

Utólagos beavatkozások hatása egy barokk tetőszerkezet erőjátékára

Effect of Subsequent Interventions on the Structural Behaviour of a Baroque Roof Structure

ZRUBKA Beatrix¹, Dr. HEGYI Dezső².

¹ Szilárdságtani és Tartószerkezeti Tanszék, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem,
1111 Budapest, Műegyetem rkp. 3-9. zbea@edu.bme.hu, sztwp.szt.bme.hu/

² Szilárdságtani és Tartószerkezeti Tanszék, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem,
1111 Budapest, Műegyetem rkp. 3-9. hegyi.dezso@epk.bme.hu + 36-1-463-1317 sztwp.szt.bme.hu/

Abstract

Historical timber roof trusses are statically indeterminate structures with multiple nonlinear properties and therefore possess a considerable capacity for load redistribution. Consequently, simpler linear elastic structural models often fail to adequately describe the actual structural behavior and the resulting damage patterns [1]. In certain cases, however, appropriately selected linear models may still provide acceptable results. In addition to joint stiffness and nonlinear behavior, the investigation of the structure's load history, the damage accumulated during its service life, and the sequence of interventions carried out over time also significantly influence the current internal force distribution.

This paper presents the effect of load history on internal force distribution through a series of first-order linear elastic finite element models based on the example of an approximately 200-year-old Baroque roof structure. The aim of the research is not to determine the exact load-bearing capacity of the structure, but rather to trace changes in structural behavior by modeling separating joints and the typical interventions observed in the selected roof structure.

Keywords: Historical timber roof trusses, load history, internal force distribution

Kivonat

A történeti fa fedélszékek számos nemlineáris tulajdonsággal bíró, statikailag többszörösen határozatlan szerkezetek, ezért számottevő teherátrendezői képességgel rendelkeznek. Emiatt az egyszerűbb, lineárisan rugalmas statikai modellek gyakran nem írják le megfelelően a valós szerkezeti működést és a kialakult károsodásokat [2]. Bizonyos esetekben azonban megfelelően megválasztott lineáris modellekkel is kaphatunk elfogadható eredményeket. A csomóponti merevségeken és a nemlineáris viselkedésen túl a szerkezet terheléstörténetének vizsgálata, az élettartam alatt kialakult károsodások és az elvégzett beavatkozások sorozata is jelentősen befolyásolja az aktuális belsőerő-eloszlást.

A tanulmány a műemléki védelem alatt álló egri Érseki Szent József kollégium barokk fedélszék részletén keresztül, lineárisan rugalmas végeelemes modellek sorozatával mutatja be a terheléstörténet hatását a belsőerőeloszlásra. A kutatás célja nem a szerkezet pontos teherbírásának meghatározása, hanem a szerkezeti viselkedés változásának követése a szétcsúszó csomópontok, valamint a mintául szolgáló tetőben tapasztalt tipikus beavatkozások modellezésével.

Kulcsszavak: történeti tetőszerkezetek, terheléstörténet, belsőerőeloszlás

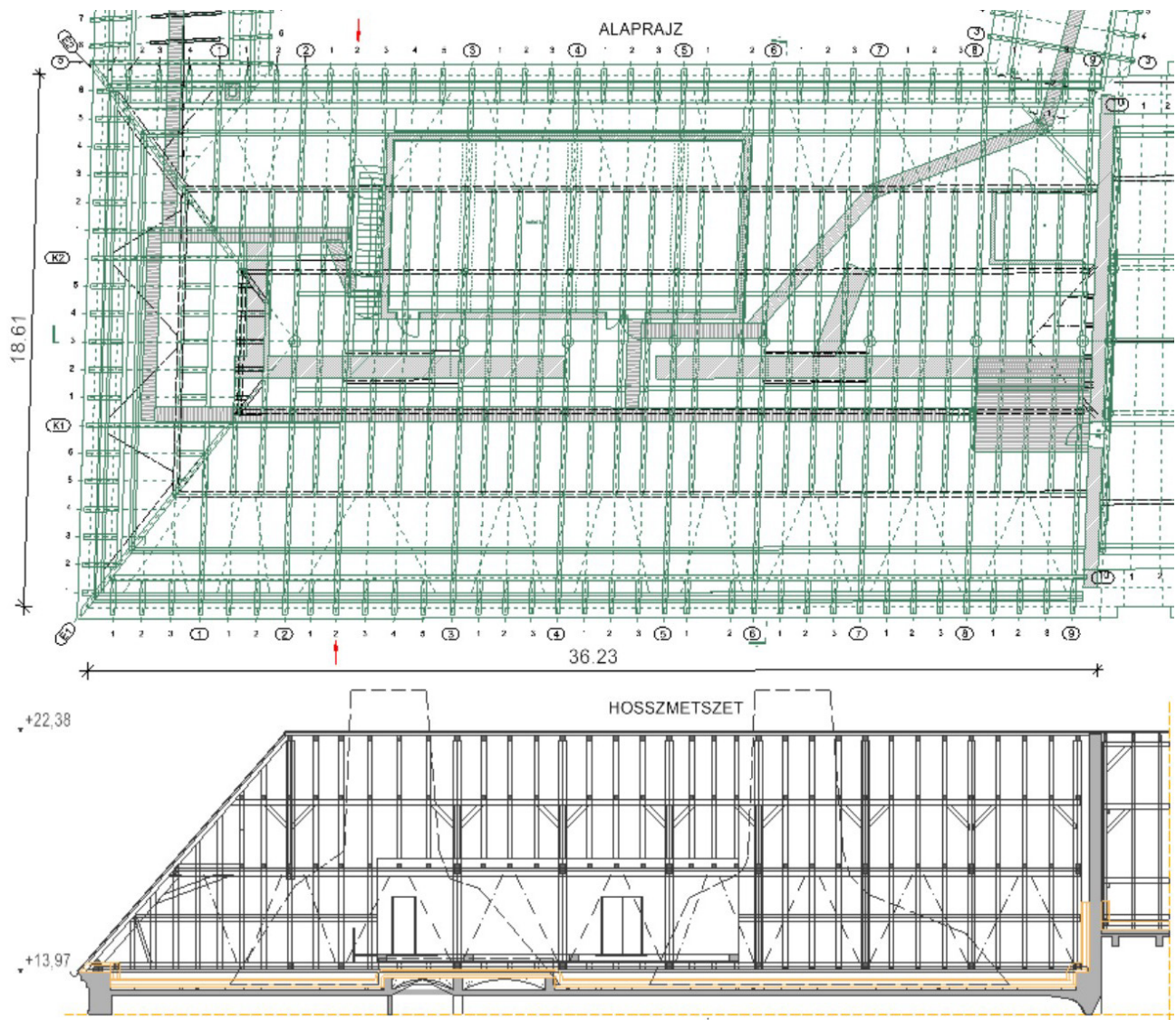
1. BEVEZETÉS

A történeti fa fedélszerkezetek vizsgálata során gyakran tapasztalható, hogy a szerkezeten kialakult károsodások és alakváltozások nem ott jelennek meg, ahol azt az egyszerűsített statikai modellek alapján várnánk. Ennek egyik oka, hogy a hagyományos ácsszerkezetek statikailag többszörösen határozatlan, jelentős teherátrendezői képességgel rendelkező térbeli rúdszerkezetek. [1], [2]

A gyakorló mérnök számára az egyik legfontosabb kérdés, hogy a viszonylag egyszerűen és gazdaságosan beszerezhető információk alapján miként lehet olyan statikai modellt felállítani, amely a lehető legegyszerűbben, de megfelelően közelíti a szerkezet valós működését.

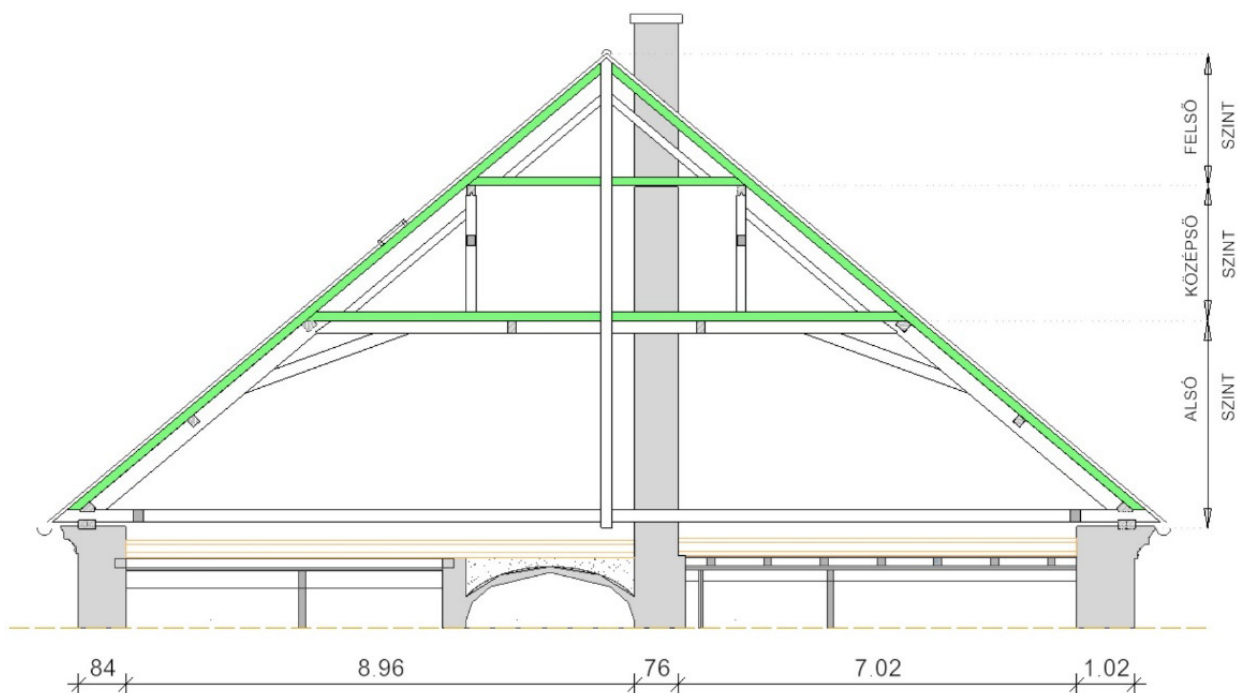
2. AZ EGRI ÉRSEKI SZENT JÓZSEF KOLLÉGIUM BAROKK TETŐSZERKEZETÉNEK ISMERTETÉSE

A vizsgált fedélszék közel 200 éves. Makay Dorottya *Erdélyi barokk fedélszerkezetek tipológiája* [3] alapján a tárgyi barokk tető szerkezeti rendszerét az alábbi kóddal lehetne definiálni: A.2*.2.(c).-b(2/3/5)-I.(1). A 18,6 m széles és 36,2 m hosszú középfőfalas épületrész fölé megépített cca. 40°-os hajlásszögű tetőszerkezetet erőtani működését már az építéskor félreértették. Erre példa az „így szoktuk” elv szerint beépített „lengő oszlopos” kialakítás a középfőfal mellett, ahol a középső oszlopok most nem húzott, hanem nyomott elemként működnek. Ezzel egyidejűleg jelentős szerkezeti hibákat is elkövettek, melyek hatását tovább súlyosbította az élettartam alatt szakszerűtlenül elvégzett beavatkozások sorozata.



1. ábra.
Egri Érseki Szent József kollégium, barokk tetőszakasz,
alaprajz és hosszmetset

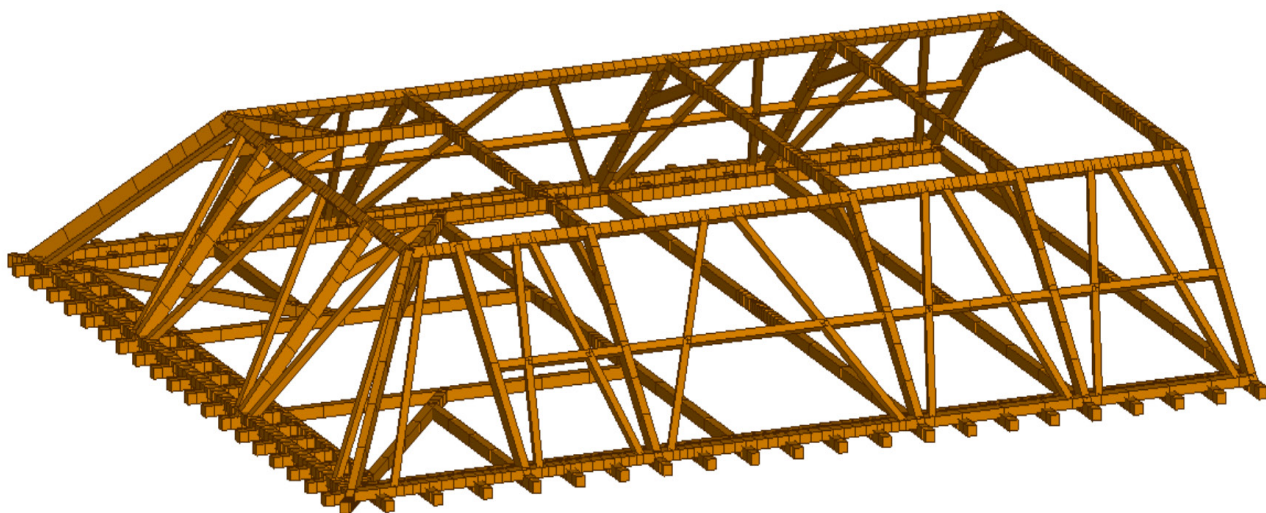
A legjelentősebb hiba, hogy a konty utáni 1. és 2. főállásnak nincsen teljes hosszúságú kötőgerendája (a belső főfalban található kémény miatt), így az első teljes értékű vízszintes erőket felvenni képes kötőgerenda a kontytól számított 9. (lépcső melletti) „mellék” szaruállásba tolódott (1. ábrán nyíllal jelölt szaruállás).



2. ábra.

Egri Érseki Szent József kollégium barokk tetőszakaszának általános metszete

Minden barokk tetőszerkezetben megtalálható az alábbi két jellegzetes szerkezeti egység. Az egyik alrendszer a szarufák és az azokat összekapcsoló torokgerendák alkotják (2. ábrán kitöltéssel jelölt faelemek), míg a másik fő szerkezeti egység a térbeli merevséget biztosító dűlt székes keretváz (3. ábra). Ezeket a különböző szerkezeti változatokban a felsőbb szinteken további merevítő rendszerek is kiegészíthetik [3], [4].



3. ábra.

A tetőszerkezet alsó szintű térbeli működésű barokk keretváza

A szerkezet helyszíni vizsgálata során több ismétlődő csomóponti károsodás volt megfigyelhető. Számos helyen szétesésztak a szarufa–torokgerenda kapcsolatok, kilazultak a csapolások a fejgerenda és a hosszmerevítő rácsrudak csomópontjainál (4. ábra), valamint szétesésztak egyes kötő- és fiókgerenda-csomópontok (5-6. ábra). A csomóponti szétesésztások egy része feltehetően már a szerkezet kezdeti építése során kialakulhatott. Ezekből kifolyólag a jelenlegi erőjáték jelentősen eltérhet az idealizált geometriai modell alapján várható állapottól.



4. ábra. Szétsúszott fejgerenda és merevítő rács csomópont



5. ábra. Szétsúszott kötőgerenda csomópont az él főállásnál



6. ábra. Szétsúszott fiókgerenda – fiókváltó csomópont a kötőgerenda nélküli főállásnál

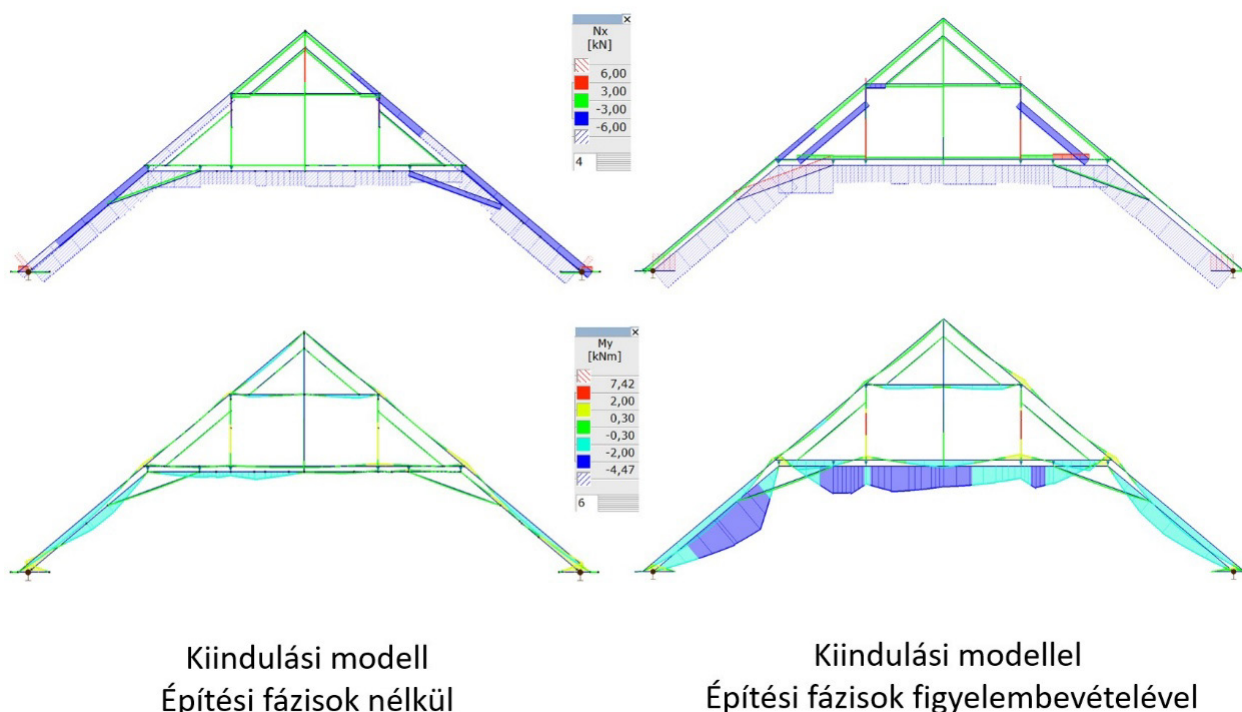
3. A VIZSGÁLAT MÓDSZERE

A szerkezet vizsgálatát az AXISVM8 végeelemes program építési fázisok vizsgálatára kifejlesztett STG moduljával végeztük. A kutatás során tudatosan egyszerűsített, lineárisan rugalmas, elsőrendű modelleket alkalmaztunk, mivel az említett programmodul ezen az elven működik. Mindezt annak érdekében tettük, hogy nyomon tudjuk követni az egymásra épülő építési fázisok sorozatának hatását.

A vizsgálat során három különböző modellváltozat készült. Az első modell tartalmazza a feltételezett kiindulási állapotot, azaz az építéskori kész állapotot. A harmadik modell a jelenleg látható, többszörösen javított végállapotot reprezentálja. A második modell tartalmazza az építési fázisokat, melyek során több lépésben jutunk el az építéskori kész állapotba, majd további lépéseken át a végső jelenlegi állapotba. Eszerint már a tetőszerkezet megépítése is négy építési fázisra bontandó:

1. fázis: az alsó szintű térbeli keretváz megépítése a főállásokban és a főállások között;
2. fázis: a két torokgerenda szint közötti (középső szintű) szelemenes, állószerkes, ferde dűcos, karpántos térbeli merevítés a főállásokban és a főállások között;
3. fázis: a felső torokgerenda szint feletti ferde támaszos merevítés kialakítása a főállásokban lengőoszlopokkal;
4. fázis: a torokgerendákkal merevített szaruzat megépítése;
5. fázis: a héjazatból származó terhek ráterhelése a szerkezetre.

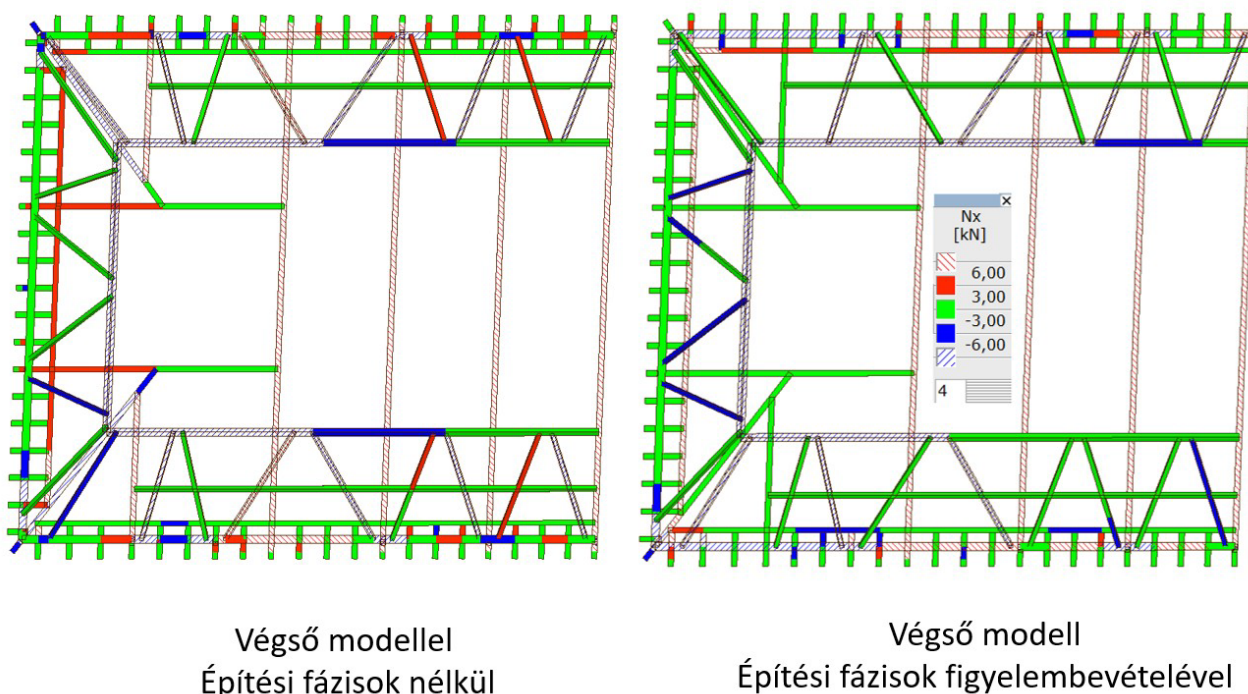
Elméletileg így jutnánk el a „kiindulási állapothoz”, azonban már a második építési fázist követően kialakulnak olyan nagy mértékű húzóerők egyes csomópontokban pusztán a szerkezet önsúlyának hatására, amelyek miatt ezek a túlterhelt kapcsolatok szétesésvesztettek. Ezt a jelenséget az adott elemek erőjátékából való kiiktatásával modelleztük. Az első elem kiesése nyomán létrejövő igénybevétel átrendeződés következtében újabb csomópontok terhelődtek túl, és további rudak estek ki az erőjátékából. Minden változást külön fázisban vizsgáltunk. Végül csak a 10. fázisban került fel a héjazat terhe a szerkezetre és vált összehasonlíthatóvá a 2. modell az 1. (kiindulási) modellel. Addigra azonban az alsó térbeli váz már jelentős változásokon ment keresztül.



7. ábra. A kötőgerenda nélküli 2. főállás N_x normálerő és M_y nyomatéki ábrájának összehasonlítása önsúly és héjazati terhelés hatására az építéskori kész állapotban, a terhelési fázisok figyelembevételével és anélkül

A további fázisokban szaru- és talpszelemen cseréket hajtottunk végre a helyszínen tapasztaltakhoz hasonló módon. Ehhez azonban előzetesen lokálisan tehermentesíteni kellett a főállásokot, valamint ki kellett

bontani azokat a hosszmerítő rácsrudakat, amelyek akadályozták volna a talpgerenda cseréjét. Végül visszakerült a héjazat terhe, és egy terhelt állapotban végzett, karbantartásjellegű javítást imitálva visszaépültek a korábbi fázisokban kiiktatott rúdelemek is. A cserélt szaruk és talpgerenda-szakaszok több helyen toldva kerültek visszaépítésre, a helyszíni tapasztalatok alapján. A három alap modell fő és mellék-állásainak igénybevételi ábrái, alakváltozásai és az egyes elemek kihasználtságai kerültek összehasonlításra a 7-8. ábrákhoz hasonlóan.



8. ábra. A kötőgerenda szint, a fejtámasz és az alsó szintű merevítő rácsosítás N_x normálerő ábráinak összehasonlítása a jelenlegi (végső) állapotban, az utólagos beavatkozások hatásának vizsgálatára a terhelési fázisok figyelembevételével és anélkül

4. EREDMÉNYEK ÉS ÉRTÉKELÉS

A különböző modellváltozatok összehasonlítása során jól megfigyelhető volt, hogy az 1. ütemben megépített alsó térbeli keretváz elemeit érő változásoknak nagyobb hatásuk volt a globális erőjátékra, mint a 4. fázis részét képező szaru–torokgerenda rendszeren végzett változtatásoknak. A szaruk változtatása csak az aktuális szaruállásra volt hatással. Ez az állítás természetesen csak bizonyos keretek között igaz. Ha például az összes szarufát többszörösen csuklósan toldott rudakra cserélnénk, annak már biztosan hatása lenne a globális erőjátékra is.

A helyszíni tapasztalatok alapján módosított modellekben fokozatosan átrendeződött az erőjáték. Így bizonyos egyszerűsítések és feltételezések mellett lineárisan rugalmas modellek sorozatával is el lehet jutni hasonló eredményhez, mintha például csak nyomásra aktív, nemlineáris tulajdonságokkal bíró modellt használtunk volna. A helyszínen szétcsúszott csomópontok pozíciói jó egyezést mutattak a számítási eredmények alapján várható helyekkel.

A vizsgálat egyik fontos tapasztalata volt, hogy a jelenlegi szerkezeti állapot önmagában nem elegendő a valós erőjáték értelmezéséhez. A szerkezet jelenlegi erőjátéka jelentős mértékben függhet az élettartam során kialakult terheléstörténetétől.

5. KÖVETKEZTETÉSEK

A bemutatott vizsgálatok alapján megállapítható, hogy a történeti fedélszerkezetek erőjátékát jelentős mértékben befolyásolja a szerkezet terheléstörténete és az élettartam során végzett beavatkozások sora.

A kutatás rámutatott arra, hogy a történeti ácsszerkezetek modellezése során nem elegendő kizárólag az aktuális végállapot geometriai állapotának figyelembevétele. A csomóponti károsodások, szétcsúszások és

korábbi javítások olyan információkat hordoznak, amelyek alapvetően befolyásolhatják a valós teherviselési mechanizmust.

IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] Zrubka B. – Hegyi D.: *Finite element modeling of historical roof structures in consideration of reduced joint stiffnesses and plastic behaviour*. Proceedings of the SHATIS 2025 – 7th International Conference on Structural Health Assessment of Timber Structures. 260-265.
- [2] Zrubka B. – Hegyi D.: *Fa fedélszékek végeselemes modellezése csomóponti merevségek és képlékenyedés figyelembevételével*. *Építés – Építéstudomány*, 53 (2025) 3-4, 389-416, DOI: 10.1556/096.2025.00148
- [3] Makay D.: *Barokk fedélszerkezetek Erdélyben*. Transsylvania Nostra, 2008/4, 20-28.
- [4] Fátrai György: *Történeti tetőszerkezetek*. Könyv. TERC, 2008, ISBN 978 963 9535 81 7