

# A SZEMSZERKEZET HATÁSA A NYÍRÁSI VASALÁS NÉLKÜLI VASBETONGERENDÁK TEHERBÍRÁSÁRA, ÉS TÖNKREMETELI MÓDJÁRA



<https://doi.org/10.32969/VB.2023.2.1>

Dr. Sajtos István – Ther Péter Pál – Vajk Rita

*Vasbetonszerkezetek esetében egyforma teherbírásra és tönkremeneteli módra számítunk, ha a betonok szilárdsága, szilárdsági osztálya, ugyanaz, függetlenül a betonkészítéshez használt adalékanyag szemszerkezetétől, maximális szemmagyságtól. Kísérleti tapasztalat, hogy a nyírási vasalás nélküli vasbeton gerendák teherbírását nagyon sok paraméter; többek között a beton szilárdsága, törési energiája, a hosszvasalás mennyisége és a gerendák mérete is változatosan, adott gerenda kialakításától függő módon, befolyásolja. Nem véletlen, hogy máig nincs matematikai (a jelenséget minden részletében egyenletekkel leíró) modell, és teljes, tiszta kép a vasbeton gerendák nyírási viselkedéséről. Cikkünkben a mérrethatás modell segítségével értelmezzük és magyarázzuk a nyírási vasalás nélküli vasbeton gerendák kísérleteiben megfigyelhető jelenségeket, és a teherbírást befolyásoló paraméterek hatását. Az elemzésünkben, magyarázatunkban fontos szerepe van a beton törési energiájának és az ezt befolyásoló, meghatározó maximális adalékanyag szemmagyságnak,  $d_{max}$ . A bemutatott mérrethatásmodell hatékonyságát kisméretű vasbeton gerendák kísérleti eredményeivel történő összehasonlításával vizsgáltuk. Megmutattuk, hogy még ilyen kicsi kísérleti gerendaméretnél is, a maximális szemmagyság, főként a törési energián keresztül, befolyásolja a nyírási vasalás nélküli vasbetongerendák nyírási teherbírását. A modell ugyancsak alátámasztja azt az építési gyakorlatban is használható elvet, hogy nagyméretű vasbeton szerkezethez nagyobb maximális szemmagyságú adalékanyagot használunk.*

**KULCSSZAVAK:** maximális szemmagyság, törési energia, nominális szilárdság, nyírószilárdság, mérrethatás

## 1. BEVEZETÉS ÉS PROBLÉMAFELVETÉS

Általánosan elfogadott nézet az építési gyakorlatban, hogy nincs különbség a beton és vasbetonszerkezetek viselkedésében, ha azok azonos szilárdsági osztályú betonból készültek, bár a készítéshez használt adalékanyag szemszerkezete különböző. Egyforma teherbírásra és tönkremeneteli módra számítunk, ha a beton nyomószilárdsága, a betonosztály ugyanaz.

A vasbetonszerkezetek szabványos hajlítási és nyírási méretezési módszerei alapján is arra kell következtetnünk, hogy a szerkezet teherbírása a betonhoz használt adalékanyag szemszerkezetétől független, hiszen a vasbetonszerkezetek teherbírását a betonosztályhoz rendelt szilárdságértékek határozzák meg. Azonban ismert az is, hogy annak ellenére, hogy az egy betonosztályhoz tartozó betonoknak azonos a nyomószilárdsága, pl. a húzó- és hajlítószilárdságuk már számottevően eltérő lehet az adalékanyag szemszerkezete, a maximális szemmagyság függvényében. Ha pl. a húzószilárdság érdemben befolyásolja a vasbetonszerkezet teherbírását, akkor a betonkészítéshez használt adalékanyag szemszerkezete, a maximális szemmagyság is fontossá válik a méretezés során.

A méretezési módszerek kidolgozásához a képlékenységtan tételeit és módszereit használták, tudva és/vagy feltételezve, hogy az adott szerkezetnek a vizsgált tönkremeneteli módja duktilis, azaz elegendően nagy a szerkezet alakváltozó ké-

pessége a tényleges tönkremenetel, az összeomlás előtt. A képlékenységtan az anyag és a szerkezet szilárdsági tönkremenetele alapján határozza meg a szerkezet teherbírását. A tönkremeneteli hely a szerkezet egy csekély része csak, azaz lokalizált a tönkremenetel helye. Rúdszerkezeteknél ez egy rövid szakasza a gerendának. A számítási modell szerint a tönkremenetel egy pontban, a képlékeny csuklóban, koncentráldódik. Lemezeknél pedig keskeny, sűrűn összeropedezett sávokban koncentráldódik a károsodás, a számítási modellben a törésvonalakra. Mindkét esetben megreped a beton, de a szerkezet teherbírását a betonacél folyása, azaz szilárdsági feltétel szabja meg. A képlékeny csukló vagy a lemez törésvonal menti elfordulási képességét a betonacél szakadása vagy a nyomott beton morzsolódása korlátozhatja, de általában elegendő ahhoz, hogy a képlékenységtan módszerei használhatók legyenek.

Halász korai, beton kockákon végzett kísérleteiből ismeretes (Palotás, 1973), hogy a kockaméret növelésével csökken a betonkockához tartozó szilárdság, és ezt egyebek mellett a beton maximális szemmagysága, azaz a szemszerkezet is befolyásolja. A betonkockák viselkedése annyiban tér el a fent említett vasbeton gerendáétól és lemezétől, hogy a tönkremenetele rideg, és azt repedések megjelenése és folyamatos növekedése, fejlődése előzi meg. Az első repedés megjelenését az „anyag” húzószilárdságának elérése jelzi, de a kocka tönkremenetele nagyobb tehernél, egy repedésrendszer kialakulása, kifejlődése után következik be, azaz nem a szilárdsági feltétel, hanem energia kritérium szabja meg a kocka teherbírását. A beton kockákon

(vagy más alakú próbatesteken, pl. henger) végzett kísérletek alapján számított betonszilárdság az anyag és a kockaméret (próbatestméret) együttesére, azaz egy rendszerre, vonatkozik. A szabványos kocka és henger kísérletek teszik lehetővé az egységes (egyezményes) betonszilárdság meghatározását és értelmezését. A beton szilárdsága az adott méretű kockára és/vagy hengere vonatkozik, ami megfelelő biztonsággal használható a képlékenységtani méretezési modellekben.

A beton és vasbetonszerkezetek tönkremeneteli folyamatának kezdetét a repedések megjelenése jelzi, majd nagyobb tehernél pedig a repedések terjedése, teljes kifejlődése eredményezi a szerkezet tönkremenetelét. Ez természetessé teszi azt, hogy a törésmechanika elvei szerint, annak eszközeivel vizsgáljuk ezeket a szerkezeteket. A **törésmechanikai vizsgálatok** alapvető jellemzője, hogy nem szilárdsági, hanem energia-kritérium határozza meg azt, hogy egy repedés tovább terjed, és/vagy növelhető-e a szerkezeten a teher anélkül, hogy a repedéshossz növekedne (Karihaloo, 1997; Bazant, Planas, 1998). Az energia-kritérium paramétere, a törési energia, ami anyagjellemző, és a beton esetében összefüggésbe hozható a betonhoz használt adalékanyag szemszerkezetével, a maximális szemmagysággal is.

Tegyük fel azt a kérdést, hogy *van-e jelentősége, következménye annak*, pl. a vasbeton gerendák méretezése, teherbírása, tönkremeneteli módja szempontjából, *ha megváltoztatjuk a betonhoz használt adalékanyag szemszerkezetét, de a szilárdságát (szilárdsági osztályát) nem!*

A nyírási vasalás nélküli vasbeton gerendák teherbírása szempontjából vizsgáljuk meg ezt a kérdést.

A nyírási vasalás nélküli vasbeton gerendák tönkremenetele jellemzően, de nem mindig, ún. nyírási (ferde) repedés kialakulása miatt, ridegen következik be. Ebben az esetben nem szilárdsági, hanem az energia kritérium alapján vizsgálható a gerenda teherbírása.

A törésmechanika elveit és egyszerű modelljeit használva elemezzük, hogy elsősorban a beton maximális szemmagysága hogyan befolyásolja egy vasbeton gerendának a nyírási teherbírását, összefüggésben a gerenda méreteivel, a hosszvasalás mennyiségével és az igénybevételek (hajlítónyomaték, nyíróerő) arányának változásával.

Először a cikkben használt fogalmakat és modelleket mutatjuk be, olyan részletességgel, ami elegendő a cikk mondandójának megértéséhez. Röviden tárgyaljuk a nyírási vasalás nélküli vasbetongerendák tönkremeneteli lehetőségeit, összefüggésben a mérettükkel, a vasalás mennyiségével és egyéb paraméterekkel. Egy elméleti modell alapján elemezzük, hogy egyes paraméterek milyen hatással vannak a gerenda viselkedésére, összefüggésben a beton szemszerkezetével. Majd bemutatjuk azokat a kisméretű gerendakísérleteket, amelyek igenlő választ adnak a fenti kérdésre, azaz az adalékanyag maximális szemmagysága befolyásolja a nyírási vasalás nélküli vasbeton gerendák teherbírását és tönkremeneteli módját is, a gerenda méretének függvényében. A cikkünk végén összegezzük azokat a megállapításokat és következtetéseket, amelyeket mind elméleti, mind gyakorlati szempontból fontosnak és megszívlelendőnek tartunk.

## 2. ELMÉLETI HÁTTÉR, ALAPELVEK, MODELLEK

A vasbeton szerkezetek repedéseit természetesnek vesszük, és úgy gondoljuk, hogy ekkor a vasbetonszerkezet működik. Sőt, ezek miatt, a terhelés során kialakuló repedések miatt, működnek gazdaságosan a vasbetonszerkezetek. A méretezési

módszereink a repedést nagyon leegyszerűsítve, általában hiányként, keresztmetszet csökkenésként veszik figyelembe.

A repedés megjelenése és kifejlődése, azaz a „tönkremenetel” folyamata azonban energiadisszipációt is jelent. Az energiadisszipációnak, és annak, hogy a tönkremenetelt energia-kritérium és nem pedig szilárdsági feltétel szabja meg, lehet és van hatása a vasbetonszerkezet teherbírására. Ezt a leegyszerűsített méretezési módszerek nem tudják figyelembe venni. Természetesen van olyan tönkremeneteli mód is, amikor az energiadisszipációnak nincs jelentősége. Ilyenkor a képlékenységtan módszerei használhatók. Például a vasbeton gerendák és lemezek törésmélete is ezt használja ki.

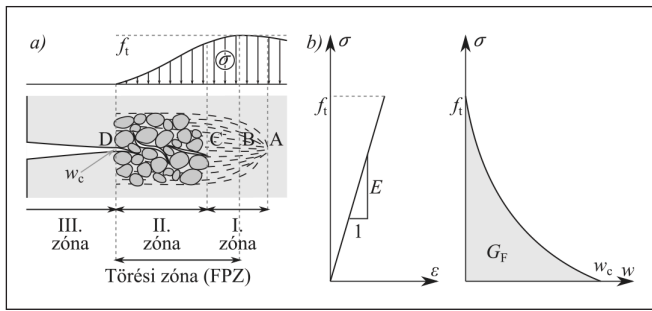
A vasbetongerendák nyírási tönkremenetelének vizsgálatakor a repedési folyamat során bekövetkező energiadisszipáció fontos, és meghatározó a gerenda nyírási teherbírása szempontjából. Talán ezért sem véletlen, hogy máig nincs a jelenséget minden részletében egyenletekkel leíró matematikai modell, és teljes, tiszta kép a vasbeton gerendák nyírási viselkedéséről.

Ebben a fejezetben röviden bemutatjuk a kohéziós repedésmodellt, és az ezt felhasználó mérethatás modellt. Mindkettő hasznos és fontos a nyírási vasalás nélküli vasbeton gerendák teherbírásának meghatározásához, és a teherbírást befolyásoló fizikai folyamatok, illetve paraméterek megértéséhez.

### 2.1 A kohéziós repedésmodell

A beton és vasbetonszerkezetekben keletkező, látható makro-repedések egy mikro-repedésekkel átszőtt, keskeny sávon belül, a mikro-repedések összekapcsolódása, egymásba fűződése miatt alakulnak ki. A mikro-repedésrendszer repedéseinek iránya és mérete véletlenszerűen változó a keskeny sávon, törési zónán (fracture process zone, FPZ) belül (*1.a ábra*). A törési zóna mindig, a majd később kialakuló, makro-repedés körüli keskeny zónát jelenti, azaz nem folytonos, hanem koncentráltan, lokálisan alakul ki. A mikro-repedésekkel átszőtt ún. törési zóna *szélessége*, a kísérleti tapasztalatok alapján  $2,5-3 \cdot d_{\max}$ , ahol  $d_{\max}$  az adalékanyag maximális szemmagysága. A törési zóna szélessége tehát nő az adalékanyag maximális szemmagyságával, és egyáltalán nem kicsi, nem elhanyagolható méretű (néhány cm-től néhány dm-ig változhat a szélessége). A törési zóna *hossza* normál-szilárdságú betonnál 200-500 mm, nagyszilárdságú betonnál 150-300 mm (Karihaloo, 1997). A törési zóna előtti betonrész még „repedésmentes”, folytonos anyag. A törési zóna után pedig már, a határozott és egyértelmű geometriájú, makro-repedés van, ami úgy választja ketté a betont, hogy ott nem adódik át feszültség a repedés két partja között. Ezzel szemben a törési zónában, mivel ott a makro- és mikro-repedések még nem alakultak folytonos makro-repedéssé, anyagrészek, adalékanyag szemcsék kapcsolják össze a majdani „makro-repedés” két oldalát, ami lehetővé teszi erő, illetve feszültség átadást a majdani repedés két partja között. A törési zónában a feszültség csökken a repedéstágasság növekedésével (*1. ábra*).

Ennek a makro-szinten (gerenda, szerkezet szintjén) tapasztalható jelenségnek a modellezésére vezették be a kohéziós repedésmodellt (cohesive crack model / fictitious crack model). A Hillerborg-féle kohéziós repedésmodell (*1.b ábra*), a repedéstágasság függvényében adja meg a „repedésmentén” a normálfeszültség változását a törési zónán belül. A repedés vonala, geometriája, a még repedésmentes anyagban számítható fő-húzófeszültségre merőleges, összefüggésben a törésmechanikában meghatározott nyíló vagy I. repedés móddal (Mode I. crack) (Karihaloo, 1997; Bazant, Planas, 1998). Az ún. alakváltozásra fellágyuló (strain softening) *viselkedési modell* eső ága alatti terület a  $G_f$  törési energia. A



**1. ábra:** Kohéziós repedésmodell (Karihaloo, 1997; Bazant, Planas, 1998; Bazant, 2002): a) a törési zóna, annak méretei, és a kohéziós feszültségeloszlás a törési zónában; I. zóna: mikro-repedt zóna, II. zóna: mikro-repedt + nem folytonos makro-repedések zónája (crack bridging zone), III. zóna: feszültségmentes makro-repedés, b) a kohéziós repedésmodell viselkedési törvénye:  $\sigma$ - $\varepsilon$  diagram a repedésmentes kontinuum, míg a  $\sigma$ - $w$  diagram pedig a törési zónán belüli viselkedést adja meg.

törési zónán belül, azaz lokálisan, az anyag a kohéziós modellnek megfelelően viselkedik, míg azon kívül, azaz globálisan, a szokásos kontinuum modelleknek megfelelő, pl. lineárisan rugalmas, az anyag, itt a beton. Fontos megjegyezni, hogy a lokális és a globális viselkedést leíró modellek a feszültséget különböző jellemzők függvényében adják meg. Lokálisan a fajlagos nyúlást, mint kontinuum jellemzőt, globálisan pedig a repedéstágasságát, mint lokális jellemzőt használjuk.

A kohéziós repedésmodellnek négy paramétere van: az anyag húzószilárdsága,  $f_t$ , a törési energia,  $G_F$ , az eső ág jellege,  $\sigma(w)$  függvény (ami lehet lineáris, bi-lineáris, exponenciális, stb.), és a kritikus repedéscsúcs megnyílás,  $w_c$ . Ha az eső ág függvényének a jellegét megadjuk, akkor bármelyik másik két paraméter egyértelműen meghatározza a kohéziós repedésmodell feszültség-repedéstágasság függvényét.

A kohéziós repedésmodell szerint, ha a feszültség eléri az  $f_t$  szilárdságot, akkor megkezdődik a mikro-repedésekkel átszőtt törési zóna kifejlődése, ahol a feszültség a modell fellágyuló viselkedésnek megfelelően változik. A makro-repedés akkor és ott alakul ki, amikor és ahol a  $w$  repedéstágasság eléri a  $w_c$  kritikus repedéscsúcs megnyílást, azaz az alakváltozási energia eléri a törési energiát. Ekkor a már kialakult makro-repedés tovább halad, hosszabb lesz. Tehát a mikro-repedésekkel teli, lokalizált törési zóna kialakulását szilárdsági kritérium, míg a makro-repedés kifejlődését pedig energia kritérium határozza meg.

A beton  $G_F$  törési energiája függ a víz-cement tényezőtől, a beton szilárdságától, az adalékanyag maximális szemmagyságától, a beton korától és az utókezelés módjától is (pl. fib, 2013).

Ha különböző maximális szemmagyságú,  $d_{max}$ , adalékanyaggal készítünk azonos szilárdságú, vagyis azonos betonostályba tartozó, betonokat, azoknak különböző lesz a,  $G_F$ , törési energiája. Növekvő maximális adalékanyag szemmagyság növeli a beton törési energiáját (Karihaloo, 1997).

Magyarázatot adhat erre az, hogy a nagyobb maximális szemmagysággal készülő beton repedésfelülete sokkal változatosabb geometriájú, „nagyobb amplitúdával hullámzóbb”, mint a kisebb maximális szemmagysággal készülő betoné, tehát a nagyobb maximális szemmagyságú beton repedésfelülete nagyobb. Mivel a törési energia az anyag szétválasztásához szükséges felületi energiasűrűséggel arányos, ezért a nagyobb maximális szemmagyságú beton, nagyobb területű repedésfelületének a szétválasztásához nagyobb energiára van szükség, mint a kisebb maximális szemmagyságú betonhoz. Ez a gondolatmenet szemléletes magyarázatot ad arra a kísérleti tapasztalatra, hogy a növekvő maximális adalékanyag szemmagyság növeli a beton törési energiáját.

A nagyobb törési energia önmagában nem határozza meg

egyértelműen a repedés okozta tönkremenetel jellegét (rideg vagy duktilis), és azt, hogyan befolyásolja ez egy szerkezet teherbírását.

A szerkezet (gerenda) mérete is jelentősen befolyásolja annak teherbírását és a tönkremeneteli módját is. A következő fejezetben megvizsgáljuk, hogyan befolyásolja a szerkezet mérete annak teherbírását.

## 2.2 Mérethatás modell

Egy, minden méretében, arányosan nagyobb gerendának (szerkezetnek) biztosan nagyobb a teherbírása. A nagyobb teherbírás azonban nem a méretek növekedésével arányos, hanem ahhoz képest, a méretnövekedés függvényében, jóval csekélyebb is lehet. A szabványok ezt a hatást általában nem, vagy nem megfelelő mértékben veszik figyelembe.

Vezessük be a nominális szilárdságot, ami a szerkezet geometriával skálázott (elosztott) teherbírása. A szerkezet teherbírása a szerkezet elvégzett kísérlet során működő, mérhető maximális teher értéke. A nominális szilárdság a teherbírásnak és a szerkezet jellemző geometriai adatainak hányadosa úgy, hogy az eredmény feszültség dimenziójú mennyiség. Legyen a nominális feszültség, szilárdság:  $\sigma_N = P/(b \cdot d)$  és  $\sigma_{Nu} = P_u/(b \cdot d)$ , [N/mm<sup>2</sup>], ahol  $\sigma_N$  – nominális feszültség,  $P$  – a (szerkezet) gerenda terhelése,  $b$  – keresztmetszet szélessége,  $d$  – a keresztmetszet (hatékony) magassága,  $\sigma_{Nu}$  – a (szerkezet) gerenda nominális szilárdsága,  $P_u$  – a (szerkezet) gerenda teherbírása.

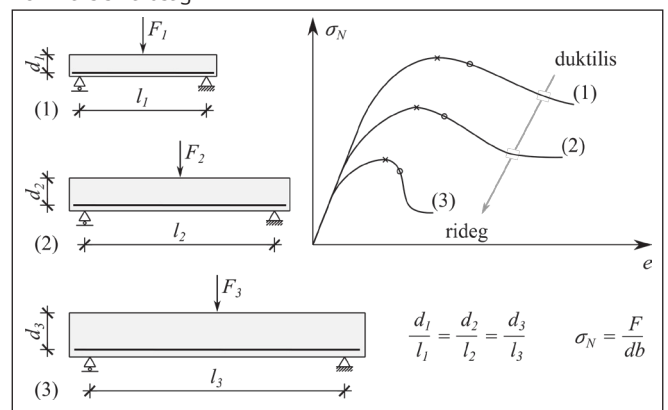
Kísérleti tapasztalat, hogy a geometriailag hasonló (minden mérete ugyanolyan arányban nő vagy csökken), de nagyobb méretű szerkezetnek a nominális szilárdsága kisebb és az alakváltozó-képessége is kisebb (2. ábra).

A szerkezet mérete befolyásolja annak alakváltozó-képességét, duktilitását és nominális szilárdságát is. Az utóbbit nevezük egyszerűen mérethatásnak. A tartószerkezetek alakváltozó-képessége, duktilitása a földrengésre történő méretezés esetében nagyon fontos paraméter, a nominális szilárdság változása pedig általában mindig fontos és figyelembeveendő hatás.

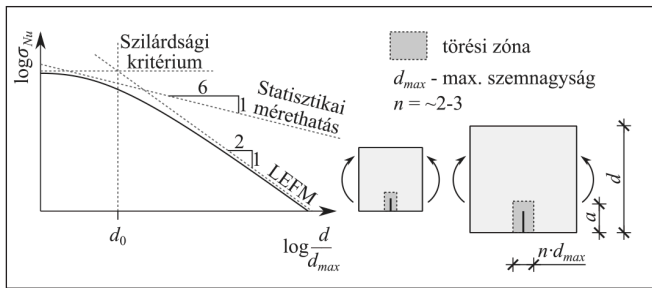
Nincs, nem tapasztalható mérethatás, ha a szerkezet tönkremenetelét az anyag, szilárdsági kritérium alapján vizsgálható, tönkremenetele okozza.

Jelentős a mérethatás, ha a szerkezet tönkremenetelét energiakritérium határozza meg, pl. a tönkremenetelt hosszú makro-repedés kifejlődése előzi meg. Ez jellemző pl. a nyírási vasalás nélküli vasbeton gerendák nyírási tönkremenetelére, a vasbeton lemezek átszűrődására, vasbeton gerendák csavarási tönkremenetelére, a betonacél kihúzóására, betoncsövek hajlítási tönkremenetelére.

**2. ábra:** Különböző méretű, de geometriailag hasonló gerendák nominális feszültség-elmozdulás diagramja (Karihaloo, 1997; Bazant, Planas, 1998; Bazant, 2002). A legnagyobb nominális feszültség a nominális szilárdság.







**3. ábra:** Mérethatás: a nominális szilárdság csökkenése a szerkezet méretének növekedésével (Karihaloo, 1997; Bazant, 2002).

A kohéziós repedés modellel – feltételezve, hogy az energiadisszipáció a repedés hosszától és a törési zóna szélességétől függ – egyszerű összefüggés vezethető le (Bazant, 1984, 1986; Bazant, Sun, 1987; Bazant, 2002), ami megadja a geometriailag hasonló (ugyanúgy skálázott) szerkezetek nominális szilárdságának a szerkezet méretétől való függését, (1) (3. ábra).

$$\sigma_{Nu} = \frac{Bf_t}{\sqrt{1 + \frac{d}{\lambda_0 d_{max}}}} \quad (1)$$

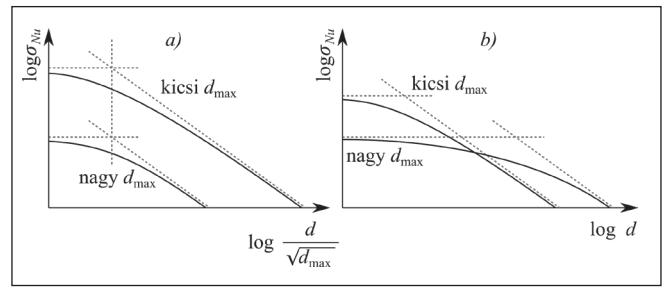
Az (1) egyenletben  $\sigma_{Nu}$  – nominális szilárdság,  $f_t$  – a beton húzószilárdsága,  $d$  – gerenda magassága,  $d_{max}$  – az adalékanyag maximális szemmagysága,  $B$  és  $\lambda_0$  – kísérleti állandók.

Logaritmikus koordináta-rendszerben az (1) függvénynek vízszintes aszimptotája van, ha  $d \rightarrow 0$ , tehát a nominális szilárdság független a mérettől. Ez a képlékenységtan szerinti teherbírás számítás esete. Ha  $d \rightarrow \infty$ , akkor az (1) függvény aszimptotája  $-1/2$  meredekségű (3. ábra). Ez a meredekség a lineárisan rugalmas törésmechanika (linear elastic fracture mechanics, LEFM) szerinti mérőhatás, ami csak igen nagyméretű szerkezetek esetében érvényesül teljes egészében. Ekkor egyetlen repedés kialakulása és a tehernövekedés során való kifejlődése vezet a szerkezet tönkremeneteléhez.

A szerkezet geometriai skálázása, felnagyítása, során használhatjuk ugyanazt a betont, vagyis az adalékanyag maximális szemmagysága változatlan. Ekkor a mérőhatásfüggvényt csak a  $Bf_t$  paraméter változtatja, lásd a 4.a ábrát. A különböző maximális szemmagysághoz tartozó mérőhatásfüggvények csak akkor különbözőek, ha eltérő a betonok szilárdsága. Azonos szilárdság, betonosztály esetében a 4.a ábra két függvénye egybeesik.

Ha a geometriai skálázás során az adalékanyag maximális szemmagyságát is arányosan növeljük (4.b ábra), akkor mérőhatásfüggvények átmetsződnek. Kicsi szerkezeti méretek esetében a kisebb maximális szemmagyságú beton, a nagy szerkezeti méretek esetében a nagyobb szemmagyságú beton használata előnyösebb. Ha a betonok szilárdsága, szilárdsági osztálya azonos, akkor a 4.b ábra két görbéjének azonos a vízszintes aszimptotája, lásd a 6. ábrát is, de nagy méreteknél mindenképpen a nagyobb maximális szemmagyság használata lesz előnyösebb.

Az anyag szilárdságának statisztikai változása (szórása) csak kismértékben befolyásolja a mérőhatást. A Weibull-elmélet szerint, ha az anyag szilárdságát véletlen változónak tekintjük, akkor a szerkezet teherbírása a szerkezet méretének növekedésével csökken. Azonban a változás sokkal csekélyebb, mint amit a repedésképződés miatti energia disszipáció, a determinisztikus mérőhatás okoz. A Weibull-elmélet szerinti statisztikus mérőhatás változást 6:1 – 8:1 meredekségű egyenes mutatja a 3. ábrán, ami jóval csekélyebb változás, mint



**4. ábra:** Mérőhatásfüggvény változó maximális adalékanyag szemmagyság esetében (Bazant, 1986): a) nominális szilárdság a függvényében, b) nominális szilárdság a  $d$  szerkezetméret függvényében. Megjegyzés: az ábrázolt esetben a kisebb  $d_{max}$ -hoz nagyobb betonszilárdság tartozik, azonos betonszilárdság esetében a két görbének közös a vízszintes aszimptotája.

a determinisztikus mérőhatásra, nagy szerkezeti méreteknél jellemző, 2:1 változás.

A mérőhatásfüggvény kísérleti paramétereket tartalmaz. A kísérleti elemek mérete ugyanakkor jóval kisebb intervallumban változtatható, mint amilyen tartományban az elméletet használni szeretnénk. A különböző kísérletek adatai és eredményei hiányosak, a mérőhatás függvény levezetés feltételei nem vagy csak részben teljesülnek. Sok esetben a kísérletben vizsgált jelenség fizikai háttere, folyamatai sem ismertek teljesen. Ennek ellenére, mérnöki szempontból megfelelő és biztonságos méretezést lehetővé tevő módszerre van szükségünk. Egy kísérleti adatokra illesztett függvény extrapolációra alkalmatlan, hiszen az illesztett függvény csak a kísérleti elemek méretrendjében megfelelő.

A fizika dimenzióanalízis módszere (Bazant, Yu, 2005; Szirtes, 2006; Carpinteri, Accornero, 2021) és elmélete lehetővé teszi, hogy fizikailag helyes kapcsolatot teremtünk egy vizsgált probléma ismert és/vagy feltételezett fizikai paramétere között. Hátránya, hogy félempirikus, azaz kísérleti, mérési eredményekre van szükség az eredmény használatához.

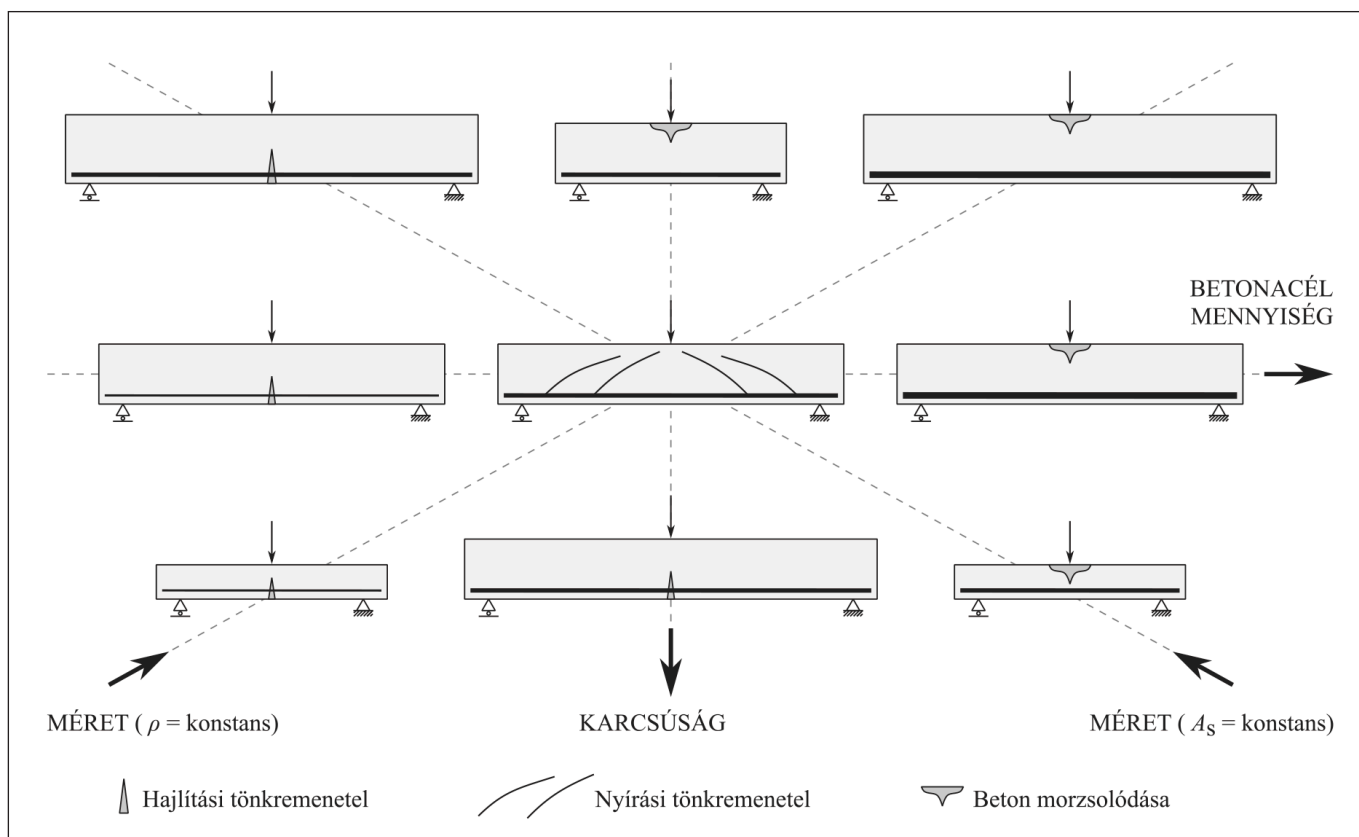
A dimenzióanalízis, dimenzióanalízist, például akkor célszerű alkalmazni (Szirtes, 2006), ha a vizsgálandó szerkezet túl nagy vagy túl kicsi, vagyis annak kísérleti vizsgálata nem valósítható meg. Továbbá célszerű az alkalmazása akkor is, ha a vizsgált szerkezet vagy rendszer paramétere közötti kapcsolatot szeretnénk meghatározni, „mivel az analitikus kifejezés bonyolult, pontatlan, illetve nem ismert” (Szirtes, 2006).

A mérőhatásfüggvény összes paramétere, azok hatása, a mérőhatást okozó fizikai folyamatok pontosan nem ismertek. A gyakorlatban is használható, a függvény aszimptotáit is helyesen visszaadó mérőhatásfüggvényt, dimenzióanalízissel lehet meghatározni.

Ilyen mérőhatásfüggvényt mutatunk be a következő fejezetben az irodalom alapján. A mérőhatásfüggvény eredményeit saját kísérletek eredményeivel is összehasonlítjuk.

### 3. A NYÍRÁSI VASALÁS NÉLKÜLI VASBETON GERENDÁK TEHERBÍRÁSA, TÖNKREMETELI MÓDJAI ÉS AZ AZT BEFOLYÁSOLÓ PARAMÉTEREK

A vasbeton gerendák nyírási teherbírását sok jelenség, paraméter befolyásolja. Különböző megközelítések, elgondolások mentén, és módszerek segítségével készülnek, keletkeznek a nyírási modellek. Azonban minden esetben kísérletek szükségesek ahhoz, hogy a modell működőképes legyen



5. ábra: A tönkremeneteli módok közötti átment lehetőségei [Corrado, Ventura, Carpinteri, 2022].

vagy a működőképessége bizonyítható legyen. Máiig nincs matematikai (a jelenséget minden részletében egyenletekkel leíró) modell, és teljes, tiszta kép a vasbeton gerendák nyírás viselkedéséről. Sok ismeretünk és kísérleti tapasztalatunk van. A különböző kutatók, az eltérő tapasztalataik és a kísérleteikben használt gerendák pl. mérete miatt mást hangsúlyoznak, más jelenségeket tartanak fontosnak.

A nyírás teherbírást, tönkremeneteli módot befolyásoló paraméterek, jelenségek, a teljesség igénye nélkül:

- a gerenda keresztmetszeti méretei;
- a teher jellege és az igénybevételek arányának változása;
- a hosszvasalás mennyisége;
- a beton szilárdsága;
- a beton törési energiája, összefüggésben az adalékanyag maximális szemmagyságával;
- a makro-repedés két partja között átadódó normálfeszültség (lásd 2.1 Kohéziós repedésmodell) és nyírófeszültség (aggregate interlock, shear friction);
- a hosszvasalás hajlítási ellenállása, a csaphatás (dowel action);
- a nyomott beton nyírás ellenállása;
- a beton és a betonacél közötti kapcsolat.

A felsorolásban szereplő paraméterek és hatások egymással is kapcsolatban vannak, lehetnek. Jelenlétük és hatásuk mértéke változó, változhatnak a gerenda méretével, a hosszvasalás mennyiségével vagy a beton tulajdonságaival összefüggésben.

### 3.1 A nyírás vasalás nélküli vasbeton gerendák tönkremeneteli módjai

Vasbeton gerendák kísérletei során többféle tönkremeneteli mód megfigyelhető. A tönkremeneteli mód lehet duktilis vagy rideg. A tönkremenetelt károsodás – repedés és/vagy a betonnak a morzsolódása, szétesése – előzi meg. A látottak,

tapasztaltak sokszor egyértelműen leírhatók, magyarázhatók, néha pedig, egyéni értelmezés szerint, különböző kutatók különböző módon magyarázzák ugyanazt.

Carpinteri és társai (Carpinteri, Carmona, Ventura, 2011a; 2011b; Corrado, Ventura, Carpinteri, 2022) teherbírás szempontjából csak három tönkremeneteli módot különböztetnek meg: hajlítási tönkremenetel, nyírás tönkremenetel, és beton morzsolódása nyomásra. A vasbetongerenda méretének és vasalásának függvényében az egyik vagy másik következik be.

**Hajlítási tönkremenetel:** a maximális nyomaték helyén, egy közel függőleges repedés halad a húzott szélső száltól a nyomott felé. A tönkremenetelt a húzott vasalás megfolyása, majd szakadása jelenti. Ez a tönkremenetel jellemző a kevés húzott vasalással készülő vasbetongerendákra. Ez a tönkremeneteli mód lehet duktilis vagy rideg, a betonacél mennyiségének a függvényében.

**Nyírás tönkremenetel:** egy nyírás repedés (alul függőlegesen induló, majd folyamatosan görbülő repedés) halad a húzott szélső száltól a gerenda nyomott része felé, ami két részre osztja a gerendát (tönkremenetelkor a repedés átfut a nyomott övön). Ekkor a gerenda két részét csak a rugalmas állapotban levő betonacél kapcsolja össze. Nincs mód másik teherviselő-mechanizmus aktivizálására. Ez a tönkremeneteli mód rideg.

**Beton morzsolódása nyomásra:** majdnem olyan, mint a nyírás tönkremenetel. Abban különböznek, hogy amikor a nyírás repedés eléri a nyomott övet, akkor egy másik teherviselő mechanizmus aktivizálható, ez az ívhatás. A nyomott öv és a támasz között kialakuló nyomott „ív” közvetlenül a támaszra továbbítja a terhet. Ez megnöveli a nyomófeszültséget a karcsú, nyírás repedés feletti részen, ahol egy ék alakú rész kitorése vezet tönkremenetelhez. Az ék alakú rész kitorése értelmezhető úgy, mint a nyírás repedés feletti karcsú rész stabilitásvesztése, vagy mint a beton morzsolódása nyomásra. Ez a tönkremeneteli mód is rideg.

Minden tönkremenetelt hosszú, kohéziós repedés kialakulása, fejlődése előz meg, ami alapfeltevése volt a mérhető

egyszerű, törésmechanikai modelljének. Ez a mérethatás modell vagy annak továbbfejlesztett változata használható a nyírási vasalás nélküli vasbeton gerendák teherbírásának vizsgálatára.

(Megjegyezzük, hogy a nyírási tönkremenetel és a beton morzsolódása nyomásra a hajlítási teherbírás elérése után is bekövetkezhet. Ekkor ezek a tönkremeneteli formák a teherbírást nem, csak a gerenda alakváltozó képességét korlátozzák. Most csak azokkal az esetekkel foglalkozunk, amikor az egyes tönkremeneteli módok a gerenda teherbírását korlátozzák. Az alakváltozóképeség korlátozásának kérdésével is foglalkoztunk a (Ther, Sajtos, 2022) cikkben.)

Többféle módon elérhető az átmenet a hajlítási tönkremenetelből a nyírási tönkremenetelbe, majd a beton morzsolódásába (5. ábra).

1. Ha állandó a gerenda mérete, de növeljük a betonacél mennyiségét.
2. Ha állandó a betonacél mennyisége, de csökkentjük a gerenda méretét.
3. Ha növeljük a gerenda méretét állandó vashányad mellett.
4. Ha csökkentjük a gerenda karcsúságát (feszítáv és a keresztmetszet magasságának aránya).

A tönkremeneteli mód változásának lehetőségeit Carpinteri és társai elméletileg, a lineárisan rugalmas törésmechanika eszközeivel (Carpinteri, Carmona, Ventura, 2011a; 2011b), és kísérletileg (Corrado, Ventura, Carpinteri, 2022) is igazolták.

A négy tönkremenetelmenti lehetőségéből kettő, a 2. és a 3. közvetlenül kapcsolódik a mérethatás jelenségéhez. Az 1. és a 4. pedig közvetve hozható vele összefüggésbe.

### 3.2 A nyírási vasalás nélküli vasbeton gerendák mérethatásfüggvénye

A korábban röviden ismertetett mérethatás modell (Bazant, 1984, 1986) kísérleti paraméterei nem állandó, konstans értékek abban az értelemben, hogy ezek is olyan paraméterek függvényei, amelyek befolyásolják a nyírási vasalás nélküli vasbeton gerendák teherbírását, viselkedését. Akkor állandók, ha nem változik a gerenda vashányada, a beton nyomószilárdsága, maximális szemmagysága, a gerenda karcsúsága, a teher fajtája, és még más, amire nem is gondolunk. Csak a gerenda méreteit változtatjuk, mindegyiket azonos arányban. Ha valami mást megváltoztatunk, akkor a mérethatás függvény jellege nem, de értékei változnak. Ebben a formában a mérethatásfüggvény tehát nem alkalmas arra, hogy a gyakorlatban is használható legyen.

Mivel máig nincs matematikai modell, és teljes, tiszta kép a vasbeton gerendák nyírási viselkedéséről, ezért nem ismerjük, nem tudjuk azonosítani az összes teherbírást befolyásoló paramétert. De nagyon sok ismeretünk és kísérleti tapasztalatunk van, ami lehetővé teszi, hogy összegyűjthetők legyenek azok a paraméterek, amelyek bizonyosan, vagy legalább bizonyos körülmények között nagy hatással vannak a nyírási vasalás nélküli vasbeton gerendák teherbírására.

A már említett dimenzióanalízis (Szirtes, 2006; Carpinteri, Accornero, 2021) segítségével fizikailag helyesen lehet összekapcsolni ezeket a változókat úgy, hogy a szükséges kísérleti paraméterek már tényleg „állandónak” vehetők. Az (1) mérethatásfüggvény aszimptotikus viselkedését (3. ábra) is figyelembe lehet és kell venni a dimenzióanalízis használatánál.

Bazant és Yu (Bazant, Yu, 2005) dimenzióanalízis alapján az alábbi összefüggés használatát javasolja nyírási vasalás nélküli vasbeton gerendák nyírási teherbírásának meghatározására:

$$v_u = \frac{v_0}{\sqrt{1 + \frac{d}{d_0}}} \quad (2)$$

ahol

$$v_u = \frac{V}{b_w d} \quad (3)$$

a „nyírószilárdság”, azaz a (szerkezet) gerenda nominális szilárdsága, [MPa];  $V$  – a gerenda teherbírásához tartozó maximális nyíróerő, [N];  $b_w$  ( $b$ ) – a (nyírt) keresztmetszet szélessége, [mm];  $d$  – a keresztmetszet (hatékony) magassága, a gerenda jellemző mérete, [mm];  $d_0$  – viselkedésátmeneti gerendaméret, [mm]. Ha  $d > d_0$  akkor a tönkremeneteli mód rideg, ha pedig  $d < d_0$  akkor pedig duktilis.

$$v_0 = \mu \cdot \rho^{3/8} \left(1 + \frac{d}{a}\right) \sqrt{f_c} \quad (4)$$

ahol

$v_0$  – a nominális szilárdság értéke, [MPa], ha  $d \rightarrow 0$ ;  $\mu = 1,10$  a nominális szilárdság átlagértékének számításához és  $\mu = 0,83$  a nominális szilárdság tervezési értékének számításához;  $\rho$  – a vashányad;  $f_c$  – a beton nyomószilárdságának karakterisztikus értéke, [MPa];  $a/d$  – nyírási karcsúság (részletesen lásd a 3.2.5 fejezetben).

$$d_0 = 693,78 \cdot f_c^{-2/3} \sqrt{d_{max}} \quad (5)$$

ahol

$d_{max}$  – az adalékanyag maximális szemmagysága, [mm].

Fontos hangsúlyozni, hogy bár a (4) és (5) egyenletekben vannak kísérleti adatok alapján meghatározott állandók, de ezek meghatározása mégsem a szokásos statisztikai függvényillesztést jelenti. A függvényalak nem az ábrázolt adathalmaz képe alapján intuitíven felvett forma, hanem a jelenség, ha mégoly egyszerű fizikai modelljének, (1), és a dimenzióanalízis helyes fizikai kapcsolatot eredményező módszerének, a következménye. A fizikai folyamatokat helyesen leíró függvényalaknak a kísérleti adatokra történő statisztikai illesztése eredményezte a (4) és (5) egyenletekben található állandókat. A függvényillesztéshez és a paraméterek kapcsolatának meghatározásához Bazant és Yu (2005) az ACI-445F adatbázis (Reineck et al, 2003) kísérleteinek adatait használta. Ezen kívül még, többek között, Leonhardt és Walter (1962), Kani (1967), a Northwestern University (Bazant, Kazemi, 1991), a University of Toronto (Collins, Kuchma, 1999; Angelakos et al, 2001) kísérleteit is figyelembe vették, összesen közel 400 kísérletsorozat adatait (ez több ezer gerendakísérletet jelent). Az illesztett függvény variációs tényezője 14-15%, annak ellenére, hogy a kísérletek térben és időben különböző helyen és korban készültek, egyáltalán nem a mérethatásfüggvény meghatározása céljából.

A kísérleti adatok közelebb vannak a lineárisan rugalmas törésmechanika szerinti 2:1, mint a Weibull féle laposabb aszimptotához. Ez is mutatja, hogy rideg a vasbeton gerendák nyírási tönkremenetele. Továbbá ez azt is jelenti, hogy a törési energia sokkal fontosabb paraméter ebben az esetben, mint a szilárdság. *Fontos megjegyezni, hogy a (2) és (3) egyenletekkel megadott „nyírószilárdság” nem a gerenda egy bizonyos keresztmetszetéhez, hanem magához az adott terhelésű, anyagú és méretű gerendához tartozik. Mindez független attól, hogy a gerenda mentén hol alakul ki a tönkremenetelt okozó nyírási repedés a maximális nyíróerő helyéhez képest.*



Ez azt is jelenti, hogy ha ugyanolyan vasbeton gerendát más jellegű (koncentrált, megoszló), elrendezésű teherrel terhelünk, akkor a különböző terhelésű gerendák „nyírószilárdsága” (teherbírása) különböző lesz, és eltérő helyen jelenik meg a nyírási repedés.

A következő fejezetekben a (2) függvényt befolyásoló paraméterek hatását vizsgáljuk meg. Megpróbáljuk megérteni, hogy milyen fizikai jelenségek, folyamatok köthetők hozzájuk.

### 3.2.1 A gerenda méretének a hatása

A gerenda  $d$  méretének a hatása jól kiolvasható az (1) és (2) egyenletekből (3. ábra). A  $d$  méret változtatása az összes többi méretnek (támaszköz, szélesség) ugyanolyan arányú változtatását is jelenti.

Ha megváltoztatjuk a gerenda magasság-szélesség arányát, akkor ugyanaz a mérethatásfüggvény, (1) és (2) egyenlet független a szélességtől. Azonban a nominális szilárdságból számítható nyírási ellenállás – a nyíróerő – a szélességgel egyenes arányban változik.

A gerenda és a törési zóna (FPZ) méretének egymáshoz való viszonya befolyásolja, meghatározza a gerenda tönkremeneteli módját. A törési zóna mérete összefüggésben van az adalék maximális szemmagyságával is. A maximális szemmagyság növelése növeli a törési zóna méretét.

Ha a törési zóna mérete (lásd 2.1 fejezet) kicsi a gerenda méreteihez képest, akkor a lineárisan rugalmas törésmechanika jól modellezi a gerenda rideg viselkedését. Ilyenkor biztosan kifejlődik egy makro-repedés, ami a repedéshossz növekedésének végén instabilan terjed, rideg viselkedést eredményezve. A makro-repedésnek a kialakulása fokozatosan csökkenti a gerenda teherbírását biztosító méretét. Ha a gerenda (keresztmetszeti) mérete és a törési zóna mérete között kicsi a különbség, akkor a gerendának duktilis a viselkedése, amint az a 3. ábra alapján is megállapítható. Ilyenkor a törési zóna gyakorlatilag a teljes hatékony magasságban megjelenik, anélkül, hogy makro-repedés alakulna ki, azaz nem csökken lényegesen a teherbírás biztosító rész. A kohéziós repedésmodellnek megfelelően ekkor még a feszültség is kellően nagy a törési zónában.

A gerenda támaszközét is a többi mérettel azonos módon skálázzuk. Egy mérethatásfüggvényhez a feszítáv/magasság aránya, a hajlítási karcsúság állandó (Palotás, 1973). Tehát a gerenda támaszköze közvetlenül nem befolyásolja a nyírási ellenállást. Azonban, mivel a hatékony magassággal arányosan változik a támaszköz, a  $d$  méret nem önmagában változtatja a nyírási ellenállást, hanem a szélességgel és a támaszközzel együtt közösen teszik azt.

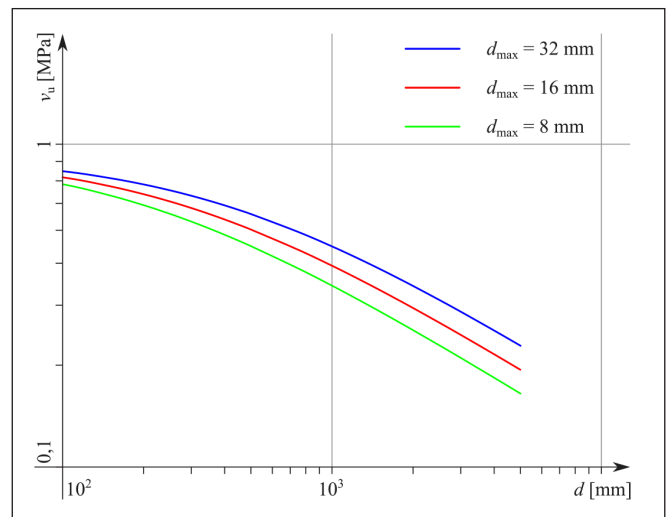
A támaszközzel arányos a nyírási karcsúság is (Palotás, 1973; Kani, 1964), ami a geometriai méretektől eltérő módon hat a nyírási teherbírásra (lásd 3.2.5 fejezetben).

### 3.2.2 A beton szilárdságának a hatása

A beton szilárdsága, nyomószilárdsága,  $f_c$ , megjelenik mind a  $v_0$ , (4), és mind a  $d_0$ , (5) képletében, tehát a (2) összefüggés számlálójában és nevezőjében is.

A számlálóban  $f_c$  növekedése növeli a nyírószilárdságot, a mérethatásfüggvény (3. ábra) fölfelé tolódik el. Mivel  $\sqrt{f_c}$  a beton húzószilárdságával arányos, ezért a beton húzószilárdságának növelése növeli a gerenda nyírószilárdságát.

A nevezőben  $f_c$  növekedése csökkenti  $d_0$  viselkedésátmeneti méret értékét. Ha  $d > d_0$  akkor a tönkremeneteli mód rideg, ha pedig  $d < d_0$  akkor duktilis. Az  $f_c$  növelésével csökkenő  $d_0$  érték azt jelenti, hogy ha növeljük a beton szilárdságát, már kisebb gerendaméretnél tapasztalható rideg viselkedés.



6. ábra: A gerenda nyírószilárdságának változása a beton adalékanyag maximális szemmagyságának növekedésével: C30/37,  $\rho = 0,5\%$ ,  $a/d = 3$ .

### 3.2.3 Az adalékanyag maximális szemmagyságának a hatása

Az adalékanyag maximális szemmagysága,  $d_{max}$ , a  $d_0$  viselkedésátmeneti méretet, (5), változtatja. Hatását úgy tárgyaljuk, hogy feltételezzük, a betonosztály és a beton szilárdsága nem változik, ezen kívül a vashányadot és a nyírási karcsúságot is állandónak vesszük.

A  $d_{max}$  növelésével nő a  $d_0$  viselkedésátmeneti méret, azaz nagyobb méretű szerkezeteknek is duktilis lesz a tönkremeneteli módja (6. ábra). Azonos méretű gerendák esetében a  $d_{max}$  növelése – a gerenda méretének függvényében kisebb-nagyobb mértékben – növeli a gerenda nyírószilárdságát (6. ábra). A nyírószilárdság változásáról az 1. és 2. táblázat ad tájékoztatást. A beton nyomószilárdságának, pl. két betonosztállyal történő változása csak nagyon kicsit, 1-3%-ban változtatja a nyírószilárdságot. A  $d_{max}$  növelése jelentősen, akár 20-30%-kal is növelheti a gerenda nyírószilárdságát (lásd 1. és 2. táblázat) normálszilárdságú betonok esetében, a gerendaméret függvényében. A vashányad és a nyírási karcsúság nem változtatja a  $d_{max}$  okozta nyírószilárdságváltozás mértékét.

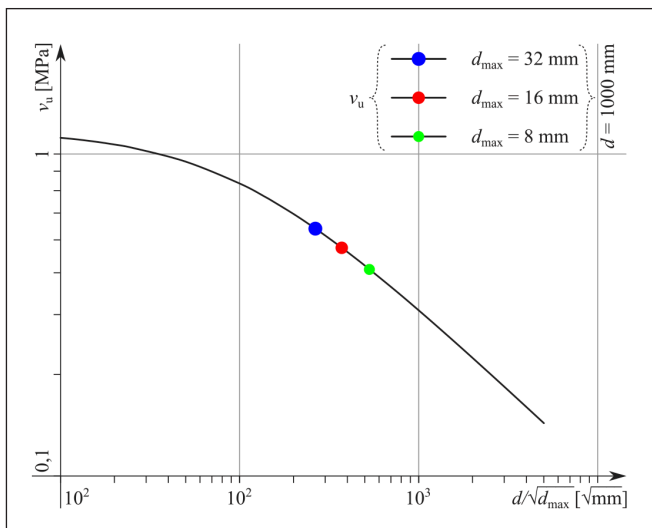
A mérethatásfüggvény ábrázolható a változó függvényében

1. táblázat: A C30/37,  $\rho = 1,0\%$ ,  $a/d = 3$  gerenda nyírószilárdságának változása %-ban, a mérethatásfüggvény szerint, a beton adalékanyag maximális szemmagyságának növekedésével. A változást a  $d_{max} = 8$  mm szemmagyságú betonnal készült gerendához képest határoztuk meg az egyes magassági méretekhez.

$d_{max}$ [mm]	A gerenda magassága, $d$ [mm]				
	250	500	750	1000	1500
8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
16	+9,2	+12,3	+14,0	+15,0	+16,1
32	+17,5	+24,5	+28,4	+30,8	+33,7

2. táblázat: A C20/25,  $\rho = 1,0\%$ ,  $a/d = 3$  gerenda nyírószilárdságának változása %-ban, a mérethatásfüggvény szerint, a beton adalékanyag maximális szemmagyságának növekedésével. A változást a  $d_{max} = 8$  mm szemmagyságú betonnal készült gerendához képest határoztuk meg az egyes magassági méretekhez.

$d_{max}$ [mm]	A gerenda magassága, $d$ [mm]				
	250	500	750	1000	1500
8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
16	+7,9	+11,2	+12,9	+14,1	+15,4
32	+14,9	+21,8	+25,9	+28,5	+31,8



7. ábra: A gerenda nyírószilárdságának változása a  $d^{\sqrt{d_{\max}}}$  függvényében: C20/25,  $\rho = 0,5\%$ ,  $a/d = 3$ .

is (7. ábra). Ha a betonosztály, a beton szilárdsága nem változik, és a vashányadot valamint a nyírási karcsúságot is állandónak vesszük, akkor egyetlen függvénnyel lehet megadni az összes lehetséges méret és maximális szemmagyság kombinációhoz a gerenda nyírószilárdságát. Ezen a függvényen jobban látható, hogy egy adott méretű gerenda nyírószilárdságát hogyan változtatja a maximális szemmagyság. A maximális szemmagyság növelése csökkenti a értékét, ami nagyobb gerenda nyírószilárdságot jelent, lásd a 7. ábrát.

Az adalékanyag maximális szemmagyságának,  $d_{\max}$ , a változása, adott betonosztály, betonszilárdság, esetében változtatja a beton törési energiáját. Ez a kohéziós repedésmodell szerint szabályozza a törési zónában levő feszültségek nagyságát és eloszlását, továbbá meghatározza a repedésterjedés lehetőségét a repedéstágasság függvényében.

Az adalékanyag szemszerkezete szerint alakul a makrorepedés felületének a geometriája. Ha kicsi a maximális szemmagyság, akkor a repedésfelület tapintásra érdes, de nem nagyon „hullámzó”. Ha nagy a maximális szemmagyság, akkor a repedésfelület tapintásra inkább sima, de nagymértékben „hullámzó”.

A repedésfelülettel párhuzamos relatív eltolódás során aktivizált nyírási ellenállást (aggregate interlock, shear friction) – a szemcse-cementhabarcs kapcsolat erősségén és a cementhabarcs szilárdságán kívül – elsősorban a repedési felület geometriája, tehát az adalékanyag szemszerkezete és az azt jellemző maximális szemmagyság befolyásolja.

(A repedésfelülettel párhuzamos relatív eltolódás lehetőségét a gerenda hosszvasalása szabályozza, ha lenne nyírási vasalás, pl. kengyel, akkor az is korlátozná ezt a mozgást és így a neki megfelelő nyírási ellenállást.)

A maximális szemmagyság,  $d_{\max}$ , paraméteren keresztül a beton törési energiájának, a törési zóna kohéziós repedéseinek és a repedésfelület nyírási ellenállásának (aggregate interlock, shear friction) a gerenda nyírási ellenállását befolyásoló hatását is figyelembe veszi a modell.

A törési zóna kohéziós feszültségei kisméretű gerendáknál nagymértékben hozzá tudnak járulni a gerenda nyírási ellenállásához, pl. ez elérheti a teljes nyírási ellenállás 30%-át (Cavagnis, Ruiz, Muttoni, 2018). Nagyméretű gerendáknál ennek a hatása csekély. Hasonló mondható el a repedésfelület nyírási ellenállásáról (aggregate interlock, shear friction) is.

### 3.2.4 A gerenda hosszvasalásának hatása

A gerenda hosszvasalását a  $\rho$  vashányaddal jellemezzük. A  $\rho$  vashányad növelése, a (4) képlet szerint növeli a gerenda nyírószilárdságát.

Ha növeljük a hosszvasalás mennyiségét, mivel az gátolja a nyírási repedés megnyílását, ezért növelhető a gerendán a teher azzal összefüggésben, hogy a makro-repedés terjedését a törési energia és a kritikus repedéstágasság elérése indítja. Ha nagyobb teherrel terjed tovább a repedés, akkor a nagyobb teherhez tartozó rövidebb repedés felett nagyobb a nyomott öv magassága, arányosan a nagyobb teherrel, ami megfelelő ellenállást tud biztosítani. (Megjegyezzük, hogy a nyomott övben elhelyezett hosszvasalás is növeli a gerenda nyírási teherbírását azzal, hogy ez is gátolhatja a nyírási repedés megnyílását és csökkenti a betonban működő nyomófeszültség nagyságát. Mindkét hatás hátráltatja a nyomott betonöv tönkremenetelét.)

A vashányad növelése megváltoztatja a gerenda tönkremeneteli módját is, amint azt már a 3.1 fejezetben is írtuk. Állandó gerendaméret mellett, a vashányad növelésével, a rideg hajlítási, majd duktilis hajlítási tönkremenetel után a rideg nyírási, ezután pedig a rideg tönkremenetelt okozó betonmorzsolódás várható. Ha állandó a  $\rho$  vashányad és arányosan növeljük a gerenda méretét, akkor ugyanilyen rend szerint változik a tönkremeneteli mód a gerenda méreteinek növekedésével.

A rideg – duktilis hajlítási tönkremenetelátmenethez tartozik a – szabványban megadott – minimális vashányad.

### 3.2.5 A nyírási karcsúság hatása

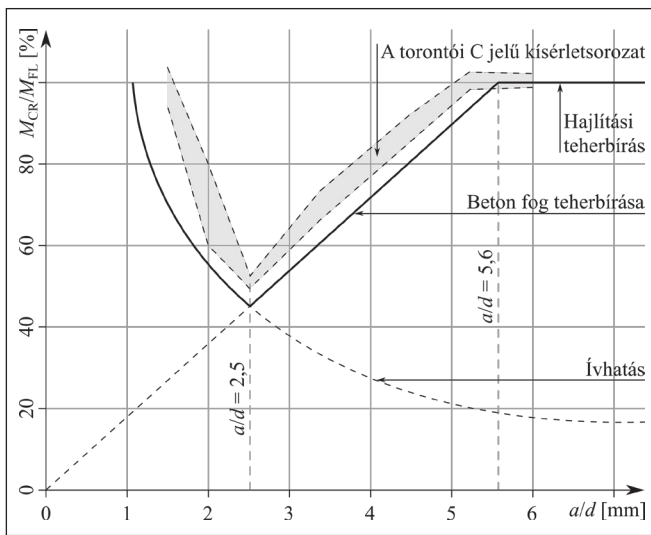
A nyírási karcsúság,  $a/d$ , mint fogalom ugyan csak később alakult ki, de Kani volt az első, aki mélyrehatóan, és értelmezően foglalkozott vele (Kani, 1964, 1966, 1967). Kortársai (Leonhardt és Walter, 1962; Palotás, 1967) figyelmét sem kerülte el a jelenség. Nagyszámú kísérlete kapcsán Kani megfigyelte, hogy azonos keresztmetszeti méretek mellett a nyírási vasalás nélküli gerendák támaszköze hogyan befolyásolja a teherbírásukat. Bevezette a nyírási hossz fogalmát (shear span – a dominánsan nyírt gerendaszakasz hossza), ami a maximális nyomaték és maximális nyíróerő hányadosa:  $a = M_{\max} / V_{\max}$ . Ennek segítségével definiálta a nyírási karcsúságot:  $a/d$ , melyben  $d$  a keresztmetszet hatékony magassága. Három és négy pontos hajlítás esetén  $a$  egyenlő a támasz és a hozzá közelebbi terhelési pont távolságával, azaz három pontos hajlítás esetén a támaszköz fele a nyírási hossz. Egyenletesen megoszló teher esetén pedig a támaszköz negyedével lesz egyenlő.

Kísérleteinek kiértékelésekor Kani a különböző szélességű és magasságú gerendák eredményeinek összehasonlíthatósága érdekében nem a valós teherbírást, hanem a törőteherhez tartozó nyomaték érték,  $M_{CR}$ , valamint a keresztmetszet képlékeny nyomatéki ellenállásának  $M_{FL}$ , hányadosát használta,  $M_{CR}/M_{FL}$ . Az eredmények a 8. ábrán láthatóak.

Kani a gerendák tönkremeneteli módjait három jól elkülöníthető csoportba osztotta:

- Ha a nyírási karcsúság kisebb, mint 2,5, akkor a gerendák tönkremeneteli oka a beton morzsolódása az ívhatás következtében, a gerenda teherbírása általában nem éri el a hajlítási teherbírását. (Vegyük észre, hogy a 2,5-es nyírási karcsúság három pontos hajlítás esetén 1:5 arányú gerendát jelent, mely a gerenda modelljeink alsó korlátja.)
- Ha a nyírási karcsúság nagyobb, mint 5,6 (ez az érték vasalás függő, ahogy Kani később ezt is megmutatta (Kani, 1966)), ekkor hajlításra megy tönkre a gerenda.
- A két előbbi érték közötti nyírási karcsúságoknál nyírásra





**8. ábra:** Kani-völgy: nyírási vasalás nélküli vasbeton gerendák teherbírása a nyírási karcsúság függvényében (Kani, 1964, 1966, 1967).

megy tönkre a gerenda, ekkor a gerenda teherbírása nem éri el annak hajlítási teherbírását.

Az utóbbi tönkremenetelt Kani (1964) az ún. konzolhatással (cantilever action) próbálta meg leírni, mellyel konzervatív, de a Mörsch-féle rácsostartó modellnél pontosabb becslést tudott adni a nyírási ellenállás számításához. (Megjegyezzük, hogy a gerenda hajlítási teherbírásának elérése után is bekövetkezhet nyírási tönkremenetel, azonban ekkor az csak a gerenda alakváltozókéességét, duktilitását korlátozza.)

Későbbiekben az ábra alakja miatt (8. ábra) a jelenséget Kani-völgynek nevezték el.

A szerzők véleménye szerint a Kani-féle (Kani, 1964) és a Carpinteri-féle (Carpinteri et al, 2011) tönkremeneteli formák páronként megfeleltethetők egymásnak.

A nyírási karcsúság,  $a/d$ , a (2) képlet számlálójában, formában jelenik meg. A nyírási karcsúság növekedésével az összeg csökken, tehát a gerenda nyírószilárdsága csökken. A függvényillesztéshez használt adatbázisban a gerendák nyírási karcsúsága 3,5 és 8 között változott.

Az  $1+(a/d)^{-1}$  összeg két tagja úgy értelmezhető, mint a gerendák nyírási viselkedésénél megkülönböztethető gerenda- és ívhatáshoz tartozó nyírási teherbírásrészek,  $V = V_A + V_B$ , (Bazant, Kim, 1984). Az ívhatásnak (B) megfelelő teherviselési mód esetében a teher (a nyíróerő) egy része közvetlenül a támaszra hárítható a gerendán belül kialakuló nyomásvonal mentén. Az ívhatáshoz tartozó nyírószilárdságrész egyenesen arányos a nyírási karcsúság fordítottjával  $V_B/(b \cdot d) \sim d/a$ . A gerendahatás (A) esetében pedig a teher (a nyíróerő) a beton és a betonacél közötti együttműködés eredményeként egyensúlyozható. Ekkor a nyírószilárdságrész egy pozitív konstans adja,  $V_A/(b \cdot d) =$  pozitív konstans, ami a javasolt (4) képletben 1.

Az ívhatás a támaszok közelében mindenképpen hatékony, és ennek a következménye, hogy itt csökkenthető a méretezéshez használt nyíróerő. Az ívhatás akkor lehet domináns az egész gerendán, ha a gerenda zömök, tehát a hajlítási karcsúsága kicsi.

## 4. KÍSÉRLETI PROGRAM

Kisméretű, nyírási „nem” vasalt vasbeton gerendákkal hárompontos hajlítókísérleteket végeztünk 2000-ben, a Szilárdságtani és Tartószerkezeti Tanszék, Czákó Adolf Laboratóriumában. A kísérletben azt vizsgáltuk, hogy a beton adalékanyag szemszerkezete hogyan befolyásolja a gerenda viselkedését, tönkremeneteli módját és teherbírását, ha a használt beton

**3. táblázat:** A kísérlethez használt beton és betonacél jellemzői.

Beton					Betonacél		
$f_{cm,cyl}$ [MPa]	$f_t$ [MPa]	$E_c$ [GPa]	$d_{max}$ [mm]	$G_F$ [N/m]	$f_{sy}$ [MPa]	$E_s$ [GPa]	$\rho$ [%]
16,5	1,25	25,4	8	35,5	607,1	203	0,71 vagy 1,07
22,1	1,75	28,0	16	52,5			
21,9	1,74	27,9	32	100,5			

betonosztálya, szilárdsága ugyanaz. A szemszerkezet jellemzésére az adalékanyag  $d_{max}$  maximális szemmagyságát használtuk.

Háromféle maximális szemmagysággal, 8 – 16 – 32 mm, C16/20 betonosztályú betont terveztünk. Mindegyik betonból, kétféle vasalással (2 $\phi$ 8 mm és 3 $\phi$ 8 mm), 3-3 db, összesen 18 db, 1,00 m támaszközű, 100/140 mm keresztmetszeti méretű gerendát készítettünk,  $a/d = 3,97$  nyírási karcsúsággal (9. ábra). (Minden gerenda nyomott övében elhelyezésre került 2 $\phi$ 8 mm betonacél is, amelyeket  $\phi 4,2/250$  mm kiosztású kengyelekkel pozícionáltunk. A feltételezésünk szerint ezek a kengyelek érdemben nem befolyásolták a gerendák nyírási teherbírását, mivel a kengyelek távolsága lényegesen nagyobb, mint a gerenda hatékony magassága.)

A beton szilárdságát szabványos próbakockákon, a betonacél jellemzőit húzott próbapálcán mértük. A kockaszilárdság alapján becsültük a beton többi, elméleti modellekhez szükséges jellemzőit. A beton törési energiáját a RILEM ajánlása (Karihaloo, 1997) alapján határoztuk meg. A beton és a betonacél anyagjellemzőit a 3. táblázat tartalmazza.

A megszilárdult betonok betonosztályba sorolását az MSZ 4798:2016 szabvány alapján végeztük el. A 16 és 32 mm maximális szemmagysággal készített betonok szilárdsági osztálya a tervezettnél megfelelő és azonos, C16/20 lett. A  $d_{max} = 8$  mm-es beton szilárdsága kisebb, a betonosztálya C12/16 volt. (Megjegyezzük, hogy amennyiben az MSZ EN 1992-1-1:2010 szabványnak a betonszerkezetek tervezése során használandó, a karakterisztikus szilárdsághoz tartozó, átlagos szilárdsági adatok számítási módjából indulunk ki, akkor a kísérleti betonok betonosztálya C16/20 helyett C12/16 és C12/16 helyett C8/10 lenne. A kísérletek értékelése szempontjából az a fontos, hogy a 16 és 32 mm maximális szemmagysággal készített betonok szilárdsági osztálya azonos és a  $d_{max} = 8$  mm-es beton eggyel alacsonyabb szilárdsági osztályba tartozik.)

A mai építési viszonyok között a kísérleti betonok szilárdsága alacsony. A kísérleti eredmények jövőbeli használhatóságát, hasznosságát azonban mi sem bizonyítja jobban, minthogy a közeljövőben egyre több korábban épült és/vagy történeti vasbetonszerkezetet kell felújítanunk, megmentenünk, többek között a fenntarthatósági szempontok fontosságá válása, a klímacélok elérése, azaz a széndioxid kibocsátás csökkentése érdekében.

A 32 mm maximális szemmagyságú beton nem ideális a gerenda kicsi keresztmetszeti méretei és az ebből adódó betonacél távolság miatt. A kísérletek tervezése idején rendelkezésünkre álló körülmények és lehetőségek ismeretében született meg annak idején a döntés a 32 mm maximális szemmagyságú beton kísérleti használatáról annak érdekében, hogy a kísérleti célok olyan paraméter tartományban legyenek megvalósíthatók, ami az eredmények alapján lehetőséget biztosít bizonyos általános következtetések levonására is. Sem a gerendák betonozása, sem a kísérletek során nem volt rossz tapasztaltunk amiatt, hogy nagy volt az adalékanyag maximális szemmagysága. A gerendák nem lettek fészkesek és a 3-3 kísérleti gerenda mind a tönkremeneteli mód, mind a teherbírás tekintetében hasonló eredményt adott.

Az előzetes, szabványos, tervezési módszerek szerint a kísérleti gerendák hajlítási teherbírása kisebb, mint a nyírási teherbírás, azaz duktilis, hajlítási tönkremenetel volt várható.

## 4.1 Kísérletek kiértékelése, eredmények

A kísérletek során, az előzetesen várthoz képest más, különböző tönkremeneteli módokat és eltérő teherbírást tapasztaltunk a változó maximális szemmagyságú betonnal és más vasalással készülő gerendáknál (4. táblázat). A 3-3 azonos típusú gerenda viselkedése és teherbírása hasonló volt.

A gerendák végső, tönkremeneteli állapotában a repedéskép, a töréskép, a 10. és 11. ábrán láthatóak a kétféle vasaláshoz és változó maximális szemmagysághoz.

A teher – lehajlás ábrák (12. és 13. ábrák) alapján megállapítható, hogy:

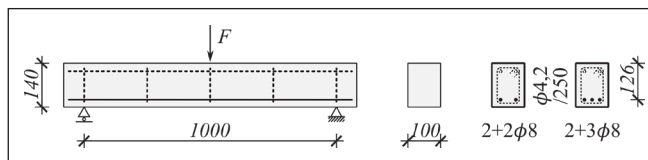
A  $2\phi 8$  vasalás esetében (10. és 12. ábrák):

- Amikor  $d_{\max} = 8$  mm, a gerenda nem érte el a hajlítási teherbírását és nyírásra ment tönkre, a tönkremenetelt okozó ferde nyírási repedés meredek és a támaszhoz közelebb alakult ki.
- Amikor  $d_{\max} = 16$  mm, a gerenda hajlításra ment tönkre, nagy alakváltozóképeséggel, duktilisan, a húzott vasalás közepén, a koncentrált erő alatt megfolyt.
- A  $d_{\max} = 32$  mm maximális szemmagyságú gerenda nyírásra ment tönkre, de a teherbírása éppen elérte annak hajlítási teherbírását, tehát a nyírási tönkremenetel „csak” a gerenda alakváltozóképeségét korlátozta, a tönkremenetelt okozó ferde nyírási repedés meredek és a koncentrált terhelő erőhöz közel alakult ki.

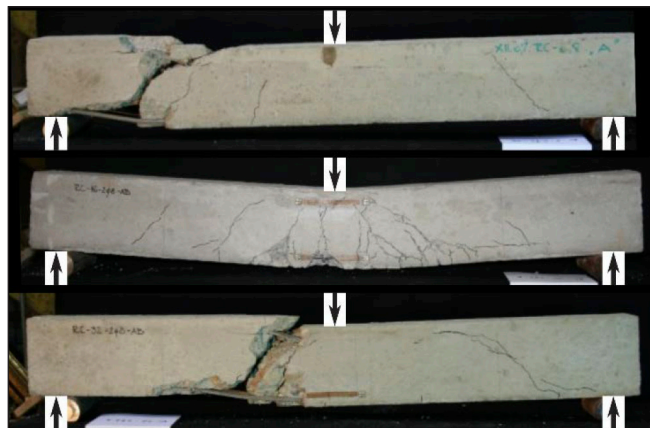
A  $3\phi 8$  vasalás esetében (11. és 13. ábrák):

- Amikor  $d_{\max} = 8$  mm és  $d_{\max} = 16$  mm, a gerenda nem érte el a hajlítási teherbírását és nyírásra ment tönkre, mindkét esetben a tönkremenetelt okozó ferde nyírási repedés meredek és a támaszhoz közelebb alakult ki.
- A  $d_{\max} = 32$  mm maximális szemmagyságú gerenda is nyírásra ment tönkre, de a teherbírása talán elérte annak hajlítási teherbírását, azaz a nyírási tönkremenetel megakadályozta a gerenda duktilis alakváltozóképeségét, a ferde nyírási repedés lapos és a „támasztól” a terhelő koncentrált teherig fut.

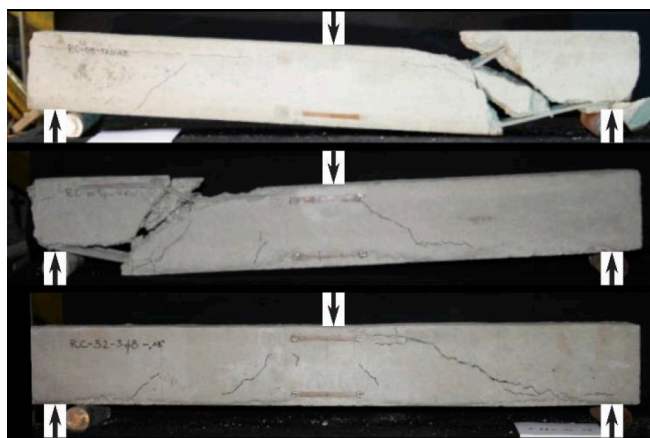
Már korábban is vizsgáltuk a tönkremeneteli mód és teherbírás ilyen módon történő változását, változékonyságát, összefüggésben a  $d_{\max}$  maximális szemmagyság változásával. Vajk és Sajtos (2015) megmutatta, hogy a „kritikus nyírási repedés elmélet” (Critical Shear Crack Theory), (Muttoni, Ruiz, 2008), és a *fib* Model Code 2010 (*fib*, 2013) alapján általában jól becsülhető a gerendák teherbírása és tönkremeneteli módja is,



9. ábra: A kísérleti elem geometriája, vasalása és terhelési módja.



10. ábra: A  $2\phi 8$  vasalású gerendák végső, tönkremeneteli állapotának repedésképe: (fentről lefelé)  $d_{\max} = 8$  mm,  $d_{\max} = 16$  mm,  $d_{\max} = 32$  mm.



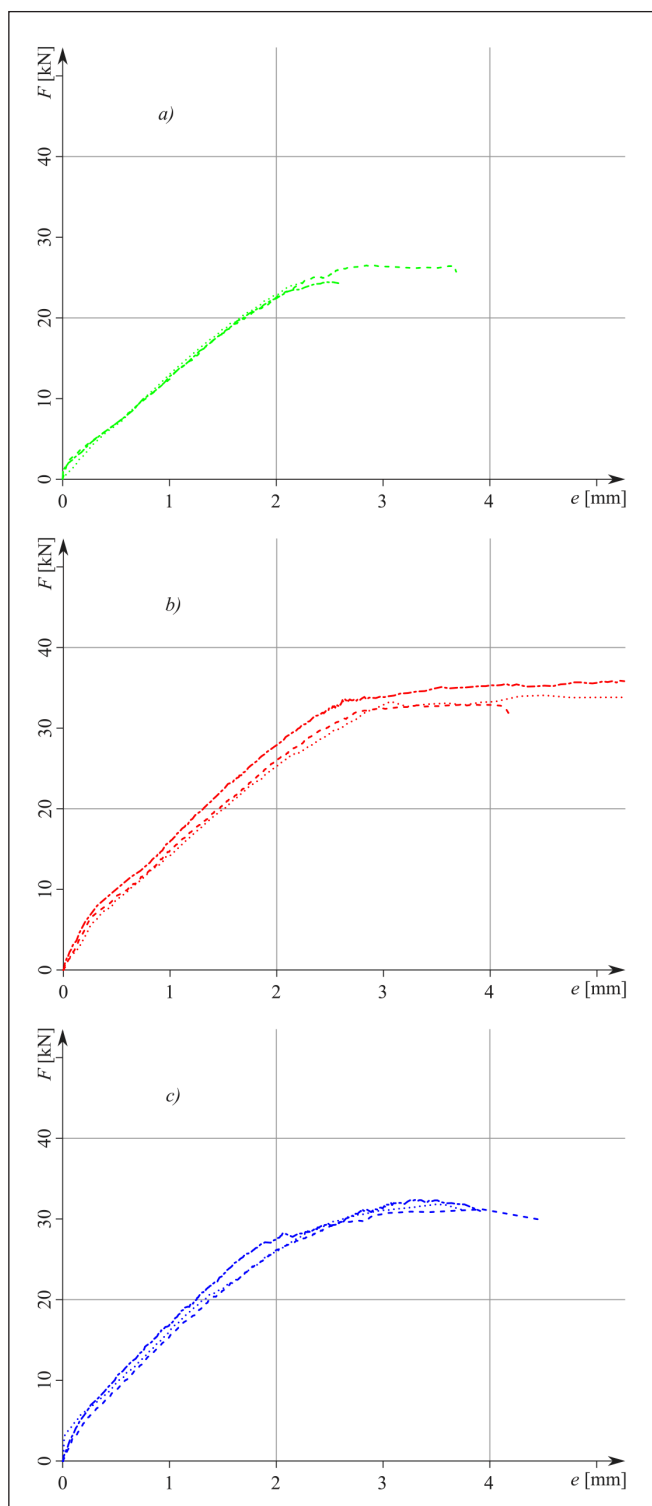
11. ábra: A  $3\phi 8$  vasalású gerendák végső, tönkremeneteli állapotának repedésképe: (fentről lefelé)  $d_{\max} = 8$  mm,  $d_{\max} = 16$  mm,  $d_{\max} = 32$  mm.

kivéve a duktilis hajlítási tönkremenetelt. Ther és Sajtos (2022) az ATENA nem-lineáris végeelem szoftver használatával megmutatta, hogy a kísérleti gerendák teherbírása, és tönkremeneteli módja a kísérleteknek megfelelően határozható meg a numerikus szimuláció segítségével (14. ábra). A számításban külön vizsgáltuk a gerenda szimmetrikus és aszimmetrikus tönkremeneteli módjának a teherbírását befolyásoló hatását is.

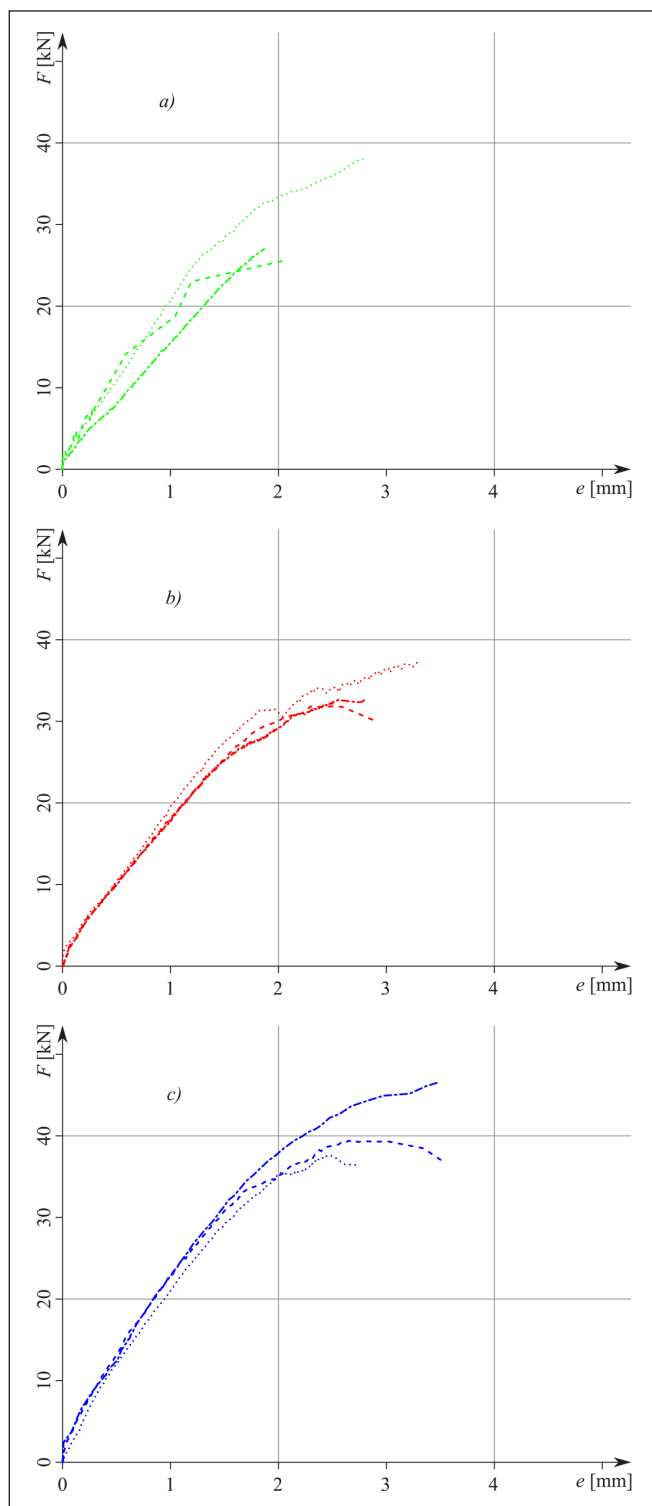
Mindkét vizsgálat alapján megállapítható volt, hogy a kísérleti elemek viselkedése összefüggésben van a beton adalékanyag maximális szemmagyságával, végső soron a beton törési energiájával. Az utóbbi pedig meglehetősen érzékenyen befolyásolja a numerikus modell eredményeit is.

4. táblázat: A kísérleti gerendák teherbírása.

A kísérleti elem jele	$A_s$ [mm <sup>2</sup> ]	$d_{\max}$ [mm]	$f_{cm,cyl}$ [MPa]	$F_{\max}$ [kN]
RC-8-2-8-A, RC-8-2-8-AB, RC-8-2-8-B	101	8	16,5	24,4; 26,4; 24,4
RC-16-2-8-A, RC-16-2-8-AB, RC-16-2-8-B	101	16	22,1	37,3; 32,9; 42,6
RC-32-2-8-A, RC-32-2-8-AB, RC-32-2-8-B	101	32	21,9	31,8; 31,2; 32,4
RC-8-3-8-A, RC-8-3-8-AB, RC-8-3-8-B	151	8	16,5	38,1; 25,6; 27,0
RC-16-3-8-A, RC-16-3-8-AB, RC-16-3-8-B	151	16	22,1	37,3; 31,8; 32,8
RC-32-3-8-A, RC-32-3-8-AB, RC-32-3-8-B	151	32	21,9	37,6; 39,5; 46,6



**12. ábra:** A 2φ8 vasalású gerendák teher – lehajlás ábrái:  
 a)  $d_{\max} = 8$  mm, b)  $d_{\max} = 16$  mm, c)  $d_{\max} = 32$  mm.



**13. ábra:** A 3φ8 vasalású gerendák teher – lehajlás ábrái:  
 a)  $d_{\max} = 8$  mm, b)  $d_{\max} = 16$  mm, c)  $d_{\max} = 32$  mm.

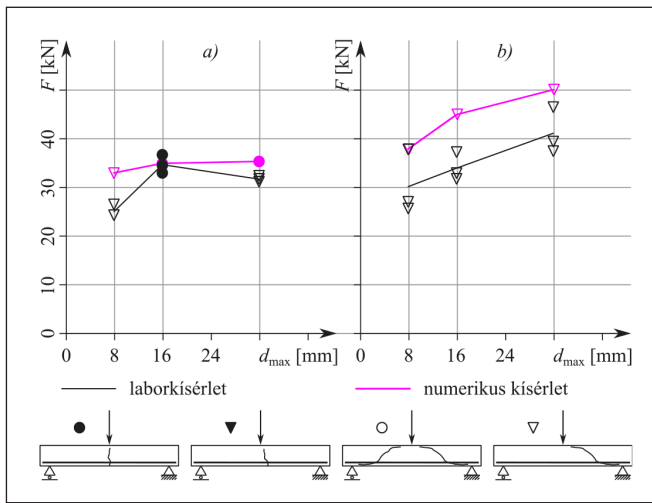
## 4.2 A KÍSÉRLETI EREDMÉNYEK ÉS AZ „ELMÉLETI MÉRETHATÁSMODELL” ÖSSZEHASONLÍTÁSA

A kísérleti gerendák adataival (3. táblázat) meghatároztuk a (2) mérethatásfüggvény alapján a gerendák nominális nyírószilárdságát. A 15. ábrán láthatók a mérethatásfüggvények a kétféle vasaláshoz. A betonok szilárdsága és az adalékanyag maximális szemmagysága is változott. A  $d_{\max} = 8$  mm és a  $d_{\max} = 16-32$  mm szemmagyságú gerendák mérethatásfüggvényei között, a szilárdságkülönbség miatt, nagyobb, a  $d_{\max} = 16$  mm

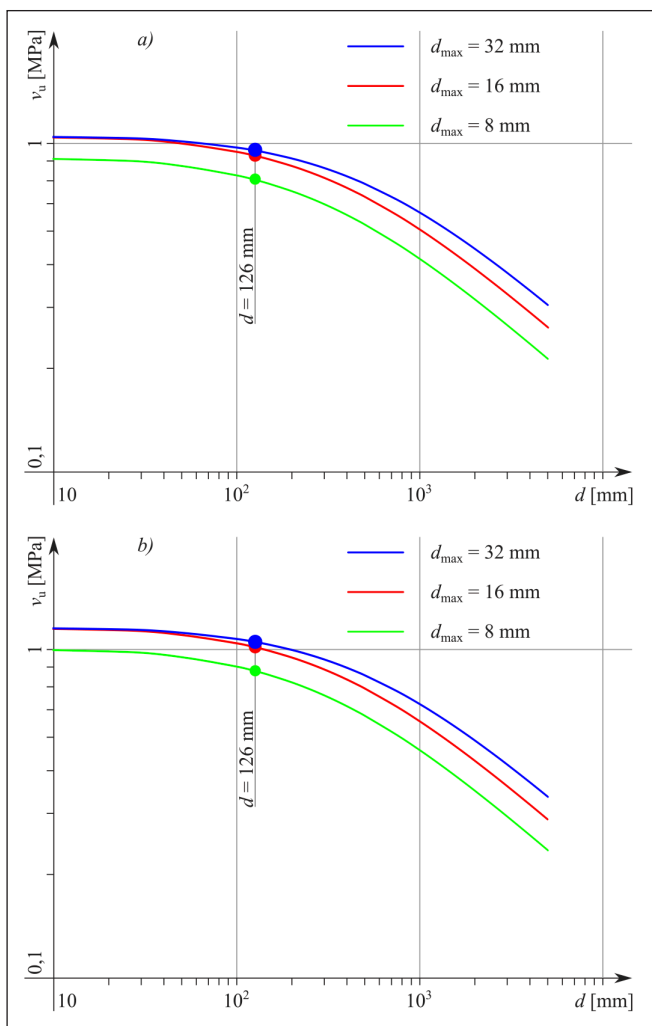
és  $d_{\max} = 32$  mm szemmagyságú gerendák között, a gerenda kicsi méretei miatt csekély az eltérés. A gerendák kicsi méretei miatt – ismerve a mérethatásfüggvény aszimptotikus tulajdonságait – nem várható nagy különbség a különböző maximális szemmagyságú betonból készült gerendák nominális nyírószilárdsága között. Van azonban egy határozott, determinisztikus változása az elméleti adatoknak – még ha nem is túl nagy – ami nem a véletlen, azaz a jellemzők statisztikai változékonyságának, hanem a determinisztikus mérethatásnak a következménye.

A 16. ábrán összehasonlítjuk a kísérleti eredményeket az elméleti mérethatásfüggvénnyel. A kísérletek nagyobb gerenda nyírószilárdságot eredményeztek, mint amit az elméleti mo-



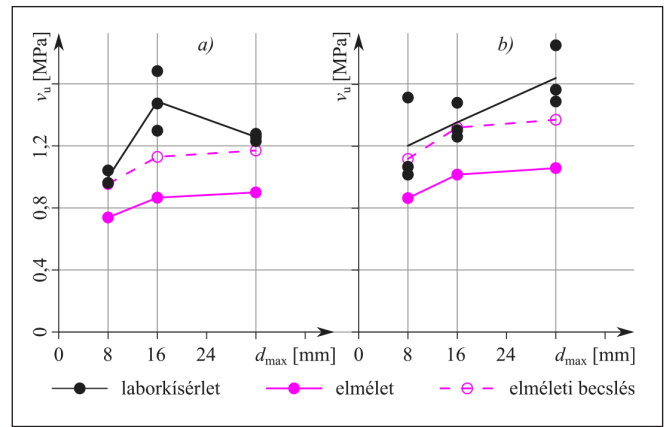


**14. ábra:** A kísérleti gerendák ATENA nem-lineáris végeselem szoftverrel számított teherbírása: a) a 2Φ8 és b) a 3Φ8 vasalású kísérleti gerendák. A különböző jelek a szimmetrikus és aszimmetrikus hajlítási és nyírási tönkremenetelhez tartozó törési állapotokat különböztetik meg (Ther, Sajtos, 2022).



**15. ábra:** a) A 2Φ8 és b) a 3Φ8 vasalású kísérleti gerendák mérethatásfüggvényei, jelölve a gerendaméretnek megfelelő nyírószilárdságot, (fentről lefelé:  $d_{max} = 8$  mm,  $d_{max} = 16$  mm,  $d_{max} = 32$  mm).

dell ad. A kísérleti eredmények átlaga 35-55%-kal nagyobb, mint az elméleti érték, kivéve a 2Φ8 vasalású,  $d_{max} = 16$  mm, gerendákat, amelyek azonban hajlításra mentek tönkre. Az eltérés lehetséges oka, hogy a nyomott övében elhelyezett hosszvasak – hasonlóan a húzott hosszvasaláshoz – gátolják, késleltetik a nyírási repedések nyomott övön való áthaladását, illetve a nyomott öv betonjának morzsolódását, azaz növelik a gerendák nyírási teherbírását. A kísérleti gerendák nyomott



**16. ábra:** a) A 2Φ8 és b) a 3Φ8 vasalású gerendák kísérleti és mérethatásmodell szerinti nyírószilárdsága a maximális szemmagyság függvényében.

övében a hosszvasalás mennyisége azonos vagy csak 33%-kal kevesebb, mint a húzott vasalás, így a nyomott övben levő hosszvasalása most nem hanyagolható el a gerenda nyírási teherbírása szempontjából. Közelítésként a (4) egyenletben a húzott és a nyomott hosszvasalás együttesét használva egy elméleti becslés adható a kísérleti gerendák nyírószilárdságára, ami figyelembe veszi a nyomott övbe épített hosszvasalás hatását is. Ekkor a kísérleti eredmények átlaga 4-27%-kal nagyobb, mint az elméleti érték.

A 16. ábra két adatsorának trendje azonban határozottan hasonló, ami azt mutatja, még ennél a kicsi kísérleti gerendaméretnél is, hogy a maximális szemmagyság, főként a törési energián keresztül, befolyásolja a nyírási vasalás nélküli vasbetongerendák nyírási teherbírását. Nagyobb gerendaméret esetében a változás jóval jelentősebb (lásd az 1. és 2. táblázatot) és a gyakorlati alkalmazás szempontjából nem elhanyagolható teherbíráskülönbséget eredményez az adalékanyag maximális szemmagyságának változtatása.

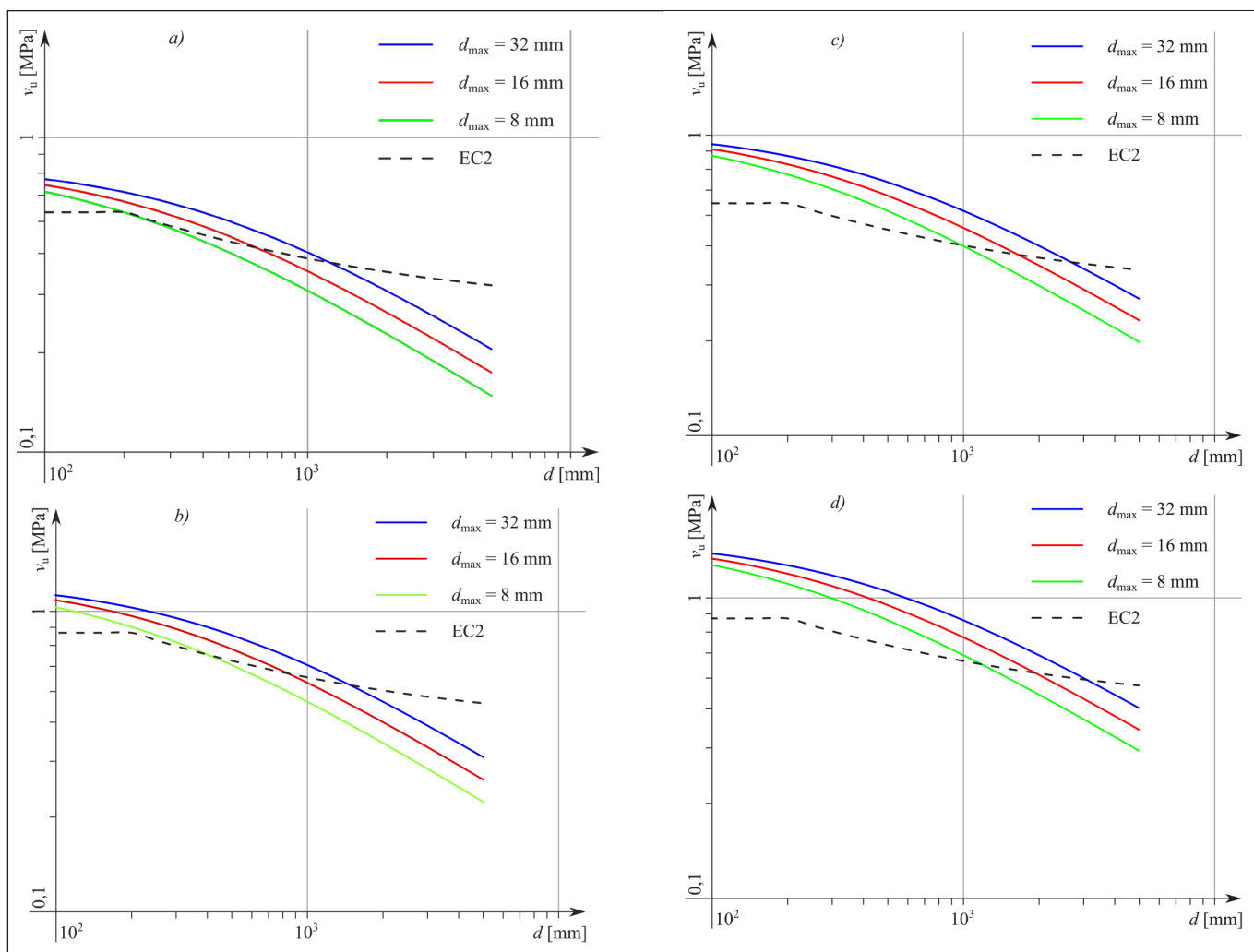
## 5. A SZABVÁNYOS SZÁMÍTÁS ÉS A MÉRETHATÁSFÜGGVÉNY ÖSZSEHASONLÍTÁSA

A nyírási vasalás nélküli vasbeton gerendák nyírási teherbírását meghatározó, MSZ EN 1992-1-1 szabvány (2010), méretezési előírásai majdnem ugyanazokat a paramétereket tartalmazza, (6), mint a (2) mérethatás függvény. Az egyetlen kivétel a beton adalékanyag maximális szemmagysága. A gerenda nyírószilárdsága (6) szerint egyenesen arányos a beton nyomószilárdságával és a hosszvasalás mennyiségével és fordítottan arányos a gerenda magasságával, de nem ugyanolyan módon, mint (2)-ben. A felhasznált kísérleti adathalmazra jellemzők az összefüggésekben megjelenő állandók. A kísérleti adathalmaz paramétertartományában – beleértve a geometriai méreteket is – biztonsággal használhatóak az összefüggések. Feltételezhető, hogy a paramétertartományon kívüli extrapolálásra azonban kevésbé használható a (6) összefüggés, szemben a (2) mérethatásfüggvénnyel.

$$v_{Rd,c} = \max \left\{ \begin{array}{l} 0,12k(100\rho_l f_{ck})^{1/3} \\ v_{min} = 0,035k^{3/2} f_{ck}^{1/2} \end{array} \right. \quad (6)$$

ahol  $k = \min \left\{ 1 + \sqrt{200/d}; 2 \right\}$ ,  $\rho_l$  – a húzott vashányad,

$f_{ck}$  – a beton nyomószilárdságának karakterisztikus értéke, és  $d$  – a gerenda hatékony magassága.



**17. ábra:** A C30/37 betonból, a)  $\rho = 0,5\%$  és b)  $\rho = 1,5\%$  vasalással készült,  $a/d = 3$  nyírási karcsúságú és c)  $\rho = 0,5\%$  és d)  $\rho = 1,5\%$  vasalással készült,  $a/d = 1,5$  nyírási karcsúságú vasbeton gerendák szabványos és mérethatásfüggvény szerinti tervezési nyírószilárdsága, (a mérethatásfüggvények fentről lefelé:  $d_{\max} = 32$  mm,  $d_{\max} = 16$  mm,  $d_{\max} = 8$  mm).

Hasonlítsuk össze pl. a különböző méretű, C30/37 betonból,  $\rho = 0,5$  és  $1,5\%$  hosszvasalással készült,  $a/d = 3$  és  $1,5$  nyírási karcsúságú vasbeton gerendák szabványos és mérethatásfüggvény szerinti nominális nyírószilárdságát (17. ábra).

A 17. ábra alapján megállapítható, hogy a szabványos számítás csak növekvő maximális szemmagyság mellett ad a biztonság javát szolgáló eredményt, ha a növekszik a gerenda mérete. Azonban az adalékanyag maximális szemmagyságának változtatását igénylő gerendaméret az  $a/d$  nyírási karcsúságtól is függ. A beton maximális szemmagyságának változtatása tehát nem csak betontechnológiai, hanem a nyírási teherbírás szempontjából is előnyös. Ez megfelel annak az építési gyakorlatban is használható elvnek, hogy a nagyobb méretű gerendát nagyobb maximális szemmagyságú betonból érdemes építeni.

A szabványos és a mérethatásfüggvény, példa szerinti adatokkal,  $a/d = 3$  esetén elvégzett, számítási eredményeinek összehasonlítás alapján – a húzott vasalás mennyiségétől függően – megállapítható, hogy a szabványos számítás a biztonság javára ad eredményt a gerendák nyírási ellenállásra (17.a és b ábrák):

- $d = 1250 - 1500$  mm gerendamagasságig, ha az adalékanyag szemmagysága  $d_{\max} = 32$  mm,
- $d = 600 - 800$  mm gerendamagasságig, ha az adalékanyag szemmagysága  $d_{\max} = 16$  mm,
- $d = 200 - 300$  mm gerendamagasságig, ha az adalékanyag szemmagysága  $d_{\max} = 8$  mm.

A szabványos és a mérethatásfüggvény, példa szerinti

adatokkal,  $a/d = 1,5$  esetén elvégzett, számítási eredményeinek összehasonlítás alapján – a húzott vasalás mennyiségétől függően – megállapítható, hogy a szabványos számítás a biztonság javára ad eredményt a gerendák nyírási ellenállásra (17.c és d ábrák):

- $d = 2500 - 3000$  mm gerendamagasságig, ha az adalékanyag szemmagysága  $d_{\max} = 32$  mm,
- $d = 1750 - 2000$  mm gerendamagasságig, ha az adalékanyag szemmagysága  $d_{\max} = 16$  mm,
- $d = 1000 - 1250$  mm gerendamagasságig, ha az adalékanyag szemmagysága  $d_{\max} = 8$  mm.

A különböző  $d_{\max}$  esetében a fenti gerendamagasságoknál magasabb gerendáknál a szabványos számítás a biztonság kárára téved a különböző nyírási karcsúságok esetében. Tehát érdemes, és célszerű a gerendamagasság növekedésével növelni a használt beton adalékanyag maximális szemmagyságát.

A 17. ábrán bemutatott példa szerint, ha a gerendának a nyírási karcsúsága „kicsi” akkor a gyakorlat szempontjából általában nincs jelentősége a betonkészítéshez használt adalékanyag maximális szemmagyságának (17.c és d ábrák). Más esetben, ha a gerenda nyírási karcsúsága „nagy”, azonban ez nincs így (17.a és b ábrák), és fontossá lesz az adalékanyag maximális szemmagysága.

Mi tudja megváltoztatni a gerendák nyírási karcsúságát a példa szerint módon, felére csökkentve azt? Például a teher jellege eredményezheti ezt. Ha adott egy kéttámaszú vasbeton gerenda és azt egyenletesen megoszló teher terheli, akkor a nyírási hossz a támaszköz negyede. Ha ugyanezt a gerendát

egy középben működő koncentrált erő terheli, akkor a nyírási hossz a támaszköz fele. Ugyanannak a gerendának tehát a nyírási karcsúsága csak fele, ha egyenletesen megoszló teherrel terhéljük, mintha hárompontos hajlítás jelenti a terhet. A (2) mérhető függvény szerint ez azt is jelenti, hogy az egyenletesen megoszló teherrel terhelt gerenda nyírószilárdsága nagyobb, mint a hárompontos hajlításnak kitett gerendáé. Másként, a (3) egyenlet alapján, az egyenletesen megoszló teherrel terhelt gerenda nagyobb nyíróerőt képes elviselni, mint a hárompontos hajlításnak kitett ugyanolyan gerenda.

A nyírási vasalás nélküli vasbeton gerendák szabványos számítása kicsi gerendamagasságoknál a biztonság javára, nagy magasságú gerendáknál a biztonság kárára téved. Az, hogy mit jelent a „kicsi” és a „nagy” gerendamagasság a gerenda betonjának maximális szemmagyságától és a nyírási karcsúság értékétől függ. A nyírási karcsúságot pedig elsősorban a teher jellege határozza meg, tehát egy vasbetongerenda nyírószilárdsága a teher fajtájától is függ.

A bemutatott példa alapján olyan építési gyakorlatot érdemes és helyes követni, ahol nagyméretű gerendához nagyobb maximális szemmagysággal készülő betont használunk, de ennek szükségessége függ pl. a teher jellegétől is.

## 6. MEGÁLLAPÍTÁSOK, KÖVETKEZTETÉSEK

Cikkünkben a mérhető modell segítségével értelmeztük és magyaráztuk a nyírási vasalás nélküli vasbeton gerendák kísérleteiben megfigyelhető jelenségeket, és a teherbírást befolyásoló paraméterek hatását és lehetséges kölcsönhatását.

Az elemzésünkben, magyarázatunkban fontos szerepe volt a beton törési energiájának és az ezt befolyásoló, ezt meghatározó, maximális adalékanyag szemmagyságnak,  $d_{max}$ .

A beton törési energiája, mint energiakritérium paraméter, „szabályozza” a nyírási repedés stabil vagy instabil terjedését összefüggésben a repedés tágasságával. Az instabil nyírási repedés terjedés lehet a vasbeton gerendák tönkremenetelének egyik oka. A repedés megnyílását korlátozza a gerenda hosszvasalása, ami lehetővé teszi a stabil repedés terjedést, vagyis a nyírási teherbírás növekedését.

A repedés megjelenése és terjedése energiadisszipációt jelent. A terhelési folyamat alatti energiadisszipáció következménye, hogy vasbeton gerenda teherbírása nem lineárisan arányos annak a (keresztmetszeti) méretével. Egy nagyobb méretű gerenda geometriával skálázott teherbírása, nominális szilárdsága, lényegesen kisebb lehet, mint egy kisebb méretű gerendáé. Ezt a kísérletekben is tapasztalható jelenséget mérhetőnek nevezzük.

Az irodalom alapján bemutatott mérhető modell paraméterei (a gerenda mérete, a beton nyomószilárdsága, a vashányad, a nyírási karcsúság, az adalékanyag maximális szemmagysága) egyrészt közvetlenül befolyásolják a repedés hosszát és geometriáját, másrészt pedig – közvetlenül, esetleg közvetve – a repedésmenti mozgásokkal összefüggésben, nyírási ellenállást eredményeznek. A repedés terjedés lehetősége és módja határozza meg a nyírási ellenállást. Ezért fontos mechanikai paraméter a repedés terjedést szabályozó törési energia és azzal összefüggésben a beton adalékanyag maximális szemmagysága.

A vasbeton gerendák nyírási viselkedésére, mint azt már többször leírtuk, még nincs egységes és egyértelmű mechanikai és matematikai modell. Korábbi modellek általában csak egy-egy, a nyírási teherbírás szempontjából domináns hatást tartalmaznak. Általában ezek empirikus, fél-empirikus model-

lek, amelyek extrapolációra (a felhasznált kísérleti adathalmaz paramétertartományán kívül) nem vagy korlátozott mértékben alkalmasak.

A törésmechanika elvei szerint, a dimenzióanalízis alkalmazásával kidolgozott, és az irodalom alapján most bemutatott, mérhető modell alkalmas extrapolációra is. Helyes függvénykapcsolatot biztosít a gerenda méretei, a beton jellemzői (törési energia, szilárdság, maximális szemmagyság), a hajlítási vasalás (vashányad) és az igénybevételek változása (nyírási karcsúság) között.

A bemutatott mérhető modell hatékonyságát kisméretű vasbeton gerendák kísérleti eredményeivel történő összehasonlításával vizsgáltuk. Megmutattuk, hogy még ilyen kicsi kísérleti gerendaméretnél is, a maximális szemmagyság, főként a törési energián keresztül, befolyásolja a nyírási vasalás nélküli vasbetongerendák nyírási teherbírását.

A kísérleti eredmények változékonyságának, szórásának nem mindig és nem szükségszerűen statisztikai, hanem determinisztikus oka is van, és lehet, ami a mérhető modell segítségével azonosítható.

A nyírási vasalás nélküli vasbeton gerendák szabványos teherbírásszámításáról megmutattuk, hogy az csak a beton adalékanyag maximális szemmagyságát változtatva (nagyobb gerendaméretnél növelve azt) ad a biztonság javára közelítő eredményt. A maximális szemmagyság változtatásának szükségessége azonban nem csak a gerenda méretétől, hanem annak nyírási karcsúságától is függ. Egy gerendának a nyírási karcsúságát pedig elsősorban a teher jellege határozza meg, tehát a teherfajta is befolyásolja a nyírási vasalás nélküli vasbeton gerendák nyírási teherbírását és a szabványos teherbírásszámítás megbízhatóságát.

A mérhető modell ugyancsak alátámasztja azt az álláspontot, hogy olyan építési gyakorlatot érdemes és helyes követni, ahol a nagyméretű vasbeton szerkezethez nagyobb maximális szemmagyságú adalékanyagot használunk.

Végül megjegyezzük, hogy a Kani-féle vasbeton gerenda tönkremeneteli módok pontosan megfelelnek a Carpinteri-féle tönkremeneteli mód osztályozásának.

## 7. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A tanulmány alapjául szolgáló kutatást az Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal Tématerületi Kiválósági Programja támogatta, a TKP2021-NVA-02 szakmai programja keretében.

Köszönjük Dr. Czigány Tibornak a kísérletek végrehajtása során nyújtott segítségét és értékes tanácsait. (Sajtos I.)

## 8. HIVATKOZÁSOK

- Angelakos, D., Bentz, E. C., Collins, M. P. (2001), „Effect of concrete strength and minimum stirrups on shear of large members”, *ACI Structural Journal*, 98 (3), pp. 290-300., <https://doi.org/10.14359/10220>
- Bazant, Z.P. (1984), „Size effect in blunt fracture: concrete, rock, metal”, *Journal of Engineering Mechanics*, 110, pp. 518-535., [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(1984\)110:4\(518\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(1984)110:4(518))
- Bazant, Z.P. (1986), „Mechanics of distributed cracking”, *Applied Mechanics Review*, 39, pp. 675-705., <https://doi.org/10.1115/1.3143724>
- Bazant, Z.P., Sun, H-H. (1987), „Size effect in diagonal shear failure: Influence of aggregate size and stirrups”, *ACI Materials Journal*, 84, pp. 259-272., <https://doi.org/10.14359/1614>
- Bazant, Z.P. (2002), „Scaling of structural strength”, *Hermes Penton, London*
- Bazant, Z.P., Kazemi, M.T. (1991), „Size effect on diagonal shear failure of beams without stirrups”, *ACI Structural Journal*, 88 (3), pp. 268-276., <https://doi.org/10.14359/3097>
- Bazant, Z.P., Kim, J-K. (1984), „Size effect in shear failure of longitudinally reinforced beams”, *ACI Journal*, 81, pp. 456-468., <https://doi.org/10.14359/10696>



- Bazant, Z.P., Planas, J. (1998), „Fracture and size effect in concrete and other quasibrittle materials”, *CRC Press LLC, Boca Raton*
- Bazant, Z.P., Yu, Q. (2005), „Designing against size effect on shear strength of reinforced concrete beams without stirrups: I. Formulation, II. Verification and calibration”, *Journal of Structural Engineering*, 131 (12), pp. 1877-1885, pp. 1886-1897., [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2005\)131:12\(1886\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2005)131:12(1886))
- Carpinteri, A., Carmona, J.R., Ventura, G. (2011a), „Failure mode transition in reinforced concrete beams – Part 1: Theoretical model”, *ACI Structural Journal*, 108 (3), pp. 277-285., <https://doi.org/10.14359/51682343>
- Carpinteri, A., Carmona, J.R., Ventura, G. (2011b), „Failure mode transition in reinforced concrete beams – Part 2: Experimental tests”, *ACI Structural Journal*, 108 (3), pp. 286-293., <https://doi.org/10.14359/51682344>
- Carpinteri, A., Accornero, F. (2021), „Dimensional analysis of critical phenomena: Self-weight failure, Turbulence, Resonance, Fracture” *Physical Mesomechanics*, 24 (4), pp. 459-463., <https://doi.org/10.1134/S102995992104010X>
- Cavagnis, F., Ruiz, M. F., Muttoni, A., (2018), „An analysis of the shear-transfer actions in reinforced concrete members without transverse reinforcement based on refined experimental measurements” *Structural Concrete*, 19, pp. 49-64., <https://doi.org/10.1002/suco.201700145>
- Collins, M. P., Kuchma, D. (1999), „How safe our large, lightly reinforced concrete beams, slabs, footings?”, *ACI Structural Journal*, 96 (4), pp. 482-490., <https://doi.org/10.14359/684>
- Corrado, M., Ventura, G., Carpinteri, A. (2022), „Experimental evidences of flexural to shear to crushing failure mode transition in reinforced concrete beams without stirrups”, *Engineering Structures*, 271, 114848., <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.114848>
- Fernández Ruiz, M., Muttoni, A., Sagastea, J. (2015), „Shear strength of concrete members without transverse reinforcement: A mechanical approach to consistently account for size and strain effects.” *Engineering Structures*, 99, pp. 360–372., <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2015.05.007>
- fib (2013), „fib Model code for concrete structures 2010”, *Wilhelm Ernst and Sohn, Berlin*, <https://doi.org/10.1002/9783433604090>
- Kani, G.N.J. (1964), „The riddle of shear failure and its solution”, *Journal of the American Concrete Institute*, 61 (4), pp. 441–467., <https://doi.org/10.14359/7791>
- Kani, G.N.J. (1966), „Basic facts concerning shear failure”, *Journal of the American Concrete Institute*, 63 (6), pp. 675-692., <https://doi.org/10.14359/7644>
- Kani, G.N.J. (1967), „How safe our large reinforced concrete beams?”, *Journal of the American Concrete Institute*, 64 (3), pp. 128–141., <https://doi.org/10.14359/7549>
- Karihaloo, B.L. (1997), „Fracture mechanics and structural concrete”, *Longman, Harlow*
- Leonhardt, F., Walter, R. (1961), „Beiträge zur Behandlung der Schubprobleme im Stahlbetonbau”, *Beton und Stahlbetonbau*, 56, pp. 277-290.
- Leonhardt, F., Walter, R. (1962), „Beiträge zur Behandlung der Schubprobleme im Stahlbetonbau”, *Beton und Stahlbetonbau*, 57, pp. 32-44., pp. 54-64., pp. 141-149., pp. 161-173., pp. 184-188.
- MSZ 4798:2016 (2016), „Beton. Műszaki követelmények, tulajdonságok, készítés és megfelelés, valamint az EN 206 alkalmazási feltételei magyarországon”, *Magyar Szabványügyi Testület*
- MSZ EN 1992-1-1:2010 (2010), „Eurocode 2: Betonszerkezetek tervezése 1-1 rész: Általános és az épületekre vonatkozó szabályok”, *Magyar Szabványügyi Testület*
- Muttoni, A., Ruiz, M. F. (2008), „Shear strength of members without transverse reinforcement as a function of critical shear crack width”, *ACI Structural Journal*, 105 (2), pp. 163-172., <https://doi.org/10.14359/19731>
- Palotás L. (1967), „Die Schubsicherung des Stahlbetonträgers auf Grund der Bruchtheorie”, *Acta Technica*, 59 (1-2), pp. 183-214.
- Palotás L. (1973), „A vasbeton elmélete”, *Akadémiai Kiadó, Budapest*
- Reineck, K. H., Kuchma, D. A., Kim, K. S., Marx, S. (2003), „Shear database for reinforced concrete members without shear reinforcement”, *ACI Structural Journal*, 100 (2), pp. 240-249., <https://doi.org/10.14359/12488>
- Szirtes T. (2006), „Dimenzióanalízis és alkalmazott modellelmélet”, *Typotex, Budapest*
- Ther P.P., Sajtó I. (2022), „Effect of load path bifurcation on the behavior of reinforced concrete beams”, In: di Prisco, M., Meda, A., Balázs L.Gy. (szerk.) *Proceedings of the 14th fib International PhD Symposium in Civil Engineering*, Rome, September 5-7. 2022., *fib*. The International Federation for Structural Concrete, pp. 97-104.
- Vajk R., Sajtó I. (2015), „The effect of aggregate size on the behaviour of beams without shear reinforcement”, *Concrete Structures*, 16, pp. 24-30.

**Dr. Sajtó István** (1961) okl. építőmérnök (1985), PhD (1997), Dr. habil. (2017), egyetemi docens, BME Szilárdságtani és Tartószerkezeti Tanszék. Fő kutatási területei: vasbeton-, falazott-, és héjszerkezetek mechanikája, történeti tartószerkezetek viselkedése és megerősítése. Tagja a *fib* Magyar Tagozatának, az MTA köztestületének és a Szilárd Testek Mechanikája Tudományos Bizottságának, az American Concrete Institute - nak.

**Ther Péter Pál** (1992) okl. építészmérnök (2018), tartószerkezet rekonstrukciós szakmérnök (2021), PhD hallgató a BME Szilárdságtani és Tartószerkezeti Tanszékén. Fő kutatási területei: beton- és vasbeton szerkezetek (anyagai, laboratóriumi vizsgálata és modellezése). Vasbeton gerendák nyírási viselkedése, szimmetria és aszimmetria hatása a kísérleti elrendezésekre.

**Vajk Rita** (1981) okl. építészmérnök (2006), okl. betontechnológus szakmérnök (2019). A BME Szilárdságtani és Tartószerkezeti Tanszék tanársegédje, a *fib* Magyar Tagozat tagja. Fő érdeklődési területei: beton- és vasbeton szerkezetek nyírása, alakváltozóképesége, mérhetősége; könnyűbeton szerkezetek.

## THE EFFECT OF AGGREGATE SIZE ON THE LOAD-BEARING CAPACITY AND FAILURE MODE OF RC BEAMS WITHOUT SHEAR REINFORCEMENT

István Sajtó – Péter Pál Ther – Rita Vajk

It is a common expectation that reinforced concrete structures have the same load-bearing capacity and failure mode independently of the maximum aggregate size and grading curve of the used aggregates if, the strength class of the concrete is the same. It is an experimental experience that many parameters influence the load-bearing capacity of the RC beams without shear reinforcement in very variable ways, e.g., strength and fracture energy of concrete, longitudinal reinforcement, and beam sizes, among others. It is no coincidence that there is no mathematical model or clear and transparent understanding of the shear behaviour of RC beams. We interpret and explain the phenomena observable in RC beam tests and the effect of the parameters influencing the capacity of the RC beams without shear reinforcement based on the size effect model in the paper. In our analysis and explanation, the fracture energy and the maximum aggregate size,  $d_{max}$ , which defines that, play a very important role. We demonstrate the effectiveness of the size effect model by comparing its results to experimental ones. The model also confirms the building practice where a larger maximum aggregate size is used for larger RC structures.