

2. előadás:

Vonatkoztatási rendszerek

2.1. A nemzetközi földi vonatkoztatási rendszer (ITRS)

A geodézia az 1900-as évek elejétől a földi pontok helyzetének meghatározásához a földtesthez (minél jobban) kötött és a Földdel együtt forgó vonatkoztatási (koordináta)rendszert használ. Ennek megvalósítására határozták meg az 1900,0–1906,0 közötti pólushelyzetek középértékeként az egyezményes (konvencionális) nemzetközi kezdőpontot (Conventional International Origin, CIO), valamint a greenwichi közepes szintfelületi meridiánt (Greenwich Mean Astronomic Meridian), amit BIH (Bureau International de l'Heure, Nemzetközi Időszolgálat) kezdőmeridiánnak is neveztek. Rájuk építve vezette be az IUGG/IAG 1967-ben az egyezményes (közepes) földi rendszert (Conventional Terrestrial System, CTS), amit CIO-BIH rendszernek is neveztek. Ennek több, későbbi változata volt az 1900-as évek utolsó 1-2 évtizedéig (Ádám, 1986 a,b). A fejlődés következő állomásaként az 1988. január 1. óta működő IERS (International Earth Rotation and Reference Systems Service, nemzetközi földforgási és vonatkoztatási rendszerek szolgálat, <http://www.iers.org>) tevékenységére támaszkodva az IUGG és annak egyik alkotó szövetsége, az IAG 1991-ben vezette be a Nemzetközi Földi Vonatkoztatási Rendszert (International Terrestrial Reference System, ITRS, <http://www.iers.org/iers/pc/itrs>).

Az ITRS az IERS által kozmikus geodéziai mérések és elméleti modellek alapján meghatározott, a Földdel együtt forgó, geocentrikus földi vonatkoztatási rendszer. Kezdőpontja tehát egybeesik (\pm néhány milliméterre) az óceánok, a tengerek és az atmoszféra tömegét is magában foglaló teljes Föld tömegközéppontjával. A vonatkoztatási rendszer hosszegysége a méter (SI mértékegység). Tengelyeinek tájékozása összhangban van a BIH által 1984,0 epochában meghatározott vonatkoztatási rendszer (BIH Terrestrial System, BTS) tengelyeivel. Ennek megfelelően a +Z tengely az IERS által meghatározott pólus (IERS Reference Pole, IRP) irányába mutat. Az X tengely pedig az IERS által meghatározott kezdő szintfelületi meridiánsík (IERS Reference Meridian, IRM) és a Z tengelyre a geocentrumban (a kezdőpontban) merőleges sík metszéspontjában van. A +Y tengely a +X és a +Z tengellyel jobbsodrású rendszert alkot (*l. ábra*). Az ITRS alapirányai (IRP és IRM) a BTS (korábban a CIO-BIH) rendszer alapirányáival mintegy $\pm 0,005''$ -en belül összhangban vannak. ($0,001''$ iránykülönbség a Föld felszínén 3 cm-nek felel meg.)

A nemzetközi földi vonatkoztatási rendszert (ITRS) az IERS keretében működő kozmikus geodéziai állomások koordinátái és mozgássebessége valósítják meg a természetben (2. ábra).

Ezek alkotják a *Nemzetközi Földi Vonatkoztatási Keretpontok* hálózatát (International Terrestrial Reference Frame = ITRF, <http://lareg.ensg.ign.fr/ITRF/>). Ezt 1988 (az IERS tevékenységének kezdete) óta rendszeresen bővítik és javítják, amelynek eredményeként különböző ITRF-megvalósításokat (realizációkat) nyertek. Ezeket a szakirodalomban ITRFyy jelöléssel látják el, ahol yy kiterjesztés a meghatározás évszámának utolsó két számjegye (2.1 táblázat). Az elmúlt 16 év folyamán az ITRF-koordináták tehát többször is megváltoztak. Jelenleg az ITRF00 (ITRF2000) jel. nemzetközi földi vonatkoztatási keret áll a rendelkezésünkre (3. ábra), melyet a Földünk felszínén mintegy 500 helyen működő állomás több mint 800 pontjának koordinátái ($\pm 0,5\text{--}2,0$ cm) és mozgássebessége ($\pm 1\text{--}3$ mm/év) valósít meg a természetben.

Az ITRS és az ETRS89 vonatkoztatási rendszerek kerethálózatai

S	az ITRS kerethálózatai	az ETRS89 kerethálózatai
1.	ITRF88	
2.	ITRF89	ETRF89 (\equiv ITRF89)
3.	ITRF90	ETRF90
4.	ITRF91	ETRF91
5.	ITRF92	ETRF92
6.	ITRF93	ETRF93
7.	ITRF94 (\approx WGS84)	ETRF94
8.	ITRF96	ETRF96
9.	ITRF97	ETRF97
10.	ITRF00 (ITRF2000)	ETRF00 (ETRF2000)
11.	ITRF2005	ETRF2000
12.	ITRF2008	ETRF2000

2.1 táblázat. Az ITRS és az ETRS89 vonatkoztatási rendszerek kerethálózatai

A GPS-műholdak pontos pályadatait ezekben a geocentrikus koordináta-rendszerekben határozták, illetve határozzák meg, és a Nemzetközi GNSS Szolgálat (International GNSS Service, IGS; <http://igsb.jpl.nasa.gov>) tevékenysége keretében teszik közzé. Ezért az egységes európai geodéziai-geodinamikai alapok létrehozásakor a GPS-technika alapul vételével végzett valamennyi helymeghatározás eredményét először ezekben a koordináta-rendszerekben (ITRFyy) kapták illetve kapják meg (napjainkban ITRF2000-ben).

2.2. Az európai földi vonatkoztatási rendszer (ETRS89)

Az IERS eredményei azt mutatják, hogy az európai kontinentális tábla az ITRS-hez viszonyítva mintegy 2–3 cm/év sebességgel ÉK irányba mozog (4. ábra). Az európai országok annak érdekében, hogy az európai tábla mozgása kisebb mértékben befolyásolja a

rajta fekvő állomások (alappontok) földi koordinátáit, 1989-ben elhatározták, hogy az Európában GPS-mérések alapján fokozatosan kiépülő EUREF (European Reference Frame) alapponthálózat vonatkoztatási rendszerül az európai táblához kötött, vele együtt mozgó vonatkoztatási rendszert vezetnek be. Ezt a rendszert Európai Földi Vonatkoztatási Rendszernek (European Terrestrial Reference System 1989, ETRS89) nevezzük (az évszám a vonatkoztatási rendszer bevezetésének évére utal) (<http://lareg.ensg.ign.fr/EUREF>).

Az ETRS89 vonatkoztatási rendszer gyakorlati megvalósulását az európai állomásoknak az IERS tevékenysége keretében és az EUREF folyamatos (permanens) GPS-hálózat (EPN) mérése alapján számított koordinátái és mozgássebessége adja. Ezek alkotják az *Európai Földi Vonatkoztatási Keretpontok* hálózatát (European Terrestrial Reference Frame, ETRF). Az állomáskoordinátákat a bevezetésükkor úgy határozták meg, hogy az ETRS89-es koordinátáik (ETRF89) azonosak legyenek az ITRF89-es koordinátáikkal, azaz $ETRF89 = ITRF89$. Az ETRS89 vonatkoztatási rendszer kerethálózatát (ETRF) is folyamatosan bővítik és javítják (illetve pontosítják). Ennek megfelelően a különböző ITRF-megvalósulásokkal párhuzamosan Európában az ETRF-realizációkat határozták, illetve határozzák meg (3. táblázat) és alkalmazzák azokat az EUREF hálózat fokozatos bővítése és pontosítása során.

1989 óta az európai állomások ETRS89 koordinátái (ETRF_y) szabályosan eltolódnak az ITRS koordinátáikhoz (ITRF_y) viszonyítva. A szóban forgó rendszerek közötti eltérés az IERS tevékenysége és az EPN folyamatos mérései alapján nyomon követhető. Az európai és a nemzetközi földi rendszer kapcsolata mintegy ± 1 cm-re megbízható. Az ITRS és az ETRS89 vonatkoztatási rendszerek különböző megvalósulásai (ITRF_y és ETRF_y) közötti átszámítások összefüggései és a vonatkozó paraméterek számszerű értékei a szakirodalomban ismertek, illetve az internetről letölthetők [<http://lareg.ensg.ign.fr/EUREF/memo.pdf>].

Megjegyezzük, hogy Európa egységes geodéziai-geodinamikai alapjainak kontinentális kiterjedésű fokozatos létrehozása keretében a korszer. műholdas GPS-technika alkalmazásával szélső pontosságú háromdimenziós (3D) hálózatot (European Reference Frame, EUREF) hoznak létre, melynek vonatkoztatási rendszere az ETRS89. Ezt a rendszert a tudományos közösség a legalkalmasabb európai geodéziai vonatkoztatási rendszernek tekinti, melyet az Európai Bizottság (European Commission) minden bizonnyal hivatalos geodéziai dátummá fog nyilvánítani adatainak vonatkoztatására. A témakörben szervezett munkaülések és szimpóziumok is azt ajánlják, hogy a jövőben az ETRS89-et használják az EU tagországain belül a különböző projektek és szerződések keretében a földmérési és térinformatikai termékek és adatbázisok térbeli vonatkoztatására és támogatják az ETRS89 széles körű alkalmazását valamennyi tagállamon belül. Néhány európai szervezet (a polgári repülés, az ipar egyes területei stb.) már egységesen alkalmazza és néhány EU-tagállamban már nemzeti geodéziai vonatkoztatási rendszerként fogadták el.

2.3. A WGS84 geodéziai vonatkoztatási rendszer

A GPS-műholdak által sugárzott fedélzeti pályaadatok vonatkoztatási rendszere WGS84 (World Geodetic System 1984, <http://www.wgs84.com>) néven ismeretes. A WGS84 vonatkoztatási rendszert az USA Védelmi Minisztériumának (Department of Defense = DoD) katonai térképészeti szolgálata (Defense Mapping Agency = DMA, illetve újabb nevén National Imagery and Mapping Agency, NIMA) határozta meg és tette közzé, elsősorban

globális méretű katonai térképészeti és navigációs feladatok megoldása céljából. A WGS84 rendszer a DMA korábbi vonatkoztatási rendszerei (WGS60, WGS66 és WGS72) fokozatos továbbfejlesztésének eredményeként született.

A WGS84 vonatkoztatási rendszer a felsőgeodézia idevágó ismeretanyaga (Biró, 2004) alapján teljes körűen (geometriai és fizikai értelemben) meghatározott geodéziai vonatkoztatási rendszer koordináta-rendszerének kezdőpontja a Föld tömegközéppontjában van, tehát a rendszer geocentrikus. A Z és az X tengelye azonos a BIH által 1984,0 időpontra meghatározott egyezményes földi rendszer (Conventional Terrestrial System = CTS) megfelelő tengelyével (5. ábra). Ennek megfelelően +Z tengelye (Z_{WGS84}) párhuzamos a BIH által 1984,0 időpontra meghatározott egyezményes földi pólus (Conventional Terrestrial Pole, CTP) irányával. A +X tengely a Z tengelyre a tömegközépponton átmenő merőleges sík és a WGS84 vonatkoztatási meridiánsíkjának metszsvonalában van. A WGS84 vonatkoztatási meridiánsíkja párhuzamos a BIH által 1984,0 időpontra meghatározott kezdő-meridiánsíkkal. A $+Y_{WGS84}$ tengely a $+X_{WGS84}$ és a $+Z_{WGS84}$ tengellyel jobbsodrású rendszert képez. A WGS84 vonatkoztatási (koordináta-) rendszer gyakorlati megvalósítását az amerikai tengerészeti navigációs műholdrendszer (Navy Navigation Satellite System, NNSS) Doppler-méréseinek feldolgozásánál alkalmazott NSWC9Z-2 jelű koordináta-rendszer megfelelő módosításával érték el.

A rendszer geometriai alapfelülete a WGS84 jelű vonatkoztatási ellipszoid, amelyet a WGS84 vonatkoztatási rendszer kezdőpontjára (a Föld tömegközéppontjára) és koordinátatengelyeire illesztve (5. ábra) használunk a gyakorlatban. (A forgási ellipszoid fél nagytengelyének hossza $a = 6\,378\,137$ m és geometriai lapultsága $f = 1/298,257\,223\,563$). A Föld valóságos nehézségi erőterének vizsgálata céljából a vonatkoztatási rendszerhez normál nehézségi erőteret rendeltek, amelynek egyetlen ellipszoid alakú szintfelülete éppen a WGS84 forgási ellipszoid (szintellipszoid). A normál nehézségi erőteret meghatározó négy kiinduló adat számértékét közzétették. Az erőter potenciálfüggvénye gömbfüggvénysorának együtthatóit $n, m = 180$ fokig és rendig határozták meg (összesen 32755 db számérték), amelyek közül csak az első 355 együttható számértékét tették közzé ($n, m = 18$ -ig bezárólag nyilvános, a többi $n, m = 19$ és 180 között tikos).

A WGS84 vonatkoztatási rendszer és a világon alkalmazott legtöbb helyi és regionális geodéziai dátum közötti ún. dátumeltolódási paramétereket a DMA meghatározta, amelyek a (<http://www.colorado.edu/geography/gcraft/notes/datum/edlist.html>) internetes címen elérhetők. A WGS84 vonatkoztatási rendszerhez síkvetületi koordináta-rendszert is alkalmaznak. Vetülete az UTM (Universal Transverse Mercator).

Megjegyezzük, hogy a WGS84 rendszer az 1990-es évek elején csak 1–2 m-re volt összhangban az ITRS és az ETRS89 vonatkoztatási rendszerrel (illetve ezek különböző megvalósulásaival). 1994-ben a WGS84 pontosságát olyan szintre emelték, hogy az összhang már néhány cm-re tehető. Így a geodéziai alkalmazások többségében a WGS84 rendszer használata is elegendő, az ITRS (ITRF_y) rendszerhez, illetve még az ETRS89 (ETRF_y) koordinátákhoz viszonyított eltérések is elhanyagolhatók (különösen a térinformatikai alkalmazások területén).

A WGS84 geodéziai vonatkoztatási rendszer a katonai (pl. NATO) és a polgári élet (pl. EUROCONTROL) számos területén Európában is kiterjedten alkalmazzák.

2.4. A GRS80 geodéziai vonatkoztatási rendszer

Az IUGG/IAG által 1980-ban elfogadott és gyakorlati alkalmazásra ajánlott nemzetközi

Geodéziai Vonatkoztatási Rendszert GRS80 (Geodetic Reference System 1980) jelöléssel használjuk a szakirodalomban. A GRS80 a Föld geometriájának és nehézségi erőterének meghatározására alkalmas viszonyítási alrendszer, amely jól meghatározott fizikai és geometriai állandók együttese. Geometriai alapfelülete a GRS80 jelű forgási ellipszoid (fél nagytengelyének hossza $a = 6\,378\,137$ m és geometriai lapultsága $f = 1/298,257\,222\,101$), amelyet a fizikai geodéziai feladatok megoldásához szintellipszoidként használunk. Ekkor a GRS80 forgási ellipszoid geocentrikus elhelyezésű és a CIO-BIH vonatkoztatási rendszer tengelyeire illeszkedik képzeletben. A GRS80 geodéziai vonatkoztatási rendszert napjainkban a geoidmeghatározás területén használják általánosan. A geoid európai felületdarabjának meghatározását is a GRS80 geodéziai vonatkoztatási rendszerben végezték.

Megjegyezzük, hogy az IAG által ajánlott GRS80 és a WGS84 geodéziai vonatkoztatási rendszer alapirányai nem az ITRS alapirányosaival, hanem a korábbi CTS, vagy más néven CIO-BIH rendszerével azonosak. A CIO és az IERS vonatkoztatási pólus, valamint a BIH és az IERS kezdő szintfelületi meridiánsík csekély iránykülönbsége miatt szigorú értelemben a WGS84 koordináták nem ITRS koordináták. Az alapirányok csekély különbségét ($\pm 0,005''$) és a rendszerek megvalósításának véges megbízhatóságát ($\pm 0,05$ m) tekintve azonban megállapíthatjuk, hogy ezen a megbízhatósági szinten az ITRS, a WGS84 és a GRS80 vonatkoztatási rendszerekben meghatározott megfelelő geodéziai adatok egymással összhangban levőknek tekinthetők. ($0,001''$ iránykülönbség a Föld felszínén 3 cm-nek felel meg.)

2.5. Az európai magassági vonatkoztatási rendszer (EVRS2000)

A földi pontok koordinátáit a GPS-technika alkalmazásával a tárgyalt vonatkoztatási rendszerekben (ITRS, ETRS89, WGS84) háromdimenziójú (3D) térbeli derékszögű koordináták (X, Y, Z) formájában kapjuk meg. Az ITRS és az ETRS89 rendszerek realizációját is az X, Y, Z koordináták halmaza adja. A legtöbb geodéziai alkalmazás azonban az ellipszoidi földrajzi koordináták (φ , λ , h) használatát, a Föld felszínéhez kötöttségünk miatt felületi, ún. ellipszoidi földrajzi koordináta-rendszer alkalmazását igényli (6. ábra).

Az IAG EUREF albizottságának határozata alapján az ETRS89 vonatkoztatási rendszerben meghatározott X, Y, Z térbeli derékszögű koordinátákból a GRS80 forgási ellipszoid geometriai adatainak felhasználásával számítunk ellipszoidi földrajzi szélesség (φ), hosszúság (λ), valamint ellipszoid feletti magasság (h) értéket az

$$X = (N_h + h) \times \cos \varphi \times \cos \lambda$$

$$Y = (N_h + h) \times \cos \varphi \times \sin \lambda \tag{2.1}$$

$$Z = [N_h \times (1 - e^2) + h] \times \sin \varphi$$

összefüggések alapján, ahol N_h az ellipszoid harántgörbületi sugara és az e az ellipszoid első excentricitása. Az első két koordinátát (φ, λ) vízszintes meghatározónak, a harmadikat (h) magasságnak nevezzük, amely az ellipszoid és az adott pont távolsága.

A gyakorlati életnek a valódi tengerszinthez kapcsolódó igen sokféle kötődése miatt a harmadik koordinátaként gyakorlatilag a pontnak a tengerszint feletti magasságát (H) használjuk. Valamely földfelszíni pontban az ellipszoid és a tengerszint feletti magasság (h és H) közötti összefüggést a

$$h=H+N \quad (2.2)$$

kifejezés adja meg, ahol N a pontban a tengerszintnek (a geoidnak) a távolsága a vonatkozási ellipszoidtól.

Az IAG EUREF albizottságának határozata alapján az európai magassági vonatkoztatási rendszer (European Vertical Reference System 2000, EVRS2000; <http://crs.bkg.bund.de/evrs>) alapszintfelülete az amszterdami mareográf-állomás (Normaal Amsterdams Peils, NAP) nullapontján átmenő szintfelület (az Északi-tenger középszintje). Az európai magassági alapszintfelület (amszterdami alapszint) W_0 potenciálértéke a GRS80 geodéziai vonatkoztatási rendszer szintellipszoidjának U_0 potenciálértékével azonos

($W_0 = U_0 = 62\,636\,860,85 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$). Az EVRS2000 magassági vonatkoztatási rendszert az egységes európai szintezési hálózat (UELN) magassági főalappontjainak az amszterdami alapszintre vonatkozó geopotenciális mérőszáma és ebből számított normálmagassága valósítja meg a természetben. Ezek alkotják az európai magassági vonatkoztatási keretpontok hálózatát (European Vertical Reference Frame 2000, EVRF2000).

A 3D helymeghatározás teljessé tételéhez is a (2) képlet értelmében még meg kell határozni a geoid és az ellipszoid egymáshoz képest elfoglalt térbeli felületi különbségeit, az N geoid-ellipszoid merőleges távolságot, az ún. geoidundulációt. Ezért jelenleg is kiemelt tevékenységet folytatnak a geoid európai felületdarabjának meghatározására, melyhez a GRS80 geodéziai vonatkoztatási rendszert veszik alapul.

(Az előadás keretében bemutatásra kerülő időszerű ábrákat az előadási tanórán osztjuk ki. Ezek feliratait a következők:

1. ábra. A nemzetközi földi vonatkoztatási rendszer (ITRS)

2. ábra. Az ITRF94 állomásainak eloszlása. Az egyes kozmikus geodéziai mérési technikák a következők: VLBI (nagyon hosszú alapvonalú radiointerferometria), LLR (Holdra vonatkozó lézeres távolságmérés), GPS (globális helymeghatározó rendszer), SLR (mesterséges holdakra vonatkozó lézeres távolságmérés) és DORIS (Doppler-frekvenciaeltolódás mérésén alapuló egyutas eljárás).

3. ábra. Az ITRF 2000 állomásainak eloszlása.

(Különböző számú kozmikus geodéziai mérési technikát egyidejűleg működtet. földfelszíni állomások számát is feltüntettük.)

4. ábra. Az EUREF permanens GPS-állomásainak földfelszíni sebességvektora az ITRF96-rendszerben

5. ábra. A WGS84 geodéziai vonatkoztatási rendszer

6. ábra. Ellipszoidi földrajzi koordináták az európai földi vonatkoztatási rendszerben (ETRS89))