

M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Építőmérnöki kar

Hidak és Szerkezetek Tanszék

Íves pilonnal épülő ferdekábeles hidak vizsgálata

TDK Dolgozat

Készítette: Király Nándor

Harmadéves BSc építőmérnök hallgató

Konzulensek:

Dr. Dunai László

egyetemi tanár, Hidak és Szerkezetek Tanszék

Dr. Kövesdi Balázs

egyetemi docens, Hidak és Szerkezetek Tanszék

2021.11.02.

Összefoglaló

A hídépítésben napjainkban elterjedten alkalmaznak ferdekábeles kialakítású hidakat, gazdaságosságuk és változatos megjelenésük miatt. Tanulmányomban egy Magyarországon egyedülálló, de világviszonylatban is ritkaságnak számító szerkezettel, az M44-es autópálya új, tisztaugyati Tisza-hídjával foglalkozom, mely íves pilonnal került kialakításra. A vizsgálatomban külön hangsúlyt fektetek a híd íves alakú pilonjának vizsgálatára, mivel ez számít szerkezeti szempontból újdonságnak. Tanulmányomban általánosságban ismertetem a ferdekábeles hidak jellegzetes pilon, illetve kábel kialakításait. A ferdekábeles hidak statikai vizsgálatához szükséges volt a feszített kötél tartók statikáját megértenem, ezen belül is a ferdekábelek belógását, a kábelek és pilon együtt dolgozását, valamint a pilon kihajlási jelenségét; ezeket tanulmányoztam, de nem építettem be a dolgozatba. Ezen kívül összegyűjtöttem a világ valamennyi fellelhető íves pilonnal rendelkező ferdekábeles hídját, ezeket elemzem, értékelem a dolgozatomban.

A munkám egyik fő célja az új tisztaugyati Tisza-híd vizsgálata. Elsőként egy teljeskörű bemutatást végeztem a hídról, ami tartalmazza az alépítményt, a merevítő tartók, a felfüggesztő kábelek és a pilonok ismertetését. Majd a híd építésének lépéseivel a híd építési technológiájával foglalkoztam. A hídról egy vége-selemes rúdmodell készítem, melyen vizsgáltam a pilon szerkezeti viselkedési sajátosságait merevségi és stabilitási szempontból. A híd statikus és dinamikus próbaterheléses vizsgálatát 2021. szeptember 28-án hajtotta végre a BME Hidak és Szerkezetek Tanszék, amin személyesen is részt vehettem. A próbaterhelés során mérésre került a merevítő tartó lehajlása, a piloncsúcs elmozdulása, valamint nyúlásmérő bélyegekkel a pilonban és a merevítő tartóban keletkező alakváltozások. TDK dolgozatomban ezen mérések eredményeit is értékeltem és elemeztem.

Abstract

Cable-stayed bridges are widely used in bridge construction today, due to their economy and variety of appearance. In the TDK research a unique structural solution, the arched pylon of the new Tisza bridge of the M44 motorway in Tiszaug is studied. Due to the novelty of this pylon shape a special focus is made on cable-stayed bridges with this type of pylon and cable design. For the static analysis of sloping cable bridges it was necessary to understand the behaviour of tensioned cable supports, including the sagging of sloping cables, the interaction of cables and pylons, and the displacements of the pylons. In addition, all the available cable-stayed bridges with arched pylons in the world are collected and introduced.

One of the main goals of the TDK work is to study the construction and the behaviour of the new Tisza bridge in Tiszaug. First of all, the bridge is introduced, which includes a description of the substructure, stiffeners, suspension cables, and pylons. Then the steps of the erection and the construction technology of the bridge is discussed. A finite element bar model of the bridge is developed, on which the structural behaviour of the pylon in terms of strength and stability are analysed. The static and dynamic load testing of the bridge was carried out on September 28, 2021, by the Department of Structural Engineering of BME, in which I was able to participate in person. During the load test the deflections of the stiffener beam, the displacements of the pylon tip, and the strains in the pylon and the stiffener beam were measured by strain gauges. Within the TDK research these measurements results are further analysed and evaluated.

Tartalomjegyzék

Összefoglaló	1
Abstract	2
1. Bevezetés	4
1.1. Célkitűzés.....	4
1.2. A megoldás menete.....	4
2. Ferdekábeles hidak	5
3. Ferdekábeles hidak íves pilonnal	8
3.1. Íves pilonnal épített ferdekábeles hidak.....	8
3.2. A ferdekábeles hidak ívelt pilonnal összefoglaló.....	14
4. Az új tiszauji Tisza-híd	18
4.1. A híd bemutatása.....	18
4.2. Az építési technológia.....	21
5. A kidolgozott numerikus modell	23
6. A numerikus modell validálása	28
7. Különböző alakú pilonok elmozdulásainak összehasonlítása	38
7.1. A vizsgált pilonok geometriai kialakítása.....	38
7.2. A négy pilonkialakítás vizsgálata merevségi szempontból.....	39
7.3. A négy pilonkialakítás vizsgálata stabilitási szempontból.....	42
8. Összefoglalás	45
Irodalomjegyzék	46
Ábrajegyzék	48
Táblázatok jegyzéke	50

1. Bevezetés

1.1. Célkitűzés

A TDK dolgozatomban az M44-es autópályán új tiszaujai Tisza-hídjával foglalkozom, mely egy jelenleg építés alatt lévő, Magyarországon egyedülálló, íves pilonnal kialakított ferdekábeles híd. A ferdekábeles hidak fejlődésével napjainkban megjelentek az ellipszis vagy kör alakú pilonokkal kialakított ferdekábeles hidak, amiket az esztétikus és újszerű kialakítása miatt egyre nagyobb számban építenek. Ezek a pilonok összetett igénybevételnek és kialakításból kifolyólag jelentős vízszintes erővel vannak terhelve, melyek egyedivé teszik ezen hidak erőjátékát. A TDK dolgozatom célja a ferdekábeles hidak szerkezeti kialakításának és erőjátékának pontosabb megismerése és az íves pilon kialakításból származó szerkezeti viselkedési sajátosságok elemzése.

1.2. A megoldás menete

Mivel még egyetemi tanulmányaim során nem tanultam az Acélhidak tárgyat, így a ferdekábeles hidak szerkezeti kialakításának és erőjátékának megismerésével kezdtem a kutatómunkám, megismertetem a ferdekábeles hidak jellegzetes pilon, illetve kábelkialakításait. Összegyűjtöttem a nemzetközi szinten épített és számomra interneten elérhető íves pilonnal kialakított ferdekábeles hidakat, melyeken keresztül tanulmányoztam ezen szerkezetek jellemző paramétertartományát és szerkezeti kialakítását. Ezután bemutatom az M44-es új Tisza-hídat, annak szerkezeti kialakítását és építési fázisait.

Ezután kidolgoztam a tiszaujai Tisza-híd felületszerkezeti végelelemes modelljét, melyet a próbaterhelés során mért eredményekkel összehasonlítottam és a modellel validáltam. Konzulenseim támogatásával részt vettem a híd próbaterhelésében, így a mérési eredményeket a modellem eredményeivel közvetlenül össze tudtam hasonlítani. Végül a validált numerikus modellen azonos paraméterbeállítások (merevítőtartó, pilon keresztmetszet és globális geometriai méretek) mellett megvizsgáltam a hídszerkezet mértékadó deformációit és kihajlási alakjait négy különböző pilongeometria alkalmazásával, így elemezni tudtam az íves kialakítású pilon szerkezeti viselkedési sajátosságait.

2. Ferdekábeles hidak

A ferdekábeles híd olyan hídtípus, ahol a hídpályát egy, vagy több pilonra ferdén felfüggesztett kábelek tartják. A ferde kábelekre függesztett hidak 200-800 m támaszköztartományban használatosak és jellemzően ebben a tartományban gazdaságosak, de napjainkban 1000 m támaszközt elérő ferdekábeles hidak is megjelentek. Nagyon sok változata lehetséges keresztmetszeti elrendezésében, pilon elhelyezésében és függesztőrendszerében. [1]

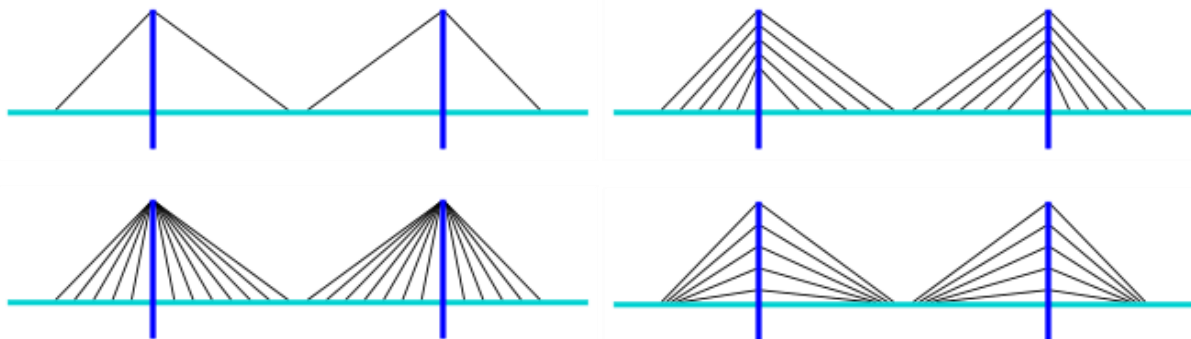
A pilonok elrendezése a híd keresztmetszetében igen változatos lehet, melyek közül a következő négy kialakítás a legjellemzőbb: (I) egyoszlopos, (II) kétoszlopos, (III) portál keret, vagy (IV) A-alakú pilon. Az egyoszlopos változat esetén a nevéből adódóan egyetlen oszlopot használnak a kábeltartáshoz, általában ez a merevítőtartó közepén található, de a híd egyik oldalán is kialakítható. Erre mutat példát a Monostori híd az 1. ábra; I, részén. Kétoszlopos változat esetén egy-egy oszlopot helyeznek el a pályaszerkezet mindkét oldalán, ilyen lesz az 1. ábra; II, részén látható új, feszített-függesztett rendszerű Kalocsa-Paks Duna-híd. A portál pilon hasonló a kétoszlopos kialakításhoz azzal a különbséggel, hogy a két oszlop felül össze van kötve, ezzel egy keretet képez. Ennek egy speciális, módosított kialakítása az íves pilon kialakítás. Ilyen az új tiszai Tisza-híd is, mely az 1. ábra; III, részén látható. A negyedik az A-alakú kialakítás, mely hasonló a portálhoz csak ilyenkor a két oldalsó oszlopot egymás felé megdöntik úgy, hogy a tetején összeérjenek így nincs szükség az összekötő gerendára; ilyen a Megyeri híd pilonja, ami az 1. ábra; IV, részén látható. A kivitelől függően a pilon lehet függőleges, döntött, szögletes vagy íves. A pilonok darabszáma függ az áthidalt nyílások arányaitól, a kedvező nyílásarányok: 1:2; 2:1; 5:1. [2]

A függesztőkábelek elrendezése alapján mono, hárfa, legyező és csillag kialakításúak lehetnek (2. ábra). A mono kialakítás egyetlen kábelt tartalmaz a pilonból, ami egy kevésbé alkalmazott kialakítás a viszonylag kis hatékonysága következtében. Hárfa elrendezés esetén a kábelek párhuzamosak egymással, így a pilontól mérve felszerkezethez való rögzítésük távolsága arányos a pilonba való becsatlakozásuk magasságával. Legyező kialakítást alkalmazva a kábelek a pilon tetejébe csatlakoznak, vagy áthaladnak rajta. Ez a kialakítás szerkezetileg nagyon előnyös, mert minimális nyomatékkal terheli a pilont. A csillag kialakítás is viszonylag ritkán alkalmazott kialakítás, a kábelek a pilonban vannak egyenletes távolságokra kiosztva és a pályaszerkezethez egy, vagy több egymástól távoli helyen vannak rögzítve. A kábelt a pilon tetejében kétféle módon rögzíthetjük, a kábel folytonos köríven való átvezetésével vagy a pilonfejbe csuklókkal való bekötéssel. [1]



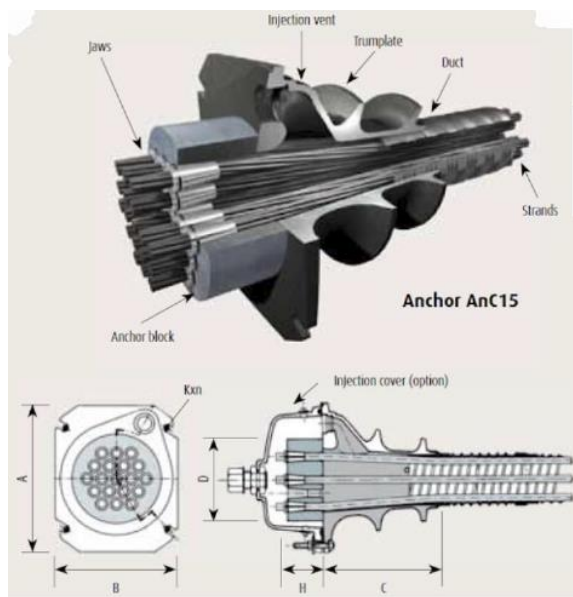
1. ábra: Jellemzőbb pylon kialakítások

I, Monostori híd; II, Kalocsa-Paks Duna-híd; III, tiszauji Tisza-híd; IV, Megyeri híd [3] [4] [5] [6]

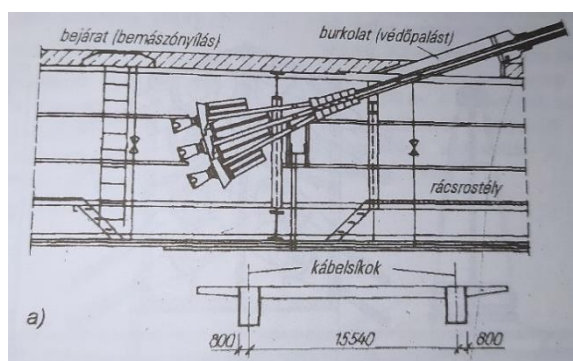
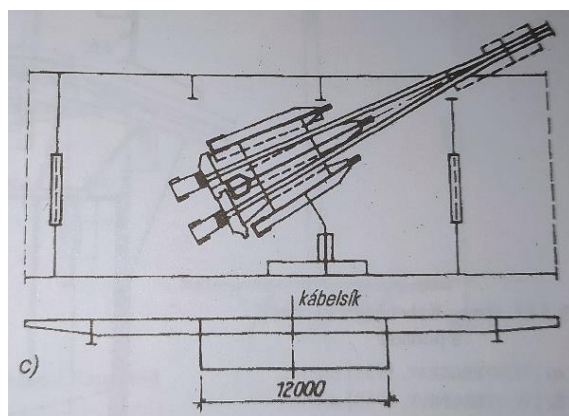
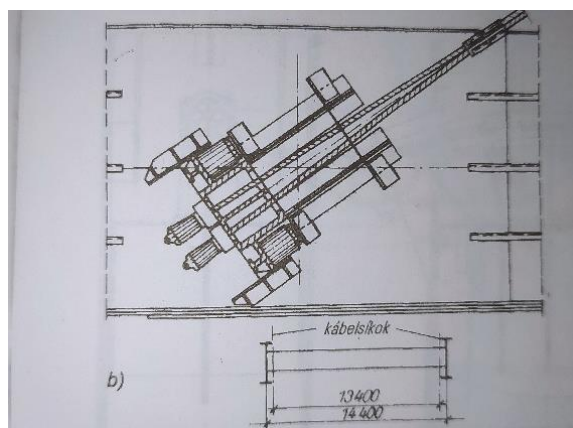


2. ábra: A függesztőkábelek elrendezései [1]

A kábelek kialakítására a 3. ábra látható néhány példa. A kábelek pályaszerkezethez való lehorgonyzására többféle mód létezik, a 4. ábra látható néhány megoldás.



3. ábra: Ferdekábelek lehorgonyzása [7]



4. ábra: Kábelek lehorgonyzása [2] [5]

3. Ferdekábeles hidak íves pilonnal

Ebben a fejezetben szakirodalom kutatást végeztem az interneten, az íves pilonnal épült ferdekábeles hidakkal kapcsolatban. Erre koncentrálni összesen 15 darab hidat találtam, melyeket röviden bemutatok, majd egy összefoglalás keretében további elemzéseket készítek.

3.1. Íves pilonnal épített ferdekábeles hidak

Miho Museum Footbrige



1997-ben épült Japánban. Az acélszerkezetű híd 120 m hosszú, 7.5 m széles, a pilon vízszintessel bezárt szöge 60° . A kábelek helyzete hárfakialakítású. A gyalogos híd napjainkban is üzemel. (5. ábra) [8]

5. ábra: Miho Museum Footbridge [8]

Margaret Hunt Hill Bridge

A híd az Egyesült Államokban, Dallasban épült, az építkezés 2 évig tartott, majd 2012-ben adták át. Hat sávós acélszerkezetű közúti híd, melynek hossza 368 m, szélessége 36.7 m. A legnagyobb támaszköz 184 m. A pilon üreges, magassága 136 m. Ötvennyolc kábel ereszkedik le az ívről, amelyeket a hídpálya középvonala mentén horgonyoztak le, a leghosszabb kábel 196 m hosszú. (6. ábra) [9]



6. ábra: Margaret Hunt Hill Bridge [9]

Lingotto Footbridge



7. ábra: Lingotto Footbridge [10]

A 2006-os téli olimpia miatt volt szükség erre a gyalogos hídra, amit 2005-ben adtak át az olaszországi Torinóban. Az acélszerkezetű híd hossza 365 m, legnagyobb támaszköze 150 m. A pilon magassága 70 m, a szélessége 55 m és dőlése 65°-os. Újszerű megoldásként a pászmákat gömbcsapágyakkal rögzítették a pályalemezhez. (7. ábra) [10]

Haneda Sky Arch



8. ábra: Haneda Sky Arch [11]

Az irodalomkutatásaim szerint ez az első ívelt pilonnal rendelkező ferdekábeles híd, ami 1992-ben épült Japán fővárosában, Tokióban. Az acélszerkezetű hídnak két különálló pályaszerkezete van. A híd teljes hossza 103 m, a legnagyobb támaszköz 76 m. A pilon szárainak távolsága 101 m. (8. ábra) [11]

Bine Bridge

A közúti hidat Azerbajdzsán fővárosában Bakuban építették, és 2010-ben adták át. A híd acél pilonja nyitott rácsos kialakítású. A kábelek elhelyezkedése hárfa jellegű. Geometriai adatokat nem találtam a hídról. A legnagyobb támaszköz Google térképről lemérve ~52 m. (9. ábra) [12]



9. ábra: Bine Bridge [12]

PUMA Bridge

A híd Németországban Nürnberg közelében található. A Puma sportszerelést gyártó cég 2017-ben építette meg, hogy székhelye két épületét kösse össze. A gyalogos híd acélszerkezetű, a vele az áthidalt hossz 85 m, a pilon 37 m magas. (10. ábra) [13]



10. ábra: PUMA Bridge [13]

Ponte Laterale Nord és Ponte Laterale Sud

E két híd a három hídból álló, úgynevezett *Le Vele* hídcsoport északi és déli hídja, a középső híd egy ívhíd. 2007-ben adták át Olaszországban, Reggio Emilia városában a közúti forgalom számára. A két ferdekábeles híd paraméterei megegyeznek, hosszuk 180 m, szélességük 12.5 m. A pilon magassága 69 m, továbbá az acél pályaszerkezetet hidanként 26 kábel tartja. (11. ábra, 12. ábra) [14] [15]



12. ábra: Ponte Laterale Sud, [15]



11. ábra: Ponte Laterale Nord [14]

Sanhao Bridge

Kínában, Shenyangban épült híd 2008-ban adták át az autós forgalomnak. A teljes híd egy 900 m hosszú, 34 m széles, 6 sávós közúti híd. A pályaszerkezet előfeszített vasbetonból gerendákból készült. A meder híd 2x100 m-es gerenda hídból és középen egy 270 m-es támaszközü ferdekábeles hídból áll. A híd két



13. ábra: Sanhao Bridge [17]

acélszerkezetű ívelt pilont tartalmaz, amelyek oldalszögből nézve V alakra emlékeztetnek. A pilonok oldalán 11 pár kábel található, hárfa elrendezéssel. A kábelek alsó végükön a pályalemez széléhez vannak rögzítve 8 m távolságra egymástól. (13. ábra, 14. ábra) [16] [17]



14. ábra: Sanhao Bridge éjszaka [17]

Seafarers Bridge

2009-ben építették Melbourneben, Ausztrália második legnagyobb városában, gyalogos és kerékpár forgalomra. A pályaszerkezet és pilonok is acélból készültek. A híd északi részén három, délen négy megdőntött, elliptikusan ívelt pilon található. Északon 4 db, délen 6 db kábel kapcsolja össze a pilonokat a pályaszerkezet széléhez. Az áthidalt hossz 122 m, a legnagyobb támaszköz 75 m. (15. ábra, 16. ábra) [18]



15. ábra: Seafarers Bridge [18]



16. ábra: Seafarers Bridge oldalnézet [18]

Nanjing Eye

A kínai Nanjingban 2014-ben adták át a hidat, amely egy acélszerkezetű gyalogos híd. A vele áthidalt távolság 240 m. A híd két megdőntött ellipszis, gyűrű alakú pilont tartalmaz, amelyek 102.5 m magasak. A kábelek elrendezése hárfa típusú. (17. ábra, 18. ábra) [19] [20] [21]



17. ábra: Nanjing Eye [20]



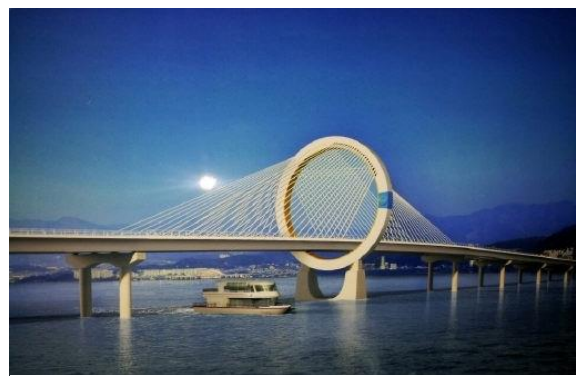
18. ábra Nanjing Eye este [21]

Legoland Korea Access Bridge

A híd Dél-Koreában, Chuncheonban található. A városból vezeti át a közúti forgalmat a dél-koreai LEGOLAND szigetére. 2017-ben fejezték be a munkálatokat. A gyűrű alakú pilon építéséhez szálerősítésű vasbetont használtak. Geometriai adatokat nem találtam a hídról. Érdekes, hogy a látványterven (20. ábra), a gyűrű közepébe nem terveztek vízszintes szár összekötő rudakat, de a megépített híd képén (19. ábra) ezek már láthatóak. [22] [23]



19. ábra: Legoland Korea Acces Bridge [34]



20. ábra: Legoland Korea Access Bridge
Látványterve [23]

Seyyedol Shohada Bridge

2018-ban egy iráni városban, Zanjanban építették. Ez egy öszvérszerkezetű, ívelt pályaszerkezettel rendelkező közúti híd, melynek a pilonja acélból készült. A híd hossza összesen 320 m, ebből a legnagyobb áthidalt távolság 120 m, szélessége 8.3 m. A pilon magassága 45 m. (21. ábra) [24]



21. ábra: Seyyedol Shohada Bridge [24]

Grand Wisata Overpass

A hidat 2007-ben adták át Bekasi-ban, Indonéziában. Ez egy közúti híd, a legnagyobb támaszköze 81 m. A helyszínen, vasbetonból készült pilon meg van döntve és 40 m magas. A pilon szárainak egyik oldalán 4-4 db a másikon 8-8 db kábel található, hárfa elrendezéssel. (22. ábra) [25]



22. ábra: Grand Wisata Overpass [25]

Zhivopisny Bridge

A híd Oroszország fővárosában Moszkvában található, 3 évig építették majd 2007-ben adták át a forgalomnak. Az acélból készült „S” alakú pályaszerkezet 1460 m hosszú, szélessége 47 m. A legnagyobb áthidalt távolsága 409,5 m. A nyitott, rácsos kialakítású, acélból készült pilon 78 kábelen keresztül tartja a pályaszerkezetet. A pilon 120 méteres magasságával a legmagasabb ferdekábeles híd Európában. Érdekesség, hogy a pilon ívének tetejéhez egy éttermet terveztek, amit el is kezdtek építeni, de a tűzvédelem és a befektetők hiánya miatt ez abbamaradt. (24. ábra, 23. ábra) [26] [27]



24. ábra: Zhivopsiny Bridge [26]



23. ábra: Zhivopsiny Bridge alulról [27]

3.2. A ferdekábeles hidak ívelt pilonnal összefoglaló

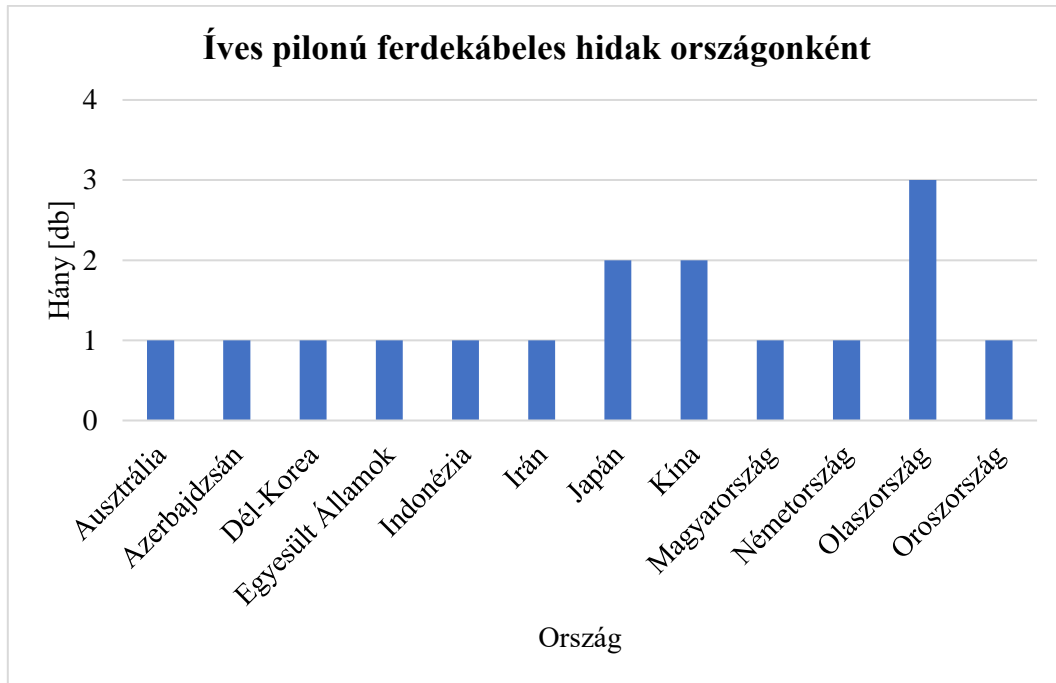
Az 1. táblázatban összefoglaltam az előző fejezetben felsorolt valamennyi híd legfontosabb tulajdonságait és a táblázat adatait diagramokkal kiértékeltem.

Sorszám	Név	Ország	Építés befejezése	A híd hossza	Legnagyobb támaszköz	Pilon anyaga	Kábelek elrendezése	Használat
1	Miho Museum Footbrige	Japán	1997	120 m	120 m	acél	hárfa	gyalogos
2	Margaret Hunt Hill Bridge	Egyesült Államok	2012	368 m	184 m	acél	legyező	közúti
3	Lingotto Footbridge	Olaszország	2005	365 m	150 m	acél	hárfa	gyalogos
4	Haneda Sky Arch	Japán	1992	103 m	76 m	acél	legyező	közúti
5	Bine Bridge	Azerbajdzsán	2010	---	52 m	acél	hárfa	közúti
6	Puma Bridge	Németország	2017	85 m	---	acél	legyező	gyalogos
7	Ponte Laterale hidak	Olaszország	2007	180 m	90 m	acél	legyező	közúti
8	Sanhao Bridge	Kína	2008	900 m	270 m	acél	hárfa	közúti
9	Seafarers Bridge	Ausztrália	2009	122 m	75 m	acél	legyező	gyalogos
10	Nanjing Eye	Kína	2014	240 m	---	acél	hárfa	gyalogos
11	Legoland Korea Access Bridge	Dél-Korea	2017	---	---	vasbeton	hárfa	közúti
12	Seyyedol Shohada Bridge	Irán	2018	320 m	120 m	acél	legyező	közúti
13	Grand Wisata Overpass	Indonézia	2007	---	81 m	vasbeton	hárfa	közúti
14	Zhivopisny Bridge	Oroszország	2007	1460 m	409,5 m	acél	hárfa	közúti
15	új Tisza-híd	Magyarország	2021	556 m	152 m	vasbeton	hárfa	közúti

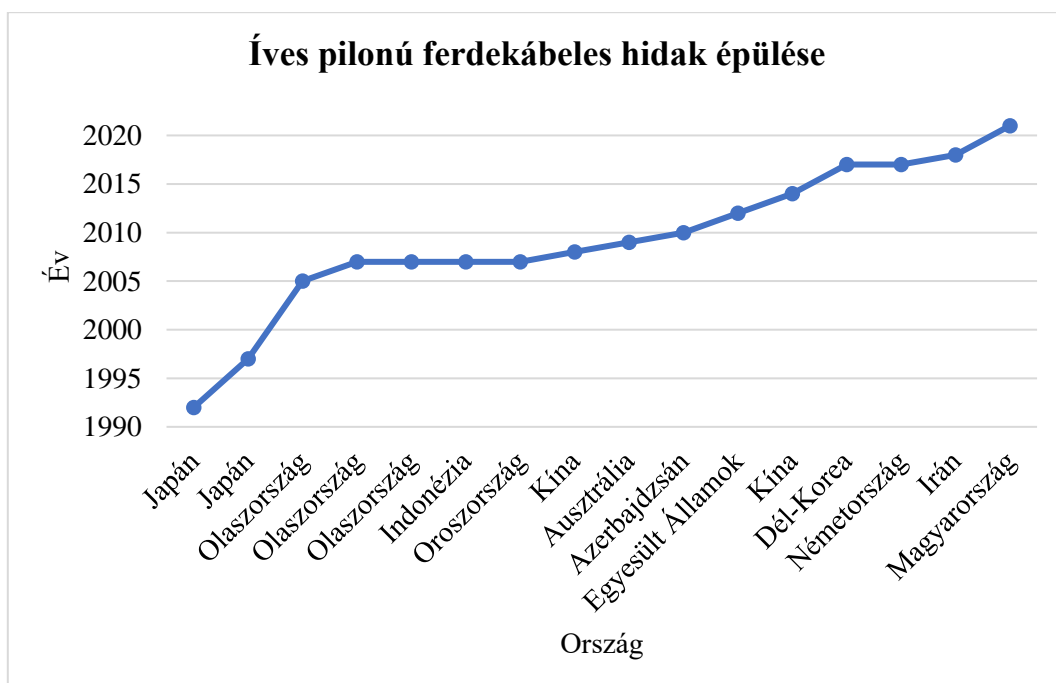
1. táblázat: Az ismertetett hidak összefoglalása

Íves pilonú ferdekábeles híd összesen 12 országban épült (25. ábra). Olaszországban három ilyen típusú híd található. Ezt követi Japán és Kína, ahol kettő-kettő épült. Az efféle hidak épülése időrendi sorrendben is megtekinthető a 26. ábra. Láthatjuk, hogy Japánban épült az első kettő még a 90-es években, majd Olaszországban 2005 és 2007 között három ilyen hidat adtak át. A 27. ábra mutatja az íves pilonú ferdekábeles hidak építésének gyakoriságát 5 éves időközökre lebontva. Láthatjuk, hogy 2000 előtt építettek két ilyen hidat. 2000-2004 között

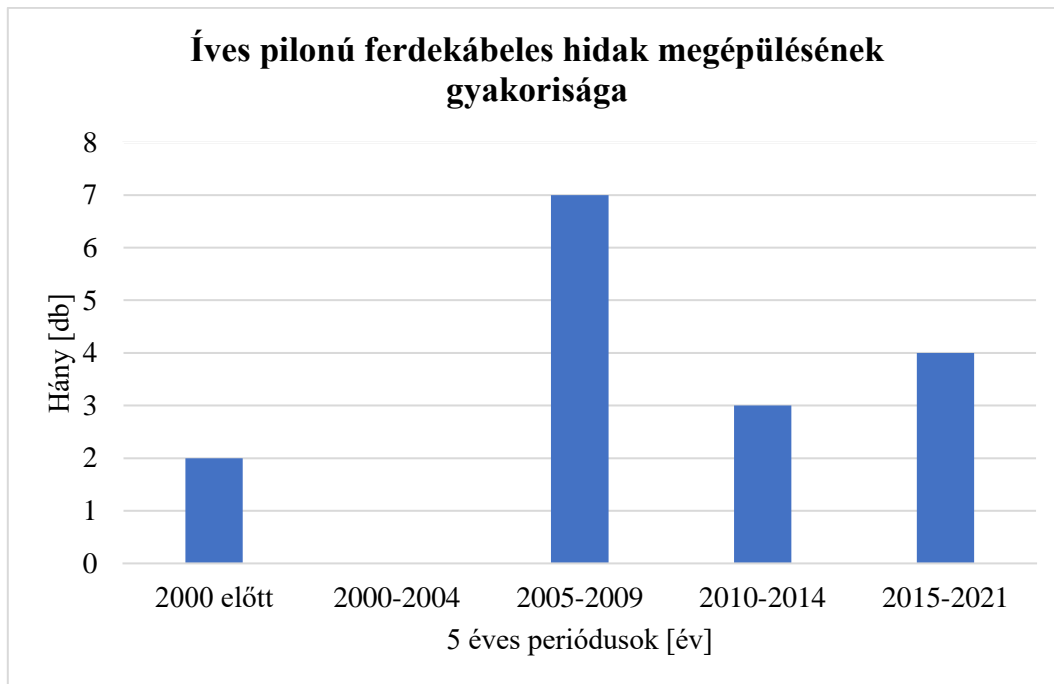
nem épült íves pilonú ferdekábeles híd, majd 2005-2009 között 7 darabot is átadtak, ebben az időközben építették a legtöbbet. 2010-2014 között 3 darab, 2015-2021 között pedig 4 darab épült.



25. ábra: Íves pilonú ferdekábeles hidak országonként



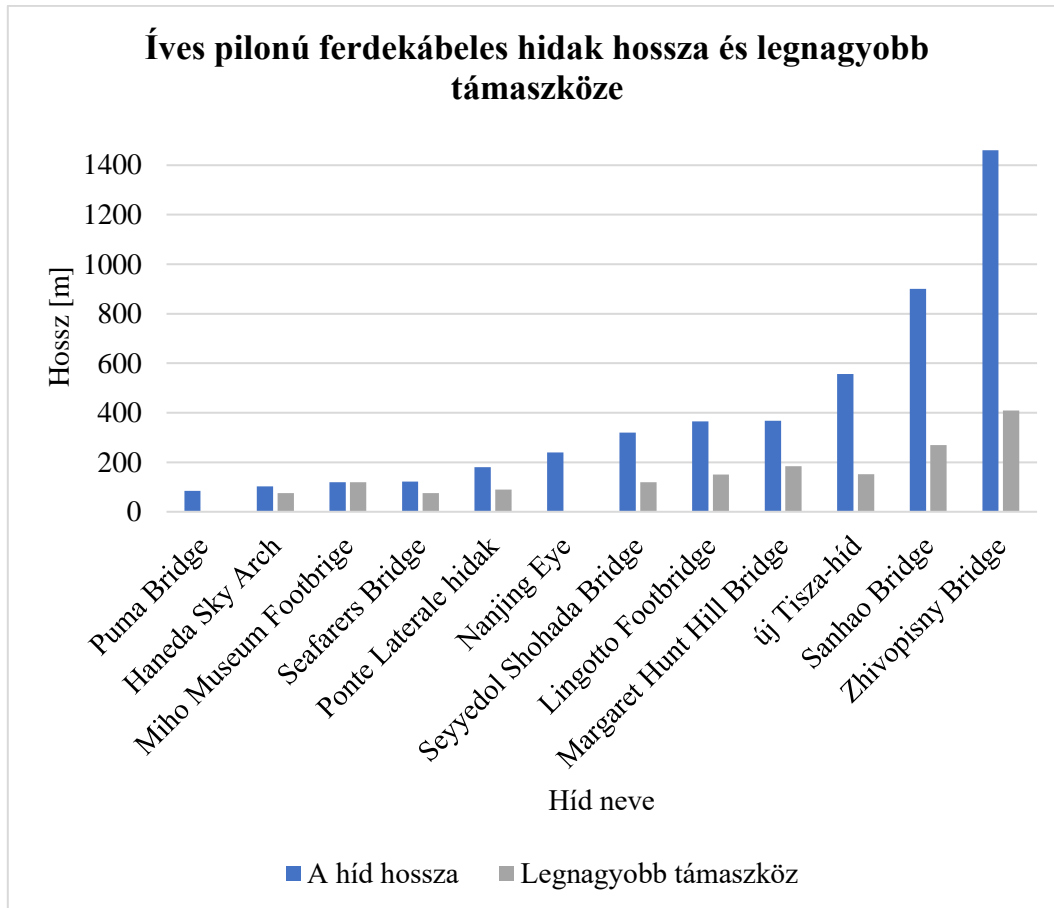
26. ábra: Íves pilonú ferdekábeles hidak épülése



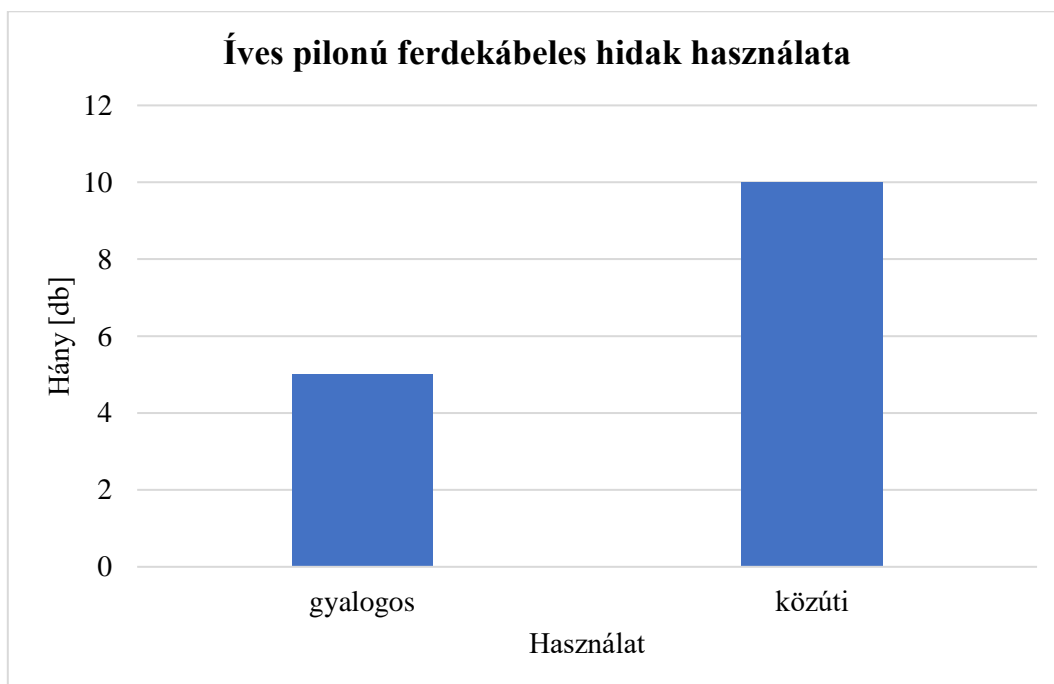
27. ábra: Íves pilonú ferdekábeles hidak megépülésének gyakorisága

A 28. ábra láthatjuk a hidak sorrendjét hosszuk szerint, valamint a hidak legnagyobb támaszközének hosszát. A leghosszabb híd az oroszországi Zhivopisny Bridge 1460 m-es hosszával és a legnagyobb támaszközzel is ez a híd rendelkezik, ami 409,5 m. A legrövidebb híd a Puma Bridge a 85 m-es hosszával. Kiemelném az új tiszaugi Tisza-hidat, ami az 556 m-es hosszával a harmadik leghosszabb és 152 m-es támaszközével a negyedik legnagyobb támaszközzel rendelkező íves pilonnal épült ferdekábeles híd.

A pilon anyaga a legtöbb esetben acél, csupán három pilont készítettek vasbetonból. A kábel elrendezés a hárfa és a legyező kialakítás között váltakozik. A 29. ábra mutatja a hidakat használatuk megoszlása alapján. A 15 darab hídból 10 darab közúti híd és 5 darab gyalogos híd. Tehát kétszer annyi közúti íves pilonú ferdekábeles híd épült, mint gyalogos híd. Továbbá megállapítható, hogy az íves pilonú ferdekábeles hidakat, inkább városokban, városi környezetben építenek különleges, egyedi esztétikájuk miatt.



28. ábra: Íves pilonú ferdekábeles hidak hossza és legnagyobb támaszköze



29. ábra: Íves pilonú ferdekábeles hidak használata

4. Az új tiszaugi Tisza-híd

4.1. A híd bemutatása

Az új Tisza-híd az M44 gyorsforgalmi út Lakitelek – Tiszakürt közötti szakaszán létesül, Tiszaug közelében. Építése 2018-ban kezdődött és 2021 végén kerül átadásra. A híd három szerkezeti részből áll, egy-egy jobb- és balparti hullámtéri hídból, amelyek előregyártott feszített vasbeton híderendás felszerkezettel készültek, illetve egy mederhídból, ami öszvér pályaszerkezettel és vasbeton pilonnal kialakított ferdekábeles szerkezet. A híd látványterve a 30. ábra látható. [28] [29]



30. ábra: Az új Tisza-híd látványterve [29]

A pillérek cölöpalapozást kaptak. A feltárási adatok és a mértékadó igénybevételek alapján a hullámtéri szerkezeteknél 1,0 m, míg a medertéri szerkezeteknél 1,3 m átmérőjű vasbeton cölöpök biztosítják a megfelelő teherbírást. Több mint 5800 méternyi cölöp került beépítésre 23~24 m egyenkénti hosszal. A talajvíz enyhén agresszív, XA1 környezeti osztályba sorolták, ezért az alépítményt legalább C30/37-es betonból kellett kivitelezni. [28]

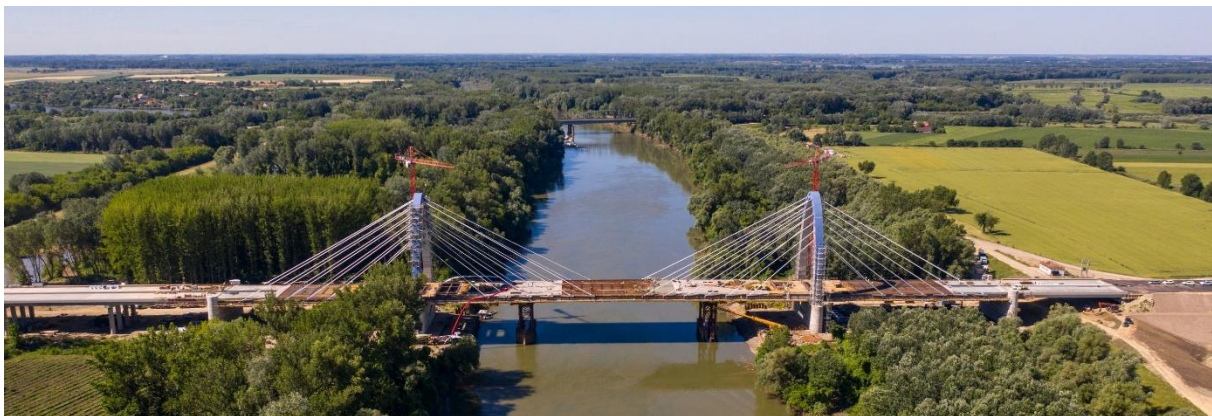
A felmenő szerkezet 4 db pillért tartalmaz, ebből kettő közös pillér a hullámtéri hidakkal, a másik kettő mederpillér, ezekre épültek a pilonok (31. ábra). A pillérek helyszíni betonozással, monolitikusan készültek, a látszó felületek 2/2 kialakítású élsarkítást kaptak. A közös pillérek 7,00 m széles 1,50 m magas cölöpösszefogó gerendával, 4,10 m széles, 10,30 m magas felmenő fallal, a mederpillérek 14,60 m széles, 2,45 m magas cölöpösszefogó gerendával, 4,10 m széles

és 10,52 m magas felmenőfallal készültek. A földdel érintkező felületek két réteg hideg bitumenmázás szigeteléssel vannak ellátva. [28]



31. ábra: Az új Tisza-híd pillére [30]

A híd 556 méter hosszú, magába foglalva mindhárom szerkezeti részt. Ebből a három nyílású mederhíd 307 méter hosszú, a középső nyílás a meder fölött, kettő pedig a Tisza jobb- és baloldali hullámtere fölött található. A híd 76,00+152,00+76,00 m támaszközökkel hidalja át a folyót, a pályalemez szélessége 23,12 m. A párhuzamos övű vasbeton pályalemezzel ellátott, két zárt acélszekrénnyel rendelkező, öszvér merevítőtartó a külső oldalánál tartókábelekkel van felfüggesztve az íves kialakítású vasbeton pilonokra (32. ábra). [28]



32. ábra: A mederhíd építés közben [30]

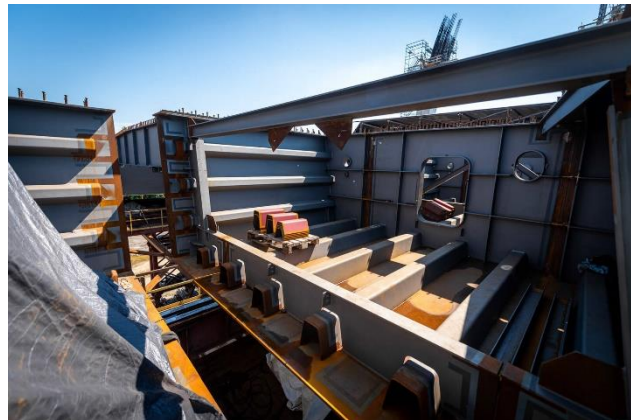
A felszerkezet a pilonokból, a felfüggesztő kábelekkel és a merevítőtartóból áll. A fél ellipszis alakú vasbeton pilon keresztmetszete 3,00x2,50 m-es négyszög (33. ábra). A pilonszarak kúszózsáruk segítségével, több szakaszban épültek. A kábelek bekötési oldalán található egy, az íven végig futó kis vájat. A pilon legmagasabb pontja 37,64 m-re van a pályaszint felett, illetve 41,63 m-re a pillérfal tetejétől. [28]



33. ábra A pilon [31]

A kábelek két ferde és térben csavarodó függesztősíkban vannak elhelyezve, elrendezésük szimmetrikus, kissé módosított hárfa jellegű (33. ábra). A kábelek kiosztása a pilonnál és a felszerkezetenél is egyenlő távolságokra adódik, utóbbi esetben ez 8,00 m. A pilonok oldalanként 12-12 db feszítőkábelrel keresztül tartják a pályaszerkezetet. A kábelek nyereg idom segítségével vannak átvezetve az íves pilonon, a merevítőtartónál lévő végek állíthatóak. A leglaposabb ferdekábelek esetében 48 db, a többinél 37 db 150 mm²-es pászma került beépítésre. [28]

A merevítőtartó két darab egycellás, ferdegerincű, acél szekrényvel kialakított monolit vasbeton pályalemezzel együttműködő öszvérszerkezet (34. ábra). A nyitott I-keresztmetszetű keresztartók a kábelek felfüggesztésénél 2,60-2,74 m, máshol 0,96-1,10 m magasságúak. A szekrénytartók belsejében a felfüggesztéseknél és a támaszok felett a keresztartók teljes diafragmákban, vagyis



34. ábra: A merevítőtartó szerelési állapotban [30]

merőleges belső lemezként folytatódnak. Az átjárhatóság kedvéért, ezek átbúvó nyílással vannak ellátva. Az acélszerkezetet mindkét oldalról szakaszosan tolták be a híd közepe felé, a hullámtereken a híd nyomvonalában kialakított szerelőjármokról indulva. A pályaszerkezet elkészülte után történt a kábelek megfeszítése és a monolit vasbeton pályalemez építése. [28]

A mederhíd felszerkezete a pillérekben lévő sarukra fekszik fel. A négy pilléren összesen 8 függőleges és 4 keresztirányú megtámasztást biztosító saru található. A közös pillérekben lévő

saruk függőleges húzóerő felvételére is képesek a hídvégek felemelkedésének megakadályozása érdekében. A felszerkezet hosszirányban „szabadon” elmozdulhat, ezt a mozgást a pilon a kábelek segítségével gátolja meg. A közös pillérek a három hídszerkezet között gumibetétes dilatációt alkalmaztak. [28]

4.2. Az építési technológia

Elsőként a pillérek fűrt vasbeton cölöpözése készült el, majd a cölöpökre helyszíni betonozással készített cölöpösszefogó gerendát építettek. Ezek után készültek el a monolit vasbeton pillérfalak (35. ábra). A szélső pillérek a közös pillérek, a közbensők a pilonos pillérek. A pillérek elkészülte után a felszerkezet szerelése következett. [28]



35. ábra: Monolit vasbeton pillér építése [30]

A felszerkezet szerelési egységekből készült, amelyek $14,50 + 3 \times 16,00 + 13,50 + 14,50 + 3 \times 16,00 + 2 \times 14,50 + 3 \times 16,00 + 14,50 + 13,50 + 3 \times 16,00 + 14,50$ m hosszúak. Az acélszerkezet keresztmetszete 9 egységből épült fel, a két konzolos részből, a külső gerinclemez „C” egységből, a fenéklemezekből, a belső gerinclemez „Z” egységből és a kereszttartókból. A 9 keresztmetszeti egységet gyárban készre hegesztették és a próba szerelés után a helyszíni szállították. A helyszínen egy autódaruval a mederhíd szélső nyílásában felállított szerelő-indító járomra helyezték és egy szerelési egységgé összehegesztették. Ezután a készre hegesztett keresztmetszeti szerelési egységet egy egységgel előretolták és mögé emelték a következő szerelési egységet. Ez mindaddig folytatódott, míg a híd elemei két oldalról középen össze nem

érték. A középén összehegesztett acél merevítőtartó a végleges támaszokra került. A tolás folyamata alatt az acélszerkezetet közbenső segédjármokkal támasztották alá (36. ábra). [28]



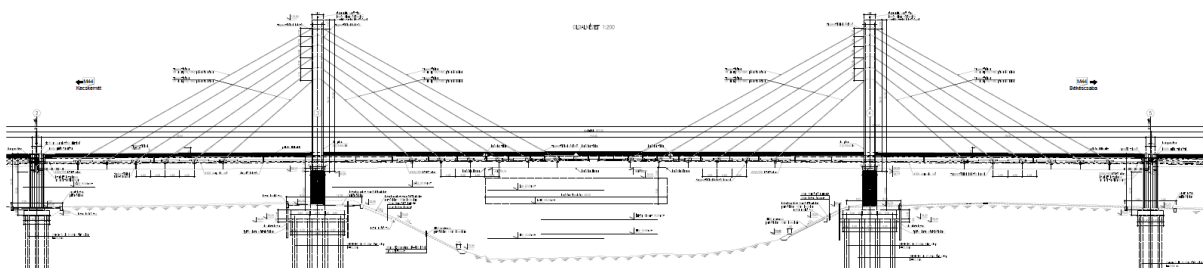
36. ábra: A merevítőtartók tolás közben [32]

Eközben a pilon építése folyamatosan haladt, szakaszosan, kúszózsaluk alkalmazásával. Építés közben a megadott helyeken a kábelek átvezető-iránytörő nyergeit el kellett helyezni. Amikor elérték felülről számolva a 2. és 3. kábelpár közötti felezőpontot, akkor a két pilonszárat összetámasztották, és a maradék összezáró ívet fix zsaluzattal betonozták. A merevítőtartó középre betolása és összehegesztése után, elkezdődtek a kábelek feszítései. A legmeredekebb kábelekkel kezdtek és alulról felfelé haladtak sorban. [28]

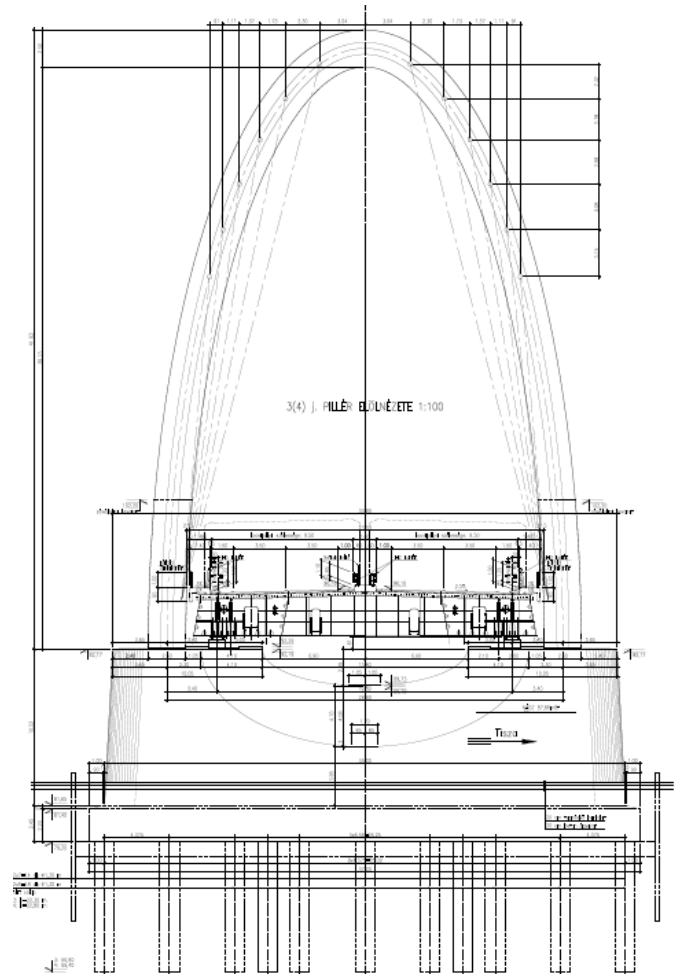
A híd tartószerkezete 2021. nyár végére készült el, a próbaterhelésre szeptember 25-én került sor.

5. A kidolgozott numerikus modell

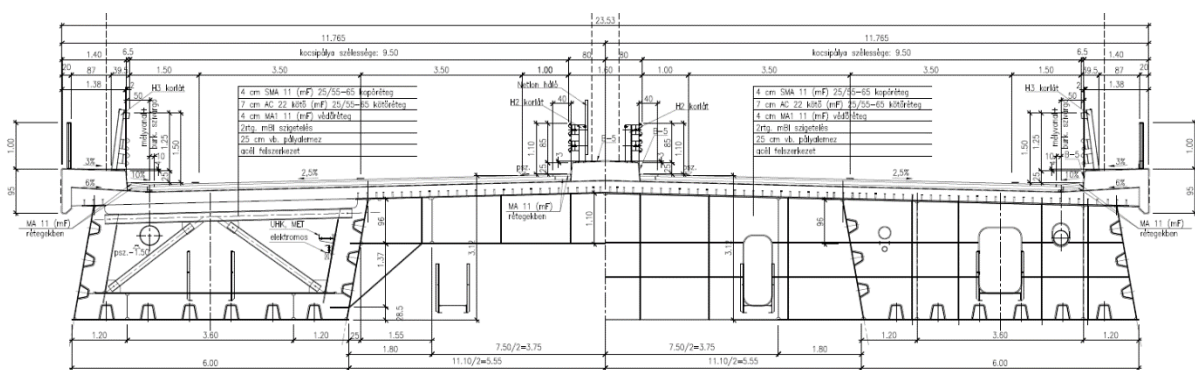
A numerikus modell a konzulenseim által rendelkezésemre bocsátott kiviteli tervek alapján készült. A híd hosszmeteszete a 37. ábra, a pillér előlnézete pedig a 38. ábra látható. A pályalemez kétféle keresztkötése a 39. ábra található, bal oldalon az alacsonyabb kereszttartós, a jobb oldalon pedig a diafragmás kialakítás. Elsőként az AutoCAD 2020 programban készítettem el a szerkezet vázát, amely a vége-selemes modell alapját fogja nyújtani. A vázszerkezet pályalemeze összesen 304 m (76+152+76 m) hosszú és 23,00 m széles, két szekrényes tartó, melynek általánosan kétféle kereszttartója van. Az egyik egy 2,60-2,74 m magas diafragma, ami a szekrények belsejében is folytatódagos, ezentúl ezt „b” típusú keresztkötésnek nevezem. A másik 0,96-1,10 m magas kereszttartó, ami a két szekrény belső oldalfaláig tart, ezért a szekrények belsejében az oldalfalakon és a talplemezen 60 cm magas lemez fut végig, ezentúl „a” típusú keresztkötés. Az utóbbi két keresztmeteszete váltakozik 4 méterenként felváltva, míg el nem érünk a pilonhoz, ahol sorban 2 db „a” típusú, a pilon tengelyvonalában 1 db „b” típusú, utána újabb 2 db „a” típusú keresztkötés létesült, valamint közepén 2 db „b” típusú keresztkötés szakítja meg a váltakozó keresztmeteszeteket. Az „a” és „b” típusú keresztkötések a 40. ábra láthatóak. A pályalemez teteje középről kiindulva mindkét irányban 2,5%-os lejtéssel rendelkezik. A pilon magassága 41,60 m, két szárának távolsága 26,60 m. Az imént említett bemenő adatok felhasználásával szerkesztettem meg a szerkezet vázát, ami a 41. ábra látható.



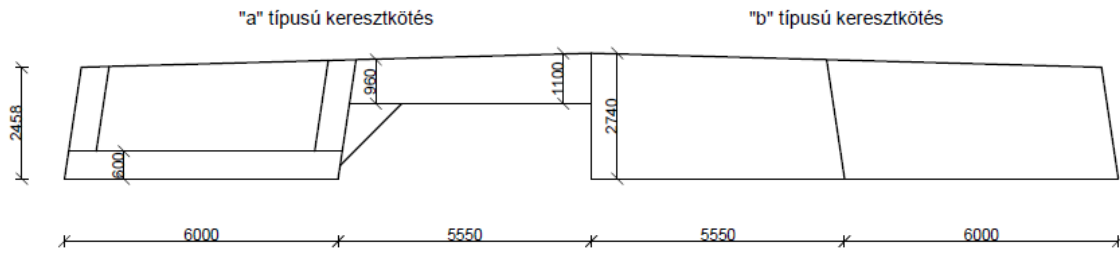
37. ábra: A híd hosszmeteszete [28]



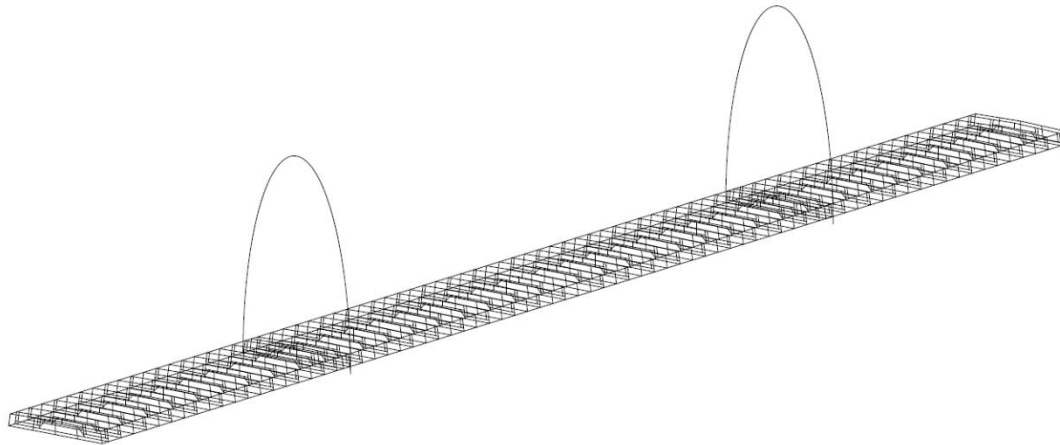
38. ábra: A pillér előnézete [28]



39. ábra: A hid kétféle keresztvételése [28]



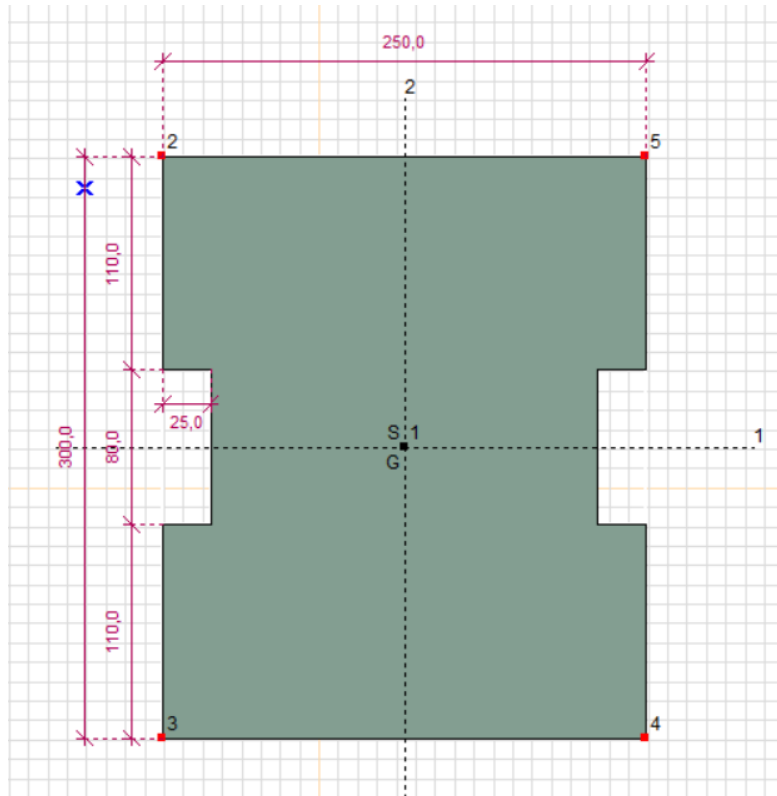
40. ábra: „a” és „b” típusú keresztkötések



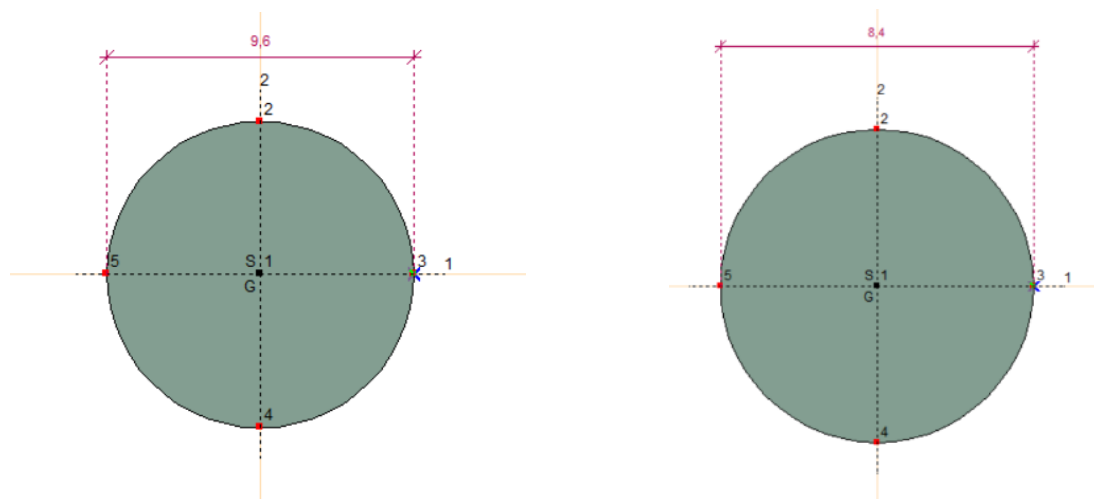
41. ábra: A modell vázszerkezete

Ezt a vázszerkezetet használtam a híd végeleemes héjmodelljének megépítéséhez. A modellt AxisVM X6 programban készítettem el. A pilon a modellben rúdként van definiálva. Keresztmetszete, ahogy a 42. ábra is mutatja, egy 250 x 300 mm-es téglalap, aminek a hosszabbik oldalain egy-egy 25 x 80 mm-es bevágás található. A keresztmetszet alakja a pilon mentén nem változik.

A hídpálya függesztéséhez kétféle kábelt alkalmaztak, a leglaposabb kábeleknél 47 db, a többinél 37 db 150 mm² területű pászma került beépítésre, ezek keresztmetszeti átmérője az előbbinél 9,6 mm az utóbbinál 8,4 mm. A modellben a függesztő kábeleket 9,6 mm-es és 8,4 mm-es körszelvényű rácsrúdként definiáltam, annak érdekében, hogy csak húzás ébredjen bennük; a keresztmetszetek a 43. ábra találhatóak.



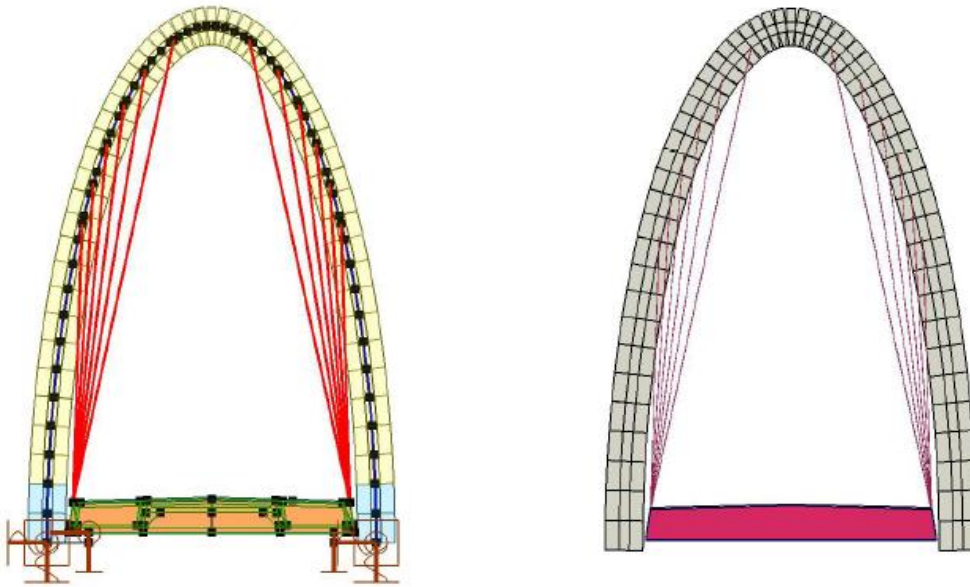
42. ábra: A pilon keresztmetszete



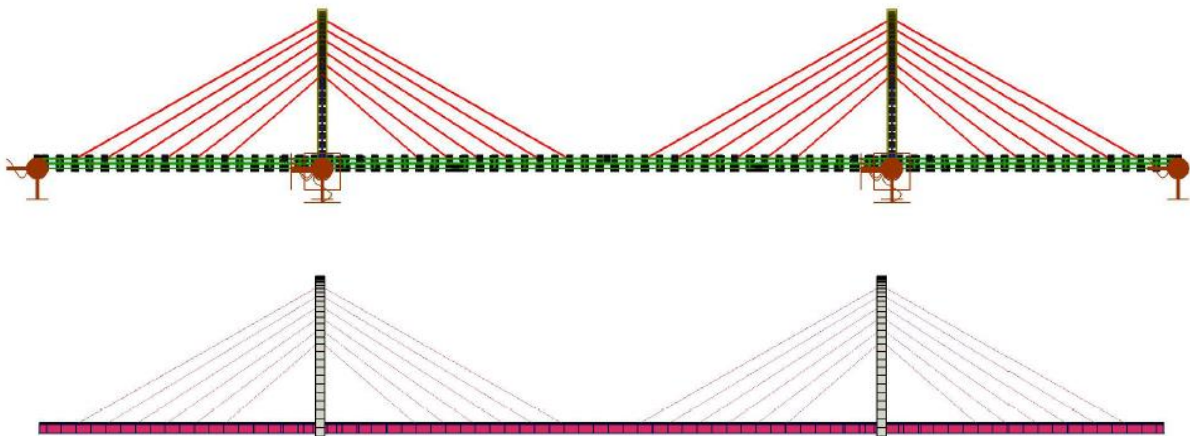
43. ábra: Kábelkeresztmetszetek

A pályaszerkezetet héjelemekből építettem fel. A szekrénytartó lemezeinek vastagságai adottak. A 39. ábra látható, hogy a szekrénytartó belsejében hosszirányú merevítéséhez trapéz alakú merevítőket alkalmaztak; ezt is figyelembe vettem a modellben úgy, hogy szelvényeknek a keresztmetszeti területét az adott lemez keresztmetszeti hosszával elosztva hozzáadtam a

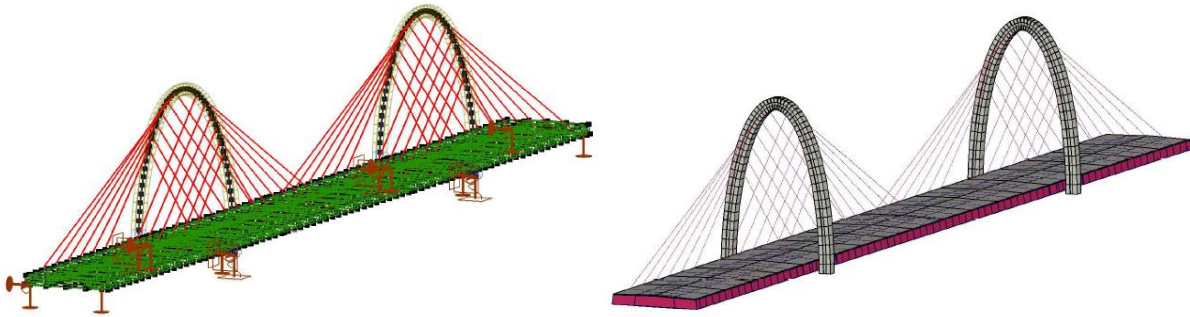
lemez vastagságához. Így jöttek ki a szekrénytartó modelljének lemezvastagságai, az oldalfalak vastagsága 17 – 30 mm, a talplemezé pedig 22 – 42 mm között változik. A diafragmák egységesen 12 mm, alsó övük 25 mm vastagságúak. A kereszttartók vastagsága szintén 12 mm, öveik pedig 1 – 1,4 mm vastagok. Továbbá az acél pályaszerkezet tetején egy 25 cm vastag monolit vasbeton pályalemez található. A végeleemes héjmodellt drótvázás és anyagjelölt módon is ábrázoltam, előlnézete a 44. ábra, oldalnézete a 45. ábra, axonometrikus képe pedig a 46. ábra látható, a diafragmákat és a kereszttartókat pedig alulról a 47. ábra mutatja.



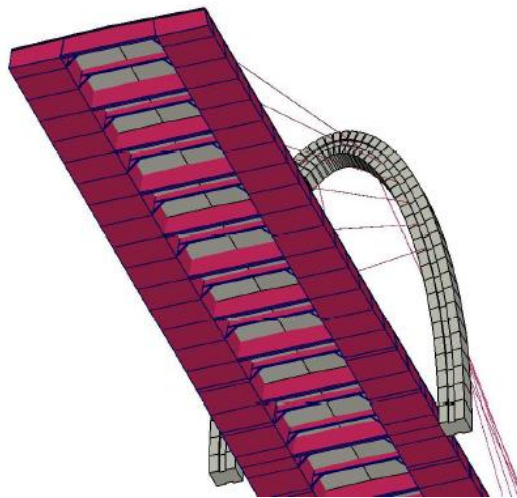
44. ábra: A modell előlnézete



45. ábra: A modell oldalnézete



46. ábra: A modell axonometrikus nézete



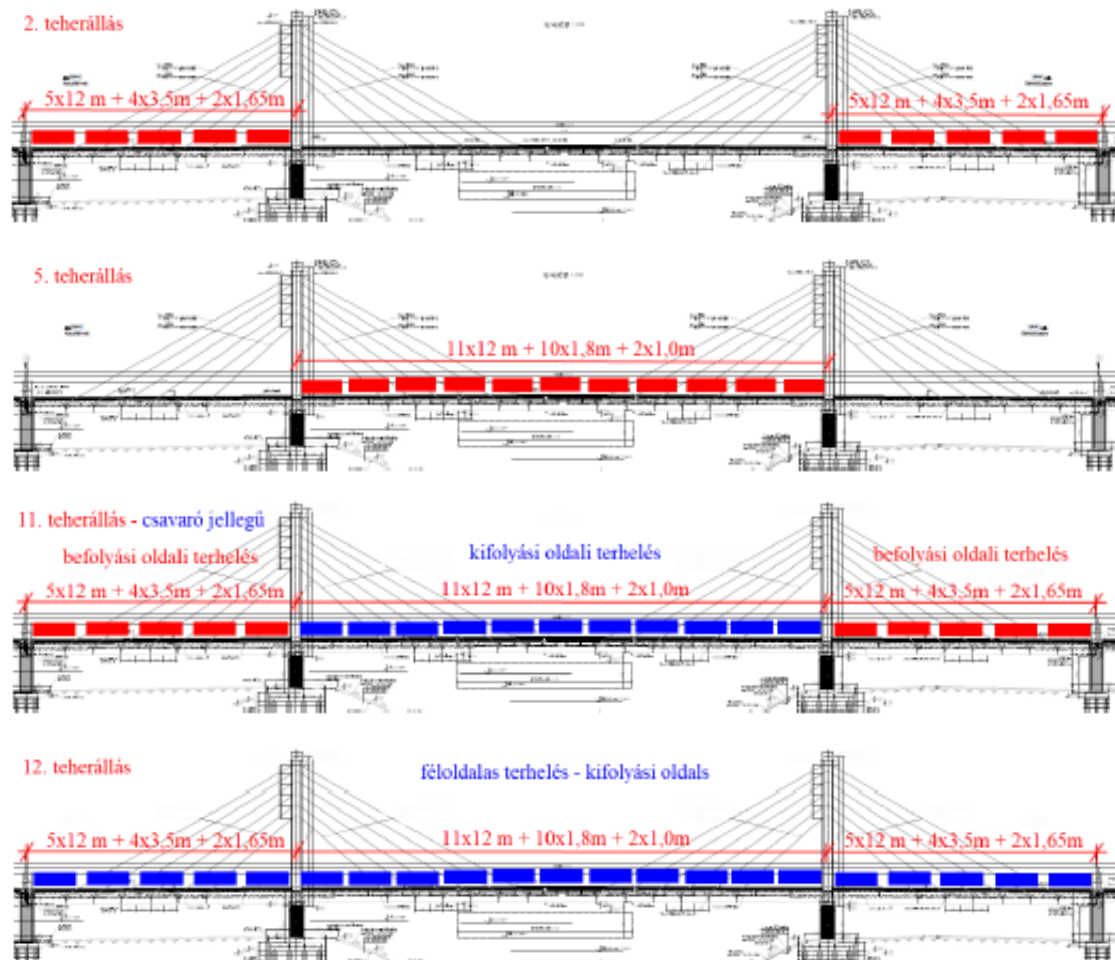
47. ábra: A modell alulnézete

6. A numerikus modell validálása

A modell validálásához megvizsgáltam, hogy a valóságban megépült híd globális elmozdulásai, hogyan viszonyulnak a numerikus modellel számított elmozdulásokhoz ugyanolyan terhelés esetén. Ezt lehetővé teszi az, hogy a híd statikus és dinamikus próbaterheléses vizsgálatát 2021. szeptember 25-án hajtotta végre a BME Hidak és Szerkezetek Tanszék, amin személyesen is részt vettem. A próbaterhelés szakértői jelentését megkaptam, és az ebben kiértékelt hídpálya lehajlásokat és piloncsúcs elmozdulásokat össze tudtam hasonlítani a modellem lehajásaival, elmozdulásaival.

A próbaterhelést összesen 22 darab, 38 t tömegű tehergépkocsival hajtották végre, összesen 13 teherállásban. Modellemben ebből összesen 4 mértékadó teherállást vizsgáltam, a 2., 5., 11. és a 12. teherállást, melyeket az 48. ábra mutat be. A 2. teherállásban a terhelő járművek a szélső támaszköz felett helyezkedtek el, ezért a hídpálya leterhelt része lefelé, a középső támaszközben, pedig felfelé mozdult el. Az 5. teherelrendezésnél a járművek a két pilon között,

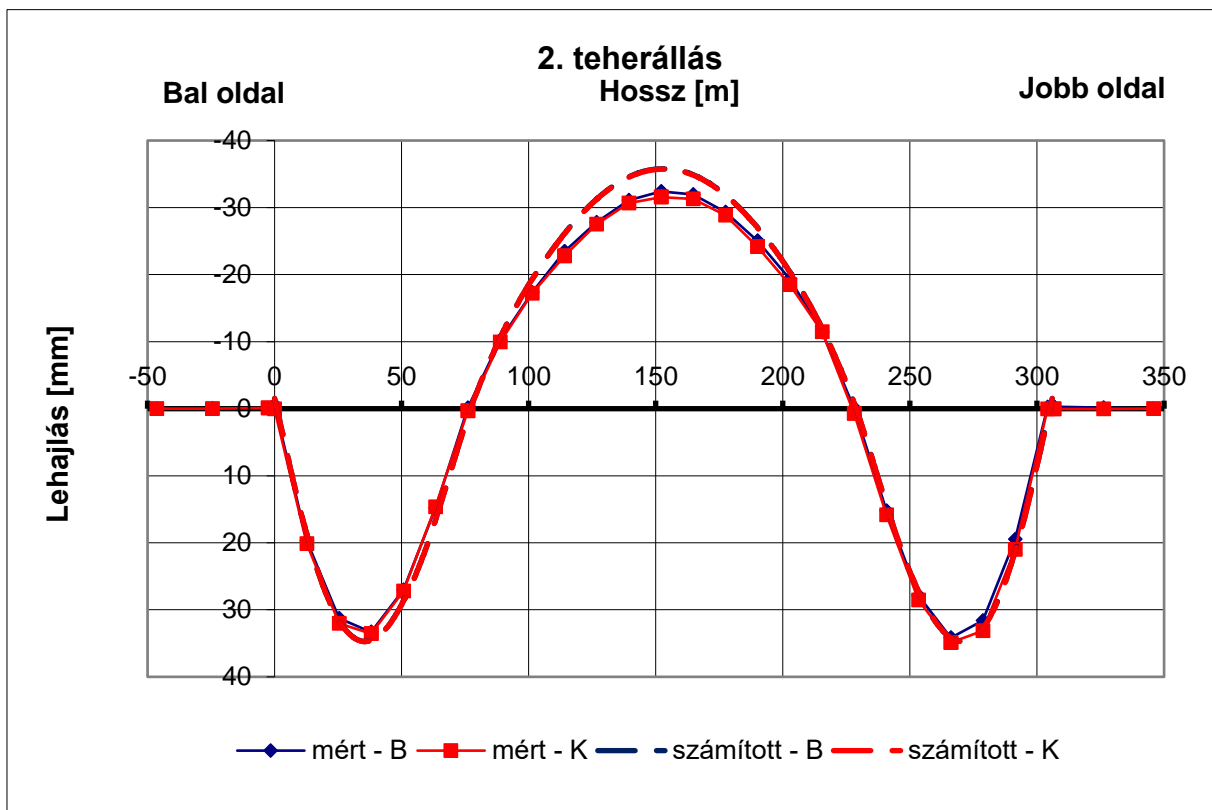
a középső támaszköz felett terheltek, ennél a teherállásnál keletkeztek a maximális elmozdulások. A 11. teherállás csavaró jellegű, a szélső támaszközök fölött a befolyási oldalon terheltek a kamionok, míg a középsőn a kifolyási oldalon. A 12. teherállás egy féloldalas terhelés, ilyenkor az összes teher a kifolyási oldalon helyezkedett el. A 11. és 12. teherállás terhegyszeresen szimmetrikus, ezért a pályaszerkezet befolyási és kifolyási oldali lehajlásai nem egyeznek meg oldalanként. [33]



48. ábra: A négy vizsgált teherállás [33]

A 2. teherállás során a pályaszerkezeten létrejövő elmozdulásokat az 49. ábra grafikusán mutatja. Az ábrán a „mért-B” sötétkék pontvonal jelöli a pályalemez befolyási oldalának lehajlási értékét, a „mért-K” piros pontvonal, pedig a kifolyási oldalét. Ezen kívül még látható a Hidak és Szerkezetek Tanszék által számított várható lehajlások szaggatott vonallal, a kék a befolyási, a piros a kifolyási oldalt jelzi. A bal oldali támaszköz mért lehajlása 33,56 mm, ezzel szemben a modellem 37,88 mm lehajlást adott, a különbség 4,32 mm. Mezőközépen megemelkedik a pályalemez 32,42 mm-t, modellemben a mezőközépi emelkedés 36,68 mm, az

eltérés 4,26 mm. A jobb oldali támaszköz valós lehajlása 34,89 mm, a modellé 37,88 mm, a különbség 2,99 mm. A modell lehajlása az 50. ábra látható. [33]

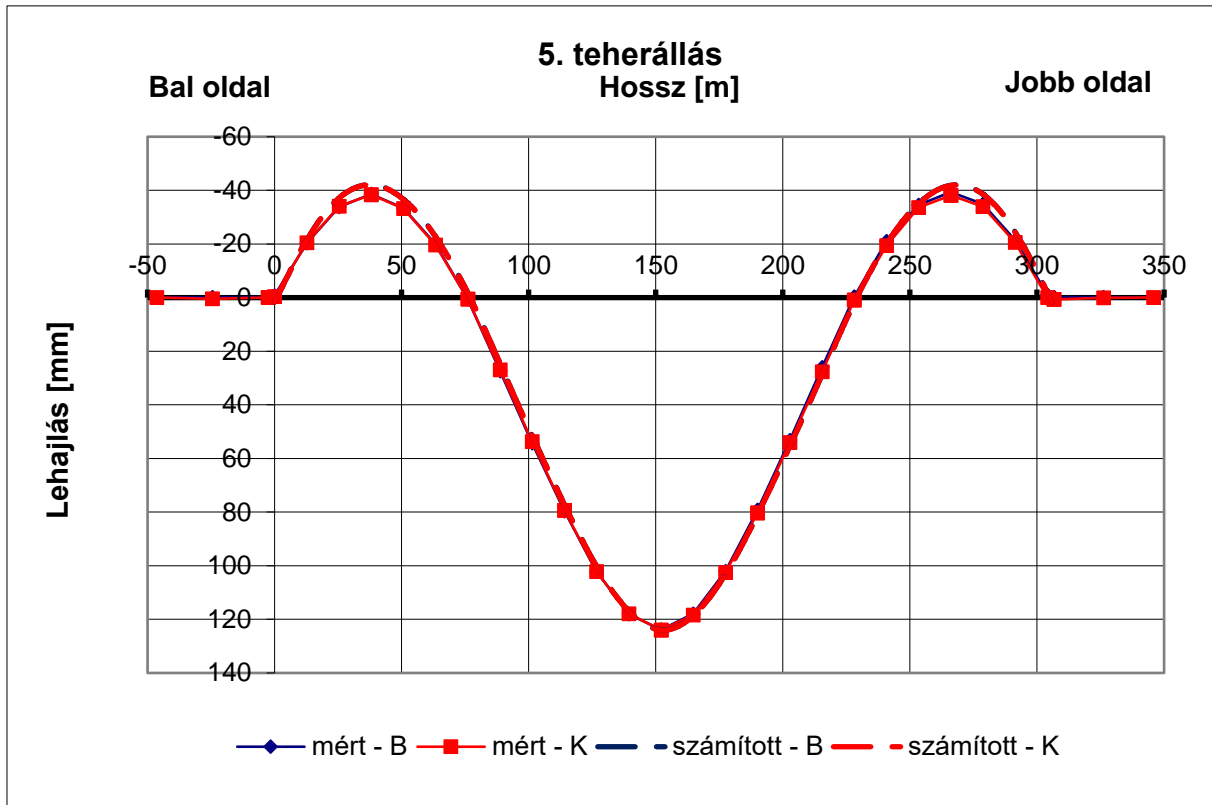


49. ábra: Lehajlások 2. teherállás esetén [33]

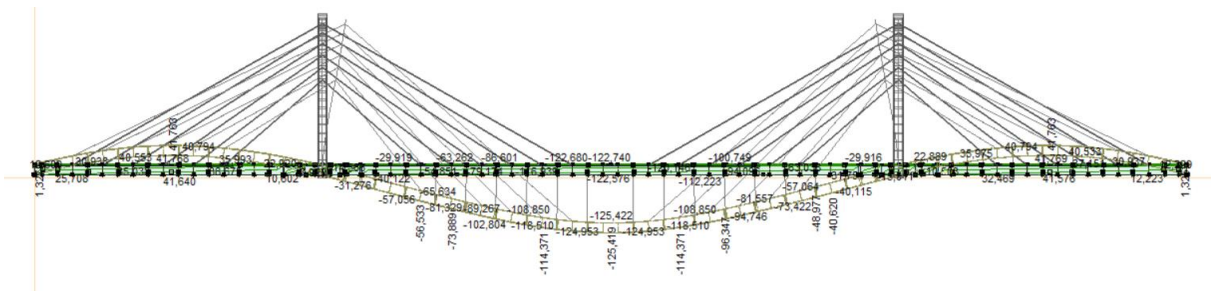


50. ábra: A saját modell lehajlásai 2. teherállás esetén

Az 5. teherállás a középső támaszköz totális leterhelése. A tényleges elmozdulások az 51. ábra láthatóak. A bal szélső támaszközben a pályaszerkezet a teher hatására 38,55 mm-t emelkedik, a modellem ezen a helyen 41,77 mm emelkedést mutat, ez 3,22 mm-es eltérés. A maximális lehajlás mezőközepén következik 123,96 mm-es lehajlással, a modellem ez 125,52 mm, a különbség 1,01 mm. A jobb szélső támaszközben az elmozdulás szintén felfelé történik ez 39,37 mm, a modell ugyanitt 41,77 mm-es értéket mutat, az eltérés 2,40 mm. A modell lehajlásit az 5. teherállásra az 52. ábra látható. [33]

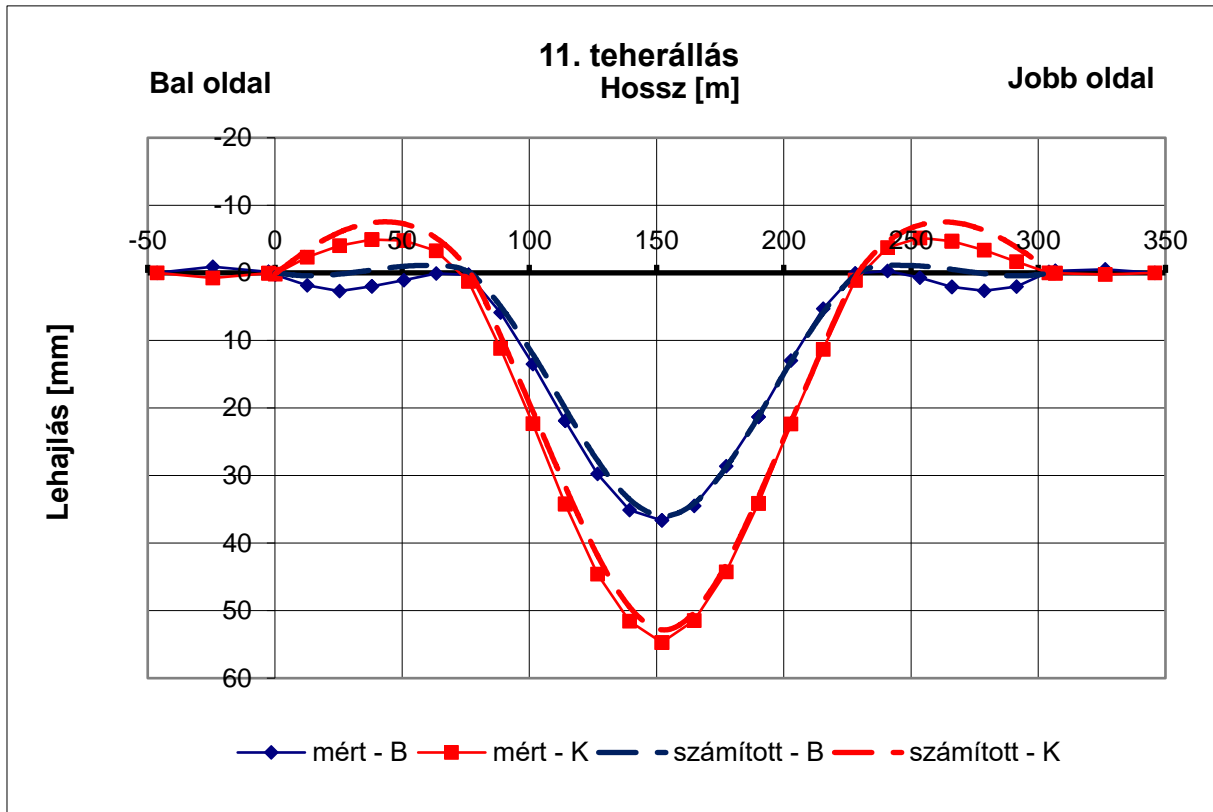


51. ábra: Lehajlások az 5. teherállás esetén [33]

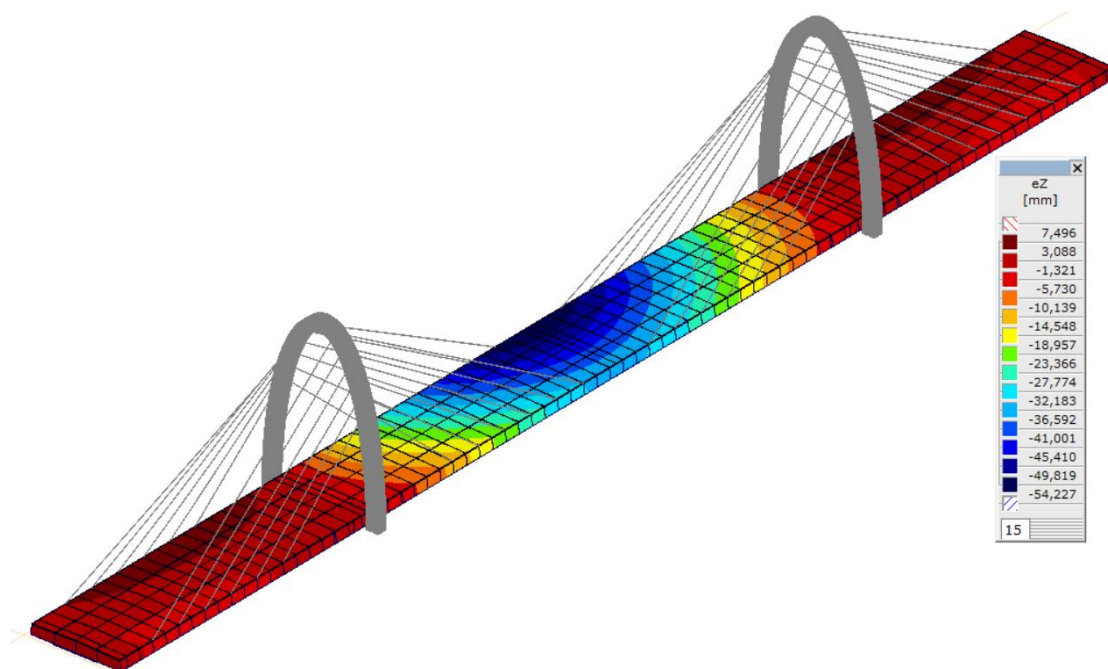


52. ábra: A saját modell lehajlásai az 5. teherállás esetén

A 11. teherállás egy csavaró jellegű teherelrendezés. Ahogy az 53. ábra is láthatjuk a pályaszerkezet oldalainak lehajlásai nem lesznek megegyezők. A pályalemez maximális elmozdulása a bal oldali támaszközben 4,92 mm felfelé, a modell eltolódása 7,50 mm, az eltérés 2,58 mm. Középen a legnagyobb lehajlás a kifolyási oldalon keletkezik ez 54,71 mm, a modell 54,23 mm eltolódást mutat, a különbség 0,48 mm. A jobb oldali támaszközben 5,19 mm-rel mozdul el felfelé a pályalemez, a modellen ez az eltolódás 7,5 mm, az eltérés 2,31 mm. Az 54. ábra látható a modell elmozdulásai. A jobb szemléltetés érdekében színezett testmodellt alkalmaztam, ami mellett megtalálható a hozzá tartozó színskála.



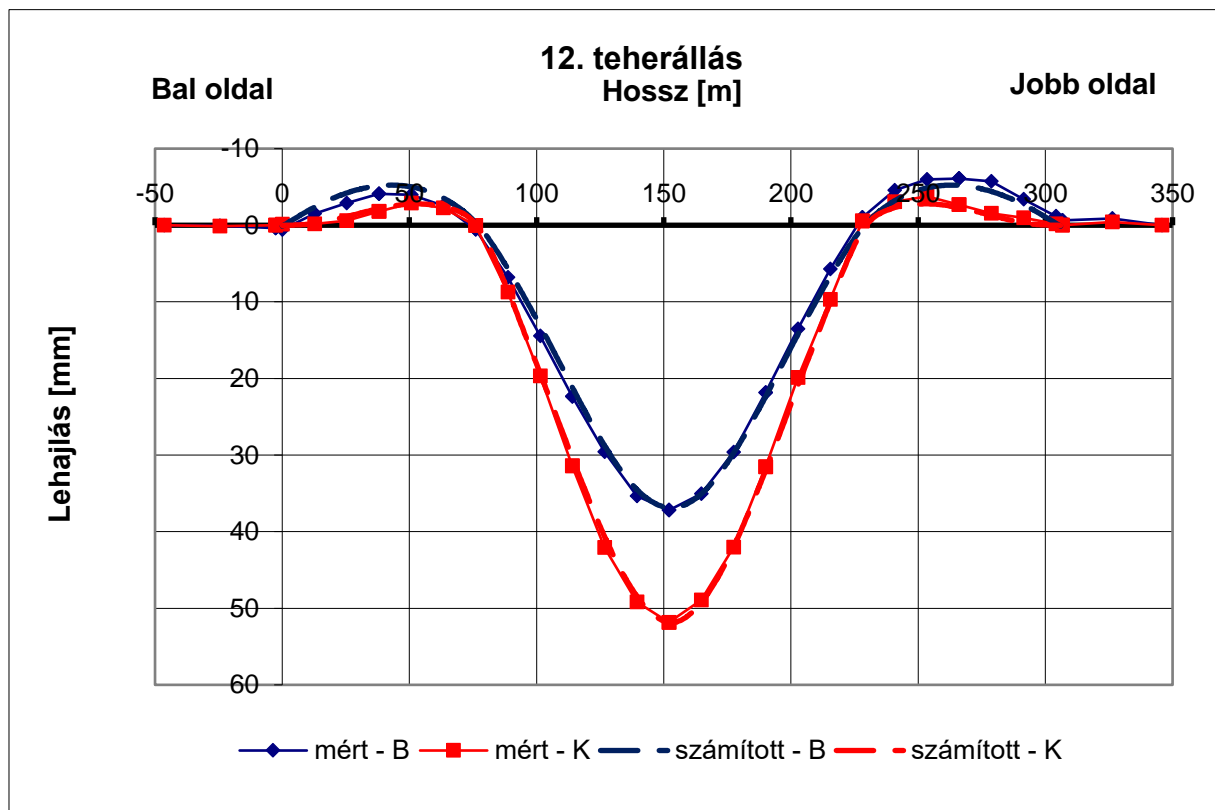
53. ábra: Lehajlások a 11. teherállás esetén [33]



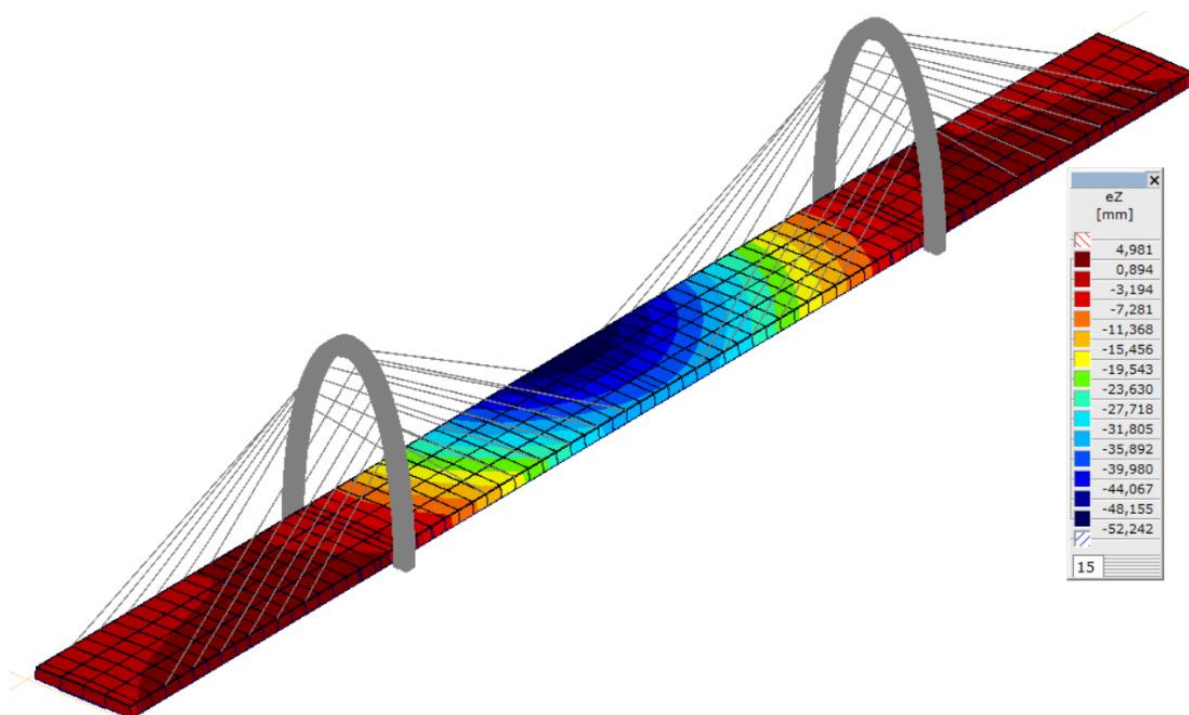
54. ábra: A saját modell lehajlásai a 11. teherállás esetén

A 12. teherállás esetén a terhek féloldalasan helyezkednek el a hídon. Az 55. ábra mutatja a tényleges lehajlásokat. A bal oldali támaszközben a pályaszerkezet legnagyobb eltolódása 4,12 mm felfelé, a modellen ez 4,90 mm, a különbség 0,78 mm. A középső támaszközben a maximális lehajlás 51,84 mm, a modell lehajlása ugyanitt 52,24 mm, az eltérés 0,40 mm. A

jobb oldali támaszközben felfelé mozdul el 6,09 mm-t, a modell pedig 4,90 mm-t, így a különbség 1,19 mm. A modell lehajlásait a 12. teherállásra az 56. ábra láthatjuk. [33]



55. ábra: Lehajlások a 12. teherállás esetén [33]



56. ábra: A saját modell lehajlásai a 12. teherállás esetén

A fentebb vizsgált lehajlások összefoglalva is láthatóak a 2. táblázatban. A különbségeket százalékosan is kiértékeltem. A nagyobb mértékadó lehajlások esetén, az 5., 11., és 12. teherállásokra a közbenső támaszközben a modell nagy pontossággal követi a mért elmozdulásokat, 0.5 mm-es eltéréssel. A valós lehajlások és a modell lehajlái között a legnagyobb eltérés mindössze 1-2 mm, de a mértékadó teherállásokban a kevesebb a jellemző.

Maximális pályalemez lehajlások különböző teherállásokra									
Teherállás	Bal oldali támaszköz			Közbenső támaszköz			Jobb oldali támaszköz		
	Mért [mm]	Modell [mm]	Eltérés [%]	Mért [mm]	Modell [mm]	Eltérés [%]	Mért [mm]	Modell [mm]	Eltérés [%]
2.	33,56	37,88	12,9	-32,42	-36,68	13,1	34,89	37,88	8,6
5.	-38,55	-41,77	8,4	123,96	125,52	1,3	-39,37	-41,77	6,1
11.	-4,92	-7,50	52,4	54,71	54,23	0,9	-5,19	-7,50	44,5
12.	-4,12	-4,90	18,9	51,84	52,24	0,8	-6,09	-4,90	19,5

2. táblázat: Maximális pályalemez lehajlások összefoglalása

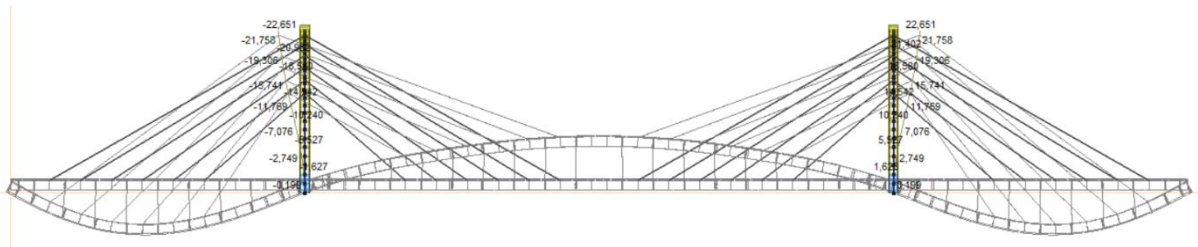
Továbbá a validálás érdekében, kigyűjtöttem a diagramokon látható, a Hidak és Szerkezetek Tanszék által számított várható lehajlási értékeket („számított”) és ezekkel is összehasonlítottam a saját fejlesztésű modellem elmozdulásaival („modell”), ez a 3. táblázatban látható. Az eltérések már 10% alattiak, a fenti példákat megnézve a számított elmozdulások és a modell értékei, már nem csak a mértékadó, viszonylag nagyobb elmozdulásoknál, hanem a kisebbeknél is nagyon közeliek. A leírtak alapján a saját fejlesztésű modellem megfelelő pontosságú a lehajlások követésére.

Maximális pályalemez lehajlások különböző teherállásokra a számított adatokkal									
Teherállás	Bal oldali támaszköz			Közbenső támaszköz			Jobb oldali támaszköz		
	Számított [mm]	Modell [mm]	Eltérés [%]	Számított [mm]	Modell [mm]	Eltérés [%]	Számított [mm]	Modell [mm]	Eltérés [%]
2.	34,7	37,9	9,0	-35,7	-36,68	2,7	34,70	37,88	9,0
5.	-42,01	-41,8	0,6	124,0	125,52	1,2	-42,01	-41,77	0,6
11.	-7,6	-7,5	0,8	52,8	54,23	2,7	-7,60	-7,50	0,8
12.	-5,2	-4,9	6,5	51,8	52,24	0,8	-5,20	-4,90	6,5

3. táblázat: Maximális pályalemez lehajlások a számított adatokkal

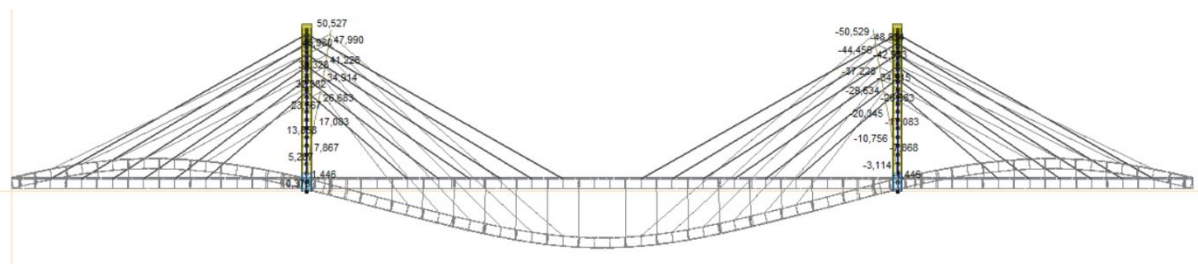
A piloncúcs elmozdulásait is mérték a próbaterhelés során, az eredmények a próbaterhelési jelentésben megtalálhatók. A piloncúcs mozgásánál figyelembe kell venni, hogy a mérési eredmények tartalmazzák az egyenlőtlen hőmérséklet-változás hatásából keletkező elmozdulásokat is, ezért a valós és a modellbeli elmozdulások eltérhetnek. A 48. ábra bemutatott teherállásokra vizsgálom a piloncúcsok hosszirányú elmozdulásait.

A 2. teherállás esetén, ahogy az 57. ábra látható, a pilonok kifelé dőlnek, a bal oldali piloncsúcs mért elmozdulása 16 mm, a jobb oldalié 25 mm, a modell piloncsúcsai szintén kifelé mozdulnak el 22,65 mm-t.



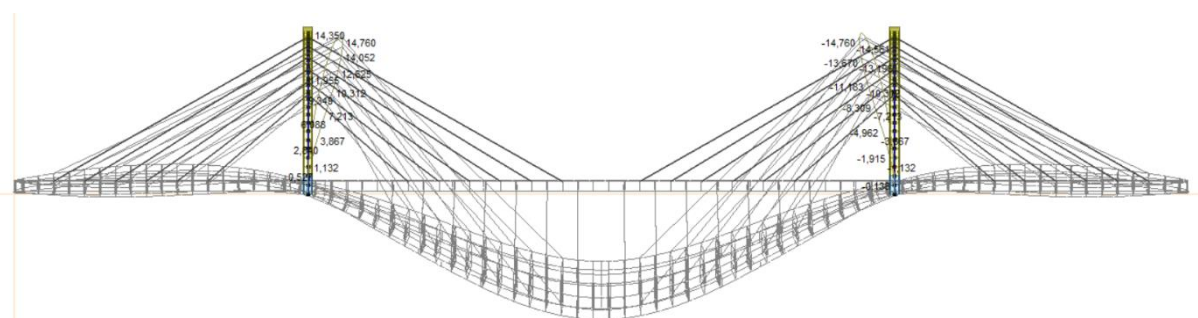
57. ábra: A pilon elmozdulása a 2. teherállás esetén – saját modell

Az 5. teherállás során keletkeznek a pilonok legnagyobb elmozdulásai, a csúcsok befelé mozdulnak el, a bal oldali pilon 51 mm-t, a jobb oldali, pedig 48 mm-t, a modell eltolódása 50,53 mm. A 58. ábra mutatja a pilonok elmozdulását.



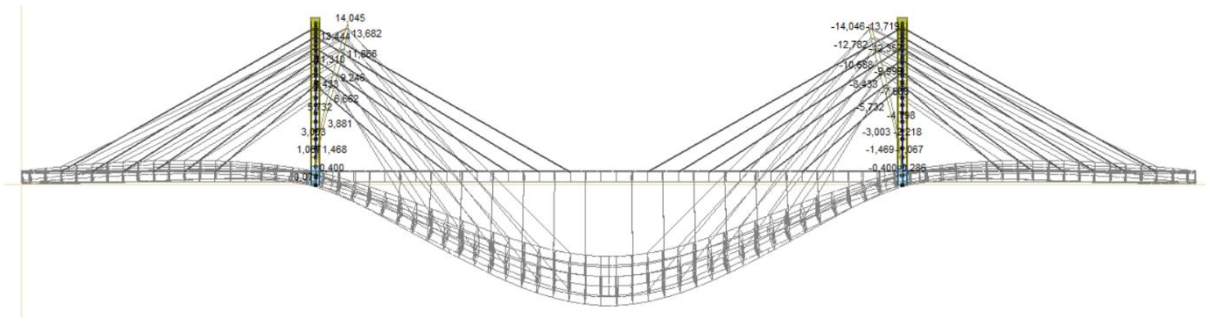
58. ábra: A pilon elmozdulása az 5. teherállás esetén – saját modell

A 11. teherállás esetén a pilon befelé dől. A mért elmozdulás a bal oldali pilonon 19 mm, a jobb oldalin 7 mm. A modellben az elmozdult alak már elcsavarodott, a piloncsúcs elmozdulása 14,76 mm. Az elmozdult alak a 59. ábra látható.



59. ábra: A pilon elmozdulása a 11. teherállás esetén – saját modell

A 12. teherállásban létrejövő elmozdulásokat a 60. ábra mutatja, a pilonok befelé mozdulnak el. A baloldali piloncsúcs mért eltolódása 14 mm, a jobb oldalié 6 mm, míg a modellé 14,05 mm.



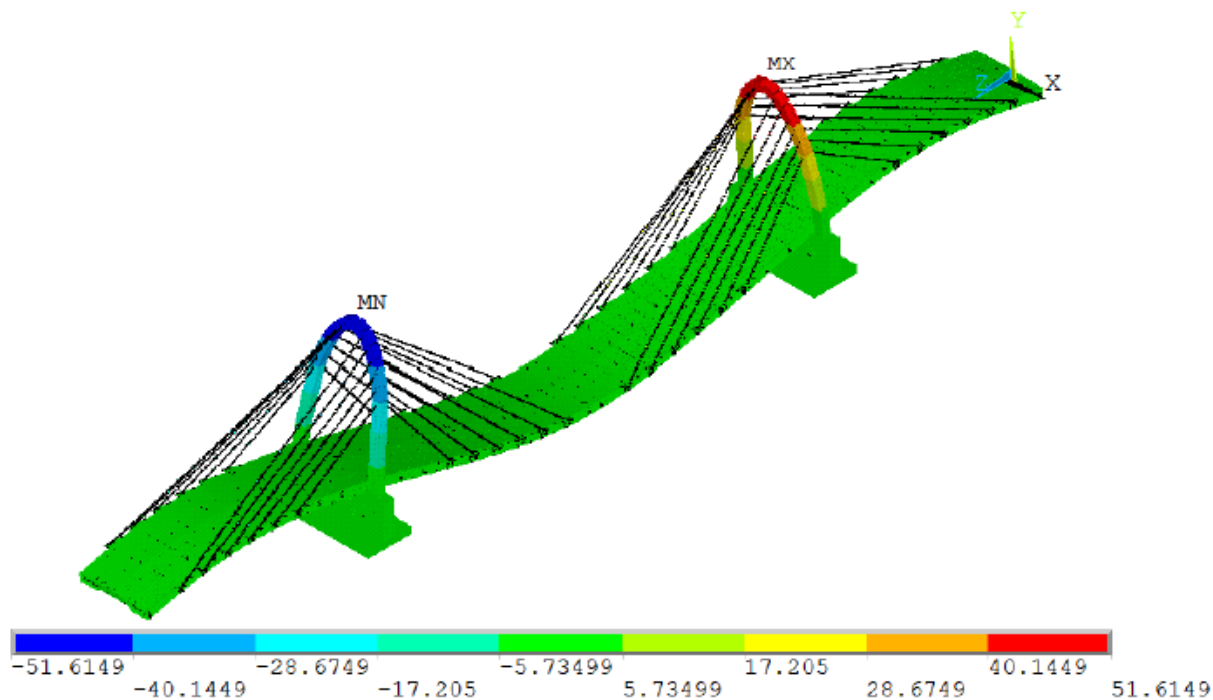
60. ábra: A pilon elmozdulása a 12. teherállás esetén – saját modell

A 4. táblázatban összefoglalva látható a piloncsúcsok maximális elmozdulásának összehasonlítása. Ezek közül az 5. teherállást érdemes megvizsgálni, ekkor keletkezik a piloncsúcs legnagyobb hosszirányú elmozdulása. A mért értékek közel megegyeznek egymással, 51 mm, illetve -48 mm, tehát a modell eredményei 0,47 mm-rel és 2,53 mm-rel térnek el.

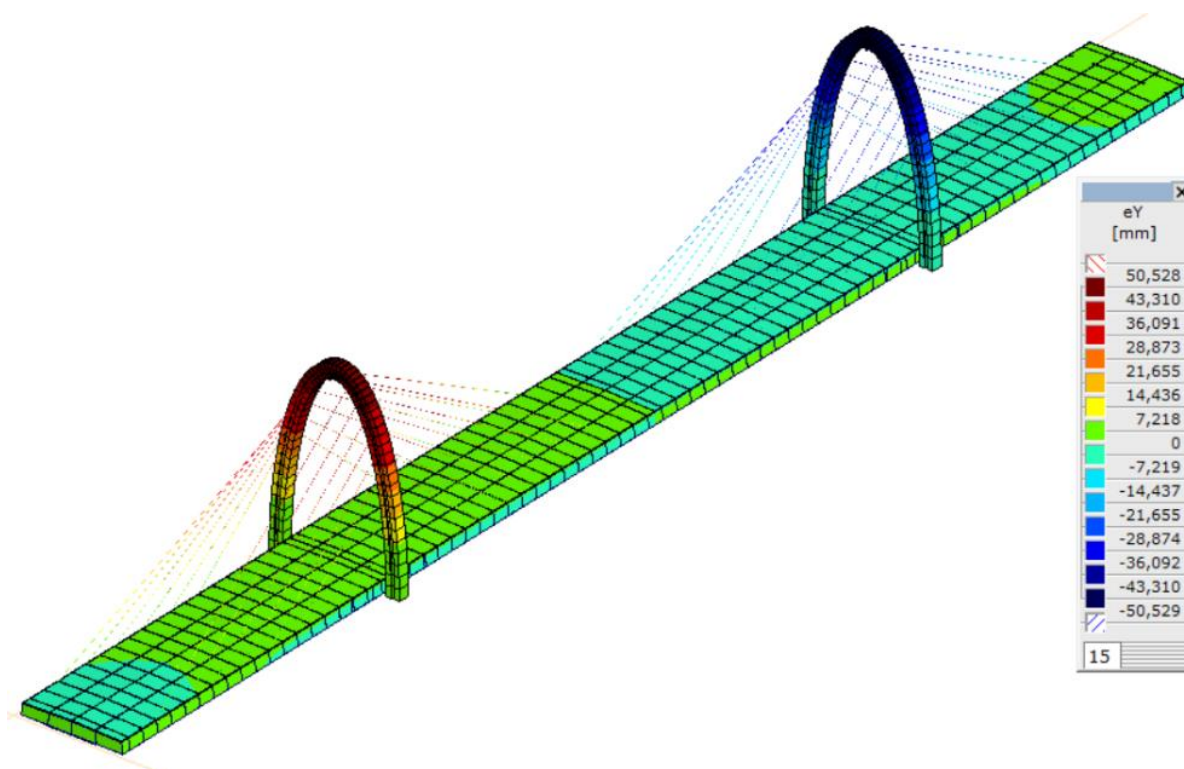
A piloncsúcs maximális hosszirányú elmozdulása különböző teherállásokra						
Teherállás	Bal oldali			Jobb oldali		
	Mért [mm]	Modell [mm]	Eltérés [%]	Mért [mm]	Modell [mm]	Eltérés [%]
2.	-16	-22,65	41,6	25	22,65	9,4
5.	51	50,53	0,9	-48	-50,53	5,3
11.	19	14,76	22,3	-7	-14,76	110,9
12.	14	14,05	0,4	-6	-14,05	134,2

4. táblázat: A piloncsúcs maximális hosszirányú elmozdulásai összefoglalva

A szakértői jelentésben erre az egy teheresetre található számított érték, melynek elmozdulásait a 61. ábra mutatja be. A számított piloncsúcs elmozdulás $\pm 51,7$ mm; ezt az értéket 1,17 mm-es eltéréssel közelíti a modellem. A két modellen keletkező elmozdulásokat a 61. ábra (Tanszék) és a 62. ábra mutatja be (saját modell).



61. ábra: Piloncsúcs számított hosszirányú elmozdulása az 5. teherállásban [33]



62. ábra: A saját modell piloncsúcsának hosszirányú elmozdulása az 5. teherállásban

A saját fejlesztésű modell tehát mind a pályaszerkezet lehajlásainál, mind a piloncsúcs hosszirányú elmozdulásainál jól közelíti a híd valós, globális szerkezeti viselkedését, így

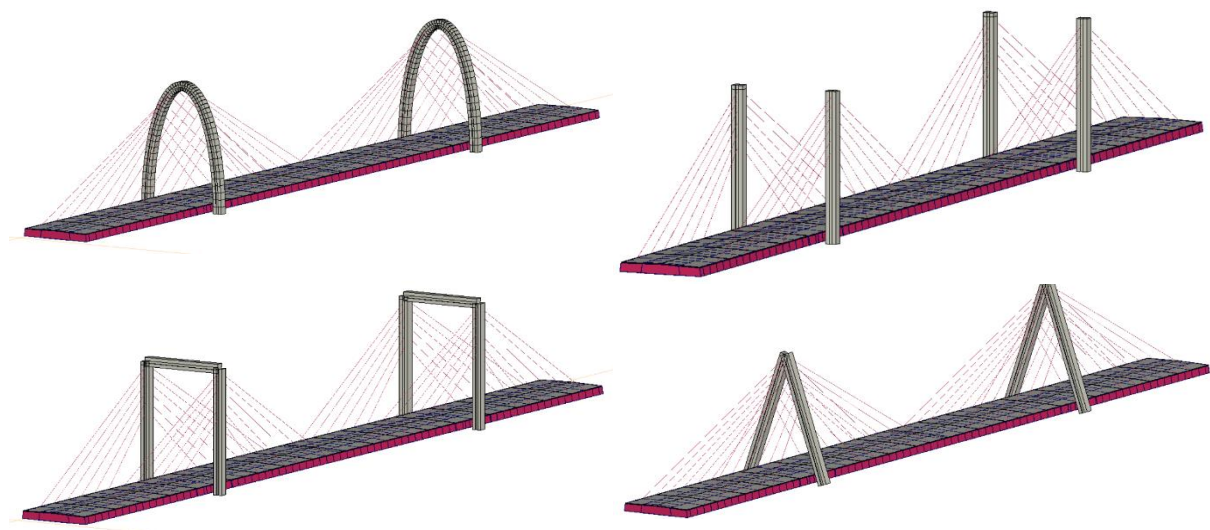
megállapítható, hogy a modell alkalmas a továbbiakban részletezett vizsgálatok és elemzések végrehajtására.

7. Különböző alakú pilonok elmozdulásainak összehasonlítása

Ebben a fejezetben azt mutatom be, hogy az íves pilonú modellel, a pilon alakjának megváltoztatása, milyen elmozdulás-különbségeket okoz az íves pilonkialakításhoz képest. A numerikus modellen az íves pilont ezért kicserélem különböző alakú, de azonos globális geometriai jellemzőkkel rendelkező pilonokra, és ezek csúcsainak elmozdulásait és pályaszerkezeti lehajlásait elemzem. Ehhez a pályaszerkezeten nem változtatok semmit és kábelkiosztás is marad azonos a tiszai Tisza-hídon alkalmazott kiosztással. A kábeleknek a pályaszerkezethez való csatlakozását sem módosítottam, ugyanakkor a pilonba való bekötések helyzetét értelemszerűen változtatni kellett a pilon alakoktól függően, de a kábelek bekötési magassága mindegyik pilonnál megegyezik.

7.1. A vizsgált pilonok geometriai kialakítása

Három különböző alakú pilont vizsgáltam és hasonlítottam össze az íves pilonnal, egy kétoszloposat, egy portált és egy A-alakút. Úgy gondolom, hogy egy ferdekábeles Tisza-hídnál jellemzően, ezek a pilonkialakítások jöhetnek szóba. A pilonok magassága és szárainak távolsága megegyezik. Az utóbbit az A-alakú pilonnál száranként növelni kellett 0,6 m-rel, hogy ne metsszen bele a pályaszerkezetbe. Keresztmetszeti szinten is megegyeznek, a keresztmetszet az 5. fejezetben a 42. ábra volt látható. A négy pilonkialakítást a 63. ábra mutatja.



63. ábra: A négy vizsgált pilonkialakítás

7.2. A négy pilonkialakítás vizsgálata merevségi szempontból

Az elmozdulásokat mind a négy hídmodellel a 6. fejezetben ismertetett teherállások esetén vizsgálom, melyekben a piloncsúcsok hosszirányú és keresztirányú eltolódásait és a mezőközépi lehajlásokat vetem össze.

A kétoszlopos kialakítás esetén a piloncsúcs elmozdulásait az 5. táblázat foglalja össze. Látható, hogy a 2. és 5. teherállásnál a hosszirányú eltolódások jó egyezést mutatnak, de a csavaró jellegű és féloldalas terhek esetén már nagyobb, 5 mm, illetve 2 mm különbségeket tapasztalunk. A kétoszlopos pilonkialakítás keresztirányú elmozdulásai, nagyságrendekkel nagyobbak az íves pilonéhoz képest.

Piloncsúcs maximális eltolódása különböző teherállásokra					
Teherállás	Hosszirányba			Keresztirányba	
	Íves pilon [mm]	Két oszlopos pilon [mm]	Eltérés [%]	Íves pilon [mm]	Két oszlopos pilon [mm]
2.	-22,65	-22,69	0,2	0,01	0,91
5.	50,53	50,63	0,2	0,08	-13,21
11.	14,76	19,88	34,7	-0,03	8,28
12.	14,05	16,04	14,2	0,08	9,26

5. táblázat: Az íves pilon és a kétoszlopos pilon elmozdulásai

A pályaszerkezet mezőközépi eltolódásait a 6. táblázat foglalja össze. A kétoszlopos kialakítás esetén a lehajlások nagyobbak ~2 mm-rel, kivéve az 5. teherállást, amely során teljesen megegyező mezőközépi lehajlást produkálnak.

Pályaszerkezet lehajlása			
Teherállás	Mezőközépen		
	Íves pilon [mm]	Két oszlopos pilon [mm]	Eltérés [%]
2.	-36,68	-37,76	2,9
5.	125,52	125,5	0,0
11.	54,23	57,29	5,6
12.	52,24	53,72	2,8

6. táblázat: A pályaszerkezet mezőközépi lehajlásai íves és kétoszlopos pilonkialakítás esetén

A portál alakú pilonkialakítás hasonló a kétoszloposhoz, annyi különbséggel, hogy felül a két szár egy gerendával össze van kötve. Várhatóan így kisebbek lesznek a keresztirányú elmozdulások. A 7. táblázatban látható a portál és az íves pilon elmozdulásainak összehasonlítása. A hosszirányú elmozdulások közötti különbség, ahogy a kétoszlopos pilon

esetében, itt is a 11. és 12. teherállásnál következnek be, ez 1 – 3 mm-re adódik. A portál pilon keresztirányú elmozdulásai igen kicsik, hasonlóan az íves kialakításúhoz, ezért az eltérések nem adnak mértékadó eredményeket.

Piloncsúcs maximális eltolódása különböző teherállásokra						
Teherállás	Hosszirányba			Keresztirányba		
	Íves pilon [mm]	Portál pilon [mm]	Eltérés [%]	Íves pilon [mm]	Portál pilon [mm]	Eltérés [%]
2.	-22,65	-22,71	0,3	0,01	0,01	---
5.	50,53	50,3	0,5	0,08	0,03	---
11.	14,76	18,43	24,9	-0,03	0,43	---
12.	14,05	15,64	11,3	0,08	0,81	---

7. táblázat: Az íves pilon és a portál alakú pilon elmozdulásai

A mezőközépi lehajlások a 8. táblázatban láthatóak. A 2. és 12. teherállásra a lehajlások megegyeznek. Az 5. teherállás esetén a portál pilonos változat 1 mm-rel kisebb lehajlást mutat, viszont a 11. teherállásnál már 1,5 mm-rel nagyobb a lehajlás értéke, az íves pilonú változathoz képest.

Pályaszerkezet lehajlása			
Teherállás	Mezőközépen		
	Íves pilon [mm]	Portál pilon [mm]	Eltérés [%]
2.	-36,68	-36,45	0,6
5.	125,52	124,35	0,9
11.	54,23	55,78	2,9
12.	52,24	52,67	0,8

8. táblázat: A pályaszerkezet mezőközépi lehajlásai íves és portál pilonkialakítás esetén

Az A-alakú pilon hosszirányú és keresztirányú eltolódásait a 9. táblázat mutatja. A hosszirányú elmozdulások megegyeznek az íves pilon elmozdulásaival, egyedül az 5. teherállásnál van nagyobb 1 mm-es különbség. A keresztirányú elmozdulások mindkét kialakításnál igen csekélyek, így az eltérések nem mértékadóak.

Piloncsúcs maximális eltolódása különböző teherállásokra						
Teherállás	Hosszirányba			Keresztirányba		
	Íves pilon [mm]	A-alakú pilon [mm]	Eltérés [%]	Íves pilon [mm]	A-alakú pilon [mm]	Eltérés [%]
2.	-22,65	-23,12	2,1	0,01	0	---
5.	50,53	51,59	2,1	0,08	0	---
11.	14,76	14,24	3,5	-0,03	-0,06	---
12.	14,05	14,24	1,4	0,08	-0,13	---

9. táblázat: Az íves pilon és az A-alakú pilon elmozdulásai

A pályaszerkezet mezőközépi lehajlásai a 10. táblázatban láthatóak. A 2. és 5. teherállás során az A-alakú pilonkialakításnál nagyobb lehajlásokat tapasztalhatunk, a különbség az előbb említett teherállásra 1 mm, az utóbbinál majdnem 3 mm.

Pályaszerkezet lehajlása			
Teherállás	Mezőközépen		
	Íves pilon [mm]	A-alakú pilon [mm]	Eltérés [%]
2.	-36,68	-37,59	2,5
5.	125,52	128,13	2,1
11.	54,23	53,5	1,3
12.	52,24	52,71	0,9

10. táblázat: A pályaszerkezet mezőközépi lehajlásai íves és A-alakú pilonkialakítás esetén

Összefoglalásként készítettem a három vizsgált elmozdulásra egy-egy táblázatot, melyben vizsgáltam, hogy mely pilon kialakítások adják a legkisebb elmozdulásokat az adott teherre. Az első táblázat a piloncsúcsok maximális, hosszirányú eltolódásait foglalja össze, ez a 11. táblázatban látható. A táblázat utolsó oszlopában található mely pilonkialakítás produkálta a legkisebb elmozdulást. A hosszirányú elmozdulások vizsgálatánál az íves pilon két teherelrendezésre is a legkisebb elmozdulással rendelkezik.

Piloncsúcs maximális hosszirányú eltolódása különböző teherállásokra					
Teherállás	Íves pilon [mm]	Két oszlopos pilon [mm]	Portál pilon [mm]	A-alakú pilon [mm]	Legkisebb elmozdulás
2.	-22,65	-22,69	-22,71	-23,12	Íves pilon
5.	50,53	50,63	50,3	51,59	Portál pilon
11.	14,76	19,88	18,43	14,24	A-alakú pilon
12.	14,05	16,04	15,64	14,24	Íves pilon

11. táblázat: A piloncsúcsok hosszirányú elmozdulásainak összefoglalása

A keresztirányú elmozdulások összefoglalója a 12. táblázatban található. Ezek az értékek a két oszlopok kialakítás kivételével elhanyagolhatóan kicsik. A keresztirányú eltolódások vizsgálatánál a 11. és 12. teherállásokra az íves pilonkialakítás nyújtja a legkisebb elmozdulásokat. A 2. és 5. teherállások esetén az A-alakú pilon rendelkezik a legkisebb elmozdulásokkal.

Piloncsúcs maximális keresztirányú eltolódása különböző teherállásokra					
Teherállás	Íves pilon [mm]	Két oszlopos pilon [mm]	Portál pilon [mm]	A-alakú pilon [mm]	Legkisebb elmozdulás
2.	0,01	0,91	0,01	0	A-alakú pilon
5.	0,08	-13,21	0,03	0	A-alakú pilon
11.	-0,03	8,28	0,43	-0,06	Íves pilon
12.	0,08	9,26	0,81	-0,13	Íves pilon

12. táblázat: A piloncsúcsok keresztirányú elmozdulásainak összefoglalása

A 13. táblázatban a pályaszerkezet mezőközépi lehajlásait mutatom be. A portál pilonkialakítás kétszer is a legkisebb lehajlással rendelkezik. Kiemelném, hogy a 12. teherállásra a legkisebb lehajlás az íves pilonkialakításnál jön létre.

Pályaszerkezet lehajlása mezőközépen					
Teherállás	Íves pilon [mm]	Két oszlopos pilon [mm]	Portál pilon [mm]	A-alakú pilon [mm]	Legkisebb elmozdulás
2.	-36,68	-37,76	-36,45	-37,59	Portál pilon
5.	125,52	125,50	124,35	128,13	Portál pilon
11.	54,23	57,29	55,78	53,5	A-alakú pilon
12.	52,24	53,72	52,67	52,71	Íves pilon

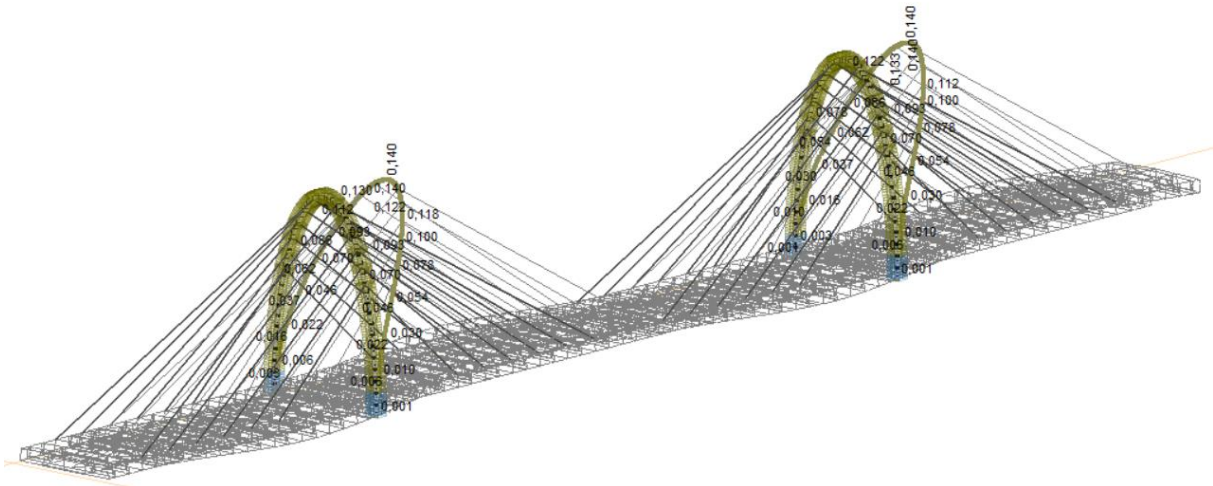
13. táblázat: A pályaszerkezet mezőközépi lehajlásainak összefoglalása

Ennek megfelelően elmozdulások szempontjából a legkedvezőbb eredményt az íves kialakítású modell mutatta. A négy pilonkialakítás közül ezen öt alkalommal keletkezett a legkisebb elmozdulás, a keresztirányú elmozdulásokat is beleértve.

7.3. A négy pilonkialakítás vizsgálata stabilitási szempontból

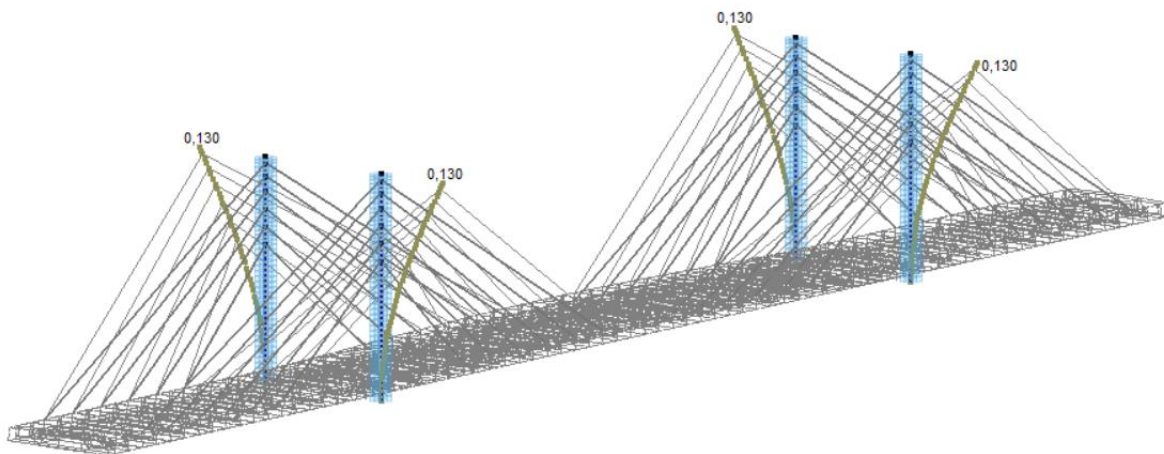
E fejezetben a négy pilon kialakítást stabilitás szempontjából vizsgálom. A kritikus teherparaméter (α_{cr}) értékeit és az első sajátalakokat hasonlítom össze egy, a piloncsúcson működtetett függőleges erő hatására. Az íves és az A-alakú pilonokra egységesen 1000 kN, a kétszlopos és a portál pilonokra oszloponként 500-500 kN függőleges lefelé ható erőt működtettem. Így a pilonokra működtetett nyomó igénybevétel mindegyik esetben közel azonosnak tekinthető.

Az íves pilon, ahogy a 64. ábra is látható, a kritikus egyensúlyi állapotban jobbra hajlik ki. A kritikus teherparaméter értéke 708,94.



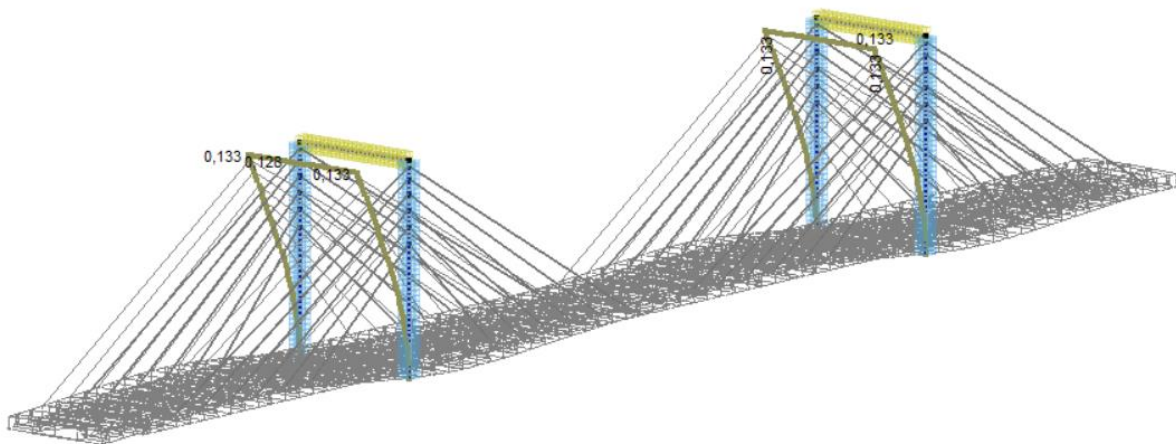
64. ábra: Az íves pilon első kihajlási alakja

A kétszlopos pilon kritikus egyensúlyi állapotban keresztirányban hajlik ki, ezt a 65. ábra szemlélteti. A kritikus teherparaméter értéke 547,85.



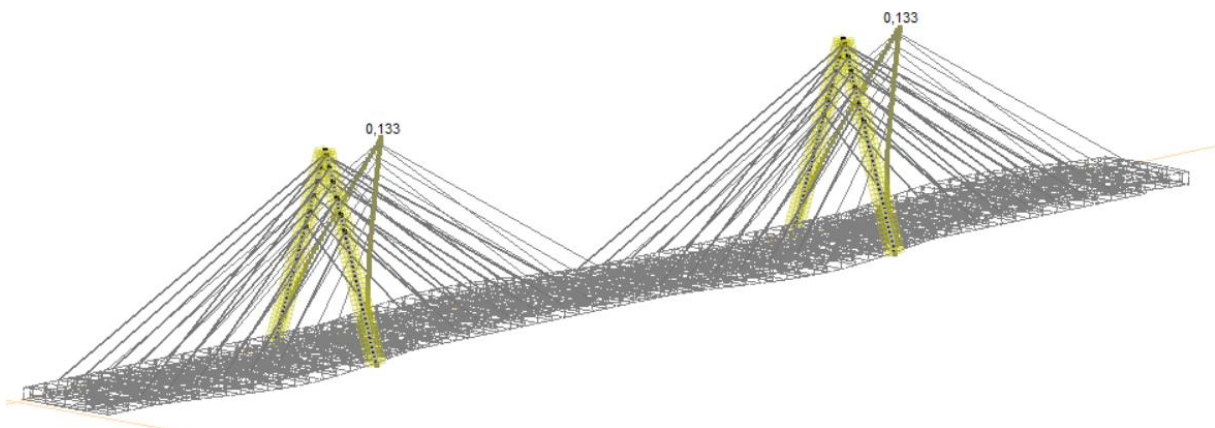
65. ábra: A kétszlopos pilon első kihajlási alakja

A portál kialakítású pilonnál a kritikus egyensúlyi állapot a 66. ábra látható, az íves pilonnal ellentétesen, de hasonló módon hajlik ki, hosszirányban balra. A kritikus teherparaméter 653,44.



66. ábra: A portál alakú pilon első kihajlási alakja

Az A-alakú pilon kritikus egyensúlyi állapotban lévő kihajlási alakja hasonlít az íves pilonnál tapasztaltnak, a pilonok hosszirányban jobbra mozdulnak el, ezt a 67. ábra mutatja. A kritikus teherparaméter értéke 610,47.



67. ábra: Az A-alakú pilon első kihajlási alakja

Közel azonos teheresetek mellett a legnagyobb kritikus teherparaméter az íves pilonnál jött létre, $\alpha_{cr} = 708,94$, azaz ehhez tartozik a legnagyobb kritikus erő. A 4 pilon közül tehát az adott 1000 kN-os teherre az íves pilonkialakítás adta a legmagasabb kritikus teherszorozót, így stabilitási szempontból a legkedvezőbbnek mondható.

8. Összefoglalás

Dolgozatom célja az íves pilonnal épülő ferdekábeles hidak tanulmányozása volt. Az irodalomkutatás során a Tisza-hídon kívül összesen 15 darab íves pilonnal épült ferdekábeles hidat találtam, melyeket a 3. fejezetben mutattam be. Az íves pilon vizsgálatához az M44-es autópályán új tisztaugri Tisza-hídjával foglalkoztam, mely fél ellipszis alakú pilonokkal került kialakításra.

A hídról egy végeeselemes modellt készítettem. A modellemet a próbaterhelés során kapott mért és a BME Hidak és Szerkezetek Tanszék által számított elmozdulások alapján validáltam. Eredményül azt kaptam, hogy a modellem jól közelíti a tanszék által számított lehajlásokat és a mért értékekhez képest is ± 2 mm eltéréssel jó eredményeket ad a mértékadó teherállások maximális elmozdulásainál. Megjegyzem, hogy a piloncsúcs mérési eredményei tartalmazzák az egyenlőtlen hőmérséklet-változás hatásából keletkező elmozdulásokat is, melyet a numerikus modellben nem vettem figyelembe, így a tapasztalt különbségek ennek tudhatók be. Összességében megállapítottam, hogy az M44-es autópályán új tisztaugri Tisza-híd meder hídjáról készített modellem merevség szempontjából jó egyezést mutat a mért és a tanszék validált numerikus modelljének eredményeivel, így alkalmasnak találtam további paraméteres vizsgálatok és elemzések elvégzésére.

A további vizsgálatok során az íves pilont kicseréltem három különböző alakú pilonra. Készítettem egy kétszlopos, egy portál és egy A-alakú változatot, ezután ezek elmozdulásait összehasonlítottam az íves pilon kialakítású híd értékeihez. Ezen számítások alapján megállapítottam, hogy az adott pályalemez és kábelkiosztás esetén az íves pilon kialakítású híd eredményezte a legkisebb elmozdulásokat.

Ezenfelül a négy pilon kritikus egyensúlyi állapotát is megvizsgáltam. Mindegyik pilonra azonos 1000 kN nagyságú függőleges lefele ható erőt alkalmaztam, és meghatároztam a szerkezetek első kihajlási alakját és a hozzá tartozó kritikus tehereszorító értékét. Az eredmények alapján megállapítottam, hogy az íves pilonnak volt a legnagyobb a kritikus teherparaméter értéke, azaz ez a pilon viselkedik legkedvezőbben stabilitási szempontból is.

A dolgozatom megírása során sok új tapasztalatra, tudásra tettem szert. A híd próbaterhelésén való személyes részvétel egy élmény volt számomra. Köszönetet szeretnék mondani két konzulensemnek Dr. Dunai Lászlónak és Dr. Kövesdi Balázsnak, hogy a kutatásom során segítettek a munkámat.

Irodalomjegyzék

- [1] „Wikipédia,” [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Cable-stayed_bridge. [Hozzáférés dátuma: szeptember 2021].
- [2] Iványi M., *Hídépítéstan*, Budapest, Műegyetemi Kiadó, 1998, pp. 195-202; 280-283; 462-474.
- [3] „Wikipédia,” [Online]. Available: https://hu.wikipedia.org/wiki/Monostori_h%C3%ADd. [Hozzáférés dátuma: szeptember 2021].
- [4] „Mérnök vagyok,” [Online]. Available: <https://mernokvagyok.hu/blog/2021/02/08/megkezd%C3%B3-dott-a-kalocsa-paks-duna-hid-epitese/>. [Hozzáférés dátuma: szeptember 2021].
- [5] „Magyar építők,” [Online]. Available: <https://magyarepitok.hu/utepites/2021/07/mar-a-mederhid-palyalemezet-epitik-az-europaban-egyedulallo-tisza-hidon>. [Hozzáférés dátuma: szeptember 2021].
- [6] „UTIBER,” [Online]. Available: <https://www.utiber.hu/megyeri-hid-2/>. [Hozzáférés dátuma: szeptember 2021].
- [7] Kövesdi B., *Ívhidak és ferdekábeles hidak modellezése*, Acélhidak segédlet, BME, Hidak és Szerkezetek Tanszék.
- [8] „Structurae,” [Online]. Available: <https://structurae.net/en/structures/miho-museum-footbridge>. [Hozzáférés dátuma: augusztus 2021].
- [9] „Structurae,” [Online]. Available: <https://structurae.net/en/structures/margaret-hunt-hill-bridge>. [Hozzáférés dátuma: augusztus 2021].
- [10] „Structurae,” [Online]. Available: <https://structurae.net/en/structures/lingotto-footbridge>. [Hozzáférés dátuma: augusztus 2021].
- [11] „Structurae,” [Online]. Available: <https://structurae.net/en/structures/haneda-sky-arch>. [Hozzáférés dátuma: augusztus 2021].
- [12] „Structurae,” [Online]. Available: <https://structurae.net/en/structures/bine-bridge>. [Hozzáférés dátuma: augusztus 2021].
- [13] „Structurae,” [Online]. Available: <https://structurae.net/en/structures/puma-bridge>. [Hozzáférés dátuma: augusztus 2021].
- [14] „Structurae,” [Online]. Available: <https://structurae.net/en/structures/ponte-laterale-nord>. [Hozzáférés dátuma: augusztus 2021].

- [15] „Structurae,” [Online]. Available: <https://structurae.net/en/structures/ponte-laterale-sud>. [Hozzáférés dátuma: augusztus 2021].
- [16] „Structurae,” [Online]. Available: <https://structurae.net/en/structures/sanhao-bridge>. [Hozzáférés dátuma: augusztus 2021].
- [17] „TYLIN,” [Online]. Available: https://www.tylin.com/en/projects/sanhao_bridge. [Hozzáférés dátuma: augusztus 2021].
- [18] „Structurae,” [Online]. Available: <https://structurae.net/en/structures/seafarers-bridge>. [Hozzáférés dátuma: augusztus 2021].
- [19] „Structurae,” [Online]. Available: <https://structurae.net/en/structures/nanjing-eye>. [Hozzáférés dátuma: augusztus 2021].
- [20] „CGTN,” [Online]. Available: https://news.cgtn.com/news/3d41444e796b7a4d/share_p.html. [Hozzáférés dátuma: augusztus 2021].
- [21] „flickr,” [Online]. Available: <https://www.flickr.com/photos/asusmt/46898795171>. [Hozzáférés dátuma: augusztus 2021].
- [22] „Structurae,” [Online]. Available: <https://structurae.net/en/structures/legoland-korea-access-bridge>. [Hozzáférés dátuma: augusztus 2021].
- [23] „ThemeparX,” [Online]. Available: <https://www.themeparx.com/legoland-korea/?page=13>. [Hozzáférés dátuma: augusztus 2021].
- [24] „Structurae,” [Online]. Available: <https://structurae.net/en/structures/zanjan-cable-stayed-bridge>. [Hozzáférés dátuma: augusztus 2021].
- [25] „Structurae,” [Online]. Available: <https://structurae.net/en/structures/grand-wisata-overpass>. [Hozzáférés dátuma: augusztus 2021].
- [26] „Structurae,” [Online]. Available: <https://structurae.net/en/structures/zhivopisny-bridge>. [Hozzáférés dátuma: augusztus 2021].
- [27] „WIKIMEDIA,” [Online]. Available: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Zhivopisny-bridge-01.jpg>. [Hozzáférés dátuma: augusztus 2021].
- [28] Pannon 2021 Zrt., Az M44 gyorsforgalmi út Lakitelek - Tizsakürt közötti szakasz és kapcsolódó építmények kiviteli tervei, műszaki leírás, 2019.
- [29] „Műszaki Magazin,” [Online]. Available: <https://www.muszaki-magazin.hu/2020/06/09/ellipszis-tisza-hid-pilon/>. [Hozzáférés dátuma: szeptember 2021].

- [30] „Magyar építők,” [Online]. Available: <https://magyarepitok.hu/mi-epul/2020/07/jo-tempoban-halad-az-m44-es-uj-tisza-hidjanak-epitese>. [Hozzáférés dátuma: szeptember 2021].
- [31] „Magyar építők,” [Online]. Available: <https://magyarepitok.hu/utepites/2021/09/mindket-probaterheles-sikeres-volt-a-paratlan-szerkezetu-uj-tisza-hidon>. [Hozzáférés dátuma: augusztus 2021].
- [32] „Magyar építők,” [Online]. Available: <https://magyarepitok.hu/mi-epul/2020/11/oriasi-lepes-az-m44-es-uj-tisza-hid-epiteseben-osszeert-a-ket-oldal>. [Hozzáférés dátuma: szeptember 2021].
- [33] Dunai L., Kövesdi B., Vigh L.G., Égető Cs., Siki Z. és Kollár D., M44 gyorsforgalmi út B.245 jelű új Tisza-híd próbaterhelése - Szakértői jelentés, Budapest: Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Hidak és Szerkezetek Tanszék, 2021.

Ábrajegyzék

1. ábra: Jellemzőbb pilon kialakítások	6
2. ábra: A függesztőkábelek elrendezései [1].....	6
3. ábra: Ferdekábelek lehorgonyzása [7].....	7
4. ábra: Kábelek lehorgonyzása [2] [5]	7
5. ábra: Miho Museum Footbridge [8]	8
6. ábra: Margaret Hunt Hill Bridge [9]	8
7. ábra: Lingotto Footbridge [10]	9
8. ábra: Haneda Sky Arch [11]	9
9. ábra: Bine Bridge [12].....	9
10. ábra: PUMA Bridge [13].....	10
11. ábra: Ponte Laterale Nord [14].....	10
12. ábra: Ponte Laterale Sud, [15].....	10
13. ábra: Sanhao Bridge [17].....	10
14. ábra: Sanhao Bridge éjszaka [17].....	11
15. ábra: Seafarers Bridge [18]	11
16. ábra: Seafarers Bridge oldalnézet [18]	11
17. ábra: Nanjing Eye [20]	12
18. ábra Nanjing Eye este [21]	12
19. ábra: Legoland Korea Acces Bridge [34].....	12
20. ábra: Legoland Korea Access Bridge Látványterve [23]	12
21. ábra: Seyyedol Shohada Bridge [24].....	13
22. ábra: Grand Wisata Overpass [25]	13
23. ábra: Zhivopsiny Bridge [26]	13
24. ábra: Zhivopsiny Bridge alulról [27].....	13
25. ábra: Íves pilonú ferdekábeles hidak országonként.....	15
26. ábra: Íves pilonú ferdekábeles hidak épülése	15

27. ábra: Íves pilonú ferdekábeles hidak megépülésének gyakorisága	16
28. ábra: Íves pilonú ferdekábeles hidak hossza és legnagyobb támaszköze.....	17
29. ábra: Íves pilonú ferdekábeles hidak használata	17
30. ábra: Az új Tisza-híd látványterve [29].....	18
31. ábra: Az új Tisza-híd pillére [30]	19
32. ábra: A mederhíd építés közben [30]	19
33. ábra A pilon [31]	20
34. ábra: A merevítőtartó szerelési állapotban [30]	20
35. ábra: Monolit vasbeton pillér építése [30].....	21
36. ábra: A merevítőtartók tolás közben [32].....	22
37. ábra: A híd hosszmetsete [28]	23
38. ábra: A pillér előlnézete [28].....	24
39. ábra: A híd kétféle keresztötése [28].....	24
40. ábra: „a” és „b” típusú keresztötések	25
41. ábra: A modell vázszerkezete.....	25
42. ábra: A pilon keresztmetsete	26
43. ábra: Kábelkeresztmetsetek	26
44. ábra: A modell előlnézete.....	27
45. ábra: A modell oldalnézete.....	27
46. ábra: A modell axonometrikus nézete	28
47. ábra: A modell alulnézete.....	28
48. ábra: A négy vizsgált teherállás [33].....	29
49. ábra: Lehajlások 2. teherállás esetén [33]	30
50. ábra: A saját modell lehajlásai 2. teherállás esetén	30
51. ábra: Lehajlások az 5. teherállás esetén [33].....	31
52. ábra: A saját modell lehajlásai az 5. teherállás esetén.....	31
53. ábra: Lehajlások a 11. teherállás esetén [33].....	32
54. ábra: A saját modell lehajlásai a 11. teherállás esetén	32
55. ábra: Lehajlások a 12. teherállás esetén [33].....	33
56. ábra: A saját modell lehajlásai a 12. teherállás esetén	33
57. ábra: A pilon elmozdulása a 2. teherállás esetén – saját modell	35
58. ábra: A pilon elmozdulása az 5. teherállás esetén – saját modell.....	35
59. ábra: A pilon elmozdulása a 11. teherállás esetén – saját modell	35
60. ábra: A pilon elmozdulása a 12. teherállás esetén – saját modell	36
61. ábra: Piloncsúcs számított hosszirányú elmozdulása az 5. teherállásban [33].....	37
62. ábra: A saját modell piloncsúcsának hosszirányú elmozdulása az 5. teherállásban	37
63. ábra: A négy vizsgált pilonkialakítás	38
64. ábra: Az íves pilon első kihajlási alakja	43
65. ábra: A kétoszlopos pilon első kihajlási alakja	43
66. ábra: A portál alakú pilon első kihajlási alakja	44
67. ábra: Az A-alakú pilon első kihajlási alakja.....	44

Táblázatok jegyzéke

1. táblázat: Az ismertetett hidak összefoglalása.....	14
2. táblázat: Maximális pályalemez lehajlások összefoglalása.....	34
3. táblázat: Maximális pályalemez lehajlások a számított adatokkal.....	34
4. táblázat: A piloncsúcs maximális hosszirányú elmozdulásai összefoglalva.....	36
5. táblázat: Az íves pilon és a kétoszlopos pilon elmozdulásai.....	39
6. táblázat: A pályaszerkezet mezőközépi lehajlásai íves és kétoszlopos pilonkialakítás esetén.....	39
7. táblázat: Az íves pilon és a portál alakú pilon elmozdulásai.....	40
8. táblázat: A pályaszerkezet mezőközépi lehajlásai íves és portál pilonkialakítás esetén.....	40
9. táblázat: Az íves pilon és az A-alakú pilon elmozdulásai.....	40
10. táblázat: A pályaszerkezet mezőközépi lehajlásai íves és A-alakú pilonkialakítás esetén.....	41
11. táblázat: A piloncsúcsok hosszirányú elmozdulásainak összefoglalása.....	41
12. táblázat: A piloncsúcsok keresztirányú elmozdulásainak összefoglalása.....	42
13. táblázat: A pályaszerkezet mezőközépi lehajlásainak összefoglalása.....	42