

## Előfeszített vasbeton gerenda numerikus és laboratóriumi vizsgálata

### Numerical and experimental examination of prestressed concrete beam

FÁSI Fanni<sup>1</sup>, TÉGLÁS Csaba<sup>1</sup>, ROSZEVÁK Zsolt<sup>2</sup>, Dr. HARIS István<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Építőmérnöki Kar, MSc

<sup>2</sup>BME, Építőmérnöki Kar, Hidak és Szerkezetek Tanszék, PhD hallgató, roszevak.zsolt@emk.bme.hu

<sup>3</sup>BME, Építőmérnöki Kar, Hidak és Szerkezetek Tanszék, adjunktus, haris.istvan@emk.bme.hu

#### Abstract

*The topic of the research is to compile a non-linear finite element procedure in order to simulate the real behavior of a prefabricated, prestressed concrete beam with high precision. The aim is to adequately record the material characteristics and parameters applicable to the examination. The accuracy of the results obtained are verified by laboratory results done by the University (BME).*

**Keywords:** prefabricated, prestressed, reinforced concrete, non-linear, finite element analysis

#### Kivonat

*A kutatás témája egy olyan nemlineáris végeselemes eljárás összeállítása, mely segítségével nagy pontossággal modellezhető egy előregyártott, előfeszített vasbeton gerenda valós viselkedése. Cél a vizsgálatokhoz alkalmazandó anyagjellemzők és paraméterek megfelelő felvétele. A modellezett eredmények helyessége, megfelelősége egyetemi (BME) labor kísérletek eredményeinek segítségével kerül igazolásra, összehasonlítva a valós és számított értékeket.*

**Kulcsszavak:** előregyártott, feszített, vasbeton, nemlineáris, végeselemes analízis

## 1. BEVEZETÉS

Lágyvasalású szerkezeteknél a feszítávolság növelésével egyre inkább előtérbe kerülnek a használhatósági problémák; azonos merevségű szerkezetek esetén a feszítáv növelésével a lehajlás és repedéstágasság mértéke is hatványozottan nő. Az esztétika és a használhatóság romlása mellett a megnövekedett repedésméretetek egyben merevségcsökkenést is jelentenek, valamint idővel korróziós problémákat, ennek következtében pedig tartóssági problémákat okozhatnak. A felsoroltak elkerülése érdekében szokás különböző feszített szerkezeteket alkalmazni.

Napjaink mérnöki gyakorlatában teljesen természetes, hogy a szerkezetek számításához, méretezéséhez valamilyen végeselemes szoftvert alkalmazunk. A piacon számos felhasználóbarát, grafikus felülettel rendelkező, széleskörűen használható, akár egy teljes szerkezet komplex vizsgálatára és méretezésére alkalmas programot találhatunk, azonban bizonyos speciális helyzetekre ezek az általános szoftverek nem megfelelően, vagy egyáltalán nem alkalmazhatók. Többek között ilyen eset a feszítés numerikus vizsgálata is.

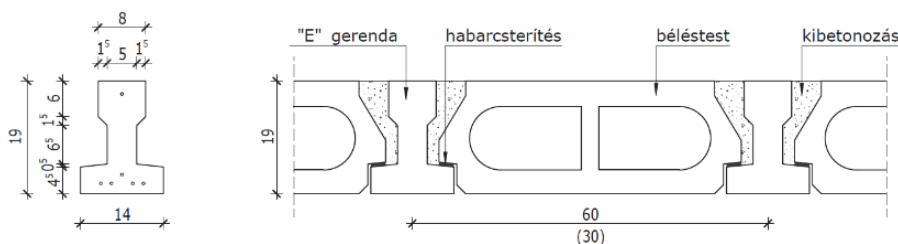
A feszítés alapelve szerint a tartószerkezetben olyan mesterséges *sajátfeszültségi állapotot* kell létrehozni, mely a használat során működő külső terhekből keletkező igénybevételekkel ellentett igénybevételeket eredményez. Ez praktikusán azt jelenti, hogy feszített szerkezetek numerikus vizsgálata esetén nemlineáris feszültséganalízist kell végrehajtani.

Az előzők értelmében a kutatás célja, hogy korábbi, a témában írt tanulmányok, dolgozatok [1] [2] és cikkek [3] megállapításait és következtetéseit alapul véve olyan modellezési eljárást sikerüljön alkotni, mely egy kifejezetten vasbeton szerkezetek nemlineáris analízisére fejlesztett végeselemes szoftvert segítségével, a valóságot legjobban leíró anyag- és feszítési modell alkalmazásával nagy pontosságú számítási eredményeket ad az előfeszített tartók esetében.

## 2. VIZSGÁLT FESZÍTETT TARTÓ

A cél a végeelemes analízis paramétereinek megfelelő kalibrálása, kézenfekvő volt a vizsgálat tárgyaként egy olyan tartót választani, mely késztermékként kapható, azaz a főbb jellemzői pontosan ismertek. Ezen szempontot, valamint a laboratóriumi kísérlet lehetőségeit figyelembe véve a választás egy általános előfeszített E-jelű födémgerendára esett.

A gerenda járatos nyílásmérete 240-660 centiméter, 60 centiméteres lépcsőkben, 480 centiméterig 10, felette 12 centiméteres minimális feltámaszkodási hossz mellett. A vizsgálatához E-36 jelű, azaz 360 centiméteres falköz áthidalására alkalmas, 380 centiméter hosszúságú gerendát választottunk. Az alkalmazott beton-szilárdsági osztály C35/45, az egyedi feszítőhuzalok pedig 6 mm átmérőjűek, szakítószilárdságuk 1770 MPa és 1. ábra szerinti 1+1+4 keresztmetszeti elrendezést követnek.

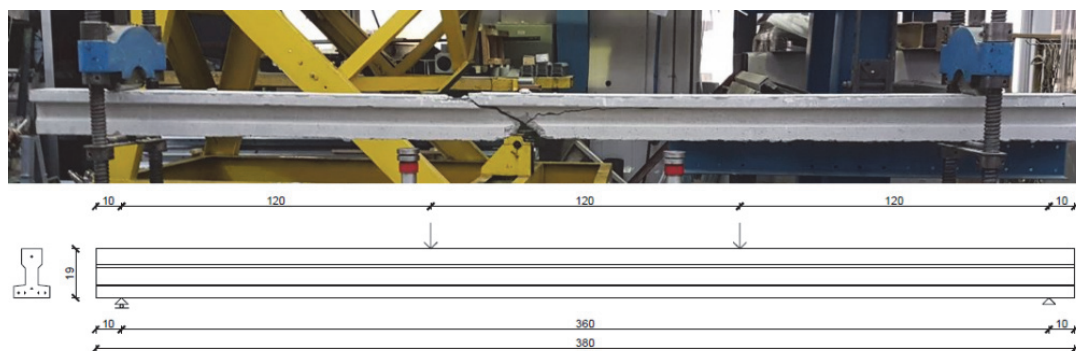


1. ábra. E-jelű feszített gerenda keresztmetszete és beépítése

Az elsősorban családi és társasházak födémjeként alkalmazott E-gerendás rendszer beépített állapotban a 30, vagy 60 centiméteres tengelytávra elhelyezett gerendákon felül közéjük helyezett megfelelő béléstestekből és hézagkitöltő betonozásból áll. Nagyobb fesztávolság esetén 4-6 centiméter felbeton alkalmazása is szükséges. Esetünkben viszont az elsődleges feladat egy különálló gerenda adott terhelés melletti vizsgálata volt.

## 3. KÍSÉRLETI ÉS TERHELÉSI ELRENDEZÉS

A laboratóriumi mérések során a vizsgált gerenda 2. ábra szerint, „fejjel lefelé” került elhelyezésre, így eliminálva a szerkezet önsúlyát. A megtámasztásoknál a csuklós viselkedést kör keresztmetszetű acélszelvények biztosítják, a terhelés pedig a harmadolópontokban, koncentrált erő jelleggel hidraulikus sajtók révén történik. A méréseket, évek óta BSC tantárgyi keretek között, a BME Szerkezet- és Anyagvizsgáló Laboratóriumában végeztük. A mérés során számítógéppel rögzítésre került a terhelőerő nagysága és az elmozdulás értéke a középső keresztmetszetenél, így a kapott eredmények alapján a vizsgált gerendára jellemző erő-elmozdulás diagram előállítható.

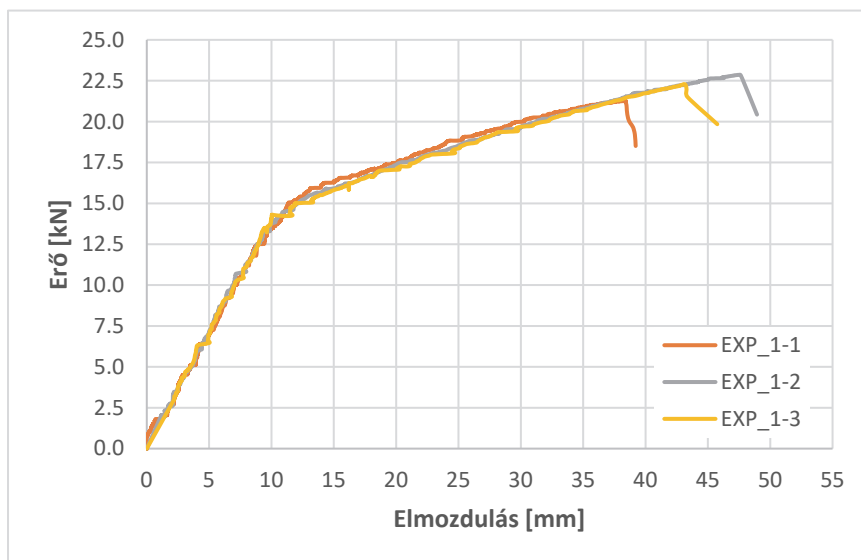


2. ábra. Kísérleti és terhelési elrendezés; tönkrement gerenda képe

A fenti ábrákon megadott geometriai méreteket és teherelrendezést a numerikus modell pontosan követi, az összehasonlíthatóság érdekében pedig ugyanazon helyek kerülnek monitorozásra, azaz a futtatás során az erőbevezetés pontjában mérjük a reakcióerőt, illetve a középső keresztmetszetben az elmozdulásokat. Ennek megfelelően a numerikus analízis eredményeképp egy a valós mérési eredményekkel közvetlenül összehasonlítható erő-elmozdulás diagramot kapunk.

## 4. KÍSÉRLETI EREDMÉNYEK

A laborvizsgálatok során három darab kísérletet (az ábrákon számozott EXP jelölés) végeztünk, melyek eredményeit 3. ábra szemlélteti. A II. feszültségi állapothoz tartozó szakasz kis meredeksége okán a tönkremenetelhez tartozó erő viszonylag kis szórást mutat, átlagosan 22,13 kN ( $\pm 1$  kN). A tönkremenetelhez tartozó lehajlási értékek már nagyobb eltérést mutatnak; a kapott eredmények átlaga szerint 43 mm ( $\pm 5$  mm). A hajlított feszített gerenda minden esetben a felső nyomott öv összemorzsolódásával, ridegen ment tönk्रे.

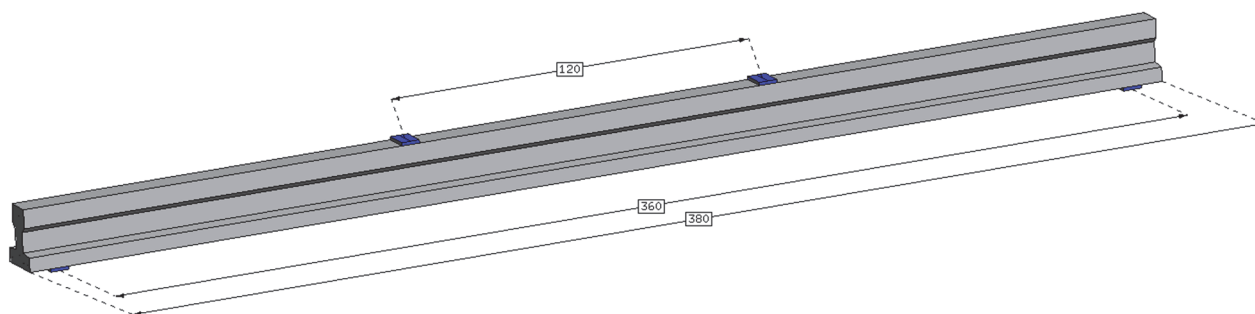


3. ábra. Erő-elmозdulás diagram – kísérleti eredmények

## 5. NUMERIKUS MODELL

A numerikus modellezés GiD-ATENA szoftverkörnyezetben valósult meg, a nemlineáris analízis futtatása és kiértékelése pedig az ATENA Studio v5 segítségével történt meg. Az említett szoftverek közül a GiD egy általános, univerzális, grafikus felülettel rendelkező Pre- és Post-Processor tudományos és mérnöki jellegű numerikus analízisekhez fejlesztve, az ATENA pedig egy kifejezetten vasbeton szerkezetek nemlineáris vizsgálatára fejlesztett törésmechanikai elméleten és végelemanalízisen alapuló programcsomag. Az ATENA egyedi jellemzői közé tartozik többek között a szerkezetek valós viselkedésének nagy pontosságú modellezhetősége 3D végelemek és fejlett anyagmodellek segítségével, a repedésterjedés és a különböző eredmények valós idejű grafikus ábrázolása, valamint további vasbeton specifikus problémák analízisének a lehetősége.

A geometriai modell és a statikai váz a kísérleti elrendezéssel megegyező, a gerenda keresztmetszete és a huzalok elhelyezése a gyártói adatok szerint lettek modellezve. A szingularitások elkerülése érdekében az erőbevezetési helyek környezetében a modellben vékony acéllapokat alkalmaztunk. A gerenda és az alátétlemezek 3D térfogatelemként, az egyedi feszítőhuzalok pedig 1D beágyazott vonalelemként definiálhatók.



4. ábra. Geometriai modell

A geometriai modellnek megfelelően alapvetően három különböző anyagmodell definiálása szükséges: a gerenda beton, illetve a feszítőhuzalok és az alátétlapok acél anyagának jellemzői adandók meg. Utóbbi a mérési eredményeket nem befolyásolja, így az acéllapok számára egy általános lineáris anyagmodell

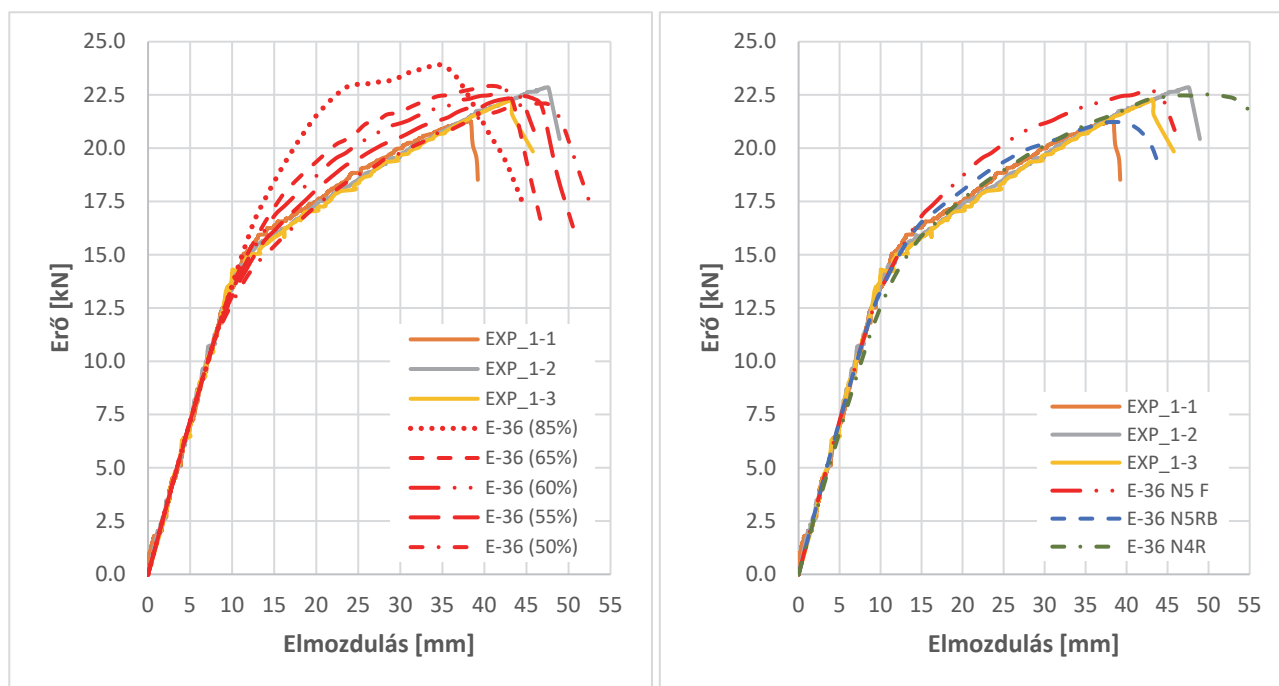
megfelelő. Korábbi eredmények [3] alapján a beton anyagmodell alapjaként az ATENA szoftver egy egyedileg parametrizálható modelljét alkalmaztuk, katalógusból vett, *várható értékű* szilárdsági jellemzők figyelembevétele mellett. A feszítőhuzalokat egy olyan speciális anyagmodellel definiáltuk, mely figyelembe veszi, hogy a megadott vonalelem egy korábban már definiált beton elemen belül helyezkedik el.

A terhelés menete két terhelési esetre bontható. Az első esetben a gerenda megfeszítése, a másodikban a gerenda harmadpontos terhelése történik meg. A terhelések időbelisége, fokozatossága mindkét terhelési esetben teherlépcsők alkalmazásával történik. A vizsgálat elmozdulás-vezérelt, azaz a teherátadási pontokon minden egyes teherlépcsőben egy előírt, függőleges, lefelé mutató elmozdulás kerül bevezetésre. A gerenda várható lehajlását és méreteit figyelembe véve esetünkben ez 1 millimétert jelent minden lépésben. Az eredmények egyszerűbb kiértékelése érdekében az (egyik) erőbevezetési pontban és a gerenda középső keresztmetszetében ún. monitorpontokat helyeztünk el. Előbbi a reakcióerőt (terhelő erőt), utóbbi pedig az elmozdulást (lehajlást) rögzíti. A tetraéder elemeket alkalmazó végeelem háló optimális méretét érzékenységvizsgálat segítségével határoztuk meg. Mivel az alátétlemezek csupán a modellezés helyességét segítik, így a lemezek és a gerenda közti kapcsolat tökéletesnek tekinthető. A gerenda támaszai tökéletesen csuklósak.

## 6. NUMERIKUS VIZSGÁLAT EREDMÉNYEI

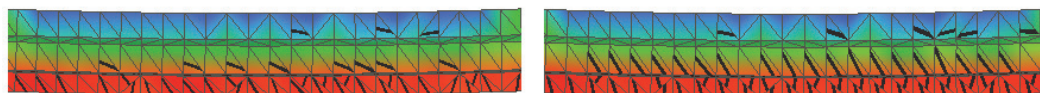
A numerikus analízis során többek között kiemelten vizsgáltuk a feszítés modellezésének, mértékének, valamint a felvehető paramétereknek a modellezett gerenda viselkedésére gyakorolt hatását. A vizsgált E-gerendák esetében gyártási hosszától függetlenül 1+1+4 feszítőhuzalt alkalmaztak, eltérő feszítőerő mellett. A modellezés során a feszítőerő kezdeti megnyúlásként definiálható, és a várákosoknak megfelelő sajátfeszültségi állapotot eredményez. Jelen tanulmányban a feszítőhuzal és a beton közti kapcsolat pontos leírásával nem foglalkozunk, tökéletesnek tekintjük. A huzal valósághoz hű viselkedése egyéb anyagjellemzők megfelelő megválasztásával kalibrálható.

Minden végeelemes eljárás során kulcskérdés a végeelemes háló méretének megfelelő felvétele. ATENA szoftver esetén a kellően pontos számításhoz elegendő a vizsgálat szempontjából fontos legkisebb geometriai méret mentén 4-5 integrálási pontot alkalmazni [3], [5]. Ez 10 csomópontú tetraéder elemek esetén azt jelenti, hogy a megengedhető legnagyobb végeelem oldalhossz 4-5 centiméter (az ábrákon N(i) jelölés, ahol i az oldalhossz centiméterben) [6], [7]. Ennél sűrűbb hálózás használata a valóságtól eltérő repedésképet és ezáltal a valóságnál jóval duktilisabb viselkedést ír le. A repedések már alacsony teherszinten megjelennek, magasabb teherszinten pedig elnyújtott képlékeny tönkremenetel következik be a várt hirtelen, rideg tönkremenetellel szemben.



5. ábra. Erő-elmozdulás diagramok – numerikus eredmények: a) feszítési fok és b) repedésterjedés hatása

Az előzőken túl a viselkedést jelentősen befolyásoló további tényező a repedésterjedés leírása. Ha rögzített irányú repedéseket alkalmazunk, akkor a repedés irányultságát a főfeszültségek berepedés pillanatában vett iránya határozza meg és a repedés a későbbiekben csak ebben az irányban terjed tovább, vagy új, más irányú repedések nyílnak meg [4], [7], [8]. Másik repedésmodell alkalmazásával a repedések iránya minden teherlépcsőben követi a főfeszültségek pillanatnyi irányultságát [4]. Ez a két modellezési lehetőség 5. ábra b) része szerint a gyakorlatban azt jelenti, hogy fix (F jelölés) irányú repedések mellett a berepedt keresztmetszethez tartozó görbeszakasz a kísérleteknél tapasztaltakhoz viszonyítva ridegebb viselkedést mutat, az elfordulás (R jelölés) megengedése esetén viszont jobban közelíti a görbe ezen részét, de a tönkremenetelt is elnyújtja [6], [7], [8]. Utóbbi némiképp orvosolható, ha a beton morzsolódását ridegebbnek modellezzük (B jelölés).



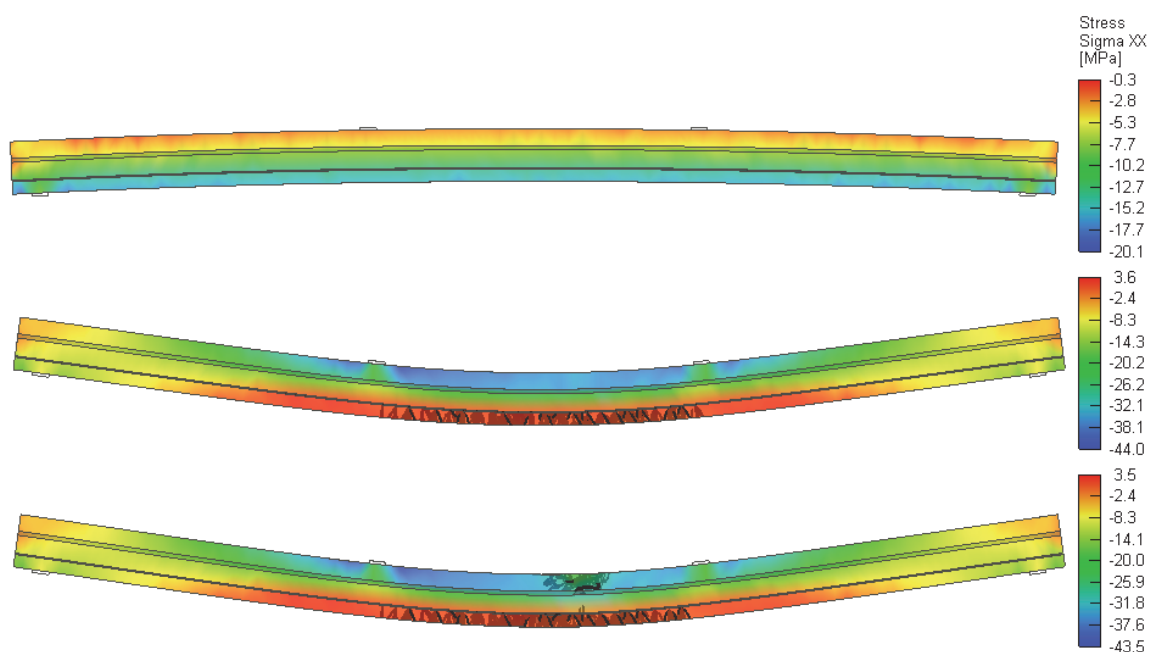
6. ábra. Repedésterjedés modellezése: a) fix irányú és b) elfordulni képes repedések

## 7. EREDMÉNYEK ÖSSZEHASONLÍTÁSA, ÉRTÉKELÉSE

Mind a laborkísérletek, mind a numerikus analízis során a mellékelt ábrákhoz hasonló erő-elmozdulás diagramok kerültek előállításra, melyek segítségével a vizsgált gerenda viselkedése jól összehasonlítható. A tényleges és modellezett viselkedést az 5. ábra szemlélteti. Az elvégzett paramétervizsgálat során célunk volt, hogy a görbe egyes szakaszaira legjobban illeszkedő beállítási értékeket megtaláljuk. Jelen cikk keretein belül a parametrizálással kapott legpontosabb numerikus eredményeket adjuk meg.

A vizsgált keresztmetszeti méretek és geometria esetén tetraéder végelemek alkalmazandók és a megengedhető legnagyobb oldalhossz 4-5 centiméter (ez valójában kisebb, 3-4 centiméteres elemeket eredményez). Túl nagy hálózás alkalmazása a ténylegesnél ridegebb modellt, a túl sűrű hálózás pedig képlékenyítő tönkremeneteli eredményekre vezetett. Az előző pontnak megfelelően a repedésterjedés modellezése és a beton morzsolódásának ridegsége is jelentős hatással bír a tapasztalt viselkedésre.

Összességében sikerült mind a feszítés folyamatát, mind pedig a repedésmentes és berepedt feszültségi állapothoz, illetve a tönkremenetelhez tartozó viselkedési szakaszt jó közelítéssel modellezni. A modellezési eredmények alapján a tönkremenetelhez tartozó erő 22,70 kN, a lehajlás 43 milliméter. Ezek az értékek a kísérleti eredmények átlagával összevetve +2,6%, valamint 0%-os eltérést jelentenek. Ugyanakkor fontos megjegyezni, hogy az egyes szakaszokat jól közelítő paraméterhalmazok összeegyeztetése még tovább pontosítandó egy tökéletesen illeszkedő burkológörbe előállítására érdekében.

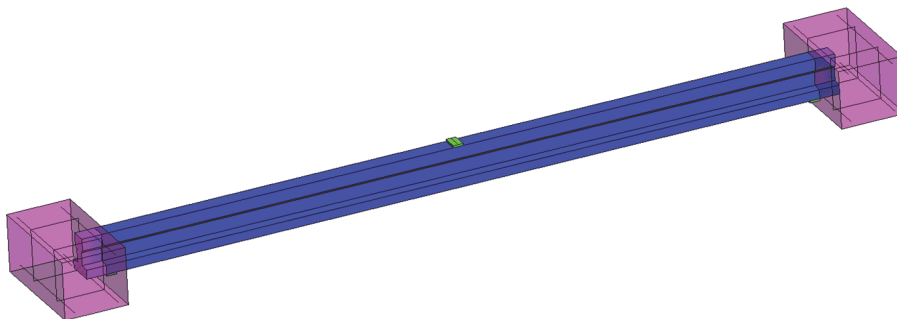


7. ábra. A modellezett gerenda képe a) feszítés után, b) tönkremenetel előtti és c) utáni pillanatban

## 8. TOVÁBBI KUTATÁSI LEHETŐSÉGEK

A kapott modellezési eredmények alapján kijelenthető, hogy az alkalmazott szoftverkörnyezettel fejlesztett modellezési eljárás a feszítés modellezésére, feszített tartók vizsgálatára is alkalmas, a valós viselkedést jól közelítő, pontos eredményeket ad. Az alkalmazott anyagmodellek pontosítását és véglegesítését követően egy olyan numerikus eljárás kiindulási alapját kapjuk, mely alkalmas lehet tetszőleges keresztmetszetű és kialakítású feszített tartók modellezésére. Jelen esetben a kísérleti és modellezési elrendezés statikai váza is egy idealizált, tökéletesen csuklós kéttámaszú tartónak felelt meg. A vizsgált E-gerendás födémrendszer esetén azonban a valóságban a gerendavégek monolit koszorúba kerülnek beépítésre, illetve a gerenda teljes hosszában felbetont is kap. Így az egyedi, terhelőpadon vizsgált gerenda és a kész födémrendszerben alkalmazott gerenda viselkedése igen eltérő. A kidolgozott modellezési eljárás lehetőséget biztosít arra, hogy a monolit és az előregyártott elemek kapcsolatát, az építési állapotokat és a helyszíni vasalás kialakítását is figyelembe véve az együttműködő szerkezetet is részletesen vizsgálhassuk, ezáltal összevetve a feltételezett és a tényleges szerkezeti viselkedést.

További kézenfekvő kutatási terület a megalkotott modellezési eljárás alkalmazása nagy feszítávolságú, T vagy I keresztmetszetű, előregyártott, előfeszített tartók vizsgálatára. Az ilyen tartók numerikus analízise rendkívül nehézkes, gyakran kézi feszültségszámítás vagy speciális célszoftverek használata szükséges, így egy praktisan alkalmazható modellezési megoldás a tervezés folyamatában is nagy segítséget nyújthat.



8. ábra. További kutatási lehetőségek: beépített állapot, véletlen befogás modellezése

## KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Ezúton köszönjük a BME Hidak és Szerkezetek Tanszék és a Szerkezet- és Anyagvizsgáló Laboratórium munkatársainak a felhasznált kísérletek lebonyolításában való közreműködésüket, valamint a numerikus modellfejlesztéshez biztosított támogatásukat.

## IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] Bogár B. és Blázsán D., *Különböző csomóponti numerikus modellek hatása egyszerű előregyártott vasbeton keretváz igénybevételeire*, BME TDK: Hidak és Szerkezetek Tanszék, 2019.
- [2] Roszevák Zs., *Előregyártott vasbeton gerendák numerikus és kísérleti vizsgálata*, BME TDK: Hidak és Szerkezetek Tanszék, 2015.
- [3] Haris I., Roszevák Zs. (2017), „Előregyártott vasbeton gerendák numerikus és kísérleti vizsgálata” *Vasbetonépítés: A FIB magyar tagozat lapja: Műszaki folyóirat XIX*: (1) pp. 2-11., 2017.
- [4] Cervenka V., Jendele L. és Cervenka J., *ATENA Theory*, Prága: Cervenka Consulting, 2018.
- [5] Roszevák Zs., Haris I. (2019), „Monolit vasbeton keretsarok numerikus vizsgálata - 1. rész Egyirányú monoton növekvő terhelés” *Vasbetonépítés: A FIB magyar tagozat lapja: Műszaki folyóirat XXI*: (3) pp. 78-86., 2019.
- [6] Roszevák Zs., Haris I. (2020), „Monolit vasbeton keretsarok numerikus vizsgálata - 2. rész Ciklikusan változó terhelés” *Vasbetonépítés: A FIB magyar tagozat lapja: Műszaki folyóirat XXII*: (3) pp. 73-82., 2020.
- [7] Roszevák Zs., Haris I. (2019), „Finite element analysis of cast-in-situ RC frame corner joints under quasi static and cyclic loading”, *Revista de la Construcción*, 18: (3) pp. 579-594. (2019)
- [8] Roszevák Zs., Bodó P. B., Haris I., *Vasbeton síklemez egyenértékű kerettel történő helyettesítése vízszintes teherre numerikus vizsgálatok alapján*, *XIII. Magyar Mechanikai Konferencia*, Miskolc, 2019.