



ACÉLSZERKEZETEK A MŰEMLÉK ÉPÜLETEK FELÚJÍTÁSÁBAN

STEEL IN ARCHITECTURAL HERITAGE PROTECTION

Nagy Zsolt,¹ Kelemen Andrea,² Sánduly Annabella³

¹ Kolozsvári Műszaki Egyetem, Építőmérnöki Kar, Kolozsvár, Románia, zsolt.nagy@dst.utcluj.ro

² Kolozsvári Műszaki Egyetem, Építőmérnöki Kar, Kolozsvár, Románia, andrea.kelemen@gordias.ro

³ Lodzi Műszaki Egyetem, Łódź, Lengyelország, annabella.sanduly@dokt.p.lodz.pl

Abstract

The current article presents some steel structural solutions implemented in archaeological and architectural heritage protection applied in Romania using case studies. The paper summarizes also some of the engineering challenges of the project team during the design process.

Keywords: *steel structure, design challenges, historical monument, ruin protection.*

Összefoglalás

Cikkünk néhány acélszerkezeti megoldást mutat be esettanulmányok segítségével, amelyeket Romániában alkalmaztunk régészeti és építészeti örökségvédelem során. A tanulmány bemutat pár, a tervezési folyamat során a projektcsapat előtt álló mérnöki kihívást is.

Kulcsszavak: *acélszerkezet, tervezési kihívások, műemlék, romvédelem.*

1. Bevezetés

Az épített örökség megőrzése napjainkban egyre inkább interdiszciplináris megközelítést igényel, amelyben az építészeti, régészeti és mérnöki tudományterületek szoros együttműködése elengedhetetlen. E kontextusban az acélszerkezetek korszerű megoldásokat kínálnak a történeti értékkel bíró épületek és régészeti lelőhelyek védelmére. Az acélszerkezetek alkalmazása lehetőséget teremt ideiglenes vagy állandó megerősítések kialakítására, a meglévő épületszövet minimális beavatkozással történő tehermentesítésére, illetve transzparens, mégis tartós lefedések és szerkezeti elemek létrehozására. Az ilyen jellegű beavatkozások azonban komoly mérnöki és műemlékvédelmi kihívásokat is felvetnek, hiszen a kortárs szerkezeti megoldásoknak összhangban kell lenniük az örökségvédelmi szempontokkal és az adott helyszín történeti kontextusával. Dolgozatunk 4 olyan esettanulmányt összegez, amelyek tervezése és kivitelezése során a szerzők sikeresen alkalmaztak acélszerkezeteket.

2. Esettanulmányok műemlékek és régészeti romok védelmére

Egyedi projektek során gyakran olyan gyakorlati megoldások és döntések születnek, amelyek nem találhatók meg a szabványos kézikönyvekben vagy elméleti tananyagokban. Az esettanulmányok lehetővé teszik e tapasztalatok rendszerezett és reflektált formában történő közlését. Az olyan komplex területeken, mint az épített örökség védelme, az esettanulmányok segítenek feltárni, hogyan működhet együtt az építészet, mérnöki tudomány, műemlékvédelem és régészet. Továbbá, új anyagok, szerkezeti rendszerek vagy tervezési módszerek gyakran először egyedi projektekben kerülnek kipróbálásra.

2.1. A tordai castrum

Az első esettanulmány a romániai Tordán (ókor-i nevén Potaissa) található V. Macedonica római légió erődjének régészeti maradványait védő építészeti beavatkozást mutatja be, kiemelve az alkalmazott acélszerkezeti megoldásokat és a

tervezés során felmerülő mérnöki kihívásokat. A projekt célja egy nagy fesztávú fedőszerkezet létrehozása és az arra részben felfüggesztett járófelületek megoldására kialakított acélépítmény létrehozása volt, amely egyrészt védi a feltárt romokat az időjárási hatásokkal szemben, másrészt lehetővé teszi a látogatók számára a lelőhely közvetlen megtekintését anélkül, hogy az károsodna. A mintegy 40,35 méter széles és 70,35 méter hosszú lefedés egy felfüggesztett járófelületi rendszer is magában foglal, amely négy irányban – két hosszirányú és két keresztirányú –, összesen mintegy 230 méter hosszúságban biztosít gyalogos közlekedést. A beavatkozás során különös figyelmet kellett fordítani a történeti kontextus megőrzésére, a minimálisan invazív megoldások alkalmazására (például a romok közé befűrt acél mikrocölöpök alkalmazása kisebb alapok kialakítása céljából), valamint a szerkezeti stabilitás és a látogatói biztonság egyidejű biztosítására. A tanulmány részletesen elemzi a projektcsapat által alkalmazott műszaki megoldásokat, valamint azokat a komplex kihívásokat, amelyek az örökségvédelmi szempontok és a korszerű mérnöki tervezés integrálása során merültek fel. Részletesen az [1]-es tanulmányunkban írtunk erről a munkáról.

A bemutatott projekt arra is nagyon jó példa, hogy kiemeli azokat a szerepeket, amelyeket a szerkezet tervezőmérnöke egy adott építkezési projekten belül betölt [2].

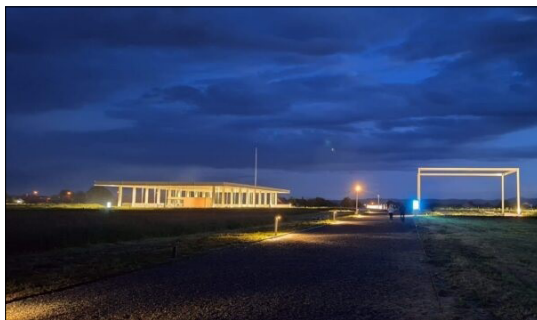
2.2. Bolyai utca 11.

A második esettanulmány egy történelmi épület rehabilitációs folyamatát mutatja be, melynek helyszíne Marosvásárhely városközpontjához kötött, amelynek során az eredeti, barokk stílusú tetőszerkezet formáját egy korszerű fémszerkezet alkalmazásával rekonstruáltuk. A tanulmány elsősorban a tetőszerkezet és a fémszerkezet

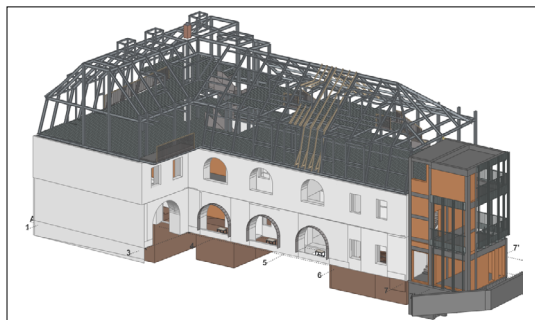
feljárólépcső tervezésére fókuszál. Az összetett formájú, több tetősíkkal rendelkező, szabálytalan geometriájú tetőszerkezetet méretezni, részletezni kellett, majd a megerősített téglafalakra lett elhelyezve. A fő közlekedő lépcső – amely acéllemezről készült, és különleges statikai rendszerrel rendelkezik – fejlett számítási módszereket igényelt ellenőrzés céljából. Cikkünk [3] ismerteti azokat a mérnöki kihívásokat, amelyek a tervezés és kivitelezés során merültek fel, valamint ezek megoldásait: 3D-szkenneléssel készített felmérés szolgált referenciarendszerként az acélszerkezeti egység számára (2. ábra); kezelni kellett a téglafal és acélszerkezet közötti illesztési eltéréseket; valamint a szabálytalan geometria kialakítását a terepi adottságokból fakadó korlátozások figyelembevételével kellett megoldani.

A projekt tervezési és kivitelezési fázisában alkalmazott módszerek kiemelkedően fontos szerepet játszottak az összetett geometriai és szerkezeti kihívások kezelésében. Egy ilyen bonyolultságú szerkezet méretezése és részletezése gyakorlatilag kivitelezhetetlen lett volna korszerű, digitális technológiák alkalmazása nélkül. A meglévő állapot pontos felmérése lézerszkennelési technológiával történt, amely nagy felbontású adatokat szolgáltatott az épület aktuális geometriai konfigurációjáról, valamint azokról a kivitelezés közben keletkezett eltérésekről, amelyek jelentősen befolyásolták a szerkezeti tervezést. Az így létrejött háromdimenziós pontfelhő alapjául szolgált a digitális modellépítésnek és a részlettervezésnek.

A projekt során BIM- (Building Information Modelling) alapú szoftverkörnyezetet alkalmaztunk, amely lehetővé tette a különböző szakterületek – például statikus mérnökök, építészek, gépészek – hatékony együttműködését egy közös, térbeli modellben. Ez a modell tartalmazta az összes releváns szerkezeti, geometriai és anyagjellemzőt,



1. ábra. A tordai castrum fénypompában a Múzeumok éjszakáján (Forrás: TurdaNews)



2. ábra. A marosvásárhelyi Bolyai utca 11. épületének 3D-modellje

és lehetőséget adott a valós idejű koordinációra és az esetleges ütközések megelőzésére.

Kihívást jelentett a véletlenszerűen tájolt szerkezeti elemek részletezése egy pontos vonatkoztatási rendszer hiányában. E probléma megoldására a projektcsapat saját koordináta-rendszert alakított ki, ehhez igazítottuk az acélszerkezeti elemek háromdimenziós illesztési pontjait. Az elemek helyzetét, orientációját és alakját több lépcsőben, ismételt lézerszkennelések segítségével ellenőriztük, biztosítva ezzel a végleges modell pontosságát és a gyártási hibák elkerülését.

A módszertan egyik legfontosabb tanulsága, hogy a különböző szakterületek célkitűzései időnként eltérő vagy ellentmondásos szempontokat tükrözhetnek. A projekt sikere nagymértékben a felek közötti nyitott kommunikáción, a multidiszciplináris együttműködésen és a kompromisszumos megoldások kidolgozásán múlott.

2.3. A sebesvári vár felújítása

A harmadik esettanulmány a sebesvári középkori várrom (román nevén Bologa) látogatók előtti megnyitását és az ezt feltételező biztonságossá tételének tervezési munkáit mutatja be. A **4. ábra** a Gordias mérnöki iroda által készített szerkezeti modellt és a bástya jelenlegi állapotát mutatja.

A munkálatok során a vár területét megtisztították a burjánzó növényzettől, kijavították a falakat, tereprendezési munkálatokat végeztek, a falkoronát gyep téglával szigetelték, feljárókat építettek, és belülről is látogathatóvá tették az öregtoronyt acélszerkezeti építmények segítségével. A felújítást végző cég a hiányzó falrészeket részben visszaépítette, olyannyira, hogy ha néhány száz évet hirtelen visszamennénk az időben, s ellenséges

sereg közeledne, jelenlegi állapotában a vár készen állna egy ostrom visszaverésére [4].

Az acélszerkezetek szerepe a sebesvári középkori várrom látogathatóvá tételében több szempontból is kulcsfontosságú, különösen ha figyelembe vesszük a műemléki környezet komplex kihívásait. Az alábbi pontokban összefoglalható, hogy miért tekinthető az acél ideális választásnak ebben a projektben:

– *Reverzibilitás és minimális beavatkozás:*

A műemlékvédelem egyik alapelve, hogy a beavatkozások legyenek visszafordíthatók (reverzibilisek), azaz ne tegyenek visszavonhatatlan változtatásokat az eredeti szerkezeten. Az acélszerkezetek jól illeszkednek ehhez az elvhez, mivel pontszerűen rögzíthetők, kis beavatkozási felülettel, és szükség esetén könnyen eltávolíthatók.

– *Nagy teherbírás kis keresztmetszettel:*

Egy romos vár esetén korlátozott a terhelhetőség – az évszázados falak nem viselhetnek el bármekkora plusz terhelést. Az acél nagy teherbírású, mégis könnyű és karcsú szerkezeteket tesz lehetővé, amelyek nem terhelik túl a meglévő falazatot.

– *Statikai stabilitás nehéz terepen:*

A középkori várak gyakran meredek, nehezen megközelíthető helyszíneken épültek. Acélszerkezetekből jól kialakíthatók ideiglenes vagy állandó hidak, lépcsők, járófelületek, amelyek minimálisan terhelik a talajt vagy a romokat, ugyanakkor lehetővé teszik a biztonságos közlekedést a látogatók számára.

– *Illeszkedés a kortárs értelmezéshez:*

A modern beavatkozásnak gyakran az a célja, hogy vizuálisan is megkülönböztesse magát az



3. ábra. A marosvásárhelyi Bolyai utca 11. épületének tetőszerkezete építés közben



4. ábra. A tervezett és a kivitelezett bástya lépcsőinek szerkezete

eredeti szerkezetétől. Az acél anyaghasználata, letisztult formavilága jól illeszkedik a kortárs építészeti nyelvezetűhez, miközben nem próbálja utánozni a történeti megjelenést – ezzel tisztelősen tartva az autenticitás elvét.

–Előregyárthatóság és gyors szerelhetőség:

A nehezen megközelíthető helyszínek miatt fontos, hogy a szerkezetek előregyárthatók és gyorsan szerelhetők legyenek a helyszínen. Az acélszerkezetek pontosan megfelelnek ennek az igénynek: üzemben gyárthatók, és helyszíni munkával gyorsan összeállíthatók.

Összességként, habár ennek a munkának az esetében szükséges volt a helyszíni hegesztéseket is alkalmazni, sikerült esztétikusan megoldani az elemek illesztését és egy kellemes látványt biztosítani a látogatók számára (6. ábra).

2.4. Szent Mihály-templom toronylépcsősei

A negyedik esettanulmány a kolozsvári Szent Mihály-templom tornyának látogathatóvá tételét feltételező acéllépcsők tervezési munkáinak összefoglalóját mutatja be. A 7. ábra a Gordias mérnöki iroda által készített vizualizációs képet és a kivitelezés alatti munka egy köztes fázisát, valamint a végső állapotot mutatja a javasolt lép-

csőszerkezetéről, tükrözve a kiviteli munkákban okozott nehézségeket is a szűk tér, valamint a munkafelületekhez való hozzáférés hiánya miatt.

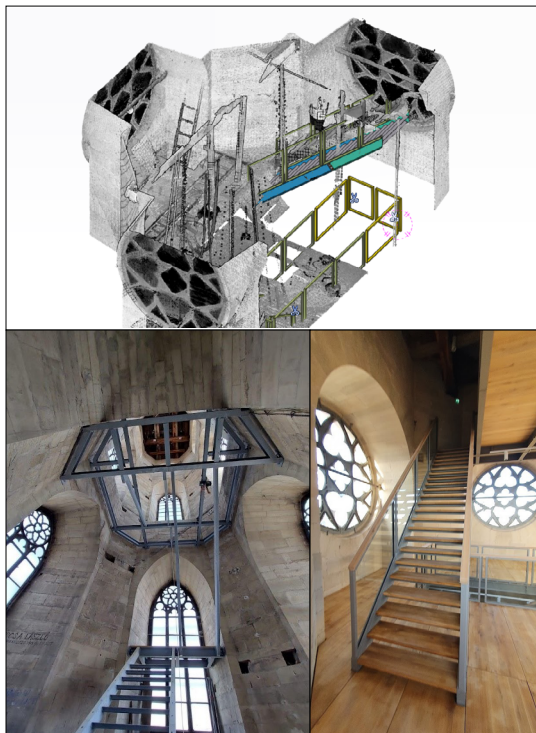
A torony felújítása során a korábbi felméréseknél súlyosabb szerkezeti problémákra derült fény. A 19. századi neogótikus torony építéséből származó jelentős önsúly miatt a középkori falrészekben 20 cm-es süllyedés volt észlelhető, amely a 3D-szkennelés alapján lett mérhető. Ezek a problémák az új, acélszerkezetű lépcső tervezését és kivitelezését is befolyásolták, mivel a szerkezetek „szabásának” tökéletesen alkalmazkodnia kellett a meglévő falak állapotához, szabálytalan síkjaihoz, és a süllyedésekből származó szintkülönbségekhez is. A korlátozott terek miatt a lépcső szerkezetének darabjait kétkezi erővel is beemelhető alkotóelemek kialakítását kellett lehetővé tenni. A Szent Mihály-templom toronylépcsőinek felújítása és a torony látogathatóvá tétele hozzájárult a templom kulturális és vallási szerepének erősítéséhez, miközben biztosította a műemlék megőrzését, és a látogatók számára is élvezetes élményt nyújt. A Szent Mihály-templom felújítása a megőrzés és adaptív újrahásznosítás kategóriában 2024-ben Europa Nostra (Európai Örökség)-díjat kapott.



5. ábra. A sebesvári vár felújítás előtti állapota



6. ábra. A sebesvári vár felújítás utáni állapota



7. ábra. A tervezett és a kivitelezett lépcsők szerkezete (köztes és végső fázis)

3. Kortárs szerkezeti beavatkozások műemléki környezetben

A négy tárgyalt esettanulmány – különböző történeti korszakokból származó, eltérő funkciójú épített örökségi elemekhez kapcsolódva – közös alapelveket, tervezési stratégiákat és mérnöki válaszokat vonultat fel. Ezek az esetek jól példázzák, hogyan találkozik a kortárs statikai gondolkodás a műemlékvédelem eszmerendszerével a 21. századi elvárások tükrében.

A tordai castrum és a sebesvári várrom látogathatóvá tételének elsődlegesen a történeti struktúrák fizikai védelmét és a turisták számára való hozzáférhetővé tételét célozták.

A Szent Mihály-templom toronylepcsőinek rekonstrukciója és a Bolyai 11. barokk tetőszerkezet újjáépítése ezzel szemben a meglévő műemlékek funkcionális megújítására koncentráltak – a kulturális élmény, valamint a használhatóság újraformálásával.

Mind a négy projekt esetében az acélszerkezet nem pusztán építéstechnikai választásként, hanem tartalmi állásfoglalásként jelenik meg: Karsúsága és szilárdsága révén az acél lehetővé teszi a minimális beavatkozást az eredeti szerkezetbe. Reverzibilitása és egyértelmű kortárs megjelenése révén biztosítja az új és a régi megkülönböztethetőségét – elkerülve az építészeti hamisítást. Előregyárthatóságának és könnyű szerelhetőségének köszönhetően jól alkalmazkodik nehezen megközelíthető vagy történetileg érzékeny helyszínekhez.

A digitalizált felmérési és tervezési eszközök döntő szerepet játszottak: A lézerszkennelés és pontfelhőalapú modellezés révén pontosan dokumentálhatóvá váltak az elmozdult, deformált vagy nem szabályos geometriák. A BIM-rendszerek alkalmazása lehetővé tette a különböző szakterületek közötti koordinációt, valamint a geometriailag bonyolult kapcsolatok pontos részlettervezését. Több esetben (pl. Szent Mihály-templom) a kivitelezés során feltárt, rejtett szerkezeti károk a tervezett megoldások folyamatos felülbírálását tették szükségessé.

Az eltérő anyagok (pl. kő és acél) csatlakozási részletei, valamint a statikai teherátadások finomhangolása komoly mérnöki innovációkat igényeltek.

4. Következtetések

A vizsgált esettanulmányok tükrében, az alábbi következtetések fogalmazhatóak meg:

4.1. Anyaghasználati szempontok – az acélszerkezetek előnyei műemléki környezetben

A sebesvári középkori várrom látogathatóvá tételének egyik legnagyobb kihívása az volt, hogyan lehet a történeti szerkezethez méltó módon biztosítani a mai kor elvárásainak megfelelő biztonságot és használhatóságot. Az acélszerkezetek alkalmazása több szempontból is indokolt és előnyös választásnak bizonyult:

- *Reverzibilitás:* az acélszerkezetek visszabontható, nem invazív megoldásokat tesznek lehetővé, ezáltal nem sértik a műemlék épségét, és később akár módosíthatók is.
- *Kis tömeg – nagy teherbírás:* a korszerű acélprofilok lehetővé teszik a könnyű, de statikailag stabil szerkezetek kialakítását, így nem terhelik túl a történeti falazatot.
- *Előregyártás és szerelhetőség:* az acélelemek üzemi környezetben gyárthatók, és gyorsan, minimális helyszíni munkával szerelhetők össze, ami különösen előnyös nehezen megközelíthető romterületeken.
- *Kortárs megjelenés:* az acél jól megkülönböztethető az eredeti kő és téglanyaghasználatától, így elkerülhető az építészeti hamisítás. Ezzel megfelel az ún. „anastylose” (megkülönböztethető helyreállítás) elvének is.

4.2. Kortárs szerkezeti megoldások a műemlékvédelemben – acélszerkezetek szerepe a sebesvári vár- és a tordai castrum-projektek esetében:

A látogatók biztonságos közlekedésének biztosítása érdekében a projekt során több helyen is acélszerkezeti beavatkozásra volt szükség. Ezek elsősorban a következő funkciókat látták el:

- Feljárók és járófelületek létesítése a vár különböző pontjaira, úgy, hogy azok ne terheljék túl a meglévő romszerkezetet.
- Kilátópontok, korlátok és kiegészítő építmények elhelyezése, amelyek a látogatói élmény részévé váltak, miközben biztonsági funkciót is betöltenek.
- Speciális rögzítési és illesztési technikák alkalmazása, amelyek lehetővé tették az eltérő anyagú (pl. kő és acél) elemek összehangolt kapcsolatát.
- Terepadottságokhoz való igazodás: a lejtős, sziklás terepen az acélszerkezetek flexibilitása lehetővé tette az egyedi illesztéseket és a testre szabott megoldások kidolgozását.

Szakirodalmi hivatkozások

- [1] Nagy Zs., Kelemen A., Sánduly A., Moldovan P., Moldovan A.: *Acél a műemlékvédelemben: a Tor-dai Castrum*. XXVIII. Nemzetközi Építéstudományi Konferencia – ÉPKO, Csíksomlyó, Románia, 2024. 120–125.
<https://ojs.emt.ro/EPKO/article/view/1655>
- [2] Nagy Zs. (szerk.): *Rolul Inginerului Proiectant de Structuri*, Editura AICPS, 2022. ISBN 978-973-0-36192-6.
- [3] Nagy Zs., Nagy Ö., Kelemen A., Kiss Z., Ambrus Á., Calian C.-F.: *Proiectarea unei șarpante de formă barocă folosind structură metalică*. In: "Construiește cu STEEL" Lucrările celei de-a XVIII-a Conferințe Naționale de Construcții Metalice, Kolozsvár, Románia, 2024. 208-228.
<https://con-steel-resources.s3.eu-central-1.amazonaws.com/CM18-2024.pdf>
- [4] Pengő Z.: *Túraajánló karcsú kalandvagyóknak: felújították a sebesvári várat*. Maszol.ro portál
<https://maszol.ro/belfold/Turaajanlo-karcsu-kalandvagyoknak-felujitottak-a-sebesvari-varat?>
(letöltve: 2024. november 15.).