



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

Hidak és Szerkezetek Tanszék

Kolozsi Péter

(TOCVAG)

TDK Dolgozat

-

A Tiszavirág-híd pályaszerkezetének gyalogosdinamikai vizsgálata



2012.10.29.



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

Hidak és Szerkezetek Tanszék

Hallgató:

Kolozsi Péter

Építőmérnöki Kar, Szerkezet és Geotechnika MSc

(TOCVAG)

Cím:

***A TISZAVIRÁG-HÍD PÁLYASZERKEZETÉNEK
GYALOGOS-DINAMIKAI VIZSGÁLATA***

Konzulens:

Dr. Vigh László Gergely

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Építőmérnöki Kar, Hidak és Szerkezetek Tanszék

Nyilatkozat

Jelen TDK dolgozatot Kolozsi Péter Szerkezet és Geotechnika MSc hallgató írta 2012 októberében a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Építőmérnöki Kar Hidak és Szerkezetek Tanszékén.

Kolozsi Péter

Budakeszi, 2012. október 29.

Köszönetnyilvánítás

Köszönetem nyilvánítom Dr. Vigh László Gergely konzulensemnek, a feladat során nyújtott tanácsokért és a munka koordinációjáért. További köszönet Pálóssy Miklós Úrnak, a Tiszavirág-híd vezetőtervezőjének, a híd modellezése során nyújtott készséges segítségéért.

Összefoglaló

TDK dolgozat címe: A Tiszavirág-híd pályaszerkezetének gyalogos-dinamikai vizsgálata

Hallgató neve: Kolozsi Péter (*Szerkezet és Geotechnika MSc, Építőmérnöki Kar*)

Konzulens: Dr. Vigh László Gergely

A Tiszavirág-híd 2010-ben elvégzett dinamikai próbaterhelésén a szerkezet dinamikus viselkedése mellett a gyalogos komfort érzet vizsgálata kiemelkedően fontos hangsúlyt kapott. A rugalmas pályaburkolatok befolyásolják a szerkezetre jutó dinamikus hatások mértékét, ezáltal közvetetten a gyalogosok által érzékelt szerkezeti válaszok nagyságát, valamint a komfort érzetet. A hídon fa-műanyag kompozit burkolatrendszert alkalmaztak, amely az acél pályatartóra rögzítve biztosítja a rugalmas teherátvitelt a pályaszerkezetre. A hegesztett gerendákból álló tartórács és a rugalmas kompozit pallók együttesen alkotják a híd inhomogén merevségű pályaburkolatát, amelyen az érzékelhető gyorsulások nagysága nagyban függ az érzékelő pont helyétől.

A TDK dolgozatom célja a pályaburkolat különböző pontjaiban érzékelhető gyorsulások számítása a dinamikai próbaterhelés alapján paraméterezett mozgó dinamikai teher hatására. A vizsgálat első lépésében a gyalogosdinamikai próbaterhelést szimulálom a híd globális modelljén. A próbaterhelési eredményekkel igazolt modell segítségével a főtartó jellegzetes pontjaiban meghatározom a függőleges és vízszintes gyorsulás és elmozdulás diagramokat. A pályaburkolat különböző pontjaiban érzékelhető gyorsulások számításához egy közbenső pályaszerkezeti panelt modellezek az Ansys APDL programmal. A panel négy sarokpontjára – a globális modellen meghatározott – függőleges és vízszintes elmozdulások, mint elmozdulás kényszerek működnek. A panelon modellezett fa-műanyag kompozit palló meghatározott pontjaiban kialakuló maximális gyorsulási értékeket ábrázolom, majd a pályaszerkezet rugalmas burkolatával összefüggésben értékelem a kapott eredményeket.

Abstract

Title of TDK paper: Dynamic analysis of the deck surfacing of Tiszavirág Footbridge
Student: Péter Kolozsi (*Structures and Geotechnics MSc, Dept. of Civil Engineering*)
Supervisor: Dr. László Gergely Vigh

Along with the investigation of structural responses, dynamic load test of the Tiszavirág Footbridge in 2010 was focusing on pedestrian comfort criteria limits and requirements. Elastic deck surfacing systems tend to govern the rate of dynamic impact on the structure, indirectly influencing the perception of structural responses and comfort feel of pedestrian. Tiszavirág Footbridge has a wood-polymer-composite (WPC) surface installed providing elastic interaction between pedestrian and the steel grillage deck. Coprising the welded plate girder grillage and the elastic WPC surfacing, the deck has inhomogeneous stiffness, on which the magnitude of perceptible accelerations depends on the point of perception.

This TDK paper focuses on accelerations arising at different spots of deck due to the moving dynamic load cases of the dynamic load test. First, several dynamic load cases are simulated on the global model of the bridge, hence the relevant acceleration and displacement diagrams may be determined by the verified global model. Secondly, an interior panel from the stiffening girder is modeled by Ansys. The vertical and lateral displacement diagrams – determined by the global model – are imposed on the four corner nodes of the panel as displacement constraints. As results of the transient analysis, peak acceleration values along the modelled WPC plank are graphed followed by the evaluation of the relevant consequences.

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés	1
1.1. A Tiszavirág-híd	1
1.2. Tervezési koncepció	3
1.3. Célkitűzés	5
1.4. Vizsgálati stratégia	5
2. Dinamikus próbaterhelés	6
3. Gyalogosdinamika	11
3.1. Szinkronizációs jelenségek	11
3.2. Alkalmazott gyalogosmodell	12
4. A burkolat	14
5. Globális vizsgálat	16
5.1. Geometria, anyag és megtámasztási modell	16
5.2. Tehermodell	17
5.3. Modálanalízis	19
5.4. Time-History analízis	20
6. Lokális vizsgálat	22
6.1. Geometriai modell	22
6.2. Anyagmodell	24
6.3. Megtámasztási viszonyok, peremfeltételek	25
6.4. Tranziens analízis	26
6.5. Lokális vizsgálat eredményeinek értékelése	27
7. Összefoglalás	31

Irodalomjegyzék	33
------------------------	-----------

Mellékletek

- A. Melléklet** – Gyorsulás diagramok (Midas eredmények)
- B. Melléklet** – Ansys lokális modell bemeneti fájl
- C. Melléklet** – Elmozdulás kényszer diagramok

1. Bevezetés

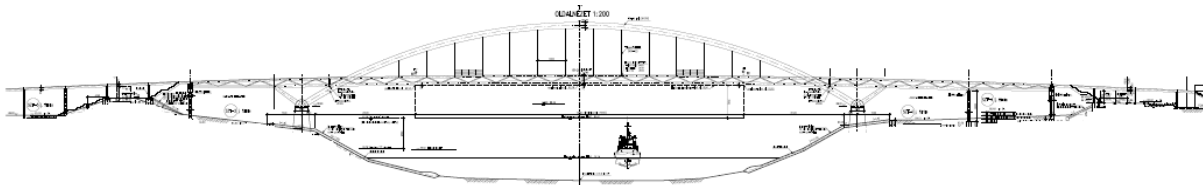
1.1. A Tiszavirág-híd

A Tiszavirág-híd teljes 450m-es hosszával Magyarország és egyben kelet-közép Európa egyik leghosszabb gyaloghídja. Építése 2009-ben indult, azonban a kedvezőtlen időjárási viszonyok és árvizek miatt az átadásra csak 2011. elején került sor. A modern gyalogoshidak stílusjegyeit magában hordozva izgalmas és a Tiszavirágot szimbolizáló megjelenésével hívja fel magára a figyelmet, miközben karcsú szerkezetével méltóságteljesen ível át a Tiszán (1.1. ábra). A magyar acélgyártás jelenlegi technológiai felkészültségéből következően az elsődleges teherviselő acélszerkezet kizárólag csőszelvényekből épül fel, amelyeknél említésre méltó az 1300mm átmérőjű ívtartó szelvények nagy vastagságú lemezekből való hajítása és szigorú mérettűrés melletti hegesztése [1].

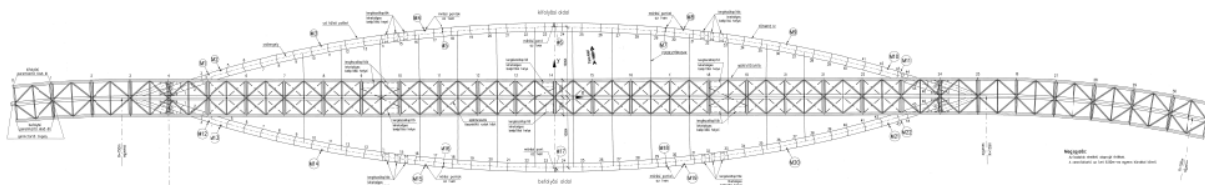


1.1. ábra - A felújított Tiszai hajósok tere és a Tiszavirág-híd [2]

A híd felszerkezetét tekintve három különálló részből áll. Az acélszerkezetű 186m hosszú mederhídra a jobb és bal parti árterek felett vasbeton rámpák – feljáróhidak – vezetnek, amelyek zavartalan közlekedést biztosítanak a kerékpárosok és gyalogosok számára (1.2-3. ábrák).



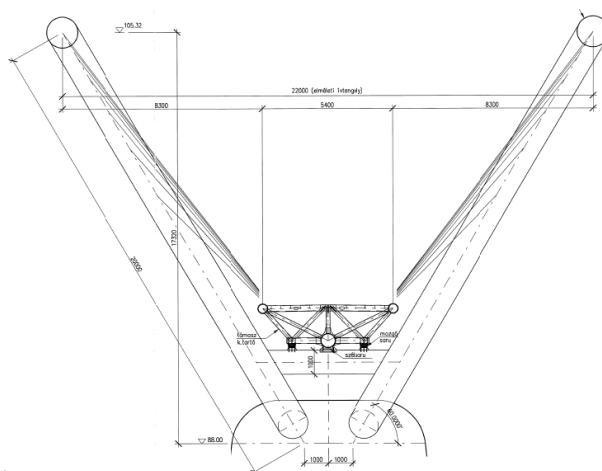
1.2. ábra – Mederhíd általános terv – Oldalnézet (forrás: Pont-Terv Zrt.)



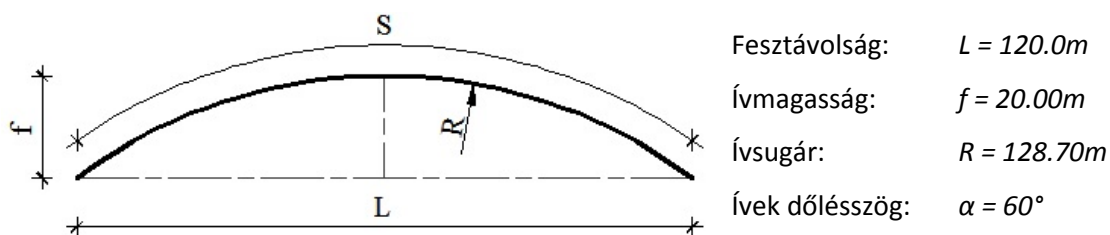
1.3. ábra – Mederhíd általános terv – Felülnézet (forrás: Pont-Terv Zrt.)

Mederhíd felszerkezetének típusa:	Acélszerkezetű ívekre függesztett háromövíű rácsostartó
Fesztávolságok:	24.00 + 120.00 + 24.00 + 18.00m
Acél felszerkezet teljes hossza:	186.00m
Pályaszélesség:	5.40m
A merevítőtartó teljes szélessége:	6.00m
Merevítőtartó magassága:	0.75-1.35m
Kábelelrendezés:	Párhuzamosan 6m osztásközzel
Anyagminőségek:	S235, S275, S355

A TDK dolgozat további vizsgálatai kizárólag az acélszerkezetű mederhídra vonatkoznak. A mederhíd fő szerkezeti eleme egy 120m fesztávú 60°-ban szétálló ívpár (1.4-5. ábrák), amelyekre a háromövíű rácsszerkezetű merevítőtartót a hossz tengelyre merőlegesen bekötött függesztő rudakkal függesztették fel.



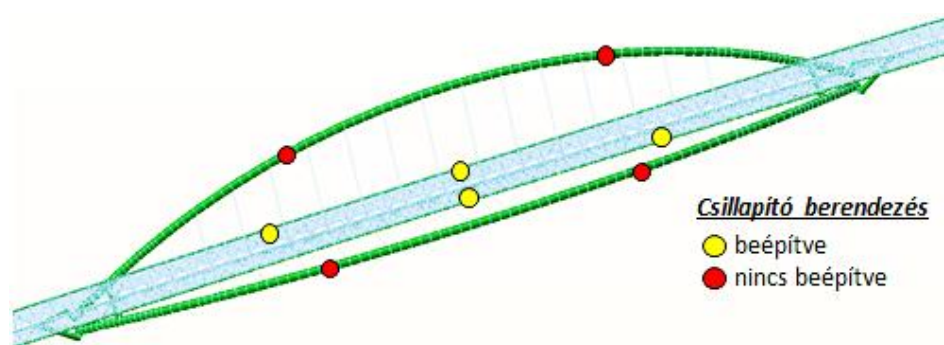
1.4. ábra – Általános terv – Ívpár és merevítőtartó keresztmetszet (forrás: Pont-Terv Zrt.)



1.5. ábra – Ívgeometria (forrás: Pont-Terv Zrt.)

A kialakításnak köszönhetően az 5m széles merevítőtartót az ívek önsúlyából származó lehajlások hatékonyan stabilizálják és teszik kevésbé érzékennyé a szél, földrengés és a gyalogosok általi gerjesztő hatásokkal szemben [1].

A jövőbeni forgalom hatására keletkező rezgések bizonytalansága miatt az íveken és a merevítőtartón csillapítóelemek lehetséges szerelési pontjai (1.6. ábra) lettek kialakítva. A pályatartón ezekben a szerelőpontokban el is helyezték a csillapító berendezéseket, míg az utóhangolást és az ívekben történő szerelést a dinamikus próbaterhelés eredményeitől tették függővé [3].



1.6. ábra - Csillapító berendezések szerelési pontjai

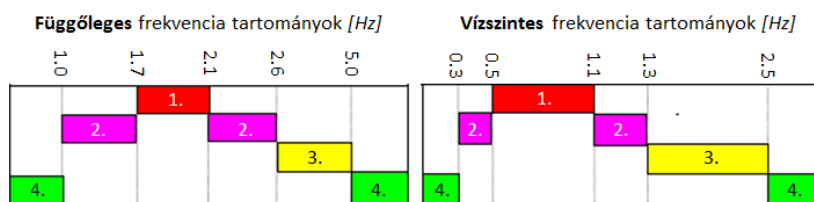
1.2. Tervezési koncepció

A tervezés során a cél egy minél könnyebb és karcsúbb szerkezet kialakítása volt, amely nem csak anyagtakarékos, hanem egyben tükrözi a modern anyagok, a technika és az ipar felkészültségi szintjét. Az anyagtechnológia fejlődésének következtében a modern szerkezetek egyre karcsúbbá válnak, ugyanakkor az esztétikai igény érzékenyebbé válnak a külső, gerjesztő hatásokra. Ilyen hatások a gyalogosok általi dinamikus terhek is, amelyek periódusai jellemzően a karcsú, alacsony sajátfrekvenciával bíró gyalogoshidak alsó frekvencia tartományába esnek. A nagyobb méretű és nagy forgalmú gyalogoshidaknál ezért elkerülhetetlen a gyalogosdinamika vizsgálata. A dinamikai számításokat legtöbb esetben szokás gyalogosdinamikai próbaterheléssel is ellenőrizni, így az esetleges tervezési bizonytalanságok és az előre nem látható dinamikai problémák kiküszöbölhetők [3].

Mivel szabványok többsége – így az Eurocode is – a dinamikai követelményekre csak konzervatív alapokon nyugvó ajánlásokat ad, a dinamikai vizsgálathoz és követelmények ellenőrzéséhez kutatásokon alapuló részletes tervezési segédletek (pl. *Sétra Technical Guide for Footbridges*, *Hivoss*, *Synpex Project Guideline*) használata terjedt el. A Tiszavirág-híd gyalogos-dinamikus hatásaira vonatkozó alapkoncepciót a Sétra francia mérnökkamara által kidolgozott gyalogos-dinamikai tervezési segédlet alapján határozták meg, mely egyúttal a geometriai kialakítást is alakította [4]. Az

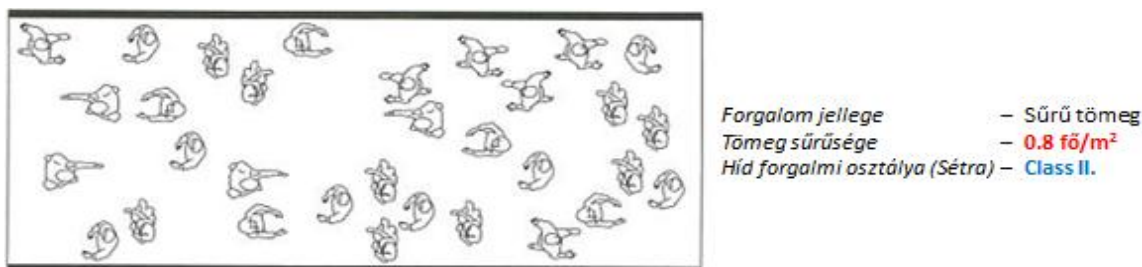
ívek függőleges és vízszintes stabilizáló hatása, a széles rácsszerkezetű pálya nagyobb merevsége, valamint a könnyű rugalmas burkolat alkalmazása nem csak a statikai, hanem a híd dinamikai tulajdonságait is kedvezőbbé teszik [5].

A Sétra ajánlás négy – a szerkezetre vonatkozó – sajátfrekvencia tartományt különböztet meg. Az 1-2. tartományokban biztos, illetve valószínűsíthetőek komolyabb rezgések, a 3-4. tartományokban azonban csekély esélye van a dinamikai problémák kialakulásának, ezért a dinamikus vizsgálat során az 1. és 2. tartományba eső sajátalakokat kell figyelembe venni (1.7. ábra).



1.7. ábra – Sétra frekvencia tartományok [6]

A gyalogos forgalom várható szintjét a Sétra négy forgalmi osztállyal jellemzi (I-IV.). A szolnoki gyalogos híd elhelyezkedése miatt kevésbé számít frekvenciált útvonalnak, ezért a forgalmi besorolása II. szintű, amely $0.8 \text{ fő}/\text{m}^2$ maximális gyalogos sűrűséget feltételez (1.8. ábra). Az alacsonyabb gyalogosforgalmi osztály ellenére a tervezett $11750 \text{ fő}/\text{h}$ áteresztőképesség és a híd mérete indokoltá tette a részletes dinamikai számítás és próbaterhelés végrehajtását [2].



1.8. ábra - A híd besorolása a várható forgalom alapján [6]

A gyalogoskomfort szintek kérdésében a szabványokhoz hasonlóan az előírások is rendkívül óvatosan fogalmaznak. A Sétra ajánlás komfort szintekhez rendelt erősen konzervatív gyorsulási értékeit az 1. táblázat foglalja össze.

komfortérzet (Sétra)	$a_{\text{függőleges}}$ [m/s ²]	$a_{\text{vízszintes}}$ [m/s ²]
nem zavaró	< 0.5	< 0.1
közepesen zavaró	0.5 - 1.0	0.1 - 0.3
zavaró	1.0 - 2.5	0.3 - 0.8
elviselhetetlen	2.5 <	0.8 <

1. táblázat – A Sétra segédlet általi komfort és gyorsulási szintek [6]

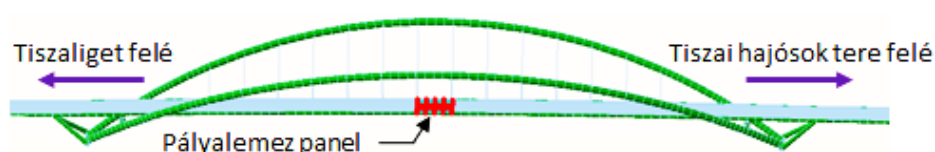
1.3. Célkitűzés

Gyalogoshidak dinamikai vizsgálatánál az alkalmazott gyalogos terhek modellezésének lehetősége bizonytalan és az irodalom alapján hiányos. Elsőként az egyszerűsített gyalogosmodell valós esetekre történő alkalmazhatóságát vizsgálom a Tiszavirág-híd dinamikus próbaterhelésén végrehajtott futamok szimulálásával. A vizsgálat eredménye képpen jellemzem a modell alkalmazhatóságát és a kritikus paramétereket.

A globális vizsgálatot követően a pályára szerelt rugalmas burkolat gyorsulásokra való hatását vizsgálom a hídpályaszerkezet lokális modelljén. A burkolat inhomogenitásától függő maximális gyorsulási értékeket a pálya egy jellemző keresztmetszetében felvett pontokban mérem. Az eredmények alapján megállapítom a pályaszerkezeten érzékelhető – elhelyezkedéstől függő – gyorsulások mértékét és az azt befolyásoló tényezőket.

1.4. Vizsgálati stratégia

A vizsgálat első lépéseként a Midas Civil 2012 végeselemes programban felépíttem a híd globális modelljét és a próbaterhelési teherparaméterek alapján mozgó dinamikai terhet alkalmazva lefuttatom a modál-, illetve lineáris time-history analízist. A numerikusan számított és mért sajátalakokat és gyorsulásokat összevetve elemzem a gyalogos tehermodellt, valamint a további vizsgálatok elvégzéséhez hitelesítem a globális modellt. Az 1.9. ábrán jelölt 5.4x6.0m-es pályaszerkezeti panel (lokális modell) négy sarokpontjában kiszámítom az elmozdulásokat (UX , UY , UZ), valamint a vonatkozó elfordulásokat ($ROTX$, $ROTY$, $ROTZ$).



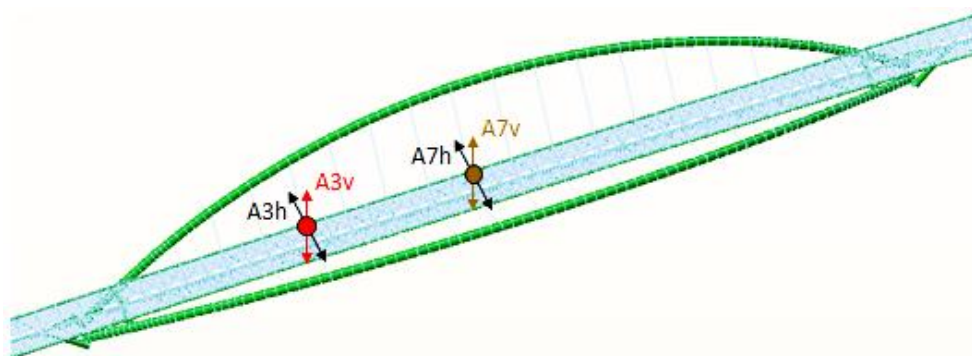
1.9. ábra - Lokális modell elhelyezkedése a globális modellen

A második lépésben a pályaszerkezetből kivett – WPC pallóval kiegészített – panelt modellezem Ansys-ban. A panel sarokpontjaira elmozdulás kényszerként működnek a globális modellen meghatározott sarokponti elmozdulások és elfordulások. A vizsgálat eredményeként ábrázolom és értékelem a kompozit pallók kijelölt pontjaiban kialakuló maximális gyorsulásértékeket.

2. Dinamikus próbaterhelés

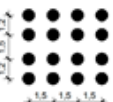
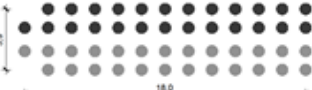
A valós dinamikai viselkedés tanulmányozására, a tervezési modell és paraméterek ellenőrzésére a hidat az átadást közvetlenül megelőzően dinamikus próbaterhelésnek vetették alá. A próbaterhelést a Budapesti Műszaki Egyetem (BME) Hidak és Szerkezetek Tanszéke végezte.

A mérés során 29 futamot végeztek el különböző hosszúságú, sebességű és gerjesztésű (lépésfrekvencia, mint paraméter) csoportokkal. A mederhíd pálya gyorsulásait két pontban – külön függőleges és vízszintes irányban – egytengelyű (uniaxiális) gyorsulásmérőkkel mérték. Az A3 és A7 pontokban elhelyezett műszerekkel (lásd 2.1. ábra) a sajátalakok szerinti mértékadó szerkezeti mozgások – vízszintes és függőleges lengések, hossztengety körüli elcsavarodás – teljes körűen megfigyelhetők [4].



2.1. ábra - Gyorsulásmérők elhelyezése a medernyílás felező és negyedelő pontjaiban [4]

A futamokat három csoportlétszámmal, különböző sebességgel, elrendezéssel és gerjesztő jelleggel futtatták. A 16 fős csoport (2.2. ábra) referenciamérésként szolgált, az 50 fős csoport (2.3. ábra) felülről közelítette a feltételezett ekvivalens gyalogösszámot, a 100 fős csoportok pedig a szélsőséges helyzetek vizsgálatára és az eredmények kiterjesztésére szolgáltak [4].

N [fő]	Csoport elrendezés	mozgás jellege (v = 3 - 15 m/s)
16 (LC1-13)	 - 4 x 4 (szimmetrikus) - 2x8 (féloldalas)	- szinkronizált - rendezetlen - tengerészjárás
50 (LC14-20)	 - 2 x 25 (szimmetrikus) - 1 x 25 (féloldalas) - 2x25 (saktábla alak)	- szinkronizált - rendezetlen - tengerészjárás
100 (LC21-35)	 - 4 x 25 - 2 x 25	- szinkronizált - rendezetlen - tengerészjárás

2. táblázat - Próbaterhelési futamok jellemzői [4]

A csoportok 3-15km/h sebességgel vonultak végig a hídon, teljes mértékben lefedve a híd normális üzemállapotában várható sebességeket és gerjesztő frekvenciákat. A különböző teherelrendezéseket illetően (*szimmetrikus, féloldalas, sakktábla alak*), a teljesen szinkronizált, nem-szinkronizált és a „tengerészlépés” jellegű mozgástípusokat is megkülönböztették (2. táblázat).



2.2. ábra – 16 fős szimmetrikus csoport [2]



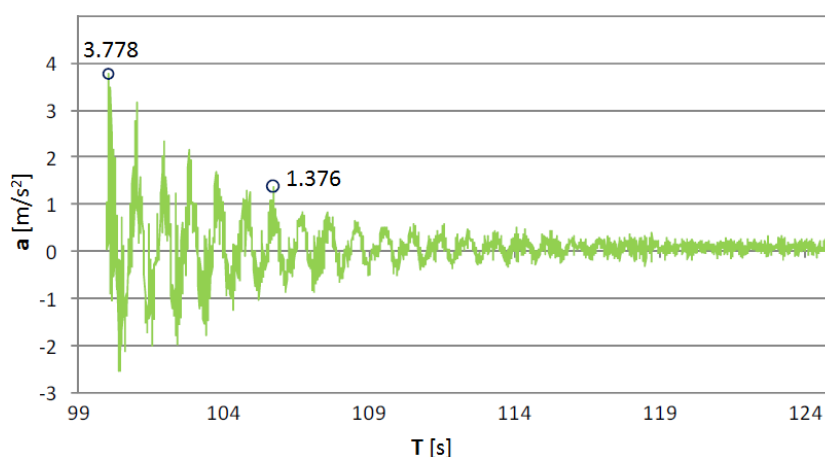
2.3. ábra – 50 aszimmetrikus csoport a kifolyási oldalon [2]

A vizsgálatok elvégzésére a végrehajtott futamok közül négyet választottam ki. A 3. táblázat tartalmazza a vizsgált futamok paramétereit, amelyek a numerikus teheralkalmazás lehetőségeit figyelembe véve kizárólag szinkronizáltak. A lépésfrekvenciák az egyszerűsített tehermodellek kalibrációs tartományába esnek, továbbá séta és futás eseteket is tartalmaznak, ezért a négy futammal a kitűzött célok átfogóan vizsgálhatók. A lépésfrekvenciák (f_i), a sebességek (v_i) és az átvonulási idő (t) a próbaterhelés során mért értékek átlagai [4].

futam	n [fő]	irány	teher elrendezés	jelleg	t [s]	v _á [m/s]	f _l [Hz]
8	16	<-	4x4 közép	szinkronizált	105.40	1.75	2.04
13	16	<-	2x8 fél (kifolyási)		70.60	2.69	2.17
20	50	<-	2x25 fél (kifolyási)		70.05	2.97	2.74
38	50	->	2x25 fél (befolyási)		127.50	1.64	2.32

3. táblázat - Vizsgált futamok paraméterei [4]

A szerkezet csillapítási mértékét egy futam utáni csillapított jellegű szabadrezgésből számították [4].

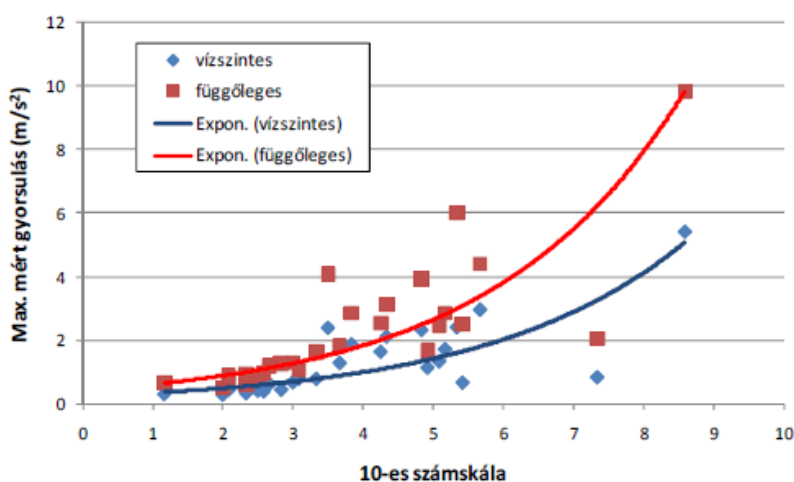


2.4. ábra - Vízszintes irányú csillapított szabadrezgés a 21. futamot követően [4]

A 2.4. ábrán rögzített vízszintes gyorsulás diagramot az A7 pontban rögzítették. A diagram alapján számított logaritmikus dekrementum 0.168, amely 2.7%-os csillapítási mértéknek felel meg. Az szakirodalomban acél hidakra közölt 0.2-1.5% csillapítási mérték [7] tartományból felülről kilógva a 2.7% magasnak számít, amely a lágy acélszerkezet, a csekély mértékben feszített függesztő rudak és a csillapító berendezéseknek működésének tulajdonítható. Habár a szerkezeti csillapítás a hídon alkalmazott esetleges teher hatására és a különböző rezgés alakok szerint változhat, a numerikus modellben állandó 2.7% modális csillapítást alkalmazok.

A híd sajátrezgéseit és alakjait a hídon mért alakváltozás és gyorsulás diagramokon alkalmazott spektrális analízissel – diszkrét Fourier transzformációval – határozták meg. A próbaterhelésen mért és sajátalakokat az 5.3. fejezetben – a globális modellen számított eredményekkel összehasonlítva – mutatom be.

A gyorsulások rögzítésén túl a korlátoknál álló megfigyelők személyek szövegesen és egy 1-10 skálán értékelték a komfort érzetet, amelyet feldolgozva később kialakították a monitoring rendszer riasztási szintjeihez rendelt gyorsulásokat.



2.5. ábra - Vízszintes irányú csillapított szabadrezgés a 21. futamot követően [4]

A 2.5. ábra mutatja a gyalogos komforttal kapcsolatban mért eredményeket, ahol a gyalogos komfortérzet a „10-es számskálán” értelmezhető [4].

1-3	–	nem zavaró
3-5	–	kicsit zavaró
5-6	–	kicsit zavaró / zavaró
6-7	–	zavaró
7-8	–	nagyon zavaró
8-9	–	elviselhetetlen

Az értékelés szerint a próbaterhelés során elvégzett futamok zöme a „nem zavaró”, „kicsit zavaró / zavaró” kategóriába esnek, amely a skálán 1-6-ig terjed. Jelentősen magasabb értékeket csak a 100 fős séta és az 50 fős tengerészjárás futamok esetén mértek, amelyek előfordulási valószínűsége csekély. Ezen mozgásformákat az egyszerűsített gyalogosmodellekkel – jelenleg rendelkezésre álló általános gyalogosmodellel – numerikusan modellezni nem lehetséges.

Gyalogos komfort szintek		
	$a_{\text{függőleges}}$ [m/s ²]	$a_{\text{vízszintes}}$ [m/s ²]
nem zavaró	< 1.3	< 0.6
kicsit zavaró	1.3 - 2.3	0.6 - 0.8
kicsit zavaró / zavaró	2.3 - 4.0	
zavaró	4.0 - 6.0	
nagyon zavaró	6.0 - 8.0	0.8 <
elviselhetetlen	8.0 <	

4. táblázat – A próbaterhelés alapján megállapított komfort- és gyorsulási szintek [4]

A 4. táblázat tartalmazza a függőleges és vízszintes gyorsulástománnyokra megállapított komfortszinteket, amelyek a Sétra által ajánlott értékekhez képest sokkal „engedékenyebbek”. A Sétra által elviselhetetlennek tartott $2.5m/s^2$ függőleges és $0.8m/s^2$ gyorsulások (lásd 1. táblázat) a Tiszavirág-híd esetében csak kicsit zavaró, zavaró jellegűek, azonban nem elviselhetetlenek. A próbaterhelés eredményei rávilágítanak a Sétra és más dinamikai tervezési segédletek – komfort kritériumra vonatkozó – konzervatív szemléletére, amely teljes körű kielégítése számos valós esetben nem lehetséges.

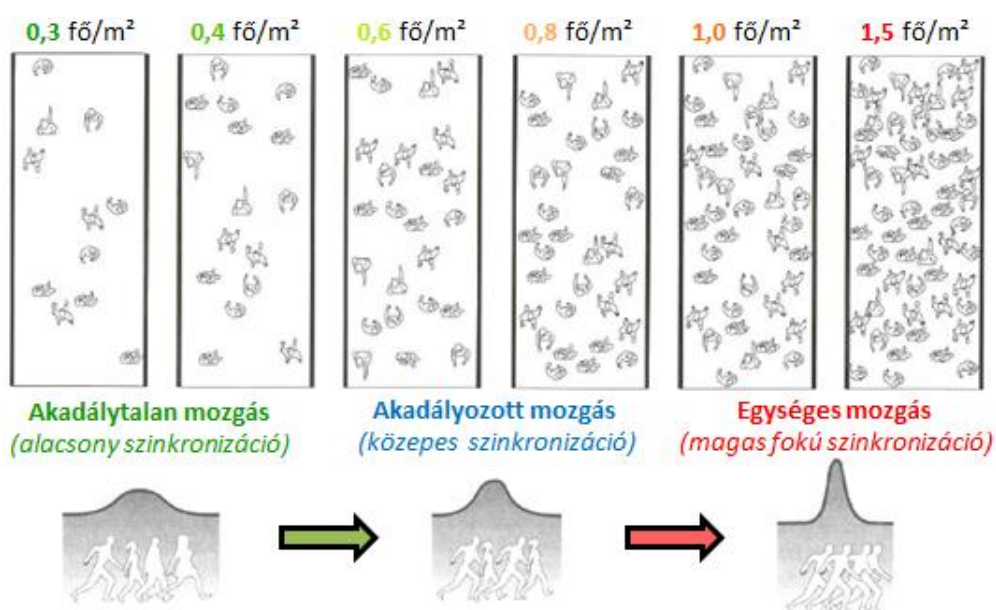
3. Gyalogosdinamika

3.1. Szinkronizációs jelenségek

A gyalogosdinamikai vizsgálatok célja tipikusan a használhatósági követelmények kielégítése, mivel a forgalom hatásából kialakuló rezgések ritkán veszélyeztetik a szerkezet globális teherbírását. A szerkezet gerjesztése szempontjából meghatározó, hogy a gyalogos csoport mozgás karakterisztikája véletlenszerű, vagy jól összehangolt, szinkronizált. A véletlenszerű mozgás általában nem okoz dinamikai problémát, mivel az személyek együttes hatása elenyésző, bizonyos esetekben pedig gyengíthetik egymást. Ezzel szemben az összehangolt, vagy szinkronizált mozgás hatására különös figyelmet kell fordítani.

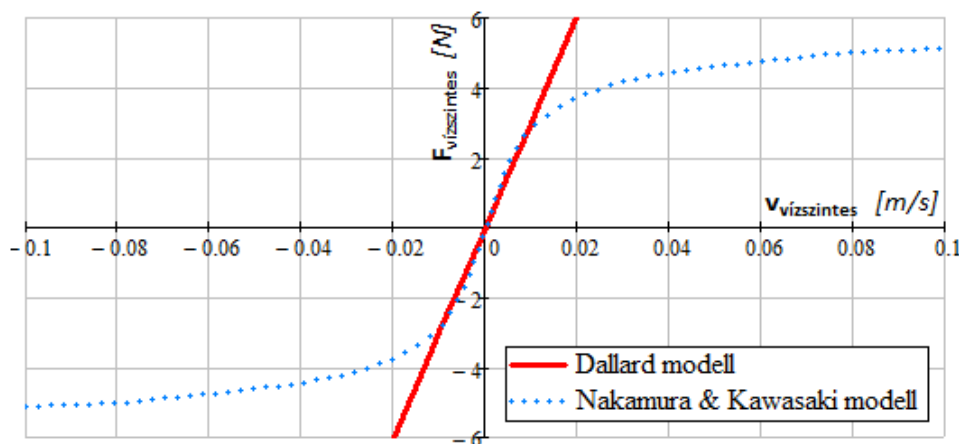
A hídon átvonuló tömegnek fontos karakterisztikája a tömegsűrűségtől függő kényszeres szinkronizáció és a „lock-in” jelenség. A két fogalom hasonló jelenségeket takar, mindkettő a tömeg szinkronizációjára utal, azonban más okok miatt alakulnak ki [8].

A tömeg mozgáskarakterisztikájának szinkronizációja elsősorban a tömeg sűrűségétől és a haladás szabadságától függ. Ritka forgalom esetén a gyalogosok szabadon választhatják meg mozgásformát (*gyaloglás, kocogás, futás*), így a tömeg együttes hatása véletlenszerű. Növekvő tömeg esetén a hídon tartózkodók alkalmazkodni kényszerülnek a tömeg mozgásához, aminek következtében bizonyos mértékű szinkronizáció alakul ki. A tömeg szinkronizáltságának növekedését a sűrűség függvényében az 3.1. ábra mutatja be. A szerkezeti merevségtől és tömegtől függően a hidaknak egy bizonyos szinkronizációs fok – a teljes létszám százalékában általában 10-30% – felett dinamikai problémák jelentkezhetnek [6].



3.1. ábra - Tömeg szinkronizáció mértéke a gyalogossűrűség függvényében [5]

A „lock-in” hatás a vízszintes irányú szerkezeti rezgésekkel függ össze. A forgalom hatására a szerkezetben vízszintes irányú kilengések, így gyorsulások jönnek létre. Kísérletek alapján kimutatható, hogy a „lock-in” hatás egy bizonyos kritikus szerkezeti gyorsulás hatására jelentkezik. A kritikus szint felett a gyalogosok – mivel ellensúlyozni próbálják a kialakult mozgásokat – önkénytelenül tovább gerjesztik a szerkezetet [5].



3.2. ábra - Szerkezet vízszintes sebessége és gerjesztő erő modelljei [9]

A gyalogosok által kifejtett vízszintes erő és a szerkezeti sebesség viszonyát – a *Dallard* és *Nakamura-Kawasaki* modellek alapján – a 3.2. ábra mutatja be. A nagyobb vízszintes kilendüléshez (*sebesség, gyorsulás*) nagyobb gerjesztő erő tartozik. Dallard esetében ez az összefüggés lineáris, a másik esetben gyökös. Mivel ez a gerjesztő erő közel periodikus, az szerkezet rezgésének amplitúdója is egyre növekszik, míg a gyalogosok számára elviselhetetlenné válik [8].

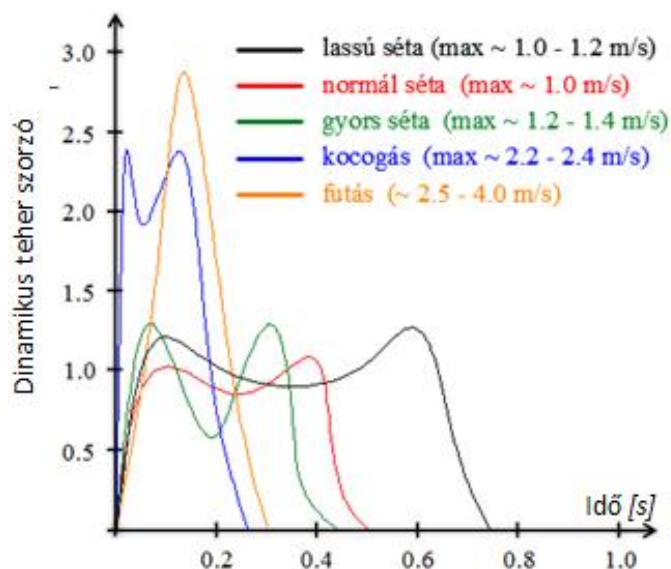
3.2. Alkalmazott gyalogosmodell

Az 5. táblázatban jól látható, hogy a mozgás jellege összefügg a lépésfrekvenciával (f_s), haladási sebességgel (v_s) és a lépéstávolsággal (l_s). A mozgástípusok átfogó csoportosítását Bachmann végezte el, amely mind a mai napig használatos [10].

	f_s [Hz]	v_s		l_s [m]
		[m/s]	[km/h]	
lassú séta	1.7	1.0	3.6	0.60
normál séta	2.0	1.5	5.4	0.75
kocogás	2.3	2.3	8.3	1.00
futás	2.5	3.1	11.2	1.25
gyors futás	>3.2	5.5	19.8	1.75

5. táblázat - Mozgás típusok sebességei és frekvenciái [5]

A dinamikus teherdiagram a felsorolt mozgástípusoknak megfelelően alakul. Sétánál az ember statikus súlyának közel megfelelő maximális teher hat a szerkezetre, a teherfüggvény pedig „nyereg” alakú (*fekete vonal*). Ilyenkor a szerkezetre kifejtett dinamikus erő és statikus erő aránya közel 1.0. Ahogy nő a sebesség, úgy csökken a burkolattal való érintkezési idő. Futásnál a teherdiagram a „nyereg alakú” függvényből folyamatosan vált át impulzus-szerű hatássá. Az érintkezési idő a lassú sétáénak csaknem a felére csökken (3.3. ábra), míg a gyalogos saját súlyának több mint a háromszorosát is kifejtheti a szerkezetre [8].



3.3. ábra - Mozgás típusokhoz tartozó teherfüggvények [5]

Az ember szerkezetre működő hatása legegyszerűbben a periodikus gyalogosteher (*egyszerűsített modell*) modellekkel vehető figyelembe. A modell Fourier sorral közelíti a bemutatott mozgástípusokat. A módszer alkalmazhatósága a Fourier sor tényezőinek (*dinamikus teherfaktor*, α_i - *DLF*) helyes felvételén múlik, amelyekre számos kísérleti eredmény található az irodalomban. A legnépszerűbb és leghasználhatóbb DLF értékeket Bachmann és társai határozták meg (6. táblázat), amelyekkel a függőleges és vízszintes normál sétához tartozó teherfüggvények a következő képpen kaphatók [8].

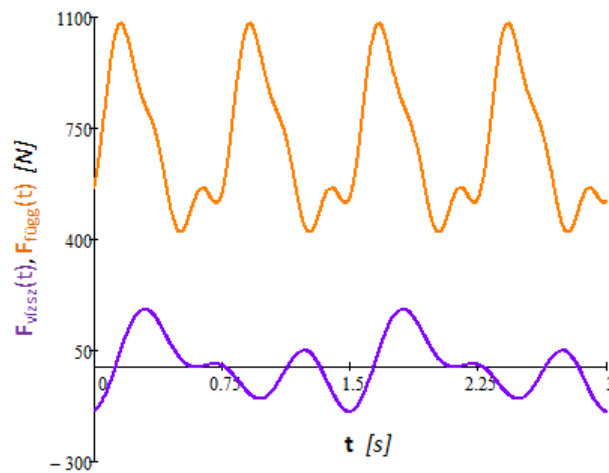
$\alpha_1 = 0,4 / 0,5$	$\varphi_1 = 0$	2,0 / 2,4 Hz
$\alpha_2 = 0,1$	$\varphi_2 = \pi/2$	
$\alpha_3 = 0,1$	$\varphi_3 = \pi/2$	

$\alpha_1 = 0,1$	$\varphi_1 = 0$	2,0 Hz
$\alpha_2 = 0,1$	$\varphi_2 = \pi/2$	
$\alpha_3 = 0,1$	$\varphi_3 = \pi/2$	

6. táblázat - (a) Függőleges teher tényezők; (b) Vízszintes teher tényezők [7]

- Függőleges gyalogos teherfüggvény: $F_{függ}(t) = P \left[1 + \sum_{i=1}^n \alpha_{i,függ} \cdot \sin(2\pi \cdot i \cdot f_s \cdot t - \varphi_i) \right]$

- Vízszintes gyalogos teherfüggvény: $F_{vízsz}(t) = P \sum_{i=1}^n \alpha_{i,vízsz} \cdot \sin(\pi \cdot i \cdot f_s \cdot t - \varphi_i)$



3.4. ábra - Függőleges és vízszintes teherfüggvények a Bachmann szerinti DLF tényezőkkel

A 3.4. ábrán a fent említett Fourier sorok ábrázolása látható normál séta esetén. A függőleges teherfüggvény intenzitása többszöröse a vízszintes erő kifejtésnek, azonban mindkét esetben hasonló periodicitás tapasztalható.

4. A burkolat

A manapság gyakran alkalmazott kompozit burkolatrendszereket könnyebb szerelni, ellenállóbbak és esztétikusabbak a sima szigetelt acél járófelületnél. A Tiszavirág-híd pályaszerkezete WPC (Wood Polyester Composite) pallóelemekkel lett burkolva (4.1. ábra), ami fa (50%), újrahasznosított műanyag (50%) és különböző adalékanyagok környezetbarát felhasználásával készül.



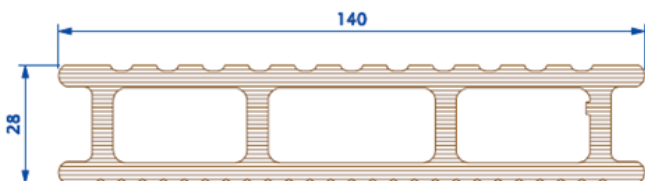
4.1. ábra - WPC fa-műanyag kompozit burkolat [2]

A WPC pallókat speciális kapcsokkal rögzítették az IPE140 keresztmetszvényű acél hossztartókra csavarozott 45x75 mm-es párnafákhoz (4.2. ábra).



4.2. ábra - Párnafa elrendezés az IPE gerendákon [2]

A kompozit palló keresztmetszete és mechanikai tulajdonságait a gyártó honlapján található katalógus alapján az 7. Táblázat foglalja össze. Az elemek hajlításra vonatkoztatott rugalmassági modulusa 6 GPa , amelyet kísérlettel határoztak meg [11].

Deceuninck Twinson P9555 WPC palló (forrás: www.twinson.hu)					
					
w [mm]	A [mm ²]	E [MPa]	ρ [kg/m ³]	g	
				[kg/m]	[kg/m ²]
140	1720.9	6000 ± 10%	1410	2.45	16.90

7. táblázat - WPC palló mechanikai tulajdonságai [11]

Az acélnál tehát nagyságrendekkel rugalmasabb a burkolat, amely egy jelentősen inhomogén lokális hajlítási merevségű pályaszerkezetet eredményez.

További szempontként megemlítem a rugalmas burkolat és a jelentősen merevebb acélszerkezet közötti kvázi-rugalmas kapcsolatot (*párnafa*). A híd globális viselkedésére nincs hatással, azonban a pályaburkolaton érzékelt gyorsulás szinteket csekély mértékben növelheti, illetve csökkentheti is, így okozva a gyalogos komfortérzetet negatív, vagy pozitív irányban. Ugyan a rugalmas kapcsolatok modellezésével a számítás finomodik, de jelen vizsgálatok során azokat nem veszem figyelembe.

5. Globális vizsgálat

A globális modellgeometriát a kiviteli terveken megadott fő kitűzési pontok alapján építem fel a Midas Civil 2012 végeselemes programban, így az analízis a valósághoz legközelebb álló geometrián végezhető el.

5.1. Geometria, anyag és megtámasztási modell

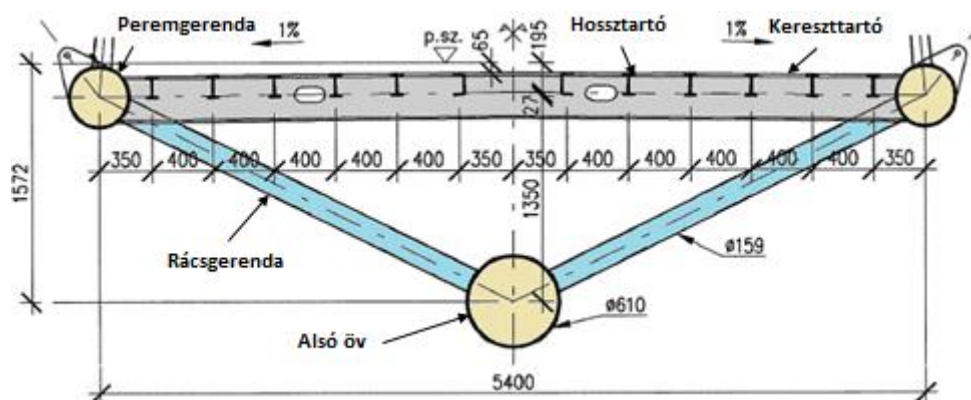
Az ívek és a merevítőtartó részei elemenként 12 szabadságfokú – nyírási alakváltozást elhanyagoló – gerendaelemekkel modellezem, míg a függesztő rudakat és a szélrácsozást csak húzást felvevő rács rudakkal veszem figyelembe. A modellben így 3829 gerendaelem és 100 darab rácsrúd elem jelenik meg, míg a csomópontok száma 2847.

A fő teherviselő elemek kizárólag hajlított cső keresztmetszetűek S355 és S275 szerkezeti acél anyagminőséggel. Az ívek S355 anyagminőségű 16-30mm-ig változó vastagságú 1300mm állandó átmérőjű csövek (8. táblázat).

Elemtípus		Minőség	Szelvény	Méretek	Megjegyzés
Ívek		S355 J2	CHS	Ø1300 (16-30)	(Linearis anyag tulajdonságok) $E = 210 \text{ GPa}$ $G = 81 \text{ GPa}$ $\nu = 0,30$
Merevítőtartó	Peremgerendák	S275 J2	CHS	Ø406 (8-12 ⁵)	
	Alsó öv			Ø610 (10-25)	
	Rácsgerendák			Ø159 (6-16)	
	Hossz- és kereszttartók	S235 J0	IPE	300	
	Szélrács és egyéb elemek	S235 J0	IPE/UPN	140/100	
Függesztő rudak	Halfen DETAN	S460	körszelvény	Ø36-42	

8. táblázat - Anyagminőségek és szelvénytérlekek

A merevítőtartót S275 minőségű peremgerendák és alsó öv, rácsgerendák, valamint S235 minőségű – másodlagos teherviselő – IPE300 és IPE140 szelvényű kereszt és hossztartó elemek alkotják (5.1. ábra).

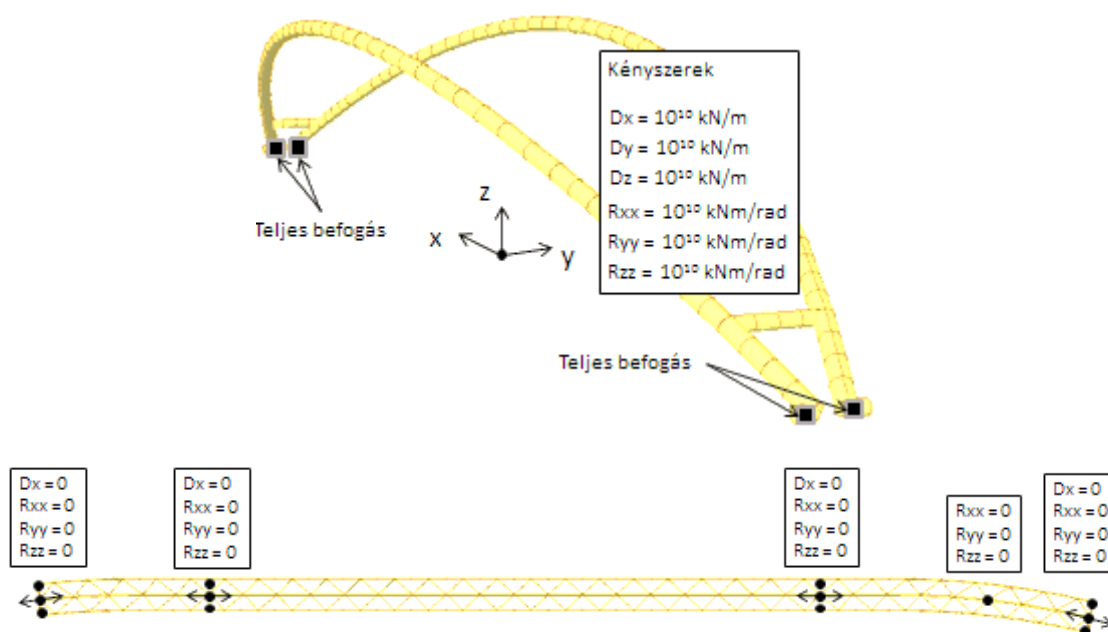


5.1. ábra - A merevítőtartó keresztmetszete

A merevítőtartó S460 nagyszilárdságú acélból gyártott függesztő rudakkal csatlakozik az ívekhez, amelyeket 36-42mm átmérőjű körszelvénnnyel modellezek.

A valós szerkezeti viselkedés figyelembe vételéhez elengedhetetlen a beépített csillapító berendezések figyelembevétele, amelyeket a szerkezethez rugó- és csillapító elemekkel rögzített 200kg/g-s tömegpontokkal modellezek. A tömegpont csak a valós csillapító elem elmozdulási szabadságfokának megfelelő irányokban tud mozogni.

A gyalogosdinamikai vizsgálatokat jellemezően alacsony teherszinten végzik, használhatósági határállapot szerinti teherkombinációban. Ennek következtében a vizsgálat eredményeit jelentősen nem befolyásolja, hogy az alapozást rugalmasan befogott, vagy teljes befogásként veszem figyelembe. Az egyszerűség kedvéért a támaszokat az 5.2. ábrán látható módon veszem fel.



5.2. ábra - Ívek és a merevítőtartó eltolódás és elfordulás elleni megtámasztásai

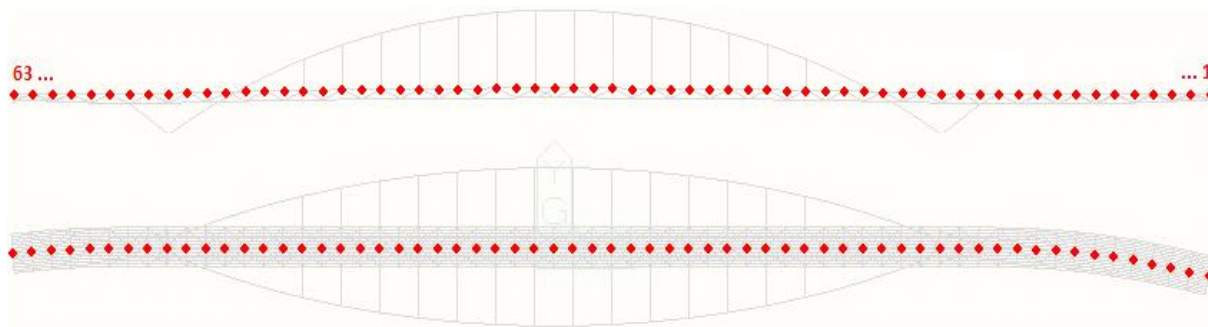
5.2. Tehermodell

Dinamikus vizsgálat esetén a terheket alapértékükön kell figyelembe venni, míg az állandó jellegű terhek dominálnak az esetleges terhekkal (*gyalogos teher*) szemben.

Az állandó terhek tartalmazzák az acélszerkezet 359 tonnás össztömegét, a közel 20 tonnás kompozit burkolatot és a 6 tonnás korlátrendszerét.

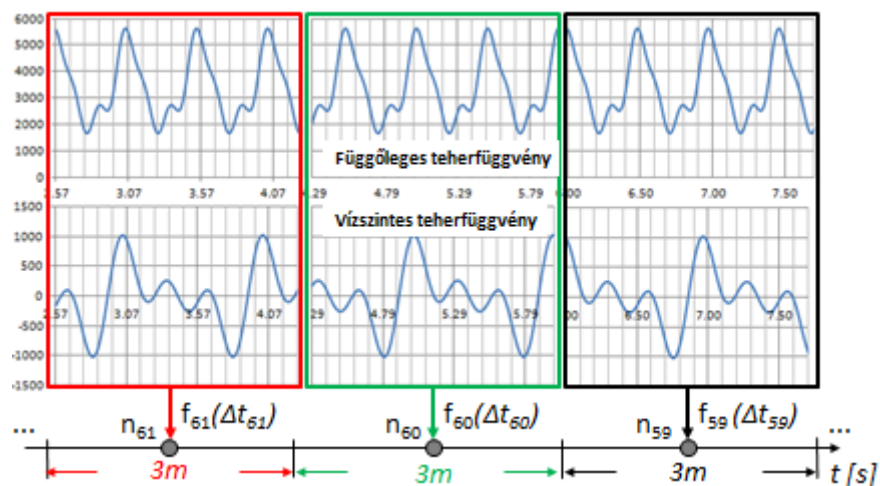
A hasznos terhet a próbaterhelési futamok jelentik, amelyeket fejlett, mozgó dinamikai teherként alkalmazok a modellen. Az egyszerűsített tehermodell Fourier sorral írható le és egy időben változó periodikus teherfüggvényt ad. A mozgás jellegét (*séta, futás*) a Bachmann által

ajánlott dinamikus teher tényezőkkal veszem figyelembe. A gyalogosteher mozgó jellegét időben változó pozíciójú csomóponti koncentrált erőkkel modellezem, amelyek a merevítőtartó hossza mentén három méterenként kijelölt referenciapontokhoz tartozó keresztmetszetekben – a kereszttartókon – hatnak a sebességtől függő időintervallumban (5.3. ábra).



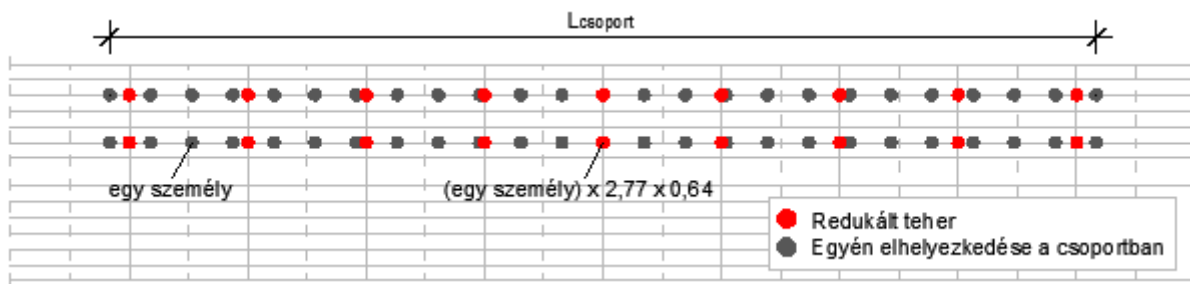
5.3. ábra - A három méterenként felvett referencia pontok (IPE300 kereszttartók)

Mialatt a periodikus gerjesztő függvény folyamatos, a teher pontról pontra halad előre a próbaterhelési futamok átlagsebességével. Az i -edik referencia pontokhoz tartozó 3m-es tartományban a gerjesztő erő az i -edik referencia ponton csomóponti dinamikus teherként hat (5.4. ábra).



5.4. ábra - A három méterenként felvett referencia pontok és a rájuk ható egyszerűsített gyalogos teher

A gyalogos csoport elrendezésétől és csoporthosszától függően a csoport terhet redukálhatjuk a kereszttartókon felvett csomópontokra, amelyekben a fenti ábrán látható gerjesztéssel hatnak a szerkezetre. A csoport tagjainak csomópontokba történő redukálását az 5.5. ábra szemlélteti.



5.5. ábra - Teher redukálása a referencia pontokhoz tartozó keresztmetszetekbe

Az 50 és 100 fős nagyobb csoportok tömeghatását a Sétra segédlet alapján egy 0.64-es csökkentő tényezővel veszem figyelembe [6], így az 5.5. ábrán bemutatott 50 fő 18 redukált pontban fejt ki gerjesztő hatását a szerkezetre. A tömeghatással számolva tehát egy redukált pontban ható gerjesztő erő

$$F(t) = f_{1\text{személy}}(t) \cdot 2.77 \cdot 0.64 = 1.77 \cdot f_{1\text{személy}}(t) \quad (1)$$

amely egy személy 1.77-szeres dinamikai hatásának felel meg. A módszer által szolgáltatott eredmények természetesen annál pontosabbak, minél sűrűbben és aprólékosabban osztjuk szét a terheket a rúdmodellen, azonban a feladat szempontjából a 3m-es felosztás elegendőnek bizonyul.

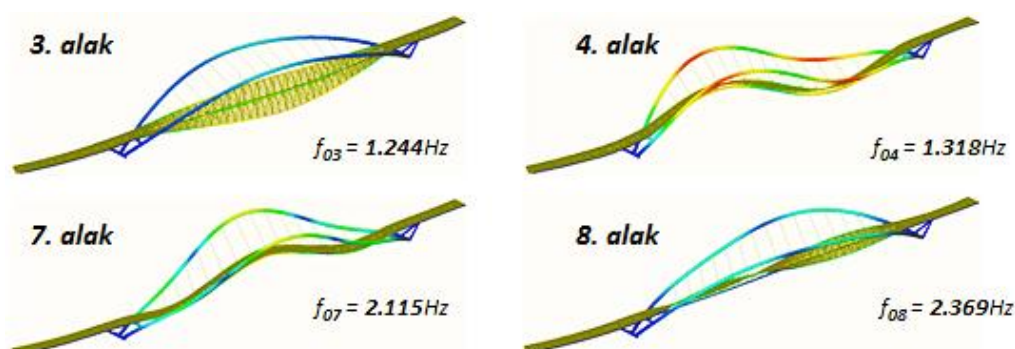
5.3. Modálanalízis

A szoftver a sajátfrekvenciákat és sajátalakokat a Lánczos módszerrel számolja, amely nagyméretű, ritka mátrixok esetén a sajátértékekre pontos eredményeket ad. A módszer kiválóan alkalmazható gyalogoshidak esetében, ahol a gyalogosdinamikai vizsgálathoz jellemzően csak az első néhány sajátérték ($\approx 1\text{-}3\text{Hz}$) meghatározására van szükség [6].

Sajátfrekvenciák [Hz]				
alak	Lánczos módszer	Próbaterhelés		megjegyzés
		f_{min}	f_{max}	
1	0.58	0.54	0.71	Kritikus frekvencia-tartományok [6] Forgalmi osztály: Class II. függőleges: 1.0-2.6Hz vízszintes: 0.3-1.3Hz (lásd 1.7. ábra)
2	0.62	0.56	0.71	
3	1.24	1.10	1.22	
4	1.32	1.46	1.49	
5	1.52	1.46	1.49	
6	1.70	1.68	1.81	
7	2.12	2.54	2.59	
8	2.35	2.15	2.31	
9	2.86	2.83	2.83	
10	2.86	2.95	2.95	

9. táblázat - A számított és mért sajátfrekvenciák összehasonlítása

A 9. táblázatban összefoglalt számított és mért sajátfrekvenciák alapján és a lengésalakok alapján kijelenthető, hogy a globális modell geometriája és megtámasztásai megfelelően lettek felvéve. A modell alkalmas további vizsgálatok elvégzésére, pontosabban az elmozdulások és gyorsulások számítására. A Tiszavirág-híd gyalogosdinamika szempontjából kritikus sajátalakjait (alakok) az 5.6. ábra mutatja, ahol kizárólag a merevítőtartó rezgéseire vonatkozó alakok sajátfrekvenciája beleesik az 9. táblázatban említett kritikus frekvenciatartományba [6].



5.6. ábra - A Tiszavirág-híd merevítőtartójának gyalogosdinamikai szempontból kritikus sajátalakjai

A globális modell teljes értékű verifikálását a megfelelő próbateher szimulálásával számított gyorsulások és a mért szerkezeti válaszok összehasonlításával lehet elvégezni.

5.4. Time-History analízis

A lineáris time-history analízist a program a Newmark- β implicit integrálási módszerrel végzi $\beta=0.25$, $\gamma=0.5$ és konstans értékű modális csillapítás figyelembe vételével. A vizsgálat szempontjából lényeges 8, 13, 20 és 38-as futamokra számított és a próbaterhelésen mért gyorsulásértékeket a 10. táblázatban foglalom össze (a futamok paramétereit lásd a 2. fejezetben).

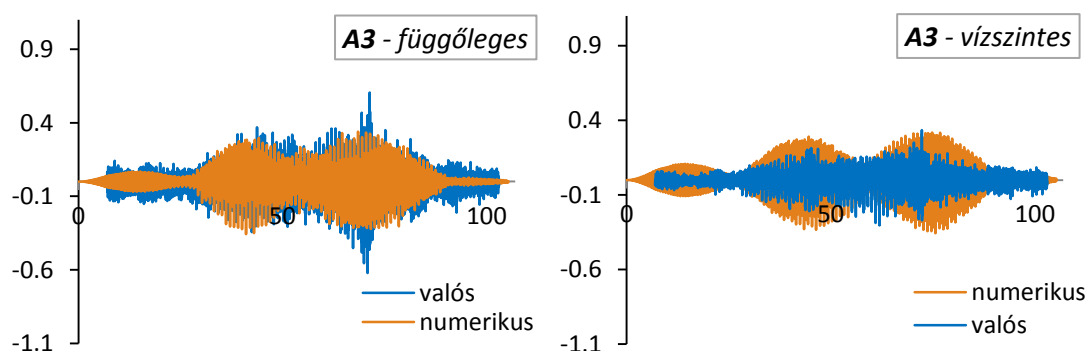
Maximális gyorsulások						
fő	futam	függőleges		vízszintes		
		a_{num} [m/s ²]	$a_{valós}$ [m/s ²]	a_{num} [m/s ²]	$a_{valós}$ [m/s ²]	
16	8	A3	0.36	0.62	0.32	0.33
		A7	0.99	1.09	0.15	0.36
	13	A3	1.68	1.47	0.79	1.15
		A7	6.23!	1.47	0.63	0.90
50	20	A3	2.78	2.57	3.40	1.55
		A7	3.22	2.59	2.07	1.75
	38	A3	1.60	0.91	0.54	0.58
		A7	1.49	1.53	0.53	0.85

10. táblázat - A numerikus és mért gyorsulások összehasonlítása

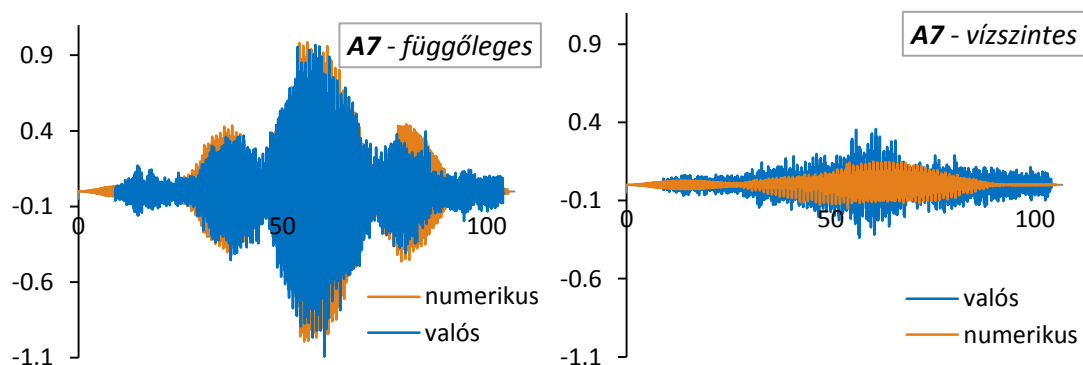
A számított gyorsulási értékek (8. táblázat) jól közelítik a mért értékeket, azonban abban az esetben, amikor a lépésfrekvencia közel esik a szerkezet sajátfrekvenciájához (lásd 13. futam – $A7_{függőleges}$), a „steril” numerikus környezet és állandó paraméterek miatt a valóságtól lényegesen eltérő gyorsulások alakulhatnak. Mivel a 13. futam lépésfrekvenciája 2.17Hz, míg a 7. alak 2.115Hz-en rezonál, a sajátalak dominánsan kilengő pontjaiban – ez esetben az A7 pont függőleges irányban – a számítás rendkívül érzékenyen reagál a lépésfrekvenciára, mint fix numerikus paraméterre. A lépésfrekvencia, csoporthossz, sebesség, valamint a szinkronizáció mértéke azonban a valóságban folyamatosan változó paraméter, amely legtöbbször gyengítő – ritkábban erősítő – tényezőként jelenik meg a gerjesztő hatásban.

Következtetésként levonható, hogy a kritikus sajátfrekvenciákhoz közeli lépésfrekvencia esetén rezonancia közeli állapot lép fel. A numerikus számítás jelentősen eltérő eredményeket adhat, mivel a valóságban az állandónak feltételezett numerikus paraméterek folyamatosan változnak. Az ilyen hibákat, amennyiben szükséges, paraméteres vizsgálattal lehet elemezni és korrigálni. A paraméteres vizsgálatot a feladatban nem végzem el.

Eltekintve a 13. futam kiugró értékétől, a Tiszavirág-híd globális végeleemes modellje a valósággal összhangban lévő kellően pontos eredményeket ad. Az 5.7-8. ábrán a 8-as futam gyorsulás diagramjai láthatók. A 13, 20 és 38-as számú futamok eredményei az A. Mellékletben találhatók. A lokális vizsgálathoz szükséges elmozdulások ezért kellő pontossággal meghatározhatók.



5.7. ábra - A3 pont gyorsulásai [m/s^2] - (a) függőleges; (b) vízszintes irányban



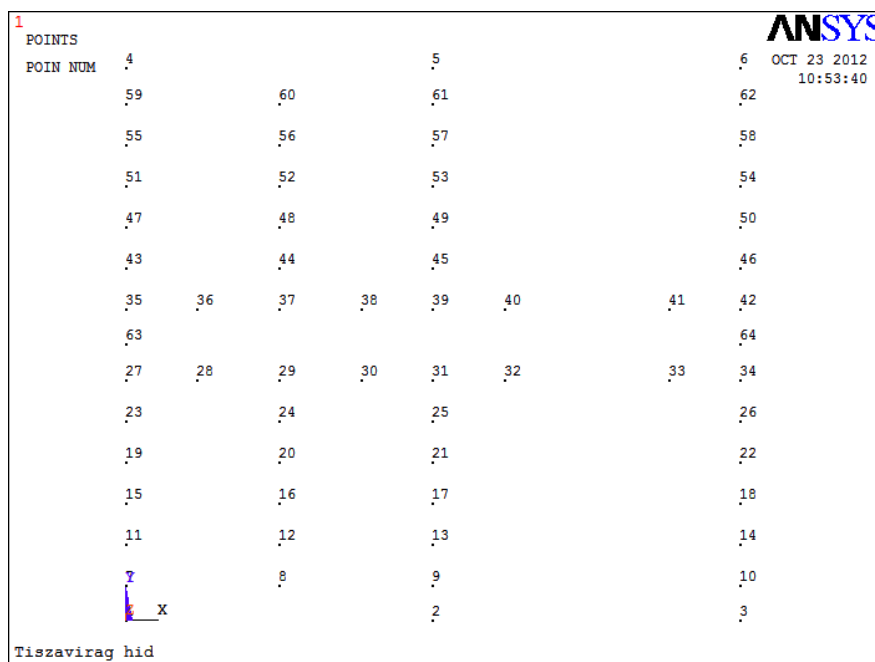
5.8. ábra - A7 pont gyorsulásai [m/s^2] - (a) függőleges; (b) vízszintes irányban

6. Lokális vizsgálat

A lokális panel modellezését az Ansys 13 végeleemes szoftverrel végzem el. A lokális modellhez és a számításhoz tartozó bemenő adatfájl az *B. Mellékletben* található.

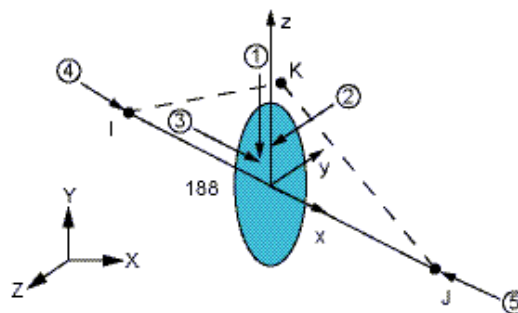
6.1. Geometriai modell

A pályaszerkezeti panel geometriája a szerkezeti csomópontokat jellemző „keypointok” segítségével lett felvéve (6.1. ábra). A keypointokat összekötve modellezhetők a peremgerendák, a kereszt- és hossztartók, a szélrácsok, valamint a kompozit pallók.



6.1. ábra - A lokális modell keypointjai (Ansys)

A modell "BEAM188" 7 szabadságfokú rúdelemekből épül fel, amely univerzálisan alkalmazható szerkezetek modellezéséhez, nyírási alakváltozás és keresztmetszeti torzulások figyelembe vételéhez (6.2. ábra).



6.2. ábra - BEAM188 elemtípus [12]

A szelvények keresztmetszeti adatait a Tiszavirág-híd általános terve alapján veszem fel. A keresztmetszetek panelsíkra merőlegesen külpontosan vannak modellezve. A külpontosságot a szelvény súlypontok eltolásával érem el.

Ansysis referencia szám	Elemtípus	Ansysis szelvénytípus [12]	Keresztmetszeti méret
10	Peremgerenda	CTUBE	Ø406-8
11	Kereszttartó	I	IPE300
12	Hossztartó	I	IPE140
13	Szélrács	CHAN	H-50;B=100;t=8
14	Channel-deck	CHAN	U100
15	WPC-palló	ASEC	lásd a 9. táblázatban!

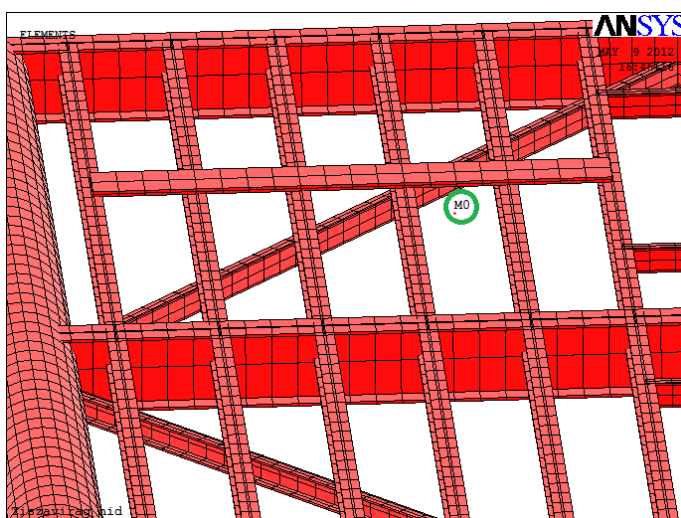
11. táblázat - A számított és mért sajátfrekvenciák összehasonlítása

A 11. táblázat tartalmazza a bemeneti fájlban megadott keresztmetszeti adatokat. A WPC kompozit palló keresztmetszete a geometriai méretek helyett a szelvény keresztmetszeti jellemzőkkel van megadva (12. táblázat). A jelölések értelmezését lásd az B. Mellékletben.

A [mm ²]	I _{yy} [mm ⁴]	I _{yz} [mm ⁴]	I _{zz} [mm ⁴]	I _w [mm ⁶]	J [mm ⁴]	CG _y [mm]	CG _z [mm]	SH _y [mm]	SH _z [mm]
1720.9	189169	0	2929857	1.71x10 ⁸	537122	70	14.05	70	14.05

12. táblázat - Kompozit palló Ansysis bemeneti adatai

A kompozit palló mentén tartózkodó 80kg súlyú megfigyelő személy a "MASS21" tömegponttal modellezhető (6.3. ábra). A tömegpont mértékegysége: $N/g = N/mm/s^2 = tonna$



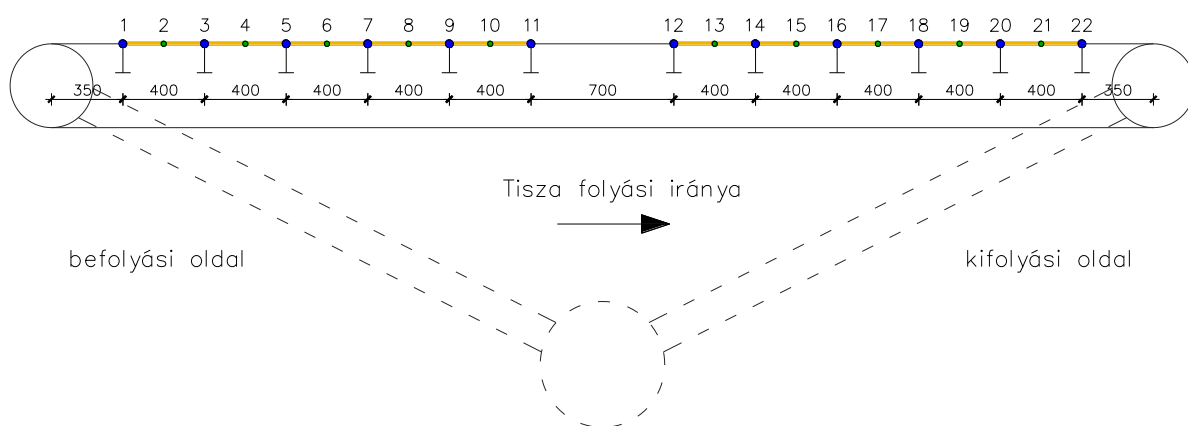
M0.Z – 0.08 t = 80 kg

M0.X – 0.08 t = 80 kg

M0.Y – 0.08 t = 80 kg

6.3. ábra - A megfigyelő személy tömegét reprezentáló M0 tömegpont

A vizsgálat során a futamban résztvevőkön kívül kizárólag egy érzékelő személy (*egy tömegpont alkalmazásával*) áll a burkolaton. A csomópontok pallók mentén való elhelyezkedését a 6.4. ábra mutatja, ahol kékkel az IPE140 hossztartó feletti, zölddel pedig a hossztartók közötti lévő pontokat jelölöm.



6.4. ábra - Teljes panel keresztmetszetben elhelyezkedő csomópontok a pallók mentén

6.2. Anyagmodell

A modellen két anyag jelenik meg. Az acél anyagjellemzőit a szokványos értékekkel veszem fel, míg a kompozit fa-műanyag palló jellemzőit a gyártó által megadott adatokkal veszem figyelembe [11]. A modellben az acél és burkolat rugalmassági modulusával számolni kell, de mivel a globális modell eredményei figyelembe veszik a teljes acélszerkezeti súlyt és a csillapítási értékeket, a lokális modellen csak a WPC palló súlyát és az anyagra jellemző csillapítási mértékeket szabad figyelembe venni. A bemeneti adatok mértékegységei $[mm]$ és $[N]$, így a térfogatsúly $[t/mm^3]$ -ben, a csomóponti tömegpontokat pedig tonnában kell megadni. A panel acélszerkezete 2.77 tonna, a burkolat súlya pedig közelítőleg 550kg, így a lokális modell teljes súlya 3.32t.

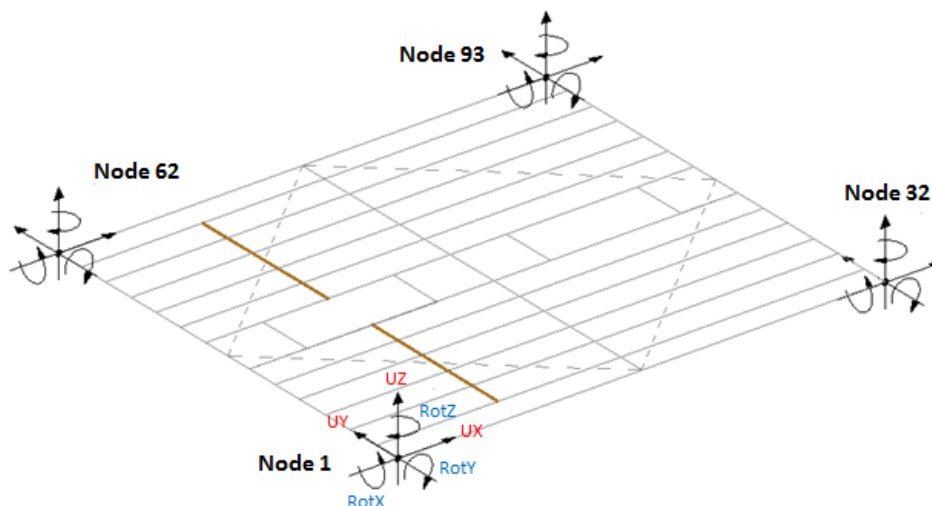
Anyag	E [GPa]	ρ $[t/mm^3]$	ν [-]	δ [-]	ζ [-]
Acél	210	7850	0.30	0.010	0.00159
WPC palló [5]; [11]	6	1700	0.32	0.037	0.00589

13. táblázat – A lokális modell anyagai

A 13. táblázat láthatók a lokális modell anyagaira vonatkozó anyagjellemzők, ahol E a rugalmassági modulus, δ a térfogatsúly, ν a Poisson tényező, δ az anyagra jellemző logaritmikus dekrementum és ζ az anyagra jellemző csillapítási mérték [5].

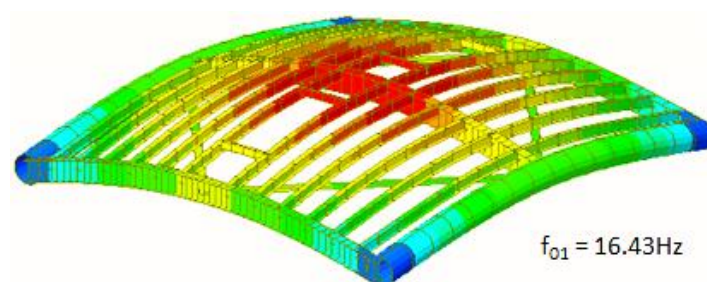
6.3. Megtámasztási viszonyok, peremfeltételek

A hitelesített globális modellen – a négy vizsgált futam hatására – a panel sarokpontjaiban meghatározott elmozdulások (UX_i , UY_i , UZ_i), elfordulások ($ROTX_i$, $ROTY_i$, $ROTZ_i$) a lokális modell sarokpontjaira elmozdulás kényszerként működnek (6.5. ábra). Az elmozdulás és elfordulás diagramok a C. Mellékletben láthatók.



6.5. ábra – Panel sarok-csomópontjaira (node) működő elmozdulás kényszerek értelmezése

A panel és kompozit pallók önsúlyát nem veszem figyelembe tekintve, hogy a globális modell által szolgáltatott eredményekben tartalmazzák azok hatását (lásd 5.2. fejezet).



6.6. ábra – Panel első sajátalakja és frekvenciája (Midas Civil 2012)

A panel alaprezgésszáma 16.43Hz (6.6. ábra), amely lényegesen nagyobb a globális szerkezet pályatartóra vonatkozó első sajátfrekvenciájánál, amely 1.244Hz (lásd 5.6. ábra). A magas sajátfrekvencia miatt a panel kiesik a gyalogos forgalom $\approx 1\text{--}3\text{Hz}$ -es [4] gerjesztési tartományából, így dinamikai szempontból a globális merevítőtartó szerkezet viselkedése és vizsgálata a mértékadó.

6.4. Tranziens analízis

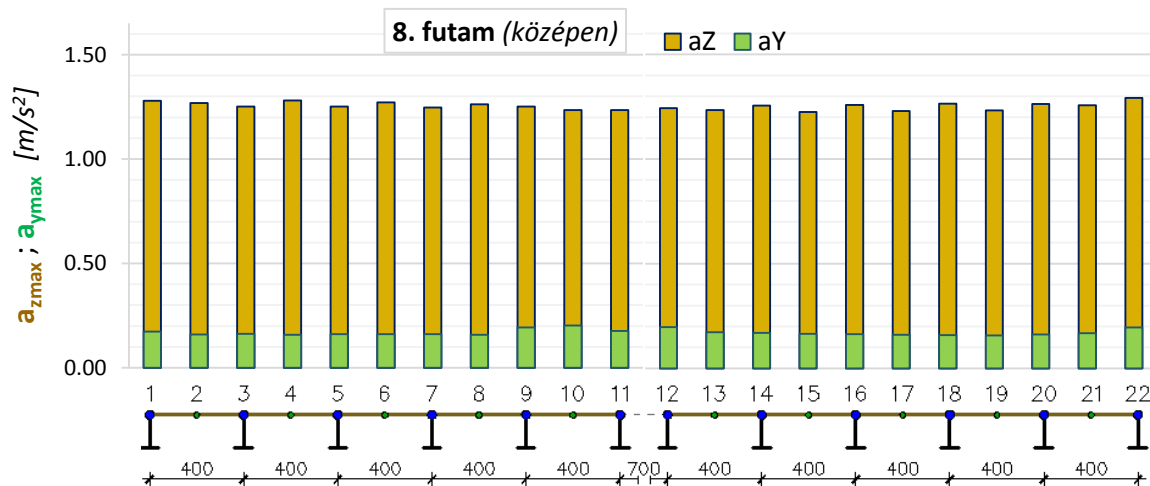
A program a dinamikai mozgásegyenlet rendszert a Newmark módszerrel oldja meg $0.05s$ lépésközönként alkalmazva a panelra ható deformációkat. Habár az acélszerkezet önsúlya nincs figyelembe véve, a megoldásban a konzisztens tömeg mátrixban megjelennek az eltolódási és elfordulási szabadságfokokhoz tartozó értékek.

A számítás végeredménye a kompozit palló egy pontjának gyorsulása, ahol az érzékelő személyt helyettesítő $80kg$ -os tömegpont áll, egyszerre egy helyen.

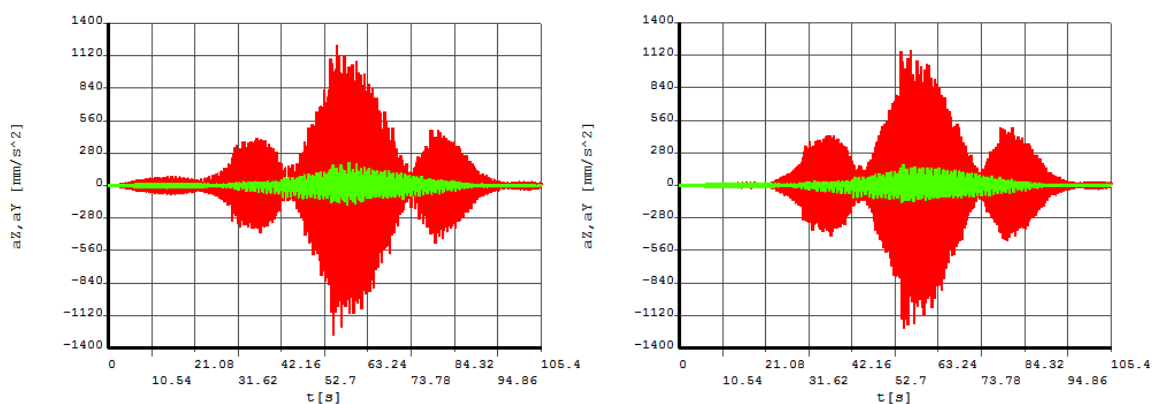
6.5. Lokális vizsgálat eredményeinek értékelése

A lokális vizsgálat eredményeinek értelmezése csoportosítható a palló hossza mentén való gyorsulási értékek eloszlása és a pallón– hossztartó felett és hossztartó közben – való elhelyezkedés **(1)**, valamint a panel irányonkénti viselkedése, ezáltal a függőleges és vízszintes gyorsulások szórása szerint **(2)**. Fontos megemlíteni, hogy az alábbiakban bemutatott sematikus pálya keresztmetszet bal széle jelenti a befolyási, jobb széle pedig a kifolyási oldalt (lásd 7.4. ábra).

(1) A szimmetrikus teherelrendezésű 8. futam hatására kialakuló gyorsulások közel szimmetrikusak a pályaszerkezet keresztmetszetében (6.6. ábra). A szimmetrikus eloszlás a híd csavarodás mentes – dominánsan 7. sajtálatok – szerinti rezgéséből is következik. A pálya közepén álló személy csekély mértékben ugyan, de valamivel alacsonyabb gyorsulási szintet érzékel, mint ha a pálya szélén a korlátnál állna.

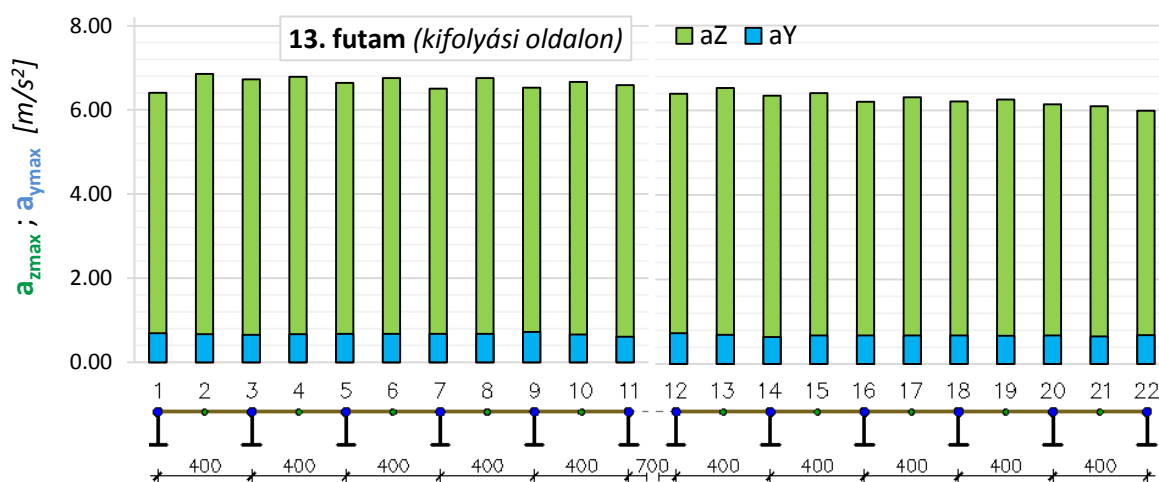


6.6. ábra – 8. futam eredményei



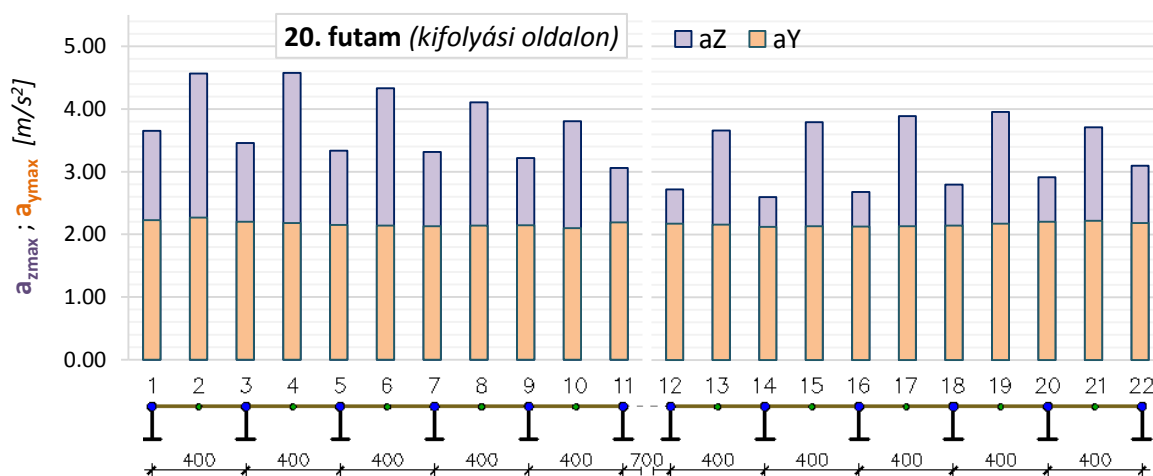
6.7. ábra – 8. futam – maximális és minimális gyorsulási diagramok a 22-es (a) és 11-es (b) pontokban

A 8. futam esetében a minimális függőleges gyorsulás a panel közepén 5%-al alacsonyabb, mint a szélén, ahol a maximális gyorsulás 1.225m/s^2 (6.7. ábra).



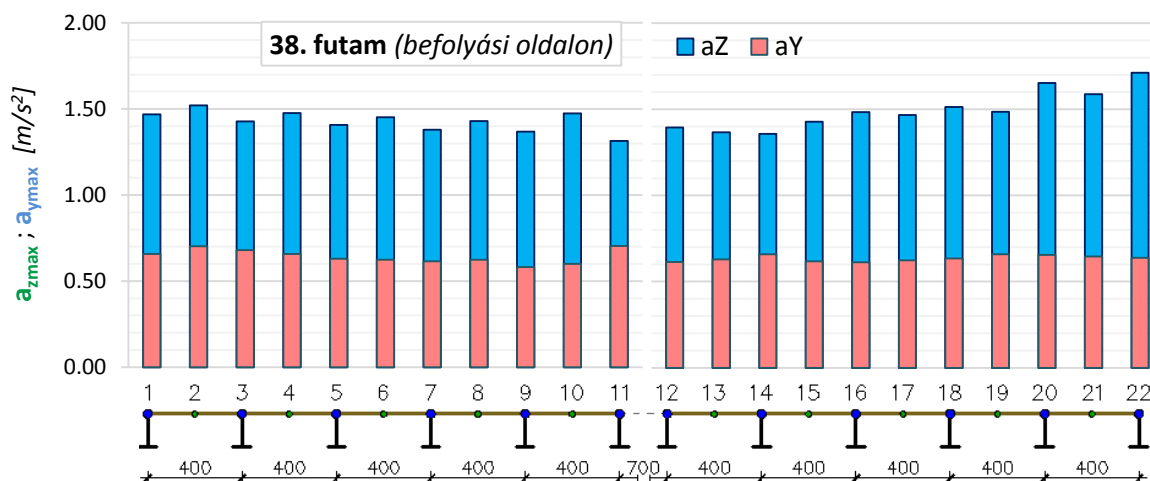
6.8a ábra – 13. futam eredményei

A féloldalas teherelrendezésű a 13, 20 és 38-as futamok (6.8a-b-c. ábrák) eredményei hatására a gyorsulások eloszlása a pallók mentén aszimmetrikus, valamelyik oldalra „lejtő” jelleget mutat, amely függ a csoport gerjesztésének intenzitásától és a haladás oldalától. A 13. futamnál a szimmetrikus 8. futamtól eltérően a csoport áthaladásához képest (*kifolyási oldal*) ellentétes oldalon érezhető a legalacsonyabb gyorsulás. A 20. Futamnál hasonló képpen a kifolyási oldalon halad a csoport, így a gyorsulási hisztogram a kifolyási oldal felé lejt. A 20. Futam hatására jelentősen felerősödnek a hossztartó közben érzékelhető gyorsulások, amely a WPC pallók alacsony rugalmassági modulusa miatt többé-kevésbé az összes futamnál megjelenik.



6.8b ábra – 20. futam eredményei

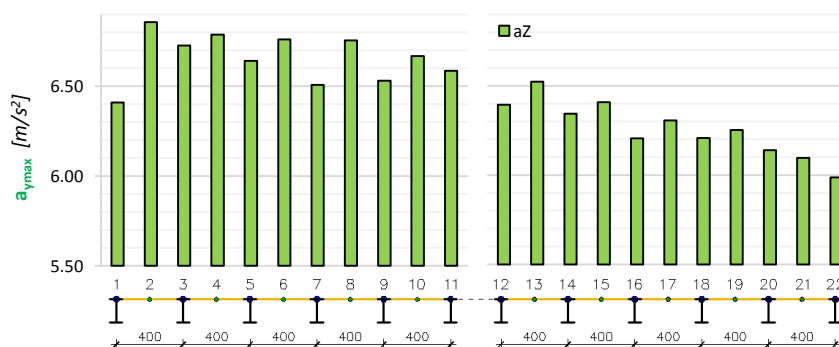
Érdekeség, hogy amennyiben a 80kg tömegpont helyett jóval nagyobb csomóponti tömeget (*extrém esetben több ezer kilogrammot*), valamint 2-3-szoros rugalmassági modulusú WPC gerendát alkalmazunk, a gerenda gyorsulás növelő hatása az ellenkezőjére is fordulhat, ami a gyorsulások csökkenését okozhatja a hossztartók között.



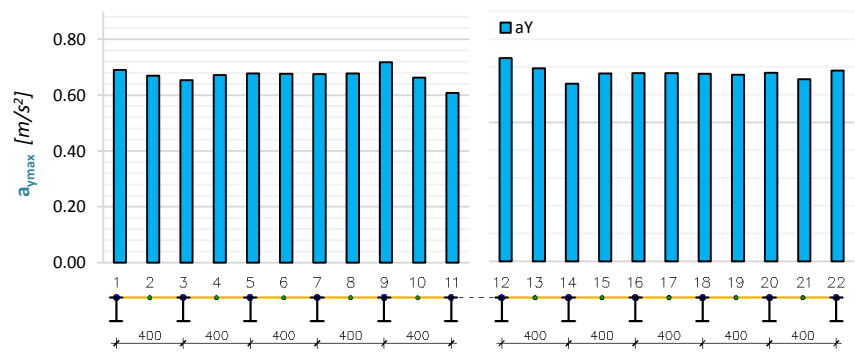
6.8c ábra – 38. futam eredményei

A 38. futamnál az előző kettő futamhoz hasonlóan a csoport áthaladásának oldalával ellentétes oldalon érzékelhető a maximális gyorsulás, azonban ebben az esetben a csoport a befolyási oldalon halad. A legkisebb gyorsulás ebben az esetben a szimmetrikus csoport elrendezéshez hasonlóan a pályalemez közepén érezhető.

- (2) A panel korábban említett inhomogén hajlító merevsége jellemzően a síkra merőleges irányában érvényesül, így a függőleges gyorsulások pontonként eltérő tendenciát mutatnak (6.9. ábra). A panel síkjában a szerkezet – a szélrácsokkal, hossz-, keresztartókkal és a burkolattal – merevített tárcsaként viselkedik, ezért a vízszintes gyorsulások (6.10. ábra) szórása a keresztmetszet mentén jóval kisebb, mint a síkra merőleges irányban.



6.9. ábra – Függőleges gyorsulások alakulása a keresztmetszet mentén (13. futam)



6.10. ábra – Vízszintes gyorsulások alakulása a keresztmetszet mentén (13. futam)

7. Összefoglalás

A Tiszavirág-híd gyalogos-dinamikai próbaterhelését követően az alábbi feladatokat végeztem el:

1. A próbaterhelési adatok feldolgozása és kiértékelése
2. A próbaterhelés során végrehajtott futamok modellezése a híd globális Midas modelljén az egyszerűsített gyalogos tehermodell alkalmazásával.
3. A globális analízis eredménye képpen a mért és numerikus sajátértékek/gyorsulások összevetésével verifikáltam a globális modell geometriai, dinamikai és teherbeállításait.
4. A globális modellen leválasztottam a lokális analízishez használt pályaszerkezeti panelt, amely sarokpontjain meghatároztam az eltolódásokat és elfordulásokat.
5. Az eredeti tervek alapján elkészíttem a panel részletes Ansys modelljét, amelyen tartalmazza a WPC (*fa-műanyag kompozit*) burkolatot. Emiatt a panel, síkjára merőlegesen inhomogén hajlítási merevséggel, míg síkjában közel homogén tárcsa merevséggel bír.
6. A panel sarokpontjaira a globális modellen meghatározott deformációkat kényszerelmozdulásként alkalmazom, így vizsgálom a panel keresztmetszetében érzékelhető különböző gyorsulásokat.
7. A vizsgálatok eredményeit ábrázolom és kiértékelem

A globális vizsgálatok eredményeit kiértékelve az alábbi következtetésekre jutottam:

- a. A Tiszavirág-híd gyalogos-dinamikai szempontból alacsony kockázatot jelent, mivel a hídon dinamikai próbaterhelést végeztek és csillapító berendezéseket és monitoring rendszert telepítettek. A csillapító berendezés hatására a híd globális szerkezeti csillapítása 2.7% körüli, amely magasnak tekinthető acél gyalogos hidak esetében.
- b. A globális modell sajátértékeire való számítás eredményei végeselemes programtól függetlenül és a modell geometriától függően pontosan közelítik próbaterhelés során mért értékeket.
- c. A híd dinamikai válasza és az abban domináns rezgésalakok a gyalogos csoport gerjesztő frekvenciájától függ. Amennyiben a gerjesztő frekvencia közel esik a híd valamelyik sajátfrekvenciájához, rezonancia jelenség lép fel. A valóságban változó paraméterek (*lépésfrekvencia, sebesség, csoporthossz, szinkronizáció*) miatt a rezonancia sokszor nem alakul ki, mivel a gerjesztés változó jellege miatt a gyalogosok gyengítik a kialakuló rezgéseket. Ugyanakkor, a numerikus analízisben a valóságban változó tényezők állandó

paraméterként szerepelnek, így kritikus lépésfrekvencia esetén a rezonancia mindig kialakul, a biztonság javára túlbecsülve ezzel a valóságban kialakuló gyorsulásokat.

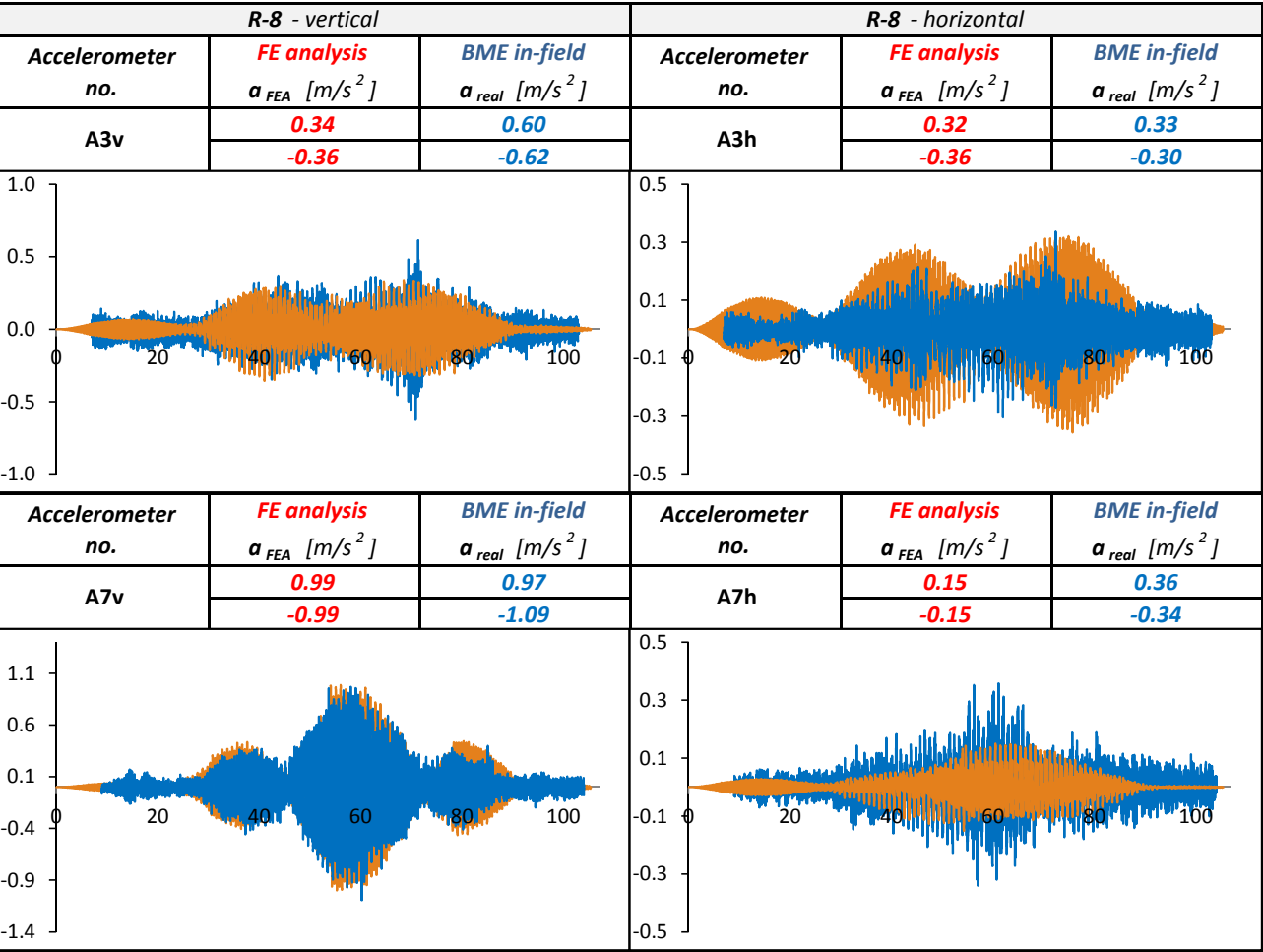
- d. A gyorsulások meghatározására mozgó dinamikai teherként használt egyszerűsített gyalogosmodellek általánosságban véve pontatlanok, alkalmazhatóságuk korlátozott. A függőleges irányú gyalogos teherre szélesebb körben találhatunk kísérletben meghatározott tényezőket, azonban a gyalogoshidak szempontjából kritikusnak vett vízszintes gyalogos terhek esetében részletes információ nem áll rendelkezésre. Ez előrevetíti a vízszintes gyalogos terhek jövőbeni részletes kísérleti vizsgálatát.
- e. A pályaszerkezeten alkalmazott rugalmas burkolat normális esetben csekély mértékben növeli a pályán érzékelhető függőleges gyorsulásokat, kivételes esetben azonban csökkentheti is.
- f. A rugalmas acél pályán és az azt borító rugalmas járófelületen alacsonyabb függőleges gyorsulási értékeket érzékelhetünk a pálya közepén, mint a merevebb helyeken (*peremgerendák és pályafelfüggesztések közelében*).
- g. A gyalogoshidak szempontjából kritikus vízszintes gyorsulások a pálya síkbeli tárcsamerevsége miatt kevésbé változnak a keresztmetszeten belül.
- h. A négy futam lokális vizsgálata alapján kiderül, hogy a függőleges gyorsulások minimális értékei *5-40%-al* lehetnek kisebbek a keresztmetszetben érzékelhető legnagyobb gyorsulásokhoz képest, amelyek jellemzően a merevebb pályaszéleken fordulnak elő. Mivel a próbaterhelésen résztvevő érzékelő személyek minden esetben a korlát mellett álltak, az általuk jellemzett komfort érték eltérő lehet (*jellemzően alacsonyabb*) a pálya közepén tapasztalható szinttől (*kissé magasabb komfort*).
- i. A tartó merevebb és lágyabb részeit a tervezés során érdemes kijelölni, mivel így meghatározható a pályaszerkezet gyorsulások szempontjából mértékadó pontja. A maximális gyorsulási érték miatti komfort szintet kis mértékben javítani lehet, ha figyelembe vesszük a pálya lágyabb részein kialakuló gyorsulási értékeket is, ezáltal meghatározva az inhomogén pályaszerkezetre vonatkozó „átlagos” komfort szintet.

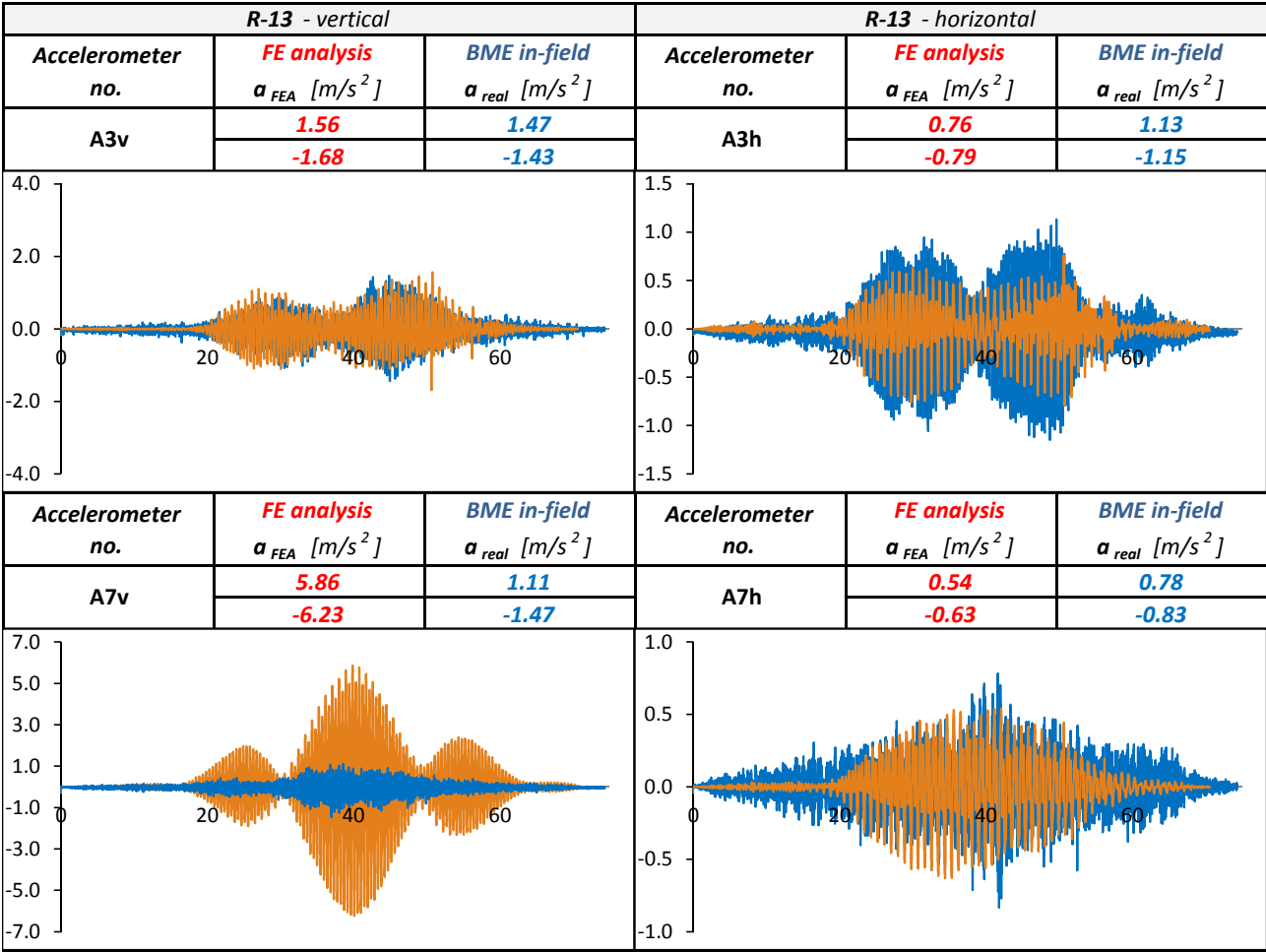
Irodalomjegyzék

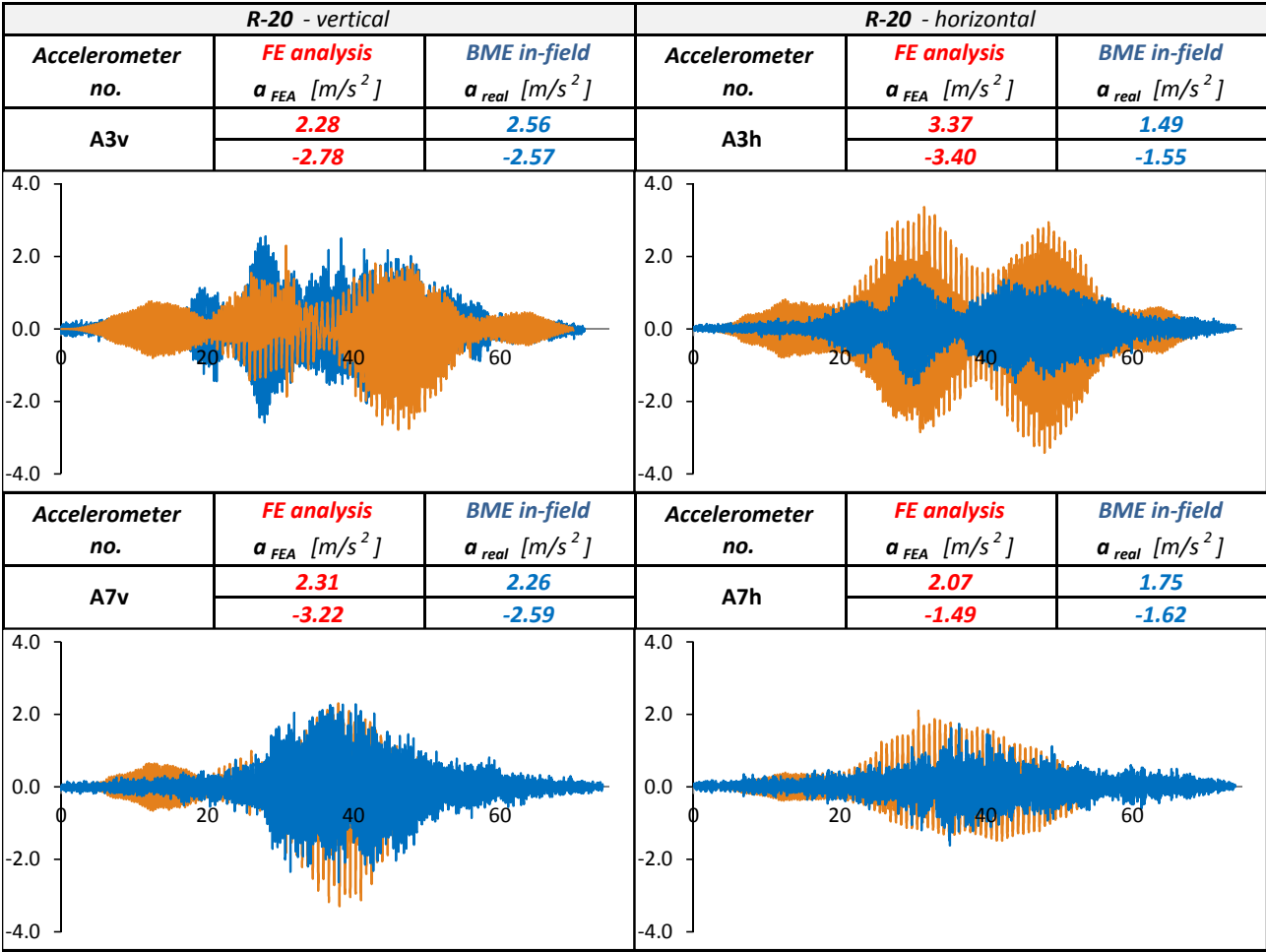
1. Dúzs, Gy., Fülöp, Sz., Pálossy, M., Szűcs, J. *Mayfly Footbridge in Szolnok - Design and construction of the longest pedestrian link in Hungary*, 6. Eurosteel Konferencia kiadványok, Budapest 2011., old.: 1437-1442.
2. Szolnoki Gyalogoshíd Blog. [Online] 2012. <http://www.szolnokigyalogoshid.hu/blog>.
3. Pálossy, M. *Az elkészült szolnoki gyalogos-kerékpáros híd*, MAGÉSZ - Acélszerkezetek. 2012., IX.. kötet, 2.
4. Vigh, G.L., Dunai, L., Kálló, M., Kövesdi, B., Kachichian, M. *A Tiszavirág-híd próbaterhelésének szakértői jelentése*, Hidak és Szerkezetek Tanszék, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Budapest, 2011.
5. *FIB Bulletin 32*. International Federation of Structural Concrete, Lausanne, 2005.
6. *Sétra Technical Guide for Footbridges*, French Association of Civil Engineering, Paris, 2006.
7. Butz, C., et al. *Advanced load models for synchronous pedestrian excitation and optimised design guidelines for steel footbridges*, SYNPEX project. 2007.
8. Zivanovic, S., Pavic, A. és Reynolds, P. *Vibration serviceability of footbridges under human-induced excitation - a literature review*, Journal of Sound and Vibration. 2005., 279, pp.: 1-74.
9. Venuti, F. és Bruno, L. *Crowd-structure interaction in lively footbridges under synchronous lateral excitation: A literature review*, Physics of Life Reviews, 2009, 6. kiadás, pp.: 176-206.
10. Bachmann, H., Pretlove, A.J. és Rainer, H. *Dynamic forces from rhythmical body motions*, Vibration problems in structures, Birkhäuser Verlag, Basel, 1995.
11. Deceuninck Ltd. [Online] 2012. <http://www.twinson.hu/doksik/terracetech.pdf>.
12. ANSYS Help. © 2010 SAS IP.

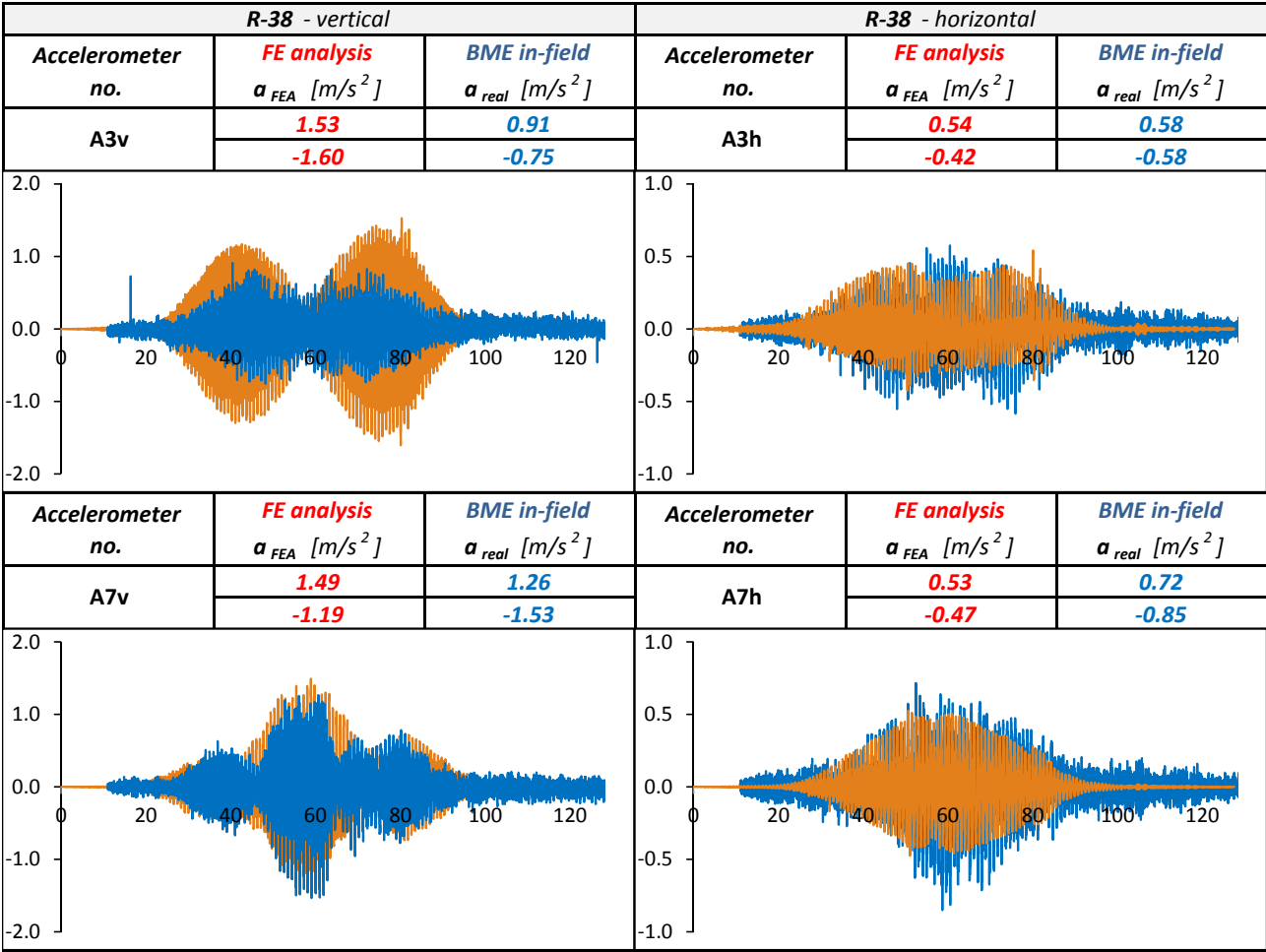
A. Melléklet – Gyorsulásdiagramok (Midas eredmények)

A. Melléklet - Gyorsulásdiagramok (Midas eredmények)









B. Melléklet – Ansys lokális modell bemeneti fájl

```

1  ! =====
2  ! B. Melléklet - ANSYS parancsfájl
3  ! =====
4  FINISH
5  /CLEAR, START
6  !/NERR,0,99999999,,0           !ne írjon hibaüzenetet
7
8  /FILENAME,Tiszavirag
9  /TITLE,Tiszavirag hid
10 /CONFIG,NRES,11000             !kibővíti a lehetséges substep-ek számát 11000-re!
11
12 /PREP7
13
14 node=287                       !"node"melyik node-on áll az emberünk (see node map!)
15
16 ! *****
17 ! Futamok adatai
18 ! *****
19
20 !R8 - 105.43s ; f=2.04Hz
21 !R13 - 70.67s ; f=2.17Hz
22 !R20 - 70.06s ; f=2.74Hz
23 !R38 - 127.50s ; f=2.32Hz
24
25 ! *****
26 ! Paraméterek definiálása
27 ! *****
28
29 TENDi=105.40                   !(R8) A futam végének ideje kerekítve
30 vonalhalo=100                 !háló elemméret [mm]
31 i=0.05                        !time increment
32 weight=0.08                   !személy súlya [tonna]
33
34 ! *****
35 ! Elemtípus, anyagmodell
36 ! *****
37
38 ET,1,BEAM188                  !összes rúdelem
39 ET,2,MASS21                   !tömegpont
40 KEYOPT,2,1,0
41 KEYOPT,2,2,0
42 KEYOPT,2,3,2
43 R,2,weight                    ![t]
44
45 ! *****
46 ! Anyagjellemzők definiálása
47 ! *****
48
49 !acél:
50 MPTEMP,,,,,,,,
51 MPTEMP,1,0
52 MPDATA,EX,1,,210000           ![MPa]
53 MPDATA,PRXY,1,,0.3           ![-]
54 !MPDATA,DENS,1,,7.85e-9       ![t/mm^3]
55 MPDATA,DMPR,1,,0.00159       !anyagi csillapítási mérték [-]
56
57 !WPC palló:
58 MPDATA,EX,2,,6000             ![MPa] szakirodalom alapján
59 MPDATA,PRXY,2,,0.32           ![-]
60 MPDATA,DENS,2,,1.7e-9         ![t/mm^3]
61 MPDATA,DMPR,2,,0.00589       !anyagi csillapítási mérték [-]
62
63 ! *****
64 ! Keresztmetszetek definiálása
65 ! *****
66
67 !Peremgerenda (0406-8)
68 SECTYPE,10,BEAM,CTUBE,EDGE,0
69 SECOFFSET,CENT                !a kulpontosság megadása
70 SECDATA,199,203,16
71 !Kereszttartó (IPE300)
72 SECTYPE,11,BEAM,I,IPE300,0
73 SECOFFSET,CENT
74 SECDATA,150,150,300,10.7,10.7,7.1
75 !Hossztartó (IPE140)
76 SECTYPE,12,BEAM,I,IPE140,0

```

```

77  SECOFFSET,USER,0,-10      !eltolas felfelé
78  SECDATA,73,73,140,6.9,4.7
79  !Szélrácssozás
80  SECTYPE,13,BEAM,CHAN,WIND,0
81  SECOFFSET,USER,0,100     !eltolas lefelé
82  SECDATA,50,50,100,8,8,8
83  !Channel deck
84  SECTYPE,14,BEAM,CHAN,CHD,0
85  SECOFFSET,USER,0,-50     !eltolas felfelé
86  SECDATA,50,50,100,8.5,8.5,6
87  !WPC palló
88  AREA=1720.9             !mm^2
89  Iyy=189169.0            !mm^4
90  Iyz=0                   !mm^4
91  Izz=2929857.0           !mm^4
92  Iw=171400000            !mm^6
93  J=537122.2              !mm^4
94  CGy=70                  !mm
95  CGz=14.05               !mm
96  SHy=70                  !mm
97  SHz=14.05               !mm
98  SECTYPE,15,BEAM,ASEC,WPC,0      !eredeti keresztmetszet alapján AxisVM programmal!
99  SECOFFSET,CENT
100 SECDATA,AREA,Iyy,Iyz,Izz,Iw,J,CGy,CGz,SHy,SHz
101
102 ! *****
103 ! Geometria létrehozása
104 ! *****
105
106 K,1,0,0,0
107 K,2,3000,0,0
108 K,3,6000,0,0
109 K,4,0,5400,0
110 K,5,3000,5400,0
111 K,6,6000,5400,0
112 K,7,0,350,0
113 K,8,1500,350,0
114 K,9,3000,350,0
115 K,10,6000,350,0
116 K,11,0,750,0
117 K,12,1500,750,0
118 K,13,3000,750,0
119 K,14,6000,750,0
120 K,15,0,1150,0
121 K,16,1500,1150,0
122 K,17,3000,1150,0
123 K,18,6000,1150,0
124 K,19,0,1550,0
125 K,20,1500,1550,0
126 K,21,3000,1550,0
127 K,22,6000,1550,0
128 K,23,0,1950,0
129 K,24,1500,1950,0
130 K,25,3000,1950,0
131 K,26,6000,1950,0
132 K,27,0,2350,0
133 K,28,700,2350,0
134 K,29,1500,2350,0
135 K,30,2300,2350,0
136 K,31,3000,2350,0
137 K,32,3700,2350,0
138 K,33,5300,2350,0
139 K,34,6000,2350,0
140 K,35,0,3050,0
141 K,36,700,3050,0
142 K,37,1500,3050,0
143 K,38,2300,3050,0
144 K,39,3000,3050,0
145 K,40,3700,3050,0
146 K,41,5300,3050,0
147 K,42,6000,3050,0
148 K,43,0,3450,0
149 K,44,1500,3450,0
150 K,45,3000,3450,0
151 K,46,6000,3450,0
152 K,47,0,3850,0

```

```

153 K,48,1500,3850,0
154 K,49,3000,3850,0
155 K,50,6000,3850,0
156 K,51,0,4250,0
157 K,52,1500,4250,0
158 K,53,3000,4250,0
159 K,54,6000,4250,0
160 K,55,0,4650,0
161 K,56,1500,4650,0
162 K,57,3000,4650,0
163 K,58,6000,4650,0
164 K,59,0,5050,0
165 K,60,1500,5050,0
166 K,61,3000,5050,0
167 K,62,6000,5050,0
168 K,63,0,2700,0
169 K,64,6000,2700,0
170
171 ! *****
172 ! Elemek létrehozása
173 ! *****
174
175 !Peremtartó
176 L,1,2
177 L,2,3
178 L,4,5
179 L,5,6
180 LATT,1,,1,,,,10
181 LESIZE,ALL,vonalhalo !halomeret megadása
182 LMESH,ALL
183 !Kereszttartó (IPE300)
184 L,1,7
185 L,7,11
186 L,11,15
187 L,15,19
188 L,19,23
189 L,23,27
190 L,27,63
191 L,63,35
192 L,35,43
193 L,43,47
194 L,47,51
195 L,51,55
196 L,55,59
197 L,59,4
198 L,2,9
199 L,9,13
200 L,13,17
201 L,17,21
202 L,21,25
203 L,25,31
204 L,31,39
205 L,39,45
206 L,45,49
207 L,49,53
208 L,53,57
209 L,57,61
210 L,61,5
211 L,3,10
212 L,10,14
213 L,14,18
214 L,18,22
215 L,22,26
216 L,26,34
217 L,34,64
218 L,64,42
219 L,42,46
220 L,46,50
221 L,50,54
222 L,54,58
223 L,58,62
224 L,62,6
225 LATT,1,,1,,,,11
226 LESIZE,ALL,vonalhalo !halomeret megadása
227 LMESH,ALL
228 !Hossztartók (IPE140)

```

```
229 L,7,8
230 L,8,9
231 L,9,10
232 L,11,12
233 L,12,13
234 L,13,14
235 L,15,16
236 L,16,17
237 L,17,18
238 L,19,20
239 L,20,21
240 L,21,22
241 L,23,24
242 L,24,25
243 L,25,26
244 L,27,28
245 L,28,29
246 L,29,30
247 L,30,31
248 L,31,32
249 L,32,33
250 L,33,34
251 L,35,36
252 L,36,37
253 L,37,38
254 L,38,39
255 L,39,40
256 L,40,41
257 L,41,42
258 L,43,44
259 L,44,45
260 L,45,46
261 L,47,48
262 L,48,49
263 L,49,50
264 L,51,52
265 L,52,53
266 L,53,54
267 L,55,56
268 L,56,57
269 L,57,58
270 L,59,60
271 L,60,61
272 L,61,62
273 LATT,1,,1,,,,,12
274 LESIZE,ALL,vonalhalo !halomeret megadása
275 LMESH,ALL
276 !Szélrács
277 L,63,5
278 L,5,64
279 L,64,2
280 L,2,63
281 LATT,1,,1,,,,,13
282 LESIZE,ALL,vonalhalo !halomeret megadása
283 LMESH,ALL
284 !Channel deck
285 L,28,36
286 L,30,38
287 L,32,40
288 L,33,41
289 LATT,1,,1,,,,,14
290 LESIZE,ALL,vonalhalo !halomeret megadása
291 LMESH,ALL
292 !WPC burkolat
293 L,8,12
294 L,12,16
295 L,16,20
296 L,20,24
297 L,24,29
298 L,37,44
299 L,44,48
300 L,48,52
301 L,52,56
302 L,56,60
303 LATT,2,,1,,,,,15
304 LESIZE,ALL,vonalhalo !halomeret megadása
```

```

305         LMESH, ALL
306 ALLSEL, ALL
307 NUMMRG, ALL, , , , LOW
308
309 ! *****
310 ! tömegpont hozzárendelés
311 ! *****
312
313 ALLSEL, ALL
314 TYPE, 2
315 REAL, 2
316 E, node
317 ALLSEL, ALL
318 !/ESHAPE, 1
319 /eof
320 ! *****
321 ! tamaszelmozdulások táblázatba (ITT ÁT KELL ÍRNI A MAPPA NEVÉT A FUTAM SZERINT)
322 ! *****
323
324 !1.keypoint elmozdulásai (t=0.05 -> TENDi):
325 *DIM, X1, TABLE, 2100, 1, TIME
326 *TREAD, X1, D:\TDK\8\x1, txt, ,
327 *DIM, Y1, TABLE, 2100, 1, 1, TIME
328 *TREAD, Y1, D:\TDK\8\y1, txt, ,
329 *DIM, Z1, TABLE, 2100, 1, 1, TIME
330 *TREAD, Z1, D:\TDK\8\z1, txt, ,
331 *DIM, RX1, TABLE, 2100, 1, 1, TIME
332 *TREAD, RX1, D:\TDK\8\rx1, txt, ,
333 *DIM, RY1, TABLE, 2100, 1, 1, TIME
334 *TREAD, RY1, D:\TDK\8\ry1, txt, ,
335 *DIM, RZ1, TABLE, 2100, 1, 1, TIME
336 *TREAD, RZ1, D:\TDK\8\rz1, txt, ,
337
338 !3.keypoint elmozdulásai (t=0.05 -> TENDi):
339 *DIM, X3, TABLE, 2100, 1, 1, TIME
340 *TREAD, X3, D:\TDK\8\x3, txt, ,
341 *DIM, Y3, TABLE, 2100, 1, 1, TIME
342 *TREAD, Y3, D:\TDK\8\y3, txt, ,
343 *DIM, Z3, TABLE, 2100, 1, 1, TIME
344 *TREAD, Z3, D:\TDK\8\z3, txt, ,
345 *DIM, RX3, TABLE, 2100, 1, 1, TIME
346 *TREAD, RX3, D:\TDK\8\rx3, txt, ,
347 *DIM, RY3, TABLE, 2100, 1, 1, TIME
348 *TREAD, RY3, D:\TDK\8\ry3, txt, ,
349 *DIM, RZ3, TABLE, 2100, 1, 1, TIME
350 *TREAD, RZ3, D:\TDK\8\rz3, txt, ,
351
352 !4.keypoint elmozdulásai (t=0.05 -> TENDi):
353 *DIM, X4, TABLE, 2100, 1, 1, TIME
354 *TREAD, X4, D:\TDK\8\x4, txt, ,
355 *DIM, Y4, TABLE, 2100, 1, 1, TIME
356 *TREAD, Y4, D:\TDK\8\y4, txt, ,
357 *DIM, Z4, TABLE, 2100, 1, 1, TIME
358 *TREAD, Z4, D:\TDK\8\z4, txt, ,
359 *DIM, RX4, TABLE, 2100, 1, 1, TIME
360 *TREAD, RX4, D:\TDK\8\rx4, txt, ,
361 *DIM, RY4, TABLE, 2100, 1, 1, TIME
362 *TREAD, RY4, D:\TDK\8\ry4, txt, ,
363 *DIM, RZ4, TABLE, 2100, 1, 1, TIME
364 *TREAD, RZ4, D:\TDK\8\rz4, txt, ,
365
366 !6.keypoint elmozdulásai (t=0.05 -> TENDi):
367 *DIM, X6, TABLE, 2100, 1, 1, TIME
368 *TREAD, X6, D:\TDK\8\x6, txt, ,
369 *DIM, Y6, TABLE, 2100, 1, 1, TIME
370 *TREAD, Y6, D:\TDK\8\y6, txt, ,
371 *DIM, Z6, TABLE, 2100, 1, 1, TIME
372 *TREAD, Z6, D:\TDK\8\z6, txt, ,
373 *DIM, RX6, TABLE, 2100, 1, 1, TIME
374 *TREAD, RX6, D:\TDK\8\rx6, txt, ,
375 *DIM, RY6, TABLE, 2100, 1, 1, TIME
376 *TREAD, RY6, D:\TDK\8\ry6, txt, ,
377 *DIM, RZ6, TABLE, 2100, 1, 1, TIME
378 *TREAD, RZ6, D:\TDK\8\rz6, txt, ,
379
380 ! *****

```

```

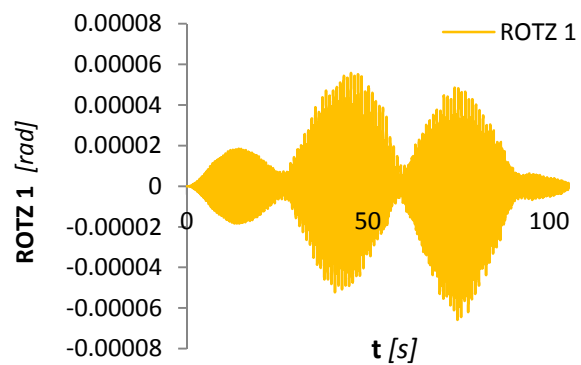
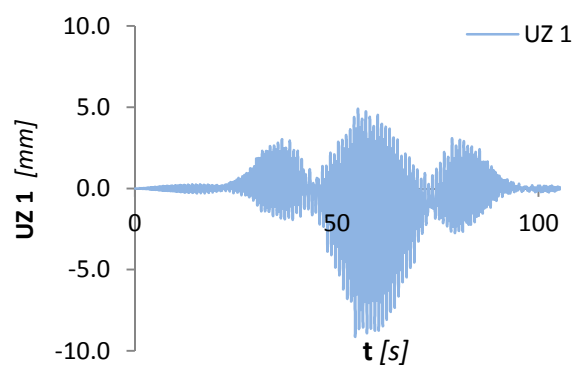
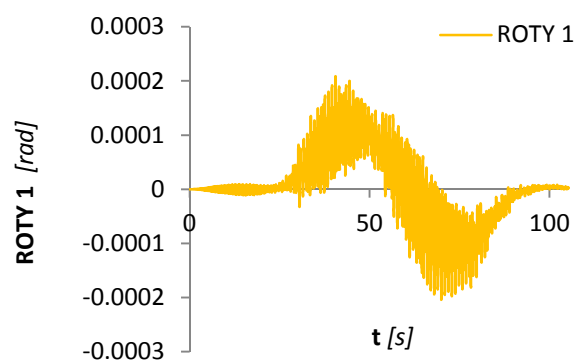
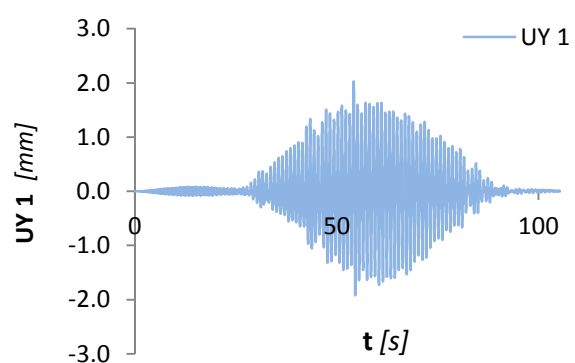
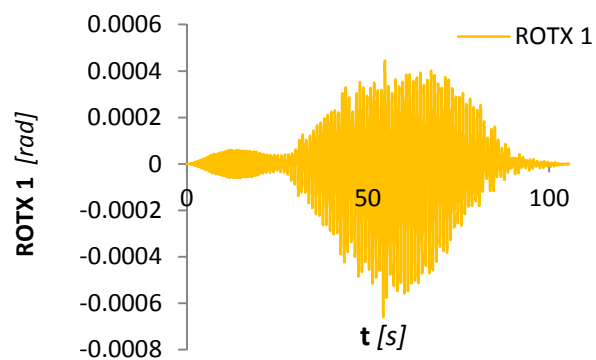
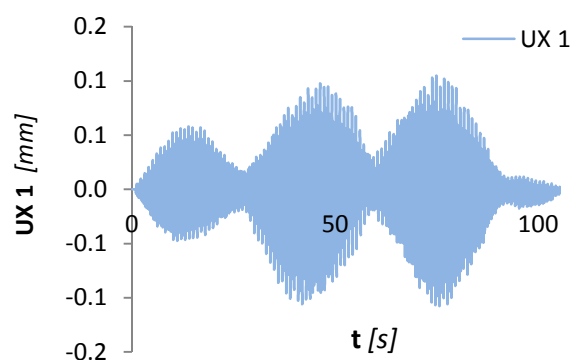
381 ! Statikus megoldó rész, csak önsúllyal!
382 ! *****
383
384 /SOLU
385
386 ! *****
387 ! Tranziens analízis!
388 ! *****
389
390 ALLSEL,ALL
391 ANTYPE,TRANS !Transient analysis
392 KBC,1
393 TRNOPT,FULL !Full transient analysis
394 LUMPM,OFF !Lump mass matrix composition is OFF
395 TIMINT,ON,STRUCT !Transient analysis effects ON
396 ALLSEL,ALL
397
398 TIME,TENDi
399 DELTIM,i,,,ON,
400
401 D,1,UX,%X1% !elmozdulásfüggvények X-irányban
402 D,32,UX,%X3%
403 D,62,UX,%X4%
404 D,93,UX,%X6%
405 D,1,ROTX,%RX1%
406 D,32,ROTX,%RX3%
407 D,62,ROTX,%RX4%
408 D,93,ROTX,%RX6%
409 D,1,UY,%Y1% !elmozdulásfüggvények Y-irányban
410 D,32,UY,%Y3%
411 D,62,UY,%Y4%
412 D,93,UY,%Y6%
413 D,1,ROTY,%RY1%
414 D,32,ROTY,%RY3%
415 D,62,ROTY,%RY4%
416 D,93,ROTY,%RY6%
417 D,1,UZ,%Z1% !elmozdulásfüggvények Z-irányban.
418 D,32,UZ,%Z3%
419 D,62,UZ,%Z4%
420 D,93,UZ,%Z6%
421 D,1,ROTZ,%RZ1%
422 D,32,ROTZ,%RZ3%
423 D,62,ROTZ,%RZ4%
424 D,93,ROTZ,%RZ6%
425
426 OUTRES,ALL,ALL
427 SOLVE
428
429 ! *****
430 ! Eredmények, gyorsulásdiagramok (aY-time / aZ-time)
431 ! *****
432
433 /POST26
434
435 ALLSEL,ALL
436 NSOL,2,node,A,Z,aZ
437 STORE,MERGE
438 ALLSEL,ALL
439 NSOL,3,node,A,Y,aY
440 STORE,MERGE
441 ALLSEL,ALL
442 XVAR,1
443 PLVAR,2,3,
444 /XRANGE,0,TENDi
445 /YRANGE,-1400,1400
446 /AXLAB,X,t[s]
447 /AXLAB,Y,aZ,aY [mm/s^2]
448 /REPLOTT
449
450 EXTREM,1,3,1,
451 FINISH

```

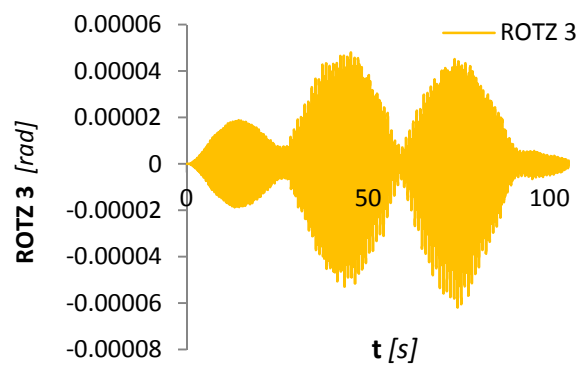
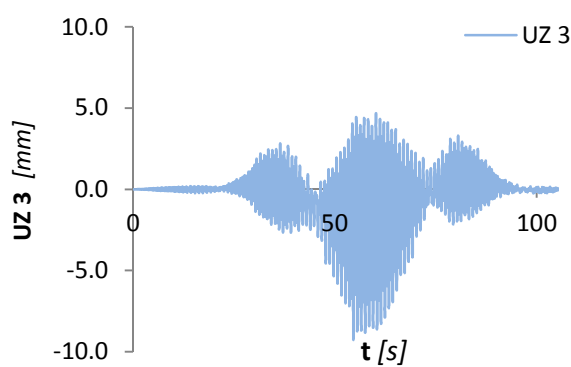
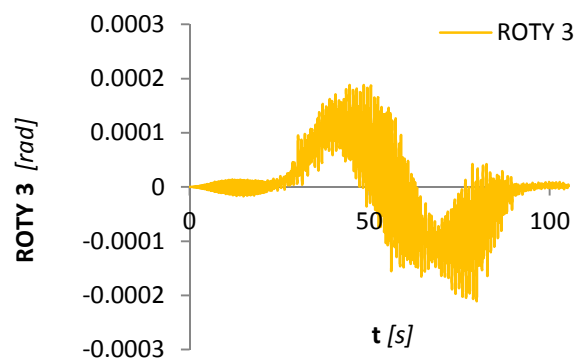
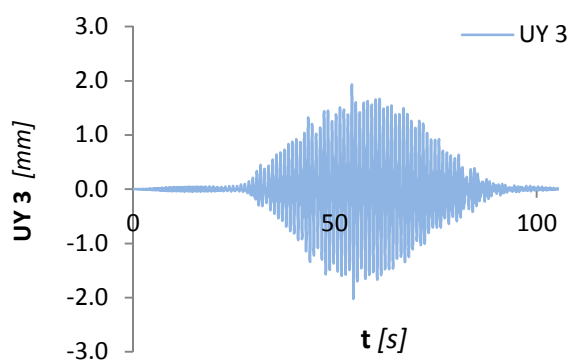
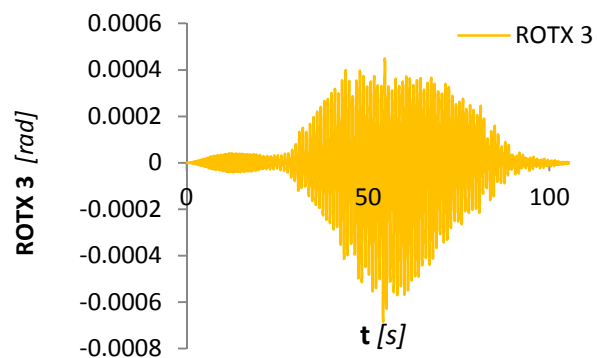
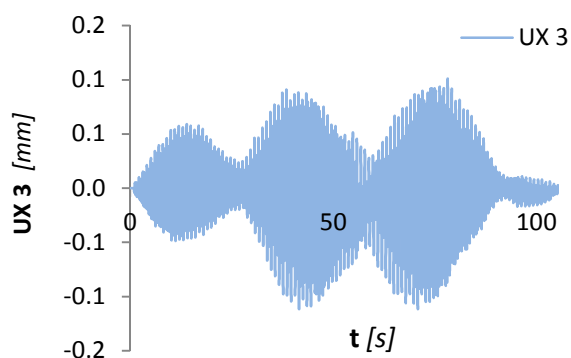
C. Melléklet – Elmozdulás kényszer diagramok

C. Melléklet - Elmozdulás kényszer diagramok (Midas eredmények)

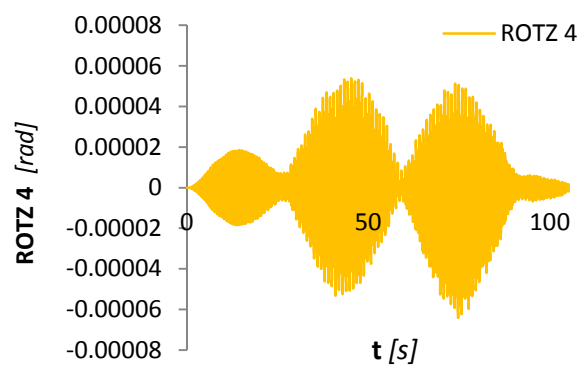
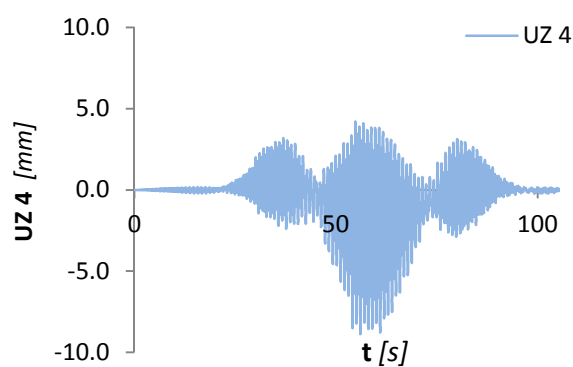
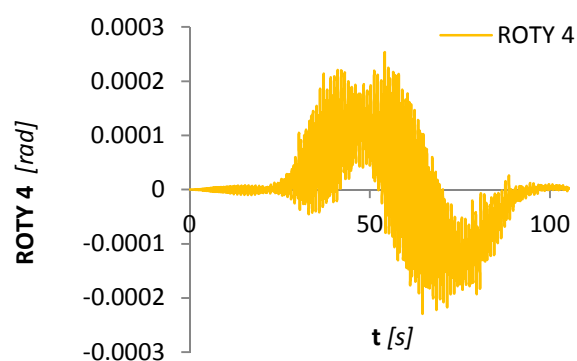
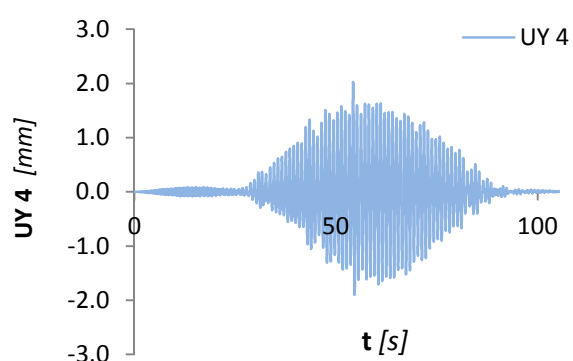
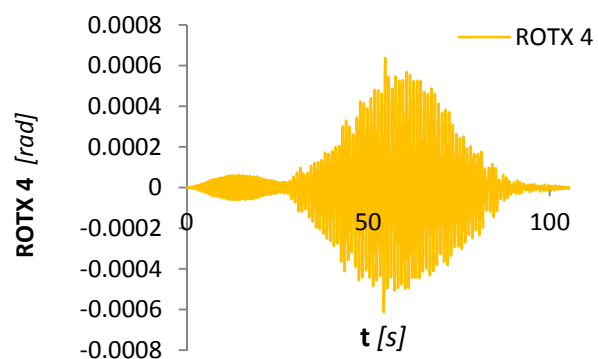
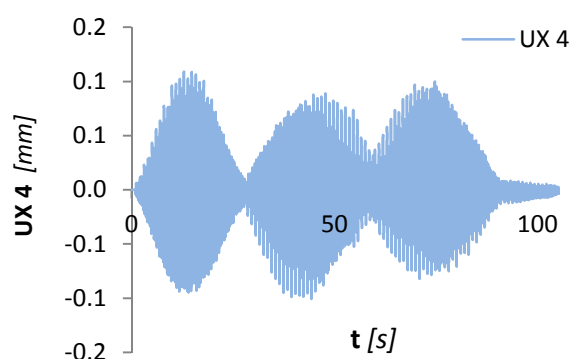
8. Futam - Keypoint 1 elmozdulás kényszerek



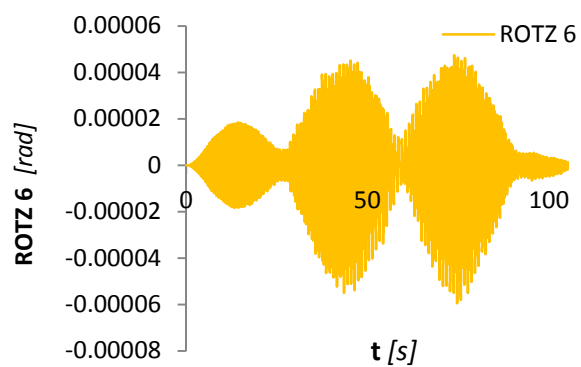
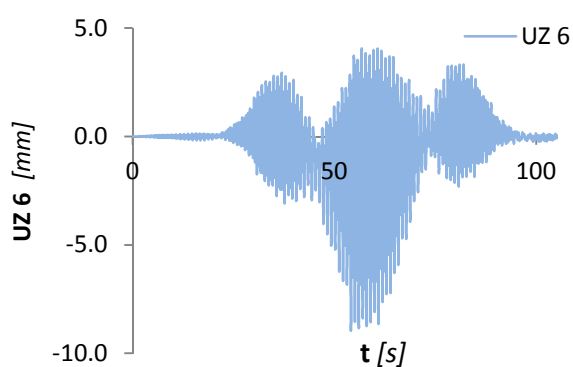
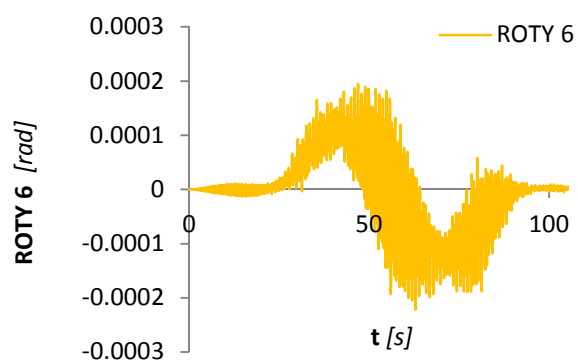
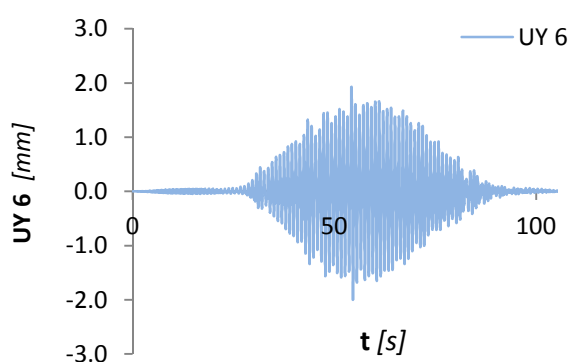
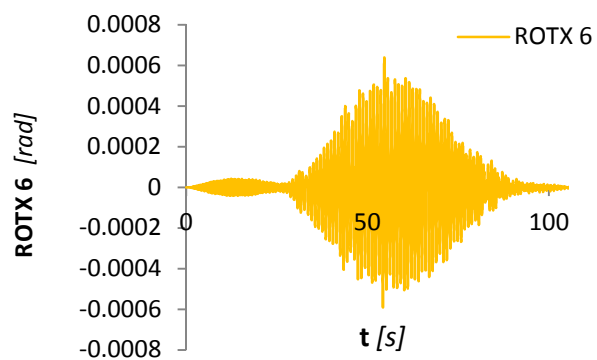
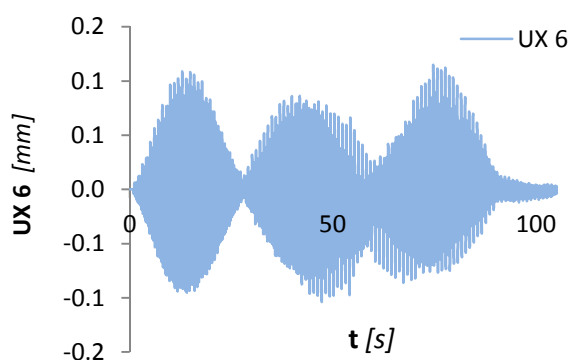
8. Futam - Keypoint 3 elmozdulás kényszerek



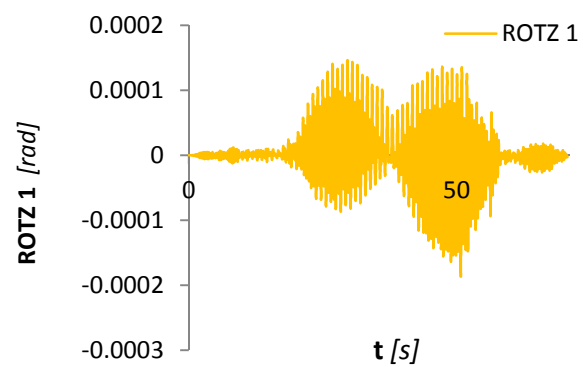
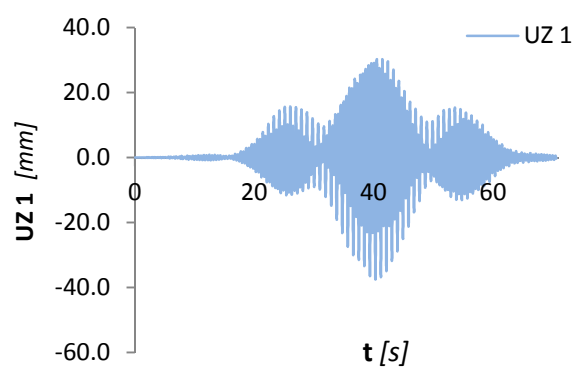
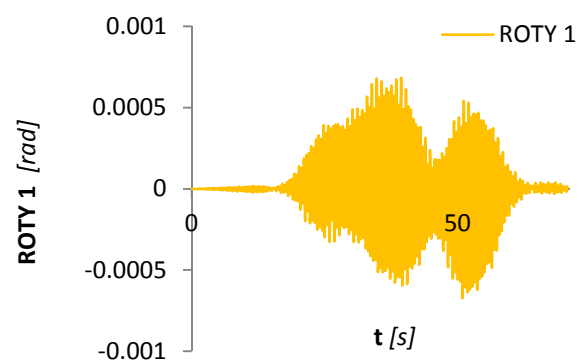
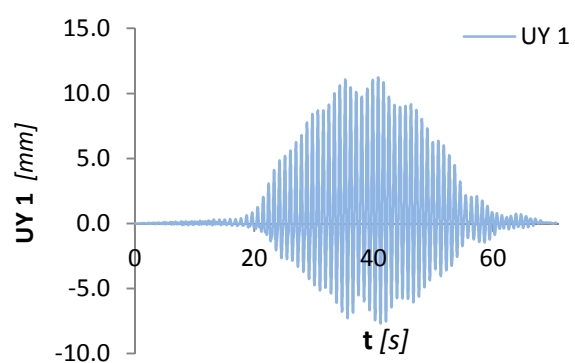
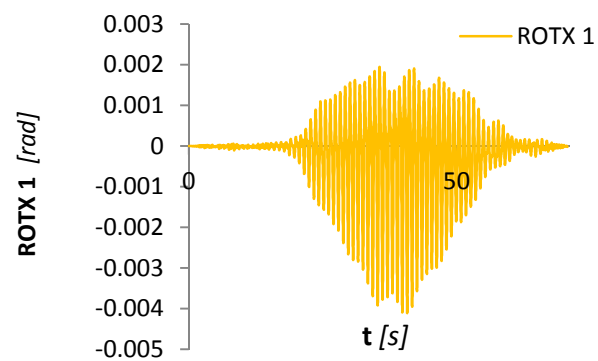
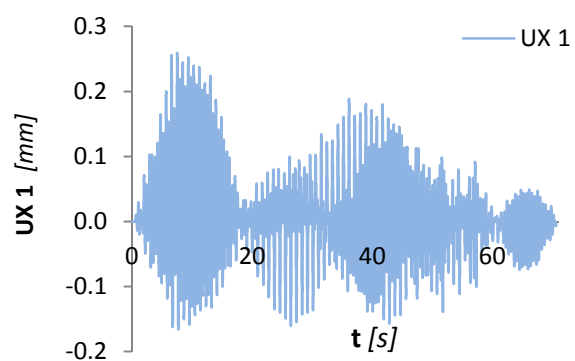
8. Futam - Keypoint 4 elmozdulás kényszerek



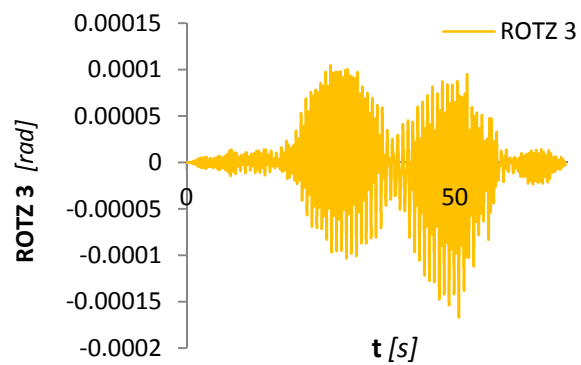
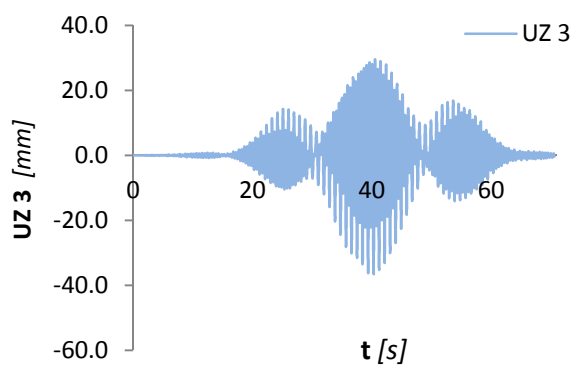
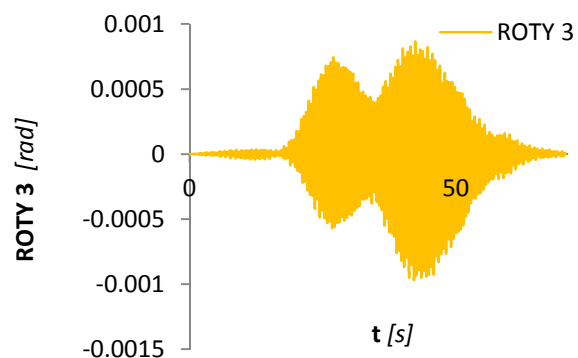
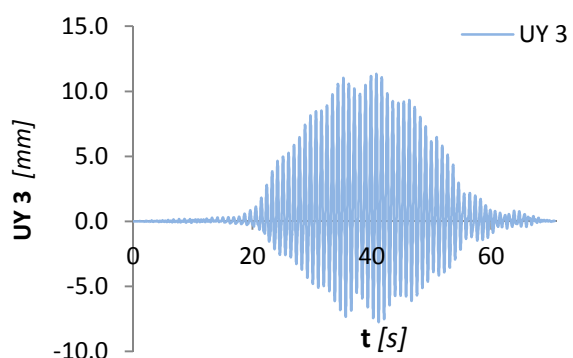
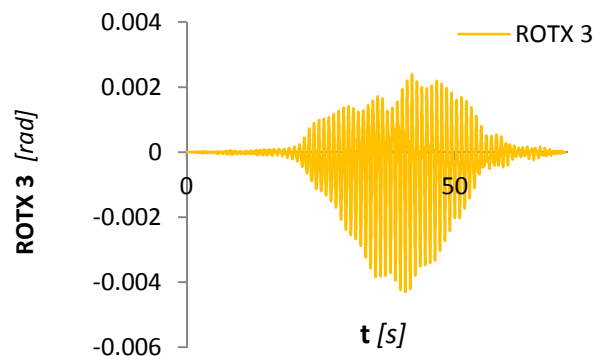
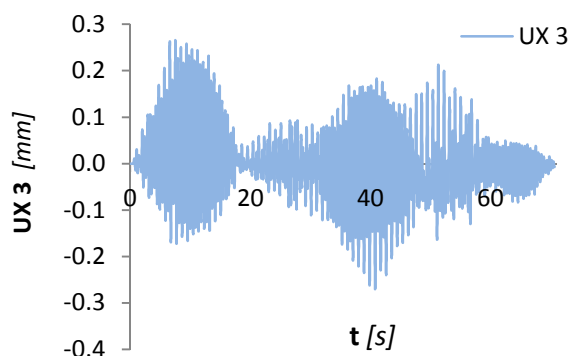
8. Futam - Keypoint 6 elmozdulás kényszerek



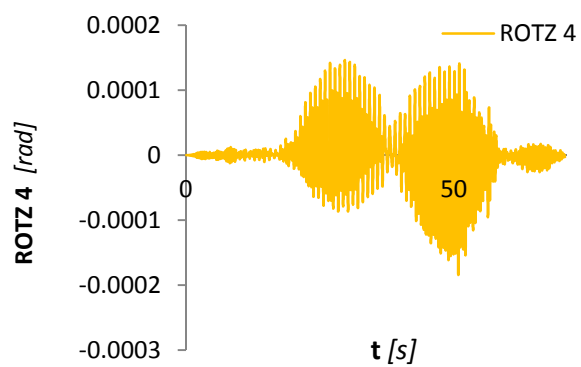
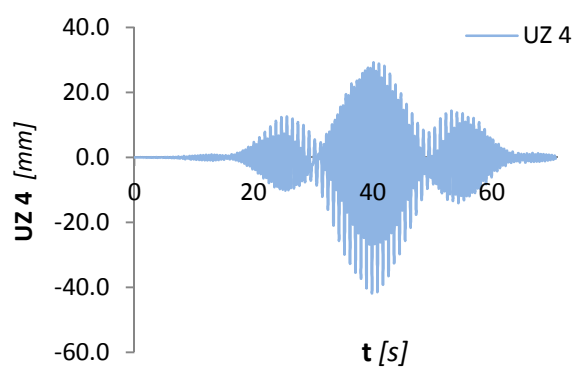
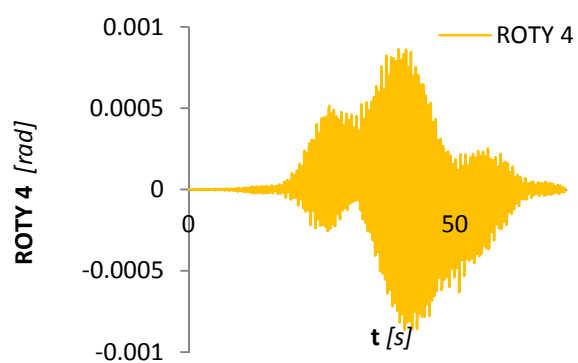
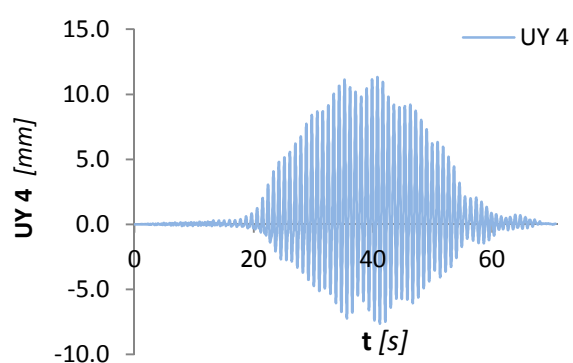
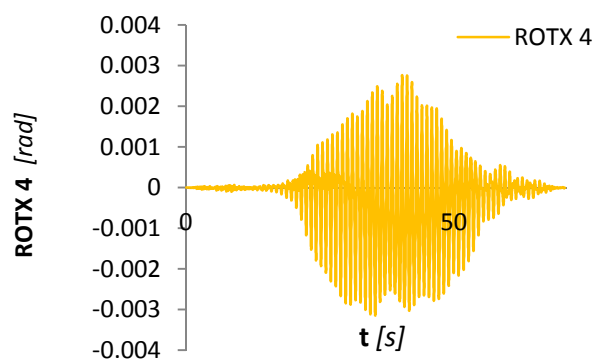
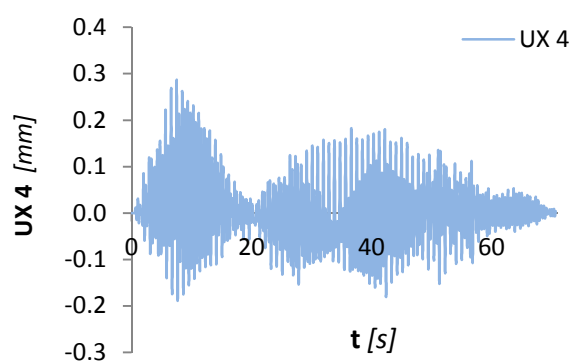
13. Futam - Keypoint 1 elmozdulás kényszerek



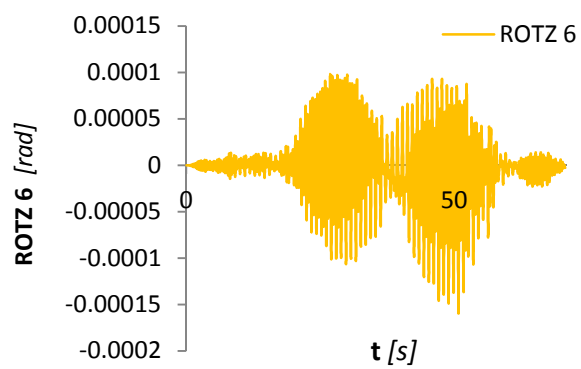
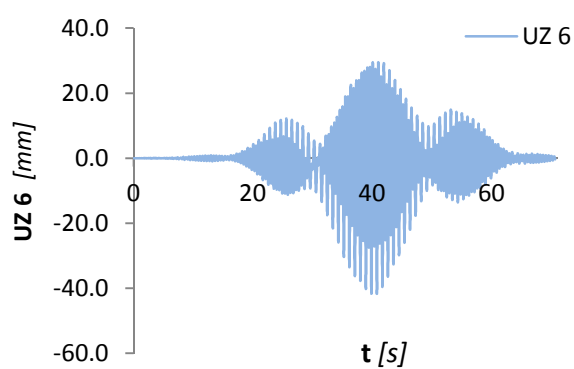
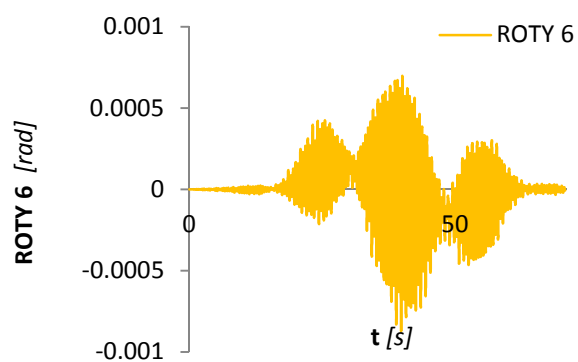
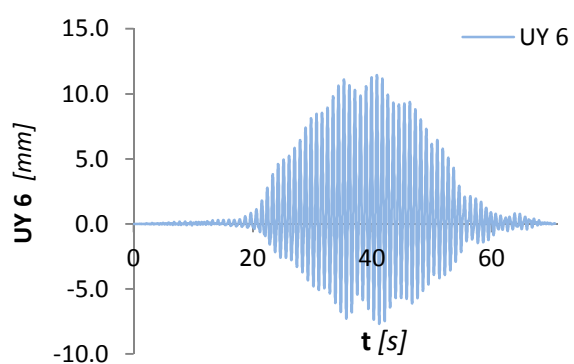
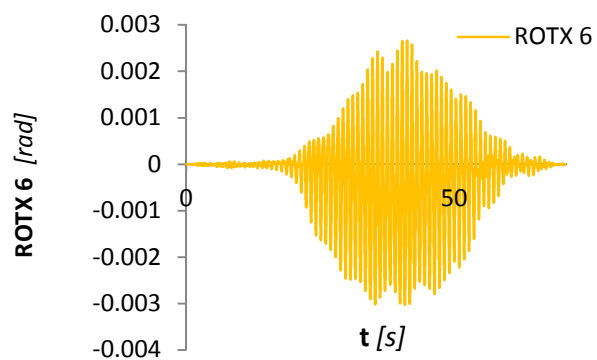
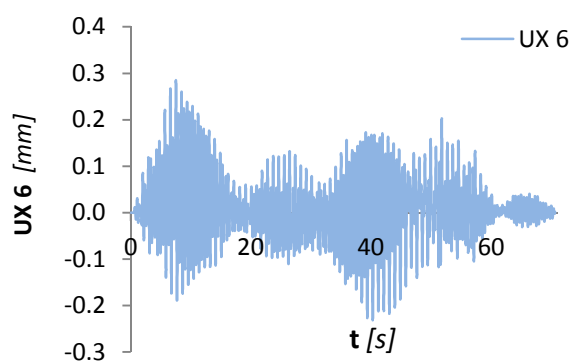
13. Futam - Keypoint 3 elmozdulás kényszerek



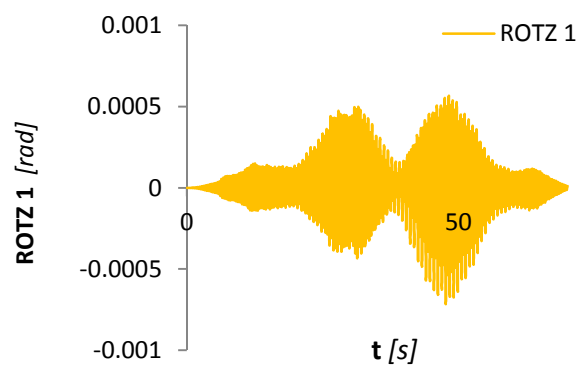
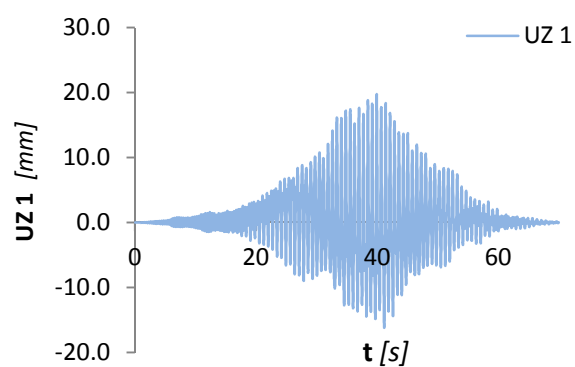
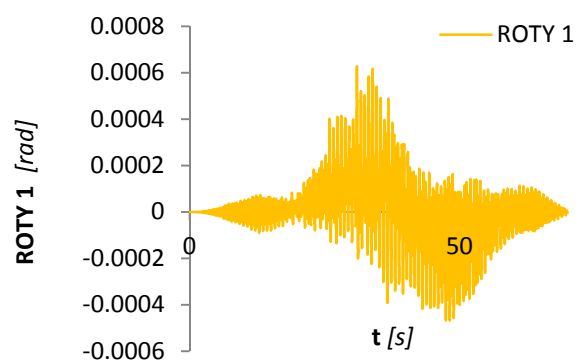
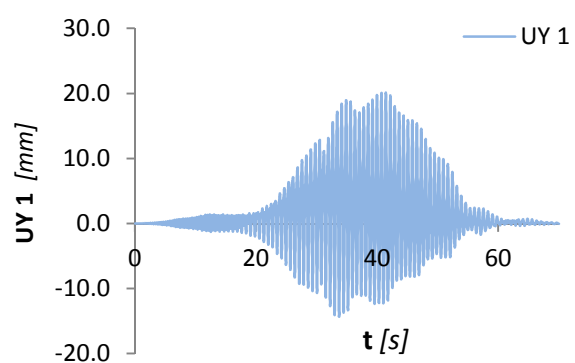
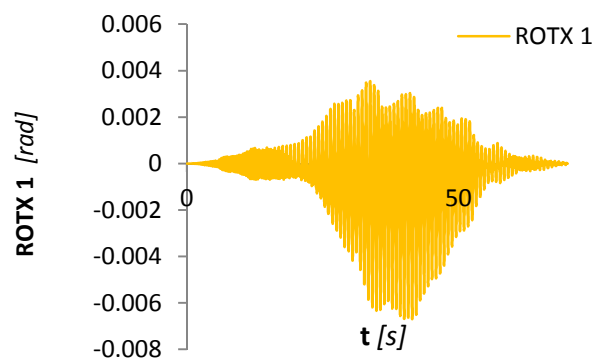
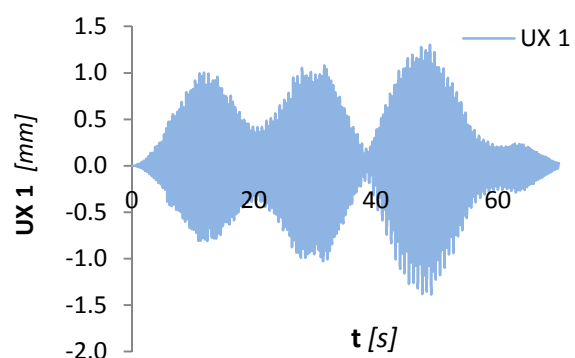
13. Futam - Keypoint 4 elmozdulás kényszerek



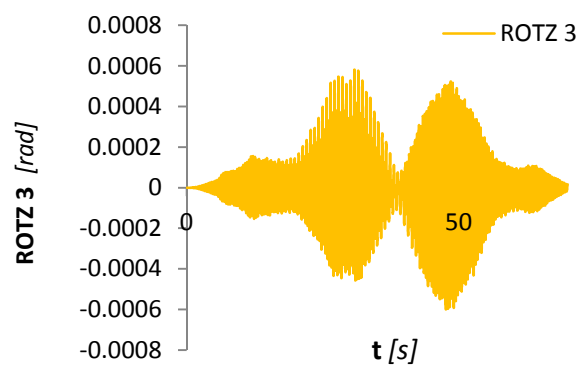
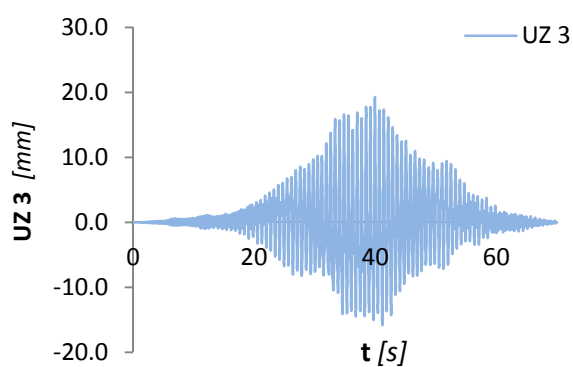
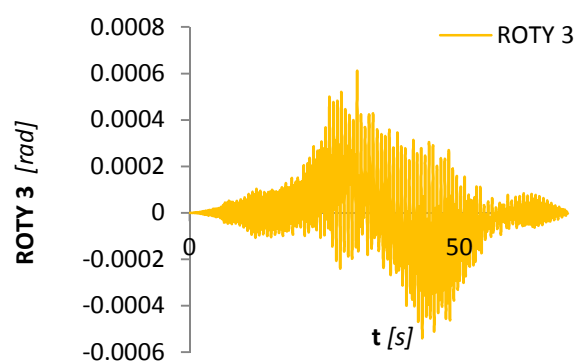
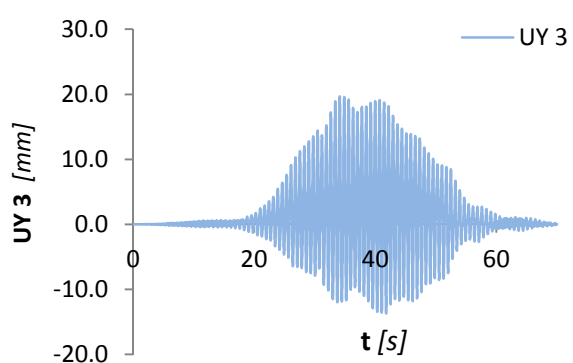
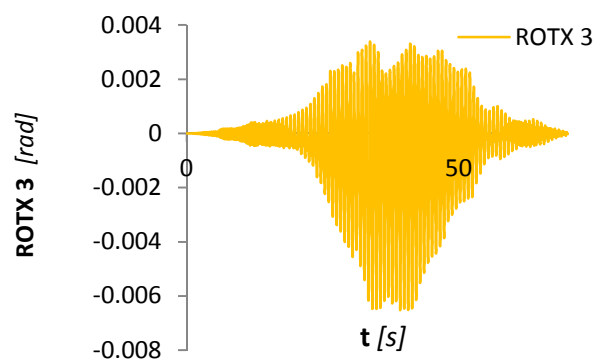
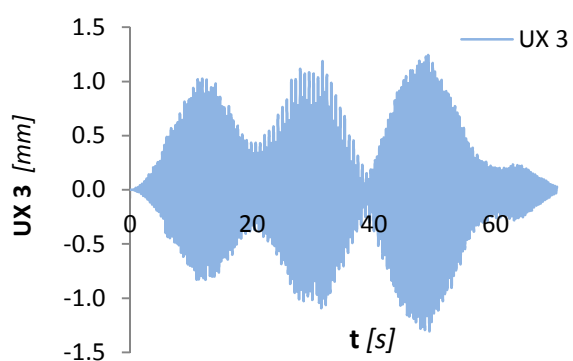
13. Futam - Keypoint 6 elmozdulás kényszerek



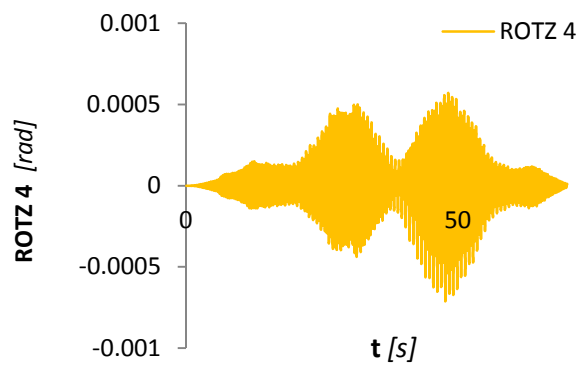
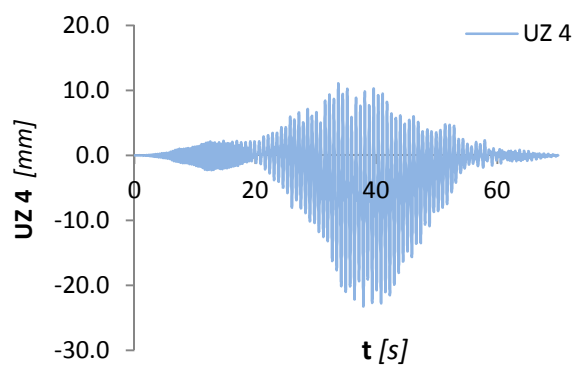
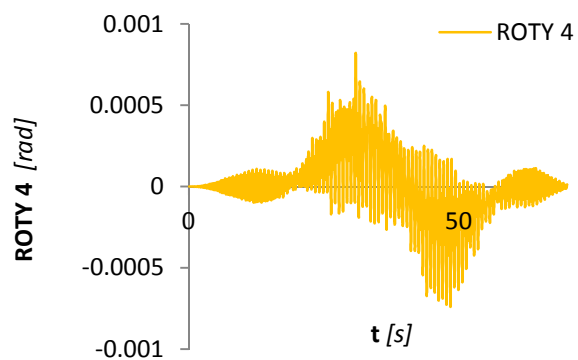
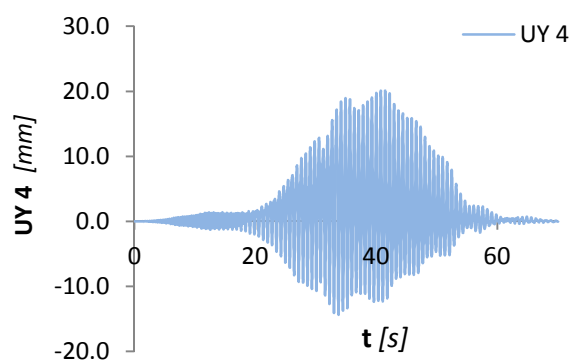
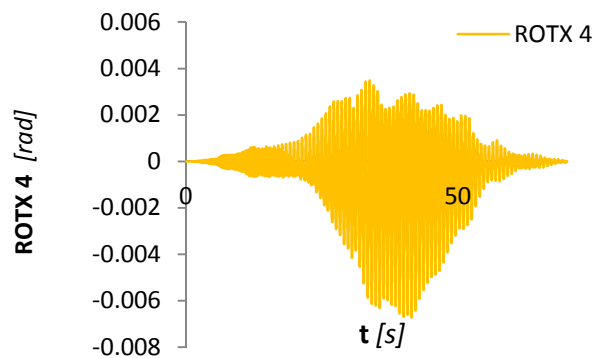
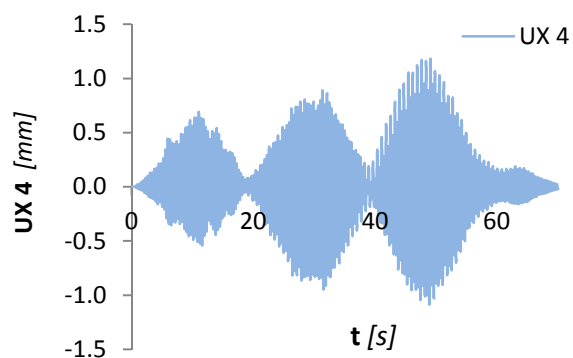
20. Futam - Keypoint 1 elmozdulás kényszerek



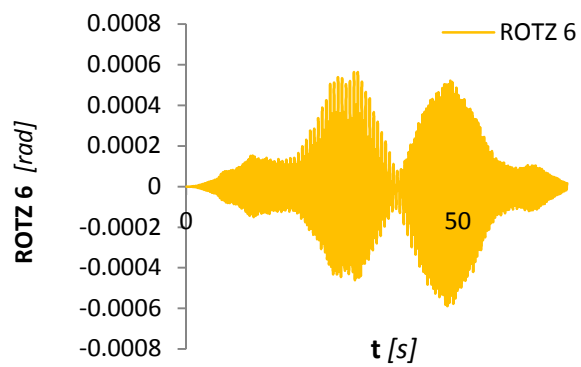
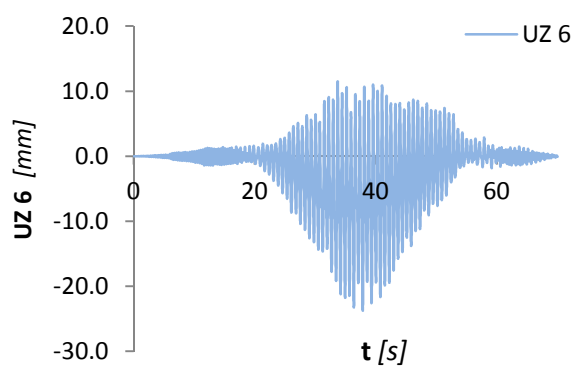
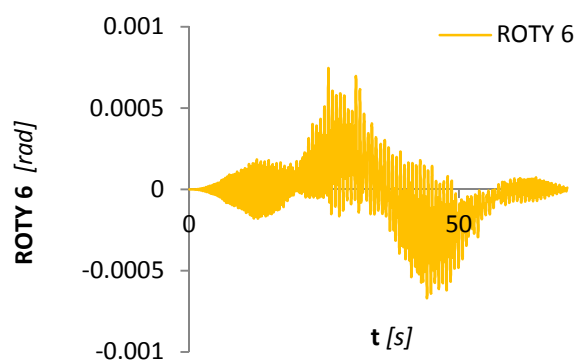
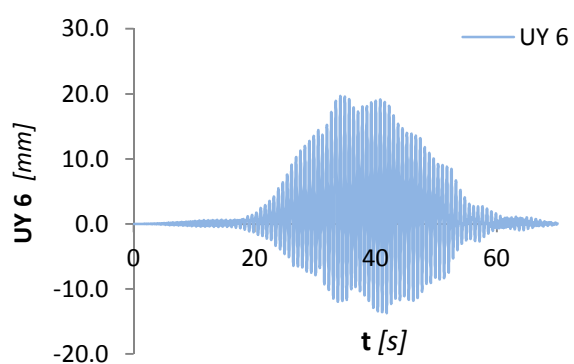
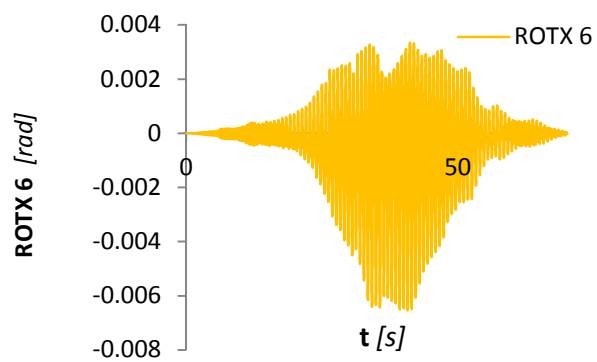
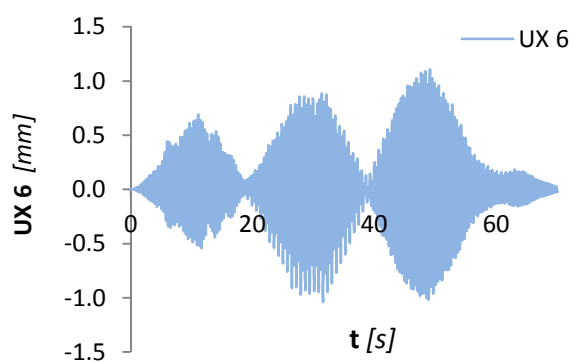
20. Futam - Keypoint 3 elmozdulás kényszerek



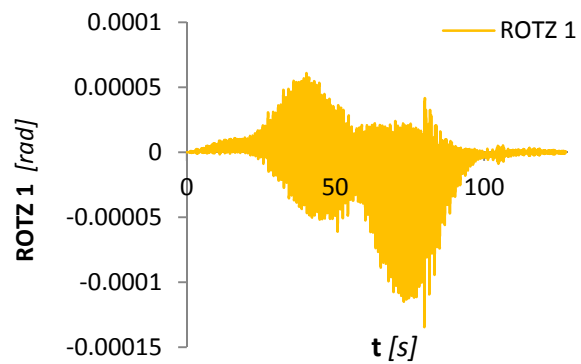
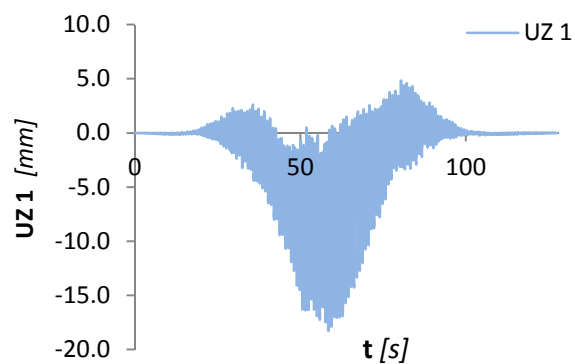
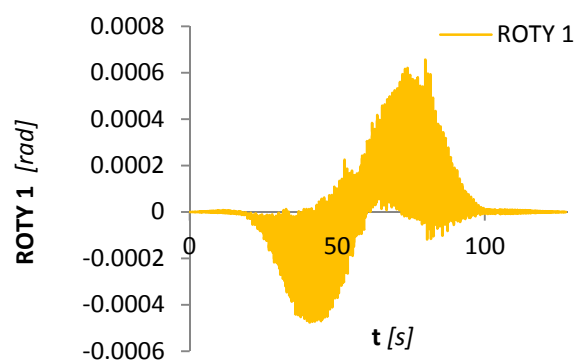
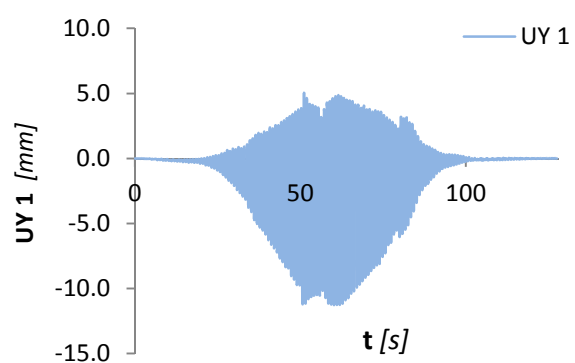
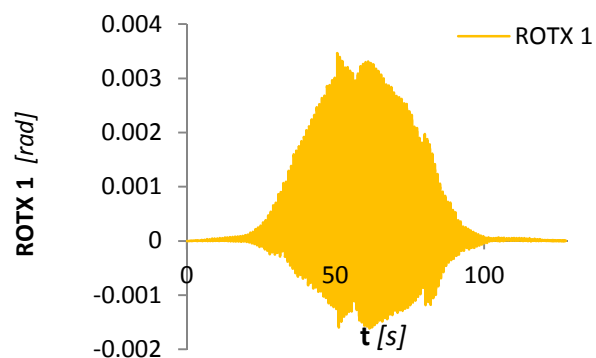
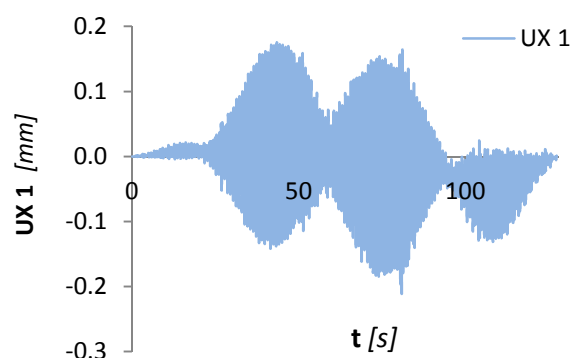
20. Futam - Keypoint 4 elmozdulás kényszerek



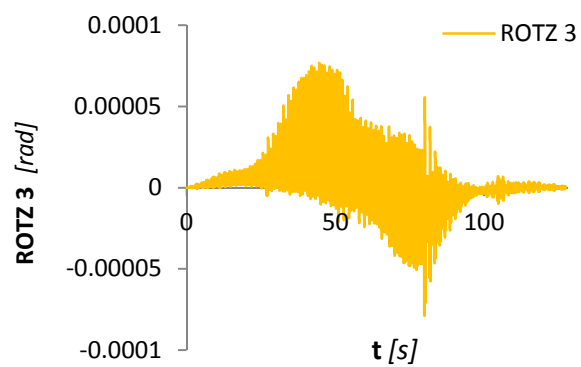
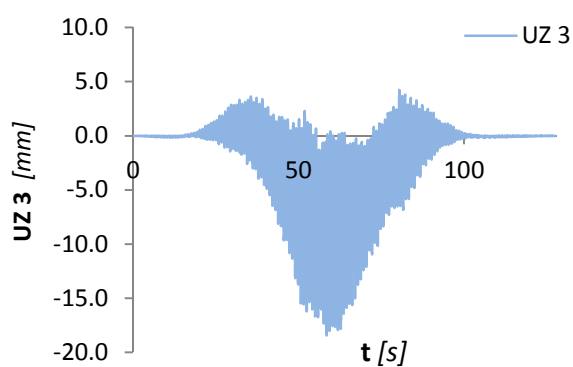
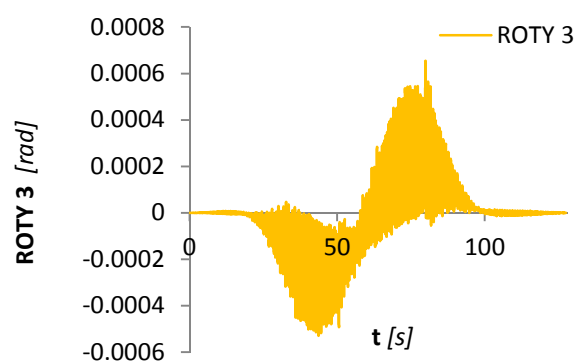
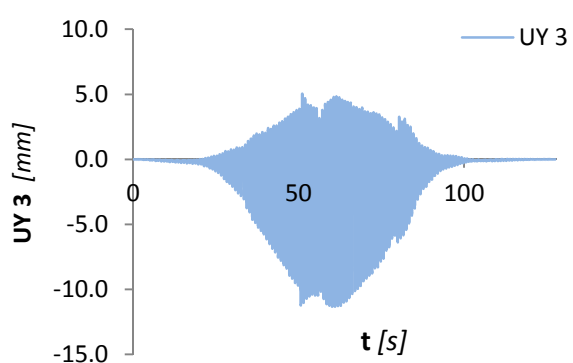
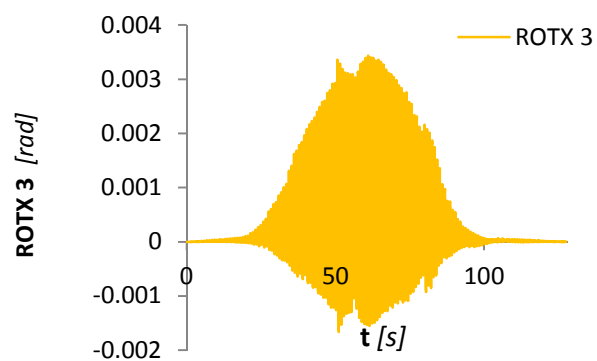
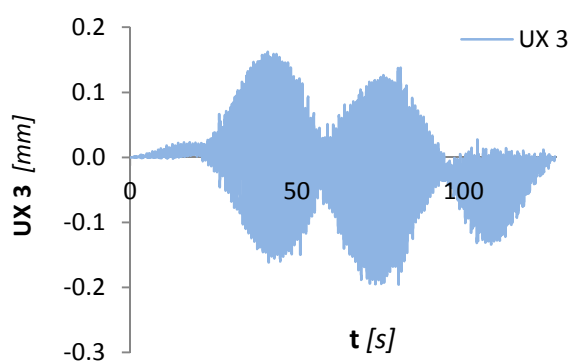
20. Futam - Keypoint 6 elmozdulás kényszerek



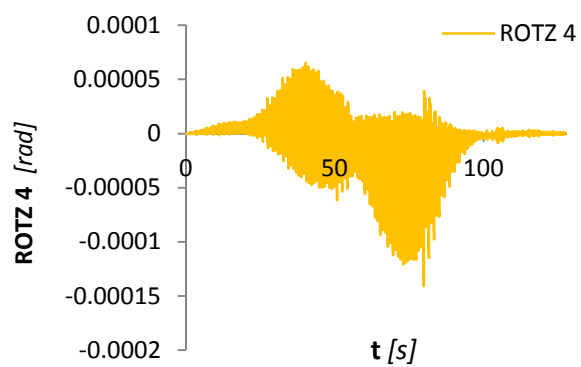
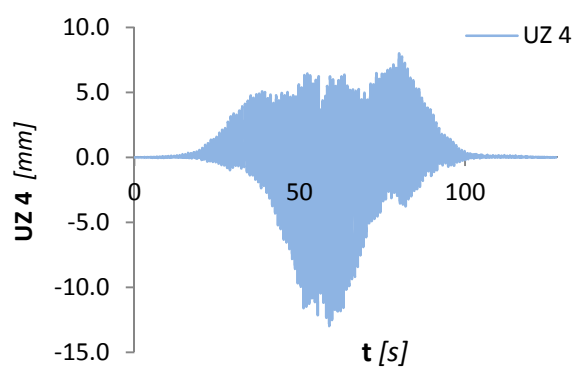
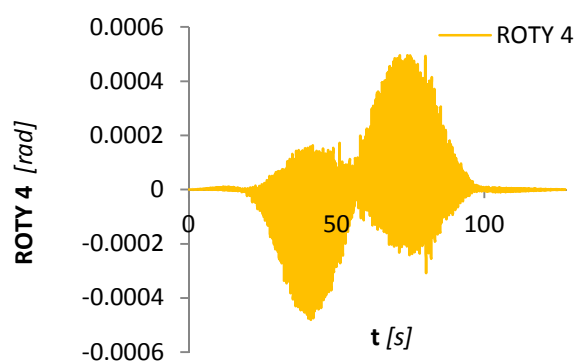
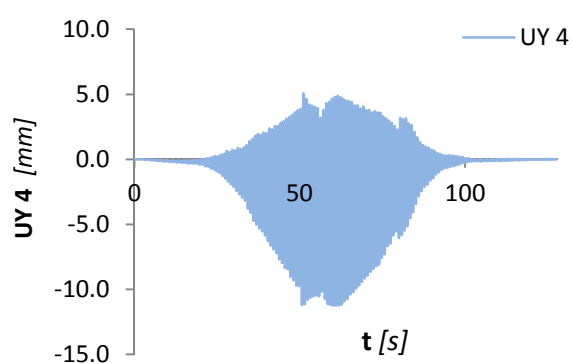
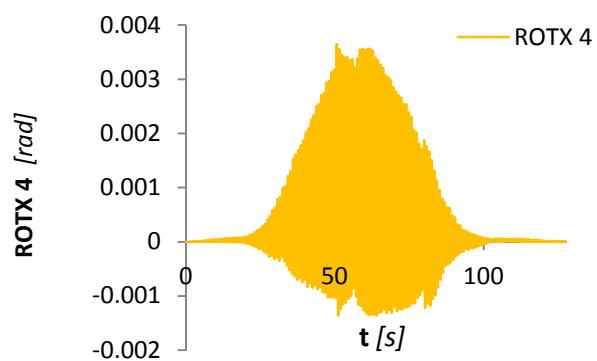
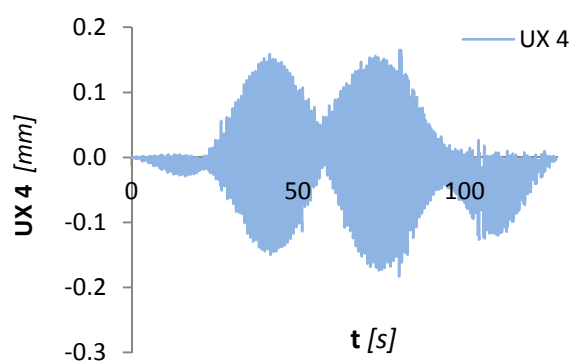
38. Futam - Keypoint 1 elmozdulás kényszerek



38. Futam - Keypoint 3 elmozdulás kényszerek



38. Futam - Keypoint 4 elmozdulás kényszerek



38. Futam - Keypoint 6 elmozdulás kényszerek

