



Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Általános és Felsőgeodézia Tanszék

Négydimenziós vízgőzmodellek előállítása GNSS tomográfiával

Készítette:

Horváth Tivadar , Msc. 1. évf.

2012

Absztrakt

A légköri vízgőz az egyik legfontosabb üvegházhatást okozó gáz. Emellett kulcsszerepe van a víz körforgásában, így mennyisége alapvetően meghatározza a kihullható csapadékmennyiség értékét. A légköri vízgőz térbeli és időbeli eloszlásának ismerete nagy segítséget nyújthat a nagy intenzitású csapadékok meteorológiai előrejelzéséhez.

A dolgozatban röviden bemutatjuk a légköri vízgőzmérések jelenlegi eszközeit, majd egy saját fejlesztésű szoftver segítségével a hazai GNSS infrastruktúra méréseiből határozunk meg négydimenziós vízgőz modelleket. A modellek levezetéséhez felhasználjuk a hazai rádiószondás méréseket is. A térbeli modell prizmaínak refraktivitás értékeit legkisebb négyzetek módszerén alapuló kiegyenlítési eljárással határozzuk meg.

Abstract

Atmospheric water vapour is one of the most important greenhouse gases. On the other hand it has a crucial role in the water cycle, thus the density of atmospheric water vapour determines an upper limit of rainfall, the precipitable water vapour. The spatial and temporal distribution of atmospheric water vapour is advantageous to the numerical weather prediction of heavy rainfalls.

In this study the operational methods of atmospheric water vapour measurements are briefly introduced. Moreover, a self-developed software is used to create 4D water vapour models using the observations of the Hungarian active GNSS network. This processing technique utilizes the existing radiosonde observations. The models are derived using the least-squares adjustment technique.

Tartalom

Absztrakt	1
Abstract	2
1. Bevezetés.....	4
2. A légköri vízgőz és meghatározásának meteorológiai módszerei.....	5
2.1 A levegő vízgőztartalmának mérési módszerei.....	6
3. A GNSS alapú kihullható csapadékmennyiség becslések elméleti háttere	10
3.1 Bevezetés	10
3.2 A troposféra hatása a GNSS jelekre	10
3.3 A közel valósídejű feldolgozó rendszer	12
3.4 Célkitűzés	12
3.5 Az egyes voxelekben megtett utak meghatározása.....	15
3.6 Refraktivitások számítása kiegyenlítéssel	19
4. Esettanulmány	22
4.1 Bevezetés	22
4.2 Bemeneti adatok	23
4.2.1 Rádiószondás mérések.....	23
4.2.2 CRD állomány	24
4.2.3 EOVS állomány	24
4.2.4 Numerikus időjárás modellekből meghatározott kihullható csapadékmennyiségek ...	25
4.2.5 Almanach állományok	26
4.2.6 Troposféra becslés állományok	26
4.3 A térmodell paramétereinek felvétele	27
4.4 A számítás menete	28
4.5 A szoftver ismertetése	29
4.5 Kimeneti adatok	30
4.6 Modell eredmények	30
5. Összegzés	34
Köszönetnyilvánítás	35
Irodalomjegyzék.....	35

1. Bevezetés

A légkörben található vízgőz fontos szerepet játszik a víz körforgásában. Bár a Föld teljes vízkészletéhez képest a légkörben lévő víz mennyisége elenyészően kicsi, mégis nagy mértékben befolyásolja a légköri folyamatokat. A meteorológiai előrejelzésekhez a légköri vízgőz eloszlásának ismerete segítséget adhat, azonban a légkörben lévő vízgőz gyors - időbeli és térbeli- változása miatt meghatározása nem egyszerű feladat. A dolgozat első felében röviden bemutatjuk a vízgőzmérések hagyományos eszközeit. Ezekkel a közvetett és közvetlen mérési módszerekkel pontos képet kaphatunk a légkör fizikai paramétereiről. Bemutatjuk ezen eljárások előnyeit és hátrányait a kihullható csapadékmennyiség mérésének szempontjából.

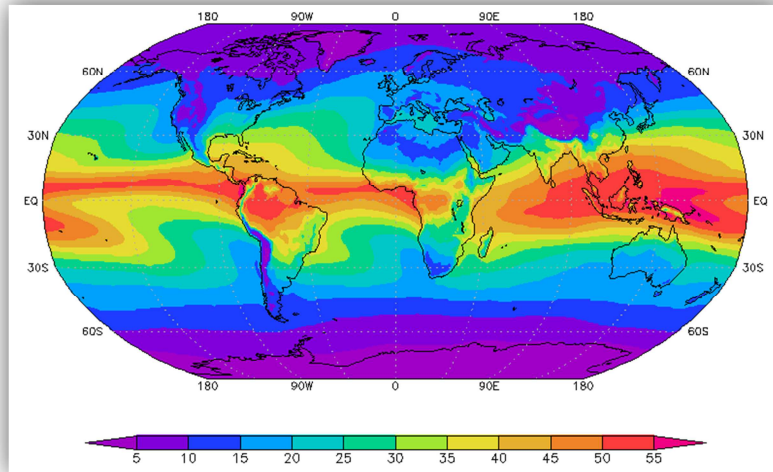
A dolgozatban a meglévő GNSS hálózat meteorológiai célú alkalmazhatóságát vizsgáljuk. A permanens állomásokon végzett GNSS méréseknél a légkör okozta hatás ismeretlen paraméterként vehető figyelembe a számításokban. A műholdakról érkező rádiójelek a légkörön áthaladva késleltetést szenvednek, ezt a késleltető hatást egyrészt a troposzférában lévő vízgőz okozza. Ha a helymeghatározás többi hibahatását (műhold órahiba, műhold pályahiba, ionosféra okozta késleltetés, vevő órahiba, többutas terjedés, stb.) kiküszöböljük, vagy ismert értéknek vesszük, akkor a troposféra okozta késleltetés becsülhető, majd ebből a vízgőz sűrűsége számítható. A permanens állomásokon végzett mérések eredményeit felhasználva vízgőzmodelleket hozhatunk létre.

Egy esettanulmányon keresztül kívánjuk bemutatni a négydimenziós vízgőzmodell létrehozásának lépéseit, felhasználva a GNSS és a meteorológiai mérések adatait. A számítások elvégzéséhez egy saját fejlesztésű szoftvert alkalmazunk, amely segítségével meg tudjuk határozni ezen modellek felhasználhatóságának lehetőségeit.

2. A légköri vízgőz és meghatározásának meteorológiai módszerei

A Földet körülvevő légburok sok különféle halmazállapotú gázkomponensből tevődik össze. Ezek közül csak a víz van jelen egyszerre több fázisban a hőmérséklettől függően, más elnevezéssel élve állandó fázisátalakulásban van. A legfontosabb gázok mellett a víz a légkör össztömegének ($8,6 \times 10^{18}$ kg) hozzávetőlegesen 0,18 %-át adja ($1,55 \times 10^{16}$ kg), az atmoszférában való tartózkodási ideje hozzávetőlegesen 10 nap (Péczely, 1981). A víz túlnyomó többsége a troposzférában található, itt zajlik a legfontosabb fázisátalakulási folyamat, amit kondenzációnak nevezünk. E folyamathoz köthető a légköri nedvességtartalom egyik legmeghatározóbb formája a vízgőz, amely egyben a legfontosabb üvegházhatású gáz a szén-dioxid mellett. Emellett nagy szerepet játszik a vízkörforgásban, a felhő- és ködképződésben, illetve közvetítője az egyes légrétegek közti energiacserének.

A légköri üvegházhatásban játszott szerepét elsősorban az erősen pozitív visszacsatolási mechanizmusa okozza (Held and Soden, 2002). Már kis mennyiségű vízgőz is képes jelentősen módosítani a légkör sugárzásáteresztő képességét, növelve az üvegházhatást, ezáltal a Föld átlaghőmérsékletét, így kiemelt fontosságúak a vízgőz mennyiségére vonatkoztatott mérések. Mivel a vízgőz tömegének 99%-a az atmoszféra alsó 30-35 km-es rétegében található, ezért a mérések is ebben a tartományban történnek különböző mérési módszerekkel. Nagy térbeli és időbeli változékonysága és rövid tartózkodási ideje miatt a légköri vízgőz mennyiségének meghatározása számos problémát vet fel. A probléma megoldására ad választ a légkörből kihullható vízmennyiség meghatározása kg/m^2 vagy mm mértékegységben (Rózsa és társai, 2009). Ez az érték összefügg a globális csapadékmennyiséggel, ami hozzávetőlegesen 1000 mm/év, így ha figyelembe vesszük a víz tartózkodási idejét a légkörben, a kihullható vízmennyiség nagyjából 25 mm lesz. Ez természetesen csak átlagérték, például a sarkvidékeken kihullható vízmennyiség töredéke egy hurrikánban mért értékhez képest, Magyarországon ez az átlagérték körülbelül 20 mm.



*A kihullható vízmennyiség területi eloszlása éves átlagban
(Forrás: NCEP Final Analysis adatbázis, 2000. január 1. és 2008. december 31. közötti
időszakban)
2.1 ábra*

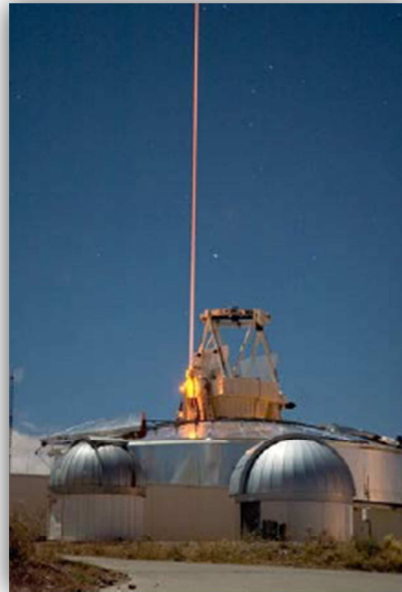
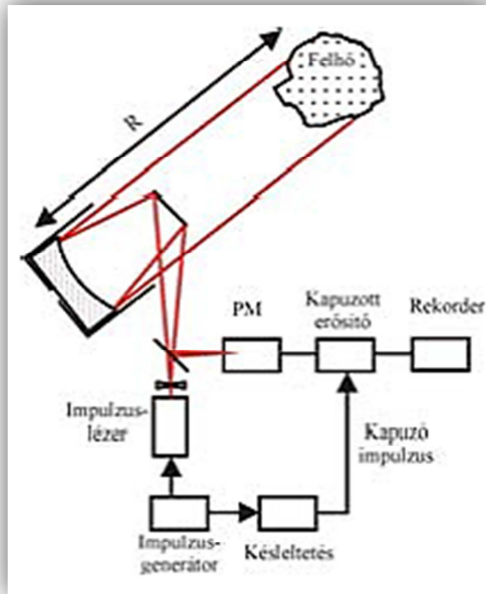
2.1 A levegő vízgőztartalmának mérési módszerei

A technika fejlődésével összhangban, egyre jobb és pontosabb módszerek, eszközök állnak rendelkezésünkre, ahhoz hogy feltérképezzük a légkört, ezen belül is a vízgőztartalmat. Mivel a vízgőz legjelentősebb elnyelési sávjai az infravörös tartományba esnek, ezért a méréshez a vizuális megfigyelés, mint meteorológiai mérésfajta nem jöhet szóba. Ehelyett célszerű különféle műszerekkel közvetett vagy közvetlen (in-situ) módon végezni a mérést.

Közvetett módon távérzékelési módszerekkel mérhetünk, előnyük, hogy a légkör tetszőleges pontjáról, akár folyamatosan is tudunk információkat kapni, a hátrányuk, hogy jóval bonyolultabbak és pontatlanabbak, mint a közvetlen mérés eszközei. Néhány közvetett elven működő vízgőzmérési eszköz a teljesség igénye nélkül:

- LIDAR (LIght Detection And Ranging)

A LIDAR olyan földi telepítésű távérzékelési eszköz, mely a látható, valamint az ultraibolya és infravörös spektrumba tartozó elektromágneses hullámot bocsát ki, ennek megfelelően képes a vízgőz elnyelési sávjában is dolgozni. A kibocsátott hullám energiája néhány mW-tól több 10 W-ig terjed. Nagy előnye, hogy viszonylag jó felbontással rendelkezik (3m), és éjszakai körülmények között is megfelelően használható.



A LIDAR felépítése¹
2.2 ábra

- WVR (**W**ater **V**apour **R**adiometer – Vízgőz Radiométer)

A WVR olyan mikrohullámú elven működő eszköz, amellyel az alacsony koncentrációjú vízgőzt és folyékony halmazállapotú vizet tudjuk mérni, és ennek segítségével határozható meg a parciális párányomás okozta jelkésleltetés nagysága.



WVR működés közben (Görögország)
2.3 ábra

¹ http://opt.physx.u-szeged.hu/oktatas/Lev_min/Eloadas.pdf

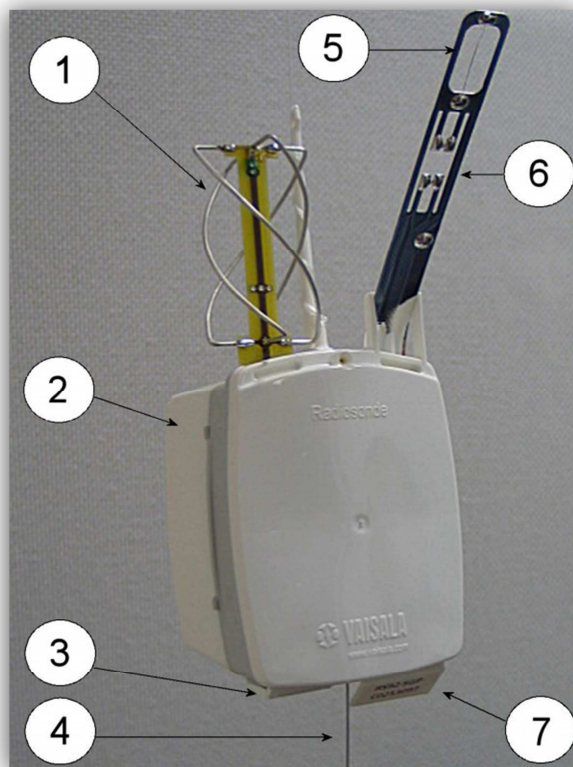
- Műholdas mérések
 - MODIS (**M**oderate Resolution Imaging Spectroradiometer - Közepes Felbontású Képalkotó Spektrofotométer Szenzor). A MODIS jelenleg a Föld körül keringő Aqua és Terra műholdakról 250 m-es felbontásban készít képeket, képes a vízgőz elnyelési sávjában is dolgozni. Hazánkban többek között az ELTE Meteorológiai Tanszéke foglalkozik az adatok feldolgozásával.
 - GNSS műholdak: a GNSS műholdakról érkező jelek késéséből fakadóan lehet következtetni a kihullható víztartalomra. A dolgozatban ez a mérési módszer kerül bővebben kitárgyalásra.

In-situ mérésakor a műszer érzékelője közvetlenül érintkezik a mérendő közeggel, ezért a mérés is sokkal pontosabb. A mérés helye nem korlátozódik a föld felszínére, hanem a légkör magasabb régióiból is nyerhetünk adatokat. A kihullható víztartalom meghatározásában nagy szerepe van többek között a rádiószondával történő felszállásoknak.

- Rádiószondás mérések

A módszer lényege, hogy egy kisméretű szenzort juttatunk fel a légkörbe egy hidrogénnel feltöltött ballon segítségével, és a szenzor mellett elhelyezett adattovábbító rendszer segítségével a földi állomáson fogadjuk a beérkező meteorológiai adatokat. Globálisan több mint 800 állomásról történik naponta a felbocsátás, ezáltal megbízható adatokat kapunk a légkör alsó 30-35 km-es vertikális rétegéről.

Hazánkban jelenleg az Országos Meteorológiai Szolgálat (OMSZ) bocsát fel rádiószondákat két helyen, Budapest – Pestszentlőrincen és Szegeden naponta egyszer, 00^h UTC időpontban. Erre a célra a finn gyártmányú Vaisala DIGICORA-III földi vevő és jelfeldolgozó rendszert, és a hozzá tartozó Vaisala RS92-GP rádiószondát alkalmazzák. A szonda felépítése a következő:



*Vaisala RS92 SGP rádiószonda felépítése
(1.GPS antenna, 2. Akkumulátor, 3. Adattovábbító szenzor, 4. Antenna, 5.
Hőmérsékletérzékelő szenzor, 6. Nedvességszenzor, 7. GC25 interfész)
2.4 ábra*

Feldolgozáskor a kapott eredményeket grafikusán (emagramon) ábrázolhatjuk, vagy numerikus módon, FSL kiterjesztésű fájlokban tárolhatjuk.

A módszer előnye, hogy pontos adatokat szolgáltat a legfontosabb időjárási paramétereiről (hőmérséklet, szél, légnedvesség, légnyomás), és ezeket real-time módon tudja továbbítani a földi vevőállomásra feldolgozás céljából.

A mérési eljárás hátránya, hogy anyag- és eszközigényes, mert a szondák, miután visszaesnek a földre, nem használhatók fel újból. Mivel a mérés egy pontban történik, ezáltal nem ad kellő területi lefedettséget, továbbá alacsony hőmérsékleten, ami a troposféra felső tartományára jellemző, nem képes kellő pontossággal meghatározni a légköri vízgőztartalmat.

3. A GNSS alapú kihullható csapadékmennyiség becslések elméleti háttere

3.1 Bevezetés

A vízgőzmodellek létrehozásához szükséges ismerni a troposzféra jellemző meteorológiai paramétereit, valamint a műholdjelekben tapasztalható jelkésleltetés mértékét. A jelenlegi közel valószerű GNSS feldolgozás eredményeit felhasználva ezek a paraméterek számíthatók. A rendszer óránként becsüli a troposzférikus késleltetést zenitirányban, több mint 50 permanens állomáson. A troposzférikus késleltetés két részből, a nedves és a hidrosztatikus összetevőből áll. A teljes késleltetésnek körülbelül 90%-át teszi ki a hidrosztatikus késleltetés, amely jól modellezhető a felszíni légnyomás függvényében. A nedves késleltetés a troposzférában lévő vízgőz függvénye, azonban ez időben nagyon változékony. A troposzférában lévő vízgőz meghatározható rádiószondás mérésekkel, de ahogy az előző fejezetben láthattuk, ezek nagyon költségesek, ezért célszerű lenne a meglévő GNSS infrastruktúrát meteorológiai célokra is felhasználni.

Minden permanens állomásról átlagosan 8-10 műholdra történnek a mérések. Mivel a permanens állomások földrajzi helyzete ismert, ezért az állomás koordináták a számításokban ismert paraméterként figyelembe vehetők, így nyílik lehetőség ismeretlen paraméterek, többek között a troposzféra okozta késleltetés számítására. A számított késleltetések zenitirányúak, melyek leképzési függvényekkel átszámíthatók ferde (műholdirányú) késleltetésekké.

3.2 A troposzféra hatása a GNSS jelekre

A troposzférában a törésmutató értéke egynél nagyobb, ezért a hullámok lassabban terjednek, mint a vákuumban. A refraktivitás a törésmutató függvényében írható fel:

$$N = (n - 1) * 10^6 \quad (3.1)$$

Amennyiben ismerjük a légkör paramétereit, akkor a refraktivitást számíthatjuk *Essen* és *Froome* (Ádám és társai, 2004) összefüggése alapján:

$$N = k_1 * \frac{p_d}{T} + k_2 * \frac{e}{T} + k_3 * \frac{e}{T^2} \quad (3.2)$$

ahol k_1 , k_2 , k_3 tapasztalati állandók, p_d a száraz levegő nyomása hektopaszskában, e a parciális párányomás hektopaszskában és T a hőmérséklet Kelvinben.

A fenti egyenletet átrendezve a következő összefüggéshez jutunk:

$$N = k_1 * \frac{p}{T} + (k_2 - k_1) * \frac{e}{T} + k_3 * \frac{e}{T^2} \quad (3.3)$$

ahol p a légnyomás hektopaszkáiban.

A fenti egyenletből a nedves refraktivitás:

$$N_w = (k_2 - k_1) * \frac{e}{T} + k_3 * \frac{e}{T^2}, \quad (3.4)$$

míg a (3.3) egyenlet első tagja határozza meg a hidrosztatikus („száraz”) refraktivitás értékét. Ha ismerjük a parciális párányomást és a hőmérsékletet, akkor a nedves refraktivitás értéke számítható. A rádiószondás méréseknél mérik a hőmérsékletet és a harmatpont hőmérsékletét. A harmatpont hőmérsékletéből a parciális párányomás értéke számítható *Bosen* összefüggése alapján (*Rózsa és társai*, 2010):

$$e = 33,8639[(0,00738T_d + 0,8072)^8 - 0,000019(1,8T_d + 48) + 0,001316] \quad (3.5)$$

ahol T_d a harmatpont hőmérséklete °C-ban.

A parciális párányomás és a hőmérséklet ismeretében a vízgőz sűrűsége az alábbi összefüggéssel számítható:

$$\rho_v = e * \frac{100}{R_v * T} \quad (3.6)$$

ahol R_v a vízgőz specifikus gázállandója, e a parciális párányomás mBar-ban, T a hőmérséklet Kelvinben, és ρ_v a vízgőzsűrűség kg/m³ egységben.

Smith és *Weintraub* (1953) szerint az okozott késleltetés a következőképpen számítható:

$$T = T_d + T_w = 10^{-6} \int N_d ds + \int N_w ds \quad (3.7)$$

ahol T_d a száraz levegő okozta késleltetés, T_w a nedves rész okozta késleltetés, N_d és N_w a száraz és nedves refraktivitás.

A troposzféra okozta teljes késleltetés zenitirányban:

$$T = T_d + T_n \quad (3.8)$$

ahol T_d a hidrosztatikai összetevő hatása, és T_n a nedves összetevő hatása.

Saastamoinen modellje alapján a troposzféra okozta késleltetés zenitirányban (Ádám és társai, 2004):

$$T = 0,002277 \left[p + \left(\frac{1255}{T} + 0,05 \right) e - \tan^2 z \right] \quad (3.9)$$

ahol p a légnyomás hPa-ban, e a parciális párányomás hPa-ban és T a hőmérséklet Kelvinben, így a javítás méterben adódik.

A zenitirányú késleltetések leképzési függvényekkel (ferdeségi szorzókkal) számíthatók át ferde irányú késleltetésekké. Marini a ferdeségi szorzót lánc tört formájában írta fel, ahol a ferdeségi szorzó a műhold magassági szögének (E) és három (a , b , c) tapasztalati együtthatónak a függvénye:

$$F(E) = \frac{1 + \frac{a}{b}}{1 + \frac{1+c}{a}} \frac{\sin E + \frac{b}{\sin E}}{\sin E + c} \quad (3.10)$$

Az a , b , c együtthatókat több szerző is meghatározta (Herring, Niell), külön a száraz és nedves összetevőre.

A nedves összetevő okozta késleltetés műhold irányban:

$$T_{fn} = T_n * F(E) \quad (3.11)$$

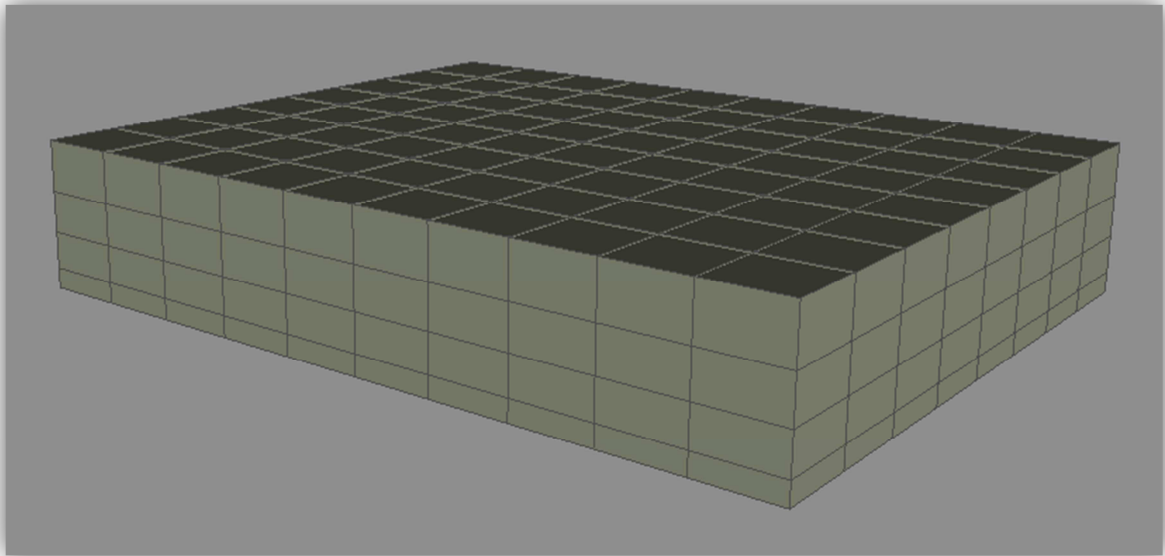
3.3 A közel valósídejű feldolgozó rendszer

A troposzféra okozta késleltető hatást az aktív GNSS hálózat mérései alapján becsülni lehet. A jelenlegi, közel valósídejű meteorológiai feldolgozórendszerben felhasználják a GPS észleléseket, a műholdak pályadatait és a meteorológiai mérések adatait és automatikus feldolgozással óránként számítják a zenitirányú troposzféra okozta késleltetést. Ebből a vízgőzbecslő modul számítja a zenitirányú nedves és hidrosztatikus késleltetés becsült értékét, majd vízgőzadatokat (integrált vízgőztartalmat²).

3.4 Célkitűzés

A célunk egy olyan háromdimenziós vízgőzmodell létrehozása, amely egész Magyarország területét lefedi és lehetőséget ad az időben gyorsan változó vízgőz modellezésére. A modellt a 3.1-es ábra szemlélteti.

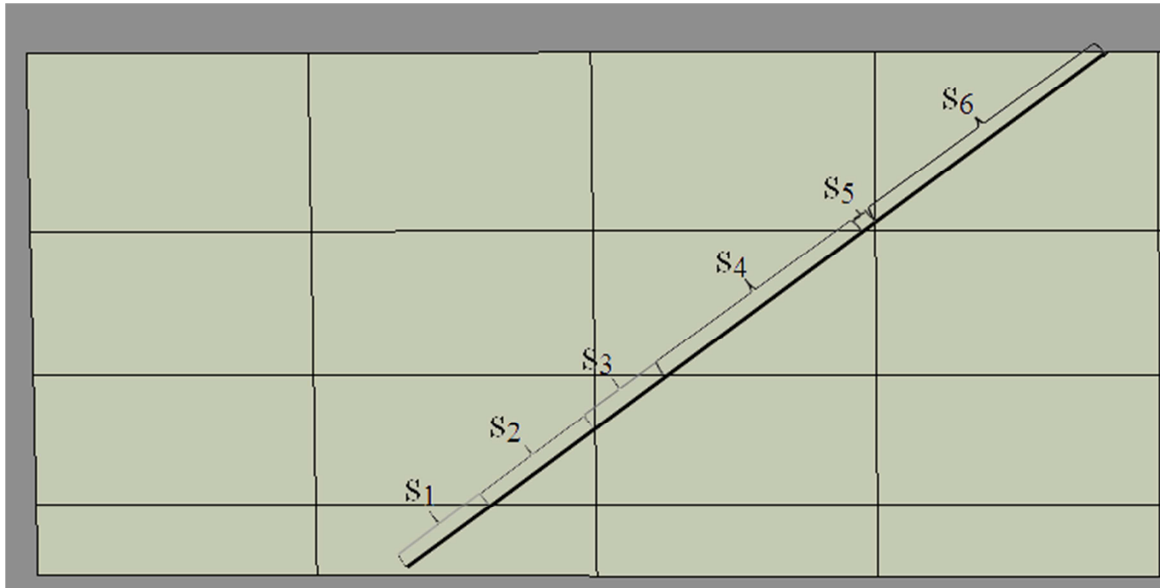
² <http://gpsmet.agt.bme.hu/>



*Háromdimenziós vízgőzmodell
3.1 ábra*

Első közelítésben a troposzférát egy három dimenziós téglaletest hálózattal közelíthetjük. A légkört felbontjuk kisebb egységekre (téglaletestekre, vagy idegen szóval voxelekre, prizmákra), ezek alkotják a modell legkisebb megkülönböztethető egységeit. A cél az, hogy minden egységben számítani tudjuk a légkör jellemző paramétereit. Minél kisebb egy prizma mérete, annál részletesebb képet kapunk a légkörről és annak változásáról, azonban a prizmaméret csökkentése egyúttal növeli az ismeretlenek számát a későbbi kiegyenlítési számításokban.

Ha felvesszük a modell paramétereit (kiterjedés, prizmák mérete), akkor a műholdak és állomások közötti egyenesek metszik a téglaletesteket. Minden egyenes egy vagy több téglaletestet metsz. A vevő és a műhold helyzetének ismeretében számítható, hogy az egyenesek melyik téglalesteken haladnak keresztül, és melyik téglalestből mekkora darabot metszenek ki.



Téglatestekből kimetszett szakaszok

3.2 ábra

A troposzféra okozta nedves késleltetés, egy állomásra és műholdra vonatkoztatva, megegyezik az egyes prizmákban megtett út és a prizma állandónak tekintett refraktivitásának szorzatával.

$$T_n = 10^{-6} \sum_{i=1}^k s_i N_{n,i} \quad (3.12)$$

ahol T_n a nedves késleltetés, s_i az i -ik prizmából kimetszett szakasz hossza, $N_{n,i}$ az i -ik prizma nedves refraktivitása, és k a metszett prizmák száma .

Mivel az alkalmazott térmodell véges kiterjedésű, ezért a lefedett terület széleinek közelében egyes műhold-vevő egyenesek nem a troposzféra tetején (a tropopauzán) keresztül hagyják el a modellt, hanem a térmodell oldalán. Emiatt a térmodellből előállítható nedves késleltetés értéke nem fog megegyezni az észlelt műholdirányú nedves késleltetés értékével. Ezt a hatást úgy vehetjük figyelembe, hogy a tisztatag vektorban lévő mérési eredményt egy korrekcióval látjuk el. Ez a csökkentő korrekció megegyezik az oldallapon lévő metszéspont és a modell teteje között lévő rész okozta nedves késleltetéssel.

A korrekció értékének számításához ismernünk kell a légköri vízgőz függőleges irányú előzetes eloszlását, amit a rádiószondás észlelések alapján vettünk figyelembe. Miután meghatároztuk a modell oldalán kilépő műhold-vevő távolságokra a rádiószondás mérések felhasználásával a modell által lefedett atmoszféra rész és a tropopauza közötti vízgőztartalom okozta troposferikus késleltetést, ezzel megjavítottuk a GNSS

feldolgozásból meghatározott értéket. Ily módon a javított troposzférikus késleltetést felhasználva azokat a műhold-vevő vektorokat is be tudtuk vonni a vízgőzmodell meghatározásába, amelyek nem a kialakított térmodell felső határán hagyták el a modellt.

A legkisebb négyzetek módszerével történő kiegyenlítés során az egyes prizmákban megtett úthosszak ismeretében a prizmák refraktivitása meghatározható. Ehhez szükségünk van még a műhold irányú troposzférikus nedves késleltetés előzetes értékeire is.

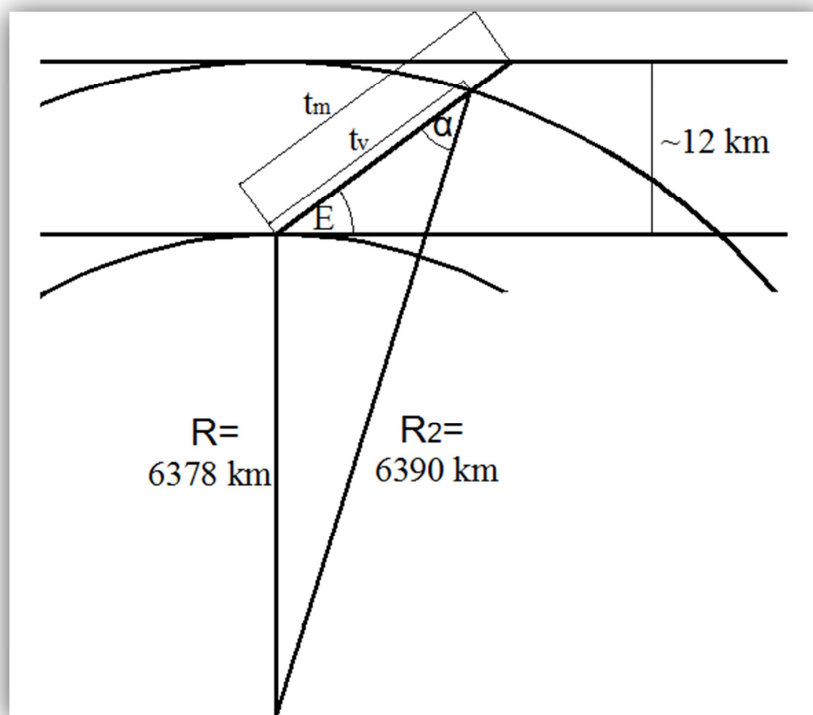
Ha a teljes szakaszt felbontjuk $s_1 \dots s_n$ részre és ismerjük a refraktivitások előzetes értékeit, akkor számíthatjuk a műholdirányú nedves késleltetések előzetes értékeit a metszett téglatestekben.

3.5 Az egyes voxelekben megtett utak meghatározása

A GNSS mérésekkor a GPS műholdakról érkező jelek áthaladnak a troposzférán. Ennek hatására a terjedési sebességük csökken. Másrészt a jelek ahelyett, hogy egyenes vonalban terjednének, egy refrakciós görbe mentén terjednek. Mivel a refrakciós görbe hossza nem tér el jelentősen az egyenes vonalú terjedés esetétől, ezért a legtöbb feldolgozó szoftver ezt a hatást el is elhanyagolja, és csupán a troposzféra sebességmódosító hatását veszi figyelembe. A kialakított matematikai modellben mi is ezzel a feltételezéssel élünk, azaz a műhold és a vevő között egyenes vonalú jelterjedéssel számoltunk.

Az állomást és a műholdat összekötő egyenes áthalad a felvett troposzféra modellen, és bizonyos téglatestek metsz. Mint azt korábban láthattuk, a troposzférikus késleltetés meghatározásához ismernünk kell, hogy melyik egyenes melyik időpontban melyik téglatesteket metszette, és milyen hosszú utat tett meg az egyes prizmákban. Amennyiben ismerjük ezeket a hosszakat, és a műholdirányú nedves késleltetés értékét, akkor minden egyes prizmában meghatározhatjuk a refraktivitás becsült értékét a legkisebb négyzetek módszerével. Az első feladatunk tehát az, hogy meghatározzuk az egyes prizmákban megtett úthosszakat.

A felvett háromdimenziós modell egy síkkal közelíti a földfelszínt. A Föld görbültsége miatt ez a közelítés hibát okoz a troposzférikus késleltetés meghatározásában.



*Föld görbültsége okozta hibahatás
3.3 ábra*

A műholdról érkező jelek a valódi t_v távolság helyett t_m távolságot tesznek meg a troposzférában, ha síkkal közelítjük a földfelszínt. Minél kisebb a műhold magassági szöge (E), annál nagyobb hibát okoz a Föld görbültsége. A számításokban a műholdak kitakarási szögét 10° -nak vettem fel. A közelítés okozta hiba megegyezik a t_v és t_m különbségével.

$$t_m = \frac{12 \text{ km}}{\sin(E)} = 69,1 \text{ km} \quad (3.13)$$

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{R}{R_2} * \sin(90^\circ + E)\right) = 79^\circ 24' 25.5'' \quad (3.14)$$

$$t_v = \frac{R_2}{\sin(90^\circ + E)} \sin(90^\circ - E - \alpha) = 67,1 \text{ km} \quad (3.15)$$

A síkközelítés tehát 2 km-es hibát okoz legrosszabb esetben, ami ebben az esetben 2,9%-os relatív hibának felel meg. Ezt a relatív hibát elfogadhatónak tekinthetjük, ezért a térmodell kialakításához a síkközelítéssel eljárást alkalmaztuk annak matematikai egyszerűsége miatt.

A prizmákban megtett úthosszak számításához ismerni kell az állomások és a műholdak térbeli pozícióját ugyanabban a koordináta rendszerben. A permanens állomások koordinátái ismertek a WGS-84 térbeli derékszögű koordináta rendszerben. A műholdak pillanatnyi közelítő helyzetét az almanach adatok alapján számíthatjuk.

Az almanach adatokból a pályaszámítás a következő lépésekben történik:

1. A középmozgás meghatározása

$$n = \sqrt{\frac{\mu}{a^3}} \quad (3.16)$$

ahol μ a geocentrikus gravitációs állandó, értéke: $\mu = 398600,5 \text{ km}^3 \text{ s}^{-1}$

2. Középanomália számítása a t időpontban

$$M_k = M_0 + n(t - t_a) \quad (3.17)$$

3. Felszálló csomó hosszának számítása

$$\Omega = \Omega_0 + \dot{\Omega}(t - t_a) - \omega_E(t - t_0) \quad (3.18)$$

ahol $\omega_E = 7292115,1467 * 10^{-11} \text{ rad/s}$

4. Excentrikus anomália számítása: meghatározása a Kepler egyenletből, fokozatos közelítéssel:

$$E_k = M_k + e * \sin E_k \quad E_{k0} = M_K \quad (3.19)$$

5. Valódi anomália számítása

$$v_k = 2 * \arctan \left(\sqrt{\frac{1+e}{1-e}} * \tan \frac{E}{2} \right) \quad (3.20)$$

6. Műhold helyzete a pályasíkban:

$$\varphi_k = v_k + \omega \quad (3.21)$$

7. Javított geocentrikus távolság számítása

$$r_k = a(1 - e * \cos E_k) \quad (3.22)$$

8. Pályasíkban értelmezett geocentrikus koordináták számítása

$$x_k = r_k * \cos \varphi_k \quad (3.23)$$

$$y_k = r_k * \sin \varphi_k \quad (3.24)$$

$$z_k = 0 \quad (3.25)$$

9. Térbeli derékszögű koordináták számítása

$$X_k = x_k * \cos \Omega - y_k * \sin \Omega \quad (3.26)$$

$$Y_k = x_k * \sin \Omega + y_k * \cos \Omega \quad (3.27)$$

$$Z_k = z_k * \sin i \quad (3.28)$$

Ha a műholdak helyzete ismertté vált, akkor a műholdak magassági szöge és azimutja számítható az összes permanens állomásra vonatkozóan.

Az áthaladó hosszak meghatározásához ismernünk kell a térmodell felépítését is. A fent említett téglalatt hálózatot jellemezhetjük az egyes sorok és oszlopok szélességével, valamint a rétegek vastagságával. Ezeknek a paramétereknek a felvétele után az összes

téglatest sarokpontjának a koordinátája ismertté válik egy derékszögű koordináta rendszerben.

Az állomások és a műholdak közötti egyenesek adottak:

- a kiindulóponttal (az állomás X és Y koordinátájával és tengerszint feletti magasságával)
- az egyenes irányával, azaz két szög értékkel (α azimut, E magassági szög)

Egy e egyenes irányvektora:

$$v_e = \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos E * \cos \alpha \\ \cos E * \sin \alpha \\ \sin E \end{bmatrix} \quad (3.29)$$

Az egyenes paraméteres egyenlete:

$$x = X_{P_1} + v_x * t \quad (3.30)$$

$$y = Y_{P_1} + v_y * t \quad (3.31)$$

$$z = Z_{P_1} + v_z * t \quad (3.32)$$

A téglatestek adottak:

- sarokpontjaik koordinátájával ($P_1 \dots P_8$)

Egy adott egyenes és téglatest metszéspontja(i) visszavezethető(k) egyenes és sík metszésére. A téglatestek lapjait síknak tekintjük és számítjuk az egyenes és sík metszéspontját.

A síkban adott két irányvektor:

$$\underline{v_1}(x, y, z)$$

$$\underline{v_2}(x, y, z)$$

A sík normálvektora:

$$\underline{n}(n_x, n_y, n_z)$$

ahol:

$$n_x = v_{1y} * v_{2z} - v_{1z} * v_{2y} \quad (3.33)$$

$$n_y = v_{1z} * v_{2x} - v_{1x} * v_{2z} \quad (3.34)$$

$$n_z = v_{1x} * v_{2y} - v_{1y} * v_{2x} \quad (3.35)$$

A sík egyenlete

$$Ax + By + Cz + D = 0 \quad (3.36)$$

A sík és az egyenes metszéspontját a következő egyenletrendszer megoldása adja:

$$\left. \begin{aligned} Ax + By + Cz + D &= 0 \\ x &= X_{P_1} + v_x * t \\ y &= Y_{P_1} + v_y * t \\ z &= Z_{P_1} + v_z * t \end{aligned} \right\}$$

Az egyenletrendszer megoldása:

$$t = \frac{-D - A * X_{P_1} - B * Y_{P_1} - C * Z_{P_1}}{A * v_x + B * v_y + C * v_z} \quad (3.37)$$

3.6 Refraktivitások számítása kiegyenlítéssel

A nedves refraktivitások számítása kiegyenlítéssel történik, amelyhez a legkisebb négyzetek módszerét alkalmaztam, ezen belül a kiegyenlítés közvetítő egyenletekkel (II. kiegyenlítési csoport). A legkisebb négyzetek módszere mind a geodéziában, mind a fotogrammetriában elterjedten alkalmazott becslési eljárás. A kiegyenlítésnek nem feltétele a mérések eloszlásának ismerete, csupán a mérési eredmények kovariancia mátrixát vagy egy azzal arányos mátrixot kell ismernünk.

A módszer alkalmazásának feltételei (Detrekői, 1991):

- legyen fölös mérésünk: a mért mennyiségek számának nagyobbak kell lennie a feladat egyértelmű meghatározásához szükséges adatok számánál:

$$f = n - s > 0 \quad (3.38)$$

ahol f a fölös mérések száma, n a mért mennyiségek száma, s az egyértelmű meghatározáshoz szükséges adatok száma.

- a méréseinket ne terheljék durva hibák
- ismerjük a mérések súlyviszonyait

A legkisebb négyzetek módszere a mérési eredményekhez úgy rendel javításokat, hogy a javítások négyzetösszege minimális legyen:

$$\mathbf{v}^* \mathbf{P}_{LL} \mathbf{v} = \min \quad (3.39)$$

ahol $\mathbf{v}$ a javítások vektora, $\mathbf{P}_{LL}$ a mért mennyiségek súlymátrixa.

A kiegyenlített mérési eredményeket (U) úgy kapjuk, ha a mért mennyiségekhez (L) hozzáadjuk a javításokat:

$$U = L + v \quad (3.40)$$

Jelen esetben a mért mennyiségek a műholdirányú nedves késleltetések (T_{fn}), amelyeket a 3.11-es pontban leírt módon kapunk. A mért mennyiségek számát a továbbiakban n -el jelöljük.

A kiegyenlítéshez felhasználunk nem mért mennyiségeket is, amelyeket paramétereknek (X) nevezünk. A kiegyenlítéshez ezeknek a paramétereknek számítjuk az előzetes értékeit (X_0), majd a legkisebb négyzet módszerét alkalmazva meghatározzuk a paraméterek változásait (x):

$$X = X_0 + x \quad (3.41)$$

Matematikai modellünkben paraméterként a nedves refraktivitás értékeit határozzuk meg az egyes prizmákban. A paraméterek előzetes értékeinek számításához felhasználhatjuk a rádiószondás mérések eredményeit, hiszen a rádiószondákkal az Országos Meteorológiai Szolgálat rendszeres időközönként meghatározza a hőmérséklet, a relatív páratartalom és a légnyomás értékeit a mérés függőlegesében. Így a 3.4-es összefüggés segítségével a nedves refraktivitás előzetes értékei meghatározhatók. A paraméterek száma (r) megegyezik azoknak a téglatesteknek a számával, amelyeket legalább egy egyenes metsz.

A javítások vektora (javítási egyenletek):

$$v = Ax + a_0 - L = Ax - l \quad (3.42)$$

Továbbá a paraméterek változása:

$$x = (A^*PA)^{-1}(A^*Pl) \quad (3.43)$$

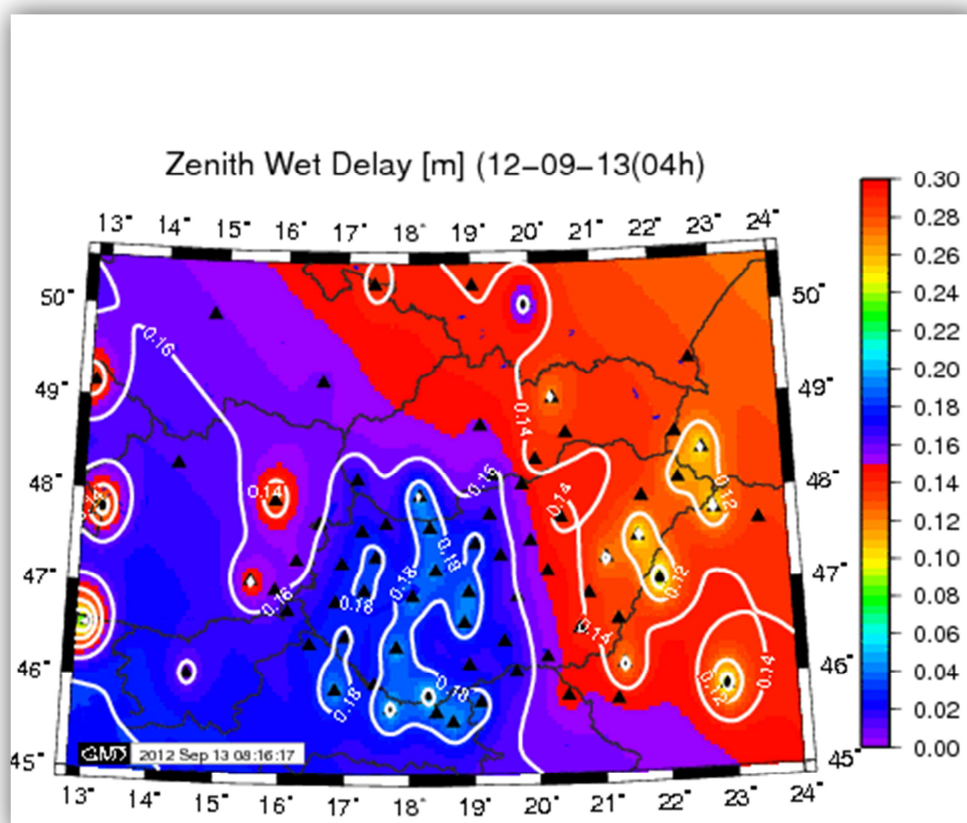
A kiegyenlítés csak akkor hajtható végre, ha van fölös mérés, tehát a paraméterek száma kevesebb, mint a mért mennyiségek száma. Ez azért fontos, mert a modell méreteinek felvétele összefüggésben van a paramétereknek a számával. Minél nagyobb méretű téglatesteket veszünk fel, annál kevesebb ismeretlenünk lesz. Ebben az esetben csökken a modell részletessége, ezért az optimális méreteket ennek a feltételnek az ismeretében célszerű megválasztani. A kiegyenlítés megbízhatóságát jellemezhetjük a kiegyenlített értékek középhibájával.

A kiegyenlítés után a nedves refraktivitások ismeretében a 3.4-es és 3.6-os összefüggést alkalmazva az egyes téglatesteknek a vízgőzsűrűsége számítható. Ehhez ismernünk kell az egyes prizmák hőmérsékleteit, amelyeket a rádiószondás mérések alapján határoztunk meg. Meg kell jegyeznünk, hogy a későbbiekben numerikus időjárási modellek alkalmazására is lehetőség nyílt mind a prizmák hőmérséklet értékeinek a becsléséhez, mind pedig a nedves refraktivitás előzetes értékeinek a meghatározásához.

4. Esettanulmány

4.1 Bevezetés

A négydimenziós vízgőzmodellek vizsgálatához egy egynapos időtartamot választottam (2012. szeptember 13.). Ezen a napon az éjszakai órákban egy markáns hidegfront vonult át az országon, így a nyugati országrészen kezdetben nagyobb volt a légrétegek víztartalma, majd miután a front a keleti részt is elérte, az egész ország területén megnövekedett a vízmennyiség a földközeli légrétegekben. A 4.1-es ábrán is látható, hogy hajnali 4 órakor a Dunántúlon jóval nagyobbak a troposzféra okozta nedves késleltetések értéke, mint a keleti országrészen.



Zenitirányú nedves késleltetés, 2012.09.13. 04 óra
4.1 ábra³

Az esettanulmányhoz szükséges adatokat a Budapesti Műszaki- és Gazdaságtudományi Egyetem Általános- és Felsőgeodézia Tanszék biztosította. Ezek az adatok tartalmazzák az adott napra a közel valósídejű GNSS feldolgozás eredményeit (troposzféra becslések), az

³ <http://gpsmet.agt.bme.hu/showmap.php>

európai permanens állomások koordinátáit, az állomásokon végzett meteorológiai méréseket, valamint a Budapesten végzett rádiószondás mérés eredményeit.

4.2 Bemeneti adatok

4.2.1 Rádiószondás mérések

A rádiószondás mérések eredményeit FSL fájlban kaptam meg. Az FSL fájlok szerkezete a következő ábrán látható:

254	23	18	FEB	2011		
1	99999	12843	47.43N	19.18E	139	2317
2	70	3000	2530	62	99999	3
3		9999			99999	kt
9	9950	139	36	15	320	4
4	10000	101	99999	99999	99999	99999
4	9250	731	8	0	310	4
5	8980	968	-3	-6	99999	99999
5	8720	1203	14	-1	99999	99999
4	8500	1411	2	-20	95	4
5	7950	1942	-31	-74	99999	99999
5	7340	2565	-85	-98	99999	99999
4	7000	2937	-103	-131	10	10
5	6870	3081	-111	-145	99999	99999

*Rádiószondás fájl felépítése
4.2 ábra*

Ha az oszlopokat balról kezdve 1-től 7-ig számozzuk, akkor az első oszlopban lévő értékek jelentése:

- 254: egy új mérési adatsor kezdete, a mérés időpontja UTC-ben (óra, nap, hónap, év)
- 1,2,3: fejléc adatok, a mérési hely földrajzi koordinátái, magasság...
- 4-9: mérési adatok

A mérési adatok tartalmazzák a légnyomást tized mBar mértékegységben, a magasságot méter mértékegységben, hőmérsékletet és a harmatpont hőmérsékletét tized °C-ban, valamint a szél irányát és a szélsébséget. Ha 99999-es érték szerepel valahol, akkor azt jelenti, hogy vagy hiányzik az érték vagy nem történt észlelés.

A rádiószondás mérések eredményeit felhasználva, a kiegyenlítésnél számíthatók a paraméterek (nedves refraktivitás) előzetes értékei. A (3.5) képlettel a harmatpont

hőmérsékletének függvényében a vízgőz parciális nyomása (e) számítható. A hőmérsékletnek, a vízgőz parciális nyomásának, valamint a k_1, k_2, k_3 (3.2) tapasztalati állandók ismeretében számítható a nedves refraktivitás (N_w).

4.2.2 CRD állomány

A CRD állomány tartalmazza a permanens állomások négy karakteres azonosítóját, és az X, Y, és Z térbeli derékszögű koordinátáit az ITRF08-as geodéziai dátumban.

Weekly coordinate solution					16-SEP-12 02:02
LOCAL GEODETIC DATUM: ITRF08					EPOCH: 2012-09-12 6:00:00
NUM	STATION NAME	X (M)	Y (M)	Z (M)	FLAG
1	ALCI 12371S001	3297847.5791	2661607.6545	4750829.9231	
2	ANKR 20805M002	4121948.4198	2652187.8582	4069023.7711	
3	AQUI 12757M001	4592507.3717	1089876.5205	4276392.9996	
4	ARAD 11200X018	4121078.5555	1610437.4595	4578721.0213	A
5	AUT1 12619M002	4466283.3278	1896167.0288	4126096.8240	
6	BACA 11405M001	3917524.7995	1988524.2044	4608585.6678	
7	BAIA 11406M001	3945839.6180	1720428.3865	4691082.7726	

CRD állomány

4.3 ábra

A térbeli derékszögű koordinátákból a szoftver automatikusan számítja az állomások földrajzi koordinátáit (szélesség, hosszúság). Erre azért van szükség, hogy a későbbiekben a műhold magassági szögét és azimutját tudjuk számítani.

4.2.3 EOVS állomány

Az EOVS állomány tartalmazza a permanens állomások négy karakteres azonosítóját, az Y és X koordinátákat az Egységes Országos Vetületi rendszerben, valamint a magasságokat (Balti-tenger felett). Az országon kívüli állomások EOVS koordinátái egy polinomos transzformáció eredménye, a koordináták Magyarország területén dm-es pontosságúak.

Weekly coordinate solution				23-SEP-12
LOCAL GEODETIC DATUM: ITRF08		EPOCH: 2012-09-19 6:00:00		
NUM	STATION	Y (EOV)	X (EOV)	M(Bf)
15	BUTE 11209M001	650684.9	237444.5	180.7
16	CAKO 11200X028	449393.2	119197.8	222.1
20	CSOR 11214M001	514982.3	253533.0	178.3
24	DUJV 11243M001	641830.5	179939.1	209.3
28	FUZE 11224M001	752592.0	268215.8	164.9
29	GANP 11515M001	743308.0	411004.2	746.1
30	GKU4 90001M001	510464.3	314323.6	195.5

EOV állomány
4.4 ábra

4.2.4 Numerikus időjárás modellekből meghatározott kihullható csapadékmennyiségek

A WRF numerikus időjárás modellekből levezetett értékeket az ELTE Meteorológiai Tanszéke bocsátotta rendelkezésünkre. Az állomásonként meghatározott adatsorok tartalmazzák:

- PRESsfc: földfelszíni légnyomás [Pa]
- PWATclm: kihullható csapadék [kg/m²]
- TMP2m: 2 m-es talajszint feletti magasságban a hőmérséklet [K]

```
#timestamp, PRESsfc, PWATclm, TMP2m
00Z28JUN2012, 99669.7, 28.1253, 291.706
01Z28JUN2012, 99689.9, 28.4533, 288.553
02Z28JUN2012, 99617.3, 28.7413, 288.848
03Z28JUN2012, 99581.6, 29.3993, 288.628
04Z28JUN2012, 99556.2, 29.6952, 290.32
05Z28JUN2012, 99532.9, 29.9602, 292.007
06Z28JUN2012, 99511.2, 30.5562, 293.826
07Z28JUN2012, 99510.3, 31.4173, 295.772
08Z28JUN2012, 99501.6, 32.4952, 297.523
```

WRF modell adatok
4.5 ábra

A földfelszíni légnyomás értékeket a hidrosztatikai késleltetés számításához használtuk fel.

4.2.5 Almanach állományok

A műholdak magassági szögének és azimutjának meghatározásához ismerni kell a műholdak helyzetét egy adott időpillanatban. Jelen dolgozatban a műholdak térbeli derékszögű koordinátáinak számításához az almanach adatokat használtam fel. Az almanach adatokból a műholdak közelítő helyzete határozható meg. A pályaszámításhoz szükséges adatok: excentricitás (e), referencia epocha (t_{0a}), inklináció (i), felszálló csomó hosszának változása ($\dot{\Omega}$), a fél nagytengely négyzetgyöke ($a^{0.5}$), a felszálló csomó hossza a GPS hét kezdetén (Ω_0), a perigeum argumentuma (ω), középanómia (M_0), órahiba (af_0) és a műholdóra driftje (af_1). (YUMA, 2012) Ezek az állományok az interneten ingyenesek elérhetők⁴.

```
***** Week 681 almanac for PRN-01 *****
ID:                                01
Health:                            000
Eccentricity:                      0.1182079315E-002
Time of Applicability(s):          405504.0000
Orbital Inclination(rad):          0.9606219126
Rate of Right Ascen(r/s):          -0.7748894201E-008
SQRT(A) (m 1/2):                   5153.598145
Right Ascen at Week(rad):          -0.3114128555E+001
Argument of Perigee(rad):          0.388780989
Mean Anom(rad):                    0.1293742019E+000
Af0(s):                            0.2737045288E-003
Af1(s/s):                          0.0000000000E+000
week:                              681
```

Almanach állomány
4.6 ábra

4.2.6 Troposzféra becslés állományok

A közel valósídejű feldolgozás eredményei a troposzféra becslés állományok. Tartalmazzák a zenitirányú teljes, nedves és hidrosztatikus késleltetéseket. Ezek az állományok óránként készülnek, és minden állomány a megelőző 12 órányi késleltetés értékét tartalmazza az összes állomásra vonatkozóan.

⁴ <http://www.celestrak.com/GPS/almanac/Yuma/>

Final Troposphere Estimation (17054)				13-SEP-12 14:36			
A PRIORI MODEL: -15		MAPPING FUNCTION:		0	MIN. ELEVATION: 5		TABUL
STATION NAME	FLG	YYYY MM DD HH MM SS	MOD_U	CORR_U	SIGMA_U	TOTAL_U	
BUTE 11209M001	P	2012 09 13 00 00 00	2.2583	0.16650	0.00071	2.42483	
BUTE 11209M001	P	2012 09 13 01 00 00	2.2583	0.17452	0.00041	2.43285	
BUTE 11209M001	P	2012 09 13 02 00 00	2.2583	0.17127	0.00049	2.42960	
BUTE 11209M001	P	2012 09 13 03 00 00	2.2583	0.18351	0.00047	2.44184	
BUTE 11209M001	P	2012 09 13 04 00 00	2.2583	0.19103	0.00041	2.44936	
BUTE 11209M001	P	2012 09 13 05 00 00	2.2583	0.20139	0.00053	2.45972	

*Troposféra becslés állomány
4.7 ábra*

4.3 A térmodell paramétereinek felvétele

A háromdimenziós modell méreteinek megválasztásakor figyelembe kellett venni az állomások átlagos távolságát, és a troposféra szerkezetét. Minél nagyobb felbontású modellt szeretnék létrehozni, annál sűrűbb állomás hálózatra van szükség, hiszen a felbontás növelésével nő az ismeretlenek száma a kiegyenlítésben. A vertikális rétegek méreteinek megválasztását a troposféra jellemző paramétereinek függvényében kellett felvenni. A modell méretét ezek alapján úgy vettem fel, hogy egész Magyarország területét lefedje, és a vertikális rétegződés a troposféra vízgőztartalmát figyelembe vegye.

A modell létrehozásának több lehetőségét is vizsgáltam, a cél a legjobb felbontás és a kiegyenlítés megoldhatóságának elérése volt. A vizsgált három lehetséges modell méretet (a, b, c) az 1. táblázat tartalmazza.

	X irányú felbontás	Y irányú felbontás	Z irányú felbontás
a,	4x100 km	6x100 km	1x1 km+ 4x2 km + 1x3 km
b,	7x60 km	10x60 km	3x1 km+ 3x2 km + 1x3 km
c,	8x50 km	12x50 km	3x1 km+ 3x2 km + 1x3 km

*A modell lehetséges méretei
1. táblázat*

	Mérések száma (n)	Paraméterek száma (r)	Fölös mérések száma (f)	Téglatestek száma
a,	418	136	282	142
b,	426	363	63	490
c,	418	446	-28	672

A kiegyenlítés jellemzői
2. táblázat

Az *a*, és *b*, esetben a fölös mérések száma nagyobb, mint nulla, tehát a kiegyenlítés elvégezhető. A *c*, esetben a paraméterek száma nagyobb, mint a mérések száma, ezért a javítási egyenletekből alkotott egyenletrendszer határozatlan, nincs megoldása. A további vizsgálatokat a *b*, esethez tartozó modellel végeztem, hiszen ez adja a legjobb térbeli felbontást.

Ha figyelembe vesszük, hogy a permanens állomások átlagos távolsága körülbelül ~60 km, akkor érthető, hogy ennél nagyobb vízszintes felbontás akkor érhető el ha növeljük az állomások számát.

4.4 A számítás menete

A számításokat a *b*, esetben felvett kiinduló adatokkal végeztem el. A modell 490 téglatestből (7x10x7, XYZ irányban) áll. A modell vízszintes értelemben 252000 km² területet fed le, és 52 permanens állomást tartalmaz.

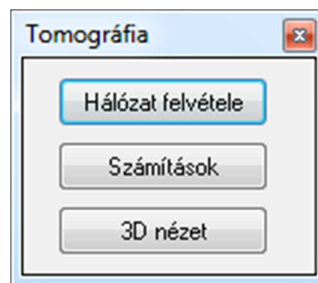


Modell által lefedett terület, EOVS koordináta rendszerben
4.8 ábra

Számítottam az állomások ellipszoidi földrajzi koordinátáit, majd állomásonként a műholdak horizonti koordinátáit (azimut, magassági szög). A magassági kitakarási szög értékének 10° -ot vettem fel, ami azt jelenti, hogy ennél alacsonyabban látszó műholdak nem vettek részt a számításban. Niell leképzési függvényének a segítségével számítottam a ferde (műhold irányú) irányú nedves késleltetéseket, a kiegyenlítésben ezek az értékek voltak a mérési eredmények. A rádiószondás mérések adatai alapján az egyes téglatestek előzetes meteorológiai paramétereit (pl.:nedves refraktivitás előzetes értéke) számítottam. A kiinduló adatok ismeretében a modellt metsző egyeneseknek (állomásokat és műholdakat összekötő egyenesek) a téglatestekből kimetszett hosszai számíthatók voltak. Ezeket a hosszakat tartalmazza a kiegyenlítésben az **A** alakmátrix. A kiegyenlítést követően meghatároztuk az egyes prizmákhoz tartozó vízgőzsűrűség értékeket. Ha a számítást több időpontban is elvégezzük, akkor kapjuk a negyedik dimenziót, az időt.

4.5 A szoftver ismertetése

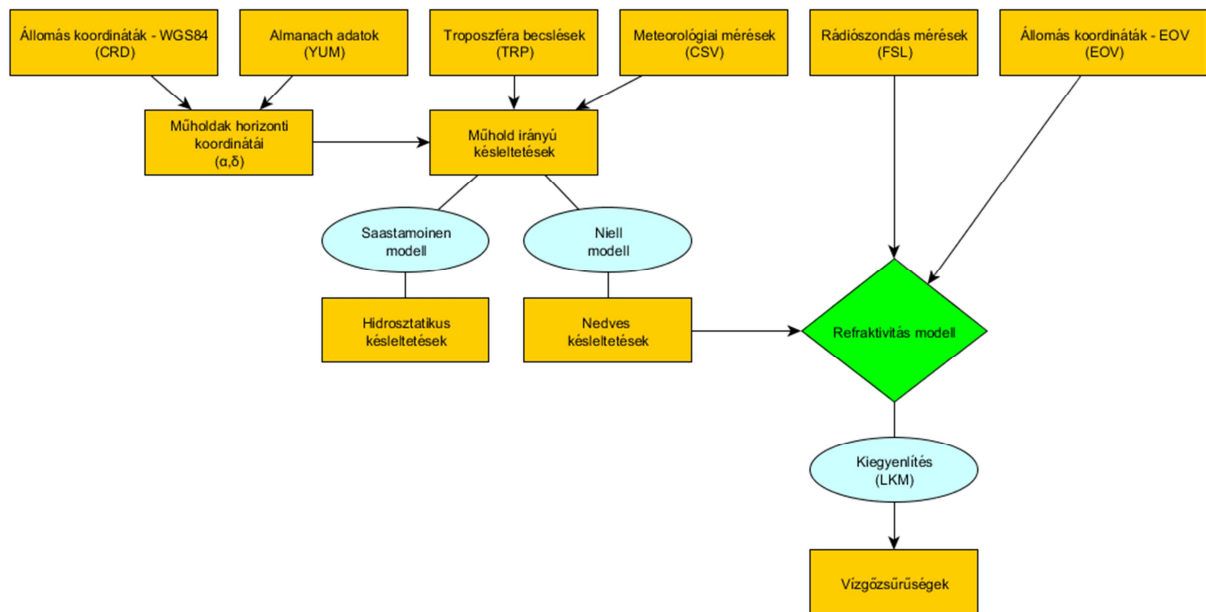
A számítások elvégzéséhez egy közel 3000 soros szoftvert (Tomográfia) fejlesztettem ki. A program elkészítéséhez a Delphi 7-es rendszert használtam. A program három modulból tevődik össze (4.9 ábra).



Tomográfia program főmenüje
4.9 ábra

Az első modulban (Hálózat felvétele) a modell paramétereit lehet beállítani: X,Y és Z irányban az egyes oszlopok, sorok, és rétegek méreteit. A második modulban (Számítások) a történik a számítások elvégzése. A harmadik modulban (3D nézet) egy háromdimenziós térben lehet szemlélni a modellt.

A program működését a 4.10 ábra szemlélteti. A következő fejezetekben a szoftver működését és az eredményeket mutatom be részletesebben.



A program működésének folyamatábrája
4.10 ábra

4.5 Kimeneti adatok

A számított eredményeket a program elmenti szöveges állományba (*out.txt*). Ez az állomány tartalmazza a téglatest azonosítóját (x, y, z) és a téglatestre számított nedves refraktivitást és a vízgőzsűrűséget. A téglatestek azonosítója három darab szám érték, melyek egy X, Y és Z koordináta-rendszerben azonosítják a téglatestet és számozásuk nullával indul.

4.6 Modell eredmények

A számítások eredményei azt mutatják, hogy a modell alkalmas a troposzférában lévő vízgőzsűrűség értékének a meghatározására. A modell szélein, ahol a mérési adatok ritkábbak, ott előfordulnak olyan téglatestek, amelyek nem vesznek részt a kiegyenlítésben, így ott a meteorológiai adatokból felvett előzetes értékekből számolt vízgőzsűrűséget kell feltételezni. Vizsgáltam a vízgőzsűrűség értékeket fizikai szempontok szerint is. Ha ismerjük a hőmérsékletet egy pontban, akkor meghatározható a telített vízgőz parciális nyomása a Meteorológiai Világszervezet (WMO) által ajánlott összefüggéssel:

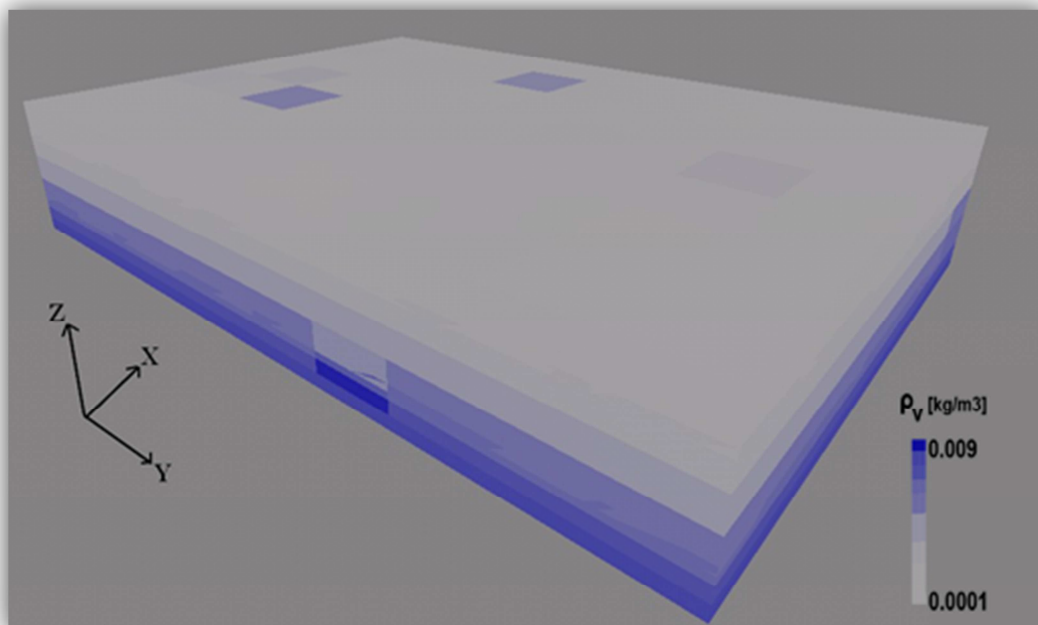
$$e_w = 6.112 * e^{\frac{17.62 * T}{243.12 + T}} \quad (4.1)$$

ahol T a hőmérséklet °C-ban, e_w a telített vízgőz parciális nyomása hPa-ban.

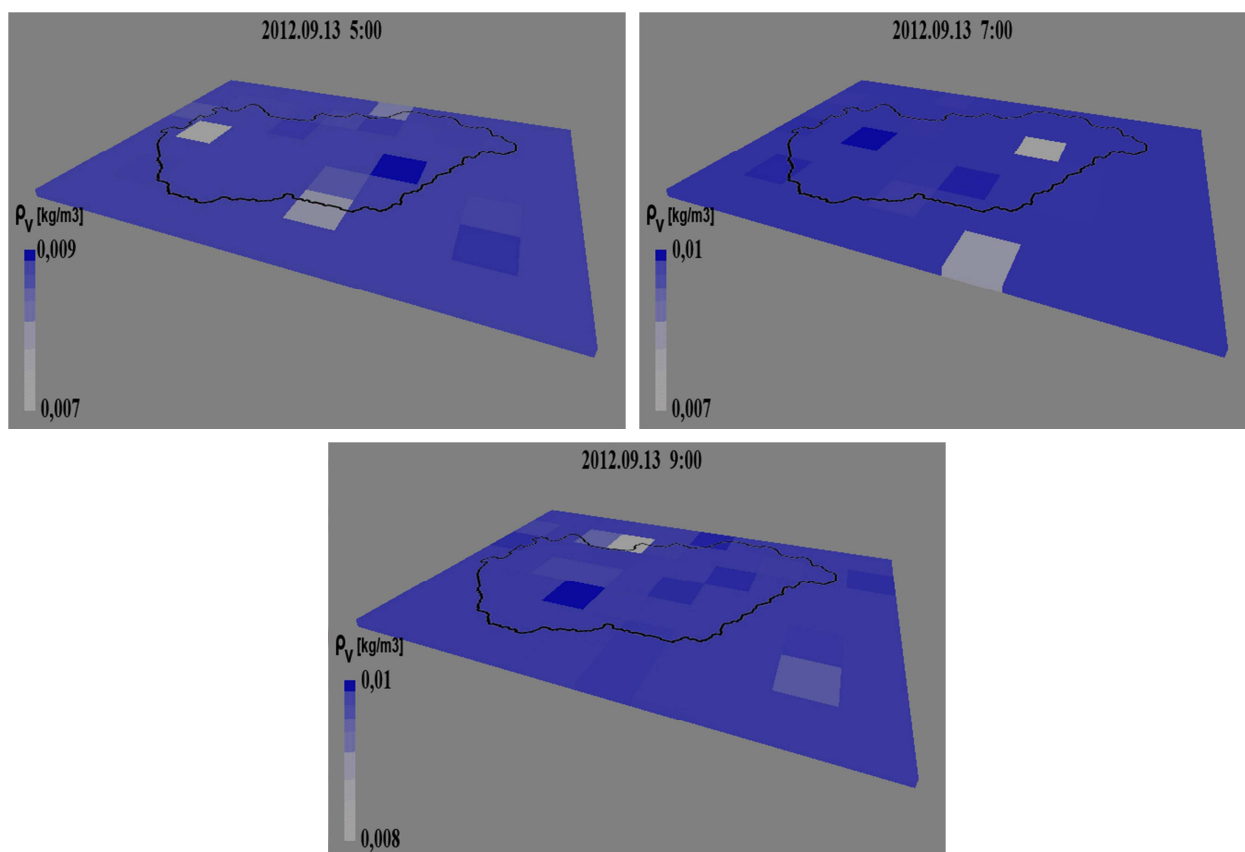
Ebből számítható a telített vízgőzsűrűség értéke a (3.6) összefüggéssel. Fizikai értelemben ennél az értéknél nem lehet nagyobb a számított vízgőzsűrűség. Mivel a legkisebb négyzetek módszere feltételi egyenleteket használ a túlhatározott egyenletrendszer megoldására, ezért előfordult olyan eset, hogy a paraméter olyan javítást kapott, amelyből számolt vízgőzsűrűség nagyobb volt, mint ami fizikailag lehetséges. Természetesen ez az eltérés nagyon kicsi volt (földközeli rétegben: $4 \cdot 10^{-4} \text{ kg/m}^3$, ami 4%-os eltérésnek felel meg, a tropopauza környékén: $\rho_v = 0,19 \cdot 10^{-4} \text{ kg/m}^3$, ami 25%-os eltérésnek felel meg), azonban ezt figyelembe kell venni a későbbi vizsgálatoknál. A kiegyenlítésben ilyen jellegű egyenlőtlenségeket nem lehet feltételként megadni, ezért más módszereket kell alkalmazni a további kutatásokban. Egy megoldás lehet, ha a szóban forgó prizmák vízgőzsűrűségeit a telített vízgőz sűrűség értékén megköttjük, ezt követően pedig egy újabb legkisebb négyzetek szerinti kiegyenlítést hajtunk végre, amelyből ezeket a prizmákat már kihagyjuk.

A modell térbeli felbontásának csak az állomások távolsága szab határt. Mivel a troposzféra becslések óránként készülnek, ezért időben jobb felbontás is elérhető.

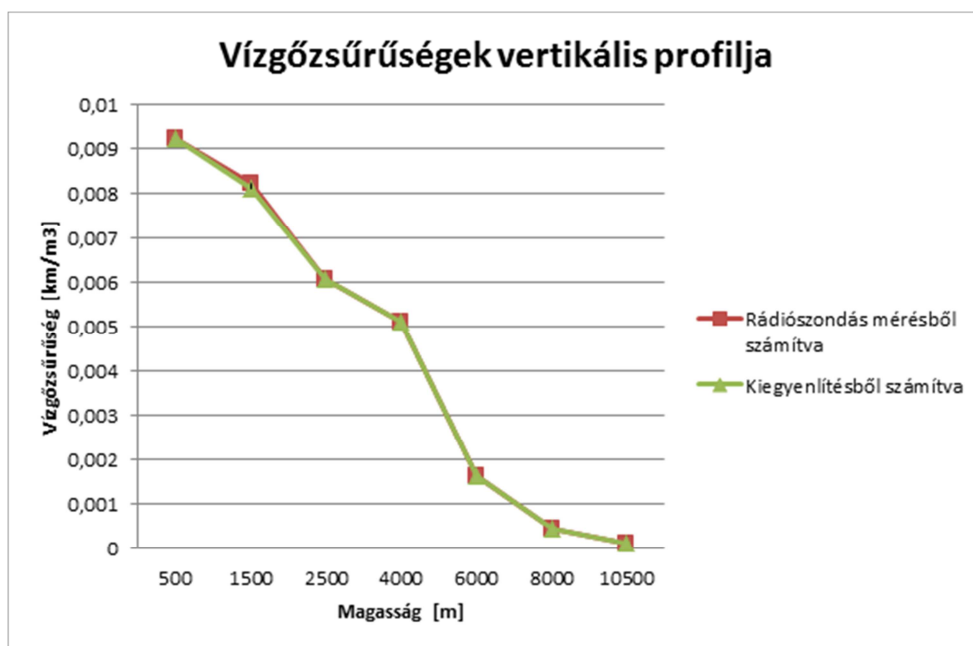
A modellt az általam készített szoftver 3D-s moduljában a térben szemlélhetjük (4.11 ábra), és van lehetőség a sorok, oszlopok és rétegek láthatóságának változtatására, azaz „benézni” a modell belsejébe.



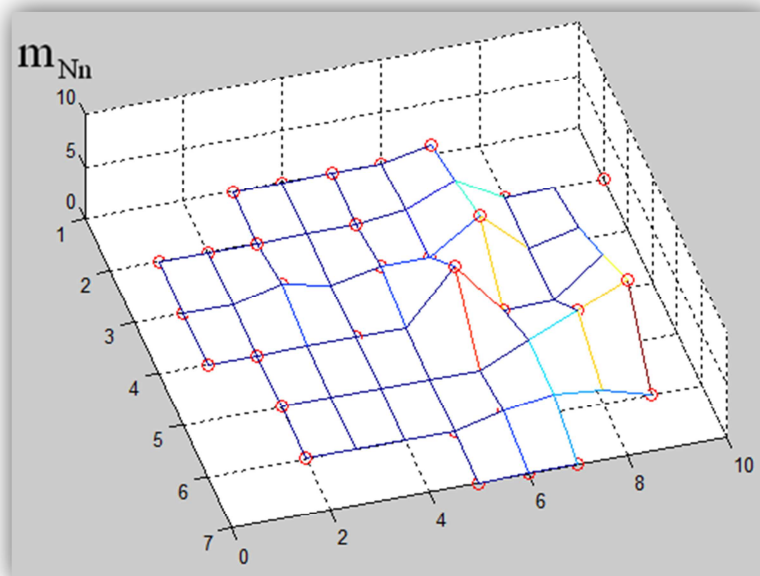
Vízgőzmodell 3D-s nézetben
4.11 ábra



Vízgőzmodell változása az időben (legalsó réteg, 5h, 7h, 9h)
4.12 ábra



Vízgőzsűrűségek vertikális profilja (BUTE, 5h)
4.13 ábra



Paraméterek (nedves refraktivitások) középhibája a legalsó rétegben (5h)
 (A nedves refraktivitások átlagos értéke ebben a rétegben: $N_n=50$)
 4.14 ábra

5. Összegzés

A GPS rendszert eredetileg navigációs célokra fejlesztették ki, azonban a geodéziai infrastruktúra felhasználásával más célokat is elérhetünk. A permanens GPS állomások mérési adatai meteorológiai célokra is felhasználhatóak. Az aktív GNSS hálózat segítségével a troposzféra műholdjelekre gyakorolt hatása meghatározható, amely hatás a troposzférában lévő vízgőzzel áll kapcsolatban. Jelen tudományos diákköri dolgozatban a közel-valósídejű rendszer feldolgozásának eredményeit és a meteorológiai mérések adatait felhasználva a négydimenziós vízgőzmodellek előállítási lehetőségét vizsgáltuk.

Az elméleti háttér fejezetben részletesen bemutatásra került a számítás elve, és a számítások során alkalmazott feltételezések és közelítések, majd egy esettanulmányon keresztül szemléltettük a vízgőzmodell létrehozásának lépéseit. A kapott eredmények azt mutatják, hogy a négydimenziós modellek térbeli felbontásának az állomások sűrűsége szab határt. A kiegyenlítésből kapott eredményeket felhasználva számítottuk a vízgőz sűrűség értékeket. A modell szélein, ahol ritkábbak a mérési adatok, ott a felsőbb rétegekben lévő prizmák nem vettek részt a kiegyenlítésben, ezért a meteorológiai adatok alapján felvett előzetes értékekből számított vízgőzsűrűséget feltételeztük.

A további kutatások célja lehet a kapott vízgőz értékek felhasználása meteorológiai célokra, valamint, az adatok összehasonlítása a numerikus időjárás előrejelző modellek eredményeivel, továbbá a különböző fizikai feltételek figyelembe vételével történő kiegyenlítés iterációs módszerrel.

Köszönetnyilvánítás

Köszönöm konzulensemnek, a BME Általános és Felsőgeodézia Tanszék tanárának, Dr. Rózsa Szabolcsnak a szakmai segítséget. Köszönettel tartozom az ELTE Meteorológiai Tanszékének, hogy a rendelkezésemre bocsátotta a mérési adatokat, és Viengdavanh Róbertnek a meteorológiai részben nyújtott segítségéért.

Irodalomjegyzék

Ádám, J., Bányai, L., Borza, T., Busics, Gy., Kenyeres, A., Krauter, A., Takács, B. (2004): Műholdas helymeghatározás. Műegyetemi Kiadó

Ádám, J., Rózsa, Sz. (2011): GNSS elmélete és alkalmazása. Oktatási segédlet⁵

Budai, O. (2009): Földbázisú távérzékelés a meteorológiában

Detrekői, Á. (1991): Kiegyenlítő számítások. Tankönyvkiadó, Budapest

Makra, L.: Rádiószondák⁶

Mohácsi, Á. (2010): A légköri vízgőz mennyiségének mérése⁷

Kuzmina, J., Dr. Tamás, P., Tóth B. (2004): Programozzuk Delphi 7 rendszerben! ComputerBooks

Péczely, Gy. (2006): Éghajlatlan. Nemzeti Tankönyvkiadó

Rózsa, Sz., Dombai, F., Németh, P., Ablonczy, D. (2009): Integrált vízgőztartalom becslése GPS adatok alapján⁸. GEOMATIKAI KÖZLEMÉNYEK XII:(1) pp. 187-196.

Rózsa, Sz., Kenyeres, A., Weidinger, T., Gyöngyösi, A. (2010): GNSS mérések közel valósidejű feldolgozása meteorológiai alkalmazásokhoz. Geomatikai Közlemények XIII/2

Rózsa, Sz., Weidinger, T., Gyöngyösi, A. (2011): Víz a légkörben. Élet és Tudomány. pp. 51-52

Smith, E. K., Weintraub, S. (1953). The Constants in the Equation for Atmospheric Refractive Index at Radio Frequencies. Proceedings of the Institute of Radio Engineers (I.R.E.), 41: 1035-1037.

⁵ http://www.agt.bme.hu/tantargyak/msc/bmeeoafmlt1/BMEEOAFMLT1_jegyzet.pdf

⁶ <http://www2.sci.u-szeged.hu/eghajlatlan/pdf/6%20radioszondak.pdf>

⁷ http://opt.physx.u-szeged.hu/oktatas/Lev_min/Eloadas.pdf

⁸ http://www.geod.bme.hu/~szrozsza/personal/publications/Geomatika2008_RSz.pdf