



DR. KISBÁN SÁNDOR –
PUSZTAI PÁL

**KALOCSA-PAKS KÖZÖTTI
ÚJ DUNA-HÍD –
3. RÉSZ:
ÉPÍTÉSTECHNOLÓGIA**

66

ASSEEL AL-HIJAZEEN –
KORIS KÁLMÁN

**VASBETON HIDAK
INTELLIGENS
MONITORINGJA DIGITÁLIS
IKER ÉS MESTERSÉGES
INTELLIGENCIA
ALKALMAZÁSOK
HASZNÁLATÁVAL**

72

LŐDÖR KRISTÓF –
DR. MÓCZÁR BALÁZS

**RIGID INCLUSIONS
ALTALAJJAVÍTÁS
TERVEZÉSE ÉS
MODELLEZÉSE**

83

2024/4

XXVI. évfolyam, 4. szám



TÖBB MINT MÉRNÖK

TOMORI PÁL HÍD
FOTÓS: DERNOVICS TAMÁS

WWW.CEH.HU

VASBETONÉPÍTÉS

műszaki folyóirat

a **fib** Magyar Tagozat lapja

CONCRETE STRUCTURES

Journal of the Hungarian Group of **fib**

Főszerkesztő:

Dr. Balázs L. György

Szerkesztők:

Hajós Bence, Dr. Koris Kálmán

Szerkesztőbizottság:

Dr. Csiki Béla

Dr. Czoboly Olivér

Dr. Erdélyi Attila

Dr. Farkas György

Dr. Hlavička Viktor

Horváth Adrián

Kolozsi Gyula

Dr. Kopecskó Katalin

Dr. Kovács Károly

Dr. Kovács Imre

Dr. Kovács Tamás

Lakatos Ervin †

Dr. Lublós Éva

Mátyássy László

Dr. Móczár Balázs

Dr. Nehme G. Salem

Dr. Orbán Zoltán

Pisch Zsuzsanna

Polgár László

Dr. Sajtó István

Dr. Sólyom Sándor

Dr. Szép János

Szijártó Anna

Telekiné Királyföldi Antónia

Várdai Attila

Dr. Völgyi István

Lektorai testület:

Dr. Dulácska Endre

Madaras Botond

Dr. Madaras Gábor

Dr. Tóth Ernő

(Kéziratok lektorálására más

kollégák is felkérést kaphatnak.)

Alapító: a **fib** Magyar Tagozata

Kiadó: a **fib** Magyar Tagozata

(**fib** = Nemzetközi Betonszövetség)

Szerkesztőség: BME Építőanyagok és
Magasépítés Tanszék

1111 Budapest, Műegyetem rkp. 3.

Tel: 463 4068 Fax: 463 3450

E-mail: fib@eik.bme.hu

WEB <http://www.fib.bme.hu>

Az internet verzió

technikai szerkesztője:

Bíró András, doktorandusz

Tervezőszerkesztő: Halmai Csaba

Megjelenik negyedévenként

nyomtatásban (korlátozott példányszám-
ban) és online.

WEB:

<http://fib.bme.hu/kiadvanyok.html>

© a **fib** Magyar Tagozata

ISSN 1419-6441 online ISSN: 1586-0361

A hirdetések felvétele:

Tel.: 463-4068, Fax: 463-3450

Címlapfotó:

A víz és beton harmóniája

Készítette: Dr. Balázs L. György

TARTALOMJEGYZÉK

66 DR. KISBÁN SÁNDOR – PUSZTAI PÁL
**KALOCSA-PAKS KÖZÖTTI ÚJ DUNA-HÍD –
3. RÉSZ: ÉPÍTÉSTECHNOLÓGIA**

72 ASSEEL AL-HIJAZEEN – KORIS KÁLMÁN
**VASBETON HIDAK INTELLIGENS
MONITORINGJA DIGITÁLIS IKER
ÉS MESTERSÉGES INTELLIGENCIA
ALKALMAZÁSOK HASZNÁLATÁVAL**

83 LŐDÖR KRISTÓF – DR. MÓCZÁR BALÁZS
**RIGID INCLUSIONS ALTALAJJAVÍTÁS
TERVEZÉSE ÉS MODELLEZÉSE**

A folyóirat támogatói:

Vasúti Hidak Alapítvány, Duna-Dráva Cement Kft., ÉMI Nonprofit Kft.,
A-Híd Zrt., MÁV Zrt., MSC Mérnöki Tervező és Tanácsadó Kft.,
Lábatlani Vasbetonipari Zrt., Pont-Terv Zrt., Swietelsky Építő Kft., Uvaterv Zrt.,
Mélyépterv Komplex Mérnöki Zrt., Hídtechnika Kft.,
Betonmix Mérnökiroda Kft., CAEC Kft., SW Umwelttechnik Magyarország Kft.,
Union Plan Kft., DCB Mérnöki Iroda Kft.,
BME Építőanyagok és Magasépítés Tanszék,
BME Hidak és Szerkezetek Tanszék

KALOCSA-PAKS KÖZÖTTI ÚJ DUNA-HÍD – 3. RÉSZ ÉPÍTÉSTECHNOLÓGIA



Dr. Kisbán Sándor - Pusztaí Pál

<https://doi.org/10.32969/VB.2024.4.1>

A cikksorozat 3. részeként bemutatjuk a felszerkezet építéstechnológiáját, építés segéd szerkezeteit. Ismertetjük az alkalmazott feszítési rendszereket. Az építési fázisok közül kiemelten foglalkozunk az építés befejező műveleteivel, a parti- és meder oldali zárással. Végezetül az építési ütemezést mindvégig követő alakbeállításról és statikai számításról lesz szó.

KULCSSZAVAK: építéstechnológia, zárás, feszítés, alakbeállítás, statika

1. BEVEZETÉS

A konzolos szabadszerelés és szabadbetonozás folyami hidaknál bevált, általánosan alkalmazott építési mód. A kivitelező megbízása alapján készített tervek során az építéstechnológia nagy hangsúlyt kapott a statikai számítás kidolgozásában. A híd tervezése mellett a segéd szerkezetek is komoly feladatot jelentenek.

A tapadóbetétes és csúszóbetétes kábelek alkalmazása a mai hidépítésben már bevált, jól ismert módszerek. A statikai szoftverek nagyban segítik a kábelek valóságnak megfelelő modellezését, de a szükséges kábel mennyiség elhelyezése a tervező feladata. Az optimális kialakítást a víznyelők, szerkezeti bekötő csapok, illetve extradosed kábelek felülírják, komoly akadályt gördítve a kábel elrendezési terv kialakításához.

2. SZABADSZERELÉS ÉS BETONÓZÁS

A felszerkezet szabadszerelési és szabadbetonozási technológia segítségével épült. A szabadszerelés a főtartó acél szerkezetének beemelése és rögzítése, a szabadbetonozás a már rögzített acél tartószerkezetre betonozandó fenék- és pályalemez miatt szükséges. A kivitelezés megkezdésekor a tervezés során feltételezett építési fázisokat és segédberendezéseket a kivitelező pontosította. Statikai szempontból nagyon fontos volt, hogy ezek a kiindulási feltételek menet közben már nem változhattak. A számítást a rögzített peremfeltételek alapján aktualizáltuk, az építési fázisokra vonatkozó szilárdsági ellenőrzést újra elvégeztük és meghatároztuk a híd építési alakbeállítását (1. ábra).

1. ábra: Szabadszerelés a medernyílásban





2. ábra: Indítózöm és segédszerkezete a mederpilléren



3. ábra: Segédszerkezetek a kalocsai oldalon



4. ábra: SJ2 járom és P24-P20 alatti állványzat, parti zárás előtt 1 zömmel

Az egyik legfontosabb építési feltétel a parti- és meder oldali építési egységek szimmetrikus építéstől való eltérésének szabályozása volt. Elméletben a szerkezet szimmetrikusan épül, de a munkafolyamatok részletes bontását követően több alkalommal, – igaz rövid időre – de keletkeznek aszimmetrikus helyzetek a part, vagy a medernyílásban végzendő munkák nem azonos időben, hanem egymást követő végzése miatt.

A tervezői egyeztetéseken rögzítették, hogy a híd építési fázis szempontjából mindig csak a parti nyílás felé térhet el. Ez a feltétel a parti nyílásban alkalmazott segédjármok miatt fontos körülmény volt.

A részletesen kidolgozott ütemezésben a ciklusidő 14-16 nap volt. Példaként a P10/M10 elemek építésére vonatkozólag a statikában figyelembe vett legfontosabb ütemeket az alábbi felsorolásban adtuk meg:

P10 / M10 acél főtartó beemelése, rögzítése (előbb part, majd medernyílás)

P08 / M08 építési egységek extradosed kábelének feszítése négy ütemben

P10 / M10 zöm fenéklemez betonozása (előbb part, majd medernyílás)

P10 / M10 zöm pályalemez betonozása (előbb part, majd medernyílás)

P10 / M10 zöm tapadóbetétes kábelek feszítése

P10 / M10 PERI zsaluzókocsi átállás a követő zöm építéséhez (part/meder).

A konzolos építés elengedhetetlen kellékei az építési segéd-szerkezetek. A szabadszerelés a P01-PM00-M01 indító zömök állványzaton történő építésével vette kezdetét. Az állványzat fő teherhordó oszlopai 4-4db HEB800-as tartópárból álltak (2. ábra). Erre a három zömből álló fogadó részre emelték be a PERI zsaluzókocsiját, mind a part, mind a meder felőli oldalra, egyenként ~112 t súllyal.

A mederpillérektől a parti nyílás irányában 35 m és 85 m távolságra helyezték el az SJ1 és SJ2 jelű segédjármokat. Szerkezeti kialakításuk révén nem csak nyomásra működtek, a betervezett feszítőrudaknak köszönhetően jelentős húzóerőt is fel tudtak venni (3. ábra).

Építéstechnológiai okokból a közöspilléreknél lévő közel 20 m-es szakaszt, a P24-P20 elemeket nem szabadszereléssel, hanem teljes állványzaton építették meg (4. ábra).

5. ábra: Pályalemez feszítőkábel lehorgonyzás



6. ábra: Pályalemeznel kialakított lehorgonyzó betontömb



A segédjármokon, állványzatokon kívül a mederzáráshoz is alkalmaztak segédszerkezetet. A pályalemez konzolokra lefeszített, korábban oszlopként használt HEB800-as tartók az MM20 zárózom építésének ideje alatt a hőmérsékletváltozásból, és egyéb külső terhekből származó hatásokat vették fel.

3. FESZÍTÉSI RENDSZEREK

A konzolosan épített szerkezetek esetében a vasbeton pályalemezben keletkező húzófeszültséget tapadóbetétes kábelek segítségével szüntetjük meg. A kábeleket a vasszereléssel egyidőben elhelyezett burkolócsövekbe fűzik be, a pályalemez betonozását követő fázisban. Tapadóbetétes kábelként a Dywidag gyártmányú Y1860S7 típusú 150mm² felületű pászmákat építettek be. A kábelek lehorgonyzására aktív/passzív végen azonosan az úgynevezett MA típusú lehorgonyzófejet alkalmaztak. Az építési állapot számításai alapján, figyelembe véve a kábelek elhelyezhetőségéhez tartozó geometriai méreteket 12 és 15 pászmás kábeleket terveztünk be. Kivitelezési okokból végül minden kábelnél a 15 pászmás feszítéshez tartozó fejet helyeztek el. A gyártó előírásai alapján 13 pászma befűzése szükséges a lehorgonyzófej központos terhelése miatt, így fejenként 2 pászmányi tartalék volt képezhető.

A kábelek feszítését általában a 15 pászmás nagysájtóval végezték el, kivétel a parti nyílás végénél a P24-es zömben lévő kábelknél, ahol monosajtót is alkalmaztak.

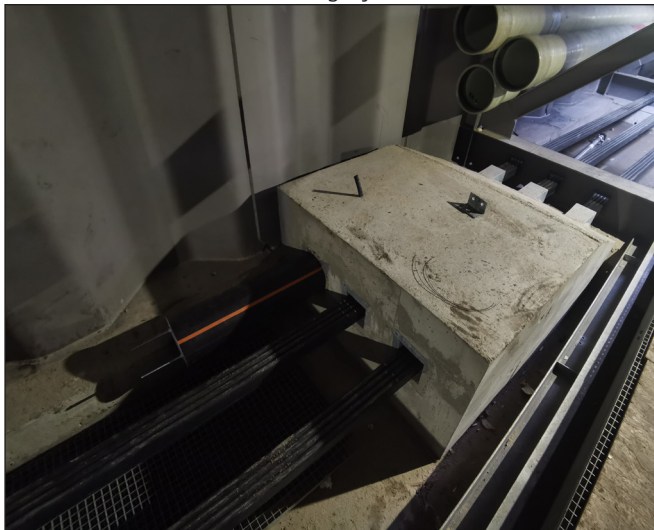
3.1 Pályalemezben vezetett kábelek

A főtartó három gerinces kialakítása miatt keresztmetszetenként min. 3 db kábelt terveztünk, de követve az igénybevétel változást mértékadó helyeken 5db kábelt is alkalmaztunk (5. ábra).

7. ábra: Fenéklemeznel kialakított lehorgonyzó betontömb



8. ábra: Csúszóbetétes kábel lehorgonyzó tömb



A kábelek vonalvezetéséről részletes terv készült, ami mind az alaprajzi, mind a magassági kábel vonalvezetést részletesen megadta a burkolócsövek beépítéséhez.

A kábelek hosszuk alapján eltérő feszítési veszteség szenvednek, ehhez igazodva állapították meg az egy- vagy kétoldali feszítés szükségességét.

A pályalemez kiemelése biztosította, hogy a legtöbb helyen elegendő betonvastagság állt rendelkezésre a kábelek lehorgonyzófejének beépítéséhez. A záráshoz szükséges kábelek esetében a pályalemez kontúrtól kiálló plusz lehorgonyzó tömböket terveztünk (6. ábra).

A leghosszabb pályalemezben vezetett kábel a P13/M13 zömököt összefeszítő ~135 m hosszúságú kábel volt. A kétoldalról feszített kábel számított nyúlása oldalanként ~430 mm nagyságú.

3.2 Fenéklemezben vezetett kábelek

Az építési, ill. végállapot számítás alapján a parti nyílásban a P24-P12 zömök tartományában, valamint a medernyílásban az M15-M15' zömök között terveztünk be tapadóbetétes kábeleket. Mivel a fenéklemez vastagsága nem tette lehetővé a kábelek lehorgonyzását, ezeken a pontokon plusz beton tömböket terveztünk be (7. ábra). A kábelek feszítését egyoldalról, a nagyfeszítőpuska alkalmazásával végezték.

3.3 Csúszóbetétes kábelek

Végleges állapotban a hasznos teherből keletkező plusz feszültségek felvételére a medernyílásban a szekrény belsejében, a vasbeton szerkezeten kívül vezetett ún. csúszóbetétes feszítőkábel rendszert terveztünk. A betervezett pászma Y1860S7 anyagminőségű, 150 mm² felületű. Kialakítás szempontjából a négy szalagból álló, szalagonként 4 db pászmát tartalmazó rendszert (4x4-150) alkalmaztuk. A kábelrendszer megnevezése VBT-System, gyártója Gleitbau GmbH.

9. ábra: MM20 zárózom beemelése a mederközépen



Keresztmetszetenként összesen 4 db kábelt terveztünk be. A leghosszabb 95m-es kábelnél az egyoldalról elvégzett feszítés alapján ~660mm nyúlás adódott.

A medernyílás hossz-szelvénye (domború lekerekítés) valamint a kábelek oldalirányú elhúzása miatt 1-1 db iránytörésre volt szükség (8. ábra).

4. ZÁRÁS

A zárás, mint építéstechnológiai kifejezés két különállóan elkészült hídszakasz egy közbenső úgynevezett záróelemmel történő összekötését, statikailag folytatóságá tételeit jelenti. Az építési fázisok alapján tárgyi hídnál mind a parti nyílásban, mind a meder nyílásban szükség volt erre a műveletre.

A parti oldal esetében a P24-P20 elemek állványzaton épültek meg. A konzolosan szerelt hídág a P18-elemig tartott és a közbenső P19 elem beépítésével záródott össze a két szerkezeti rész. A statikai vizsgálatok alapján az acél főtartók keresztmetszete elegendő teherbírást biztosított a betonozási műveletek elvégzéséhez.

Medernyílás esetében a két fél hídág 97,5 m-es konzolméretével az M19 építési egységig készült el. Az MM20 zárózöm beépítéséhez a pályalemez konzoljaira kitámasztó segédstruktúrát feszítettek le. Az elkészült struktúrák összeépítése a két konzolvég azonos magassága esetén végezhető el. A konzolvégek magassági beállítását a kalocsai oldali zsaluzókocsi pozícióba mozgatásával ill. plusz terhelések alkalmazásával végezték el. A konzolos szerkezet lágy merevségét jól szemlélteti, hogy a zsaluzókocsi 42 t súlyú fenékszalujának leengedésekor a konzolvégen ~120 mm-es függőleges elmozdulást számoltunk (9. ábra).

5. ALAKBEÁLLÍTÁS

A szabadszerelés indító szerkezete a medertámasz PM00 vasbeton támaszkeresztartó, és a hozzá csatlakozó parti ol-

10. ábra: Link elem geodéziai mérőpontok



dali P01, és meder oldali M01 acélzömök állványon történő beállításával, majd a fenékmez és pályalemez részek betonozásával, és a hídtegyel irányú összefeszítésével készült el.

A támaszkeresztartóból kitűskézve indult el a befolyási és kifolyási oldali pilonszerkezet építése, a merevítőtartó konzolos építése pedig a mérlegelv betartásával mind a part, mind a mederirányban történt, először a soron következő parti acélzöm, majd a meder oldali acélzöm beemelésével, beállításával.

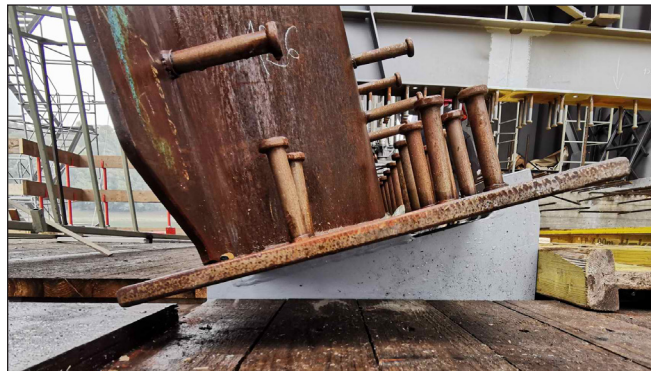
A vasbeton pilon szerkezetek, mivel a támaszkeresztartóval és így a merevítőtartóval egybeépítve készültek, az építés során együtt mozogtak a merevítőtartóval, ezért ezeket a hídszerkezeti részeket is „tülemeléssel” kellett építeni. A 22 m-es pilonok csúcspontja hídtegyel irányában a part felé 115 mm-rel, híd keresztirányban a hídtegyeltől kifelé 44 mm-rel lettek megépítve.

Egy pilonszerkezet hét építési ütemben készült, magassági értelemben 3m-es építési egységekben. Az építési egységek vasszerelése után a zsaluzat beállításához az ellipszis alakú keresztmetszet sarokpontjait tartalmazó kitzési táblázatot adtunk meg, ami tartalmazta az aktuálisan alkalmazott kétirányú vízszintes tülemelési értékeket. A legfelső építési egységnél a ferde lecsapás miatt további térbeli kitzési pontok megadása volt szükséges.

A 4. építési egységtől kezdve építési egységenként 3 db acélszerkezetű link elem beállítása előzte meg a vasszerelést. A link elemek egy szögvasakból kialakított, a link elemekkel együtt épülő segédstruktúrára támaszkodtak. Beállításuk mind a meder, mind a part oldali linkelemvégen rögzített geodéziai mérőpont segítségével történt, minden egyes link elemhez megadott beállítási táblázat alapján (10. ábra).

A merevítőtartó konzolos szabadszerelése a P01-PM00-M01 indító zömről indult, először a part oldali, majd a mérlegelv biztosítása miatt a meder oldal acélzöm beemelésével, beállít-

11. ábra: Szélső gerinc oldalirányú megtámasztása

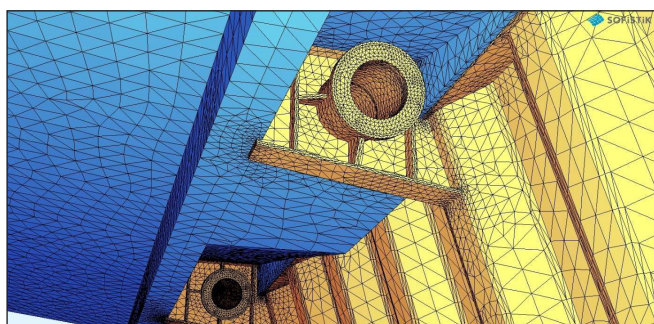


12. ábra: Kalapácsfej karima geodéziai mérőpontok





13. ábra: Függőlegesen felfelé korrigáló éklemesz



14. ábra: Sofistik héj modell az extradosed kábel alsó lehorgonyzásáról

tásával. Az acélzöm gerincek konzolvégein a felső-, és az alsó övlemezeken kerültek kijelölésre geodéziai mérési pontok. Egy acélzöm beállításához megadásra került az aktuális pozícióhoz meghatározott türelemelési alak beállítási táblázata, valamint a megelőző acélzöm középső gerinc felső övlemez mérési pont és beállítandó zöm középső gerinc felső övlemez mérési pontja közötti relatív magasság különbség.

A geodéziai mérés és a beállítás lehetőség szerint kora reggel történt a napközbeni hőmérsékleti hatások kiküszöbölése miatt. Ha építésszervezési okok miatt a beállítás nem reggel történt, akkor a kiegészítő adatként megadott relatív magasság különbséget használták az acélzöm beállításához. A középső gerinc függőleges beállítása mellett fontos volt a szélső gerincek alsó övlemez mérési pontjainak oldalirányú beállítása is. Híd keresztirányban a konzolvégi szélső gerincek könnyen elmozdultak, ezért a vasbeton fenéklemesz betonacél szerelése és betonozása előtt a zsaluzatot tartó acélvázhoz hegesztett pozicionáló segédszerkezettel a szélső gerincek konzolvégi alsó övlemezét megtámasztották. Az első hat acélzöm esetén a főtartó kiékelés miatti gerincmagasság és a fenéklemesz szélesség változás fokozott odafigyelést igényelt a szélső gerincek tervszerinti oldalirányú beállításánál, alsó megtámasztásánál (11. ábra).

A 7. zömtől kezdődően a 16. zömmel bezárólag a járdakon-zolok alatt az acélzömök keresztartói az extradosed kábelek lehorgonyzási csomópontját, a „kalapácsfejet” is tartalmazták. A kábel tengely irányban 955 mm hosszú kalapácsfejet alul 80 mm vastag támaszlemez, felül 25 mm vastag karima zárta le. Mind a támaszlemezhez, mind a karimához a geodéziai méréshez segédszerkezetek kerültek rögzítésre, 5-5 mérőpont kialakítással (12. ábra).

A méréshez megadott táblázatok tervezési értékeit és a beállított acélzöm kalapácsfejeinek geodéziai ellenőrző be-

méréseit kiértékelve megkaptuk a bemért tengely és a terv szerinti tengely közötti szögműködés különbséget. Mivel a kalapácsfej felső karimájához az extradosed kábelek térbeli ferdeségének függvényében egy 3200-4200 mm hosszú védőcső csatlakozott, és ez a védőcső a pályalemez betonozásával fix hídszerkezeti résszé vált, a védőcsőnek a bemért tengelyhez kellett igazodnia. Ezt a kalapácsfej felső lezáró karimája és védőcső alsó karimalezárása közé elhelyezett éklemesz gyűrűvel biztosítottuk (13. ábra).

A hatékony kivitelezés éklemesz készletek előzetes elkészítését, és a kalapácsfej tengely geodéziai bemérése után néhány órán belüli gyors tervezői adatszolgáltatást igényelt. Az alkalmazandó éklemesz 45 fokoskénti forgatás lehetőségével, vagy akár két éklemesz egyidejű alkalmazásával biztosítható volt a védőcső térbeli terv szerinti beállítása, aminek ellenőrző geodéziai méréséhez a védőcső felső lezáró karimáján lettek mérési pontok kialakítva.

A partoldali P24-P20 zömök építéstechnológiai okokból állványzaton épültek meg. Az egyes acélzömök beállítási pontjai itt is a gerincvégi övlemezeken kijelölt geodéziai mérőpontok voltak, melyekhez lettek megadva a beállítási táblázati adatok.

6. STATIKAI SZÁMÍTÁS

A számítás során a szerkezet egyedi ún. hibrid keresztmetszet kialakítása, a trapézlemez tulajdonságai, építési ütemek, segéd szerkezetek és különböző feszítési rendszerek alkalmazása komoly kihívást jelentett. További megoldandó helyzetek keletkeztek az építés alatt, amikor egy korábban elfogadott feltételt módosítani kellett. Az építés előrehaladásával, a parti-, illetve meder oldali zárás során egymást követően merültek fel az építési ütemezést módosító kérések.

Egy-egy változás kiszámítása ~2 óra program futtatást jelentett, mivel a változó statikai váz miatt az eredmények kézi összegzése nem minden esetben működött. A parti zárást követően a segédjárom bontásával a statikai váz állandóvá vált a mederzárás pillanatáig, így egységteherből számított értékekkel excel táblázatokba kigyűjtve az értékeket, gyorsabbá vált a kérdések megválaszolása.

A statikai számítás 3 különböző végeelemes program alkalmazásával történt. A globális statikai számítás RM Bridge programmal, rúdszerkezeti modellen hajtottuk végre. Ennek segítségével a főtartó szerkezet teherbírás ellenőrzését, az építési segéd szerkezetekben keletkező mértékadó igénybevételek számítását és egyben a hídalak beállításához szükséges türelemelési értékek számítását végeztük el.

A modell verifikálását és az építési fázisok ellenőrzését a Sofistik programban felépített héj és rúdelemekből álló független számítással végeztük el. Nagy előnye ezeknek a programoknak, hogy az adatok megadása és módosítása legtöbbször szövegesen, paraméteresen végezhető el, ami jelentősen gyorsítja a modellezést (14. ábra).

Egy-egy terhelési eset és építési fázis vizsgálatát a Sofistik-en kívül AxisVM-ben felépített héj modelleken is vizsgáltuk. A globális, főtartó szerkezeti viselkedésen kívül a csomópontok részletes vizsgálata mind Sofistik 3D és héj elemek, mind AxisVM héj elemek felhasználásával történt.

7. MEGÁLLAPÍTÁSOK

A híd felszerkezetének egyedi kialakítása, vasbeton és acél szerkezetek együttes alkalmazása, különböző feszítési rendszerek egyidejű használata, trapézgerinc viselkedése mind a

kivitelezői, mind a tervezői oldalon komoly kihívást jelentett.

Tervezői oldalról az építési fázisok feldolgozása, a számítás naprakész módosításai jelentős időt igényeltek. Kivitelezői oldalról példaként az építési egységekhez tartozó acél, vasbeton, feszítési munkát végző brigádok ütemezése, egymás munkájának akadályoztatás nélküli elvégzése jelentett nehézségeket.

Az építés hosszú hónapjai alatt ezeket a problémákat kivitelező és tervező szorosan együttműködve sikeresen megoldotta a közös cél érdekében, hogy egy látványos, és műszaki tartalommal is igényes híd épüljön meg.

8. IRODALOM

- Kiss R. (2024) „Kalocs–Paks közötti új Duna-híd 1. rész A híd általános ismertetése”, VASBETONÉPÍTÉS 2024/2 pp. 26-29.
- Kisbán S., Pusztai P. (2024) „Kalocs–Paks közötti új Duna-híd 2. rész A mederhíd szerkezete”, VASBETONÉPÍTÉS 2024/3 pp. 50-53.
- Bellai L. (szerk.) (2024) „Beton és acél ölelésében – Tomori Pál híd Kalocsa és Paks térségében”, Duna Aszfalt Zrt. Budapest, p. 198
- Pusztai P. (2022) „Kalocs–Paks új Duna-híd tervezése I. – Mederhíd tervezése”, Hidász napok 2022 előadásainak gyűjteménye, Lánchíd füzetek 35. Első Lánchíd Bt. Biri, pp. 36-45.
- Fornay Cs. (2022) „Kalocs–Paks új Duna-híd tervezése II. – Ártéri hidak, alépitmények és széldinamika”, Hidász napok 2022 előadásainak gyűjteménye, Lánchíd füzetek 35. Első Lánchíd Bt. Biri, pp. 46-56.
- Feczkó R., Magyar J. (2022) „Kalocs–Paks Duna-híd mederhíd építése” Hidász napok 2022 előadásainak gyűjteménye, Lánchíd füzetek 35. Első Lánchíd Bt. Biri, pp. 57-75.
- Szigeti A. (2022) „Kalocs–Paks új Duna-híd mederszerkezet zsalutechnológiája VBC – Balanced Cantilever Carriage”, Hidász napok 2022 előadásainak gyűjteménye, Lánchíd füzetek 35. Első Lánchíd Bt. Biri, pp. 76-92.
- Tóth T. (2022) „Kalocs–Paks új Duna-híd és kapcsolódó úthálózat tervezése és kivitelezése”, Hidász napok 2021 előadásainak gyűjteménye, Lánchíd füzetek 29. Első Lánchíd Bt. Biri, pp. 74-82.
- Feczkó R. (2021) „A Kalocs és Paks közötti új Duna-híd építésének megkezdése”, Hidépítők, 2021/3 p. 24-29.
- Feczkó R. (2021) „A Kalocs és Paks közötti új Duna-híd építése”, In Hidépítők 2021/4 p. 12-17.

Dr. Kisbán Sándor (1949) Okl. szerkezetépítő mérnök (BME, 1973). Céh zRt. hídszakági főmérnöke. Hídtervezői pályafutását 1975-ben az Uvaterv-ben kezdte, ahol nagyfeszítávú acélszerkezetű hidak tervezésében vett részt (Szegeci Északi Tiszahíd, Tiszapalkonyai közúti híd, Jugoszlávia – Újvidéki Ferdekábeles Duna-híd). Dr. techn. címet ferdekábeles hidak témakörben 1986-ban szerezte meg (BME–Acélszerkezetek Tanszék). 2002-től a CÉH zRt-ben végzi hídtervezői tevékenységét, számos hazai folyami és autópálya híd tervezését készítette és irányította (M0, M31, M6 autópálya- és völgyhidak, Megyeri híd). A most épülő Kalocs–Paks új Duna-híd felelős tervezője. Szakmai tevékenységének elismeréseként megkapta a Gábor Dénes-díjat (2008), a Széchenyi-díjat (2009), Menyhárd István-díjat (2023) és az Év hidásza díjat (2024). A **fib** Magyar Tagozatának tagja.

Pusztai Pál (1974) Okl. szerkezetépítő mérnök (BME 1998), Hídtervezői pályafutását a Hídépítő Zrt.-nél kezdte, ahol részt vett a Zalalövő–Bajánsenye vasúti feszített vasbeton híd tervezésében. 2001-től a CÉH zRt. munkatársaként részt vett az M0 Keleti szektor autópálya hídjainak tervezésében, az M31 autópálya hídjainak szakaszfelelős tervezőként való tervezésében, a Megyeri híd engedélyezési és kiviteli terveinek készítésében, M6 autópálya 1693 j. völgyhíd tervezésében és Hódmezővásárhely körhíd tervezésében. A most épülő Kalocs–Paks új Duna-híd főtervezője. A **fib** Magyar Tagozatának tagja.

NEW BRIDGE BETWEEN KALOCSA AND PAKS – PART 3 CONSTRUCTION TECHNOLOGY

Sándor Kisbán – Pál Pusztai

The third article about the design of the new Kalocs-Paks Danube bridge is a detailed description of the construction technology and the temporary supporting structures. The tensioning systems used in balanced cantilever method were described in detail. Among the phases of construction, special emphasis were given to the final construction operation so-called bridge wedding. Finally, the shape adjustment and static calculations that follow the construction schedule throughout the whole construction process were discussed.

VASBETON HIDAK INTELLIGENS MONITORINGJA DIGITÁLIS IKER ÉS MESTERSÉGES INTELLIGENCIA ALKALMAZÁSOK HASZNÁLATÁVAL



<https://doi.org/10.32969/VB.2024.4.2>

Asseel Al-Hijazeen – Koris Kálmán

A vasbeton hidak biztonsága és fenntarthatósága jelentősen növelhető a szerkezet működés közbeni állapotának folyamatos monitoringjával és ennek révén a különböző terhelési körülmények között várható viselkedésük és állapotuk pontosabb előrejelzésével. A monitoring rendszer által mért adatok alapján, digitális iker (DI) és mesterséges intelligencia (MI) alapú eszközök használatával a szerkezet statikai állapota valós időben követhető, és a megfelelő határértékek definiálása mellett automatikus hibajelzés kapható nem megfelelő állapot esetén. A potenciális tartószerkezeti problémák korai felismerésével a későbbi, komolyabb károsodások megelőzhetők, még azok bekövetkezése előtt. Annak ellenére, hogy több hazai hídon jelenleg is van monitoring rendszer, a mért adatok nyers formában gyakran feldolgozatlanok maradnak, így a híd állapota pusztán ezek alapján kevésbé becsülhető meg. A célunk az volt, hogy a mért nyers monitoring adatokat digitális iker és mesterséges intelligencia alapú eszközök alkalmazásával, valós időben feldolgozzuk, és a híd statikai állapotának jellemzésére alkalmas adatokká alakítsuk, ilyen módon lehetővé téve a szerkezettel kapcsolatos, potenciális problémák időben történő felismerését. A kifejlesztett eljárás alapjait egy meglévő, magyarországi vasbeton szekrény keresztmetszetű közúti híd példáján keresztül mutatjuk be. A választott híd felszerkezet statikai viselkedésének numerikus szimulációjához és a megfelelőségi feltételek ellenőrzéséhez a digitális iker (DI) technológiát alkalmaztuk. Az igénybevételek és alakváltozások meghatározását, valamint a teherbírási (ULS) és használhatósági (SLS) feltételek ellenőrzését egy validált 3D-s végeselemes modellen (VEM) végeztük el. Monte Carlo-szimulációval különböző forgalmi terheket generáltunk, és minden egyes teherelrendezés esetén meghatároztuk a híd kihasználtságát különböző ULS és SLS határállapotokban, különös tekintettel a feszültségekre, a lehajlásra és a repedéstágasságra. A numerikus modellben a tényleges hídon elhelyezett szenzoroknak megfelelő helyeken az adott szenzor által mérhető fizikai jellemzőket (pl. nyúlások) is rögzítettük minden egyes futtatás során. Ilyen módon két adathalmazt kaptunk, amelyek közül az egyik a virtuális híd statikai állapotát (kihasználtságok ULS és SLS állapotokban), a másik a – valós hídon lévő szenzoroknak megfelelő – virtuális monitoring pontokban egyidejűleg “mérhető” mennyiségeket tartalmazta. A két adathalmaz közötti kapcsolatot mesterséges intelligencia (MI) alkalmazás, azon belül a mesterséges neurális hálózatok (ANN) segítségével határoztuk meg. Ezen meghatározott összefüggés alapján a tényleges hídon mért monitoring adatok valós időben feldolgozhatók és meghatározhatók a híd statikai állapotára (ULS és SLS kihasználtságok) vonatkozó számszerű információk, ezzel segítve a szerkezet állapotának megítélését, valamint az állapottal és a karbantartási igényekkel kapcsolatos előrejelzések készítését.

KULCSSZAVAK: híd, monitoring, neurális hálózat, digitális iker, kárfelismerés, mesterséges intelligencia

1. BEVEZETÉS

Bár az európai úthálózat hídjainak jelentős része az elmúlt 50 évben épült, néhány közülük jóval régebbi. Ez az előregedő infrastruktúra napjainkban kritikus kihívással néz szembe: a közúti forgalom egyre növekvő mértékével és súlyával. A hidakra nehezedő terhek jóval meghaladják azt, amire eredetileg tervezték őket. A BRIME jelentés (Woodward és társai, 2001)

ráadásul komoly hiányosságokat tárt fel az autópályahidakon Európa szerte. Franciaországban, Németországban és az Egyesült Királyságban kiemelkedően magas volt a valamilyen módon sérült vagy károsodott hidak aránya: 39%, 30%, illetve 37%. Ezek a problémák vasbeton hidak esetén különböző okokra vezethetők vissza, amelyek öt alapvető kategóriába sorolhatók. Az első a korrózió, amely a betonacélokat és a feszítőbetéteket egyaránt károsítja. A betonban megjelenő

repedések fő okai a zsugorodás, a fagyási-olvasadási ciklusok, az alkáli-szilikát reakció és az ütések okozta sérülések. A károk kialakulásában a tervezési és kivitelezési hibák is szerepet játszanak, beleértve a nem megfelelő betonozást, tömörítést, a vízszigetelési és a hőtechnikai tervezési hibákat. Emellett a szerkezet túlterhelése, a hibás saruk, dilatációs hézagok és vízelvezető rendszerek is gyakran hozzájárulhatnak a tartószerkezet károsodásához. Nem utolsó sorban olyan külső tényezők, mint a tűz, az árvíz és a járművek ütközése a normál működésen túlmenően is veszélyt jelentenek.

A felsorolt problémákra való tekintettel a meglévő és új hidak folyamatos monitoringja egyre fontosabbá válik. Az intelligens monitoring rendszerek (Smart Health Monitoring, SHM) rendszerek valós idejű adatokat szolgáltatnak hídszerkezet állapotával kapcsolatban, lehetővé téve ezzel a proaktív hídfenntartást. A szerkezeti viselkedés ok-okozati összefüggéseinek megértésével, a várható állagromlás modellezése mellett, lehetővé válik a mérnökök számára, hogy felismerjék és kezeljék a tartószerkezeti problémákat, mielőtt azok súlyossá válnának, ezáltal csökkentve a fenntartási költségeket a teljes életciklus alatt (Huang és társai, 2010). Az olyan hagyományos diagnosztikai módszerek, mint például a vizuális ellenőrzés vagy a roncsolásmentes vizsgálat (ultrahang, röntgen, akusztikus emisszió stb.) általában alkalmasak a nagyobb károsodások helyének, mértékének megállapítására, a kisebb, nehezen észlelhető, de a szerkezet viselkedését mégis befolyásoló károsodások viszont ezek mellett észrevétlenek maradhatnak. A lokalizált vizsgálatok fontosak lehetnek a kisebb repedések, betonfedés leválások és hasonló károsodások észleléséhez, mielőtt azok kritikussá válnának (Gharehbaghi és társai, 2022). Ezek a módszerek azonban inkább a kisebb, egyszerűbb szerkezeteknél alkalmazhatók megbízhatóan, mivel részletes kiindulási adatokat igényelnek, és szükség van a sérült területek helyének pontos ismeretére, így alkalmazásuk nagy és komplex szerkezeteknél nem hatékony, drága és időigényes lehet (Shih és társai, 2009; Chang és társai, 2003).

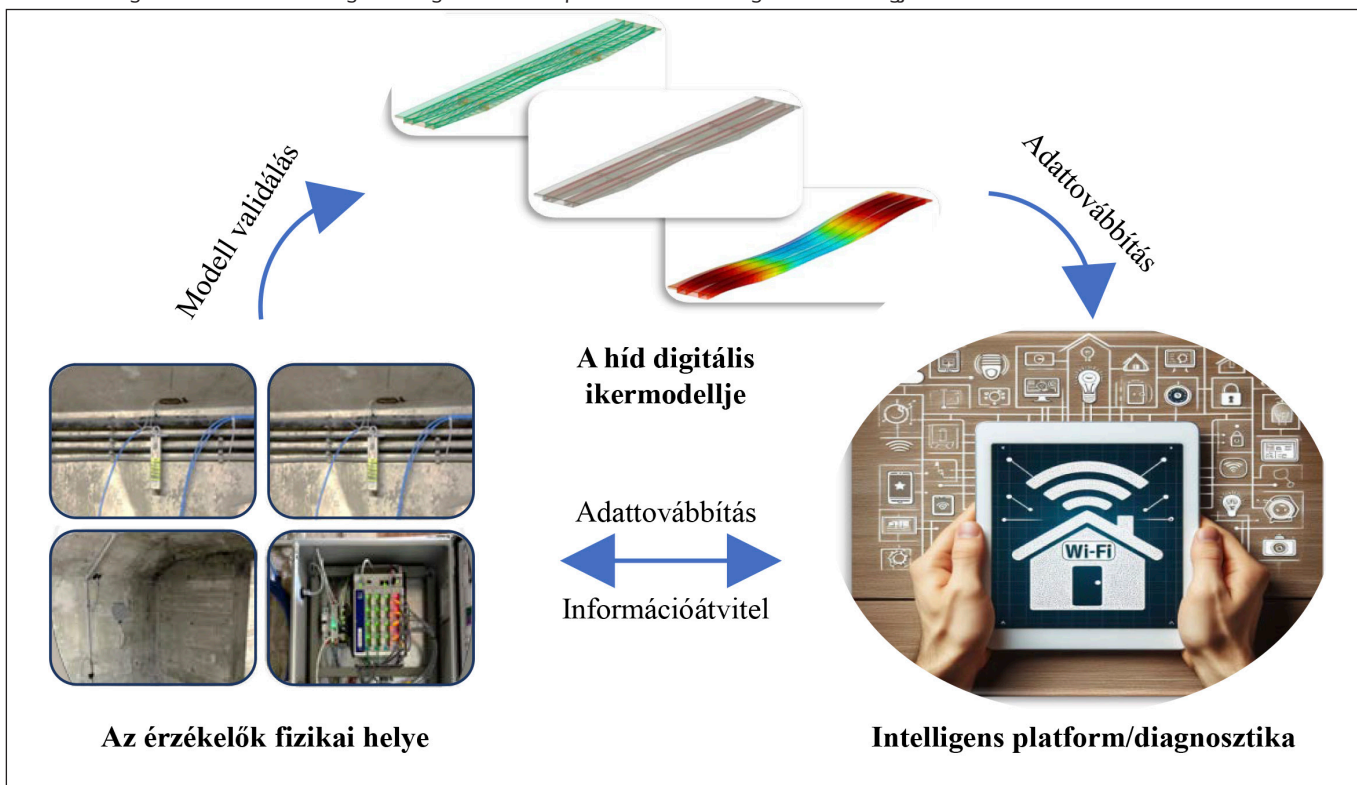
Housner és társai (1997) az intelligens szerkezeti monitoringot a szerkezeti károsodások felismerésére szolgáló érzékelési technikákat és a tartószerkezeti jellemzők átfogó elemzését magában foglaló módszerként határozták meg. A számos nagyfrekvenciás érzékelővel felszerelt monitoring rendszerek a tartószerkezet hosszú távú megfigyelése során hatalmas mennyiségű adatot képesek összegyűjteni, és az SHM egyik kulcsfontosságú területe ezen adatok elemzése és értelmezése a szerkezet állapotának megismerése céljából.

A hidak monitoringja jellemzően modellalapú módon vagy adatvezérelt módon történhet (Sun és társai, 2020). A modellalapú módszerek a híd részletes végeselemes modelljét hozzák létre, amelynek paramétereit folyamatosan frissítik a szenoradatok felhasználásával. A numerikus modell előrejelzései és az új fizikai mérések közötti jelentős eltérések potenciális károsodásra utalhatnak. Az adatvezérelt módszerek ezzel szemben megkerülik a fizikai modellt, és közvetlenül az érzékelő adatokat elemzik statisztikailag a szerkezeti változásokhoz kapcsolódó minták azonosítása érdekében. A modellalapú módszerek egyértelmű fizikai értelmezést kínálnak, így ezek előzetes ismereteket igényelnek. Az adatvezérelt módszerek alkalmazkodóképesebbek, de kevesebb betekintést nyújtanak a károsodás konkrét okába. Mindkét megközelítésnek vannak előnyei, és az átfogóbb szerkezeti elemzés érdekében a két módszer kombináltan is alkalmazható.

2. A DIGITÁLIS IKER ÉS A GÉPI TANULÁS TECHNOLÓGIÁK ÖSSZEKAPCSOLÁSA AZ INTELLIGENS MONITORING SORÁN

A hidak állapotának ellenőrzési folyamata napjainkban jelentős átalakuláson megy keresztül, amelyet a digitális iker (DI) technológia és a gépi tanulási (Machine Learning, ML)

1. ábra: A digitális iker és a mesterséges intelligencia összekapcsolása hidak intelligens monitoringjához



algoritmusok erőteljes kombinációja hajt. A DI technológia révén létrehozhatjuk a híd digitális másolatát, amiben vizuális, illetve számszerű formában rögzíthetők a vizsgálat szempontjából fontos adatok, mint például a geometriai- és anyagjellemzők, a szerkezeti viselkedés és az esetleges károsodások. A híd ezen digitális reprezentációja lehetővé teszi a híd aktuális állapotának egyértelmű megjelenítését. A gépi tanulás módszerével ugyanakkor lehetőségünk van elemezni a valós szerkezeten mért érzékelési adatokat (pl. nyúlások, elmozdulások, feszültségek stb.), ezáltal pontosabb képet kaphatunk a szerkezet viselkedéséről, aktuális állapotáról, várható élettartamáról, és az esetleges tartószerkezeti károsodások kialakulásáról.

A DI és az ML technológiák fúziója egyelőre kezdeti stádiumban van (Liu és társai, 2020), de izgalmas új lehetőségeket kínál a hidak intelligens monitoringja terén. A gépi tanulásnak a DI modellbe való integrálásával „szinkron működést” hozunk létre a fizikai híd és annak digitális ikertestvére között. A valós szerkezeten mért szenzoradatok lesznek a rendszer kulcsfontosságú elemei, amelyek alapján a DI modell felépíthető és kalibrálható (1. ábra). A DI ilyen módon történő folyamatos felügyelete és a mért adatok elemzése lehetővé teszi a lehetséges szerkezeti problémák korai felismerését.

3. MÓDSZERTAN

Kutatásunk során a fentiekben említett, korszerű DI és ML technológiák segítségével egy eljárást dolgoztunk ki, amellyel a vasbeton közúti hidakon mért monitoring adatok és a tartószerkezet állapotát jellemző számszerű paraméterek (kihasználtság különböző ULS és SLS határállapotokban) közötti összefüggés meghatározható. Az eljárás három fő elemet integrál, melyeket az alábbiakban ismertetünk.

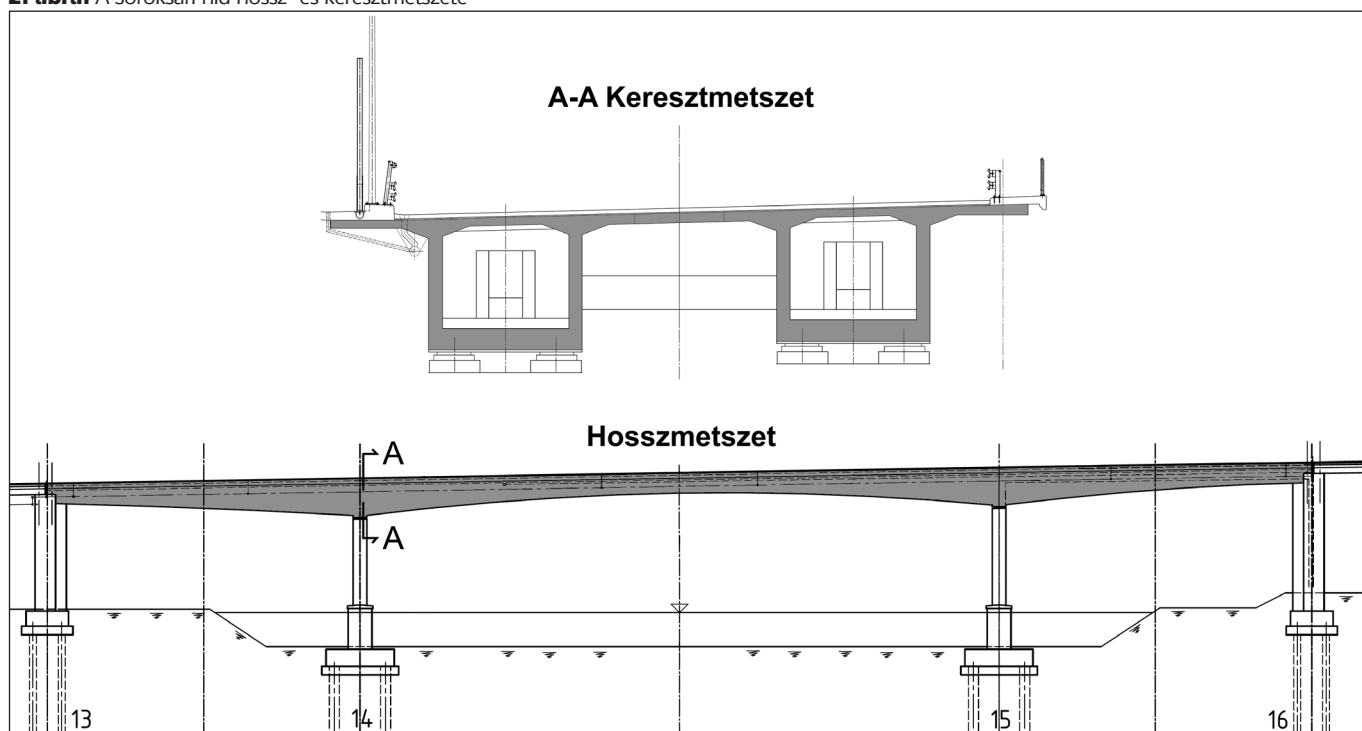
VEM modell fejlesztése és használata: Egy meglévő, utófeszített, szekrényes keresztmetszetű, vasbeton közúti híd felszerkezetének részletes 3D-s végelem-modellje (VEM) szolgált digitális ikertestvérként. A numerikus modell geometriai- és anyagjellemzőit az eredeti kiviteli és megvalósulási tervek,

továbbá a saját helyszíni szemrevételezéses vizsgálataink és roncsolásmentes betonszilárdság méréseink alapján vettük fel. Az Eurocode szabványrendszer figyelembevételével elvégeztük a híd erőtani ellenőrzését, e mellett, végrehajtottuk a modell verifikációját és validálását is, ami a tényleges hídon végzett próbaterhelés eredményei alapján készült. Az eredmények alapján a modellben számított alakváltozások, feszültségek és repedéstágasságok megfelelő pontossággal tükrözték a valós szerkezet viselkedését. A numerikus modell felhasználásával Monte-Carlo szimulációt végeztünk, mely során véletlenszerűen generált forgalmi terhek esetére meghatároztuk a szerkezet igénybevételeit, alakváltozását és repedéstágasságait. Ezek mellett, minden futtatás során rögzítettük a tényleges hídon elhelyezett szenzoroknak megfelelő virtuális monitoring pontokban az adott érzékelő típusának megfelelő, számított fizikai jellemzőket (pl. nyúlásmérő bélyeg esetén a modell adott pontjában számolt megnyúlást).

Szenzorhálózat felügyelete: A fizikai hídon már eleve meglévő, illetve általunk elhelyezett új szenzorok hálózata valós idejű adatokat (vízszintes és függőleges nyúlások, hőmérséklet, támaszmozgás) rögzített több mint 1 éven keresztül. Ezek a mérések szolgáltatták a bemeneti adatokat tényleges a híd szerkezeti válaszában későbbi értékeléséhez.

Gépi tanulás integrációja: Egy mesterséges neurális hálózatot (ANN) fejlesztettünk ki a digitális ikerből származó adatok feldolgozására. Ennek segítségével kapcsolatot tudunk teremteni a szerkezet erőtani állapota (jellemzően valamely ULS vagy SLS állapotra vonatkozó kihasználtság), és a virtuális monitoring pontokban számított fizikai jellemzők között. Ez alapján, az ANN rendszer – kellő számú futtatás segítségével történő – betanítása után a képesek voltunk megjósolni a valós szerkezet állapotát a hídon lévő szenzorok adataira alkalmazva a digitális iker elemzésével kapott összefüggéseket. A fejlett numerikus szimuláció és a gépi tanulási módszer ilyen módon összekapcsolható volt a valós hídon mért monitoring adatokkal, amely segítségével a híd statikai állapota akár valós időben is elvégezhető.

2. ábra: A Soroksári híd hossz- és keresztmetszete





3. ábra: Hosszirányú elmozdulás mérése a 13 támasznál (A), a 15 támasznál (B) és hőmérsékletmérő a 14 támasznál (C)

A módszer segítségével a híd infrastruktúra állapota valós időben nyomon követhető, szükség esetén, a rendszer jelzései alapján a híd részletesebb diagnosztikája, karbantartása, javítása vagy megerősítése elvégezhető, megelőzve a komolyabb károsodás, vagy veszélyhelyzet kialakulását, elősegítve ezzel a biztonságosabb és hatékonyabb fenntartást.

4. ESETTANULMÁNY

4.1. A vizsgált híd leírása

A fentiekben vázolt módszert egy esettanulmányon keresztül mutatjuk be. A vizsgált híd az M0 autópálya Soroksári Duna-ág hídjának régebbi, 1990-ben épült bal-pálya hídjára (2. ábra). A híd felszerkezet digitális ikertestvérét az *AxisVM* végeselemes szoftver segítségével készítettük el. A hídon 2020-ban 8 db hőmérsékletmérőből és 10 db hosszirányú alakváltozásmérő eszközökből álló monitoring rendszert telepítettek, a szerkezet különböző keresztmetszeteiben. A kutatási munka során, a híd felszerkezetének viselkedésére vonatkozó átfogóbb adatok megszerzése érdekében a Magyar Közút Zrt. mint hídüzemeltető és a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Építőmérnöki Karának Szerkezetvizsgáló Laboratóriuma segítségével további hét nyúlásmérő műszert is telepítettünk a szekrénykeresztmetszet belsejébe.

A mederhíd felszerkezet 3 nyílású folyótárolagos feszített vasbeton gerendahíd. A főtartó a támaszok felett kiékelte, két külön cellából álló, változó magasságú szekrénykeresztmetszet, integrált oldalsó konzolos járdalemezekkel. A híd a támaszok felől konzolos szabad szereléssel épült. A híd teljes keresztmetszeti szélessége 20,64 méter, a vizsgált szakasz pedig összesen 147,3 méter hosszú (2. ábra).

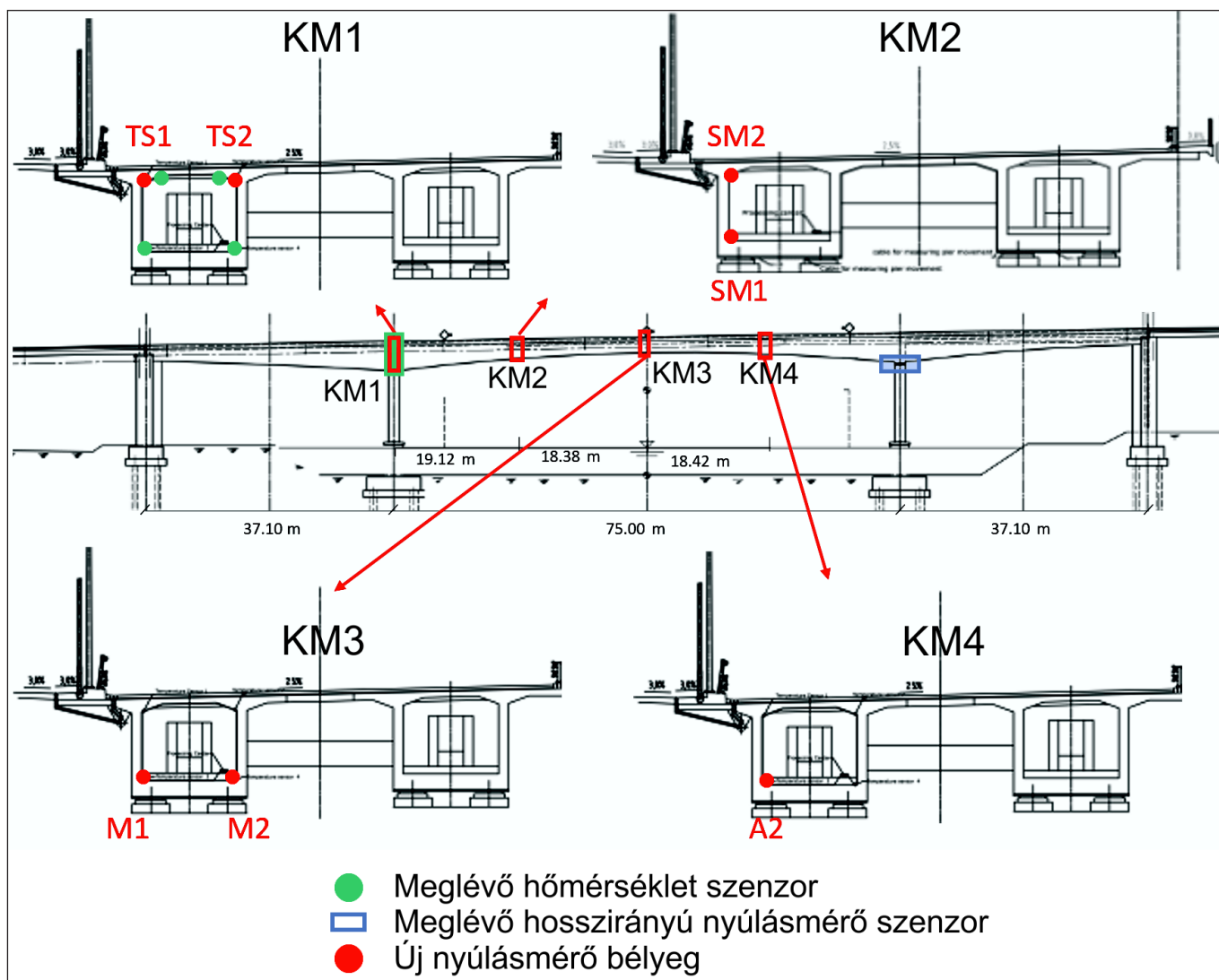
A korábbi hídsaru javítások során telepített, már meglévő monitoring rendszer folyamatosan méri a híd állapotát. A rendszer Rhodium 30305 Pt100 típusú hőmérsékletmérőket és ASM PCQA24 mágnesszabályozós távolságmérőket használ a hőmérséklet és a hosszirányú alakváltozások mérésére. Ezeket az érzékelőket a híd hossz tengelye mentén minden támasznál elhelyezték. A pillérek geometriája a méretkülönbségek miatt kisebb eltéréseket mutat, a szenzorok elrendezése ennek ellenére következetes. A távolságmérő szenzorok nem mozgatható felét egy hajlított, rozsdamentes acélból készült konzol segítségével rögzítették minden egyes pillér felső végéhez, míg a hajtóműfej egy csuklós rúddal csatlakozik a kerethez. A mérőrendszer pontossága 0,1 mm, a mintavételi frekvencia 5 Hz. A hőmérsékletmérők mérési tartománya -30 °C és +85 °C között van, a Pt100 érzékelők „A” pontossági osztályúak, a mérés pontossága így 0,1 °C, a mintavételi frekvencia pedig 1 Hz. A szenzorok védőcsőben vezetett kábelekkal

vannak összekötve a híd központi mérőegységével, elkerülve az ideiglenes emelési pontokat és más fontos szerkezeti tartóelemeket. A szenzorok jelei a központi mérőegységben található HBM PMX PX455 mérőkártyákhoz csatlakoznak. A hőmérsékletmérő és elmozdulásmérő szenzorok jelei között a szinkronitás biztosított. A szekrénykeresztmetszet belsejében, a 13, 14 és 15 támaszoknál elhelyezett néhány szenzor fotója a 3. ábrán látható. A biztonság és hatékonyság érdekében a telepített szenzorhálózat autonóm állapotfigyelést tesz lehetővé, ami kiküszöböli a hídon végzett folyamatos kézi beállítások szükségességét. Az érzékelők adatai biztonságos Ethernet-kapcsolaton keresztül, közvetlenül egy erre a célra szolgáló, HPE EL300-as ipari vezérlő számítógépre kerülnek továbbításra, a gépen szabványos MS Windows 10 Professional operációs rendszert fut. Az adatgyűjtést a HBM CatmanEasy szoftvere kezeli, biztosítva az érzékelők leolvasásainak hatékony és megbízható gyűjtését és továbbítását.

A szóban forgó híd jelenlegi állapota tartószerkezeti szempontból megfelelőnek tekinthető, ugyanakkor a jövőben várható, természetes állagromlásra való érzékenysége miatt szükséges a további, folyamatos monitoring. A meglévő felügyeleti rendszer továbbfejlesztése érdekében javasoltuk, hogy a hídra kiegészítő szenzorokat építsenek be, ennek eredményeképpen 2022 decemberében hét darab új nyúlásmérő bélyeg felszerelésére került sor, a szekrényes keresztmetszet belsejében. A meglévő, illetve az utólag felszerelt kiegészítő szenzorok adatai szolgálták a következőkben ismertetett intelligens monitoring rendszer alapjául. A már meglévő, és az általunk telepített szenzorok hídon való elhelyezkedését a 4. ábra szemlélteti.

4.2. Digitális Iker alkalmazása SHM céljából

A digitális iker koncepcióját, mint a hidak monitoringjának egy hatékony eszközét Grieves vezette be 2002-ben (Grieves, 2014). A DI technológia három fő összetevője: a) a valós fizikai híd, b) a híd virtuális másolata a digitális térben, és c) folyamatos, szinkronizált adatáramlás a valós és a virtuális híd között (Grieves, 2014). Más iparágakhoz hasonlóan a digitális iker alkalmazása egyre nagyobb teret nyer napjainkban a hídfenntartás és üzemeltetés terén. A fizikai híd szenzoradataival folyamatosan frissített virtuális modell létrehozásával a mérnökök proaktív felügyeletet és karbantartást tudnak megvalósítani, amely segítségével a potenciális problémák időben azonosíthatók és kezelhetők (Pregolato és társai, 2023). A digitális iker lényegében a híd virtuális megfelelőjeként működik, lehetővé téve a modell valós idejű frissítését, a valós szerkezetre vonatkozó visszajelzéseket, sőt a kockázatok felmérésére és a teljesítmény



4. ábra: A már meglévő hőmérséklet- és hosszirányú elmozdulásmérő szenzorok, és az újonnan telepített nyúlásmérő bélyegek pozíciója a hídon

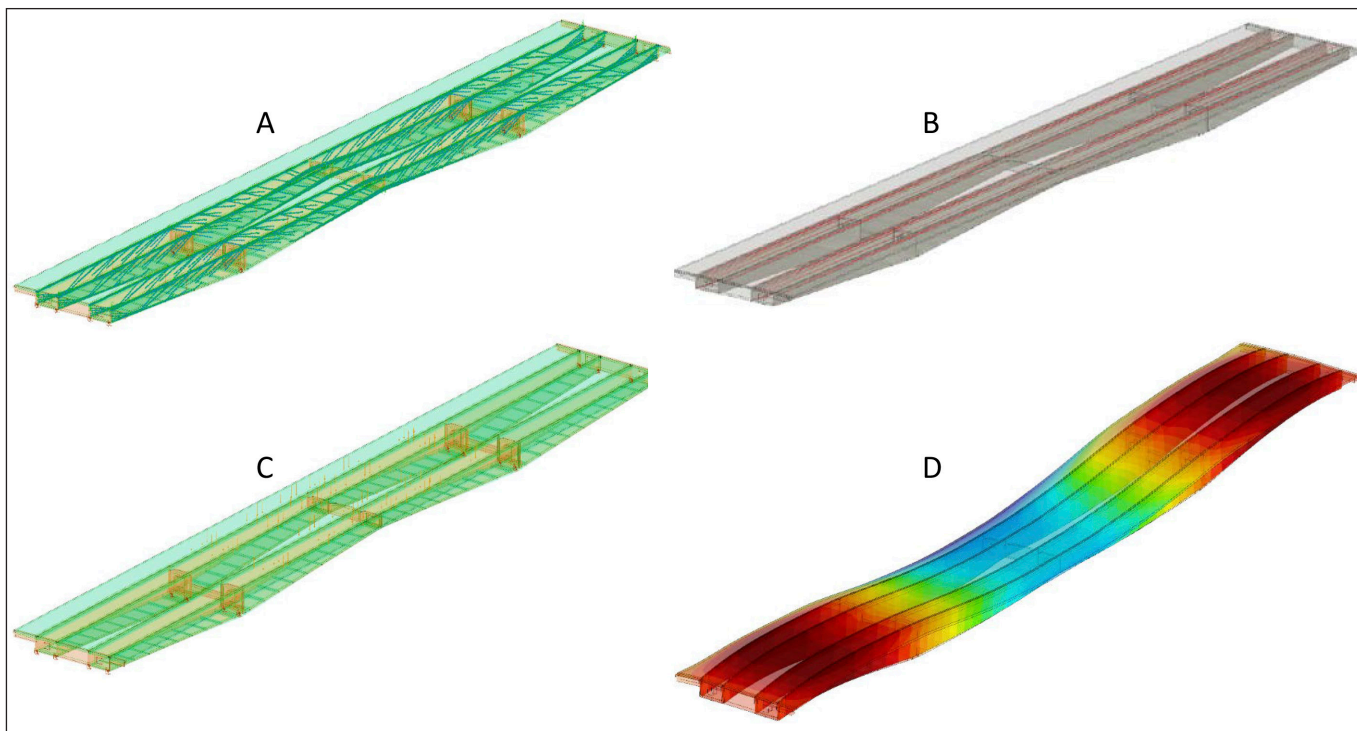
előrejelzésére szolgáló szimulációkat is (Ladj és társai, 2020). Ez a digitális másolat túlmutat a híd egyszerű tükrözésén, olyan algoritmusokat tartalmaz, amelyek elemzik a valós hídon rögzített szenzor adatokat, és akár a hídkarbantartó rendszeren belül is képesek önállóan műveleteket végezni. A kulcs a megfelelő digitális modell létrehozásában rejlik, amely kellő pontossággal tükrözi a tényleges híd viselkedését (Roszevák, Haris, 2021). A Ye és társai által a staffordshirei vasúti hidakon végzett tanulmány is bizonyítja ezen megközelítés hatékonyságát (Ye és társai, 2019). Kutatásuk rávilágít a különböző adatforrások kombinálásának és többféle numerikus modell egyetlen digitális ikerbe történő integrálásának fontosságára a megbízhatóbb előrejelzések érdekében. Az általuk javasolt digitális iker modell hatékonyságának értékeléséhez és a híd egészségi állapotának nyomon követésére a kutatás nyolc alapvető képességet határoz meg a szakirodalom alapján (Ye és társai, 2019).

A Soroksári híd intelligens monitoringjához fejlesztett digitális iker készítésekor tekintettel voltunk a Ye és társai (2019) által megfogalmazott nyolc alapvető képességre, melyek közül néhányat a következőkben sorolunk fel. A vizualizáció érdekében a híd digitális modelljét az AxisVM szoftver segítségével hoztuk létre. A modell tartalmazta eredeti kiviteli és megvalósulási terveken szereplő geometriai adatokat, anyagjellemzőket és feszítési paramétereket, továbbá a saját helyszíni szemrevételezéses vizsgálataink és roncsolásmentes betonszilárdság méréseink alapján rögzített információkat a

geometria, anyagjellemzők és meglévő károsodások kapcsán. A numerikus modellt annak verifikálásával és – a BME által 1990-ben végzett próbaterhelés eredményei alapján történő – validálásával pontosítottuk (lásd 4.3. fejezet). Új nyúlásmérő szenzorok beépítésével kibővítettük a monitoring rendszert, hogy a nagyobb számú rendelkezésre álló információ alapján pontosabban becsülhető legyen a tartószerkezet állapota. A digitális iker felhasználásával különböző terhelési eseteket szimuláltunk, a kapott eredményeket és adatokat pedig részletesen elemeztük és feldolgoztuk az integrált neurális hálózat nyújtotta gépi tanulási eszközök kihasználásával. Ilyen módon meg tudtuk határozni az összefüggést a tartószerkezet állapotát leíró számszerű változók (pl. kihasználtságok) és a hozzá tartozó, a valós szerkezeten lévő szenzoroknak megfelelő pontokban számított fizikai jellemzők (pl. nyúlások) között. Ezen összefüggés ismeretében a valós hídon mért szenzor adatok valós időben is feldolgozhatók, és a szerkezet állapota értékelhető. Az alkalmazott neurális hálózat képes arra, hogy a szimulációk számának növelésével tanuljon és fejlődjön, a valós hídról gyűjtött új adatok alapján pedig a digitális iker modell is fejleszthető, pontosítható.

4.3. A végeelemes modell

A Soroksári híd digitális ikertestvérének létrehozása során az első lépés az 5. ábrán látható 3D-s végeelemes modell elkészítése volt, az AxisVM szoftverben. A modell vasbeton anyagú héjelemekből, támaszokból és utófeszítő



5. ábra: A Soroksári híd végeelemes modellje: A) utófesztítő kábelek a szekrénykeresztmetszet gerincében; B) a modell renderelt nézete; C) koncentrált terhek a pályalemezen; D) lehajlott hidalak a statikai számítás után

kábelekből áll. A modell geometriáját a híd kiviteli tervei alapján alakítottuk ki, a beton anyagminőségét a terveken megadott C30/37 értékre vettük fel, amit az általunk végzett roncsolásmentes betonszilárdság vizsgálatok is megerősítettek. A híd pályalemezébe és a szekrénykeresztmetszetekbe épített utófesztítő kábeleket a terveknek megfelelő pozíció, alak és feszítési feszültségek figyelembevételével építettük be a modellbe, *Axis VM* feszítőerő opciójának használatával.

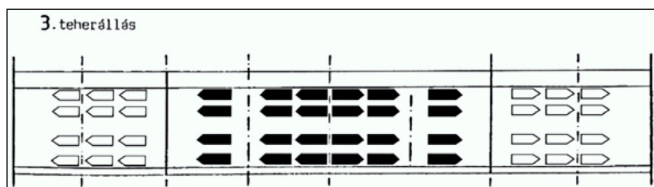
A megfelelő pontosságú analízis érdekében elvégeztük a modell verifikálását és validálását. A verifikálás és az optimális végeelemes hálóméret meghatározása érzékenységvizsgálat segítségével történt. Esetünkben különösen fontos volt a hálóméret optimalizálása, hogy a várható nagyszámú futtatás mellett számítási idő a lehető legkevesebb legyen. A hálósűrűség a számítási igény és a feldolgozási idő mellett természetesen jelentősen befolyásolja az eredmények pontosságát is. A végeelemes analízis alapelvei szerint a pontosság javítása vagy a háló finomítását vagy magasabb rendű elemek alkalmazását jelenti, mivel a számítási eredmények pontosságát a végeelemek mérete nagyban meghatározza (Pisarciuc és társai, 2023). A finomabb háló használata fokozatosan növeli az eredmények pontosságát, amennyiben az alkalmazott végeelem típus megfelel a konvergencia-kritériumnak, ez is rávilágít a megfelelő elemméret kiválasztásának kritikus szerepére (Dutt, 2015). A finomabb végeelemes háló tehát javítja a pontosságot, ugyanakkor több számítási erőforrást igényel és növeli a modell összetettségét, míg a durvább háló csökkentheti a pontosságot, de gyorsabb számítást tesz lehetővé (More, Bindu, 2015; Salehi, Burgueño, 2018). A Soroksári híd numerikus modellje kapcsán a hálóméret hatásának értékelését szisztematikus érzékenységi vizsgálattal végeztünk. A tipikus szerkezeti vastagságokat és a híd méretét figyelembe véve 0,20 m és 3,00 m közötti hálóméreteket elemeztük, és úgy találtuk, hogy a 0,5 m-es átlagos hálóméret jelenti az optimumot a pontosság és a számítási idő tekintetében.

A modell validálását a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem által a hídon 1990-ben végzett próbaterhelés eredményei alapján végeztük (Orosz és társai, 1990). A próbaterhelés során homokkal és kavicsal megtöltött KAMAZ 5511-es teherautókat használtak, amelyeket a helyszínen mérleltek a különböző terhelési elrendezések alkalmazása előtt. Példaképpen a 6. ábra a 3. teherállást szemlélteti, ahol a fekete alakzatok az aktív teherautók helyeit jelölik az adott terhelési elrendezésnél, a híd felső pályalemezén. A próbaterhelés során mért alakváltozásokat a 7. ábra mutatja be. A próbaterhelés során alkalmazott járműterhek és teherállások figyelembevételével a numerikus modellben is meghatároztuk a lehajlásokat és ezeket összevetettük a mért lehajlásokkal.

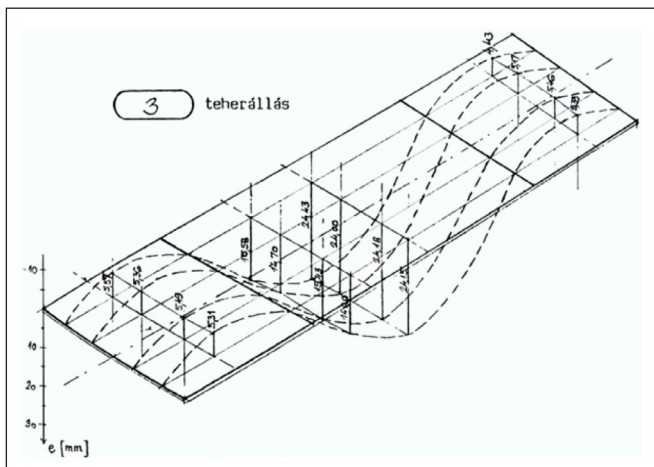
A 8. ábra a 3. teherállás esetén mért és számított lehajlások összehasonlítását mutatja. Összességében a mért és számított alakváltozások közötti legnagyobb különbség 4%-nál kevesebbre adódott, igazolva ezzel a modell alkalmazását a hídszerkezet viselkedésének nyomonkövetésére.

5. Gépi tanulás alkalmazása a hídmonitoring terén

A gépi tanulás (ML), a mesterséges intelligencia egyre növekvő részterülete, amely segítségével a tartószerkezetek állapotának nyomon követése reaktív folyamatból proaktívra alakítható (Pisarciuc és társai, 2023; Dutt, 2015; More, Bindu, 2015). A hagyományos vizsgálati módszerekkel ellentétben, amelyek elsősorban az emberi szakértelemre és időszakos személyes jelenlétre támaszkodnak, az ML a szerkezet folyamatos felügyeletét teszi lehetővé a szenzorhálózatokon keresztül, amelyek nagy mennyiségű adatot képesek gyűjteni az alakváltozásról, a rezgésről és más tartószerkezeti paramétereikről (Salehi, Burgueño, 2018; Sofi és társai, 2022; Morgantini és társai, 2021). Ezek az adatok szolgálnak a többlépcsős ML folyamat alapjául, amely segítségével az intelligens szerkezeti monitoring (SHM) megvalósítható. A mérnöki ismeretek és a matematikai eljárások kombinációját



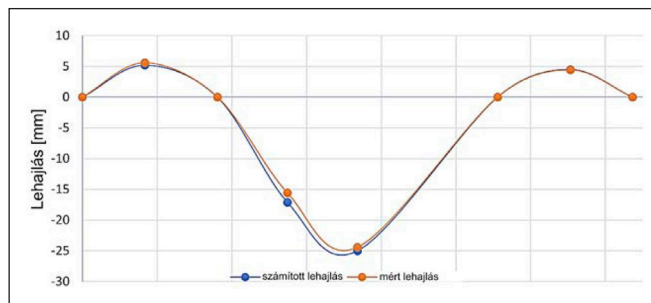
6. ábra: A 3. teherállásnál alkalmazott teherelrendezés felülnézete a híd próbaterhelése során (Orosz és társai, 1990)



7. ábra: A pályalemez próbaterhelése során mért alakváltozások a 3. számú teherállás esetén (Orosz és társai, 1990)

magában foglaló folyamat adatgyűjtéssel kezdődik, melynek során a szerkezetbe ágyazott érzékelők valós idejű információkat gyűjtenek. Ezeket a nyers adatokat előzetes feldolgozásnak vetik alá, hogy kiküszöböljék a zajt és a kiugró, irreális értékeket, amelyek ronthatják az elemzés pontosságát. Ezután következik a kívánt tartószerkezeti jellemzők kinyerése. Ezen kulcsfontosságú lépés során a károsodásra utaló releváns jellemzőket azonosítják és elkülönítik az előre feldolgozott adathalmazból (Flah és társai, 2021).

A kívánt paraméterek kinyerése után következik a modellalkotás, amely a gépi tanulás egyik legfontosabb része. A mesterséges neurális hálózatok (ANN), az emberi agy által inspirált ML algoritmusok egy olyan nagy teljesítményű típusa, amely különösen alkalmas az összetett adathalmazokban lévő mintázatok és trendek felismerésére (Morgantini és társai, 2021; Yaseen és társai, 2017; Kurian, Lijanapathirana, 2020). Ezeket a gépi tanulási algoritmusokat címkézett adathalmazok segítségével képezik ki, amely során minden egyes adatpontot egy adott károsodási állapothoz (pl. sérülésmentes, repedt, korrodált szerkezet, stb.) társítanak (Morgantini és társai, 2021; Malekloo és társai, 2022; Flah és társai, 2021). Az SHM számára az ún. felügyelt tanulás az egyik gyakran előnyben részesített módszer, mivel ez lehetővé teszi, hogy az ANN-ek megtanulják a szerkezeten mért jellemzők és a megfelelő károsodási jelenségek közötti bonyolult kapcsolatokat. Azokban az esetekben azonban, amikor kevés a címkézett adat, az ún. nem felügyelt tanulási technikák használhatók az anomáliák felismerésére és kiküszöbölésére. A betanítás után a modell szigorú validáláson megy keresztül, "nem látott" adatok felhasználásával, hogy valós helyzetekben is értékelni lehessen a modell hatékonyságát (Flah és társai, 2021). A "nem látott" adatok a modell számára olyan új adatok, amelyek nem voltak részei a tanulási folyamatnak. A megfelelően betanított modell ezután alkalmas a szerkezetből érkező adatok folyamatos megfigyelésére és értékelésére, továbbá szükség esetén riasztás is ad, ha potenciális károkra

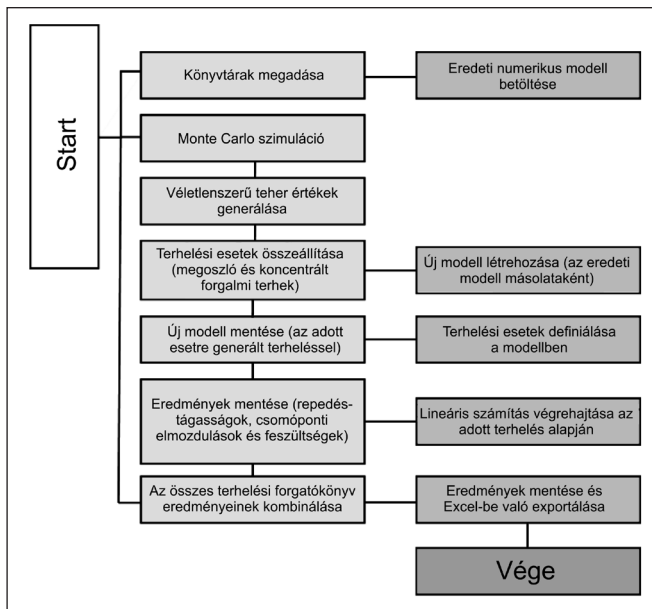


8. ábra: A Soroksári híd mért és a számított lehajlásának a 3. számú teherállás esetére

utaló anomáliákat észlel. Ez a valós idejű visszacsatolás segíti a fenntartást végző mérnököket abban, hogy megalapozottabb döntéseket hozzanak a szükséges karbantartási és javítási munkálatokról, végső soron megelőzve ezzel a költségesebb meghibásodásokat és folyamatosan biztosítva a szerkezeti integritást (Salehi, Burgueño, 2018; Sofi és társai, 2021). A gépi tanulás tartószerkezeti állapotfigyelésben történő alkalmazása jelentős lehetőségeket rejt magában, de továbbra is fennállnak kihívások ezen a téren. A hatékony ML modellek képzéséhez megfelelő minőségű, címkézett adatokra van szükség, és a bonyolult, nem lineáris viselkedést mutató szerkezetek olyan robusztus modelleket igényelnek, amelyek képesek kezelni a magas fokú összetettséget (Morgantini és társai, 2021; Gu és társai, 2017). A digitális ikrek alkalmazása e tekintetben áthidaló megoldást jelenthet. A valós, fizikai szerkezetek virtuális másolatai segítségével több száz, vagy ezer véletlenszerű terhelési esetet vagyunk képesek szimulálni, és olyan adatokat generálni, amelyek szorosan tükrözik a híd valós viselkedését. Ilyen módon a digitális ikrekből származó, bőséges adatfolyam lehetővé teszi a kifinomult ML algoritmusok betanítását az SHM számára. Ez a lehetőség utat nyithat a kiemelt infrastruktúra műtárgyak prediktív karbantartásához, amelynél a gépi tanulási modellek nemcsak a károsodást képesek nagy pontossággal észlelni, hanem annak előrehaladását is képesek előre jelezni, és javaslatokkal segíthetik az optimális javítási stratégiák kidolgozását.

5.1. A Soroksári hídhoz alkalmazott neurális hálózat

Amint korábban említettük, a célunk a Soroksári híd felszerkezetének automatizált, intelligens monitoringja volt neurális hálózatok és digitális iker alkalmazása révén. Ehhez először végeeselemes modellezés segítségével egy adathalmazt hoztunk létre, ami tartalmazta egyrészt egy adott terheléshez tartozóan a szerkezet állapotát leíró fontosabb paramétereket (repedéstágasságok, feszültségek és alakváltozások), továbbá ezzel egy időben a valós szerkezeten elhelyezett szenzoroknak megfelelő pontokban a numerikus modellben számított – az adott szenzor típusának megfelelő – mennyiségeket. A munka során elsősorban a használhatósági határállapotokra vonatkozó jellemzőket vizsgáltuk, mivel a legtöbb tartószerkezetnél a használhatósági határértékek túllépése jellemzően megelőzi a komolyabb, teherbírás kimerülésével járó események kialakulását. A véletlenszerű terhelési esetek generálását Monte Carlo szimuláció segítségével végeztük. A terhek generálásának, azok numerikus modellbe való implementációjának, a modell futtatásának és az eredmények kigyűjtésének folyamatát egy Python programozási nyelv segítségével készített kóddal végeztük. A véletlen jellegű megoszló és koncentrált forgalmi



9. ábra: A véletlenszerű terhelés generálásához és automatizált végelemes analíziséhez készített Python kód folyamatábrája

terhek valószínűségi eloszlását, és az eloszlás paramétereit (várható érték és szórás) egy másik magyar közúti hídon mért forgalmi terhelési adatok alapján határoztuk meg. A generált terhelés numerikus modellbe történő implementálását és a 3D modell *AxisVM* szoftverben történő futtatását a *Pyaxisvm* nevű *Python* könyvtársegítségével, automatizált módon végeztük. A *Pyaxisvm* lehetővé teszi az *AxisVM* modell betöltését, a terhelések megadását, a hálógenerálást, az elemzés végrehajtását és az eredmények kinyerését, mindezt *Python* környezetben. A 9. ábra az alkalmazott *Python* kód munkafolyamatát szemlélteti.

A neurális hálózatok sikeres betanításának alapja a részletes adatelőkészítés. Mielőtt elkezdjük a tanítási folyamatot, az adatoknak tisztának, konzisztensnek és a hálózat hatékony tanulására alkalmasnak kell lenniük. Ez a döntő fontosságú első lépés, az úgynevezett előfeldolgozás olyan technikákat foglal magában, mint a normalizálás/skálázás, hogy minden paraméter hasonló skálán helyezkedjen el, megakadályozva ezzel, hogy a hálózat a nagyobb értékű jellemzők felé torzítson (Géron, 2019). A hiányzó értékeket imputálással pótolják (az adott változó hiányzó értékeit a változó megfigyelt értékeinek átlaga alapján adják meg) vagy eltávolítják, biztosítva, hogy a hálózat teljes információon alapuljon. A kiugró értékeket, azaz a normától jelentősen eltérő adatpontokat is kezelni kell, megakadályozandó azok torzító hatását a hálózat tanulási folyamatára. Az adatok előfeldolgozása és megfelelő formátumba való alakítása után a következő lépés az adatok felosztása, egy tanulási és egy tesztelési halmazra. Az adatok nagy részét (kb. 70-80%) jelentő tanulási halmaz az alapja a hálózat betanításának. A “nem látott” adatokat tartalmazó tesztalmaz (20- 30%) létfontosságú szerepet tölt be, mivel ennek felhasználásával értékeli a rendszer, hogy a hálózat képes-e általánosítani a megtanultakat új adatokra, nem csak a tanulási adatokat memorizálta (Chollet, 2017). Az adatok gondos előfeldolgozásával és felosztásával jól strukturált tanulási környezetet hozunk létre a neurális hálózat számára, ami robusztus és általánosítható teljesítményt eredményez az új (a tanulási folyamat részét nem képező) adatokon.

A Soroksári híd digitális ikertestvérén számolt, illetve a valós hídon mért adatokat a fentiek szerint előzetesen feldolgoztuk. Adatszűrési technikák alkalmazásával, a károsodás szempontjából kritikus tartószerkezeti

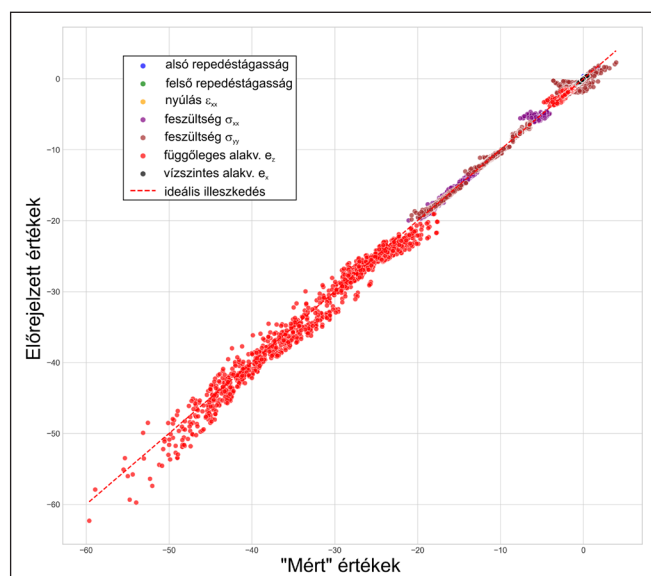
csomópontokhoz és felületekhez tartozó rész-adathalmazok kijelölésével biztosítottuk, hogy csak a releváns információk elemzésére kerüljön sor. A szűrést követően átfogó elemzést végeztünk, mely során összefoglaló statisztika készült a szűrt adathalmazban megfigyelhető tendenciák jellemzése érdekében. Ezután az adatmegjelenítési technikákat alkalmaztunk az adathalmaz vizuális elemzésére és a potenciális kiugró értékek azonosítására. Az adatok gépi tanulási modellezéshez való előkészítése érdekében funkcióskalázást is végrehajtottunk, ehhez a *Scikit-Learn* könyvtár *StandardScaler* funkcióját használtuk, amellyel – az adatok szabványosítása révén – biztosítható volt, hogy minden paraméter egyenlő mértékben járuljon hozzá a tanulási folyamathoz. Az adatok előfeldolgozására egy többretegű perceptron regresszor (*MLPRegressor*) modellt építettünk, majd ezt betanítottuk a skálázott tanulási adatok (X_{train} , Y_{train}) felhasználásával. A betanított modell általánosíthatóságát ezután a tesztadatokra (X_{test}) vonatkozó előrejelzések létrehozásával és elemzésével értékeltük. Az ML modell teljesítményének és pontosságának értékelésére az átlagos négyzetes hiba (Mean Square Error, MSE), az átlagos abszolút hiba (Mean Absolute Error, MAE) és az R^2 (determinációs együttható) értékeket használtuk. Végezetül a digitális iker alkalmazása révén betanított ML modell felhasználásával értékeltük a valós fizikai hídon mért szenzor adatokat, ezekből meghatározva a híd kritikus pontjaiban várható kihasználtságot repedéstágasság, alakváltozások és feszültségek tekintetében.

6. EREDMÉNYEK

A Soroksári híd intelligens monitoringja érdekében egy új módszertant alkalmaztunk, amelyben a mesterséges neurális hálózatokat (ANN) és a digitális iker technológiát kombináltuk, az előző fejezetekben leírt módon. A véletlen jellegű forgalmi terhelés figyelembevételére Monte Carlo-szimulációt alkalmaztunk, és minden legenerált teherelrendezés esetére elvégeztük a híd VEM analízisét. A futtatás időigényes volta miatt a minták teljes száma csak 1000 volt, de a teljes statisztikai eloszlás megfelelő közelítése érdekében speciális mintavételi technikát (Importance Sampling) alkalmaztunk, így a mintaszám megfelelőnek bizonyult. Minden – véletlen forgalmi terheléshez tartozó – végelemes futtatás során kiszámítottuk a szerkezet kritikus pontjaiban a kihasználtságot lehajlás, repedéstágasság és feszültségek tekintetében, így jellemezve a híd állapotát. Ezen adatok szolgáltak ANN algoritmus célváltozóiként. Minden futtatás során rögzítettük a virtuális monitoring pontokban mérhető – a valós szerkezeten lévő szenzorok adatainak megfelelő – mennyiségeket is. Ezek az adatok jelentették az ANN algoritmus bemeneti változóit. Az így kapott két adathalmazt az ANN modell tanítására használtuk fel (a VEM modell összes eredménye szerepel ebben az adathalmazban). Az adathalmazt egy tanulási halmazra és egy tesztalmazra osztottuk fel. A tanulási halmazt szolgált az ANN modell kifejlesztésére és betanítására, míg a tesztalmazt a modell teljesítményének értékelésére használtuk. Az ANN modell pontosságát a tesztalmaz tényleges értékeinek és a modell előrejelzéseinek összehasonlításával értékeltük. Ez az értékelés döntő fontosságú annak felmérésében, hogy a modell mennyire hatékonyan általánosít a “nem látott” adatokra vonatkozóan, és mennyire teljesít jól a “valós” körülmények között. A betanított mesterséges neurális hálózati

modellünk teljesítményének és pontosságának értékelése az előzőekben említett hibamérszámokra alapult. A tesztalmaz segítségével kiszámítottuk a betanított modellel készített előrejelzésekre vonatkozó alapvető hibametrikákat. Az átlagos négyzetes hiba (MSE) a tényleges (mért) értékek és az előrejelzett értékek közötti átlagos négyzetes különbséget méri. Ez a metrika a nagyobb hibákat a különbségek négyzetre emelése miatt erősebben bünteti, átfogó képet nyújtva az előrejelzés pontosságáról. Az MSE négyzetgyökéből számított átlagos négyzetes hiba (RMSE) az előrejelzési hibák átlagos nagyságát mutatja, függetlenül a célváltozó skálájától. Az alacsonyabb RMSE érték nagyobb pontosságot jelent, ami a tényleges értékekhez közelebb álló előrejelzést tükröz. Az átlagos abszolút hiba (MAE) a tényleges és az előrejelzett értékek közötti abszolút különbségek átlagos nagyságát számítja ki, ami az előrejelzési hiba egyszerű mérszámát kínálja. A modellünk értékelése során kapott MSE=0,0261, RMSE=0,0610 és MAE=0,0451 értékek kellően pontos előrejelzést jelentenek, és a modell megfelelő hatékonyságára utalnak a gyakorlati alkalmazás szempontjából. A számított hibaarányok jelenleg – a szimulációk korlátozott száma mellett – is ígéretesek, ugyanakkor a szimulációk számának és a tanulási adatmennyiség jövőbeli növelésével tovább csökkenthetők, ezzel tovább pontosítva az előrejelzéseket. A 10. ábrán látható diagram a betanított mesterséges neurális hálózati modell teljesítményét mutatja be. A vízszintes tengely a szerkezeti jellemzők (feszültség, alakváltozás, repedéstágasság) tényleges értékeit ábrázolja, amelyeket a validált végeses elemes modell analízise alapján kaptunk, míg a függőleges tengelyen ugyanezen szerkezeti jellemzők ANN modell által előrejelzett értékei szerepelnek. Általánosságban az előrejelzett és a tényleges értékek közötti erős korrelációt az ábrán a bal alsó saroktól a jobb felső sarokig tartó átlós, 45°-os egyenes mentén koncentrálódó adatpontok jelzik. Az ábrán megadott piros vonal az említett referenciavonal, ami az előrejelzett és a tényleges értékek tökéletes egyezését jelzi. Esetünkben a meghatározott – különböző szerkezeti paraméterekhez tartozó – adatpontok elhelyezkedése pozitív korrelációt mutat a referenciavonal körül, ami azt jelzi, hogy az ANN modell képes volt felismerni a bemeneti paraméterek (virtuális monitoring pontokban számított jellemzők) és a kívánt kimeneti adatok (a híd állapotát leíró kihasználtság értékek) közötti alapvető összefüggéseket. Az adatpontoknak a 45°-os egyenes körüli szóródása arra utal, hogy a modell pontosságát még lehet finomítani.

Ellenőriztük, hogy a modell nem volt-e túlillesztve (túlillesztés akkor fordul elő, amikor a modell nem tud általánosítani, és helyette túlságosan szorosan illeszkedik a tanulási adathalmazhoz). A 11. ábra bal oldalán látható diagram a tanulási és validációs veszteséget szemlélteti a tanulási ciklusok számának függvényében. A folyamatosan csökkenő tanulási veszteség (kék színű görbe) egy jól teljesítő ANN modellre utal, ami képes volt hatékonyan felismerni a tanulási adathalmazokon belüli mintákat. Biztató, hogy a validációs veszteség (piros színű görbe) szintén csökkenő tendenciát mutat, ami arra utal, hogy a modell jól általánosított és elkerülte a túlillesztést. A 11. ábra jobb oldalán, illetve a 12. ábrán az ANN modell által előrejelzett és a VEM modellben ténylegesen számolt szerkezeti paraméter értékek összehasonlítása látszik. A 11. ábra jobb oldalán a repedéstágasságokra, a 12. ábra bal oldalán a feszültségekre, a jobb oldalán pedig a lehajlásokra vonatkozó becslült és tényleges értékek összevetése látszik, a híd egy-egy

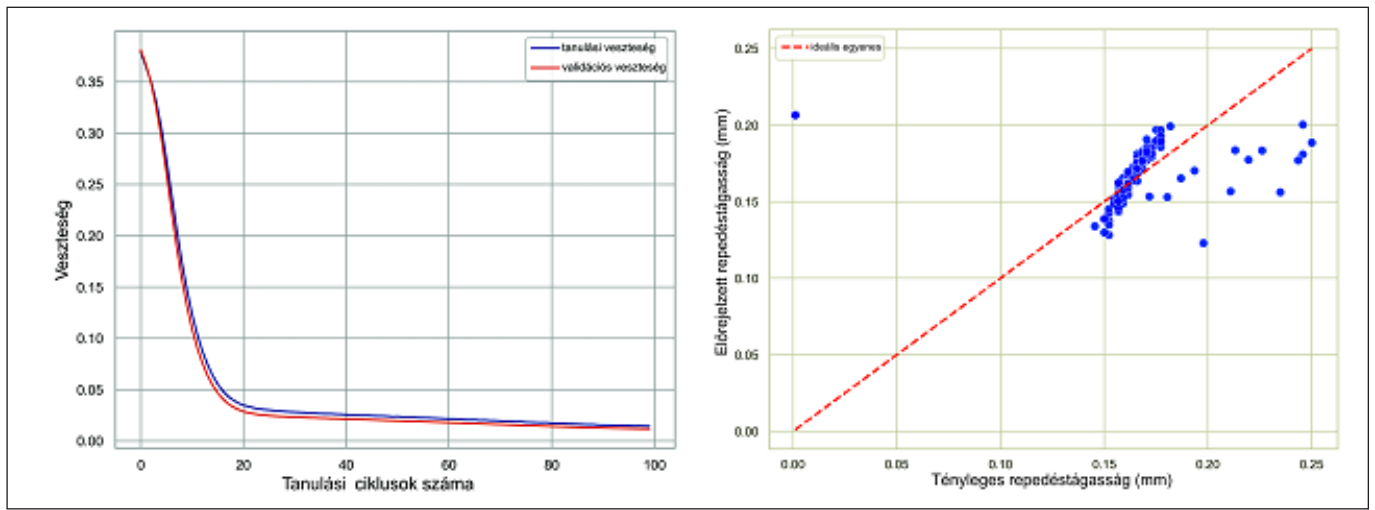


10. ábra: Az ANN modell előrejelzési pontosságának szemléltetése, ami az előrejelzett és a tényleges értékek (feszültség, alakváltozás, repedéstágasság) közötti korrelációval fejezhető ki

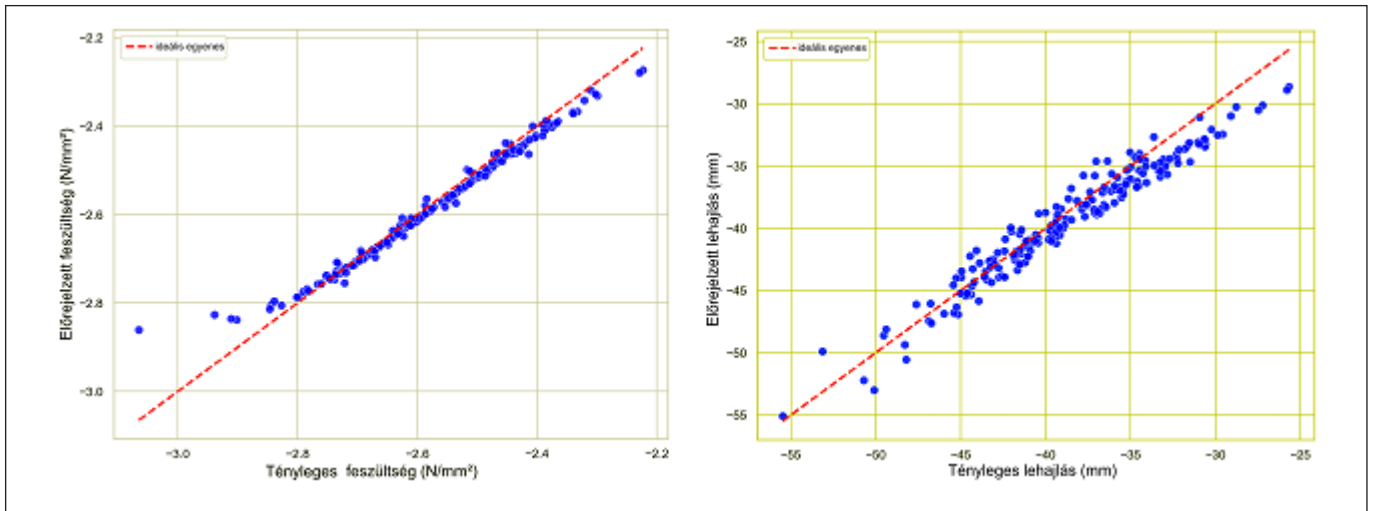
kiválasztott pontjában. Látható, hogy az adatpontok az ideális átlós egyenes körül csoportosultak, ami jó ANN modellt, és megfelelő pontosságú előrejelzéseket jelent. Az ANN modell ez alapján képes a szerkezet minden kiválasztott pontjában meghatározni a fenti értékeket, és a megfelelő határértékek megadása mellett kiszámítani a vonatkozó kihasználtságokat, a virtuális monitoring pontokban számított adatokból. A tanult összefüggések alapján a modell képes a tényleges hídon lévő szenzorok által mért adatokat is feldolgozni, és a fizikai szerkezet állapotáról számszerű visszajelzést adni. Erre mutat példát a 13. ábra, ami a valós hídon mért szenzor adatok alapján, az ANN modell által becslült lehajlási és repedéstágassági kihasználtságokat mutatja a híd kiválasztott csomópontjaiban, egy 1 órás időtartam alatt (2023. július 7, 5:00-6:00).

7. ÖSSZEFOGLALÁS

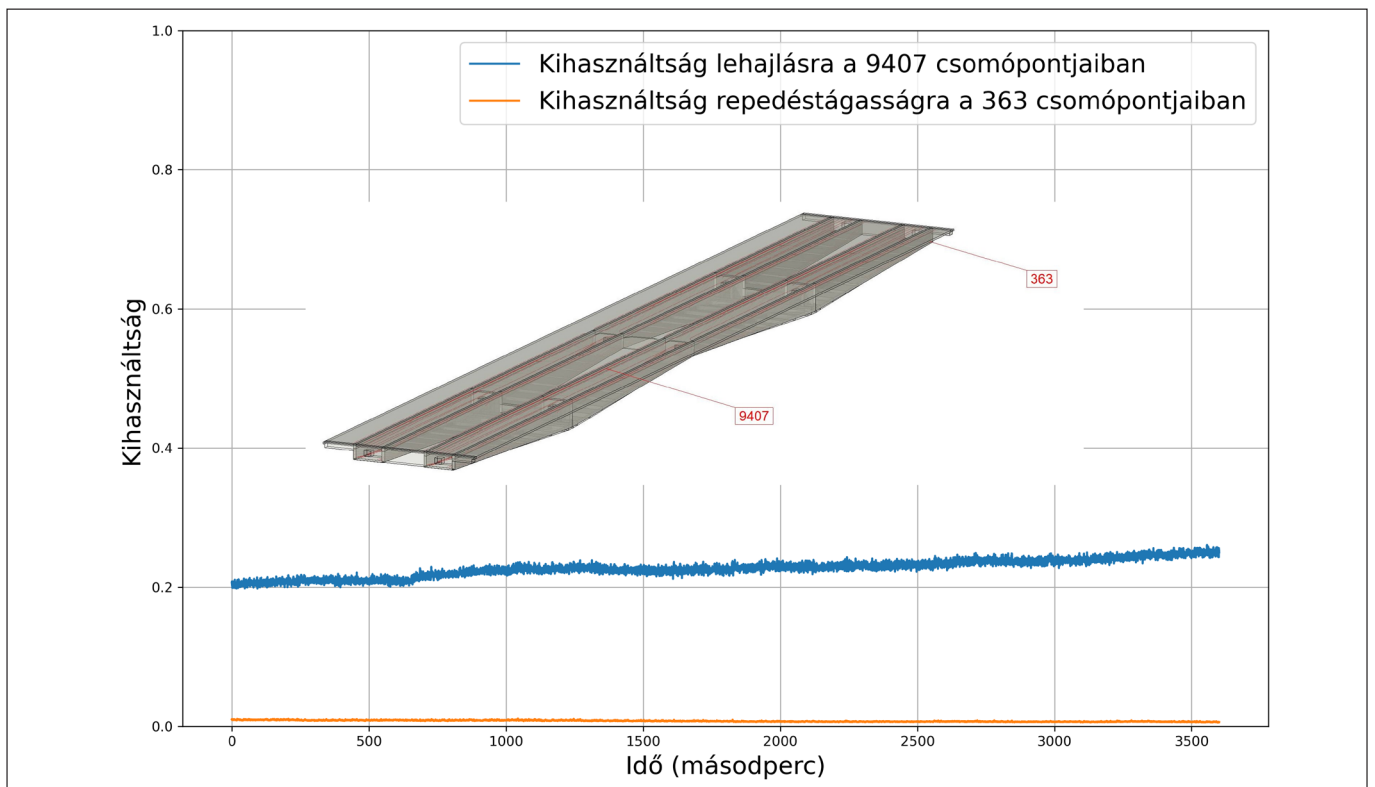
Bemutattunk egy összetett módszert a vasbeton hidak statikai állapotának valós idejű becslésére a hídon mért szenzor adatok alapján. Az egyes mennyiségek közötti korrelációt a tényleges híd digitális ikertestvéreinek felhasználásával határoztuk meg. Monte Carlo szimulációval véletlenszerű terhelési eseteket generáltunk, és VEM analízissel meghatároztuk a szerkezet kihasználtságát a megfelelően kiválasztott csomópontokban és az említett SLS szerkezeti határállapotok esetén. Ezekkel egyidőben, a fizikai szerkezeten lévő szenzoroknak megfelelő virtuális monitoring pontokban lévő mennyiségeket is rögzítettük a modellben. A fenti adatsorok közötti korrelációt az alkalmazott ANN algoritmus segítségével határoztuk meg. A digitális ikertestvéren kapott korrelációs függvény alapján a tényleges híd szenzormérései feldolgozhatók, és a híd erőtani állapota valós időben becslhető. A bemutatott módszer képes folyamatos visszajelzést biztosítani a híd állapotáról, és amennyiben a rendszer problémát jelez, elvégezhető a híd részletesebb szemrevételezéses és műszeres vizsgálata, illetve szükség esetén a szerkezet javítása vagy megerősítése, ezzel megelőzve a súlyosabb szerkezeti problémákat és biztosítva a biztonságos működést.



11. ábra: Az ANN modell tanulási és validációs vesztesége a tanulási ciklusok számának függvényében (balra), a tényleges és az előrejelzett repedéstágasságok összevetése (jobbra)



12. ábra: Az ANN modell által előrejelzett és a tényleges feszültségek összehasonlítása (balra), az előrejelzett és a tényleges lehajlások összevetése (jobbra)



13. ábra: A valós hídon mért szenzor adatok alapján, az ANN modell által becült lehajlási és repedéstágassági kihasznátságok a híd kiválasztott csomópontjaiban, 1 órás időtartam alatt (2023. július 7, 5:00-6:00)

8. HIVATKOZÁSOK

- Woodward, R., et al. (2001), "Bridge Management in Europe (BRIME)," European Commission, Directorate-General for Research and Innovation, Brussels.
- Huang, R. Y., Mao, I. S., and Lee, H. K. (2010), "Exploring the deterioration factors of RC bridge decks: A rough set approach," Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, Vol. 25, No. 7, pp. 517-529, <https://doi.org/10.1111/j.1467-8667.2010.00665.x>
- Gharehbaghi, V. R., et al. (2022), "A Critical Review on Structural Health Monitoring: Definitions, Methods, and Perspectives," Archives of Computational Methods in Engineering, Vol. 29, No. 4, pp. 2209-2235, <https://doi.org/10.1007/s11831-021-09665-9>
- Shih, H. W., Thambiratnam, D. P., and Chan, T. H. T. (2009), "Vibration based structural damage detection in flexural members using multi-criteria approach," J Sound Vib, Vol. 323, No. 3-5, pp. 645-661, <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2009.01.019>
- Chang, P. C., Flatau, A., and Liu, S. C. (2003), "Review Paper: Health Monitoring of Civil Infrastructure," Struct Health Monit, Vol. 2, No. 3, pp. 257-267, <https://doi.org/10.1177/1475921703036169>
- Housner, G. W., et al. (1997), "Structural Control: Past, Present, and Future," J Eng Mech, Vol. 123, No. 9, pp. 897-971, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(1997\)123:9\(897\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(1997)123:9(897))
- Sun, L., Shang, Z., Xia, Y., Bhowmick, S., and Nagarajaiah, S. (2020), "Review of Bridge Structural Health Monitoring Aided by Big Data and Artificial Intelligence: From Condition Assessment to Damage Detection," Journal of Structural Engineering, Vol. 146, No. 5, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0002535](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0002535)
- Liu, Z., Shi, G., Zhang, A., and Huang, C. (2020), "Intelligent tensioning method for prestressed cables based on digital twins and artificial intelligence," Sensors (Switzerland), Vol. 20, No. 24, pp. 1-20, <https://doi.org/10.3390/s20247006>
- Grievies, M. (2014), "Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication," White Paper, Florida Institute of Technology. Vol. 1, No. March, pp. 1-7.
- Pregnotato, M., et al. (2023), "Digital twins for civil infrastructure: A case study on the Clifton suspension bridge (Bristol, UK)," in Life-Cycle of Structures and Infrastructure Systems, CRC Press, London, pp. 2219-2226, <https://doi.org/10.1201/9781003323020-271>
- Ladj, A., Wang, Z., Meski, O., Belkadi, F., Ritou, M., and Da Cunha, C. (2021), "A knowledge-based Digital Shadow for machining industry in a Digital Twin perspective," J Manuf Syst, Vol. 58, pp. 168-179, <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2020.07.018>
- Roszevák, Zs., Haris, I. (2021), "Modern numerical modeling of reinforced concrete structures," Concrete Structures, Vol. 22, pp. 13-20, <https://doi.org/10.32970/CS.2021.1.3>
- Ye, C., Zhang, Y., and Wang, Y. (2019), "A Digital Twin of Bridges for Structural Health Monitoring," in Structural Health Monitoring 2019, DEStech Publications, Inc., Lancaster, PA, <https://doi.org/10.12783/shm2019/32287>
- Pisarciuc, C., Dan, I., and Cioară, R. (2023), "The Influence of Mesh Density on the Results Obtained by Finite Element Analysis of Complex Bodies," Materials, Vol. 16, No. 7, p. 2555, <https://doi.org/10.3390/ma16072555>
- Dutt, A. (2015), "Effect of Mesh Size on Finite Element Analysis of Beam," International Journal of Mechanical Engineering, Vol. 2, No. 12, pp. 8-10, <https://doi.org/10.14445/23488360/IJME-V2I12P102>
- More, S. T., Bindu, R. S. (2015), "Effect of Mesh Size on Finite Element Analysis of Plate Structure", International Journal of Engineering Science and Innovative Technology (IJESIT), Volume 4, Issue 3, pp. 181-185
- Salehi, H., and Burgueño, R. (2018), "Emerging artificial intelligence methods in structural engineering," Eng Struct, Vol. 171, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.05.084>
- Sofi, A., Regita, J. J., Rane, B., and Lau, H. H. (2022), "Structural health monitoring using wireless smart sensor network - An overview," Mech Syst Signal Process, Vol. 163, p. 108113, <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2021.108113>
- Morgantini, M., Betti, R., and Balsamo, L. (2021), "Structural damage assessment through features in quefreny domain," Mech Syst Signal Process, Vol. 147, p. 107017, <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2020.107017>
- Rizzo, P., and Milazzo, A., Eds. (2021), European Workshop on Structural Health Monitoring, Vol. 128, Springer International Publishing, Cham, <https://doi.org/10.1007/978-3-030-64908-1>
- Sahin, M., and Shenoi, R. A. (2003), "Quantification and localisation of damage in beam-like structures by using artificial neural networks with experimental validation," Eng Struct, Vol. 25, No. 14, pp. 1785-1802, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2003.08.001>
- Gu, J., Gul, M., and Wu, X. (2017), "Damage detection under varying temperature using artificial neural networks," Struct Control Health Monit., Vol. 24, No. 11, p. e1998, <https://doi.org/10.1002/stc.1998>
- Yaseen, S. A., Aziz, O. Q., and Bakar, B. H. A. (2017), "Prediction of Shear Strength of Ultra High Performance Reinforced Concrete Deep Beams without Stirrups by Neural Network," Eurasian Journal of Science and Engineering, Vol. 3, No. 1, <https://doi.org/10.23918/eajse.v3i1s1p142>
- Malekloo, A., Ozer, E., AlHamaydeh, M., and Girolami, M. (2022), "Machine learning and structural health monitoring overview with emerging technology and high-dimensional data source highlights," Struct Health Monit, Vol. 21, No. 4, pp. 1906-1955, <https://doi.org/10.1177/14759217211036880>
- Flah, M., Nunez, I., Chaabene, W. B., and Nehdi, M. L. (2021), "Machine Learning Algorithms in Civil Structural Health Monitoring: A Systematic Review," Archives of Computational Methods in Engineering, Vol. 28, No. 4, pp. 2621-2643, <https://doi.org/10.1007/s11831-020-09471-9>
- Kurian, B., and Liyanapathirana, R. (2020), "Machine Learning Techniques for Structural Health Monitoring," in Lecture Notes in Mechanical Engineering, Springer, pp. 3-24, https://doi.org/10.1007/978-981-13-8331-1_1
- Géron, A. (2018), Hands-On Machine Learning with Scikit-Learn, Keras & TensorFlow, O'Reilly Media.
- Chollet, F. (2018), Deep Learning with Python, Manning Publications.
- Orosz, A. és társai (1990), „Az M0 autótű Soroksári Duna-ág hídja modernizálásának próbaterhelése,” tanszéki jelentés, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Vasbetonszerkezetek Tanszék, Budapest.

Asseel Al-Hijazeen (1994) okleveles építőmérnök, a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem (BME) hallgatója. Jelenleg PhD tanulmányait folytatja a BME Hidak és Szerkezetek Tanszékén. Kutatási területei: hidak intelligens monitoringja, a digitális iker és a gépi tanulás alapú megoldások, valamint a hidak károsodási folyamatainak automatizált azonosítási módszereinek felhasználásával. Tagja a *fib* Magyar Tagozatának és a Jordán Mérnökök Szövetségének.

Dr. Koris Kálmán (1970) okleveles építőmérnök, 1993-ban végzett a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Építőmérnöki Karán, PhD, Egyetemi docens a BME Hidak és Szerkezetek Tanszékén. Kutatási területek: vasbeton szerkezeti elemek megbízhatóságának vizsgálata, előregyártott, előfeszített vasbeton szerkezetek analízise, szerkezetek megerősítése, faszerkezetek analízise, numerikus modellezése. Tagja a *fib* Magyar Tagozatának. A Magyar Tudományos Akadémia köztestületének tagja. A Magyar Mérnöki Kamara, és az MMK Építési Tagozat elnökségének tagja. A *fib* Magyar Tagozata által kiadott Vasbetonépítés és Concrete Structures szakmai folyóiratok szerkesztője.

RIGID INCLUSIONS ALTALAJJAVÍTÁS TERVEZÉSE ÉS MODELLEZÉSE



Lődör Kristóf – Dr. Móczár Balázs

<https://doi.org/10.32969/VB.2024.4.3>

Az elmúlt évtizedekben a fejlődő és szerteágazó kivitelezői technológiáknak köszönhetően a talajjavítási eljárások versenyképes és gazdaságos alternatívát nyújtanak a hagyományos mélyalapozásokhoz képest az altalaj teherbírásának növelésére, ezzel együtt képesek hatékonyan csökkenteni a szerkezetek alakváltozásait. Magyarországon az egyik legelterjedtebb altalajerősítési mód a rigid inclusions altalajjavítás, amelynek vizsgálata a rendszert alkotó szerkezeti elemek összetett viselkedése miatt nagy kihívást jelent a tervező mérnökök számára. Nincs kiforrott, egyszerűsített méretezési eljárás, így szinte minden esetben célszerű térbeli véges elemes modellezést készíteni az alakváltozások pontos meghatározásának érdekében, ugyanis a legtöbbek által alkalmazott egyszerűsített numerikus modellezésekkel, vagy analitikus számítási módszerekkel nem érhető el gazdaságos tervezés. Az alapozási rendszer komplex viselkedése ellenére megfelelően felállított talajfizikai modellparaméterekkel és szerkezeti modellgeometriával térbeli szimulációk segítségével lekövethetők annak alakváltozásai és igénybevételei.

KULCSSZAVAK: rigid inclusions, cella modell, térbeli modell, Plaxis 3D, back analízis

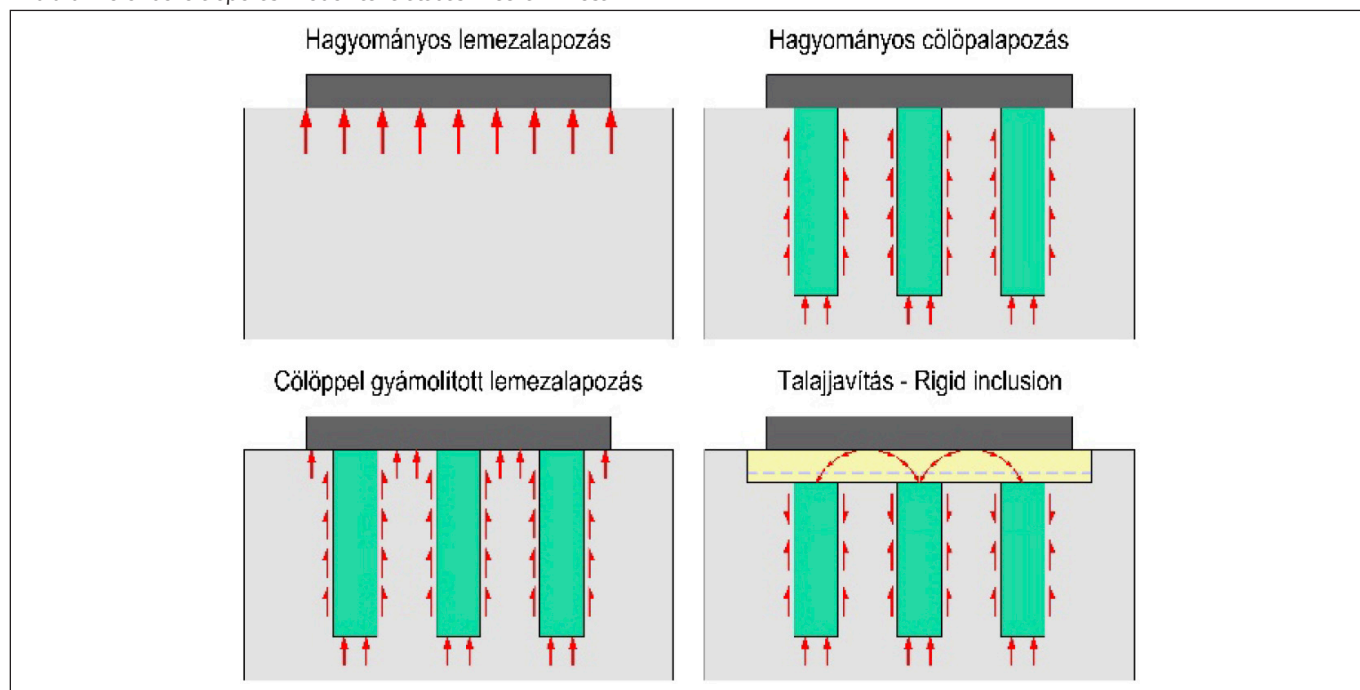
1. BEVEZETÉS

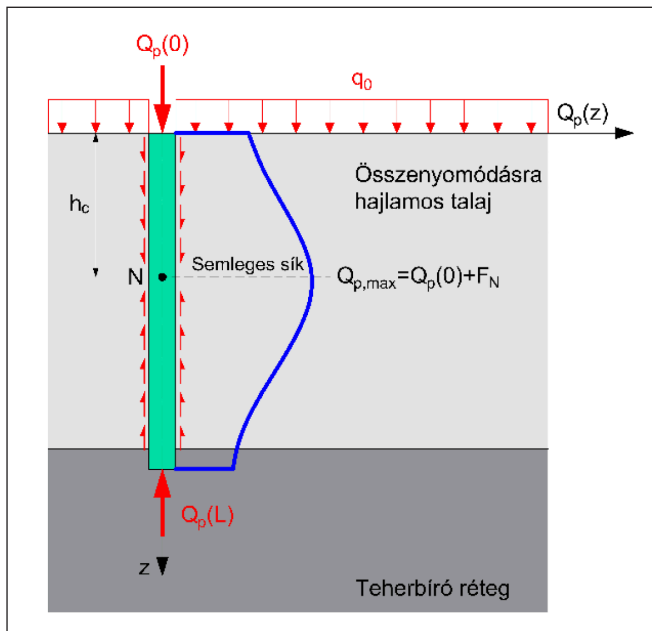
A 2000-es évek elejétől egyre gyakrabban merült fel a tervezési folyamatoknál a költségek optimalizációjának céljából, valamint a környezettudatosabb kivitelezés érdekében a különféle altalajjavítások alkalmazása. Ezt a trendet az urbanizáció felgyorsulása, valamint a geotechnikailag kedvező adottságú területek számának csökkenése tovább erősítette. Az utóbbi években számos olyan ipari és mezőgazdasági beruházásban sikerült részt vennünk, ahol műszakilag és gazdaságilag a rigid inclusions altalajerősítés bizonyult a

legkedvezőbb megoldásnak. Ezen projektek között számos tartály, siló, valamint nagy alapterületű kiterjedésű csarnok (ipari padló) volt. Rigid inclusions altalajjavítással mára már nagyszámú projekt valósult meg, de egy-egy esettanulmányt leszámítva a hazai tervezési és mozgásmérési tapasztalatokat összegző, átfogó publikáció eddig nem jelent meg.

A rendszer alakváltozásait 8-10 paraméter befolyásolja, így numerikus szimulációk során több körös (sok esetben hosszantartó) iterációt követően tudunk eljutni az optimális és gazdaságos altalajerősítési geometriához. Mindezek miatt a projektek kezdeti fázisában a tervezők analitikus számítási

1. ábra: Különböző alapozási módok teherátadási mechanizmusa





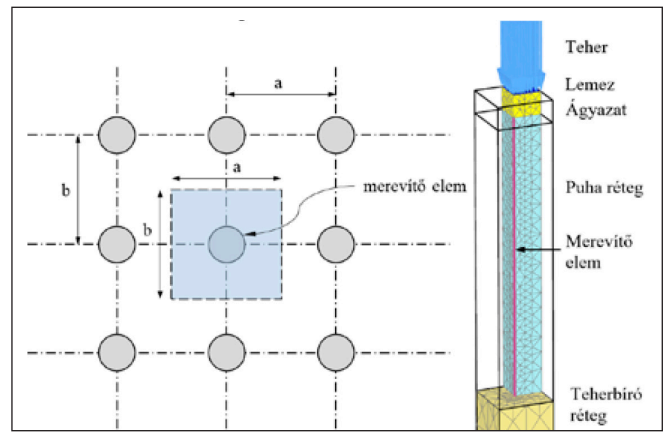
2. ábra: Merevítő elemen belüli normál igénybevétel eloszlás

módszereket, vagy leegyszerűsített véges elemes modelleket (egységcella modell) alkalmaznak a geometriai méretek becslésére adott talaj-és talajvízviszonyok, valamint terhelési intenzitások mellett. Azonban mint minden közelítő eljárásnak ezeknek is megvannak a maguk hátrányaik, buktatóik, amelyeknek esetenként jelentős negatív hatásuk tud lenni és gazdaságtalan túltervezéshez vezethetnek.

2. A RENDSZER ÁLTALÁNOS BE-MUTATÁSA

A valóságban ezt a technológiát a történelem során a korai években már több ízben is alkalmazták, elsősorban mocsaras, lápos területeken anélkül, hogy tudatában lettek volna a rendszer összetett mechanizmusáról. Eleinte fa cölöpöket juttattak az altalajba, majd a mocsaras területet homokos talajjal töltötték fel és arra építették az épületeket. Többnyire olyan építmények körében elterjedt, ahol a jelentős intenzitású teher nagy kiterjedésű felületen oszlik meg, valamint a süllyedéskülönbségekre a szerkezet érzékenyen reagál. A talajjavítás rendszer szintű alkalmazását Európában az 1970-es években kezdték el Svédországban és Finnországban, elsősorban útpálya töltések alatt (Rathmayer, 1975; Broms, 1979), majd később Skóciában és Németországban hidak háttöltése, valamint vasúti töltések alatt készítettek merev betételes talajerősítést. A talajjavítás hagyományos műtárgyak alatti alapozási célú alkalmazását Franciaországban Gigan (Gigan, 1975) nyomán kezdték el.

A rigid inclusions elemekkel gyámolított lemezalapozás alkalmazásának számos előnye van a hagyományos cölöppel gyámolított lemezalapozáshoz képest (Katzenbach és Choudhury, 2013), a különböző alapozási módszerek teherátadási módját a 1. ábra szemlélteti. Cölöppel gyámolított lemezalapozások esetében a cölöpökre közvetlenül átadódó függőleges-és vízszintes erők, valamint nyomaterkek azt eredményezik, hogy a cölöpöket erősítő vasalással kell ellátni a szerkezeti stabilitás megőrzésének érdekében. Rigid inclusions altalajjavításnál a cölöpök és az alaplemez között nincs közvetlen kapcsolat, a terhek az ágyazati rétegen keresztül továbbítódnak a betételekre, így azokban jellemzően csak normál igénybevétel ébred, vagy esetleg olyan minimális



3. ábra: Cella modell értelmezési tartománya és Plaxis 3D cella modell felépítése

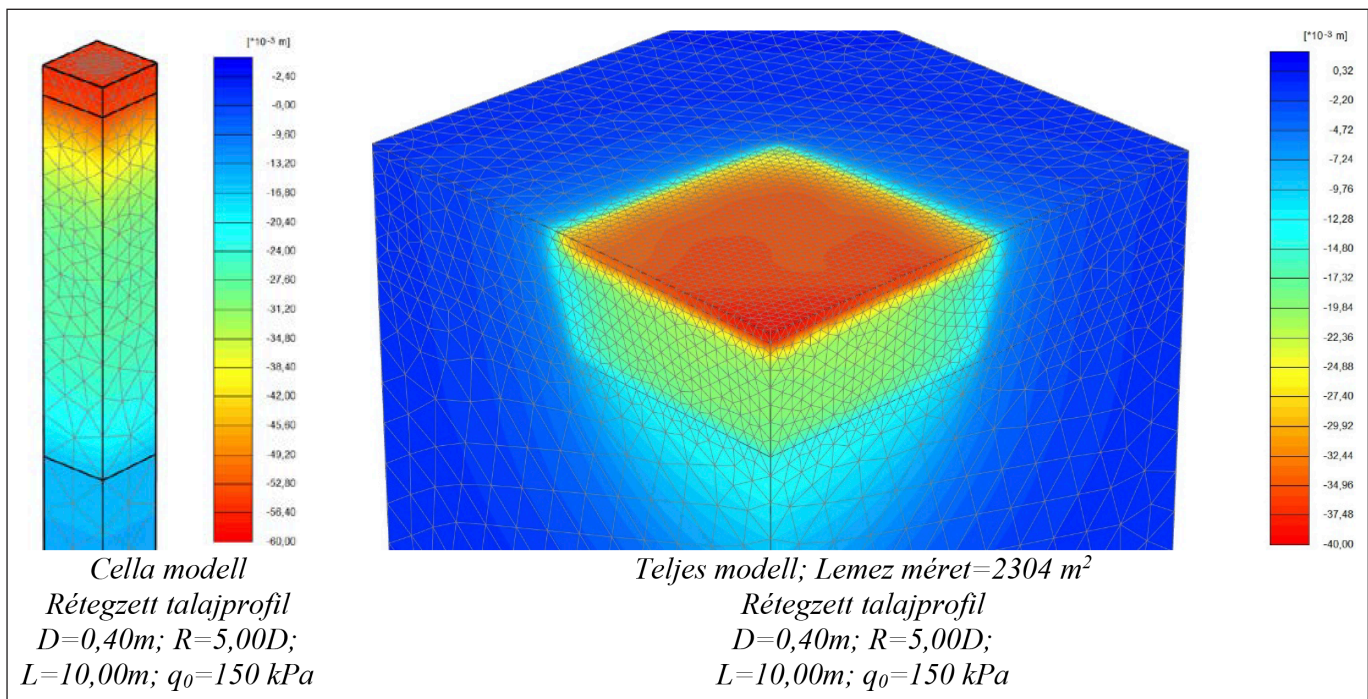
nyomaték és vízszintes teher, amelyet a keresztmetszeti méretének és anyagszilárdságának köszönhetően a cölöpök képesek felvenni (Varaksin és társai, 2016).

A szerkezeti (betét)elemek talp-és köpenymenti ellenállás segítségével ellensúlyozzák a felszerkezetről átadódó terhelést. A vasalatlan beton elemek felső részén az altalaj és a merevítő elemek relatív süllyedéskülönbségéből többletterhelés keletkezik negatív palástsúrlódás (Fellenius, 1984; ASIRI, 2012) formájában (2. ábra). A negatív köpenysúrlódás tulajdonképpen egy lefele ható súrlódás a merevítő elem palástja mentén, amely a szerkezeti elem körüli altalaj cölöphöz képesti nagyobb süllyedésének eredménye. Azt a mélységet, ahol a betételelem és a környező altalaj alakváltozása megegyezik semleges síknak nevezzük. A semleges sík fölött negatív köpenysúrlódás keletkezik, míg alatta pozitív, így a cölöpök felső részén a mélységgel lefelé haladva nő a normálerő egészen a semleges síkig, majd ezt követően a pozitív palástsúrlódásnak köszönhetően a betételelemek talpsíkjaig a normálerő folyamatosan csökken.

3. CELLA MODELL ÉS VALÓS MODELLEK KAPCSOLATÁNAK VIZSGÁLATA

Mind a hazai, mind a nemzetközi piacon egyre sűrűbben alkalmaznak térbeli 3D véges elemes szoftvereket a rigid inclusions altalajjavítás modellezése során, azonban ezekben az esetekben jellemzően nem a teljes, részletes geometriát építik fel a modelltérben belül, hanem csupán egy kiragadott részletet. Ezt a modellezési eljárást cella modellnek (ASIRI, 2012; Simon, 2012; Hor és társai, 2015) nevezik. A cella modellezésnél töltések, valamint egyenletesen megoszló terhelésű műtárgyak alatt alkalmazott rigid inclusions altalajjavításnál a szerkezetek középső tartományát vizsgálják. Kiragadva egy közbenső cölöpöt, a cölöpök tengelytávolságával megegyező modellméreten belül elemzik az alakváltozásokat, valamint a merevítő elemek erőjátékát (3. ábra). Az egységcella modellekkel a szerkezet max. süllyedési, illetve a cölöpökben ébredő max. normálerők határozhatók meg.

Kutatásaink során készítettünk egy vizsgálatsorozatot, amelynél elemeztük, hogy a cella modell valóban megbízhatóan alkalmazható-e egyenletesen megoszló terhelésű, nagyobb kiterjedésű lemezalapok alatt, valamint azt is, hogy milyen korlátai vannak ennek a fajta egyszerűsített modellezési technikának, mekkora alapterületű alaplemezek esetében tekinthető annak eredményei reprezentatívnak. A számításokat



4. ábra: Cella és teljes modell Plaxis 3D süllyedési ábrák

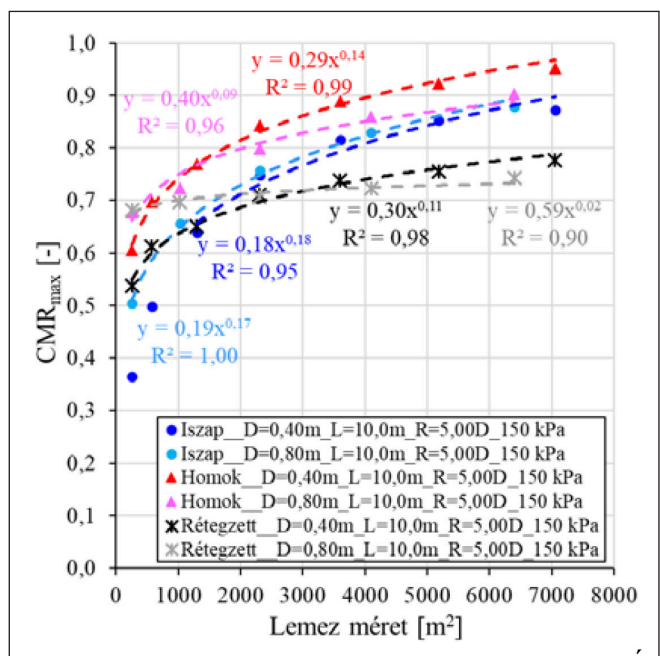
három különböző, a gyakorlatban jellemző réteprofilra végeztük el (valós helyszíni-és laboratóriumi vizsgálatok alapján), amelyek az alábbiak voltak (talajfizikai paramétereket az 1. táblázat tartalmazza):

- homogén, puha iszap/agyag réteg
- homogén, tömör homok réteg
- rétegzett talajprofil, ahol a terepszint alatt a cölöpök hosszával megegyező vastagságban puha iszap/agyag réteg van, ez alatt pedig tömör homok réteg (két réteg között jelentős merevségkülönbség van)

1. táblázat: Talajfizikai modellparaméterek – Cella modell

Paraméterek	Iszap/ Agyag	Tömör homok	Ágyazat (zúzottkő)
Anyagmodell	HSS	HSS	HSS
γ_{unsat} (kN/m ³)	19,0	17,0	20,0
γ_{sat} (kN/m ³)	20,0	19,0	20,0
$E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$ (MPa)	5	17	70
E_{50}^{ef} (MPa)	5	17	70
$E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ (MPa)	15	51	210
m (-)	0,9	0,5	0,5
φ° (°)	30	32	40
c'_{ref} (kPa)	20	7	5
$\gamma_{0,7}$ (-)	$2,010^{-4}$	210^{-4}	210^{-4}
G_0^{ref} (MPa)	75	50	131.25
R_{inter} (-)	0,9	0,67	0,67

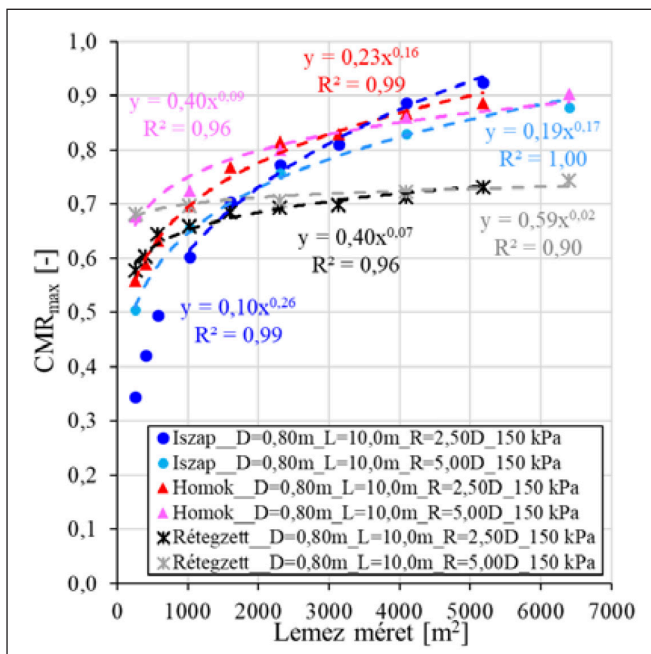
A modellekben a CFA technológiájú beton merevítő elemek $D=0,40\div 0,80m$ átmérőjük és $L=10,00\div 15,00m$ hosszúságúak voltak, míg tengelytávolságuk $a=b=2,50\cdot D=1,00\div 2,00m$ és $a=b=5,00\cdot D=2,00\div 4,00m$ volt. A teherközvetítő ágyazati réteg $h=0,80m$, míg a vasbeton alaplemez vastagsága $v=0,30m$. Az alaplemez felső síkján egyenletesen megoszló $q_0=50\div 150\div 250\text{ kN/m}^2$ terhelést definiáltunk. A vázolt geometriák mellett első lépésként felépítettük a $2,50\cdot D$ és $5,00\cdot D$ tengelytávolságokra vonatkozó cella modelleket, majd különböző, egyre növekvő négyzetes alapterületű alaplemezeket (vizsgált intervallum: 2567056 m^2). Az eredmények kiértékelésénél az alaplemezek



5. ábra: CMR_{max} a lemez méret függvényében – Átmérő (D) hatásának vizsgálata

süllyedéseit hasonlítottuk össze úgy, hogy meghatároztuk a különböző méretű alaplemezek maximális ($u_{z,i,\text{max}}$) elmozdulásait, majd ezeket leosztottuk a cella modellben kapott eredményekkel ($u_{z,\text{cell,max}}$). Ha a hányados értéke ($u_{z,i,\text{max}}/u_{z,\text{cell,max}}$) 1,00, akkor azt mondhatjuk, hogy a cella modellel végzett süllyedésszámítás kompromisszumok nélkül kiterjeszhető nagyobb méretű alaplemezekre is. A süllyedési arányokra bevezettünk egy kifejezést, amelynek az elnevezése Cella Modell Ratio ($CMR_{\text{max}} = u_{z,i,\text{max}}/u_{z,\text{cell,max}}$).

Az eredményeket kiértékelve azt tapasztaltuk, hogy növekvő alaplemez méretek hatására a modellek alakváltozási arányai folyamatosan emelkedő tendenciát mutatnak, a cella és a valós modell alakváltozási eredményei közelítik egymást. Ennek elsődleges oka az alaplemez alaprajzi méretéből fakadó növekvő határmélység (összenyomódó talajzónának a vastagsága). Az egyes fázisokhoz tartozó számítási eredményekre illesztett

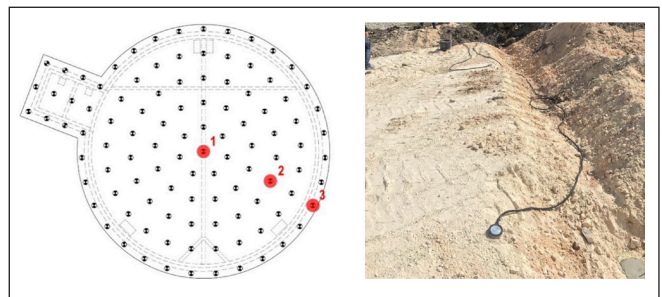


6. ábra: CMR_{max} a lemez méret függvényében – Raszterávolság (R) hatásának vizsgálata

görbék hatványfüggvények segítségével jól leírhatók, jellemezhetők (a determinisztikus együttható $R^2=0,90\div 1,00$ közötti). Az 5. ábra alapján homogén iszap, agyag talaj mellett az átmérő módosításának minimális hatása van az eredményekre, a görbék egymáshoz közel futnak, míg nagyobb merevségű homogén homok és rétegzett talajkörnyezetnél kisebb átmérővel hamarabb érhető el a $CMR_{max}=1,00$ küszöbérték. A betételek tengelytávolságának hatását bemutató 6. ábrán alacsonyabb alaplemez mérettartományban az $R=5,00\cdot D$ raszterávolságú görbék az $R=2,50\cdot D$ görbék felett futnak, majd ez a trend megfordul és végül minden esetben a kisebb raszterávolságokkal érhető el leghamarabb az egyezőség a cella modellel.

Tartályok, silók esetében, ahol az az alapterület jellemzően kb. 250-3000 m^2 között van, a kísérletsorozat során egyik esetben sem értük el, vagy közelítettük meg a cella modellekkel számított deformációkat. A 2501500 m^2 közötti tartományban a cella modellhez képest talajkörnyezet függvényében homogén, puha talajprofilnál 33-71%, homogén, teherbíró homok talajnál 51-81%, míg rétegzett talajkörnyezet esetében 51-79% az abszolút, maximális süllyedések aránya. Még a Magyarországon egyedinek, speciálisnak mondható Kaposvári Cukor Zrt. területén rigid inclusions altalajjavítással megvalósult közel 2800-2900 m^2 alapterületű cukorsilónál is - ahol heterogén, rétegzett talajkörnyezet van - cella modellezéssel megközelítőleg 25-30 %-al nagyobb alakváltozásokat kapnánk eredményül.

A vizsgálati intervallumban (max. 7000 m^2 -es alapterületig) egyenletesen megoszló terhelés mellett a cella modellezés nem alkalmazható megbízhatóan, az minden esetben túlzó süllyedésekhez és a rigid inclusions altalajjavítási rendszer túltervezéséhez vezet, ami miatt sok esetben ez a talajjavítási módszer gazdaságossági okok miatt nem lesz versenyképes az egyéb alapozási, vagy talajerősítési rendszerekkel. A szimulációkban alkalmazott szerkezeti geometria és terhelés mellett homogén iszap, agyagnál kb. 700017500 m^2 , homogén homoknál kb. 620035800 m^2 , míg rétegzett talajközeg mellett csak irreálisan nagy, >56000 m^2 alapterületű alaplemezek esetében érhető el a $CMR_{max}=1,00$ küszöbérték. Ezek alapján kijelenthető, hogy rétegzett altalajprofil (cölöpök palástja



7. ábra: Boldog, Szennyvíztisztító telep – Feszültségmérő cellák helyszíni beépítése és alaprajzi elhelyezkedése

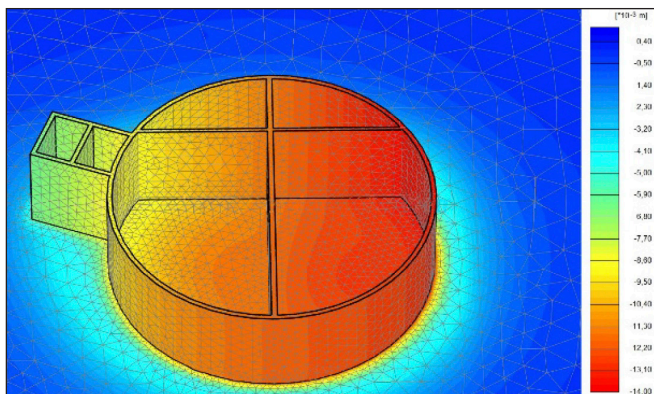
mentén puha, a talp alatt merev talaj) mellett a cella modell alkalmazása nem javasolt.

4. HELYSZÍNI MÉRÉSI EREDMÉNYEK VS. VÉGES ELEMES MODELLELVIZSGÁLATOK

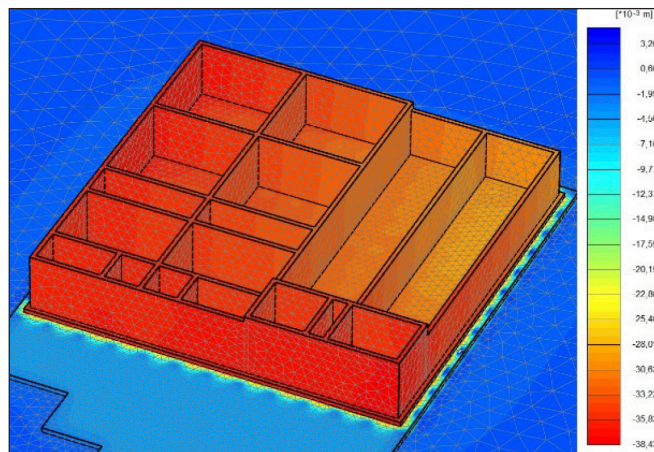
Magyarországi nagyobb, elsősorban ipari csarnokberuházásoknál a megnövekvő tárolási igényeknek-és terheléseknek, valamint a folyamatosan szigorodó süllyedési kritériumoknak köszönhetően számos projekt esetében sikeresen alkalmaztak merev betételemes altalajjavítást az ipari padlók alakváltozásainak csökkentése érdekében. Ezeknél a projekteknél sajnos az utólagos back-analízis vizsgálat nagyon nehézkes, mivel a terhelés polcrendszerek esetében pontszerű, a tárolás, raktározás pontos üteme a legtöbb esetben nem ismert, valamint az alakváltozások helyszíni mérésére limitáltan van csak lehetőség.

A szakmai tervezői és kutatói pályafutásunk során lehetőségünk volt magyarországi, rigid inclusions altalajjavítási technológiával megvalósult műtárgyak tervezésében, helyszíni monitoring méréseiben, valamint back-analízis vizsgálatában részt vennünk. Az egyik ilyen helyszín a Boldogi Szennyvíztisztító telep, ahol a 2019-ben megvalósult biológiai műtárgynál (18,30m átmérőjű kör alapterületű, tárolt anyag terhe: 55 kN/m^2) 3 darab merevítő elem (7. ábra) felső síkjára telepítettünk feszültségmérő cellákat (saját forrásból kutatási céllal), valamint mértük a szerkezet mozgásait. Rigid inclusions altalajjavítás esetében ez a fajta helyszíni monitoring mérés Magyarországon eddig egyedülálló, korábban ilyen fajta mérési eljárás nem készült, továbbá nemzetközi szinten is csupán néhány lelhető fel nyilvánosan. A másik beruházás, a Zsámbéki Szennyvíztisztító telepen 2021-ben megvalósult biológiai műtárgy (34,50x35,20m téglalap alapterületű, tárolt anyag terhe: 55 kN/m^2), ahol beruházói döntésre a szerkezet vízpróbája során mérték annak mozgásait. Mind két esetben a talajvizsgálati jelentésben és műtárgyak alapozásának tervezésében résztvettünk, így a projekteket a kezdeti fázistól kezdve nyomon tudtuk követni. A tervezés során a műtárgyak süllyedéseinek modellezésére készült síkbeli Plaxis 2D (kezdeti fázis) és térbeli Plaxis 3D (kiviteli tervi fázis) modell, amelyek eredményeit az utólagos mozgásmérésekkel össze tudtuk hasonlítani és elemezni tudtuk a modellek pontosságát.

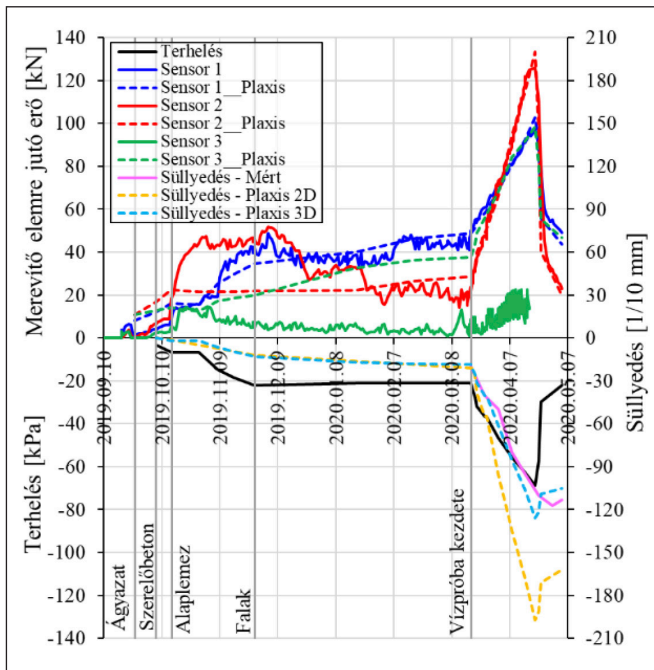
A 8. ábrán a boldogi biológiai műtárgy Plaxis 3D süllyedési ábrája látható teljesen feltöltött állapotban (2020.04.22.), míg a 9. ábrán a helyszíni monitoring mérési eredmények és a véges elemes modellezések alakváltozás és cölöp felső síkján ébredő normálerő görbék összehasonlítását ábrázoltuk. Megfigyelhető, hogy 3. szenzor feltételezhetően a kivitelezés során megsérült, vagy esetleg elmozdult, ezért a teljes mérés időtartamán



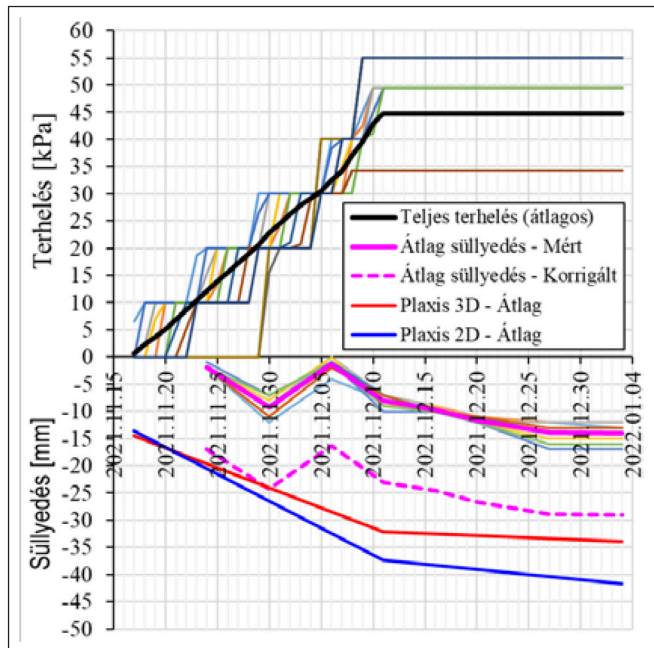
8. ábra: Plaxis 3D süllyedési ábra – Boldog, teljesen feltöltött állapot



10. ábra: Plaxis 3D süllyedési ábra – Zsámbék, teljesen feltöltött állapot



9. ábra: Helyszíni mérések és véges elemes számítási eredmények összehasonlítás - Boldog, Biológiai műtárgy



11. ábra: Helyszíni mérések és véges elemes számítási eredmények összehasonlítás - Zsámbék, Biológiai műtárgy

rossz eredményeket közölt. A szerkezet kivitelezése alatt a mért-és a számított görbék kissé eltérnek egymástól, amely különbségek a beton zsugorodásából, az ismeretlen kivitelezési körülményekből, és esetleges anyagtarolásokból adódnak. Ezen eltérések a falak kivitelezésének végeztével folyamatosan csökkentek és a vízpróba kezdetére már közel azonos értéket mutattak a mért és számított eredmények. Látható, hogy a vízpróba során a betöltött víz hatására a terhelés folyamatosan, egyenletesen nő, amelynek hatására a beton merevítő elemek felső síkján is növekszik a normálerő. A vízpróba teljes időtartama alatt a mért és modellezett eredmények szorosan egymás mellett futnak, ami az alapozási rendszer és a tervezés, modellezés helyességét igazolja.

A zsámbéki műtárgynál csak helyszíni süllyedésmérés történt, azonban ennél is látható a 11. ábrán, hogy térbeli Plaxis 3D véges elemes modellezéssel a szerkezet tényleges mozgása jól szimulálható, a mért és számított süllyedési görbék között minimális az eltérés.

A helyszíneken a műtárgyak mozgásait geodéziai mérésekkel rögzítették, azonban mind a két esetben a süllyedéseket a szerkezetek megépítését követően kezdték el mérni, azaz a kivitelezésből, a szerkezet önsúlyából származó alakváltozásokat ezen deformációs értékek nem tartalmazták. Így amikor a véges elemes szimulációk eredményeit összehasonlítottam a monitoring mérésekével, akkor a helyszíni mozgásvizsgálatokkal előállított süllyedésgörbét eltoltam

(„korrigáltam”) azzal az értékkel, amekkor alakváltozás a Plaxisban adódott a szerkezetépítést követő fázisban.

A véges elemes modellezéssel előállított süllyedési eredményekről összességében elmondható, hogy azok térbeli szimulációk esetében nagyon jól közelítik a helyszíni monitoring méréseket, úgy, hogy az egyes altalajrétegek input paraméterein utólagosan nem változtattunk, manipuláltunk. Azok minden esetben a talajvizsgálati jelentésben megadott talajfizikai jellemzők, valamint a laboratóriumi mérések és helyszíni szeizmikus-és statikus nyomószondázások adatait feldolgozva lettek definiálva.

A szerkezetek két-és háromdimenziós süllyedésmodellezésénél jelentős eltéréseket kaptunk. A kétdimenziós modellezések során minden esetben jelentősen nagyobbak voltak az alakváltozások, mint amit térbeli modellezésnél, valamint a helyszíni méréseknél tapasztaltunk. Ennek legfőbb oka 2D tengelyszimmetrikus modellezésnél, hogy a cölöpök pontos geometriája (átmérő, keresztmetszeti terület és palást felület), kiosztása nehezen parametrizálható, míg 2D síkbeli (plain strain) modellezésnél az alaplemez valós alaprajzi mérete nem definiálható a modellterén belül. Annak síkra merőleges méretét végtelennek értelmezi a szoftver, így a határmélység jóval mélyebb lesz, ami mindenképpen az alakváltozások - reálishoz képesti - növekedését eredményezi.

A kétdimenziós modellezés további hátránya, hogy a komplex geometriájú, több medencetérrel rendelkező tartályoknál a falak tényleges, valós merevítő hatása nehezen vehető figyelembe. Az alaplemezen belüli, medencetereként változó terhelések csupán korlátozottan határozhatók meg helyettesítő terhelés formájában, így az egyenlőtlen süllyedések értelmezése limitált.

5. MEGÁLLAPÍTÁSOK

A cikkben bemutatott közelítő véges elemes cella modellezés során megfigyelhető volt, hogy ezzel az egyszerűsített modellezési technikával jellemzően túlbecsüljük a tervezett rigid inclusions általajjavítási rendszer maximális mozgásait, így a tervezés nem gazdaságos. Célszerű a vizsgált tartományba eső alaplemezeket a tényleges méretükkel figyelembe venni már az előtervezések során is. A kísérletsorozatban alkalmazott szerkezeti geometria és terhelés mellett homogén iszap, agyagnál kb. 7000-17500 m², homogén homoknál kb. 6200-35800 m², míg rétegzett talajközeg mellett csak irreálisan nagy, >56000 m² alapterületű alaplemezek esetében érhető el a $CMR_{max}=1,00$ küszöbérték. Ezek alapján kijelenthető, hogy rétegzett talajkörnyezet mellett a cella modell alkalmazása nem javasolt.

Magyarországon, rigid inclusions általajjavítással két különböző helyszínen megvalósult szennyvíztisztító medencéknél végzett helyszíni monitoring mérési eredményeket összehasonlítva a numerikus számításokkal azt tapasztaltuk, hogy helyes talajmodell, talajfizikai jellemzők és modellgeometria felvételével térbeli szimulációkkal a mért és számított értékek közötti különbség minimális. A szerkezetek két-és háromdimenziós süllyedésmodellezésénél jelentős eltéréseket kaptunk, amelyek alapján a pontos és gazdaságos tervezés érdekében javasolt minden esetben térbeli geotechnikai véges elemes süllyedésanalízist készíteni.

6. HIVATKOZÁSOK

- ASIRI National Project, IREX, (2012), „Recommendations for the design, construction and control of rigid inclusions ground improvements.” *Paris: Press des Pontos*.
- Broms, B., B., (1979), „Problems and solutions to construction in soft clay” *Proceeding, 6th Asian regional conference on soil mechanics and foundation engineering*. vol. 2, pp. 28-30. Singapore.
- Fellenius, B., H., (1984), „Negative skin friction and settlement of piles.” *Second International Seminar, Pile Foundations*, Nanyang Technological Institute, Singapore, 28-30 November 1984.
- Gigan, J., P., (1975), „Consolidation d'un sol de fondation par pilotes” *Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées*. no. 78, pp. 12-16.

- Hor, B., Song, M.-J., Jung, M.-H., Song, Y.-H. & Park, Y.-H., (2015), „A 3D FEM analysis on the performance of disconnected piled raft foundation.” *Japanese Geotechnical Society Special Publication*. vol. 2: 1238-1243.
- Katzenbach, R., Choudhury, D., (2013), „ISSMGE Pile-Raft Foundation Guideline.” *Technische Universität Darmstadt. Institute and Laboratory of Geotechnics*. Darmstadt. Germany. July 2013
- Rathmayer, H., (1975), „Piled embankment supported by single pile caps” *Proceeding, Istanbul conference on soil mechanics and foundation engineering*.
- Simon, B., (2012), „General report S5 - Rigid inclusions and stone columns.” *ISSMGE – TC 211 International Symposium on Ground Improvement IS-GI*, Brussels, May 31st and June 1st, 2012.
- Varaksin, S., Hamidi, B., Huybrechts, N. Denies, N., (2016), „Ground Improvement vs. Pile Foundations?” *ISSMGE-ETC 3 International Symposium on Design of Piles in Europe*, Leuven, Belgium, 28-29 April, 1-48.

Dr. Móczár Balázs (1971) okl. építőmérnök, okl. igazságügyi szakmérnök, PhD, egyetemi docens, a BME Geotechnika és Mérnökgeológia Tanszék oktatója. Fő érdeklődési területei: talaj és szerkezet kölcsönhatása, sík- és mélyalapozások, mély munkagödörök, talajjavítások. Az MMK Geotechnikai Tagozat elnöke. Az ISSMGE és a Magyar Geotechnikai Egyesület tagja.

Lődör Kristóf (1990) okl. építőmérnök (MSc), a Strabag Építőipari Zrt. geotechnikai tervezője és a BME Geotechnika és Mérnökgeológia Tanszék oktatója. Fő érdeklődési területei: a speciális mélyépítés, mély munkagödörök, talaj és szerkezet kölcsönhatása, talajjavítások. Az ISSMGE és a Magyar Geotechnikai Egyesület tagja.

DESIGN AND MODELLING PROCESS OF RIGIDI INCLUSIONS GROUNDIMPROVEMENT

Kristóf Lődör - Balázs Móczár

Thanks to the evolving and diversifying construction technologies in the recent decades, ground improvement offers a competitive and economical alternative to traditional deep foundations for increasing the bearing capacity of the ground, while also being able to reduce the deformation of structures. In Hungary, one of the most commonly used ground improvement technologies is the rigid inclusions. The design of rigid inclusions is a challenging task for engineers because due to the complex behaviour of the structural elements of the system, there are no well-developed simplified methods for the design, and therefore it is always advisable to perform complex 3D finite element modelling to accurately determine its behaviour. The verification of the numerical simulations was aided by projects in Hungary, where rigid inclusions ground improvement was used to limit deformations under the designed structures and a variety of field measurements were carried out during construction and operation. Based on the results of these monitoring measurements, the models, structural geometries and geotechnical parameters were validated by numerical back-analysis and recommendations were made on how to define these in a finite element model.



BETONMIX

Szálerősítéses betonok

Tervezés

Betontechnológia

Szakértés

Diagnosztika

Ipari padlók

Térbetonok

Betonszerkezetek

Minőségbiztosítás

- Technológiai utasítás (TU), Mintavételi-és megfelelés-igazolási terv (MMT) készítése
- Kivitelezés közbeni helyszíni tanácsadás, szakértői felügyelet
- Javítási technológia kidolgozása

Szakértés

- Műszaki átadás-átvételkor műszaki megfelelés megállapítása
- Betontechnológiai hibák okainak meghatározása
- Helyszíni vizsgálatok roncsolással és roncsolás mentesen
- Georadar vizsgálatok
- Ráhatási felelősség megállapítása

+36 30 377 8629

BETONMIX@BETONMIX.HU

WWW.BETONMIX.HU

Teljeskörű vasbetontervezés

- Építési állapotok kezelése (új STG modul)
- Falak és lemezek vasalásának számítása
- Oszlop- és gerendavasalás
- Lemezek átszúródási és nyírási méretezése
- Pont- és sávalap méretezés, geotechnikai ellenőrzés
- Vasbeton falak és falmagok méretezése összetett igénybevételekre
- Vasbeton keresztmetszet feszültséganalízise
- Vasbeton gerendák és oszlopok tűzállósági méretezése
- Vasbeton lemezek és falak tűzállósági méretezése
- Utófeszített rúd- és felületszerkezetek modellezése
- Parametrikus tervezés támogatása (Rhino-Grasshopper, Revit-Dynamo)

axisvm.hu

fotó: MOL Campus, Dernovics Tamás/magyarepitok.hu ■ Néprajzi Múzeum, Palkó György/LIGET BUDAPEST

