

Fa tartószerkezetek megerősítése 3PHV60 típusú műgyantával: roncsolásos vizsgálatok és végelelemes modellezés

Reinforcement of timber structures with 3PHV60 type epoxy resin: destructive tests and finite element modelling

drd. ing. MÁRTON Péter

S.C. TRUSTATIK S.R.L., 5355500 Gyergyószentmiklós, Gyilkostó sgt.128
ADECO ÉPÍTÉSZETI TERVEZŐ, SZAKÉRTŐ ÉS SZOLGÁLTATÓ, 1114 BUDAPEST, KEMENES UTCA 6
KOLOZSVÁRI MŰSZAKI EGYETEM, ÉPÍTŐMÉRNÖKI KAR, DOKTORI ISKOLA

Abstract

The present article deals with the issue of repairing wooden structural elements with 3PHV60 type resin within the framework of my PhD thesis at the Faculty of Civil Engineering, Technical University of Cluj-Napoca. The destructive testing of wooden test specimens subjected to different stresses was carried out at the Adolf Czako Laboratory of Strength of Materials at the Budapest University of Technology and Economics. This paper deals with the finite element modelling of particular destructive tests.

Keywords: structural wood, resin, finite element modelling, wood repair, structural restoration

Kivonat

A jelen cikk a Kolozsvári Műszaki Egyetem Építőmérnöki Karán készülő doktori disszertációm keretein belül, fa tartószerkezeti elemek 3PHV60 típusú műgyantával történő javításának kérdéskörével foglalkozik. A különböző igénybevételeknek kitett fa próbatestek roncsolásos vizsgálatát a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Czako Adolf Szilárdságtani Laboratóriumában végeztem el. Jelen cikk az egyes roncsolásos vizsgálatok végelelemes modellezésének bemutatásával foglalkozik.

Kulcsszavak: tartószerkezeti fa, műgyanta, végelelemes modellezés, fa javítása, tartószerkezeti helyreállítás

1. ALAPHELYZET

Napjainkban az épületek rehabilitációja egyre nagyobb jelentőséggel bír, és a tartószerkezeti felújítás során, a sérült szerkezeti elemek helyreállítása számos kihívást jelent. A szerkezeti helyreállítás felelős mérnöki hozzáállást igényel, beleértve a gazdaságos és környezettudatos megközelítést is. A gazdaságos- és környezettudatos megközelítés egyik fontos kritériuma, hogy a helyreállítás/beavatkozás a károsodás mértékéhez igazodjon. A tartószerkezeti elem helyi károsodására helyi kiterjedésű megerősítés alkalmazása a kitűzött cél.

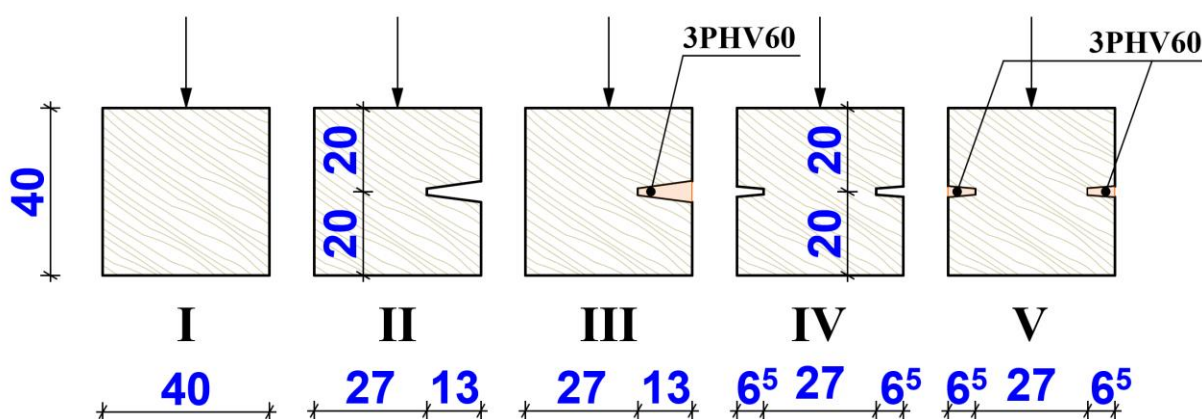
A többlépcsős kutatás célja a helyileg károsodott faszerkezeti elemek lokális helyreállításának vizsgálata 3PHV60 típusú műgyantával. A kutatás központi kérdése, hogy a 3PHV60 típusú műgyanta képes-e növelni a sérült faszerkezeti elemek teherbírását és merevségét.

A kutatás kezdeti szakasza a fa tartószerkezeti elemek helyreállításához alkalmazandó 3PHV60 típusú műgyanta vizsgálatáról szól. A korábban közölt A 3PHV60 típusú műgyanta anyagjellemzőinek összehasonlítása a C24 szilárdsági osztályú puhafák anyagjellemzőivel [2] a kutatás kezdeti szakaszának eredményeit mutatja be.

2. A VIZSGÁLT PRÓBATESTEK BEMUTATÁSA

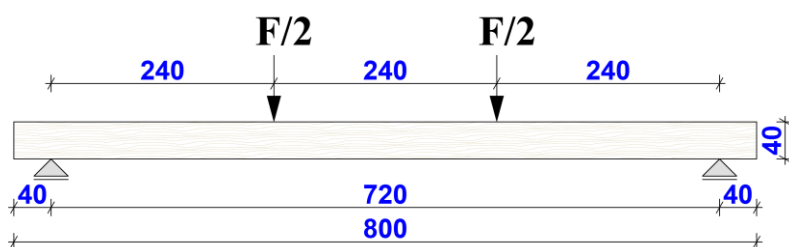
A tanulmány a fa szerkezeti elemek repedéseinek hatását vizsgálta. A hajlított gerendák nyírófeszültségeinek számításakor az Eurocode 5 egy k_{cr} felrepedési tényezőt használ a tényleges szelvény szélesség kiszámításához. A nyírási teherbírás meghatározásakor a figyelembe vehető elemszélességet a $b_{ef} = k_{cr} b$ összefüggés alapján kell kiszámítani. Fűrészelt és rétegelt ragasztott rétegelt faanyagok esetében a k_{cr} értéke 0,67. Ezen érték alapján a vizsgált keresztmetszet 1/3-án gyengítést alkalmaztunk a próbatétel teljes hosszában.

Kiindulási pontként sérülésmentes próbatételeket vizsgáltunk. Ezt követte az egyik oldalon meggyengített próbatételek és a gyantával javított próbatételek vizsgálata. A kapott eredményeket a *Fa tartószerkezeti elemek 3PHV60 típusú műgyantával való helyreállításának végeselemes modellezése* [2] című cikk közli. A vizsgálat tovább folytatódott a keresztmetszet két oldalán megjelenő repedés tesztelésével és modellezésével. Az 1. ábra szemlélteti a vizsgált eseteket.

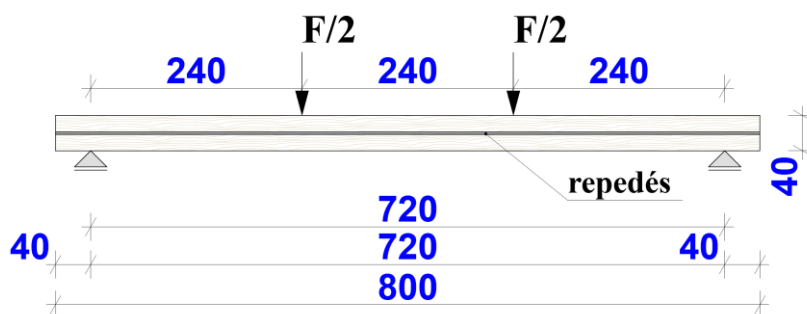


1. ábra. A vizsgált hajlított-nyírt próbatételek

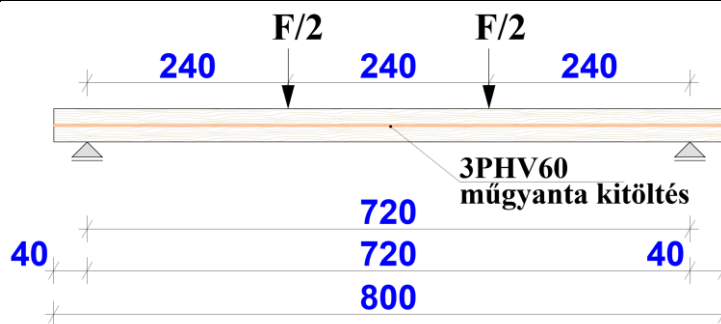
A 2.-4. ábrák a kísérletek geometriai paramétereit mutatják be, melyek az MSZ EN 408:2010+A1:2012 [1] szabvány előírásai alapján lettek végrehajtva.



2. ábra. Az ép fa próbatételek (I) roncsolásos- és végeselemes vizsgálatának statikai modellje



3. ábra. A két oldalán berepedt fa próbatételek (IV) roncsolásos- és végeselemes vizsgálatának statikai modellje

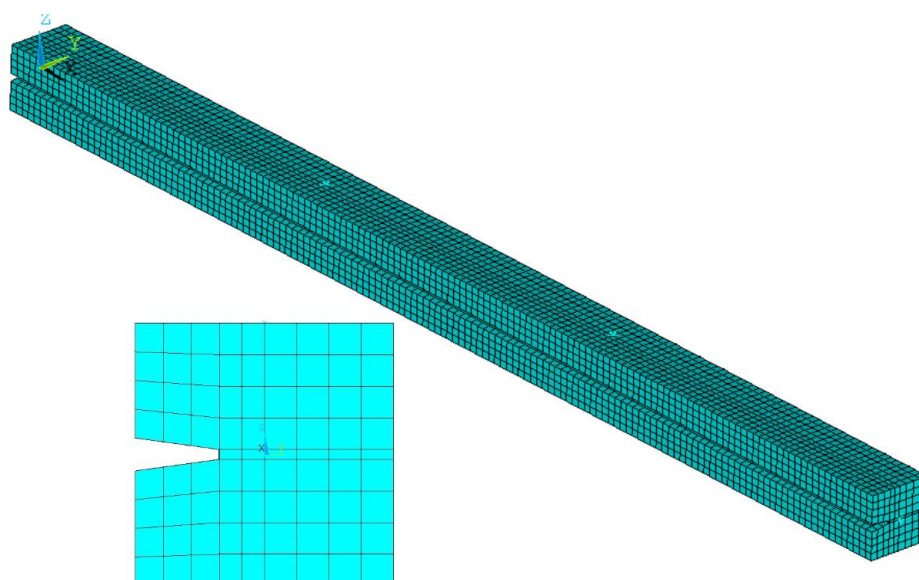


4. ábra. A két oldalán helyreállított fa próbatestek (V) roncsolásos- és végeleemes vizsgálatának statikai modellje

3. VÉGESELEMES MODELLEZÉS MÓDSZERTANA

A roncsolásos vizsgálatok eredményeit felhasználva, a kutatást a kísérletek végeleemes módszerrel való modellezésével folytattuk. Először az AXIS VM X7-es végeleemes szoftvert használtuk, de a feladat bonyolultsága miatt az ANSYS 2024 R2 szoftver használatára váltottunk. A végeleemes program segítségével a roncsolásos vizsgálatok során eredményül kapott erő-elmozdulás diagramokat összehasonlítottuk a végeleemes modellezés során kapott értékekkel. A nemlineáris számításhoz a fából készült próbatesteket SOLID45 típusú elemekből építettük fel, lineárisan rugalmas ortotróp anyagot feltételezve, olyan anyagmodellel, amely húzásra merevedik, nyomásban pedig tökéletesen képlékennyé válik. A gyantaerősítést SOLID185 típusú elemekkel modelleztük, lineárisan rugalmas izotróp anyagot feltételezve.

A két anyag között tökéletes kölcsönhatást feltételeztünk, a fa és műgyanta végeleemek közös csomópontjainál az elmozdulásokat úgy kapcsoltuk össze, hogy azok a számítás során végig azonosak legyenek. A próbatest egyik végén csuklós támaszokat, a másik végén pedig görgős támaszokat definiáltunk. A terheket a próbatestek a harmadpontjaiban levő 40×40 mm-es merev teherelosztó lemezekon vezettük fel kis időlépéses elmozdulás-vezérelt terhekkkel. Az elemek 5 mm x 5 mm x 5 mm véges elemekből épültek fel, melyet az 5. ábra szemléltet. [5]



5. ábra. A két oldalán helyreállított fa próbatestek (V) roncsolásos- és végeleemes vizsgálatának statikai modellje [5]

Az elméleti modellben az anyagok rugalmassági modulusait, Poisson-tényezőit és határfeszültségi értékeit a roncsolásos vizsgálatok eredményei és az irodalmi adatok alapján vettük figyelembe. A fa anyagmodell paramétereit az 1. táblázat foglalja össze.

A végelelemes modellekben alkalmazott fa mechanikai tulajdonságai [5]

1. táblázat

Mechanikai tulajdonság	Érték
Young modulus (x irány)	11 000 N/mm ²
Young modulus (y irány)	649 N/mm ²
Young modulus (z irány)	1408 N/mm ²
Poisson tényező (xy irány)	0,462
Poisson tényező (yz irány)	0,255
Poisson tényező (xz irány)	0,422
Nyírási rugalmassági modulus (xy)	1364 N/mm ²
Nyírási rugalmassági modulus (yz)	110 N/mm ²
Nyírási rugalmassági modulus (xz)	1320 N/mm ²
Folyáshatár (húzás, x irány)	50 N/mm ²
Folyást követő rug. modulus (húzás, x irány)	500 N/mm ²
Folyáshatár (húzás, y irány)	5 N/mm ²
Folyást követő rug. modulus (húzás, y irány)	100 N/mm ²
Folyáshatár (húzás, z irány)	5 N/mm ²
Folyást követő rug. modulus (húzás, z irány)	100 N/mm ²
Folyáshatár (nyomás, x irány)	30 N/mm ²
Folyást követő rug. modulus (nyomás, x irány)	0 N/mm ²
Folyáshatár (nyomás, y irány)	50 N/mm ²
Folyást követő rug. modulus (nyomás, y irány)	0 N/mm ²
Folyáshatár (nyomás, z irány)	50 N/mm ²
Folyást követő rug. modulus (nyomás, z irány)	0 N/mm ²

A végelelemes modellben a műgyanta Young modulusa minden irányban 650 N/mm², a Poisson-tényező pedig 0,3 értékű.

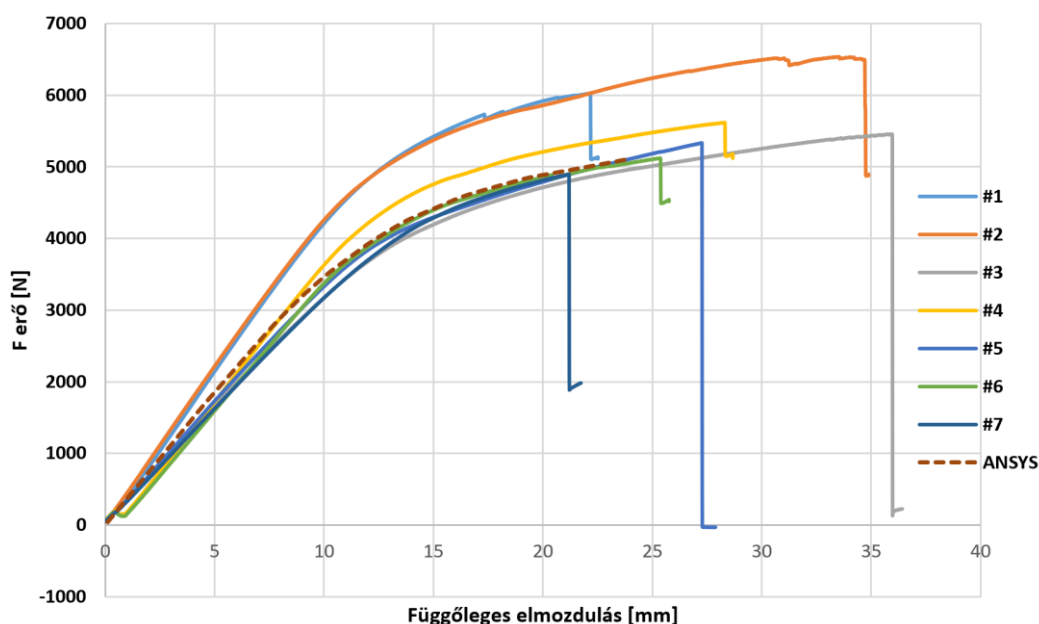
4. VÉGESELEMES MODELLEZÉS SORÁN KAPOTT EREDMÉNYEK

Minden esetben a roncsolásos vizsgálatok során kapott erő-elmozdulás diagramokra szerkesztettük a végeselemes modellezés során kapott erő-elmozdulás diagramokat, ezáltal vissza tudtuk ellenőrizni a végeselemes modell helyességét is. A törésteszték- és a végelemes modellezés során mértük a feszítávolság felénél a függőleges elmozdulásokat és az alkalmazott F erőt.

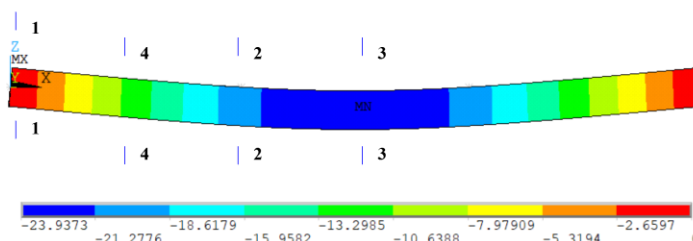
A végeselemes modellezés során az elemekben fellépő normál- és nyírófeszültségek alakulását elemeztük és ezek alapján vontunk le következtetéseket.

4.1. Sérülésmentes próbatestek

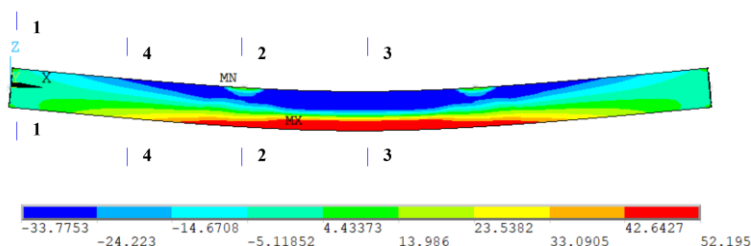
A 6. ábra a sérülésmentes próbatestek roncsolásos és végeselemes (ANSYS) erő-elmozdulás diagramjait szemlélteti. A szaggatott vonal jelöli az elméleti modell erő-elmozdulás függvényét. Az elméleti modellben a tönkremenetel pillanatában mért függőleges elmozdulásokat a 7. ábra szemlélteti. A 8. ábrán a normál-feszültségek alakulása, a 9. ábrán pedig a nyírófeszültségek alakulása látható.



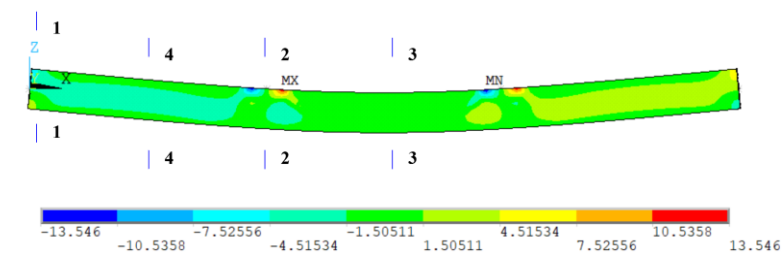
6. ábra. A sérülésmentes próbatestek (I) erő-elmozdulás diagramja [5]



7. ábra. A sérülésmentes próbatestek (I) erő diagramja [5]



8. ábra. A sérülésmentes próbatestek (I) normál-feszültség ábrája [5]

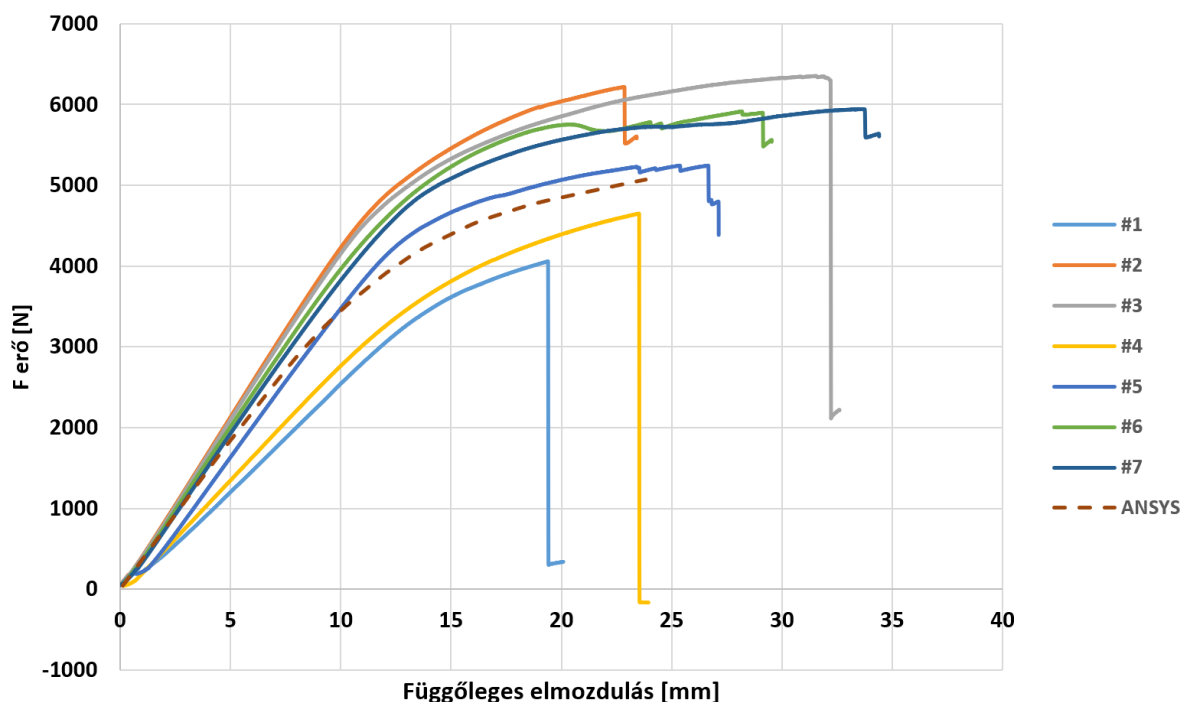


9. ábra. A sérülésmentes próbatetek (I) nyírófeszültség ábrája [5]

A roncsolásos vizsgálatok során kapott F törőerők átlagértéke 5569 N volt, a fesztávolság közepén mért átlagos függőleges elmozdulás értéke 28,26 mm. Az elméleti modellben a törőerő értéke 5106 N, a fesztávolság közepén mért átlagos függőleges elmozdulás értéke 23,86 mm. [5]

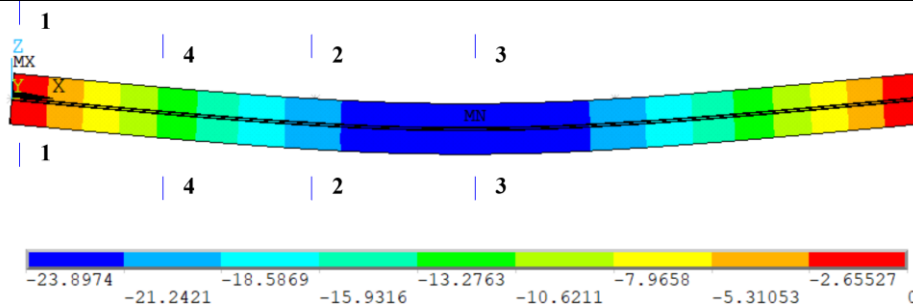
4.2. A két oldalán berepedt próbatetek

Az I., II., III. típusú próbatetek vizsgálatait követően végeselemes módszerrel vizsgáltuk azt az elemet is, melynek semleges tengelyénél, az elem mindkét oldalán repedést szimuláltunk, majd ezt végeselemes szoftverrel modelleztük. A repedés mélységét az érték felére csökkentettük, de a semleges tengely magasságában az elem mindkét oldalán alkalmaztuk az elem gyengítését. A 10. ábrán a törésteztek során kapott erő-elmozdulások diagramjai és a végeselemes modell erő-elmozdulás diagramja látható.

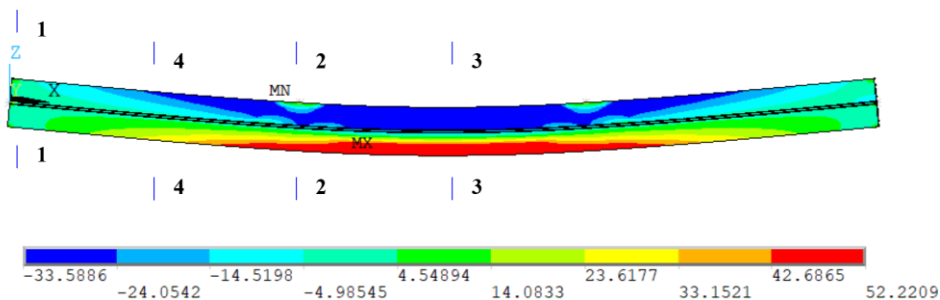


10. ábra. A két oldalán berepedt próbatetek (IV) erő-elmozdulás diagramja

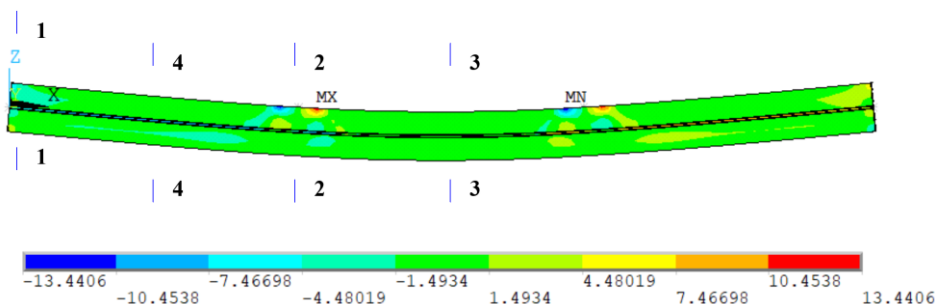
A 11. ábrán a két oldalon berepedt elem függőleges elmozdulásai láthatók mm-ben. A 12. ábra a két oldalon berepedt repedt elem normál feszültségeinek alakulását szemlélteti N/mm²-ben. A 13. ábra a két oldalon berepedt elem nyírófeszültségeinek alakulását szemlélteti N/mm²-ben.



11. ábra. A két oldalán berepedt próbatestek (IV) függőleges elmozdulásai



12. ábra. A két oldalán berepedt próbatestek (IV) normálfeszültségeinek alakulása



13. ábra. A két oldalán berepedt próbatestek (IV) nyírófeszültségeinek alakulása

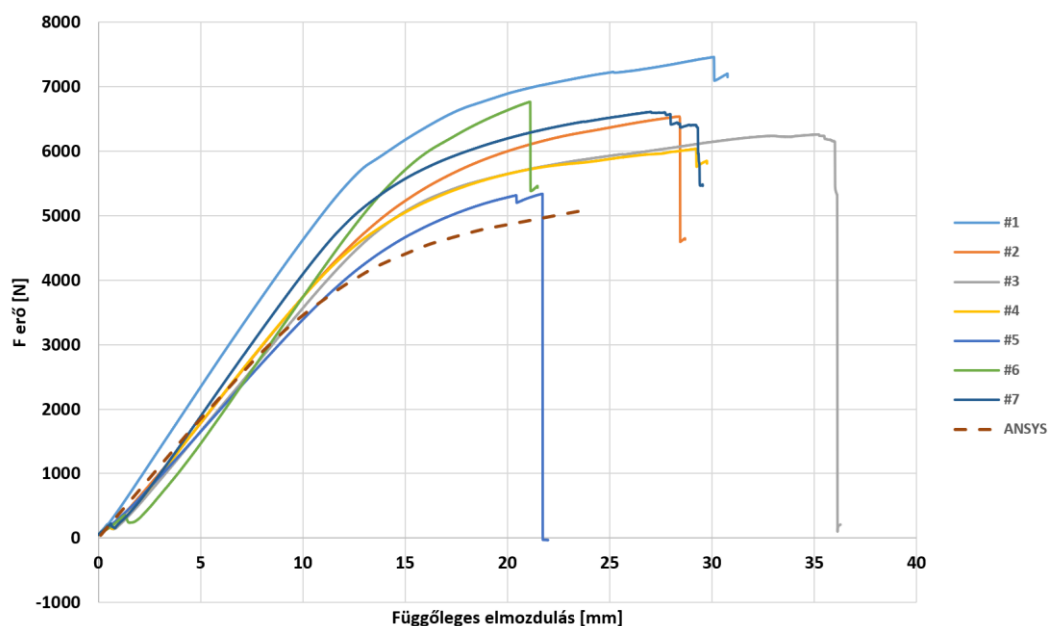
A végeselemes szoftverrel modellezett elem erő-elmozdulás diagramja jól illeszkedik a törésteszték során eredményül kapott próbatestek diagramjaihoz.

A roncsolásos vizsgálatok során kapott törőerők átlagértéke 5482 N, a fesztávolság felénél mért elmozdulások átlagértéke pedig 27,30 mm volt. A végeselemes módszerrel kapott törőerő 5071 N volt, ennél az erőnél 23,82 mm-es elmozdulás született.

4.2. A két oldalán berepedt, műgyantával helyreállított próbatestek

A 4.1. pontban modellezett, kétoldali repedéssel kialakított próbatestet műgyantával állítottuk helyre. A 14. ábrán a műgyantával helyreállított elemek töréstesztjeinek erő-elmozdulás diagramjai és a végeselemes modell erő-elmozdulás diagramja látható. A végeselemes szoftverrel modellezett elem erő-elmozdulás diagramja jól illeszkedik a törésteszték során eredményül kapott próbatestek diagramjaihoz.

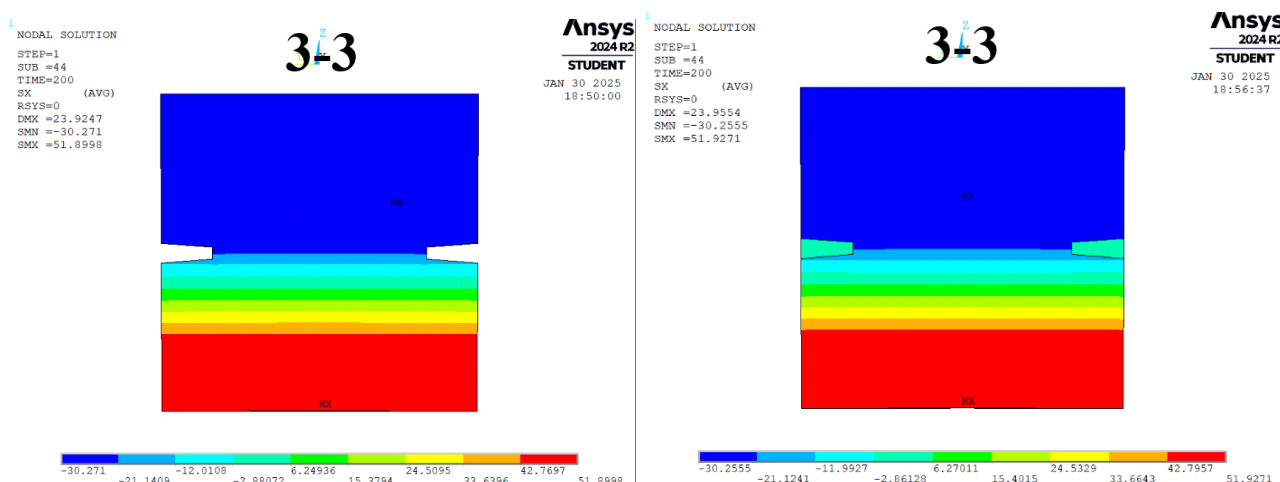
A roncsolásos vizsgálatok során kapott törőerők átlagértéke 6430 N, a fesztávolság felénél mért elmozdulások átlagértéke pedig 28,20 mm volt. A végeselemes módszerrel kapott törőerő 5057 N volt, ennél az erőnél 23,85 mm-es elmozdulás született.



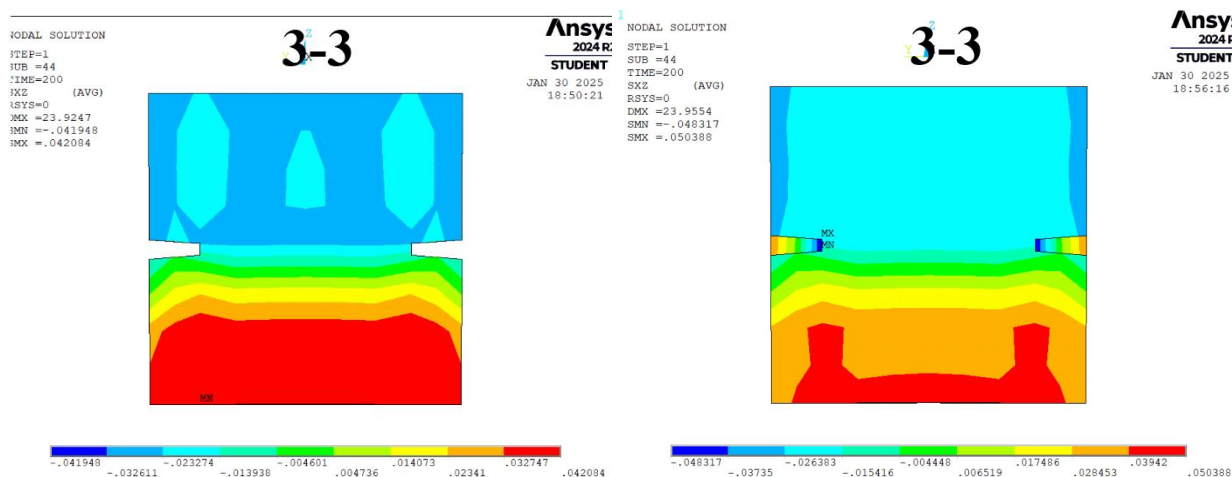
14. ábra. A két oldalán berepedt próbatestek (IV) erő-elmozdulás diagramja

4.3. A két oldalán berepedt próbatestek és a 3PHV60 típusú műgyantával helyreállított esetek keresztmetszetben fellépő feszültségeinek összehasonlítása

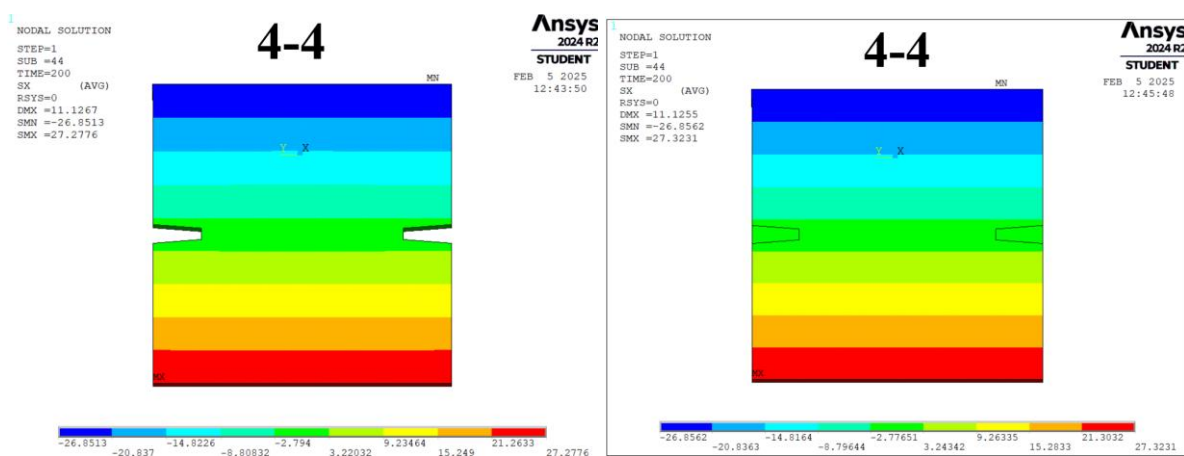
A végeleemes modellekben a műgyanta hatását a keresztmetszetek normál- és nyírófeszültségi diagramjainak összehasonlításával elemeztük (15-19 ábrák). Több keresztmetszetet vettünk fel az elem hosszában. A feszításvég felénél (3-3) és a támasztól számított 120 mm-re (4-4) vettük fel a metszeteket, melyek a továbbiakban bemutatásra kerülnek. A 3-3 keresztmetszetben található a maximális normál-feszültségi pont, a 4-4. metszetben pedig a maximális nyírófeszültség található. A támaszok és az erőbevezetések esetében a feszültségeloszlást jelenleg nem vizsgáljuk a helyi hatások elkerülése érdekében.



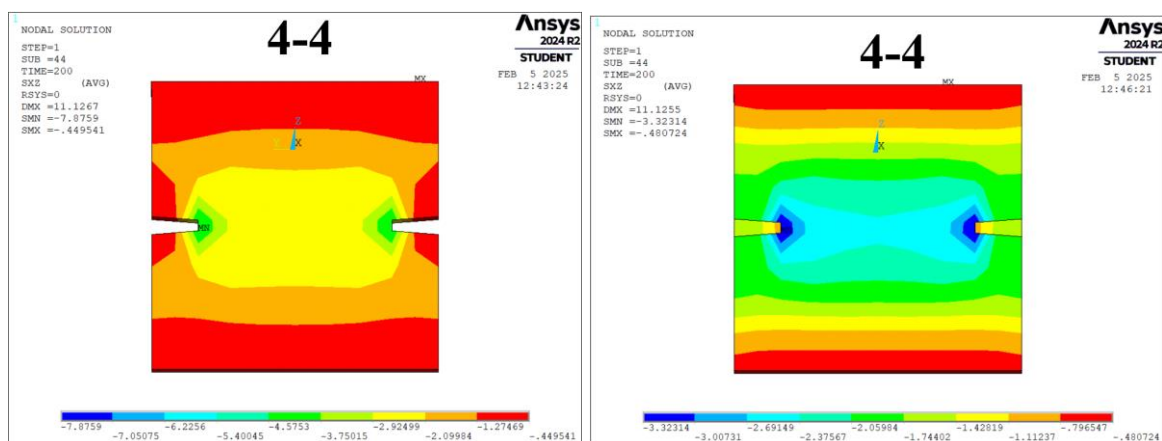
15. ábra. Normál-feszültségek alakulásai a 3-3 metszetben a két oldalon berepedt és helyreállított próbatestek esetében



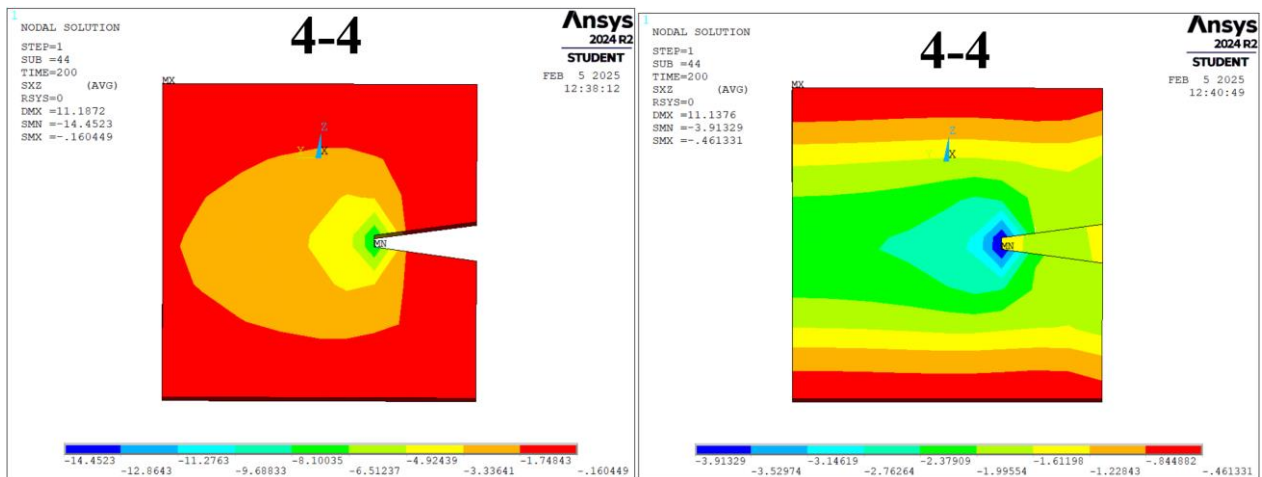
16. ábra. Nyírófeszültségek alakulásai a 3-3 metszetben a két oldalon berepedt és helyreállított próbatetek esetében



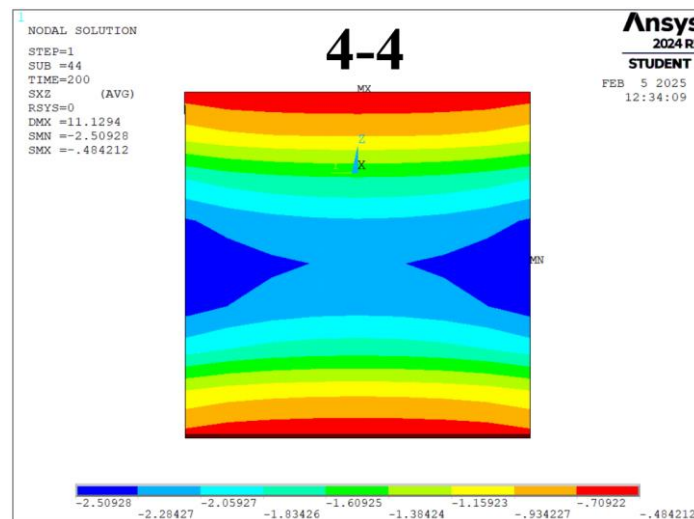
17. ábra. Normál-feszültségek alakulásai a 4-4 metszetben a két oldalon berepedt és helyreállított próbatetek esetében



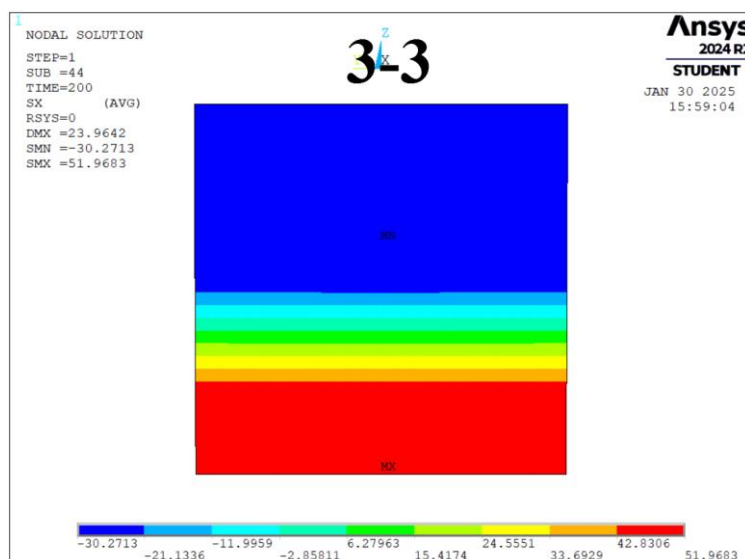
18. ábra. Nyírófeszültségek alakulásai a 4-4 metszetben a két oldalon berepedt és helyreállított próbatetek esetében



19. ábra. Nyírófeszültségek alakulásai a 4-4 metszetben az egy oldalon berepelt és helyreállított próbatetek esetében [5]



20. ábra. Nyírófeszültség alakulása a serülésmentes próbatest 4-4 metszetében



21. ábra. Normál feszültség alakulása a serülésmentes próbatest 4-4 metszetében

5. KÖVETKEZTETÉSEK

A repedéseket- és azok helyreállítását az elemek semleges tengelyének vonalában alakítottuk ki. A normál feszültségek alakulására a semleges tengelyben megjelenő repedésnek nincsen jelentős hatása, ezzel magyarázható az is, hogy a törésnél mért erők a vizsgált I-V esetek során nem tértek el jelentősen egymástól.

A nyírófeszültségek alakulásait a 4-4 metszeteken keresztül tudjuk végigkövetni. A semleges tengelyben történő repedésnek jelentős hatása van a nyírófeszültségek alakulására. A 18. ábrán megfigyelhető, hogy a repedés legmélyebb pontjánál az XZ nyírófeszültség értéke $4,57 \text{ N/mm}^2$, a műgyantával való helyreállítás során pedig XZ nyírófeszültség értéke $3,32 \text{ N/mm}^2$ -re csökken. A 19. ábra egy előző kutatás eredményét emeli be, ahol az egyoldali repedés legmélyebb pontjánál az XZ nyírófeszültség értéke $8,10 \text{ N/mm}^2$, a műgyantával való helyreállítás során pedig XZ nyírófeszültség értéke $3,98 \text{ N/mm}^2$ -re csökken. A véges elemes modellek alapján az egyoldali-, de kétszeres mélységű repedéssel rendelkező próbatestek esetén a nyírófeszültségek maximum értéke közel kétszerese a kétoldali repedéssel kialakított változathoz képest.

A vizsgált próbatestek esetében a műgyantával való helyreállítás a nyírófeszültségek csúcserőértékeinek csökkentéséhez járul hozzá, megközelítve a sérülésmentes próbatestek esetében kapott nyírófeszültségek értékeit.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Köszönettel tartozom Dr. Armuth Miklós címzetes egyetemi tanárnak (Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem), prof. Dr. Köllő Gábornak (Kolozsvári Műszaki Egyetem), Sebestyén Ottó technikusnak (Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem), Karádi Dániel építészmérnök doktorandusznak (Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem), Varga Kristóf Renátó építészmérnök doktorandusznak (Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem) és Baróthy Miklós vegyészmérnöknek (Polinvent KFT), akik a tanulmányom megfelelő fázisaiban segítettek, támogattak.

IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] MSZ EN 408:2010+A1:2012 Faszerkezetek. Szerkezeti fa és rétegelt-ragasztott fa. Egyes fizikai és mechanikai tulajdonságok meghatározása
- [2] Márton Péter: A 3PHV60 típusú műgyanta anyagjellemzőinek összehasonlítása a C24 szilárdosági osztályú puhafák anyagjellemzőivel / Determination and comparison of the mechanical properties of epoxy resin type 3PHV60 with C24 structural graded softwood, Hungarian Technical Scientific Society of Transilvania, Technical Review 84/2023, old. 23-37, <https://ojs.emt.ro/muszakiszemle/article/view/1495>
- [3] Péter Márton: The use of epoxy resin in the repair of cracked wooden structural elements – The 18th International Conference Interdisciplinarity in Engineering – INTER-ENG, Springer Nature, 2024
- [4] Márton Péter: A 3PHV60 típusú műgyanta alkalmazása a faszerkezetek javítására/ Application of 3PHV60 type epoxy resin for the repair of timber structures, Acta Materialia Transylvania 7/1. (2024) old. 29-38, <https://doi.org/10.33923/amt-2024-01-06>
- [5] Márton Péter, Varga Kristóf Renátó, Köllő Gábor: Fa tartószerkezeti elemek 3PHV60 típusú műgyantával való helyreállításának modellezése / Finite element modelling of the restoration of wooden structural elements with 3PHV60 type epoxy resin, Acta Materialia Transylvania, 2025