



AXISVM

CLT (X-LAM) KÉZIKÖNYV ÉS HASZNÁLATI ÚTMUTATÓ

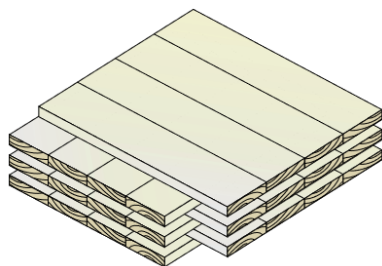
Készítette: Inter-CAD Kft.

Tartalomjegyzék

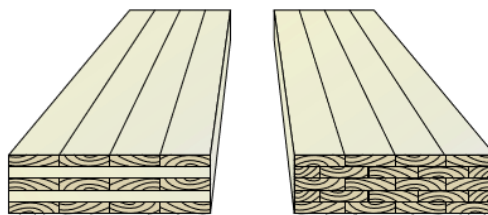
| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 1. CLT Panelek Szerkezeti Leírása | 4 |
| 2. CLT Panelek Mechanikai Leírása | 6 |
| 2.1. Anyag Fizikai Egyenletei | 6 |
| 2.2. Rugalmas Anyagi Paraméterek Kapcsolata | 8 |
| 2.3. Elem Fizikai Egyenletei | 9 |
| 2.3.1. Mindlin Héjelmélet Rétegelt Szerkezetekhez | 11 |
| 2.3.2. Nyírási korrekció | 11 |
| 3. CLT Panelek Méretezése | 13 |
| 3.1. Teheridőtartam osztályok | 13 |
| 3.2. Felhasználási osztályok | 13 |
| 3.3. A merevség és a szilárdság karakterisztikus értékét módosító tényezők | 13 |
| 3.4. A faanyag merevségi jellemzőinek tervezési értéke | 16 |
| 3.5. A faanyag szilárdsági jellemzőinek karakterisztikus értéke | 16 |
| 3.6. A faanyag szilárdsági jellemzőinek tervezési értéke | 17 |
| 3.7. Teherbírési határállapotok | 17 |
| 3.8. Méretezés AXISVM használatával | 21 |
| 3.8.1. Adatmegadás | 21 |
| 3.8.2. Eredmények | 22 |
| 3.8.3. Tippek és Trükkök | 24 |
| 3.9. Verifikációs Példa 1 | 25 |
| 3.10. Verifikációs Példa 2 | 28 |

1. CLT Panelek Szerkezeti Leírása

Többrétegű keresztirányú ragasztott tömörfa (CLT vagy másnéven XLAM) : Legalább három, egymásra jellemzően merőleges, szerkezeti fa rétegek egy-máshoz ragasztásával kialakított lemeztermék. [1]



(a) CLT szerkezeti felépítése [1]



(b) CLT (balra) ill. glulam (jobbra) [1]

1. ábra. Ragasztott tömörfa szerkezeti panelek felépítése

CLT szerkezeti panelek gyártásának főbb lépései:

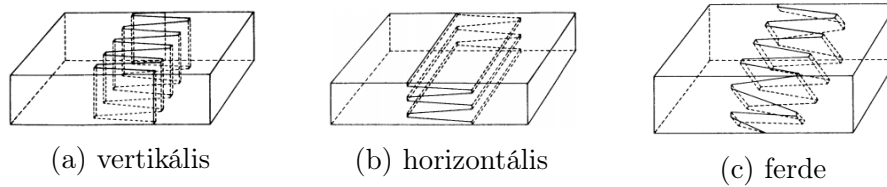
- kitermelés, rönkök felfűrészélése, osztályozás, hibakiejtés, stb.
- pallók vágása, szárítása
- síkrétegek pallókból történő kialakítása
- panelek kialakítása a síkrétegek egymáshoz ragasztásával és összepréselésével
- minőségellenőrzés, utómunkálatok, csomagolás, szállítás, stb.

Az CLT panelekben felhasznált anyagok:

- Az CLT termékekben felhasznált faanyag jellemzően légszáraz állapotúra szárított C24 szilárdsági osztályú fenyő, alkalmanként alacsonyabb szilárdsági osztályba tartozó fenyőfajta (általában C16) vagy más alacsonyabb kategóriájú fűrészárú (pl. nyár) kombinálásával. A felhasznált anyagminőség függvényében a termék átlagsűrűsége $12 \pm 3\%$ -os nedves-ségtartalom mellett* körülbelül $470-590 \text{ kg/m}^3$ -re tehető.
- A termékek hozzávetőlegesen 0.6% -át a rétegek egymáshoz ragasztásánál használt, jellemzően melamin-urea-formaldehid (MUF), egykomponensű poliuretán (PUR), fenol-rezocinol-formaldehid (PRF) vagy emulziós polimer-izocianát (EPI) kötőanyag adja [2].

*[1]-ben foglaltak szerint, egyes források $12 \pm 2\%$ -ot említenek

Gyártótól függően a legfelső réteg száliránya a panel fő teherbírési irányával párhuzamos vagy arra merőleges is lehet, a rétegeket alkotó pallók éleik mentén lehetnek részlegesen vagy teljesen ragasztottak. A pallók hosszirányú toldását általában ékcsapos toldással (lásd 2. ábra) oldják meg.



2. ábra. Példák ékcsapos toldás kialakítására [3]

2. CLT Panelek Mechanikai Leírása

2.1. Anyag Fizikai Egyenletei

Az elemi merevség tárgyalásához ebben a fejezetben ismertetjük a vonatkozó anyagegyenleteket, melyek részletesebb áttekintéséhez Robert M. Jones "Mechanics of Composite Materials" című könyvét [4] javasoljuk.

A továbbiakban a feszültségkomponensek jelölésére a Voight-féle indexes jelölést használjuk, tehát a σ_{ij} kifejezés jelentése normálfeszültség ha $i = j$, nyírófeszültség ha $i \neq j$:

$$(\sigma_{xx} \ \sigma_{yy} \ \sigma_{zz} \ \sigma_{yz} \ \sigma_{xz} \ \sigma_{xy}) = (\sigma_x \ \sigma_y \ \sigma_z \ \tau_{yz} \ \tau_{xz} \ \tau_{xy}). \quad (1)$$

A mérnöki alakváltozások jelölése ugyanezzel a koncepcióval:

$$(\varepsilon_{xx} \ \varepsilon_{yy} \ \varepsilon_{zz} \ \varepsilon_{yz} \ \varepsilon_{xz} \ \varepsilon_{xy}) = (\varepsilon_x \ \varepsilon_y \ \varepsilon_z \ \gamma_{yz} \ \gamma_{xz} \ \gamma_{xy}). \quad (2)$$

Amennyiben a kezdeti konfiguráció feszültségmentes, a feszültségek és az alakváltozások kapcsolatát a következő közelítő, lineáris összefüggéssel modellezhetjük (Hooke-modell):

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{C}\boldsymbol{\varepsilon}, \quad (3)$$

ahol

$$\boldsymbol{\sigma} = (\sigma_{xx} \ \sigma_{yy} \ \sigma_{zz} \ \sigma_{yz} \ \sigma_{xz} \ \sigma_{xy})^T \quad (4)$$

a feszültségkomponenseket tartalmazó vektor,

$$\boldsymbol{\varepsilon} = (\varepsilon_{xx} \ \varepsilon_{yy} \ \varepsilon_{zz} \ \varepsilon_{yz} \ \varepsilon_{xz} \ \varepsilon_{xy})^T \quad (5)$$

az alakváltozáskomponenseket tartalmazó vektor, \mathbf{C} pedig a rugalmas anyagi paramétereket tartalmazó mátrix (rugalmassági mátrix):

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{41} & C_{42} & C_{43} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{51} & C_{52} & C_{53} & C_{54} & C_{55} & C_{56} \\ C_{61} & C_{62} & C_{63} & C_{64} & C_{65} & C_{66} \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Amennyiben a (3) alatti összefüggés invertálható

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{S}\boldsymbol{\sigma}, \quad \mathbf{S} = \mathbf{C}^{-1} \quad (7)$$

ahol \mathbf{S} a hajlékonysági mátrix.

A fa jó közelítéssel ortotrópnak tekinthető, így célszerű az anyagegyenletek egy a fa anatómiai felépítéséhez illeszkedő koordináta-rendszerben (anyag koordináta rendszer) történő felírása. Jelölje x_1 , x_2 és x_3 a rostirányú, sugárirányú és húrirányú koordináta tengelyeket ebben a sorrendben. Ha az \mathbf{S} hajlékonysági mátrixot ebben a rendszerben írjuk fel, (3) és (7) a következőképpen írható:

$$\boldsymbol{\sigma}^* = \mathbf{C}^* \boldsymbol{\varepsilon}^*, \quad (8)$$

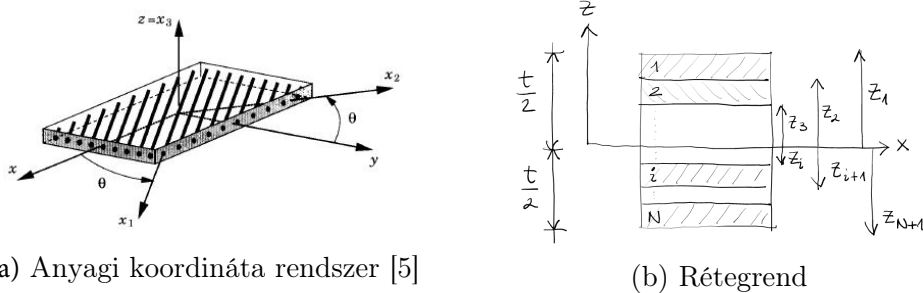
$$\boldsymbol{\varepsilon}^* = \mathbf{S}^* \boldsymbol{\sigma}^*, \quad \mathbf{S}^* = \mathbf{C}^{*-1}, \quad (9)$$

a feszültség és alakváltozás komponensek anyagi koordináta-rendszerben történő felírásával:

$$\boldsymbol{\sigma}^* = (\sigma_{11} \quad \sigma_{22} \quad \sigma_{33} \quad \sigma_{23} \quad \sigma_{13} \quad \sigma_{12})^T \quad (10)$$

és

$$\boldsymbol{\varepsilon}^* = (\varepsilon_{11} \quad \varepsilon_{22} \quad \varepsilon_{33} \quad \varepsilon_{23} \quad \varepsilon_{13} \quad \varepsilon_{12})^T. \quad (11)$$



3. ábra. CLT panel felépítése

Ebben az esetben az \mathbf{S}^* hajlékonysági mátrix a következő 9 paraméterrel karakterizálható:

$$E_1 E_2, E_3, G_{23}, G_{13}, G_{12}, \nu_{23}, \nu_{13}, \nu_{12}. \quad (12)$$

Koordináta Transzformáció

A teljes panel elemi merevségét egy a panelhez kijelölt ún. globális koordináta-rendszerben írjuk fel, ami síkhéjak esetén egy a síkra merőleges tengely körüli θ szöggel történő elfordulással kapható meg (3a. ábra). Szükséges tehát a feszültség és alakváltozás komponensek e két rendszer közötti transzformációjának tárgyalása.

A feszültségek transzformációját a következő kifejezés adja:

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{T}\boldsymbol{\sigma}^*, \quad (13)$$

ahol

\mathbf{T} transzformációs mátrix.

Az általunk használt mérnöki alakváltozások transzformációja a (13)-ben szereplő \mathbf{T} transzformációs mátrix és az ún. Reuter-féle mátrix (\mathbf{R}) használatával a következő:

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{RTR}^{-1}\boldsymbol{\varepsilon}^*. \quad (14)$$

Végül (13) és (14) felhasználásával az anyagi merevségi mátrix a globális koordináta-rendszerben:

$$\mathbf{C} = \mathbf{TC}^*\mathbf{R}^{-1}\mathbf{T}^T\mathbf{R}, \quad (15)$$

ahol

\mathbf{C} egy adott réteg anyagi merevségi mátrixa a réteghez tartozó (anyagi) koordináta rendszerben;

\mathbf{C}^* ugyanazon réteg anyagi merevségi mátrixa a panelhez tartozó (globális) koordináta rendszerben.

2.2. Rugalmas Anyagi Paraméterek Kapcsolata

A 2.1-es fejezetben taglaltak szerint az anyagi merevségi mátrix felépítéséhez 9 paraméter szükséges. Mivel az egyes CLT gyártók brossúráiban ennél általában kevesebb található, a programban kihasználjuk a puhafák merevségi paramétereit között megfigyelt törvényszerűségeket, melyeket publikált laboratóriumi mérések statisztikai elemzésével állapítottunk meg Hearmon [6], Bodig és Goodman [7], Askenazi [8] és más kutatók munkái alapján [9] [10].

2.3. Elem Fizikai Egyenletei

A legtöbb gyakorlatban alkalmazott mechanikai és méretezési modell a faméretezés berkeiben megszokott módon gerendaelméleti alapokon nyugszik. Ezek közül a legnépszerűbbek [11, 12, 13]:

- γ -módszer (mechanically jointed beam theory)
A Möhler által kidolgozott analitikus megoldás [14] az egyes rétegeket különálló elemekként kezeli, melyek a nyírási deformációban való szerepvállalását a rétegekhez rendelt γ tényezők szabályozzák ($\gamma = 1$ teljesen összedolgozó, $\gamma = 0$ egyáltalán nem összedolgozó rétegek esetén). A megoldás csuklósan megtámasztott, szinuszosan terhelt gerendák analitikus megoldását adja, ennek ellenére a gyakorlathoz közelebbi terhelési esetektől való elhanyagolható mértékű különbségeknek, a módszer egyszerűségének, és az Eurocode 5 B mellékletében történő szerepeltetésének hála mégis elterjedt a tervezői gyakorlatban.
- Nyírási analógia (Shear analogy method)
Az elmélet Kreuzinger nevéhez fűződik [15], lényege hogy a gerendaelem teljes merevségét két részre bontva építi fel. Egy ún. virtuális gerenda reprezentálja az egyes rétegek saját súlyponti tengelyére számolt hajlítási merevségeinek összegét, egy másik pedig a rétegek hajlítómerevségeinek Steiner-tagjait, a rétegek nyírási merevségét és a rétegek közötti kapcsolatokból származó merevségnövekedést tartalmazza. Úgy is fogalmazhatunk, hogy az első gerenda a rétegek önálló, a második gerenda a rétegek együttdolgozásából származó merevségi hatásokat reprezentálja.
- Timoshenko-féle gerendamodell
A népszerű gerendaelméleti módszerek közül elméletileg legmegalapozottabbnak a Timoshenko-féle gerendaelmélet [16] inhomogén keresztmetszetre történő értelemszerű továbbgondolása jelenti, mely több szakirodalmi forrás ajánlott módszere CLT panelek méretezésére [17, 18]. A módszerben a nyírási deformáció a nyírási merevség ún. nyírási korrekciós tényezővel történő korrigálása útján vehető figyelembe. A nyírási korrekciós tényező megfelelő számítása nem triviális feladat, a korábban felsorolt módszerekhez képest viszonylag bonyolult eljárásnak számít.

Számos folyóiratcikk és egyéb tudományos publikáció foglalkozik a felsorolt módszerek összehasonlításával. Jelen dokumentáció nem kíván ítéletet mondani ezek fölött, azonban megjegyzi, hogy a gerendaelméleten alapuló eljárások

természetükénél fogva alkalmatlanok bizonyos összetett feszültségállapotok reprodukálására, köszönhetően az egytengelyű feszültségállapot szükségzerű feltételezésének. Ennél prózaibb, hogy az említett elméletek egész egyszerűen nem nyújtanak lehetőséget alapvetően tetszőleges alakú, adott esetben áttörésekkel tűzdelt két dimenziós tartományok tetszőleges peremfeltételek mellett történő modellezéséhez, így ebből a szempontból alkalmazásuk nem adekvát CLT panelek összetett térbeli szerkezetbe történő integrálásához. Az említett hiányosságok miatt elkerülhetetlen a rétegesen felépített kompozit elemek számításához minden tekintetben megfelelő, két dimenziós lemez és héjelméletek alkalmazása.

A többretegű héj elméletek alapvetően két logika szerint csoportosíthatók. Az egy ekvivalens réteget használó módszerek (Equivalent Single Layer Methods = ESLM) előnye abban rejlik, hogy a kialakított modell ismeretlennek a száma független a rétegek számától. Ezzel ellentétben a használatos módszerek másik csoportja (Layer-Wise Methods = LWM) minden réteghez hozzárendel bizonyos számú kinematikai ismeretlent a kapott feszültség és alakváltozás eloszlások pontosabb figyelembevételére érdekében.

A Raymond Mindlin által 1951-ben kidolgozott ún. elsőrendű nyírási elmélet (First-order Shear Deformation Theory = FSDT) a Timoshenko-féle gerendaelmélet síkbeli feszültségállapotra kiterjesztett verziója, szokás vastag lemezek/héjak elméletének is nevezni. Az elmélet a végeleemes gyakorlat legelterjedtebb héjelméleti modelljének számít, CLT panelek vizsgálatára történő alkalmazásának lehetőségeit Czaderski és munkatársai foglalták össze [20]. Az összehasonlító elemzés során megállapították, hogy a 3D testelemes és a Mindlin héjelmélettel történő megoldás kivételével a használt módszerek jelentős eltéréseket mutatnak az elvégzett kísérletekhez képest. A Pagano-féle egzakt megoldással [22] történő összehasonlítás során Sturzenbecher és munkatársai megállapították, hogy a Mindlin héjelmélet megfelelően közelíti CLT panelek merevségi viszonyait [21]. A kutatás során a szerzők megjegyzik, hogy noha egyes héjelméleti modellek képesek pontosabb eredmények direkt módon történő szolgáltatására, az infinitezimális egyensúlyi egyenletek indirekt módon történő alkalmazásával az elsőrendű nyírási elmélet a nyírófeszültségek megfelelő eloszlását adja.

2.3.1. Mindlin Héjelmélet Rétegelt Szerkezetekhez

Az elmélet hipotézisei szerint hajlításkor a referenciasík normálisai az alakváltozásnál egyenesek maradnak, de nem lesznek merőlegesek az alakváltozott referenciasíkra (a Kirchhoff-Love elmélettel ellentétben) és a normálisokon levő pontok távolsága nem változik. Az ennek megfelelő elmozdulásmező szerint:

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \boldsymbol{\varepsilon}_0 + z\boldsymbol{\kappa}, \quad (16)$$

ahol

- $\boldsymbol{\varepsilon}_0$ a nemzérus, referenciafelületen mért mérnöki alakváltozás komponenseket tartalmazó vektor;
- z egy anyagi pont legrövidebb távolsága a referenciafelülettől;
- $\boldsymbol{\kappa}$ a görbületeket tartalmazó vektor.

A héjelem belső erői és nyomatékai a 10. ábrán látható rétegrend jelöléseivel élve:

$$\mathbf{N} = \begin{pmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{pmatrix} = \int \boldsymbol{\sigma}^{(i)} dz = \sum_{i=1}^N \left(\int_{z_{i+1}}^{z_i} \boldsymbol{\sigma}^{(i)} dz \right) \quad (17)$$

$$\mathbf{M} = \begin{pmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{pmatrix} = \int z \boldsymbol{\sigma}^{(i)} dz = \sum_{i=1}^N \left(\int_{z_{i+1}}^{z_i} z \boldsymbol{\sigma}^{(i)} dz \right) \quad (18)$$

$$\mathbf{Q} = \begin{pmatrix} Q_x \\ Q_y \end{pmatrix} = \int \boldsymbol{\tau}^{(i)} dz = \sum_{i=1}^N \left(\int_{z_{i+1}}^{z_i} \boldsymbol{\tau}^{(i)} dz \right) \quad (19)$$

vagy kompaktabb formában

$$\begin{pmatrix} \mathbf{N} \\ \mathbf{M} \\ \mathbf{Q} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{B} & \mathbf{0} \\ \mathbf{B} & \mathbf{D} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{S} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \boldsymbol{\varepsilon}_0 \\ \boldsymbol{\kappa} \\ \boldsymbol{\gamma} \end{pmatrix}. \quad (20)$$

2.3.2. Nyírási korrekció

Az alkalmazott kinematikai modell konstans szögtorzulás, ezáltal konstans nyírófeszültség eloszlás alkalmazását teszi lehetővé. Könnyű belátni, hogy nyírással egyidejű hajlítás esetén a konstans eloszlás feltételezése nem reális, így a modell által tükrözött energia nem konzisztens. A hiba orvoslására a héj

referenciasíkját kifeszítő derékszögű koordinátaírányokban k_x és k_y korrekciós tényezőket számolunk. Az korrekciós tényezők egy tipikus CLT panel esetén körülbelül a homogén héjak esetén kapott, közismert 5/6-os érték negyedére adódnak, mely megegyezik a szakirodalomban említett értékekkel [24].

3. CLT Panelek Méretezése

3.1. Teheridőtartam osztályok

Az EC5 előírásai szerint a terheket az alábbi osztályok egyikébe kell besorolni:

| A teheridőtartam osztálya | A karakterisztikus hatás időtartamának összegzett nagyságrendje |
|---------------------------|-----------------------------------------------------------------|
| Állandó | 10 évnél hosszabb idő |
| Hosszú idejű | 6 hónap - 10 év |
| Közepes idejű | 1 hét - 6 hónap |
| Rövid idejű | 1 hétnél rövidebb |
| Pillanatnyi | |

1. táblázat. Teheridőtartam-osztályok

3.2. Felhasználási osztályok

Az EC5 előírásai szerint az egyes szerkezeti elemeket a következő felhasználási osztályok egyikébe kell besorolni:

- **1. felhasználási osztály** Jellemzője a faanyag azon nedvességtartalma, amely 20 °C-on akkor alakul ki, ha a környező levegő relatív páratartalma évenként csak néhány hétig haladja meg a 65 %-is értéket (Ekkor a fenyők átlagos egyensúlyi nedvességtartalma nem haladja meg a 12 %-ot).
- **2. felhasználási osztály** Jellemzője a faanyag azon nedvességtartalma, amely 20 °C-on akkor alakul ki, ha a környező levegő relatív páratartalma évenként csak néhány hétig haladja meg a 85 %-is értéket (Ekkor a fenyők átlagos egyensúlyi nedvességtartalma nem haladja meg a 20 %-ot).

3.3. A merevség és a szilárdság karakterisztikus értékét módosító tényezők

A teher időtartamának és a faanyag nedvességtartalmának hatása
A hatást a k_{mod} tényező veszi figyelembe, melyet a program automatikusan határoz meg a beállított teheridőtartam és felhasználási osztály szerint.

Szabványos állásfoglalás hiányában a k_{mod} értékét a 2. táblázatnak megfelelően, a [26]-ban foglaltak szerint vesszük fel.

| Felhasználási osztály | Tehertartóssági osztály | | | | |
|-----------------------|-------------------------|--------------|---------------|-------------|-------------|
| | Állandó | Hosszú idejű | Közepes idejű | Rövid idejű | Pillanatnyi |
| 1 | 0.6 | 0.7 | 0.8 | 0.9 | 1.10 |
| 2 | 0.6 | 0.7 | 0.8 | 0.9 | 1.10 |

2. táblázat. k_{mod} értékei CLT panelek esetén.

A nedvességtartalom deformációkra gyakorolt hatása A hatást a k_{def} paraméterrel, a beállított felhasználási osztály alapján vesszük figyelembe. Szabványos állásfoglalás hiányában k_{def} értékét a [26] és [27] -ben foglalt ajánlások szerint vesszük fel.

| | |
|-----|-----|
| SC1 | SC2 |
| 0.8 | 1.0 |

3. táblázat. k_{def} értékei CLT panelek esetén.

Mérethatás Természetes faanyag esetén az CLT-panelet alkotó pallók referencia próbatesttől való eltérését a karakterisztikus szilárdsági értékek k_h tényezővel történő módosításával vesszük figyelembe.

Szabványos állásfoglalás hiányában $k_h = 1.0$ értéket használunk.

Rendszerhatás A réteges felépítésnek köszönhető együttes teherviselésből származó hatást faanyagok esetében a k_{sys} szilárdságnövelő tényezővel vesszük figyelembe, a következő formula szerint (EC5):

$$k_{sys} = \min\{1.2, 1 + 0.025n\} \quad (21)$$

ahol

n a terhelt pallók számát jelöli.

A növelő tényezőt csak normál- és hajlítószilárdsági értékek esetén alkalmazzuk. (EN 1995-1-1, 6.6-os fejezet).

Repedések hatása Az EC5 előírásai szerint, a repedések megjelenésének a nyírási teherbírásra gyakorolt hatását a k_{cr} tényezővel vesszük figyelembe.

A k_{cr} tényező EC5-által javasolt értékei:

$k_{cr} = 0.67$ természetes faanyag esetén,

$k_{cr} = 0.67$ rétegelt-ragasztott faanyag esetén,

$k_{cr} = 1.0$ egyéb, az EN 13986 és EN 14374-nek megfelelő, fa alapanyagú termékek esetén.

Szakirodalmi javaslat alapján [28] a tényező használata nem indokolt, a hatást a gyártói brossúrákban közzétett adatok tartalmazzák.

Keresztmetszet alakjának hatása Gerendaelemek keresztmetszeti alakjából fakadó hatásokat a k_{shape} tényező veszi figyelembe. Mivel a szoftverben az CLT-panelet hájmodell alkalmazásával számítjuk, $k_{shape} = 1.0$ értéket használunk.

Ékcsapos kialakítás hatása Elemek ékcsapos kialakítással történő toldásakor a hajlítószilárdság csökkentését a k_{fin} -tényező veszi figyelembe, melynek értékét szakirodalmi források alapján vesszük fel [28].

Faszerkezet biztonsági tényezője Az anyagjellemzők és ellenállások γ_M parciális biztonsági tényezőjét a nemzeti mellékletekben foglalt előírások szerint vesszük fel.

Rendelkezés hiányában, szakirodalmi javaslat alapján $\gamma_M = 1.25$ értéket alkalmazunk [26].

3.4. A faanyag merevségi jellemzőinek tervezési értéke

A χ anyagi merevségi paraméter tervezési értékének EC5-szerinti meghatározási módjait a 4. táblázat foglalja össze.

| Vizsgálat típusa | SLS | ULS |
|------------------------------------|------------------------------------------|----------------------------------------------------|
| Elsőrendű, lineárisan rugalmas | $\chi = \frac{\chi_{mean}}{1 + k_{def}}$ | $\chi = \frac{\chi_{mean}}{1 + \varphi_2 k_{def}}$ |
| Másodrendű, lineárisan rugalmas | $\chi = \frac{\chi_{mean}}{\gamma_M}$ | $\chi = \frac{\chi_{mean}}{\gamma_M}$ |
| Vibration | $\chi = \chi_{mean}$ | $\chi = \chi_{mean}$ |

¹ Előszámítás hiányában $\phi_2 = 1.0$ érték alkalmazandó.

4. táblázat. Anyagi paraméterek tervezési értékeinek számítása.

A Poisson-tényezők számítása a 2.2 fejezetben foglaltak szerint történik.

3.5. A faanyag szilárdsági jellemzőinek karakterisztikus értéke

Más faanyagú termékekhez hasonlóan, a szilárdságot illetően a gyártói adatbázisok tekinthetők mérvadónak. Az EN 338 és szakirodalmi források [29, 28] szerinti tájékoztató jellegű adatokat a következő táblázat foglalja össze.

| | | |
|---------------------------------------------------------------|--------------|-----|
| Száliránnyal párhuzamos hajlítószilárdság ¹ | $f_{m,0,k}$ | 24 |
| Szálirányra merőleges hajlítószilárdság ² | $f_{m,90,k}$ | 0.5 |
| Száliránnyal párhuzamos húzószilárdság | $f_{t,0,k}$ | 14 |
| Szálirányra merőleges húzószilárdság | $f_{t,90,k}$ | 0.5 |
| Száliránnyal párhuzamos nyomószilárdság | $f_{c,0,k}$ | 21 |
| Szálirányra merőleges nyomószilárdság | $f_{c,90,k}$ | 2.5 |
| Nyírószilárdság a szálirányra merőleges síkban | $f_{v,k}$ | 2.5 |
| Nyírószilárdság a száliránnyal párhuzamos síkban ³ | $f_{r,k}$ | 1.0 |
| Csavarási nyírószilárdság | $f_{T,k}$ | 2.5 |

¹ $f_{m,k}$ az EC5 jelölései szerint.

² Nem szerepel a szabványokban.

³ Gördülési nyírás.

5. táblázat. Szilárdság karakterisztikus értékei C24-es alapanyag esetén, N/mm^2 -ben (EN 338).

3.6. A faanyag szilárdsági jellemzőinek tervezési értéke

A χ szilárdsági érték χ_d tervezési értékét a következő formulával számoljuk:

$$\chi_d = k_{mod} \frac{\chi_k}{\gamma_M} \quad (22)$$

ahol

χ_k a szilárdság karakterisztikus értéke,

γ_M az alapanyag parciális biztonsági tényezője;

k_{mod} szilárdságot módosító tényező.

Az előző fejezetekben foglaltak szerint, CLT panelek szilárdsági értékeinek tervezési értékei:

$$f_{t,0,d} = f_{t,0,k} \cdot k_{mod} \cdot k_{sys} / \gamma_M$$

$$f_{t,90,d} = f_{t,90,k} \cdot k_{mod} \cdot k_{sys} / \gamma_M$$

$$f_{c,0,d} = f_{c,0,k} \cdot k_{mod} / \gamma_M$$

$$f_{c,90,d} = f_{c,90,k} \cdot k_{mod} / \gamma_M$$

$$f_{v,d} = f_{v,k} \cdot k_{mod} / \gamma_M$$

$$f_{r,d} = f_{r,k} \cdot k_{mod} / \gamma_M$$

$$f_{m,0,d} = f_{m,0,k} \cdot k_{mod} \cdot k_{sys} \cdot k_{fin} / \gamma_M$$

$$f_{m,90,d} = f_{t,90,k} \cdot k_{mod} \cdot k_{sys} / \gamma_M$$

3.7. Teherbírási határállapotok

A számítás során az EN 1995-1-1 [30], a DIN 1052:2004-8 [31] és egyéb szakirodalmi források [32, 33, 24, 29] által javasolt határállapotokat ellenőrizzük.

Szálliránnyal párhuzamos húzás és hajlítás

$$\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} + \frac{|\sigma_{m,0,d}|}{f_{m,0,d}} \leq 1.0 \quad (23)$$

ahol

$\sigma_{t,0,d}$ a szálliránnyal párhuzamos húzófeszültség tervezési értéke,

$f_{t,0,d}$ a száliránnyal párhuzamos húzószilárdság tervezési értéke,
 $\sigma_{m,0,d}$ a száliránnyal párhuzamos hajlítófeszültség tervezési értéke,
 $f_{m,0,d}$ a száliránnyal párhuzamos hajlítószilárdság tervezési értéke.

Szálirányra merőleges húzás és hajlítás

$$\frac{\sigma_{t,90,d}}{f_{t,90,d}} + \frac{|\sigma_{m,90,d}|}{f_{m,90,d}} \leq 1.0 \quad (24)$$

ahol

$\sigma_{t,90,d}$ a szálirányra merőleges húzófeszültség tervezési értéke,
 $f_{t,90,d}$ a szálirányra merőleges húzószilárdság tervezési értéke,
 $\sigma_{m,90,d}$ a szálirányra merőleges hajlítófeszültség tervezési értéke,
 $f_{m,90,d}$ a szálirányra merőleges hajlítószilárdság tervezési értéke.

Száliránnyal párhuzamos nyomás és hajlítás

$$\left(\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}} \right)^2 + \frac{|\sigma_{m,0,d}|}{f_{m,0,d}} \leq 1.0 \quad (25)$$

ahol

$\sigma_{c,0,d}$ a száliránnyal párhuzamos nyomófeszültség tervezési értéke,
 $f_{c,0,d}$ a száliránnyal párhuzamos nyomószilárdság tervezési értéke,
 $\sigma_{m,0,d}$ a száliránnyal párhuzamos hajlítófeszültség tervezési értéke,
 $f_{m,0,d}$ a száliránnyal párhuzamos hajlítószilárdság tervezési értéke.

Szálirányra merőleges nyomás és hajlítás

$$\left(\frac{\sigma_{c,90,d}}{k_{c,90} f_{c,90,d}} \right)^2 + \frac{|\sigma_{m,90,d}|}{f_{m,90,d}} \leq 1.0 \quad (26)$$

ahol

$\sigma_{c,90,d}$ a szálirányra merőleges húzófeszültség tervezési értéke,

$f_{c,90,d}$ a szálirányra merőleges húzószilárdság tervezési értéke,

$k_{c,90}$ szilárdságnövelő tényező,

$\sigma_{m,90,d}$ a szálirányra merőleges hajlítófeszültség tervezési értéke,

$f_{m,90,d}$ a szálirányra merőleges hajlítószilárdság tervezési értéke.

Szabványos rendelkezés hiányában a $k_{c,90} = 1.0$ érték alkalmazásával a biztonság javára járunk el.

Nyírás és csavarás

$$\frac{|\tau_{T,d}|}{f_{v,d}} + \left(\frac{\tau_d}{f_{v,d}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{r,d}}{f_{r,d}}\right)^2 \leq 1.0 \quad (27)$$

ahol

$\tau_{T,d}$ a csavarásból származó feszültség tervezési értéke,

τ_d a nyírófeszültség tervezési értéke,

$\tau_{r,d}$ a gördülési nyírási feszültség tervezési értéke,

$f_{v,d}$ a nyírószilárdság tervezési értéke.

Gördülési nyírás és szálirányra merőleges húzás

$$\frac{\sigma_{t,90,d}}{f_{t,90,d}} + \frac{|\tau_{r,d}|}{f_{r,d}} \leq 1.0 \quad (28)$$

ahol

$\sigma_{t,90,d}$ a szálirányra merőleges húzófeszültség tervezési értéke,

$f_{t,90,d}$ a szálirányra merőleges húzószilárdság tervezési értéke,

$\tau_{r,d}$ a gördülési nyírási feszültség tervezési értéke,

$f_{r,d}$ a gördülési nyírási szilárdság tervezési értéke.

Gördülési nyírás és szálirányra merőleges nyomás

$$\frac{|\sigma_{c,90,d}|}{f_{c,90,d}} + \frac{|\tau_{r,d}|}{f_{r,d}} \leq 1.0 \quad (29)$$

ahol

$\sigma_{c,90,d}$ a szálirányra merőleges húzófeszültség tervezési értéke,

$f_{c,90,d}$ a szálirányra merőleges húzószilárdság tervezési értéke,

$\tau_{r,d}$ a gördülési nyírásfeszültség tervezési értéke,

$f_{r,d}$ a gördülési nyírás szilárdság tervezési értéke.

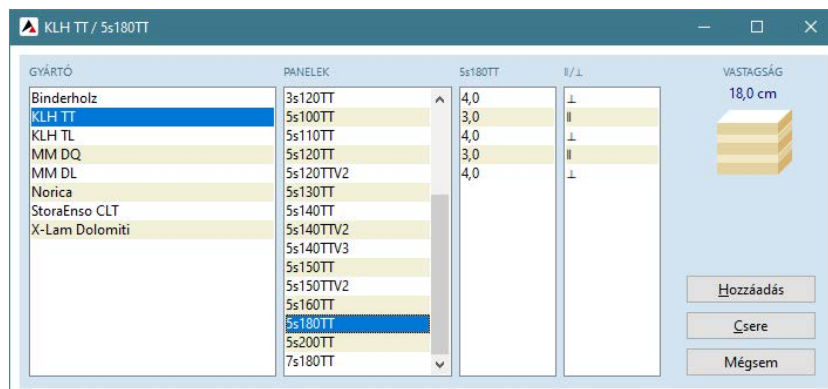
3.8. Méretezés AXISVM használatával

3.8.1. Adatmegadás

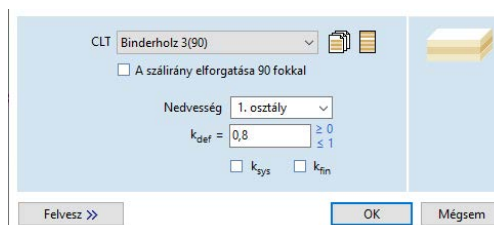
A program anyagkönyvtára tartalmaz egy dedikált 'CLT' anyag típust, előre definiált merevségi és szilárdsági paraméterekkel a 2.2 és 3.5 fejezeteknek megfelelően.

4. ábra. CLT anyag típus merevségi és szilárdsági paramétereit.

Tartományok megadásakor az aktuális kialakítás termékkatalógusból történő kiválasztás (5. ábra), vagy egyedi konfiguráció definiálásával lehetséges. Az egyes rétegek szálirányai a legfelső réteg szálirányához képesti relatív irányítottsággal állíthatók be. A konfiguráció kiválasztása mellett a felhasználó itt tudja beállítani a kívánt felhasználási osztályt, illetve szabályozhatja a k_{sys} és k_{fin} tényezők használatát, melyek alapértelmezés szerint kikapcsolt állapotban jelennek meg.



5. ábra. CLT termékkatalógus.



6. ábra. CLT tartományok megadása.

3.8.2. Eredmények

A feszültségek a szokásos eredményábrázolási stílusokkal jeleníthetők meg (grafikon, izovonalak, sízínfelület, 3D s zínfelület). A normál és hajlítófeszültségek -egyéb fa alapanyagú szerkezetekhez hasonlóan- szeparáltan, maximális és minimális értékekkel vannak feltüntetve. A maximális és minimális értékek közül az amelyik pozitív lokális z koordinátájú ponthoz tartozik.

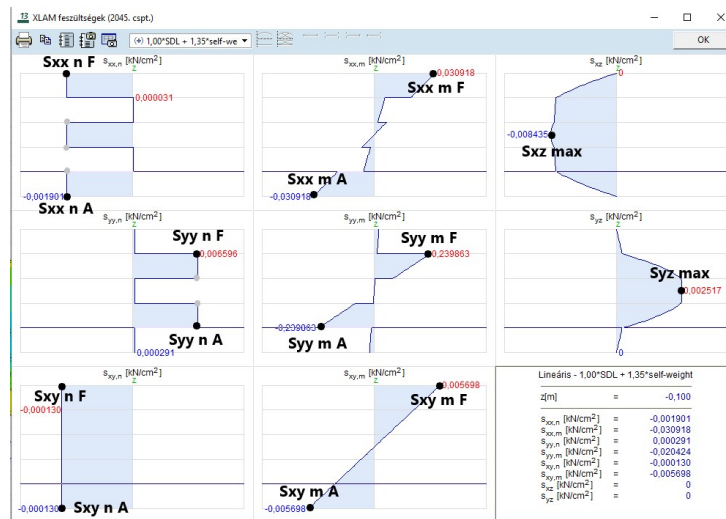
A felületi eredmények az AXISVM szokásos reprezentációs stílusaival tekinthetők meg (Diagram, Szintfelület 2D, stb.). Ahogy az fatermékek méretezésénél megszokott, az anyagban keletkező feszültségek a hatás forrása szerint normál- és hajlító hatásból keletkező részekre vannak osztva. A felületi feszültségek hajlításból származó részei a vastagság mentén vett abszolút szélsőértékekkel kerülnek megjelenítésre. A két szélsőérték közül az, amelyik pozitív lokális z irányú koordinátához tartozik 'F' (felső), amelyik negatívhoz 'A' (alsó) utótagot kap. A τ_{xz} és τ_{yz} vertikális nyírófeszültség komponensek egyetlen, a vastagság mentén vett abszolút szélsőértékükkel vannak feltüntetve. Példa néhány feszültségkomponens értelmezésére az előzőek szerint:

- S_{xx} m T : σ_x normálfeszültség hajlító hatásból keletkező részének a

vastagság mentén vett abszolút szélsőértéke, a lemez középfelületétől mért pozitív lokális z irányban.

- $S_{xy} \text{ n A} : \tau_{xy}$ nyírófeszültség normál hatásból keletkező részének abszolút szélsőértéke, a lemez középfelületétől mért negatív lokális z irányban.
- $S_{xz} \text{ max} : \tau_{xz}$ nyírófeszültség abszolút értelemben vett maximális értéke a vastagság mentén.

Felületi CLT feszültségek megtekintésekor a tartományra történő kattintással a feszültségek vastagság menti eloszlása is megtekinthető, erre mutat példát a 7. ábra a felületi ábrázoláshoz tartozó értékek feltüntetésével.

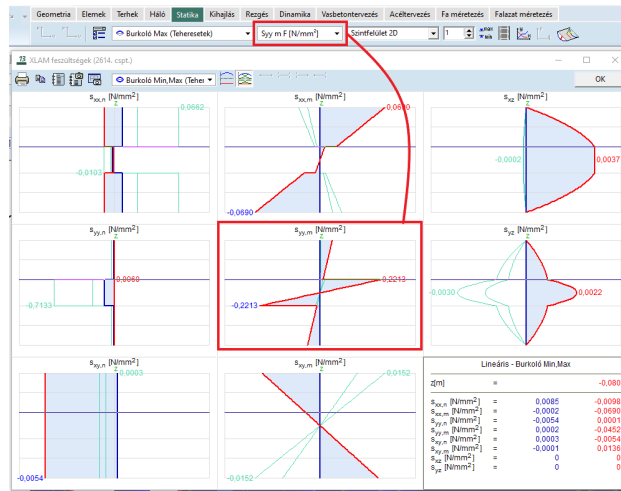


7. ábra. CLT feszültségeloszlás AXISVM-ben. A megjelölt pontok mutatják a felületi feszültségek megjelenítésekor látható értékeket, egy adott pont esetén.

Amennyiben a tartományon történő kattintás pillanatában burkoló vagy kritikus eredmények megintése zajlik, a feszültségábrázolásnál az éppen aktív feszültségkomponens mértékadó kombinációi diktálják a kirajzolást. Egy lehetséges esetre mutat példát a 8. ábra, ahol a vastagon húzott piros és kék teherkombinációk az 'Syy m F' komponens szélsőértékeit okozó teherkombinációkat jelölik minden ablakban.

Az CLT panelek kihasználtsági ellenőrzéseit 4 csoportba foglalva ábrázolja a szoftver, melyek:

- M-N-0 : (23) és (25)



8. ábra. Envelope stress distribution diagrams at a node, with $s_{yy,m}$ being the active component.

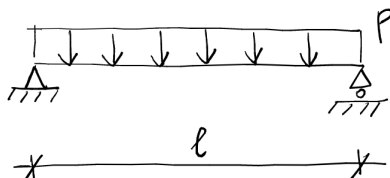
- M-N-90 : (24) és (26)
- V-T : (27)
- Vr-N : (28) és (29)

3.8.3. Tippek és Trükkök

- Mivel az CLT panelek gyártása és méretezése az EC5 által jelenleg nem teljeskörűen támogatott, különbségek lehetnek az egyes gyártók termékspecifikációiban. A program tartalmaz egy dedikált 'CLT' anyagtípust, de feltétlenül érdemes alaposan átnézni a gyártók termékismertetőit és a termékekhez kapcsolódó ETA dokumentumokat.
- A fa szálirányra merőleges húzószilárdsága sokkal alacsonyabb a szálirányban mért értéknél, ami a kéttengelyű erőjáték miatt gyakran meglehetősen nagy kihasználtsági értékekben jelentkezik. Amennyiben ez a tönkremenetel nem mérvadó, a kapcsolódó szilárdsági ellenállás értéknek a megnövelésével az ellenőrzés marginálissá tehető. Ennek megítélése a tervező feladata.

3.9. Verifikációs Példa 1

Számoljuk ki a feszültségeit és kihasználtságait a következő példának. A mértékegységek $[kN]$ -ban és $[cm]$ -ben értendők, az értékek 4 élesjeggyel kerültek kiírásra.



9. ábra. 1. verifikációs példa elrendezése.

Anyagi paraméterek:

termék megnevezése : KLH 3(60)s TL

hossz : $l = 600.0$

szélesség : $b = 1.0$

rugalmassági modulus várható értéke szálirányban : $E_{0,mean} = 1100$

rugalmassági modulus várható értéke szálirányra \perp -en : $E_{90,mean} = 55.00$

legfelső réteg száliránya : lokális x -nek megfelelő

rétegvastagságok : $(2, 2, 2)$

teljes vastagság : $t = 6.000$

szálirányok : $(\parallel, \perp, \parallel)$

felhasználási osztály : 1

tehertartóssági osztály : állandó

megoszló teher intenzitása : $p = 1E - 4$

Ellenőrzés kézi számítással:

$k_{def} = 0.8000$

hajlítómerevség : $EI = 19100.$

maximális statikai nyomaték : $S_{max} = S(0) = 4427$

maximális hajlítónyomaték : $M_{max} = \frac{p \cdot l^2}{8} = 4.500$

maximális nyíróerő : $V_{max} = \frac{p \cdot l}{2} = 0.03000$

maximális normálfeszültség : $\sigma_{x,max} = E_0 \frac{M_{max} t}{EI} \frac{1}{2} = 0.7774$

maximális nyírófeszültség (gördülő nyírás) : $\tau_{max} = \frac{V_{max} \cdot S_{max}}{EI} = 0.006952$

maximális lehajlás : $w_{max} = \frac{5 \cdot p \cdot l^4}{384 \cdot EI} = 15.90$

$k_{mod} = 0.6000$

$k_{fin} = 1.000$

$\gamma_M = 1.250$

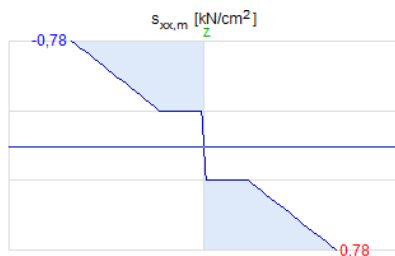
hajlítási szilárdság tervezési értéke : $f_{m,0,d} = f_{m,0,k} \cdot k_{mod} \cdot k_{sys} \cdot k_{fin} / \gamma_M = 1.152$

kihasználtság hajlításból (M-N-0) : 0.6748

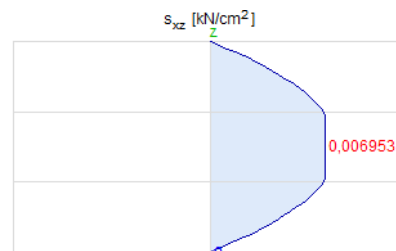
a gördülő nyírás ellenállás tervezési értéke : $f_{r,d} = f_{r,k} \cdot k_{mod} / \gamma_M = 0.048$

kihasználtság nyírásból (Vr - N) : 0.1448

Ellenőrzés AXISVM-mel ($\nu = 0$ alkalmazásával):

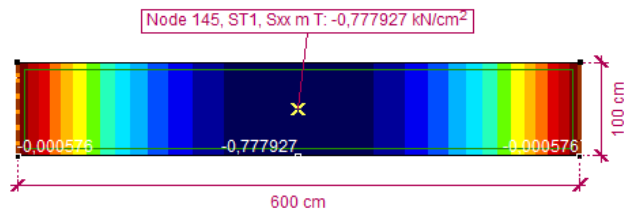


(a) σ_{xx} eloszlása tartóközépen.

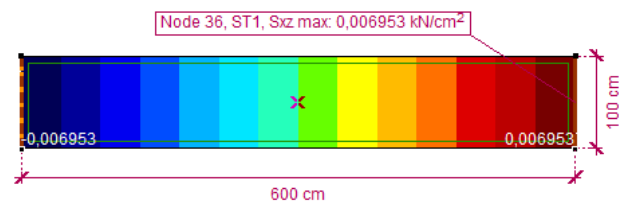


(b) τ_{xz} eloszlása a jobb oldali támasznál.

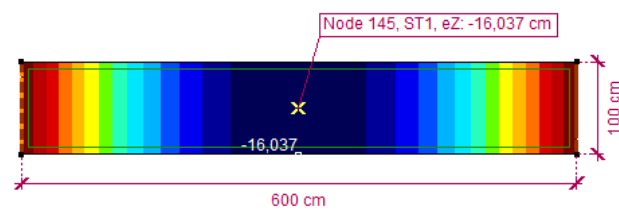
10. ábra. Mérvadó feszültségeloszlások az 1. verifikációs példa esetén.



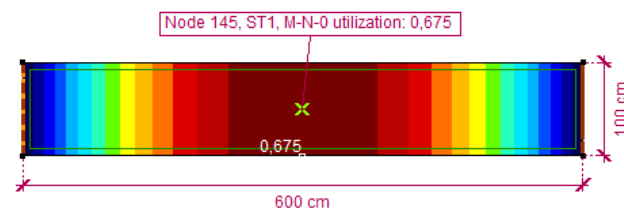
11. ábra. 'Sxx m F' szintfelületes ábrázolása.



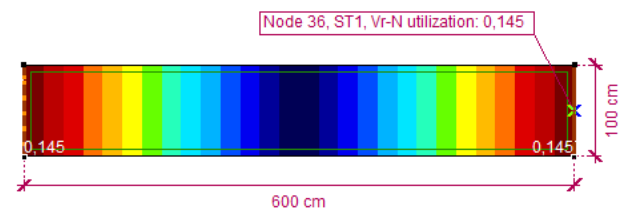
12. ábra. 'Sxz max' szintfelületes ábrázolása.



13. ábra. Lehajlás szintfelületes ábrázolása.



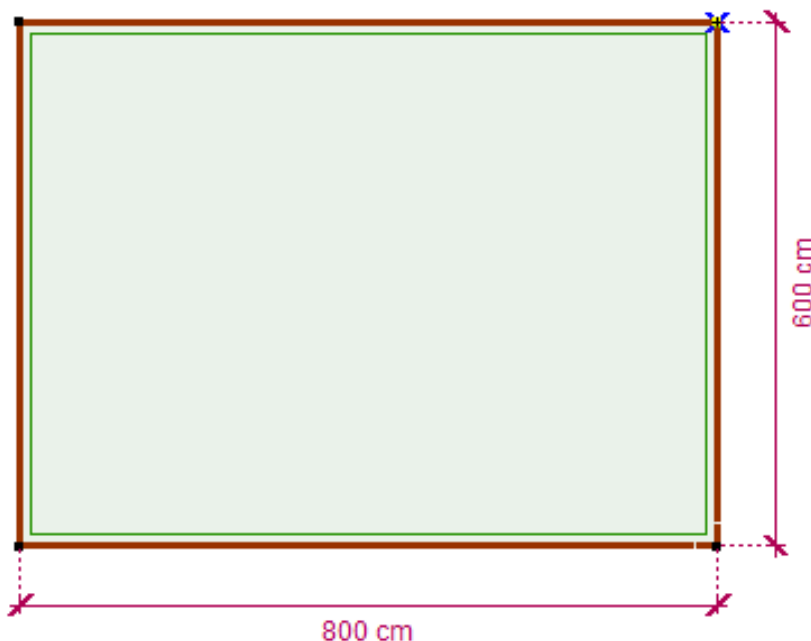
14. ábra. M-N-0 kihasználtság szintfelületes ábrázolása.



15. ábra. Vr-N kihasználtság szintfelületes ábrázolása.

3.10. Verifikációs Példa 2

Ebben a példában az CLT panelek merevségének a számítását vetjük össze ANSYS-szal számított értékekkel. A mértékegységek $[kN]$ -ban és $[cm]$ -ben értendők, az értékek 4 élesjeggyel kerültek kiírásra.



16. ábra. 2. verifikációs példa elrendezése.

A példa paraméterei:

termék megnevezése : Binderholz 7(260) 125

rugalmassági modulus várható értéke szálirányban : $E_{0,mean} = 1100$

rugalmassági modulus várható értéke szálirányra \perp -en : $E_{90,mean} = 55.00$

nyírási modulus várható értéke: $G_{mean} = 69.00$

gördülési nyírási modulus várható értéke: $G_{r,mean} = 6.900$

legfelső réteg száliránya : lokális x -nek megfelelő

rétegvastagságok : (6, 2, 4, 2, 4, 2, 6)

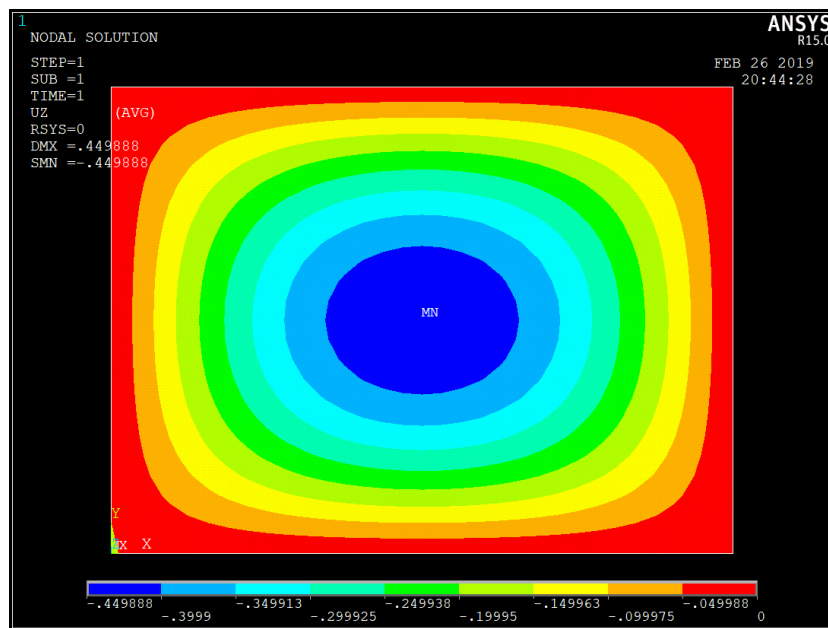
szálirányok : ($\parallel, \perp, \parallel, \perp, \parallel, \perp, \parallel$)

felhasználási osztály : 1

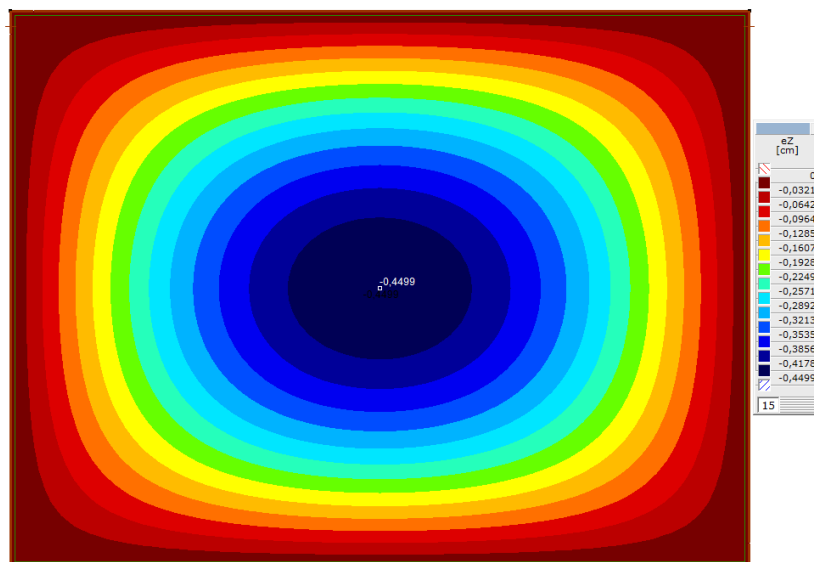
teher tartóssági osztály : állandó

megoszló teher intenzitása : $p = 1E - 4$

Az ellenőrző számítás ANSYS-ban került megvalósításra, SHELL281 hég végelem használatával.



17. ábra. Lehajlási ábra ANSYS-ban, 25 cm-es átlagos elemmérettel.



18. ábra. Lehajlási ábra AXISVM-ben, 25 *cm*-es átlagos elemmérettel.

Hivatkozások

- [1] E. Karacabeyli, B. Douglas, CLT Handbook : cross-laminated timber, Pointe-Claire, Quebec : FPInnovations, 2013.
- [2] X-lam alliance technical issue 1, Tech. rep.
- [3] R. W. Jokerst, Finger-jointed wood products, Tech. Rep. FPL-RP-382, Forest Products Laboratory (apr 1981).
- [4] R. Jones, Mechanics Of Composite Materials, Materials Science and Engineering Series, Taylor & Francis, 1998.
- [5] J. Reddy, Mechanics of Laminated Composite Plates and Shells: Theory and Analysis, Second Edition, CRC Press, 2004.
- [6] R. F. S. Hearmon, The Elasticity of Wood and Plywood, Forest products research, H.M. Stationery Office, 1948.
- [7] J. Bodig, J. Goodman, Prediction of elastic parameters for wood, Wood science 5(4) (1973) 249 – 264.
- [8] E. K. Askenazi, Anizotropia dreveszinü i drevesznüh materialov, Lesznaja Promüslennoszty, Moscow, 1978.
- [9] Elastic moduli of veneers in pine and beech plywood, Drewno. Pr. Nauk. Donies. Komunik. 55 (2012) 47 – 58, structural and Physical Aspects of Construction Engineering. doi:"<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.05.301>".
- [10] J. Szalai, A faanyag és faalapú anyagok anizotróp rugalmasság- és szilárdságtana. 1. rész, A mechanikai tulajdonságok anizotrópiája, Erdészeti és Faipari Egyetem, Sopron, 1994.
- [11] R. Stürzenbecher, K. De Borst, J. Eberhardsteiner, Cross laminated timber: A multi-layer, shear compliant plate and its mechanical behavior, 11th World Conference on Timber Engineering 2010, WCTE 2010.
- [12] J. Ahvenainen, H. Sousa, Multistorey building made of CLT: How to design it right?, 2016, pp. 95–118.
- [13] M. P. S. Gagnon, Analytical procedures for determining stiffness of clt elements in bending, Wood Design Focus 22 (2) (2012) 22–30.

- [14] B. Heimeshoff, Zur berechnung von biegeträgern aus nachgiebig miteinander verbundenen querschnittsteilen im ingenieurholzbau, Holz als Roh- und Werkstoff 45 (6) (1987) 237–241. doi:10.1007/BF02616416.
- [15] H. Kreuzinger, Platten, scheiben und schalen - ein berechnungsmodell für gängige statikprogramme, in: Bauen mit Holz, Vol. 1, Bruderverlag, Karlsruhe, 1999, pp. 34–39.
- [16] S. Timoshenko, Lxvi. on the correction for shear of the differential equation for transverse vibrations of prismatic bars, The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science 41 (245) (1921) 744–746. doi:10.1080/14786442108636264.
- [17] T. Bogensperger, T. Moosbrugger, G. Schickhofer, BSPHandbuch, Holz-Massivbauweise in Brettsperrholz, 1st Edition, Verlag der Technischen Universität Graz, 2009.
- [18] V. Bajzecerová, Bending Stiffness of CLT-Concrete Composite Members - Comparison of Simplified Calculation Methods, Procedia Engineering 190 (2017) 15–20. doi:10.1016/j.proeng.2017.05.301.
- [19] R. D. Mindlin, Influence of rotary inertia and shear on flexural motions of isotropic, elastic plates, Journal of Applied Mechanics 18 (1) (1951) 31–38.
- [20] C. Czaderski, R. Steiger, M. Howald, S. Olia, A. Gülzow, P. Niemz, Versuche und berechnungen an allseitig gelagerten 3-schichtigen brettsperrholzplatten, Holz als Roh- und Werkstoff 65 (5) (2007) 383–402. doi:10.1007/s00107-007-0184-6.
- [21] R. Stürzenbecher, K. Hofstetter, J. Eberhardsteiner, Structural design of cross laminated timber (clt) by advanced plate theories, Composites Science and Technology 70 (9) (2010) 1368 – 1379. doi:https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2010.04.016.
- [22] N. Pagano, Exact solutions for rectangular bidirectional composites and sandwich plates, Journal of Composite Materials 4 (1) (1970) 20–34. doi:10.1177/002199837000400102.
- [23] V. G. Kirchhoff, Über das gleichgewicht und die bewegung einer elastischen scheibe., Journal für die reine und angewandte Mathematik 40 (1850) 51–88. doi:https://doi.org/10.1515/crll.1850.40.51.

- [24] A. Thiel, G. Schickhofer, A software tool for designing cross laminated timber elements: 1d-plate-design., 11th World Conference on Timber Engineering, 2010.
- [25] F. Auricchio, E. Sacco, A mixed-enhanced finite-element for the analysis of laminated composite plates, *International Journal for Numerical Methods in Engineering* 44 (10) (1999) 1481–1504. doi:10.1002/(SICI)1097-0207(19990410)44:10<1481::AID-NME554>3.0.CO;2-Q.
- [26] M. Jacob, J. Harrington, B. Robinson, *The Structural Use of Timber - Handbook for Eurocode 5: Part 1-1.*, COFORD, Department of Agriculture, Food and the Marine, Dublin., 2018.
- [27] R. A. Jöbstl, G. Schickhofer, Comparative examination of creep of glt and clt slabs in bending, in: *WORKING COMMISSION W18 - TIMBER STRUCTURES*, Vol. 40, ., 2007, pp. 1–15.
- [28] M. Wallner-Novak, J. Koppelhuber, K. Pock, *Cross-laminated timber structural design - basic design and engineering principles according to eurocode*, Tech. rep., Stora Enso Wood Products GmbH.
- [29] A. Bernasconi, *Il calcolo dell'xlam - basi, normative, progettazione, applicazione*, Tech. rep., Promo Legno (2011).
- [30] *Design of timber structures - part 1-1: General - common rules and rules for buildings.*, norm (2004).
- [31] *Geometrische produktspezifikation (gps) - iso-toleranzsystem für längenmaße - teil 1: Grundlagen für toleranzen, abmaße und passungen (iso 286-1:2010)* (Nov. 2010).
- [32] P. Mestek, H. Kreuzinger, S. Winter, *Design of cross laminated timber (clt)*.
- [33] A. Vilguts, D. Serdjuks, L. Pakrastins, Design methods of elements from cross-laminated timber subjected to flexure, *Procedia Engineering* 117 (2015) 10 – 19, international Scientific Conference Urban Civil Engineering and Municipal Facilities (SPbUCEMF-2015). doi:<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.117>.