

**CONCEPT OF SPATIAL COORDINATE SYSTEMS, THEIR DEFINING AND IMPLEMENTATION AS A PRECONDITION IN GEOSPATIAL APPLICATIONS**

ZORAN NEDELJKOVIĆ<sup>1</sup>, ALEKSANDAR SEKULIĆ.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*University of Belgrade, Faculty of Civil Engineering, Department of geodesy and geoinformatics, Bulevar kralja Aleksandra 73, 11000 Belgrade, Serbia*

**Abstract:** There are many users of spatial information, and quite large interest about the nature and genesis of such information. Different users found spatial information in the form of maps, plans or alphanumerical tables. Recently, there are more often in the form of spatial databases, and in the form of geographic information systems. What is behind these spatial data? On what foundation are they designed? In this article we look at the basic aspects of space, dimensionality and global coordinate systems in applications of global geospatial research. Here is explained the definition of the coordinate system as an abstract entity and, consequently, its implementation or establishment in the form of a geodetic reference frame, as real geodetic reference network. The applicative aspect of coordinate systems in this article is emphasized through recommendations and considerations during usage of their different implementations.

**Key words:** Earth, coordinate system, geodetic datum, reference frame, ellipsoid, geoid, ITRF, GNSS

**Concept of space and dimensionality**

Scientific debate about what is space and how to understand it dates back to the ancient Greek philosophers. The famous Plato, Socrates and Aristotle in his writings mentioned the term 'space' (anc. Gk. Χώρα / khôra) and the concept of 'place' (Gk. Τόπος / topos). First setting of this philosophical, metaphysical and mathematical concept (Michael, 2007), was brought in the 17th century, during Renaissance. First foundations of a modern space understanding have been profiled since then. Newton, Leibniz, Kant and many others considered this question (O'Connor and Robertson). Newton formulated the space as 'absolute', in the sense that it exists permanently and independently of whether there is any matter in the space or movement through it (French and Ebison 1986). This definition is perhaps closest to the general understanding of space. Basic postulates of Euclid about point, line and plane, in his voluminous work in thirteen books "Elements" (anc. Gk.: Στοιχεῖα-Stiheia), axiomatically define Euclidean geometry. This is finally the foundation of today's understanding of three-dimensional Euclidean space, which provides basic settings in research of almost all geosciences (Figure 1). The term and idea of space is nearly connected with their dimensionality. It can be said that the concept of dimensionality depends of specific research areas. In physics and mathematics, space dimensionality is

---

<sup>1</sup> E-mail: [nzoran@grf.bg.ac.rs](mailto:nzoran@grf.bg.ac.rs)

Article history: Received 15.03.2016 ; Accepted: 29.03.2016

The support of this study was made through Ministry of Education, Science and Technological Development of the Republic of Serbia (Project No. III 47014).

defined informally as a minimal number of parameters, necessary to determine completely and unambiguously the position of the point in such space. Straight line or curve is one-dimensional space, because it's used just one coordinate for entirely determined point position. Plane, cylinder or sphere surface are examples of two-dimensional space. Two coordinates determine the position of points in such space, the latitude and longitude for example. Sphere or cube, along with their interior, are examples of three-dimensional space.

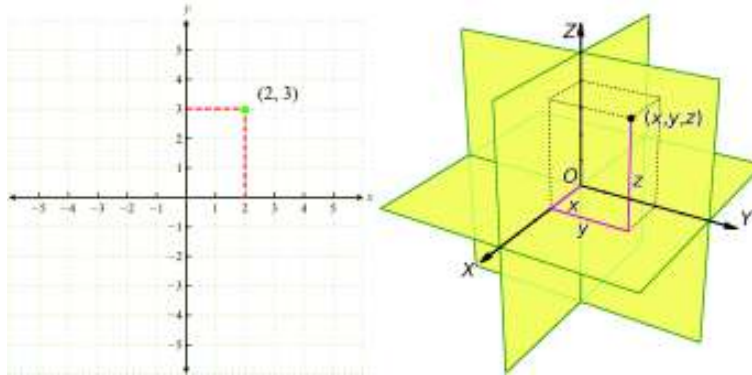


Figure 1. Two-dimensional and three-dimensional Cartesian coordinate system

In classical mechanics, space and time are different categories, and the concept of Universe is defined as a four-dimensional space. In quantum mechanics the space-time entity is observed integrally, as infinite dimensional feature, where space and time are mutually intertwined. Geospatial and engineering applications, defines the space usually in three dimensions, according to the Euclidean paradigm of rectangular coordinate system. It is often considered the time parameter, when are observed temporal changes in the space. The time can't be treated like fourth dimension, as in classical or quantum mechanics, but more like an added value. When the space and its dimensionality are clearly defined and understood, then they require an appropriate coordinate system. The coordinate system can be defined, according to use, at the micro level-locally, or at the universal level-globally. Geospatial studies are usually focused on the phenomena and processes that treat the Earth as a global object, like a general geographic area. On the other hand, the construction and engineering projects usually takes a small local area. Today's technology allows a relatively simple use of globally defined coordinate systems. Satellite technology, by its operation characteristics provides such benefit. There are emphasized two key components that characterize the coordinate system as an entity: the definition of the coordinate system and its realization. The terms originate from astronomy, astrophysics and geophysics, generally from most of sciences about the Earth and Cosmos.

### Defining global reference coordinate system-imaginary model

The definition of the coordinate system is based on the abstraction about the observed object and recognition of its form and its behavior in space and time (Kovalevsky and Mueller 1981). In the Universe, where a constant movement and general positional relativity are recognized, the coordinate system has a role to provide provisional and limited in its domain, an illusion of absolute spatial positions. The definition the coordinate system is an imagination about the targeted object of the research. So, to define a coordinate system is nothing more than to imagine or to state a logical and abstract idea. Also, the coordinate system definition must take into account the needs of all current and future tasks that would

eventually be covered. Usually, coordinate system is defined as a rigid structure that does not change over time (relative to the target object), especially not geometrically.

### **How do we imagine the Earth?**

If we ignore historical and mythical assumptions, the Earth is seen like a ball-shaped celestial body, that almost uniformly rotates around its axis and, together with the Moon, its natural satellite, orbiting around the Sun. Geological and geophysical research, and also constant volcanic and seismic activity, provides legitimacy to consider the Earth's interior as a fluid of fairly viscous nature. This is especially valid for zones deeper than 150 kilometers. Earth's approximate sphere radius is about 6400 kilometers. Solid crust of Earth, in comparison with that radius is quite small. If we look at the world's oceans and seas, there is an enormous disparity in land and water surfaces. These facts fully justify the view of the Earth as an elastic, fluid, i.e. viscous body in the Cosmos. The idea of various forces influence to the elastic body, and consequently the formation of such a body shape, then has a really reasonable legitimacy. So, the Earth has flattened shape due to the effect of centrifugal force of rotation, and that phenomenon is fully complying with Newton's classical theory of gravitation. Isaac Newton wrote in his major work "Mathematical Principles of Natural Philosophy", Book III, Proposition XX, (lat. *Philosophiae naturalis principia mathematica*): "The Earth is higher under the equator than at the poles and that by an excess of about 17 miles..." (Van Sickle, 2010).

### **Geoid and ellipsoid as a possible Earth's figures**

When we have in mind the specific characteristics of the Earth, it appears the question: how do the best approximation of its shape and how to define its global reference coordinate system? Having in mind unequal density of the various zones in the Earth's interior, we can talk about an irregular geometric distribution and intensity of the gravity force. If, for a moment, we forget the topography, the Earth can be represented as imaginary, undulating closed surface, on which the potential of the gravity force have a constant value. Such equipotential surface is called the geoid, and it is the first approximation that reflects the spatial shape of the Earth and geophysical characteristics. The geoid is the surface that is closest to the mean sea level surface in ideal conditions, with no waves and tides effects. Although theoretically is completely valid concept, geoid is not clear mathematically formulated surface. So, the computational complexity of the practical applications is quite large. Another approximation of Earth is a flattened ellipsoid or spheroid, obtained by rotating ellipse around its minor axis (Figure 2). Ellipsoid is entirely mathematically formulated figure in space, which allows a variety of practical applications and scientific research.



**Figure 2. Exaggerated pictures of geoid and flattened ellipsoid**

## Coordinate system models

### Three-dimensional Cartesian orthogonal coordinate system-orthogonal trihedron model

A simple way to clearly determine position everywhere on the Earth's surface is to use a three-dimensional Cartesian coordinate system (Seeger, 1999) The following features define such a geodetic coordinate system (Figure 3):

- The origin of the system coincides with the Earth's center of mass,
- Z-axis coincides with the axis of the Earth's rotation and its positive direction passes through the north pole,
- X-axis lies in the plane of prime, Greenwich meridian and it is perpendicular to the previous axis,
- The Y-axis with the two previous makes the right-handed system orientation.

The coordinates X, Y and Z determine each point in space, in such a defined coordinate system. Such defined trihedron (Petit and Luzum, 2010) determines the entity which International Earth Rotation and Reference Systems Service (IERS), denotes as International Terrestrial Reference System (ITRS). The spatial reference system rotates together with Earth and corresponds to all daily movements in space, with coordinate origin close to geocenter. The term 'geocentric' indicates the center of mass of the entire Earth system, including the oceans and mass of the atmosphere. For continuity with the previous terrestrial reference system, according to the Resolution 2, of the International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG) in 1991, its formulation is very close to the middle equator in 1900 and Greenwich meridian. So, when defined coordinate system is observed in this way, we can't ignore the fact that it is a rectangular Descartes coordinate system model, which includes Euclidean three-dimensionality and classical Newton's postulates about space and gravity. The notation 'Descartes' in various articles can usually be found as Cartesian, as a result of the name translation of the famous French mathematician and philosopher Rene Descartes (Fr. René Descartes), in Latin as: Renatus Cartesius. Often for this coordinate system we find in the literature the term Earth Centered-Earth Fixed (ECEF), which represents the Conventional Terrestrial System (CRS). Through the system name is described its nature and definition: geocentric and rotate together with Earth. Its axis complies with the directions of the International Reference Pole (ERP) and International Reference Meridian (IRM), which are fixed to the Earth itself.

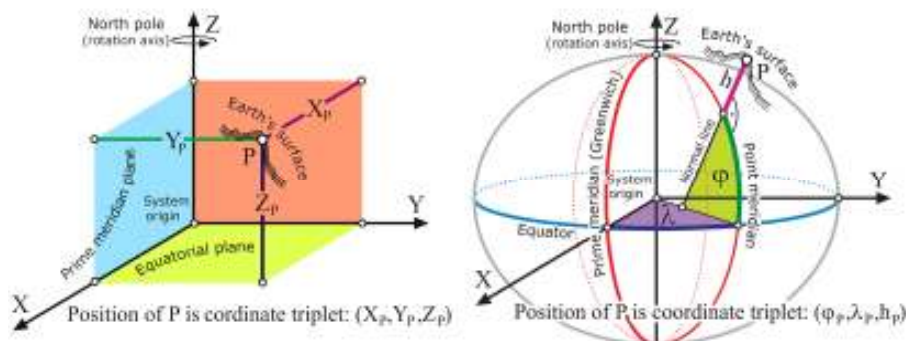


Figure 3. Rectangular Descartes trihedron and ellipsoidal coordinate system

## Ellipsoid coordinate system model

Approximation of the Earth with ellipsoid, give the opportunity to represent previously defined coordinate systems in an ellipsoidal, so called geographical model (Figure 3). We can place the ellipsoid within the Earth and within the geoid. This can be done in such a way to best represent figure of the Earth. Thus, the point position can be determined with latitude, longitude, and height above or below the ellipsoid surface. These are the so-called ellipsoid or geographic coordinates: latitude, longitude, and ellipsoid height  $(\varphi, \lambda, h)$ . Latitude  $\varphi$  is an angle in the plane of point meridian, measured from the equator plane to the straight line, which is perpendicular to the ellipsoid and passes through the observed point. Longitude  $\lambda$  is the angle in the plane of equator, measured from the prime meridian, usually Greenwich meridian, to the observed point meridian. Ellipsoid height  $h$  is the strait distance from the ellipsoid surface to the observed point, measured along a line perpendicular to the ellipsoid. Ellipsoid coordinates defined like this are called geodetic, unlike geocentric latitude, longitude and height whose values are based on the straight line that passes through the center of the ellipsoid. As opposed to the rectangular coordinates X, Y and Z, the geographical model, gives more natural information about location, and also the possibility of separating the horizontal and vertical position. Almost everyone who deals with spatial exploration could easily recognize where is a specific geographic area, simply by observing the coordinates. There are mathematical relations between the coordinates of the points that have been expressed by one or another coordinate system model. Conversion of coordinates from rectangular to the ellipsoid model is mutually unambiguous, so-called 'biunivocal' relation. Both models essentially determined the same thing, with few specific tendencies. The first Cartesian model indicates to the dimensionality of space. Ellipsoid model pointing to the shape of the Earth's figure and allows the choice between integrated or separated treatment of horizontal and vertical positions. Ellipsoid model is used in the gravity field research and, consequently, in defining the heights coordinate system. Also, the aspect of cartographic applications is still more easily implemented, using geographic coordinate system.

## Local ellipsoids

Historically, the ellipsoid model of the Earth's coordinate system is maybe older than the Cartesian, because of application reasons. At the beginning times of modern geodetic practice, definition of the reference coordinate system came together with its implementation, or immediately after it. At first were performed measurements, and according to results, were brought conclusions about ellipsoid and the coordinate system. Measurements are carried out on a smaller or relatively limited area and it was not possible to determine precise position of the ellipsoid center according to geocenter. It was important for the ellipsoid to be best suited to the local territory, in which its use is planned. So, there are a lot of different ellipsoids used today, in different regions of the world, like an historical legacy. Not only their dimensions vary significantly, but for obvious reasons, also theirs spatial positions are mutually different (Table 1). The historical legacy of local ellipsoids, and their reference coordinate systems, now plays a multiple role. On the first place can be recognized their positive historical importance for the surveying profession. On the other hand, the existence of local ellipsoids and their associated enormous cartographic material requires very extensive and complex tasks of transition. This is especially important today, when is very rapid development of scientific research based on satellite technology. Also, technology of Geographic Information Systems (GIS), work with globally distributed data.

Using satellite technology of Global Positioning System (GPS) can, successfully resolve the issue of lots of different coordinate systems and ellipsoids.

**Table 1. Coordinate systems and associated ellipsoids with parameters (NIMA, 2000)**

Coordinate system name	Local ellipsoid	$a$ Major semi-axis [m]	$1/f$ Inverse flattening	Eccentricity values		
				$\Delta X$ [m]	$\Delta Y$ [m]	$\Delta Z$ [m]
World	World Geodetic System 1984 (WGS84)	6378137.000	298.257223563	0.0	0.0	0.0
North American datum 1983	Geodetic Reference System 1980 (GRS80)	6378137.000	298.257222101	0.0	0.0	0.0
Hermannskogel-Yougoslavia	Bessel 1841	6377397.155	299.152812800	682.0	-203.0	480.0
Ordnance survey of Great Britain 1936	Airy 1830	6377563.396	299.324964600	375.0	-111.0	431.0
European datum 1950	International 1924	6378388.000	297.000000000	-87.0	-96.0	-120.0
North American datum 1927	Clarke 1866	6378206.400	294.978698200	-9.0	161.0	179.0

### Horizontal coordinate system model

Inclusion of ellipsoids into the coordinate system issue, allow separate treatment of the point position in space, especially on the Earth's surface. Thus, the three-dimensional coordinate system can be separated into two-dimensional (horizontal) and one-dimensional (vertical) components. If the latitude  $\varphi$  and longitude  $\lambda$  is known, then the horizontal position of the observed point is fully identified. Current technology of global satellite positioning permits easily determination of those coordinates. Of course, difficulties arise when it is necessary to calculate the relationships between points: distance, azimuth, angle, or showing a certain area on the flat map. The complexity of calculations on the ellipsoid shape, and also the need for spatial data visualization, is solved with mathematical mapping projection on the plane surface. Map projections and cartographic products also, as an applicable part of spatial coordinate systems, provide a further basis for numerous applications. It is very common practice using the term coordinate system, or geodetic datum, for a map projection such as UTM, Lambert or Gauss-Krueger plane. That practice is not properly in essential sense. Naturally, the projection for itself can't be determined without a previously formulated ellipsoid and without parameters of coordinate system. A lot of articles, books and numerous software tools today, have such terminological confusion.

### Heights coordinate system model

Ellipsoid height in appropriate coordinate system is geometrical value, entirely mathematically determined. One-dimensional coordinate system, which is used for altitude positioning, primarily needs to take into account the gravity force. Water masses of the whole Earth is, from the other side, completely under the influence of gravity. So, it seems to be the most natural using of sea level as a coordinate origin. Today, it is widely used the

term Mean Sea Level-MSL, which is, viewed from the perspective of gravity, the closest to the geoid surface, consequently to the Earth's shape. Mean sea level implies that the influence of waves and tides is previously removed from such averaged surface. Geoid is surface model of gravity force equal potential, at Mean Sea Level. Measurements of gravity force, astro-geodetic measurements, spirit leveling, mareography and finally topographic gravitational influence, are all included in geoid surface modeling. At greater depths below, or higher altitudes above the geoid, can also be modeled different equipotential surfaces. As the density of mass in the Earth's interior is different and unequally distributed, it is almost impossible to find two parallel equipotential surfaces. The vertical line is perpendicular to the geoid surface (Figure 4). Hypothetically, we can imagine a point that moves toward the Earth's center of masses, through different equipotential surfaces. It follows the line perpendicular to those surfaces and creates the space curve of the vertical line, so-called true vertical or plumb line. Figuratively speaking, it would have behaved like the stone in free fall, if the stone were able to pass through the layers of the Earth's interior. So, now we can speak about two height lines in the observed point: the normal line, perpendicular to the ellipsoid and vertical line (true vertical), perpendicular to the geoid. Normal line determines the height relative to the ellipsoid and this ellipsoid height has a mathematical importance for necessary calculations. The vertical line is used to determine the elevation, or in the case of the geoid, the so-called orthometric height. Orthometric height has actually practical significance, because it reflects the natural phenomena of the site. Figuratively speaking, the water in the seas, lakes or rivers behaves respecting the law of gravity and orthometric height.

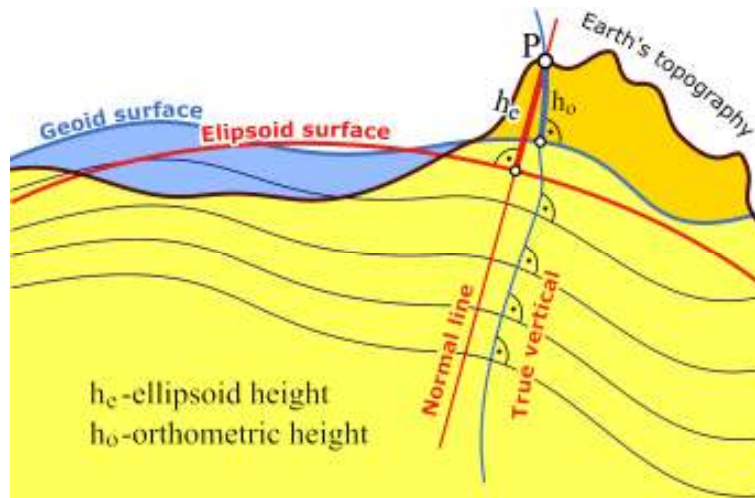
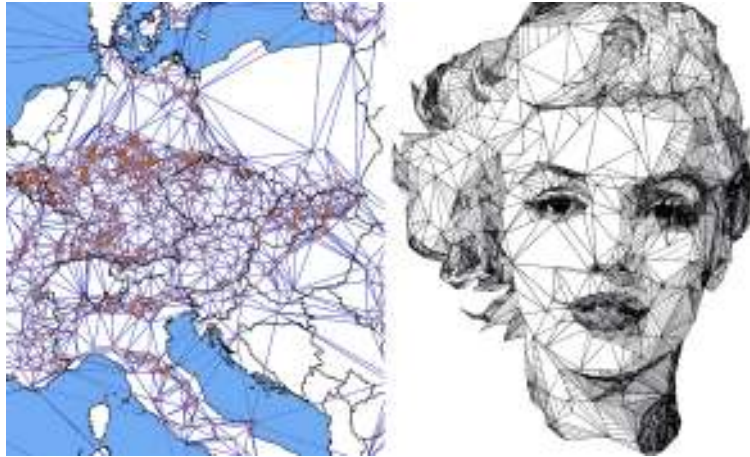


Figure 4. Heights coordinate system

#### Coordinate system implementation-reference frame as a real model

The implementation of coordinate system is a process of its materialization. Often the process of implementation is more complicated, compared to its definition. However, regardless of the complexity, the coordinate system need to be implemented, otherwise there will be nothing more than an idea. Therefore, the processes of coordinate system definition and realization are inseparable parts of an integral whole (Figure 5).



**Figure 5. Conceptuality of network usage, Europe network and the network of Marilyn Monroe face**  
(Josh Bryan Artist, <http://www.joshbryanart.com/> - !Marilyn Monroe/zoom/c1tyq/imagejw2)

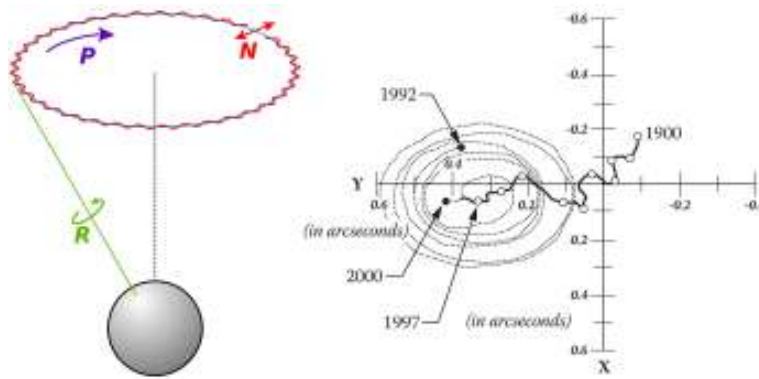
### **Geodetic reference frame**

Geodetic reference frame represents the realization, i.e. the implementation of the previously defined coordinate system. The frame is a material, visible part of coordinate system. In geodesy, survey and other geospatial research, the reference frame is also called a geodetic reference network. Point coordinates are the result of different values measurement in the network, which allows determination of relative relations between points. The reference frame is used to describe quantitatively the position and motion of observed objects. Measurements performed in the process of the frame constructing, are carried out according to the system definition. It is a common case, where physical marks or measurements, implement two or more completely different coordinate systems definitions.

### **What is the Earth's nature in fact?**

Even though it doesn't look that way, the Earth is not quite as calm and stable, as it seems at the first glance. Earth can be observed as a rigid body, like an unchangeable shape. It is not justified, especially in research dealing with the nature of the Earth itself and phenomena that occur on it. More realistic, Earth could be treated as a collection of infinite or finite number of elements, which moving over time, more or less. Movement of the Earth parts, both in its interior and on its surface, has continuous, cyclical or random (stochastic) character. The occurrence of cracks and faults in the solid part of its crust and formation of global tectonic continental plates was also a result of constant dynamics. Moon gravity, and the gravity of other planets in the Solar system, causing the tides phenomena. The Moon has much more influence than the all other planets together, due to different distance. Also, the phenomenon of poles displacement has a short and long periodic tendency, which is recognized as the nutation and precession (Figure 6). Precession is a long periodic movement of the Earth's axis and the North Pole consequently. It is considered that its path has almost circular shape, with a period of nearly 25800 years. Currently, the North Pole of the Earth's axis is directed to the star Polaris.





**Figure 6. The occurrence of the Earth's poles movement in the form of precession and nutation**

For about 14,000 years it will be directed towards the star Vega from the constellation Lyra. Nutation is a short periodic movement of the North Pole with a period of about 18.6 years. British astronomer James Bradley discovered it in 1728. Nutation is mainly caused by the Moon influence and the characteristics of its movement relative to the Earth. Namely, every 18.6 years, the angle between the Moon's orbit plane and the Earth's equatorial plane, reaches its maximum of  $28^{\circ} 36'$ , or a minimum of  $18^{\circ} 20'$ . Moving the poles, thereby cause the wobble of the equatorial plane. Volcanic and seismic activity, solar radiation, the water mass movement in the oceans and the movement of glowing liquid magma in Earth's shallow and deeper layers, are some of the many different influences that affecting Earth. All these influences cause, more or less, the shape of the Earth as we know, and its constant temporal changes. The object that behaves in such a dynamic way requires complex procedures of coordinate system definition and implementation.

### **Shape and elements of the network**

There are many different geodetic networks for different purposes. From networks for surveying, cadastre, land and urban planning, networks for monitoring construction projects, up to the global networks that exist only because of the coordinate system. The spatial disposition of network points, actually monuments of geodetic network, is designed so, for the best coverage of an observed object. If the network is used for monitoring the bridge construction, in that case the marks should be set on those places that provide uninterrupted observation of all relevant elements during construction. When we setting up a geodetic reference network for a country, then points or marks should be set so, to evenly cover and include the whole national territory. Global network has an essential task, and it is exclusively determining the shape of the Earth and the realization of the coordinate system. The goal of network set up is the most homogeneous coverage of the Earth. Of course, the differences between examples are enormous. Besides conceptual distinctions, we can consider the distance between network points, for example. In the network for construction projects, distances are usually expressed in hundreds of meters, from 100 m to 500 m. State territory are covered by the networks with distances expressed in kilometers and tenth of kilometers, from 1km to 10, 25, 50, or even 100 kilometers (Figure 7). Global networks have the structure where the distances between points are expressed in hundreds and thousands of kilometers.



Figure 7. Trigonometric network as a geodetic frame and trigonometric monument with point mark.

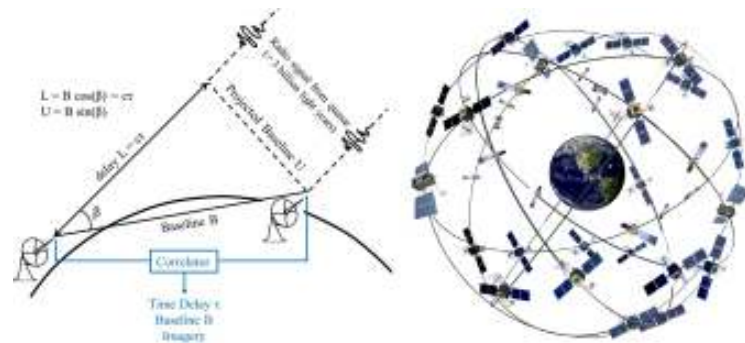
### Building and spatial locating of geodetic network

In the process of building a global geodetic frames, shall be given an answer about two important questions:

- To determine geometrical and geophysical relations between the points in a network.
- Positioning and temporal changes of the network itself, in the space of a globally adopted reference system.

Building the geodetic network is usually achieved by measuring horizontal and vertical angles, elevations and since recently, distances between points. In the past, the lines in the network were arranged in triangle figures, due to measuring angular values as a primary measurement method. So, such frames are called triangulation networks. In the middle of the 20th century, in surveying practice are progressively introduced measuring methods based on light waves and microwaves. Thus was opened an opportunity for measuring very large linear distances of around 50-100 km. This gives the opportunity to reprocess most of the nineteenth century triangulation networks (Seeger, 1999.). Measuring distance between certain points in the network solves one of the fundamental requirements of any network, determining the network scale in space. Positioning of a network, as a single entity in the global system, is also implemented by measurements. Such specific observations through the history of geodesy are performed on different ways. In addition to the angular and linear values between the networks points, for the establishment of a geodetic reference frame are necessary astronomical and astrogeodetical measurements. Observation of the apparent stars movement across celestial sphere and registration of the measurement time epochs, provides the values of astronomical longitude and latitude. These values, along with measured deflection of the true vertical lines, at selected points of the

network, offer much closer pictures about a local ellipsoid. As discussed earlier, the vertical line and the normal line, in the observed point on the Earth's surface, are not the same thing. The vertical line is the result of gravity and its direction can always be seen or created. With the normal line is not the same. With astrogeodetic measurements can be determined deflection between these two lines. The deflection is necessary for the realization of geodetic networks, and also for geoid model issue as the vertical reference frame. For the beginning of cosmic era is considered 4th October 1957, when the Soviet Union launched the first artificial Earth satellite Sputnik. Geodesy thus received technologically very productive asset. Development in this area has led to the profiling of satellite geodesy as a qualitatively new way of the space exploring. Satellites and new scientific breakthrough in Earth observations, has created several new measurement methods, such as SLR, VLBI, TRANSIT, DORIS, GPS, GLONASS and others. The nature of the satellite functioning itself has a very useful application in the realization process of global reference coordinate system. What was not possible before, now it is. Measuring relations between points, between two continents, or comprehensive, globally, is now becoming a reality. Method of Satellite Laser Ranging (SLR) determined the precise elements of the satellite orbits. TRANSIT maritime navigation system, which is based on the Doppler effect of radio waves, for the first time enabled the measurement of large distances on the Earth's surface, with an accuracy of 30 centimeters. French DORIS system is based on the same Doppler principle (Fra. Détermination d'Orbite et Radiopositionnement Intégré par Satellite) is used to determine the precise satellite positions in orbit, and also for positioning on the Earth surface. Method of Very Long Baseline Interferometry (VLBI), which estimates correlation between detected radio signals from distant quasars, is used for intercontinental distance measurement (Figure 8). Extremely stable Space sources of radio signal are simultaneously processed in two very distant receivers, for example at stations Wetzell in Germany (Ger. Wetzell) and Santiago in Chile (Spa. Santiago de Chile). Knowing the propagation velocity of the waves and measuring the time difference, base line can be determined with very high relative accuracy of even 0,01ppm (Eng. Parts-per-million).



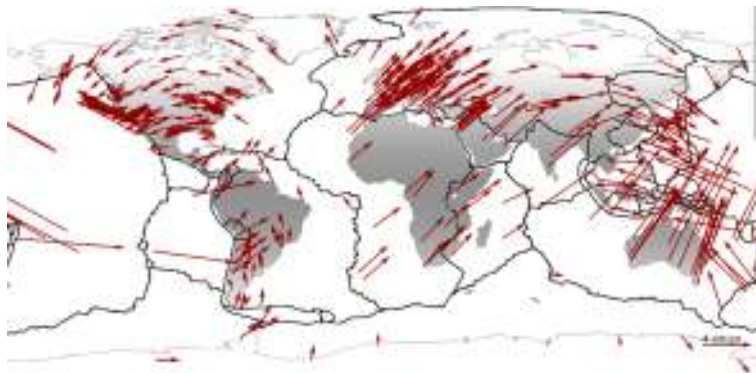
**Figure 8. VLBI method of intercontinental distance determination and volatile satellite GNSS constellation**

A new era of global navigation and positioning, occurs with development of the American GPS system, in eighties of the 20th century (Figure 8). Soviet Union, at the same time, develops their own, a parallel navigation system GLONASS, which is based on similar technological basis (Rus. ГЛОБАЛЬНАЯ НАВИГАЦИОННАЯ СПУТНИКОВАЯ СИСТЕМА-ГЛОНАСС). Although started in the late nineties of 20th century, European satellite navigation system Galileo, at the end of first decade of 21st century, still has contours of incomplete constellation. At this moment, in 2016, Galileo has launched twelve satellites, of the planned thirty, which are all in the testing phase. China is also developing its own system, called Beidou, or COMPASS. All of these navigation systems are generally known

as a Global Navigation Satellite Systems (GNSS). The development of these systems, initiated a huge breakthrough in geospatial research today and in the future. As a comparison with earlier mentioned measuring methods, we can consider their accuracy that can be provided. The distance between two GNSS receivers, using the phase difference measurements of carrier waves, can be estimated with an error of 0.001 ppm (Seeger, 1999; Lange and Gilbert, 1999).

### Temporal epochs of global reference frame

All of these measuring methods are used mostly to evaluate parameters of geodetic reference frame, i.e. geodetic network. As shown, the Earth is a very dynamic structure that permanently, periodically or randomly changes its shape and position in space. Geodetic network realizes defined coordinate system respecting the dynamic aspects (Figure 9). Methods for determining the current position of the poles, position of equator, speed of rotation, monitoring the movement of the continental plates and many other processes, requires reference coordinate frame that is constantly renewing. The ITRS organization permanently performs all these activities and publishes reports about the status of the International Terrestrial Reference Frame (ITRF). Terrestrial reference frame, as a global geodetic network, is used to show all geodynamical processes. Earth and its rotation in Cosmos, is displayed through continental plate tectonics, regional subsidence and movements. The rotation of the Earth is observed in relation to the celestial reference frame that is tied to stars. Organization IERS was founded in 1988 with the mission to establish and maintain the celestial reference frame (ICRF-International Celestial Reference Frame), and the terrestrial reference frame ITRF. Parameters of the Earth orientation are connection between these two reference frames (EOP-Earth Orientation Parameters). Earth orientation parameters include Universal Time (UT), coordinates of celestial pole (CEP-Celestial Ephemeris Pole) and movement of celestial pole. Celestial pole movement is recognized through the appearance of precession, nutation or Chandler wobble.



**Figure 9. Global stations for ITRF2008 realization and the speed of tectonic displacement (Altamimi and all, 2012)**

Measurement results from different locations are compared through these two reference frames. Four main geodetic measuring techniques are used today, to determine geodynamical changes: GNSS, VLBI, SLR and DORIS. There are a large number of measurements, which are conducted through a lot of years back. Also, because of a continuous technological progress, the ITRF is constantly renewed and improved. Since the year 1988 until today, there was eleven realization of ITRS system, and the last one is the ITRF2005. The most important products of the coordinate system realization are point's

coordinates for the specific epoch and their speed. Each of realizations describes a movement model of the Earth's crust.

### Reference system or reference datum?

The geodetic datum is a very common term that is used to determine realized spatial reference coordinate system, an entity as a whole. The term geodetic datum usually includes both procedures: definition of the coordinate system and its implementation through a reference frame. Mentioning of ellipsoid, which defines geodetic datum, can be found very often in specialized books and articles. The datum is realized through a network of corresponding points. In the glossary of the organization IERS, the term datum is explained as follows (Petit and Luzum, 2010):

*“Datum is a geodetic reference frame (plural datums). In surveying and geodesy, a datum is a set of reference points on the Earth's surface, and (often) an associated model of the shape of the Earth (reference ellipsoid) used to define a geographic coordinate system. Horizontal datums are used to describe the location of a point on the Earth's surface, in latitude and longitude or other appropriate coordinates. Vertical datums are used to describe site elevations or depths.”*

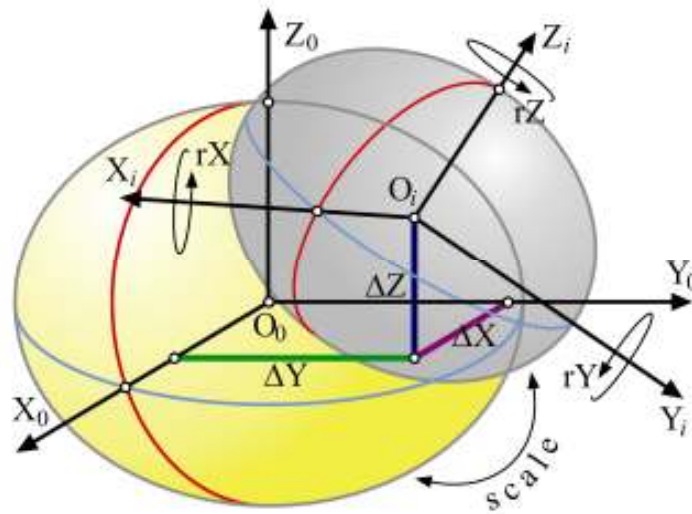


Figure 10. Helmert transformation between two coordinate systems

So, the term geodetic datum refers to the integrated concept of coordinate system, which is recognized through reference ellipsoid, through geodetic network and its physical and visible marks. When we talk about ellipsoid as the geodetic datum, it is necessary to formulate its basic dimensions and parameters of its spatial position relative to the globally defined Earth figure (Figure 10). Parameters of Earth figure are: its geocenter, axis of rotation and reference values of middle equator and Greenwich meridian. These parameters are determined in the global geocentric coordinate system. Such a geocentric coordinate system, or geodetic datum, is World Geodetic System, implemented in the year 1984 by the United States Department of Defense (WGS84-World Geodetic System 1984). Its main purpose is to provide a geodetic basis for operating of the global positioning system, GPS/NAVSTAR. Also, global definition of the Earth parameters, through global system like ITRS, continuously provides IERS organization. Local geodetic datum is determined by the

values of its eccentricity from the global datums ITRS or WGS84. Parameters of eccentricity, so-called geodetic datum parameters include three linear translations along coordinate axes X, Y and Z, three angular rotations around each of the axes and one scale parameter. Then, the transition between datums can be performed according to Helmert rules (Hofmann-Wellenhof and all, 2001). Ellipsoid is determined by its semi-major axis  $a$ , and its coefficient of inverse flattening  $1/f$ . So, by specifying of these nine values, the local geodetic datum and its associated ellipsoid are fully formulated.

### **Basic recommendations in work with different space coordinate systems- Conclusion**

Spatial data and geodetic datum parameters requires to be carefully treated. The main problem and usual trap that can occur, is irregular use of parameters in several geodetic datums, which are presented in different data sets. There is a great historical legacy, in the form of maps, plans, alphanumerical tables and other geodetic materials. It is still in use, especially in Europe, cartographic material based on the coordinate system of local character. Combining such maps from south Europe, for example, with maps from north Europe, produces significant inconsistency. Different maps can be products of map projection from different ellipsoids. Ellipsoids are previously associated with different coordinate systems, which are not all geocentric and their position and orientation are with local character. At the same time it flows production of voluminous data quantity, measurements and geodetic data basis. Geographic map that is created today is a product of the modern, global systems, so its geodetic datum has to be of a global geocentric character, for example WGS84. As an important repercussion, the obvious disagreement of geodetic datums between older data and today's collected material is presented. The requirements of modern researchers and the use of IT solutions, also creates pressure to solve the problem in a systematic way. Disagreement between coordinate systems of different spatial datasets can be recognized through two forms of appearance:

- Spatial datasets have on the same way defined coordinate system, but is implemented differently for different data. Hence, the particular realizations, each in its own way, are implemented improperly or do not match modern requirements.
- Datasets have two, or more differently defined geodetic coordinate systems.

First case is often found during exploitation of geodetic surveys from earlier period. It is reasonable to talk about geodetic networks that are never implemented in the right way, or so-called 'neglected' networks. Due to different reasons, throughout history, during realization of the reference frames have been often ignored important scientific facts and produced the essential errors. Mathematical calculation in the geodetic network does not performed integrally and homogeneously, due to lack of adequate computing resources. The expansion of the network covered territory or its densification is performed often with unscientific assumptions and approximately. Geodynamical facts such as tectonics, regional and local ground movements were mostly ignored. The problem is even more significant because there is a huge amount of data that are systematically linked to the network. Cadastral surveying and geodetic dataset basis of urban planners, cartographers and others, depends substantially from such a reference system (Figure 11). Overcoming the problems of this type is a today's challenge primarily in geodetic profession. There are many, very demanding and complex, proposals and models for solutions of this deviation (Blagojević, 2009). The second case is primarily logistic and organizational issue. Several different datums, by theirs definition and realization, can be transformed into one homogeneous, unified coordinate system. In order to solve this problem, it is necessary to adopt a target

coordinate system. There is often taken, a global geocentric coordinate system WGS84, which can be established simply by applying of the GNSS technology. According with such adopted target coordinate system, it is necessary to determine the datum parameters of each local datum. It is used further, a so-called datum transformation, which is today an necessary tool and it its integrated in all GIS software systems.



**Figure 11. The result of position and height disagreement between two coordinate systems of nor American continent. Horizontal datums NAD27 vs. NAD83 and height datums NGVD29 vs. NAVD88**

#### References

- Altamimi Z., Collilieux X., Metivier L. (2012). Analysis and results of ITRF2008, International Earth Rotation and Reference Systems Service-Technical Note No. 37, Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, Frankfurt am Main.
- Blagojević D.(2009). Research of optimal model of horizontal transformation on the territory of the Republic of Serbia-Final Report, Republic of Serbia-Serbian Geodetic Authority, Belgrade.
- French A.P. and Ebison M.G. (1986). Introduction To Classical Mechanics, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- Hofmann-Wellenhof B., Lichtenegger H., Collins J. (2001). Global Positioning System: Theory and Practice (Fifth Edition), Springer-Verlag.
- Kovalevsky J, Mueller I. (1981). Comments On Conventional Terrestrial And Quasi-Inertial Reference Systems, Reference Coordinate Systems For Earth Dynamics-Proceedings Of The 56Th Colloquium Of The International Astronomical Union Warsaw, Poland, September 8-12.
- Lange A.F. and Gilbert C. (1999). Using GPS for GIS data capture, chapter 33 from: Geographical Information Systems: Principles, Techniques, Applications and Management (Editors: Paul A. Longley, Michael F. Goodchild, David J. Maguire, David W. Rhind), 2nd Edition, Wiley.
- Michael L.A. (2007). The Principles of Existence & Beyond, Lulu Enterprises,
- NIMA Technical Report, World Geodetic System 1984-It's Definition and Relationships with Local Geodetic Systems, U.S.A. Department of Defense, 2000.
- O'Connor J. J. and Robertson E. F., Gottfried Wilhelm von Leibniz Biography, Mac Tutor History of Mathematics archive, URL: <http://www-history.mcs.st-andrews.ac.uk>
- Petit G. and Luzum B. (2010). IERS Conventions (2010), International Earth Rotation and Reference Systems Service-Technical Note No. 36, Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, Frankfurt am Main.
- Seeger H. (1999). Spatial referencing and coordinate systems, chapter 30 from: Geographical Information Systems: Principles, Techniques, Applications and Management (Editors: Paul A. Longley, Michael F. Goodchild, David J. Maguire, David W. Rhind), 2nd Edition, Wiley.
- Van Sickle J.(2010). Basic GIS Coordinates, CRC Press-Taylor & Francis.

# КОНЦЕПТ ПРОСТОРНИХ КООРДИНАТНИХ СИСТЕМА, ЊИХОВО ДЕФИНИСАЊЕ И РЕАЛИЗАЦИЈА КАО ПРЕДУСЛОВ У ГЕОПРОСТОРНИМ ПРИМЕНАМА

ЗОРАН НЕДЕЉКОВИЋ<sup>1</sup>, АЛЕКСАНДАР СЕКУЛИЋ<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Универзитет у Београду – Грађевински факултет, Одсек за геодезију и геoinформатику, Булевар краља Александра 73, 11000 Београд, Србија*

**Абстракт:** Бројни су корисници информација о простору, чије је интересовање о самој њиховој природи и настанку, прилично велико. Саме просторне информације различити корисници проналазе у виду карата, планова или алфанумеричких табела. У новије време, све чешће у виду просторних база података, у облику географских информационих система. Шта стоји у основи оваквих просторних подлога? На каквим темељима су оне засноване? У овом чланку се посматрају основни аспекти простора, димензионалност и глобални координатни системи у применама код глобалних геопросторних истраживања. Објашњава се дефинисање координатног система као апстрактног ентитета и последично, њихова реализација или успостављање у виду геодетског референтног оквира, као реалне референтне геодетске мреже. Апликативни аспект координатних система се у чланку апострофира кроз препоруке и обазривост у поступку коришћења њихових различитих реализација.

**Кључне речи:** Земља, координатни систем, геодетски датум, референтни оквир, елипсоид, геоид, ITRF, GNSS

## Појам простора и концепт димензионалности

Научна дебата о томе шта је простор и како га разумети сеже још у доба старогрчких филозофа. Чувени Платон, Сократ и Аристотел су у својим делима помињали појам 'простор' (ст. грч.  $\chi\acute{o}\rho\alpha/kh\acute{o}ra$ ) и појам 'место' (грч.  $\tau\acute{o}\pi\omicron\varsigma/topos$ ). Доба ренесансе у Европи, у 17. веку, доноси прве поставке овог филозофско-метафизичко-математичког појма. Тада се профилишу прве основе модерног схватања простора. Тиме су се бавили Њутн, Лајбниц, Кант и многи други. Њутн формулише простор као "апсолут" који постоји стално и независно, без обзира на постојање материје и кретање које се у њему догађа или не догађа, (French and Ebison 1986). Та његова дефиниција је можда најприближнија општем схватању простора. Основни постулати Еуклида о појмовима тачке, праве и равни, у његовом обимном делу у тринаест књига "Елементи" (старогрчки:  $\Sigma\tau\omicron\iota\chi\epsilon\iota\alpha$ -Стихија), аксиоматски дефинишу Еуклидску геометрију. То је најзад темељ данашњег разумевања тродимензионалног Еуклидског простора, што даје основне поставке у истраживањима готово свих гео-наука (Слика 1). Појам простора је уско повезан са концептом димензионалности и може се рећи да схватање димензионалности зависи од конкретне области истраживања. У физици и математици се димензионалност простора неформално дефинише као минималан број параметара потребних да се потпуно једнозначно одреди положај тачке у таквом простору. Права или крива линија јесте једнодимензионалан простор, јер се за потпуно одређивање положаја тачке на њој користи једна координата. Раван, површ цилиндра или површ сфере су примери дводимензионалног простора зато што се положај тачке на њима одређује са две координате: латитуда и лонгитуда на пример. Сфера или коцка, заједно са њиховом унутрашњошћу, су пример тродимензионалног простора.

Слика 1. Дводимензионални и тродимензионални Декартов координатни систем

У класичној механици су простор и време различите категорије, те се појам универзума дефинише као четвородимензионални простор. У квантној механици се ентитет простор-време посматра интегрално, као бесконачно димензионална функција где се простор и време међусобно прожимају. У геопросторним истраживањима,



простор је дефинисан најчешће са три димензије, базиран на Еуклидовој парадигми правоуглог координатног система. Често разматрање параметра време, када се посматрају временске промене у простору, не може да се третира као четврта димензија, као у класичној или квантној механици, већ више као додата величина. Када су простор и његова димензионалност, јасно дефинисани и схваћени, онда захтевају одговарајући координатни систем. Координатни систем може да се дефинише, сходно употреби, на микро нивоу-локално, или свеобухватно-глобално. Геопросторна истраживања су најчешће усмерена на појаве и процесе који третирају планету Земљу као глобални објекат тј. општи географски простор. Иако се често примењује на ограниченом локалитету, данас је технолошки релативно једноставна употреба глобално дефинисаног координатног система. Сателитска технологија самим својим функционисањем обезбеђује коришћење глобално дефинисаног и успостављеног координатног система. Издвајају се две кључне целине које карактеришу координатни систем као ентитет; дефиниција координатног система и његова реализација или материјализација. Термини воде порекло из астрономије, астрофизике, геофизике и уопште из већине наука о Земљи и Космосу.

### **Дефинисање глобалног референтног координатног система-Имагинарни модел**

Дефиниција координатног система се заснива на апстраховању објекта посматрања, те препознавању његове форме и понашања у простору и времену (Kovalevsky and Mueller 1981). У универзуму у коме се препознаје стално кретање и општа релативност положаја, координатни систем има улогу да привремено и у свом ограниченом домену обезбеди привид апсолутне позиције. Дефинисање координатног система је имагинација о циљном објекту истраживања. Дакле, дефинисати неки координатни систем није ништа друго, него замислити или изјавити једну логичну и апстрактну идеју. Такође, када се дефинише систем, морају се узети у обзир све садашње потребе и будући задаци које би евентуално координатни систем обухватио. Најчешће је координатни систем дефинисан као крута структура која се кроз време не мења, (у односу на циљни објекат), нарочито не геометријски.

### **Како замишљамо Земљу?**

Пре свега, ако се занемаре историјско-митолошке представе, Земља се посматра као небеско тело лоптастог облика, које равномерно ротира око своје осе и заједно са Месецом, њеним природним сателитом, орбитира око Сунца. Геофизичка и геолошка истраживања, а такође и готово стална вулканска и сеизмичка активност дају оправдање да се Земљина унутрашњост на већој дубини од 150 километара сматра за флуид, тј неку врсту течности прилично вискозне природе. Сама дебљина чврсте Земљине коре, у поређењу са радијусом Земљине сфере од приближно 6400 километара је прилично мала. Посматрањем светског океана и мора, уочава се огромна несразмера у копненим и воденим површинама. Ове чињенице потпуно оправдавају поглед на Земљу као на еластично, течно, тј. вискозно тело у Космосу. Идеја о деловању различитих сила на еластично тело и последично формирање облика таквог тела, тада имају заиста утемељено оправдање. Земља је дакле спљоштеног облика због деловања центрифугалних сила ротације, што је сагласно са Њутновом класичном теоријом гравитације. Њутн је у свом капиталном делу “Математички принципи природне филозофије, Књига III, Претпоставка XX” (лат. *Philosophiae naturalis principia mathematica*), написао: “Земља је испупченија код екватора, него на половима и то за око 17 миља...” (Van Sickle, 2010.).

## Геоид и елипсоид као могуће фигуре земље

Када се имају у виду специфичне карактеристике Земље, поставља се питање: како на најбољи начин да се апроксимира њен облик и како да се дефинише њен глобални референтни координатни систем?

Узимајући у обзир неравномерну густину различитих зона у Земљиној унутрашњости, може се говорити о неправилној геометријској распрострањености и интензитету деловања силе гравитације. Ако се на тренутак заборави топографија, Земља се може представити као имагинарна, заталасана затворена површ, на којој је потенцијал силе Земљине теже константан. Таква еквипотенцијална површ се назива геоид и он је прва апроксимација која одражава Земљин просторни облик и геофизичке особине. Геоид је површ која је најближа површи средњег нивоа мора у идеалним условима, без таласа и деловања плиме и осеке. Иако потпуно теоретски исправан концепт, геоид није математички једнозначно формулисана површ, па је рачунска комплексност у практичним применама прилично велика. Друга апроксимација Земље јесте спљоштени елипсоид или сфероид, добијен ротацијом елипсе око своје мање осе (Слика 2). Елипсоид је потпуно математички формулисана фигура у простору, што омогућава различите практичне примене и научно истраживање.

Слика 2. Пренаглашено приказан геоид и спљоштени елипсоиди

### Модели координатног система

#### Модел правоуглог Декартовог координатног система-правоугли триедрон

Једноставан начин да се једнозначно одреди положај тачке испод, изнад и на самој површини Земље јесте употреба тродимензионалног Декартовог координатног система (Seeger, 1999.). Такав геодетски координатни систем се дефинише следећим особинама (Слика 3):

- координатни почетак, или исходиште система, коинцидира са центром маса Земље,
- оса  $Z$  се подудара са осом Земљине ротације и њен позитивни смер пролази кроз северни пол,
- оса  $X$  лежи у равни почетног, гриничког меридијана и управна је на претходну осу,
- оса  $Y$  са две претходне чини правоугли систем десне оријентације.

Свака тачка у простору, код овако дефинисаног координатног система је одређена координатама  $X$ ,  $Y$  и  $Z$ . Овако дефинисани триедрон (Petit and Luzum, 2010.) одређује оно што Међународни Сервис за Ротацију Земље и Референтне Системе (енг. IERS-International Earth Rotation and Reference Systems Service) назива Интернационални Терестрички Референтни Систем (енг. ITRS-International Terrestrial Reference System). Такав просторни референтни систем ротира заједно са Земљом и одговара свим дневним кретањима у космосу, са координатним почетком који је близак геоцентру. Појам 'геоцентар' подразумева центар масе целог система Земље, укључујући океане и атмосферу. Због континуитета са претходним терестричким референтним системом, у складу са Резолуцијом 2, Међународне Уније за Геодезију и Геофизику (енг. IUGG-International Union of Geodesy and Geophysics), из 1991. године, његова формулација је веома блиска средњем екватору из 1900. године и гриничком меридијану. Дакле, када се посматра на овај начин дефинисан координатни систем, не може да се занемари чињеница да је у питању модел правоуглог Декартовог

координатног система који подразумева Еуклидску тродимензионалност и класичне Њутнове постулате о простору и гравитацији. Одредница ‘Декартов’ се у литератури може најчешће пронаћи као Картезијански (енг. Cartesian), што је последица превођења имена прослављеног француског математичара и филозофа Ренеа Декарта (фра. René Descartes) на латинском језику као: Ренатус Картезијус (лат. Renatus Cartesius). Често за овај координатни систем у литератури срећемо термин ECEF-Earth Centered Earth Fixed, који представља конвенционални терестрички систем (енг. CRS-Conventional Terrestrial System). Кроз назив система се описује његова природа и дефиниција: геоцентрични и ротира заједно са Земљом. Његове осе су сагласне са правцима међународног референтног пола (енг. ERP-International Reference Pole) и међународног референтног меридијана (енг. IRM-International Reference Meridian), који су фиксирани за саму Земљу.

**Слика 3. Правоугли Декартов триедрон и елипсоидни координатни систем**

### **Модел елипсоидног координатног система**

Апроксимација Земље елипсоидом, пружа прилику да се предходно дефинисани координатни систем може представити у елипсоидном, тј. географском моделу. Смештање елипсоида унутар Земље и геоида, тако да најбоље репрезентује њену фигуру, омогућава приказ положаја тачке у виду географске ширине, географске дужине и висине изнад или испод површи елипсоида То су такозване елипсоидне, тј. географске координате: латитуда, лонгитуда и елипсоидна висина:  $(\varphi, \lambda, h)$ . Латитуда  $\varphi$  је угао у равни меридијана тачке, мерен од равни екватора до праве која је нормала на елипсоид у посматраној тачки. Лонгитуда  $\lambda$  је угао у равни екватора, мерен од равни почетног меридијана, најчешће гриничког, до меридијана посматране тачке. Елипсоидна висина  $h$  је праволинијско одстојање од елипсоида до посматране тачке, мерено дуж нормале на елипсоид. Овако дефинисане елипсоидне координате се зову геодетске, за разлику од латитуде, лонгитуде и висине чије се вредности заснивају на правој која пролази кроз центар елипсоида и зову се геоцентричне. За разлику од координата  $X, Y, Z$  код правоуглог модела система, географски модел координата даје природнију информацију о локацији, а такође и могућност раздвајања хоризонталног и вертикалног положаја. Готово свако ко се бави просторним истраживањем може лако да препозна где се налази конкретан географски простор, једноставним посматрањем координата. Постоје математичке релације између координата тачака које су изражене по једном или другом моделу координатног система. Превођење координата из правоуглог у елипсоидни облик је обострано једнозначно одређено, тј. биунивоко. Оба модела координатног система у суштини одређују исту ствар. Први модел картезијански, упућује на димензионалност простора. Елипсоидни, тј. географски модел упућује на облик фигуре Земље и дозвољава избор између одвојеног и интегралног третмана хоризонталне и вертикалне позиције. Елипсоидни модел се користи код истраживања деловања гравитационог поља и последично, код дефинисања висинских система. Такође, аспект картографске примене се даље много једноставније имплементира коришћењем географског модела координатног система.

### **Локални елипсоид**

Историјски посматрано, елипсоидни модел координатног система је можда старији од картезијанског из апликативних разлога. У времену почетака модерне геодетске праксе је дефиниција референтног координатног система долазила заједно са његовом реализацијом, или тек после ње. Прво су извођена мерења, па се на основу

результата доносио заључак о елипсоиду и самом координатном систему. Из разлога што су тада мерења извођена на мањем или релативно ограниченом локалитету, није било могуће одредити положај центра елипсоида у односу на геоцентар. Тада је било важно да елипсоид буде најбоље прилагођен територији на којој је планирана његова употреба. Тако у историјској заоставштини данас постоји пуно различитих елипсоида који се употребљавају у различитим регионима света. Не само да се њихове димензије значајно разликују, већ је, из разумљивих разлога, такође и њихов просторни положај међусобно другачији (Табела 1). Историјски легат локалних елипсоида, и њихових референтних координатних система, данас игра вишезначну улогу. На првом месту може да се препозна њихов позитивни историјски значај за геодетску струку. Са друге стране, постојање локалних елипсоида и њима придруженог огромног картографског материјала, захтева јако обимне и комплексне послове транзиције. То ја нарочито значајно данас, када је јако убрзан развој научних истраживања, која је заснована на сателитској технологији. Такође, технологије геоинформационих система (енг. GIS-Geographic Information Systems) функционишу са глобално распрострањеним подацима. Овакво стање се, у ситуацији постојања великог броја различитих координатних система и елипсоида, успешно превазилази применом сателитске технологије глобалног позиционог система (енг. GPS-Global Positioning System).

**Табела 1. Координатни системи и придружени елипсоиди са параметрима (NIMA, 2000.)**

### **Модел хоризонталног координатног система**

Увођење елипсоида у проблематику координатног система, дозвољава раздвојено посматрање позиције тачке у простору, конкретно на површи Земље. Тако је могуће тродимензионални координатни систем раздвојити на дводимензионалну (хоризонталну) и једнодимензионалну (висинску) компоненту. Ако се познаје латитуда  $\varphi$  и лонгитуда  $\lambda$ , онда се у потпуности познаје хоризонтални положај посматране тачке. Технологија глобалног сателитског позиционирања данас омогућава одређивање ових координата са лакоћом. Наравно, потешкоће настају када је потребно израчунавање међусобних односа између тачака: растојања, азимута, углова или приказ одређеног простора на карти. Комплексност израчунавања на елипсоиду, а такође и потреба за визуелизацијом података о простору, се решава математичком пројекцијом на картографску раван. Поступак картографске пројекције и саме картографске подлоге, као апликативни део просторних координатних система, дају даљу основу за многобројне примене. Данас се веома често за картографске пројекције попут UTM или Gauss-Krueger употребљава термин координатни систем или геодетски датум, што суштински није исправно. Наравно, сама пројекција не може бити одређена без претходно формулисаног елипсоида и без параметара геодетског датума, тј. координатног система. Веома обимна литература и многобројни софтверски алати и данас садрже овакву терминолошку забуну.

### **Модел висинског координатног система**

Висина у односу на елипсоид координатног система је величина у потпуности одређена математички, тј. геометријски. Једнодимензионални координатни систем који служи да се у њему одређује висинска позиција, мора примарно да узме у обзир силу Земљине теже. Сва водена маса на Земљи је у потпуности под утицајем гравитације, па је онда најприродније коришћење нивоа мора и океана за координатни висински почетак. Данас се широко употребљава термин средњи ниво мора (енг. MSL-Mean Sea Level), који је, гледано из угла гравитације, најближи површи геоида, тј. облику Земље. Средњи ниво мора

подразумева да је претходно уклоњен утицај таласа, плиме и осеке на тако осредњену површ. Геоид је са друге стране моделирана површ једнаког потенцијала силе Земљине теже, на нивоу средњег мора. Површ се математички моделира коришћењем мерења силе гравитације, астрогеодетских мерења, геометријских одређивања висинских разлика и урачунавањем топографског гравитационог утицаја. На већим дубинама испод, или већим висинама изнад површи геоида, могу да се моделирају различите екипотенцијалне површи. Како су густине маса у Земљиној унутрашњости различите и неравномерно распоређене, ретко ће се наћи две паралелне екипотенцијалне површи. Линија вертикале је у посматраној тачки, на физичкој површи Земље, управна на површ геоида (Слика 4). Ако се замисли тачка која се креће ка центру Земље, кроз различите екипотенцијалне површи, пратећи линију која је управна на те површи, креира се просторна крива линија вертикале, која се природно улива у центар гравитације. Сликвито речено, тако би се понашао камен у слободном паду, када би имагинарно могао да пролази кроз слојеве Земље. Зато се сада може говорити о две висинске линије посматране тачке: линија нормале на елипсоид и линија вертикале на геоид. На линији нормале се одређује елипсоидна висина и она има математички значај за потребе израчунавања. Линија вертикале служи за одређивање такозване надморске висине или у случају геоида, такозване ортометријске висине. Ортометријска висина има заправо употребни, практични значај, јер одражава саму природу појаве на локацији. Сликвито речено, вода у мору, језеру или реци се понаша поштујући законе гравитације, тј. ортометријску висину.

**Слика 4. Висински координатни систем**

#### **Реализација координатног система-Референтни оквир као реални модел**

Реализација координатног система представља процес његове материјализације. Често је процес реализације система много компликованији, од његовог дефинисања. Но, без обзира на комплексност, координатни систем мора да буде реализован, иначе неће бити ништа више од идеје. Зато су процеси дефиниције и реализације координатног система неодвојиви делови једне интегралне целине (Слика 5).

**Слика 5. Концептуалност употребе мреже, Мрежа Европе и мрежа лица Мерлин Монро**

#### **Геодетски референтни оквир**

Геодетски референтни оквир представља реализацију, тј. имплементацију претходно дефинисаног координатног система. Оквир је материјални, видљиви део координатног система. У геодезији, премеру и осталим геопросторним истраживањима, референтни оквир се такође зове и геодетска референтна мрежа. Координате тачака мреже су резултат мерења различитих величина у мрежи, што омогућава одређивање релативних односе између тачака, па и самих координата. Референтни оквир се дакле користи за квантитативно описивање положаја и кретања објеката који су предмет интересовања. Сама мерења која се изводе у процесу изградње оквира, одвијају се у складу са дефиницијом система. Чест је случај да физичке белеге, или мерења њихових међусобних односа, реализују два или више потпуно различито дефинисаних координатних система.

#### **Каква је заправо земља?**

Иако на први поглед тако делује, Земља није баш тако мирна и стабилна. Земља може да се посматра као тело крутог, непроменљивог облика, што није

оправдано, нарочито у истраживањима која се баве управо самом природом Земље и појавама на њој. Реалније, Земља може да се третира као скуп бесконачно или коначно много елемената који се кроз време, у мањој или већој мери померају. Померања делова Земље, како у њеној унутрашњости, тако и на њеној површини имају трајни, циклични или случајни (стохастички) карактер. Појава пукотина у чврстом делу њене коре и формирање глобалних тектонских континенталних плоча је такође резултат сталне динамике. Гравитација Месеца у највећем делу и у много мањој мери гравитација осталих планета Сунчевог система, изазивају појаву плиме и осеке. Такође, појава померања полова има краткопериодичне и дугопериодичне манифестације, што се препознаје као нутација и прецесија (Слика 6). Прецесија је дугопериодично кретање Земљине осе и северног пола и сматра се да је његова путања приближно кружног облика, са периодом од близу 25800 година. Тренутно је северни пол Земљине осе у правцу звезде Северњаче (енг. Polaris), али ће за око 14000 година да буде усмерен ка звезди Вега из сазвежђа Лире (енг. Lyra).

**Слика 6. Појава кретања Земљиног пола у виду прецесије и нутације**

Нутација је краткопериодично кретање северног пола са периодом од приближно 18,6 година, коју је открио британски астроном Џејмс Бредли (енг. James Bradley) 1728. године. Највећим делом је нутација изазвана деловањем Месеца и карактеристикама његовог кретања у односу на Земљу. Наиме, сваких 18,6 година, угао између Месечеве орбите и равни Земљиног екватора достиже свој максимум од  $28^{\circ}36'$ , или минимум од  $18^{\circ}20'$ . Померање полова, самим тим, утиче на несталност екваторијалне равни. Вулканска и сеизмичка активност, деловање Сунчевог зрачења, кретање водених маса у океанима и ужарене течне магме у плићим и дубљим слојевима Земљине унутрашњости су неки од великог броја различитих утицаја које трпи Земља. Сви ти утицаји проузрокују, у мањој или већој мери, облик Земље какав познајемо и његове сталне временске промене. Објекат који се понаша на овако динамичан начин захтева сложене поступке дефиниције и реализације координатног система.

**Облик и елементи мреже**

Постоји пуно различитих геодетских мрежа за различите намене. Од мрежа за премер, катастар и урбанизам, мрежа за праћење грађевинских пројеката, па све до глобалних мрежа које постоје због самог координатног система. Просторни распоред белега мреже, заправо тачака геодетске мреже, се креира тако да се на најбољи начин обухвати објекат посматрања. Ако се успоставља мрежа за праћење изградње једног моста, онда се белеге постављају на оним местима која обезбеђују несметано опажање свих релевантних елемената током грађења. Када се поставља референтна геодетска мрежа за једну државу, онда се тачке или белеге мреже постављају тако да равномерно покривају и обухватају државну територију. Глобалне мреже, чији је суштински задатак искључиво одређивање облика Земље и реализација координатног система, се постављају са циљем њеног што хомогенијег обухватања. Наравно да су разлике код наведених примера огромне, и осим концептуалних, може да се посматра раздаљина између тачака, на пример. Код мрежа грађевинског пројекта су раздаљине најчешће изражене у стотинама метара, од 100 m до 500 m. Територије држава су прекривене мрежама чија се удаљеност изражава у километрима и десетинама километара, од 1km до 10, 25, 50, па и 100 km (Слика 7). Код глобалних мрежа се раздаљине мере стотинама и хиљадама километара.

**Слика 7. Тригонометријска мрежа као геодетски оквир и тригонометријска белега са ознаком**

## Изградња и просторно лоцирање геодетске мреже

У процесу изградње глобалног геодетског оквира се даје одговор на два важна питања:

- одређивање међусобних геометријских и геофизичких односа између тачака мреже.
- одређивање положаја и временских промена саме мреже у простору глобално усвојеног референтног система.

Изградња геодетске мреже, се обавља најчешће мерењем хоризонталних и вертикалних углова и од недавно мерењем дужина. Некада су линије у мрежи чиниле троуглове, због мерења угловних величина као примарне мерне методе, па су се такве мреже звале триангулација. Средином двадесетог века су у геодетску праксу постепено увођене мерне методе засноване на светлосним таласима и микроталасима. Тако је отворена могућност да се мере веома велика линеарна растојања од 50-100 km, што даје прилику да се преради већина триангулационих мрежа из деветнаестог века. Мерена дужина између појединих тачака у мрежи решава један од елементарних захтева сваке мреже, а то је успостављање размере у простору. Одређивање положаја мреже као јединственог ентитета у глобалном систему, се реализује такође мерењима. Таква специфична опажања су кроз историју геодезије извођена на различите начине. Осим мерења угловних и линеарних величина између тачака мреже, за успостављање геодетског референтног оквира су неопходна астрономска и астрогеодетска мерења. Опажањем кретања звезда и регистравањем временских епоха таквих мерења, одређују се астрономска лонгитуда и латитуда. Ова мерења, заједно са одређивањем отклона вертикале на одабраним тачкама мреже, успостављају основне вредности локалног елипсоида. Како је раније речено, линија вертикале и линија нормале на елипсоид у посматраној тачки на површи Земље, нису иста ствар. Вертикала је последица гравитације и њен правац увек може да се види или креира. Са нормалом није тако, астрогеодетским мерењима се може измерити отклон ове две линије, што што је потребно за реализацију геодетске мреже, а такође и приликом одређивања модела геоида као вертикалног референтног оквира. Почетком космичке ере се сматра 4. октобар 1957., када је СССР лансирао први вештачки Земљин сателит Спутник. Истраживања у области геодезије су добила технолошки веома продуктивно средство. Развој у тој области је довео до профилисања сателитске геодезије као новог правца истраживања у свери простора. Коришћење сателита и нових научних продора у опажањима Земље развија нове мерне методе, као што су SLR, VLBI, TRANSIT, DORIS, GPS, ГЛОНАСС и друге. Сама природа сателитског функционисања има јако корисну примену у реализацији глобалних референтних координатних система. Оно што раније није било могуће, сада јесте. Мерење међусобних односа тачака између два континента, или свеобухватно, глобално, сада постаје стварност. Методом ласерског мерења дужине до сателита који орбитирају око Земље, (енг. SLR-Satellite Laser Ranging), одређују се прецизни елементи орбите сателита. Систем поморске навигације TRANSIT, који је заснован на Доплеровом ефекту радио таласа је по први пут омогућио мерење великих растојања на површи Земље са тачношћу од 30 центиметара. Заснован на истом Доплеровом принципу, француски систем DORIS (фра. Détermination d'Orbite et Radiopositionnement Intégré par Satellite) служи за одређивање прецизне позиције сателита у орбити, а такође и за позиционирање на површи Земље. Интерферометрија веома дугих базних линија, (енг. VLBI-Very Long Baseline Interferometry) која омогућује одређивање корелације детектованог радио сигнала са удаљеног квазара, се користи код интерконтиненталних мерења дужина. Екстремно стабилан сигнал космичког радио извора се истовремено обрађује у два јако удаљена пријемника, на пример на станицама Вецел у Немачкој (нем. Wetzell) и Сантјаго у Чилеу (шпа. Santiago de Chile). Познајући брзину простирања таласа, мерењем временске разлике, базна линија се одређује са веома великом тачношћу од чак 0,01ppm (енг. parts-per-million).

### **Слика 8. VLBI метода интерконтиненталног одређивања дужина и променљива сателитска GNSS констелација**

Нова ера глобалне навигације и позиционирања настаје развојем америчког система GPS, осамдесетих година, двадесетог века (Слика 8). У исто време СССР развија паралелно сопствени навигациони систем ГЛОНАСС, који је базиран на сличним технолошким основама. Иако започет касних деведесетих година, европски систем сателитске навигације Galileo, тек крајем прве деценије овог века добија обриси непотпуне констелације. У овом тренутку, 2016. године, од планираних тридесет, Galileo је лансирао дванаест сателита, који су у фази тестирања. Кинеска држава такође развија свој систем назван BeiDou, или COMPASS. Све ове навигационе системе можемо данас уопштено да назовемо Глобални Навигациони Сателитски Системи (енг. GNSS-Global Navigation Satellite System). Развојем ових система, инициран је огроман продор у геопросторним истраживањима данас и у будућности. Као поређење са претходно наведеним мерним методама може да послужи тачност коју данас они пружају. Међусобни положај између GNSS пријемника, коришћењем мерених фазних разлика таласа, може да се изведе са грешком реда величине 0,001 ppm (Lange and Gilbert, 1999.).

### **Временске епохе глобалног референтног оквира**

Све ове мерне методе се употребљавају превасходно да се одреде параметри референтног геодетског оквира, тј. геодетске мреже. Како је приказано, Земља је јако динамичан објекат који трајно, периодично или на случајан начин мења свој облик и положај у простору (Слика 9). Геодетска мрежа реализује дефинисани координатни систем поштујући динамичке аспекте. Поступци одређивања тренутног положаја Земљиних полова, екватора, брзине ротације, регистровање померања континенталних плоча и много других процеса, захтевају референтни координатни оквир који се стално обнавља. Организација IERS перманентно обавља све ове активности и објављује извештаје о стању међународног терестричког референтног оквира ITRF, тј. глобалне геодетске мреже Земље. Терестрички референтни оквир служи да се изрази тектоника континенталних плоча, регионално слегање и померање и да се прикаже Земља и њена ротација у Космосу. Ротација Земље је опажана у односу на небески референтни оквир који је везан за звезде. Организација IERS је настала 1988. године са задатком да успостави и одржава небески референтни оквир (енг. ICRF-International Celestial Reference Frame), и терестрички референтни оквир ITRF. Параметри Земљине оријентације (енг. EOP-Earth Orientation Parameters) повезују ова два референтна оквира заједно. Параметре EOP сачињавају: универзално време (енг. UT-Universal Time), координате небеског пола (енг. CEP-Celestial Erhemeris Pole) и кретање небеског пола, што се препознаје преко појаве прецесије, нутације или Чендлеровог подрхтавања (енг. Chandler wobble).

### **Слика 9. Глобалне станице за реализацију ITRF2008 и брзина тектонских померања**

Резултати мерења са различитих локација се упоређују преко ова два референтна оквира. Данас се користе четири главне геодетске мерне технике да би се израчунале тачне координате: GNSS, VLBI, SLR, и DORIS. Из разлога постојања великог броја мерења која су обављена кроз доста година уназад, те непрестаног технолошког напретка, ITRF се непрестано обнавља и унапређује. Од 1988. године до данас је било једанаест реализација система ITRS, од којих је последња ITRF2005. Најважнији продукт реализације координатног система су координате тачака и њихове брзине кретања. Свака од реализација осликава модел кретања Земљине коре.

### **Референтни систем или референтни датум?**

Геодетски датум је веома чест термин који се употребљава да би се одредио просторни референтни координатни систем као ентитет у целини. Термин геодетски датум, најчешће подразумева оба поступка: дефиницију координатног система и његову



реализацију кроз референтни оквир, тј мрежу. Често се у литератури може срести помињање елипсоида који одређује геодетски датум преко мреже одговарајућих тачака. У речнику термина поменуте организације IERS, термин датум се објашњава на следећи начин (Petit and Luzum, 2010.):

*“Датум је геодетски референтни оквир (множина датуми). У премери и Геодезији, датум је скуп референтних тачака на Земљиној површи и (често) придружени модел облика Земље (референтни елипсоид), коришћен да дефинише географски координатни систем. Хоризонтални датум је коришћен да опише положај локације тачке на Земљиној површи, преко латитуде и лонгитуде, или одговарајућих координата. Вертикални датум је коришћен да опише висину или дубину места.”*

#### **Слика 10. Хелмертова трансформација између два координатна система**

Дакле термин геодетски датум упућује на интегрални појам координатног система, кога најпре препознајемо преко геодетске мреже, преко њених физички видљивих белега и преко елипсоида. Када се говори о елипсоиду, као о геодетском датуму, непходно је формулисати његове основне димензије и параметре његовог просторног положаја у односу на глобално дефинисане параметре фигуре Земље (Слика 10). Параметри фигуре Земље су њен геочентар, оса ротације и референтне вредностим средњег екватора и гриничког меридијана. Ови параметри фигуре Земље се такође одређују кроз некакав координатни систем глобалног карактера, чији координатни почетак коинцидира са центром маса Земље. Такав један елипсоид координатног система или геодетски датум, јесте Светски Геодетски Систем, реализован 1984. године од стране министарства одбране Сједињених Америчких Држава (енг. WGS84-World Geodetic System 1984). Његова сврха је да обезбеди геодетску основу за функционисање глобалног позиционог система, GPS/NAVSTAR. Такође, глобално дефинисање параметара Земље, кроз дефиницију глобалног система ITRS, обавља перманентно и међународна организација IERS. Параметри Земље и њихове временске промене се прате стално кроз реализацију међународног терестричког референтног оквира (енг. ITRF-International Terrestrial Reference Frame), што је ознака за реализацију дефинисаног система ITRS. Локални геодетски датум је одређен познавањем параметара његовог одступања од глобалног датума ITRS или WGS84. Параметри одступања, тј. параметри геодетског датума су три линеарне транслације дуж координатних оса X, Y и Z, три угловне ротације око сваке од координатних оса и један параметар размере. Оваква датумска трансформација се често изводи према Хелмертовим правилима. Елипсоид је одређен својом великом полуосом  $a$ , и својим коефицијентом спљоштености  $1/f$ , Дакле, одређивањем ових девет величина, се потпуно формулише локални геодетски датум и њему придружени елипсоид.

#### **Основне препоруке у раду са различитим просторним координатним системима- Закључак**

Рад са просторним подацима и параметрима геодетског датума захтева пажљиво поступање. Главни проблем и честа замка која може да се појави је неправилна употреба параметара више геодетских датума, који су присутни у различитим скуповима података. Постоји велика историјска заоставштина, у виду карата, планова, алфанумеричких табела и другог геодетског материјала. Још увек је у употреби картографски материјал заснован на координатним системима локалног карактера. Комбиновање, на пример карата из северне и јужне Европе, производи значајне несугласице. Различите географске карте су продукт картографске пројекције са различитих елипсоида. Елипсоиди су претходно придружени међусобно различитим координатним системима који нису геочентрични и чији је положај и оријентација локалног карактера. Истовремено се данас продукује веома обимна количина података, мерења и геодетских подлога. Географска карта која је креирана данас је производ коришћења савремених глобалних система, па њен геодетски

датум може да буде глобалног карактера тј. геоцентричан, на пример WGS84. Зато је значајна последица изражен несклад геодетских датума старијих података, са данас снимљеним материјалом. Захтеви савремених истраживача и коришћење информационих решења такође стварају притисак да се проблем реши на системски начин. Несагласност координатних система просторних података може да буде препозната кроз два појавна облика:

- подаци имају на исти начин дефинисан координатни систем, али је реализован различито за различите скупове података. Тако је свака појединачна реализација, свака на свој начин, изведена неправилно, те не одговара савременим захтевима.
- подаци имају два, или више различито дефинисаних геодетских координатних система

Први случај се често среће приликом употребе старијих система геодетског премера. Може се са разлогом говорити о геодетским мрежама које нису заправо никада реализоване на исправан начин, о такозваним ‘запуштеним’ мрежама. Из различитих разлога, кроз историју су приликом реализације референтног оквира, често занемариване важне научне чињенице и прављене суштинске грешке. У времену без рачунара, у прошлости је био чест случај да се математичка израчунавања у геодетској мрежи не изводе интегрално и хомогено. Ширење територије мреже или њена денсификација је извођена често уз ненаучне претпоставке и апроксимативно. Чињенице као што су тектонска, регионална и локална померања тла су углавном занемариване. Проблем не би био толико значајан, да нема огромног броја података који су системски везани за мрежу. Геодетски и катастарски премер, подлоге урбаниста, картографа и осталих, зависе суштински од оваквог референтног система (Слика 11). Превазилажење проблема овог типа, данас представља изазов првенствено у геодетској струци. Постоји много, веома захтевних и комплексних предлога и модела решења ове несагласности (Благојевић 2009.). Други случај је првенствено проблем логистичке и организационе природе. Различити координатни системи, по својој дефиницији и реализацији могу да се трансформишу у један хомогени обједињени датум. Да би овај проблем био решен, неопходно је усвајање једног циљног геодетског датума, па се најчешће бира да то буде глобални геоцентрични геодетски датум. Најчешће је то елипсоид и координатни систем WGS84, који се иначе по потреби, једноставно може успоставити применом GNSS технологије. За тако усвојени циљни датум је даље неопходно одређивање датумских параметара сваког појединачног локалног датума. Примењује се дакле такозвана датумска трансформација, која је данас обавезан алат и интегрисана је у свим софтверским системима GIS-а.

**Слика 11. Последица положајне и висинске несагласности два координатна система северноамеричког континента. Положајни датуми NAD27 vs. NAD83 и висински NGVD29 vs. NAVD88**

Литературу видети на страни 91.