

## A győri új Mosoni-Duna-híd kábel-erőjátékának optimális tervezése

### Optimum design of the cable forces of the new Moson-Danube bridge in Győr

KÖVÁRI Ákos okl. építőmérnök, hídépítési irányító tervező,  
SZOBOSZLAI László okl. szerkezettervező

UNITEF'83 Műszaki Tervező és Fejlesztő Zrt,  
cím: 1119 Budapest, Bornemissza tér 12,  
telefon: +36-1-205-6330, +36-20-823-3735  
email: kovaria@unitef.hu, szoboszlai@unitef.hu  
web: www.unitef.hu

#### Abstract

*Design of the new Moson-Danube bridge in Győr has given determinate task our Company between 2019-2022. The construction of the bridge is expected in the near future. In this article, we present the structural shape and design of the bridge. This bridge has an unique shape: Cable steel bridge with inclined pylon, box girders and asymmetrical tensioning system. The cable force system was determined with an iteration process during the design. We have well-known closed formulas that are often used to determine the cable tension forces of symmetrical bridges. However, there is no such possibility for asymmetric bridges. The determination of the optimal cable tensioning system is possible by running a finite element-based iteration program. In our article, we present our updated optimization procedure for the new Mosoni-Danube bridge.*

**Keywords:** bridge construction, cable bridges, optimalization, steel structures, tensioning

#### Kivonat

*A győri új Mosoni-Duna híd tervezése 2019-2022. között meghatározó feladatot adott tervezőirodánknak. A híd megépítése a közeljövőben várható. Jelen cikkünkben a híd kialakítását, tervezését mutatjuk be. A háromtámaszú, ferdekábeles, aszimmetrikus feszítési rendszerű híd kábelereinek meghatározása a szerkezet konstruálás során csak iterációs eljárással volt lehetséges. Szimmetrikus hidak kábel feszítőereinek meghatározására gyakran használt, ismert zárt képleteink vannak. Azonban aszimmetrikus hidakra nincs ilyen jellegű lehetőség. Az optimális kábel feszítési rendszer meghatározása végelem-alapú iterációs program futtatásával lehetséges. Cikkünkben az új Mosoni-Duna-híd esetére aktualizált optimáló eljárásunkat mutatjuk be.*

**Kulcsszavak:** hídépítés, kábelhidak, optimalizáció, acélszerkezet, feszítés

## 1. GYŐR ÚJ HÍDJA

A Modern Városok Program keretében Győr Megyei Jogú Város jelentős közlekedési beruházással gazdagodik. Az Ipar utca folytatásában új keleti tehermentesítő út épül az Építési és Közlekedési Minisztérium (jogelődje: NIF Nemzeti Infrastruktúra Fejlesztő Zrt.) beruházásában és az UNITEF'83 Zrt. tervezésében. Az új út keresztezi a Mosoni-Dunát, ahol látványos, ferdekábeles acélszerkezetű híd épül.

Az új híd a győri belváros keleti lezáró elemeként elválasztja a beépítésre szánt területeket az ipari zónától, valamint a Szigetköz Natura 2000 területeitől. Alapvető igényként fogalmazódott meg, hogy megjelenésében is meghatározó városképi jelentőségű hidat tervezzünk. Egyedi kialakítást választottunk az egysíkú kábel felfüggesztéssel, a folyó felé dőlő pilonnal, valamint a „hárfa” (párhuzamos) kábelrendezéssel. Ez utóbbival a korábban lebontott Vásárhelyi Pál hídra utaltunk vissza, mely Magyarország első ferdekábeles hídja volt.



1. ábra. Győr új Mosonyi-Duna-hídjának látványterve

## 2. HÍDSZERKEZET JELLEMZŐI

A hídszerkezet teljes hossza: 213,6 m, támaszközök: 144 m és 68 m, a szerkezet magassága: 69 m, a teljes szerkezet súlya 3906 t.

Az acélszerkezetű ferdekábeles híd a meder felett egy kábelsíkkal készül, az északi hídfő felé pedig 2-2 kábellel van visszakötve. A merevítőtartó háromcellás szekrényszerkezet, a gyalogjárdát és az üzemi járdát konzolok támasztják alá. A pilon szintén zárt keresztmetszetű, benne lépcsőház kerül elhelyezésre, a piloncsúcson pedig üzemi terasz. A piloncsúcson repülési irányfény és webkamera is kiépítésre kerül. A híd egyedi szerkezeti kialakítása különleges megoldásokat igényelt a tartószerkezeti tervezés során.

## 3. ERŐTANI MÉRETEZÉSI KÉRDÉSEK

A híd erőtani szempontból egy önmagába visszahorgonyzott kábellel feszített tartószerkezet. A híd aszimmetrikus kialakítású, a közbenső támasz el van húzva az északi oldal felé. Mindezeket egybevéve egy komplex erőtani viselkedés modellezése volt a feladat. A híd globális egyensúlyát az északi oldalon elhelyezett nagytömegű hídfő biztosítja. A felszerkezet és a hídfő kapcsolata oldalanként 4-4 lekötő kábel.

A híd támaszonként 4-4 db saru közvetítésével adja át terheit az alépítményekre. Az oldalirányú megfogás a hídfőknél, míg a hosszirányú a pilon alatti támaszon valósul meg. Ezáltal statikailag határozott tartó alakul ki, így nem lesznek gátolt csavarás miatti sarureakciók.

A hídszerkezet leginkább igénybevett része a pilon és merevítőtartó csatlakozási pontja. Itt merev befogást kellett biztosítani, melyet a közbenső cella magasításával, valamint a megfelelő sűrű bordázással oldottunk meg. Tanulságos volt, hogy a szerkezeti viselkedést jelentősen befolyásolja a merevség apró módosítása is. Éppen ezért részletekbe menő pontossággal kellett a globális modellben is elkészíteni a bordázást.



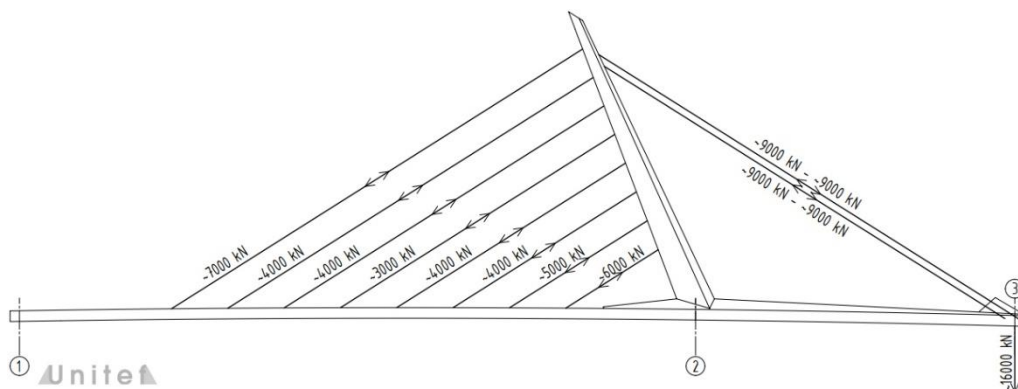
2. ábra. Híd teljes numerikus modellje (SOFiSTiK VEM-modell)

A hídon a pilonbefogás környezetében és a támaszoknál, valamint a kábelbekötési pontokon S460ML anyagminőséget terveztünk, a többi helyen S355ML anyag is elegendő. Reményeink szerint a választott termomechanikusan hengerelt ML anyagminőséggel jelentősen csökkenthető az acélok helyszíni melegítése, ami technológiai és időbeli könnyebbséget jelent.

A merevítőtartó 3 cellás zárt ortotróp lemezes szekrény-keresztmetszet, melynek belmagassága ~2,5 m, így járható a szerkezet. A középső cellában szárnylemezes megoldással horgonyozzuk le a ferdekábeleket, míg a szélső cellák a 2x2 sávós útpályát támasztják alá. A kifolyás oldali konzolon üzemi járda, a város felőli konzolon gyalog- és kerékpárút kapott helyett, ami miatt a merevítőtartó aszimmetrikus kialakítású.

A pilon nyitott bordákkal merevített ortotróp, változó magasságú zárt hatszög keresztmetszetű acélszerkezet. Az erőtanilag szükséges méreteken túl helyet biztosítottunk a lépcsőháznak és a lehorgonyzó berendezéseknek is.

A tervezett felszerkezet kábelelei Freyssinet HD rendszerűek. A hátrakötő kábelnekél 109 pászmás, míg a meder felőli oldalon max. 91 pászmás kábelt alkalmaztunk. A hárfa rendszerű kábel-elrendezés sajátossága a radikálisan eltérő kábelhosszok, amelyek a kábelerők beállításánál és az alakváltozások korlátozása során okoztak fejtörést.



3. ábra. Kábel-feszítési erőrendszer

Számos konfigurációban, iterációs eljárással állítottuk be a kívánt kábelerőket. Ferdekábeles hidak kábelerő rendszerére számos jó megoldás adható a feszítőerők és a pászmaszámok módosításával. A több lehetséges megoldás közül terveink az egyik jó megoldást tartalmazzák, azonban foglalkoztatta kollégáinkat a gondolat, hogy miképpen határozható meg a feszítőerő-rendszer és pászmakép optimális kialakítása. Miben

áll az optimális erőjáték? Abban, hogy a szükséges minimumra csökkentjük a bevitt feszítőerőket (és pászmaszámot) az alakváltozási feltételek kielégítése mellett.

#### 4. KÁBELERŐK OPTIMÁLIS TERVEZÉSE

A kábelátmérők és kábelerők beállítása az állandó terhekből számított nyomatéki igénybevételek alapján történik: állandó terhek hatására a merevítőtartóban a 0 körüli nyomatékértékek a kívánatosak. Ennek eléréséhez két fő módszer létezik ferdekábeles hidak előtervezésénél, nevezetesen az optimalizálási módszer és a „zero displacement”, vagyis a "nulla elmozdulás" módszer.

Az optimalizálási módszerben a kezdeti kábelereket bizonyos célfüggvények optimalizálása alapján választhatjuk ki, amelyek vagy a szerkezeti hatékonysághoz, vagy a gazdaságossághoz kapcsolódhatnak. Ebben a módszerben a teljes feszültségi energia gyakran az egyik célfüggvény, amelyet minimalizálni kell. Nagyon óvatosan kell előírni az optimalizálási korlátokat, különben az ebből eredő rendszerek néha kivitelezhetetlenné válhatnak.

A nulla elmozdulás módszer esetén a kábeleket a merevítőtartó bekötési pontjain függőleges támaszokkal helyettesíthetjük, így az elmozdulások ezekben a pontokban 0-ra adódnak. Az önsúlyra való futtatás után a helyettesítő támaszokban kapott értékeket átszámoljuk az eredő ferde erőkomponensére, majd párokban működtetjük a merevítőtartó és a pilon megfelelő pontjain, hogy újabb közelítést kapjunk a feszítőerőkre. Néhány iteráció után a támaszerők nagymértékben már nem változnak, tehát megkapjuk a 0 elmozduláshoz szükséges kábel-feszítőerőket és az ezekhez szükséges kábel-keresztmetszeteket.

A hagyományos nulla elmozdulás módszer elméletben egyszerűbb, és lehetővé teszi a tervező számára, hogy finomítsa a kezdeti kábelereket és a szerkezeti konfigurációt. Ha egy egyenes és közel vízszintes híd felszerkezetet számos rögzítőkábel függeszt fel, a kábelerők vízszintes komponensei kis hatással vannak a merevítőtartó hajlítónyomatékaira, ezért a hajlítónyomatékokat elsősorban a kábelerők függőleges összetevői és az állandó teher alakítja. A nulla elmozdulás módszerrel az ideális kezdeti kábelereket úgy kapjuk meg, hogy a kábelrögzítéseknél lévő lehajlásokat „eltüntetjük”.

Ha a felszerkezet hosszesése elhanyagolható, akkor a merevítőtartóban keletkező hajlítónyomatékok lényegében megegyeznek egy egyenértékű folytonos gerenda hajlítónyomatékaival, ahol a kábelekből és pilonból származó összes támasz merev, egyszerű támasznak tekinthető.

Ha azonban a hídpálya hosszesése a forgalmi követelmények vagy más tényezők miatt jelentős, akkor ennek a módszernek a használata megkérdőjelezhető. Mivel a kábelerők vízszintes komponensei további hajlítónyomatékokat idéznek elő a merevítőtartóban, az ebből eredő hajlítónyomatékok valószínűleg hosszútávon jelentős újraelosztást okoznak. Ebben az esetben a hajlítónyomatékok számítanak igazán, mert ezek befolyásolják a híd hosszútávú szerkezeti viselkedését.

Az, hogy a kialakult elmozdulások nullák-e vagy sem, nem annyira hangsúlyos, mivel ezek az építés során szükség szerint szabályozhatók a kábelek megfelelő beállításával, előfeszítésével.

A tervezett Mosoni-Duna híd felszerkezetének kábeleinek rendszerét az előző fejezetben részletesen ismertettük. A kezdeti feszítőerők meghatározását bonyolítja, hogy a kábeleknél nincsen pilonra vetített tükörképük, amivel kiegyensúlyoznák egymást. Az aszimmetria, a pilon megdöntése és a hátrahorgonyzó kábelekkel való kiegyensúlyozás tovább bonyolítja az önmagában is komplex kezdeti kábelero-meghatározás folyamatát, sokszori iterációt követően juthatunk csak el a végeredményig. Ez szülte a gondolatot, hogy egy megfelelő algoritmussal végezzük el az előfeszítő erők meghatározását.

Egy olyan iteráló program megvalósításán dolgoztunk, aminek segítségével az optimális előfeszítési kábelerők viszonylag könnyedén meghatározhatók. Egy ilyen program előállítására sok időt és munkát emészt fel. Számos munkaóra leforgása alatt jutottunk el oda, hogy a programmal képesek vagyunk egy szimmetrikus híd, illetve egy egyszerűbb aszimmetrikus híd optimalizált előfeszítő kábelereit meghatározni. Ez már egy nagy előrelépés ahhoz, hogy a jövőben könnyebb és gyorsabb legyen a ferdekábeles hidak erőtanai előtervezése, a kábel feszítőerők meghatározása.

A kezdeti kábelereők iterálására a The MathWorks fejlesztése alatt álló MATLAB szoftvert használtuk. A MATLAB egyben egy programozási nyelv is, amit numerikus számítások elvégzésére fejlesztettek ki. A programrendszer képes mátrix számítások elvégzésére, függvények és adatok ábrázolására, algoritmusok implementációjára és felhasználói interfészek kialakítására.

Az iteráló programunk az alábbi logika szerint épül fel: A geometriai- és anyagjellemzők, illetve a terhek és becsült kezdeti feszítőerők megadása után a geometriai elemekhez végelem modell típusokat rendelünk. Ezután a végelem módszer lépéseinek megfelelően az algoritmus kiszámítja a működő terhek hatására kialakult elmozdulásokat és normálerőket a kábelben. Az iterációs ciklus ekkor összeveti a lehajlásokat a megadott határokkal, és amennyiben nem teljesülnek a feltételek, módosítja a kábelek feszítőereit, újraszámolja a tehervektorokat, és újra kiszámítja az elmozdulásokat és normálerőket. Ezt addig ismétli, amíg a feltételek ki nem elégülnek. Amennyiben minden feltétel teljesül, a program kiírja az optimális feszítőereket és kirajzolja a lehajlásábrát ellenőrzésképp.

A program pontossága egy végelelemes szoftver eredményeivel összehasonlítva jelenlegi formájában is megállja a helyét amellet, hogy a távlati fejleszthetőségi lehetőségek és irányok egyértelműen kijelölhetőek. Tovább dolgozunk azon, hogy az alkalmazhatósági körét bővítsük. A kábelekre jelenleg alkalmazott húzott-nyomott rúdmodell át lehetne alakítani a kábel viselkedését valósabban leíró végelem típusra, beépítve a kábel nemlineáris viselkedését és kezdeti belógását. Számolni lehetne ezen felül akár a kábelek tartószerkezettel bezárt szögeinek változásával a további geometriai nemlinearitások figyelembevételéhez.

Továbbá, mivel a modell matematikailag fel van építve, lehetőségünk adódik további feltételeket szabni a kábelereők meghatározásához. Ilyen feltétel lehet például a pilon megengedett kardossága vagy a szomszédos kábelereők maximális aránya/változása.

Röviden összefoglalva ez a módszer egy nagyon jó kiindulási alapot jelent ahhoz, hogy továbbfejlesztve, gyorsabban és kellő pontossággal meghatározható legyen egy aszimmetrikus ferdekábeles híd kábeleinek optimális kezdeti feszítőereje.

## KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Az UNITEF'83 Zrt. tervezői számára a Mosoni-Duna feletti modern híd tervezése mérföldkövet jelentett mind a szerkezetkonstruálás, modellezés, mind a számítási metódusok alkalmazása terén. A cikkben bemutatott különleges erőtanai feladatok megoldása komoly tudományos és szabványalkalmazási háttérkutatóval járt együtt. Tervező csapatunk, akik a híd tervezésében részt vettek: Molnár Kázmér (magasépítési igazgató), Bartus Róbert (irodaigazgató), Kővári Ákos (felelős tervező), Németh Gábor (statikus tervező – felszerkezet), Talerling János (statikus tervező – felszerkezet), Berta Richárd (acélszerkezeti modellezés, elvi építési állapotok vizsgálata), Halwax András (acélszerkezeti modellezés), Székely Márta (acélszerkezeti modellezés), Szepessy Gábor (statikus tervező – alépítmények, földrengésszámítás), Simon Viktória DLA (építész vezető tervező), Egyed Veronika (építész tervező), Tóth Domonkos (látványtervek). Külön köszönetet kell mondanunk szakértő kollégáinknak: Nagy Lászlónak és Dr. Dalmy Dénesnek, valamint az MSC Kft. tervezőinek: Duma Györgynek, Gyurity Mátyásnak, Szigeti Zoltánnak, Gondár Péternek és Németh Dávidnak a tervezés során nyújtott észrevételeikért, javaslataikért.

## IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] Kővári Á., Simon V. INNOTÉKA 2021 április: Új híd a Mosoni-Dunán.
- [2] Kővári Á., Németh G., Tairling J., Bartus R. (2021) MAGÉSZ Acélszerkezetek XVIII (2): 11-19. - Győr új hídja a Mosoni-Dunán.
- [3] Kővári Á., Németh G. (2021) MAGÉSZ Acélszerkezetek XVIII (3): 3-4.: Tervező válasza Hajós Bence hidász mérnök a MAGÉSZ Acélszerkezetek szaklap 2021. XVIII. évf. 2. számában megjelent "Győr új hídja a Mosoni-Dunán" című cikkhez írt hozzászólására.
- [4] Kővári Á., Berta R., Bartus R. (2021) MAGÉSZ Acélszerkezetek XVIII (4): 25-27.: A győri új Mosoni-Duna-híd 3D tervezése.
- [5] Kővári Á., Németh G., Bartus R. (2021) MAGÉSZ Acélszerkezetek XVIII (4): 25-27.: Új Mosoni-Duna-híd Győrben
- [6] Szoboszlai László - Ferdekábeles hidak előfeszítő kábelerőinek optimális meghatározásának vizsgálata és fejlesztése (PTE – Műszaki és Informatikai Kar Szerkezet-Építőmérnök MSc Diplomamunka, 2022.)