

KUTATÁSI ZÁRÓJELENTÉS

A T46691 azonosító számú OTKA projekt eredményeiről

„Számítási modellek és diagnosztikai eljárások fejlesztése műemlék jellegű, falazott hídszerkezetek teherbírásának megállapítására és használhatósági követelményeinek ellenőrzésére”

A jelentést összeállította:

Orbán Zoltán
egyetemi adjunktus
szakmai koordinátor

Témavezető:

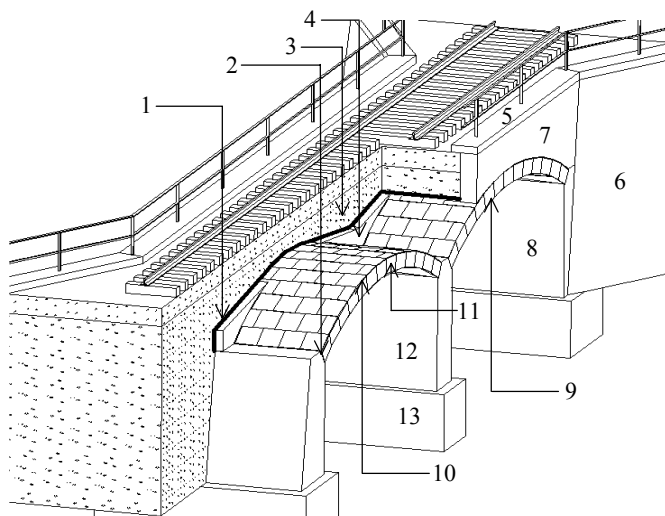
Prof. Lenkei Péter
professor emeritus
témavezető

Pécs, 2009. január 23.

1. A KUTATÁS TUDOMÁNYOS ELŐZMÉNYEI ÉS RÖVID ÖSSZEFOGLALÁSA

1.1 Bevezetés, a kutatás aktualitása

A téglá és kőanyagú boltozott hidak igen jelentős részét képezik a hídállománynak Európában és világszerte. A boltozatos hidak a hídállomány legrégebbi szerkezetei, amelyek közül még ma is több ezer forgalomban van, annak ellenére, hogy terhelési körülményeik az építésük óta eltelt időszakban drasztikus változásokon mentek keresztül. Felméréseink szerint Európában hozzávetőleg 200 ezer db téglá és kő boltozatú híd található a vasútvonalakon, a kisebb méretű áterezeket is beleértve. Mindez a teljes európai vasúti hídállomány kb. 50%-át jelenti (Orbán, 2004). A boltozott vasúti hidak legfontosabb szerkezeti elemeit és tipikus kialakítású boltozott hidakat mutatja be az 1. ábra.



1- vízszigetelés 2- boltváll 3- feltöltés 4- mögéfalazás 5- szegély 6- szárnyfal 7- homlokfal
8- hídfő, ellenfal 9- intrados 10- extrados 11- boltozati kő 12- pillér 13- alap

1. ábra. Boltozott vasúti hidak szerkezeti felépítése. Tipikus kialakítású boltozott hidak.

A boltozott hidak tervezése tapasztalati összefüggések alapján történt az építés időszakában forgalomban lévő vasúti járművek által képviselt terheknek megfelelően. Míg a 19. század végén és az 1900-as évek elején létesített hidak építésének időszakában általában 10-12 tonna (100-120 kN) tengelyterhű mozdonyok voltak a mértékadóak, addig jelenleg a legtöbb magyarországi boltozott hídra 21 tonna (210 kN) tengelyteher a megengedett, amely a tervek szerint a hamarosan 22,5 tonnára növekszik. Néhány európai vasúttársaság esetében ugyanakkor a megengedett tengelyteher a meglévő vonalakon a 30 tonnát (300 kN) is elérheti a közeljövőben, ami így az építéskori megengedett tengelyterheknek akár a háromszorosát is jelentheti. A jármű sebességek és így a dinamikus hatások vonatkozásában is legalább ilyen mértékű növekedés következett be és várható a jövőben is.

Hozzávetőleg 150 éves használati tapasztalat szerint a terhelési körülmények megváltozása (ez alatt elsősorban a tengelyterhek és a járműsebességek növekedését értjük) általában a hidak állapotromlásának felgyorsulását vonja maga után.

A megnövekedett igénybevételek és azok várható további növekedése így a következő aggályokat és kérdéseket vetik fel a boltozatos hidak jövőjével kapcsolatban:

- Mekkora a boltozott hidak biztonsága a mostani igénybevételekkel szemben, figyelembe véve a jelenlegi műszaki állapotukat?

- Ellenállnak-e majd a jövőbeni igénybevételeknek, azaz a növekvő tengelyterheknek és járműsebességek növekedéséből származó hatásoknak?
- Mekkora a várható élettartamuk a változó hatások és azok következtében várható gyorsuló állapotromlás figyelembe vételével?
- Gazdaságos lehet-e a boltozott hidak további hosszú távú üzemeltetése?

Az előbbi kérdések megválaszolása és a problémakör megoldása az európai hídgazdálkodás egyik legnagyobb gazdasági jelentőséggel bíró feladata. Reményeink szerint kutatásunk ehhez hasznos és a gyakorlatban alkalmazható segítséget nyújt majd.

1.2 Tudományos előzmények

A vasúti forgalom biztonsága és a nemzetközi vasúti hálózat kölcsönös átjárhatóságának elősegítése szempontjából kiemelkedő jelentősége van annak, hogy a régi, boltozott kialakítású hidak megfelelőségét egy egységesített rendszer szerint ellenőrizzük. Mindez a gyakorlatban is hatékonyan alkalmazható számítási módszereket igényel a szerkezetek terhelés alatti viselkedésének modellezésére és teherbírásuk meghatározására.

A jelenleg nemzetközileg legáltalánosabban használt közelítő számítási eljárás a tapasztalati összefüggésekre épülő MEXE módszer (*UIC Code, 1994*). A módszer legnagyobb hátránya, hogy csak erősen idealizált feltevések mellett használható.

A számítási kapacitás rohamos növekedésével egyre nagyobb lehetőségek mutatkoznak a numerikus szerkezet modellezési eljárások alkalmazásában. A gyakorlatban hatékonyan alkalmazott egyszerű módszerek között meg kell említeni a képlékenységtan határállapot-vizsgálatán alapuló „támaszvonala-eljárás”-t (*Harvey, 1988*) valamint a „merev-blokk módszer”-t (*Heyman, 1982; Gilbert és Melbourne, 1994*).

A boltozott hidak modellezése igen összetett feladat. Az alkalmazott számítási modellnek alkalmasnak kell lennie többek között az alkotóanyagok nemlineáris feszültség-alakváltozás jellemzőinek figyelembe vételére, a blokkok közötti súrlódásos-jellegű kapcsolatok leírására, megfelelő talajmodell alkalmazására, illetve a szerkezet-háttöltés kölcsönhatásának vizsgálatára. Mivel a boltozott hidak alkotóanyagai (kő, tégl, beton) húzószilárdsággal csak igen korlátozott mértékben rendelkeznek, így az ilyen anyagból felépített szerkezetekben folytonossági hiányok (repedések) alakulhatnak ki. Az előbb említett nemlineáris hatásokat és folytonossági hiányokat csak erre alkalmas szoftverek és speciális anyagmodellek alkalmazásával lehet kezelni.

Falazott szerkezetek modellezésére az utóbbi időben a végeselemes számítási eljárások mellett egyre inkább tér hódít a diszkrét elemek módszerének alkalmazása. A diszkrét elemek módszere a nem-folytonos mikroszintű modellezés egy lehetséges módja. A módszer előnye a végeselemes számítási eljárásokhoz képest, hogy a szerkezeti folytonosság megszűnése – pl. repedések képződése által – nem okoz konvergencia problémákat. A diszkrét elemek közötti kapcsolat, viszonylag egyszerűen adható meg, úgynevezett kontakt paraméterekkel. Mindez lehetővé teszi a különböző jellemzőkkel bíró szerkezeti részek egymásra hatásának, vagy akár elválásának modellezhetőségét (*Tóth, Orbán, Bagi, 2009*).

A boltozott hidak környezetükkel (háttöltés, feltöltés, altalaj, kapcsolódó szerkezeti elemek) kölcsönhatásban alakították ki teherviselő rendszerüket, amely rendszer egy jelentős része rejtve van a szokványos diagnosztikai eljárások előtt. Mivel ennek az eltakart résznek a tulajdonságai jelentős hatással vannak a boltozat szerkezeti viselkedésére, így a valóságos viselkedést reálisan közelítő modellezéshez nem lehet eltekinteni ezen „rejtett” jellemzők feltérképezésétől valamint a velük kapcsolatos bizonytalanságok diagnosztikai vizsgálatokkal történő csökkentésétől.

A szokványos roncsolásos diagnosztikai vizsgálatok mellett egyre inkább előtérbe kerülnek a roncsolásmentes vagy csak minimális roncsolással járó szerkezetdiagnosztikai módszerek. Számos kutatást végeztek világszerte a falazott szerkezetekre irányuló mérési módszerek megbízhatóságának növelése és az adatfeldolgozás tökéletesítése érdekében, viszont ez idáig nem készült olyan tanulmány, amely segítséget nyújtana boltozott hidak állapot értékeléséhez és

modellezéséhez szükséges paraméterek diagnosztikai módszerekkel történő célirányos meghatározásához.

Meglévő boltozott hidak megbízhatóságának értékelésére jelenleg nincs nemzetközileg elfogadott eljárás. A tervezési szabványok (köztük az EN 1990) a határállapotokon alapuló tervezés filozófiáját és a parciális biztonsági tényezők módszerét alkalmazza. Az ezekben foglalt megbízhatósági előírások lineáris számítást vesznek alapul és elsősorban csak szerkezeti elemekre vonatkoznak, nem pedig az egész szerkezetre. Az Eurocode szabványok némelyike (pl. EN 1992-1-1) azt is világosan megemlíti, hogy a parciális biztonsági tényezők módszere nem alkalmazható olyan szerkezetek vizsgálata esetén, amelyek nemlineáris számítást igényelnek. Mivel boltozott hidak teherbírás vizsgálata esetében általában ez a helyzet, ezért a parciális biztonsági tényezőkön alapuló módszer helyett inkább valószínűségelméleti eljárások alkalmazhatóak.

A teherbírás értékelése mellett a folyamatosan változó intenzitású forgalmi terhelés miatt a boltozott hidak használhatóságának ellenőrzése egyre növekvő jelentőséggel bír a hídgazdálkodás számára. A használhatóságot nem csupán a jelenlegi igénybevételek szintjén és a szerkezet jelenlegi állapota mellett kell értelmezni, hanem a jövőben várható igénybevételek és a becsült állapotromlás figyelembevételével egyaránt. Az utóbbi megközelítés a szerkezet várható használhatósági élettartamának megállapításához, valamint a beavatkozások optimális tervezéséhez nyújt elengedhetetlen segítséget.

Tégla,- és kőboltozatú hidak használhatósági határállapotára vonatkozóan jelenleg nem áll rendelkezésre széles körben elfogadott definíció, ezzel együtt a megfelelőséget definiáló kritériumrendszer sem. A jelenlegi előírások a használhatósági követelményeket a beton anyagú hidakhoz hasonlóan a szerkezetben ébredő nyomófeszültségek nagyságának, a repedések megnyílásának, valamint a szerkezet alakváltozásainak korlátozásában adják meg (*UIC Code 778-3R, 1994*). Az előbbi megközelítések egyike sem veszi azonban figyelembe azt a tényt, hogy a téglá,- illetve kő boltozatú hidak esetében a használhatóság szorosan összefügg a sokszor ismétlődő terhelés okozta állapotromlással, azaz a *fáradási tönkremenetellel* (*Roberts et. al. 2006; Melbourne et. al., 2007*). Boltozott hidak esetében a fáradási tönkremenetel, más szerkezet típusokkal (pl. vasbeton, vagy acél hidak) ellentétben, elsősorban nem teherbírás problémája ugyanis a törési mechanizmusok kialakulásához szükséges teherszintet csak kismértékben befolyásolja. A sokszor ismétlődő teher ellenben hatással van a falazóelemek közötti kapcsolatok erősségére és azok lokális leépülését eredményezheti. A jelenség előrehaladásával a szerkezet használhatósága korlátozódik.

2. A KUTATÁS CÉLJAI

A kutatás fő célkitűzése egy olyan *többlépcsős eljárás kidolgozása volt tipikus kialakítású boltozott hidak megfelelőségének megállapítására*, amely magában foglalja a teherbírás és a használhatóság értékelését, valamint segítséget nyújt a várható élettartam meghatározására.

Az eljárás fő alkotóelemeinek kidolgozásához az alábbi feladatok elvégzését tűztük ki célul:

- *Adatbázis létrehozása, statisztikai elemzések.*

A hazai és az európai boltozott hídállomány felmérése és statisztikai elemzése elengedhetetlen a kutatás jelentőségének és prioritásainak meghatározása szempontjából. A felmérés magában foglalja a boltozott hidak építésének bizonyos történeti, tervezési és építéstechnológiai kérdéseit, valamint a meglévő hídállomány nagyságára, szerkezeti kialakítására és jelenlegi műszaki állapotára vonatkozó adatokat.

- *A szerkezeti viselkedés elemzése.*

A szerkezet lehetséges tönkremeneteli mechanizmusainak, a meglévő károsodások okainak és esetleges következményeinek ismerete nélkülözhetetlen a szerkezet értékelése szempontjából. Kutatásunk célkitűzése tipikus kialakítású boltozott hidak szerkezeti viselkedésének elemzésére és teherbírásának meghatározására alkalmas számítási módszerek felkutatása illetve kifejlesztése, valamint ezekkel olyan numerikus vizsgálatok elvégzése, amelyek lehetőséget adnak a szerkezeti viselkedést befolyásoló paraméterek hatásainak elemzésére.

- *Eljárás fejlesztése boltozott vasúti hidak megbízhatóságának értékelésére.*
Célunk egy valószínűségelméleti módszeren alapuló egyszerűsített eljárás fejlesztése volt, amely lehetőséget nyújt a szerkezet adott károsodási szinthez tartozó megbízhatóságának megállapítására. Mivel meglévő hidak esetében jelenleg nem áll rendelkezésre megbízhatósági kritériumrendszer ezért ennek kidolgozása is a kutatás tárgyát képezte.
- *Eljárás fejlesztése boltozott vasúti hidak használhatóságának értékelésére.*
Boltozott vasúti hidak használhatóságának vizsgálatára eddig nem állt rendelkezésre széles körben elfogadott eljárás, ezzel együtt értékelési kritériumrendszer sem. Célunk egy olyan egyszerűsített számítási eljárás kidolgozása volt, amely lehetőséget ad a használhatóság ellenőrzésére a leggyakrabban előforduló tönkremeneteli típusok esetén, illetve meghatározza azt a használati teherszintet amely mellett még nem várható a boltozat progresszív módon előrehaladó tönkremenetele sokszor ismétlődő terhek hatására sem.
- *Eljárások fejlesztése boltozott vasúti hidak diagnosztikai vizsgálatára.*
Célunk olyan - elsősorban roncsolásmentes, vagy minimális roncsolással járó - vizsgálati módszerek felkutatása és hatékonyságának kísérleti vizsgálata, amelyek alkalmasak a szerkezeti viselkedést és teherbírást leginkább befolyásoló paraméterek megállapítására illetve bizonytalanságának csökkentésére. A kutatás eredményeként a módszereket az alkalmazás céljának megfelelően értékeljük, rendszerbe foglaljuk és alkalmazásukra gyakorlati útmutatást adunk.
- *Többlépcsős eljárás fejlesztése boltozott vasúti hidak megfelelőségének értékelésére.*
Célunk volt az előbb részletezett számítási és vizsgálati módszereket egy, a gyakorlatban közvetlenül alkalmazható rendszerbe foglalni és útmutatást adni felhasználásukra.

3. A KUTATÁS MÓDSZERE

A kutatás céljainak megvalósításához az alábbi vizsgálatokat végeztük el:

Adatbázis létrehozása, irodalomkutatás

A Nemzetközi Vasútegylet (UIC) Mérnöki Szerkezetek Szakértői Bizottságának tagjaihoz kérdőíveket juttattunk el, amelyben boltozott hidak számával, szerkezeti kialakításával, állapotával, valamint vizsgálati, számítási és felújítási eljárásaival kapcsolatos kérdéseket tettünk fel. A kérdőíveket 13 vasúttársaság töltötte ki saját adatbázisuk alapján, elsősorban azok, amelyek jelentős nagyságú boltozott hídállománnyal rendelkeznek. Ezek a következők: SNCF (Franciaország), DB (Németország), NR (Nagy-Britannia), RENFE (Spanyolország), REFER (Portugália), RFI (Olaszország), SBB (Svájc), ÖBB (Ausztria), JBV (Norvégia), BS (Dánia), CD (Csehország), PKP (Lengyelország), MÁV (Magyarország) A kérdőívekre kapott válaszokat feldolgoztuk és statisztikailag elemeztük.

Részletesen feldolgoztuk a kő-, és téglá anyagú boltozott hidak és hasonló szerkezetek történetével, tervezésével, építéstechnológiájával, teherbírási értékelésével és diagnosztikai vizsgálatával foglalkozó magyarországi és nemzetközi szakirodalmakat, előírásokat és kutatási jelentéseket.

Felkutattuk, rendszerbe foglaltuk és összehasonlítottuk a boltozatok vastagságára, valamint a hídfők és mederpillérek méreteinek meghatározása vonatkozó korabeli tervezési előírásokat.

MÁV (Magyar Államvasútak) tervtári adatok tanulmányozása valamint helyszíni felmérések alapján elemzést végeztünk a meglévő boltozott hidak számára, geometriai és állapot jellemzőire vonatkozóan. A felmérés célja a boltozatok jellemzőinek statisztikai elemzése és külföldi adatokkal valamint a korabeli tervezési előírásokkal való összehasonlítása.

Számítási eljárások feltérképezése és fejlesztése

Kutatásunk során összegyűjtöttük a gyakorlatban fellelhető boltozott híd számítási módszereket, ahol lehetett szoftverrel együtt. A módszereket rendszereztük és a gyakorlati

felhasználás különböző szempontjai szerint értékeltük. Az értékelés alapján meghatároztuk azokat a területeket, ahol további fejlesztésre van szükség.

Boltozatok szerkezeti viselkedésének leírására különböző végeselemes és diszkrét elemes modellek alkalmazhatóságát vizsgáltuk. A modellek felépítésénél figyelembe vettük a hídszerkezetek alkotó elemeinek speciális geometriai és mechanikai tulajdonságait ésszerű egyszerűsítéseket alkalmazva.

A boltozott hidak megbízhatóságának, használhatóságának és várható élettartamának meghatározására közelítő számítási módszereket fejlesztettünk ki. A számítási módszerek algoritmusát igyekeztünk úgy meghatározni, hogy lehetséges legyen a számítások bemenő paramétereinek szokványos vizsgálati módszerekkel történő meghatározása, a számítás pedig a gyakorlati alkalmazhatóság szempontjából egyszerű és gyors legyen.

Szerkezeti viselkedés elemzése, numerikus vizsgálatok

Érzékenységvizsgálatokat hajtottunk végre boltozott hidak szerkezeti viselkedését befolyásoló tényezők hatásainak elemzésére. A vizsgálatok során meghatároztuk azokat a geometriai és anyagi paramétereket, amelyek leginkább hatással vannak a szerkezetek teherbírására illetve feszültségeinek eloszlására. A teherbírással kapcsolatos paramétervizsgálatokat 'merev blokk' módszeren alapuló RING 2.0 szoftverrel, míg a terhelés alatti szerkezeti viselkedés elemzését és a feszültségek vizsgálatát a kifejlesztett diszkrét elemes modellen végeztük.

A teherviselést befolyásoló paraméterek bizonytalanságainak kezelésére valószínűségelméleti módszereket alkalmaztunk. Az elsőrendű valószínűségelméleti módszer (FORM) mellett, a szerkezeti viselkedés nemlineáris jellege miatt Monte-Carlo szimulációs módszert használtunk, egy alacsony mintaszámú vizsgálatra optimalizált Latin-Hypercube Sampling (LHS) eljárást követve.

Egy közelítő eljárással sztochasztikus érzékenység vizsgálatokat hajtottunk végre a teherbírást befolyásoló paraméterek hatásainak elemzésére. Számpéldákon keresztül meghatároztuk azokat a paramétereket amelyek a legnagyobb jelentőséggel bírnak boltozott hidak szerkezeti ellenállásának értékelése szempontjából.

Számpéldákon keresztül bemutattuk a boltozott hidak megbízhatóságának meghatározására kifejlesztett eljárások alkalmazását és igazoltuk, hogy az általunk javasolt egyszerűsített számítási módszerek biztonságos közelítést jelentenek.

Diszkrét-elemek módszerét alkalmazva többnyílású kőboltozatú hídmodellen vizsgáltuk a háttöltés talajmechanikai jellemzőinek hatását a boltozat feszültség-eloszlására és teherbírására. A használhatóság vizsgálatára kifejlesztett közelítő módszer segítségével egy tipikus geometriai kialakítású egynyílású téglá boltozatú hídmodellen vizsgáltuk, hogy a forgalmi terhelés hatására bekövetkező nyomófeszültség változások okozhatnak-e fáradási tönkremenetelt a boltozatban. A diszkrét elemes számításokat az OTKA 48906 projekt keretében a BME Tartószerkezetek Mechanikája Tanszék doktorandusza, Tóth Axel végezte Dr. Bagi Katalin témavezetésével. A modellek anyagi paramétereit a szakirodalomból vett mérési eredmények alapján kalibrálták.

Diagnosztikai eljárások fejlesztése és értékelése

Szakirodalmi adatokra támaszkodva felkutattuk azon vizsgálati módszerek körét, amelyek alkalmasak lehetnek boltozott hidak diagnosztikai vizsgálatára; elsősorban a szerkezeti viselkedést leíró geometriai és anyagi paraméterek meghatározására, valamint a szerkezet általános állapotának jellemzésére. A módszereket az alkalmazhatóság szempontjai szerint rendszereztük és kiválasztottuk közülük azokat, amelyek a boltozott hidak értékelése szempontjából a legértékesebb információkat szolgáltatathatják.

A kiválasztott vizsgálati módszerek hatékonyságának elemzésére laboratóriumi vizsgálatokat és MÁV kezelésben lévő hidakon végrehajtott helyszíni vizsgálatokat végeztünk. A vizsgálatokhoz a PTE Pollack Mihály Műszaki Kar eszközállományán kívül felhasználtuk az Eötvös Loránd Geofizikai Intézet néhány diagnosztikai eszközét valamint speciális szaktudását. A vizsgálatok az alábbi eszközökkel és módszerekkel történtek: georadar, infravörös hőmérsékletmérés, szeizmikus

vizsgálat, lyuk geofizikai vizsgálatok, videoendoszkópos vizsgálat, szilárdsági vizsgálatok fűrt mintákon, felületi nedvességmérés.

A kísérletek és a szakirodalmi adatok elemzése alapján különböző szempontok alapján értékeltük az egyes vizsgálati módszereket és gyakorlati ajánlásokat fogalmaztunk meg boltozott hidakon történő célirányos felhasználásukra vonatkozóan.

4. A KUTATÁS ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEI

4.1. Boltozott vasúti hidak jellegzetességei, statisztikai elemzése

4.1.1 Az európai boltozott vasúti hídállomány statisztikai jellemzői (Orbán, 2004 és 2008a)

13 ország vasúttársaságának adatbázisa alapján statisztikai felmérést végeztünk az európai téglá-, és kő boltozatos vasúti hídállományra vonatkozóan. A felmérések összesített eredményei az alábbi megállapításokban foglalhatók össze:

- A 2m-nél kisebb nyílású hidakat is beleértve a boltozatos hidak száma meghaladja a 200 ezret, amely hozzávetőlegesen a 13 vasúttársaságra összesített teljes vasúti hídállománynak kb. 60%-át teszi ki. A teljes európai vasúti hídállományra vonatkoztatva a boltozatos hidak száma ennél még magasabb lehet, viszont százalékos arányuk valamivel kevesebb (becslések szerint kb. 50%).
- A boltozatos hidak általában kisnyílású hidak. A felmérés alapján a hidak 60%-a 2m alatti nyílású, míg 80%-a 5m alatti nyílású. Csupán a boltozatok 8,5%-ának nyílása haladja meg a 10m-t.
- A legtöbb boltozatos híd (mintegy 85%) egynyílású. A kétnyílású hidak aránya 5%, a három nyílásúaké 4%, míg a háromnál több nyílással rendelkezők aránya kb. 6%.
- A boltozott hidak mintegy 70%-a jelenleg 100 és 150 év közötti korú. A 150 évnél idősebb hidak aránya az összesített statisztika alapján 12%. A 150 évnél idősebb hidak aránya a legmagasabb Nagy-Britanniában (45%) és Olaszországban (40%).
- A boltozott hidak műszaki állapotára vonatkozó felmérések alapján a hidak kb. 85%-a jó vagy közepes állapotú, 14% rossz állapotú, míg 1% nagyon rossz, vagy veszélyes állapotú¹. Ez utóbbiak azonnali, vagy mihamarabbi beavatkozást igényelnek.

4.1.2 A magyarországi boltozott vasúti hídállomány statisztikai jellemzői (Orbán, 2008a)

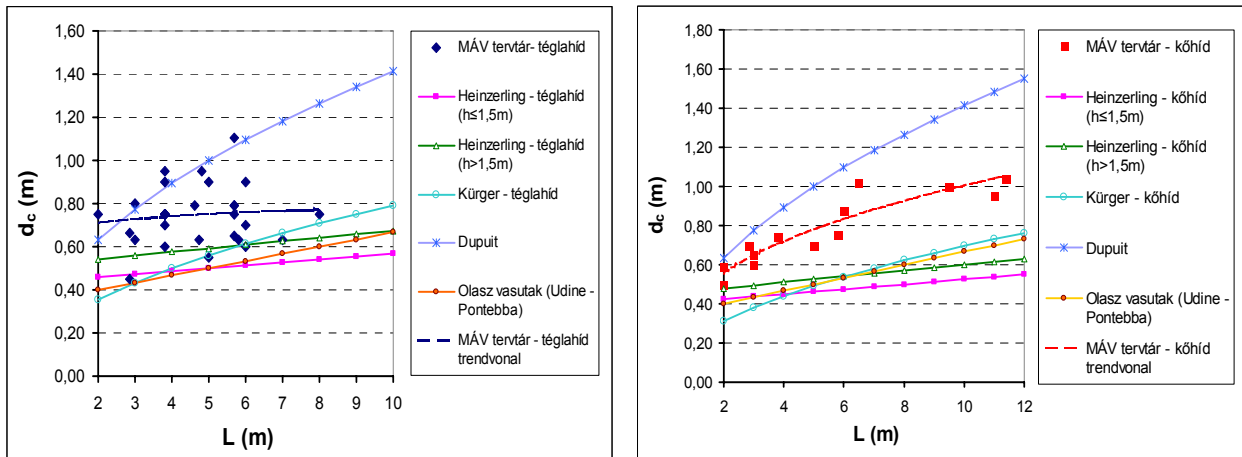
MÁV tervtári adatok elemzése alapján megállapítottuk, hogy jelenleg 655 db téglá és kő boltozatos híd található a magyarországi vasútvonalakon, a 2m-nél kisebb nyílású átvezetéseket is beleértve. Ez mintegy 7%-át teszi ki a teljes hazai vasúti hídállománynak. A boltozatos szerkezetű hídnyílások száma ennél több, beton boltozatos hidakkal együtt összesen 1077. A boltozatok átlagos nyílása 2,33 m, míg átlagos kora 117 év. A boltozott vasúti hidak közül a legtöbb egynyílású. A kettő-, illetve többnyílású hidak részaránya csupán 2,5% a teljes állományhoz viszonyítva. A boltozatos alakra vonatkozó felmérések szerint a félköríves boltozat dominál, de elvétve körszegmens alak is előfordul.

68 db, 2 métert meghaladó nyílású hídszerkezet korabeli tervdokumentációját részletesen elemeztük. Ez alapján az alábbi megállapításokat tettük:

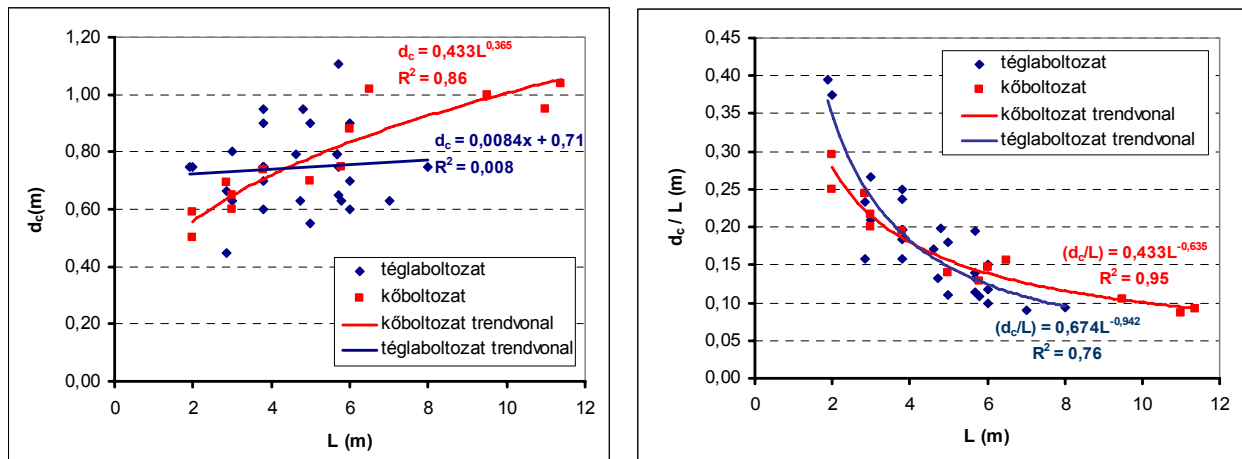
- A tényleges boltozat vastagságok és korabeli tervezési előírások összevetése alapján (2. ábra) nem állapítható meg egyértelműen, hogy a magyarországi vasúti hidakat milyen előírások alapján tervezték. A trendvonalak elemzése alapján valószínűsíthető, hogy kőhidak esetében *Kürger*, míg téglahidak esetében *Heinzerling* előírásaihoz hasonlóan követtek.

¹ A műszaki állapot értékelése 4 szinten történt: jó, közepes, rossz, nagyon rossz.

- A boltozatvastagság (d_c)-nyílás (L) arányát ábrázolja hazai kő és téglahidakra az 3. ábra. Téglaboltozat esetében az igen nagymértékű szórás miatt a boltozat vastagság és hídnyílás kapcsolatára nem lehetett megbízható regressziós összefüggést találni.
- Általánosságban elmondható, hogy a ténylegesen alkalmazott boltozat vastagságok a korabeli előírásoknál nagyobbak (kivételt jelent a francia *Dupuit* előírása), viszont a hídnyílás ismeretében csak igen alacsony megbízhatósággal állapíthatók meg.
- A boltozat mögötti mögéfalazás lejtéséről a hidak kb. 2/3-ánál sikerült adatot szereznii. Ezek alapján megállapítható, hogy az esetek 32%-ában a lejtés 1:2, míg a 68%-ban 1:3. Ezeken kívüli más lejtéstípus nem fordul elő.
- A vizsgált hidak kb. 50%-ánál alkalmaztak a vállnál eltérő boltozat vastagságot, mint a záradéknban.



2. ábra: A tényleges boltozat vastagságok (MÁV tervtári adatok) összevetése a korabeli tervezési előírásokkal. a) téglaboltozatok b) kő boltozatok



3. ábra: Boltozat vastagságok a záradéknál és a hídnyílás kapcsolata (MÁV tervtári adatok)

7 európai ország összesen 293 db boltozatos vasúti hídjának részletes geometriai elemzése és a magyarországi adatokkal való összehasonlítása alapján az alábbi megállapításokat tettük:

- A boltozat nyílás és emelkedés aránya (*1. táblázat*) igen nagy szórást mutat több ország adatait figyelembe véve. Átlagos értéke 2,80 amelynél a magyarországi átlag jóval alacsonyabb (2,12). Mindez mutatja a Magyarországon domináló félköríves ív alakot (az esetek 92%-ban).

- A boltozatok átlagos vastagsága a hídníyláshoz képest igen változatos képet mutat az egyes országokban (2. táblázat). A relatív vastagság Franciaországban a legkisebb és Magyarországon a legnagyobb. Mindez magyarázható egyrészt az egyes országokban alkalmazott tervezési képletek és építőanyagok eltérő voltával másrészt a vizsgálatban résztvevő hidak jellemző nyílásának különbségével.

1. táblázat. Európai statisztikák - A boltozat nyílásának (L) és emelkedésének (r) aránya

L/r	Összes adat	Csehország	Francia o.	Lengyel o.	Portugália	Egyesült Királyság	Spanyol o.	Magyar o.
Átlag	2,80	2,55	3,30	3,70	2,65	3,18	3,35	2,12

2. táblázat. Európai statisztikák - A boltozat vastagságának (d_c) és nyílásának (L) aránya

d_c / L	Összes adat	Csehország	Francia o.	Lengyel o.	Portugália	Egyesült Királyság	Spanyol o.	Magyar o.
Átlag	0,095	0,123	0,060	0,103	0,075	0,076	0,085	0,170

3. Táblázat. Boltozott hidak meghibásodásainak átlagos gyakorisága

A meghibásodások okai	Gyakorisági szám*	
	Nemzetközi átlag	Magyarországi átlag
Környezeti hatások miatt bekövetkező károsodások	2	1
A forgalmi terhek hatásaként a szerkezet túlterheléséből adódó károsodások	4	5
Az alapozás nem megfelelő kialakítása, vagy annak elmozdulása miatti károsodások	4	4
Homlokfalak, szárnyfalak elmozdulása, deformációja	3	2
Egyéb okok miatti károsodások	4	4
* Jelmagyarázat:		
[1]: Jellemző meghibásodás	(előfordulás minimum a hidak 50%-nál)	
[2]: Nagyon gyakori meghibásodás	(előfordulás minimum a hidak 25%-nál)	
[3]: Gyakori meghibásodás	(előfordulás minimum a hidak 10%-nál)	
[4]: Ritka meghibásodás	(előfordulás minimum a hidak 5%-nál)	
[5]: Eseti meghibásodás	(előfordulás maximum a hidak 5%-nál)	

4.1.3 A boltozott vasúti hídállomány jellemző károsodásai (Orbán, 2004 és 2008a)

Statisztikai felmérést végeztünk az európai boltozott vasúti hídállomány esetében leggyakrabban előforduló károsodásokról és elemeztük azok feltételezhető okait.

Hozzávetőleg 100 db magyarországi hídon végrehajtott vizsgálat, valamint 12 európai vasúttársaság adatainak elemzése alapján megállapítottuk, hogy a boltozott hidak meghibásodásai leggyakrabban a nem megfelelő vízszigetelésből adódó átázások miatt következnek be, azaz elsősorban tartóssági jellegűek. Szintén gyakori meghibásodások a homlokfalak és szárnyfalak elmozdulásai, repedései. A teherbírást jelentősen csökkentő (pl. az alapok elmozdulása, valamint a boltozat túlterhelése miatt bekövetkező) meghibásodások viszonylag ritkának mondhatók.

A magyarországi adatokat tekintve a szigetelési problémák miatti átázások, illetve az ebből adódó tartóssági problémák, a homlokfalak, szárnyfalak károsodásai a nemzetközi átlagnál nagyobb gyakorisággal fordulnak elő. Ellenben a túlterhelésből és a boltozatra ható koncentrált jellegű terhelésből adódó meghibásodások az európai átlagnál kisebb gyakoriságúak. Mindez visszavezethető a geometriai kialakítás robosztusabb jellegére és a boltozat feletti nagyobb töltésmagasságokra.

A meghibásodások okai szerinti értékelést és számszerű összehasonlítást a 3. táblázat ismerteti.

4.2. Boltozott hidak szerkezeti viselkedése, modellezése és megbízhatóságának értékelése

Az alábbi összefoglalóban numerikus vizsgálatok eredményein keresztül mutatjuk be a legfontosabb szerkezeti és anyagjellemzőkhöz köthető paraméterek hatásait boltozott hidak szerkezeti viselkedésére, teherbíró képességére, megbízhatóságára valamint a fáradás jelenségéhez kapcsolható használhatóságára.

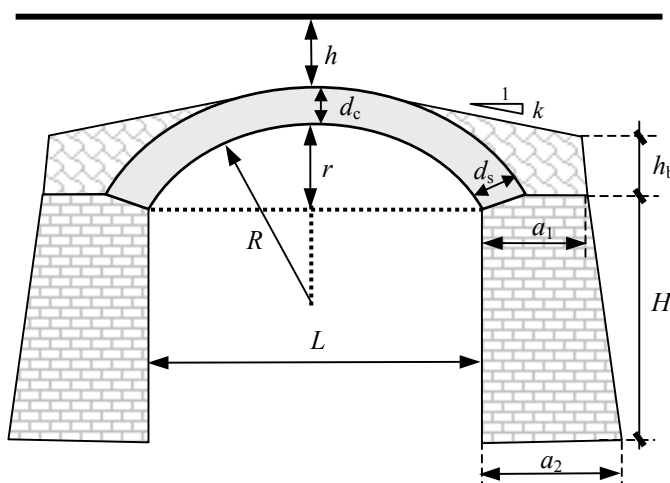
A determinisztikus modelleken végrehajtott számításokon kívül sztochasztikus érzékenységvizsgálatokat is végeztünk, amelyben azt vizsgáltuk, hogy az egyes paraméterek statisztikai jellemzői milyen hatással vannak a teherbírás statisztikai jellemzőire, illetve azok bizonytalanságai milyen mértékben befolyásolják a számítási eredmény bizonytalanságát.

A numerikus vizsgálatok átlagos jellemzőkkel bíró, kisnyílású hidakon lettek végrehajtvva, a 'merev-blokk módszer' illetve az ez alapján kifejlesztett RING 2.0 szoftver, valamint a diszkrét elemes módszert alkalmazó UDEC szoftver segítségével.

A diszkrét elemes számításokat külföldi kísérletek alapján (Jiang & Esaki, 2002; Gilbert és Melbourne, 1994) verifikált modelleken végeztük el. A modellekben a falazatot lineárisan rugalmas, a háttöltést és az ágyazatot Mohr-Coulomb, míg a falazati blokkok és gyűrűk közötti kapcsolatot, valamint a boltozat-háttöltés és háttöltés-ágyazat kapcsolatokat különböző súrlódásos kapcsolati modellekkel írtuk le.

A számítási eljárások korlátai miatt a vizsgálatot csak síkbeli modellen végeztük el, amely a teherbírás kimerülésének környezetében nem jelent túlzott mértékű eltérést a valóságos viselkedéstől.

A számításoknál alkalmazott legfontosabb geometriai paraméterek jelölése:



- L : A híd nyílása (m)
- W : A híd dolgozó szélessége (m)
- R : Az intrados görbületi sugara (m)
- d_c : Boltozat vastagsága a záradéknál (mm)
- d_s : Boltozat vastagsága a vállnál (mm)
- r : A boltozat emelkedése (m)
- h : A boltozat feletti töltés magassága (m)
- H : A hídfő magassága (m)
- a_1 : A hídfő szélessége a vállvonalban (m)
- a_2 : A hídfő szélessége az alpnál (m)
- h_b : A mögéfalazás magassága (m)
- k : A mögéfalazás lejtése (-)
- H_p : Közbenső pillér magassága (m)
- B_p : Közbenső pillér szélessége (m)

A legfontosabb anyagjellemzőkhöz köthető paraméterek jelölése:

- f_c : a boltozat nyomószilárdsága (N/mm^2)
- c : háttöltés/feltöltés kohéziója (kN/m^2)
- $\phi_{\text{töltés}}$: háttöltés/feltöltés belső súrlódási szöge ($^\circ$)
- $\gamma_{\text{töltés}}$: háttöltés/feltöltés térfogatsúlya (kN/m^3)

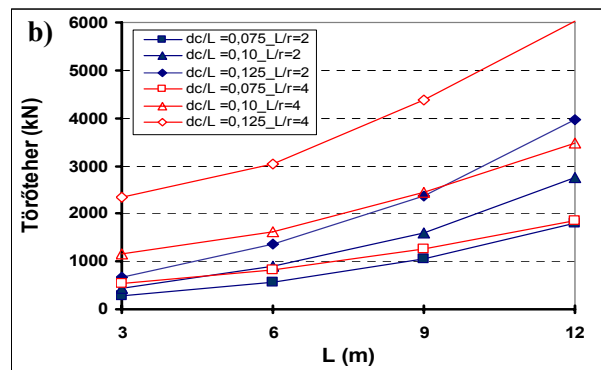
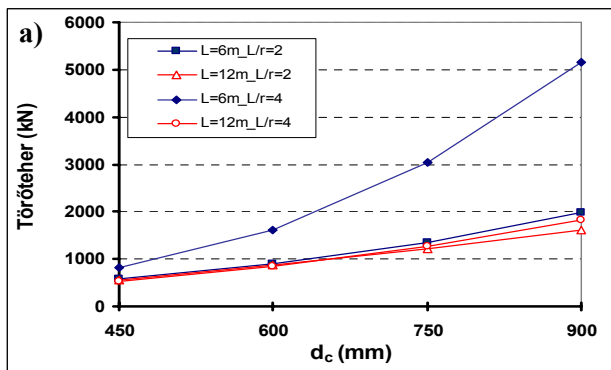
4.2.1 Paraméterek hatása boltozott hidak teherbírására és szerkezeti viselkedésére

4.2.1.1 Geometriai és anyagi paraméterek hatása boltozott hidak teherbírására 'Merev-blokk' módszerrel végrehajtott számítások alapján (4. táblázat), (Orbán 2007 és 2008b).

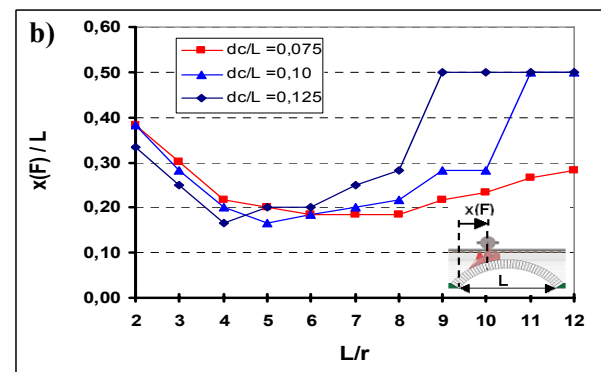
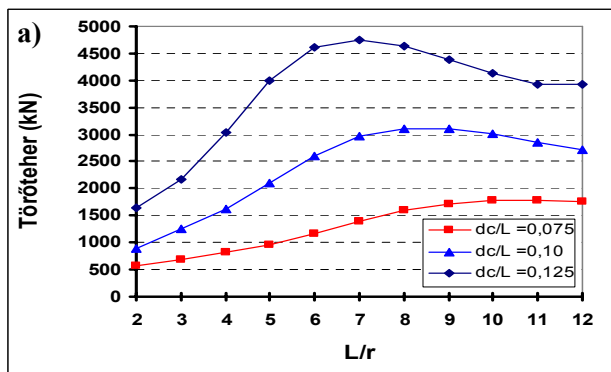
4. táblázat. Megállapítások a paraméterek hatásvizsgálata alapján

Paraméter	Jel	A paraméter hatása a törőteherre ²
Boltozat vastagsága a záradékbán	d_c	A boltozat vastagságának illetve a nyíláshoz képesti relatív vastagságának jelentős hatása van a törőteher értékére. A törőteher boltozat vastagságától függő növekedésének üteme a kisnyílású körszegmens boltozatok esetében a legnagyobb. (4a. ábra)
A boltozat relatív vastagsága a nyíláshoz képest	d_c/L	Azonos relatív vastagságú boltozatok esetében nagyobb nyílásmérethez nagyobb törőteher tartozik. A növekedés minden esetben exponenciális jellegű. (4b. ábra)
A boltozat anyagának nyomószilárdsága	f_c	A boltozat nyomószilárdságának hatása nagymértékben függ a boltozat alakjától és vastagságától. Félkör boltozatok esetében a boltozat nyomószilárdság változásának csak alacsony szilárdsági tartományban (kb. 5 N/mm ² alatt) van jelentősége. Körszegmens boltozatok esetében ez határ magasabbra tolódik.
A boltozat alakja (lapossága)	L/r	Azonos boltozat vastagság mellett a törőteher egy bizonyos határig növekszik a boltozat laposságának (L/r arány) növekedésével. Vastagabb boltozatok ($d_c/L = 0,125$) esetében ez a határ kisebb, $L/r \approx 7$, míg vékonyabb boltozatok esetében ($d_c/L = 0,125$) a növekedés $L/r \approx 10$ értékig tart (5a. ábra). Az egytengelyes terhelőerő kritikus helyzete nagymértékben függ a boltozat laposságától és vastagságától. Félköríves boltozatoknál a terhelőerő kritikus helyzete a nyílás 1/3-a környékén, a gyakorlatban leginkább előforduló $L/r = 4$ és 6 közötti arányú szegmens boltozatoknál a nyílás 1/4-e és 1/6-a közötti tartományban, míg nagyon lapos boltozatoknál a nyílásközép környékén van (5b. ábra).
A mögéfalazás relatív magassága	h_b/r	A mögéfalazás relatív magassága (h_b/r) jelentős mértékben befolyásolja a törőteher értékét. Félköríves boltozatoknál a növekedés üteme inkább a magasabb h_b/r értékeknél (1/3 felett), míg szegmens boltozatoknál inkább az alacsonyabb értékeknél számottevő (7a. ábra). Ez összefügg azzal a jelenséggel, hogy a mögéfalazás növekedésével a tönkremeneteli mechanizmust alkotó csuklók egyre közelebb kerülnek egymáshoz azaz a boltozat „dolgozó támaszköze” csökken, míg lapossága növekszik.
A háttöltés talajmechanikai jellemzői	ϕ $\gamma_{\text{töltés}}$ c	A háttöltés belső súrlódási szögének (ϕ), térfogatsúlyának ($\gamma_{\text{töltés}}$) és kohéziójának (c) növekedésével a boltozat törőterhe is növekszik. A nagyobb belső súrlódási szög és a kohézió egyrészt a teherelosztást segíti, másrészt a boltozatot stabilizálja a passzív ellenállás növekedése révén. A növekedés tendenciája nem függ számottevően a feltöltés magasságától (6a. ábra). A háttöltés/feltöltés kohéziójának hatása elenyésző a feltöltés magasságának, belső súrlódási szögének és a térfogatsúlyának hatásához képest. A kohézió mértéke nagyobb jelentőségű félkör boltozatoknál, mint szegmens boltozatoknál (6b. ábra).
A feltöltés magassága	h	A boltozat törőterhe a feltöltés magasságának függvényében exponenciálisan növekszik. Mindez alátámasztja a feltöltés jelentőségét a boltozat stabilizálásában és a forgalmi terhek elosztásában.
A közbenső pillér karcsúságának hatása többnyílású hídnál	H_p/B_p	A közbenső pillér karcsúságának növekedésével a törési mechanizmus kialakulásához szükséges erő exponenciálisan csökken. Szegmens boltozatok esetében a csökkenés mértéke erőteljesebb, mint félköríves boltozatnál. A kettő és három nyílású esetekben a csökkenés mértékében nincs számottevő különbség.

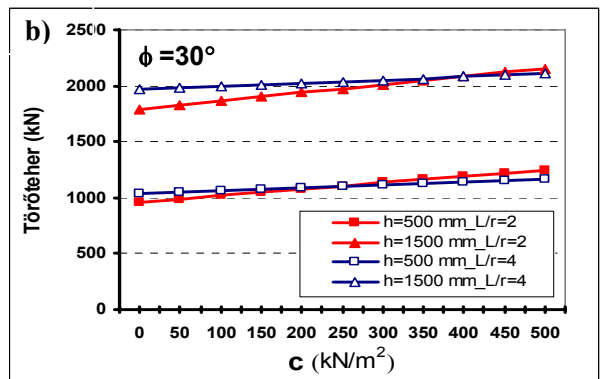
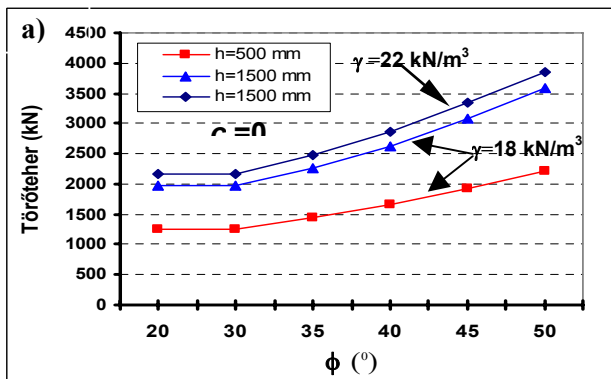
² A boltozat törőterhe a híd teherbírásaként értelmezendő.



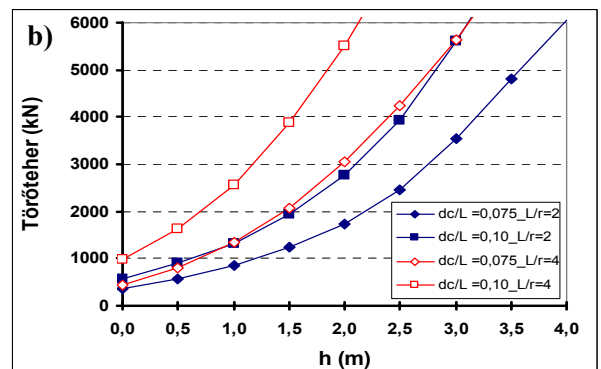
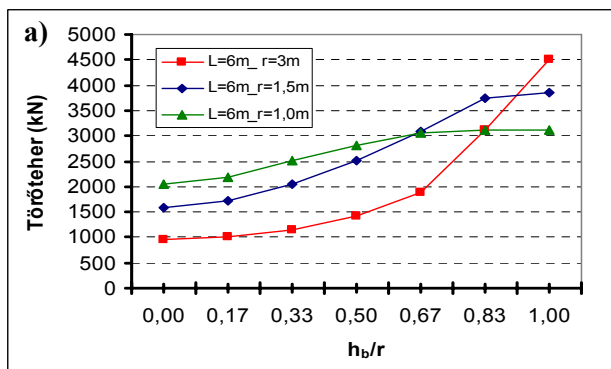
4. ábra. a) A törőteher változása a boltozat vastagságának függvényében b) Különböző boltozat nyílásokhoz tartozó törőteher a boltozat relatív vastagságának és a boltozat alakjának függvényében



5. ábra. a) A törőteher nagyságának és kritikus helyének változása a boltozat laposságának (L/r) és relatív vastagságának (d_c/L) függvényében



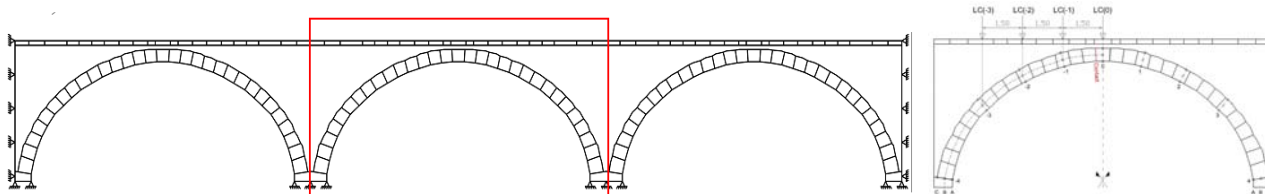
6. ábra. A törőteher változása a háttöltés geotechnikai jellemzőinek függvényében



7. ábra. A törőteher változása a mögéfalazás relatív magasságának (h_b/r) és a feltöltés magasságának (h) függvényében

4.2.1.2 A háttöltés mechanikai jellemzőinek hatása boltozott hidak teherbírására diszkrét elemek módszerével végrehajtott számítások alapján (Tóth, Orbán, Bagi, 2009).

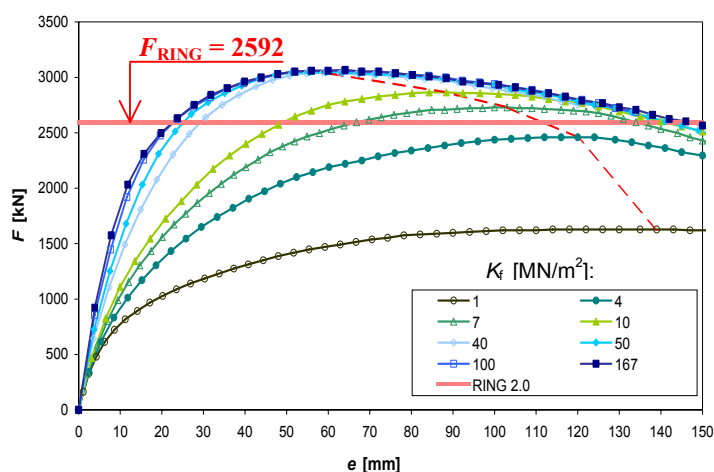
Diszkrét-elemes modellen különféle háttöltés típusok teherbírásra és szerkezeti viselkedésre gyakorolt hatását vizsgáltuk egytengelyű koncentrált hasznos teher alkalmazása mellett, 4-féle teherállásban (8. ábra). Ellenőrzés céljából a számítást a 'merev-blokk' módszert alkalmazó RING 2.0 szoftverrel is elvégeztük.



8. ábra. A vizsgált híd többnyílású diszkrét elemes modellje (Tóth, Orbán, Bagi, 2009)

A vizsgálatok megállapításait az alábbiakban foglaljuk össze:

- A háttöltés talajmechanikai és rugalmas jellemzői (ϕ_f , c_f , K_f) jelentős hatással vannak a boltozat teherbírására. Jelentősen eltérő talajjellemzők alkalmazásával a törőteher értékében akár 50%-nál nagyobb mértékű eltérés is lehet.
- A RING modellen kapott törőteher értékek bizonyos paraméter tartományban igen jó egyezést mutatnak a diszkrét elemes modellen kapott eredményekkel. Megállapítható azonban, hogy a RING modell nem mutat olyan mértékű érzékenységet a vizsgált talajmechanikai paraméterekre, mint az alkalmazott diszkrét elemes modell.
- A háttöltés kompressziós modulusa (K_f) csak egy bizonyos határ alatt (elsősorban puha talajok) befolyásolja a törőteher értékét (9. ábra). Megállapítható továbbá, hogy K_f értékétől a boltozat duktilitása is nagymértékben függ: merevebb háttöltés esetén csökken a duktilitás (A 9. ábrán a piros szaggatott vonal a maximális erőhöz tartozó pontokat köti össze).
- A mértékadó teher helyzete különböző lehet különböző háttöltés jellemzők esetén. Ezt a RING 2.0 szoftverrel végrehajtott számítások is igazolták. Tömör falazatból készült háttöltés esetén a mértékadó teherhelyzet boltozat főtépontjának közelében helyezkedik el. Mindez összefügg azzal a jelenséggel, hogy merevebb háttöltés nagyobb mértékben közvetíti a terheket a szomszédos nyílásokra, így könnyebben képes azokat is bevonni a törési mechanizmusba.



9. ábra. A terhelőerő (F)-elmozdulás (e) összefüggés a háttöltés kompressziós modulusának (K_f) függvényében, negyedponti terhelés mellett (Tóth, Orbán, Bagi, 2009)

4.2.2 A teherbírást befolyásoló paraméterek sztochasztikus érzékenysége (Orbán, 2009)

4.2.2.1 Közelítő számítási eljárás paraméterek sztochasztikus érzékenységvizsgálatára

Kidolgoztunk egy közelítő eljárást, amelynek segítségével meghatározható, hogy a számítás során alkalmazott bemenő paraméterek statisztikai jellemzői milyen hatással vannak a vizsgált állapotjellemező (általában szerkezeti ellenállás, R) statisztikai jellemzőire.

Az eljárás során az egyes bemenő paramétereket (X_i) normális eloszlású valószínűségi változóként kezeljük, így várható értékükkel (X_m) és relatív szórásukkal (V_{xi}) tekintjük adottnak. A paraméterek relatív szórásait bizonytalanságuk mértékeként is értelmezhetjük. Javaslatot tettünk egy ú.n. „modell bizonytalansági tényező” bevezetésére, amely a mechanikai és geometriai modellek valóságtól való eltéréseit hivatott reprezentálni. A közelítő módszerrel minden egyes X_i

paraméterhez meghatározhatók a $k_{xi} = \frac{\partial V_R}{\partial V_{xi}}$ „érzékenységi” mutatók, amelyek megmutatják, hogy

az egyes bemenő paraméterek bizonytalanságai milyen mértékben befolyásolják a vizsgált állapotjellemező bizonytalanságát, azaz relatív szórását.

A javasolt módszerrel megállapítható, hogy melyek azok a paraméterek amelyek a legnagyobb jelentőséggel bírnak boltozott hidak szerkezeti ellenállásának értékelése szempontjából.

4.2.2.2 A teherbírást befolyásoló paraméterek sztochasztikus érzékenysége

Átlagos jellemzőkkel bíró, kisnyílású félkör és körszegmens alakú boltozott hidakon numerikus számításokat hajtottunk végre „merev blokk módszer” felhasználásával. A 4.2.2.1 pontban ismertetett közelítő módszer szerinti algoritmust követve meghatároztuk a boltozat törőterhének statisztikai jellemzőit és a bemenő paraméterek k_{xi} érzékenységi mutatóit.

A számítás során az 5. táblázat szerinti paramétereket tekintettük valószínűségi változónak. A bemenő paramétereket normális eloszlásúnak tételeztük fel és a hozzájuk rendelt V_{xi} relatív szórások értékeit szakirodalmi adatok és mérési tapasztalatok alapján állapítottuk meg. A számítási modell bizonytalanságát szintén normális eloszlású valószínűségi változóként kezeltük.

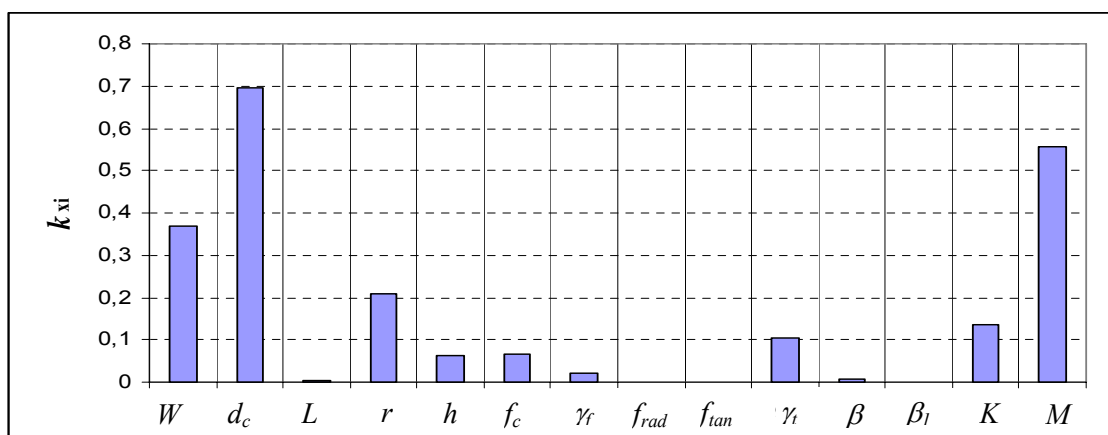
5. táblázat. Valószínűségi változóként kezelt bemenő paraméterek

Paraméter, X_i	Jel	Mérték egység	Eloszlás típusa	V_{xi}
Dolgozó szélesség	W	mm	normális	0,10
Boltozat vastagsága	d_c	mm	normális	0,05
Nyílás	L	mm	normális	0,01
Boltozat emelkedése	r	mm	normális	0,02
Töltés magassága	h	mm	normális	0,10
Falazat törőszilárdsága	f_c	N/mm ²	normális	0,30
Falazat térfogatsúlya	γ_f	kN/m ³	normális	0,10
Súrlódási együttható (sugárirányú)	f_{rad}	(-)	normális	0,50
Súrlódási együttható (érintő irányú)	f_{tan}	(-)	normális	0,50
Töltés térfogatsúlya	γ_t	kN/m ³	normális	0,10
Tehereloszlási szög	β	rad	normális	0,20
Töltés/boltozat súrlódási szög	β_f	rad	normális	0,20
Passzív földnyomás együtthatója	K	(-)	normális	0,20
Modell bizonytalansági tényező	M	(-)	normális	0,20

Az ismertetett közelítő módszerrel kívül a törőteher relatív szórásának meghatározásához néhány esetben LHS módszert is alkalmaztunk. Megállapítottuk, hogy a 15. paraméterkombinációt

követően a törőteher LHS módszerrel meghatározott statisztikai jellemzői magasfokú egyezést mutatnak a közelítő módszerrel kapott értékekkel.

A 10. ábra a hét db hídszerkezeten végrehajtott számítások átlagaként kiadódó k_{xi} érzékenységi mutatókat ábrázolja.



10. ábra. A bemenő paraméterek k_{xi} érzékenységi mutatóinak átlaga a számpéldák alapján

A számpéldák összesített eredményei alapján megállapítottuk, hogy a szerkezethez köthető legmagasabb k_{xi} érzékenységi mutatók az alábbi geometriai és anyagi paraméterekre adódnak:

1. Boltozat vastagsága (geometriai paraméter)
2. Boltozat dolgozó szélessége (geometriai paraméter)
3. Boltozat emelkedése (geometriai paraméter)
4. Passzív földnyomás együtthatója (anyagi paraméter)
5. Töltés térfogatsúlya (anyagi paraméter)

Megjegyzendő továbbá, hogy a törőteher megállapításának bizonytalanságában egyik legnagyobb szerepe a modellbizonytalansági tényezőnek van. Ezen azonban segíteni nem lehet az alkalmazott mechanikai modellben rejlő egyszerűsítések miatt.

4.2.3 Boltozott hidak megbízhatósága (Orbán, 2009)

4.2.3.1 Boltozott hidak megbízhatósága a bemenő paraméterek bizonytalansági szintjének függvényében

Elsőrendű valószínűségelméleti módszer (FORM) alkalmazásával 5 db hídszerkezeten számításokat hajtottunk végre a β_{RE} megbízhatósági index meghatározására. A példákban azt elemeztük, hogy az ellenállást befolyásoló bemenő paraméterek bizonytalansága milyen hatással van a szerkezet megbízhatósági indexére. Az optimális megbízhatósági indexet $\beta_{RE,opt} = 3,25$ -ben határoztuk meg.

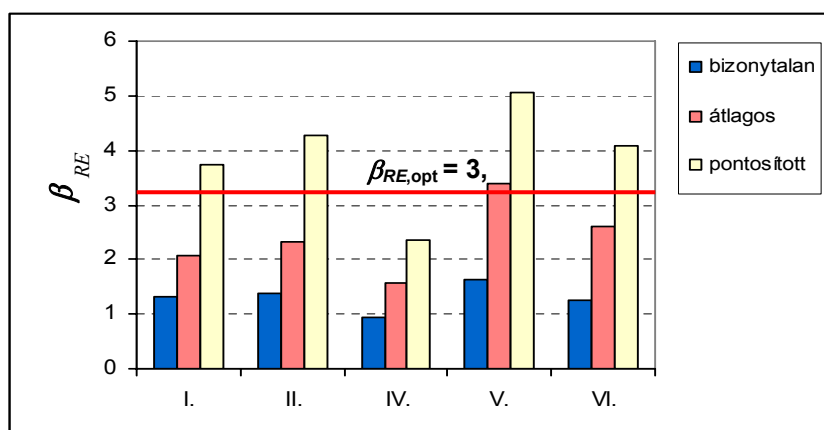
A számítások során a bemenő paraméterek bizonytalanságát relatív szórásukkal definiáltuk. Ez alapján három eltérő szintet különböztettünk meg: 1. bizonytalan, 2. átlagos, 3. pontosított. Az első szint esetében feltételeztük, hogy a paraméterek meghatározásánál elsősorban becslésekre hagyatkozunk. A második szintnél az alapvető paraméterek értékét egyszerű mérésekkel határozzuk meg, míg a harmadik szint a paraméterek gyakorlatban elérhető maximális pontosságának felel meg, pl. speciális diagnosztikai módszerek alkalmazásával. A szintek közötti különbséget a modellalkotás bizonytalanságára utaló relatív szórás értékekben is figyelembe vettük. A paraméterek ez alapján feltételezett relatív szórásait a 6. táblázat tartalmazza.

Megállapítások a számítások alapján:

- A mintapéldák eredményei alapján számított átlagok alapján megállapítható, hogy az ellenállás relatív szórásai a bemenő paraméterek bizonytalansági szintjének megfelelően a következők:
 1. Bizonytalan: $V_R \approx 0,50$
 2. Átlagos: $V_R \approx 0,25$
 3. Pontosított: $V_R \approx 0,13$
- A számításoknál alkalmazott alapvető bemenő paraméterek pontosításával (azaz relatív szórásának csökkentésével) az ellenállás relatív szórása jelentősen csökkent és a β_{RE} megbízhatósági index jelentősen nőtt (11. ábra). Megállapítható, hogy a megfelelés igazolásához elengedhetetlen a bemenő paraméterek bizonytalanságainak csökkentése, pl. célirányos diagnosztikai vizsgálatokkal (erről bővebben a 3. fejezet szól).

6. Táblázat. A bemenő paraméterek relatív szórásainak definiálása eltérő bizonytalansági szinteken

Paraméter (X_i)	W	d_c	L	r	h	f_c	γ_t	f_{rad}	f_{tan}	γ_t	β	β_I	K	M
V_{xi} , bizonytalan	0,20	0,05	0,05	0,05	0,10	0,50	0,10	0,50	0,50	0,20	0,20	0,50	0,40	0,30
V_{xi} , átlagos	0,10	0,05	0,01	0,02	0,10	0,30	0,10	0,50	0,50	0,10	0,20	0,20	0,20	0,20
V_{xi} , pontosított	0,05	0,05	0,001	0,005	0,01	0,10	0,05	0,20	0,20	0,05	0,10	0,10	0,10	0,10



11. ábra. A megbízhatósági indexek alakulása a bemenő paraméterek bizonytalansági szintjének megfelelően (mintapéldák összesített eredményei)

4.2.3.2 Új közelítő számítási eljárások boltozott hidak megbízhatóságának ellenőrzésére

Kidolgoztunk két közelítő eljárást, amelyben a megbízhatóság ellenőrzése az ellenállás illetve a hatás tervezési értékeinek (R_d ill. E_d) összehasonlítása alapján történik. Az eljárásokban mind az ellenállást, mind a hatást normális eloszlású valószínűségi változónak tételeztük fel.

Az I. eljárásban először az ellenállás relatív szórását (V_R) határozzuk meg az 5%-os küszöbértékéhez tartozó karakterisztikus értéke ($R_{k,0.05}$) és a várható értéke (R_m) alapján. Mivel a geometriai és a modellalkotás bizonytalanságát leíró paraméterek karakterisztikus értékének meghatározása általában nehézkes, ezért $R_{k,0.05}$ -t pusztán az anyagjellemzőkhöz köthető paraméterek karakterisztikus értékei alapján határozzuk meg, majd ezután megnöveljük a számítási modell és a geometriai adatok bizonytalansága miatt, az alábbi összefüggések szerint:

$$V_{RA} = \frac{1}{1,645} \cdot \left(1 - \frac{R_{k,0.05}}{R_m} \right) \quad \text{és} \quad V_R = \sqrt{V_{RA}^2 + V_{RG}^2 + V_{RM}^2}, \quad \text{ahol}$$

V_{RA} az anyagi paraméterek, V_{RG} a geometriai paraméterek, V_{RM} a számítási modell bizonytalansága miatti relatív szórás. Ezek értékeire a bemenő paraméterek különböző bizonytalansági szintjei esetére az alábbi javaslatot tettük.

	Bizonytalan	Átlagos	Pontosított
V_{RG}	0,2	0,1	0,05
V_{RM}	0,3	0,2	0,1

Az ellenállás és a hatás tervezési értéke ezek alapján:

$$R_d = R_m \cdot (1 - \alpha_R \cdot \beta_{RE,opt} \cdot V_R) \quad \text{illetve} \quad E_d = E_m \cdot (1 + \alpha_E \cdot \beta_{RE,opt} \cdot V_E), \quad \text{ahol}$$

E_m és V_E a hatás várható értéke feltételezett, vagy mért relatív szórása, valamint α_R és α_E az ellenállás illetve hatás alábbi súlyozó tényezői:

$$\alpha_R = \frac{V_R \cdot R_m}{\sqrt{(V_R \cdot R_m)^2 + (V_E \cdot E_m)^2}} \quad \alpha_E = \frac{V_E \cdot E_m}{\sqrt{(V_R \cdot R_m)^2 + (V_E \cdot E_m)^2}}$$

A szerkezet megfelelősége igazolható, ha:

$$R_d \geq E_d$$

A II. eljárás alkalmazása olyan esetekben javasolható, amikor a bemenő paraméterek karakterisztikus értékei nem állnak rendelkezésre, vagy értékük nehezen meghatározható a kevés mérési adat miatt. Ekkor az ellenállás és hatás tervezési értékei azok várható értékéből (R_m ill. E_m) közvetlenül is megbecsülhető ún. globális biztonsági tényezők felhasználásával, az alábbi módon:

$$R_d = \frac{R_m}{\gamma_{Rm}} = R_m \cdot (1 - \alpha_R \cdot \beta_{RE,opt} \cdot V_R), \quad \text{ahol}$$

$$\gamma_{Rm} = \frac{1}{1 - \alpha_R \cdot \beta_{RE,opt} \cdot V_R} \quad \text{az ellenállásra értelmezett globális biztonsági tényező.}$$

Hasonló módon, a hatás oldali globális biztonsági tényező:

$$\gamma_{Em} = \frac{E_d}{E_m} = 1 + \alpha_E \cdot \beta_{RE,opt} \cdot V_E$$

Az ellenállás illetve hatás α_R és α_E súlyozó tényezőit az I. eljárással végrehajtott mintaszámítások alapján kapott átlagos értékekből vezettük le a bemenő paraméterek különböző bizonytalansági szintjeihez.

A globális biztonsági tényezők javasolt értékeit a 4.2.3.1 pontban meghatározott V_R értékek, valamint $\beta_{RE,opt}=3,25$ és $V_E=0,2$ paraméter értékek feltételezésével az alábbiak:

Bizonytalansági szint:	Bizonytalan	Átlagos	Pontosított
γ_{Rm} javasolt értéke	≈ 10	5	2
γ_{Em} javasolt értéke	1,1	1,2	1,3

A megbízhatóság az alábbi reláció teljesülése esetén igazolható:

$$R_d = \frac{R_m}{\gamma_{Rm}} \geq E_d = E_m \cdot \gamma_{Em}$$

Egyéb megállapítások:

- Számpéldák alapján igazoltuk, hogy a javasolt egyszerűsített számítási módszerek biztonságos közelítést jelentenek boltozott hidak megbízhatóságának ellenőrzésére.

4.2.4 Boltozott vasúti hidak használhatósága

4.2.4.1 Közelítő számítási eljárás boltozott hidak használhatóságának megítélésére a nyomási kritérium alapján (Orbán, 2009)

Külföldi laboratóriumi vizsgálati eredményeket felhasználva (Roberts et al., 1999) egy a megengedhető feszültségek elvének alkalmazásán alapuló közelítő számítási eljárást dolgoztunk ki boltozott hidak használhatóságának ellenőrzésére. A módszer a boltozatban forgalmi terhelés hatására bekövetkező nyomófeszültség változások és az ismétlési ciklusszám vizsgálatára épül.

Az eljárás során a téglafalazat fáradási szilárdságára kísérleti úton levezetett
$$F(S) = \frac{(\Delta S \cdot S_{max})^{0,5}}{S_u} = A - B \log N$$
 alakú összefüggésből indultunk ki, ahol ΔS a nyomófeszültségi

spektrum, S_{max} a maximális feszültség, S_u a kvázi-statisztikus terhelés melletti nyomószilárdság, N a feszültség ingadozást okozó ismétlési szám, A és B pedig empirikus úton levezethető konstansok.

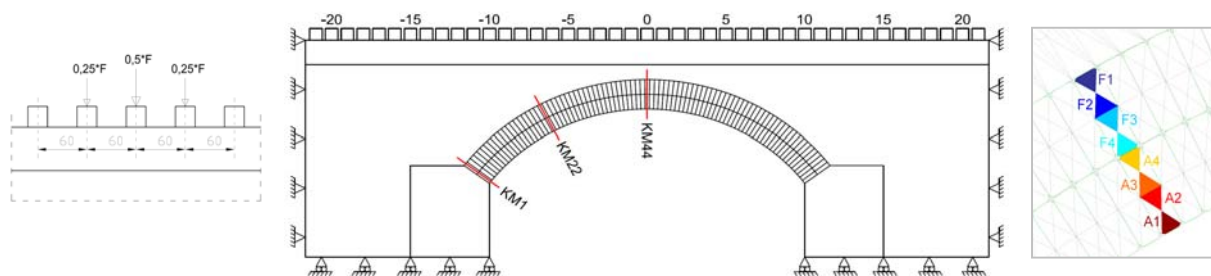
Az előző összefüggést alapul véve a megengedhető maximális nyomófeszültségre nézve levezettünk egy kritériumrendszert, amely az ismétlési ciklusszámtól függetlenül biztosítja azt, hogy a szerkezet nem szenved fáradási tönkremenetelt nyomással összefüggő igénybevételekre.

4.2.4.2 Geotechnikai paraméterek hatása boltozott vasúti hidak használhatóságára (Orbán és Tóth, 2009)

Kidolgoztunk egy olyan diszkrét elemek módszerén alapuló mechanikai modellt, amely a szerkezetet megfelelően reprezentálja és alkalmas a boltozatban a forgalmi terhelésből és önsúlyból származó feszültségek illetve feszültségváltozások meghatározására.

Egy tipikus geometriai kialakítású, egynyílású, két gyűrűből álló téglaboltozatú híd modellen, egytengelyű, koncentrált járműteher hatására vizsgáltuk a nyomófeszültségek változását, jellemző keresztmetszeti pontokban (12. ábra). A számítást különböző teherintenzitások (1kN-250kN) és a háttöltés különböző geotechnikai jellemzői (HT1: tömör háttöltés, HT2: laza háttöltés) mellett végezte el a kutatásban együttműködő doktorandusz.

A használhatóság ellenőrzéséhez a 4.2.5.1 pontban ismertetett közelítő módszert alkalmaztuk.

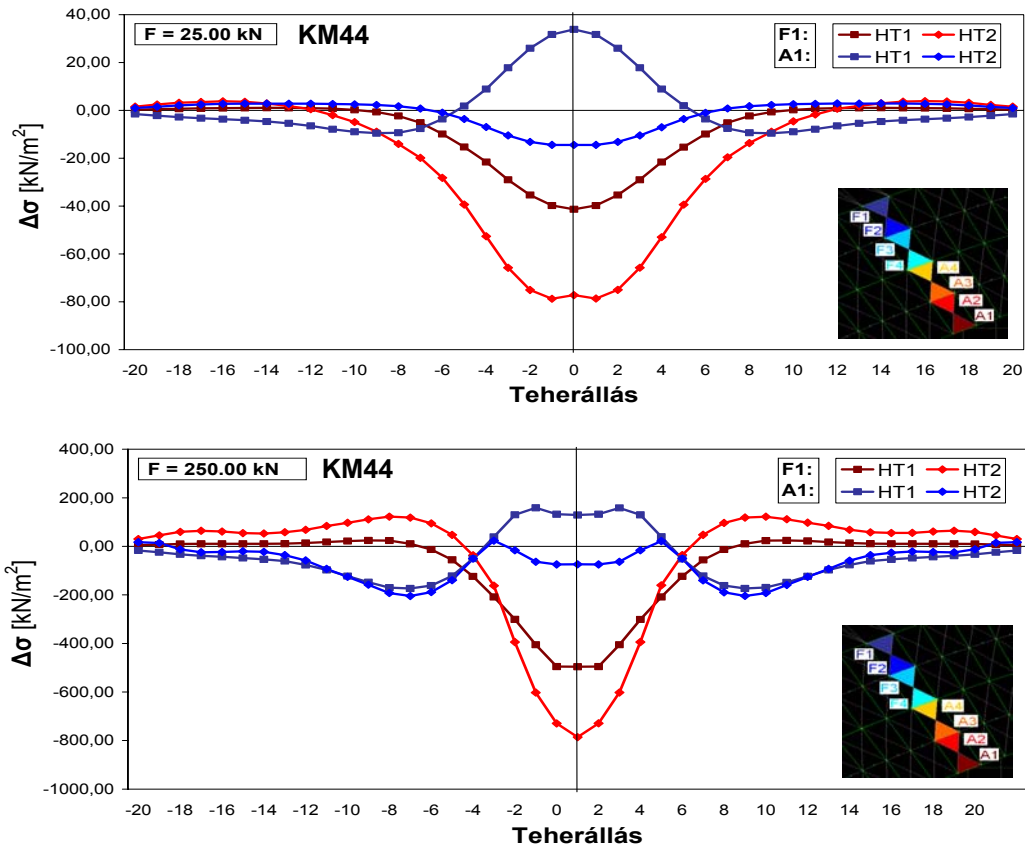


12. ábra. Diszkrét elemes hídmodell a használhatóság vizsgálatához

A legfontosabb megállapításaink a vizsgálatok alapján az alábbiak:

- Laza háttöltés esetén járműterhelés hatására a boltozatban bekövetkező feszültségváltozás jóval nagyobb, mint tömör háttöltés esetében (13. ábra).
- Laza háttöltés esetében az önsúlyból származó mértékadó keresztmetszeti feszültségek nagyobbak lesznek a tömör háttöltésű esethez képest.
- A fáradási tönkremenetelt okozó teherismétlési szám nagymértékben függ a boltozat mögötti háttöltés talajmechanikai jellemzőitől. Laza anyagú háttöltés esetén, mindhárom vizsgált keresztmetszeti pontban, több nagyságrenddel kevesebb ismétlési szám is elegendő a fáradási tönkremenetel bekövetkezéséhez a tömör háttöltésű esethez képest.

- a teherintenzitás növelésével már a használati teherszinten is feszültségátrendeződés következhet be a boltozatban egyes falazati blokkok illetve a gyűrűk közötti kapcsolatok lokális jellegű leépülése miatt.
- A boltozatban belüli feszültségátrendeződés mértéke függ a teherintenzitástól. Emiatt a feszültségváltozásokat reális teherszinten kell meghatározni és nem egy lineáris modellen, az alacsony teherintenzitás mellett kapott értékek felszorozásával.



13. ábra. A normálfeszültség változásának összehasonlítása a boltozat keresztmetszeti pontjaiban, különböző teherintenzitások és háttöltés típusok esetén

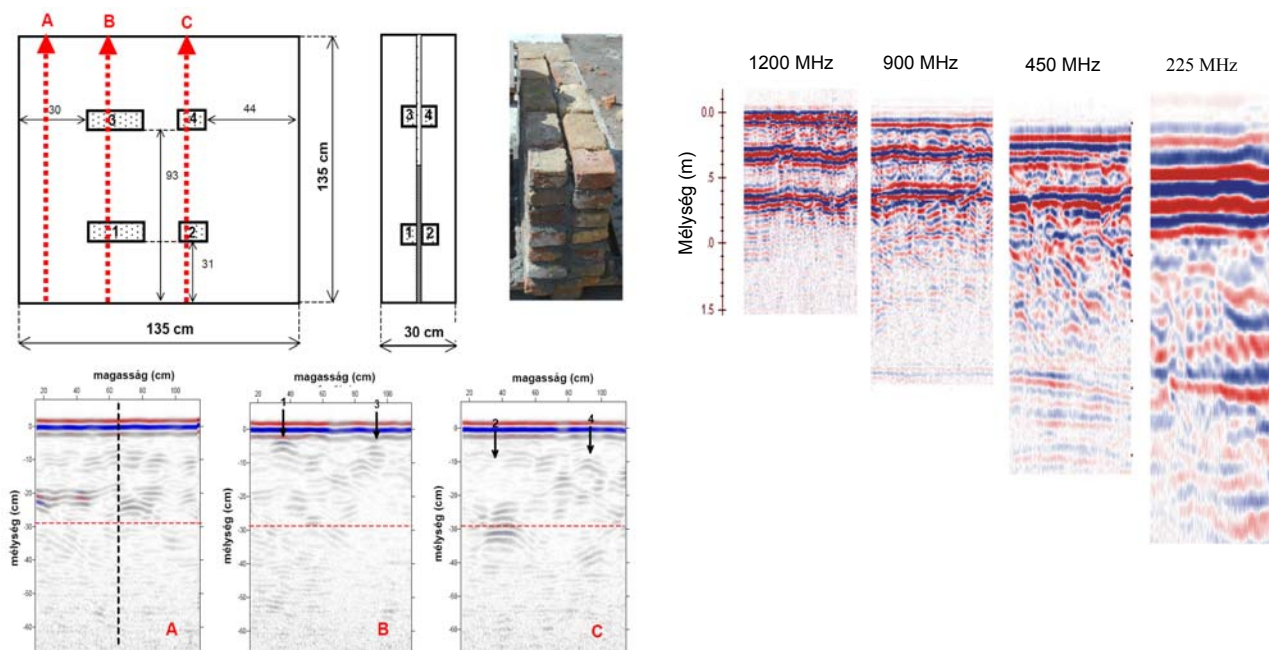
4.3. Boltozott hidak diagnosztikai vizsgálata

4.3.1 Geofizikai módszerek alkalmazása boltozott hidak diagnosztikájára (Orbán, 2006b)

Kísérleti próbafalakon és valódi hídszerkezeteken végrehajtott vizsgálatok alapján igazoltuk, hogy a geofizikai módszerek alkalmasak falazott hídszerkezetek néhány lényeges geometriai és állapot jellemzőinek roncsolásmentes meghatározására. Legfontosabb megállapításainkat az alábbiakban foglaljuk össze:

Georadar vizsgálatokkal kapcsolatos megállapítások:

- A georadar vizsgálat alkalmas a falazatok vastagságának és a falrétegek határvonalainak megállapítására. A megfelelő pontosság eléréséhez a terjedési sebesség kalibrációs mérésekkel történő megfelelő beállítására van szükség. A kalibrációs vizsgálatokhoz hatékony módszer a lyukkamera vagy videoendoszkóp (14. ábra).

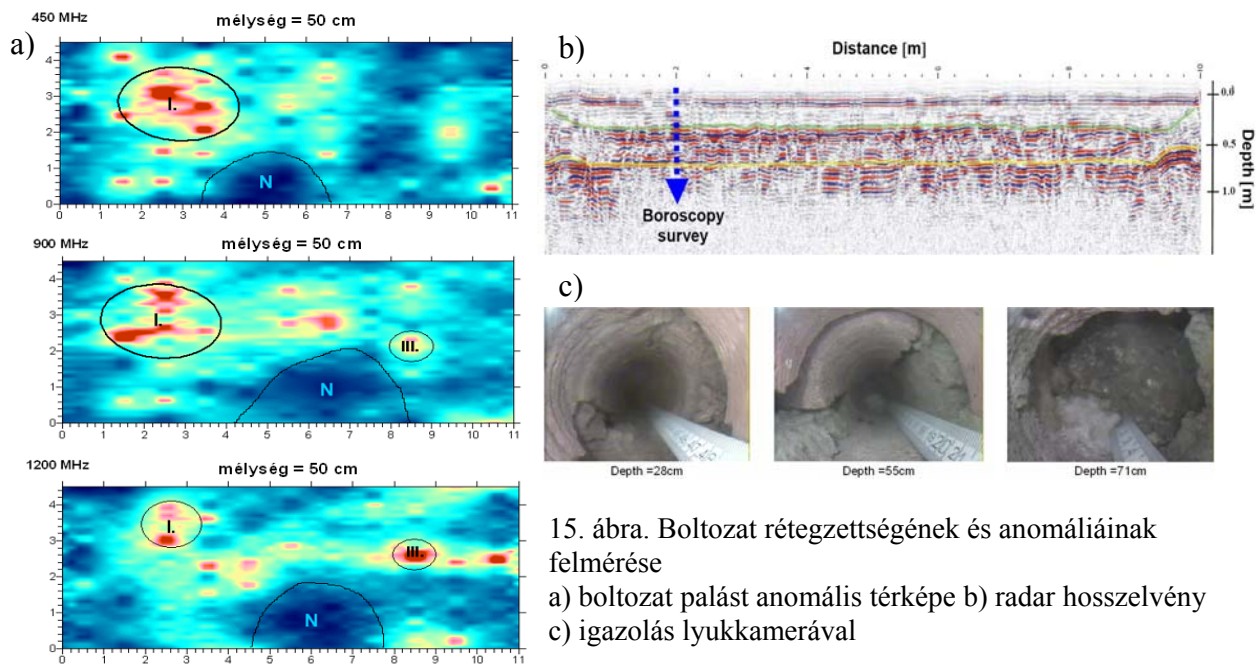


14. ábra. Kétrétegű kísérleti fal rejtett geometriai anomáliáinak és rétegzettségének megjelenítése radarfelvételeken.

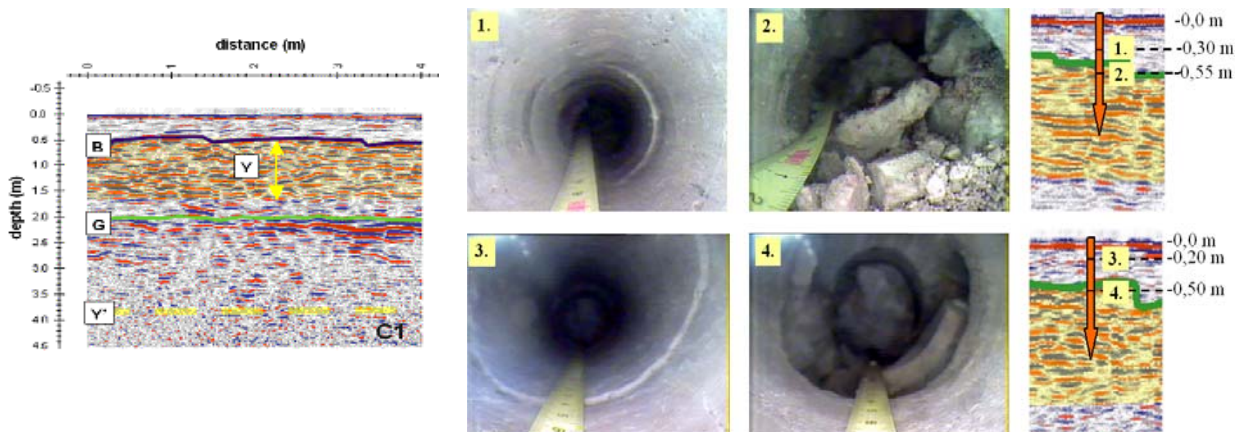
- A radarvizsgálat alkalmas a falazat általános állapotának jellemzésére azaz megállapíthatók a legfontosabb szerkezeti anomáliák helyei (pl. üregek, habarccsal nem kitöltött tartományok, repedezett tartományok, falrétegek elválása). Az ún. koherencia vizsgálattal a falazat kitöltöttségének mértékét mutató minőségi jellemző vezethető le.
- A geometriai anomáliákról készült radarszelvények elemzése alapján megállapítható volt, hogy a felbontás és így az észlelhető anomáliák méretének alsó határa az alkalmazott antennákkal a következő: 1200 MHz antennánál kb. 2-3 cm, míg 450 MHz antennánál kb. 10 cm.
- A falazatok belső geometriai anomáliáinak és rétegzettségének felméréséhez elsősorban magasabb frekvenciájú antennákat (900-1200 MHz) célszerű használni. Nagyobb frekvenciát használva jobb felbontást, de kisebb kutatási mélységet érhetünk el. Kisebb frekvenciák használatával nő a behatolási mélység, de romlik a felbontás.
- A boltozatok vastagságának és a háttöltés jellemzőinek (pl. rétegzettség, eltérő tömörségű részek) meghatározásához elsősorban alacsonyabb frekvenciájú antennák használatára van szükség (450 MHz, vagy az alatti).
- A radarméréssel a falazat és a háttöltés erősen nedvesedett tartományai kimutathatók. Ábrázolásuk legszemléletesebben az ún. anomália térképen valósítható meg, ahol az egyes

radarszelvények pillanatnyi amplitúdó értékeit idő- illetve mélység sávokban egymás mellett ábrázoljuk és különböző mélységszintekre vonatkozó metszeteket készítünk (15a. ábra).

- A helyszíni vizsgálatok során alkalmazott ellenőrző lyukkamerás mérések több helyen igazolták a radarméréssel kapott eredményeket (15. és 16. ábra).



15. ábra. Boltozat rétegzettségének és anomáliáinak felmérése
a) boltozat palást anomális térképe b) radar hosszszelvény c) igazolás lyukkamerával

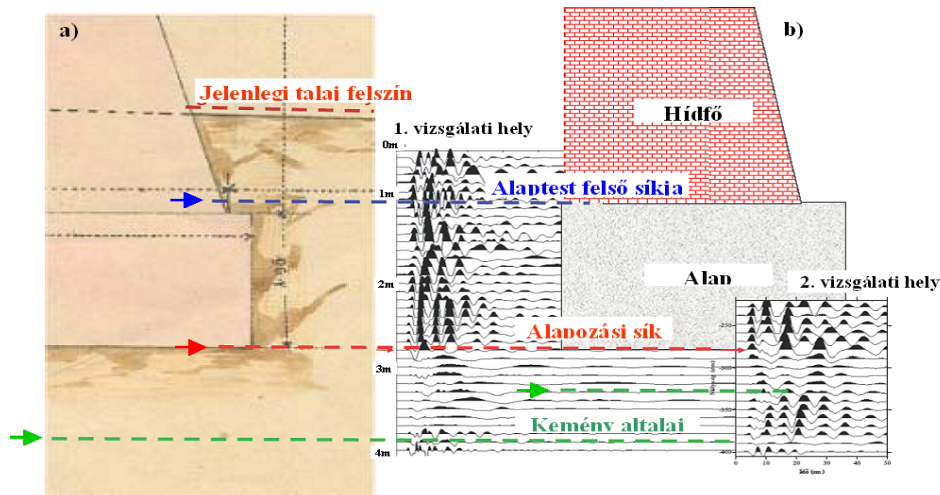


16. ábra: Kőfalazat és háttöltés rétegzettségének megjelenítése radarszelvényen és lyukkamerás felvételeken

Szeizmikus, elektromos és lyuk geofizikai vizsgálatokkal kapcsolatos megállapítások:

- Kőanyagú hídfőkön mért szeizmikus reflexiós felvételek a radarnál rosszabb felbontásban, de nagyobb behatolással tükrözik a külső köréteg mögötti jelenségeket. A kőszerkezetekben kialakuló bonyolult interferenciajelenségek miatt a szeizmikus méréssel kapott eredmények kiértékelése nehezebb a radarmérésekénél.
- A lyuk szeizmikus módszer hatékonynak mutatkozott falazott hídszerkezetek alapozási síkjának és az alap függőleges geometriai méreteinek megállapítására. A lyukradar módszer ilyen célra nedves agyagos talajban nem alkalmazható hatékonyan (17. ábra).
- Kitöltőbetont tartalmazó falazott hidpillér belső inhomogenitásának és geometriai anomáliáinak (repedések, üregek) megállapítására a szeizmikus és lyukradar módszer bizonyult a leghatékonyabbnak. A mérésekkel a homogén illetve üregeket, folytonossági hiányokat tartalmazó tartományok körülhatárolhatóvá váltak. A vizsgálatok eredményeit videoendoszkópos felméréssel sikerült igazolni.

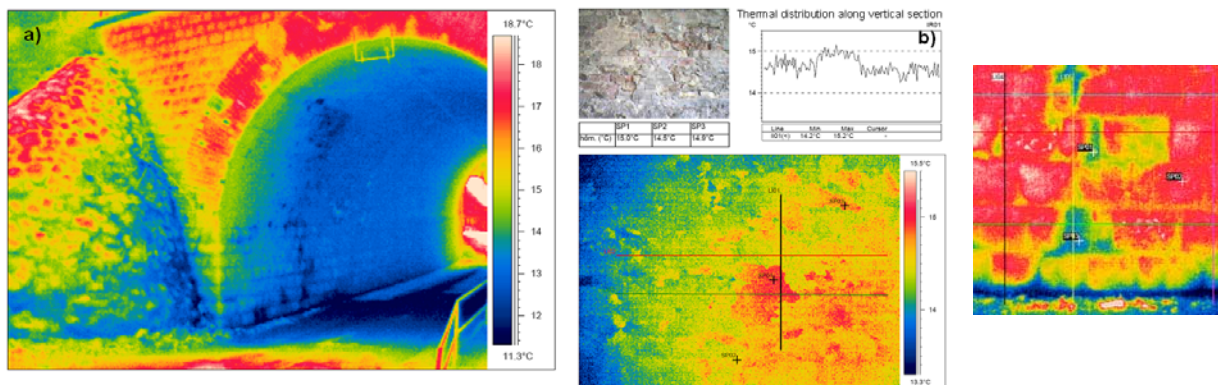
- Szeizmikus tomográfiával megállapítható volt a hídpillér külső kőfalzatának vastagság illetve annak változásai.
- A szeizmikus hullámok sebességeinek különbségei alapján a megfelelően kitöltött pillér tartományokon megállapítható volt a pillér feszültségeloszlásának aszimmetriája.
- Az elektromos méréssel kimutathatók a szerkezet nedvességtartalmának anomáliái.



17. ábra. Alap feltárása lyuk szeizmikus módszerrel

Infravörös hőmérsékletméréssel kapcsolatos megállapítások:

- A hőeloszlás képek átfogó értékelése alapján megállapítható, hogy az infravörös hőmérsékletmérés segítségével a falazatok különféle alkotóanyagainak (pl. kő, tégl, habarcs) határai megjeleníthetők, az eltérő nedvességtartalomra visszavezethető eltérő hőmérsékletű tartományok meghatározhatók, valamint számos olyan károsodás hatékonyan megállapítható, amely szabad szemmel a méréssel azonos távolságból nem, vagy csak nehezen észlelhető. Ilyenek: a növényzet és gyökér szerkezetbe való beépülési helyei, fugahiány, a fugázat elválása a falazó elemektől, erősen málló felületek, réteges felületi leválások illetve nedvesedések, a falazat átmedvesedő repedései (18. ábra).
- Az adatfeldolgozást és értelmezést jelentősen megnehezítik az olyan környezeti hatások, mint a felületet érő közvetlen napsugárzás, erős szél, csapóeső, a mérés idején a mérőeszköz kamerája és a vizsgált felület között mozgó tárgy, valamint egyéb reflektáló szekunder sugárzások. A vizsgálatok során ezen hatások kiküszöbölésére van szükség.



18. ábra. a) Téglaboltozat hőfelvétele. A sötétkék színek átázási helyekre utalnak.
b) Réteges felületi leválás és átázó repedés megjelenése hőfelvételen.

4.3.2 A vizsgálati módszerek értékelése (Orbán, 2009)

Az elvégzett kísérleti program tapasztalatai illetve szakirodalmi adatok alapján a rendelkezésre álló roncsolásmentes, kis roncsolással járó valamint monitoring módszereket boltozott hídszerkezeteken történő felhasználhatóságuk szempontjából értékeltük. Az értékelés eredményeit a 7. táblázatban foglaltuk össze.

7. táblázat. Vizsgálati módszerek értékelése a mérési adatok felhasználhatóságának szempontjából

Tulajdonságok	Vizsgált paraméterek	RMV			KRV						MONITORING							
		Szeizmikus / lyuk szeizmikus módszer	Georadar /lyuk georadar	Infravörös hőmérsékletmérés	Elektromos ellenállásmérés	Kis átmérőű fűrt minták vizsgálata	Lyukkamera / endoszkópos vizsg.	Flat-jack vizsgálat	Felületi vizsgálat			Akusztikus emisszió vizsgálat	Repedés monitoring	Lézeres alakmeghatározás	Nedvesség monitoring	Deformáció monitoring	Dinamikus vizsgálat	
									Schmidt kalapácsos vizsg.	Behatólásmérés	Kihúzóvizsgálat							
Geometria	Boltozat geometriai profilja																	
	Boltozat vastagság	2	2		3	1	1							1				
	Hídfo méretei	2	2		3	1	1											
	Pillér méretei	2	2		3	1	1											
	Alapok mélysége	2	2		3													
	Mögéfalazás jelenléte, anyaga, geometriája	3	3		3	1	1											3
	Homlokfalok vastagsága	2	2		3	1	1											
	Hosszirányú merevítőfalak jelenléte, geometriája	2	2	3	3	3	2											3
	Egyéb rejtett jellemzők (pl. vakboltozat, üregek)	2	1	3	3	3	1											
	Korábbi beavatkozások típusa, jellemzői	3	3	3	3	1	1											3
Alapok típusa, geometriája	2	2																3
Anyagjellemzők	Falazóelemek típusa, szilárdsága, állapota			3		1	2	2	2	2	2						3	
	Falazóhabarcs típusa, szilárdsága, állapota			3		2	2			2							3	
	Falazat térfogatsúlya	3	3		3	1	2		3									3
	Töltés térfogatsúlya	3	3		3	1	2											3
	Falazat nedvességtartalma és eloszlása		2	2	2	2	3								1			
	Töltés nedvességtartalma és eloszlása		2		2	2	3											
	Töltés mechanikai jellemzői	3	3		3	1	2											3
Károsodások	Falazóelemek kilazulása, elmozdulása			3			3					2			1			
	Intradós repedések a boltozaton	2	3	2			3					3	1	3				3
	Extradós repedések a boltozaton	2	3				3					3						3
	Homlokfalok elválása a boltozattól	2	3			3	2					3						3
	Boltozat deformációja														1		1	
	Boltozati gyűrűk szeparációja	3	2			3	2					3	3					3
	Üregek, alacsony tömörségű részek a falazatban és a töltésben	2	2	3	3	3	2					3						
	Felületi delamináció a falazaton	3	3	2		2	2		3		3	2						
	Fugahiány	3	2	2	3	3	2			2		3			2			
	Falazóelemek mállása			3		2	2		2		2	2						
	Alapok károsodása	2	2		3	3	3											2

Jelmagyarázat: RMV – Roncsolásmentes vizsgálatok KRV – Kis roncsolással járó vizsgálatok

- 1: Alapvető és megbízható információt szolgáltat
- 2: Hasznos információt szolgáltat, a mérés megbízhatósága a körülményektől függ
- 3: Csak kiegészítő információt szolgáltat, a mérés megbízhatósága a körülményektől függ
- Üresen hagyva: Nem szolgáltat használható eredményt

4.3.3 Ajánlások a vizsgálati módszerek speciális célú gyakorlati alkalmazására (Orbán, 2009)

A roncsolásmentes, kis roncsolással járó valamint monitoring vizsgálati módszerek boltozott hidakon történő speciális célú gyakorlati alkalmazására a 8. táblázatban foglalt ajánlásokat tesszük.

8. táblázat. Ajánlások a vizsgálati módszerek speciális célú gyakorlati alkalmazására

Vizsgálati módszerek		A vizsgálat célja									
		Alkotóanyagok típusának meghatározása	Mechanikai jellemzők meghatározása	Fizikai és kémiai jellemzők meghatározása	Boltozat geometriai profiljának meghatározása	Rejtett jellemzők meghatározása	Károsodások felmérése	Számítási modell verifikációja	Hídállapot általános jellemzése	Állapot monitoring	Beavatkozások hatásának vizsgálata
RMV	Szeizmikus / lyuk szeizmikus módszer	3	3	3		2	2		2	3	2
	Georadar / lyuk georadar	3	3	2		2	2		2	3	2
	Infravörös hőmérsékletmérés	2	3	3		3	2		2	3	3
	Elektromos ellenállásmérés	3	3	2		3	3		2	3	3
KRV	Kis átmérőjű fűrt minták vizsgálata	1	1	1		2	3		3	3	1
	Lyukkamera / endoszkópos vizsgálat	1	3	3		1	2		3	3	1
	Flat-jack vizsgálat		2					2	3	3	3
	Schmidt kalapácsos vizsg	3	2				3		3		
	Behatolásmérés	2	2	3			3		3	3	3
	Kihúzóvizsgálat	2	2	3					3		3
MONITORING	Kopogtatásos vizsgálat	3	3	3		3	2		2	2	3
	Akusztikus emisszió vizsgálat						3	2	2	2	2
	Repedés monitoring						3	3	3	2	3
	Lézeres alakmeghatározás				1		2	3	2	2	
	Nedvesség monitoring		3	2		3	2		3	3	2
	Deformáció monitoring				3		2	2	3	2	2
	Dinamikus vizsgálat						3	2	2	2	2

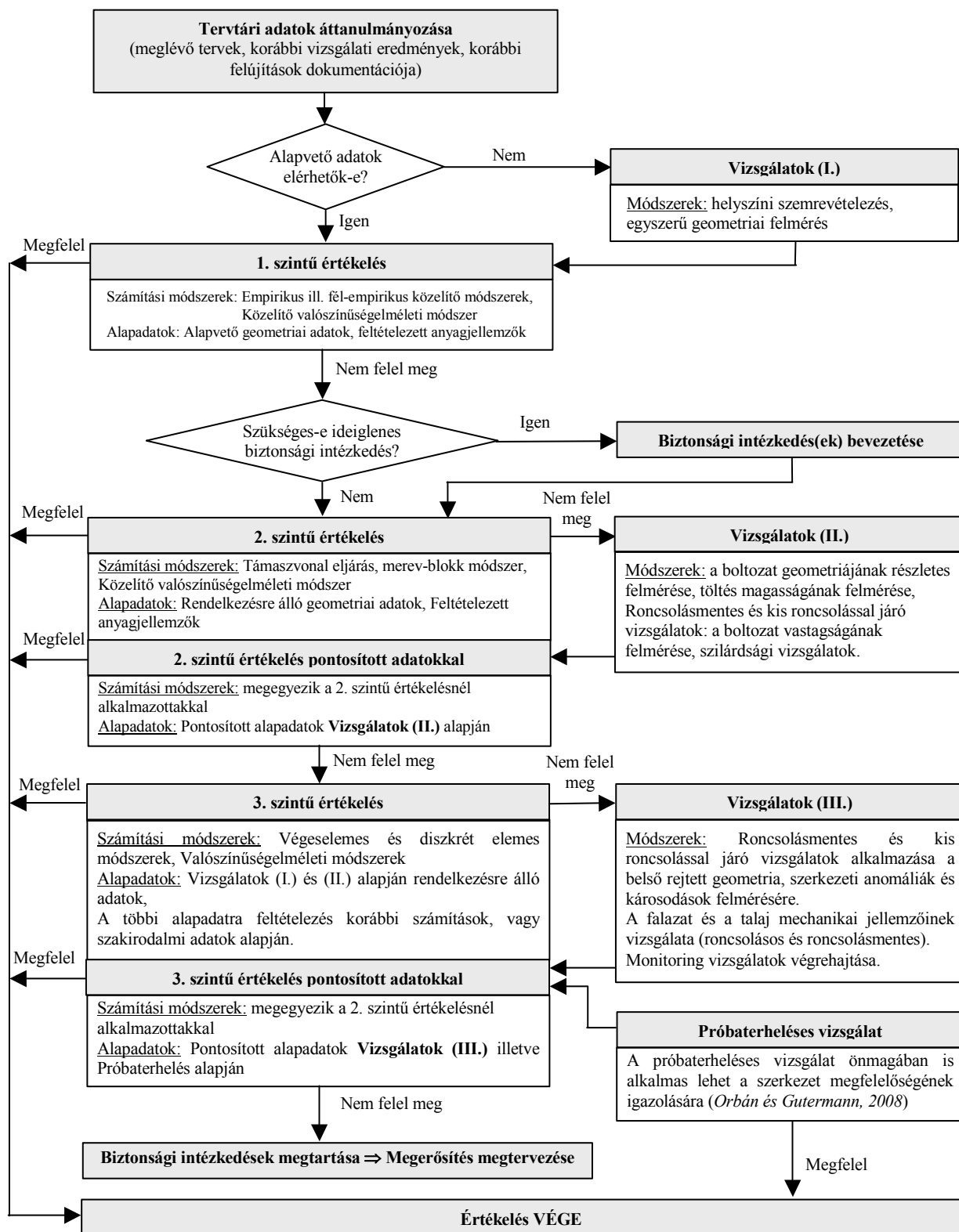
Jelmagyarázat: RMV – Roncsolásmentes vizsgálatok KRV – Kis roncsolással járó vizsgálatok

- 1: Használata általános esetben ajánlott
- 2: Más módszerek mellett kiegészítő vizsgálatként ajánlott
- 3: Használata csak speciális esetekben vagy kísérleti jelleggel javasolt
- Üresen hagyva: Használata az adott célra nem javasolt

4.4. Többszintű eljárás boltozott vasúti hidak megbízhatóságának értékelésére (Orbán, 2006a, valamint Orbán és Gutermann 2009)

A kutatás megállapításai és eredményei alapján egy többszintű eljárásra tettünk javaslatot boltozott vasúti hidak megbízhatóságának értékeléséhez. Tipikus kialakítású hídszerkezetekre vonatkozóan az eljárás rendszerbe foglalja a teherbírás számításának és a megbízhatóság értékelésének különböző módszereit, diagnosztikai módszerek felhasználásával.

Az eljárás alkalmazásához az alábbi folyamatábra alapján adunk útmutatást.



5. AZ KUTATÁS EREDMÉNYEINEK HASZNOSÍTÁSA

A boltozott vasúti hidak számával, szerkezeti és állapot jellemzőivel kapcsolatos adatbázis statisztikai elemzése lehetőséget nyújtott és nyújt kutatási prioritások meghatározására.

A hidak modellezésével és megbízhatóságával kapcsolatos eredmények hozzásegítenek a boltozott hidak szerkezeti viselkedésének és jelenlegi állapotának jobb megértéséhez, ezáltal a beavatkozások szükségességének és célszerű módjának megállapításához.

A diagnosztikai eljárásokkal szerzett tapasztalatok alapján olyan gyakorlati ajánlásokat fogalmaztunk meg, amelyek alkalmasak lehetnek, hogy a vasúttársaságok hídvizsgálatainak rutinszerű rendjébe illeszkedjenek.

A kifejlesztett többszintű értékelési eljárás a Hídgazdálkodási Rendszerek döntés előkészítő moduljainak fontos eleme lehet.

HIVATKOZÁSOK A JELENTÉSBEN

Hivatkozások a kutatásban részt vett szerzőktől

- Orbán, Z. (2004): "Assessment, Reliability and Maintenance of Masonry Arch Bridges in Europe", *ARCH 04: 4th International Conference on Arch Bridges*, eds: P. Roca, C. Molins, Barcelona, 2004, pp. 152-161, ISBN: 84-95999-63-3
- Orbán, Z., (2006a): "Condition assesment and rehabilitation of masonry arch railway bridges", *Concrete Structures*, Vol. 7, pp. 22-30, ISSN 1419-6441
- Orbán, Z. (2006b): "Increasing the reliability of the assessment of masonry arch bridges by non-destructive testing", *Pollack Periodica*, Volume 1, No. 3, pp. 45-56, ISSN: 1788-1994
- Orbán, Z. (2007): " Boltozott hidak biztonságának megítélése" *X. Magyar Mechanikai Konferencia*, 2007 augusztus 27-28, Miskolc.
- Orbán Z. (2008a): "Tégla- és kőboltozatú vasúti hidak Magyarországon és Európában", *Közúti és Mélyépítési Szemle*, 58. évfolyam, 9. szám, pp. 22-30.
- Orbán Z. (2008b): "Boltozott vasúti hidak szerkezeti viselkedésének modellezése és teherbírásának értékelése ", *Közúti és Mélyépítési Szemle*, 58. évfolyam, 10. szám, pp. 30-35.
- Tóth, A., R., Orbán, Z., Bagi, K. (2009): "Discrete element analysis of a stone masonry arch", *Mechanics Research Communications*, (közlésre elfogadva, <http://dx.doi.org/10.1016/j.mechrescom.2009.01.001>), p.12. (az OTKA 48906 projekt támogatásával)
- Orbán, Z., Gutermann, M. (2009): "Assessment of masonry arch railway bridges helped by non-destructive testing procedures", *Engineering Structures*, (közlésre elküldve).
- Orbán, Z. (2009): "Diagnosztikával támogatott eljárás boltozott vasúti hidak megbízhatóságának értékelésére", *PhD disszertáció* (kézirat).
- Orbán, Z., Tóth, A. (2009): "Serviceability assessment of masonry arch bridges with the help of discrete element analysis" (tervezett publikáció az OTKA 48906 projekt támogatásával).

Hivatkozások a kutatásban nem szereplő szerzőktől

- Gilbert, M., Melbourne, C. (1994): "Rigid-block analysis of masonry structures", *The Structural Engineer*, 54(21), 356-361
- Harvey, W.J. (1988) : "The application of the mechanism analysis to masonry arches", *The Str. Eng.*, 66, 77-84.
- Heyman, J. (1982): "The Masonry Arch", *Chichester, New York, Holsted Press*.
- Jiang, K., Esaki, T. (2002): "Quantitative evaluation of stability changes in historical stone bridges in Kagoshima, Japan, by weathering". *Eng. Geol.* 63, p. 83-91.

- Melbourne, C.; Tomor, A., Wang, J., (2004): "Cyclic load capacity and endurance limit of multi-ring masonry arches", *Arch bridges IV, Advances in assessment, structural design and construction*, Barcelona, 375–384.
- Roberts, T.M., Hughes, T. G., Dandamudi, V. R. (2006): "Quasi static and high cycle fatigue strength of brick masonry", *Construction and Building Materials*, 20(9), p.603-614.
- UIC Code 778-3R (1994), "Recommendations for the assessment of the load carrying capacity of existing masonry and mass-concrete arch bridges", Paris.