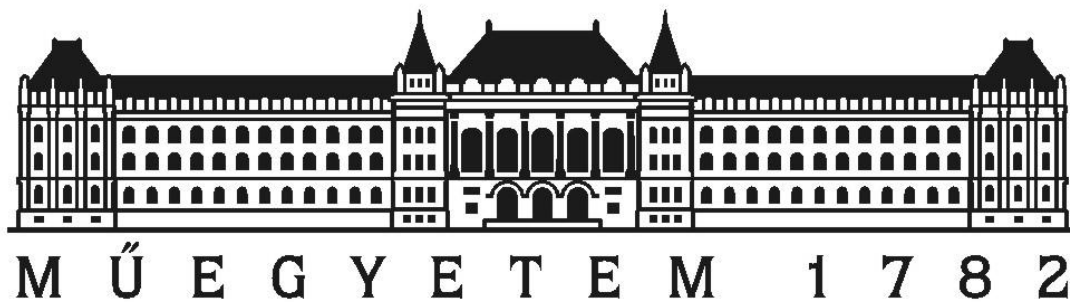




Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Építőmérnöki Kar

Általános- és Felsőgeodézia Tanszék

A Nemzeti Összetartozás Hídjának hosszútávú mozgásvizsgálata

TDK dolgozat

Dömötör Anna

Konzulens: Turák Bence

Budapest, 2024

Tartalomjegyzék

Absztrakt	2
Abstract	2
1. Bevezetés	3
2. A GNSS mérési technológia	5
2.1. Elméleti áttekintés	5
2.2. Mérések kivitelezése.....	7
3. Adatok feldolgozása.....	9
3.1. A híd alakváltozása a hőmérséklet függvényében.....	9
3.2. A híd sajátfrekvenciáinak kimutatása.....	10
3.2.1. Fourier-transzformáció	10
3.2.2. Rövid távú Fourier-transzformáció (Short Time Fourier Transform, STFT)	11
3.2.3. Wavelet transzformáció	12
4. Eredmények	16
4.1. A hőmérséklet hatása a szerkezetre	16
4.2. A szél hatása a szerkezetre	17
5. Összefoglalás	24
6. Köszönetnyilvánítás	25
Irodalomjegyzék.....	26

Absztrakt

A hagyományos geodéziai módszerek mellett egyre nagyobb szerep jut a GNSS-rendszeren alapuló technológiáknak. Az árak csökkenésével és a megbízhatóság növekedésével elérhetővé vált ezen forradalmi megoldás használata a szerkezetek deformációvizsgálatára. A GNSS technológia lehet kiegészítője a hagyományos technológiákkal történő mozgásvizsgálatoknak, de bizonyos esetekben akár önálló rendszerként is használható szerkezetek monitorozására.

Munkám során elvégeztem a sátoraljaújhelyi Nemzeti Összetartozás Hídjának mozgásvizsgálatát, ahol kitértem a hőmérsékletváltozás okozta deformációk kimutatására, valamint a gerjesztett hídszerkezet sajátfrekvenciáinak meghatározására. Továbbá kísérletet tettem a hídmozgás és időjárásviszonyok közötti összefüggése felderítésére.

Abstract

In addition to traditional surveying methods, the GNSS system-based techniques are playing an increasingly important role. With the decrease in prices and the increase in accuracy, the use of this technology for deformation testing of structures has become available. GNSS technology can supplement motion studies with traditional technologies, but in some cases, it can even be used as an independent system for monitoring structures.

During my work, I carried out the movement analysis of the Bridge of National Unity at Sátoraljaújhely. During the investigation, I covered the detection of deformations caused by temperature changes as well as the determination of the natural frequencies of the disturbed structure. Furthermore, I attempted to show the connections between bridge movement and weather conditions.

1. Bevezetés

Az elkészült, illetve megvalósult szerkezetekkel szemben időnként támasztott igény azok próbaterhelése, felülvizsgálata. Ezen próbaterhelések célja a szerkezet adott teherre, hatásra történő viselkedésének vizsgálata, azok összehasonlítása a tervezés során előállított numerikus modellek eredményeivel. A próterhelések hagyományosan két típusra oszthatók: statikus, illetve dinamikus terhelésekre. A statikus próbaterhelés során a szerkezetre ismert tömegű terheket helyeznek és vizsgálják annak deformációját, míg a dinamikus terhelés alatt a szerkezetet időben változó hatásoknak, gerjesztésnek teszik ki. Ez utóbbi, megvalósulhat akár hosszútávú monitoring formájában, amely során hónapokon vagy akár éveken át tartó méréseket végeznek a szerkezetre ható mindennapi erők, hatások kimutatására.

A geodéziában alkalmazott hagyományos módszerek – melyek többnyire a szintezés és a szögmérésen alapuló mérőállomással történő mérés – mellett egyre nagyobb teret nyernek az alternatív módszerek. A technológia fejlődésének és az árak csökkenésének köszönhetően olyan technológiák is elérhetővé váltak a szerkezetek mozgásának meghatározására, mint a GNSS technológia [1] vagy GBSAR interferometria (Ground-based SAR interferometry) [2].

Jelen dolgozat tárgya a Nemzeti Összetartozás Hídja (1. ábra) [3], mely a sátoraljaújhelyi Szárhegyet és Várhegyet összekötő kétirányú gyalogoshíd. Különlegessége, hogy a maga 700 méterével világ leghosszabb gyalogos kötélhídjaként tartják számon, valamint az 1,2 méter széles járófelület középső szakaszán, az oda látogatók egy 5-6 méter hosszan elterülő üveg járófelületen keresztül tekinthetik meg az alattuk tátongó 83 méter völgyet. Szerkezetét tekintve hídpályáját 6 darab, 70 mm átmérőjű zárt spirálkábel tartja, ezen kerettartók, szélkábelek és lekötő kábelek biztosítják a függőhíd stabilitását, merevségét. A szerkezetet a mérnökök azért tervezték így, hogy a híd ellenálljon a szél okozta kilengésekkel, hullámsokkakkal szemben. Emellett nagy hangsúlyt fektettek arra, hogy az esetleges kilengések esetén a híd megőrizze stabilitását.



1. ábra: A Nemzeti Összetartozás Hídja[4]

A soron következő kutatás célja a szerkezetet terhelő környezeti hatások kimutatása. Az erre alkalmazott szerkezetvizsgálat állt egy próbaterhelésből, mely során statikus és dinamikus terhekkel is terhelték a szerkezetet, valamint egy hosszú távú monitoring rendszerből, mely a hídra ható különböző időjárási körülmények hatását hivatott kimutatni. Az alkalmazott mérési módszerek között megtalálhatóak a szerkezetvizsgálatkor hagyományosan használt nyúlásmérő bélyegek, illetve gyorsulásmérő szenzorok. Ezen felül alkalmazásra kerültek a hagyományos geodéziai eszköztárból mérőállomások, illetve ezt kiegészítendő GNSS vevők, melyek alkalmas eszköznek bizonyultak a hosszútávú méréseknél, elsősorban a híd alakváltozásainak kimutatására.

Dolgozatomban a hosszú távú GNSS alapú mozgásvizsgálat eredményeire helyeztem a hangsúlyt, így a hőmérsékletváltozás, illetve a szél hatásainak kimutatása volt az elsődleges szempont.

2. A GNSS mérési technológia

Az elmúlt évtizedekben egyre nagyobb teret nyert a globális műholdas helymeghatározás. A technológia fejlődésével és az árak csökkenésével manapság mindenki számára elérhető vált a GNSS (Global Navigation Satellite System) használata, valamint az ezen technológiát alkalmazó eszközök a világ minden pontján megtalálhatók.

A GNSS egy olyan navigációs műholdcsalád, amely magába foglalja nemcsak a GPS NAVSTAR műholdak, hanem az orosz GLONASS, a kínai BeiDou és az európai Galileo műholdak és azok kiegészítőrendszereit is [5]. A GNSS méréseket alapvetően kódmérésekre és fázismérésekre bontjuk. Kód mérés esetén alapvetően az időmérésen alapuló távmérés elvét alkalmazzuk, mely során felhasználjuk az elektromágneses hullámok terjedési sebességét vákuumban. A mindennapi navigációs eszközök (mobiltelefonok, tabletek, sportórák) ezen módszert használják helymeghatározási célokra. Megbízhatósága néhány méter körül alakul. A geodéziai megbízhatóság eléréséhez az úgynevezett fázismérésen alapuló módszerek szolgálhatnak, itt ugyanis a beérkező vivőhullámok fázisát mérjük a navigációs üzenetek eltávolítása után. A módszer alkalmazható abszolút PPP (Precise Point positioning), illetve relatív helymeghatározási módszerként is PPK (Post-Processed Kinematic)/RTK(Real-Time Kinematic).

2.1. Elméleti áttekintés

A GNSS méréseket számos hiba terheli a jel kibocsájtásától kezdve egészen annak vételéig. A GNSS alapú helymeghatározás közvetítőegyenlete λ frekvencián a következőképpen írható fel [5]:

$$\phi_i^j = \rho_i^j - c\delta_i + c\delta^j + \lambda N_i^j + T_i^j - I_i^j + v_i^j \quad (1)$$

Ahol:

ϕ_i^j a fázistávolság méterben adott frekvencián i-edik vevőn a j-edik műholdra

δ_i a vevő órahibája

δ^j a műhold órahibája

λ a vivőjel hullámhossza

N_i^j a ciklustöbblettelműség

T_i^j a troposzféra hatása

I_i^j az ionoszféra hatása

c az elektromágneses hullám terjedési sebessége vákuumban

v_i^j a mérési zaj

ρ_i^j a geometriai távolság a vevő és a műhold között:

$$\rho_i^j = \sqrt{(X_i - X^j)^2 + (Y_i - Y^j)^2 + (Z_i - Z^j)^2} \quad (2)$$

A GNSS mérések során az 1. egyenletben szereplő hibák és hatások a megfelelő modellek használatával csökkenthetők, vagy megfelelő mérési módszerrel kiejthetők. A PPP technika az előbbi módszert alkalmazza, ahol a különböző hibahatások modellezése után – különösen a troposzféra és ionoszféra hatása – kivonásra kerülnek az egyes mérési eredményekből. A módszer hátránya, hogy az említett modellek előállítása bonyolult számításokat igényel, melyek megbízhatósága a valós idejű számítások (PPP-RTK) során még nem éri el a geodéziai megbízhatóságot, vagy az csak hosszútávú mérések segítségével érhető el [6, 7].

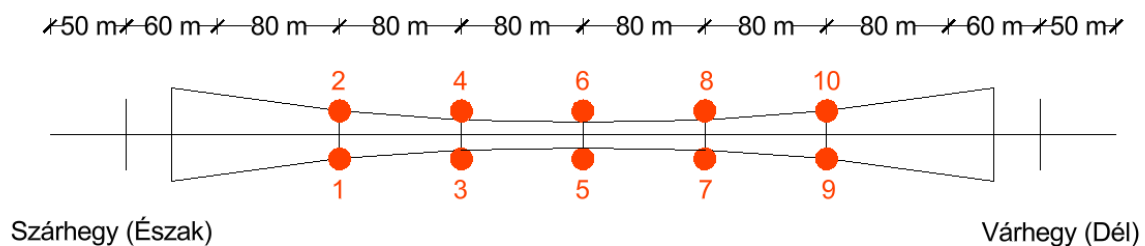
Ennek következtében a gyakorlati felhasználásra, a hibák mérési módszerrel való kiejtésének metodikája terjedt el egyszerre több GNSS-vevő alkalmazásával. Ezen eljárás az 1. egyenlet különbségképzései segítségével kiejti a troposzféra és ionoszféra hatását, feltételezve, hogy a két GNSS-vevők elég közel van egymáshoz, így a hibahatások megegyeznek.

A valós idejű helymeghatározási eljárásnál (RTK) a pozíciók pontosságának növelésének céljából, rögzített bázisállomást használnak, ami egy mozgó vevőnek, úgynevezett rovernek küldi ki a vezeték nélkül a korrekciókat [5, 7]. A módszer legnagyobb előnye, hogy a terepen azonnali ellenőrzésre van lehetőségünk, így nem ütközünk nehézségekbe (takarás, műhold-geometria) a ciklustöbbsértelműség során, amivel elkerülhetjük a pótmérést, ezzel sok időt és plusz munkát megspórolva. Az idő tekintetében előnyünkre van még a rendkívül rövid mérési időtartam, ami az OTF (on-the-fly) inicializálásnak köszönhetően igen nagy előnyt jelent a PPK méréshez képest. Az RTK módszer megbízhatósága eléri az ~1 cm körüli értéket, mely a legtöbb geodéziai célú mérés során elegendőnek bizonyul.

Az RTK technológia költséghatékonyságának és megbízhatóságának köszönhetően bizonyos körülmények között elérhetővé vált nem csak hagyományos térképezési célokra, hanem szerkezetek mozgásvizsgálatához is [1].

2.2. Mérések kivitelezése

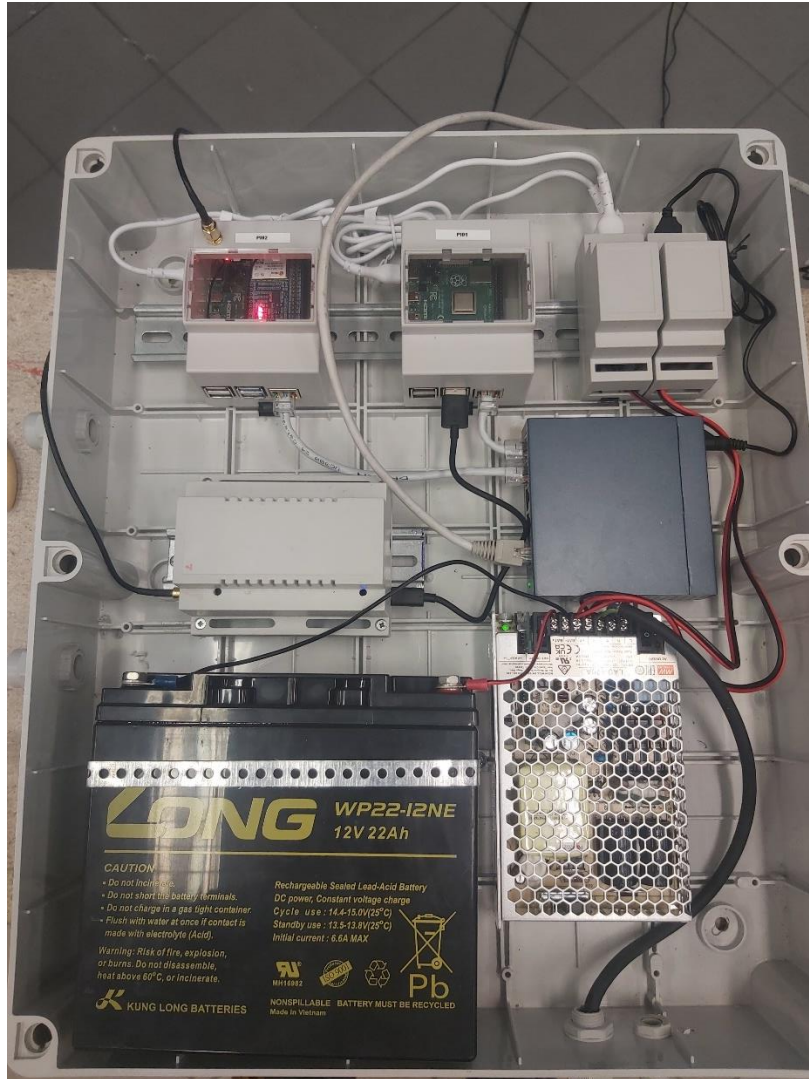
A híd próbaterhelésének kivitelezését a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudomány Egyetem, Építőmérnöki Kar, Hidak és Szerkezetek Tanszék, valamint az Általános- és Felsőgeodézia Tanszék végezte el. A próbaterhelés ideje alatt hagyományos és újszerű technológiákat is felhasználtak a híd alakváltozásainak kimutatására, valamint a hosszú távú mozgásvizsgálati szempontokat szem előtt tartva, a szél erősségének és irányának, továbbá a híd hőmérsékletének mérésére is sor került a teljes mozgásvizsgálati időszakban. Dolgozatomban a GNSS mérésekre és azok feldolgozására koncentrálok. A méréseket megelőzően a híd szerkezetére 10 darab Ublox ZED-F9P két frekvenciás multikonstellációs (GPS, GLONASS, Galileo és BeiDou) RTK GNSS vevő került elhelyezésre. A vevők párosával, 5 szelvényben kerültek a híd két oldalára, míg a szelvények a híd középpontjától indulva, ellentétes irányban helyezkednek el, egymástól 80 méteres távolságban (2. ábra).



2. ábra: GNSS-vevők a hídon

A rendszert kiegészíti egy, a szárhegyi hídfőn elhelyezett bázisállomás. A bázisállomás LAN hálózaton kommunikál minden egyes Ublox vevővel. Erre a megoldásra azért volt szükség, mert a legközelebbi bázisállomás is távol helyezkedik az ideális RTK megoldásokhoz. További előnye a fent említett saját bázisos rendszernek a hálózati RTK megoldásokkal szemben, hogy az internet kiesése esetén is szolgáltat fix pozíciót, mivel az internet csupán az adatok továbbításában játszik szerepet.

A GNSS vevők szelvényenként párosával egy vízálló villamossági dobozba kerültek, mely egyaránt tartalmazta a rendszer működéséhez szükséges egyéb kiegészítőket (3. ábra). Ezekből az egyik egy mobilhálózatra képes routert is tartalmaz, mely lehetővé teszi az adatok valós idejű továbbítását. A rendszer kialakításánál további szempont volt a redundancia, így minden eszköz mellett található egy akkumulátor, mely áramkimaradás esetén is biztosítja a rendszer zavartalan működését.



3. ábra: Egy szelvényben kihelyezett GNSS vevők

A Ublox vevők 1Hz frekvencián szolgáltatnak koordinátákat WGS84 vonatkozási rendszerben, közel 3 hónapon keresztül. A beérkező pozíciók száma meghaladja a hatvanmilliót. Ezek feldolgozását a következő fejezetben mutatom be.

3. Adatok feldolgozása

Az előző fejezetben részletezett, GNSS mérőrendszer segítségével rögzített adatokat Python programozási nyelven dolgoztam fel. A feldolgozása során egyedül a magassági adatokat vettem figyelembe, a vízszintes pozíciókat nem használtam fel. Célkitűzésem, hogy a hídra ható két környezeti tényező – a hőmérséklet, valamint a szél hatását – kimutassam a GNSS RTK technológiával való mérések alapján. A GNSS méréseket rendre összevetettem a Hidak és Szerkezetek Tanszék által kihelyezett testhőmérő, valamint szélesebbesgmérő által rögzített adatokkal.

A bemutatott módszerek mindegyikére igaz, hogy csakis egyenletesen mintavételezett adatokkal lehetséges. Az esetlegesen hiányzó adatokat lineáris interpolációval pótoltam. Ez igaz mind a GNSS, mind a környezeti adatok feldolgozására. Ez a módszer megfelelőnek bizonyul, ha csak rövid idejű adathiány keletkezik az adatsorban.

A feldolgozás során elsődlegesen NumPy modult használtam, ezt kiegészítve a SciPy, illetve PyWavelets modulokkal.

3.1. A híd alakváltozása a hőmérséklet függvényében

Mint ismeretes, a hőmérséklet igen nagy hatással lehet az elkészült szerkezetekre. Ennek figyelembevétele elkerülhetetlen mind az épülő, mind a már elkészült szerkezetek esetében. A hőmérséklet hatása és azzal a hőtágulás mértéke, a szerkezet mértékével arányosan nő. Az olyan méretű szerkezetek esetén, mint a Nemzeti Összetartozás Hídja pedig elkerülhetetlen – ahol a napi hőingadozásból származó alakváltozások akár a több 10 cm-t is elérhetik – hogy a próbaterhelés során figyelembe lehessen venni.

Ennek kimutatása történhet a tervezés során előállított numerikus modellek alapján, azonban ennek alátámasztására direkt mérést szokás alkalmazni. Ez történhet lineáris regresszió alkalmazásával, amikor is egyenest illesztünk az adott időpontra mért hőmérséklet és magasság párok alkotta ponthalmazra. A kapott egyenes meredeksége megmutatja, hogy 1°C hatására mekkora alakváltozást szenved a híd az adott pontban. Az egyenest a legkisebb négyzetek módszerével illesztettem, ahol a következő közvetítőegyenlet m illetve b paramétereit kerestem, amik rendre az egyenes meredeksége és tengelymetszete:

$$y_i = mx_i + b \quad (3)$$

A kapott eredményeket a 4. részben mutatom be.

3.2. A híd sajátfrekvenciáinak kimutatása

Mint a legtöbb nagyméretű szerkezet esetében, így a Nemzeti Összetartozás Hídjánál is kulcsfontosságú a szerkezet sajátfrekvenciáinak kimutatása. A különböző hatásoknak kitett és különböző módon gerjesztett szerkezet más és más frekvenciájú rezgőmozgást végezhet. Ezen mozgások kimutatására dolgozatomban a GNSS technológiát alkalmaztam. Ezt a rezgőmozgást nagy (több centiméter) amplitúdója, valamint viszonylag alacsony frekvenciája teszi lehetővé. A GNSS technológia, illetve az alkalmazott 1 Hz mintavételi frekvencia erősen korlátozza a szerkezet kimutatható sajátfrekvenciáit. A Nyugist-Shannon mintavételi törvény értelmében a legnagyobb kimutatható frekvencia a mintavételi frekvencia fele [8]. Ez a mi esetünkben 0,5 Hz. Ennél magasabb frekvenciák kimutatásához a mintavételi frekvenciát emelni kell.

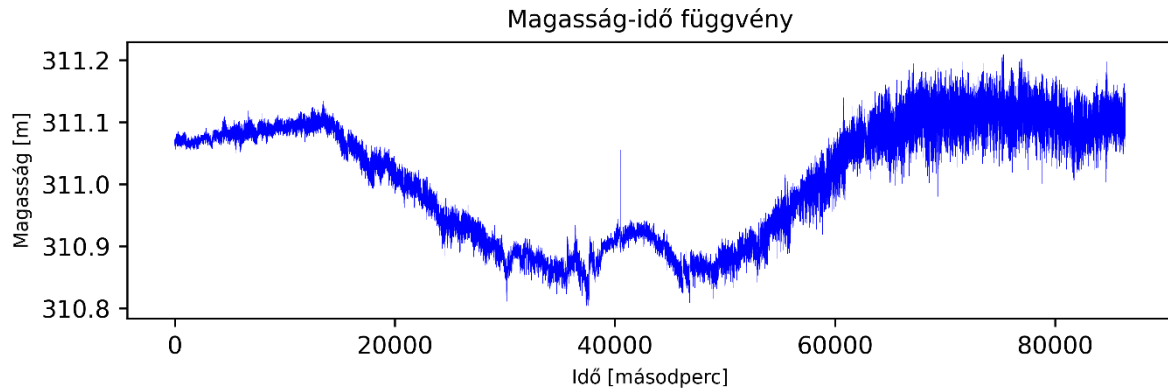
Hagyományosan egy adatsorban jelentkező frekvenciák kimutatására a Fourier-transzformációt szokás alkalmazni azonban az elmúlt évszázadban több a Fourier-transzformáció elvén alapuló módszer alakult ki. Ezek közül a Fourier-transzformációt, a rövid idejű Fourier-transzformációt (Short Time Fourier Transform, STFT), valamint a Wavelet transzformációt a következő szakaszokban mutatom be.

3.2.1. Fourier-transzformáció

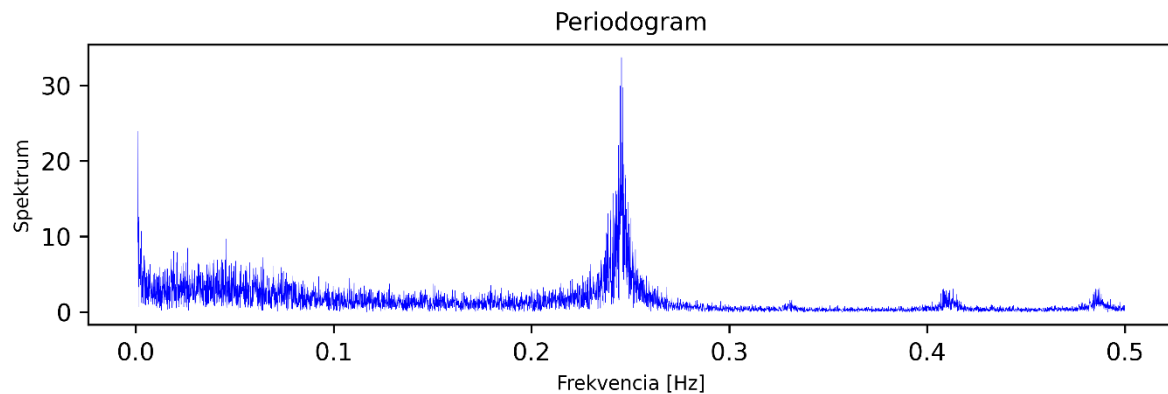
A Fourier-transzformáció lehetőséget ad arra, hogy elvégezhessük egy adatsor spektrumanalízisét. A Fourier-transzformáció hagyományosan, periodikusan ismétlődő jelek jellemzésére, spektrumanalízisére szolgáló matematikai eszköz. Emellett hatékonynak bizonyul kép- és jelfeldolgozásban, optikában, akusztikában [9,10]. Egy integrálható $g(t)$ függvény Fourier-transzformáltja egy komplex függvény, amely a 4. egyenlet szerint írható fel. A kapott komplex függvény $(-\infty, \infty)$ tartományon értelmezett szimmetrikus függvény, melynek jellemzően a pozitív felét használjuk a spektrumanalízis során.

$$G(f) = \int_{-\infty}^{\infty} g(t)e^{-2\pi ift} dt \quad (4)$$

Az eredményül kapott komplex függvény abszolút értékeként vizsgálhatjuk a jel spektrumát. Egy adatsor (4. ábra) Fourier-transzformáció használatával az időtartományból a frekvenciatartományba történő transzformáltja a 5. ábrán látható. Az ábrán a Fourier-transzformált pozitív fele látható 0,5 Hz frekvenciáig (Nyquist-Shannon határfrekvencia) [8]. A transzformáció után egyértelműen látható ~0,24 Hz frekvencia, ezen felül megfigyelhetünk kisebb energiájú ~0,42 Hz és ~0,48 Hz frekvenciákat is.



4. ábra: 6-os GNSS által mért magasság (2024.04.21)



5. ábra: 6-os GNSS által mért idősor Fourier-transzformáltja (2024.04.21. 17:00-20:00)

A Fourier-transzformáció hátránya, hogy frekvenciatartományba való áttérés során elvesztjük az adatsor időfüggését, így az időben változó frekvenciájú hullámok idő-dependenciája nem kimutatható. Ezt kiküszöbölendő, a következőkben két módszert mutatok be, mellyel egy adatsorban mutatkozó egy vagy több jellemző frekvenciát az idő függvényében mutathatunk ki.

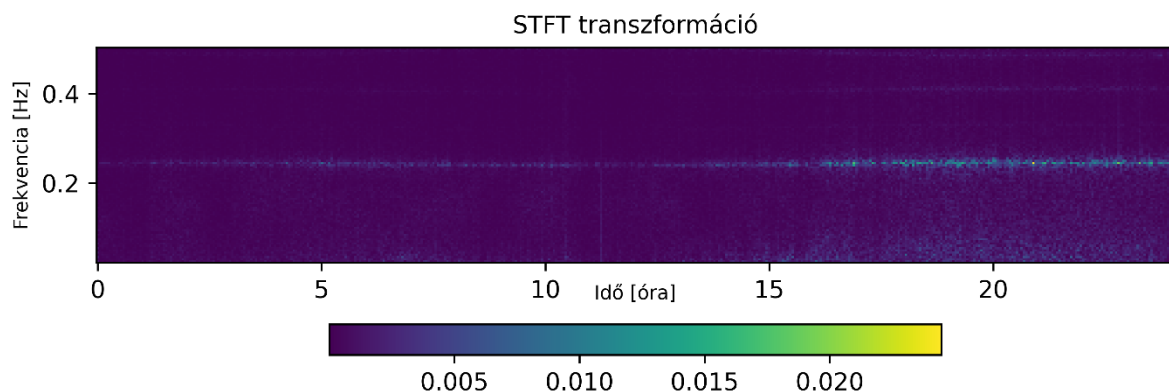
3.2.2. Rövid távú Fourier-transzformáció (Short Time Fourier Transform, STFT)

Amíg a hagyományos Fourier transzformáció egy jel frekvenciakomponenseit írja le az időtől függetlenül, addig a rövid idejű Fourier-transzformáció lehetővé teszi a jelek időben változó frekvenciakomponensekkel történő jellemzését [11]. Ez a fajta módszer egy hosszabb jel rövid időtartamú szegmensének Fourier transzformációját számolja ki, oly módon, hogy egy teljes idősort megszoroznak egy rövid időtartamú $w(t)$ ablakfüggvénnyel melyet az időben eltolva kaphatjuk meg az egyes időszakokhoz tartozó Fourier-transzformáltakat (5. egyenlet).

$$STFT(\tau, f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)w(t - \tau)e^{-2\pi i t f} dt \quad (5)$$

A transzformáció előnye, hogy időbeli frekvenciákat is ki tudunk mutatni, azonban az ablakok hosszát gondosan kell megválasztani. Ha nagyon nagy ablakot választunk a spektrális felbontás nő, a temporális felbontás csökkent. Az időablak hosszát a végtelenig növelve eredményként hagyományos Fourier-transzformációt kapunk. Az időablak rövidítésével a transzformáció spektrális felbontása csökken, a temporális felbontás megnő. Ezt a határozatlansági reláció okozza, mely kimondja, hogy léteznek olyan mennyiségek melyek egy időben nem határozhatók meg korlátlan pontossággal [12].

A 6. ábrán a 3.2.1 szakaszban is bemutatott adatsor STFT transzformáltja látható. Az adatsor egy teljes napon keresztül mutatja a mért pontban a híd jellemző frekvenciáinak alakulását. A hagyományos Fourier-transzformációval ellentétben itt látható, hogy a 3.2.1 szakaszban leírt frekvenciák közel sem állandó jellegűek, azok energiája időben változik.



6. ábra: 6-os GNSS által mért idősor STFT transzformáltja (2024.04.21.)

Bár ez a fajta transzformáció hasznos lehet a vizsgálatainkhoz, de mi a számunkra előnyösebb wavelet transzformációt vesszük alapul, melyet a következő szakaszba mutatok be.

3.2.3. Wavelet transzformáció

A wavelet transzformáció – hasonlóan az eddigiekhez – hatékony eszköz idősorok változó spektrumanalízisére, továbbá számos gyakorlati alkalmazása terjedt el az évtizedek alatt. Ezek között szerepel az adattömörítés, szűrés, képfeldolgozás, beszédfelismerés [13].

A wavelet transzformáció előnye, hogy a Fourier transzformációval ellentétben – akárcsak az STFT esetén – a jelek frekvencia- és időtartománybeli analízise egyszerre hajtható végre. A wavelet transzformáció alapelve, hogy az idősor és egy véges időtartamú hullám (ún. wavelet,

hullámocska) konvolúciójaként számítja az adott wavelet frekvenciájához tartozó hullám energiáját. Az adott wavelet frekvenciája az a skálaparaméter, időbeli eltolás b eltolás paraméterrel változtatható, ezzel lefedve a teljes vizsgálandó spektrális illetve temporális intervallumot:

$$W(a, b) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \psi_{a,b}(t) dt \quad (6)$$

Ahol

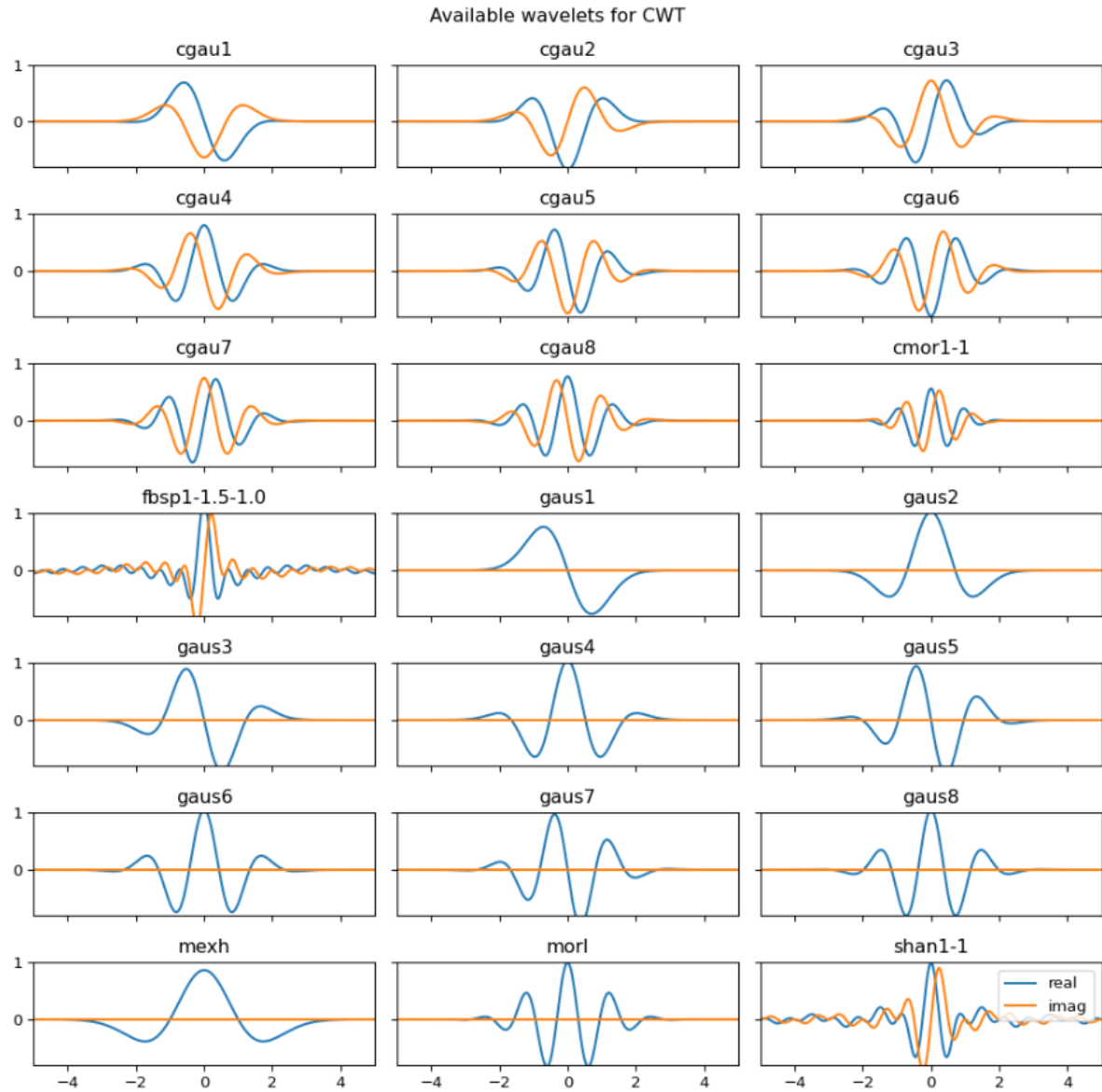
a a skálaparaméter

b eltolás paraméter

$\psi_{a,b}(t)$ wavelet az anya-waveletből számítható:

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (7)$$

Az anya-waveletnek számtalan valós és komplex függvény használható adott alkalmazásnak megfelelően, de további waveletek is előállíthatók az igényeknek megfelelően. Az általam használt Python modulban, a PyWavelets-ben [14], a 7. ábrán látható waveletek érhetők el a folytonos wavelet transzformációhoz.



7. ábra: A PyWavelets modulban elérhető komplex waveletek folytonos wavelet transzformációhoz[14]

Kutatásom során a komplex Morlet waveletet használtam. Ez az egyik legelterjedtebb wavelet általános idősoranalízishez. A komplex Morlet wavelet az alábbi képlettel írható le:

$$\psi(t) = \frac{1}{\sqrt{\pi B}} e^{-\frac{t^2}{B}} e^{-2\pi i C t} \quad (8)$$

Ahol

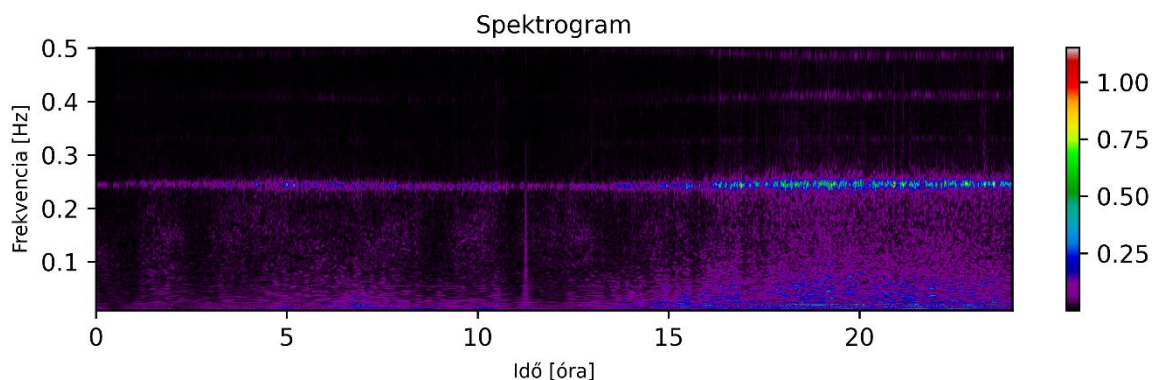
B a sávszélesség

C a központ frekvencia.

Látható, hogy a komplex Morlet wavelet az Euler-képlet és egy módosított Gauss-függvény szorzata, amivel időben ablakoljuk a végtelenségig ismétlődő Euler-formula szinuszos és

koszinuszos tagjait. C paraméter változtatásával a keresendő frekvenciákat tudjuk meghatározni, míg B paraméterrel a wavelet hosszát, és ezáltal a spektrális és temporális felbontást változtathatjuk (3.2.2 szakasz) [12]. Ezek alapértelmezett értéke 1-1 körül adódik, de a gyakorlati felhasználás függvényében változtathatóak. Az értékek kiválasztása a legtöbb esetben tapasztalati úton történik. Megjegyzendő, hogy bizonyos modulok más formulát használnak. A frekvencia helyett alkalmazható körfrekvencia, valamint a sávszélesség helyett, szórás, illetve ciklusszám [15].

Komplex wavelet alkalmazása esetén a spektrumanalízis az eredményül kapott együtthatók abszolútértékén végezhető el. A komplex együtthatók ϕ szöge pedig a hullámok fázisát jellemzi. A 3.2.1 szakaszban bemutatott adatsor wavelet transzformáltja látható a 8. ábrán. Itt az STFT transzformációhoz hasonlóan láthatók a kialakult, de időben változó jellemző frekvenciák. Összehasonlítva az STFT transzformációval észrevehető, hogy egy részeleiben gazdagabb eredményt kaptunk, melyen kis energiájú hullámok is könnyen felismerhetők.



8. ábra: 6-os GNSS által mért idősor wavelet transzformáltja (2024.04.21.)

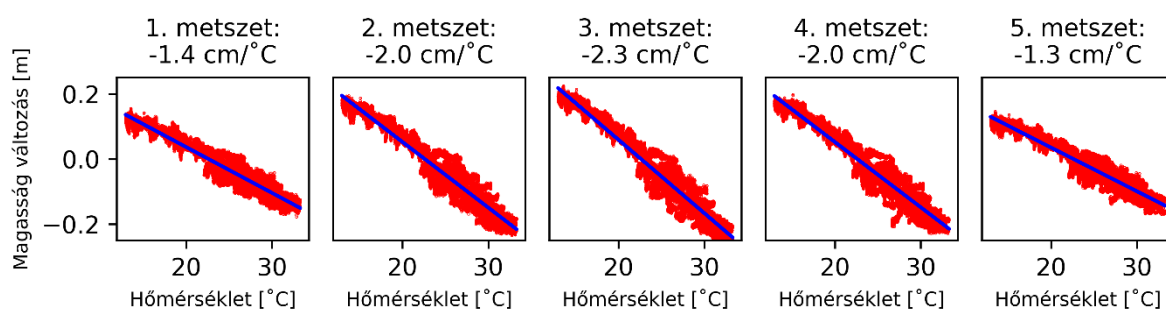
4. Eredmények

Az előző részben részletezett módszerek segítségével a 10 GNSS vevő által rögzített körülbelül három hónapnyi adatsort dolgoztam fel. Első lépésben a hőmérsékletváltozás hídalakra gyakorolt hatását (4.1 fejezet), majd a szél által gerjesztett hídszerkezet sajátfrekvenciáinak hatását mutatom be (4.2 fejezet).

4.1. A hőmérséklet hatása a szerkezetre

A hőtágulás hatásának vizsgálatát egyetlen nap mérési adatai alapján végeztem el. Ez a nap a 2024.05.19., melynek kiválasztása során szerepet játszott, hogy minden GNSS vevő esetén teljes napi adatsor rendelkezésre álljon, valamint a teljes napi hőingadozás minél nagyobb érték legyen. Ez a mi esetünkben $\sim 20^\circ\text{C}$. A vizsgálatot öt GNSS vevőre végeztem el a híd 5 szelvényében, feltételezve, hogy az egy szelvényben elhelyezett GNSS vevők hasonló viselkedést mutatnak. A 3.1 fejezetben részletezett legkisebb négyzetes illesztést követően a 9. ábrán látható eredményt kaptam a híd öt szelvényében.

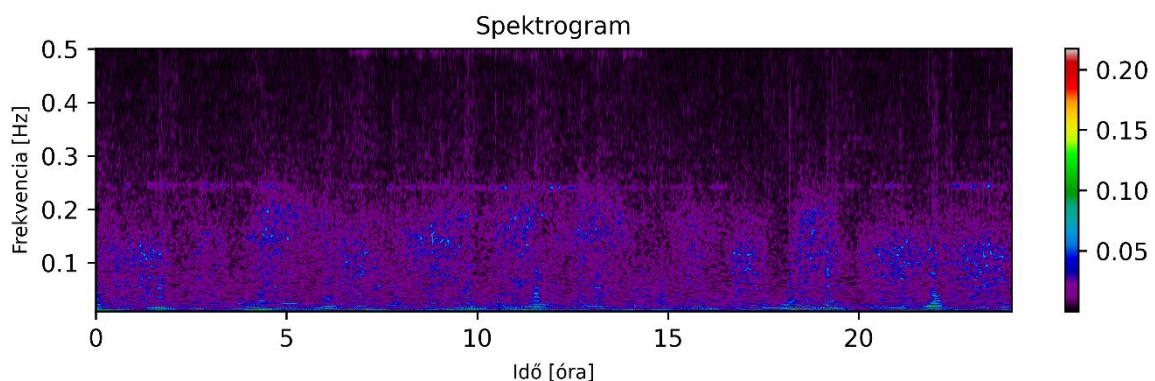
Mint előzetesen is vártuk, látható, hogy a hőtágulás hatása szimmetrikus a híd szerkezetére és ezt a híd középpontjában fejt ki a legnagyobb mértékben. Itt az alakváltozás eléri a fokenkénti $-2,3\text{cm}$ mértéket, ami a napi $\sim 20^\circ\text{C}$ hőmérséklet ingadozást figyelembe véve megközelítőleg 46 cm vertikális elmozdulást jelent. Továbbá a középponttól mért 80 m -es távolságban a hőtágulás mértéke $-2,0\text{cm}/^\circ\text{C}$, 160 m -es távolságban $-1,4\text{cm}/^\circ\text{C}$.



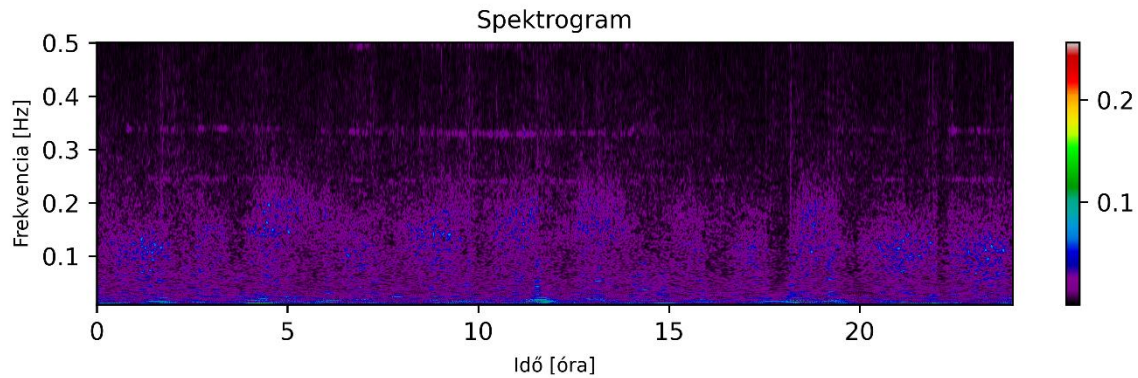
9. ábra: A hőtágulás hatása a hídszerkezetre öt metszetben

4.2. A szél hatása a szerkezetre

A szél hatásának kimutatására a teljes vizsgált időszakban mind a 10 GNSS vevőre alkalmaztam a 3.2.3 szakaszban részletezett wavelet transzformációt. A kapott eredmények mennyisége miatt egy szélcsendes és egy szeles időszak példáján keresztül mutatom be a szél hatását a szerkezetre. A sajátfrekvenciák kimutatásakor feltételeztem, hogy az egyes metszetekben elhelyezett GNSS-vevők által mért adatsorban, azonos frekvenciák mutathatók ki, így csakis az egyik oldalon elhelyezett (páratlan sorszámú) GNSS-vevők által mért adatok elemzését mutatom be. A szélcsendes időszaknak 2024. április 5. napot választottam. Ezen a napon a szél átlagos sebessége 2-3 m/s érték körül alakult. A 10. ábrán a híd középpontjában mért adatsor spektrogramját láthatjuk. Halvány sávként a 0,24 Hz frekvencia egészen jól kivehető, azonban erősen elnyomja a mérési zaj. Egyéb frekvenciák nem figyelhetők meg. A 11. ábrán a negyedelőpontban mért adatsor spektrogramja látható. Ez esetben az időnként megjelenő ~0,24 Hz frekvencia mellett a ~0,34 Hz-es frekvencia is kivehető. Hasonló mértékű zaj figyelhető meg a ~0,22 Hz-es frekvencia alatt.

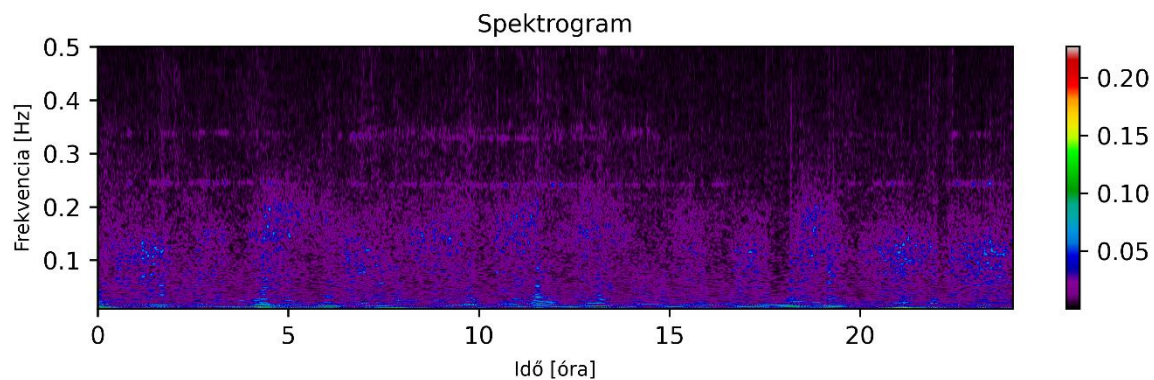


10. ábra: 5-ös GNSS vevő (híd felezőpont) által mért adatsor spektrogramja (2024.04.05.)



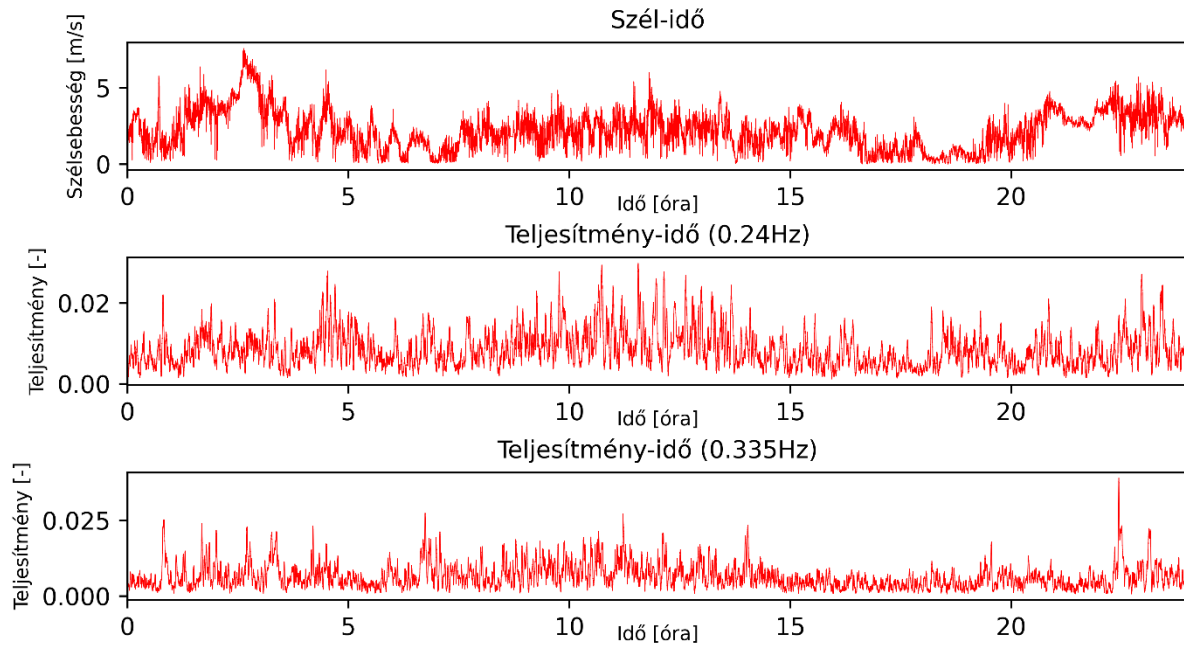
11. ábra: 1-es GNSS vevő (híd negyedelőpont) által mért adatsor spektrogramja (2024.04.05.)

Az előbbieken tapasztalt $\sim 0,34$ Hz-es frekvencia hiánya a híd középpontjába, felveti annak lehetőségét, hogy ezen a frekvencián a megjelenő hullám a híd középpontjára páratlan. Ennek alátámasztására megvizsgáltam a 3-as GNSS-vevő által mért adatsor spektrogramját, mely a 12. ábrán látható. Itt szintén megfigyelhető a már említett $\sim 0,34$ Hz-es hullám, azonban ez még nem bizonyítja a hullám páratlan jellegét. Ennek bizonyítására további elemzés szükséges, melyet a későbbiekben mutatok be.



12. ábra: 3-as GNSS vevő által mért adatsor spektrogramja (2024.04.05.)

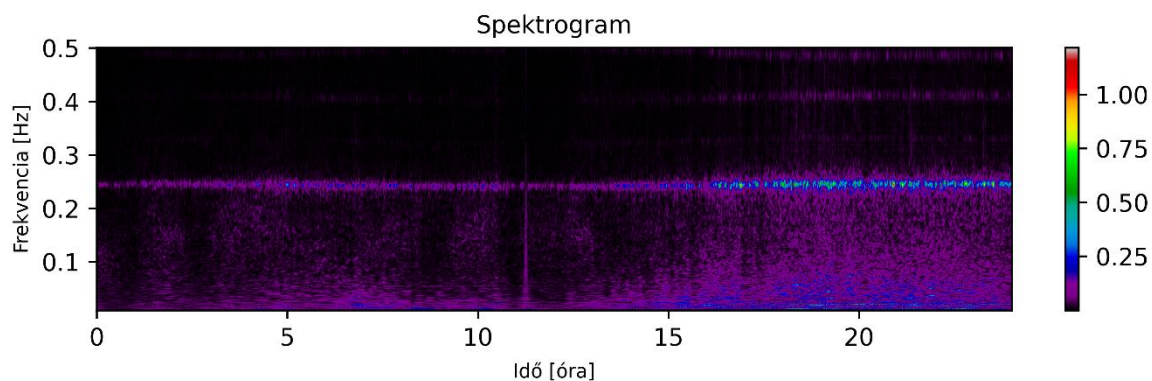
Habár ezen elemzés során egy szélcsendes időszakot választottam, már kis szél esetén is látható a híd mozgásának időfüggése. A 13. ábra felső részén a szél-idő függvény látható, alatta az 1-es GNSS vevő adatsorán a már kimutatott rendre $0,24$ Hz, illetve $0,34$ Hz-hez tartozó teljesítmény-idő függvény a wavelet transzformáció együtthatóiból. Már ilyen kis szél esetén is egyértelműen látható a korreláció a szél és az egyes frekvenciák teljesítménye között, különösen a $0,24$ Hz-es frekvencia esetén.



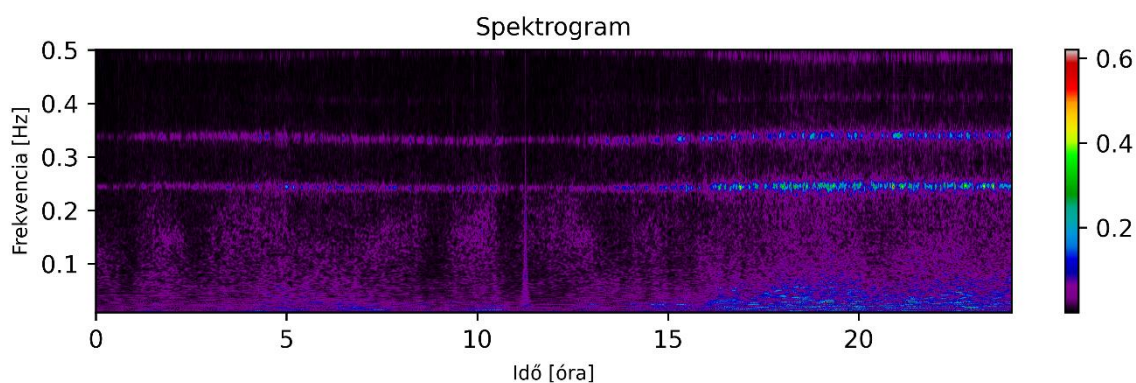
13. ábra: 1-es GNSS vevő (híd negyede) által mért adatsor teljesítmény-idő grafikonja a szélsebesség függvényében (2024.04.05.)

Az előzőekben ismertetett módon elvégeztem az egyes GNSS-vevők által mért adatsorok analizését egy szeles napon is. A választott nap 2024. április 21. Ezen a napon a nappali szél sebessége átlagosan 6-8 m/s között alakult, azonban az esti órákban elérhette akár a 15 m/s-os sebességet.

A szélcsendendes időszakhoz hasonlóan itt is megfigyelhető a $\sim 0,24$ Hz-es frekvencia, csakhogy sokkal markánsabban. Időben változó jellege is egyértelműen kimutatható, melyet a szél erősségének változása okoz. A 0,34 Hz-es frekvencia erős szél esetén ugyan kimutatható a híd középpontjában, azonban annak energiája éppen csak érzékelhető (14. ábra). Az ábrát tovább elemezve további frekvenciák ($\sim 0,42$ Hz és $\sim 0,48$ Hz) figyelhetők meg az esti órákban. Ezen frekvenciák a híd középpontján (14. ábra) és negyedelő pontján is jelen vannak erős szél esetén (15. ábra).

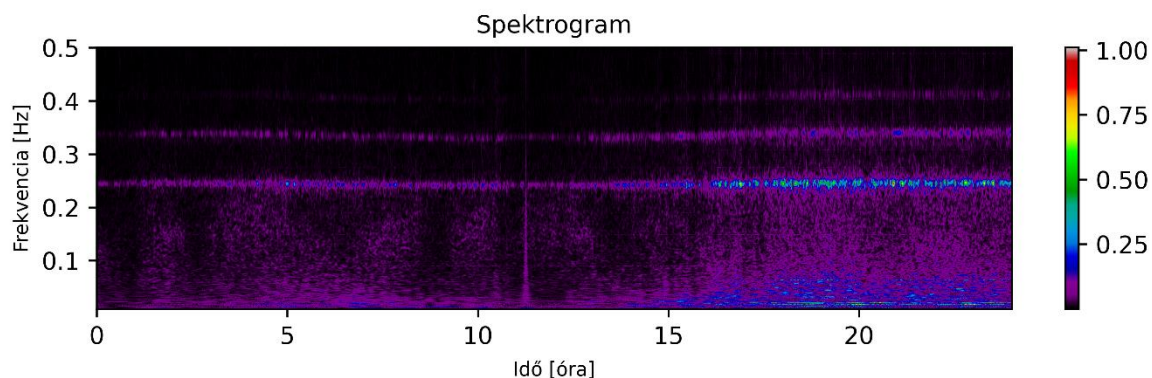


14. ábra: 5-ös GNSS vevő (híd felezőpont) által mért adatsor spektrogramja (2024.04.21.)



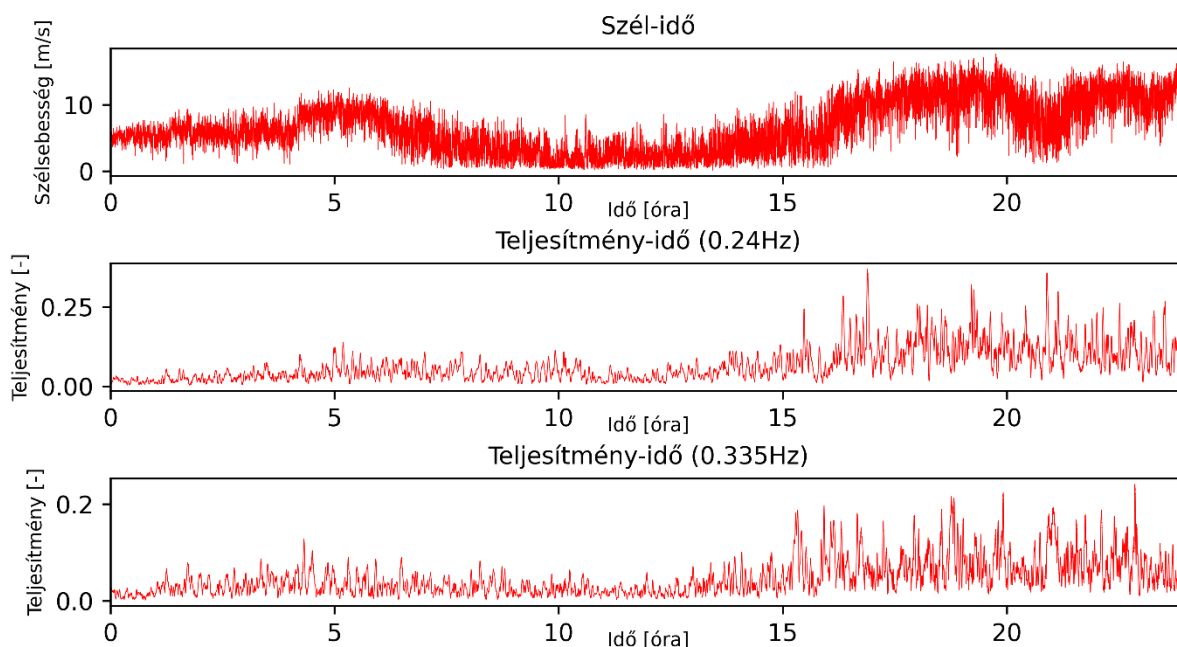
15. ábra: 1-es GNSS vevő (híd negyedelőpont) által mért adatsor spektrogramja (2024.04.21.)

Az előbbieken már felvetett páratlan hullámalak alátámasztására megvizsgáltam a 3-as GNSS-vevő által mért adatsor spektrogramját (16. ábra). Az elvártaknak megfelelően, jelentősen alacsonyabb energiával azonban itt is megjelenik a 0,34 Hz-es frekvencia. Bár ez nem perdöntő, alátámasztja addigi feltételezésemet a páratlan hullámalakról.



16. ábra: 3-as GNSS vevő által mért adatsor spektrogramja (2024.04.21.)

A szélcsendes időszakhoz hasonlóan ebben az esetben is vizsgáltam a szél és a sajátfrekvenciák energiája közötti összefüggést. A 17. ábra felső részén látható szélesség az idő függvényében, majd rendre a wavelet transzformációból származó 0,24 Hz és 0,34 Hz frekvenciájú hullámok teljesítménye az idő függvényében. Már szélcsendes időszakban is látható volt a 0,24 Hz-es frekvencián, azonban nagy szél esetében egyértelmű korreláció észlelhető a szélessége és az egyes frekvenciájú hullámok teljesítménye között.



17. ábra: 1-es GNSS vevő (híd negyede) által mért adatsor teljesítmény-idő grafikonja a szélesség függvényében (2024.04.21.)

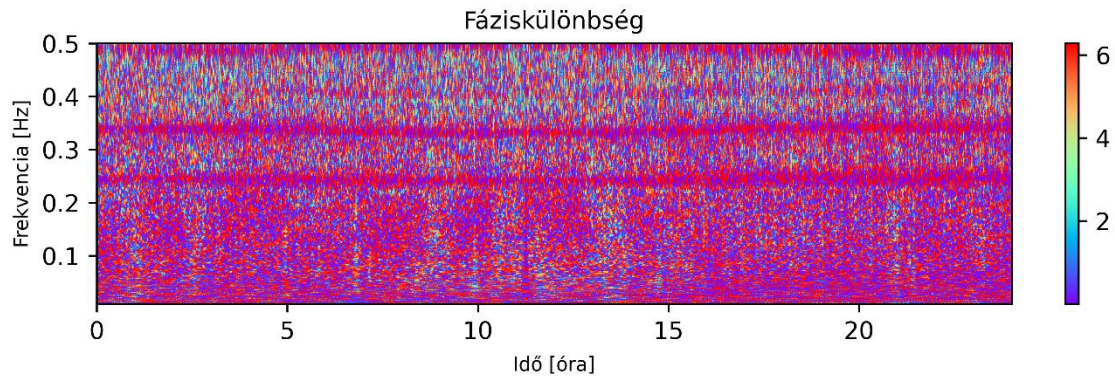
A 3.2.3 szakaszban tárgyalt wavelet transzformáció nem csak a szerkezet mozgását jellemző hullámok frekvenciájáról, hanem azok fázisáról is szolgáltat információt. Ezt az információt a komplex wavelet-együtthatók szöge mutatja, mely a fázis időbeli változását szemlélteti az egyes vizsgált frekvenciákon. Ezeket az egyes GNSS-vevőkön mért adatsorokból kimutatható fázisokat, egymással összehasonlítva szabályos összefüggéseket kaphatunk az egyes GNSS-vevők fázisai között.

Első lépésben megvizsgáltam a két negyedelőpontban elhelyezett 1-es és 9-es GNSS-vevő fáziskülönbségét. A 18. ábrán jól megfigyelhető mind a négy kimutatott frekvencia és azok időbeli változása. Az is megfigyelhető, hogy míg 0,24 Hz, 0,42 Hz és 0,48 Hz frekvenciájú hullámok fáziskülönbsége 0, illetve 6,28 érték körül alakul, addig a 0,34 Hz-es hullám fáziskülönbsége az 1-es és 9-es GNSS-vevő között 3,14 körül van. Ez alátámasztja az eddigi sejtésünket, azaz az 1-es és 9-es vevők 0,24 Hz, 0,42 Hz és 0,48 Hz frekvencián azonos fázisban mozognak, tehát hullámalakjuk páros, viszont a 0,34 Hz-es frekvencián a GNSS-vevők ellentétes fázisban vannak, tehát hullámalakja páratlan. Ez magyarázatul szolgál arra, hogy a híd középpontjában miért nem lehet kimutatni a 0,34 Hz-es frekvenciát.



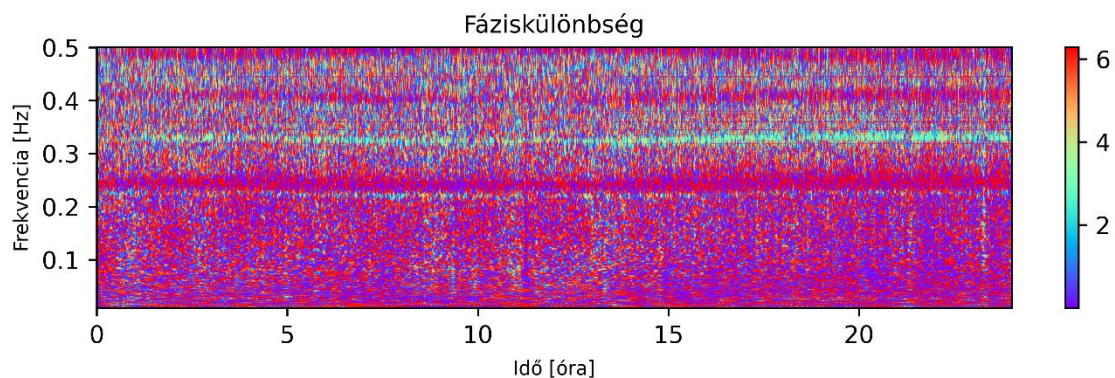
18. ábra: Az 1-es és 9-es GNSS-vevők fáziskülönbsége (2024.04.21.)

A fáziskülönbségek alapján ugyancsak alátámasztható a vizsgálatok előtt felállított feltételezésem, mely szerint elegendő csupán a páratlan sorszámú GNSS-vevőket vizsgálni, mivelhogy az azonos szelvényben elhelyezett vevők azonos mozgást végeznek. A 19. ábrán az 1-es és 2-es GNSS-vevő fáziskülönbsége látható, ahol egyértelműen kivehető, hogy az eddig kimutatott 4 frekvencia mindegyikén a két vevő közötti fáziskülönbség 0 és 6,28 érték körül alakul, tehát azonos fázisban vannak.



19. ábra: Az 1-es és 2-es GNSS-vevők fáziskülönbsége (2024.04.21.)

Ugyanezt a vizsgálatot elvégezve az 5-ös és 6-os (felezőpont) vevőre különös eredményt kapunk (20. ábra). A 0,34Hz frekvencián – a többi frekvenciával ellentétben – a számított fáziskülönbsége 3,14 körüli érték, azaz ellentétes fázisban vannak. Ez a jelenség csakis a híd közepén tapasztalható a több szelvényben nem fordul elő. Tehát az eredmények alapján kijelenthető, hogy a híd középpontján csavaró hatás érvényesül a 0,34 Hz-es frekvencián, mely frekvencia alig mutatható ki a spektrogram alapján (14. ábra).



20. ábra: Az 5-ös és 6-os GNSS-vevők fáziskülönbsége (2024.04.21.)

5. Összefoglalás

Munkám során körbejártam a GNSS alapú technológiákat és ismertettem azok különböző környezetben való alkalmazhatóságát. Bemutattam, hogy a jelenleg elérhető szakirodalom alapján a GNSS RTK technológia alkalmas lehet szerkezetek mozgásának vizsgálatára, ha azok várható mozgása meghaladja a GNSS RTK technológia mérési bizonytalanságát. Továbbá bemutatásra került az Általános- és Felsőgeodézia Tanszék által elhelyezett GNSS mérőrendszer a Nemzeti Összetartozás Hídján, mely megközelítőleg három hónapon keresztül működött és 10 költséghatékony GNSS vevő segítségével gyűjtött adatokat a híd mozgásáról.

Célkitűzéseim között szerepelt egyrészt a hőmérséklet, másrészt a szél szerkezeten okozott hatásának kimutatása. Első esetben a legkisebb négyzetes illesztés segítségével meghatároztam az 1°C hőmérsékletváltozás hídszerkezetre gyakorolt hatását. Ez a híd középpontján eléri $2,3\text{cm}/^{\circ}\text{C}$ értéket.

A szél hatásának felfedésére a vonatkozó szakirodalom alapján három lehetséges módszert vizsgáltam meg a híd sajátfrekvenciáinak kimutatására. Ezek a módszerek a Fourier-transzformáció, rövid idejű Fourier-transzformáció (STFT), valamint a wavelet transzformáció. A hagyományos Fourier-transzformáció hátránya, hogy egy spektrum időbeli változásának kimutatása nem lehetséges, míg az STFT és wavelet transzformáció alkalmas eszköz időben változó periodicitás kimutatására. A tapasztalatok alapján végül a wavelet transzformáció mellett döntöttem, mert a módszer paraméterezési lehetőségei egy részletesebb, nagyobb felbontású eredményt biztosítanak a spektrumanalízis során.

A wavelet transzformáció segítségével meg tudtam állapítani a híd saját frekvenciáit ($0,24\text{Hz}$, $0,34\text{Hz}$, $0,42\text{ Hz}$ és $0,48\text{ Hz}$) az idő függvényében, illetve az egyes frekvenciákhoz tartozó hullámok fázisát vizsgálva ki tudtam mutatni azok paritását. Egy szeles és egy szélsendes napon keresztül mutatom be a szél hídra gyakorolt hatását a szél-idő és teljesítmény-idő függvények segítségével. További vizsgálatok útján kimutattam, hogy a szél-idő, hogyan viszonyul a teljesítmény-idő függvényéhez

6. Köszönetnyilvánítás

Szeretném megköszönni konzulensemnek, Turák Bencének, hogy szakmai tudásával és hozzáértésével támogatott, továbbá mellettem állt elejétől a végéig, ezzel is elősegítve dolgozatom létrejöttét. Ezen felül szeretném megköszönni a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Általános- és Felsőgeodézia Tanszékének a szükséges műszeradatok biztosítását, valamint a Hidak és Szerkezetek Tanszéknek, hogy biztosították számomra a hőmérséklet és szél adatokat.

Irodalomjegyzék

- [1] Égető Cs., Siki Z., Turák B., Rózsa S.: Low-Cost GNSS sensor development for structural monitoring. Scientific bulletin series d: mining, mineral processing, non-ferrous metallurgy. Geol. Environ. Eng. 35(2), 37–48, 2021
- [2] Monserrat O., Crosetto M., Luzi, G.: A review of ground-based SAR interferometry for deformation measurement, ISPRS J. Photogramm. Remote Sens., 93 pp. 40-48, 2014
- [3] Wikipédia, Nemzeti Összetartozás hídjá , [online] Elérhető: https://hu.wikipedia.org/wiki/Nemzeti_%C3%B6sszetartoz%C3%A1s_h%C3%ADdja
- [4] Travelo, sátoraljaújhelyi függőhíd, [online] Elérhető: https://www.travelo.hu/kozel/20240513-fuggohid-satoraljaujhely-teriszony-kirandulas-tipp.html#google_vignette
- [5] Ádám J., Bányai L., Borza T., Busics Gy., Kenyeres A., Krauter A., Takács B.: Műholdas helymeghatározás, Műegyetemi Kiadó, 2004
- [6] Geng J., Guo J., Meng X., Gao K., Speeding up PPP ambiguity resolution using triple-frequency GPS/BeiDou/Galileo/QZSS data, Journal of Geodesy, 94, 6, 2020, <https://doi.org/10.1007/s00190-019-01330-1>
- [7] Busics Gy.: Műholdas helymeghatározás 5.: RTK és más kinematikus technológiák, 2011, https://dtk.tankonyvtar.hu/xmlui/bitstream/handle/123456789/7664/0027_MHM5.pdfsequence=1&isAllowed=y
- [8] Por, E., van Kooten M., Sarkovic, V.: Nyquist-Shannon sampling theorem, 2019, https://home.strw.leidenuniv.nl/~por/AOT2019/docs/AOT_2019_Ex13_NyquistTheorem.pdf
- [9] Elias M. Stein & rami Shakarchi: Fourier Analysis, 2007
- [10] Cochran, W. T., Cooley, J. W., Favin, D. L., Helms, H. D., Kaenel, R. A., Lang, W. W., ... Welch, P. D. (1967). *What is the fast Fourier transform?* *Proceedings of the IEEE*, 55(10), 1664–1674. doi:10.1109/proc.1967.5957
- [11] Lawrence R. Rabiner and Ronald W. Schafer: Introduction to Digital Speech Processing (1978, 2010)

- [12] Oppenheim, J. N., Magnasco, M. O., Human Time-Frequency Acuity Beats the Fourier Uncertainty Principle, 2013, Phys. Rev. Lett. 110
- [13] Sifuzzaman, M., Islam, M. R., Ali, M. Z., Application of Wavelet Transform and its Advantages Compared to Fourier Transform, 2009, Journal of Physical Sciences, Vol. 13,, 121-134
- [14] Continuous Wavelet Transform (CWT), PyWavelets Documentation, <https://pywavelets.readthedocs.io/en/latest/ref/cwt.html>
- [15] Gaviria, C. A., Montejo, L. A., M. EERI, Optimal Wavelet Parameters for System Identification of Civil Engineering Structures, 2018, Earthquake Spectra, Volume 34, No. 1, pages 197–216