



# Geodesy in the Context of Scientific and Technological Progress: From Euclid to Geodesy 4.0

Ani Adriyanova STEFANOVA

Department of Applied Geodesy, Faculty of Geodesy, University of Architecture,  
Civil Engineering and Geodesy, Sofia, Bulgaria  
stefanova\_fgs@uacg.bg (ORCID: 0009-0008-4879-6665)

**Abstract:** This paper provides an overview of the historical and technological development of geodetic science, tracing its evolution from ancient civilizations to the modern digital era. It examines key transformations in geodetic methods across major historical milestones, including the Industrial Revolution and the Digital Revolution, with a focus on the integration of advanced technologies such as GNSS, LiDAR, unmanned aerial vehicles (UAVs), and artificial intelligence (AI). The study outlines the transition from mechanical and optical instruments to electronic and satellite-based systems, as well as the growing role of AI and GIS technologies in geospatial data analysis. The paper emphasizes the importance of geodesy in infrastructure development, environmental monitoring, and spatial modelling. Recent innovations in automated mapping, big data processing, and real-time applications are also discussed, with a focus on the shift toward "Geodesy 4.0" – a term that encapsulates the integration of smart technologies, automation, and real-time data processing in modern geodesy. Finally, it can be concluded that geodesy has evolved into a dynamic and interdisciplinary field, with geodesists driving innovations that impact a wide range of areas, including infrastructure planning, environmental monitoring, spatial modelling, and real-time data applications in the economic and construction domains.

**Keywords:** geodesy, GNSS, LiDAR, UAVs, artificial intelligence, GIS, geospatial data, automated mapping, Geodesy 4.0

## 1 Introduction

Geodesy occupies a central role in modern geospatial sciences, providing critical data for infrastructure planning, natural resource management, and disaster response. The growing complexity of society and rapid technological advances have increased the need for precise, reliable, and timely measurements, which modern technologies such as satellites and drones aim to complement. The advent of digital platforms and automated systems offers new opportunities for integrating large volumes of data, while also presenting challenges related to quality standards, operational interoperability, and data security.

This study aims to present a comprehensive overview of the transformation of geodetic practice and

technology, emphasizing the contemporary trends that will shape the discipline's future. Realizing "Geodesy 4.0" requires not only the adoption of new tools and methods but also a fundamental shift in how we approach data integration, system automation, and interdisciplinary collaboration.

Accordingly, this paper analyses the key components necessary to achieve high accuracy and operational flexibility across a range of applications—from mapping to real-time monitoring and forecasting. The following sections examine the principles of integrating satellite and unmanned systems, the role of cloud technologies and artificial intelligence, and outline directions for future research aimed at improving the adaptability and functional sustainability of geodetic platforms, which are expected to evolve rapidly and



# Geodezija u kontekstu znanstvenog i tehnološkog napretka: Od Euklida do Geodezije 4.0

Ani Adrijanova STEFANOVA

Odjel za primijenjenu geodeziju, Geodetski fakultet,  
Sveučilište za arhitekturu, građevinarstvo i geodeziju, Sofija, Bugarska  
stefanova\_fgs@uacg.bg (ORCID 0009-0008-4879-66653)

**Sažetak:** Članak daje pregled povijesnog i tehnološkog razvoja geodezije, prateći njezinu evoluciju od drevnih civilizacija do moderne digitalne ere. Ispituje ključne transformacije u geodetskim metodama kroz važna povijesna razdoblja, uključujući Industrijsku revoluciju i Digitalnu revoluciju, s naglaskom na integraciju naprednih tehnologija poput GNSS-a, LiDAR-a, bespilotnih letjelica (UAV) i umjetne inteligencije (AI). Studija prikazuje prijelaz s mehaničkih i optičkih instrumenata na elektroničke i satelitske sustave, kao i rastuću ulogu AI i GIS tehnologija u analizi geoprostornih podataka. U radu je naglašena važnost geodezije u razvoju infrastrukture, praćenju okoliša i prostornom modeliranju. Također se raspravlja o nedavnim inovacijama u automatiziranom kartiranju, obradi velikih podataka i aplikacijama u stvarnom vremenu, s naglaskom na pomak prema "Geodeziji 4.0" – pojmu koji obuhvaća integraciju pametnih tehnologija, automatizacije i obrade podataka u stvarnom vremenu u modernoj geodeziji. Konačno, može se zaključiti da se geodezija razvila u dinamično i interdisciplinarno područje, s geodetima koji pokreću inovacije koje utječu na širok raspon područja, uključujući planiranje infrastrukture, praćenje okoliša, prostorno modeliranje i primjenu podataka u stvarnom vremenu u ekonomskoj i građevinskoj domeni.

**Ključne riječi:** geodezija, GNSS, LiDAR, UAV, umjetna inteligencija, GIS, geoprostorni podaci, automatizirano kartiranje, Geodezija 4.0

## 1. Uvod

Geodezija zauzima središnju ulogu u modernim geoprostornim znanostima, pružajući ključne podatke za planiranje infrastrukture, upravljanje prirodnim resursima i odgovor na prirodne katastrofe. Rastuća složenost društva i brzi tehnološki napredak povećali su potrebu za preciznim, pouzdanim i pravovremenim mjerenjima, što moderne tehnologije poput satelita i dronova imaju za cilj. Pojava digitalnih platformi i automatiziranih sustava otvara nove mogućnosti za integraciju velikih količina podataka, ali istovremeno predstavlja izazove u vezi sa standardom kvalitete, operativnom interoperabilnošću i sigurnošću podataka.

Ova studija ima za cilj predstaviti sveobuhvatan pregled transformacije geodetske prakse i tehnologije,

naglašavajući suvremene trendove koji će oblikovati budućnost ove discipline. Ostvarenje "Geodezije 4.0" zahtijeva ne samo usvajanje novih alata i metoda, već i temeljnu promjenu u pristupu integraciji podataka, automatizaciji sustava i interdisciplinarnoj suradnji.

Stoga se u ovom članku analiziraju ključne komponente potrebne za postizanje visoke točnosti i operativne fleksibilnosti u širokom spektru primjena — od kartiranja do praćenja u stvarnom vremenu i prognoza. U sljedećim odjeljcima ispituju se principi integracije satelitskih i bespilotnih sustava, uloga tehnologija u oblaku i umjetne inteligencije te se opisuju smjerovi za buduća istraživanja usmjerena na poboljšanje prilagodljivosti i funkcionalne održivosti geodetskih platformi, za koje se očekuje da će se brzo razvijati i možda neće zadržati mehaničku robusnost tradicionalnih instrumenata.

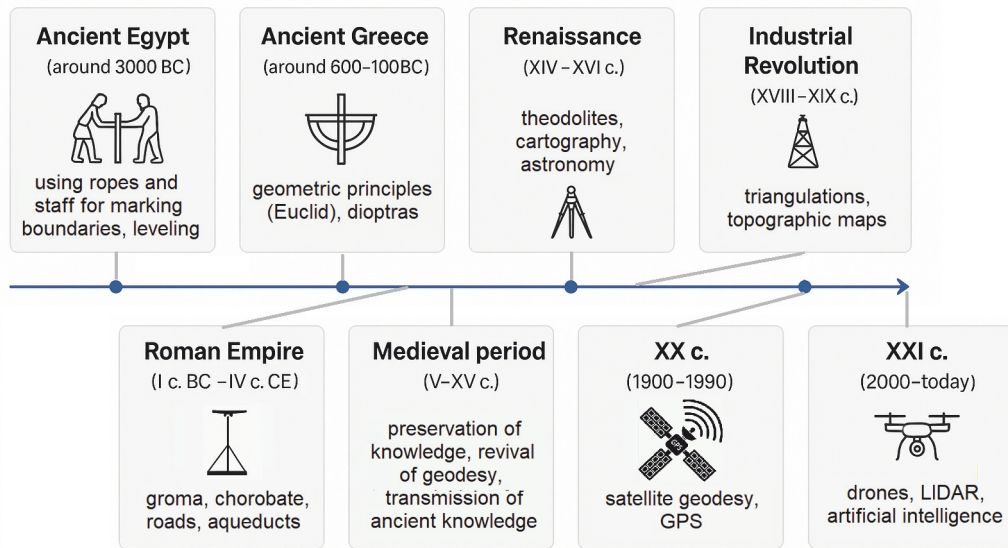


Fig. 1 Major Stages in the Development of Geodesy. Image created by Chat GPT on April 15, 2025.

may not retain the mechanical robustness of traditional instruments.

Given the important role of geodesy in science and the ongoing technological evolution, exploring its historical roots and theoretical foundations will provide valuable insights into its development and the establishment of its core principles in the early stages of human civilization.

## 2 The Evolution of Geodetic Science: A Historical Overview

### 2.1 Fundamental principles and general features of geodesy

Geodesy, one of the oldest applied sciences, emerged in response to the human need for spatial measurement, planning, and management. It focuses on determining the shape, dimensions, and precise positioning of the Earth (Madzhdrakov, Ivanova 2014). Initially, geodetic practices were basic and intuitive, tied to marking boundaries and celestial navigation. Over time, these practices evolved into systematic methodologies based on geometry and astronomy (Geomedia n. d.).

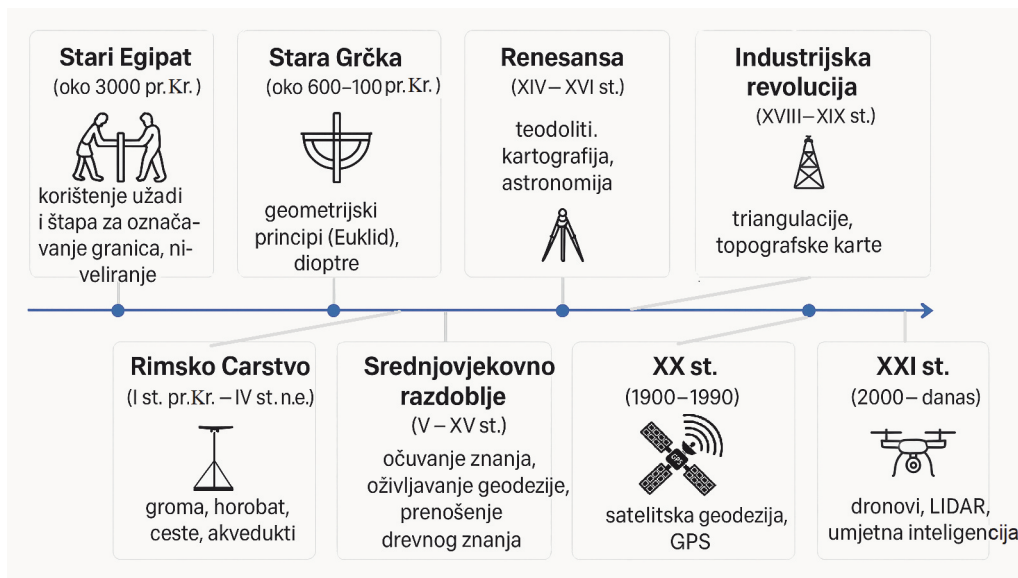
As societies became more organized, the demand for more precise measurements grew, particularly for land division, infrastructure development, and administration. This shift from empirical observation to scientific principles, grounded in mathematics, physics,

and engineering, formed the foundation of modern geodesy as an interdisciplinary science.

Mathematical and astronomical discoveries made significant contributions to the development of geodesy. Astronomers such as Hipparchus and Ptolemy (Abdullatif 2011) established fundamental methods for determining position on Earth and angles for navigation. The development of trigonometry by Al-Battani offered critical tools for measuring distances and angles. In the 17th century, Newton's theory of gravitation and the contributions of mathematicians like Gauss and Legendre advanced geodetic measurements, leading to more accurate models of Earth's shape. The invention of precision instruments, such as the theodolite and sextant, played a key role in transforming geodesy into a rigorous scientific discipline.

The continuous evolution of geodesy was driven by technological progress and the increasing complexity of managing socio-economic systems. From its ancient origins to modern technological advancements, particularly during the Industrial Revolution and into the 20th and 21st centuries, geodesy has significantly transformed. The following sections will explore these historical phases and their lasting contributions to the field.

Figure 1 illustrates the key milestones in the development of geodesy, tracing its evolution from early practices to the scientific foundations laid during Antiquity and the Renaissance, and highlighting the technological advancements of the Industrial Revolution and the Digital Age. This visual representation provides



Slika 1. Glavne faze u razvoju geodezije. Sliku izradio ChatGPT 15. travnja 2025.

S obzirom na važnu ulogu geodezije u znanosti i kontinuirani tehnološki razvoj, istraživanje njezinih povijesnih korijena i teorijskih temelja pružit će vrijedne uvide u njezin razvoj i uspostavu osnovnih principa u ranim fazama ljudske civilizacije.

## 2. Evolucija geodetske znanosti: povijesni pregled

### 2.1. Temeljna načela i opće značajke geodezije

Geodezija, jedna od najstarijih primijenjenih znanosti, pojavila se kao odgovor na ljudsku potrebu za prostornim mjerenjem, planiranjem i upravljanjem. Fokusira se na određivanje oblika, dimenzija i preciznog položaja na Zemlji (Madzhdrakov, Ivanova 2014). U početku su geodetske prakse bile osnovne i intuitivne, povezane s označavanjem granica i nebeskom navigacijom. S vremenom su se te prakse razvile u sustavne metodologije temeljene na geometriji i astronomiji (Geomedia n.d.).

Kako su društva postajala organiziranija, povećala se potreba za preciznijim mjerenjima, osobito za podjelu zemljišta, razvoj infrastrukture i administraciju. Taj prijelaz s empirijskog promatranja na znanstvena načela, zasnovana na matematici, fizici i inženjerstvu, oblikovao je temelje moderne geodezije kao interdisciplinarnih znanosti.

Matematika i astronomija dale su značajan doprinos razvoju geodezije. Astronomi poput Hiparha i Ptolomeja uspostavili su temeljne metode za određivanje položaja Zemlje i kutova za navigaciju (Abdullatif 2011). Razvoj

trigonometrije Al-Battanija ponudio je ključne alate za mjerenje udaljenosti i kutova. U 17. stoljeću, Newtonova teorija gravitacije i doprinos matematičara poput Gaussa i Legendrea usavršili su geodetska mjerenja, omogućujući preciznije modele oblika Zemlje. Izum preciznih instrumenata, poput teodolita i sekstanta, odigrao je ključnu ulogu u transformaciji geodezije u rigoroznu znanstvenu disciplinu.

Kontinuirani razvoj geodezije bio je vođen tehnološkim napretkom i sve većom složnošću upravljanja socio-ekonomskim sustavima. Od svojih drevnih početaka do modernih tehnoloških napredaka, osobito tijekom Industrijske revolucije i u 20. i 21. stoljeću, geodezija je značajno transformirana. Sljedeći odjeljci istražiti će ove povijesne faze i njihov trajni doprinos području.

Slika 1 prikazuje ključne prekretnice u razvoju geodezije, prateći njezinu evoluciju od ranih praksi do znanstvenih temelja postavljenih tijekom antike i renesanse, te ističući tehnološke napretke Industrijske revolucije i Digitalnog doba. Ta vizualna reprezentacija pruža jasan okvir za razumijevanje napretka geodetskih tehnika, instrumenata i tehnologija tijekom vremena, ističući glavne prijelaze u ovom polju i nudeći uvid u njegovu kontinuiranu transformaciju.

Nakon što su uspostavljeni temeljni principi geodezije, ključno je istražiti njezine rane prakse u starim civilizacijama. Geodetske metode koje su se koristile u starom Egiptu i Mezopotamiji postavile su temelje za naprednije tehnike, označavajući početak sustavnih prostornih mjerenja koja će s vremenom evoluirati u modernu geodeziju.



**Fig. 2** Ancient geodetic methods in Egypt. Image created by Chat GPT on April 27, 2025.

**Slika 2.** Stare geodetske metode u Egiptu. Sliku izradio ChatGPT 27. travnja 2025..

a clear framework for understanding the progression of geodetic techniques, instruments, and technologies over time, highlighting major transitions in the field and offering insights into its continuous transformation.

Having established the foundational principles of geodesy, it is crucial to explore its early practices in ancient civilizations. The geodetic methods employed in Ancient Egypt and Mesopotamia laid the groundwork for more advanced techniques, marking the beginning of systematic spatial measurements that would evolve over time into modern geodesy.

## 2.2 Geodetic practices in Antiquity

### 2.2.1 Ancient Egypt and Mesopotamia

In Ancient Egypt, geodesy played a crucial role in maintaining agricultural systems and constructing monumental structures. Following the annual flooding of the Nile, land had to be redistributed, necessitating accurate measurements. The Egyptians used simple tools such as staffs and ropes to delineate boundaries (Figure 2). The Egyptian phrase for a surveyor was a “rope stretcher” and surveying was known as “stretching a rope”. For small-scale levelling, they likely employed an „A“-shaped tool with a plumb bob, while for larger areas they may have used water-filled channels. Straight lines were maintained with a ‘markhet’, a fixed plumb bob aligned with a staff or simple sighting

device (Paulson 2005). These methods were sufficiently precise to enable the construction of pyramids and temples with remarkable accuracy (Leonidov n.d.).

In addition to these practical tools, the ancient Egyptians also utilized astronomical observations for orientation. By observing the stars and the position of the sun, they were able to determine cardinal directions with impressive accuracy, aiding in land division and the alignment of architectural structures. This incorporation of celestial navigation marked an early intersection between astronomy and geodesy, a relationship that would continue to evolve throughout history. These astronomical techniques were crucial for ensuring that the structures, including temples and pyramids, were precisely aligned with the cardinal points.

In Mesopotamia, geodetic practices were primarily oriented toward the management of water resources and arable land. The development of irrigation systems and drainage infrastructure required precise measurement and planning, which led to the application of geometric principles and astronomical observations for boundary definition and spatial orientation.

### 2.2.2 Ancient Greece and Rome

The ancient Greeks made significant contributions to the development of geodesy through the introduction of systematic mathematical and geometric methods. Euclid,

## 2.2. Praktična geodezija u antici

### 2.2.1. Stari Egipat i Mezopotamija

U starom Egiptu, geodezija je igrala ključnu ulogu u održavanju poljoprivrednih sustava i izgradnji monumentalnih struktura. Nakon godišnjeg poplavlivanja Nila, zemljište je trebalo biti ponovno raspodijeljeno, što je zahtijevalo precizna mjerenja. Egipćani su koristili jednostavne alate poput štapova i užadi za označavanje granica i niveliranje terena (slika 2). Egipatski izraz za geodeta bio je "zatezač užeta", a geodetsko mjerenje bilo je poznato kao "zatezanje užeta". Za nivelman u malim razmjerima vjerojatno su koristili alat u obliku slova "A" s viskom, dok su za veća područja možda koristili kanale ispunjene vodom. Ravne linije održavale su se "markhetom", fiksnim viskom poravnatim s letvom ili jednostavnim uređajem za nišanje (Paulson 2005). Te metode bile su dovoljno precizne da omogućile izgradnju piramida i hramova s izvanrednom preciznošću (Leonidov n.d.).

Osim tih praktičnih alata, stari Egipćani su također koristili astronomska opažanja za orijentaciju. Promatrajući zvijezde i položaj Sunca mogli su odrediti kardinalne smjerove s impresivnom preciznošću, što je pomagalo u podjeli zemljišta i poravnavanju arhitektonskih struktura. Ta integracija nebeske navigacije označila je rani susret astronomije i geodezije, odnos koji će se nastaviti razvijati kroz povijest. Astronomske tehnike bile su ključne za osiguranje da su strukture, uključujući hramove i piramide, precizno poravnate s kardinalnim točkama.

U Mezopotamiji, geodetske prakse bile su uglavnom usmjerene na upravljanje vodnim resursima i obradivim zemljištem. Razvoj sustava za navodnjavanje i infrastrukture za odvodnju zahtijevao je precizno mjerenje i planiranje, što je dovelo do primjene geometrijskih principa i astronomska opažanja za određivanje granica i prostornu orijentaciju.

### 2.2.2. Stara Grčka i Rim

Stari Grci dali su značajan doprinos razvoju geodezije uvođenjem sustavnih matematičko-geometrijskih metoda. Euklid je u svom djelu *Elementi* formulirao temelje geometrije, koji su postali osnova za geodetska mjerenja. Eratosten je kasnije primijenio te principe za procjenu Zemljinog opsega, pokazujući praktičnu vrijednost geometrije u kartiranju i planiranju teritorija.

S druge strane, Rimljani su unaprijedili praktične aspekte geodezije. Koristili su instrumente poput grome za određivanje pravih kutova i horobata za mjerenje nagiba tijekom gradnje cesta i akvadukata. Te inženjerske



**Slika 3.** Antičke geodetske metode u Grčkoj i Rimu. Sliku izradio ChatGPT 25. travnja 2025.

**Fig. 3** Ancient geodesic methods in Greece and Rome. Image created by Chat GPT on April 25, 2025.

strukture zahtijevale su iznimnu preciznost – na primjer, održavanje konstantnog nagiba od približno 0,1 stupanj uzduž cijele duljine akvedukta. Tako je, već u antici, geodezija postala ključna disciplina nužna za razvoj infrastrukture i upravljanje teritorijem.

Utjecaj takvog praktičnog rada i teorije nastavio se nakon antike. Rimske metode za mjerenje nagiba i pravih kutova, na primjer, primjenjuju se i u suvremenoj geodeziji. Preciznost u definiranju kutova i nagiba pokazuje trajni utjecaj drevnih tehnika na današnju praktičnu geodeziju.

### 2.3. Srednjovjekovno razdoblje i formiranje znanstvene geodezije

Tijekom srednjeg vijeka, geodezija se razvijala uzduž dviju glavnih kulturnih linija – Zapadne Europe i islamskog svijeta. U kršćanskoj Europi, znanstveni napredak bio je ograničen zbog male rasprostranjenosti znanja i prevladavajućeg utjecaja vjerskih institucija. Nasuprot tome, znanstveni centri u islamskom svijetu svjedočili su intenzivnim istraživanjima mjerenja zemljišta, izradi karata i usavršavanju promatračkih instrumenata (Mercier 1994).

Između 8. i 13. stoljeća, muslimanski učenjaci dali su izniman doprinos geodeziji i geografiji. Jedna od najistaknutijih figura bio je Abū Rayhān al-Bīrūnī (973–1048),



**Fig. 4** Medieval geodesy: Developments in the Islamic World and Western Europe. Image created by Chat GPT on April 20, 2025.

**Slika 4.** Srednjovjekovna geodezija: razvoj u islamskom svijetu i zapadnoj Europi. Sliku izradio ChatGPT 20. travnja 2025.

in his work *Elements*, formulated the foundations of geometry, which became fundamental to geodetic measurements. Eratosthenes later applied these principles to estimate the Earth's circumference, demonstrating the practical value of geometry in mapping and territorial planning.

The Romans, in turn, advanced the practical aspects of geodesy. They employed instruments such as the groma for determining right angles and the chorobates for measuring slopes during the construction of roads and aqueducts. These engineering structures required exceptional precision—for example, maintaining a constant slope of approximately 0.1 degrees along the entire length of an aqueduct. Thus, even in antiquity, geodesy was established as a key scientific discipline essential for infrastructure development and territorial management.

The influence of these practices and theories extended far beyond antiquity. Roman methods for measuring slopes and right angles, for example, are still used in modern geodesy today. Their precision in defining angles and gradients demonstrates the lasting impact of ancient techniques on current geodetic practices.

### 2.3 Medieval period and the formation of scientific geodesy

During the Middle Ages, geodesy developed along two principal cultural lines—Western Europe and the Islamic world. In Christian Europe, scientific progress was hampered by limited dissemination of knowledge and the prevailing influence of religious institutions. In contrast, Islamic scientific centres witnessed intensive research on land measurement, mapmaking, and the refinement of observational instruments (Mercier 1994).

Between the 8th and 13th centuries, Muslim scholars made outstanding contributions to geodesy and geography. One of the most notable figures was Abū Rayhān al-Bīrūnī (973–1048), who applied triangulation and trigonometry to determine distances and elevations. In his work *Canon Mas'udicus*, he calculated the Earth's radius as approximately 6339.6 km—a value very close to modern measurements (Mercier 1994). Al-Bīrūnī also provided coordinates for over 600 settlements, deriving them from astronomical observations and geometric principles (Islam Wiki n.d.).

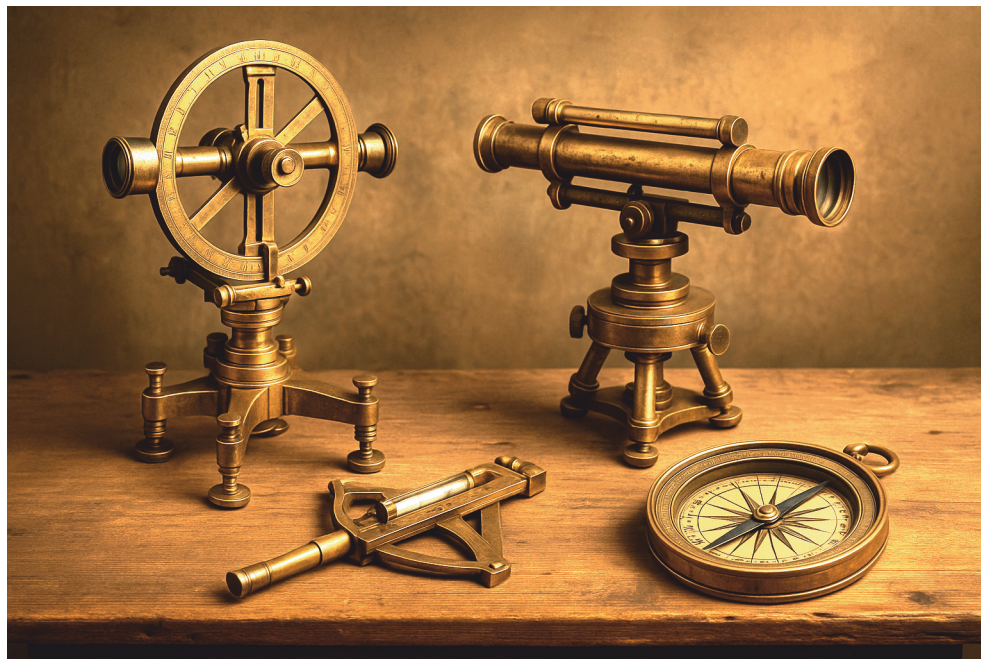
Another leading scholar of the period was Muḥammad ibn Mūsā al-Khwārizmī (c. 780–850), who compiled an extensive geographical treatise listing the coordinates of more than 2400 locations. His world map, built upon Ptolemaic foundations, was augmented with updated Arab data, reflecting a commitment to scientific precision and systematic organization (Swaeen n.d.).

Meanwhile, in Western Europe, geographical knowledge began a gradual revival. By the 13th century, the first portolan charts – nautical maps distinguished by their accuracy – appeared. These charts employed compass directions and inter-port distances, becoming essential navigational tools for Mediterranean and Atlantic mariners and marking a significant advance toward systematic European cartography (Fuechsel n.d.).

These contributions laid important foundations for the evolution of geodesy, with methods like triangulation and celestial navigation continuing to influence modern surveying and mapping techniques. The geographical knowledge and coordinate systems developed during this period eventually formed the basis for future advancements in geospatial sciences, particularly in the establishment of global positioning systems (GPS) and modern cartography.

### 2.4 The Renaissance and the emergence of the modern scientific approach in geodesy

During the Renaissance, significant advancements in geodesy and cartography were made, closely tied to the revival of the scientific approach based on observation,



**Slika 5.** Geodetski instrumenti u renesansi. Sliku izradio ChatGPT 20. travnja 2025.

**Fig. 5** Geodetic instruments in the Renaissance. Image created by Chat GPT on April 20, 2025.

koji je primijenio triangulaciju i trigonometriju za određivanje udaljenosti i nadmorskih visina. U svom djelu Canon Mas'udicus, izračunao je radijus Zemlje na približno 6339,6 km - vrijednost koja je vrlo bliska modernim mjerenjima (Mercier 1994). Al-Birūnī je također dao koordinate za više od 600 naselja, koje je izvodio iz astronomskih opažanja i geometrijskih principa (Islam Wiki n.d.).

Drugi vodeći znanstvenik tog razdoblja bio je Muḥammad ibn Mūsā al-Khwārizmī (oko 780–850), koji je sastavio opsežnu geografsku raspravu koja je uključivala koordinate za više od 2400 lokacija. Njegova karta svijeta, koja se temeljila na Ptolemejevim osnovama, bila je obogaćena ažuriranim arapskim podacima, što je odražavalo njegovu posvećenost znanstvenoj preciznosti i sustavnom organiziranju podataka (Swaen n.d.).

U međuvremenu, u zapadnoj Europi, geografsko znanje počelo je postupno oživljavati. Do 13. stoljeća pojavile su se prve portolanske karte - nautičke karte poznate po svojoj točnosti. Te karte koristile su smjerove kompasa i udaljenosti između luka, postajući ključni navigacijski alati za pomorce Sredozemlja i Atlantskog oceana, te su označile značajan napredak prema sustavnoj europskoj kartografiji (Fuechsel n.d.).

Ti su doprinosi postavili važne temelje za razvoj geodezije. Metode poput triangulacije i nebeske navigacije i danas utječu na suvremene tehnike geodetske izmjere

i kartiranja. Geografsko znanje i koordinatni sustavi razvijeni tijekom tog razdoblja postavili su temelje za budući napredak u geoprostornim znanostima, posebice u uspostavi globalnih pozicijskih sustava (GPS) i suvremene kartografije.

## 2.4. Renesansa i pojava modernog znanstvenog pristupa u geodeziji

Tijekom renesanse, ostvareni su značajni napreci u geodeziji i kartografiji, usko povezani s oživljavanjem znanstvenog pristupa temeljenog na opažanju, preciznosti i razvoju novih mjernih instrumenata. To je razdoblje svjedočilo stvaranju novih geodetskih alata i značajnim teorijskim postignućima koji su postavili temelje suvremene geodezije.

### 2.4.1. Pojava i razvoj ranih geodetskih instrumenata: teodolit, libela i kompas

Tijekom renesanse, napredak u prirodnim znanostima i primijenjenoj matematici doveo je do značajnog usavršavanja geodetskih instrumenata. Prekretnica tog razdoblja bio je razvoj teodolita. Do 16. i 17. stoljeća, teodolit je postao nezamjenjiv za triangulacijska mjerenja, omogućujući proizvodnju izuzetno preciznih kartografskih i

precision, and innovations in instruments. This era witnessed the creation of new geodetic tools and significant theoretical achievements, which laid the foundations for modern geodesy.

#### 2.4.1 Emergence and development of early geodetic instruments: theodolite, level, and compass

During the Renaissance, advances in the natural sciences and applied mathematics led to substantial refinement of geodetic instruments. A landmark achievement of this era was the development of theodolite. By the 16th and 17th centuries, theodolite had become indispensable for triangulation surveys, enabling the production of highly accurate cartographic and topographic data. This development laid the groundwork for modern surveying techniques, ensuring the precision required for large-scale mapping projects, which remain critical in the era of digital mapping and geographic information systems (GIS).

Concurrently, the introduction of precise levelling techniques inaugurated a new phase in elevation measurement, proving critical for the design and construction of infrastructure such as aqueducts, bridges, and roads. The ability to measure and adjust for elevation accurately was instrumental in the development of modern civil engineering.

Equally significant was the enhancement of the magnetic compass. While initially employed almost exclusively for maritime navigation, the Renaissance saw its adoption for terrestrial surveying as well, where it was used to determine azimuths and orient land parcels. This expanded the compass's role in cartography and geodetic practice, with its principles still influencing modern GPS and satellite-based navigation systems.

#### 2.4.2 Copernicus's heliocentric model and early geodetic expeditions

The formulation of the heliocentric model by Nicolaus Copernicus, published in his work *De revolutionibus orbium coelestium* in 1543, marked a turning point for both astronomy and geodesy. Although initially not widely accepted, the model laid the groundwork for rethinking the position of the Earth in the universe, questioning and then prevailing geocentric view established by Ptolemy. This conceptual shift necessitated a revision of observational and measurement methods, stimulating the development of more precise geodetic instruments and mapping techniques (Kuhn 1957). The recognition of Earth's place in a larger cosmos paved the way for more accurate measurements of the Earth's surface and motivated the adoption of more refined

methods, including the application of astronomical observations in geodesy.

The development of geometry during the Renaissance further contributed to the advancement of geodetic techniques, particularly in the realm of mapping. Martin Behaim (1459–1507) emerged as one of the leading cartographers of the period, making significant contributions to the creation of globes and maps based on scientific principles and precise measurements.

A particularly important figure in the development of cartographic science was Gerardus Mercator (1512–1594), who developed an innovative mapping system known as the Mercator projection. Designed to accurately represent angles, it proved to be invaluable in navigation. The Mercator projection became the standard for modern cartography and is still in use today. The systematic use of mathematical principles in this projection helped lay the groundwork for modern geodetic methods and navigation systems.

These geodetic achievements of the Renaissance demonstrate how the combination of precise measurement techniques with new geometric and astronomical concepts led to a qualitative leap in understanding and representing the Earth's surface. They not only supported the advancement of geographic discoveries but also changed the perception of Earth as part of a larger cosmic system.

## 2.5 The Industrial Revolution in geodetic methods

The Industrial Revolution brought about significant transformations in geodesy, driven by technological progress that expanded its practical applications. The rapid growth of railway networks and urban infrastructure required precise geodetic measurements for route planning, construction and mapping. Railway surveys not only supported transportation development but also laid the groundwork for advancements in geographic and topographic mapping.

In the 19th century, geodetic methods and instruments advanced notably, with improvements in measurement accuracy. The development of theodolites and levels enabled precise angular and elevation measurements, essential for widespread geodesic applications. Improved triangulation techniques and the introduction of geographic coordinate systems allowed for independent determination of latitude and longitude, greatly enhancing the accuracy and scalability of cartographic projects (Torge 2001). These advancements played a pivotal role in precise mapping and the development of navigational technologies, as well as in the design and construction of infrastructure networks such as railways and industrial facilities during the Industrial Revolution.

topografskih podataka. Taj razvoj postavio je temelje suvremenoj geodetskoj tehnici, osiguravajući preciznost potrebnu za velike projekte kartiranja, koji i dalje ostaju ključni u eri digitalnog kartiranja i geoinformacijskih sustava (GIS).

Istodobno, uvođenje preciznih tehnika niveliranja označilo je novu fazu u mjerenju visina, što je bilo ključno za projektiranje i izgradnju infrastrukture kao što su akvedukti, mostovi i ceste. Sposobnost preciznog mjerenja i prilagodbe visine bila je ključna za razvoj moderne građevinske inženjerske prakse.

Jednako značajno bilo je unapređenje magnetskog kompasa. Iako je prvotno bio korišten gotovo isključivo za pomorsku navigaciju, renesansa je donijela njegovo usvajanje i za terensko geodetsko mjerenje, gdje je korišten za određivanje azimuta i orijentaciju zemljišnih parcela. Tako se uloga kompasa proširila i na kartografiju i svakodnevnu geodetsku praksu, a njegovi principi i danas utječu na suvremene satelitske navigacijske sustave.

#### 2.4.2. Kopernikov heliocentrični model i rane geodetske ekspedicije

Formulacija heliocentričnog modela Nikole Kopernika, objavljena u njegovom djelu *De revolutionibus orbium coelestium* 1543. godine, označila je prekretnicu kako za astronomiju, tako i za geodeziju. Iako isprva nije bio široko prihvaćen, model je postavio temelje za ponovno razmatranje Zemljina položaja u svemiru dovodeći u pitanje tada prevladavajući geocentrični pogled koji je uspostavio Ptolomej. Ta konceptualna promjena zahtijevala je reviziju metoda promatranja i mjerenja, potičući razvoj preciznijih geodetskih instrumenata i tehnika kartiranja (Kuhn 1957). Shvaćanje Zemljina položaja u širem kozmosu otvorilo je put preciznim mjerenjima Zemljine površine te potaknulo prihvaćanje naprednijih metoda, uključujući primjenu astronomskih opažanja u geodeziji.

Razvoj geometrije tijekom renesanse dodatno je doprinijeo razvoju geodetskih tehnika, osobito u području kartiranja. Martin Behaim (1459–1507) bio je jedan od vodećih kartografa tog razdoblja, dajući značajan doprinos razvoju globusa i karata temeljenih na znanstvenim principima i preciznim mjerenjima.

Posebno važna figura u razvoju kartografske znanosti bio je Gerardus Mercator (1512–1594), koji je razvio inovativni sustav kartiranja poznat kao Mercatorova projekcija. Dizajnirana za točno prikazivanje kutova, pokazala se neprocjenjivom u navigaciji. Mercatorova projekcija postala je standard za modernu kartografiju i još uvijek se koristi. Primjena matematičkih principa u toj projekciji pomogla je postaviti temelje za moderne

geodetske metode i navigacijske sustave.

Ta geodetska postignuća renesanse pokazuju kako je kombinacija preciznih tehnika mjerenja s novim geometrijskim i astronomskim konceptima dovela do kvalitativnog skoka u razumijevanju i prikazivanju Zemljine površine. Ona nisu samo podržala napredak geografskih otkrića, već su također promijenila percepciju Zemlje kao dijela šireg kozmičkog sustava.

#### 2.5. Industrijska revolucija u geodetskim metodama

Industrijska revolucija donijela je značajne transformacije u geodeziji, potaknuta tehnološkim napretkom koji je proširio njezinu praktičnu primjenu. Brzi rast željezničkih mreža i urbane infrastrukture zahtijevao je precizna geodetska mjerenja za planiranje ruta, izgradnju i kartiranje. Željezničke izmjere ne samo da su podržale razvoj prometa, već su i postavile temelje za napredak u geografskom i topografskom kartiranju.

U 19. stoljeću, geodetske metode i instrumenti su napredovali, posebno u pogledu točnosti mjerenja. Razvoj teodolita i libela omogućio je precizna kutna i visinska mjerenja, koja su bila ključna za širu primjenu geodezije. Poboļšane tehnike triangulacije i uvođenje geografskih koordinatnih sustava omogućili su neovisno određivanje širine i dužine, što je uvelike poboljšalo točnost i mogućnost promjene mjerila kartografskih projekata (Torge 2001). Ta dostignuća bila su ključna za precizno kartiranje, razvoj navigacijskih tehnologija te projektiranje i izgradnju infrastrukturnih mreža poput željeznica i industrijskih objekata tijekom Industrijske revolucije.

#### 2.6. Geodezija u 20. stoljeću: navigacijske tehnologije i digitalna revolucija

U 20. stoljeću, geodezija je doživjela revolucionarni pomak – od mehaničkih i optičkih instrumenata prema elektroničkim i satelitskim tehnologijama. Taj prijelaz bio je potaknut napretkom u elektronici, računalnim znanostima i svemirskim istraživanjima. Tradicionalne metode poput niveliranja, tahimetrije i triangulacije postupno su bile nadopunjene – a u nekim slučajevima i zamijenjene – sustavima temeljenim na radio-valovima i satelitima, koji nude neusporedivu točnost i globalno pokriće.

##### 2.6.1. Prijelaz s mehaničkih na elektroničke metode

Uvođenjem elektroničkih instrumenata za geodetska mjerenja, kao što su elektronički tahimetri i uređaji za elektromagnetsko mjerenje udaljenosti



**Fig. 6** Geodesy and Industrial Progress in the 19th century. Image created by Chat GPT on April 17, 2025.

**Slika 6.** Geodezija i industrijski napredak u 19. stoljeću. Sliku izradio ChatGPT 17. travnja 2025.

## 2.6 Geodesy in the 20th century: navigational technologies and digital revolution

In the 20th century, geodesy experienced a revolutionary shift - from mechanical and optical instruments to electronic and satellite-based technologies. This transition was fuelled by advances in electronics, computer science, and space exploration. Traditional methods such as levelling, tacheometry, and triangulation were gradually supplemented - and in some cases replaced - by radio-wave and satellite systems, offering unparalleled accuracy and global coverage.

### 2.6.1 Transition from mechanical to electronic methods

The introduction of electronic surveying instruments, such as electronic tacheometers and electromagnetic distance measurement (EDM) devices, in the 1950s and 1960s marked a major breakthrough. These instruments significantly enhanced speed and accuracy in distance measurements by analysing the phase and travel time of electromagnetic waves. The development of automated data collection and processing systems during this period paved the way for the integration of satellite-based technologies in geodesy.

### 2.6.2 The creation and development of GPS

Building on advancements in electronic instruments, the next major breakthrough came from space-based navigation systems. The most significant innovation in modern geodesy is the creation of the Global Positioning System (GPS) - a project initiated by the U.S. Department of Defense in 1973 to develop a high-precision navigation system by integrating elements from earlier programs like TRANSIT and TIMATION (Smithsonian National Air and Space Museum n.d.). The first prototype satellite of the system, known as NAVSTAR GPS, was launched in 1978. The system became fully operational in 1995 and consists of a constellation of at least 24 active satellites in orbit, each broadcasting radio signals used to determine position, velocity, and time (Parkinson 1996).

With the expansion of GNSS (Global Navigation Satellite Systems), geodesists can now measure coordinates with centimetre-level accuracy in real time using techniques such as Real-Time Kinematic (RTK) positioning and achieve even higher accuracy through post-processed GNSS observations (Hofmann-Wellenhof et al. 2001). This capability allows for highly precise topographic mapping, monitoring tectonic movements, and geodetic surveys in engineering and construction.

### 2.6.3 Geodetic application of satellite technologies

In addition to GPS, geodesy also utilizes other Global Navigation Satellite Systems (GNSS), including:

- GLONASS (Russia)
- Galileo (European Union)
- BeiDou (China).

The integrated use of multiple GNSS constellations significantly enhances coverage, reliability, and measurement accuracy. This has broad applications in various industries such as transportation, agriculture, and environmental monitoring. Another important satellite-based technology in geodesy is Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR). InSAR enables the monitoring of surface deformations - including landslides, volcanic activity, and earthquake-induced ground movements - by measuring phase differences between radar images acquired over time (Massonnet 1998). The data collected through satellite technologies provides the foundation for a new wave of innovation in geodesy, particularly through the integration of artificial intelligence (AI) in processing this data. The new data processing and analysis capabilities provided by satellite technologies reflect the progress achieved in recent decades, with AI integration beginning to shape new paradigms in geodesy, starting in the late 1990s.

(EDM), tijekom 1950-ih i 1960-ih godina, došlo je do velikog napretka. Ti su instrumenti značajno poboljšali brzinu i točnost mjerenja udaljenosti analizirajući fazu i vrijeme putovanja elektromagnetskih valova. Razvoj automatiziranih sustava za prikupljanje i obradu podataka tijekom tog razdoblja otvorio je put za integraciju satelitskih tehnologija u geodeziji.

### 2.6.2. Stvaranje i razvoj GPS-a

Nadovezujući se na napredak u elektroničkim instrumentima, sljedeći veliki napredak došao je iz svemirskih navigacijskih sustava. Najvažnija inovacija u modernoj geodeziji je stvaranje globalnog pozicijskog sustava (GPS) – projekt koji je pokrenuo Odjel za obranu SAD-a 1973. godine s ciljem razvoja sustava visoke preciznosti, integrirajući elemente iz ranijih programa poput TRANSIT-a i TIMATION-a (Smithsonian National Air and Space Museum n.d.). Prvi prototip sustava satelita, poznat kao NAVSTAR GPS, lansiran je 1978. godine. Sustav je postao potpuno operativan 1995. godine i sastoji se od konstelacije od najmanje 24 aktivna satelita u orbiti, od kojih svaki odašilje radio signale koji se koriste za određivanje položaja, brzine i vremena (Parkinson 1996).

Širenjem GNSS-a (Globalni navigacijski satelitski sustavi), geodeti sada mogu mjeriti koordinate s točnošću na razini centimetra u stvarnom vremenu koristeći tehnike kao što je pozicioniranje u kinematičkom sustavu u stvarnom vremenu (RTK) i postići još veću točnost putem naknadno obrađenih GNSS promatranja (Hofmann-Wellenhof i dr. 2001). To omogućuje vrlo precizno topografsko kartiranje, praćenje tektonskih pokreta i geodetsku izmjeru u inženjerstvu i građevinarstvu.

### 2.6.3. Geodetske primjene satelitskih tehnologija

Osim GPS-a, geodezija također koristi druge globalne navigacijske satelitske sustave (GNSS), uključujući:

- GLONASS (Rusija)
- Galileo (Europska unija)
- BeiDou (Kina).

Zajednička uporaba više konstelacija GNSS-a značajno poboljšava pokrivenost, pouzdanost i točnost mjerenja. To ima široku primjenu u različitim industrijama, kao što su transport, poljoprivreda i praćenje okoliša. Druga važna satelitska tehnologija u geodeziji je interferometrijski sintetički radar (InSAR). InSAR omogućuje praćenje deformacija površine – uključujući klizišta, vulkansku aktivnost i pomake tla uzrokovane potresima – mjerenjem razlika faze između radarskih slika snimljenih tijekom vremena (Massonnet 1998). Podaci prikupljeni putem

satelitskih tehnologija osiguravaju temelj za novi val inovacija u geodeziji, posebno kroz integraciju umjetne inteligencije (AI) u obradi tih podataka. Nove sposobnosti obrade i analize podataka koje omogućuju satelitske tehnologije odražavaju napredak postignut posljednjih desetljeća, s time da je integracija AI-a počela oblikovati nove paradigme u geodeziji, počevši od kasnih 1990-ih.

### 2.7. Rana integracija umjetne inteligencije u geodeziju (1990–2000)

Tijekom 1990-ih, umjetna inteligencija (AI) počela je ostavljati svoj trag u različitim znanstvenim i industrijskim područjima, uključujući i geodeziju. To razdoblje obilježili su prvi pokušaji automatizacije geodetskih procesa, potaknuti brzim napretkom računalne tehnologije i obrade podataka. AI tehnologije, osobito strojno učenje i neuronske mreže, uvedene su radi poboljšanja analize podataka i automatizacije geodetskih zadataka. Rane primjene uključivale su razvoj algoritama za obradu i tumačenje geodetskih mjerenja, poboljšanje modeliranja terena te optimizaciju stvaranja i upravljanja geografskim informacijskim sustavima (GIS). Te inovacije postavile su temelje za naprednije tehnike temeljene na umjetnoj inteligenciji, omogućujući učinkovitiju obradu podataka i donošenje odluka u geodeziji.

#### 2.7.1. Početni pokušaji automatizacije geodetskih procesa

Jedan od glavnih ciljeva korištenja umjetne inteligencije (AI) u geodeziji tijekom 1990-ih godina bio je automatizirati procese mjerenja i povezane radne procese. Ta inicijativa obuhvatila je automatiziranu obradu GPS opažanja, očitavanja teodolita i satelitskih snimki. Razvoj naprednih algoritama optimizacije značajno je poboljšao točnost i učinkovitost tih procesa. Mnoge od tih tehnologija integrirane su u geografske informacijske sustave (GIS), koji su obrađivali i analizirali geoprostorne podatke kako bi pružili precizne rezultate za različite primjene.

Na primjer, AI algoritmi počeli su se primjenjivati u GPS geodeziji kako bi se poboljšala točnost 3D pozicioniranja. U kombinaciji s AI tehnikama kao što je strojno učenje, omogućili su određivanje položaja s točnošću na razini milimetara. Takvi napreci imali su velik doprinos u područjima geofizike, seizmologije i znanosti o prirodnim opasnostima, osobito u praćenju tektonskih pomaka i seizmičkih aktivnosti. Integracija AI-ja u GPS geodeziju označila je ključnu prekretnicu, jer je omogućila praćenje deformacija Zemljine kore s dotad neviđenom točnošću.

## 2.7 Early integration of Artificial Intelligence in geodesy (1990–2000)

In the 1990s, Artificial Intelligence (AI) began to make its mark across various scientific and industrial domains, including geodesy. This period saw the first attempts at automating geodetic processes, driven by the rapid advancements in computing and data processing technologies. AI technologies, particularly machine learning and neural networks, were introduced to enhance data analysis and automate geodetic tasks. Early applications included the development of algorithms for processing and interpreting geodetic measurements, improving terrain modelling, and optimizing the creation and management of Geographic Information Systems (GIS). These innovations laid the groundwork for more advanced AI-based techniques, enabling more efficient data handling and decision-making in geodesy.

### 2.7.1 Initial attempts at automating geodetic processes

One of the main goals of using Artificial Intelligence (AI) in geodesy during the 1990s was to automate measurement processes and associated workflows. This initiative encompassed the automated processing of GPS observations, theodolite readings, and satellite imagery. During this period, advanced optimization algorithms were introduced to significantly improve both the accuracy and efficiency of these processes. Additionally, many of these technologies were integrated into broader Geographic Information Systems (GIS), which processed and analysed geospatial data to deliver precise outputs for various applications.

For example, AI algorithms began to be applied to GPS geodesy to improve the precision of 3D positioning systems. When integrated with AI techniques such as machine learning, these systems helped accurately estimate positions with millimetre-level precision. Such advancements contributed significantly to the fields of geophysics, seismology, and natural hazard science, particularly in monitoring tectonic movements and seismic activities. The integration of AI into GPS geodesy marked a key milestone, enhancing the ability to track deformations in Earth's crust with great accuracy.

### 2.7.2 Application of geoinformation systems (GIS) for geodetic data analysis

Parallel to advancements in AI, Geographic Information Systems (GIS) also saw significant development during the 1990s, becoming an indispensable tool for managing and analysing geodetic data.

By the 1990s, GIS technology had evolved considerably and became a primary tool for processing geographic data and creating spatial models. During this period, GIS systems began incorporating AI algorithms for the automated collection, processing, and visualization of geodetic and geographic data. Although AI applications in GIS at that time were relatively rudimentary compared to today's systems, they significantly enhanced the precision and speed of data processing. GISs in the 1990s began integrating AI to improve spatial analyses, such as terrain feature analysis and predictions of changes in the Earth's surface.

A more recent example of GIS applications combined with AI is the use of these technologies in land-use and urban planning, particularly in the analysis of urban heat islands. In a study conducted in 2021, AI-powered GIS tools were used to analyse satellite images to identify urban heat islands in cities across China. The study leveraged deep learning algorithms integrated within GIS to predict heat distribution patterns, assisting urban planners in developing strategies to mitigate the effects of climate change on urban areas.

### 2.7.3 Opportunities for automation and optimization

The integration of AI in geodesy during the 1990s opened new possibilities for automation and optimization. AI technologies began to be employed for the creation of intelligent systems capable of analysing geodetic data and providing automated solutions for data processing. Although these early AI applications were not as advanced as today's methods, they laid the groundwork for more modern systems. A key development during this period was the creation of automated algorithms designed to optimize parameters in geodetic measurements, enabling the detection of errors and suggesting corrections in the data.

These early technologies were gradually integrated into geodetic instruments, enhancing the accuracy and speed of measurements. By laying this foundation, AI-based methods prepared the field for the major technological leap into fully automated and intelligent systems in the 21st century. The initial AI advancements in the 1990s set the stage for today's high-tech solutions, where intelligent automation and integrated systems have become essential.

Building on these early innovations, modern geodetic technologies now leverage real-time data analysis, automation, and cutting-edge applications, such as drone mapping and AI-powered surface monitoring. These advancements continue to reshape geodesy, driving it toward greater precision, efficiency, and real-time capabilities in the 21st century.

### 2.7.2. Primjena geoinformacijskih sustava (GIS) za analizu geodetskih podataka

Paralelno s razvojem umjetne inteligencije, geoinformacijski sustavi (GIS) tijekom 1990-ih doživjeli su značajan napredak, postajući nezamjenjiv alat za upravljanje i analizu geodetskih podataka.

Do tog razdoblja, GIS je evoluirao u primarni alat za obradu geografskih podataka i izradu prostornih modela. Tada su se počeli u GIS integrirati prvi algoritmi umjetne inteligencije s ciljem automatiziranog prikupljanja, obrade i vizualizacije podataka. Iako su primjene umjetne inteligencije u GIS-u u to vrijeme bile relativno osnovne u odnosu na današnje sustave, značajno su poboljšale preciznost i brzinu obrade podataka. GIS-ovi iz 1990-ih počeli su koristiti umjetnu inteligenciju za poboljšanje prostornih analiza, poput analize terenskih značajki i predviđanja promjena na Zemljinoj površini.

Noviji primjer GIS aplikacija kombiniranih s umjetnom inteligencijom je uporaba tih tehnologija u planiranju korištenja zemljišta i urbanom planiranju, posebice u analizi urbanih toplinskih otoka. U studiji iz 2021. godine, GIS alati potpomognuti umjetnom inteligencijom korišteni su za analizu satelitskih snimaka kako bi se identificirali urbani toplinski otoci u gradovima širom Kine. Integracijom metoda dubokog učenja omogućeno je predviđanje obrazaca raspodjele topline, čime se urbanim planerima pomaže u razvoju strategija za ublažavanje učinaka klimatskih promjena u urbanim sredinama.

### 2.7.3. Mogućnosti za automatizaciju i optimizaciju

Integracija umjetne inteligencije u geodeziji tijekom 1990-ih otvorila je nove mogućnosti za automatizaciju i optimizaciju. Tehnologije umjetne inteligencije počele su se koristiti za razvoj inteligentnih sustava sposobnih za analiziranje geodetskih podataka i pružanje automatiziranih rješenja za obradu podataka. Iako te rane primjene umjetne inteligencije nisu bile toliko napredne kao današnje metode, postavile su temelje za suvremene sustave. Ključni doprinos tog razdoblja bila je izrada algoritama za automatiziranu optimizaciju parametara u geodetskim mjerenjima, što je omogućilo preciznije prepoznavanje pogrešaka i predlaganje korekcija u podacima.

Te su rane tehnologije postupno integrirane u geodetske instrumente, čime su poboljšane točnost i brzina mjerenja. Postavljanjem takvih temelja, metode utemeljene na umjetnoj inteligenciji pripremile su teren za veliki tehnološki skok prema potpuno automatiziranim i inteligentnim sustavima u 21. stoljeću. Početni napretci iz 1990-ih oblikovali su temelje za današnja visoko-tehnološka

rješenja, u kojima su inteligentna automatizacija i integrirani sustavi postali neizostavni.

Nadovezujući se na te inovacije, suvremeni geodetski sustavi danas koriste analizu podataka u stvarnom vremenu, automatizaciju te najnovije metode, poput kartiranja dronovima i praćenja površina uz pomoć umjetne inteligencije. Takva poboljšanja nastavljaju oblikovati geodeziju, usmjeravajući je prema većoj preciznosti, učinkovitosti i mogućnostima primjene u stvarnom vremenu.

## 2.8. Suvremeni trendovi i inovativne tehnologije u geodetskoj praksi

U posljednjim desetljećima geodezija je prošla kroz značajne tehnološke transformacije, otvarajući nove mogućnosti za prikupljanje, obradu i analizu geoprostornih podataka.

### 2.8.1. Primjena dronova, LiDAR tehnologije, GNSS-a visoke preciznosti i automatiziranih procesa

Posljednjih godina, dronovi su postali sve prisutniji u geodeziji, nudeći uzbudljive nove mogućnosti za kartiranje, praćenje infrastrukture, analizu terena i prikupljanje podataka, osobito u teško dostupnim ili opasnim područjima. Kada su opremljeni tehnologijama GNSS-a i LiDAR sensorima, dronovi omogućuju prikupljanje visokorazlučivih prostornih podataka i izradu detaljnih digitalnih modela terena (Kovanič i sur. 2023). Na primjer, dronovi se sve češće koriste za izmjeru obalnih područja poput Kariba, gdje je nužno precizno nadzirati podizanje razine mora i obalnu eroziju. Slično tomu, u Japanu se LiDAR sustavi bazirani na dronovima koriste za izradu visoko razlučivih topografskih karata planinskih područja, što je ključno za predviđanje poplava i planiranje korištenja zemljišta.

Druga inovativna integracija robotike u geodeziju je upotreba platformi poput robota Spot tvrtke Boston Dynamics. Ta mobilna jedinica, opremljena 3D laserskim skenerima i autonomnim navigacijskim sustavima, olakšava prikupljanje geoprostornih podataka na gradilištima. Njihova primjena značajno poboljšava brzinu, sigurnost i preciznost geodetskih mjerenja, osobito u područjima koja su teško dostupna ili opasna za ljude (slika 7).

Tehnologija LiDAR-a, postala je jedan od temelja suvremenog geoprostornog kartiranja. Generiranjem trodimenzionalnih oblaka točaka, LiDAR omogućuje izuzetno precizna mjerenja topografskih značajki, pokrova vegetacije, izgrađene infrastrukture i drugih površinskih elemenata (Netrebina 2024). Ova sposobnost je ključna za



**Fig. 7** Laser scanning with Boston Dynamics' Spot robot. Image created by Chat GPT on April 28, 2025.

**Slika 7.** Lasersko skeniranje s robotom Spot tvrtke Boston Dynamics. Sliku izradio ChatGPT 28. travnja 2025.

## 2.8 Contemporary trends and innovative technologies in geodetic practice

In recent decades, geodesy has undergone significant technological transformations, opening up new possibilities for the collection, processing, and analysis of geospatial data.

### 2.8.1 Application of drones, LiDAR technologies, high-precision GNSS systems, and automated processes

In recent years, drones have become increasingly prominent in geodesy, offering exciting new possibilities for mapping, infrastructure monitoring, terrain analysis, and data collection, especially in remote or hazardous areas. When equipped with GNSS technologies and LiDAR sensors, drones can acquire high-resolution spatial data, enabling the generation of detailed digital terrain models (Kovanič et al. 2023). For example, drones are now widely used to survey coastal regions in places like the Caribbean, where rising sea levels and coastal erosion need to be carefully monitored. Similarly, in Japan, drone-based LiDAR systems are employed to create high-resolution topographic maps of mountainous regions, crucial for flood prediction and land-use planning.

Another innovative integration of robotics into geodesy is the use of platforms like Boston Dynamics' Spot robot. This mobile unit, equipped with 3D laser scanners and autonomous navigation systems, facilitates

the collection of geospatial data on construction sites. The use of such robots significantly improves the speed, safety, and precision of surveying, especially in environments that are challenging to access or hazardous to humans (Figure 7).

LiDAR technology has emerged as a cornerstone of contemporary geospatial mapping. By generating three-dimensional point clouds, LiDAR enables highly accurate measurements of topographic features, vegetation cover, built infrastructure, and other surface elements (Netrebina 2024). This capability is crucial for the collection of precise geodetic data over large areas, including detailed measurements of building and terrain elevations (Figure 8).

Modern GNSSs have evolved beyond their initial function as standalone navigation tools. Today, these systems are increasingly integrated with drone platforms, LiDAR sensors, and other complementary technologies to form highly sophisticated systems for precise positioning and navigation. This integration enables the real-time monitoring of dynamic processes, such as surface deformations, while also optimizing construction site management and supporting the efficient generation of up-to-date mapping products with consistently high accuracy.

In addition to geodesy, GNSSs have found extensive application in industries such as precision agriculture and mining. For example, GNSSs are used in precision agriculture for monitoring crop health and managing irrigation systems in regions like the Midwestern United States. GPS-guided tractors and other precision agriculture technologies are commonly used on large farms in states like North Dakota, Nebraska, and Iowa, helping optimize resources and manage irrigation more effectively (McVan 2023).

Similarly, in the mining industry in Australia, GNSS technologies are crucial for tracking equipment and surveying vast mining areas with high precision. Satellite positioning systems have helped improve the efficiency and safety of mining operations in Australia (Ali 2019).

### 2.8.2 Automated mapping using unmanned vehicles and satellite technology

Building upon the technological integrations discussed earlier, the next transformative development in geodesy is the automation of mapping processes. Drones equipped with GNSS receivers, cameras, or LiDAR scanners are now routinely employed for the automated surveying of terrain and urban environments, enabling the rapid generation of high-quality digital terrain models. These unmanned systems, due to their precision and versatility, have revolutionized the way mapping projects are conducted, enhancing both the speed and accuracy of data collection.

prikupljanje detaljnih geodetskih podataka na velikim područjima, uključujući mjerenja visina zgrada i visina terena (slika 8).

Moderni GNSS-ovi razvili su se izvan svoje početne funkcije samostalnih navigacijskih alata. Danas su sve češće integrirani s platformama bespilotnih letjelica, senzori ma LiDAR-a i drugim komplementarnim tehnologijama, stvarajući visoko sofisticirane sustave za precizno pozicioniranje i navigaciju. Ta integracija omogućuje praćenje dinamičnih procesa u stvarnom vremenu, poput deformacija površine, dok istovremeno optimira upravljanje gradilištima i podržava učinkovito generiranje ažuriranih kartografskih proizvoda s visokom razinom točnosti.

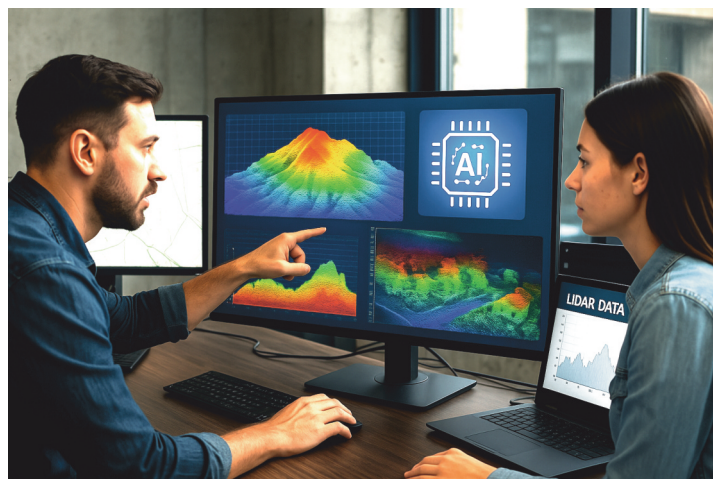
Osim u geodeziji, GNSS-ovi pronašli su široku primjenu u industrijama poput precizne poljoprivrede i rudarstva. Primjerice, u preciznoj poljoprivredi koriste se za praćenje zdravlja usjeva i upravljanje sustavima za navodnjavanje u regijama poput američkog srednjeg zapada. GPS-om navođeni traktori i druge tehnologije precizne poljoprivrede često se koriste na velikim farmama u saveznom državama poput Sjeverne Dakote, Nebraske i Iowe, čime se optimiraju resursi i učinkovitije upravlja navodnjavanjem (McVan 2023).

Slično tome, u industriji rudarstva u Australiji, tehnologije GNSS-a su ključne za praćenje opreme i geodetska mjerenja velikih rudarskih područja s visokom preciznošću. Satelitski pozicijski sustavi pomogli su u poboljšanju učinkovitosti i sigurnosti rudarskih operacija u Australiji (Ali 2019).

### 2.8.2. Automatizirano kartiranje pomoću bespilotnih letjelica i satelitske tehnologije

Na temelju ranije spomenutih tehnoloških integracija, sljedeća transformacijska faza u geodeziji je automatizacija procesa kartiranja. Dronovi opremljeni prijemnicima GNSS-a, kamerama ili skenerima LiDAR-a danas se rutinski koriste za automatizirano snimanje terena i urbanih sredina, omogućujući brzo generiranje visokokvalitetnih digitalnih modela terena. Ti bespilotni sustavi, zbog svoje preciznosti i svestranosti, revolucionirali su način na koji se provode projekti kartiranja, poboljšavajući brzinu i točnost prikupljanja podataka.

Osim toga, kombinacija satelitskih snimaka i podataka prikupljenim dronovima dodatno povećava točnost, učinkovitost i opseg projekata kartiranja. Ta sinergija omogućuje sveobuhvatno pokrivanje širokih i prethodno nedostupnih područja, dok istovremeno održava visoke standarde kvalitete podataka. Kombinacija satelitskih snimaka visoke rezolucije i podataka prikupljenih dronovima nudi snažan pristup kartiranju, osobito u izazovnim okruženjima poput gustih urbanih područja, udaljenih terena i područja pogođenih katastrofama.



**Slika 8.** Analiza podataka LiDAR-a uz pomoć AI tehnologija. Sliku izradio ChatGPT 19. travnja 2025.

**Fig. 8** Analysis of LiDAR Data with AI Technologies. Image created by Chat GPT on April 19, 2025.

Automatizacija je postala jedan od ključnih trendova u razvoju geodezije. Moderni softverski sustavi koji integriraju tehnologiju GNSS-a, satelitska opažanja, podatke s dronova i mjerenja LiDAR-om sada nude snažna, intuitivna rješenja za upravljanje i obradu velikih količina prostornih podataka (Li i dr. 2021). Osim što značajno smanjuju vrijeme i radnu snagu potrebnu za geodetske istražne radove, automatizirani radni tokovi poboljšavaju točnost mjerenja, smanjuju ljudske pogreške i na kraju omogućuju robusnije i pouzdanije rezultate kartiranja.

Automatizirano kartiranje već se pokazalo učinkovitim u regijama poput Bliskog istoka, gdje su u tijeku veliki infrastrukturni projekti, primjerice, pri širenju urbanih područja u Dubaiju. Bespilotni zračni sustavi (UAV), integrirani s tehnologijama dubokog učenja, sve se više koriste u Dubaiju za kartiranje poljoprivrednih područja, čime se poboljšava točnost i podupiru održive poljoprivredne prakse (Hoummaidi 2023). Slično tome, u udaljenim dijelovima Afrike, UAV-i su korišteni za kartiranje poljoprivrednih područja, podržavajući učinkovitost poljoprivrede i održive prakse korištenja zemljišta kroz preciznu poljoprivredu, kao što su pokazale nedavne studije u Južnoj Africi (Munghemezulu i dr. 2023).

### 2.8.3. Rad s velikim količinama prostornih podataka i integracija geoinformacija u modernu geodetsku praksu

S brzim razvojem novih tehnologija i alata za geoprostornu analizu, geodezija je postala područje koje upravlja ogromnim količinama podataka, često nazvanih

Moreover, the fusion of satellite imagery with drone-acquired data further enhances the accuracy, efficiency, and scale of mapping projects. This synergy allows for comprehensive coverage of extensive and previously inaccessible areas, while simultaneously maintaining high data quality standards. The combination of high-resolution satellite imagery and drone-based data collection offers a powerful approach to mapping, especially in challenging environments like dense urban settings, remote terrains, and disaster-stricken regions.

Automation has thus become a defining trend in the evolution of geodesy. Modern software platforms that integrate GNSS technologies, satellite observations, drone data, and LiDAR measurements now provide powerful, intuitive solutions for managing and processing large volumes of geospatial information (Li et al. 2021). In addition to substantially reducing the time and labour required for geodetic surveys, automated workflows improve measurement precision, minimize human error, and ultimately enable more robust and reliable mapping outcomes.

Automated mapping has already proven effective in regions like the Middle East, where large-scale infrastructure projects – such as urban expansion in places like Dubai – are underway. Unmanned aerial systems (UAS), integrated with deep learning technologies, are increasingly employed in Dubai for agriculture mapping, helping to enhance precision and support sustainable farming practices (Hoummaidi 2023). Similarly, in remote parts of Africa, UAVs have been utilized for mapping agricultural areas, supporting farming efficiency and sustainable land-use practices through precision agriculture, as shown in recent studies in South Africa (Munghemezulu et al. 2023).

### *2.8.3 Working with large volumes of spatial data and integrating geoinformation into modern geodetic practice*

With the rapid development of new technologies and tools for geospatial analysis, geodesy has increasingly become a field that handles vast volumes of data, commonly referred to as Big Data. The advent of satellite technologies, drones, and other advanced sensors has led to the creation of massive databases that require processing, storage, and analysis (Lansley et al. 2018). These developments have prompted the creation of new algorithms and platforms that enable the efficient management and integration of this data, facilitating more comprehensive geospatial analysis.

The integration of diverse types of geospatial information – from satellites, drones, and traditional

geodetic measurements – has unlocked new opportunities for creating accurate, up-to-date maps and models of the Earth's surface. This is particularly crucial in applications such as natural disaster monitoring, infrastructure planning, and environmental management. For example, real-time satellite and drone data are increasingly used for monitoring climate changes, urban sprawl, and the effects of natural disasters like floods and earthquakes.

Geodesy has undergone a dynamic evolution – from traditional measurement techniques to the implementation of cutting-edge solutions based on satellite systems, automation, and artificial intelligence. Technologies such as GNSS, LiDAR, unmanned aerial vehicles, and geoinformation systems (GIS) have significantly enhanced the precision, efficiency, and capabilities of geodetic practices (Leick et al. 2015; Hristov 2024). These advancements have not only improved data collection and processing but also provided a foundation for the development of new methods for analysing and interpreting spatial data.

The introduction of AI and machine learning algorithms has further expanded the potential of geodesy by enabling intelligent processing, interpretation, and prediction of spatial data. These algorithms facilitate better decision-making and forecasting, particularly in critical areas such as infrastructure development, environmental monitoring, and urban planning (Mrówczyńska 2011; Li et al. 2024). With these technological advances, geodesy has become a cornerstone for sustainable development, scientific research, and the efficient management of resources. It now plays an indispensable role in shaping the future of geospatial applications.

Geodesy 4.0 represents the culmination of these technological strides – a convergence of automation, real-time analytics, and intelligent systems. It marks a shift from traditional surveying to a dynamic, data-driven science that redefines how spatial information is collected, interpreted, and applied.

## **3 Conclusion**

In conclusion, geodesy has undergone a profound transformation, evolving from the geometric principles of Euclid and early mechanical tools to today's advanced digital and autonomous systems. The progression from manual surveying methods to satellite-based positioning, LiDAR, drones, and real-time GNSS technologies has significantly enhanced accuracy, efficiency, and applicability. Building on these foundations, the integration of artificial intelligence marks a

Big Data. Pojava satelitskih tehnologija, dronova i drugih naprednih senzora dovela je do stvaranja opsežnih baza podataka koje zahtijevaju učinkovitu obradu, pohranu i analizu (Lansley i dr. 2018). Ti su razvojni koraci potaknuli stvaranje novih algoritama i platformi koje omogućuju učinkovito upravljanje i integraciju tih podataka, olakšavajući sveobuhvatniju geoprostornu analizu.

Integracija različitih vrsta geoprostornih podataka – satelitskih opažanja, podataka prikupljenih dronovima i tradicionalnih geodetskih mjerenja – otvorila je nove mogućnosti za izradu preciznih, ažuriranih karata i modela Zemljine površine. To je osobito važno u primjenama kao što su praćenje prirodnih nepogoda, planiranje infrastrukture i upravljanje okolišem. Na primjer, podaci u stvarnom vremenu satelitima i dronovima sve se više koriste za praćenje klimatskih promjena, širenje gradova i učinke prirodnih katastrofa poput poplava i potresa.

Geodezija je prošla dinamičan razvoj – od tradicionalnih mjernih tehnika do implementacije najnovijih rješenja temeljenih na satelitskim sustavima, automatizaciji i umjetnoj inteligenciji. Tehnologije poput GNSS-a, LiDAR-a, bespilotnih letjelica i GIS-a značajno su poboljšale točnost, učinkovitost i sposobnosti geodetskih praksi (Leick i dr. 2015, Hristov 2024). Ta poboljšanja ne samo da su unaprijedila prikupljanje i obradu podataka, već su također postavila temelje za razvoj novih metoda za analizu i tumačenje prostornih podataka.

Uvođenjem algoritama umjetne inteligencije i strojnog učenja proširen je potencijal geodezije omogućujući inteligentnu obradu, tumačenje i predviđanje prostornih podataka. Ti algoritmi omogućuju bolje donošenje odluka i prognoze, osobito u kritičnim područjima poput razvoja infrastrukture, praćenja okoliša i urbanog planiranja (Mrówczyńska 2011, Li i dr. 2024). Zahvaljujući tim tehnološkim napretcima, geodezija je postala kamen-temeljic održivog razvoja, znanstvenog istraživanja i učinkovitog upravljanja resursima. Danas igra nezamjenjivu ulogu u oblikovanju budućnosti geoprostornih aplikacija.

Geodezija 4.0 predstavlja vrhunac tehnoloških napredaka – konvergenciju automatizacije, analitike u stvarnom vremenu i inteligentnih sustava. Označava pomak od tradicionalnog mjerenja prema dinamičnoj, podacima vođenoj znanosti koja redefinira način prikupljanja, interpretacije i primjene prostornih informacija.

### 3. Zaključak

Zaključno, geodezija je prošla kroz duboku transformaciju, evoluirajući od geometrijskih principa Euklida i ranih mehaničkih alata do današnjih naprednih digitalnih



**Slika 9.** Analiza podataka LiDAR-a uz pomoć AI tehnologija. Sliku izradio ChatGPT 19. travnja 2025.

**Fig. 9** Analysis of LiDAR Data with AI Technologies. Image created by Chat GPT on April 19, 2025.

i autonomnih sustava. Razvoj od ručnih metoda mjerenja do pozicioniranja putem satelita, LiDAR-a, dronova i GNSS-a u stvarnom vremenu značajno je povećao točnost, poboljšao učinkovitost i proširio primjenjivost. Osnajena tim osnovama, integracija umjetne inteligencije označava novu eru – Geodeziju 4.0 – koja je karakterizirana automatiziranom analizom podataka, dinamičkim praćenjem okoliša i prediktivnim modeliranjem. Ta evolucija ne samo da redefinira opseg i utjecaj geodezije, već također jača njezinu ključnu ulogu u suočavanju s današnjim znanstvenim, okolišnim i društvenim izazovima. Kako geodezija nastavlja integrirati najnovije tehnologije, ona postaje izvrstan primjer kako se drevne znanosti prilagođavaju i razvijaju u doba inovacija.

### Izjava o upotrebi umjetne inteligencije

Tijekom pisanja rukopisa, izrade slika te prikupljanja i analize podataka, autorica je koristila ChatGPT 4.0 u razdoblju ožujak–travanj 2025. godine. Autorica snosi punu odgovornost za sadržaj rukopisa, uključujući dijelove generirane pomoću alata umjetne inteligencije, te je u cijelosti odgovorna za eventualno kršenje etičkih načela znanstvenog objavljivanja.

new era – Geodesy 4.0 – characterized by automated data analysis, dynamic environmental monitoring, and predictive modelling. This evolution not only redefines the scope and impact of geodesy but also reinforces its essential role in addressing contemporary scientific, environmental, and societal challenges. As geodesy continues to integrate cutting-edge technologies, it stands as a prime example of how ancient sciences adapt and thrive in the age of innovation.

## Disclosure

When writing the manuscript, creating images, and collecting and analysing data, the author used ChatGPT 4.0 in the period March-April 2025. The author is fully responsible for the content of the manuscript, even for those parts generated by an artificial intelligence tool and is therefore responsible for any violation of publication ethics.

## References / Literatura

- Abdullatif M (2011) *Al-Battani Contributions in Astronomy and Mathematics*. IIUM Press
- Ali U (2019) Eye in the sky: How satellite positioning could help Australian mines. *Mining Technology*. <https://www.mining-technology.com/features/eye-in-the-sky-how-satellite-positioning-could-help-australian-mines/> (Accessed 28 Apr 2025)
- Fuechsel CF (n.d.) The Middle Ages. In *History of cartography*. Encyclopaedia Britannica <https://www.britannica.com/science/map/The-Middle-Ages> (Accessed 16 Apr 2025)
- Geomedia (2009) History of geodesy. <https://www.geomedia.bg/geodesia/istoriya-na-geodeziyata-2/> (Accessed 16 Apr 2025)
- Hofmann-Wellenhof B, Lichtenegger H, Collins J (2001) *Global Positioning System: Theory and Practice*, 5th ed. Springer 382
- Hoummaidi L, Larabi A, Alam K (2023) Using unmanned aerial systems and deep learning for agriculture mapping in Dubai. In *Drones - Various Applications*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.1002436> (Accessed 27 Apr 2025)
- Hristov E (2024) Interview with eng. Ivan Belchev, founder of Aerodata Bulgaria Ltd., on LiDAR technologies. *Vestnik Stroitel Stroitel* (Accessed 20 Apr 2025)
- Islam Wiki (n.d.) Geography and cartography in medieval Islam. [https://islam.fandom.com/wiki/Geography\\_and\\_cartography\\_in\\_medieval\\_Islam](https://islam.fandom.com/wiki/Geography_and_cartography_in_medieval_Islam) (Accessed 20 Apr 2025)
- Kovanič L, Topitzer B, Peřovský P, Blišťan P, Gergeřov MB, Blišťanov M (2023) Review of Photogrammetric and Lidar Applications of UAV. *Applied Sciences*, 13(11):6732. <https://doi.org/10.3390/app13116732> (Accessed 29 Apr 2025)
- Kuhn TS (1957) *The Copernican revolution: Planetary astronomy in the development of Western thought*. Harvard University Press, Cambridge, MA
- Lansley G, de Smith M, Goodchild M, Longley P (2018) *Big Data and Geospatial Analysis*. arXiv preprint. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1902.06672> (Accessed 28 Apr 2025)
- Leick A, Rapoport L, Tatarnikov D (2015) *GPS Satellite Surveying* (4th ed.). John Wiley & Sons, Hoboken, NJ
- Leonidov R (n.d.) *Архитектура древнего Египта / Ancient Egypt – Roman Leonidov's architectural bureau* <https://leonidov.com/history-egypt> (Accessed 16 Apr 2025)
- Li H, Huang W, Zha Z, Yang J (2021) Application and platform design of geospatial big data. *The International Archives of the Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences XLIII-B4-2021* 293-300
- Li W, Arundel S, Gao S, Goodchild MF, Hu Y, Wang S, Zipf A (2024) GeoAI for science and the science of GeoAI. *Journal of Spatial Information Science*, 29, 1–17. <https://doi.org/10.5311/JOSIS.2024.29.349> (Accessed 2 May 2025)

- Madzhdrakov M, Ivanova I (2014). Geodesy: General geodesy (Textbook for Bachelor's degree students in Geodesy). Shumen University Press "Bishop Konstantin Preslavski." [https://benov.org/wp-content/uploads/2014/09/Uchebnik\\_final\\_1.pdf](https://benov.org/wp-content/uploads/2014/09/Uchebnik_final_1.pdf) (Accessed 16 Apr 2025)
- Massonnet D, Feigl KL (1998) Radar interferometry and its application to changes in the Earth's surface. *Reviews of Geophysics* 36(4) 441–500
- McVan M (2023) Graphic: Precision agriculture technologies most common on big farms in Midwest. *Investigate Midwest* <https://investigatemidwest.org/2023/04/13/graphic-precision-agriculture-technologies-most-common-on-big-farms-in-midwest/> (Accessed 28 Apr 2025)
- Mercier RP (1994) Chapter 8. Geodesy. In Harley JB, Woodward D (eds) *The history of cartography, Volume 2, Book 1: Cartography in the traditional Islamic and South Asian societies*. University of Chicago Press 175–188
- Mrówczyńska M (2011) Neural networks and neuro-fuzzy systems applied to the analysis of selected problems of geodesy. *Computer Assisted Mechanics and Engineering Sciences*, 18(3) 161–173
- Munghemezulu C, Mashaba-Munghemezulu Z, Ratshiedana PE, Economon E, Chirima G, Sibanda S (2023) Unmanned Aerial Vehicle (UAV) and Spectral Datasets in South Africa for Precision Agriculture. *ResearchGate*. [https://www.researchgate.net/publication/371155803\\_Unmanned\\_Aerial\\_Vehicle\\_UAV\\_and\\_Spectral\\_Datasets\\_in\\_South\\_Africa\\_for\\_Precision\\_Agriculture](https://www.researchgate.net/publication/371155803_Unmanned_Aerial_Vehicle_UAV_and_Spectral_Datasets_in_South_Africa_for_Precision_Agriculture) (Accessed 28 Apr 2025)
- Netrebina YS, Popov BA, Verbitckaya LV (2024) On the use of air laser scanning technology in geodesy. In *Joint Innovation – Joint Development, Part 3: Proceedings of the Foreign International Scientific Conference*. Harbin, China: HNRI "National Development" in cooperation with PS of UA 12-17. [https://www.researchgate.net/publication/377510397\\_ON\\_THE\\_USE\\_OF\\_AIR\\_LASER\\_SCANNING\\_TECHNOLOGY\\_IN\\_GEODESY](https://www.researchgate.net/publication/377510397_ON_THE_USE_OF_AIR_LASER_SCANNING_TECHNOLOGY_IN_GEODESY) (Accessed 30 Apr 2025)
- Parkinson BW, Enge P, Axelrad P, Spilker JJ Jr (1996) *Global Positioning System: Theory and Applications, Volume II*. American Institute of Aeronautics and Astronautics, Washington, DC
- Paulson J (2005) From Pharaohs to Geoinformatics, FIG Working Week 2005 and GSDI-8, Cairo, Egypt April 16-21, 2005, WSHS 2 – Ancient Egypt, WSHS2.2 Surveying in Ancient Egypt, 1-12
- Smithsonian National Air and Space Museum (n.d.) GPS begins: Time and navigation – The untold story of getting from here to there <https://timeandnavigation.si.edu/> (Accessed 21 Apr 2025)
- Swaen P (n.d.) Islamic cartography. Paulus Swaen Rare Antique Maps & Prints. <https://www.swaen.com/articles-about-maps/islamic-cartography> (Accessed 20 Apr 2025)
- Torge W (2001) *Geodesy* (3rd ed.) Walter de Gruyter