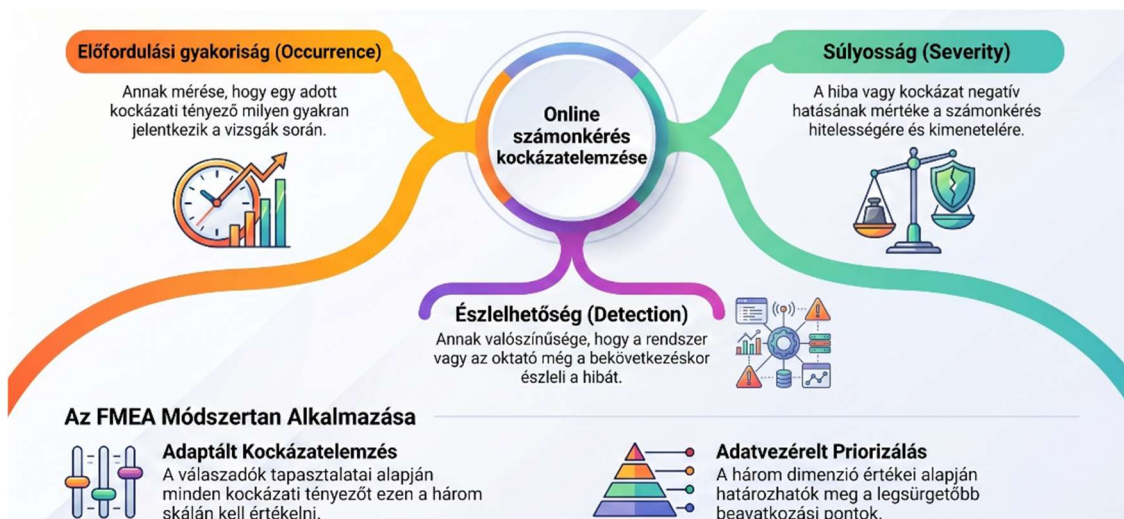
A kutatás során vizsgált kockázatok az online számonkérések biztonság tudományi szempontból releváns főbb kockázati kategóriái alapján kerültek rendszerezésre. A kategorizálás során elkülönítésre kerültek az akadémiai integritással kapcsolatos, a technikai és infrastruktúra-jellegű, az adatvédelmi és etikai, a szervezeti-szabályozási, valamint a pedagógiai és pszichológiai kockázatok (1. táblázat).

Kockázati kategóriák	Kérdőívben szereplő kockázatok
Akadémiai integritási kockázatok	Más személy írja meg a számonkérést a hallgató helyett (impersonáció). Kérdések vagy megoldások kiszivárognak (pl. képernyőfotó, megosztás). A hallgatók külső chatsatornán kommunikálnak az online számonkérés közben. Külső források vagy AI-eszközök (pl. ChatGPT) használata számonkérés közben. A proktorálás nem képes kiszűrni a csalást.
Technikai és működési kockázatok	Internetkapcsolat megszakadása zavarja a számonkérést. Vizsgaplatform túlterhelt. A hallgatók nem egyenlő technikai eszközökkel rendelkeznek. Oktatói hibák fordulnak elő (pl. rosszul beállított számonkérés).
Adatvédelmi és etikai kockázatok	Adatvédelmi incidens történik (pl. személyes adatok szivárgása). Az online felügyelet (proktorálás) túlzott beavatkozásnak érződik.
Szervezeti és szabályozási kockázatok	Nem megfelelően kommunikálják a szabályokat. Az intézménynél hiányzik az online számonkérésekre vonatkozó szabályozás.
Pedagógiai és pszichológiai kockázatok	A hallgatók stresszesnek vagy igazságtalannak érzik az online számonkérést. A vizsga, számonkérés kérdései nem a valós tudást mérik.

1. táblázat Az online számonkérések kockázatai

Az online számonkérésekhez kapcsolódó kockázatok értékelése adaptált FMEA (Failure Mode and Effects Analysis) módszer alkalmazásával történt. A válaszadók minden kockázati tényezőt három dimenzió mentén értékelték (2. ábra):

- (1) előfordulási gyakoriság (Occurrence),
- (2) a kockázat súlyossága (Severity),
- (3) a kockázat észlelhetősége (Detection).



2. ábra. Az online számonkérések FMEA alapú kockázatelemzése (forrás: saját prompt alapján AI generált kép)

Az értékelés ötfokozatú Likert-skálán történt. Az egyes dimenziók átlagértékei alapján került kiszámításra a Risk Priority Number (RPN), az alábbi képlet szerint:

$$RPN = \text{Severity} \times \text{Occurrence} \times \text{Detection}$$

Az RPN értékek lehetővé tették a kockázatok rangsorolását és a kritikus kockázati tényezők azonosítását (2. táblázat)

Kockázat	S	O	D	RPN	Kockázati szint
Más személy írja meg a számonkérést a hallgató helyett	2,16	3,19	3,39	23,36	
Kérdések vagy megoldások kiszivárognak	2,98	2,91	3,3	28,62	
A hallgatók külső chatsatornán kommunikálnak	2,86	2,94	3,51	29,51	
Külső források vagy AI-eszközök (pl. ChatGPT) használata	3,19	3,22	3,11	31,95	
A proktorálás nem képes kiszűrni a csalást	2,68	2,88	3,16	24,39	
Internetkapcsolat megszakadása zavarja a számonkérést	2,69	3,31	2,9	25,82	
Vizsgaplatform túlterhelt	3,04	3,33	2,58	26,12	
A hallgatók nem egyenlő technikai eszközökkel rendelkeznek	2,87	2,7	3,19	24,72	
Oktatói hibák fordulnak elő	2,92	3,08	2,65	23,83	
Adatvédelmi incidens történik	1,6	2,93	2,98	13,97	
Az online felügyelet (proktorálás) túlzott beavatkozásnak érződik	2,74	2,78	2,97	22,62	
Nem megfelelően kommunikálják a szabályokat	2,21	2,83	3,04	19,01	
Hiányzik az online számonkérésekre vonatkozó szabályozás	2,52	2,63	2,98	19,75	
A hallgatók stresszesnek vagy igazságtalannak érzik az online számonkérést	2,5	2,52	3,05	19,22	
A számonkérés kérdései nem a valós tudást mérik	2,99	3,01	2,88	25,92	

2. táblázat. RPN értékek meghatározása az egyes tényezők átlagértékei alapján

Az RPN értékek értelmezése relatív kategorizálással történt, figyelembe véve a minta eloszlását és az oktatási környezet sajátosságait. A kockázatok alacsony, közepes és magas kategóriába sorolása a kapott RPN értékek alapján került meghatározásra (3. táblázat).

RPN	Besorolás
<20	Alacsony
20–27	Közepes
>27	Magas

3. táblázat RPN értékek besorolása

4. Eredmények

Az eredmények alapján az online számonkérések során leggyakrabban előforduló kockázatok több dimenzióban jelennek meg. A válaszadók szerint a legjelentősebb gyakorisággal a vizsgaplatform túlterheltsége fordul elő, ami egyértelmű technikai jellegű problémára utal. Emellett kiemelkedően gyakori a külső források és mesterséges intelligencia alapú eszközök használata, valamint a kérdések és megoldások kiszivárgása, amelyek az akadémiai integritás sérülékenységét jelzik. A gyakori kockázatok között megjelennek továbbá az oktatói hibák is, például a számonkérések nem megfelelő beállítása, ami a rendszer szervezeti gyengeségeire mutat rá. Végül a válaszadók szerint gyakran előfordul, hogy a vizsgakérdések nem a valós tudást mérik, ami pedagógiai szempontból kritikus problémát jelent. Összességében a leggyakoribb kockázatok azt mutatják, hogy az online számonkérés kihívásai nem kizárólag technikai eredetűek, hanem együttesen jelennek meg technológiai, integritási, szervezeti és pedagógiai dimenziók mentén. Az eredmények alapján a különböző kockázatok észlelt gyakorisága jelentős eltéréseket mutat. A technikai kockázatok inkább objektíven észlelhetők, míg az akadémiai integritással kapcsolatos kockázatok esetében magas a bizonytalanság ('nem tudom' válaszok aránya), ami az alacsony észlelhetőségre és az információhiányra utal (K2).

A válaszadók a legsúlyosabb hatású kockázatok közé elsősorban az akadémiai integritást veszélyeztető tényezőket sorolták, mint az impersonáció, a vizsgafeladatok kiszivárgása, valamint a külső források és mesterséges intelligencia használata. Emellett kiemelten kritikusnak ítélték a csalás detektálásának korlátait és az adatvédelmi incidensek lehetőségét, amelyek az online számonkérések megbízhatóságát és jogszerű működését egyaránt veszélyeztetik.

Az észlelhetőségi adatok alapján a technikai jellegű kockázatok általában jól detektálhatók, míg az akadémiai integritással kapcsolatos problémák, például a csalás különböző formái és a külső eszközök használata, jellemzően nehezen észlelhetők (K2). A válaszok azt mutatják, hogy a legkritikusabb kockázatok közé tartozó jelenségek gyakran rejtve maradnak, ami a kontrollmechanizmusok korlátozott hatékonyságára utal.

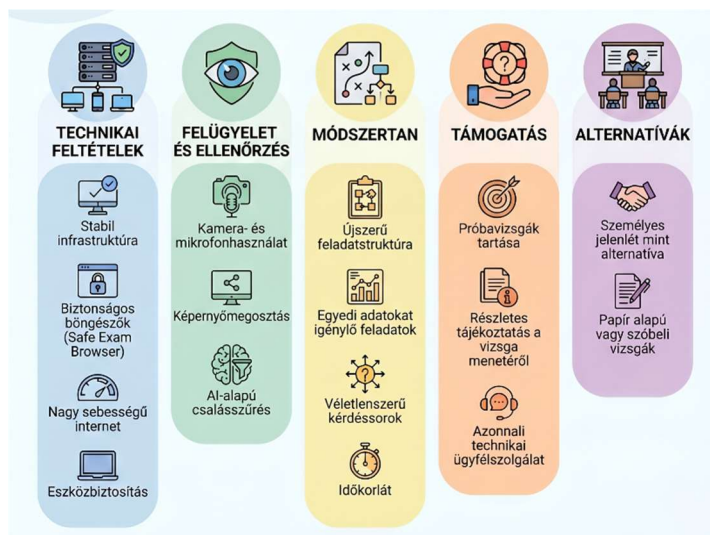
A 150 válaszadó válaszainak elemzése alapján több összefüggés is megfigyelhető a demográfiai jellemzők és a kockázatértékelési pontszámok között (K3). A női válaszadók (50 fő) tendenciaszerűen magasabb pontszámokat adtak a kockázatok súlyosságára (Severity) és észlelhetőségére (Detection), mint a férfiak. A nők gyakrabban értékelték 4-es vagy 5-ös (kritikus) szintűre az olyan kockázatok hatását, mint az internetkapcsolat megszakadása vagy a vizsgaplatform túlterheltsége. A női kitöltők körében magasabb az 5-ös értékek aránya az észlelhetőségi skálán, ami azt jelenti, hogy ők nehezebben észlelhetőnek (rejtettebbnek) tartják a csalásokat (például az AI használatát vagy a külső chatsatornákon történő kommunikációt),

mint a férfi hallgatók. Az idősebb generációk (X és Y), akik jellemzően a levelező tagozaton (39 fő) vagy szakirányú továbbképzésben vesznek részt, sajátos mintázatot mutatnak. Az X és Y generációs válaszadók magasabb pontszámot adtak a technikai jellegű kockázatok (pl. adatvédelmi incidens, rendszerhiba) súlyosságára. Ez a csoport kiemelkedően magasra értékelte a támogató intézkedések, például a próbavizsga és az előzetes tájékoztatás hatékonyságát, mivel számukra a technikai biztonságérzet kulcsfontosságú. A férfi Z generációs műszaki hallgatók (a minta legnagyobb csoportja) az átlagnál alacsonyabb pontszámot adtak a kockázatok előfordulási gyakoriságára (Occurrence). Ők magabiztosabbnak tűnnek a technikai rendszer stabilitásában, ugyanakkor reálisabbnak (alacsonyabb pontszámúnak) ítélik a csalások észlelhetőségét, feltételezve, hogy ismerik a technikai kiskapukat. Gazdaságtudományi hallgatók esetén (ahol magasabb a nők aránya) az AI (ChatGPT) használata és a hallgatók közötti kommunikáció miatti aggodalom magasabb pontszámokat kapott mind a gyakoriság, mind a hatás tekintetében.

A 2. táblázat alapján a legmagasabb kockázati prioritási értéket a „Külső források vagy AI-eszközök (pl. ChatGPT) használata” kapta (RPN = 31,95) (K1). Ez arra utal, hogy a hallgatók ezt a jelenséget viszonylag gyakori, nehezen észlelhető és az online számonkérések integritását jelentősen veszélyeztető problémának tekintik. Az eredmény különösen aktuális a generatív mesterséges intelligencia oktatási környezetben való gyors terjedése miatt. Szintén magas RPN értéket kapott a külső chatszolgáltatás használata (RPN = 29,51), valamint a kérdések és megoldások kiszivárgása (RPN = 28,62) (K1). Ezek az eredmények azt mutatják, hogy a hallgatók az online számonkérések egyik legjelentősebb biztonsági problémájának az ellenőrizhetőség korlátozottságát és a kollaboratív csalási lehetőségeket tekintik. A magas észlelhetőségi értékek arra utalnak, hogy ezek a tevékenységek nehezen felismerhetők a jelenlegi online felügyeleti rendszerek számára. A technikai és infrastruktúra-jellegű kockázatok közül a vizsgaplatform túlterheltsége (RPN = 26,12), az internetkapcsolat megszakadása (RPN = 25,82), valamint az a probléma, hogy a számonkérések nem a valós tudást mérik (RPN = 25,92), szintén jelentős kockázati szintet értek el. Ez arra utal, hogy a hallgatók nemcsak technikai, hanem pedagógiai szempontból is problémásnak érzékelik az online számonkérések egy részét. Érdekes eredmény, hogy az impersonáció („Más személy írja meg a számonkérést”) RPN értéke alacsonyabb lett (23,36), mint az AI-eszközök vagy a külső kommunikáció esetében. Ez arra utalhat, hogy a hallgatók a klasszikus csalási formákat kevésbé érzik gyakorinak vagy relevánsnak, míg a digitális és AI-alapú támogatással történő csalást sokkal aktuálisabb fenyegetésnek tartják (K4). Az adatvédelmi incidensek kapták a legalacsonyabb RPN értéket (13,97), ami arra utalhat, hogy a hallgatók ezeket ritkábban tapasztalják vagy kevésbé érzékelik közvetlen veszélynek. Ez azonban nem feltétlenül jelenti azt, hogy az adatvédelmi kockázatok objektíven kevésbé súlyosak, inkább arra utal, hogy a hallgatói percepcióban kevésbé jelennek meg hangsúlyosan. A szervezeti és szabályozási problémák – például a szabályok nem megfelelő kommunikációja (RPN = 19,01) vagy a szabályozás hiánya (RPN = 19,75) – közepes kockázati szintet mutatnak. Ez arra utal, hogy a hallgatók ezeket inkább támogató, háttérjellegű tényezőként érzékelik, amelyek közvetetten befolyásolják az online számonkérések biztonságát és igazságosságát. Összességében az eredmények azt mutatják, hogy a hallgatók az online számonkérések legkritikusabb kockázatainak az akadémiai integritást veszélyeztető, technológiailag támogatott csalási formákat tekintik (K1). A kutatás rámutat arra, hogy az online számonkérések biztonságának növelése nem kizárólag technikai kérdés, hanem komplex pedagógiai, szervezeti és etikai megközelítést igényel.

5. Kontroll intézkedések

A hallgatókat egy nyílt végű kérdés keretében arról is megkérdeztük, hogy mely intézkedéseket tartják hatékonyak az online számonkérések során felmerülő kockázatok csökkentésében. A hallgatók számos javaslatot fogalmaztak meg az online számonkérések kockázatainak csökkentésére (K5). Az észrevételeiket az alábbi fő kategóriákba csoportosíthatjuk (3. ábra).



3. ábra Hallgatói javaslatok az online számonkérések kockázatainak csökkentésére (forrás: saját prompt alapján AI generált kép)

5.1. Technikai és infrastrukturális javaslatok

A válaszadók jelentős része a technikai hátteret tartja a legkritikusabbnak a hibák elkerülése érdekében. Kiemelték a stabil internetkapcsolat és a megbízható szerverek szükségességét, amelyek nem omlanak össze a terhelés alatt. Felmerült az igény kedvezményes internetre vagy eszközökre, sőt, olyan javaslat is érkezett, hogy az egyetem biztosítson laptopot a vizsgázáshoz a hibák minimalizálása érdekében. Számos hallgató tartja hatékonyak a biztonságos vizsgaböngésző használatát, illetve olyan rendszereket, amelyek folyamatosan mentik a válaszokat.

5.2. Felügyeleti és ellenőrzési megoldások

A visszaélések (csalások) kiszűrésére több szigorító intézkedést is hatékonyak vélnek. A webkamera használatát és a tevékenységek rögzítését több helyen is említik, mint a személyes jelenlét pótlékát. Javasolták a digitális ellenőrző kulcsok (MFA) vagy banki szintű azonosítási folyamatok bevezetését. Felmerült a képernyőmegosztás, a mimika és a szemmozgás követése, valamint az olyan szoftverek alkalmazása, amelyek észlelik, ha a diák más platformot használ.

5.3. Módszertani és pedagógiai fejlesztések

Sokan a vizsgák felépítésének megváltoztatásában látják a megoldást. Olyan feladatok kiadása, amelyek saját gondolkodást igényelnek vagy személyre szabott adatokkal dolgoznak, így a segédeszközök kevésbé használhatók. Megoszlanak a vélemények, egyesek szerint a rövid időkorlát hatékony a csalás ellen, mások szerint több időre lenne szükség a technikai stressz és a kapkodás csökkentésére. A kérdések véletlenszerű kiadása és a vizsgázók csoportokra bontása (a szerver terhelésének csökkentésére) szintén felmerült.

5.4. Támogatás és kommunikáció

Ebbe a csoportba a hallgatók biztonságérzetét növelő, „puha” intézkedések tartoznak. A stressz és a technikai bizonytalanság csökkentésére az egyik leghatékonyabb eszköznek tartják a próbavizsga lehetőségét. A vizsgafolyamat pontos leírása, a pontszámok és feladattípusok előzetes ismertetése is kulcsfontosságú. Kritikus pont, hogy a vizsga alatt legyen elérhető technikai támogatás vagy közvetlen kapcsolat az oktatóval.

5.5. Radikális és alternatív javaslatok

Vannak, akik szerint az online forma alapvető kockázatokat hordoz. Többen a személyes, szóbeli vizsgát vagy a papír alapú, tantermi számonkérést tartják a „legtisztább” és legnyugodtabb megoldásnak. Néhány válaszadó szerint a kockázatokat egyáltalán nem lehet teljesen kiszűrni az online térben.

III. Összefoglalás

A kutatás eredményei alapján az online számonkérések olyan komplex rendszerek, amelyek biztonsága nem garantálható kizárólag technikai eszközökkel. A legmagasabb kockázati prioritást a mesterséges intelligencia alapú eszközök használata kapta (RPN = 31,95), ami jelzi, hogy a hallgatók ezt tartják a legnehezebben kontrollálható és legaktuálisabb fenyegetésnek az akadémiai integritásra nézve. Míg a technikai hibák (pl. rendszerleállás) jól detektálhatók, az integritási kockázatok, különösen a kollaboratív csalások, észlelhetősége alacsony. Ez azt jelenti, hogy a jelenlegi felügyeleti rendszerek (proktorálás) hatékonysága korlátozott a rejtett csalási formákkal szemben. A női válaszadók és az idősebb (X, Y) generációk kritikusabbak a kockázatok súlyosságával szemben, míg a Z generációs műszaki hallgatók magabiztosabbak a technikai környezetben, de realisabban látják a csalások észlelhetőségének nehézségeit. A kockázatok csökkentése érdekében a technikai kontrollokat (pl. biztonságos böngésző) kombinálni kell módszertani fejlesztésekkel (pl. egyedi, gondolkodtató feladatok) és „puha” intézkedésekkel, mint a próbavizsgák biztosítása és a transzparens kommunikáció. A legmagasabb hatékonyságúnak ítélt (pl. próbavizsga, világos szabályok) (K5) intézkedések nem a szigort, hanem a kiszámíthatóságot és a technikai biztonságot növelik, ami kulcsfontosságú a hallgatói stressz csökkentéséhez és az igazságos értékeléshez.

A kutatás korlátai közé tartozik, hogy az alkalmazott FMEA-módszer és a számított RPN-értékek elsősorban a hallgatói percepcióra támaszkodnak, így azok a vizsgált jelenségek szubjektív megítélését tükrözik, ami eltérhet az objektív technikai statisztikáktól. Módszertani szempontból számolni kell az úgynevezett „RPN-csapda” jelenségével is: mivel a prioritási szám a súlyosság, az előfordulás és az észlelhetőség szorzataként áll elő, előfordulhat, hogy alapvetően eltérő kockázati profilok, például egy ritka, de kritikus hiba és egy gyakori, de csekélyebb súlyú incidens, azonos értéket kapnak, ami elfedheti a tényezők közötti lényegi különbségeket. Emiatt fontos hangsúlyozni, hogy a kockázati szintek besorolása relatív módon, a jelen minta sajátosságaihoz mérten történt, így az eredmények abszolút értéként való kezelése és más intézményi környezetbe történő közvetlen átültetése kritikai szemléletet igényel.

Bár a jelen tanulmány elsősorban a hallgatói percepciókra és az általuk érzékelt kockázatokra fókuszált, az online számonkérések mint komplex rendszerek teljes körű megértése további vizsgálatokat igényel. A kutatás folytatásaként jövőbeni terveink között szerepel a vizsgálat kiterjesztése az oktatók, valamint a technikai támogató munkatársak

nézőpontjaira is. Ez a többszemponú megközelítés lehetővé teszi, hogy a hallgatói véleményeket összevegyük a vizsgáztatók tapasztalataival és a rendszerüzemeltetők technikai rálátásával, ezáltal egy holisztikus, minden érintett csoportot átfogó képet kapjunk az online értékelési folyamat biztonsági és integritási kihívásairól. A különböző perspektívák integrálása alapvető fontosságú olyan átfogó kontrollmechanizmusok kidolgozásához, amelyek egyszerre kezelik a technológiai, pedagógiai és szervezeti kockázatokat.

IRODALOM

- [1] K. Butler-Henderson and J. Crawford, "A systematic review of online examinations: A pedagogical innovation for scalable authentication and integrity," *Comput. Educ.*, vol. 159, p. 104024, Dec. 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2020.104024>
- [2] G. Sindre and A. Vegendla, "E-exams versus paper exams: A comparative analysis of cheating-related security threats and countermeasures," Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway, 2015.
- [3] K. A. A. Gamage, E. K. d. Silva, and N. Gunawardhana, "Online Delivery and Assessment during COVID-19: Safeguarding Academic Integrity," *Educ. Sci.*, vol. 10, no. 11, p. 301, Nov. 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/educsci10110301>
- [4] P. Hancock, J. Birt, P. De Lange, C. Fowler, M. Kavanagh, L. Mitrione, M. Rankin, "Students' perceptions of different assessment modes and student experience," *J. Account. Educ.*, vol. 70, p. 100953, 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jaccedu.2025.100953>
- [5] N. Ruzgar and C. Chua-Chow, "Perception of Students on Online Exams and How Sequential Exams and the Lockdown Browser Affect Student Anxiety and Performance," *WSEAS Trans. Comput. Res.*, vol. 11, pp. 92–110, 2023. DOI: 10.37394/232018.2023.11.9.
- [6] F. Sabrina, S. A. Azad, S. Sohail, and S. Thakur, "Ensuring academic integrity in online assessments: A literature review and recommendations," *Int. J. Inf. Educ. Technol.*, vol. 12, no. 1, pp. 60–70, 2022.
- [7] L. C. O. Tiong, H. J. Lee, and K. L. Lim, "Online assessment misconduct detection using internet protocol and behavioural classification," 2022.
- [8] C.M. Kell, Y. Thandar, A.K. Bhundoo, F. Haffejee, B. Mbhele, J. Ducray, "Academic integrity in the information age: insights from health sciences students at a South African University," *J. Appl. Res. High. Educ.*, vol. 17, no. 7, pp. 16–28, 2025. DOI: 10.1108/JARHE-12-2023-0565.
- [9] M. Khalil, P. Prinsloo, and S. Slade, "In the nexus of integrity and surveillance: Proctoring reconsidered," *J. Comput. Assist. Learn.*, vol. 38, no. 6, pp. 1589–1602, 2022.
- [10] J. Wong, L. Racine, T. Henderson, and K. Ball, "Online Learning as a Commons: Supporting students' data protection preferences through a collaborative digital environment," *J. Intellect. Prop. Inf. Technol. E-Commer. Law*, vol. 14, no. 2, pp. 251–277, 2023.
- [11] M. Hartnett, P. Butler, and P. Rawlins, "Online proctored exams and digital inequalities during the pandemic," *J. Comput. Assist. Learn.*, vol. 39, no. 4, pp. 1103–1115, 2023. DOI: 10.1111/jcal.12813.
- [12] M. Henderson, R. Awdry, J. Chung, M. Bryant, S.V. Patel, A.S. Yu, M. Mundy, K. Ryan, C. Ashford, "Online examinations: Factors that impact student experience and perceptions of academic performance," *Australas. J. Educ. Technol.*, vol. 40, no. 4, pp. 73–89, 2024. DOI: 10.14742/ajet.9412.
- [13] D. Vose, *Risk Analysis: A Quantitative Guide*, 3. kiadás. Chichester, U.K.: Wiley, 2008.
- [14] D. H. Stamatis, *Failure Mode and Effect Analysis: FMEA from Theory to Execution*, 2. kiadás. Milwaukee, WI, USA: ASQ Quality Press, 2003.

Angol szekció

4. Ethical Challenges and Practical Experiences with Generative Artificial Intelligence in Technical Education in Hungary

Timea Bekk
Alba Regia Faculty
Óbuda University
bekk.timea@uni-obuda.hu

Imre Négyesi
Faculty of Military Science and Officer Training
National University of Public Service
negyesi.imre@uni-nke.hu

Abstract - This study examines the ethical implications and practical challenges of integrating generative artificial intelligence (GenAI) into education in Hungarian technical vocational high schools and higher education institutions. The research is based on a quantitative approach: we used a questionnaire survey to explore educators' attitudes and experiences regarding the technology. The aim of the study was to analyze the data protection, security, and ethical challenges educators face, as well as how they interpret their own responsibilities regarding plagiarism prevention and student education. The empirical results show that the use of generative tools is widespread, yet educators consider the development of clear and consistent institutional policies to be of paramount importance. The results indicate that instructors' expectations do not differ significantly based on demographic characteristics or frequency of use, suggesting the presence of a unified ethical framework. Based on the responses, the key to responsible technology integration lies not only in methodological training but also in the development of the technological environment. A particularly prominent need is the implementation of system-level ethical control mechanisms and warnings integrated into GenAI systems. The study concludes that the sustainable use of generative artificial intelligence in education can only be ensured through the coordinated implementation of institutional regulations, technological controls, and the active involvement of educators.

Keywords - generative artificial intelligence, quantitative research, educator responsibility, regulatory framework, ethical considerations, technical education

I. INTRODUCTION

The explosive growth of GenAI in the education sector has brought about a fundamental paradigm shift. This change is particularly pronounced in technical vocational training and higher education, where algorithm-generated code, designs, and texts have a direct impact on the assessment and credibility of professional competencies. Although the technology holds significant potential for increasing efficiency, issues of data protection and cybersecurity remain critical challenges in its practical application.

This study posits that the broader institutional integration of generative AI is influenced not primarily by technological factors, but by difficulties and limitations stemming from ethical and regulatory uncertainties. A prerequisite for successful adaptation is the development of a complex framework that not only focuses on preventing plagiarism but also centers on reinterpreting the responsibilities of educators. In this context, the practice of fact-checking plays a particularly prominent role, as does the need for an ideal software environment that supports the ethical and conscious use of generative systems through built-in control mechanisms. While guidelines on the use of GenAI have already been published in the international literature and in policy documents, quantitative data on the specific ethical dilemmas in Hungarian technical vocational education and on instructors' practical experiences are currently limited. The aim of this research is to address this empirical gap: using a questionnaire-based survey, it examines educators' attitudes toward the technology, about data

protection and security challenges, as well as their interpretation of individual educator responsibility in the context of plagiarism prevention and student information.

II. LITERATURE REVIEW

The emergence of GenAI in education has become one of the most intensively researched areas in recent years. The literature agrees that AI-based systems are significantly transforming learning and teaching processes, while also raising complex ethical, pedagogical, and regulatory challenges [1].

GenAI tools, for example, open new learning opportunities through large language models, including personalized education, automatic feedback, and support for curriculum development. At the same time, the use of this technology changes the nature of knowledge acquisition and raises new questions regarding autonomous learning and critical thinking [1] [2].

Empirical studies show that students widely use AI-based tools: according to a 2024 international survey, 86% of students use some form of generative AI in their studies. This widespread adoption underscores the urgency of integrating the technology into education, particularly in terms of establishing regulatory and ethical frameworks [3].

A central theme in the literature is the examination of ethical dimensions. In the context of GenAI use, issues related to data protection, transparency, algorithmic biases, and accountability are particularly prominent. In the educational setting, the handling of student data and the “black box” nature of AI systems’ operations are especially critical issues [2].

Analyses indicate that universities’ initial responses have focused primarily on issues of transparency, human oversight, and accountability. According to the research, the credibility of student performance assessment remains a key ethical principle that is potentially threatened using AI [4].

One of the greatest challenges of generative AI is the reinterpretation of academic integrity. The traditional concept of plagiarism is difficult to apply to AI-generated content that is technically original but not of human authorship [5].

Research indicates that the use of AI tools increases the risk of academic misconduct, while the lines between legitimate assistance and cheating become blurred. The term “AI-giarism” has also emerged, referring to a new type of plagiarism committed using generative systems [6] [7].

At the same time, research also emphasizes that ethical attitudes play a more significant role in shaping student behavior than formal regulations. This underscores the importance of the instructor’s role in fostering ethical awareness [5].

The literature clearly highlights the lack of and fragmentation in regulatory frameworks. At the international level, it is observed that institutions employ varying strategies, ranging from complete prohibition to controlled integration [8].

According to a comprehensive systematic review, effective integration requires a multidimensional approach that includes curriculum development, teacher training, the transformation of assessment methods, and the development of technological infrastructure. In

addition, developing AI literacy and incorporating ethical guidelines into educational practice are of paramount importance [9].

III. THE THEORETICAL BACKGROUND OF THE QUANTITATIVE RESEARCH APPROACH

The aim of the study was to explore educators' attitudes toward the educational use of generative artificial intelligence, as well as the challenges related to data protection, security, and ethics, in the context of technical vocational secondary schools and higher education in Hungary. We employed a quantitative research method, which allowed for a broad, structured mapping of the phenomenon.

The aim of quantitative research is the numerical examination and statistical analysis of phenomena. This approach focuses on measurable variables; by exploring and analyzing the relationships between them, it becomes possible to describe, explain, and predict the phenomena under study [10]. A key feature of the method is the pursuit of objectivity, measurability, and standardized data collection procedures (such as questionnaires and scales).

The aim of quantitative research is to identify relationships between variables, test hypotheses, and generalize findings to a specific population using statistical tools. According to Bryman's approach [11], the fundamental characteristics of this paradigm include the collection of numerical data, measurement, the examination of causal relationships, and reproducibility [12]. The author emphasizes that structured data collection procedures effectively ensure the objective examination and comparability of social phenomena [11]. This approach follows strictly deductive logic: it examines phenomena within a predefined theoretical framework and then evaluates their validity using statistical methods, which allows for the formulation of generalizable conclusions [10]. In Bryman's interpretation, other defining characteristics of quantitative research include the central role of measurement, the examination of causal relationships, and the pursuit of generalizability and reproducibility of results [11]. The author emphasizes that the quantitative approach employs structured data collection and analysis procedures that enable the objective examination and comparability of social phenomena. This method is particularly well-suited for examining attitudes, perceptions, and behavioral patterns in large-scale data collection, such as through questionnaire-based research, as these methods ensure that data are collected in a standardized and statistically analyzable format [11].

Within the methodological framework of this study, we conducted primary quantitative data collection using a structured questionnaire designed to explore educators' attitudes toward the educational use of generative artificial intelligence. The questionnaire enabled a quantitative comparison of educators' experiences, perceptions, and attitudes, which is consistent with the standardized survey approach used in quantitative research [13].

The use of variables measured on a Likert scale facilitated the quantification of ethical and regulatory dimensions and provided an opportunity for statistical analysis of the relationships between individual factors. As a result, the research was not limited to formulating descriptive findings but also allowed for the drawing of generalizable conclusions within the educational context under study.

Research Methodology and Data Collection

Data collection took place online, which ensured flexibility in responding and allowed for broader reach among educators working at various institutions. Completing the questionnaire was voluntary and anonymous, which reduced the risk of respondent bias and facilitated the identification of genuine attitudes.

During the design of the measurement tool, several thematic blocks were developed, which covered the main dimensions of the phenomenon under study in alignment with the research questions. Most of the questions were operationalized on a five-point Likert scale, which allowed for the quantification of educators' opinions and the statistical analysis of differences between individual factors. The extremes of the scale represented the categories "not at all characteristic / not important" and "very characteristic / very important."

The questionnaire covered the following main areas of investigation:

Q1: To what extent and in what ways do educators' demographic characteristics and their experiences with generative AI influence their expectations regarding institutional ethical regulations and data protection?

Q2: Which regulatory and ethical uncertainties most hinder the integration of generative AI into education, and what competencies and technological solutions do educators believe are necessary to support responsible use?

The questionnaire also included demographic questions that allowed respondents to be grouped by generation, gender, institution type, and subject taught. This ensured the comparability of different groups of educators and enabled the identification of underlying patterns in their attitudes. The database enabled the performance of descriptive statistical analyses and the examination of correlations between individual variables, thereby providing a foundation for the empirical results of the research. The data set structured in this way was suitable for conducting statistical analyses aligned with the research questions, with particular emphasis on identifying differences and correlations between groups.

Sample and Sampling

The target group for the study consisted of instructors working at technical vocational secondary schools and higher education institutions in Hungary. Sampling was conducted using a non-probability, convenience sampling method, which allowed for quick and efficient outreach to the relevant target group. Respondents were recruited from various types of institutions and professional fields, ensuring a diverse range of experiential backgrounds, with a particular focus on technical and IT training areas.

A total of N=95 individuals participated in the study, representing various types of institutions, including:

- higher education institutions (e.g., several faculties of Óbuda University, BME, ELTE, Széchenyi István University),
- vocational training institutions and technical colleges,
- as well as high schools.

From a demographic perspective, the respondents constitute a heterogeneous sample:

- multiple generations were represented (Baby Boomers, Gen X, Gen Y, Gen Z),
- both genders were represented,
- the subjects taught cover a wide spectrum (computer science, technical subjects, natural sciences, economics, humanities).

This diversity enables a multidimensional examination of the educational application of generative AI.

The main variables examined in the study can be classified into three main groups. The independent variables included the respondents' generation, gender, type of institution, and subject taught. The frequency of generative artificial intelligence uses, and the level of technological experience served as explanatory variables. Among the dependent variables, we examined perceptions of the importance of ethical and regulatory considerations particularly in the dimensions of plagiarism, data protection, and transparency as well as perceived risks, such as data protection and security issues. In addition, we analyzed factors influencing the integration of AI in education, such as the degree of regulatory uncertainty, perceptions regarding necessary competencies about fact-checking skills and technological expectations, including demands for ethical safeguards.

Data Processing and Analytical Methods

Data processing was performed using statistical methods. During the analysis, we used descriptive statistical measures (mean, standard deviation, frequency) to characterize the teachers' responses in general. We then conducted correlation analyses between the individual variables, with a particular focus on the relationship between the frequency of GenAI use and the perception of ethical risks.

The aim of the data analysis was to uncover the patterns underlying attitudes toward the use of generative AI and to identify the factors that influence educators' adoption of the technology.

We analyzed the data using descriptive statistical methods. During the analysis, we examined frequency distributions and mean values across each variable, with particular focus on:

- the frequency of AI use,
- the perceived importance of ethical dimensions,
- and the strength of factors influencing integration.

Based on the responses, we conducted a comparative analysis across the different groups (e.g., frequency of use vs. ethical sensitivity), which allowed us to identify the patterns underlying the instructors' attitudes.

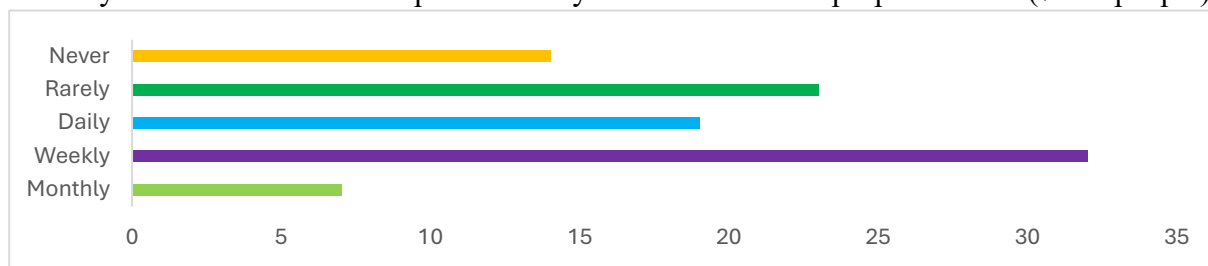
Ethical considerations

Throughout the research, we paid particular attention to adhering to ethical standards. The questionnaire was completed anonymously; respondents participated in the survey voluntarily and were informed in advance of the study's purpose. During data processing, we ensured the protection of personal data and the confidential handling of responses.

IV. PRESENTATION OF RESULTS

A total of $N = 95$ instructors participated in the questionnaire survey. The sample was selected using convenience sampling; therefore, when interpreting the results, it is important to note that they cannot be considered representative of the entire population of educators in Hungary, particularly given the relatively small sample size. In exploring background variables, we examined the respondents' generation, gender, and teaching location. We then sought to determine how frequently instructors use generative artificial intelligence in education, including in delivering lessons, preparing for class, and generating assignments. In presenting the results, we first analyze the frequency of generative AI use, then examine perceptions of ethical and regulatory dimensions, and finally present the factors influencing integration and the related development needs, followed by a discussion of more detailed findings regarding ethical issues.

Based on the data, most respondents use GenAI tools at least once a week: 32 people use them weekly, and 19 people use them daily. In contrast, 23 people rarely use the opportunities offered by generative AI in their teaching practice, while 14 people do not use them at all; monthly use was reported by a low proportion (7 people).



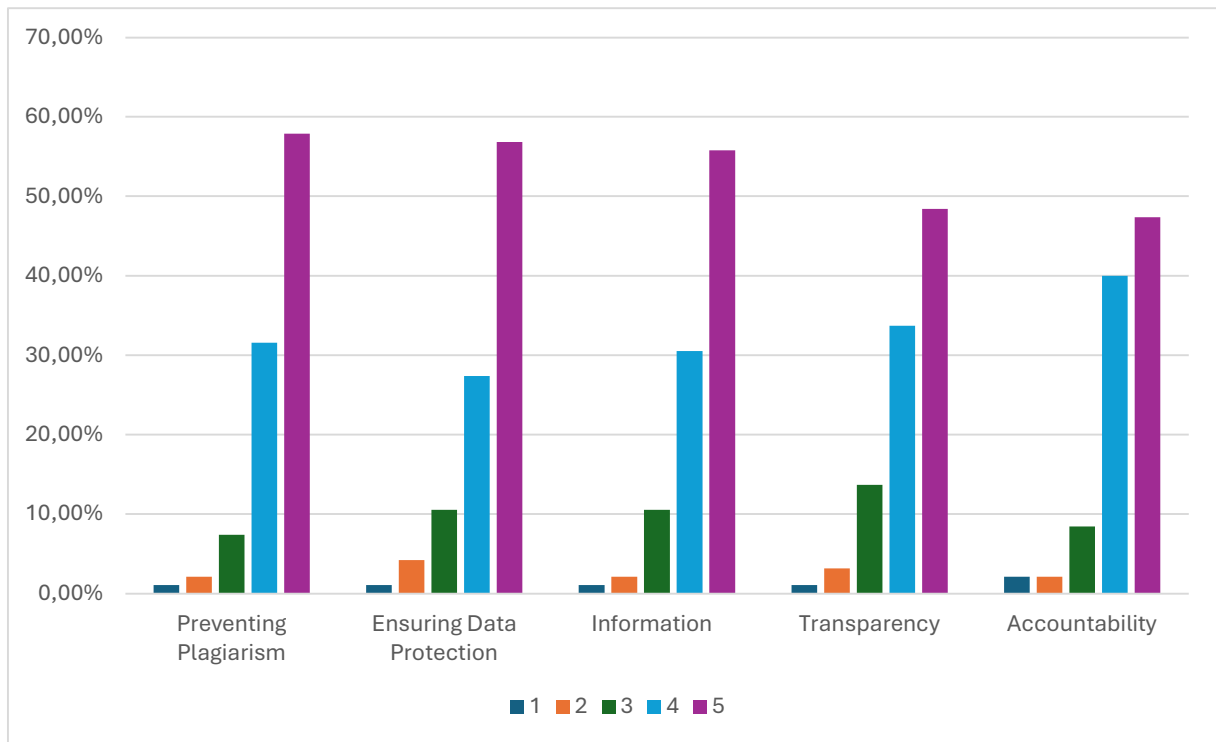
1. Figure: How often do you use generative AI in education?

Ethical and regulatory considerations are viewed as highly important. According to most respondents, preventing plagiarism, ensuring data protection, and transparency in the use of AI fall into the “important” or “very important” categories, and defining the responsibilities of instructors and informing students about AI received similarly high ratings (Figure 1).

Among the factors influencing the integration of generative AI into education, ethical and regulatory uncertainty was identified by most respondents as a moderate or significant barrier. A smaller group of respondents did not perceive this as a problem, while the majority cited the lack of or uncertainty surrounding regulations as a barrier.

Regarding the necessary competencies, educators consider the development of fact-checking skills and the expansion of data protection knowledge to be of paramount importance; most responses are concentrated in the high-priority categories.

During the descriptive statistical analysis, we also examined the ratings for each ethical and regulatory dimension based on frequency distributions. The results show that higher value categories dominate in all dimensions. Based on the resulting grouped bar chart, the highest (5) ratings dominate across all ethical and regulatory dimensions, while low (1 and 2) ratings appear in negligible proportions (Figure 2).



2. Figure: A Comparison of Ethical Dimensions

When assessing plagiarism prevention, most respondents selected the highest ratings: 55 respondents (57.89%) chose category 5, while 30 respondents (31.58%) chose category 4. The occurrence of lower ratings was minimal (category 1: 1.05%; category 2: 2.11%). This suggests that there is a strong consensus among instructors regarding the paramount importance of the issue of plagiarism.

A similar distribution can be observed in the data protection dimension: 54 respondents (56.84%) selected a value of 5, 26 respondents (27.37%) selected a value of 4, while the proportion of lower categories remained low here as well (category 1: 1.05%; category 2: 4.21%). The results clearly demonstrate that the security of personal data and regulatory compliance are critical priorities in everyday educational and research practice.

Perceptions of the importance of information also shifted toward the higher categories: 53 respondents (55.79%) chose a rating of 5, while 29 (30.53%) chose a rating of 4. Lower ratings were less common here as well (categories 1 and 2: 2.11% each). This indicates that respondents consider clear, unambiguous, and proactive communication to be essential, as it builds trust in institutional processes.

In the case of transparency, the distribution is somewhat more balanced, but the higher categories continue to dominate: 46 respondents (48.42%) selected a score of 5, while 32 respondents (33.68%) selected a score of 4. The proportion of the middle rating (category 3) is slightly higher in this dimension (13.68%). The more moderate distribution and the rise in moderate responses may suggest that, although the principle of transparency is supported in theory, some respondents still see room for improvement in terms of practical feasibility or the visibility of decision-making processes.

In the accountability dimension, rating 4 received the highest frequency (38 respondents; 40.00%), followed by rating 5 (45 respondents; 47.37%). The proportion of lower ratings

remained low here as well (rating 1: 2.11%; category 2: 2.11%). This distribution clearly shows that educators firmly recognize the necessity of accountability and commitment at both the individual and institutional levels, and view taking responsibility as a natural part of daily operations.

Regarding sensitivity, 46 respondents (48.42%) selected a score of 5, while 33 (34.74%) chose a score of 4, which also indicates a predominance of high scores. The proportion of moderate scores (13.68%) is like that for transparency. This result suggests that respondents highly value sensitivity to ethical or social issues; however, the moderate ratings may indicate that the practical, tangible application of the abstract concept of “sensitivity” can sometimes lead to uncertainty in everyday life.

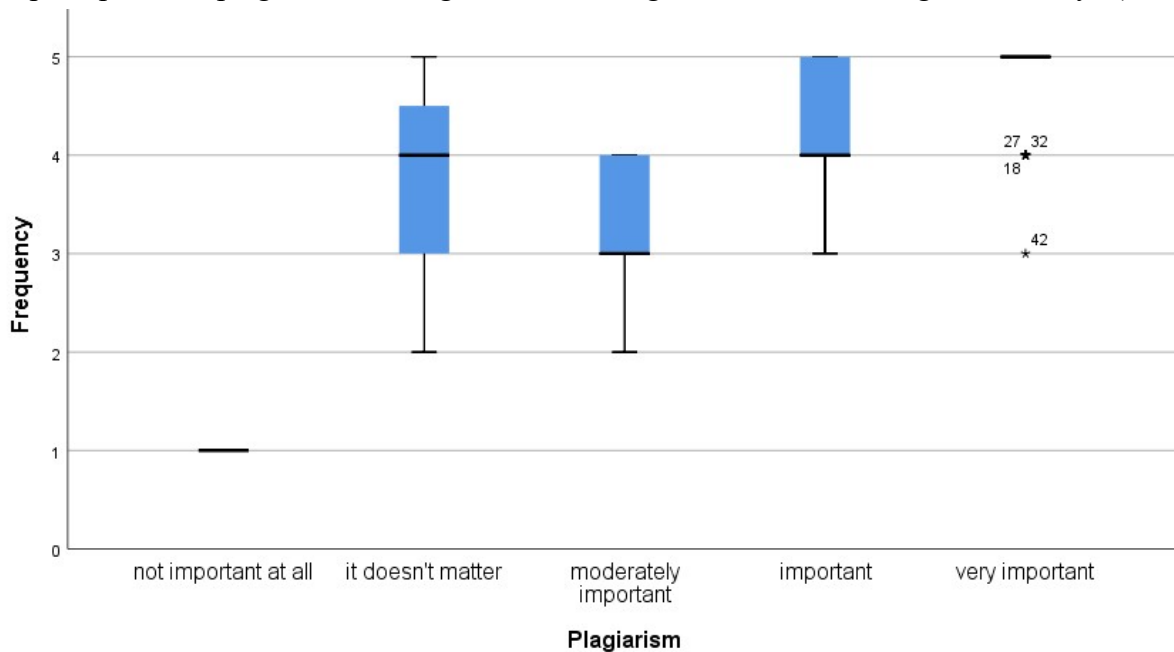
Due to the Likert-scale data and the lack of normality assumptions, we used non-parametric statistical tests. Based on the non-parametric Mann–Whitney U tests performed on the sample, the assessment of the examined ethical and operational dimensions including plagiarism, data protection, information, transparency, responsibility, and sensitivity is homogeneous among respondents. During the statistical analysis, no significant differences ($p > 0.05$) were detected for any of the variables examined, neither by the respondents’ gender nor by the type of school attended (institution/faculty).

The following results were observed during the analysis of each sub-area. In the dimension of plagiarism and intellectual property, based on descriptive statistics, this issue received the highest mean score (Mean = 4.43; Median = 5.00; Standard Deviation = 0.81), while differences between groups were negligible in terms of gender ($U = 1033.00$; $Z = -0.804$; $p = 0.422$) and by school type, where identical rank averages indicate that the groups’ opinions are practically identical (vocational high school: 47.94; university: 48.04; $U = 1089.50$; $p = 0.983$). In the case of data protection and data security (Mean = 4.35; Median = 5.00; Standard Deviation = 0.91), the greatest numerical difference appeared between the genders ($U = 926.00$; $Z = -1.687$; $p = 0.092$), where the rank mean for female respondents (52.30) was higher than that for males (43.79); however, this difference was not statistically significant, and the comparison of school types also showed no significant difference ($U = 962.50$; $Z = -1.099$; $p = 0.272$). In the dimensions of information (Mean = 4.38; Median = 5.00; Standard Deviation = 0.84) and transparency (Mean = 4.25; Median = 4.00; Standard Deviation = 0.89), the transparency of how the technology operates ($p = 0.481$ by gender; by school type $p = 0.379$), as well as institutional communication (by gender $p = 0.761$; by school type $p = 0.152$) showed similar values, and no significant difference was detected in either case. The analysis of responsibility (Mean = 4.28; Median = 4.00; Standard Deviation = 0.87) and sensitivity (Mean = 4.27; Median = 4.00; Standard Deviation = 0.86) also indicated a homogeneous sample: there was no significant difference in the assessment of responsibility based on either gender ($p = 0.172$) or school type ($p = 0.868$), and similar results were obtained for the sensitivity variable (gender: $p = 0.519$; school types: $p = 0.206$).

We then analyzed the respondents’ attitudes based on the frequency of their use of generative artificial intelligence. The sample distribution was as follows: 14 people do not use the technology (code 1), 23 people use it rarely (code 2), 7 people use it monthly (code 3), 32 people use it weekly (code 4), and 19 people use it daily (code 5). Since the categorical variable

contained five categories, we used the Kruskal–Wallis H test to examine the relationships (Figure 3).

Based on the rank averages, certain patterns emerged across multiple dimensions. In terms of perceptions of plagiarism, the highest rank averages were found among the “weekly” (55.47)



3. Figure: Usage vs. Ethical Attitude

and “never” (52.79) groups, while the lowest value belonged to the “daily” users (38.00). In the data protection dimension, the highest scores were also found among the weekly (52.16) and never-users (50.96) groups, while the lowest was associated with monthly users (33.79). In the case of transparency, the daily users (53.71) and the never-users (53.04) showed the highest values, while the lowest value was reported by the monthly users (36.21). In the sensitivity dimension, the highest rank average was shown by daily users (55.53), and the lowest by infrequent users (40.02).

However, based on the Test Statistics outputs, there was no significant effect of usage frequency on any of the dimensions examined (Data Protection: $p = 0.445$; Information: $p = 0.935$; Responsibility: $p = 0.222$; Transparency: $p = 0.273$; Sensitivity: $p = 0.381$). The results of the Kruskal–Wallis test showed that frequency of use did not have a significant effect on opinions for any of the dimensions examined (plagiarism: $H(4) = 7.711$; $p = 0.103$; data protection: $H(4) = 3.721$; $p = 0.445$; responsibility: $H(4) = 5.714$; $p = 0.222$; transparency: $H(4) = 5.142$; $p = 0.273$; sensitivity: $H(4) = 4.189$; $p = 0.381$). The smallest difference was observed in the information dimension ($H(4) = 0.822$; $p = 0.935$), where the differences between the groups were minimal.

V. CONCLUSIONS

The aim of the study was to explore the ethical and regulatory challenges posed using GenAI in technical and higher education in Hungary, as well as to examine the extent to which instructors’ demographic characteristics and experience influence their attitudes toward these challenges.

Based on the results of the first research question (Q1), it can be concluded that neither demographic factors nor the frequency of technology use showed a significant correlation with the assessment of ethical dimensions. This finding is consistent with the conclusions of the international literature, which indicates that ethical concerns regarding generative artificial intelligence are widespread in educational settings and, according to several studies, cannot be clearly linked to specific user groups [1] [2]. This homogeneity suggests that the ethical attitudes emerging among educators stem not from individual experiences, but rather from a broader institutional and professional framework of norms. A particularly significant finding is that the intensity of generative AI use is not associated with differing ethical judgments. This finding partly contradicts assumptions that an increase in technological proficiency may be accompanied by a downplaying of ethical risks. The results of this study instead reinforce the view that, for educators, the use of technology does not diminish expectations regarding data protection, transparency, or accountability. A similar phenomenon is described by Zaidy [3], who argues that ethical concerns among students and educators persist even with the use of generative AI, particularly regarding the issue of academic integrity.

About the second research question (Q2), the results clearly indicated that the greatest barriers to the integration of generative artificial intelligence in education are not technological, but rather regulatory and ethical in nature. Respondents identified regulatory uncertainty as a key limiting factor, which is in close alignment with international research. García-López and Trujillo-Liñán [2], as well as Alfiras et al. [13], also emphasize that one of the most critical issues regarding the educational application of GenAI is the lack of regulatory frameworks and the uncertainty surrounding ethical guidelines. Our findings reinforce the interpretation that institutional responses play a key role in the responsible integration of the technology. Dabis and Csáki [4] point out that higher education institutions' initial reactions to the emergence of generative AI primarily manifest at the policy level; however, these are often fragmented and do not provide consistent guidance. This is consistent with the finding of the present study that educators express a strong need for a clear and consistent regulatory environment.

The analysis of competencies revealed the key role played by information literacy skills and knowledge of data protection. This finding aligns with the concept of "critical AI use," which is gaining prominence in the literature and holds that the application of this technology requires not only technical skills but also reflective and ethical thinking [6] [9]. Uncertainties regarding the reliability of content generated by generative systems particularly justify the development of these competencies. The descriptive statistical results particularly the dominance of high-value categories across all ethical dimensions examined also support the view that educators adopt a strongly norm-conforming attitude toward the use of generative AI. This is consistent with research that identifies the issue of academic integrity as one of the most critical areas regarding generative AI [5] [7] [8].

One of the study's most important contributions, however, goes beyond the examination of individual attitudes. Based on the results, a clear systemic need for the development of the technological environment emerges. Respondents expect not only regulatory clarification but also generative AI systems that incorporate built-in ethical control mechanisms and warnings to facilitate responsible use. This expectation aligns with the areas for institutional intervention identified by Jayasinghe et al. [9], among which the integration of technological and regulatory solutions plays a prominent role.

The findings of the study suggest that the challenges associated with the educational use of generative artificial intelligence are primarily related not to the acceptance of the technology, but to its regulated and ethical use. The focus is not on addressing individual differences, but on developing a unified ethical framework that is supported at both the institutional and technological levels.

VI. SUMMARY

The aim of this study was to explore the ethical considerations, regulatory challenges, and competency requirements associated with the educational use of generative artificial intelligence in Hungarian technical and higher education. Based on the empirical results, it appears that the use of generative AI is widespread among educators, yet the conditions for its application are significantly influenced by regulatory and ethical uncertainties. One of the most important findings of the study is that ethical attitudes in the sample can be considered homogeneous: neither demographic variables nor the frequency of technology use resulted in significant differences in the assessment of data protection, transparency, accountability, or plagiarism. This finding suggests that there is a unified, stable system of ethical norms among educators. The research also highlighted that the most significant barriers to the integration of generative AI are not technological, but rather institutional and regulatory in nature. Instructors clearly express a need for the development of clear and consistent regulatory frameworks, as well as for the development of competencies that support responsible use particularly information verification and data protection skills. The study's most significant contribution, however, is the recognition that educators' expectations go beyond ethical norms formulated at the individual level. The results clearly indicate a need for system-level ethical control mechanisms integrated into generative AI systems that can support transparent and responsible use. The sustainable integration of generative artificial intelligence into education can only be effectively achieved if institutional regulations, the technological environment, and teacher professional development are coordinated.

References

- [1] S. Bouguettaya, F. Pupo , M. Chen and G. Fortino, "A Meta-Survey of Generative AI in Education: Trends, Challenges, and Research Directions," *Big Data and Cognitive Computing*, vol. 9, no. 9, pp. 1-25, 2025.
- [2] I. M. García-López and L. Trujillo-Liñán, "Ethical and regulatory challenges of Generative AI in education: a systematic review," *Frontiers in Education* , vol. 10, no. 1565938, pp. 1-13, 2025.
- [3] A. A. Zaidy, "The Impact of Generative AI on Student Engagement and Ethics in Higher Education," *Journal of Information Technology, Cybersecurity, and Artificial Intelligence*, vol. 1, no. 1, pp. 30-38, 2024.
- [4] A. Dabis and C. Csáki , "AI and ethics: Investigating the first policy responses of higher education institutions to the challenge of generative AI," *Humanities and Social Sciences Communications*, vol. 11, no. 1, pp. 1-13, 2024.

- [5] B. Lund, R. N. Mannuru, A. Z. Teel, H. T. Lee, J. N. Ortega, S. Simmons and E. Ward, "Student Perceptions of AI-Assisted Writing and Academic Integrity: Ethical Concerns, Academic Misconduct, and Use of Generative AI in Higher Education," *AI in Education*, vol. 1, no. 1, pp. 1-13, 2025.
- [6] K. Bittle and O. El-Gayar, "Generative AI and Academic Integrity in Higher Education: A Systematic Review and Research Agenda," *Information*, vol. 16, no. 4, pp. 1-15, 2025.
- [7] C. K. Y. Chan, "Students' perceptions of 'AI-giarism': investigating changes," *Education and Information Technologies*, vol. 30, no. 6, p. 8087–8108, 2025.
- [8] S. Peterson, "Addressing student use of generative AI in schools and universities through academic integrity reporting," *Frontiers in Education*, vol. 10, no. 1610836, pp. 1-18, 2025.
- [9] S. Jayasinghe, K. A. A. Gamage, D. Yang, C. Cheng , C. Disanayake and D. U. Apeji, "Six Institutional Intervention Areas to Support Ethical and Effective Student Use of Generative AI in Higher Education: A Narrative Review," *Education Sciences*, vol. 16, no. 1, pp. 1-28, 2026.
- [10] J. W. Creswell, *Research design: Qualitative, Quantitative, and Mixed Methods Approaches*, California: SAGE Publications, 2009.
- [11] A. Bryman, *Social research methods*, Oxford: Oxford University Press, 2016.
- [12] J. Oranga and A. Matere , "Quantitative Research: Types, Advantages, Generalizability & Limitations," *Open Access Library Journal*, vol. 12, pp. 1-9, 2025.
- [13] I. M. I. Alfiras, Q. A. Emran and . A. M. Mohamed, "Ethics and governance of generative AI in education: a systematic review on responsible adoption," *Discover Education*, pp. 1-19, 2025.

5. Robust Estimation Methods for Cadastral Error Correction: A Theoretical Perspective

Bujdosó Márkó Dániel
Pest Vármegyei Kormányhivatal
Földhivatali Főosztály
bujdosomarko@protonmail.com

Katona János
Alba Regia Kar
Óbudai Egyetem
katona.janos@amk.uni-obuda.hu

Absztrakt – Cadastral databases frequently suffer from systematic geometric inconsistencies due to historical survey methods, heterogeneous data sources, and imperfect digital transformations. This paper presents a theoretical framework for the correction of cadastral errors using robust estimation techniques integrated with automated, block-contour-based adjustment models. The approach interprets block contours as geodetic constraints and combines them with robust statistical methods such as M-estimators and Random Sample Consensus (RANSAC). The study demonstrates that classical least squares adjustment is inadequate in error-contaminated environments and proposes hybrid estimation strategies better suited for heterogeneous cadastral datasets. The framework supports improved spatial consistency, enhanced data integrity, and compatibility with future automated land administration systems.

Keywords – cadastral database, correction, robust statistical methods

I. INTRODUCTION

Cadastral systems form the backbone of land administration, ensuring legal certainty in property rights and spatial data consistency. However, many national cadastral systems - particularly in Europe - are built on historical datasets accumulated over decades or even centuries. These datasets often combine graphical survey methods, numerical adjustments, and modern GNSS-based measurements, leading to structural heterogeneity within a single database.

In Hungary, this issue is particularly pronounced due to the digital transformation of analogue maps without complete geometric re-evaluation. The resulting digital cadastral map (DAT) integrates data of varying accuracy levels, creating systematic distortions such as translations, rotations, and scale discrepancies. These distortions are not purely random but often affect entire blocks or settlement areas, generating internal network tensions. [1] [2]

Internationally, similar challenges have been widely documented in the context of cadastral modernization and the ongoing digital transformation of land administration systems. Recent studies emphasize that improving the geometric consistency and reliability of cadastral datasets is essential for enabling interoperable spatial data infrastructures (SDIs), supporting evidence-based governance, and facilitating automated processing workflows within digital environments. [3]

The transition towards fully digital cadastre systems - often embedded within broader e-governance frameworks - has further intensified these requirements. Contemporary research highlights that modern land administration systems rely heavily on high-quality, consistent geospatial data to ensure system integrity, transparency, and efficient service delivery, particularly in automated and data-driven administrative processes. In this context, the emergence of electronic land administration platforms - such as the Hungarian E-ING system - illustrates the practical implications of this transformation, where the correctness and

consistency of cadastral data become critical prerequisites for the reliable operation of fully digital registration workflows. Traditional error correction practices have focused on localized, parcel-level adjustments. While effective in specific cases, these interventions frequently redistribute rather than eliminate errors, leading to increased system inconsistency. Consequently, there is a growing need for system-level approaches that address distortions at the block or network level. [4, 5]

At the same time, advances in computational methods have enabled the use of robust statistical techniques capable of handling noisy and heterogeneous datasets. These methods allow for more reliable parameter estimation in the presence of gross errors and systematic distortions. The objective of this paper is to provide a theoretical overview of robust estimation methods in cadastral error correction, with a specific focus on block-contour-based adjustment models and algorithm selection strategies. [6]

II. AUTOMATED BLOCK-CONTOUR-BASED ADJUSTMENT MODELS

Block-contour-based adjustment models represent a hybrid approach between full resurveying and traditional map correction. The core concept is to divide the cadastral map into blocks bounded by stable, physically identifiable features such as streets, public spaces, or permanent infrastructure elements. These block contours serve as geodetic constraints, meaning their coordinates are determined through high-precision modern surveying techniques such as GNSS or total station measurements. Once the contour is established, the internal parcel geometry is adjusted using parametric transformations. The most common models include Helmert transformation (handles translation, rotation, and scale) and Affine transformation (allows additional shear distortions).

The transformation aligns the entire block with the accurately measured contour while preserving its internal geometric structure. As a result, the method is capable of significantly reducing systematic distortions at the block level, while maintaining the relative configuration of parcels. From an operational perspective, it offers a considerable advantage over complete resurveying, as it requires substantially less fieldwork. Furthermore, its compatibility with modern data acquisition techniques - such as UAV-based surveying, LiDAR measurements, and photogrammetric workflows - makes it particularly suitable for integration into contemporary geospatial processing environments. An additional benefit lies in the preservation of the existing cadastral structure, which is often a critical requirement in legally sensitive land administration systems. [7]

Despite these advantages, the applicability of the method is subject to certain constraints. Its effectiveness strongly depends on the availability of stable and clearly identifiable contour features, which serve as the geometric reference framework for the adjustment. In areas where distortions are highly heterogeneous or exhibit complex spatial patterns, the method may yield suboptimal results unless the dataset is subdivided into smaller, more homogeneous units. Moreover, in cases where the underlying cadastral data are severely degraded or lack internal consistency, the approach may not provide sufficient correction, necessitating more comprehensive reconstruction strategies.

III. COMPARATIVE ANALYSIS OF ROBUST ESTIMATORS AND ALGORITHMS

The reliability of cadastral error correction methods fundamentally depends on the statistical model used for parameter estimation. In classical geodetic adjustment, the least squares (LS) method has long been considered the standard solution due to its optimality under ideal assumptions. However, cadastral datasets rarely meet these assumptions, as they are typically affected by historical inaccuracies, heterogeneous measurement techniques, and non-random distortions. This section provides a detailed comparative discussion of classical and robust estimation approaches, with particular emphasis on their applicability in cadastral adjustment.

The least squares method is based on the minimization of the sum of squared residuals, which implicitly assumes that measurement errors follow a normal distribution with zero mean and constant variance. Under these conditions, the LS estimator is unbiased and has minimum variance among all linear estimators, as defined by the Gauss–Markov theorem. In well-controlled geodetic networks, this assumption is often sufficiently satisfied. However, cadastral datasets present a fundamentally different context. The integration of analogue maps, digitized archives, and modern measurements introduces systematic deviations and gross errors that violate the Gaussian error model. [8]

A critical weakness of the least squares approach in such environments is its sensitivity to outliers. Since residuals are squared during optimization, large deviations disproportionately influence the solution. In practice, this results in what is often termed “error smearing,” where the effect of a few erroneous observations spreads across the entire network. Instead of clearly identifying problematic points, the adjustment redistributes inconsistencies, producing a geometrically smooth but physically inaccurate result. This phenomenon is closely related to the masking effect, where multiple outliers conceal each other’s presence, making it difficult to detect them using conventional statistical tests.

To overcome these limitations, robust statistical methods have been introduced. These approaches modify the estimation process in a way that reduces the influence of observations that deviate significantly from the assumed model. One of the most widely used classes of robust estimators is the family of M-estimators. In contrast to the quadratic loss function of least squares, M-estimators employ generalized loss functions that grow more slowly for large residuals. As a result, observations with excessive deviations contribute less to the final solution, effectively limiting their impact.

From a practical standpoint, M-estimators are typically implemented through the iteratively reweighted least squares (IRLS) procedure. In each iteration, residuals are evaluated, and weights are updated accordingly, gradually downweighting suspicious observations. The Huber estimator provides a particularly important example of this approach, combining quadratic behaviour for small residuals with linear growth beyond a threshold. This dual nature ensures that the estimator retains efficiency under near-Gaussian noise conditions while maintaining robustness in the presence of outliers. In cadastral applications, where error distributions often consist of a central Gaussian component with occasional large deviations, this balance is especially advantageous.

Despite their strengths, M-estimators assume that all observations belong to a single statistical population. This assumption is often violated in cadastral datasets, where multiple sources of data coexist, each with distinct accuracy characteristics. For example, historical

graphical data and modern GNSS measurements may be merged within the same dataset. In such cases, a single weighting scheme may not be sufficient to appropriately represent the underlying structure of the data. [9]

This limitation has led to the development of more advanced approaches such as M-split estimation. The key idea behind this method is to identify and separate different statistical populations within the dataset, allowing each to be modelled independently. Instead of forcing all observations into a single adjustment framework, M-split estimation partitions the data into multiple groups, each associated with its own parameter set or weighting scheme. This is particularly beneficial in cadastral contexts, where systematic shifts or distortions may differ between data subsets. By isolating these effects, M-split estimation reduces cross-contamination between datasets and improves the overall stability of the solution.

Another important class of robust methods is based on alternative norms, such as the L1-norm. Unlike least squares, which minimizes the sum of squared residuals, L1-based methods minimize the sum of absolute residuals. This change has a profound effect on robustness, as large residuals are no longer amplified quadratically. Consequently, the estimator becomes less sensitive to extreme values. However, the increased robustness comes at the cost of reduced statistical efficiency under ideal conditions and greater computational complexity. In addition, the lack of smoothness in the objective function can complicate numerical optimization.

A conceptually different strategy for dealing with outliers is embodied in the RANSAC (Random Sample Consensus) algorithm. Rather than modifying the weighting of observations, RANSAC fundamentally redefines the estimation process by focusing on the identification of a consistent subset of data points. The algorithm repeatedly selects minimal samples from the dataset, computes a candidate model, and then evaluates how many observations are compatible with that model within a predefined tolerance. The model with the largest consensus set is selected as the best representation of the data.

This approach offers a significant advantage in situations where the proportion of outliers is extremely high. While traditional robust estimators typically assume that the majority of observations are valid, RANSAC can tolerate cases where correct data points are actually in the minority. This property makes it particularly well suited for cadastral applications involving heavily distorted or poorly digitized maps. In such cases, the primary challenge is not fine-tuning a solution but identifying which observations are reliable in the first place.

However, the robustness of RANSAC comes with certain trade-offs. The method is inherently non-deterministic, meaning that repeated runs may produce slightly different results. Its performance also depends on the correct selection of parameters, such as the number of iterations and the inlier threshold. If these parameters are not properly tuned, the algorithm may either fail to identify a valid model or include too many erroneous observations in the consensus set. Furthermore, the computational cost increases with the size of the dataset and the complexity of the model.

In practical cadastral workflows, no single estimation method is universally optimal. Instead, the selection of an appropriate algorithm must be based on the characteristics of the dataset and the nature of the distortions present. When measurement errors are predominantly random and normally distributed, the least squares method remains an efficient and appropriate choice. In the presence of moderate contamination, M-estimators provide a balanced solution that

preserves statistical efficiency while improving robustness. For highly contaminated datasets, particularly those derived from historical digitization processes, RANSAC offers a powerful means of isolating reliable data before further refinement.

1. Table: Evaluation and Decision Matrix Based on Network Distortions

Distortion / Error Type	Recommended Method	Strengths	Weaknesses	Cadastral relevance
No outliers, pure Gaussian noise	Least Squares	Parametrically optimal, computationally efficient, widely used standard method	Highly sensitive even to a single gross error	Suitable for well-maintained and homogeneous datasets
Moderate number of outliers (statistical noise)	M-estimators (e.g. Huber)	Reduces the influence of outliers through weighting, yields stable estimates	Iterative, parameter-dependent, may converge to local minima	Applicable in cases with minor measurement or identification uncertainties
High error ratio (>50% outliers)	RANSAC	Robust against large amounts of gross errors, suitable for automated processing	Computationally intensive, non-deterministic results	Particularly useful for digitized data derived from distorted historical maps
Heterogeneous datasets (legacy + modern measurements)	M-split estimation	Capable of separating different statistical populations within the dataset	Mathematically complex, requires high redundancy	Suitable for hybrid datasets involving supplementary ("re-survey") measurements
Local geometric distortions (e.g. paper shrinkage)	Membrane models	Smooths local inconsistencies while preserving continuity	May introduce surface warping, does not eliminate individual gross errors	Applicable in georeferencing and alignment of historical maps

Increasingly, hybrid approaches are being adopted in which multiple methods are combined within a single workflow. A common strategy involves using RANSAC as a preprocessing step to identify a subset of consistent observations, followed by robust least squares adjustment to refine the parameter estimates. In more complex scenarios, M-split methods can be integrated to account for structural differences between data groups, while block-contour-based transformations provide the geometric framework for applying the correction at the system level (1. table).

From a theoretical perspective, the comparison of these methods highlights a fundamental trade-off between efficiency and robustness. Classical estimators achieve optimal performance under ideal conditions but degrade rapidly in the presence of outliers. Robust estimators sacrifice some efficiency to gain stability, while consensus-based methods prioritize data selection over parameter optimization. The challenge in cadastral error correction lies in balancing these aspects in a way that ensures both geometric accuracy and practical applicability.

Ultimately, the analysis demonstrates that robust estimation is not merely an optional enhancement but a necessary component of modern cadastral adjustment. The complexity and heterogeneity of cadastral datasets demand flexible and adaptive methods capable of dealing with imperfect data. When combined with appropriate geometric models, such as block-contour-based adjustment, these techniques provide a comprehensive framework for achieving reliable and consistent cadastral corrections.

IV. CONCLUSION

Cadastral error correction requires a paradigm shift from localized interventions toward integrated, system-level solutions. Block-contour-based adjustment models provide an efficient framework for addressing large-scale distortions without requiring complete resurveying.

Robust statistical methods are essential for ensuring reliable parameter estimation in the presence of heterogeneous and error-prone data. While classical least squares remain a cornerstone of geodetic adjustment, its limitations necessitate the adoption of more resilient approaches.

The combination of robust estimation techniques and block-level geometric modelling forms a powerful methodology capable of improving both spatial accuracy and system consistency. However, full automation remains limited by the complexity of cadastral datasets and the necessity of expert interpretation.

Future developments should focus on integrating these methods into automated cadastral workflows while preserving professional oversight and legal compliance.

V. SUMMARY

This paper presented a theoretical framework for the application of robust estimation methods in cadastral error correction. The analysis demonstrated that the combination of block-contour-based adjustment models and modern robust statistical techniques provides a viable solution for handling complex, heterogeneous datasets.

The study highlighted the importance of method selection based on data characteristics and emphasized the advantages of hybrid approaches combining RANSAC, M-estimators, and transformation models.

Ultimately, the implementation of these methods contributes to improved data integrity, enhanced reliability, and the successful transition toward automated land administration systems.

REFERENCES

- [11] Vincze L. (2009). Nagyméretarányú digitális térképeinkért, *Geodézia és Kartográfia*, 2009/09 (61. évf.), pp. 15-20. https://real-j.mtak.hu/18359/14/GeK_2009_9.pdf
- [12] Lehoczky M. – Tóth Z. (2022). Cadastral Map Update with Modern Technologies in Hungary, In: FIG - FIG (szerk.) *FIG Congress 2022 : 27. FIG Congress, Volunteering for the future - Geospatial excellence for a better living*, Warsaw, Lengyelország : International Federation of Surveyors (2022) pp. 1-10. Paper: 11459 , 10 p.
- [13] R. Bennett et al. (2022). *Digital Transformation of Land Administration: Stages, Status, and Solutions*, FIG Congress, 2022.
- [14] B. Uşak et al. (2024). Current Cadastral Trends - A Literature Review of the Last Decade, *Land*, vol. 13, 2024. <https://doi.org/10.3390/land13122100>
- [15] FAO, UNECE, FIG (2022). *Digital Transformation and Land Administration*, ISBN 978-92-5-136837-4, 98 p. <https://doi.org/10.4060/cc1908en>
- [16] Idris, K. A. (2024). The Implementation an Electronic Land Administration System Towards Sustainable Land Administration: Systematic Literature Review. 2024 IEEE 14th Symposium on Computer Applications & Industrial Electronics (ISCAIE) pp. 37-46. DOI: 10.1109/ISCAIE61308.2024.10576247
- [17] M. Batilović, R. Đurović, Z. Sušić, Ž. Kanović és Z. Cekić. (2022). Robust Estimation of Deformation from Observation Differences Using Some Evolutionary Optimisation Algorithms, *Sensors*, 1/22, 159 p.
- [18] J. Janicka és J. Rapiński (2014), „Outliers detection by RANSAC algorithm in the transformation of 2D coordinate frames,” *Boletim de Ciências Geodésicas*, pp. 610-625.
- [19] Y. Ling, Y. Wang és T. O. Chan (2024) „RANSAC-Based Planar Point Cloud Segmentation Enhanced by Normal Vector and Maximum Principal Curvature Clustering,” *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, pp. 145-151.

6. Cost-effective 3D condominium cadastre using open-source software

Anna Szabó
Alba Regia Faculty
Óbuda University
pappannaeva19@gmail.com

Timea Bekk
Alba Regia Faculty
Óbuda University
bekk.timea@amk.uni-obuda.hu

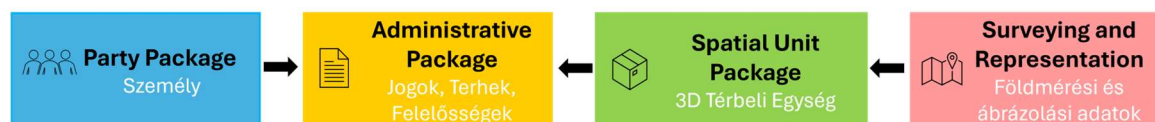
Abstract – Due to modern urbanization, increasing city development, and complex architectural solutions, the currently valid 2D cadastre can no longer be maintained in the long term. The lack of vertical articulation arises in several aspects: special spanning systems and underground garage properties created at varying depths and shapes cannot be mapped in the current registry. The idea of implementing the procedure detailed in this article arose in connection with the currently ongoing digitization of the cadastral system in Hungary, which requires significant financial investment. The goal is to create a 3D spatial model based on international guidelines using free software currently available on the market. The geometric construction was performed using QGIS geographic information system software. The database structure was implemented based on the international ISO standard (LADM) using the license-free MS SQL Express database management software. The two software applications and their associated plugins not only provide spatial visualization but also ensure interoperability and immediate data exchange.

Keywords – *QGIS, SQL, spatial visualization, relational database, 3D cadastre, condominium*

I. INTRODUCTION

Although the 2D cadastre served societal needs for nearly a century and a half, with the emergence of joint ownership forms from the 1930s and the subsequent massive spread of urbanization, it has proven to be insufficient [1]. The need to transform the 2D registry arose due to today's complex architectural solutions, the increasingly difficult transparency of utility network junctions, and the widespread use of subterranean space. The current system only maps the planar cross-section of buildings above the ground surface. As a result, vertically articulated properties cannot be separated: underground parts, bridges, and property segments extending beyond the building foundation cannot be represented in the traditional real estate registration system either.

Prior to the research, investigating the international literature background is essential. The ISO 19152 (LADM - Land Administration Domain Model) standard provides international guidance for countries [2]. It is not a ready-made system or software, but a unified conceptual viewpoint that provides a framework for the development of 3D registries. The standard divides the data into 4 main packages (4. Figure).



4. Figure Basic logical model of LADM (ISO 19152)

When linking data, parties (persons) and spatial units are never directly connected to each other. These data are linked by the administrative package. This contains the various ownership

types, encumbrances, and rights. For the spatial unit, surveying and representation data always provide the authoritative data as a spatial basis.

Individual countries are currently at different stages of development due to their varying levels of advancement. In the Netherlands, a 3D real estate registry has been in operation since 2016 [3]. In several regions of China, the full integration of GIS and BIM data has already been achieved [4]. Singapore [5] defines land parcel boundaries not as lines, but as spatial prisms. In Canada [6], specifying spatial volume and elevation data is mandatory under the law for multi-story buildings. Croatia [7], and Slovenia [8] have started developing LADM-based 3D real estate registries in the past few years.

In light of the problems and international efforts outlined above, the proposed methodology detailed below aims to develop a cost-effective procedure for visualizing spatial data. The developed methodology does not aim to rebuild the national database, but rather to create a completely free 3D spatial model that is accessible and preparable for a wide user audience, supported by currently applicable software.

II. APPLIED SOFTWARE AND TECHNOLOGIES

Currently, in Hungary, the complete digitization of the real estate registry is taking place in several stages with state funding [9]. The establishment of the 3D real estate registry will be the final, technologically more complex step of the entire process. Given that the development of such a system requires a significant national budget, it was a conscious decision to develop a free solution. The goal is to present a methodology that proves that license-free software tools are also capable of serving the complex demands posed by the 3D cadastre. There are many software products on the market capable of handling both data and spatial geometric shapes, but they require licensing fees. When designing the procedure, it became clear that the implementation could not be achieved with a single software application (5. Figure).

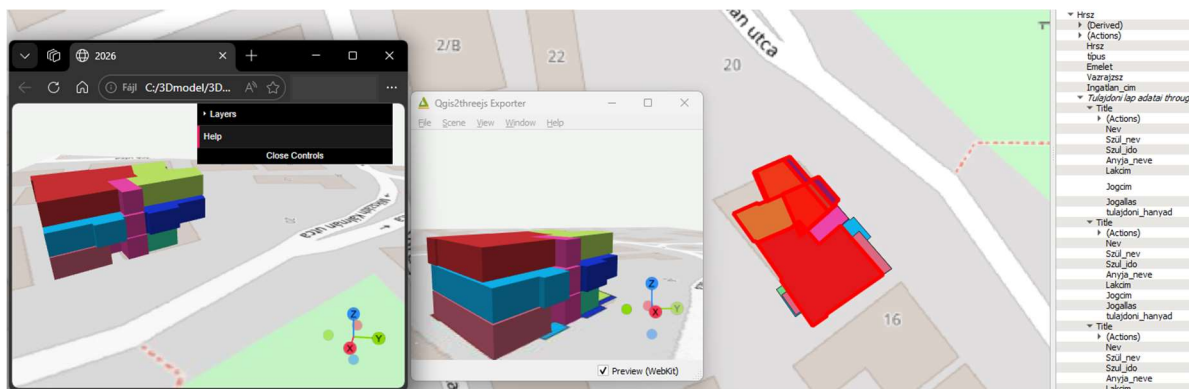


5. Figure The software ecosystem

The choice of software was also greatly influenced by the importance of establishing a connection between the database management software and the geographic information system software. When defining the target software, a key consideration was interoperability, meaning that handling various types of file formats should also be supported. Therefore, a geographic information system software had to be chosen that is capable of both processing *.dxf extension data and providing a stable data transfer connection with the database management system.

The spatial geometry was created in the QGIS 3.44.3 Solothurn geographic information system software [10]. The software is capable of executing various geometric algorithms. It has numerous plugins and can be easily connected with other programs. It is open-source, and therefore under continuous community development. The program handles various projection systems at a professional level, which in our country is the EOVS (Unified National Projection System) (EPSG:23700).

The software played a crucial role in the data normalization of the scanned data. With the help of built-in algorithms, creating the topology and extruding the spatial solids made it possible to create a 3D body from a 2D sketch. The program ensures the visual differentiation of the formed, separable spatial units by adjusting the display options of the layer properties. The GIS software itself is not capable of a form of 3D visual representation that treats separated building parts and their associated data as distinct units. Therefore, the use of the Qgis2threejs 2.8 plugin [11] is essential for the successful outcome of the procedure. This plugin not only provides visual representation but also allows the display of user-preset data assigned to the separated units. Through the simplified web interoperability provided by the plugin, certain data can also be displayed to other users without installing the plugin or the GIS software. The data assigned to the formed, separable units can be displayed interactively. This final result could be achieved using unique identifiers (topographical numbers). By clicking on the building part, ownership and proprietor data are automatically displayed. In the case of configured web data transmission, the model with predetermined personal data or building information can be easily shared (6. Figure).

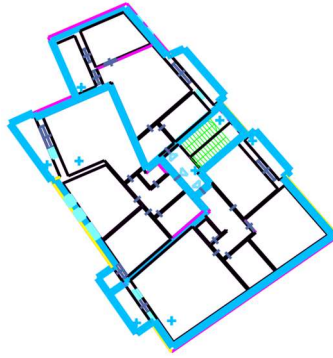


6. Figure 3D model visualization options

The management of the data structure and the execution of logical operations on the data were performed with the Microsoft SQL Express database management software [12]. The software is freely accessible to anyone and provides real-time data interoperability for client applications, which is essential for the dynamic data updating and interactive querying of the created model. It ensures the execution of logical operations on data using SQL queries. The designed database was based on the previously detailed LADM standard. The 1:N (one-to-many) type database relation applied during the procedure allows multiple owners and their different ownership shares to be assigned to a given property. With the help of queries, sorting, filtering, analyzing, and modifying the stored data can be performed flexibly, thereby providing a stable foundation and a wide range of functional possibilities for the user.

III. GEOMETRIC IMPLEMENTATION OF THE 3D MODEL

The construction of the 3D model began with setting the correct projection system in the GIS software, which is necessary for further work. In Hungary, the EOJ (EPSG:23700) projection system is in effect. This ensures that the resulting model can later be integrated with any national database. Following the specification of the coordinate system, the transformation of boundaries followed. The source of the model was provided by a currently valid sketch required for condominium establishment in *.dxf format (7. Figure) [13].



7. Figure Data preparation - after importing the raw file

The file contains various information, but for the implementation of the model, it is advisable to filter out the boundary lines of the residential units. The system cannot assign data and elevation data to lines, so they must be converted into polygons [14]. By running the built-in algorithms, 2D closed surface elements were created.

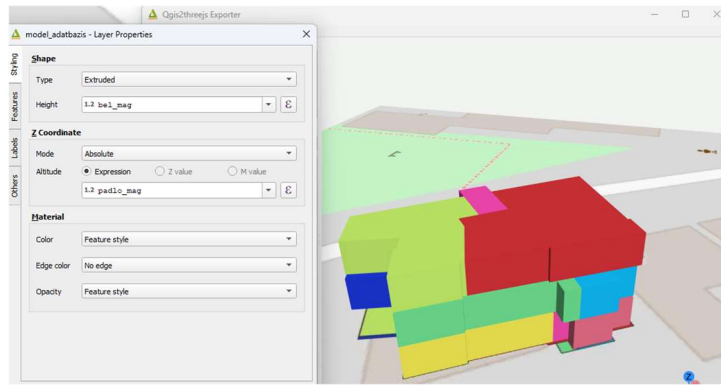
Recording the authentic elevation data read from the sketch is a fundamental condition for creating the spatial model. Unique identifiers help in creating the database connection and in differentiating the separate units. Consequently, these serve as the initial indispensable basic data. The generation of vertical subdivision was implemented using the Qgis2threejs plugin.

For this, the internal height and the floor level height are crucial attribute data; with their help, not just a spatial visual element, but a 3D unit is created due to the display capabilities of the linked data. Therefore, it is necessary to store this in the GIS software's database (8. Figure).

	Hrsz ▼	padlo_mag	bel_mag
1	37663/A/8	5.80	2.75
2	37663/A/7	5.80	2.75
3	37663/A/6	2.87	2.75
4	37663/A/5	2.87	2.75
5	37663/A/4	2.87	2.75
6	37663/A/3	0	2.75
7	37663/A/2	0	2.75
8	37663/A/11	5.80	2.75

8. Figure Attribute table in QGIS

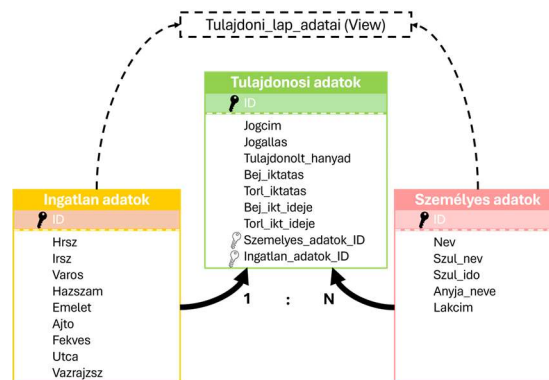
The model can be colored arbitrarily based on unique data using a color scale, which facilitates easier comprehension. With this, the separability of legal relationships and the overcoming of their physical display limitations were achieved (9. Figure).



9. Figure Spatial extrusion

IV. DATABASE INTEGRATION AND ATTRIBUTE MANAGEMENT

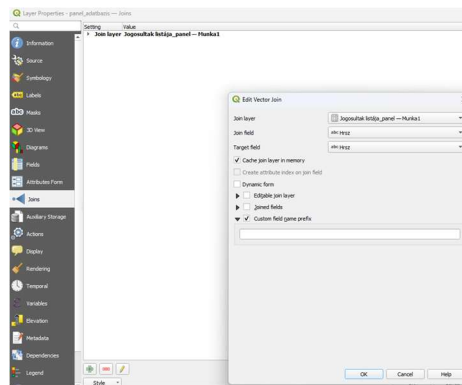
The goal was to build what is contained in the international standard. One of its main principles is that it requires data normalization. The system stores all data once, referring to it multiple times if necessary, thereby avoiding data redundancy and minimizing human errors and the extent of maintenance. In practice, this means that in the event of a change in personal data, the person's data only needs to be modified in the person table, but the data will be updated across all properties assigned to them. Relational databases implement this with a one-to-many (1:N) data relationship. If necessary, the relations can later be expanded with many-to-many (N:N) type connections. To achieve this, the tables had to be linked using unique identifiers. Designing the data relationship to be displayed is straightforward: multiple rights/encumbrances are connected to each topographical number, which the owners possess over the given spatial geometry. Therefore, the primary key is the topographical number. Three tables were defined in the database management software [15]. Logical calculations between the attributes of the tables are computed by a View. This also reduces the runtime and performance demand of the GIS software (10. Figure).



10. Figure Database structure

The attributes in the data table can be easily modified, deleted, and new records can be easily registered. SQL can store not only text or number formats but also special data (dates), for which the software performs error handling during entry and querying. The file paths of the documents belonging to the data body can also be stored in text fields, which the QGIS program can use to display them. If there is a live folder share on the given folder, it can even open them from another computer. With this function, the configured documents become immediately accessible. The relational data connection established between the SQL and QGIS programs

provides unrestricted data interoperability after the appropriate configuration parametrization (11. Figure).



11. Figure Setting up the data connection

Data modifications are updated in real-time. Interactive data queries within the GIS program provide an immediate response.

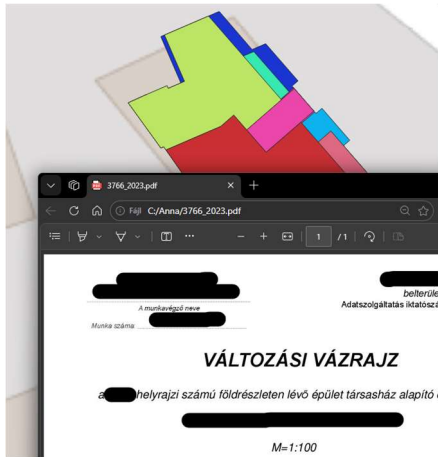
V. RESULTS: INTERACTIVE QUERYING AND GRAPHIC DISPLAY

As the final result of the procedure, a complex, interactive spatial model was created. This proved that a real-time, interactive model capable of handling multiple owners is achievable even in a completely free environment. The elements of the model can be separated visually and geometrically from each other. The data connected to the spatial geometry using primary keys can be interactively queried.

To do this, it is necessary to use the "Identify Features" function found on QGIS's native toolbar [16]. During data visualization, the personal and property data set by the user are displayed. Thus achieving a completely independent, parent-child data relationship display that can be broken down into residential units.

The display of data connected to the spatial model is not manual. The database manager provides the data in real-time. In the event of a data change or a new record, the change is applied immediately. The 3D spatial view is achieved by specifying the indispensable floor and internal heights during extrusion.

The logical operation on the data is performed by the View. This helps the faster operation of the GIS system. Beyond graphic visualization, the objective was the creation of a dynamic document management and data display panel ("Map Tips"). Under layer properties, after writing HTML code, it is possible to access the parameters stored in the SQL database. By hovering the cursor over the map object, an information box pops up that provides not only the topographical number but also one-click access to the endorsed sketches. The code recognizes two types of file extensions: *.pdf and *.jpeg. In the case of a PDF format, a white text box appears, with an interactive text box in the middle (12. Figure). By clicking on the box, the stored endorsed sketch appears in the web browser. In the case of a JPEG format, the image appears immediately next to the spatial model (13. Figure).



12. Figure Document display for *.pdf



13. Figure Document display for *.jpeg

Using the Qgis2threejs plugin, the web interface can be shared with anyone. It allows the model and its associated, pre-defined restricted data to be accessible to anyone via any smart device. For the display, neither the GIS software nor the database manager needs to be installed. For this purpose, a QR code can also be generated, and the model can be shared through it; there is no need for a URL address (14. Figure).



14. Figure QR code for accessing the model with reduced data content

With the entirety of these functions, it can be achieved that the model is not merely a visual spectacle, but a full-fledged information system capable of accelerating administration and querying.

VI. SUMMARY

In Hungary, the massive transformation of the 2D real estate registry (EING) is currently underway, utilizing significant financial resources. Although the planned transformation promises a significant change, it is still unable to spatially interpret and differentiate built-up, vertically articulated properties.

The procedure described in the article demonstrates, in a completely free environment, how a modern 3D cadastral model can be implemented using open-source software already available on the market. The resulting model can be used not only for visual display. With its help, the separate units and their attached data can be queried interactively and dynamically.

The model was created using real data, thereby proving its authenticity. The resulting final product is professional and license-free. The implementation of the procedure required the use of several open-source software applications. The construction of the spatial model was carried out in the QGIS geographic information system software, which, in addition to built-in algorithms, can be flexibly customized by installing various plugins. Its ability to handle

multiple file formats was an advantage when choosing it, thereby ensuring long-term usability and interoperability.

The structured storage of data was implemented with the MS SQL Express software. Interoperability between the two systems and the 1:N (one-to-many) data relationship were achieved by configuring primary keys. A real-time data connection was established between the database and the software, which ensures the immediate display of data changes when querying the model.

The procedure detailed in the article clearly proves that, even considering professional and financial difficulties, there exists an already available free alternative that is acceptable as a starting point. These software tools also hold their ground in a multi-user environment: they can efficiently separate, manage, and interpret complex linked data systems.

REFERENCES

- [1] „1924. évi XII. törvénycikk,” [Online]. Available: <https://net.jogtar.hu/ezer-ev-torveny?docid=92400012.TV&searchUrl=/ezer-ev-torvenyei%3Fpagenum%3D39>.
- [2] R. T. P. v. O. Christiaan Lemmen, „ISO 19152:2012, Land Administration - An internal 2D and 3D Representation Standard,” [Online]. Available: https://www.fig.net/resources/articles_about_fig/geoinformatics/2013_08_geoinformatics.pdf.
- [3] H. P. R. R. E. v. d. R. F. B. H. L. Jantien Stoter, „First 3D Cadastral Registration of Multi-level Ownerships Rights in,” [Online]. Available: https://repository.tudelft.nl/file/File_642e9891-0dae-4324-828a-4ec27a2e1a96?preview=1.
- [4] C.-b. Y. Chen Wang, „Design, Development and Applicability Evaluation of a Digital Cartographic Model for 3D Cadastre Mapping in China,” 2021. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2220-9964/10/3/158>.
- [5] K. H. S. V. H. S. K. Kho, „CITYGML MODELLING FOR SINGAPORE 3D NATIONAL MAPPING,” [Online]. Available: <https://isprs-archives.copernicus.org/articles/XLII-4-W7/37/2017/isprs-archives-XLII-4-W7-37-2017.pdf>.
- [6] T. R. G. F.-A. J. D. Jacynthe Pouliot, „3D Cadastre in the Province of Quebec: A First,” [Online]. Available: <https://telematika.kstu.kg/server/books/ger/geoinformation/9.pdf>.
- [7] M. M. M. R. S. V. N. Vučić, „TOWARDS A CROATIAN 3D CADASTRE BASED ON THE LADM,” [Online]. Available: https://gdmc.nl/3DCadastres//literature/3Dcad_2017_14.pdf.
- [8] E. P. A. K. A. L. Jernej TEKAVEC, „Towards 3D-Real Property Cadastre in Slovenia,” [Online]. Available: https://www.oicrf.org/documents/40950/0/o_3D_CAD_2021_paper_5+%281%29.pdf/2cf6d0f8-88d8-d398-33e9-2db0edd220c5?t=1726149697867.

- [9] Lechner Nonprofit Kft., „E-ingatlan-nyilvántartás,” [Online]. Available: <https://lechnerkozpont.hu/oldal/e-ingatlan-nyilvantartas>.
- [10] QGIS project, „QGIS felhasználói kézikönyv,” [Online]. Available: https://docs.qgis.org/3.44/hu/docs/user_manual/index.html.
- [11] M. Akagi, „Qgis2threejs Plugin Documentation,” 2014. [Online]. Available: <https://minorua.github.io/Qgis2threejs/docs/2.10/>.
- [12] Microsoft 2026, „Mi az SQL Server,” [Online]. Available: <https://learn.microsoft.com/hu-hu/sql/sql-server/what-is-sql-server?view=sql-server-ver17>.
- [13] QGIS project, „11.1.3.4. Importing a DXF or DWG file,” 2026. [Online]. Available: https://docs.qgis.org/3.44/en/docs/user_manual/managing_data_source/opening_data.html#importing-a-dxf-or-dwg-file.
- [14] QGIS project, „24.2.2. Raster conversion,” 2026. [Online]. Available: https://docs.qgis.org/3.44/en/docs/user_manual/processing_algs/gdal/rasterconversion.html.
- [15] Microsoft 2026, „FileTables (SQL Server),” 2026. [Online]. Available: <https://learn.microsoft.com/en-us/sql/relational-databases/blob/filetables-sql-server?view=sql-server-ver17>.
- [16] QGIS project, „12.1.12.3. Using Actions,” 2026. [Online]. Available: https://docs.qgis.org/3.44/en/docs/user_manual/working_with_vector/vector_properties.html#actions-properties.

7. DETERMINATION OF THE VOLUME OF WOOL-SACK CAVES

TARSOLY PÉTER

Óbuda University, Alba Regia Faculty
Institute of Geoinformatics
8000, Székesfehérvár, Pirosalma u. 1-3., tarsoly.peter@amk.uni-obuda.hu

Abstract: The small-size caves disposed also with a specific and unique microclimate, which differs from the climate of the surrounding environment. The microclimate parameters of the small-size caves linked strongly from the changes of the outer climate. The relationship between the cave and the environment can be understand through the volume of the cave and the air flow between the cave and the environment. The knowing of these parameters is very important for modelling in different dates the temperature and humidity of a cave, and the ventilation between the cave and the environment. When there is unique cross-section characterized parts of the caves, then based on the method of orthogonal surveying, the shape of the cave-parts can be modelled with polynoms. Using the definite integral the area of the cross-section can be calculated, and knowing the length of the unique cross-section characterized parts of the caves the volume can be determinate. In my investigation I determinate the volume of two wool-sack caves, the quantity of the ventilation between the caves and the environment in summer and winter season, too, and the duration of the complete ventilation. Based on the investigations I modified the bio- and microclimatological model of the wool-sack caves in the Fodor and Gressel cave climatological systems.

INTRODUCTION

Perhaps cave climatology is the only field of speleology in Hungary on which a comprehensive textbook has been published, written by *István Fodor* in 1981, yet it can be said that in terms of its laws, it is one of the least known areas of expertise. This is especially true for caves in non-karstic rock in Hungary, which have always attracted fewer enthusiasts and researchers (*ESZTERHÁS*, 1994a, 2001, 2002; *TARSOLY*, 2013). In our important, large caves occurring in the karst rock mass of our low mountain ranges, regular observations have been carried out for a long time to map the microclimate and determine the relationship between the cave and surface climate. However, small caves and cave-like objects can also have their own specific microclimate; no one has yet conducted in-depth research into this, particularly the microclimate of small caves in non-karst rock. Of course, microclimates with the same characteristics as those found in caves 50-100 meters deep cannot develop in small caves, but there is no doubt that our small caves "breathe," are characterized by climate parameters that differ from their surroundings, and their characteristics are related to changes in the external environment. The relationship between the cave and its environment can only be understood if we can determine the amount of air "stored" in the cave and the rate of air flow, because knowledge of these parameters is key to modelling the temperature and humidity of caves and air exchange with the external environment. Knowledge of these parameters is particularly

important in the case of caves used for tourism or medical purposes. The methods known from classical geodesy (e.g., formation of trapezoidal prisms) cannot be used with sufficient accuracy to determine the volume of caves due to the irregular cross-section of cave passages. The optimal solution is to use a laser scanner, because in this case the volume can be easily determined from the resulting 3D point cloud. However, scanning is expensive and can only be used in a limited number of caves due to the size and fragility of the scanners and their sensitivity to cave environmental factors (e.g., mud, dripping water, etc.). In my research, I investigated how the volume of caves can be determined using a definite integral based on measurement results obtained from simple measurement methods that can be used in all caves. Another objective was to refine the bio- and microclimatological model of wool sack caves based on the results obtained.

THE CONCEPT AND APPLICATION OF DEFINITE INTEGRALS IN AREA CALCULATION

Let $y=f(x)$ be a function that is defined everywhere on the closed interval $[a, b]$. The definite integral of the function $y=f(x)$ from a to b is called the following number (BÁRCZY, 1971):

$$\int_a^b f(x)dx = \lim_{\substack{\Delta x_i \rightarrow 0 \\ n \rightarrow \infty}} \sum_{i=1}^n f(\xi_i)\Delta x_i \quad (1)$$

where Δx_i is the length of the i -th subinterval of the closed interval $[a, b]$, and $f(\xi_i)$ is the function value corresponding to any point in the i -th interval. We must form the limit of the sum in such a way that we increase the number of division points of the interval so that the length of each subinterval tends to zero. If the limit exists, then the function $y=f(x)$ is integrable on the closed interval from a to b . The definite integral can be easily calculated using the Newton-Leibniz formula:

$$\int_a^b f(x)dx = F(b) - F(a) = [F(x)]_a^b \quad (2)$$

where $F(x)$ is any primitive function of $f(x)$, and the substitution value of the function in square brackets at point b must be subtracted from the substitution value at point a . The calculation of the definite integral therefore consists of two tasks: finding a primitive function of the integrand, then forming the difference between the substitution values of the upper and lower limits. It follows from the geometric interpretation of the integral that if f is bounded and integrable on the interval $[a, b]$, and if $f(x) \geq 0$, then $\int_a^b f(x)dx$ represents the measure of the area of the plane figure bounded by the graph of f , the lines $x = a$ and $x = b$, and the x -axis, provided that $f(x) \leq 0$ ($x \in [a, b]$), then $-f(x) \geq 0$ and thus (CSABINA, 2010):

$$\int_a^b -f(x)dx = -\int_a^b f(x)dx \geq 0, \text{ azaz } \int_a^b f(x)dx \leq 0 \quad (3)$$

The definite integral also provides a way to determine areas enclosed by curves, which is important for determining the volume of caves. The area enclosed by $y = f(x)$ and $y = g(x)$, $x = a$, $x = b$, if $f(x) > g(x) > 0$ (CSABINA, 2010):

$$T = \int_a^b f(x)dx - \int_a^b g(x)dx = \int_a^b [f(x) - g(x)]dx \quad (4)$$

This formula also applies if $f(x)$ and $g(x)$ take negative values on the interval.

TEST MATERIAL AND METHOD

I investigated the applicability of definite integrals in volume estimation through two caves, or cave-like formations, in the Velence Hills. Both the Zsivány Cave (4510-2) and the Gömb-kő Cave (4510-503) are located within the Pákozdi Ingókövek Nature Reserve. Both cavities are wool-sack caves formed in granite porphyry; they developed between large, rounded granite blocks as a result of weathering and fragmentation (ESZTERHÁS, 1994b, 2006; TARSOLY, 2013). During the survey, I applied rectangular coordinate measurement. I divided the caves into sections characterized by uniform cross-sections and determined their lengths, which functioned as the height of the bodies in the volume calculations. I established a horizontal baseline between the two cave walls along the centerline of the cross-sections—or in the most practical position for measurement. This baseline was physically represented by a pocket leveling rod with centimeter graduations. The measurement line essentially defined a local rectangular coordinate system, where the origin was the left wall of the cave and the endpoint was the right wall. Consequently, only positive values occurred when determining the abscissa values. Using these abscissa and ordinate values, I recorded the significant points of the cave ceiling and the floor level for the purpose of cross-sectional modelling; points on the ceiling were assigned positive ordinates, while points on the floor were assigned negative ordinates. In the case of complex cross-sections, I occasionally divided the section into several parts using one or more fictitious horizontal lines, determining the points describing the top and bottom of the sections separately for each part. In such instances, the aggregate area of these parts provided the total area of the cross-section, and the volume could only be calculated after merging the volumes of the individual segments. Whenever it was not possible to isolate a section with a uniform cross-section—for example, due to the gradient of the floor or the ceiling—I defined a separate cross-section at both the beginning and the end of the section with a constant slope. I calculated the volume of the passage segment based on both the smaller and the larger cross-sections, then determined the difference between the two. I adjusted the volume calculated from the smaller cross-section by adding half of this difference, accepting this as the final volume of the passage (averaging technique). Provided that the sloped sections are short,

this represents an acceptable approximation for practical purposes, which I have proven based on the formula for the volume of a frustum (LATKA, 1980):

$$V = \frac{m \cdot (T + \sqrt{T \cdot t} + t)}{3} \quad (6)$$

where m is the height of the frustum, T is the area of the base, and t is the area of the top surface. The volume of a cave passage can essentially be defined as a frustum, where T represents the area of the larger cross-section and t the area of the smaller one. My fundamental hypothesis was that the difference between the actual volume and the volume calculated using the averaging technique from the cross-sections must not exceed 1%. Based on the investigations, it was found that the length of the passage (the height of the frustum) has no significant effect on the volume discrepancy, provided that the $t:T$ ratio does not exceed 1:1.6. Therefore, the sole limiting factor is the ratio between the areas of the smaller and larger cross-sections. Since the areas of the cross-sections cannot be calculated directly in the field, their ratio can only be inferred. If the ratio of the measurement lines and ordinates in the smaller and larger cross-sections remains below 1:1.6, the averaging technique indeed provides a suitable approximation.

I fitted polynomials of various degrees to the series of points defined by the measured rectangular coordinates (Fig. 1) and then calculated the area between the polynomials describing the ceiling and the floor using definite integrals within the *MathCad Professional* software package. By multiplying the cross-sectional area by the passage length, the volume of individual sections could be determined; the total volume of the cave was then calculated by summing these sectional volumes.

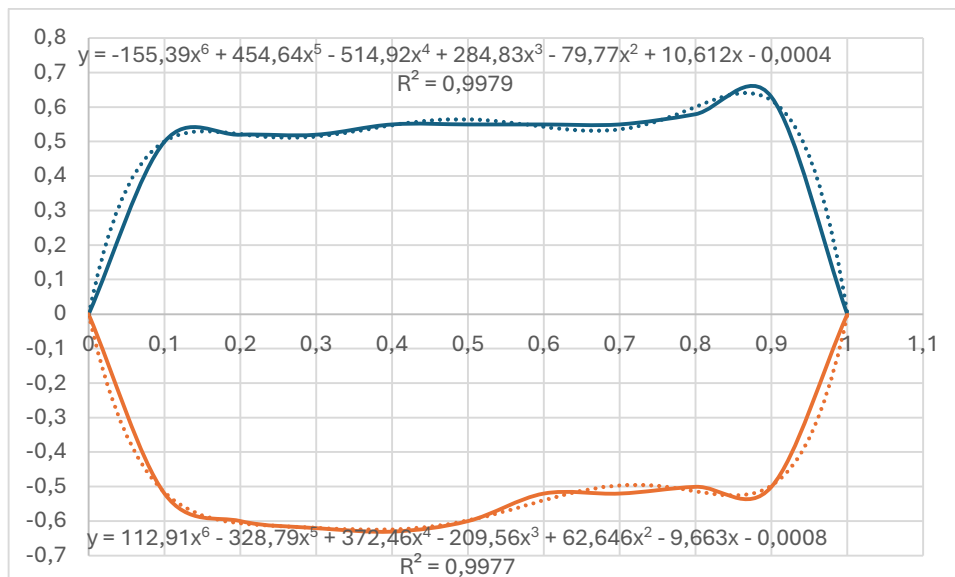


Fig.1. The third cross-section of the Zsivány-cave (thick line), the fitted six-degree polynomial (broken line), the equation of the polynomial and the determinate coefficient

I used the following equations to calculate the air exchange between the cave and the surface (LOSONCI, 2010):

$$Q = K \cdot A \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \Delta h \cdot \frac{T_i - T_0}{T_i}}, \text{ ha } T_i > T_0$$

$$Q = K \cdot A \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \Delta h \cdot \frac{T_0 - T_i}{T_0}}, \text{ ha } T_0 > T_i \quad (5)$$

where

Q = air flow rate in m^3/s ,

A = surface area of the entrances in m^2 ,

K = surface air pressure coefficient, typically 0.65,

g = gravitational acceleration, $9.81 m/s^2$,

Δh = vertical extent (or relief) in meters,

T_i = average internal temperature in Kelvins,

T_o = outside air temperature in Kelvins.

Between December 2010 and December 2012, I conducted microclimatological measurements and synchronous measurements at a total of seven wool-sack caves (TARSOLY, 2013). Since wool-sack caves are small-scale and maintain contact with the outdoors through two or more openings, they are directly linked to atmospheric air pressure, temperature, and flow conditions. Consequently, air exchange with the surface—specifically the presence of advective air currents—is a determining factor throughout all seasons of the year.

To apply Formula 5, it is necessary to know the difference between the average internal and external temperatures; based on our investigations, the calculated value over 12 months for wool-sack caves is $0.7 \text{ }^\circ\text{C}$ (TARSOLY, 2013).

RESULTS

In the case of Gömb-kő Cave, it was necessary to record cross-sections at two locations, which also serve as the cave entrances. I fitted a fifth-degree polynomial to the main entrance, resulting in a coefficient of determination of 92%. For the side entrance, a sixth-degree polynomial was fitted, yielding a coefficient of determination of 98%.

Regarding Zsivány Cave, I had to define eight cross-sections; with two exceptions modelled using fifth-degree polynomials, the remainder were fitted with sixth-degree polynomials. In one instance, the coefficient of determination was 59%, while in all other cases, it ranged between

90% and 99%. The 59% fit was due to the irregularity of the entrance in question. A potential solution would have been the segmentation of the cross-section and fitting third-degree (spline) polynomials to each segment; however, since the perpendicular deviation between the polynomial and the actual cross-section never exceeded 2.0 cm, I accepted this lower-reliability polynomial.

Table 1 summarizes the calculated entrance areas, passage volumes, and air flow rates for the caves during the winter and summer periods. For the calculations, I adopted the average winter and summer temperatures measured at the surface and inside Gömb-kő Cave and Zsivány Cave in February and June 2012 (*TARSOLY*, 2013). The average passage height was derived by averaging the ordinate values measured within the cross-sections.

Table1. Are, volume and ventilation data of the Zsivány-, and Gömb-kő-caves

Name	Entrance area [m ²]	Volume [m ³]	Air flow [m ³ /s] T _i >T ₀ (winter)	Complete air exchange [s]	Air floe[m ³ /s] T ₀ >T _i (summer)	Complete air exchange [s]
Gömb-kő Cave	2.2615	2.507767	0.270308	9	0.259343	10
Zsivány Cave	3.9488	8.081553	0.350731	23	0.336503	24

Analysing the data in *Table 1*, it can be concluded that the investigated wool-sack caves possess a large entrance surface area relative to their short length and small passage volume; consequently, the rate of air exchange with the external environment is intensive in both winter and summer. There is no significant difference between the duration of total air exchange in winter versus summer. In the case of Gömb-kő Cave, approximately six total air exchanges occur per minute, while for Zsivány Cave, the rate is two.

The above data support the findings established between 2010 and 2012 regarding the bioclimatological and microclimatological models of wool-sack caves. Primarily, wool-sack caves are perceived as "cool-feeling" caves; however, when examining their annual cycle, there are extended periods when they can be classified as "comfortable." For a shorter duration (during any summer month), these caves fall into the category of "warm-feeling" caves, while for a very brief period (during any winter month), they are characterized as "cold-feeling" caves.

The wool-sack caves can only be partially integrated into the climatic cave type models defined by *FODOR* (1981). Within this system, wool-sack caves belong to the "cool-feeling" dynamic cave types; however, I have modified the parameters established by *FODOR* for wool-sack caves based on the investigations conducted between 2010–2012 and in the year 2016 (*Table 2*).

Table 2. The climate model of the wool-sack caves

<i>Climatic cave type – caves that create a feeling of coolness</i>						
<i>Wool-sack caves</i>	<i>Bradtké index annual average</i>	<i>Based on the cave's morphostructure and airflow system</i>	<i>Annual average air temperature [°C]</i>	<i>Relative humidity [%]</i>	<i>Water vapor pressure [mbar]</i>	<i>Complete air exchange [s]</i>
	<i>B~2.1</i>	<i>dynamic</i>	$x_t = 1.1-12.0$ $\sigma_d > 1.5$	$x_u = 60-80$	$x_e \leq 15.0$ $\sigma_d > 1.0$	$t < 30 s$

Based on our research, wool-sack caves are classified as dynamic caves within the classification system of GRESSEL (1958). Since wool-sack caves are connected to the outside world via two or more openings, they are in direct contact with atmospheric air pressure, temperature, and flow conditions; consequently, air exchange with the surface is a determining factor throughout all seasons of the year.

In winter - with the exception of extreme warming events - wool-sack caves behave as purely dynamic caves, where $t_{\text{surface}} < t_{\text{cave}}$. In summer, however - disregarding days with extreme weather - $t_{\text{surface}} > t_{\text{cave}}$, which leads to the observation of static elements in the caves' behavior (where the cave ventilates predominantly through a single entrance).

SUMMARY

Small caves and cave-like objects can possess a distinct, unique microclimate. These small-scale caves are characterized by climate parameters that differ from their surroundings, yet their properties are strongly correlated with external environmental changes. The relationship between a cave and its environment can only be understood if we can determine the volume of air "stored" within the cave and the rate of air flow, as knowledge of these parameters is crucial for modelling the cave's temperature, humidity, and air exchange with the external environment.

During my research, I established that if passage segments characterized by uniform cross-sections can be isolated within a cave, the passages can be modelled using polynomials of various degrees based on rectangular coordinate measurements. From these models, the area can be derived using definite integrals, and the volume can be calculated by incorporating the passage length. Based on the microclimatological parameters of wool-sack caves, I determined the characteristic air flow rates and the duration required for total air exchange for both the Gömb-kő Cave and the Zsivány Cave during winter and summer periods. Based on investigations conducted between 2010–2012 and in 2016, I modified the bioclimatological and

microclimatological models defined for wool-sack caves, effectively integrating them into the *Fodor* and *Gressel* cave-climatological classification systems.

REFERENCES

- [1] *BÁRCZY B.* (1971): Integrálszámítás, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, pp. 167-169.
- [2] *CSABINA Z.* (2010): Integrálszámítás alkalmazása, Matematika példatár 5., Nyugat-magyarországi Egyetem, Székesfehérvár, pp. 1-6.
- [3] *ESZTERHÁS I.* (1994a): Magyarország jégbarlangjai - Lychnis, a Vulkánszpeleológiai Kollektíva kiadványa, Kapolcs p. 36-42
- [4] *ESZTERHÁS I.* (1994b): A Velencei-hegység barlangjai, Vulkánszpeleológiai Kollektíva Kiadványa, Kapolcs p.52-54
- [5] *ESZTERHÁS I.* (2001): Néhány klimatológiai mérés Szilvás-kő barlangjaiban- kézirat a Vulkánszpeleológiai Kollektíva Évkönyvében p.114-120
- [6] *ESZTERHÁS I.* (2002): A mérsékelt öv jégbarlangjai bazaltban - Karsztfejlődés VII., Szombathely p. 259-267
- [7] *ESZTERHÁS I.* (2006): Felszíni denudációs formák és gyapjúsákbarlangok a Velencei-hegység gránitjában, Karsztfejlődés XI., Szombathely pp. 195-208
- [8] *FODOR I.* (1981): A barlangok éghajlati és bioklimatológiai sajátosságai, Akadémiai Kiadó, Budapest, p. 190
- [9] *GRESSEL W.* (1958): Über die Bewetterung der alpinen Höhlen. Meteorologische Rundschau 11.2
- [10] *LATKA F.* (1980): Matematikai képletgyűjtemény, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, p. 134
- [11] *LOSONCI G.* (2010): A huzat és a barlangkutatás, p. 11. (http://www.gubacs.hu/konyvek-irasok/huzat_losi.pdf, érvényes 2010.12.10.)
- [12] *TARSOLY P.* (2013): A térinformatikai célú adatgyűjtés minősítése, fejlesztése és módszertani alkalmazása a gyapjúsákbarlangok kutatásában. PhD-dolgozat, Nyugat-magyarországi Egyetem Kitaibel Pál Környezettudományi Doktori Iskola, NymE-EMK, Sopron, 129 oldal

8. The Potential Role of AI in Urban Development through a Review of the Literature

Richard Veres
Alba Regia Faculty, Obuda University
Doctoral School of Innovation Management
Szekesfehervar, Hungary
veres.richard@amk.uni-obuda.hu

Abstract - The aim of this study is to provide an overview of the potential role of AI in urban development. The study presents the findings of the most relevant literature on smart cities, sustainable cities, and artificial intelligence, without the intention of providing an inclusive summary. We consider it an important task to provide insight into the development of the topic under study through the literature published between 2022 and 2026, as well as to highlight best practices. In this brief study, we examine the concepts of prominent consulting firms, the potential trends they have identified, and the general directions of EU and domestic strategies. The study also touches on the next stage of smart city development (the wise city) and discusses the potential role of higher education institutions in this context. We are formulating recommendations for the higher education institution on how it can support the strengthening of AI's role in urban development through its third-mission activities.

Keywords: smart city, sustainable city, wise city, the role of AI, urban development, higher education, third mission, literature review

I. INTRODUCTION

45% of world's population, which is approximately 3.7 billion people, live in cities based on the World Urbanization Prospects 2025 report of United Nations DESA, furthermore it forecasts that 2/3 of the world's population growth will occur there by 2050. The number of megacities (over 10 million; 50% in Asia) is growing continuously, but the study highlights that more people live in small- and medium sized cities than in large ones [1], therefore, to facilitate sustainable development they recommend integrated planning in which the towns and cities and rural territories appear in interconnected units. By strengthening the urban-rural connections in this way, recognizing the interdependency and using appropriate planning processes they may strive for the reduction of territorial inequalities and the development of the capability for resilience. The fact of continuous urbanization is a megatrend that is known to all of us, and which is a long-term driving force for our common future. Cities are continuously expanding simultaneously with their population growth; they develop their services to provide proper responses to the emerging needs of the local community and the challenges they face. They need to find the balance between putting the city on the sustainable and smart development path, while they tackle their daily problems (e.g.: providing affordable housing, in transport: excessive use of private cars, parking in public spaces, optimizing the public services processes, social lagging etc.) and the local impacts of megatrends (e.g.: technological shifting, scarcity of resources, climate change, demographic imbalances, increasing consumption etc.) [2]. Recognising the fact that the cities are not only the victims of challenges but also creators of solutions, the EU has established its new strategic framework (EU Agenda for Cities) in which they focus on collaboration between the EC and local municipalities with facilitating the success of cities by direct dialogues, simplifying grants and investing in city projects. In the city, they see collective strength, which, through its diversity, possesses knowledge that can generate unique abilities and capacities within that specific geographical location [3]. The process of cities becoming smart began a quarter of a century ago, in parallel with technological advancements, and has since become a key concept in urban development. In their 2012 research on the future of smart cities, Batty et al. drew attention to the fact that, since the term "smart city" first appeared, it has taken on many forms in the vision of virtual cities, digital cities, and information cities. They viewed the smart city as the integration of ICT with traditional infrastructure, which can be coordinated and integrated through digital technologies [4]. The digital and

green transitions are currently ongoing based on the European Green Deal, which is influencing the further development of smart cities and shaping the vision for smart, sustainable cities. In addition, we have entered the era of artificial intelligence, which has the potential to raise smart, sustainable cities to a new level of evolution.

The aim of this study is to provide an overview of the possible future scenarios that may develop for cities through the integration of AI into urban development, as well as to highlight the potential role of higher education institutions in this process.

II. METHOD

Using Scopus database, we reviewed the literature published between 2022 and 2026 (keywords: AI, smart city, sustainable city, urban development, urban planning) to provide insight into the development of the topic under study and to identify best practices. In this brief study, we discussed relevant EU initiatives as well as the key directions of European and domestic strategies; we compared the concepts of prominent consulting firms; and we outlined potential trends. In the article, we also discussed the next stage of smart city development (the wise city) and, in this context, touched on the potential role of higher education institutions.

III. ON RELATED INITIATIVES AND STRATEGIES

On the initiatives of EU for supporting Smart Cities. The European Commission supports the development of smart cities and communities by creating tools and services, developing sustainable projects, and providing opportunities for community-based governance, with the aim of improving the well-being of residents, entrepreneurs, visitors, and organizations, and creating the conditions for a better quality of life [5]. The initiative titled „Smart Cities and Communities” implemented in collaboration with the EIP-SCC (European Innovation Partnership on Smart Cities and Communities). The EU launched the initiative titled „Living-in.EU” to the local and regional leaders, urban experts and providers of technological solutions. On this platform, in collaboration with organizations such as EUROCITIES, Open and Agile Smart Cities (OASC); European Network of Living Labs (ENoLL), European Regions Research and Innovation Network (ERRIN), Local and Regional Europe, they aim to support cities and their communities in their digital transformation so that they can become smart and sustainable. This form of cooperation for urban development contributes to the city’s transformation through a citizen-centred approach, in which the city is a citizen-driven and open innovation ecosystem where technology and data are used in an ethical and responsible manner [6]. In the four projects of „CitiVERSE” (x-CITE, SENSE, CU, 3DxVERSE), the collaborating partners established a virtual environment for urban planners and citizens, where urban development plans can be tested using virtual and augmented reality [7]. These projects are used to test AI solutions, expand knowledge, and develop the ecosystem in the cities. The knowledge, information, and practical insights gained from the projects are shared through the „Smart Cities Marketplace” platform, among other channels, to support cities of all sizes in developing sustainable projects. By creating „Green Cities Wiki” website, they have made all the information that could be useful to urban experts, planners, and developers available in one place, helping them to put their cities on a path toward sustainable, inclusive, and climate-neutral development [8]. The „NetZeroCities” project serves as a service-oriented platform and is part of Horizon 2020 Research and Innovation Programme in which 112 cities (including the hungarian cities of Budapest, Miskolc, Pécs) have committed to achieving climate neutrality by 2030 with the support of world-class experts. This initiative could serve as a model for other cities and help Europe achieve its 2050 climate neutrality goals [9]. The launch of the „SmartSpires” project, in which the Orange Luxembourg (telecommunications company), 5SKYE (a smart city and AI solutions company), Gcore (an edge and cloud services company), and the Luxembourg Institute of Science and Technology have joined together to create an AI-driven smart city pilot environment in Belval’s (Luxemburg) innovation and university district [10].

On the Key Directions of the EU and National AI Strategies. In the digital vision of Europe, a main aim is to become the “AI continent,” promoting the spread of artificial intelligence while upholding EU values, with the aim of boosting competitiveness and productivity. The plan aims to develop

innovation capabilities and achieve technological sovereignty, while ensuring that technology can be used safely and democratically. The action plan identified five strategic areas (computing infrastructure, data union strategy, skills - AI talents, apply AI strategy, simplify rules) have the potential to accelerate the integration and use of artificial intelligence [11]. Building on the action plan and applying the AI strategy, the potential of AI's transformative impact will be leveraged by the members of the EU, within a secure framework in strategic, flagship sectors (industry and the public sector), while taking the AI First Policy into account [12]. With the legal framework of the European Union's AI Act, the EU has sought to be the first in the world to establish a safe legal environment for the use of artificial intelligence [13]. In its statement entitled "A Statement About Strategy to encourage the use of artificial intelligence," the European Commission identified cities as being relevant to the areas of "Mobility, Transport, and the Automotive Industry" and "Climate and Environment." The cities will focus on creating opportunities for self-driving vehicles (robotic vehicles) based on artificial intelligence and promoting autonomous urban transportation. The EC will provide AI-based local digital twin models to local authorities and stakeholders to help cities better prepare to manage the risks from climate change as part of their urban and rural planning processes [14].

On the aspects of the Hungarian AI strategy. Hungary's Artificial Intelligence Strategy (2025–2030) was developed with the participation of government, academic, and business stakeholders, as well as the Artificial Intelligence Coalition, and is scheduled for annual review considering the rapid advancement of the technology. Among other things, the strategy addresses the development of sustainable cities through measures in the transportation sector aimed at tackling environmental challenges, using resources more efficiently, and optimizing traffic management, with the goal of creating a more liveable environment. Areas of AI application identified to promote the development of sustainable cities: „Implementation of fleet management systems powered by artificial intelligence; Development of real-time vehicle tracking solutions for mobile applications; Installation of MI-based image processing and traffic management technologies in major cities; Implementation of adaptive traffic management systems; Building smart transportation infrastructure using in-vehicle data transmission devices; Development of 5G-based communication systems; Creating and supporting UrbanTech platforms to help local governments catch up digitally and share AI-based innovations in public administration” [15]. The action plan included in the appendix to the strategy outlines the development of test environments in Hungary and their integration into European test environment systems, with a view to further developing autonomous vehicles and smart cities.

The previous government initiated the development of an AI-based urban management system, for which a demonstration test environment was planned to be established in Miskolc, thereby creating the „AI Model City” program to foster a more sustainable and digitally literate community [16]. The new government may also intend to play a key role to technology (and specifically to artificial intelligence) in improving the country's competitiveness, as clearly demonstrated by its plan to establish a Ministry of Science and Technology.

According to data from Statista.com, the “smart city” market in Hungary is expected to grow significantly and could reach an estimated 128.1 million dollar in revenue by 2026 [17]. According to the statistical database, Hungary primarily uses smart city technologies to improve urban mobility and increase energy efficiency. This market still offers significant growth potential for service providers and developers.

IV. LITERATURE REVIEW

The cities of the future must continue to develop in the areas of smart solutions and sustainability, as they need to find solutions to the environmental pressures resulting from the growing energy demand caused by accelerated urbanization and the constant increase in population, as well as to the impacts of climate change. Paes et al. have identified these challenges and opportunities related to sustainable smart cities, which can simplify urban planning processes and decision-making [18].

Deloitte consulting firm and its partners conducted a comprehensive survey titled „AI-Empowered Cities of the Future” in 2025, involving 250 cities, in which they developed a model for assessing AI adoption maturity specifically for cities. Based on the survey, 20% of cities were classified as „leaders”, 60% as „advancers”, and another 20% as „adopters” based on their attitudes toward the use of traditional

and generative artificial intelligence; which urban areas use artificial intelligence; what regulatory measures have been adopted regarding the responsible use of artificial intelligence; and what resources they have in place to prepare for the future. Based on responses from cities, the study identified the top 10 most effective AI use cases, which are as follows: Traffic management, Public Safety, Energy management, Customer Safety, Predictive maintenance, Waste management, Data Analysis, Urban planning, Cybersecurity, Fraud detection. Based on the survey results, we highlight cities that are regularly used as a comparison basis for Hungarian cities. The authors of the study pointed out that the city of Bratislava uses AI both to implement dynamic pricing for public services, thereby increasing efficiency and revenue, and to improve security, defense, and resilience. In the case of Ljubljana, issues of safety, security, and resilience also come into the picture. In Vienna, AI-based carbon emissions and air quality monitoring are used to reduce pollution levels and improve public health. In Sofia, AI is used to detect financial fraud. The authors highlight that the use of traditional artificial intelligence will become common in the next three years: “83% of cities will use artificial intelligence selectively or on a large scale in the next three years” [19].

City Case Studies on the Use of AI. In their region-specific study (in Poland), Skubis et al. examine the potential benefits of applying AI in an urban environment. They highlight the importance of a people-centred approach to smart city development, with a focus on inclusivity, transparency, and ethical principles. The role of AI was examined in the Silesian in traditional industries such as manufacturing and energy, while in the Lesser Poland Voivodeship, it was examined in the life sciences, ICT, and the transition to sustainable energy production, as well as in the following areas: „in traffic management (accessible and user-friendly, so that daily commuting is a pleasant and safe experience), in healthcare (by using diagnostic tools and personalized treatment plans to address patients’ needs and build trust), in the field of energy efficiency (balancing energy demand and supply through smart grids and forecasting systems), in the field of waste management (through selective waste collection and recycling, ensuring safe disposal, and promoting the circular economy), to reduce traffic congestion and pollution by improving traffic management in urban mobility, and to promote sustainable modes of transportation” [20]. Lifelo et al. concluded that the AI-supported metaverse could play a role in developing the sustainability, adaptability, and liveability of smart cities. In their study, they presented real-world use cases from the following virtual cities, where the effectiveness of AI in the smart city metaverse has already been demonstrated. In Singapore, a digital twin of the city-state (Virtual Singapore) has been created by combining advanced 3D mapping and geographic information systems (GIS) technologies; data was collected using LiDAR technology, and mobile mapping, creating a risk-free testing environment for the government, business, and academic sectors to conduct research and test their ideas. In China, the cities of Beijing, Shanghai, and Guangzhou are testing the integration of autonomous vehicles into smart cities in collaboration with robotaxi providers to reduce traffic congestion and improve road safety. The world’s first municipal metaverse platform (Metaverse Seoul) has been launched in South Korea. Through this platform, users can access a wide range of public services, such as obtaining official documents and paying local taxes, via personalized avatars. The SmartWorldPro platform (New Mexico) integrates various data and software to optimise energy grids, healthcare, transportation, public utilities, and urban planning with minimal disruption. In Lisbon, Portugal, a dynamic 3D model of the city’s infrastructure was created using data from drones, by integrating real-time spatial data extracted from satellite imagery and IoT sensors [21]. In Sydney, Australia Varzeshi et al. examined the role of technology (IoT, AI, big data) in advancing urban sustainability, inclusivity, and adaptive urban systems. Through these initiatives (NSW Spatial Digital Twin, a Land iQ és a SIMPaCT), the city is supporting predictive urban management, the well-being of the community, and the development of resilience to climate change [22]. Rad et al. highlighted that in Amsterdam, AI technology is used in urban planning for flood forecasting and green infrastructure design, and to adapt urban initiatives to the city’s natural waterways [23]. Fünfgeld et al. demonstrated in Freiburg, how AI-based decision-support tools (modelling and forecasting methods) can assist with complex urban land-use and climate adaptation planning. They drew the attention of local governments to the fact that urban density targets must be considered when expanding green infrastructure for urban cooling. The authors also highlighted the role of AI in assessing existing green infrastructure, which could be important for urban cooling [24].

Other solutions in the Fields of Smart City Technologies and Energy Management. Arora et al. reviewed the role of multi-agent systems (MAS) in smart cities. They highlighted that, in smart homes, agents can coordinate temperature, lighting, security, and energy management. In the field of smart governance, it can facilitate communication with stakeholders and promote public engagement in the shaping of government policy. In a smart environment (networks, energy management systems), it can optimize energy production, distribution, and consumption. In intelligent mobility systems, MAS role may cover the complex real-time management of pedestrians, public transportation, traffic control, and autonomous vehicles [25]. Singar et al. propose a „green AI” approach to ensure that the principles of sustainability and fairness are also reflected in urban development, alongside the focus on increasing efficiency. The authors examined the symbiotic relationship between artificial intelligence and renewable energy sources. They concluded that AI facilitates the smooth integration of renewable energy sources, paving the way for an urban energy transition and contributing, among other things, to improving quality of life, reducing carbon emissions, and promoting community-centred approaches [26]. Zhang et al. pointed out that AI technology can improve the accuracy of solid waste sorting, thereby increase efficiency and reduce costs. They also mention the future role of AI-powered robots in waste sorting, which could reduce people’s exposure to dangerous waste [27].

Urban Planning. Malekzadeh draws attention to the fact that urban planning is undergoing a transformation due to AI technology but encourages urban planners to make use of it. The author emphasizes that AI can assist in developing scenarios by recognizing new patterns and offering innovative approaches and can support collaborative creation by identifying blind spots in current practices, an approach that requires curiosity and critical thinking [28]. Rad et al. examined how to leverage the potential of AI in the field of sustainable urban development. They concluded that integrating AI into urban planning and supply chain management, including supplier selection, the optimization of control processes, and the complex processes involved in order allocation, can improve efficiency, resilience, and sustainability [23]. Androniceanu examined the potential applications of AI in the Romanian public administration. The author gave the example that technology can improve the efficiency of public services; some administrative processes can be automated, thereby reducing bureaucracy; decision-making based on real-time data analysis can be enhanced; and progress can be made toward providing personalized services. He pointed out that the use of AI must be regulated and that standards need to be developed [29]. Chen et al. examined interpersonal meetings in urban public spaces in terms of frequency, spatial distribution, and duration, using computer vision technologies to identify and record social interactions (in four categories: temporary, permanent, long-term, and gatherings). Using this people-centred, AI-based video analysis approach, they wanted to find out how effectively these spaces facilitate human interaction. Their study highlights that urban planners can use this methodology to identify the city’s active and inactive areas to improve the functionality of public spaces (seating, greenery, etc.) [30]. Fünfgeld et al. pointed out that AI can support the early stages of the design process by conducting virtual experiments when new green infrastructure solutions need to be considered.

The authors highlight that, using scenario-based AI modelling, it is possible to quickly generate high-resolution spatial representations of future buildings, green and blue infrastructure (e.g., the locations of trees and fountains), and their potential urban heat effects [24]. In connection with the planning of the “15-minute cities” concept, the potential for applying AI and geospatial tools in Poland (Gdańsk) was examined by Sepe et al. The authors have proposed a framework that offers a robust diagnostic tool and, through its automated methodology, provides a new approach compared to traditional on-site surveys of public spaces [31]. Filho et al. examined how AI technology can contribute to achieving the UN Sustainable Development Goal 11 (Sustainable Cities and Communities) in the context of urban development. They highlighted general urban planning, urban transportation planning, traffic management, and smart energy systems as potential areas for intervention, as well as environmental benefits (e.g., water demand forecasting, water supply management, air quality monitoring, etc.). The authors clearly see the potential of AI in macro-level planning processes aimed at creating a more sustainable urban environment [32].

Smart, Sustainable, or Autonomous Cities? Has the Age of “Wise Cities” Arrived? The smart city concept has been around for quite some time, and numerous case studies have analysed the experiences gained from various solutions and highlighted best practices. European Union initiatives are also aimed at ensuring that cities continue to develop as part of their natural evolutionary process, leveraging the benefits of technology while keeping sustainability in mind, thereby ensuring a prosperous life for their citizens. Szpilko et al. examined the factors that determine whether a city in Europe can become sustainable and smart. The authors concluded that external funding, digital infrastructure that integrates data, and cybersecurity all play a role in the path to success. They highlighted that when implementing a project, local governments must aim to strengthen the connections between systems and departments; otherwise, the result will be fragmentation and wasted data. They also drew attention to the fact that the involvement of national authorities, the scientific and research sectors, and the commitment of their own institution create the supporting environment needed to become a sustainable and smart city [33]. Mecca et al. examined an emerging new model of urban development and governance, in which the evolution is moving from the smart city model toward the so-called autonomous city, and its effects in terms of the weak versus strong sustainability paradigms. Based on their comparative analysis, the authors highlight that neither model points toward strong sustainability; furthermore, from an environmental perspective, the costs and consequences of AI are exponentially higher than those of smart solutions. In smart cities, operations are carried out according to plans devised by programmers, urban planners, and city leaders, yet human capital continues to be an asset. In contrast, the authors emphasize that in autonomous cities, AI can manage the city without human intervention, analysing an infinite number of future scenarios to achieve the most optimal outcome. They point out that technology no longer plays a mediating role here, but rather a dominant one, which may give rise to the idea that sustainability is achievable through technological optimization. At the same time, they point out that there is a risk that, as human and natural capital are sidelined, the future development of cities may be characterized by a path toward „super weak sustainability” [34]. In 2017, Ravetz developed pathways based on the synergies necessary for the evolution from smart cities to wise cities, which lead to the achievement of collective urban intelligence. He explained that when dealing with complex urban challenges that affect multiple systems, we must aim to understand synergies and work with them to foster shared learning, co-creation, and innovation. He highlighted that this would lead to a form of urban “collective intelligence,” which would take us from the smart city to the wise city. With this holistic approach and through the involvement and cooperation of stakeholders, we can foster a sense of “urban social consciousness” that can address the most complex challenges facing cities [35]. In his study of smart cities, Hambleton highlighted the need for wise judgement. The author urged that, when processing the vast amounts of data, which are becoming almost impossible to comprehend, generated by daily human and technical interactions in cities, critical attention must be paid to how that data is used and its utility, so that it can truly contribute to improving quality of life. The author highlighted the example of the „Bristol One City Approach”, in which stakeholders and political and public service actors agreed on a set of core values that could contribute to the development of their city and region. Through this practice of inclusive urban governance, the author also encourages moving beyond the concept of „smart cities” and shifting toward „wise cities” [36]. The study of Skubis et al. also presents a people-centred vision of the future of smart cities, in which the focus is on the well-being of citizens through the integration of technology, urban planning, and community participation [20]. Bittencout et al. also believe that a shift has begun in the field of urban development, with a move away from the “smart city” concept toward a “cognitive city” model that places people at the centre. The authors highlighted that with the integration of GenAI, static urban systems can evolve into dynamic ecosystems that support sustainable and people-centred urban innovations. The authors suggest that, in the future, the driving forces behind the use of GenAI should focus on human needs and social equity rather than profit [37].

A Comparison of Prominent Consulting Firms’ Visions for AI-Driven Cities. After reviewing the literature to identify potential development trends for smart cities, we conducted a comparative analysis of the AI-driven urban visions proposed by major consulting firms. We compared the information available in the consulting firms’ publications and on their websites based on the following criteria:

- What is the essence of the AI-driven urban concept?
- What are the key elements/characteristics/enablers of the concept?

- How is the cityscape depicted in the concept?
- How does the concept view the city’s residents (in what role)?
- How is the relationship with stakeholders presented?

The table below summarizes the results of our analysis, which covered McKinsey’s „AI-native city” concept [38], BCG’s „AI-First City” concept [39], PwC’s „Cognitive City” concept [40], and the findings of Deloitte’s “AI-powered cities” study [19].

Consulting Firms	McKinsey’s „AI-native city” concept (Panda et al., 2026)	BCG’s „AI-First City” concept (Bitar et al., 2026)	PwC’s „Cognitive City” concept (PwC Middle East, 2023)	the findings of Deloitte’s “AI-powered cities” study (Deloitte Global, 2025)
What is the essence of the AI-driven urban concept?	AI-based cities make every aspect of the urban environment intelligent, create smarter infrastructure (which functions more like software), monitor the situation in real time, and are capable of autonomous operation based on defined rules.	“...the AI-First City model itself, where cities repeatedly Sense, Analyze, and Orchestrate across their systems to operate more proactively, intelligently, and efficiently.”	“Cognitive cities can become proactive, intelligent and adaptive ecosystems that enhance the quality of life for their dwellers.”	AI is transforming most municipal services, making them widely available to businesses and residents in cities as essential services, just like electricity.
What are the key elements/characteristics/enablers of the concept?	“1. Cities operate more like distributed computing systems; 2. High-resolution sensing becomes the city’s ‘nervous system’; 3. Real-time data fabric replaces dashboards and batch analytics; 4. Digital twins become operational control tools; 5. AI moves from recommendation to execution.”	“1. Governance & Institutional Alignment: Clarifying Ownership and Decision Rights; 2. Policy, Regulatory, & Responsible AI Frameworks: Setting the Rules for Safe and Trusted AI; 3. Data Governance & Interoperability: Establishing a Trusted, Integrated Data Foundation; 4. Workforce & Organizational Capability: Equipping City Teams to Operate with AI; 5. Partnerships & Innovation Ecosystems: Accelerating Adoption Through Collaboration.”	“1. Human-centric design and engagement; 2. Sensing and data acquisition; 3. Cognitive engine for cross-sectoral intelligence; 4. Service enablement and orchestration; 5. Governance, security and interoperability.”	“1. Make a top-down commitment (vision, plan, budget); 2. Build a modern data and IT foundation; 3. Develop needed AI skills, talent and processes; 4. Cultivate an AI innovation ecosystem; 5. Transform urban domains through AI and GenAI; 6. Unlock value by combining AI with other technologies; 7. Keep data security and privacy top of mind.”
How is the cityscape depicted in the concept?	The city and its infrastructure form an autonomous, technology-driven “operating system” focused on optimization.	The city’s central driving force is the MI, around which its operational models, capabilities, and institutions are organized.	The city is evolving into a future-proof, adaptive ecosystem, one that is reflective, learning, and built on social acceptance.	“In an AI-powered city, vast amounts of data are collected and analyzed to generate predictions, which can help improve the quality of life for city residents, promote sustainability, and increase efficiency.”
How does the concept view the city’s residents (in what role)?	“AI complements human judgment.” “Routine matters in public administration can be completed without human intervention, allowing human oversight to focus on exceptions.” “Human-led management is the result of planning.”	People remain at the heart of the coordination. A “human-in-the-loop” approach is taken. Cities can deliver more human-centered, accessible, and equitable experiences	People and their needs are at the center of our focus. The city is the embodiment of human creativity.	The “keeping humans in the loop” approach is being adopted.
How is the relationship with stakeholders presented?	“...parts of the city are beginning to behave like computing platforms...”	Strategic partnerships with technology providers, academia, industry, and startups. Ecosystem-based thinking.	The success of the concept depends on the cooperation of all stakeholders (government provides a vision and sets regulations, businesses drive innovation and investment, and civil society contributes community knowledge and flexibility).	Automated processes and IT platforms provide access to data subjects.

TABLE 1: An overview table comparing the visions of prominent consulting firms regarding AI-driven cities
Source: edited by the author based on information found on the websites of major consulting firms or in their studies

Based on this comparison and in view of the literature reviews, it is conceivable that AI-supported urban development concepts in Europe (and specifically in Hungary) will be people-centred and will fundamentally require human oversight. Systems in which humans are given the opportunity to intervene are much better suited to European data protection regulations. The concepts described in the table are not alternatives or competitors to one another, but rather ideas that follow different developmental trajectories.

V. DISCUSSION AND CONCLUSIONS

In our study, we reviewed the EU’s initiatives supporting Smart Cities, the guidelines of the EU and Hungarian AI strategies, and briefly touched upon the relevant aspects of the Hungarian AI strategy as well as the current state of the domestic smart city market. Through an analysis of the literature, we identified urban case studies to illustrate potential areas for the use of AI in urban development, from urban planning to energy management.

We also provided insight into the development trajectory of smart cities through the literature on city models based on wisdom or cognitive intelligence. At the end of our study, we compared the visions of major consulting firms regarding AI-driven cities, exploring the potential development path for data-driven smart cities. Based on our analysis of the literature, we have concluded (in agreement with

Ravetz) that a „wise city” development model could be the best solution for cities, in which collaboration based on synergies, with the involvement of stakeholders, can generate the knowledge needed to address even the most complex urban challenges.

We consider this concept realistic at the level of mid-sized cities, where the population size still allows for the social connections that weave through the city like an invisible fabric. Through the social capital thus created, it supports the city’s collective problem-solving capacity, the development of its competitiveness, and its transition to a sustainable path.

Our study may be useful to city leaders and urban development experts, as it provides an overview of current urban development concepts that combine AI with existing approaches. We wanted to encourage city leaders to remain open-minded and curious about the solutions offered by AI. If possible, have a simulation test environment designed as soon as possible where urban development experts can test new solutions repeatedly. Reach out to local higher education institutions, which can support the implementation of urban twin projects through their third-mission activities. Higher education institutions offering engineering and computer science programs can assist in planning the development of a virtual city model and the necessary infrastructure in their city. By establishing living labs, they can incorporate these needs into the planning phases of urban development. Through its activities, LLL provides an opportunity to develop the digital literacy of people of all ages in the city, ensuring that digital transformation is not limited to data management but is aimed at raising the community’s level of knowledge.

In conclusion, we recommend that city leaders and urban planners think critically and responsibly as they begin to integrate AI-powered solutions into urban systems.

References

[1] United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division. (2025). *World Urbanization Prospects 2025: Summary of Results* (UN DESA/POP/2025/TR/NO. 12). New York: United Nations. https://www.un.org/development/desa/pd/sites/www.un.org.development.desa.pd/files/undesa_pd_2024_key_messages_wup_2025.pdf (Last viewed: 2026.05.10.)

[2] European Commission, Joint Research Centre. (2026). *Megatrends Hub*. Knowledge4Policy. https://knowledge4policy.ec.europa.eu/foresight/tool/megatrends-hub_en (Last viewed: 2026.05.10.)

[3] European Commission. (2026). *Cities at the Heart of Europe’s Future: Introducing the EU Agenda for Cities*. Panorama - Inforegio. https://ec.europa.eu/regional_policy/whats-new/panorama/analysis-data_en (Last viewed: 2026.05.10.)

[4] Batty, M & Axhausen, K & Giannotti, F. & Pozdnoukhov, A. & Bazzani, A. & Wachowicz, M. & Ouzounis, G. & Portugali, Y. (2012). *Smart cities of the future*. The European Physical Journal Special Topics. 214. 481-518.

[5] European Commission, *Smart Cities and Communities*, 2026. <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/smart-cities-and-communities> (Last viewed: 2026.05.10.)

[6] *The European way of digital transformation in cities and communities* <https://living-in.eu/> (Last viewed: 2026.05.10.)

[7] European Commission, *Citiverse*, 2025. <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/factpages/citiverse> (Last viewed: 2026.05.10.)

[8] European Commission, *Smart Cities Marketplace*, 2026. <https://smart-cities-marketplace.ec.europa.eu/> (Last viewed: 2026.05.10.)

[9] European Commission, *Net Zero Cities*, 2026. <https://netzerocities.eu/the-netzerocities-project/> (Last viewed: 2026.05.10.)

[10] European Commission, *SmartSpires*, 2026

<https://digital-strategy.ec.europa.eu/hu/miscellaneous/eu-funded-smartspires-project-transform-belval-smart-city-test-bed> (Last viewed: 2026.05.10.)

[11] European Commission, *The AI Continent Action Plan*, 2026
<https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/library/ai-continent-action-plan> (Last viewed: 2026.05.10.)

[12] European Commission, *The Apply AI Strategy*, 2026
<https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/apply-ai> (Last viewed: 2026.05.10.)

[13] European Commission, *The AI Act*, 2024
<https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/regulatory-framework-ai> (Last viewed: 2026.05.10.)

[14] European Commission *Statement About Strategy to encourage the use of artificial intelligence*, 2025.
<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/HU/TXT/HTML/?uri=CELEX:52025DC0723> (Last viewed: 2026.05.10.)

[15] *Magyarország Mesterséges Intelligencia Stratégiája (2025-2030)*
<https://kormany.hu/dokumentumtar/magyarorszag-mesterseges-intelligencia-strategiaja-2025-2030-1> (Last viewed: 2026.05.10.)

[16] *Miskolc lesz Magyarország első mesterséges intelligencia mintavárosa*, 2025.
<https://www.miskolc.hu/aktualis/miskolc-lesz-magyarorszag-első-mesterseges-intelligencia-mintavarosa> (Last viewed: 2026.05.10.)

[17] Statista. (2026). *Smart Cities – Hungary: Market Forecast and Revenue 2026* [Market Forecast]. Statista.
<https://www.statista.com/outlook/tmo/internet-of-things/smart-cities/hungary> (Last viewed: 2026.05.10.)

[18] Paes, V. & Pessoa, C. & Pagliusi, R. & Barbosa, C. E. & Argôlo, M. & Lima, Y. & Santos, H. & Lyra, A. & Souza, J. (2023). *Analyzing the Challenges for Future Smart and Sustainable Cities*. Sustainability. 15.

[19] Deloitte Global. (2025). *AI-powered cities of the future: The rise of the AI-powered city*. Deloitte Development LLC. <https://www.deloitte.com/us/en/industries/government-public/research/ai-powered-cities-of-future.html> (Last viewed: 2026.05.03.)

[20] Skubis, I. & Wolniak, R. & Grebski, W. (2024). *AI and Human-Centric Approach in Smart Cities Management: Case Studies from Silesian and Lesser Poland Voivodships*. Sustainability. 16. 1-26.

[21] Lifelo, Z. & Ding, J. & Ning, H. & Qurat-U.-A., & Dhelim, S. (2024). *Artificial Intelligence-Enabled Metaverse for Sustainable Smart Cities: Technologies, Applications, Challenges, and Future Directions*. Electronics. 13.

[22] Varzeshi, S. & Fien, J. & Irajifar, L. (2024). *Integrating Technology and Urban Resilience: A Comprehensive Analysis of Smart City Initiatives in Sydney*. Sustainability. 16.

[23] Rad, A. & Karlsen, E. & Nazar, M. (2025). *Unleashing the Potential of AI in Sustainable Urban Planning and Design*. In: Kioumarsis, M., Shafei, B. (eds) *The 1st International Conference on Net-Zero Built Environment. NTZR 2024. Lecture Notes in Civil Engineering*, vol 237. Springer, Cham.

[24] Fünfgeld, H. & Christen, A. & Briegel, F. & Schrödi, S. & Speidel, A. & Felder, C. & Hoffmann, J. & Irscheid, L. & Merkle, D. & Meyer, J. & Schindler, D. & Wehrle, J. & Zengerling, C. (2026). *Optimizing urban greening and densification in the context of outdoor heat: Opportunities for AI-supported urban adaptation*. Landscape and Urban Planning. 268.

[25] Arora, A. & Jain, D. & Yadav, D. & Hassija, V. & Chamola, V. & Sikdar, B. (2023). *Next Generation of Multi-Agent Driven Smart City Applications and Research Paradigms*. IEEE Open Journal of the Communications Society. PP. 1-1.

[26] Singar, M. & Suneetha, K. & Saraswat, N. & Shukla, G. (2024). *Artificial Intelligence's Role in Shaping Renewable Energy for Next-Generation Smart Cities*. E3S Web of Conferences. 540.

- [27] Zhang, J. & Yang, H. & Xu, X. (2023). *Research on Service Design of Garbage Classification Driven by Artificial Intelligence*. Sustainability. 15.
- [28] Malekzadeh, M. (2026). *Urban planners should not be afraid of AI*. Cities, 168.
- [29] Androniceanu, A. (2024). *Generative artificial intelligence, present and perspectives in public administration*. Administratie si Management Public, 43, 105-119.
- [30] Chen, W. & Natapov, A. & Ali, Y. (2025). *Can urban vitality be seen? Video analytics of social interaction and land use*. Land Use Policy. 159.
- [31] Sepe, A., Nyka, L., et al. (2026). *Integrating AI and spatial analysis for resilient and inclusive 15-minute cities: A case study of Gdańsk*. Cities.
- [32] Filho, W. & Mbah, M. & Dinis, M. & Viera T., L. & de Lange, D. & Mishra, A. & Gasparetto R., B. & Ben Hassen, T. & Aina, Y. (2024). *The role of artificial intelligence in the implementation of the UN Sustainable Development Goal 11: Fostering sustainable cities and communities*. Cities. 150.
- [33] Szpilko, D. & Rzepka, A. & Nica, E. & Lăzăroiu, G. & Gedeon, T. (2025). *What factors will shape the future of sustainable and smart cities in Europe? Evidence from the Delphi study*. Economics and Environment. 94.
- [34] Mecca, B.; Lami, I.M.; Cugurullo, F. (2026). *Smart, autonomous and sustainable cities? A critical analysis from the perspective of strong, weak and super weak sustainability*. Cities 2026, 174.
- [35] Ravetz, J. (2017). *From 'smart' cities to 'wise': pathways for collective urban intelligence*. In J. Bylund (Ed.), *Connecting the dots by obstacles? Friction and traction ahead for the SRIA urban transitions pathways JPI Urban Europe*.
- [36] Hambleton, R. (2021). *From smart cities to wise cities*. IET Smart Cities. 3. 53-55.
- [37] Bittencout, J. C. & Flores, T. & Jesus, T. & Costa, D. (2025). *On the Role of AI in Building Generative Urban Intelligence*. Artif Intell Rev 59, 78.
- [38] Panda, C., Soller, H., & Swain, S. (2026, March 6). *How AI-native public infrastructure changes how cities operate*. McKinsey & Company. <https://www.mckinsey.com/capabilities/tech-and-ai/our-insights/tech-forward/how-ai-native-public-infrastructure-changes-how-cities-operate> (Last viewed: 2026.05.03.)
- [39] Bitar, J., Maher, H., Deschietere, B., Rahbani, J., Oussi, C., Jaoude, D. A., Bollettino, E., Alaradi, A., & Rguig, S. (2026, January 23). *The AI-First City: What City Leaders Can Do Today to Shape Tomorrow's City*. Boston Consulting Group. <https://www.bcg.com/publications/2026/united-arab-emirates-the-ai-first-city-what-city-leaders-can-do-today-to-shape-tomorrows-city> (Last viewed: 2026.05.03.)
- [40] PwC Middle East. (2023, November 7). *Cognitive Cities: A journey to intelligent urbanism*. <https://www.pwc.com/m1/en/publications/documents/cognitive-cities-a-journey-to-intelligent-urbanism.pdf> (Last viewed: 2026.05.03.)