



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

# Magyarországi közúti hidak szeizmikus viselkedése és károsodáselemzése

**Simon József**

Tudományos vezető:

Vigh László Gergely, PhD

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Hidak és Szerkezetek Tanszék

Budapest, 2016

## Tartalomjegyzék

---

Tartalomjegyzék.....	2
1. Bevezetés .....	3
1.1. Problémafelvetés.....	3
1.2. Módszerek, megválaszolendő kérdések.....	3
2. Földrengési teher meghatározása .....	4
3. Közúti hídadatbázis elemzése.....	5
4. Numerikus modellfejlesztés .....	7
5. Előzetes paraméteres vizsgálatok .....	9
6. Törékenységi vizsgálatok.....	11
6.1. Vizsgálatok elve .....	11
6.2. Modellezési és analízis kérdések .....	12
6.3. Szerkezetek értékelése törékenységi görbék alapján .....	14
6.4. Szerkezetek megbízhatósági szintjei.....	15
7. Megerősítési módok vizsgálata.....	16
7.1. Hagyományos megerősítés és szeizmikus szigetelés .....	16
7.2. Szeizmikus szigetelés tervezése ekvivalens lineáris analízissel.....	17
7.3. Tervezési koncepciók új hidak esetén.....	18
8. Összefoglalás.....	19
9. Új tudományos eredmények.....	19
10. Az értekezés témakörében készült publikációk.....	21
11. Irodalomjegyzék.....	22

# 1. Bevezetés

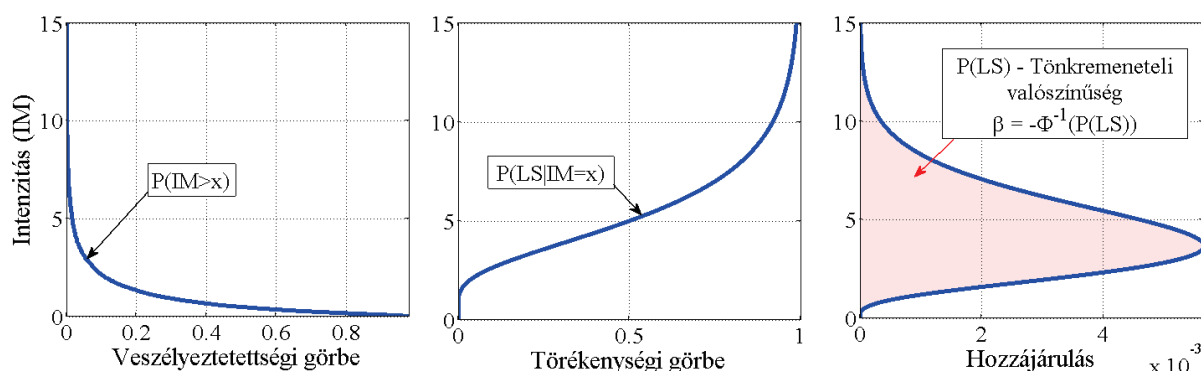
## 1.1. Problémafelvetés

Magas szeizmicitású övezetekben (például USA nyugati partvidéke, Japán, Új-Zéland, a Földközi-tenger vidéke) az emberek régóta fel vannak készülve nagyobb erejű földrengésekre; a mérnöki tervezésben a földrengési hatások tudatosan megjelennek, azokra a mérnöki szerkezeteket méretezik. Ezzel szemben az alacsony és mérsékelt szeizmicitással jellemezhető régiókban (USA keleti partvidéke, Európa északabbra fekvő részei) ez a felfogás csak a 90-es évektől kezdett beszivárogni a mindennapos gyakorlatba. A tervezés hiánya miatt egy kisebb intenzitású földrengés is okozhat károkat ezeken a területeken is, mely jelentős gazdasági következményekkel járhat. Ezen az elven a hatályos egységes európai szabvány (Eurocode, röviden EC8-1 [1], EC8-2 [2] és EC8-3 [3]) előírja minden új vagy megerősítendő hídszerkezet szeizmikus vizsgálatát mérsékelt szeizmicitás esetén.

Az Eurocode bevezetésével Magyarországon is kötelezővé vált a földrengési hatásokra való tervezés, ellenőrzés. A magyar hídtervezési szabvány (ÚT [4]) csak az 50 méternél nagyobb nyílású hidak esetén követelte meg ezt, így a hidak túlnyomó többsége a szeizmikus hatás figyelembe vétele nélkül lett megtervezve. 2006-ban az EC elveivel összhangban egy szeizmikus zónatérkép készült [5], mely szerint a tervezési maximális talajgyorsulás értéke 0.08-0.15 g között mozog hazánkban. Ez jelentős növekedés a korábbi értékekhez képest. A megnövekedett követelmények és a szeizmikus tervezés hiánya felveti a kérdést, hogy hogyan viselkednek hídjaink egy esetleges földrengés során. Az eddigi tapasztalatok [6],[7],[S10] alapján valószínűsíthető, hogy egyes hidaknál jelentős károsodások keletkezhetnek. A hidak szeizmikus viselkedésének megismerése így elsődleges feladat.

## 1.2. Módszerek, megválaszolandó kérdések

A károsodások valószínűségi elemzése törékenységi/sérülékenységi vizsgálattal történik. A szerkezet törékenységi/sérülékenységi görbéje megadja egy előre definiált károsodási határállapot kialakulásának feltételes valószínűségét a földrengés intenzitásának függvényében. A valószínűség számításához ismernünk kell az intenzitás kialakulásának valószínűségét is, melyet az adott helyszínrre jellemző veszélyeztetettségi görbe mutat meg (1. ábra) [S8].

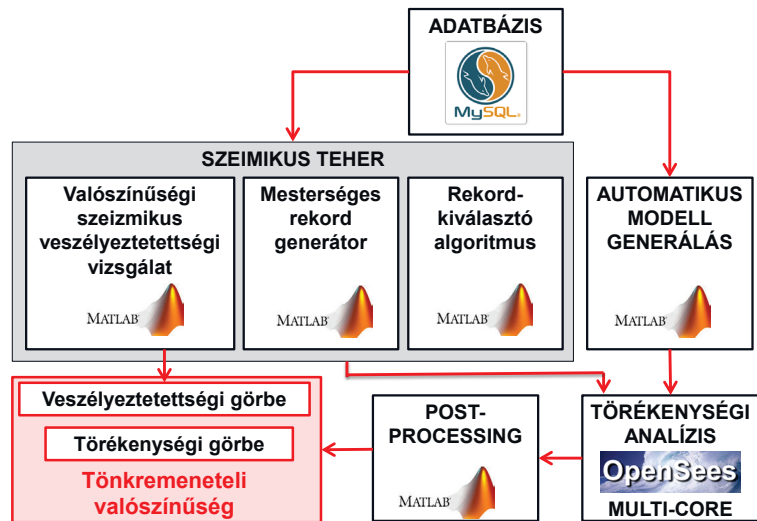


1. ábra A tönkremeneteli valószínűség számításának illusztrálása.

A törékenységi görbe hatékonyan alkalmazható mind földrengés előtti, mind utáni helyzetekben. A görbék elemzésével, összehasonlításával kritikus szerkezeti elemek és kialakítások határozhatóak meg, megerősítési terv dolgozható ki. A törékenységi görbe alapján becsülhető, hogy egyes hidak milyen károsodást szenvednek egy adott intenzitású

földrengés során, mely információ fontos lehet elérhetőségi tervek és útvonalak kidolgozására vészhelyzet esetén.

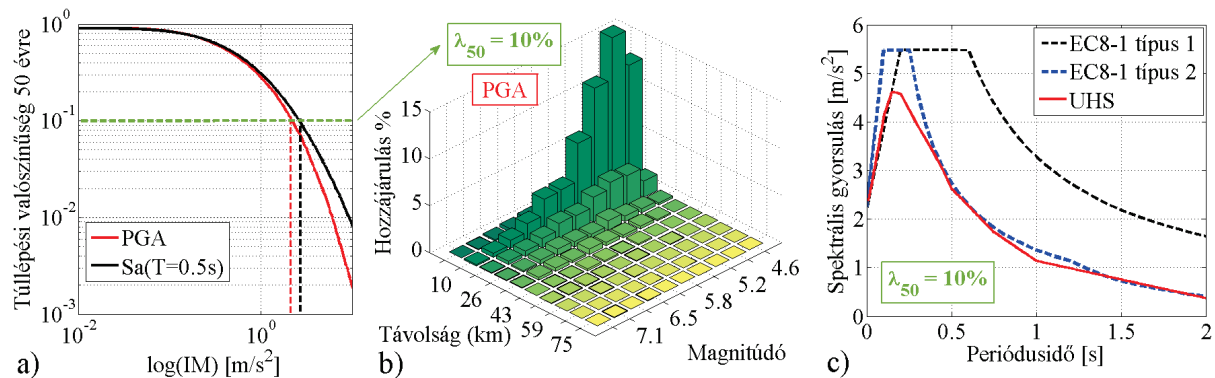
A kutatás célja egy egységes, az ország egész területére kiterjedő vizsgálati rendszer kidolgozása és megvalósítása. Hasonló, teljes hídállományra kiterjedő vizsgálatot hajtottak végre például az USA keleti partvidékén [8], Olaszországban [9], Törökországban [10], azonban Európán belül, mérsékelt szeizmikus övezetben hasonló kutatás még nem volt. A kidolgozott vizsgálati rendszert mutatja a 2. ábra, melyet a hídadatbázis, szeizmikus teher generáló, automatikus modell építő, analízis és kiértékelő modulok részletes kidolgozásával és azok összekapcsolásával automatizáltam [S7]. Ezáltal megfelelő adatok birtokában a kiértékelés elvégezhető a teljes magyarországi hídállományra.



2. ábra Rendszerszintű automatizált károsodáselemzés folyamatábrája.

## 2. Földrengési teher meghatározása

Valószínűségi szeizmikus veszélyeztetettségi vizsgálatot [11] alkalmaztam magyarországi körülményekre [S16], mellyel meghatároztam több vizsgált helyszínre is a károsodások valószínűségének számításához szükséges veszélyeztetettségi görbéket (3.a ábra), valamint a helyszíni spektrumokat (3.c ábra) is, melyeket összehasonlítottam a szabvány által javasolt spektrumokkal.

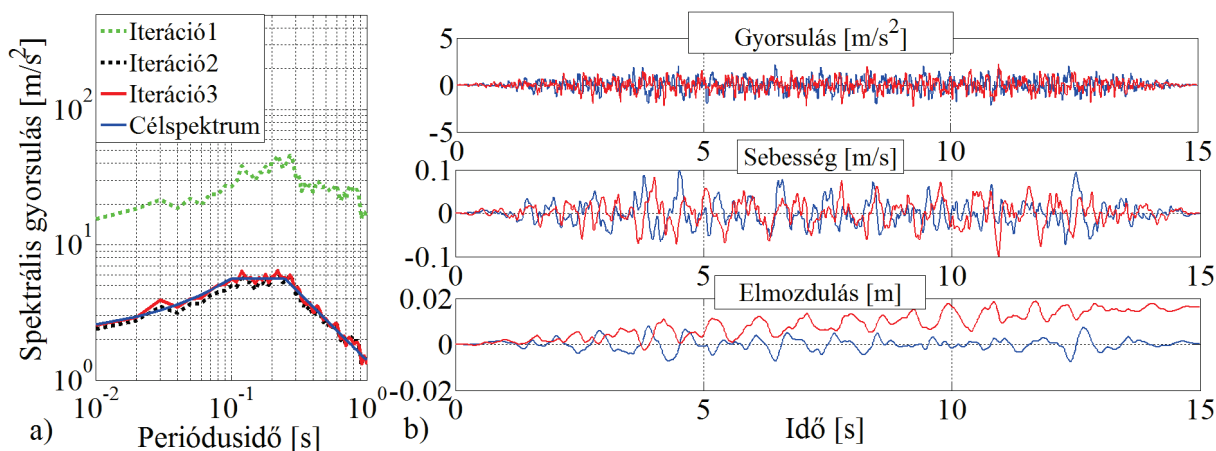


3. ábra Földrengési teher Komáromra. a) Veszélyeztetettségi görbe. b) Diszaggregáció tervezési intenzitás szinten. c) Helyszíni és szabványos spektrumok tervezési intenzitás szinten.

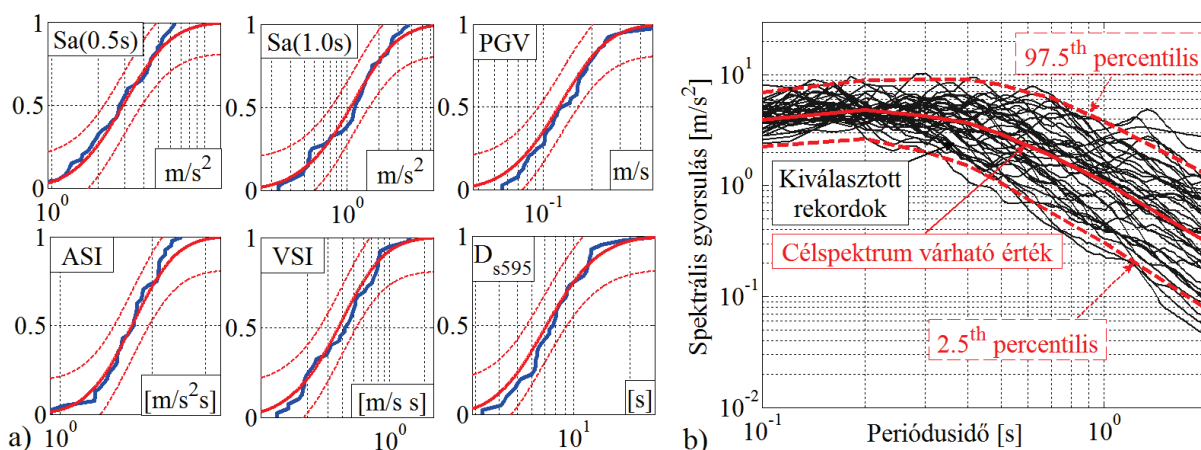
A 3.b ábra szerint 5.5 magnitúdó alatti és kis epicentrális távolságú (<10 km) rengések járulnak hozzá leginkább a tervezési szinten számított veszélyeztetettséghez, mely esetben az EC szerint a 2-es típusú spektrumot kell alkalmazni. Ezt igazolja a 3.c ábra, a 2-es típusú spektrum írja le jobban a tényleges helyszíni spektrumot. A Nemzeti Melléklet az 1-es típus használatát ajánlja, így az alkalmazott spektrum módosítása javasolt [S6].

A törékenységi görbék előállításához nemlineáris ciklikus viselkedésű modelleken elvégzett nemlineáris időtörténeti vizsgálatok szükségesek. Egy olyan algoritmust építettem

be a kiértékelő keretrendszerbe, mely a kiválasztott célspektrumra illesztve generál mesterséges rekordokat az időtörténeti vizsgálathoz iteratív módon [S1] (4.a ábra), valamint korrekciót végez, hogy se maradó sebesség, se elmozdulás ne alakuljon ki (4.b ábra). Az algoritmus hatékony, ~2-3 iterációs lépés alatt megoldásra vezet elfogadható hibával.



4. ábra Mesterséges rekord generálás illusztrációja: iteráció (a); korrekció (b).



5. ábra Rekordkiválasztás Komáromra. a) néhány intenzitásjellemező elméleti (piros) és empirikus (kék) eloszlása a tervezési maximális talajgyorsulás szintjén. b) Kiválasztott rekordok.

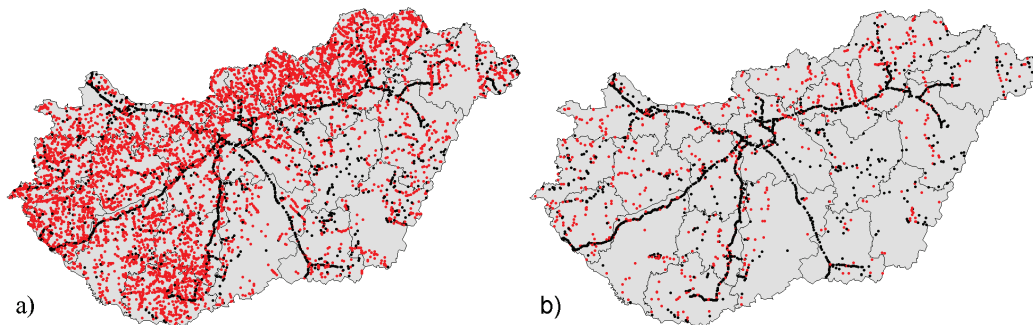
A mesterséges rekordok jól illeszkednek a célspektrumra, de más intenzitási jellemzőkben (pl. energiatartalom) eltérhetnek a valós földrengésektől. Tovább lépésként egy rekordkiválasztó algoritmust [12] adaptáltam magyarországi viszonyokra [S16]. Több ezer meglévő rekord közül választottam ki azokat a rekordokat, melyek intenzitásjellemezői (nem csak spektrális, hanem pl. energiatartalmat, mértékadó rengéshosszt mérő jellemzők) a helyszínrre számolt elméleti eloszlást követnek. Ilyen kiválasztott rekordok gyorsulási válaszspektrumát mutatja az 5.b ábra. Az intenzitások elméleti eloszlásának létrehozásával kimutattam, hogy a szignifikáns rengésidő ( $D_{s595}$ ) várhatóan 10 s alatt van (5.a ábra). Ez összhangban van a diszaggregációs eredménnyel, a dominánsan közeli, de moderált földrengések rövidebb rengésidővel jellemezhetőek.

### 3. Közúti hídadatbázis elemzése

A Közlekedésfejlesztési Koordinációs Központtal közreműködésével és engedélyével az általuk fejlesztett Egységes Hídnnyilvántartási Rendszer (EHR) [13] adatainak felhasználásával saját adatbázist hoztam létre. Elemeztem az adatbázis struktúráját és a meglévő adatok körét. Meghatároztam, hogy mely adatok hiányoznak egy pontosított földrengésvizsgálat és

károsodáselemzés végrehajtásához. Az üzemeltetési céllal készült EHR nem elegendő a hidak pontos leírásához, így a hidakat első körben osztályokba soroltam és típushidakat választottam ki a vizsgálatok elvégzéséhez, melyek támpontot adhatnak a hídállomány teljesítőképességének becsléséhez. Az adatbázis további adatokkal való feltöltése elengedhetetlen a rendszerszintű kiértékeléshez, így megterveztem és ajánlatot tettem egy háromszintű bővítési folyamatra, ahol megadtam a kiegészített adatbázis struktúráját is [S5].

Az adatbázis ~12000 közúti hidat tartalmaz (6.a ábra), melyek többsége kis fesztávú, egynyílású híd. Földrengés szempontjából a hosszabb (>10 m) nyílásközű (6.b ábra), többtámaszú hidak kritikusak; melyek többnyire elsőrendű utakon (autópálya, autótú) helyezkednek el. Az elsőrendű utak hídjainak értéke a teljes hídállomány 80%-át teszi ki, ezek alapján az osztályozást csak elsőrendű utakra végeztem el (~3200 db híd).



6. ábra Meglévő hidak (piros – egynyílású; fekete – többnyílású). a) összes híd; b) 10 m-nél nagyobb fesztávú hidak.

1. táblázat Hidak besorolása felszerkezeti rendszer és anyag, relatív számuk és értékük alapján.

Felszerkezet rendszere/anyaga	Darabszám (%)	Érték (%)
<b>Vasbeton</b>	<b>83.1</b>	<b>44.4</b>
Előregyártott gerendás	49.9	32.6
Monolit lemez	24.1	5.5
Monolit keret	7.6	0.8
Feszített szekrény	0.7	4.2
Egy- vagy kétcellás szekrény	0.7	1.3
<b>Acél</b>	<b>1.0</b>	<b>12.4</b>
Szegecselt rácsostartó	0.4	4.7
Hegesztett tartó	0.4	3.5
Szekrénytartó ortotróp pályával	0.2	4.2
<b>Öszvér</b>	<b>1.3</b>	<b>5.7</b>
Öszvér I-tartó	1.0	1.7
Öszvér szekrénytartó	0.3	4.0
<b>Boltozatok, beton/vasbeton ív, cső,tubosiderek</b>	<b>9.0</b>	<b>1.2</b>
Tubosider	5	0.9
Beton/vasbeton cső	3	0.2
Kő vagy téglaboltozat	1	0.1
<b>Speciális szerkezetek (ívhidak, ferdekábeles hidak, Duna hidak)</b>	<b>2.3</b>	<b>33.9</b>

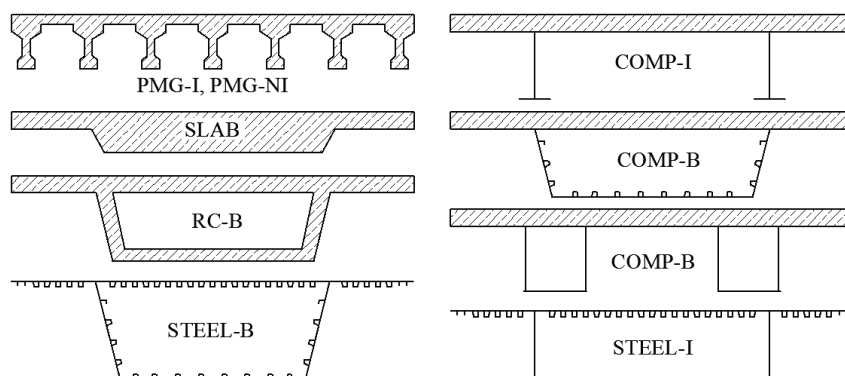
A következő lépésként a hidakat a felszerkezet rendszere és anyaga, relatív előfordulás és relatív érték szerint osztályokba soroltam (1. táblázat). A csoportosítás alapján látható, hogy a magasabb rendű utakon lévő hídjaink többsége (>83%) vasbeton híd, emellett a vasbeton hidak relatív értéke meghaladja a teljes hídállomány értékének 40%-át. Értéküket tekintve nagy súllyal vannak jelen acél és öszvér, valamint speciális nagy hídszerkezetek (Duna hidak, völgyhidak). Utóbbiak nagyban hozzájárulnak a teljes állomány összértékéhez, azonban számuk viszonylag kicsi (<5%). Speciális kialakításuk miatt egyedi vizsgálatot igényelnek, melyekből általános megállapítások nem vonhatóak le. A speciális hídszerkezeteken kívül további osztályokat is elhagytam: 1) csövek, átereszek, földbeágyazott szerkezetek, vizsgálatuk teljesen más megközelítést igényel, mint egy hagyományos híd, károsodásuk nem jár jelentős anyagi vonzattal; 2) szegecselt acél rácsostartó speciális vizsgálatokat igényel,

tényleges állapotuk felmérése lenne szükséges; 3) vasbeton keretek hasonlóak az átereszekhez, kis fesztávval jellemezhetőek, nem érzékenyek földrengésre.

Végül 8 típusú hidat határoztam meg (2. táblázat, 7. ábra), figyelembe véve egyéb besorolási szempontokat is (pl. hagyományos saru vagy monolit kapcsolat; integrál vagy hagyományos hídfő stb.) szakirodalmi példák alapján. A kiválasztott hidak jól reprezentálják magasabb rendű utakon lévő hidakat. A 2. táblázat szerint a leggyakrabban alkalmazott szerkezeti típus a sűrűbordás híd (kb. 1600 híd, ~50%), illetve a vasbeton lemez híd (~24%). A többi híd egy- vagy többnyílású folytatólagos gerendahíd különböző felszerkezeti rendszerrel.

2. táblázat Kiválasztott típusú hidak elsőrendű utakon.

No.	Hídostály	Rövidítés	Saru típusa	Támasz típusa	Relatív számuk (%)
1	Előregyártott gerendás	PMG-I	Monolit	Több pilléres	45.0
2	Előregyártott gerendás	PMG-NI	Elasztomer+monolit	Több pilléres	5.0
3	Vasbeton lemez	SLAB	Monolit	Több pilléres	24
4	Vasbeton szekrény	RC-B	Hagyományos saru	Egy pilléres	1.4
5	Öszvér gerenda	COMP-I	Hagyományos saru	Több pilléres	1
6	Öszvér szekrény	COMP-B	Hagyományos saru	Több pilléres	0.3
7	Acél gerenda	STEEL-I	Hagyományos saru	Egy pilléres	0.4
8	Acél szekrénytartó	STEEL-B	Hagyományos saru	Egy pilléres	0.2



7. ábra Az egyes típusú hidak tipikus keresztmetszetei.

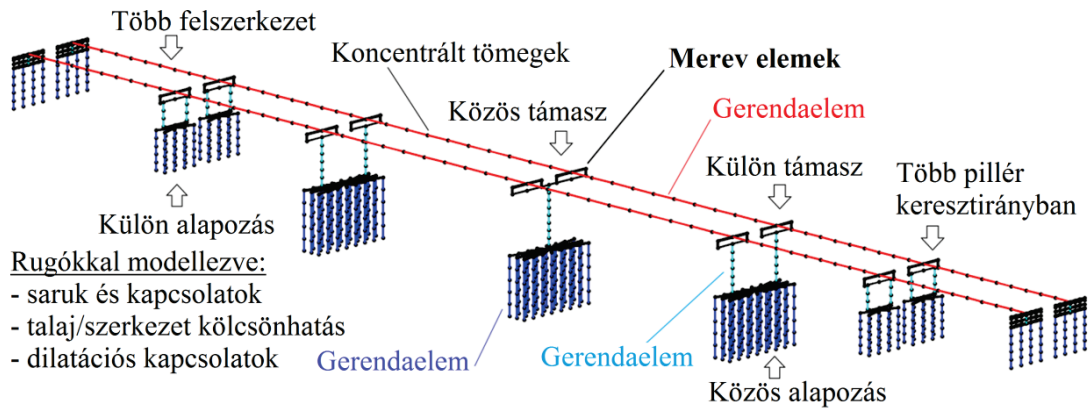
Utolsó lépésként statisztikai eszközökkel meghatároztam a típusú hidakat leíró szerkezeti paraméterek (támaszközök száma, pillérmagasság, szélesség, nyíláshossz stb.) tartományát. Csak a sűrűbordás (PMG) és lemez (SLAB) hidak rendelkeznek kellően nagy számmal ahhoz, hogy reprezentatívnek lehessen mondani a meghatározott paramétereket. Ennek értelmében paraméteres vizsgálatot csak a PMG és SLAB hidakra végeztem a kutatás során, míg a többi híd esetében egy olyan 30 hídból álló portfóliót hoztam létre tervezőcégekkel való konzultációk alapján, mely az összes hídostályt megfelelően reprezentálja, gyakran alkalmazott vagy fontos hidakból áll össze.

## 4. Numerikus modellfejlesztés

A nemlineáris dinamikai analízishez kidolgoztam az egyes típusú hidak numerikus végeleemes modelljét [S9]. Egy integrált rendszert hoztam létre, mely az adatbázisból lekérdezi az adatokat, majd hidanként automatikusan megépíti a szerkezet modelljét és végrehajtja a kiválasztott analízist. A szerkezeti elemek rúdelemekből épülnek fel, a különböző kapcsolatokat és megtámasztásokat nemlineáris rugókkal vettem figyelembe (8. ábra). A modellgeneráló algoritmust úgy készítettem el, hogy figyelembe tudja venni a következőket: 1) több felszerkezet; 2) keresztirányban több pillér; 3) közös vagy egyedi támasz több felszerkezet esetén; 4) közös vagy egyedi alapozás; 5) híd és az egyes támaszok



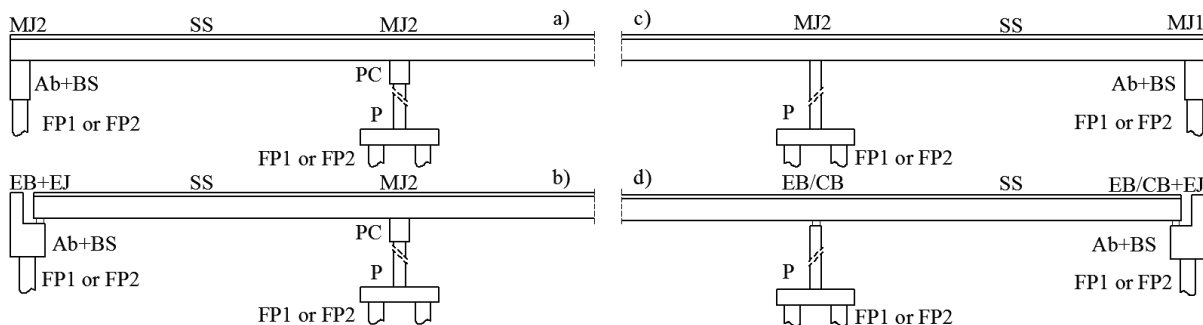
ferdesége külön-külön; 6) felszerkezet megszakítása bármely pontban (pl. dilatáció kialakítása támaszoknál). Továbbá az egyes szerkezeti elemek globális méretei (pillérmagasság támaszonként) és keresztmetszetei egyedileg definiálhatóak.



8. ábra Hidak általános numerikus modellje.

3. táblázat Hídkomponensek, alkalmazott elemek és anyagmodellek összefoglalása.

Komponens	Kód	Elem	Anyagmodell	Modellezés leírása
Felszerkezet	SS	elasticBeamColumn	Elastic	Rugalmas tulajdonság
Pillér fejgerenda	PC	elasticBeamColumn	Elastic	Rugalmas tulajdonság
Monolit kapcsolat 1	MJ1	ZeroLength	Elastic	Merev minden irányban
Monolit kapcsolat 2	MJ2	ZeroLength	Pinching4 Steel01	Nyírási vas ciklikus viselkedése Beton-beton súrlódás modellezése
Elasztomer saru	EB	ZeroLength	Steel01	Merevség: elasztomer; Folyás: dinamikus súrlódás
Hagyományos saru	CB	ZeroLength	Elastic	Egyes irányokban merev
Dilatáció	EJ	ZeroLength	ElasticPPGap	Merev elem és hézag (csak nyomásra)
Pillér	P	dispBeamColumn	Concrete01 Concrete01 Steel01	Normál beton szálak Abroncsolt beton szálak Betonacél szálak
Hídfü	Ab	elasticBeamColumn	Elastic	Rugalmas tulajdonság
Háttöltés	BS	ZeroLength	ElasticPPGap	Passzív földnyomás csak nyomás alatt
Sikalapozás	FS	ZeroLength	Elastic	Elmozdulási és fordulási lineáris rugók
Cölöpalapozás	FP1	ZeroLength	Elastic	Elmozdulási és fordulási lineáris rugók
	FP2	elasticBeamColumn	Elastic	Rugalmas cölöp (nemlineáris gerenda alternatíva)
		ZeroLength	TzSimple1	Köpenysúrlódás modell
			QzSimple1	Talpellállás modell
			PySimple1	Vízszintes viselkedés modell



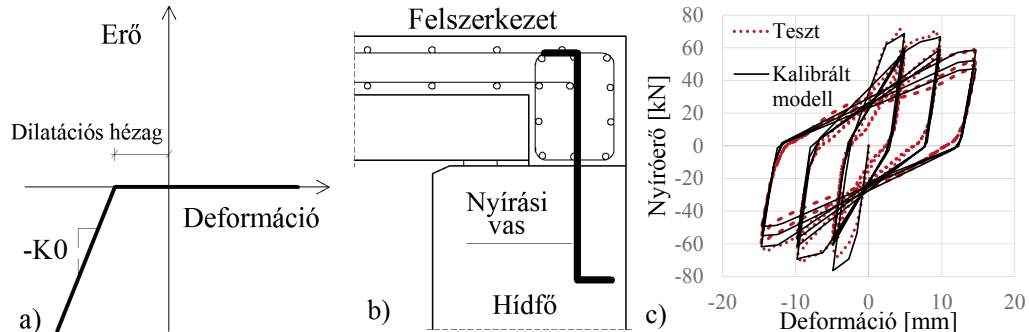
9. ábra Tipikus kialakítások: a) PMG-I; b) PMG-NI; c) SLAB; d) egyéb gerendahidak. Kódok: 3. táblázat.

A károsodások megbízható kiértékeléséhez a nemlineáris dinamikai analízis során az elemek tényleges ciklikus-képlékeny viselkedését megbízható módon leíró anyagmodellek alkalmazása szükséges. Az egyes hídkomponensek modellezését foglalja össze a 3. táblázat, a 9. ábrán pedig az egyes híd típusokhoz alkalmazott modellezési megközelítések láthatóak.

Földrengés során a pillérekben képlékenyedés várható. A pillérek ciklikus-képlékeny modelljének kidolgozása mellett 4 fontos részlet modellezésének kérdésére is kitértem,

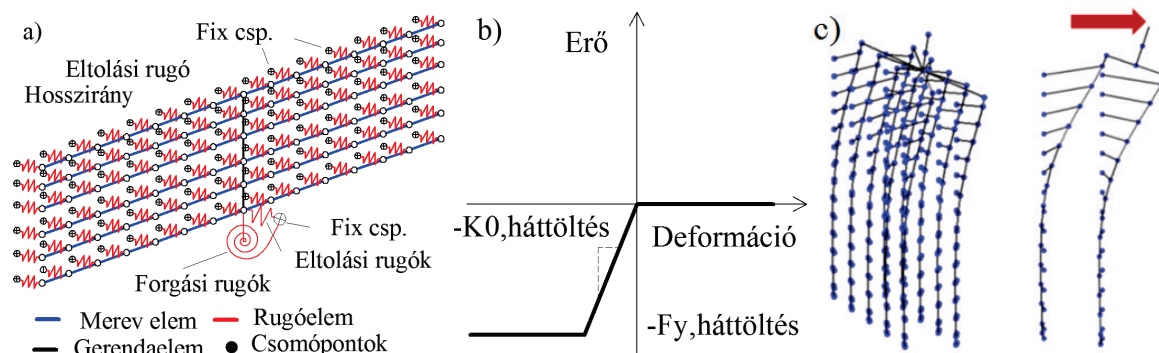


melyek nem megszokottak a hétköznapi tervezésben, ugyanakkor nagy mértékben befolyásolják a szerkezeti válaszokat. Dilatáció esetén modelleztem a szerkezeti elemek ütközését (10.a ábra). Numerikus modellt dolgoztam ki a nyírási vassal ellátott monolit kapcsolatok esetére (10.b ábra): párhuzamosan kapcsoltam egy bilineáris beton-beton súrlódási modellt, valamint a nyírási acélbetét viselkedését leíró szakirodalmi laboratóriumi kísérletekre kalibrált ciklikus anyagmodell (10.c ábra) [S3].



10. ábra a) Ütközés modellezése. b) Nyírási vassal ellátott monolit kapcsolat. c) Nyírási vas kalibrált ciklikus anyagmodellje.

A háttöltés megtámasztó hatása jelentős lehet, főleg integrált hídfő esetén. Ezt merev pontrácsra helyezett bilineáris rugókkal vettem figyelembe (11.a-b ábrák). Ezenkívül kidolgoztam egy nemlineáris Winkler-ágyazású cölöpalapozás modellt is, melynek paramétereit a magyar gyakorlattal összhangban határoztam meg (11.c ábra) [S12].



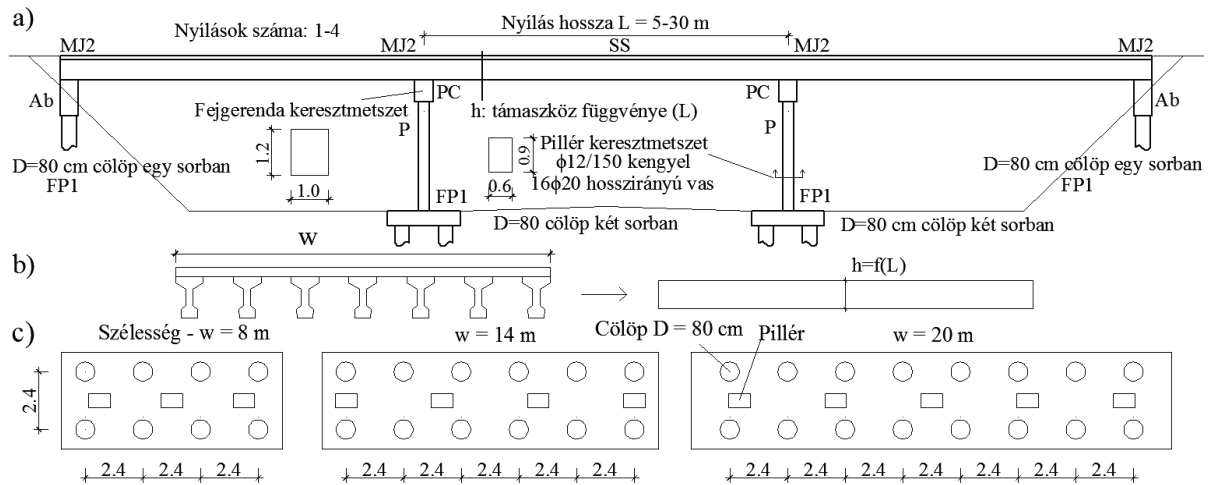
11. ábra a) Háttöltés modellezése nemlineáris rugókkal. b) Alkalmazott rugókarakterisztika. c) A kidolgozott cölöpalapozási modell illusztrálása.

## 5. Előzetes paraméteres vizsgálatok

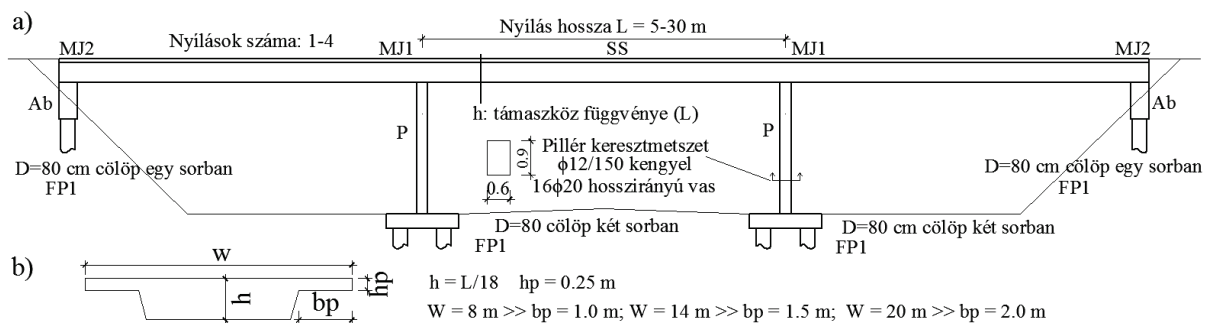
A földrengésre való tervezés hiánya miatt a hidak szeizmikus viselkedése nem ismert. Ennek feltárására hagyományos sarukkal rendelkező gerendahidak esetén egy közelítő paraméteres vizsgálatot hajtottak végre [7]-ben. A kutatás keretein belül monolit kapcsolattal rendelkező PMG-I és SLAB hidakat vizsgáltam hasonló módon [S15]. A vizsgálatokat lineáris modális válaszspektrum analízissel végeztem el [S14], ahol a nemlineáris elemeket kezdeti merevségükkel vettem figyelembe. Kitértem a háttöltés csak nyomásnak ellenálló viselkedésének lineáris modellben való alkalmazására is. A lineáris modellezés erősen közelítő eredményeket ad, azonban segítségével képet kaphatunk a lehetséges kritikus komponensek és szerkezeti kialakítások köréről.

A vizsgált integráltan épített sűrűbordás (PMG-I) és lemezhidak (SLAB) tipikus kialakítását mutatja a 12. és 13. ábra. A paraméteres vizsgálat paraméterterét az adatbázis statisztikai elemzésével vettem fel. Ezek a hidak nagyon gyakran alkalmazott szerkezetek,

néhány szerkezeti változó, mint a pillér keresztmetszete, hídfő kialakítása, pillérösszefogó gerenda méretei állandóak, egyéb paraméterek (pl. felszerkezet magassága, gerendák kiosztása) pedig a támaszköz függvényében változnak (4. táblázat).



12. ábra PMG-I hidak tipikus kialakítása: a) oldalnézet; b) keresztmetszet; c) cölöpalapozás kialakítása különböző szélességek esetén.

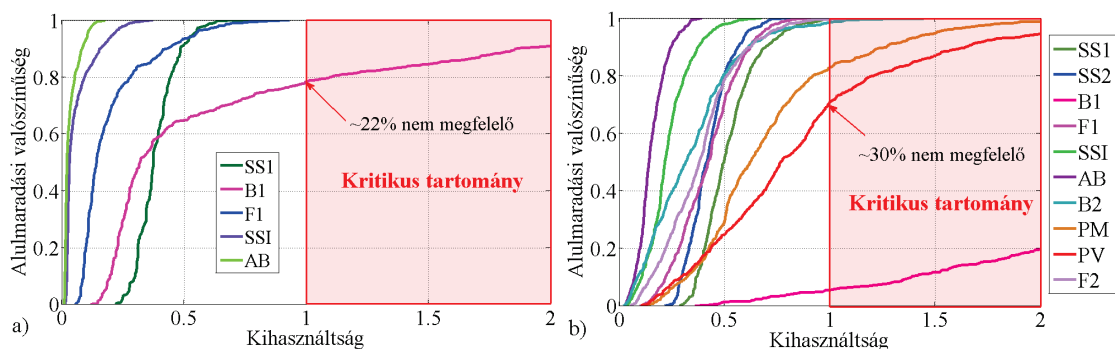


13. ábra SLAB hidak tipikus kialakítása: a) oldalnézet; b) keresztmetszet.

4. táblázat A paraméteres vizsgálatok paramétertere (törékenységi vizsgálathoz alkalmazott paraméterek pirossal jelölve).

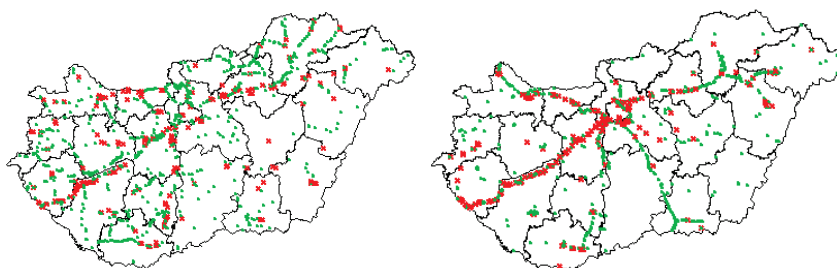
Paraméter	Szélesség			Kialakítás jelölése
	8 m	14 m	20 m	
Nyílások száma		1-2-3-4		W08-W14-W20
Pillérmagasság		2-4-6-8-10 m		S1-S2-S3-S4
Nyílás mérete		5-10-15-20-25-30 m		L05-L10-L15-L20-L30
Pillérek száma keresztirányban	3	4	5	-
Alapozás - hídfő	1x4 D=80	1x6 D=80	1x8 D=80	-
Alapozás - pillér	2x4 D=80	2x6 D=80	2x8 D=80	-

Tipikus kialakítást, vasalást, keresztmetszeteket feltételezve meghatároztam az egyes szerkezeti komponensek szabványos ellenállását, majd számítottam a megengedhető maximális talajgyorsulást, mely éppen teljes kihasználtságot eredményez az adott komponensben. Az adatbázisban lévő összes hídhöz elhelyezkedésük alapján hozzárendeltem a tervezési talajgyorsulás értékét, majd meghatároztam az egyes komponensek kihasználtságát. Létrehoztam a hídkomponensek kihasználtságainak empirikus eloszlásfüggvényeit (14. ábra), mely betekintést ad arról, hogy mely komponensek lehetnek kritikusak és azok a hidak hány százalékánál fordulnak elő.



14. ábra Hídkomponensek kihasznátságának empirikus eloszlásai: a) egynyílású; b) többnyílású hidak. SS1-SS2 – felszerkezet (+) és (-) nyomatékra; B1-2 – hídfő és pillér monolit kapcsolat; PM – pillér hajlítás; PV – pillér nyírás; F1-2 – hídfő, pillér alapozás; SSI – háttöltés; AB – hídfő.

Az eredmények szerint mind egynyílású, mind többnyílású esetben megfelelően viselkedik a felszerkezet, háttöltés, hídfő és alapozás. Egynyílású hidaknál a hídfő-felszerkezet monolit kapcsolata kritikus. Ez a kapcsolat többnyílású hidak többségénél szintén nem megfelelő, illetve a pillér nyírási és hajlítási teherbírása sem elégséges a hidak 20-30%-nál. A kritikus hidakat térképen is megjelöltem (15. ábra), mely fontos információt szolgáltat a esetleges megerősítési terv kidolgozásához.



15. ábra Kritikus (piros) és megfelelő (zöld) hidak. a) Egynyílású hidak hídfő kapcsolat tönkremenetel. b) Többnyílású hidak pillér tönkremenetel.

## 6. Törékenységi vizsgálatok

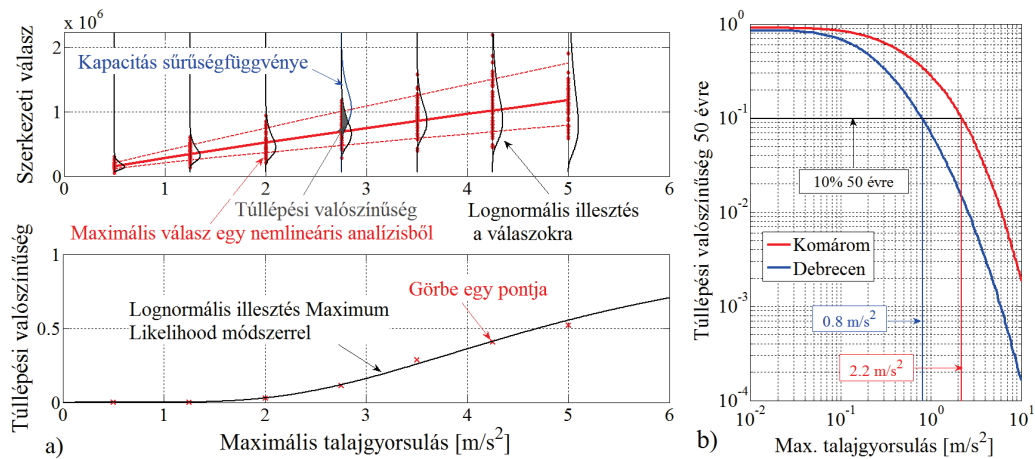
### 6.1. Vizsgálatok elve

A károsodások elemzéséhez szükséges törékenységi görbe előállítását szemlélteti a 16.a ábra. A szerkezet numerikus modelljén kellő számú nemlineáris dinamikai analízist hajtunk végre különböző intenzitási szinteken. Ezután a maximális válaszok (belső erők, deformációk stb.) és az adott károsodási szint kapacitásának összevetésével meghatározzuk a károsodás túllépési valószínűségét az intenzitás függvényében [14]. A kapott törékenységi görbe feltételes valószínűséget ad meg, a tönkremeneteli valószínűség az intenzitások bekövetkezési valószínűsége ismeretében (lásd 1. ábra) számítható a veszélyeztetettség görbe segítségével (16.b ábra), melyből származtatható az úgynevezett megbízhatósági index ( $\beta$ ) is. Utóbbit mind a komponensekre, mind a teljes rendszerre, soros rendszert feltételezve számítottam. A kutatás során a rendszerhez rendelt megbízhatósági indexet alkalmaztam a vizsgált hidak szeizmikus teljesítőképességének globális összehasonlítására.

Három károsodási szintet határoztam meg az EC8-3-mal összhangban: enyhe károsodás (LS1), közepes károk (LS2) és teljes összeomlás (LS3). Mindhárom károsodási szinthez meghatároztam az egyes hídkomponensek kapacitását lognormális eloszlást alkalmazva.

Kétféle törékenységi vizsgálatot hajtottam végre [S3],[S15]: 1) paraméteres vizsgálat (lásd 4. táblázat) monolit kapcsolatú PMG-I hidakra, jelentőségükre és a nagy

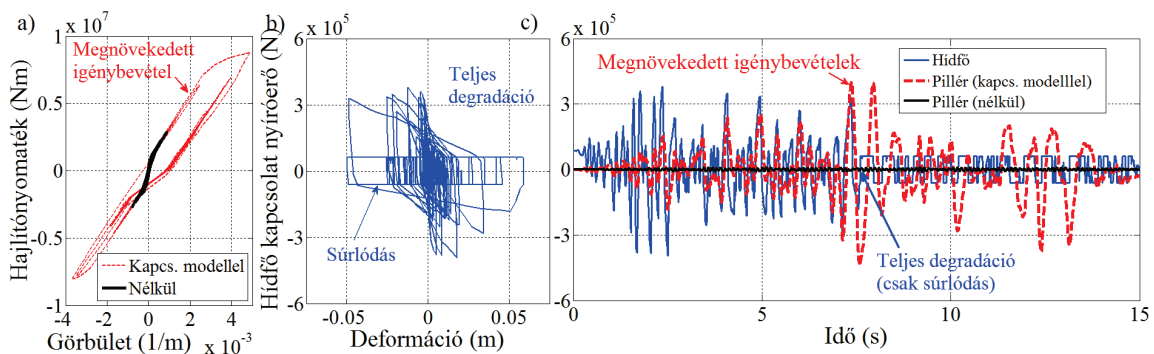
mintaszámra tekintettel; 2) egyedi részletes vizsgálat a hídportfolióként összeállított 30 tipikus meglévő közúti hídra.



16. ábra a) Törekenységi görbe előállítás. b) Veszélyeztetettség görbék (C talaj).

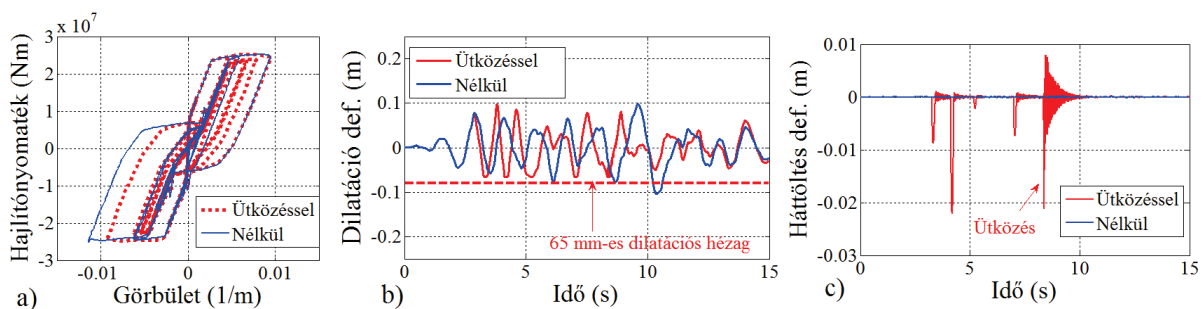
## 6.2. Modellezési és analízis kérdések

A törekenységi analízis előtt megvizsgáltam a különböző modellezési feltételezések és megközelítések hatását a számított igénybevételekre és a törekenységi görbére. A 17. ábra a monolit kapcsolat nemlineáris ciklikus viselkedésének modellezésének fontosságát mutatja. Az általam kidolgozott ciklikus degradálódó modell figyelembe tudja venni a nyírási betonacél teljes tönkremenetelét. A hídfőnél bekövetkező károsodás során az igénybevételek átrendeződnek és a pillérekre többlet igénybevétel adódik át.



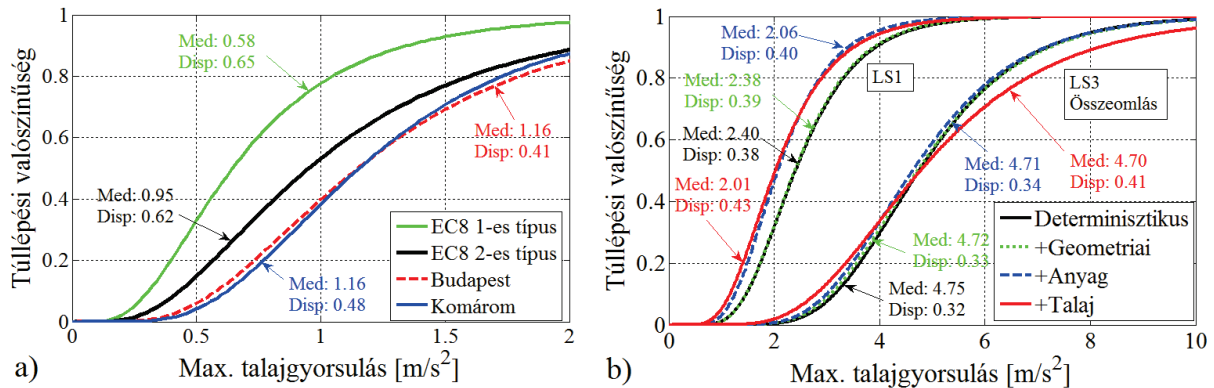
17. ábra Monolit kapcsolat modellezésének hatása: a) pillér nyomaték-görbület ábra; b) hídfő kapcsolat viselkedése; c) hídfő és pillér kapcsolat nyíróerő alakulása.

A 18. ábra az ütközés hatását mutatja a dilatációs szerkezetről: a felszerkezet mozgásai korlátoltak, ez pedig kisebb igénybevételeket okoz a pillérekben. Ezzel egyidőben az ütközés miatt lökészerűen megnövekedik a háttöltés deformációja.



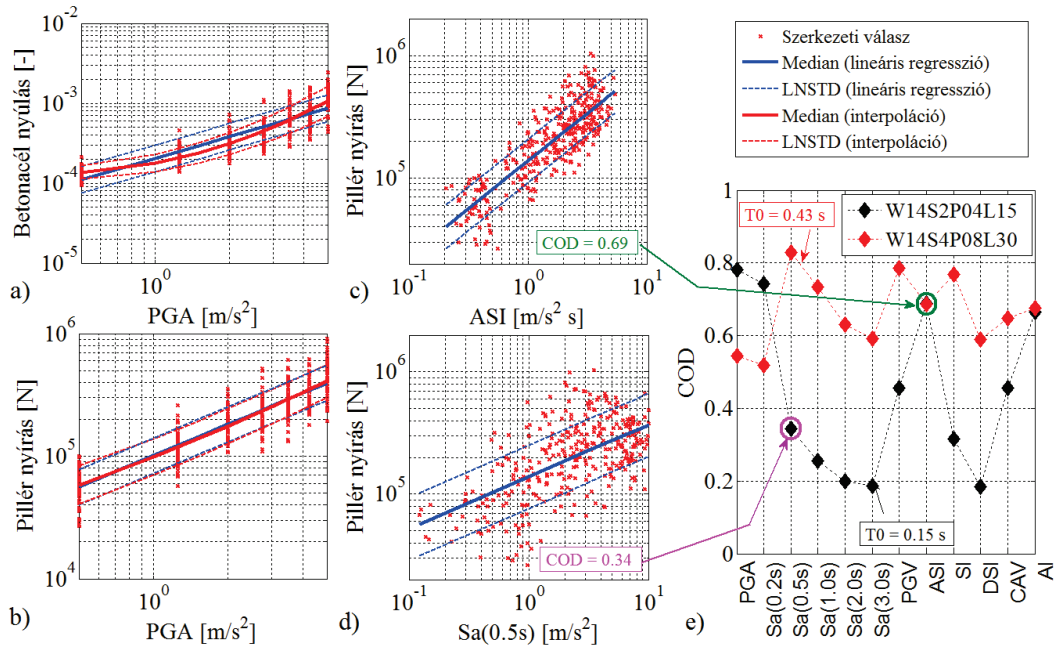
18. ábra Ütközés hatása a dilatációnál: a) pillér nyomaték-görbület ábra; b) dilatáció mozgása; c) háttöltés deformációja.

A 19.a ábra szerint a törékenységi görbét nagy mértékben befolyásolja, hogy milyen célspektrumhoz választott földrengésrekordokkal hoztuk őket létre. Az ábrán az is látszódik, hogy két különböző helyszínre (Budapest és Komárom) meghatározott törékenységi görbe csak kis mértékben tér el egymástól.



19. ábra Törékenységi görbék összehasonlítása. a) Különböző célspektrumok alkalmazása. b) Geometria, anyagtulajdonságok és talaj bizonytalanságának beépítése.

A szerkezeti válaszok érzékenyek lehetnek egy-egy bemenő paraméter kis mértékű megváltozására. A tényleges geometria, az anyagminőségek és a talaj merevsége bizonytalan. A 19.b ábra a felsorolt paraméterek valószínűségi változóként való kezelésének hatását mutatja: a geometriai bizonytalanság elhanyagolható mértékben, míg az anyagi és talajjal kapcsolatos bizonytalanságok jelentős mértékben befolyásolhatják a törékenységi görbe alakját (medián és szórás), így a számított tönkremeneteli valószínűséget is.



20. ábra a-d) Szerkezeti válaszok és intenzitás közötti összefüggés szemléltetése. e) Egyes intenzitásjellemzők korrelációjának mértéke a pillér nyírásival PMG-I hidak esetén.

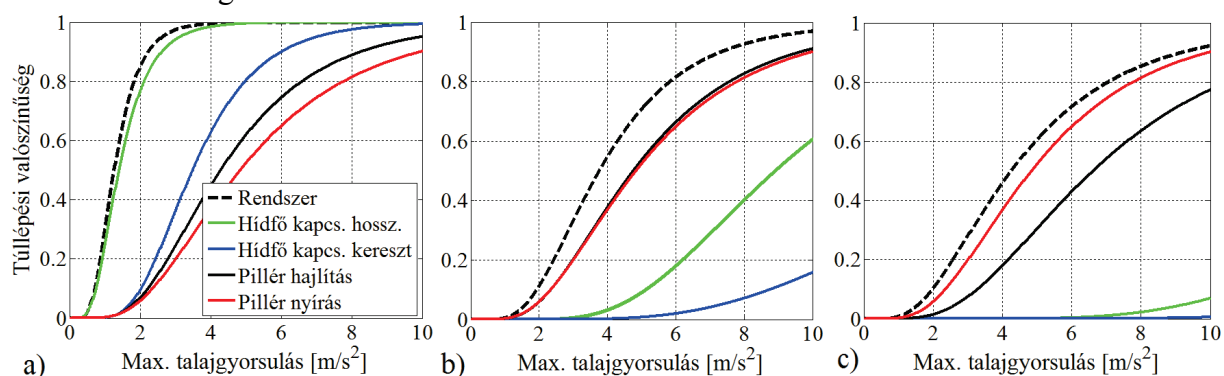
A szakirodalomban gyakran lognormális térben lineáris összefüggést alkalmaznak (20.c-d ábra) a szerkezeti válaszok és az intenzitás közötti kapcsolat felvételére. Az általam alkalmazott eljárás intenzitás szintenként diszkrét pontokban adja ezt meg, mellyel jóval pontosabban követhető a tényleges összefüggés (20.a-b ábra). Az említett lineáris összefüggés egyes válaszokat (pl. a pillér nyíróerejét) jól, az erősen képlékenyedő komponensek válaszát (pl. pillér betonacél nyúlás) pedig nem megfelelően írja le.



Az általam alkalmazott rekordkiválasztó eljárás a helyszínre jellemző veszélyeztetettséggel összhangban lévő intenzitás eloszlások szerint válogatja ki a legmegfelelőbb rekordokat. Ilyen kiválasztás esetén a tönkremeneteli valószínűség nem függ attól, hogy mely intenzitás (jelen esetben maximális talajgyorsulás) függvényében határozzuk meg a törékenységi görbét. Ettől eltérő kiválasztás esetén törekedni kell arra, hogy olyan intenzitásjellemzőt válasszunk, mely erős korrelációban van a vizsgált szerkezeti válaszokkal. Ezt a korrelációt értékeltem minden híd esetén többféle intenzitásjellemzőt figyelembe véve. A 20.e ábra például azt mutatja, hogy a szerkezeti válaszok erős korrelációban vannak a választ leíró mértékadó rezgés periódusidejéhez tartozó spektrális gyorsulással. Mind a sűrűbordás, mind a lemezhidak esetén a kis periódusidők miatt a maximális talajgyorsulás (PGA), a gyorsulási spektrum intenzitás (ASI) és az Arias intenzitás (AI) megfelelően jól írja le a válaszokat.

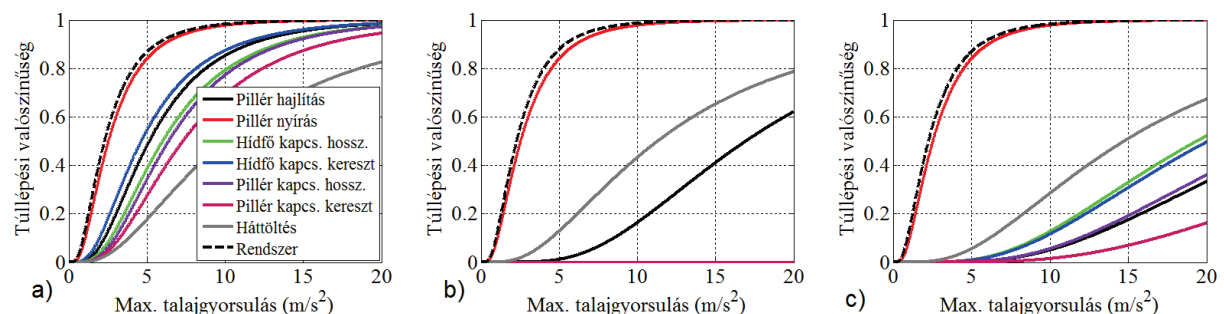
### 6.3. Szerkezetek értékelése törékenységi görbék alapján

A komponensekhez tartozó törékenységi görbék alapján meghatározható, hogy mely hídkomponens a legérzékenyebb a földrengési teherre, a teljes szerkezet törékenységi görbéjéből pedig a híd várható károsodásának valószínűsége számítható. A sűrűbordás PMG-I hidak paraméteres törékenységi analízise igazolta az előzetes vizsgálatok konklúzióit (21. ábra). Nagy valószínűséggel a hídfő kapcsolat károsodása következik be (LS1), míg az összeomlást (LS3) a pillérek nyírási teherbírásának kimerülése okozza, a hajlítási teherbírás az esetek többségében kedvezőbb.



21. ábra Törékenységi görbék tipikus PMG-I kialakításra. a) LS1; b) LS2; c) LS3.

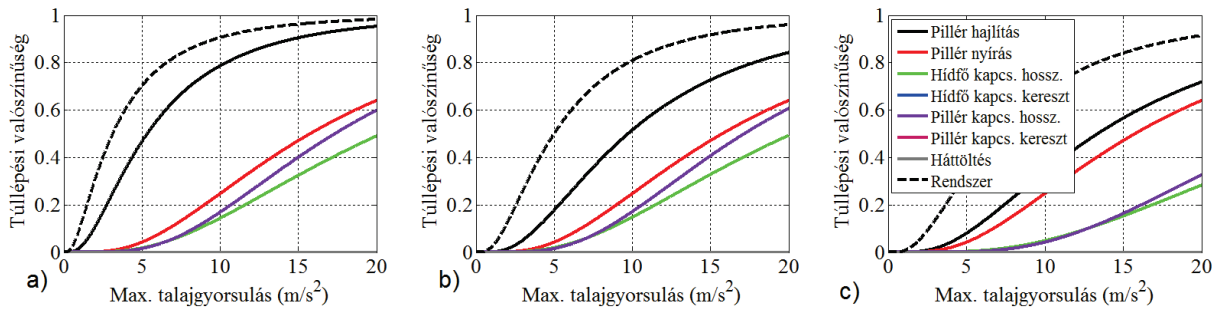
A pillérek gyenge nyírási vasalása jellemző a többi vizsgált híd típusra (lemezhidakra, elasztomer saruval is épített előregyártott gerendás hidakra, hagyományos sarus vasbeton és ösvér gerendahidakra). Egy elasztomer sarukkal épített előregyártott gerendás híd törékenységi görbéje azt mutatja, hogy a nyírási tönkremenetel még azelőtt bekövetkezik, hogy a többi komponens károsodna (22. ábra).



22. ábra PMG-NI mintahíd törékenységi görbéi: a) LS1; b) LS2; c) LS3.

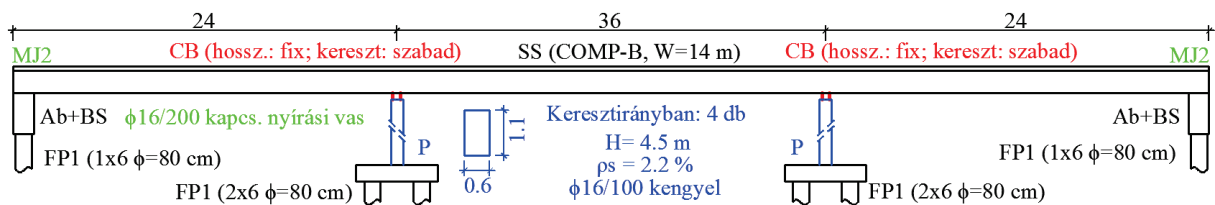
Kivéteklént a könnyebb, acél felszerkezetű hidak esetén tapasztaltam a – rideg – nyírási tönkremenetelnél kedvezőbb hajlítási pillér tönkremenetelt (23. ábra).



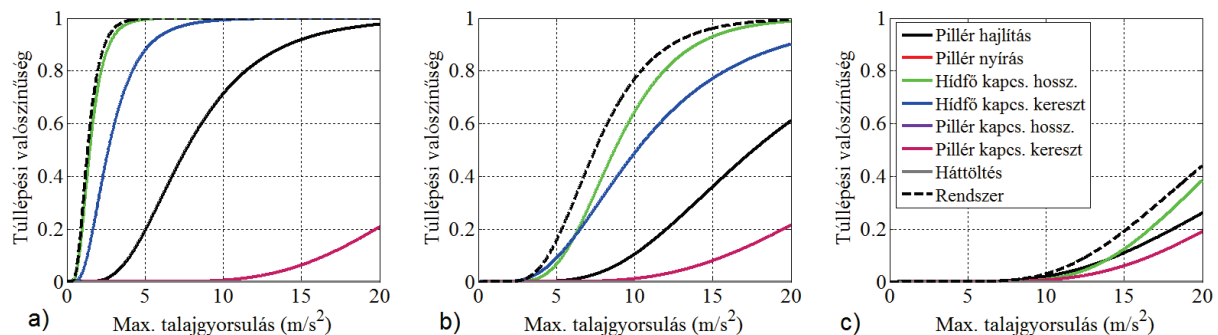


23. ábra STEEL-B mintahíd törékenységi görbéi: a) LS1; b) LS2; c) LS3.

A 24. ábrán látható kialakítású öszvér szekrényhid külön figyelmet érdemel kedvező viselkedése miatt. A hídfőknél monolit kapcsolat, míg a pilléreknél hosszirányban fix, keresztirányban szabadon mozgó hagyományos saru található. Ennek eredményeképpen hosszirányban a hídfő/háttöltés veszi fel a szeizmikus erők nagy részét, keresztirányban pedig a pillér el van szigetelve. A törékenységi görbék alapján (25. ábra) a hídfő kapcsolat itt is kritikus, az összeomlás előtt a kapcsolat teljesen tönkremegy, az összeomlás pedig kis valószínűséggel ugyan, de a szerkezet leesésével következik be. Ez a kialakítás olyan, mintha mindkét irányban szeizmikus szigetelés lenne, a pillérré minimális igénybevétel jut.



24. ábra Speciális kialakítású öszvérhid illusztrációja.

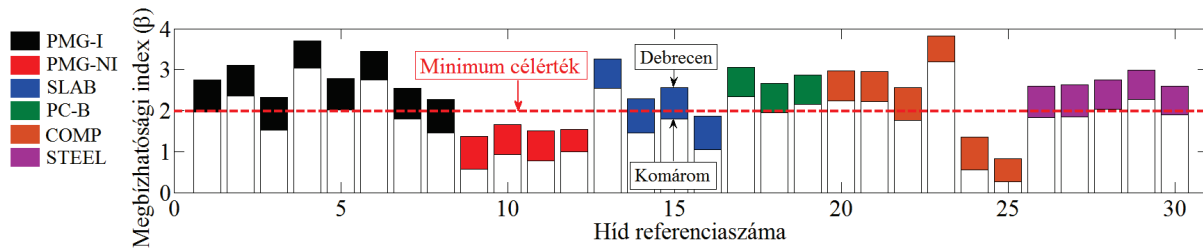


25. ábra A speciális kialakítású öszvérhid (24. ábra) törékenységi görbéi. a) LS1; b) LS2; c) LS3.

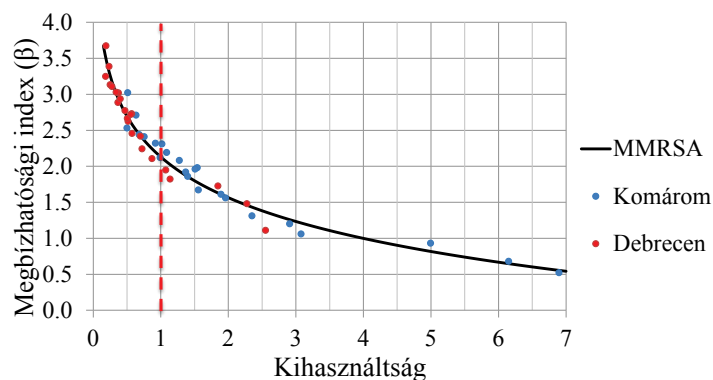
## 6.4. Szerkezetek megbízhatósági szintjei

A teljes szerkezetre vonatkozó törékenységi görbe alapján számítottam a teljes szerkezet, mint rendszer tönkremenetelének valószínűségét, illetve a megbízhatósági indexet Komárom (legmagasabb szeizmicitás) és Debrecen (legalacsonyabb szeizmicitás) térségére [S3],[S7] (26.ábra). A szakirodalom alapján [15] meghatározott minimális célértéket (1.98) figyelembe véve a sűrűbordás (PMG-I) és hagyományos sarus vasbeton szekrény (PC-B); öszvér (COMP) és acél (STEEL) gerendahidak elérik a minimális biztonsági szintet az esetek többségében. Ezzel szemben a lemez (SLAB) és nem integráltan épített sűrűbordás (PMG-NI) hidak rosszabb teljesítőképességgel rendelkeznek. Néhány esetben (lásd 24-es és 25-ös híd a 26.ábrán) a megbízhatósági szint elfogadhatatlanul alacsony, melyet a szeizmikus tervezés hiánya és a nem megfelelő koncepcionális tervezés, szerkezeti kialakítás okoz. A 24-es öszvérhid esetében például a hosszirányban csak egy pilléren elhelyezett fix saru miatt az adott pillér a 115 méteres teljes felszerkezeti tömeggel mozog együtt hosszirányú rezgés

során; keresztirányban pedig két kisebb méretű, kör keresztmetszetű, a keresztirányú rezgésből jelentősen túlterhelt pillér van beépítve. Itt is látható a 24. ábrán bemutatott 23-as híd magas szeizmikus teljesítőképessége, melyet magas megbízhatósági index jellemez.



26. ábra Számított megbízhatósági indexek ( $\beta$ ) a portfólió hidakra összeomlás esetén.



27. ábra Intenzitás alapú tervezés és a hozzárendelhető megbízhatósági index összefüggése.

Az összes vizsgált híd esetén meghatároztam válaszspektrum analízis segítségével a pillér nyírási kihasználtságát szabványos módon két helyszínrre is, majd ehhez hozzárendeltem a megfelelő megbízhatósági indexet (27. ábra). Azt tapasztaltam, hogy az EC szerinti tervezés alapján körülbelül 2.0 megbízhatósági index érhető el szeizmikus terhekre, mely megfelel az ajánlott minimális célértéknek.

## 7. Megerősítési módok vizsgálata

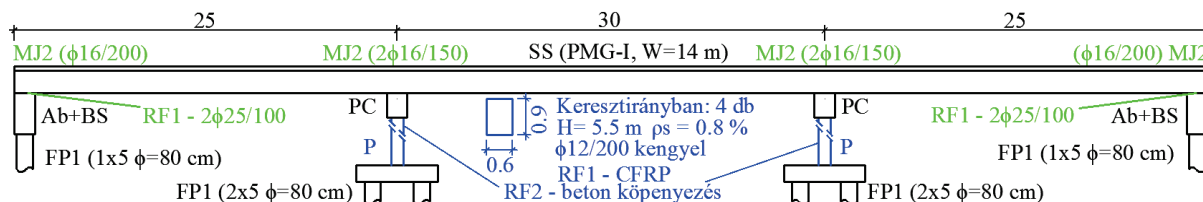
Alapvetően kétféle megerősítési módszer van [S4],[S11]: 1) hagyományos megerősítés, ahol a cél a kialakuló igénybevételekre való megfeleltetés; 2) az igénybevételek csökkentése a periódusidő elhangolásával, az erők megfelelő szétosztásával és/vagy energiaelnyeléssel.

### 7.1. Hagományos megerősítés és szeizmikus szigetelés

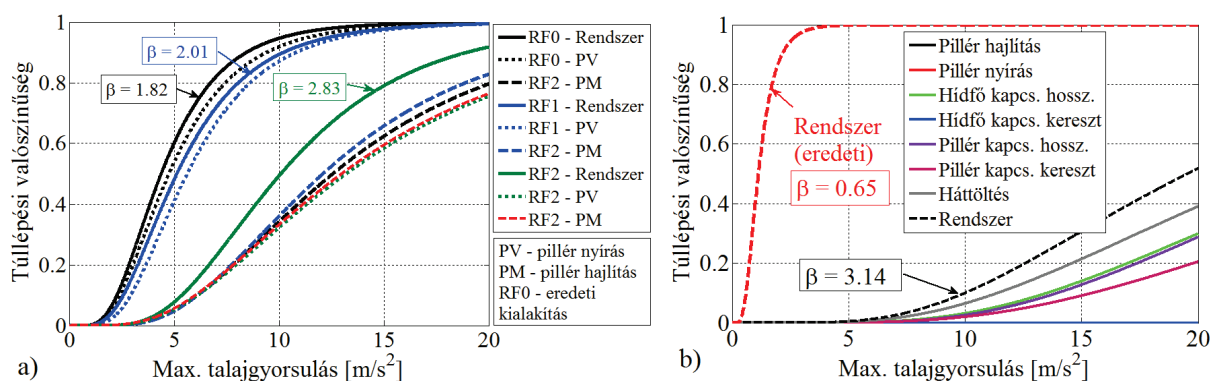
Két alapvetően eltérő viselkedésű reprezentatív szerkezetet (monolit kapcsolatú sűrűbordás híd és nem megfelelően kialakított öszvér szekrényes híd) választottam ki a megerősítések hatékonyságának elemzésére. Minden esetben az volt a cél, hogy Komárom térségére számított megbízhatósági index elérje a 2 körüli értéket.

Az első híd (28. ábra) egy monolit kapcsolatú PMG-I híd, mely esetében a hídfőnél lévő monolit kapcsolatot meg kell erősíteni többlet nyírási vas elhelyezésével (RF1) (megfelelő helyen befűrt lyukakba helyezett betonacélok és injektálás segítségével). Ez az eljárás hosszadalmas és költséges lehet a pályaburkolat megbontása miatt. Az összeomlás a pillér elégtelen nyírási teherbírása miatt alakul ki. A hagyományos megerősítési módok hatékonyan alkalmazhatóak, amennyiben a szerkezeti rendszer alapvetően helyesen van kialakítva, de a szeizmikus igénybevételek miatt kis mértékben meg kell növelni a teherbírást. A példahíd esetében a meglévő 1.82-es megbízhatósági index szálerősítésű polimeres erősítéssel gazdaságosan növelhető a minimális szintre (RF1; 29.a ábra). Ekkor azonban még mindig a

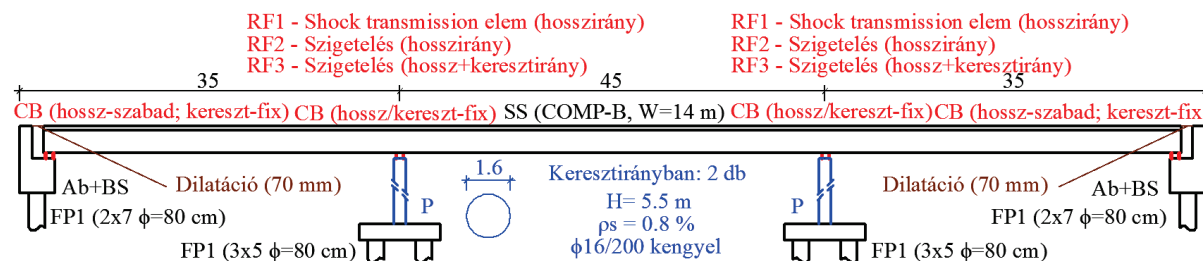
nyírási tönkremenetel dominál, a kedvezőbb hajlítási tönkremenetel eléréséhez ( $\beta=2.83$ ) szükséges nyírási teherbírást beton köpenyezéssel érhetjük el (RF2). A szélerősítésű polimer alkalmazása tipikus sűrűbordás és lemezhidak esetén kifejezetten előnyös a kis helyfelhasználása (autópályák esetén kritikus lehet), valamint relatív költséghatékonysága és könnyű kivitelezhetősége miatt. Robosztusabb pillérek esetén azonban a keresztmetszet arányaitól függően csak a beton köpenyezés jöhet szóba.



28. ábra Monolit kapcsolatú sűrűbordás típusú híd kialakítása és megerősítési módjainak illusztrálása.



29. ábra A vizsgált megerősítések törekenységi görbéi: a) PMG-I híd; b) COMP-B híd.



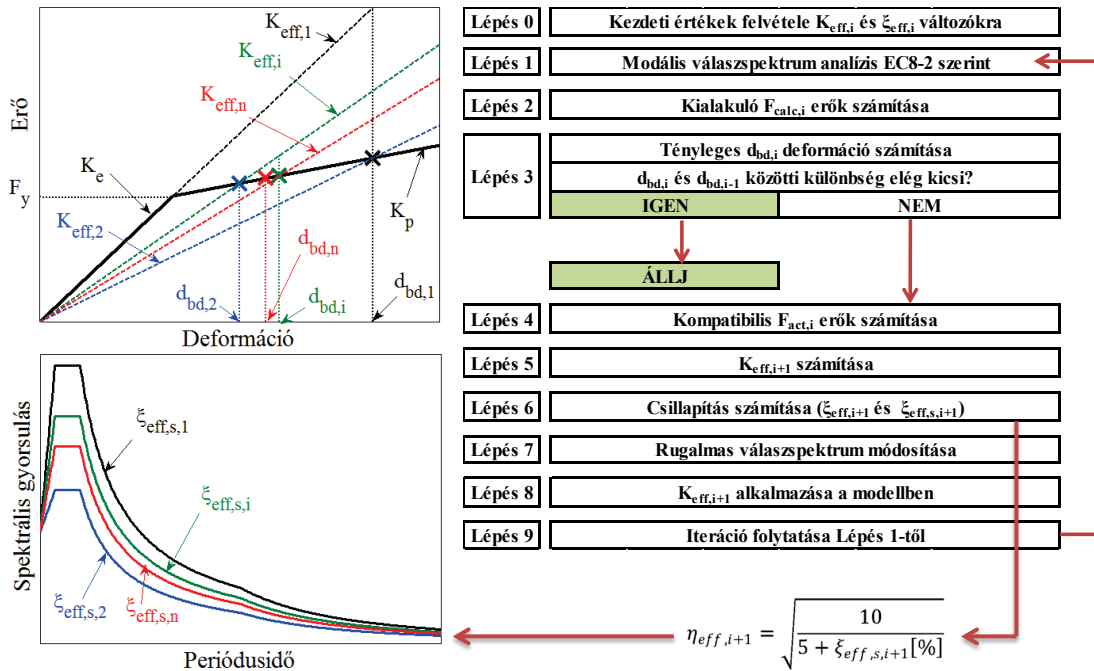
30. ábra Hagyományos sarus öszvér típusú híd kialakítása és megerősítési módjainak illusztrálása.

Olyan esetben, ahol a megerősítés túl nagy befektetéssel jár (pl. egy mederhíd pilléreinél és alapozásának megerősítését el akarjuk kerülni), vagy a szerkezeti kialakítás nem megfelelő, ott a szerkezet viselkedésének megváltoztatása a cél. Ez az eset áll fenn a második példahídnál is (30. ábra). Többféle megerősítési stratégiát vizsgáltam: RF1) terhek szétosztása a pillérek között; RF2) hosszirányú csillapítás; RF3) hossz és keresztirányú csillapítás alkalmazása. Kimutattam, hogy csillapítórendszerek alkalmazása mérsékelt szeizmicitás esetén is igen gazdaságos, a megbízhatóság jelentősen növelhető (29.b ábra;  $\beta=0.65$ -ről  $\beta=3.14$ -re), miközben a költséges pillér és legfőképp alapozás megerősítés elkerülhető.

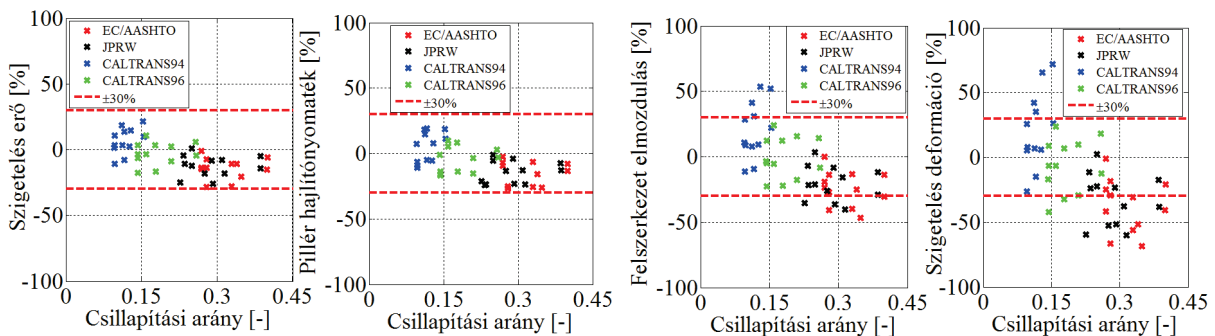
## 7.2. Szeizmikus szigetelés tervezése ekvivalens lineáris analízissel

Mivel a szeizmikus szigetelés egy optimális megoldást nyújthat meglévő szerkezetek megerősítése során, alkalmazása ajánlott. A szigetelés tervezés nehézsége, hogy a szigetelők ciklikus nemlineáris viselkedése és energiaelnyelése a tervezésben használatos lineáris válaszspektrum analízissel csak közelítően vehető figyelembe. Ennek érdekében elemeztem az EC8-2-ben javasolt közelítő ekvivalens lineáris analízis pontosságát nemlineáris

időtörténeti vizsgálatokkal való összehasonlítás alapján. A módszer lényege, hogy a szigetelés energiaelnyelését effektív csillapítással, nemlineáris viselkedését pedig effektív merevséggel vesszük figyelembe. A megoldás iterációt igényel (31. ábra), hogy kompatibilis erőket és deformációkat kapjunk.



31. ábra Ekvivalens lineáris analízis iterációs lépéseinek illusztrálása.



32. ábra Ekvivalens lineáris analízis hibája nemlineáris időtörténeti eredményekhez hasonlítva.

A vizsgálatok során három különböző típusú hídon végeztem összesen 48 ilyen összehasonlító analízist [S13]. A 32. ábra szerint mind a szigetelőben kialakuló erők, mind a pillérek belső erői  $\pm 30\%$ -os hibával határozhatóak meg, míg a deformációk és elmozdulások esetén a hiba 50-75% között mozog. A fentiek alapján egy 1.3-as módosító tényezőt ajánlottam a belső erők korrigálására, illetve egy módszert ajánlottam szigetelők koncepcionális tervezésére, melynek alkalmazhatóságát egy valós híd megerősítése során igazoltam [S2].

### 7.3. Tervezési koncepciók új hidak esetén

Az elvégzett törékenységi és megerősítési vizsgálatok alapján az egyes típusú szerkezetekre tervezési koncepciókat javasoltam, melynek részleteit helyhiány miatt csak a disszertációmban közlök. A koncepciók betartásával és helyes tervezéssel gazdaságos és legalább a minimális megbízhatósági szintet elérő szerkezet tervezhető.

## 8. Összefoglalás

---

Közúti hídjaink szeizmikus viselkedése nem ismert, esetleges károsodásuknak komoly anyagi vonzata és gazdasági következménye lehet. A kutatás részeként kidolgoztam egy kiértékelő keretrendszert, mellyel a teljes hídállomány automatikusan kiértékelhető. A meglévő hídadatbázisban lévő adatok nem elégségesek a hidak megfelelő szintű és megbízhatóságú modellezéséhez, így a hidakat osztályba soroltam, jellemeztem az egyes osztályokat, majd a hídállományt jól jellemző típushidakat választottam ki. Elemeztem a hidak kritikus komponenseit, kialakításait, létrehoztam a hidak törékenységi görbét és számoltam azok megbízhatóságát is. Ezenkívül kiértékeltem az egyes megerősítési módokat, valamint új hidak megfelelő biztonságú tervezéséhez koncepciókat adtam meg. Az eredmények közvetlenül alkalmazhatóak három témakörben is: szeizmikus analízis és tervezés; hidak szeizmikus teljesítőképességének kiértékelése; megerősítések tervezése.

A legfontosabb cél a jövőre nézve az adatbázis bővítése és a teljes hídállomány kiértékelése a kidolgozott keretrendszer segítségével.

## 9. Új tudományos eredmények

---

### *I. Tézis Kapcsolódó publikációk: [S1],[S6],[S16]*

Megvizsgáltam Magyarország szeizmikus veszélyeztetettségét és összehasonlító vizsgálatot végeztem helyszíni és az Eurocode 8-1 által javasolt szabványos spektrumok között.

- I/a Egy valószínűségi szeizmikus veszélyeztetettségi vizsgálati rendszert és egy általános feltételes intenzitásjellemező alapú rekordkiválasztó rendszert alkalmaztam magyarországi körülményekre, valamint létrehoztam egy ingyenesen hozzáférhető, mesterséges rekord generáló programot.
- I/b Megmutattam, hogy magyarországi helyszínek esetén a tervezési szinthez tartozó veszélyeztetettséghez mérsékelt magnitúdójú (<5.5) és kis epicentrális távolságú (<10 km) földrengések járulnak hozzá leginkább, valamint hogy a várható szignifikáns rengésidő 10 s alatt van.
- I/c Ráműtöttem, hogy magyarországi helyszínek esetén az Eurocode 8-1 által javasolt 2-es típusú spektrum jobban jellemzi a tényleges helyszíni spektrumot, mint az 1-es típusú spektrum.
- I/d A különböző intenzitásjellemezők elemzésével igazoltam, hogy a hidak szerkezeti válaszait a szerkezeti választ döntően meghatározó rezgés periódusidejéhez rendelhető spektrális gyorsulás és a spektrális intenzitás írja le legjobban.

### *II. Tézis Kapcsolódó publikációk: [S5],[S7]*

Kidolgoztam egy törékenységi vizsgálat alapú kiértékelő keretrendszert magyarországi közúti hidak szeizmikus teljesítőképességének meghatározására.

- II/a Részletesen kidolgoztam 5 különálló modult (adatbázis, szeizmikus teher előállító, numerikus modell generáló, szeizmikus analízis és kiértékelő modulok), melyek összekapcsolásával automatizáltam a kiértékelési folyamatot.
- II/b Elemeztem az adatbázis alkalmazhatóságát a teljes hídállomány szeizmikus teljesítőképességének kiértékelése szempontjából. Kimutattam a meglévő adatbázis hiányosságait, majd ajánlatot tettem az adatbázis kibővítésének stratégiájára.
- II/c A teljes hídállományt megfelelően jellemző 8 típusszerkezetet határoztam meg, és jellemeztem a típusszerkezetek legfontosabb szerkezeti paramétereit. Létrehoztam egy 30 reprezentatív hídból álló hídportfóliót.

### **III. Tézis Kapcsolódó publikációk: [S14],[S15]**

Közelítő lineáris modális válaszspektrumon alapuló paraméteres vizsgálatot hajtottam végre monolit kapcsolatú sűrűbordás és lemezhidakra.

- III/a Kidolgoztam a szerkezetek lineáris numerikus modelljét és javaslatot tettem a háttöltés hatásának modellezésére lineáris modális válaszspektrum analízis esetén.
- III/b Meghatároztam a kritikus kialakítások és komponensek körét tipikus hídszerkezetek esetén, és megmutattam, hogy a felszerkezet, a hídfő, a háttöltés és az alapozás viselkedése megfelelő; a monolit kapcsolatok teherbírása elégtelen, főleg a hídfő-felszerkezet kapcsolat esetén. Tipikus pillérvasalást feltételezve megmutattam, hogy hosszabb hidaknál (>50 m) alacsonyabb pillérek (<5 m) esetén a nyírási, míg magasabb pillérek (>5 m) esetén a hajlítási teherbírás kritikus.
- III/c Az Eurocode 8-2 szerinti szabványos kiértékelés alapján egy előzetes becslést adtam a kritikus sűrűbordás és lemezhidak számára.

### **IV. Tézis Kapcsolódó publikációk: [S7],[S9],[S12],[S15]**

Paraméteres törékenységi vizsgálatot hajtottam végre monolit kapcsolatú sűrűbordás hidakra, valamint elvégeztem 30 olyan meglévő szerkezet törékenységi vizsgálatát, melyek jól reprezentálják a hídállomány tipikus hídszerkezeteit.

- IV/a Kidolgoztam az egyes típusszerkezetek nemlineáris numerikus modelljét. Kidolgoztam és kalibráltam a nyírási vasalással ellátott monolit kapcsolat ciklikus numerikus modelljét. Nemlineáris Winkler-ágyazású gerendamodellen alapuló cölöpalapozási modellt hoztam létre, melynek paramétereinek felvételére az Eurocode 7-tel és a magyar tervezési elvekkel összhangban adtam javaslatot.
- IV/b Elemeztem a különböző modellezési és analízissel kapcsolatos feltételezések szerkezeti válaszokra gyakorolt hatását. Rámutattam a monolit kapcsolat ciklikus viselkedésének és az ütközések modellezésének a fontosságára. Megmutattam, hogy a geometriai bizonytalanság elhanyagolható, míg az anyagjellemzők és a talajjellemzők bizonytalansága jelentősen befolyásolhatja a számított tönkremeneteli valószínűséget.
- IV/c A komponens törékenységi görbék alapján meghatároztam a kritikus hídkomponensek körét. Igazoltam a paraméteres vizsgálat következtetéseit monolit kapcsolatú sűrűbordás és lemezhidakra, valamint megmutattam, hogy a pillér nyírási tönkremenetele domináns számos kialakítás esetén. Rámutattam, hogy a hagyományos sarus acél gerendahidak viselkedése kedvezőbb, hajlítási tönkremenetel jellemezhető.
- IV/d Kiértékeltem tipikus közúti hidak megbízhatóságát, a megbízhatósági index alapján összehasonlítottam az egyes szerkezetek szeizmikus teljesítőképességét. Megmutattam, hogy a nem megfelelő szerkezeti kialakítás és a szeizmikus tervezés hiánya extrém alacsony megbízhatósági indexet eredményezhet, valamint hogy az EC8-2 alapú tervezéssel 2 körüli megbízhatósági index érhető el.

### **V. Tézis Kapcsolódó publikációk: [S2],[S11],[S13]**

Javaslatot tettem a kritikus szerkezetek megerősítési módjaira, valamint új szerkezetek tervezéséhez tervezési koncepciókat adtam meg.

- V/a Rámutattam, hogy a hídfőknél monolit kapcsolat, a pilléreknél hosszirányú fix és keresztirányban mozgó saruk alkalmazása optimális kialakítás maximum 100 méteres autópálya felüljáró hidak esetén.



- V/b Kiértékeltem két reprezentatív kritikus híd megerősítési módszereit. Megmutattam, hogy a pillérek szénzál erősítésű polimeres erősítése optimális, helytakarékos megoldás olyan esetben, amikor a megbízhatóság kis mértékű növelése szükséges, míg beton köpenyezéssel jelentős növekedés érhető el. Nem megfelelő szerkezeti kialakítás esetén a szeizmikus szigetelés a költséghatékony megoldás.
- V/c Értékeltem az Eurocode 8-2 által javasolt ekvivalens lineáris analízis módszer pontosságát nemlineáris időtörténeti analízis segítségével; és javaslatot tettem a módszer módosított alkalmazására szeizmikus szigetelések koncepcionális tervezéséhez, melynek alkalmazhatóságát igazoltam egy valós hídmegerősítés során.

## 10. Az értekezés témakörében készült publikációk

---

### Idegen nyelvű folyóiratcikk

- [S1] Simon J, Vigh LG (2013) Seismic assessment of an existing Hungarian highway bridge. Acta Technica Napocensis – Civil Engineering and Architecture 56(2):43-57
- [S2] Simon J, Vigh LG, Horváth A, Pusztai P (2015) Application and assessment of equivalent linear analysis method for conceptual seismic retrofit design of Háros M0 highway bridge. Periodica Polytechnica – Civil Engineering 59(2):109-122
- [S3] Simon J, Vigh LG (2016) Seismic performance and damage assessment of integral precast multi-girder bridges in moderate seismic zones. Bulletin of Earthquake Engineering (javított változat bírálat alatt)

### Magyar nyelvű folyóiratcikk

- [S4] Simon J, Martinovich K, Dani B, Ájpli B, Sapkás Á, Vigh LG (2013) Retrofit methods for bridges – case studies (in Hungarian). Útügyi Lapok 1(1) Paper 2
- [S5] Simon J, Vigh LG (2015) Application of the existing road bridge database for the seismic performance evaluation of Hungarian road bridges (in Hungarian). Útügyi Lapok 5(1):1-24
- [S6] Simon J, Vigh LG (2016) Determination of seismic load in Hungary: Application of site specific response spectra (in Hungarian). Vasbetonépítés (elfogadva)

### Szerkesztett kiadványban megjelent cikk

- [S7] Simon J, Vigh LG, Horváth A (2016) Seismic performance and damage assessment of Hungarian road bridges (in Hungarian). Scientific Publications of BME Department of Structural Engineering. pp. 89-98, Budapest, Hungary
- [S8] Vigh LG, Rózsás Á, Zsarnóczay Á, Balogh T, Morais EC, Simon J (2016) Reliability analysis of structures subjected to extreme loads (in Hungarian). Scientific Publications of BME Department of Structural Engineering. pp. 119-128, Budapest, Hungary

### Konferenciacikk

- [S9] Simon J (2012) Numerical model development for seismic assessment of continuous girder bridges. Proc. of the Conference of Junior Researchers in Civil Engineering. pp. 216-224, Budapest, Hungary
- [S10] Simon J, Vigh LG (2012) Seismic assessment of Hungarian highway bridges – A case study. Proc. of the First international conference for PhD students in Civil Engineering. pp. 155-162, Cluj-Napoca, Romania
- [S11] Simon J, Vigh LG (2013) Possible seismic retrofit methods for road bridges (in Hungarian). Építményeink védelme 2013. pp. 1-14, Ráckeve, Hungary
- [S12] Simon J (2013) Parameter identification for dynamic analysis of pile foundation using non-linear p-y method. Proc. of the Second Conference of Junior Researchers in Civil Engineering. pp. 161-170, Budapest, Hungary

- [S13] Simon J, Vigh LG (2013) Response spectrum analysis of girder bridges with seismic isolators using effective stiffness. *Int. Conf. on Civil, Structural and Earthquake Engineering*. pp. 1353-1362, Istanbul, Turkey
- [S14] Simon J, Vigh LG (2014) Multi modal response spectrum analysis implemented in OpenSees. *OpenSees Days Portugal 2014*. pp. 39-42, Porto, Portugal
- [S15] Simon J, Vigh LG (2015) Preliminary seismic vulnerability assessment of pre-code multi-girder bridges in Hungary. *Earthquake Risk and Engineering towards a Resilient World*, pp. 1-10, Cambridge, UK
- [S16] Simon J, Vigh LG (2015) Seismic vulnerability assessment of existing Hungarian highway bridges using hazard compatible ground motions. *12th Hungarian Conference on Theoretical and Applied Mechanics*. Paper 334. 13 p. Miskolc, Hungary

## 11. Irodalomjegyzék

---

- [1] CEN (2008) MSZ EN 1998-1 Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance. Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings.
- [2] CEN (2008) MSZ EN 1998-1 Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance. Part 2: Bridges.
- [3] CEN (2011) MSZ EN 1998-3 Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance. Part 3: Assessment and retrofitting of buildings.
- [4] ÚT (2004) Útügyi Műszaki Előírás ÚT 2-3.401 Közúti hidak tervezése, Általános előírások (in Hungarian). Magyar Útügyi Társaság
- [5] Tóth L, Győri E, Mónus P and Zsíros T (2006) Seismic hazard in the Pannonian Region. *The Adria Microplate: GPS Geodesy, Tectonics, and Hazards*, Springer Verlag, NATO ARW Series 61(1):369-84. doi: 10.1007/1-4020-4235-3\_25
- [6] Vigh LG, Dunai L, Kollár L (2006) Numerical and design considerations of earthquake resistant design of two Danube bridges. *1st European Conference on Earthquake Engineering and Seismology*, Switzerland, Paper 1420.
- [7] Zsarnóczay Á, Vigh LG, Kollár L (2014) Seismic Performance of Conventional Girder Bridges in Moderate Seismic Regions. *Journal of Bridge Engineering* 19(5), 9 p. Paper 04014001. doi: 10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0000536
- [8] Nielson BG (2005) Analytical fragility curves for highway bridges in moderate seismic zones. PhD dissertation, School of Civil and Environmental Engineering, Georgia Institute of Technology.
- [9] Borzi B, Ceresa P, Franchin P, Noto F, Calvi GM and Pinto PE (2015) Seismic vulnerability of the Italian roadway bridge stock. *Earthq Spectra* 31(4):2137-2161. doi: 10.1193/070413EQS190M
- [10] Avşar Ö, Yakut A, Caner A (2011) Analytical fragility curves for ordinary highway bridges in Turkey. *Earthquake Spectra* 27(4):971–996. doi: 10.1193/1.3651349
- [11] Cornell CA (1968) Engineering seismic risk analysis. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 58(5): 1583-1606
- [12] Bradley BA (2010) A generalized conditional intensity measure approach and holistic ground-motion selection. *Earthq Eng Struct D* 39(12):1321–1342. doi: 10.1002/eqe.995
- [13] KKK (2016) Egységes Hídnnyilvántartási Rendszer ([www.hidadatok.hu](http://www.hidadatok.hu)). Közlekedésfejlesztési Koordinációs Központ
- [14] Jalayer F, Cornell CA (2009) Alternative nonlinear demand estimation methods for probability-based seismic assessments. *Earthq Eng Struct D* 38(8):951-972. doi: 10.1002/eqe.876
- [15] JCSS (2001) Probabilistic model code – Part 1: Basis of design. Joint Committee on Structural Safety