KARSZTFEJLŐDÉS XVI.
Szombathely, 2011. pp. 315-327.

A DGPS-TECHNIKA ALKALMAZÁSA BARLANGBEJÁRATOK HELYÉNEK MEGHATÁROZÁSÁRA

TARSOLY PÉTER

Nyugat-magyarországi Egyetem, Geoinformatikai Kar, Geomatikai Intézet, 8000, Székesfehérvár, Pirosalma u. 1-3., tp@geo.info.hu

Abstract: The cave cadastre in Hungary is using nowadays only post-processing methods (GIS receivers, code measurement, environment dependent elevation cut off angle) to determine the position of entrances. In my research I aimed to investigate the accuracy of real-time, GIS purpose satellite positioning applying CMAS standard. Furthermore, to formulate those requirements which allow of widely applying real-time technology together with post-processing in the area of the cave cadastre.

Bevezetés

A jelenlegi kataszter utófeldolgozásos technológiát használ, melynek lényege, hogy a terepen csak nyers mérési adatokat rögzítenek, és azokat a mérés befejezése után, irodában, valamely referenciaállomás vagy permanens állomás mért adatainak a felhasználásával kiértékelik. Ügyelve arra, hogy a permanens állomás és a vektor végpontja közötti távolság a megfelelő korláton (50-60 km) belül maradjon, még kódmérés felhasználásával is elérhető a deciméteres pontosság. A megoldás azonban három kérdést is felvet: szükség van-e arra, hogy a barlangok bejáratait deciméter pontossággal ismerjük, és milyen romlást eredményez a számított koordináták pontosságában a vektorhossz kritikus távolság fölé növelése? Figyelembe véve az időráfordítást, megbízhatóságot, gazdaságosságot és műszerigényt, az utófeldolgozásos vagy a valós idejű technológia felel meg jobban a barlangkataszter céljainak?

A bejáratok koordinátáit nem szükséges ismerni deciméteres pontossággal, sok esetben nem is lehetséges a bejárat azonosítása csak méter élesen. A koordinátát tehát elegendő ismernünk méteres pontossággal; ez a meghatározási pontosság elegendő a bejárat újbóli terepi megtalálásához. Ezt a pontosságot biztosítja az utófeldolgozás még 50-60 kilométert meghaladó vektorhossz esetén is, azonban műszer és számítás igénye, a ráfordított idő és a gazdaságosság tekintetében kedvezőtlenebb, mint a valós idejű meghatározás. Az utófeldolgozáshoz mért nyers adatok tartalmazzák az adott pillanatban fogott összes műhold által sugárzott jelsorozatot (ami lehetővé teszi az adatok szűrését és különböző paraméterek melletti feldolgozását), míg a

valós idejű meghatározás csak a számított koordináta-párokat tárolja. Az optimális megoldás az utófeldolgozásos és valós idejű technológiák együttes alkalmazásában rejlik, de jelenleg nem minden pont koordinátáját lehet valós idejű technológia felhasználásával meghatározni. Egyrészről az EGNOS-jelek (EGNOS - European Geostationary Navigation Overlay Service; a GPS egyik műholdas alapú kiegészítő rendszere) sem foghatók minden felmérési helyzetben (szükséges a szabad kilátás dél felé); másrészről a GPRS/3G/WIFI-n keresztüli NTRIP használat sem megoldható minden esetben a térerő hiánya miatt.
A DGPS-technika egyik alkalmazási lehetősége Magyarországon az ingyenes EGNOS-jelek vétele, azonban létezik másik lehetőség is, a hazai aktív hálózat DGPS internetes szolgáltatása és a Geotrade GNSS-hálózata is. Kutatásomban csak az EGNOS-jelek vételével megvalósuló DGPS-technikát vizsgáltam meg.

A vizsgálati mérések folyamatának bemutatása

A vizsgálati mérések végrehajtására a Nyugat-magyarországi Egyetem Geoinformatikai Karának tetején elhelyezett középső betonpilléren került sor ideális, kitakarás-mentes mérési környezetben. A barlangbejáratok az ideálisnak tekintett helyzettel ellentétben sokkal mostohább körülmények között találhatóak, nagyon gyakran sziklafalak vagy kiugró sziklaperemek (részleges vagy teljes oldalkitakarás) alján. Az általam végzett vizsgálatok csak abban az esetben tekinthetőek mértékadónak, ha a barlangbejárat közelében kijelölhető hasonlóan körpanorámás hely. Mindez azt jelenti, hogy a tárgyalt megoldás létjogosultsága csak ritka, egyedi esetekben lehetséges.
A méréseket bő egy év időtávlatában végeztem (2009.08.11. és 2010.09.03. között) egy TDS Recon kéziszámítógépre szerelt Hemisphere Crescent vevő (csak GPS és EGNOS holdak jelének vétele) segítségével különböző évszakokban, napszakokban és időjárási körülmények között, hogy a troposzféra, ionoszféra és műholdkonstelláció hatását változó körülmények között tudjam vizsgálni. A kísérletek során vizsgáltam a különböző beállítási lehetőségeket, úgy mint a hagyományos navigációs üzemmódot (abszolút GPS-mérés=EGNOS0), EGNOS korrekciók vételét, a mérések ismétlésszámát (1-10-100-500-1000-szeres mérési ismétlésszám, az átlagolást a műszer végezte) és a különböző észszerűségi keretek között mozgó műszeres beállítású kitakarási szögeket (5-10-15-20 fok). Egy mérésnek egyetlen epochányi, azaz körülbelül 1 másodpercnyi mérést neveztem. A vizsgált időszakban 747 darab koordináta hármast határoztam meg a WGS84 (X, Y, Z) rendszerben. Az EGNOS-korrekciók vétele mellett lényegében az ITRF2000

rendszerben kapunk koordinátákat, azonban a WGS84 és ITRF2000 között meglévő mintegy 5 centiméteres eltéréstől a barlangkataszter gyakorlati felhasználási szempontjai miatt eltekintettem. A barlangbejáratok 3D objektumok, azonban a földfelszínen lévő bejárat ábrázolásához elegendők a vízszintes koordináták is. A vízszintes és magassági koordináták között meglévő pontosság különbség indokolttá tette tehát, hogy a vizsgálatokat ne csak WGS84 térbeli derékszögű koordinátákkal (3D), hanem síkvetületi és magassági adatokkal (2D+1D) is elvégezzem EOV-ban.
A WGS84 rendszerében mért koordinátákat első lépésben az *EUREF Permanent Network* honlapján található transzformációs programmal átszámítottam az ETRS89 rendszerbe, majd az így kapott koordinátákat az EHT^2 program segítségével transzformáltam át EOV-ba.
Az összehasonlítás alapját képező referencia-koordinátát egy Leica 500-as típusú geodéziai célú vevővel, statikus méréssel határoztam meg az ETRS89-es rendszerben. A kapott koordinátát az (EHT^2) transzformációs szoftver alkalmazásával számítottam át EOV-ba. A statikus mérés természetesen szigorú értelemben nem tekinthető hibátlannak - hiszen a fázismérésnek ugyanúgy megvannak a hibái, mint a kódmérésnek - azonban a vizsgálatom szempontjából a centiméteres pontossággal jellemezhető geodéziai célú helymeghatározás hibátlannak tekinthető a méteres pontossággal jellemezhető valós idejű, térinformatikai célú műholdas helymeghatározáshoz képest. A mérési jegyzőkönyvben (saját Excel táblában, a kutatás céljára kialakított jegyzőkönyvben) a koordináták mellett számos más, a mérési körülményeket jellemző paramétert is tároltam, amelyek segítségével lehetőség nyílt a mérések megbízhatóságát befolyásoló tényezők jobb megértésére. A mérési jegyzőkönyv elemei vázlatosan a következők voltak:
1. A mérés sorszáma, helyszíne és időpontja, a pillér WGS84 és EOV koordinátái a referenciamérésből;
2. Az aktuális beállítások értékei, valamint a vevő által meghatározott koordináták, azok különbségei a referencia-koordinátához képest, továbbá a 3D lineáris eltérések a referencia-értékhez képest;
3. A vevő által kijelzett PDOP-érték, középhibák (HRMS, VRMS), jel/zajviszony-átlag, észlelt műholdak száma.

A mérési eredmények előfeldolgozása

A mérési eredmények előfeldolgozása segítséget nyújthat a megbízhatósági mérőszámok becslésében, valamint azoknak az intervallum-határoknak a lehatárolásában, amelyek közé szélső esetekben ezen értékek eshetnek. A tényleges feldolgozás megkezdése előtt nincs lehetőség arra, hogy „*valódi*”

megbízhatósági mérőszámokkal dolgozzunk, azonban az y, x, M, és 2D/1D lineáris eltérések statisztikájának és hisztogramjának elemzése képet adhat arról a folyamatról, amely meghatározza a DGPS-technika által szolgáltatott adatok felhasználhatóságának tartományát.
Az előfeldolgozás folyamatához tartozik a Δy, Δx, ΔM, 2D és 1D lineáris eltérések középhibáinak meghatározása is, azonban ezek az adatok önmagukban szemlélve nem nyújtanak szemléletes képet a pontosságról. Ahhoz, hogy a későbbi vizsgálatokhoz megfelelő adatok álljanak a rendelkezésünkre leíró statisztikákat és hisztogram-elemzéseket érdemes végezni.
A leíró statisztika célja egy adatsor lehető legteljesebb elemzése a matematikai statisztika módszereivel. Az egyszerűség, könnyebb áttekinthetőség és érthetőség kedvéért a leíró statisztikai elemzésekhez a Microsoft Excel beépített elemző funkcióját használtam. Az alább felsorolt statisztikai mérőszámokat mind az y, x, M, 2D és 1D lineáris eltérés esetében kiszámítottam: számtani közép, standard hiba, medián, középhiba, variancia, terjedelem. Ezeket az adatokat egyenként meghatároztam az egyes beállítási módokhoz és kitakarási szögekhez kapcsolódóan, azonban a mérési folyamat egységes jellemzéséhez a különböző kitakarási szögekhez kapott eredményeket végül összevontam, és így olyan statisztikákat számítottam, amelyek egységes képet nyújtanak a térinformatikai célú műholdas helymeghatározási eljárásokról.
A mérési eredmények további előzetes elemzéséhez tartozott még az adatsorok hisztogramokon történő megjelenítése és elemzése is. A hisztogram egy rendezett minta előre kitűzött változó-tartományaiba eső elemek számát vagy gyakoriságát ábrázolja. A hisztogram hasábjainak szélessége a változó-tartományt, magassága az (abszolút vagy relatív) gyakoriságot ábrázolja. A hisztogramok tehát alkalmasak arra, hogy megvizsgáljuk, hogy a mért koordináták, koordináta-különbségek és lineáris eltérések a legkisebb és legnagyobb értékek által kijelölt intervallum-határokon belül milyen eloszlást mutatnak. Mindebből következtetéseket lehet levonni arra vonatkozóan, hogy a mérések pontossága milyen értéktartományokon belül fog mozogni, mennyi lesz a becsült értéke a középhibának, azaz jellemezni tudjuk az egyes mérésekhez kapott eredményeket. Az egységes jellemzéshez a különböző kitakarási szögekhez és beállítási módokhoz kapott eredményeket összevontam. A leíró statisztikákból és a hisztogram-elemzésekből levonható következtetéseket és a legfontosabb jelzőszámokat az *I. táblázat* tartalmazza:

I. táblázat
Table I.

Az előfeldolgozás legfontosabb eredményei
The most important results of the pre-analysis

	Abszolút GPS-mérés	EGNOS1x	EGNOS10x	EGNOS100x	EGNOS500x	EGNOS1000x
	Az előfeldolgozásból becsült középhibák [m]					
y	±1.3	±0.9	±0.9	±0.6	±0.3	±0.3
x	±2.6	±1.8	±1.7	±1.5	±0.5	±0.5
M	±4.2	±3.0	±3.0	±2.2	±0.7	±0.6
2D	±2.0	±1.5	±1.3	±1.0	±0.4	±0.4

A DGPS-technika pontosságának vizsgálata a CMAS-módszerrel

A pontosság jellemzésére használt egyetlen mérőszám azt az érzetet keltheti, mintha a pontosság egy egyszerűen, könnyen és egzaktul meghatározható mérőszám lenne. A valóságban azonban túl sok tényező befolyásolja ezt az értéket; ezen tényezőknek nem ismerjük minden esetben a hatásmechanizmusát. Sokkal megfoghatóbb, egyben árnyaltabb megoldást ad, ha a pontosságot egy intervallumon belül becsüljük, és minden intervallumhoz valamilyen valószínűségi szintet rendelünk hozzá. A valószínűség fogalmának bevezetése magában hordozza a bizonytalanságot is, amelyet ugyan ki lehet fejezni matematikai módon, azonban mégis közvetíti a felhasználó számára azt az értékes információt, hogy a kapott mérőszámnak meg vannak a korlátai.

A CMAS- (Circular Map Accuracy Standard) módszert eredetileg a topográfiai és földrajzi térképek adatai helyzeti pontosságának az ellenőrzésére alakították ki (*MALING* 1989), azonban megfelelő újragondolás után alapelemei használhatók a műholdas helymeghatározás pontosságának a becslésében is (*TARSOLY* 2009). A módszer által használt paramétereknek nem ismert magyar nyelvű fordítása, ezért a továbbiakban az angol megfelelő betűszavaival fogok hivatkozni rájuk.

Tekintsük a helymeghatározás azon esetét, amikor a célunk az y, x síkkoordináta meghatározása. A CMAS-módszer alkalmazásának előfeltétele, hogy ismerjük az egyes koordináta-összetevők középhibáit (μ_y, μ_x). Ha feltételezzük, hogy méréseinket csak véletlen jellegű hibák terhelik, akkor lényegében a két középhiba egy ellipszis alakú függvényt fog meghatározni. Képzeljük el a terepen a hibátlannak tekintett ponthelyet, a helyi vízszintes síkjában pedig olyan koncentrikus ellipsziseket, melyek kis- és nagy tengelyei-

nek méretei eltérő valószínűségi szinteken jellemzik a pontosságot. A valószínűség, hogy a mért ponthely valamely ellipszisen belülre fog esni, arányos az ellipszis kis- és nagy tengelyeinek méretével. Ha a két koordináta középhibája egyenlő, vagy egyenlőnek tekinthető, akkor az ellipszisek körré válnak, amelyet sokkal egyszerűbb kezelni matematikailag. Ebben az esetben a hibátlannak tekintett ponthely körül a helyi vízszintes síkjában különböző valószínűségi szinthez tartozó, különböző sugarú koncentrikus körökkel fogjuk tudni jellemezni a pontosságot.

Az EOV-koordináták lényegében 2D+1D értékekként értelmezhetők, tehát a síkkordináták (y, x) és a magasság különböző vonatkoztatási rendszerben adottak. Ennek megfelelően a CMAS-paraméterek vizsgálatát is szét kell bontani 2D-re és 1D-re. Két dimenzióban a hibátlannak tekintett ponthely körül a pontosságot hibakörök fogják szemléltetni, amennyiben az y és x irányú koordináta-összetevők középhibáit azonosnak tekintjük. A valóságban a koordinátahibák középhibája nem azonos (*TARSOLY* 2003) és a GPS-mérésekre jelentősen hatnak szabályos hibák is. Ezektől azonban jelen vizsgálat keretei között eltekintünk.

Egy dimenzióban a pontosságot az álláspont függőlegesére illesztett hibaszakasz fogja jelképezni. A magassági érték különálló vizsgálatát az is indokolja, hogy a GPS-méréseken alapuló magasságmeghatározás egy nagyságrenddel megbízhatatlanabb, mint a síkban értelmezett koordinátáké. A későbbi következtetések szempontjából tehát szükséges ismerni, hogy az egyes összetevő tényezők hogyan befolyásolják a kapott végeredményeket.

A fenti megfontolásokból látszik, hogy a CMAS-módszer alkalmazása a barlangkataszterben nem tekinthető precíz megoldásnak, más célú meghatározásokban való alkalmazása csak alapos megfontolás után lehetséges.

Egy vektor meghatározása esetén legyenek az EOV y, x koordináták középhibái μ_y, μ_x, továbbá tételezzük fel, hogy a két mennyiség legyen egyenlő egymással ($\mu_y=\mu_x$). A vektor középhibája, és a CMAS-módszer alapparamétere (σ_c) ekkor:

$$\mu_V = \sqrt{(\mu_y^2 + \mu_x^2}$$

$$\sigma_c = \frac{\mu_V}{\sqrt{2}} \qquad (1)$$

A σ_c paraméter ismeretében számíthatók a CMAS-módszer paraméterei (*II. táblázat*), azaz lényegében a koncentrikus körök sugarai:

II. táblázat
Table II.

A CMAS-módszer paraméterei
The parameters of the CMAS-method

Név	Rövidítés	Valószínűség (%)	Származtatás
Circular standard error	**σ_c**	0.39	1.0 σ_c
Circular probable error	**CPE or CEP**	0.50	1.1774 σ_c
Circular mean square positional error	**MSPE**	0.63	1.4142 σ_c
Circular map accuracy standard	**CMAS**	0.90	2.1460 σ_c
Three-five sigma error	**3.5 σ**	0.99	3.5 σ_c

Az *II. táblázatban* látható paramétereket figyelembe véve, az előfeldolgozás során számított középhibák bevonásával az egyes mérési módszerekhez és kitakarási szögekhez az alábbi paraméterek számíthatók (*III. táblázat*):

III. táblázat
Table III.

A CMAS-módszer alkalmazása EGNOS0 (abszolút GPS-mérés), EGNOS1x és EGNOS 10x mérések esetén (P(%)=valószínűség) az EOV rendszerben
The application of the CMAS-method in the EGNO0, EGNOS1x, EGNOS10x measurements method using the EOV system

		Értékek [m]								
		5		10		15		20		
	P(%)	2D	1D	2D	1D	2D	1D	2D	1D	
CSE	39	2.1	2.7	1.9	2.8	1.8	3.2	2.4	4.3	EGNOS (0)
CPE	50	2.5	3.2	2.2	3.2	2.1	3.8	2.9	5.0	
MSPE	63	3.0	3.8	2.7	3.9	2.5	4.6	3.4	6.0	
CMAS	90	4.1	5.8	4.0	5.9	3.8	7.0	5.2	9.1	
3.5σ	99	7.4	9.4	6.6	9.6	6.2	11.3	8.5	14.9	
		Értékek [m]								
		5		10		15		20		
	P(%)	2D	1D	2D	1D	2D	1D	2D	1D	
CSE	39	1.2	2.2	1.3	2.4	1.4	3.5	1.7	4.2	EGNOS 1x
CPE	50	1.4	2.6	1.5	2.8	1.6	4.1	2.0	4.9	
MSPE	63	1.7	3.1	1.8	3.4	1.9	4.9	2.4	5.9	
CMAS	90	2.6	4.7	2.8	5.1	2.9	7.5	3.7	9.0	
3.5σ	99	4.3	7.7	4.5	8.3	4.8	12.2	6.0	14.6	
		Értékek [m]								
		5		10		15		20		
	P(%)	2D	1D	2D	1D	2D	1D	2D	1D	
CSE	39	1.2	2.0	1.2	2.2	1.3	3.4	1.9	4.4	EGNOS 10x
CPE	50	1.4	2.4	1.5	2.6	1.6	4.0	2.2	5.2	
MSPE	63	1.7	2.9	1.8	3.1	1.9	4.8	2.7	6.2	
CMAS	90	2.5	4.4	2.7	4.7	2.8	7.2	4.0	9.4	
3.5σ	99	4.1	7.1	4.3	7.7	4.6	11.8	6.6	15.4	
Mérési időtartam (1s=kb.1 epocha)										
1s	10s									

A gyakorlati életben a 90%-os valószínűségi szint vizsgálatának van jelentősége, hiszen ez mutatja azt a reális valószínűséget, amely mellett még érdemes dolgozni terepen, így a táblázat ezen értékeinek az összehasonlítását végeztem el részletesebben (*TARSOLY* 2003).
Abszolút GPS-mérés (a táblázatban EGNOS0) esetén a vízszintes pontosság (a táblázatban 2D) 5-10-15 fokos kitakarási szögek esetén kis mértékű, de határozott javulást mutat, míg a 20 fokos kitakarási szög esetén a korábbiakhoz képest egyértelműen romlik. A magasság (a táblázatban 1D) meghatározások pontossága az 5 fokos kitakarás mellett a legjobb, és folyamatosan romlik a kitakarási szög növekedésével. Az egyes beállítási módok pontosságának általános jellemzéséhez kiszámítottam a különböző kitakarási értékekhez kapott pontossági mérőszámok számtani átlagát. Az átlagolt értéket tekintve abszolút-GPS mérés esetén a vízszintes meghatározás pontossága 90%-os valószínűségi szinten várhatóan ± 4.5 méter, a magassági meghatározásé pedig ± 7.0 méter.
EGNOS1x beállítás esetén a vízszintes meghatározás pontossága a kitakarási szög növelésével egyértelmű romlást mutat. A magassági meghatározások esetén ugyanez a tendencia figyelhető meg. EGNOS1x mérés esetén a vízszintes meghatározás pontossága 90%-os valószínűségi szinten várhatóan ± 3.0 méter, a magassági meghatározásé pedig ± 6.5 méter.
EGNOS10x beállítás esetén a vízszintes és magassági meghatározások pontossága azonos tendenciát mutat az EGNOS1x beállításhoz, tehát romlik a kitakarási szögek növekedésével. EGNOS10x mérés esetén a vízszintes meghatározás pontossága 90%-os valószínűségi szinten várhatóan ± 3.0 méter, a magassági meghatározásé pedig ± 6.5 méter, tehát nem mutat javulást az EGNOS1x beállításhoz képest.
A *3. táblázatban* látható mérőszámok jól jellemzik a DGPS-technika pontosságát, azonban nem szabad elfelejtenünk, hogy ezek a számok csak becslést adnak, szélsőségesnek tekinthető mérési környezetben (kevés számú műhold, zavaró objektumok stb.) lényegesen rosszabb pontossággal kell számolnunk. A kitakarási szögek figyelembe vétele azt sugallja, hogy az 5-10 fokos magassági kitakarás nyújtja a legjobb megoldást. Fedett terepen a többutas terjedés hatása fokozottan érvényesül különösen az 5 fokos kitakarási szög alkalmazása mellett, így a barlangkataszterbeli gyakorlati felhasználás szempontjából a 10 fokos kitakarási szöget lehet az optimális választásnak tekinteni. Mindezt 2001-ben a Balaton-felvidéki Nemzeti Park területén végzett barlangkataszteri felmérések és vizsgálatok is igazolták (*TARSOLY* 2003). A 15 és 20 fokos magassági kitakarási szög alkalmazása esetén a pontosság értékek már jelentős romlást mutatnak az 5 és 10 fokos kitakarási szöghöz képest, azonban meg kell jegyeznünk, hogy mérlegelve a

vevő körüli kitakarás jellegét és elhelyezkedését a 15-20 fokos magassági kitakarás alkalmazása is indokolt lehet (*TARSOLY* 2003).
A táblázatból megállapítható, hogy a mérési ismétlésszám növelése kedvezően befolyásolja a pontosság alakulását. A további vizsgálatokat már csak az optimálisnak tekintett 10 fokos kitakarási szög mellett végeztem, 100-500-1000-szeres ismétlésszám mellett, és a CMAS-módszer paramétereinek a levezetéséhez közel 100 mérési alkalom eredményeit használtam fel. Az eredményeket a *IV. táblázat* tartalmazza.

IV. táblázat
Table IV.
A CMAS-módszer alkalmazása EGNOS100x, EGNOS500x és EGNOS 1000x mérések esetén az EOV rendszerben
The application of the CMAS-method in the EGNO100x, EGNOS500x, EGNOS1000x measurements method using the EOV system

	Értékek [m]			
		10		
	Valószínűség (%)	2D	1D	
CSE	39	1.1	2.3	EGNOS 100x
CPE	50	1.3	2.7	
MSPE	63	1.6	3.2	
CMAS	90	2.4	4.9	
3.5σ	99	4.0	7.9	
	Értékek [m]			
		10		
	Valószínűség (%)	2D	1D	
CSE	39	0.4	0.7	EGNOS 500x
CPE	50	0.5	0.8	
MSPE	63	0.6	1.0	
CMAS	90	0.9	1.5	
3.5σ	99	1.4	2.5	
	Értékek [m]			
		10		
	Valószínűség (%)	2D	1D	EGNOS 1000x
CSE	39	0.4	0.6	
CPE	50	0.4	0.7	
MSPE	63	0.5	0.9	
CMAS	90	0.8	1.4	
3.5σ	99	1.3	2.2	
	Mérési időtartam (1s=kb.1 epocha)			
3.5 perc	10-15 perc		30 perc	

EGNOS100x mérés esetén a 2D meghatározás pontossága 90%-os valószínűségi szinten várhatóan ± 2.4 méter, az 1D meghatározásé pedig ± 4.9 méter, tehát lényeges javulást az EGNOS10x beállításhoz képest csak a magasságok meghatározása mutat. EGNOS500x mérés esetén a 2D meghatározás pontossága 90%-os valószínűségi szinten várhatóan ± 0.9 méter, az 1D meghatározásé pedig ± 1.5 méter, tehát a pontosság javulása számottevő mind a két érték esetében. EGNOS1000x mérés esetén a 2D meghatározás pontossága 90%-os valószínűségi szinten várhatóan ± 0.8 méter, az 1D

meghatározásé pedig ± 1.4 méter. A pontosság javulása az EGNOS500x beállításhoz képest mindösszesen 10%-os a 2D értékek esetében és 12%-os a magasságok esetében. A mérési időtartam 15-20 perccel megnő az 500-as és 1000-es ismétlésszám között, ugyanakkor a több ráfordított idő nem térül meg a középhibák tekintetében. Mindezen értékek megerősítik azt, hogy EGNOS-korrekciók alkalmazása esetén a meghatározott koordináták pontossága egyértelműen javulást mutat az ismétlésszám függvényében, és az ismétlésszám ésszerűségi határa valahol 100-500 körül húzódik. Az adatok elemzéséből az is kitűnik, hogy a magasság meghatározás pontossága lényegesen rosszabb a síkkoordinátákénál. Az összesített értékek vizsgálatából megállapítható, hogy a magassági értékek pontosságánál a síkkoordinátákhoz képest mintegy 1.5-2.0 szorzótényezővel lehet számolni.
A gyakorlati életben az EGNOS-vevőknél a WGS84-es rendszerben meghatározott koordináták közvetlenül kerülnek átszámításra valamilyen transzformációs eljárással (VITEL, lokális transzformáció stb.) az EOV rendszerbe. Az általam használt vevővel (Hemisphere) lehetőség volt a terepen meghatározott WGS84 koordinátákat a VITEL2009-es transzformációs program segítségével közvetlenül EOV-ba átszámítani. A valós időben kapott EOV koordináták azonban csak kvázi-EOV koordinátáknak tekinthetők, hiszen a VITEL2009, az ETRS89 és EOV rendszerek közötti átszámítást teszi lehetővé. A WGS84 és ETRS89 rendszerek közötti eltérést (mintegy 0.5 méter) ez a megoldás nem veszi figyelembe. A barlangkataszter céljára legalkalmasabbnak tekintett beállítási mód (EGNOS500x, 10 fokos magassági kitakarás) használatával terepen nyert kvázi EOV és az irodában számított helyes EOV koordináták összehasonlításának eredményét az *V. táblázat* tartalmazza:

V. táblázat
Table V.

Eltérés a kvázi EOV és az EOV rendszer között
Distinction between the kvazi EOV and EOV systems

Beállítási mód: EGNOS500x, 10 fokos magassági kitakarás		
	Átlagos lineáris eltérés a teljes mérési sorozatra [m]	
	2D	1D
kvázi EOV – helyes EOV	~0.6	~0.0
Kvázi EOV - referenciapont	~0.9	~0.8
helyes EOV - referenciapont	~0.8	~0.7

A táblázatból látható, hogy a WGS84 rendszerből a VITEL2009 felhasználásával közvetlenül nyert kvázi EOV koordináták nem rontják számottevően a meghatározás pontosságát, tehát a barlangkataszter gyakorlati alkalmazá-

sának szemszögéből nézve a kvázi EOV koordináták használata megengedett lehet.

A DGPS-technika alkalmazása a barlangkataszterben

A CMAS-módszer alkalmazásával levezetett megbízhatósági mérőszámok ismeretében látható, hogy az EGNOS-korrekciókkal segített helymeghatározás alkalmas lehet – megfelelő feltételek teljesülése mellett – a barlangkataszter céljaira. Gyakorlati megfontolásokból a 10 fokos magassági kitakarási szöget és 500-szoros ismétlésszámot érdemes alkalmazni, mert a barlangkataszter által megkövetelt ±1.0-1.5 méteres pontosságot ez típusú meghatározás várhatóan biztosítja.
A mai, modern térinformatikai célú műholdas helymeghatározó eszközök az esetek ~90%-ában alkalmasak valós időben az 1 méter alatti pontosságú 2D pozíció és a 1.5 méter alatti pontosságú 1D pozíció meghatározásra ingyenes EGNOS korrekcióval, amennyiben az alábbi feltételek (saját tapasztalataim, továbbá a http://www.gpsdebrecen.hu/gps_pontossag.htm weboldalon olvasható összefoglalás alapján) teljesülnek:

- szabad kilátás az égboltra (a kitakarási szög a zavaró objektumok függvényében 5-10-15 fok)
- minimum 6 GPS műhold folyamatos követése
- maximum 3-as PDOP érték
- a mérés megkezdése előtt minimum 10 másodpercnyi tartózkodás a mérési ponton
- minimum 10 perc mérési idő vagy 500 átlagolt mérés
- a készülék fejmagasságban tartása 45 fokos szögben vagy külső GPS antenna használata.

Az EGNOS-korrekciókkal segített helymeghatározásnak a barlangkataszter szempontjából két alkalmazási területe lehetséges. Az egyik a bejáratok koordinátájának meghatározása, a másik pedig a barlangbejárati helyszínrajzok elkészítéséhez szükséges mérések végrehajtása.
A bejárati koordináták meghatározása csak a korlátok mérlegelése és a fentebb említett szempontok betartása mellett lehetséges. A pontosságot tárgyaló fejezetben bemutatott *3-4. táblázatok* segítik terepen a munkát az objektív, hasznos döntések meghozásában. A táblázatok lényegében gyűjtőtáblázatok, amelyekben található mérőszámokat a terepi körülményekhez igazítva el tudjuk dönteni, hogy a bejáratot meg lehet-e határozni a kívánt megbízhatósággal valós időben vagy sem.
Az EGNOS-korrekciókkal segített helymeghatározás alkalmas lehet a bejárat környezetét bemutató helyszínrajzok elkészítéséhez szükséges mérések

elvégzéséhez is, amennyiben a felmérési környezet lehetővé teszi ezen DGPS-módszer alkalmazását. Az Országos Barlangnyilvántartás (OBNY) nem írja elő a barlangkataszter számára az ilyen célú helyszínrajzok készítését, azonban meglétük nagymértékben könnyítheti a barlangok nyilvántartását, terepi felkeresését.
A barlangok - különösen a kisbarlangok - bejáratai a terepen nehezen lelhetők fel; a megadott, és akár *Internetről* letölthető koordináták valamint a közepes (1:20 000-60 000) méretarányú turistatérképek jelölései a generalizálás és a nem kellő részletesség miatt sokszor nem bizonyulnak elegendőnek a bejárat felleléséhez. Szükséges lehet olyan térképek/helyszínrajzok létrehozása, amelyek kellően részletesen mutatják a barlang bejáratának közvetlen környezetét, az ott található sziklaformációkat, növényeket, a mellettük elhaladó utakat és nyiladékokat, a bejárattól látható jelentős tereptárgyakat stb. Az EGNOS-korrekciókkal segített helymeghatározás – és egy mérőszalag és egy tájoló – által biztosított méteres – ideális esetekben szubméteres – megbízhatóság elegendő ahhoz, hogy a bejárat körül fellelhető tereptárgyakat bemérjük. Természetesen ebben az esetben sem hagyhatók figyelmen kívül az alkalmazás feltételeire megállapított szempontok, továbbá a táblázatokban összefoglalt pontossági mérőszámok.

Összefoglalás

A GNSS technológiák mára széles körben elterjedtek, pontosságuk a dekaméterestől a milliméteresig terjed. A felhasználók általában reális pontossági mérőszámot is elvárnak a helymeghatározó adatok mellé, ez azonban összetett feladat. Beletartozik a GNSS-mérésre való alkalmasság vizsgálata, a felhasznált alaprendszerek és kiegészítő rendszerek, az alkalmazott mérési és feldolgozási technológiák, beállítások hatásának ismerete. Jelenleg a barlangkataszterben utófeldolgozásos technológiát alkalmaznak, mely minden tekintetben megfelelő pontosságú koordinátákat szolgáltat. Kutatásomban az GPS- és EGNOS-rendszerekre alapuló, valós idejű térinformatikai célú műholdas helymeghatározás (DGPS) alkalmazási lehetőségeit és pontosságát vizsgáltam meg a barlangkataszter, mint lehetséges felhasználási terület szempontjából, és a tesztmérések adatait minősítettem a CMAS-módszer segítségével az EOV (2D+1D) rendszerben. Az általam vizsgált DGPS-eljárás csak abban az esetben alkalmazható terepen barlangbejáratok meghatározására, ha a felmérési körülmények lehetővé teszik az EGNOS-jelek vételét, és az általam levezetett megbízhatósági mérőszámok csak abban esetben állják meg a helyüket, amennyiben a tesztméréshez hasonló paraméterekkel rendelkező helyszínen lehet a méréseket végrehajtani.

A vizsgálati mérésekből bizonyítást nyert, hogy 90%-os valószínűségi szinten 10 fokos magassági kitakarási szög és minimum 500-szoros ismételt mérés automatikus átlagszámítása esetén az EGNOS-korrekciókra épülő DGPS-technikával vízszintes (2D) értelemben ± 0.9 méteres és magassági (1D) értelemben pedig ± 1.5 méteres pontosság érhető el. A fent említett pontosságot visszaigazolták a Velencei-hegységben (*TARSOLY* 2010), a tesztméréshez hasonló terepi körülmények között végzett barlangbejárat-meghatározások is.

IRODALOM

MALING, D.H (1989): Measurements from maps - Pergamon Press, Oxford University, 577 p.

TARSOLY P. (2003): GPS alkalmazása barlangbejáratok helyének meghatározására - OTDK Konferencia különdíj, Debrecen, 54 p.

TARSOLY P. (2007): Barlangok Információs Rendszere. - In: Földméréstől a geoinformatikáig. 45 éves a GEO., NyME-GEO, Székesfehérvár, p. 295-303.

TARSOLY P. (2009): Digital topographical maps-positional accuracy (How CMAS-method works in the practise). - Proceeding of 7th FIG Regional Conference, Hanoi, Vietnam, Oct. 19-22. 2009. CD. 11 p.

TARSOLY P. (2010): A valósidejű, térinformatikai célú műholdas helymeghatározás jellemzése a barlangkataszter szempontjából - Geomatikai Közlemények XIII/2, MTA GGKI, Sopron, 2010, p. 73-81.