

Facsapos kapcsolatok kísérleti vizsgálata

Experimental Study of Connections with Hardwood Studs

J. HUDÁK¹, ZS. LITERÁTI², I. KOVÁCS³, L. RADNAY⁴

¹Debreceni Egyetem, jhudak1991@gmail.com

²Debreceni Egyetem, zsoltliterati@gmail.com

³Debreceni Egyetem, dr.kovacs.imre@gmail.com

⁴Debreceni Egyetem, radnaylaszlo@gmail.com

Absztrakt: Faszervezetek tervezésében szemléletváltás szükséges. Kis keresztmetszetű fűrészáruból összeállított rácsos tartószerkezetek alkalmasak nagy fesztávok áthidalására. Az így előregyártott tartószerkezeti elemek felhasználása csökkenti a helyszíni munkát, és gazdaságossá teszi a faszervezetek alkalmazását. A rácsrudak kapcsolata keményfacsap alkalmazásával, az acél szerkezeti elemek teljes kiiktatásával is kialakítható, így a szerkezet agresszív környezetben is alkalmazhatóvá válik. Jelen kutatás témája a facsapos kapcsolat. Kísérleteinkben facsapok, és egyes facsapos kapcsolatok teherbírását vizsgáltuk. A kísérletek eredményeit összevetettük a gyakorlatban elterjedt méretezési eljárásokkal.

Abstract: Attitude change is needed in design of timber structures. Truss girder made of timber elements with small cross sections can be used on large spans. Constructing structures with the use of these prefabricated trusses reduces the need of in-site work, and makes the use of timber structures economic. Rods of truss can be connected with the use of hardwood stud. On this way all steel components can be eliminated from the truss, so it can be used in aggressive environment as well. Dowel type connection, with hard wood stud is the subject of the present research. Hardwood studs were investigated individually and also as the part of separated connections of the truss girder.

Bevezetés

A facsapos rácsos tartókat több évtizede alkalmazzák Magyarországon, azonban a szerkezetek méretezési eljárása nem tisztázott, a kivitelezett szerkezetekért a gyártó vállal garanciát. Kutatásunk és ezen dolgozat célja, hogy számítási modellt alkossunk a keményfa-csapos kapcsolatok méretezésére.

A számítási modellek eredményeit a kísérleti eredményekkel összevetve képet kaptunk a kapcsolatok tényleges teherbírásáról, a kapcsolatok viselkedéséről, valamint a tönkremenetelekről. A csap fölötti feszültségek rostirányra merőleges eloszlását, a hasadás jellegű tönkremenetel kialakulása miatt, végeelem módszerrel is modelleztük.

1. Facsapos technológia rövid bemutatása

A technológia fejlődésével a faanyagú tartószerkezetek alkalmazása egyre több területen válik lehetségessé. A hagyományos ács jellegű szerkezeteket felváltották a síkbeli tartókból felépülő mérnöki jellegű faszerkezetek. Ezek legtöbb esetben rétegelt ragasztott tartók vagy rácsos tartók. A kis keresztmetszetű fűrészáruból összeállított rácsos tartószerkezetek alkalmasak nagy fesztávok áthidalására.

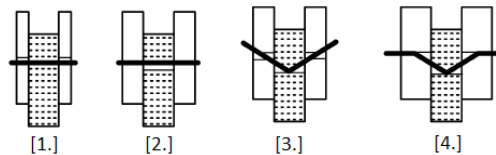
Síkbeli, faanyagú rácsos tartók kialakításának alternatív módszere a keményfa-csapos szerkezetek építése. Ilyen szerkezetekben, a csomópontokban a rácsrudak kapcsolatát keményfa csapok biztosítják, esztétikus, homogén szerkezetet képezve. Az acél kötőelemek teljes kiiktatásával a szerkezet agresszív környezetben is alkalmazhatóvá válik, emellett tűzvédelmi szempontból is kedvezőbb. Az alapanyag C20 szilárdsági osztályú (az MSZ EN 14081-1:2005+A1:2011 szerint), felületkezelt, fenyő fűrészáru. A tartószerkezet legfontosabb eleme a keményfa-csap, melynek átmérője 30 mm és jellemzően akácfából készül, esztergálással.

2. Méretezési eljárások

A csapos kapcsolatok kialakítása fém csapok alkalmazásával széles körben elterjedt ugyan, de nem található specifikusan keményfa csapos kapcsolatokkal foglalkozó szakirodalom. Az MSZ-EN a csap típusú kapcsolatokat a Johansen által kidolgozott módszerrel vizsgálja.

2.1. A Magyar Szabvány – Johansen-egyenletek

Az MSZ EN 1995-1-1:2010 (Eurocode 5) Szabvány 8. Fejezete tárgyalja az acél kapcsolóelemes kapcsolatokat. A méretezési eljárás alapját a K. W. Johansen [2] által leírt vizsgálat képezi. A Szabvány által előírt geometriára vonatkozó szerkesztési szabályok betartásával egy kapcsolat teherbírása függ a kapcsolóelem képlékeny nyomatéki teherbírásától, beágyazási szilárdságától és a kihúzóási szilárdságtól. A Szabvány a 8.2.2-es szakaszban ismerteti a fa-fa, illetve falemez-fa kapcsolatokra vonatkozó tönkremeneteleket, és az ezekhez tartozó teherbírások meghatározását. Ezek alapján az egyszer nyírt kapcsolatokra hat, a kétszer nyírt kapcsolóelemes kapcsolatokra négy tönkremeneteli módot definiál. Az egyes tönkremeneteli módoknak megfelelő teherbírások karakterisztikus értéke meghatározható, ezek minimuma adja a kapcsolat teherbírását. Kutatómunkánk keretén belül kétszer nyírt kapcsolatokat vizsgáltunk, melyekhez tartozó tönkremeneteleket az 1. ábra szemlélteti:



- (1.) palástnyomási tönkremenetel a szélső elemekben;
 (2.) palástnyomási tönkremenetel a közbenső elemben;
 (3.) kapcsolóelem hajlítási tönkremenetele, 2 képlékeny csukló kialakulása;
 (4.) kapcsolóelem hajlítási tönkremenetele, 4 képlékeny csukló kialakulása

1. ábra: Két nyírt síkú kapcsolóelemes kapcsolatok tönkremeneteli módjai [1]

Tekintettel arra, hogy esetünkben nem teljesülnek a szerkesztési szabályok (csaptengely-elemvég távolság), ezért a Johansen-egyenletek alkalmazásán túl további vizsgálatok szükségesek. Húzókísérleteink során előforduló tönkremenetelek közül a felhasadás jelensége nem szerepel a Johansen-féle tönkremenetelek között. A jelenséget több szakirodalom is tárgyalja. Az ilyen felhasadás jellegű, rideg tönkremenetelt acél csapok esetén is érdemes vizsgálni! André Jorissen [3] egyike azon kutatóknak, aki törésmechanikai összefüggéseket alkalmazva, számítási modellt állított fel az ilyen jellegű tönkremenetelek leírásához.

2.2. Jorissen törésmélet

André Jorissen kísérletei bizonyították, hogy a maximális teherbírás elérésekor a csap közvetlen közelében két repedés alakul ki rostirányban, melyek a nyírófeszültségek és rostirányra merőleges húzófeszültségek miatt hirtelen végigfutnak az elem végkeresztmetszetéig. Törésmechanika egyenleteit alkalmazva meghatározta, hogy mekkora tehernél alakul ki a repedés, ami a tönkremenetelt jelenti.

3. Kutatómunka bemutatása

A számítási modellek megalkotásához, a jellemző tönkremeneteli módok megismeréséhez kísérleti programot dolgoztunk ki. Kísérleteink célja a megvalósult szerkezetek elemeinek, kapcsolatainak modellezése, majd ezek tényleges teherbírásának meghatározása.

Vizsgálatainkat a Debreceni Egyetem, Építőmérnöki Tanszékének Anyag-, és szerkezetvizsgáló laboratóriumában végeztük.

Faanyagról lévén szó, az anyag fizikai, mechanikai tulajdonságai még azonos fafajon belül is igen tág határok között változnak, ebből adódóan az eredmények nagy szórást mutatnak, aminek következtében az 5%-os küszöbhez tartozó értékek messze esnek az átlagértékektől.

A csomópontok teherbírását alapvetően meghatározza a csapok teherbírása, így ezeket elkülönítetten is vizsgáltuk. Kétféle vizsgálatnak vetettük alá a csapokat: hajlítás és nyírás.

3.1. Csapok hajlító vizsgálata

A csapok hajlító kísérlete harmadpontos terheléssel történt, így a csap középső részén egy tisztán hajlított szakaszt létrehozva. A csapok hajlítószilárdságának ismeretére a Johansen egyenletekben is szükség van.

A hajlító vizsgálatok során megfigyeltük, hogy a mért törőteher értékek átlagosan 6 kN és 8 kN körüli értékek körül változnak, jellemzően vagy az egyik értékhez közel, vagy a másikhoz.

A különböző szilárdságú csapok színben eltértek egymástól, a kisebb szilárdságú csapok a szíjácsból származtak, míg a nagyobb szilárdságú csapok a gesztből készültek. Az élő fa növekedése során a belül elhelyezkedő évgűrűk szöveteit fokozatosan kikapcsolja az életműködésből. Ezekbe a szövetekbe tartósító anyagok, lignin, fagumi, csersav, festékanyag, ásványi sók épülnek be, és kizárólag mechanikai, tartó funkciójuk marad meg, így jön létre a geszt. A kisebb teherbírású, szíjácsból származó, sárgásabb színű csapokat kivettük a mintából. Ezt megtehetjük, hiszen a későbbiekben tervezői utasításba adható, hogy ezeket a jól elkülöníthető csapokat ne alkalmazzák.

3.2. Csapok nyírási vizsgálata

A nyíróvizsgálat két tisztán nyírt keresztmetszet létrehozására törekedtünk. A kísérletek során nem voltak teljesen egységesek a tönkremeneteli módok. Ennek oka, hogy nem minden esetben sikerült tisztán nyírt keresztmetszetet előállítani. A terhelőelem és a próbatest deformációja miatt nyomaték lépett fel a csapban, a terhelt keresztmetszetek környezetében. Illetve a csap anyagának rosttal párhuzamos nyírószilárdsága kisebb a rostra merőleges nyírószilárdságánál. Ezért több esetben nem a terhelés síkjában nyíródott el a próbatest, hanem rostokkal párhuzamos nyírásra ment tönkre.

3.3. Első húzókísérlet-sorozat

Vizsgálataink során a kapcsolatok ragasztás nélkül lettek kialakítva. A terhelés elmozdulás-vezérelt módon történt, 0,5 mm/min sebességgel, így megfigyelhető volt a kapcsolat tönkremenetele utáni viselkedés is. Az erő iránya minden esetben megegyezett a rostiránnyal. Az első kísérletsorozat célja volt, hogy képet kapjunk a kapcsolatok terhelés alatti viselkedéseiről, lehetséges tönkremeneteli módjairól. Az első kísérletsorozatban 10 db. különböző geometriai tulajdonságokkal rendelkező, egy csapos próbatest szerepelt. Változó volt a csap tengelyének az elemvégtől mért távolsága, valamint a duplázott elemek vastagsága (2,5 vagy 5 cm). A kísérletsorozat eredményei a fa anyagjellemzőinek jellemző szórása miatt csak tájékoztató jellegűek. Növelve a csaptengely-elemvég távolságot, a tönkremenetel módja egyre inkább átment az alapanyag oldaláról a csap tönkremenetele felé, ezzel együtt a kapcsolat teherbírása is nőtt. A csap tönkremenetele magasabb teherszinten, nagyobb elemvég-távolság esetén áll elő.

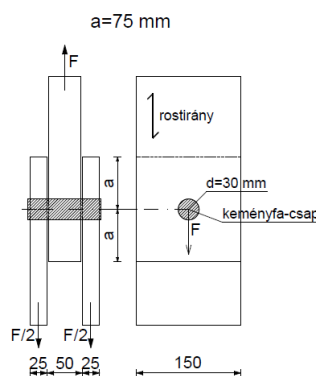
Elmondható, hogy a csaptengely-elemvég távolság növelésével, kevésbé viselkedik ridegen a kapcsolat, a legvégső tönkremenetelt nagy képlékeny alakváltozások előzik meg. Ez a képlékenyebb viselkedés a csap alakváltozási képességének és az alapanyagba való beágyazódásnak köszönhető. A

tönkrementeli módok részletesebb elemzésére a későbbi kísérletsorozatok elvégzése után került sor, mivel ilyen kevés elemszámból nem lehet megalapozott következtetéseket levonni.

Az itt kialakított kapcsolatok némelyike, nem gazdaságos. Ennek a kísérletsorozatnak az eredményei csupán iránymutatásként szolgáltak, a további kísérleteink elvégzéséhez.

3.4. Második húzókísérlet-sorozat

A második kísérletsorozatban 15 db egyforma, egy csapos próbatest készült. A csap tengelyének és az elem végkeresztmetszetének a távolsága 75 mm volt. 2,5 cm vastag duplázott elemeket alkalmaztunk (2. ábra). Az „a” méret 75 mm, mivel a legtöbb megvalósult szerkezetben ez a méret a jellemző. A 15 cm széles pallók és deszkák kapcsolataiként ez alakítható ki gazdaságosan.



2. ábra Második kísérletsorozat próbatesteinek vázlata

A tönkrementeli módok változóak voltak, 9 esetben elnyíródás, 6 esetben felhasadás jelentette a kapcsolat teherbírásának kimerülését.

A felhasadás jelenségét kis alakváltozások előzik meg, és kisebb teherszinten is fellép. Tartószerkezeti szempontból ez a rideg tönkrementel kedvezőtlen. A faanyag nem homogén szerkezete, anyagai sajátosságai, illetve az esetleges fahibák miatt a törőerők nagymértékben változtak, nagy volt az eredmények szórása.

A faanyag viselkedését nem csupán a rostirány, hanem az évgyűrűk iránya is befolyásolja, és meghatározza a tönkrementelt. Esetünkben ez azt jelenti, hogy az évgyűrűk iránya minél inkább közelít az elem szélességével párhuzamos irányhoz, annál nagyobb a felhasadás valószínűsége. Ezt a faanyag adott irányt jellemző húzószilárdsági értékei is alátámasztja: a lucfenyő sugárirányra merőleges húzószilárdsága (5,92 N/mm²) tizede a sugáriránnyal párhuzamos húzószilárdságnak (63,52 N/mm²). [7]

3.5. Harmadik húzókísérlet-sorozat

A harmadik húzókísérlet-sorozatban annyiban változtak a geometriai feltételek, hogy a csaptengelyelemvég távolságot 75 mm-ről 100 mm-re növeltük. Célunk az volt, hogy megfigyeljük a tönkrementeli módok változását, illetve hogy a felhasadás jelensége nagyobb elemvég távolság esetén

is megjelenik-e. Jorissen vizsgálatai szerint a hasadást előidéző lokális repedések mindig megjelennek, az elemvég távolságtól függetlenül. A törőerők átlagértéke 9%-al nőtt a nagyobb elemvég-távolságnak köszönhetően. A nagyobb elemvég-távolság ellenére a felhasadás jellegű tönkremenetel itt is több alkalommal előfordult, ám az előző, 75 mm-es sorozathoz képest nagyobb teherszinten. Azonban 5 esetben a csap tönkremenetele is bekövetkezett.

4. Számítási modellek

Az egyes tönkremeneteli módokhoz acél csapok esetére kidolgozott képletek levezetését, fizikai tartalmát elemezve megvizsgáltuk, milyen módosítások szükségesek ahhoz, hogy pontosabban leírjuk a facsapos kapcsolat tönkremenetelét.

4.1. Palástnyomási tönkremenetel

Az első két Johansen-egyenlet az alapanyag tönkremenetelét vizsgálja a kapcsolóelem benyomódásának hatására. Kísérleteink során nem következett be ilyen jellegű tönkremenetel, azonban kizárni nem lehet, más geometriai kialakításnál megjelenhet mértékadó tönkremenetelként.

A tönkremenetelt az MSZ EN 1995-1-1:2010 8.2.2. szakasza tárgyalja.

A kapcsolóelem sűrűsége kb. másfélszerese az alapanyagénak [7], tehát feltételezzük, hogy a tönkremenetel hasonlóképpen az acélcsapos kapcsolat tönkremeneteléhez, az alapanyagban következik be, így a képletek módosítására nincs szükség.

4.2. Kapcsolóelem tönkremenetele

Az MSZ EN 1995-1-1:2010 (Eurocode 5) szabvány, két nyírt síkú, fém típusú kapcsolóelemek esetére két tönkremeneteli módra ad ellenőrzési lehetőséget, mindkét esetben feltételezi, hogy a csap teherbírása hajlítás hatására merül ki. A kapcsolat teherbírása két részből tevődik össze: a kapcsolóelem nyomatóki teherbírása, valamint az alakváltozott csapban működő húzóerő terhelőerő-irányú komponense. A mi esetünkben az utóbbit nem vesszük számításba.

Három összekapcsolt elemnél a terhek megoszlásától függően kettő, vagy négy helyen alakulhatnak ki képlékeny csuklók a kapcsolóelemekben. Mivel fa kapcsolóelemet vizsgálunk, így nem járhatunk el teljes mértékben a szabvány szerint. A keményfa csapok hajlító-, illetve nyírószilárdságait rugalmas feszültségeloszlást feltételezve határoztuk meg. Ennek megfelelően a kapcsolatok vizsgálatánál a kapcsolóelemet rugalmasan vizsgáljuk. Tehát abban a pontban, ahol a csapban a normálfeszültség eléri az anyagra jellemző szilárdságot, a kapcsolóelem tönkre megy, nem számolunk a keresztmetszet képlékeny többlet teherbírásával.

A szabványban tárgyalt méretezési eljárások nem térnek ki a kapcsolóelem elnyíródásának vizsgálatára, az alapanyag tönkremenetele, valamint a csap nyomatóki teherbírásának kimerülése hamarabb következik be. Méréseink bizonyították, hogy a mi esetünkben célszerű a szóban forgó tönkremenetel vizsgálata. Két oldalról közelítjük meg az említett méretezési kérdéseket:

- *Kapcsolat ellenőrzése a kapcsolóelem nyomatóki teherbírása alapján:* Ez a módszer megfelel a szabványban ismertett méretezési eljárásnak. Az alapanyag beágyazódási szilárdságának és a csap hajlítószilárdságának ismeretében a teherbírás meghatározható. A két ismeretlenes egyenletrendszer megoldásával megkapjuk a beágyazódási hosszat, és az ezen a hosszon beágyazódott csapfelületen működhető legnagyobb feszültség (beágyazódási szilárdság) eredőjét (kapcsolat teljes teherbírásának fele).
- *Kapcsolat ellenőrzése a kapcsolóelem nyírási teherbírása alapján:* A kapcsolóelemben a legnagyobb nyíróerő (és ezzel együtt a legnagyobb nyírófeszültség) a két összekapcsolt elem találkozási alatti keresztmetszetben van, és ez megegyezik az egy rúdelemre átadható erő nagyságával (tehát a teljes kapcsolat teherbírásának felével). A kapcsolóelem nyírószilárdságának ismeretében a kapcsolat teherbírása meghatározható

4.3. Felhasadás jellegű tönkremenetel

Rugalmasságtani feladatoknál, valamint a gyakorlati tervezés számos esetében alkalmazhatjuk a Saint-Venant elvet: A test azon pontjainak, amelyek kellő távolságra helyezkednek el a testre ható erők támadáspontjának környezetétől, a feszültségei és alakváltozásai ugyanolyanok lesznek, mint bármely más terhelés hatására, ha a terhek statikailag egyenértékűek és a test ugyanazon részén hatnak. Tehát a rugalmasságtanban az erőbevetések helyénél, lyukgyengítésekénél, repedésekénél jelenlévő feszültségek bonyolult leírásával nem foglalkozunk. A „kellő” távolság, amelyen kívül érvényes a Saint-Venant elv, az elem nagyobbik keresztmetszeti méretével egyenlő.[8]

Vannak esetek, amikor a lokális hatások figyelembe vétele nem hanyagolható el. Különösen rideg anyagok esetén fontos a vizsgálatuk. Kísérleteink során tapasztaltuk, hogy a próbatestek tönkremeneteleinek többsége hirtelen, rideg módon következett be, és közvetlenül az erőátadás helyének környezetéből indul ki. Korábban többen is foglalkoztak azzal a kérdéssel, hogy a fa kapcsolatoknál elegendő-e a Johansen-féle tönkremeneteli módok vizsgálata. Szakirodalmi eredmények, valamint jelen dolgozatban tárgyalt kísérleteink azt támasztják alá, hogy a kapcsolatok méretezésénél vannak esetek, amikor vizsgálni kell a zavart zónákba eső tartományokat, nem hanyagolhatóak el a lokális hatások. Ezen jelenségek vizsgálata a törésmechanika tárgya.

Jorissen vizsgálta a csap típusú kapcsolatokat, és törésmechanikai módszerekkel is igyekezett leírni a tönkremeneteleket.

4.4. Nyírás jellegű tönkremenetel

Az anyagi kapcsolat két síkon szűnik meg, és a csap feletti keresztmetszet kiszakad. Az alapanyag nyírási tönkremenetelére történő tervezés a következő módon történhet: A faanyag rostirányú nyírószilárdságát szorozva a nyírt keresztmetszeti felülettel, számítható a határerő.

75 mm-es csaptengely-elemvég távolságnál a mérési eredményekből származó maximális húzóerő és a számítással meghatározott teherbírás között a különbség kicsi, 2,69%. Nagyobb takarás esetén azonban a modell a biztonság kárára téved. A csap feletti anyag összenyomódása miatt a csap környezetében nyírófeszültségi csúcs, és helyi tönkremenetel alakul ki. Ennek a feltételezésnek a bizonyítása további vizsgálatokat igényel.

5. Összegzés, ellenőrzési javaslat, célkitűzések

Kísérleteink átfogó képet adnak a keményfa-csapos kapcsolat terhelés alatti viselkedéséről, teherbírásáról, változó geometriai feltételek esetén. A szerkesztési szabályok be nem tartása, és a faanyagú kapcsolóelem miatt, a fém csapos kapcsolatokra vonatkozó méretezési eljárások nem alkalmazhatóak.

A kis elemvég-távolság és a kötőelem anyaga miatt olyan tönkremeneteli módok jelentek meg, amelyeket a Szabvány nem tárgyal: kapcsolóelem nyírási tönkremenetele, alapanyag felhasadás jellegű tönkremenetele, alapanyag nyírás jellegű tönkremenetele.

Nagyobb elemvég távolság esetén átlagosan nő a kapcsolat teherbírása. Emellett megnő az esélye a csap hajlítási és nyírási tönkremenetelének, de az alapanyag felhasadási és nyírási tönkremeneteleit nagyobb csaptengely-elemvég távolság esetén sem lehet kizárni.

Az eddigi vizsgálatok alapján részben saját, részben más kutatók által felállított modellekkel közelíthetjük a kapcsolatok teherbírását.

Ahhoz, hogy az eljárások alkalmazhatóak legyenek, további kísérletekre és vizsgálatokra van szükség, különös tekintettel a rideg, felhasadás jellegű tönkremenetekre vonatkozóan.

6. Köszönetnyilvánítás

Köszönetet szeretnénk nyilvánítani Dr. Kovács Imre tanszékvezetőnek, főiskolai tanárnak, valamint Dr. Radnay László főiskolai docensnek, hogy kiemelkedő szaktudásukkal és segítőkészségükkel hozzájárultak dolgozatunk elkészüléséhez. Nekik köszönhetően a közös munka során sok új, hasznos ismeretre tettünk szert.

A kísérletekhez szükséges próbatestekért és terhelőelemekért köszönetet mondunk az "ÉP-FARM" Építőipari, Mezőgazdasági, Kulturális és Szolgáltató Betéti Társaság, kiemelve Szabó Zoltán ügyvezető igazgató és Bacskai Attila mérnök urakat.

Vizsgálatainkat a Debreceni Egyetem, Építőmérnöki Tanszékének Anyag-, és szerkezetvizsgáló laboratóriumában végeztük.

Hivatkozások

- [1] MSZ - EN - 1995-1-1:2010 - Eurocode 5: Faszervezetek tervezése
- [2] Johansen, K. W., Theory of timber connections. International Association of Bridge and Structural Engineering, Publication, Copenhagen, 1949. I.S. Jacobs and C.P. Bean, "Fine particles, thin films and exchange anisotropy," in Magnetism, vol. III, G.T. Rado and H. Suhl, Eds. New York: Academic, 1963, pp. 271-350.
- [3] Jorissen, A., Double shear timber connections with dowel type fasteners. Ph.D-thesis; Delft University Press, Delft, The Netherlands, 1998.

- [4] www.epfarmbt.hu
- [5] www.facsapostetok.hu
- [6] Wittmann Gy., Mérnöki faszerkezetek I., Mezőgazdasági Szaktudás Kiadó, 2000.
- [7] Wittmann Gy., Mérnöki faszerkezetek II., Mezőgazdasági Szaktudás Kiadó, 2001.
- [8] R. C. Hibbeler. Mechanics of Materials (8th Edition), Prentice Hall, 2010.