



FA TARTÓSZERKEZETI ELEMÉK 3PHV60-TÍPUSÚ MŰGYANTÁVAL VALÓ HELYREÁLLÍTÁSÁNAK VÉGESELEMES MODELLEZÉSE

FINITE ELEMENT MODELLING OF THE RESTORATION OF WOODEN STRUCTURAL ELEMENTS WITH 3PHV60 TYPE EPOXY RESIN

Márton Péter,¹ Varga Kristóf Renátó,² Köllő Gábor³

¹ Kolozsvári Műszaki Egyetem, Építőmérnöki Kar, Kolozsvár, Románia, marton.peter17@gmail.com

² Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Építőmérnöki Kar, Budapest, Magyarország, k.r.varga1211@gmail.com

³ Kolozsvári Műszaki Egyetem, Építőmérnöki Kar, Kolozsvár, Románia, Gavril.Kollo@cfdp.utcluj.ro

Abstract

This article deals with the issue of repairing wooden structural elements with 3PHV60 type epoxy resin. The primary objective of this paper is to model the effects of cracking. Finite element design software has been used to study this issue and the results obtained have been compared with the results of previously performed destructive tests. The results of the damaged specimens were compared with the results of the resin-restored specimens.

Keywords: *finite element modelling, structural timber, timber repair, epoxy resin, consolidation.*

Összefoglalás

Jelen cikk a fa tartószerkezetek 3PHV60-típusú műgyantával történő javításának kérdéskörével foglalkozik. Ezen kérdéskörön belül a repedés hatásának modellezése a tanulmány elsődleges célja. A kérdéskör tanulmányozására végeselemes szoftvert használtunk, és az így kapott eredményeket összehasonlítottuk a korábban elvégzett roncsolásos vizsgálatok eredményeivel. A károsodott próbatestek eredményeit összehasonlítottuk a műgyantával helyreállított változatokkal.

Kulcsszavak: *végeselemes modellezés, tartószerkezeti fa, műgyanta, farehabilitálás, megerősítés.*

1. Bevezetés

Napjainkban az épületek rehabilitációja kiemelt fontossággal bír, viszont egy épület felújítása során a károsodott tartószerkezeti elemek helyreállítása számos kihívást rejteget. A tartószerkezetek helyreállítása felelős mérnöki hozzáállást igényel, melynek része a gazdaságos és környezettudatos szemlélet is. A gazdaságos és környezettudatos szemlélet egyik fő irányelve a károsodás mértékéhez igazodó helyreállítás/beavatkozás.

A több szakaszból álló kutatás célja a helyileg károsodott fa tartószerkezeti elemek műgyantával történő lokális helyreállításának vizsgálata.

A kutatás központi kérdése, hogy a műgyanta képes-e növelni a károsodott fa tartószerkezeti elemek teherbírását és merevségét.

2. Alaphelyzet

A kutatás első lépése a fa tartószerkezeti elemek helyreállításhoz alkalmazandó, 3PHV60-típusú műgyanta mechanikai tulajdonságainak vizsgálata volt, amellyel az előzetesen már közölt *A 3PHV60 típusú műgyanta anyagjellemzőinek összehasonlítása a C24 szilárdsági osztályú puha-fák anyagjellemzőivel* [1] már részletesen foglalkozott. Az alkalmazott 3PHV60-típusú műgyanta mechanikai tulajdonságainak feltérképezésére

töréskereszteken alapuló vizsgálatokat hajtottunk végre. Az ismereteinket a gyártó által szolgáltatott információkkal egészítettük ki. A műgyanta mechanikai tulajdonságainak megismerése után, a műgyanta fán történő alkalmazhatóságát vizsgáltuk. Bővebben ezzel a kérdéskörrel az *A 3PHV60 típusú műgyanta alkalmazása a faszerkezetek javítására/Application of 3PHV60 Type Epoxy Resin for the Repair of Timber Structures* [2] című tanulmány foglalkozik.

3. A vizsgált próbatetek bemutatása

A vizsgálat során a fa tartószerkezeti elemeken levő repedések hatását vizsgáltuk. A hajlított tartók nyírófeszültségeinek számításánál az Eurocode 5 egy k_{cr} felrepedési tényezőt alkalmaz a hatékony keresztmetszeti szélesség kiszámítására. A nyírási teherbírás meghatározásakor a figyelembe vehető elemszélességet a $b_{ef} = k_{cr} \cdot b$ összefüggéssel számítjuk. A fűrészelt és rétegelt-ragasztott fa esetén a k_{cr} értéke 0,67. Ezt az értéket alapul véve a vizsgált keresztmetszet egyharmad részéig hajtottunk végre szabályos gyengítést a próbatest teljes hosszán.

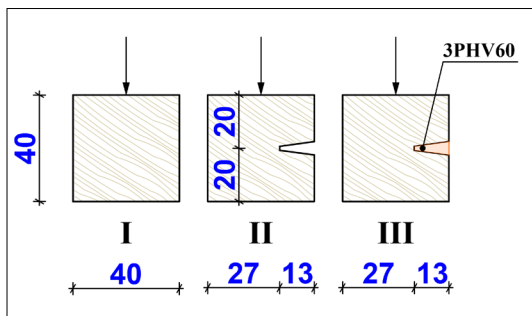
Kiindulásként sérülésmentes próbatesteket vizsgáltunk. Ezt követően az egyoldali gyengített próbatestek és műgyantával helyreállított próbatestek vizsgálatával folytattuk a kutatást. A vizsgált esetek eredményeit összehasonlítottuk.

A roncsolásos vizsgálatok és végeselemes modellek során a 2–4. ábrákon szemléltetett statikai modellt alkalmaztuk az MSZ EN 408:2010+A1:2012 [3] szabvány előírásait figyelembe véve.

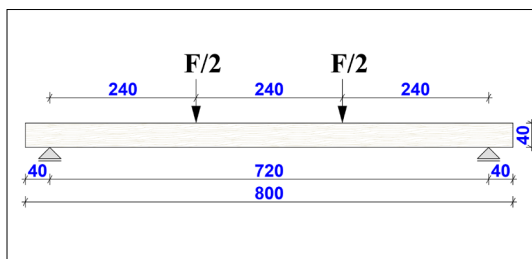
A roncsolásos vizsgálatok során mértük a fesztség felénél a függőleges elmozdulást és a törés pillanatában az F erőt. *A The Use of Epoxy Resin in the Repair of Cracked Wooden Structural Elements* [4] tanulmányban a roncsolásos vizsgálatok eredményeinek részletes kimutatása található.

4. Végeselemes modellezés

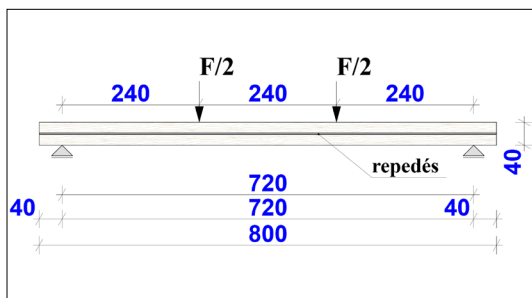
A roncsolásos vizsgálatokat követően a kísérleteket végeselemes módszerrel is modelleztük az ANSYS 2024 R2 szoftver segítségével, majd a kapott erő-elmozdulás diagramokat összehasonlítottuk a roncsolásmentes vizsgálatok során kapott diagramokkal. A nemlineáris számítás során a fa próbatestet SOLID45-típusú elemekből építettük fel, lineárisan rugalmas ortotróp anyagot feltételezve, húzásra felkeményedő, míg nyomásra tökéletes képlékenyedő anyagmodellel. A műgyanta-megerősítést SOLID185 elemtípus használatával és lineárisan rugalmas, izotróp anyagot figyelembe véve modelleztük.



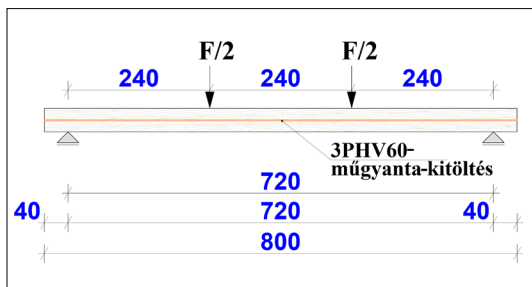
1. ábra. A vizsgált próbatetek keresztmetszete



2. ábra. Az ép fa próbatetek vizsgálata során alkalmazott kísérleti elrendezés



3. ábra. Az egyik oldalán berepedt fa próbatetek vizsgálata során alkalmazott statikai modell



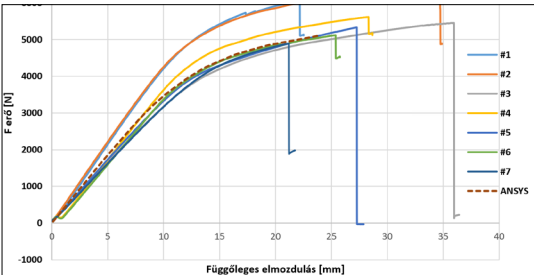
4. ábra. A műgyantával helyreállított fa próbatetek vizsgálata során alkalmazott statikai modell

A két anyag között tökéletes együttlőgozást feltételezve, az eltérő elemek közös csomópontjaiban az elmozdulásokat összekapcsoltuk, így azok azonosak a számítás teljes folyamata során. A gerenda egyik végén csuklós, másik végén gör-gős megtámasztásokat definiáltunk. A terheket a harmadoló pontokban elhelyezett, 40×40 mm-es merev, teherelosztó lapokon, kis időlépéses el-mozdulás vezérelt terheléssel helyeztük a geren-dára. Az elemek 5 mm×5 mm×5 mm méretű vé-geselemekből épülnek fel.

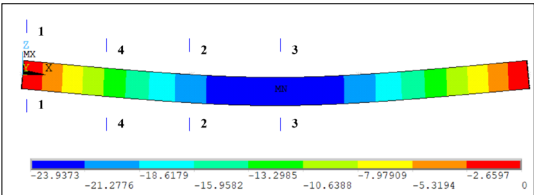
Az elméleti modellben az anyagok rugalmassági moduluszait, Poisson-tényezőit és határfeszültsé-gi értékeit a roncsolásos vizsgálatok eredményei és a szakirodalomban található adatok alapján vettük figyelembe. A fa anyagmodell paramétere-it az 1. táblázatban foglaltuk össze.

4.1. Sérülésmentes próbatetek

A sérülésmentes próbatetek roncsolásos vizs-gálatai során kapott erő-elmozdulás diagram-jaira szerkesztettük a végeselemes modellben kapott diagramokat, ezáltal a modell helyességét is tudtuk ellenőrizni. A 5. ábra a sérülésmentes próbatetek roncsolásos és végeselemes (ANSYS) erő-elmozdulás diagramjait szemlélteti. A szagga-tott vonal jelöli az elméleti modell erő-elmozdulás függvényét. Az elméleti modellben a tönkremene-tel pillanatában mért függőleges elmozdulásokat a 6. ábra szemlélteti. Az 7. ábrán a normálfeszül-tségek alakulása, a 8. ábrán pedig a nyírófeszül-tségek alakulása látható.



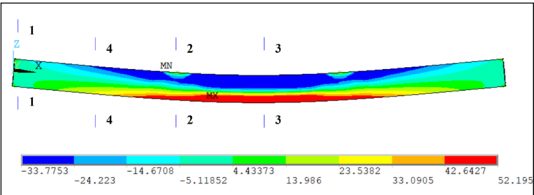
5. ábra. A sérülésmentes próbatetek erő-elmozdulás diagramja



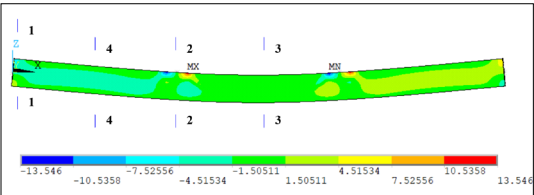
6. ábra. A sérülésmentes próbatetek elmozdulásáb-rája az ANSYS végeselemes szoftverben

1. táblázat. A végeselemes modellekben alkalmazott fa mechanikai tulajdonságai

Mechanikai tulajdonság	Érték
Young-modulus (x irány)	11000 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



7. ábra. A sérülésmentes próbatetek normálfeszül-tség-ábrája az ANSYS végeselemes szoftverben



8. ábra. A sérülésmentes próbatetek normálfeszül-tség-ábrája az ANSYS végeselemes szoftverben

A végeselemes modellben a műgyanta Young-modulusa minden irányban 650 N/mm^2 , a Poisson-tényező pedig 0,3 értékű.

A roncsolásos vizsgálat során az F törőerők átlagértéke 5569 N volt, a feszítávolság közepén mért átlagos függőleges elmozdulás értéke 28,26 mm. Az elméleti modellben a törőerő értéke 5106 N, a feszítávolság közepén mért, átlagos függőleges elmozdulás értéke 23,86 mm.

4.2. Az egyik oldalukon berepedt próbatestek

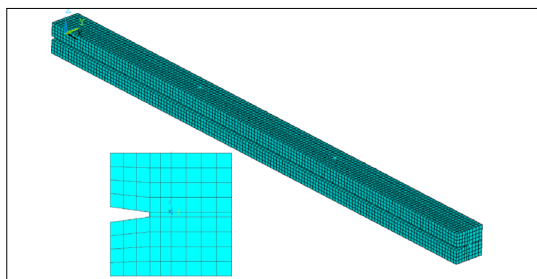
A roncsolásos vizsgálatokat követően végeselemes módszerrel vizsgáltuk azt az elemet is, melynek semleges tengelyénél, az elem egyik oldalán repedést szimuláltunk. A 9. ábra a végeselemes szoftverrel behálózott próbatestet szemlélteti. A 10. ábrán a végeselemes modell erő-elmozdulás diagramja és a roncsolásos vizsgálat erő-elmozdulás diagramjai láthatók. A 11. ábrán a repedt elem függőleges elmozdulásai láthatók mm-ben. A 12. ábra a repedt elem normálfeszültségeinek alakulását szemlélteti N/mm^2 -ben. A 13. ábra a repedt elem nyírófeszültségeinek alakulását szemlélteti N/mm^2 -ben.

A végeselemes szoftverrel modellezett elem erő-elmozdulás diagramja jól igazodik az eltört próbatestek diagramjaihoz.

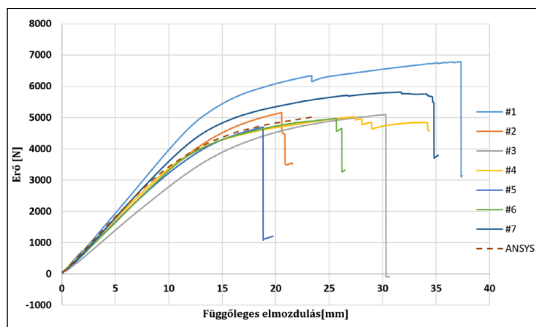
A roncsolásos vizsgálatok során kapott törőerők átlagértéke 5363 N, a feszítávolság felénél mért elmozdulások átlagértéke pedig 29,33 mm volt. A végeselemes módszerrel kapott törőerő értéke 5018 N volt, melyhez 23,43 mm elmozdulás társul.

4.3. A műgyantával helyreállított próbatestek

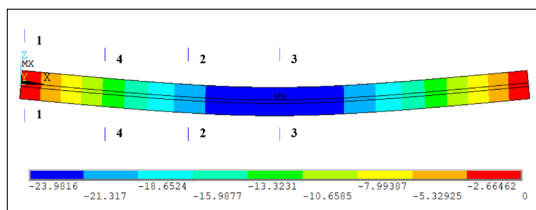
A repedt próbatestek geometriája alapján készítettük el a műgyantával helyreállított elemeket. A 14. ábra a roncsolásos vizsgálat és elméleti modell erő-elmozdulás diagramjait összegzi. A végeselemes modell erő-elmozdulás függvényét a szaggatott vonallal jelöltük.



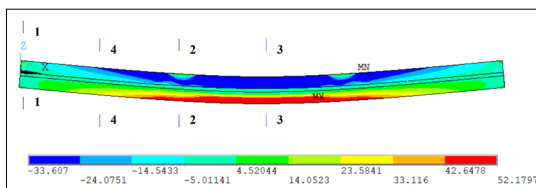
9. ábra. Az egyik oldalán berepedt próbatest végeselemes modellje



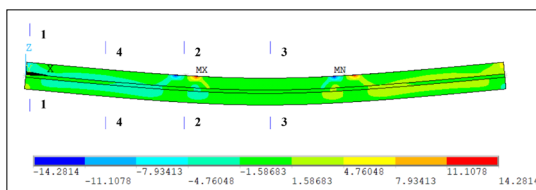
10. ábra. A sérülésmentes próbatestek erő-elmozdulás diagramja



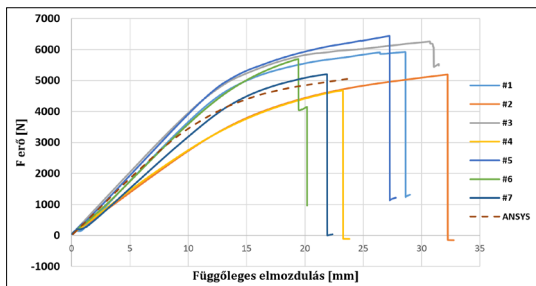
11. ábra. A repedt elem függőleges elmozdulásai



12. ábra. A repedt elem normálfeszültségeinek alakulása



13. ábra. A repedt elem nyírófeszültségeinek alakulása



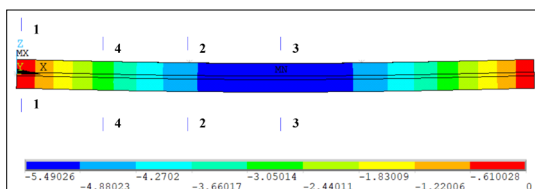
14. ábra. A helyreállított próbatestek erő-elmozdulás diagramja

A helyreállított próbatestek esetében a roncsolás vizsgálat során eredményül kapott törőerők átlagértéke 5631 N, a feszítávolság felénél mért függőleges elmozdulások átlagértéke 26,76 mm volt. Az elméleti modell esetében a törőerők átlagértéke 5065,64 N, a feszítávolság felénél mért függőleges elmozdulások átlagértéke 23,86 mm volt. A 15. ábrán a műgyantával helyreállított próbatest függőleges elmozdulásai láthatók mm-ben.

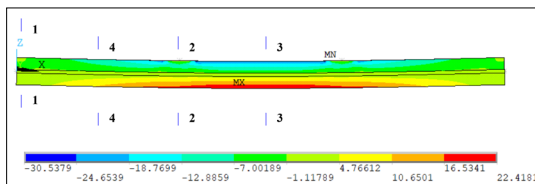
A 16. ábra a műgyantával helyreállított elem normálfeszültségeinek alakulását szemlélteti N/mm²-ben. A 17. ábra a helyreállított elem nyírófeszültségeinek alakulását szemlélteti N/mm²-ben.

4.4. A repedt és műgyantával helyreállított esetek összehasonlítása

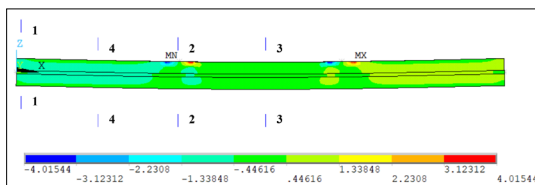
A műgyanta hatását a végeselemes modellekben felvett metszetek normál- és nyírófeszültség ábráinak összehasonlításával analizáltuk. A feszítávolság felénél (3-3) és a támasztól számított 120 m-re (4-4) vettük fel a metszeteket. A 3-3 metszetben maximum normálfeszültségi pont van, a 4-4 metszetben pedig maximum nyírófeszültség (18–27. ábra). A támaszoknál és az erőbevezetéseknel ezúttal nem vizsgáljuk a feszültségek eloszlását a lokális hatások elkerülése érdekében.



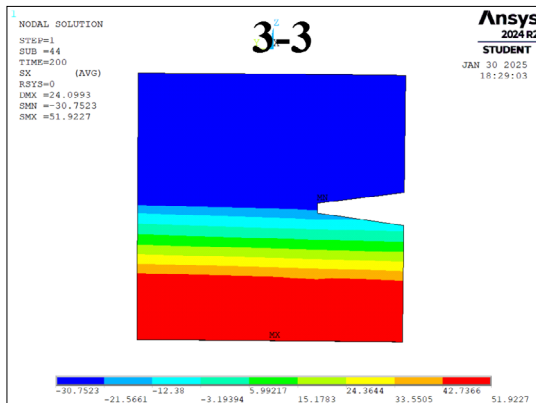
15. ábra. A műgyantával helyreállított elem függőleges elmozdulásai



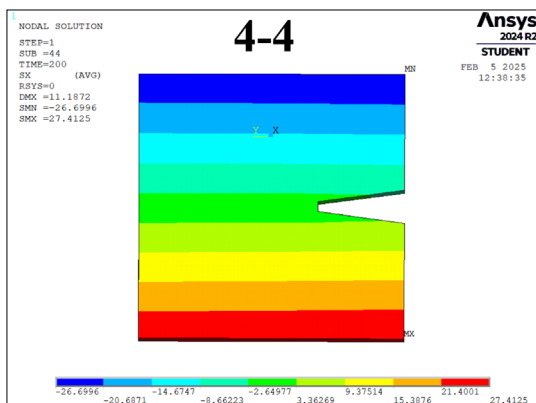
16. ábra. A műgyantával helyreállított elem normálfeszültségeinek alakulása



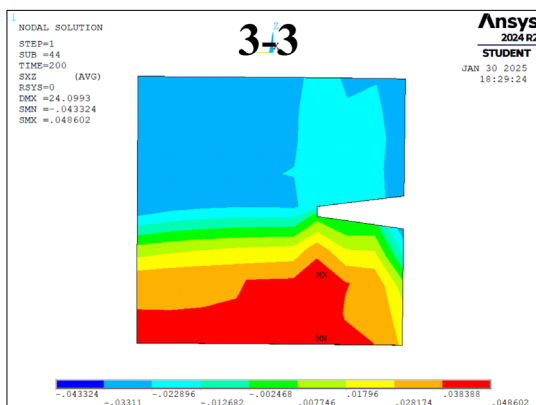
17. ábra. A műgyantával helyreállított elem nyírófeszültségeinek alakulása



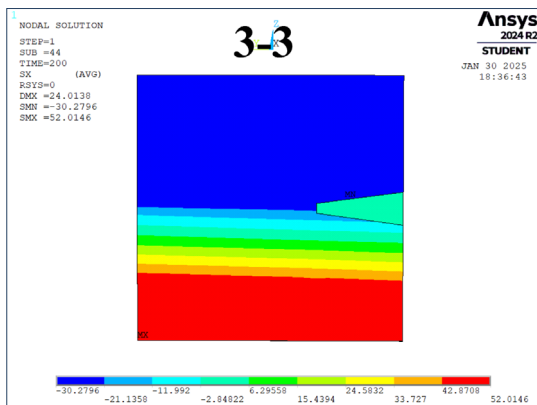
18. ábra. Normálfeszültség alakulása a 3-3 metszetben a repedt próbatest esetén



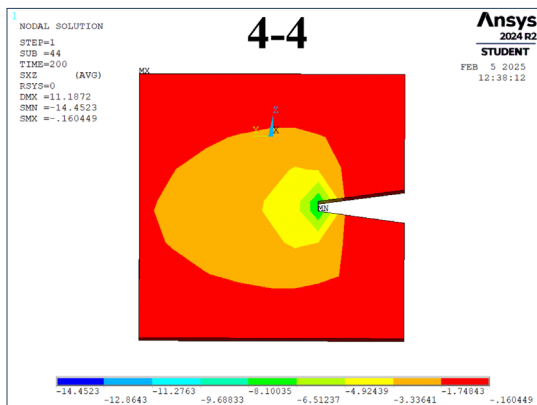
19. ábra. Normálfeszültség alakulása a 4-4 metszetben a repedt próbatest esetén



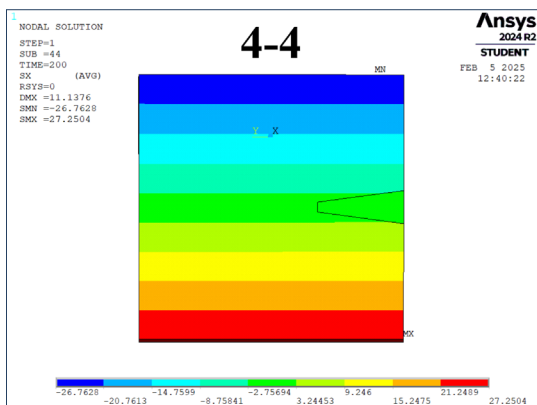
20. ábra. Nyírófeszültség alakulása a 3-3 metszetben a repedt próbatest esetén



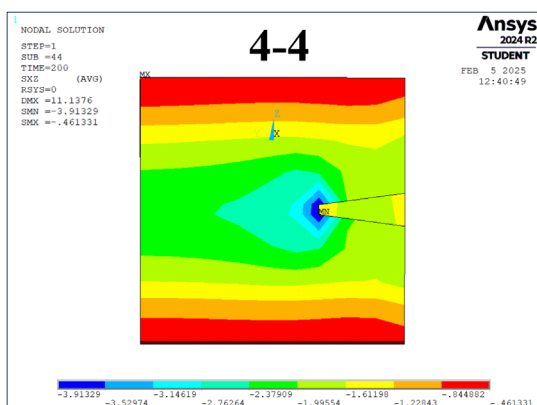
21. ábra. Nyírófeszültség alakulása a 3-3 metszetben a helyreállított próbatest esetén



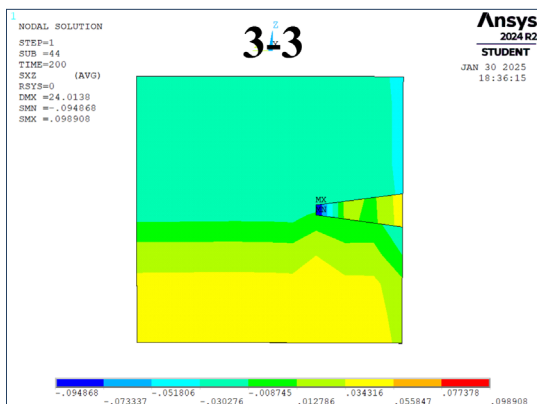
24. ábra. Nyírófeszültség alakulása a 4-4 metszetben a repedt próbatest esetén



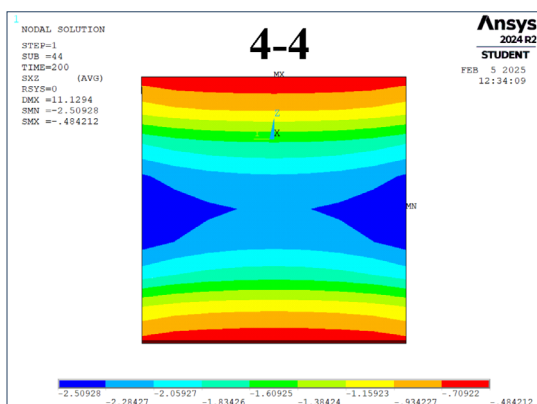
22. ábra. Normál feszültség alakulása a 4-4 metszetben a helyreállított próbatest esetén



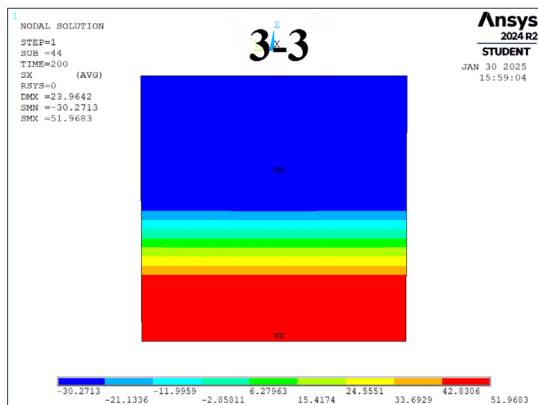
25. ábra. Nyírófeszültség alakulása a 4-4 metszetben a helyreállított próbatest esetén



23. ábra. Nyírófeszültség alakulása a 3-3 metszetben a helyreállított próbatest esetén



26. ábra. Nyírófeszültség alakulása a 4-4 metszetben az ép fa próbatest esetén



27. ábra. Normálfeszültség alakulása a 3-3 metszetben az ép fa próbatest esetén

5. Következtetések

A normálfeszültségek alakulása szempontjából egyik esetben sem számottevő a repedés hatása. Ez a jelenség a repedésnek az elem keresztmetszeten belüli, semleges tengelynél levő pozíciójával magyarázható. Emiatt a törési erők sem térnek nagyban el egymástól. A törés a normálfeszültségek határfeszültségének túlhaladása miatt következik be ennél a mélységű és pozíciójú repedésnél.

A nyírófeszültségek alakulása szempontjából viszont a repedésnek meghatározó szerepe van. A repedés a várható nyírófeszültség maximumánál helyezkedik el. A 18. ábra az ép próbatestek nyírófeszültségének alakulását szemlélteti, ahol a várt módon, a keresztmetszet közepén éri el az XZ-nyírófeszültség a csúcspot.

A 16. ábra a repedt próbatest nyírófeszültség-ábráját szemlélteti a 4-4 keresztmetszetben. A repedés környezetében megfigyelhető egy feszültségcsúcs 8N/mm^2 feszültségi csúcértékkel, amely több mint háromszoros érték az ép próbatest megfelelő pontjához hasonlítva.

A 17. ábrán a műgyantával helyreállított próbatest esetében a műgyanta alkalmazása kedvezően hat a nyírófeszültségek alakulására. A helyreállított repedés csúcspontjában megtalálható a feszültségi maximumpont, de ennek értéke több

mint 2-szer kisebb, mint a repedt elem esetében. A műgyanta alkalmazásával sikerült a feszültségcsúcsokat csökkenteni és a nyírófeszültségek alakulása szempontjából az ép keresztmetszethez közeli értékeket kapni.

A kutatás további lépéseiben a keresztmetszet mindkét oldalán levő repedéseinek hatását és annak műgyantával való helyreállítását célozzuk meg vizsgálni. Ezt követően olyan eseteket is vizsgálni szeretnénk, ahol a gyengítés pozíciója a normálfeszültség alakulását befolyásolhatja.

Köszönetyilvánítás

Köszönettel tartozunk Armuth Miklós címzetes egyetemi tanárnak (Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem), Sebestyén Ottó technikusnak (Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem), Karádi Dániel építésmérnök doktoranduszának (Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem) és Baróthy Miklós vegyészmérnöknek (POLINVENT Kft.), akik a tanulmány megfelelő fázisaiban segítettek, támogatták a kutatást.

Szakirodalmi hivatkozások

- [1] Márton P.: A 3PHV60 típusú műgyanta anyagjellemzőinek összehasonlítása a C24 szilárdsági 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) 23–37.
<https://ojs.emt.ro/muszakiszemle/article/view/1495>
- [2] Márton P.: A 3PHV60-típusú műgyanta alkalmazása a faszerkezetek javítására/Application of 3PHV60 Type Epoxy Resin for the Repair of Timber Structures, Acta Materialia Transylvanica 7/1. (2024) 29–38.
<https://doi.org/10.33923/amt-2024-01-06>
- [3] MSZ EN 408:2010+A1:2012 Faszerkezetek. Szerkezeti fa és rétegelt-ragasztott fa. Egyes fizikai és mechanikai tulajdonságok meghatározása
- [4] Márton P.: 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.