

Toronyház tervezés Rétegelt-ragasztott fa és CLT panel segítségével

Jóna Gábor

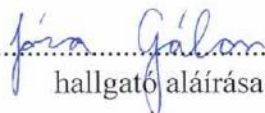
2024

HALLGATÓI NYILATKOZAT

Alulírott Jóna Gábor TMDK hallgató kijelentem, hogy az Toronyház tervezés Rétegelt-ragasztott fa és CLT panel segítségével TMDK dolgozatot a Pécsi Tudományegyetem Műszaki és Informatikai Kar Mérnöki és Smart Technológiák Intézet Építőmérnök Tanszékén készítettem Szerkezet-Építőmérnök MSc szakos hallgatóként.

Kijelentem, hogy a TMDK dolgozat a saját munkám eredménye, és kizárólag a megjelölt forrásokat használtam fel. Minden olyan részt, amelyet szó szerint vagy azonos értelemben, de átfogalmazva más forrásból átvettem, a forrás megadásával egyértelműen, az előírásoknak megfelelően megjelöltem. Ugyanígy jártam el a más forrásból átvett illusztrációk (rajzok, ábrák, képek, grafikonok, táblázatok, stb.) esetében is.

Pécs, 2024. december 2.


.....
hallgató aláírása

Tartalomjegyzék:

1.	Bevezetés	1
2.	Felhőkarcolók történet	1
2.1.	Kezdetek.....	1
2.2.	Az első felhőkarcolók	2
2.3.	World Trade Center és következményei	5
2.3.1.	Az épület története	5
2.3.2.	Terrortámadás következménye a tervezésben	9
2.4.	Innovációk a felhőkarcolók tervezésében	10
2.5.	Felhőkarcolók jövőképe	12
3.	Földrengés rövid ismertetése	14
3.1.	Földrengés jelensége	14
3.2.	Válaszspektrum analízis	16
3.2.1.	A válaszspektrum-analízis lépései	17
3.2.2.	Válaszspektrum-analízis előnyei	17
4.	Tervezendő fa felhőkarcoló bemutatása	17
4.1.	Rétegelt-ragasztott fa	19
4.1.1.	A Rétegelt-ragasztott fa tulajdonságai	19
4.2.	CLT panel.....	20
4.3.	Napelem-, szélérőmű rendszer	21
4.4.	A torony bemutatása	23
5.	Helyszín ismertetése	24
6.	Épület merevítése.....	25
6.1.	Outrigger	25
6.2.	Belső merevítő mag.....	27
7.	Statikai méretezés	27
7.1.	Geometria kialakítása, szelvény meghatározás, teher felvétel.....	28
7.2.	Végeselem hálókra osztás, statikai számítás	31
7.3.	Eredmények kiértékelése, vasalás tervezése	32
7.4.	A fa szerkezeti elemek méretezés	34
7.4.1.	Normálerő	40
7.4.2.	Nyírás (y)	41
7.4.3.	Nyírás (z)	41
7.4.4.	Hajlítás (y)	41
7.4.5.	Hajlítás (z).....	42
7.4.6.	Csavarás	42
7.4.7.	Normálerő-Hajlítás	42

7.4.8. Normálerő-Hajlítás-Kihajlás.....	43
7.4.9. Normálerő-Hajlítás-Kifordulás	44
7.4.10. Nyírás-Csavarás	44
7.4.11. Tetőponti keresztirányú feszültség	45
7.4.12. Szerkezet optimalizálása.....	45
7.5. Földrengés méretezés	47
8. Kapcsolatok kialakítás	49
9. Összefoglalás	51
10. Képjegyzék, Ábrajegyzék, Táblázatjegyzék.....	52
Irodalomjegyzék	55

1. Bevezetés

A XXI.században egyre nagyobb teret hódít a tudatosság az életünk minden szegmensében, ezáltal az építőiparban is. Így az egyik fő kérdés minden egyes beruházás előtt, hogyan tudnánk környezetbarát módon megépíteni a tervezett épületeinket, létesítményeinket. Ezzel is csökkenteni szeretnénk a karbonlábnyomunkat. Fontos tehát visszatérni és kihasználni a természetes vagy más néven organikus építőanyagok adta lehetőségeket, előnyöket.

Dolgozatomban a magas szerkezetekkel, toronyházakkal foglalkozom, illetve azzal, hogy hogyan is tervezhetők meg ezek a szerkezetek rétegelt-ragasztott fa, illetve CLT panel technológiával, amire Magyarországon még nincs példa.

2. Felhőkarcolók történet

A felhőkarcolókat egy-egy város, a haladás, sőt gyakran az örökké valóság szimbólumaként képzelik el sokan. Természetesen nemcsak esztétikai és eszmei, hanem praktikus okai is voltak, hogy ilyen épületeket kezdtek tervezni a mérnökök. Többek között a legfontosabb szempont a városközpontokban fellépő beépíthető telkek iránti nagy kereslet volt. Így meg kellett oldani a gyors és gazdaságos építkezést. Természetesen a nagy városok szempontjából is rendkívül fontos egy ilyen épület, hiszen lehetővé teszi a vertikális terjeszkedést, ezzel is maximalizálva a lakó- és irodahelyek kihasználását. [1]

2.1. Kezdetek

Pontos meghatározás, hogy mi számít felhőkarcolónak nincsen, általánosan a 150 méternél magasabb épületek szokták a határt képezni. Ilyen alapon a Gízai nagy piramis (1. kép, bal oldalt), a maga 137,3 méterével közelítette, de inkább csak magas-, vagy toronyháznak tekinthetjük, ha a fogalmaknál és a kategóriáknál maradunk [2]. Az Eiffel-torony (1. kép, jobb oldalt) viszont 324 méterével már másik kasztba, úgynevezett szupermagas épületek közé tartozik [3]. Viszont egyiket se tekinthetjük háznak, ezt csak a szemléletesség kedvéért hasonlítottam össze.



1. kép: Gízai nagy piramis és az Eiffel-torony [2], [3]

Az első olyan építmények, amelyet magas háznak hívhatunk az Jemenben, Sibám városában (szokták a sivatag Manhattanjének is nevezni) épült a XVI. században. Ez közel 500 darab 5-9 emeletes tornyot (2. kép) jelentett. Viszont a XIX. századig nem épültek 6 emeletnél magasabb épületek. A problémát nem az építőanyag szilárdsága jelentette, hanem a felvonó és a vízpumpa hiánya. Ugyanis a vizet 50 méternél magasabbra nem tudták feljuttatni az akkori technológia szerint.



2. kép: Sibám, a sivatag Manhattanje [4]

A XVII. században a skóciai Edinburgh-ben egyre magasabb épületeket kezdtek el építeni, miután a városfal szűk lett. Ezek 11 emelet magas szerkezetek voltak átlagban, a legmagasabb épület 14 szintet jelentett. Inkább ezeket is még a magasház kategóriába soroljuk, de érzékelhető volt, hogy egyre magasabb és merészebb épületek születtek. [4]

2.2. Az első felhőkarcolók

A felhőkarcolók eredetéhez viszont az Egyesült Államokba kell utaznunk, ott is Chicagóba. 1871-ben tűzvész pusztította el a város egyharmadát. A város újra tervezésénél az építészek egy új technológiához fordultak, ugyanis ebben az időszakban az acél története az acélgyártás modern korszakával fordulóponthoz érkezett. A Bessemer-eljárás (Henry Bessemer, brit kohász, után kapta a nevét) során a nyersvasat a

kohóból való kivonás után levegővel fűjják át acéllá. A Bessemer által 1856-ban bemutatott eljárás 1864-ben vált sikeresen működőképpé. Ez az eljárás a modern kor legfontosabb termelési fejlesztései közé tartozik (hasonló eljárást alkalmazott az Egyesült Államokban William Kelly 1851-ben, amelyet 1857-ben szabadalmaztattak.). Ha még azt is hozzávesszük, hogy a másik nagy problémára is ebben az időszakban találtak megoldást, ugyanis 1852-ben Elisha Otis feltalálta a liftet, lehetőségessé vált mind biztonsági, mind kényelmi szempontból magasabb épületek kivitelezése. Az első magas épület a Home Insurance Company Building (3. kép) (egy lakásbiztosító társaság székháza) volt. 1882-ben építették, az érdekessége pedig az, hogy az első épület volt, amelynek a váza kizárólag acélból és vasból készült. A tíz emelet, mintegy 42 méteres magasságot jelentett. [5]

A magasság, maga az épület szerkezete és a benne rejlő lehetőségek egy, akkor még felfoghatatlan mértékű innovációt és (napjainkban) versenyt idéztek elő. Rájöttek idővel a mérnökök, hogy hogyan tudják megmerevíteni az épületet, a szélterheléssel és más meghatározó igénybevételekkel szemben ellenállóbbá tenni. Mindezek mellett látványosság is lett egy-egy ilyen épület, így természetesen a turizmus is fellendült, későbbiekben pedig, külön városrészek jöttek létre, egyfajta „város a városban” alakult ki, ezért saját infrastruktúrával kellett rendelkeznie, mivel egy nagyobb felhőkarcoló akkora, mint egy kisebb város.



3. kép: Home Insurance Company Building [5]

1913-ban adták át a Woolworth Buildinget (4. kép), ami 13,5 millió dollárból készült 241 méter magas épületet, Manhattan legidősebb felhőkarcolóinak egyike. Amikor elkészült,

a világ legmagasabb épülete volt. A pénzügyi központban található a Kereskedelem Katedrálisa becenevet viselő ikonikus épület. Turisták elől el van zárva, nem látogatható, így egyfajta tiltott gyümölcsként emlegetik New Yorkban. [5]

A méltán híres Empire State Building (5. kép) egy másik jelkép lett az évek alatt. A 102 emeletes és 381 méter magas tornyot 1930. január 22-én kezdték el építeni. Az építkezésen 3400 ember dolgozott, akik főként európai bevándorlók és indiánok voltak, alig több mint egy év alatt el is készült és 1931. május 1-jén átadták az épületet. Az Empire State New York állam beceneve. A legenda szerint John Jacob Raskob (a megrendelő) megkérdezte az építész Bill Lamberttől 1928-ban: „*Bill, milyen magasra tudod építeni, hogy ne dőljön össze?*” [6]

A toronyházra az Empty State Building azaz az Üres Állami Épület gúnynevet kezdték használni, mivel az 1940-es évekig a legtöbb irodának nem akadt bérlője. Az antenna a torony tetejére 1952-ben került fel. [6]



4. kép: Woolworth Building, A Kereskedelem Katedrálisa [6]



5. kép: Empire State Building [7]

Chicagóban, 1974-ben felépült a Sears Tower vagy Willis Tower (6. kép), amely a világ legmagasabb felhőkarcolója volt akkor, a maga 110 emeletével és 442 méter magasságával. Aztán a Petronas Tower 1 vette át ezt a címet, amelyik Malajziában, Kuala Lumpurban épült fel 1998-ban. [8]



6. kép: Sears Tower vagy Willis Tower [8]

A versenyfutás innentől kezdve hihetetlen mértékeket öltött, egyre magasabb épületek és merészebb tervek jelentek meg (manapság már több mint egy kilométer magasságú szerkezeteket tűztek ki célul), melynek még a terrorizmus által keltett félelem se tudott megálljt parancsolni, sőt egyenesen felgyorsította azt.

A 2001. szeptember 11.-i World Trade Center elleni terrortámadás következményeként számos mérnöki, tervezési gyakorlat módosult. Viszont mielőtt az esemény utáni innovációkról beszélünk, érdemes a tornyok történetét is megismerni.

2.3. World Trade Center és következményei

2.3.1. Az épület története

A World Trade Center vagy magyarul a Világkereskedelmi központ, hét épületből álló épületegyüttes volt New York város Manhattan kerületében. A World Trade Centert Raymond Hood álmodta meg és Jamaszaki Minoru japán–amerikai építész tervezte meg, segítőtársa Emery Roth volt. [9]

Az ikertornyok 110 emeletesek és a WTC legismertebb épületei voltak. A komplexumot 1966 és 1973 között építették, az alábbi képek (7. kép-11. kép) ezen folyamat közben készültek. 1971-ben készült el a felhőkarcoló acélszerkezete, 1972-ben az északi

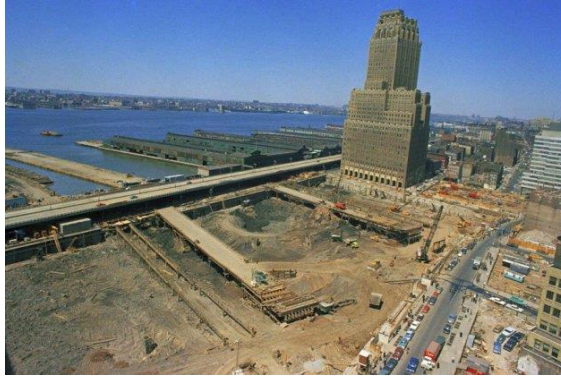
toronyba az első bérlők már be is költöztek. 1973. április 4-én nyitották meg, nyáron átadták a déli tornyot is. Az alapterülete hat hektár volt a tornyok tövében található tér kiterjedése pedig 20 000 négyzetméter. Az épületegyüttes annyira hatalmas volt, hogy saját irányítószámot rendeltek hozzá (10048). [9]

„A World Trade Centernek az emberiségbe vetett bizalom kézzel fogható erekléjévé kell válnia, kifejezésre juttatva az egyes ember méltóság iránti igényét, az együttműködés és összefogás szükségszerűségének felismerését, végső fokon pedig a nagyság felfedezésére irányuló képességét” /Yamasaki [9]/

A World Trade Center kezdte átvenni a Wall Street helyét, a tornyokat körülölelő sétatér turistalátványossággá vált. A külföldi turisták és a fiatalabb New York-i nemzedék számára a WTC a pénzügyi körzet jelképévé vált. Látogatóként 200 000 ember fordult meg naponta a komplexumban. A két toronyban 50 000 különböző ember dolgozott. A WTC-ben fedett, összekötő hídon lehetett átsétálni a World Financial Centerbe vagy a Hudson folyó partjára, ahová elegáns, üveg és acél fedte, üzletek és éttermek szegélyezte kristálypalotán keresztül vezetett az út. Egy másik fedett hídon a Wall Streetbe torkolló keskeny utcák felé lehetett eljutni. [9]



7. kép: Ide épült a Világkereskedelmi Központ [10]



8. kép: Déli torony alapozási munkálatai [10]



9. kép: Visszahorgonyzás, földmegtámasztás alapozás közben [10]



10. kép: Előregyártott elemek beemelése a pozíciójukba, jól érzékelhető dimenzió, amiben gondolkodni kellett [10]



11. kép: Ikertornyok látképe [10]

2001. szeptember 11-én egy világ nézhette végig élőben a sajnálatos terrortámadást és annak következményeit, ahogy a tornyok megsemmisültek (12. kép).



12. kép: 2001. szeptember 11. [11]

A World Trade Center tornyainak, összeomlása láttán sokan úgy gondolták, hogy többé nem fogjuk majd biztonságban érezni magunkat ilyen ikonikus épületekben. A valóság azonban rácáfolt a több mint húsz évvel ezelőtti borúlátásra. 23 év elteltével, a 2001-ben sokak által vizionált felhőkarcoló-stopnak éppen az ellenkezőjét lehet kijelenteni. Szeptember 11-e óta ugyanis több mint ötször annyi magas épület épült, mint korábban.

2000-ben a világon körülbelül 25 szupermagas (200 méter feletti) felhőkarcoló volt. Ma már több mint 200 van belőlük, és még számos építés alatt áll.

Elméletek tömkelege található az interneten, hogy miért az ikertornyokat vették akkor célba az elkövetők, talán az egyik ok az lehetett, hogy szimbolikus és ikonikus jellegük volt. Ebből kiindulva a felhőkarcolók létezésének oka nem szűnt meg, sőt érthető módon egyre jobban terjed. Ha a Világkereskedelmi Központ még állna, akkor ez lenne a világ 31. legmagasabb épülete. Elpusztításakor még a világ negyedik legmagasabb épülete volt. A felhőkarcolók használata sokat változott az évek alatt, ugyanis a lakó-, vegyes használatú és hoteltornyok egyre gyakoribbak. 2001-ben a 200 méternél magasabb felhőkarcolók 80%-a kifejezetten irodai célra épült, ez a szám mára 46%-ra csökkent. [10]

2.3.2. Terrortámadás következménye a tervezésben

A felhőkarcolók számának növekedésével párhuzamosan, jelentős javulás tapasztalható mind fizikai, mind működési biztonságukban. Fizikailag az épületek földszintjének védelme lett az elsődleges kritérium, megóvva attól, hogy illetéktelen járművek megközelíthessék. Továbbá robbanásnak ellenálló burkolatok lettek kifejlesztve. A logisztikát és az épületekhez való hozzáférést vizsgálják a tervezés során, kizárva az épület érzékeny részei alatti parkolás, hozzáférés lehetőségét.

A 2001-es események következménye volt az is, hogy a nemzetközi építési szabályzatok beépültek a helyi előírásokba szerte a világon. Ma kiterjedt átfedések tapasztalhatók az építési szabályzatok között.

Egyik sarkalatos pont lett a menekülési útvonalak újragondolása. A World Trade Centerben csak néhány keskeny lépcsőház volt, ami a támadások után lassú evakuálást tett csak lehetővé. Könnyebben használható lépcsőket és logikusabb, közvetlenül a szabadba vezető útvonalakat követelnek meg napjainkban. A szélesebb közlekedőkön az egyértelműbb jelzőfények és a tartalék világítás is kötelezővé vált.

A felhőkarcolók építéséhez használt anyagokat is átgondolták az elmúlt 20 évben. A menekülési útvonalakat tartalmazó közlekedőmagokat ma jellemzően nagy szilárdságú tűzálló betonból építik. A World Trade Centerben az ikertornyok lépcsőmagjait kis szilárdságú gipszkarton lapokkal határolták körbe. A támadásokat követően ez azt jelentette, hogy az ütközési zónákon szétestek, és az épületek lakóit csapdába ejtették felettük. A modern felhőkarcolók lépcsőházai túlnyomás alatt vannak, ami azt jelenti, hogy megakadályozzák a füst beáramlását a zárt ajtókon, hogy megkönnyítsék a menekülést és a tűzoltást.

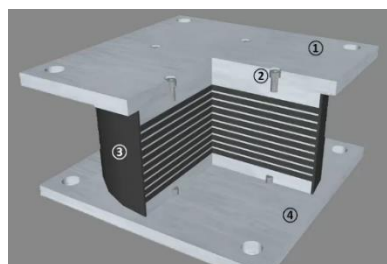
Az elmúlt két évtizedben a mérnökök olyan módszereket is kifejlesztettek, amelyeket a progresszív összeomlás elleni védelemre terveztek. A progresszív összeomlás az épület szerkezeti meghibásodása, amely akkor következik be, amikor egy kulcsfontosságú szerkezeti elem meghibásodik, és a szomszédos elemek meghibásodását okozza (dominó hatás). Ez történt a World Trade Centerben a támadásokat követően, mivel az ütközésekből eredő tüzek és magas hőmérsékletek a padlólemezek megereszkedéséhez és az acélszerkezet kihajlásához vezettek. Ennek elkerülésére ma a szerkezetet úgy tervezik, hogy ha például egy pillér megsérül és elveszíti a teherhordó képességét, a közelében lévő tartószerkezetek át tudják venni a többletterhet.

Ezeket a (tragédiából származó) tapasztalatokat felhasználva, tehát újabb szintre lépett a felhőkarcolók versenye. Magasabb, erősebb, logikusabb szerkezetű épületeket terveztek, szem előtt tartva a megjelenést is, de egy fontos probléma még mindig maradt. Hiába vették figyelembe a szélhatást, más természeti erők is működnek és például Amerikában is, vagy akár a szomszédos Romániában, gyakoriak a kisebb-nagyobb földrengések, a szerkezetek pedig kellően érzékenyek az ilyen mozgásokra. [10]

2.4. Innovációk a felhőkarcolók tervezésében

A magas házak, felhőkarcolók tervezése során, az egyik legnagyobb terhet a földrengések, illetve a szélből keletkező dinamikai hatások jelentik. Ezen terhek elnyelésére, számos fejlesztés, mérnöki találmány készült.

Vannak épületek, amelyek alapjait úgy tervezik, hogy képesek legyenek elnyelni és elvezetni a földrengés okozta rezgéseket. A szerkezet számára lehetővé teszik, hogy elmozduljon a talajhoz képest, így csökkentve a felszerkezetre ható erőket, egyfajta rugalmas alapot hoznak létre (pl. szeizmikus izolátor 13. kép). Ezek az eszközök, a rezgések energiájának elnyelésére és csökkentésére szolgálnak. [12]



13. kép: Szeizmikus csillapító (1. horgonylemez, 2. csatlakozók a vízszintes terhek átvételére, 3. elastomer központi elem vízszintes acél merevítő lemezekkel, 4. horgonylemez) [12]

Ami még tud segíteni a rezgések elnyelésében az építőanyag választás, ugyanis az acél és egyes speciális betonfajták képesek meghajlani és energiát elnyelni anélkül, hogy elszakadnának vagy eltörnének. Mondhatni „ringatóznak” a földrengés során, ez pedig csökkenti a károsodást. Ennél résznél mindenképp érdemes megemlíteni Gulyás András nevét, akinek a kutatásai tették lehetővé, a modern épületek esetében gyakran alkalmazott rugalmas szerkezeti kialakításokat. [12]

Tovább növelheti a stabilitást a geometriai forma is. A háromszög például diagonális merevítőnek tekinthető, ami hatékonyan osztja el a terhelést. Mind statikai, mind esztétikai szempontból kedvező lehet az is, amikor a különböző szinteken eltérő formákat alkalmaznak, így csökkentve a szerkezetre ható szeizmikus hatásokat. Ezt nevezik a „megzavarás” technikájának.

Vannak mérnökök, akik egyszerűen csak egy nagy tömeget akarnak elhelyezni az épületben, amely lesúlyozza azt. Ez a tömeginga (14. kép), amit az épület tetejéhez rögzítenek és a földrengés mozgásával ellentétes irányba mozog. Ez segít stabilizálni a szerkezetet, elkerülve a rezonancia veszélyét. Az egyik leghíresebb ilyen inga a tajvani Taipei 101-ben található, ami 660 tonnás, ez a tömeg pedig leredukálja az épület kilengését. [13]

Más kialakítás szerint szétszedik az épületet, egyfajta moduláris szerkezetet hoznak létre, amely így kisebb részekből áll és különbözőképpen mozog, ezzel is csökkentve az össztömeg együttes kilengését és elosztva a szeizmikus erőket. Ezt igen gyakran alkalmazzák, minimális mozgást biztosítva a részeknek, elkerülve a többlet feszültségek keletkezését.



14. kép: Tömeginga a Taipei 101 épületben [13]

2.5. Felhőkarcolók jövőképe

A jövőt tekintve, leginkább építőanyagokban jelentkezhethet innováció, mintsem a geometriai méretekben. Ha ebből a szempontból vizsgáljuk ezt a jelenséget, akkor még, az acél és a vasbeton (ebből épült a 15. képen látható Burdzs Khalifa [14]) a két fő alapanyag, viszont a CLT (cross-laminated timber - keresztirányban ragasztott fa) megjelenésével, illetve a rétegelt-ragasztott fa- és a rácsos tartók szilárdsági és mechanikai tulajdonságainak minden előnyét kihasználva, újabb lehetőséggel bővült az anyagfelhasználási lehetőség. Jelenleg a Milwaukee-ban található Ascentet (16. kép) tartják számon a világ legmagasabb fából készült toronyházaként. Tudatosan használtam ezt a fogalmat, ugyanis „csak” 86 méter magas az épület. [15] A szerkezet egyfajta beton-fa hibrid, a CLT technológia minden előnyével.

Ha visszatérünk Európába és körbe nézünk, akkor láthatjuk, hogy Prágában sem merednek az ég felé a gigantikus épületek, Varsónak viszont sajnos a világháború miatt muszáj volt egy modern várost felhúznia, ahová már a felhőkarcolók is megférnek. Párizsban sem mindenki rajong a zárványként megteremtett La Défense-ért, hiszen éppen a kompakt város eszméjét vágja tönkre. Tehát láthatjuk, hogy a két földrész közötti különbséget, maga a már korábban kialakított építészeti látványkép jelenti.



15. kép: A világ legmagasabb felhőkarcolója (828 méter), a Burdzs Khalifa [14]



16. kép: Ascent [15]

Magyarországra is igaz ez az általános kép, ugyanis Budapest az elmúlt közel 100 évben egyetlen felhőkarcoló sem épült. Számos terv született, végül egyik sem valósult meg. 2022-ben adták át a MOL Campust (17. kép), amely összességében 143 méter magasságú toronyház, Magyarország legmagasabb irodaépülete. [16]



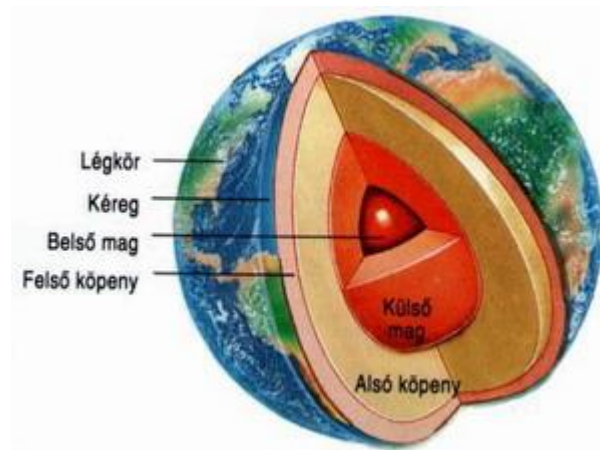
17. kép: MOL Campus [16]

3. Földrengés rövid ismertetése

Az előző fejezetben már említett, ilyesfajta magas épületeknél mértékadó igénybevételt jelenthet, a földrengés. Fontos szempont az optimalizáció vagy a kezdeti méretfelvétel esetén a szelvénymeghatározásnál és csomóponti kialakításnál, ugyanis ha túl mereven viselkedik az épület, akkor többlet feszültség, ha pedig alul becsüljük, stabilitásvesztés illetve állékonysági probléma léphet fel. Így látható, hogy ennek a jelenségnek a vizsgálata nem elhanyagolható.

3.1. Földrengés jelensége

Földünk rétegződése a következőképpen néz ki, a földkéreg legfelső része a talaj, amely a tengerek alatt közel 10 kilométer, míg a kontinensek esetében akár 40 kilométer vastag is lehet. A következő réteg egy változó halmazállapotú és ezáltal sűrűségű és keménységű anyag, a köpeny. 2900 km mélységben pedig a Földünk külső és belső magja található (1. ábra).



1. ábra: A Föld rétegződése [17]

Belső erők hatására a földkéreg különböző részei összenyomódnak, közelednek, távolodnak, megtörnek, meggyűrődnek. Ez egy lassú folyamat, ami változásokat okoz a Föld felszínén.

Okai a következők lehetnek, százalékos előfordulási sorrendben:

- 1) 85% - Szerkezeti (Pangea) rengések.

A rugalmas feszültségeknek a kőzetanyag törését követő, részben rugalmas energiák formájában történő feloldódásával keletkeznek, csak szilárd halmazállapotú kéreganyagban pattanhatnak ki, ezek a legpusztítóbbak.

- 2) 7% - Vulkanizmussal kapcsolatos rengések (a vulkánkitörés energiájának egy része rugalmas hullámokká alakul).

3) 5% - Talajnyugtalanág:

- a., Géprezgések, járművek által keltett rezgések;
- b., Légtörési jelenségek által okozott rezgések.

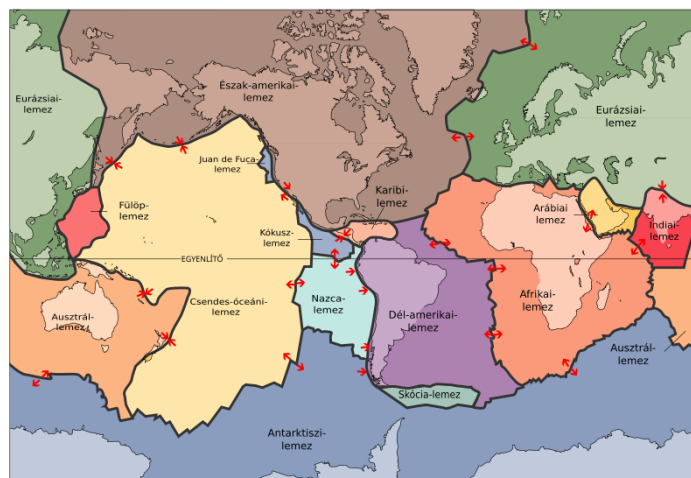
4) 3% - Beszakadásos - beomlásos rezgések (magma kamrák beomlása - implózió, barlangok beszakadása). Mesterséges rezgések (nukleáris, bányászati és egyéb robbantások).

A belső feszültségállapot jellemzőin kívül befolyásolják még a terhelésváltozást okozó külső tényezők: az erózió, klímaváltozás - pl. a jégmezgek megolvadása -, mesterségesen megnövelt terhelés, pl. tározó kialakítása, légnyomásváltozás, égitestek vonzása stb.

A Föld külső, a kéregből és a felső földköpeny merev szilárd részéből álló kőzetburkolat együttes neve a litoszféra, amely a köpeny asztenoszféra nevű képlékeny részén úszik, amelynek vastagsága 70—150 km közötti. E két szerkezeti rész (a litoszféra és az asztenoszféra) mechanikailag egységes, együtt mozog el. A nagyobbak "hordozzák" az óceánokat és kontinenseket - eszerint lehetnek óceáni, szárazföldi (kontinentális) és "komplex" táblák. Egymáshoz és a Föld forgástengelyéhez képest folyamatosan és/vagy epizodikusan mozognak.

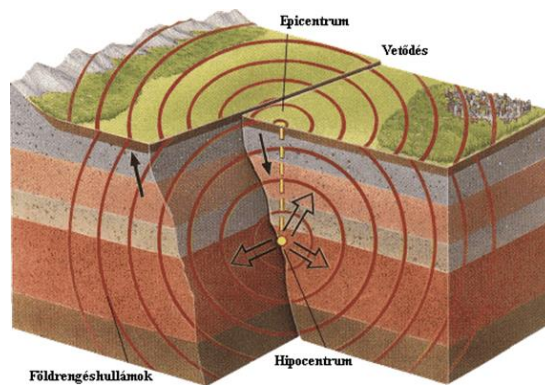
Mozgásuk megnyilvánul a kontinensek "elúszásában" (kontinensvándorlás), az óceánaljzat szétterülésében (repedésvölgy-rendszer), vagyis az óceáni kéreg keletkezésében és az óceáni árkok régióiban történő megsemmisülésében.

A földkérget alakító nagyszerkezeti jelenségek (pl. a földrengési zónák kialakulása) – egységes értelmezését kíséri meg a lemeztectonika. A feltevés szerint a Föld felszíne hat nagy (elsőrendű táblák) és mintegy húsz kisebb, másodrendű litoszféra-táblára (lemezre) osztható (2. ábra).



2. ábra: Tektonikai lemezek [18]

A legtöbb földrengés a két kőzetlemez határán lévő vetődés mentén következik be. A kőzetlemezek elmozdulása miatt a kőzetek deformálódnak, majd a felhalmozódott feszültség hirtelen felszabadulásakor eltörnek. Ahol a kőzetek eltörnek, ott van a rengés hipocentruma (3. ábra). Ebből a pontból a felszabaduló energia hatására lökéshullámok, úgynevezett földrengéshullámok indulnak ki, amelynek a Föld belsejében és a felszíne mentén tovább terjednek. Ezek a hullámok rengetik meg a földfelszínt. A rengés az epicentrumban a legerősebb, vagyis a földfelszínnek éppen a hipocentrum fölött fekvő pontjában. [18]



3. ábra: Vetődés következtében létrejött földrengés mechanizmusa [18]

3.2. Válaszspektrum analízis

Szerkezeteink stabilitása szempontjából fontos, hogy figyelembe vegyünk a földrengés jelenségét. Többféle módszer létezik, most, a leggyakrabban használt módszert, a válaszspektrum analízis módszerét mutatom be. A válaszspektrum-analízis során egy adott földrengési spektrumot alkalmaznak a szerkezet különböző természetes frekvenciáira, és ezekre a frekvenciákra meghatározzák a válaszokat. A módszer lényege, hogy egy "ideális" ingadozó terhelés hatását vizsgálják a szerkezet különböző módusain (rezgési formáin) anélkül, hogy minden egyes rezgési mód külön-külön teljes időbeli dinamikai analízisét kellene elvégezni.

Egy olyan grafikus ábrázolás, amely megmutatja a maximális elmozdulást, sebességet vagy gyorsulást, amit egy egydimenziós tömegtömb egy adott periodikus ingadozás esetén tapasztalhat, a periodikus terhelés függvényében.

A vizsgálat előfeltétele a modális analízis, amely során meghatározzák a szerkezet szabad rezgési frekvenciáit és a megfelelő módusokat. Az egyes frekvenciákhoz tartozó válaszok adódnak a válaszspektrumból. [19]

3.2.1. A válaszspektrum-analízis lépései

1. Modál analízis elvégzése: Elsőnek is meghatározzuk a szerkezet természetes rezgési módusait és frekvenciáit, ez a modál analízis.
2. Válaszspektrum kiválasztása: A válaszspektrumot, a földrengési rezgéseket leíró adatokat tartalmazó grafikon alapján választják meg, például egy adott földrengési zónára vonatkozóan (Magyarországra levetítve a BME szakemberei készítettek egy zóna-térképet).
3. Modális válaszok meghatározása: A szerkezet minden egyes természetes frekvenciájához tartozó válasz (pl. elmozdulás, sebesség, gyorsulás) az adott válaszspektrum alapján számítható.
4. Összegezés: Az összegezés a válaszok kombinálásának szabályai szerint történik.
5. Eredmények értékelése: Végül a válaszok alapján meghatározzuk a szerkezet biztonságát, stabilitását. [19]

3.2.2. Válaszspektrum-analízis előnyei

A válaszspektrum-analízis gyors és egyszerű módszer, mivel nem igényel a szerkezet teljes dinamikai elemzését (Tudjuk még jobban gyorsítani, ha diafragmaként kezeljük a tartományokat). A rezgési alakokhoz tartozó válaszok egy spektrumból egyszerűen kiolvashatók. Éppen ezért költséghatékony, ugyanis az eljárás lehetővé teszi a gyors és gazdaságos előzetes analízist, különösen akkor, ha a szerkezet számos rezgési módusát kell figyelembe venni, és nincs szükség minden egyes időbeli változás számítására.

A válaszspektrum-analízis egyszerű alkalmazása különösen hasznos nagy épületek vagy komplex rendszerek esetén, ahol a részletes dinamikai vizsgálathoz, számos módus és időbeli viselkedés analízisére van szükség. [19]

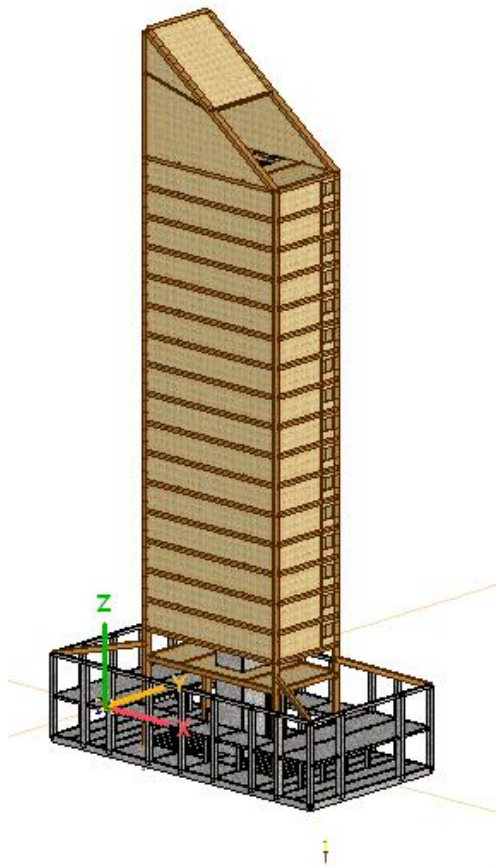
4. Tervezendő fa felhőkarcoló bemutatása

Fontos volt, hogy a megálmodott felhőkarcoló teljesen új kialakítású legyen, és hogy mindenképpen fából készüljön a lehető legtöbb eleme, hiszen az egyik cél a környezettudatosabb szerkezet kialakítása, amivel a széndioxid kibocsátási mutató csökkenthető. Az is fontos szempont volt a kutatás és tervezés során, hogy Magyarországon még nem készült ilyen szerkezet, így a kevés külföldi tapasztalatokat kellett figyelembe venni a kialakítás során.

Maga az épület (4. ábra), 20x40 méter, a torony pedig 10x20 méter alapterületű, legmagasabb pontján, 85 méter, rétegelt-ragasztott fából készült pillérek és gerendák által készített vázas szerkezetű épület.

A fő tartószerkezet GL24C (Glued Laminated a GL, tehát rétegragasztásra, a 24 a hajlítószilárdság N/mm²-ben kifejezve, míg a „C” a kombinált lamellafelépítésre utal).

Ilyesfajta tartószerkezetű épület esetében elengedhetetlen az a fajta követelmény teljesítése, hogy állandó, mindenféle fahibáktól mentes anyag épüljön be. Ezért is jó választás a rétegelt-ragasztott fa, amely az anyaggal szemben támasztott elvárások miatt, több vizsgálaton is keresztül megy, mire beépül. Ezzel is biztosítva a minőséget.

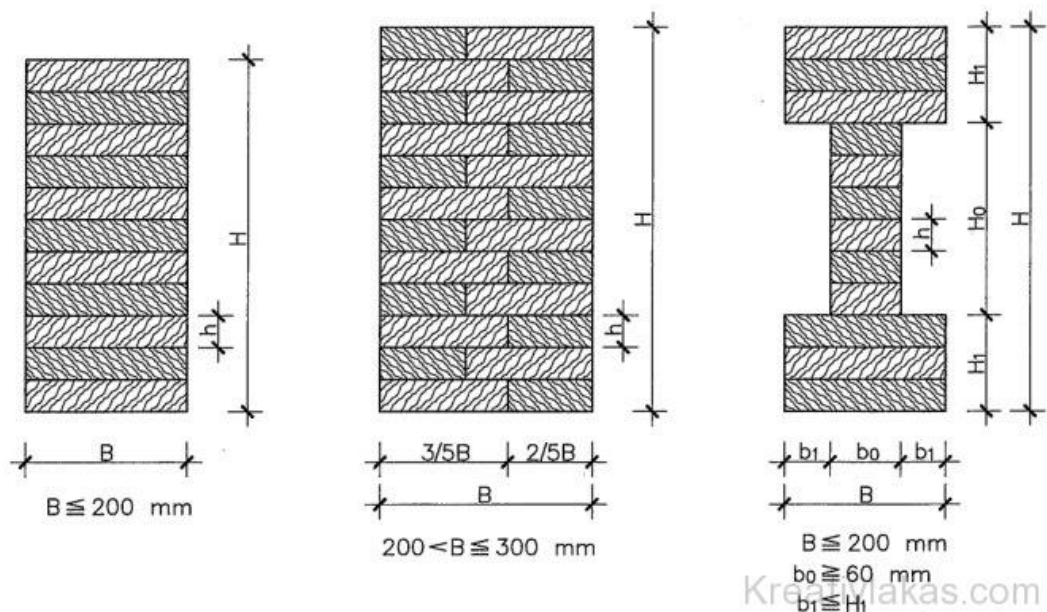


4. ábra: Felhőkarcoló látványterve

4.1. Rétegelt-ragasztott fa

4.1.1. A Rétegelt-ragasztott fa tulajdonságai

Rétegelt-ragasztott fáról (5. ábra) akkor beszélhetünk, ha legalább 3 réteg, egymással párhuzamos rostirányban vannak összeragasztva. Ez a ragasztó lehet műgyanta bázisú is. Ékcsapos toldással biztosítják, a kívánt hossz elérését. Így jóval nagyobb keresztmetszetű elemek is kialakíthatók, akár változó, íves vagy különleges vonalvezetésű is. Emiatt is váltak ezek a szerkezetek nagy fesztávolságú, szabadon megformált terek építésénél kedvelt elemmé. Itthon döntően lucfenyőt használnak. [20]



5. ábra: Rétegelt-ragasztott keresztmetszetek 3 kialakítási módja [20]

A fa legjobb mechanikai tulajdonságait egyesíti, minimális zsugorodással és torzulással rendelkezik a ragasztott rétegek miatt. Homogén szerkezetűek, jobban terhelhetőek a hagyományos fűrészárukhoz képest, emiatt kevésbé hajlamosak repedésre vagy deformálásra.

Kivitelezési szempontból is könnyen kezelhető az anyag, ugyanis egyszerűen csavarozható, fűrészelt vagy ragasztható. Az előre gyártott paneleknek köszönhetően gyorsabb és hatékonyabb építkezés érhető el. Természetesen nem elhanyagolható a gyártási folyamat során pontosan elkészített elemek, az építkezés során minimális hulladékkal építhető be.

Fontos kérdés a faszerkezeteknél a tűzvédelem. A rétegelt szerkezet lelassítja az égés folyamatát, mivel a fa felülete a tűz hatására "kéregként" megég, így védve a belső rétegeket. Az alapanyagot (fenyőfélék, melyek beégési sebessége 0,6-0,8 mm/perc)

tűzvédelmi kezelésekkel (pl. tűzálló festékek, impregnálószer) is ellátják, a lamellák között is, amelyek növelik az éghetőségi ellenállást (R120-as besorolás elérhető). Ezen felül, a teljes szerkezet az épület belső felületén tűzálló réteg (gipszkarton) borítást kap. Alacsony környezeti terhelés jellemzi. Ez azt jelenti, hogy az elemek gyártása során alacsonyabb szén-dioxid kibocsátás keletkezik, mint a hagyományos építőanyagok, például a beton vagy az acél előállításánál. A faanyagok gyártásához szükséges energia kisebb. A faanyagok ugyanis megújuló forrást jelentenek, és a rétegelt-ragasztott fa gyártása során használt faanyagok sok esetben a fenntartható erdőgazdálkodásból származnak, így a természetes erdők megőrzése mellett csökkenthetők a környezeti hatások. A karbonlábnyom csökkentéséhez is hozzájárul. Az elemek szén-dioxidot tárolnak, ami hozzájárul a globális felmelegedés csökkentéséhez. A faanyagok megkötik a szén-dioxidot, miközben az építkezés során hosszú távon tárolják azt, amíg az épület fennáll. [21]

4.2. CLT panel

A kitöltő falazat, illetve a födémek CLT (cross-laminated timber) panelekből (6. ábra) állnak. Több egymásra merőlegesen elforgatott fenyő lamella rétegből összeragasztott tömörfa panel. Az elforgatott rétegeknek köszönhetően az így létrejött újfajta alapanyag mérettartó, rendkívül erős, de mégis ~95%-ban természetes fa.



(Fotó: MM Holz)

6. ábra: CLT panel [22]

A keresztben ragasztott rétegeknek köszönhetően (lehet 3-5-7 rétegű, födémeknél 20 cm vastagság az elfogadott) a CLT panelek rendkívül stabilak és erősek, miközben könnyebbek a hagyományos beton vagy acél szerkezeteknél. Kiváló mechanikai tulajdonságokkal rendelkeznek, így nagyobb terheket is képesek elviselni, mint más

faalapú építőanyagok. Mivel ebben az esetben is előregyártott elemről beszélünk, a helyszínen történő szerelés gyorsabb, hatékonyabb és kevesebb hulladékot eredményez. A panelrétegek közötti ragasztás biztosítja az anyag tartósságát és stabilitását, miközben könnyen méretezhető és alakítható.

Nagy előnye, a szilárdsági tulajdonságai mellett, a fenntarthatóság, ahogy a rétegelt-ragasztott fa elemeknél, ebben az esetben is az alapanyag az erdőgazdálkodásból származik.

A fából készült építőanyag hozzájárul a klímaváltozás elleni küzdelemhez. A panelek gyártása és szállítása alacsonyabb szén-dioxid-kibocsátással jár, mint a hagyományos építőanyagoké, például a beton vagy az acél.

Az épület belső akusztikai tulajdonságai is javulnak, mivel a fa képes elnyelni a hanghullámokat (44 dB, amely szint már a hangos beszéd érthetőségét jelenti, tehát ezt már nem lehet tisztán kihallani), csökkentve ezzel a zajszennyezést. Hőszigetelés szemszögéből ($U=0,144$) egy 30-as téglafal tulajdonságaival vetekszik a szerkezet.

Tűzvédelmi szempontból, ugyanazok a tulajdonságok vonatkoznak rá, mint a rétegelt-ragasztott társaira, különböző felületkezelés után az előírt (R120) szabványt tudja teljesíteni maradéktalanul. [22]

4.3. Napelem-, szélérőmű rendszer

Az épület kialakításának fő szempontja a környezettudatosság volt. Ez egyértelműen jelenti azt, hogy megújuló energiaforrásokhoz kellett fordulni, ahol lehetőség nyílt rá. Így a ferde tetőszerkezeten napelem rendszer (18. kép) kerül telepítésre, míg a zárófödémén vertikális szélérőmű (19. kép) található. A tetőszerkezet kialakítása egyfajta „sikátor” jellegű, ezáltal garantálva a szél, mint energiaforrás, folyamatos biztosítását.



18. kép: Tetőszerkezeten elhelyezkedő napelemrendszer [23]



19. kép: Zárófödémén található vertikális szélérőmű [24]

Mivel az alapelképzelés az önfenntartó rendszer kialakítása, így a teljes függetlenség kialakítása volt a cél. Ezt a későbbiekben azzal lehet elérni, ha a vízellátást fűrt kutakkal, illetve, ha lehetséges a fűtést akár geotermikus megoldással is biztosítható lehet. Ezek az önfenntartó rendszerek csak említés szintjén jelennek meg a dolgozatban (hiszen terület specifikusak is), részletezve a napelem rendszer és a szélérőművek lesznek, hiszen azok teherként jelennek meg a tartószerkezeten.

Az egyik fő energiaforrás a napelem rendszer. Egyfajta hibrid rendszer alkalmazása látható ennél az épületnél. A napelemek termelnek áramot közvetlen a hálózatra, illetve energiatárolóba, akkumulátorokba is. Ez az On-grid és Off-grid rendszer ötvözése, on-grid az egyből a hálózatra, az off-grid pedig akkumulátorokba termeli az áramot. Így tárolja is egy részét a megtermelt mennyiségnek, amelyet később fel tud használni. [23]

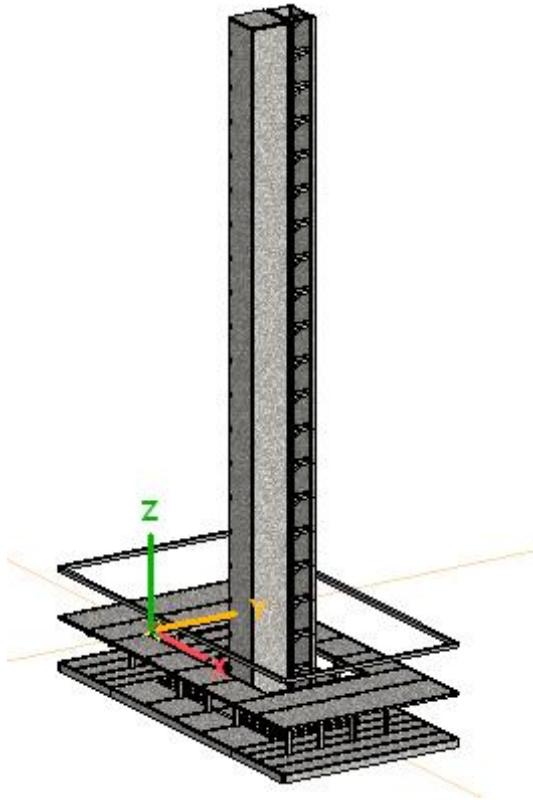
A másik fő forrás a szél energiája, amelyet vertikális szélérőmű hasznosít. A vertikális tengelyű szélérőművek (itt fontos megjegyezni, hogy magyar tudós innovációjának hála, Dr. Györgyi Viktor fejlesztette ki az első függőleges tengelyű szélérőművet) nem függenek a szél irányától, mivel a rotorlapátok minden irányban képesek forogni. Ezáltal stabilabb működést biztosítanak viharos, változékony szélviszonyok között is. A rotor tengelye függőlegesen helyezkedik el, és az energia a rotorlapátok felületén keletkező aerodinamikai erőkből származik.[24]

Itt is tároljuk az energiát, ugyanaz az elképzelés, mint a napelemrendszerénél. Fontos megjegyezni, itt inkább tárolásra termelünk, ugyanis ez a másodlagos energiaforrás.

Mindkét rendszerénél kiemelhető az egyik legnagyobb előnyük, nincs lég-víz és zajszennyezés, mivel csendes rendszerekről beszélünk.

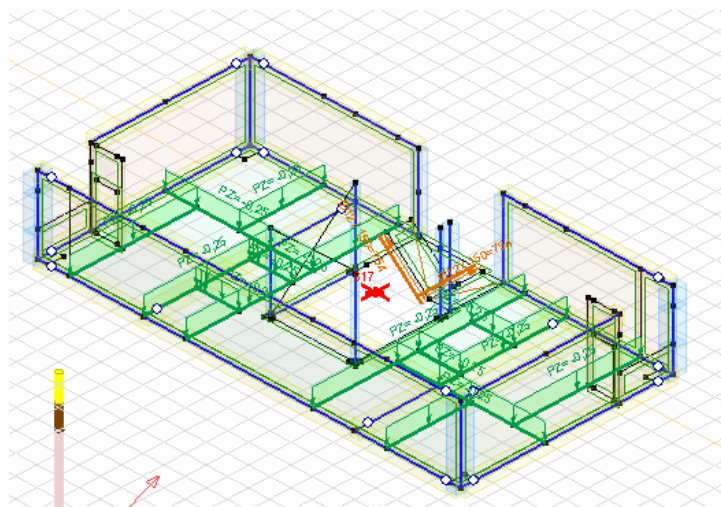
4.4. A torony bemutatása

Az épület merevítését, a belső magot a liftakna, illetve a mellette található vasbeton lépcsőház biztosítja (7. ábra).



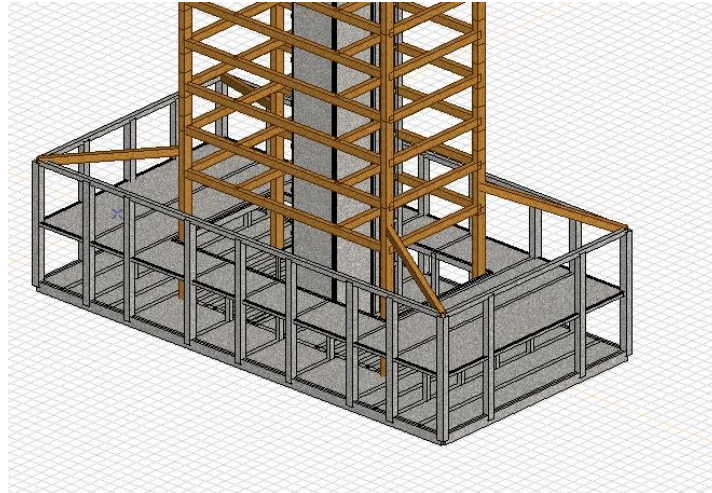
7. ábra: Belső mag szerkezete

A torony épületben, csak és kizárólag lakások (8. ábra) találhatóak, illetve alsó szinten egy porta szolgálat, gyülekező. Minden szinten 2 lakás, amely egyenként közel 70 m²-esek, illetve erkéllyel rendelkeznek. Válaszfalakat, a képen jól látható módon, vonalmenti teherrel vettem fel.



8. ábra: Általános szinten, 2 lakás kialakítása

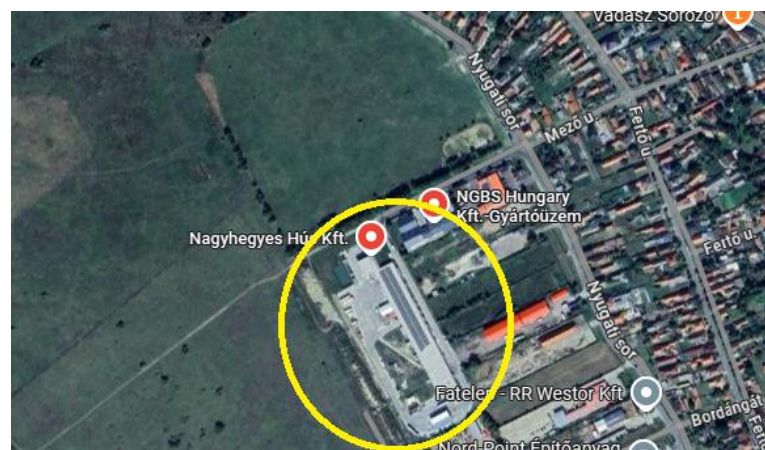
Az alsó vasbeton (9. ábra) szint pedig üzletként, illetve szabadidőközpontként funkcionál majd. Ez 10 méter magas és 4 sarkából egy-egy rétegelt-ragasztott fatartógerenda kötődik a toronyhoz, melyeken későbbiekben üvegtető lesz majd elhelyezve.



9. ábra: Alsó vasbeton szabadidő központ és összekötő gerenda

5. Helyszín ismertetése

A toronyház egy valós területen, ám fiktív módon kerül megtervezésre, ami Hajdúszoboszló DNY-i részén fekszik, a 0345/111 helyrajzszámom (20. kép). Jelenleg egy vágóhid taláható rajta. A környező telken jellemzően lakóépületek, kisebb csarnoképületek helyezkednek el. A terület közepesen beépített.



20. kép: Helyszínrajz [25]

A felszínen átlagosan 40 cm-es vastagságban barnásszürke agyag réteg, alatta, 2 méteres mélységig kemény konzisztenciájú meszes iszapot találtunk. Ezt követően merev közepes-kövé-, majd pedig a fúrás minta alsó rétegében, gyúrható sovány agyag fellelhető. A felső iszap réteg alacsony víztartalom mellett kedvező teherbírású, viszont

az alatta található, közepes-kövérgyag, igen nagy térfogatváltozó tulajdonságokkal rendelkezik. [26]

Fontos az alapozási síkot a jelenlegi terepszinttől minimum 1,5 méter mélységig levinni, mert a szezonális meteorológia viszonyok nedvességtartalma jelentősen befolyásolhatja, ezért ezt a fajta függést le kell redukálni minimálisra. A hidrológiai információk alapján, a neutrális szint (talajvíz állandó szintje) -1,6 méter. A feltárás előtt, a felszínen repedések voltak láthatóak, melyek akár 1,5 méter mélységig is lehatolhatnak. Ez azért is fontos számunkra, mert csapadékosabb időszakban, ezek a repedések alján felgyülemelő víz hatására átázik az altalaj, belső nyírási ellenállása lecsökken. [26]

A talaj típusa a csapadékvíz-elvezetés szempontjából is igen jelentős, ugyanis szikkasztó árok nem alakítható ki. Minél jobban vissza kell szorítani a talaj víztartalmának változásait, éppen ezért zárt elvezető rendszert kell alkalmazni a kötéseknél, illetve a csőanyagnak kellően vízzárónak kell lennie.

Szeizmicitás szempontjából 2. tervezési zónába (horizontális gyorsulása az alapkőzetnek $0,981 \text{ m/s}^2$), illetve a feltárt minták alapján „D” talaj osztályba soroljuk. [26]

A tervezett épület egyik lehetséges alapozási módja a fa vert cölöpös technológia, de ennek részletes statikai számítása és ezáltal megfelelőségének bizonyítása nem témája dolgozatunknak.

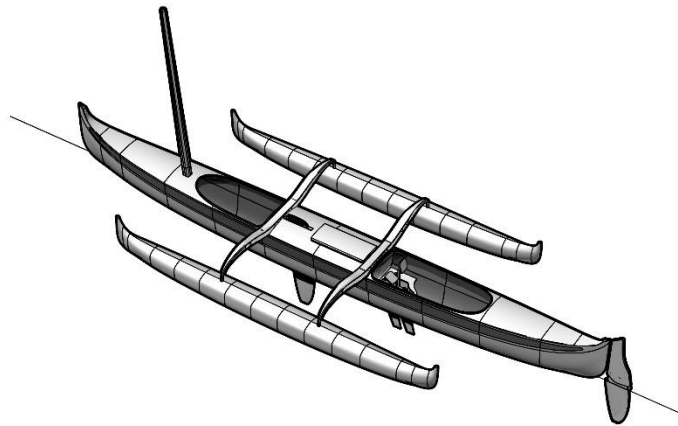
6. Épület merevítése

Az épület stabilitása mindig fontos kérdés, főleg egy ilyen, karcsú, magas szerkezetnél. Erre kétféle megoldást alakítottam ki, amelyek között végül a gazdaságosság döntött.

Mivel a toronyház 85 méter magas, így egyértelműen kirajzolódott, hogy a belső mag kialakítása elégnek bizonyulhat. Viszont az extrém időjárási viszonyok, a szélhatás vagy éppen a földrengéssel szembeni ellenálló képesség miatt, egy másik módszert is meg kellett vizsgálni.

6.1. Outrigger

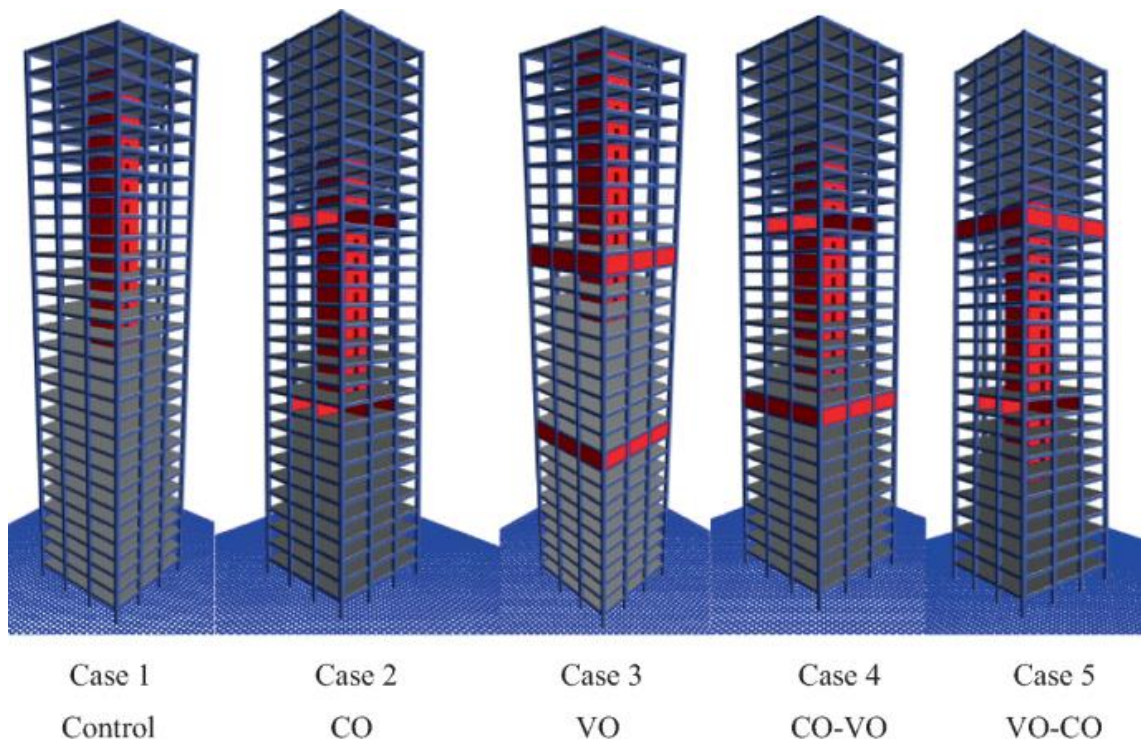
Ez a fajta kialakítás a 100 méter magasságot meghaladó épületeknél alkalmazandó, ám ebben az esetben, mivel a szerkezet többségében fából tervezett, indokoltnak tekinthető. Az alap elképzelést egy kajaktípus adta (21. kép), amely úgy őrzi meg stabilitását, hogy a fő részhez (a kajakhoz) csatlakoztatnak egyensúlyozó, segédúszókat. A legkönnyebb hasonlat a pótkerék lehet, amit a biciklihez rögzítünk, ezzel is segítve az egyensúlyi állapot megőrzését. [27]



21. kép: outrigger kajak [27]

Az elméleti háttérrel felhasználva alakították ki tehát ezt a fajta épület merevítést.

Ilyenkor bizonyos szintenként, mint a 1. ábra mutatja, a teljes alaprajzi méretben födémet öntenek, vagy készítenek (pl. acél szelvényekkel, sűrűbordás födémet alakítanak ki).



10. ábra: Az 1. ábrán a belső magos verzió, majd pedig az outrigger különböző kialakításai láthatóak [28]

Lehet harántfalas, vagy monolit födém, ilyenkor egyben jelentős konzolokról is beszélünk.

Nagy hátránya, a fentebb említett kialakításnak is köszönhetően, a nagy igénybevételek, nagy nyomatékok keletkezése. Gyakorlatilag ezzel együtt a keresztmetszeti méretek is növekednek, ezzel együtt az épület súlya is lineárisan emelkedik, így egyértelműen drágább szerkezeti kialakítást kapunk. [28]

Egy egyszerű közelítő számítással is könnyen belátható.

- $L/250$ a megengedett lehajlás, ami nem annyira szigorú feltétel. Ez 3,2 cm-t eredményez.
- $L/15$ a szelvény mérete, ami legalább 50 cm vastag vasbetonlemez jelent.
- Átlagosan, egy erős betonacél mennyiséggel közel 9 tonna (8904 kg) kerül egy ilyen konzolos szintre, ami, ha összeadjuk az értékeket, tehát a 1 m^3 beton fajsúlyát is idevetve, több mint 200 tonnát jelent!

6.2. Belső merevítő mag

A fentebb leírt számolást folytatva nézzük, ha csak is belső magot alakítunk ki, ebben az esetben a liftaknát és a lépcsőházat jelentené, mennyivel kapunk könnyebb ezáltal gazdaságosabb szerkezetet.

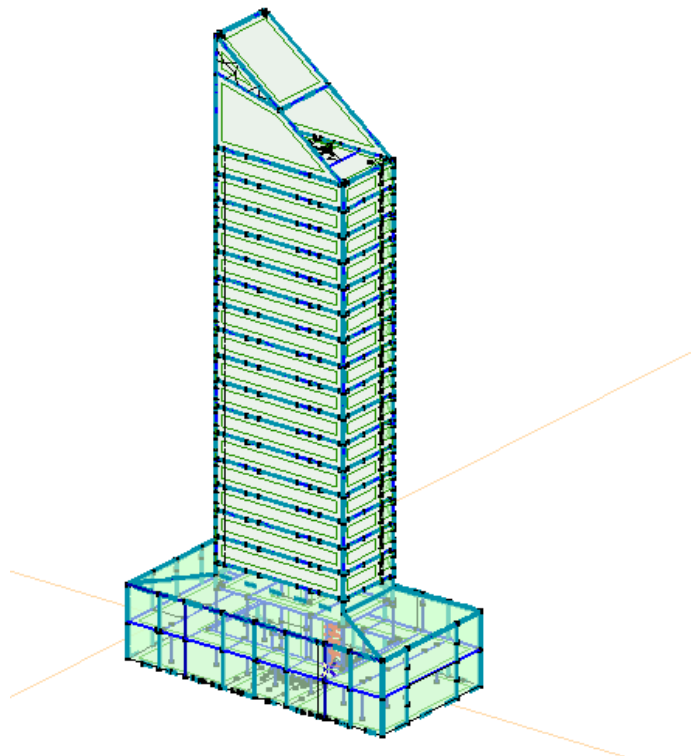
- Nem kell a teljes alaprajzi felületen számolnunk betonmennyiséggel, ez köbméterenként 2400 kg-ot jelent
- Ugyanehhez hozzáadódna a betonacél súly is, ami további plusz 100 kg egységenként
- A CLT panel, födémként funkcionálva, 20 cm-es vastagságával kellően teherbíró, így csaknem felére csökkentettük a keresztmetszeti méreteket, tehát még helytakarékosabban is tudunk tervezni
- Egyfajta ökol szabályként alkalmazandó ilyen magas épületeknél, amennyiben 100 méter alatt van a tervezett magasság és nem rendelkezünk extrém geometriai kialakításokkal, merész mérnöki elgondolásokkal, a belső magos merevítő megoldás elégnek bizonyulhat. Ebben az esetben minden pontban megfeleltünk a kritériumoknak, így egyértelmű melyik kialakítást választottuk.

7. Statikai méretezés

A vizsgálat folyamán az Eurocode 1: A tartószerkezeteket érő hatások (MSZ EN 1991) [29], Eurocode 2: Betonszerkezetek tervezése, Általános és az épületekre vonatkozó szabályok (MSZ EN 1992) [30], az Eurocode 5: Faserkezetek tervezése (MSZ EN 1995)

[31], az Eurocode 8: Tartószerkezetek tervezése földrengésre (MSZ EN 1998) [32], illetve az AXIS VM X7 hallgatói változatát vettem segítségül.

Ebben a fejezetben bemutatom a statikai méretezés folyamatát, beleértve a földrengés számítás menetének, illetve a fa optimalizáció számításának az ismertetését. Első lépésben felvesszük a geometriát (11. ábra). Ez a mozzanat mérnöki intuíciót feltételez, elvégre is itt döntjük el, hova milyen kapcsolatot, milyen alapozás típust, feltételezett szelvényméreteket kívánunk betervezni. Az épület hierarchiáját is ekkor alakítjuk ki.

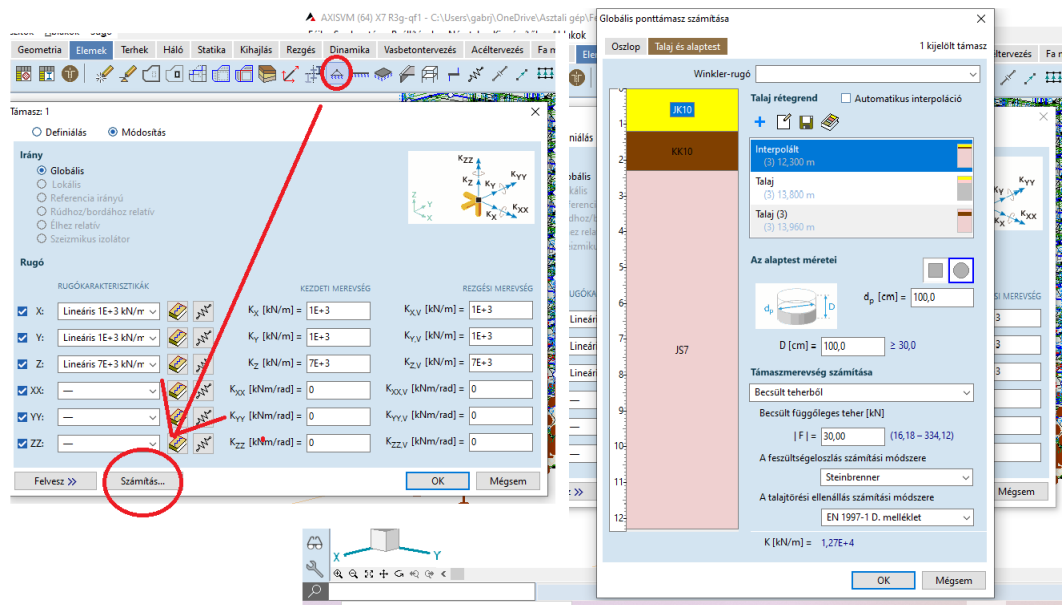


11. ábra: Geometriai modell felvétele

7.1. Geometria kialakítása, szelvény meghatározás, teher felvétel

Látható a csomóponti támaszoknál, hogy x, y, z irányú erők hathatnak rájuk. Az Axis program segítségünkre van, amennyiben nem tudjuk meghatározni, milyen rugóállandókat vegyünk fel, csomóponti támasz értékekhez, ugyanis amennyiben megadjuk a talaj típusát, a hozzájuk tartozó geofizikai tulajdonságokkal, melyet a talajvizsgálati jelentésből könnyedén kinyerhetünk, illetve egy feltételezett alaptest geometriáját is betápláljuk és azt, hogy süllyedésből vagy becsült teherből (amiknek a határértékét szintén mi adhatjuk meg) akkor kiadja a számunkra közel megfelelő értéket (12. ábra). Azért írtam így, hogy közel megfelelő, mert előfordulhat, hogy párszor kell

majd iterálunk, hogy egy csomópontra jutó erő, vagy éppen a süllyedés megfelelő legyen. Talán egyfajta ökölszabályként leírhatjuk, hogy az 5000-10000 kN/m értéknél, ha kisebb nagyon puha, ha nagyobb, merev talajról beszélhetünk. Továbbá még szintén segítségünkre lehet az a szintén mérnöki gondolkodásmódot feltételező elképzelés, miszerint a szélső mezőkben 1,6, a belsőkben 0,8, míg az épület sarkaiban akár 2 vagy 4-szeres szorzót is felvehetünk. Ezzel is segítve az egyenlőtlen süllyedések és az esetlegesen egy csomópontra jutó terhek kiegyenlítését.



12. ábra: Csomóponti támasz rugóállandó meghatározása

A rugóállandó, ágyazási tényezők megadása azért is fontos, mert azt feltételezzük, hogy a talaj, az épület alatt egyfajta rugóként viselkedik (Winkler-rugó).

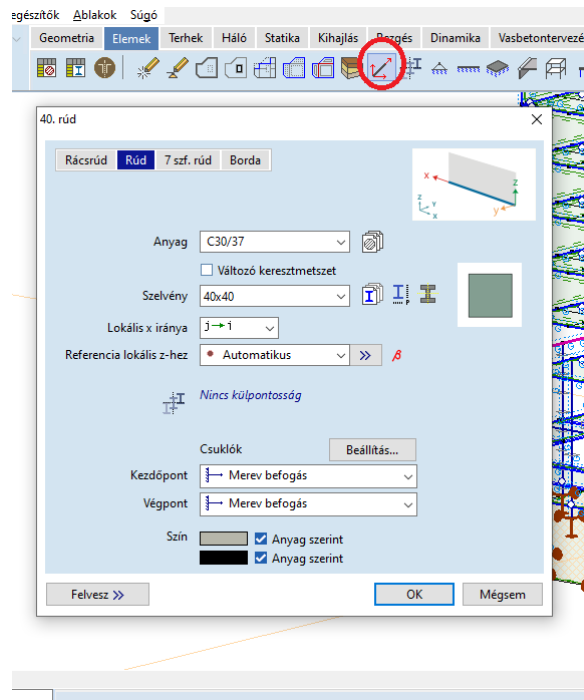
A vonalelemek (13. ábra), illetve tartományok meghatározása (itt a szelvényméret, csuklás, vagy merev kapcsolati kialakításra gondolok, referencia irány, definiálni, hogy rúd vagy esetleg borda) következik. Célszerű elővenni a tapasztalati becslések arányszámait, ($L/250$, $L/300$ stb...) illetve a gyakorlati tapasztalatokat és ezek alapján megsaccolni mire is lesz szükségünk a tervezett terhek ellensúlyozására.

A tartományt is hasonlóképpen tudjuk megadni. Célszerű minden beállítás után 3D-s verzióban is megnézni modellünket, így az esetleges beállítási hibákat észrevehetjük.

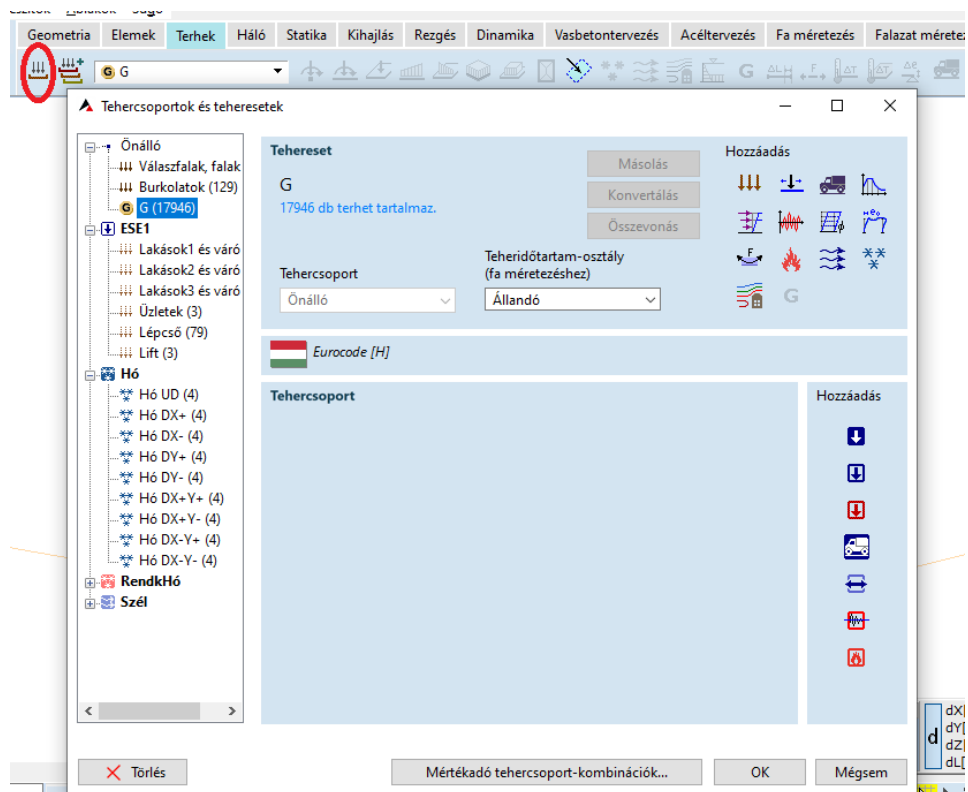
A következő lépés a szabadsági fokok beállítása, amelyet később automatikusan a program is felajánl nekünk a statikai számítás előtt.

A terhek felvétele (14. ábra), teherkombinációk létrehozása következik. Ilyen épület esetében a domináns a szélteher és a földrengés teher. Ha valamiféle modellezési hiba

miatt nagy lehajlást tapasztalunk az egyes födémeken, akkor lehet az önsúly, de azt viszonylag könnyen tudjuk orvosolni egy-egy plusz támasszal.



13. ábra: Szelvénymeghatározás beállításai



14. ábra: Teherfelvétel

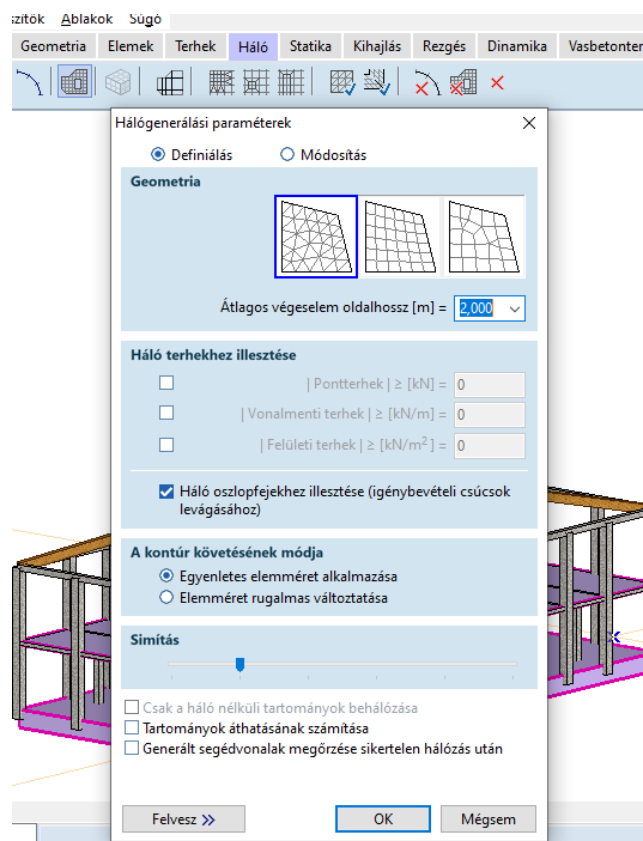
Az állandó (önsúly, válaszfalak, burkolat), az esetleges (pl. a különböző lakások vagy lift terhelési esetei), a hó és a szélteher generálása mellett, létre kellett hozni egy hózug terhet is, ugyanis a torony és az üvegtető kialakítása ezt igényelte.

Teherpaneleket kell létrehozni, ahol ki lehet választani, hogy a panel alatt melyik szerkezeti elemet terhelje az adott terhelés típus, a szél és hóteher.

7.2. Végeselem hálókra osztás, statikai számítás

Ha felvettük a terheket, akkor fel kell osztani végeselemekre (15. ábra) (ha kihagyjuk akkor a program ezt is felajánlja a statikai számítás előtt) a szerkezetet a háló generálás segítségével. Ezzel azt érjük el, hogy a program felosztja kisebb részekre, tartományokra az elemeket és a csomópontokban vizsgálja a komplett szerkezetet.

Célszerű első körben, egy ekkora modellnél, nagyobbra venni az egyes végeselem oldalhosszakat, ezzel is felgyorsítjuk a számítást. Jelen esetben én 2 méteresre állítottam be.



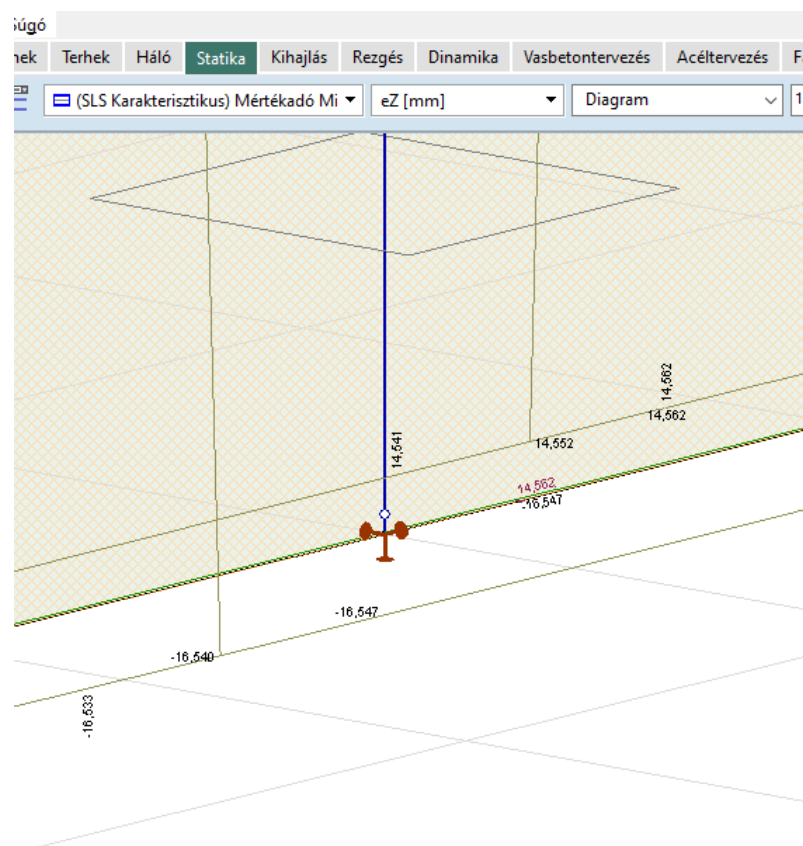
15. ábra: Háló generálása

A statika fülre érve a modellmentés után, el is lehet indítani a számításokat. A program létrehoz mátrixokat (pl. geometriai, merevségi) és azok alapján számolja ki az

ismeretleneket. Számomra fontos volt, hogy 1-2 centiméter közé essen a süllyedés átlagban, amit sikerült elérni.

7.3. Eredmények kiértékelése, vasalás tervezése

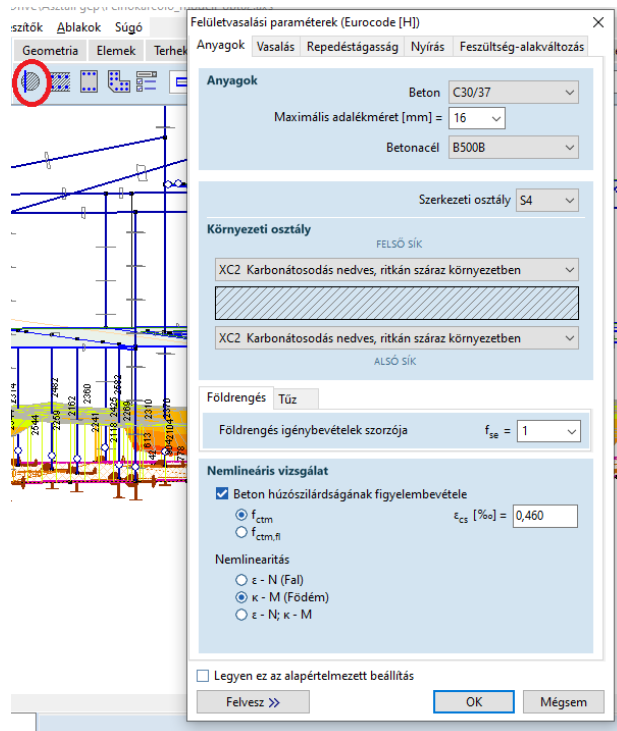
A süllyedés értékeit az SLS (használatosági határállapot) karakterisztikus értékeknél az „e_z”, tehát a „z” irányú mozgásoknál lehet megtalálni. A képen (16. ábra) látható csomópontra ható erő közel -116 kN, ami Y irányú szélnyomás esetén keletkezik. Ugyanebben a csomópontban egy 101 kN mértékű reakcióerő is található, ami az ezzel ellentétes oldalon lévő szélnyomás miatt itt keletkező szélszívás következtében alakul ki.



16. ábra: Süllyedés alakulása

Az eredmények kiértékelése után jön a vasbetonszerkezeti rész tervezése (17. ábra). Itt a mértékadó kombináció továbbra is az SLS állapot lesz.

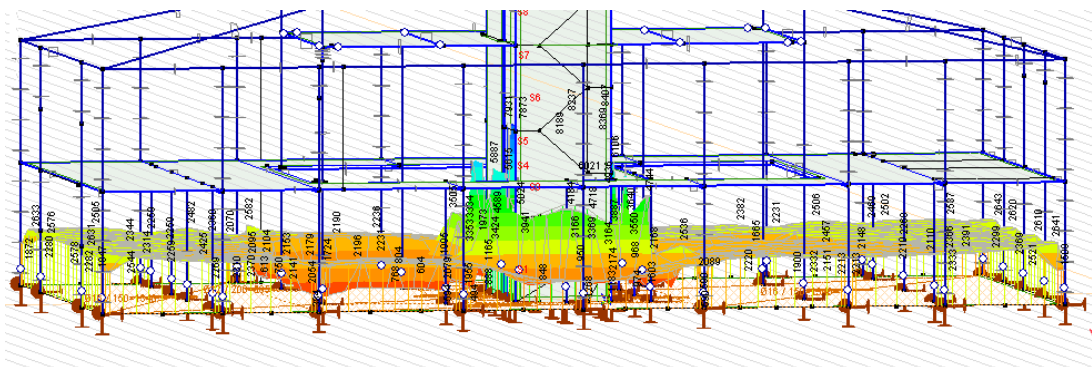
A vasbetontervezés fülre kattintva, a vasalási paramétereknél (pirossal bekarikázva) megadhatjuk a beton típusát, milyen környezeti kitéti osztályba soroljuk, vagy éppen a szerkezet fajtáját, ami jelen esetben födém. A betonacél típusa, fő vasalási irány, illetve teherhordás, egy-vagy kétirányú legyen. Habár ennél a geometriánál az egyirányú is megfelelne, ugyanis az oldalak aránya lehetővé teszi azt, de a kétirányban teherhordó kialakítás, a szerkezet stabilitását segíti elő, így ezt célszerű választani.



17. ábra: Vasalási paraméterek

Ebben a pontban tudjuk megvizsgálni a repedéstágasságot is, ami megmutatja nekünk, hogy szükségünk van-e még az adott keresztmetszetben plusz vasalásra. Szintén hasznos funkció a vasalási különbözet, ami folyamatosan közli nekünk, hogy még az adott pontban mennyi (mm²/m) acélra van szükségünk.

A 18. ábra mutatja szintvonalakkal, a vasalás megfelelőségét. Egy színskála van még segítségünk, ami szintén prezentálja számunkra, hol vannak kritikus pontok a szerkezetünkben, ezzel is jelentősen segítve tervezésünket. [30]



18. ábra: Szintvonalak 3D-ben vasalástervezésnél

7.4. A fa szerkezeti elemek méretezés

Első lépés a szelvények meghatározása. A főtartó pillérek keresztmetszetét felül becsültem, 100x150 cm a torony sarokpontjaiban, a torony és a vasbeton épületet összekötő gerendák 45x60, míg a CLT panel alatti tartógerendák 80x80 cm-esek lettek. Magyarországon jellemzően lucfenyőt használnak egy ilyen szerkezet kialakításához, amelyet mindenféle hibás résztől (pl. göcs) megszabadítanak, majd fűrészfogas hossztoldással a megfelelő méret eléréséig összeragasztanak, többségében műgyanta bázisú anyaggal. Mint már korábban említésre került, minimum 3 réteg lamella egymáshoz ragasztása után beszélhetünk rétegelt-ragasztott fa termékről.

A keresztmetszet kiválasztása után a szilárdsági paraméterek (1. táblázat) meghatározása következett. Az első oszlopban az igénybevételek, merevségi faktorok, sűrűség és módosító tényezők állnak, majd jelölésük és értékeik, levetítve a különböző típusokra. Fa termék esetében (például az $f_{c,90,d}$) az első index (c) az igénybevétel típusára utal – ez a jelölés, ha hajlító „m”, húzó „t”, nyomó „c”, nyíró „v”- a második a feszültség iránya és a rost iránya által bezárt szög, a harmadik pedig hogy tervezési (d) vagy karakterisztikus (k) értékről beszélünk. Mindig nagyobbnak, kell lenni a keletkező feszültséghez képest. Természetesen egyfajta hierarchiát kialakítunk a szerkezetek esetében a teheridőtartam szintjén (2. táblázat) is, ugyanis nem mindegy, hogy állandó – mint az önsúly – vagy közepes időtartamú lesz a terhelés, ilyen esetben mondjuk egy hasznos teherről beszélhetünk.

	Homogén rétegelt-ragasztott fa				Kombinált rétegelt-ragasztott fa				
	GL24h	GL28h	GL32h	GL36h	GL24c	GL28c	GL32c	GL36c	
Szilárdsági tulajdonságok [N/mm ²]									
Hajlítás	$f_{m,g,k}$	24	28	32	36	24	28	32	36
Rostlirányú húzás	$f_{t,0,g,k}$	16,5	19,5	22,5	26	14	16,5	19,5	22,5
Rostlirányra merőleges húzás	$f_{t,90,g,k}$	0,4	0,45	0,5	0,6	0,35	0,4	0,45	0,5
Rostlirányú nyomás	$f_{c,0,g,k}$	24	26,5	29	31	21	24	26,5	29
Rostlirányra merőleges nyomás	$f_{c,90,g,k}$	2,7	3	3,3	3,6	2,4	2,7	3	3,3
Nyírás	$f_{v,g,k}$	2,7	3,2	3,8	4,3	2,2	2,7	3,2	3,8
Merevségi tulajdonságok [kN/mm ²]									
A rostlirányú rugalmassági modulus középértéke	$E_{0,g,mean}$	11,6	12,6	13,7	14,7	11,6	12,6	13,7	14,7
A rostlirányú rugalmassági modulus 5%-os kvantilise	$E_{0,g,05}$	9,4	10,2	11,1	11,9	9,4	10,2	11,1	11,9
A rostlirányra merőleges rugalmassági modulus középértéke	$E_{90,g,mean}$	0,39	0,42	0,46	0,49	0,32	0,39	0,42	0,46
A nyírási rugalmassági modulus középértéke	$G_{g,mean}$	0,72	0,78	0,85	0,91	0,59	0,72	0,78	0,85
Sűrűség [kg/m ³]									
A sűrűség alsó 5%-os kvantilise	$\rho_{g,k}$	380	410	430	450	350	380	410	430
Stabilitási anyagjellemzők [-]									
Kihajlásvizsgálatnál a k_c tényező számításához	λ_E	62,2	61,6	61,5	61,6	66,5	64,8	64,3	63,6
Kifordulásvizsgálatnál a k_{crit} tényező számításához	$\lambda_{E,m}$	17,5	17,1	16,7	16,3	16,9	16,8	16,4	16
Példák a lamellák szilárdsági osztályaira		C24	C30	C40		C24 C18	C30 C24	C40 C30	

1. táblázat: Szilárdsági osztály RRfa szerkezeteknél [33]

Faanyag		Felhasználási osztály	A teheridőtartam osztályai				
			állandó	hosszú időtartamú	közepes időtartamú	rövid időtartamú	pillanatnyi
Természetes faanyag, rétegelt-ragasztott fa, LVL termékek, és rétegelt lemezek		1	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10
		2	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10
		3	0,50	0,55	0,65	0,70	0,90
OSB lapok	OSB/2	1	0,30	0,45	0,65	0,85	1,10
	OSB/3, OSB/4	1	0,40	0,50	0,70	0,90	1,10
	OSB/3, OSB/4	2	0,30	0,45	0,50	0,70	0,90

2. táblázat: k_{mod} módosító tényezők [33]

A faszervezetek esetében, hatványozottan fontos szerepet játszik a későbbi feltételezett környezeti kitettség. Ugyanis nem mindegy, hogy milyen a páratartalom. A vetemedés egyik fő oka, a vízfelvételkor duzzadás, majd kiszáradás, aminek az időbeli lefutása lehet gyors, így nem lesz ideje az anyagnak a feszültségek relaxációjára sem. A rétegelt-ragasztott szerkezetek esetében 12% lehet az egyensúlyi nedvességtartalma a beépített anyagnak, ezzel a kritériummal pedig sikerül elérni azt, hogy az alakváltozások kiegyenlítődnek és a vetemedés elleni is védjük a szerkezetet.

A táblázatból (3. táblázat) felvesszük a rétegelt-ragasztott fára vonatkozó parciális értéket, ami 1,25.

Alapkombinációk esetén:	
Szerkezeti (természetes) fa:	1,30
Rétegelt-ragasztott fa:	1,25
LVL termékek, rétegelt lemezek:	1,20
OSB lapok:	1,20
Faforgácslemezek:	1,30
Farostlemezek, MDF lapok:	1,30
Kapcsolatok:	1,30
Szeglemezek:	1,25
Rendkívüli kombinációk esetén:	1,00

3. táblázat: Parciális tényezők [33]

A szerkezet 3 különböző típusú elemből tevődik össze az épület fatervezés szempontjából. A főtartó, a kis és nagy összekötő gerendák. Értelmszerűen ugyanennyi különféle szelvényméretről is beszélhetünk. A főtartó erőtani szempontból jellemzően nyomásnak, húzásnak van kitéve. A szélhatások következtében még beszélhetünk csavarásról is. Könnyű elképzelni, amennyiben a torony egyik felületét szélnyomásnak

tesszük ki, a másik oldalon húzás keletkezik a szerkezetben. További evidenciának bizonyul az is, hogy a maga 85 méteres magasságával, geometriai kialakításától függően persze (inercia), karcsú szerkezetnek tekinthetjük. Így kihajlással számolni kell a későbbiekben.

Nyomás esetében a már jól ismert F/A összefüggéssel számolhatunk feszültséget. A rostiránnyal megegyezően és vele 90° -al elforgatott esetben kell figyelembe venni. Fontos még, hogy hatékony felületet kell megadni, természetesen az F , ebben az esetben is, a merőleges nyomóerőt jelenti. Ezt a számítást szokták pecsétnyomás számításnak is nevezni. Húzás esetén a táblázatból kinyert adatok segítségével és az elemre ható húzófeszültségi érték ismeretében tudunk gyors összehasonlítást végezni. A hajlítás vizsgálatnál szükségünk van a főtengelyek körüli hajlításból származó normálfeszültségek tervezési értékére, a megfelelő hajlítoszilárdsági értékekre és egy módosító tényezőre, ami téglalap alaprajz esetén 0,7, míg minden más esetben 1 nagyságrendet vehet fel.

Mint már korábban utaltam rá, kihajlás vizsgálatra is szükség van. Ezt a 19. ábra foglalja össze.

Ha az érték nem megfelelő, akkor újra kell kezdeni a számításokat, addig iterálni a különböző paramétereket, amíg nem kapunk megfelelő értéket. [33]

Program általi tervezés menete ugyanígy zajlik. Az elején természetesen egyfajta mérnöki intuíciót így is kér tőlünk a program, de miután mindent meghatároztunk, pár perc alatt megoldja azt az egyenletrendszert, ami nekünk jóval több időbe telne.

4.3.1. Nyomott szerkezeti elemek kihajlása

$$\lambda_{\text{rel},y} = \frac{\lambda_y}{\pi} \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} \quad \text{és} \quad \lambda_{\text{rel},z} = \frac{\lambda_z}{\pi} \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} \quad \text{ahol:}$$

λ_y és $\lambda_{\text{rel},y}$ y tengely körüli hajlításhoz tartozó karcsúság és relatív karcsúság (a kihajlás z irányú),

λ_z és $\lambda_{\text{rel},z}$ z tengely körüli hajlításhoz tartozó karcsúság és relatív karcsúság (a kihajlás y irányú),

$E_{0,05}$ a rostokkal párhuzamos rugalmassági modulus 5%-os kvantilise.

Ha egyidejűleg $\lambda_{\text{rel},x} \leq 0,3$ és $\lambda_{\text{rel},y} \leq 0,3$, akkor:

$$\left(\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}} \right)^2 + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1,0$$

$$\left(\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}} \right)^2 + k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1,0$$

Minden más esetben:

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,y} f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1,0$$

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,x} f_{c,0,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1,0 \quad \text{ahol:}$$

$$k_{c,y} = \frac{1}{k_y + \sqrt{k_y^2 - \lambda_{\text{rel},y}^2}}$$

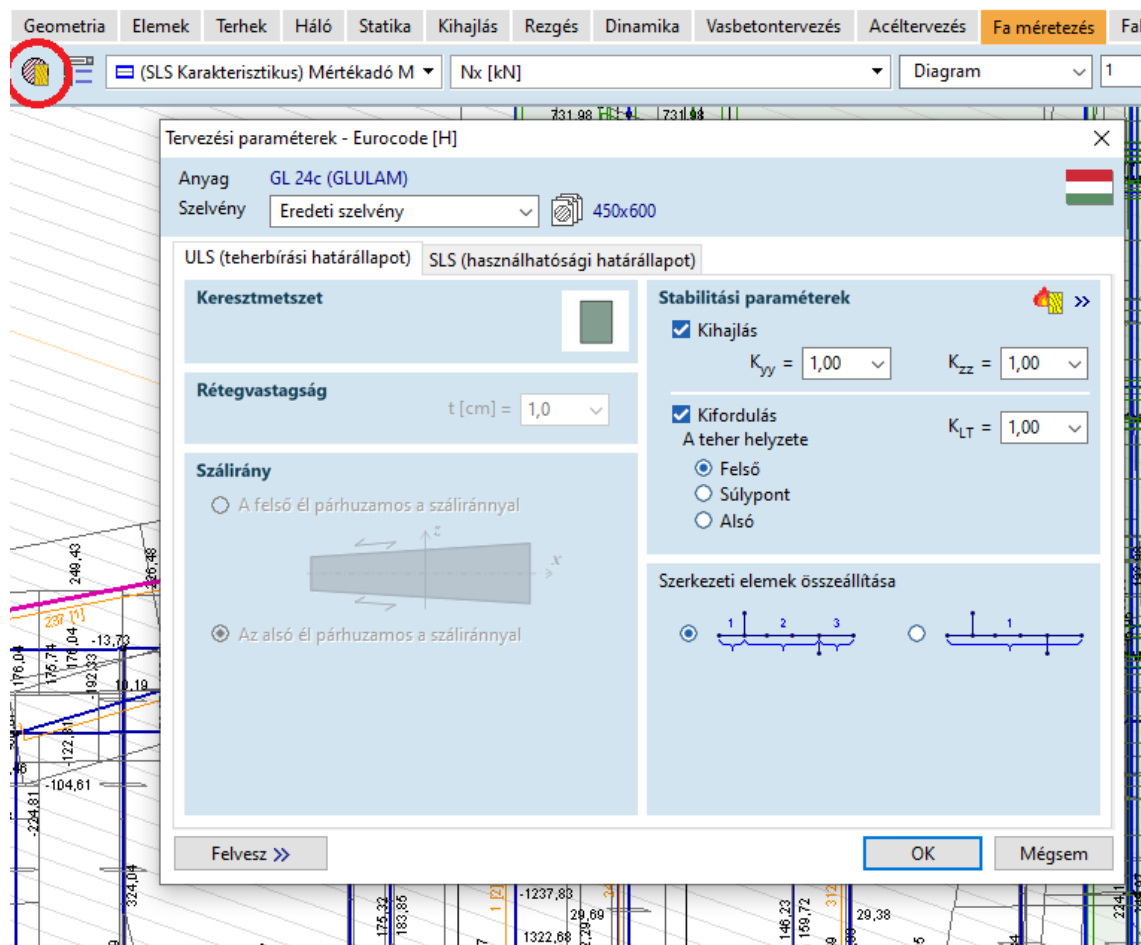
$$k_{c,x} = \frac{1}{k_z + \sqrt{k_z^2 - \lambda_{\text{rel},z}^2}}$$

$$k_y = 0,5 \left(1 + \beta_c (\lambda_{\text{rel},y} - 0,3) + \lambda_{\text{rel},y}^2 \right)$$

$$k_z = 0,5 \left(1 + \beta_c (\lambda_{\text{rel},z} - 0,3) + \lambda_{\text{rel},z}^2 \right) \quad \text{ahol:}$$

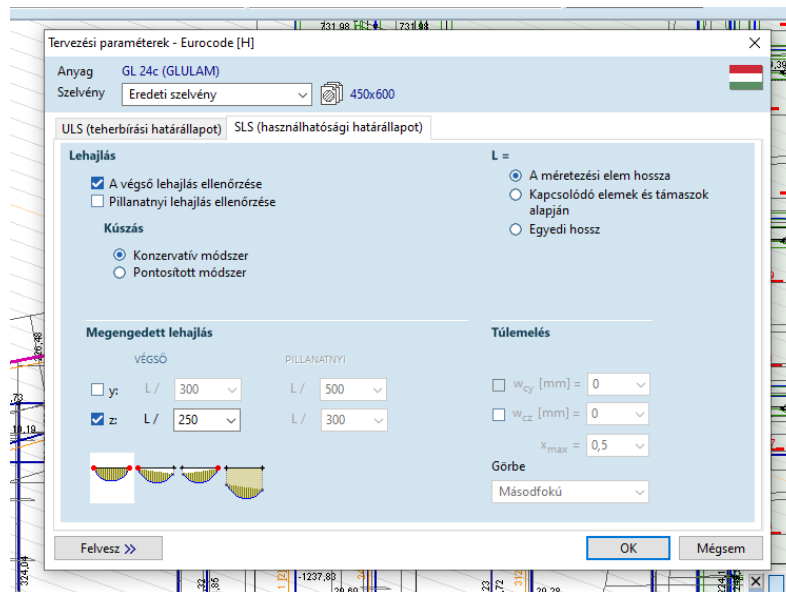
β_c egyenességi tényező: 0,2: természetes szerkezeti fa esetén,
0,1: RRFa és LVL termékek esetén.

19. ábra: Kihajlás vizsgálat [34]



20. ábra: Fatervezés

A fa tervezési paraméterek (20. ábra) menüben megadhatjuk a szelvényt, ebben az esetben én egy, a vasbeton szerkezet és a torony összekötő gerendáját választottam ki. A teher helyzeténél, mivel az üvegtető a gerendára nehezedik, felsőt választottam (ami azt jelenti, hogy a keresztmetszetet felülről terhelem meg), majd az SLS használhatósági határállapotnál (21. ábra) megadtam a lehajlás értékét, amit $L/250$ -re vettem, illetve végső lehajlás ellenőrzését kértem a teljes elem vizsgálatával, konzervatív módon.



21. ábra: SLS határállapot

A tervezési számítások kiértékelése következik. Mindegyik számítás legelején látható a rá vonatkozó szabvány, annak kifejezetten erre vonatkozó alfejezete, illetve a mértékadó kombináció. Először a tiszta, majd az összetettek igénybevételek következnek. Zárójelben mellettük található a vizsgált tengely iránya.

7.4.1. Normálerő

EN 1995-1-1: 6.1.2, 6.1.4

Mértékadó teherkombináció: $\{\pm FR1\}$ (0,3*Üzletek)

Teheridőtartam-osztály: **Pillanatnyi**

Mértékadó keresztmetszet: $x = 0,00 \cdot L = 0,00 \cdot 1050 = 0$ cm

$$\sigma_{t,0,d} = \frac{N_x}{A_x} = \frac{2298}{4250} = 0,54 \text{ kN/cm}^2$$

$$k_{h,y} = 1$$

$$f_{t,0,d} = \frac{k_{mod} \cdot k_{h,y} \cdot f_{t,0,k}}{\gamma_M} = \frac{1,10 \cdot 1 \cdot 1,7}{1,25} = 1,5 \text{ kN/cm}^2$$

$$\eta_N = \frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} = \frac{0,54}{1,5} = 36,1 \% \quad (6.1) \quad \text{megfelel}$$

7.4.2. Nyírás (y)

EN 1995-1-1: 6.1.7

Mértékadó teherkombináció: {1,5*Lakások2 és váró}

Teheridőtartam-osztály: **Hosszú idejű**

Mértékadó keresztmetszet: $x = 0,00 \cdot L = 0,00 \cdot 1050 = 0$ cm

$$k_{cr} = 0,67 \quad (6.13a)$$

$$\tau_{V_y,d} = \frac{1,5 \cdot |V_y|}{k_{cr} \cdot b \cdot h} = \frac{1,5 \cdot |2,4|}{0,67 \cdot 50 \cdot 85} = 0,0013 \text{ kN/cm}^2$$

$$f_{v,y,d} = \frac{k_{mod} \cdot f_{v,y,k}}{\gamma_M} = \frac{0,70 \cdot 0,35}{1,25} = 0,2 \text{ kN/cm}^2$$

$$\eta_{V_y} = \frac{\tau_{V_y,d}}{f_{v,y,d}} = \frac{0,0013}{0,2} = 0,6 \% \quad (6.13) \quad \text{megfelel}$$

7.4.3. Nyírás (z)

EN 1995-1-1: 6.1.7

Mértékadó teherkombináció: {±FR1 } (0,3*Üzletek)

Teheridőtartam-osztály: **Pillanatnyi**

Mértékadó keresztmetszet: $x = 0,00 \cdot L = 0,00 \cdot 1050 = 0$ cm

$$k_{cr} = 0,67 \quad (6.13a)$$

$$\tau_{V_z,d} = \frac{1,5 \cdot |V_z|}{k_{cr} \cdot b \cdot h} = \frac{1,5 \cdot |(-5,1)|}{0,67 \cdot 50 \cdot 85} = 0,0027 \text{ kN/cm}^2$$

$$f_{v,z,d} = \frac{k_{mod} \cdot f_{v,z,k}}{\gamma_M} = \frac{1,10 \cdot 0,35}{1,25} = 0,31 \text{ kN/cm}^2$$

$$\eta_{V_z} = \frac{\tau_{V_z,d}}{f_{v,z,d}} = \frac{0,0027}{0,31} = 0,9 \% \quad (6.13) \quad \text{megfelel}$$

7.4.4. Hajlítás (y)

EN 1995-1-1: 6.1.6

Mértékadó teherkombináció: {±FR1 } (0,3*Üzletek)

Teheridőtartam-osztály: **Pillanatnyi**

Mértékadó keresztmetszet: $x = 0,00 \cdot L = 0,00 \cdot 1050 = 0$ cm

$$k_{h,y} = 1 \quad (3.2)$$

$$f_{m,y,d} = \frac{k_{mod} \cdot k_{h,y} \cdot f_{m,k}}{\gamma_M} = \frac{1,10 \cdot 1 \cdot 2,4}{1,25} = 2,1 \text{ kN/cm}^2$$

$$\sigma_{m,y,d} = \frac{|M_y|}{W_y} = \frac{|5189|}{6,0208 \cdot 10^4} = 0,086 \text{ kN/cm}^2 \quad (6.37)$$

$$\eta_{M_y} = \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} = \frac{0,086}{2,1} = 4,1 \% \quad \text{megfelel}$$

7.4.5. Hajlítás (z)

EN 1995-1-1: 6.1.6

Mértékadó teherkombináció: {1,5*Lakások2 és váró}

Teheridőtartam-osztály: Hosszú idejű

Mértékadó keresztmetszet: $x = 1,00 \cdot L = 1,00 \cdot 1050 = 1050$ cm

$$\sigma_{m,z,d} = \frac{|M_z|}{W_z} = \frac{|(-2508)|}{3,5417 \cdot 10^4} = 0,071 \text{ kN/cm}^2$$

$$k_{h,z} = \min \left(\left(\frac{600}{b} \right)^{0.1} ; 1.1 \right) = \min \left(\left(\frac{600}{50} \right)^{0.1} ; 1.1 \right) = 1,018 \quad (3.2)$$

$$f_{m,z,d} = \frac{k_{mod} \cdot k_{h,z} \cdot f_{m,k}}{\gamma_M} = \frac{0,70 \cdot 1,018 \cdot 2,4}{1,25} = 1,4 \text{ kN/cm}^2$$

$$\eta_{M_z} = \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} = \frac{0,071}{1,4} = 5,2 \% \quad \text{megfelel}$$

7.4.6. Csavarás

EN 1995-1-1: 6.1.8

Mértékadó teherkombináció: {±FR1} (0,3*Lakások1 és váró)

Teheridőtartam-osztály: Pillanatnyi

Mértékadó keresztmetszet: $x = 0,00 \cdot L = 0,00 \cdot 1050 = 0$ cm

$$\tau_{tor,d} = 0,00033 \text{ kN/cm}^2$$

$$f_{v,d} = \frac{k_{mod} \cdot f_{v,k}}{\gamma_M} = \frac{1,10 \cdot 0,35}{1,25} = 0,31 \text{ kN/cm}^2$$

$$k_{shape} = \min \left(1 + 0,05 \cdot \frac{h}{b} ; 1.3 \right) = \min \left(1 + 0,05 \cdot \frac{85}{50} ; 1.3 \right) = 1,085 \quad (6.15)$$

7.4.7. Normálerő-Hajlítás

EN 1995-1-1: 6.3.2, 6.2.4

Mértékadó teherkombináció: {±FR1} (0,3*Lakások1 és váró)

Teheridőtartam-osztály: Pillanatnyi

Mértékadó keresztmetszet: $x = 1,00 \cdot L = 1,00 \cdot 1050 = 1050$ cm

$$\eta_1 = \frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} + \frac{|\sigma_{m,y,d}|}{f_{m,y,d}} + k_m \cdot \frac{|\sigma_{m,z,d}|}{f_{m,z,d}} = \frac{0,54}{1,5} + \frac{|0,042|}{2,1} + 0,7 \cdot \frac{|0,065|}{2,2} = 40,0 \% \quad (6.17)$$

$$\eta_2 = \frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} + k_m \cdot \frac{|\sigma_{m,y,d}|}{f_{m,y,d}} + \frac{|\sigma_{m,z,d}|}{f_{m,z,d}} = \frac{0,54}{1,5} + 0,7 \cdot \frac{|0,042|}{2,1} + \frac{|0,065|}{2,2} = 40,3 \% \quad (6.18)$$

$$\eta_{N,M} = \max(\eta_1 ; \eta_2) = \max(40,0 ; 40,3) = 40,3 \% \quad \text{megfelel}$$

7.4.8. Normálerő-Hajlítás-Kihajlás

EN 1995-1-1: 6.3.2

Mértékadó teherkombináció: {±FR1} (0,3*Lakások2 és váró)

Teheridőtartam-osztály: Pillanatnyi

Mértékadó keresztmetszet: $x = 1,00 \cdot L = 1,00 \cdot 1050 = 1050$ cm

$$\lambda_y = \frac{K_{yy} \cdot L_{tot}}{i_{s,y}} = \frac{1,00 \cdot 1050}{25} = 42,8$$

$$\lambda_z = \frac{K_{zz} \cdot L_{tot}}{i_{s,z}} = \frac{1,00 \cdot 1050}{14} = 72,7$$

$$\lambda_{rel,y} = \frac{\lambda_y}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} = \frac{42,8}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{2,2}{910}} = 0,7 \quad (6.21)$$

$$\lambda_{rel,z} = \frac{\lambda_z}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} = \frac{72,7}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{2,2}{910}} = 1,1 \quad (6.22)$$

$$k_y = 0,5 \cdot \left(1 + \beta_c \cdot (\lambda_{rel,y} - 0,3) + \lambda_{rel,y}^2 \right) = 0,5 \cdot (1 + 0,10 \cdot (0,7 - 0,3) + 0,7^2) = 0,74 \quad (6.27)$$

$$k_z = 0,5 \cdot \left(1 + \beta_c \cdot (\lambda_{rel,z} - 0,3) + \lambda_{rel,z}^2 \right) = 0,5 \cdot (1 + 0,10 \cdot (1,1 - 0,3) + 1,1^2) = 1,17 \quad (6.28)$$

$$k_{c,y} = \min \left(\frac{1}{k_y + \sqrt{k_y^2 - \lambda_{rel,y}^2}} ; 1 \right) = \min \left(\frac{1}{0,74 + \sqrt{0,74^2 - 0,7^2}} ; 1 \right) = 0,94 \quad (6.25)$$

$$k_{c,z} = \min \left(\frac{1}{k_z + \sqrt{k_z^2 - \lambda_{rel,z}^2}} ; 1 \right) = \min \left(\frac{1}{1,17 + \sqrt{1,17^2 - 1,1^2}} ; 1 \right) = 0,66 \quad (6.26)$$

$$\eta_1 = \frac{|\sigma_{c,0,d}|}{k_{c,y} \cdot f_{c,0,d}} + \frac{|\sigma_{m,y,d}|}{f_{m,y,d}} + k_m \cdot \frac{|\sigma_{m,z,d}|}{f_{m,z,d}} = \frac{|0,58|}{0,94 \cdot 1,9} + \frac{|0,043|}{2,1} + 0,7 \cdot \frac{|0,065|}{2,2} = 36,7 \% \quad (6.23)$$

$$\eta_2 = \frac{|\sigma_{c,0,d}|}{k_{c,z} \cdot f_{c,0,d}} + k_m \cdot \frac{|\sigma_{m,y,d}|}{f_{m,y,d}} + \frac{|\sigma_{m,z,d}|}{f_{m,z,d}} = \frac{|0,58|}{0,66 \cdot 1,9} + 0,7 \cdot \frac{|0,043|}{2,1} + \frac{|0,065|}{2,2} = 50,8 \% \quad (6.24)$$

$$\eta_{NMBuck} = \max(\eta_1; \eta_2) = \max(36,7; 50,8) = 50,8 \% \quad \text{megfelel}$$

7.4.9. Normálerő-Hajlítás-Kifordulás

EN 1995-1-1: 6.3.3

Mértékadó teherkombináció: $\{\pm FR1\}$ (0,3*Lakások2 és váró)

Teheridőtartam-osztály: **Pillanatnyi**

Mértékadó keresztmetszet: $x = 0,00 \cdot L = 0,00 \cdot 1050 = 0$ cm

$$dL = 2 \cdot h_{max} = 2 \cdot 85_{max} = 170 \text{ cm}$$

$$\sigma_{m,crit} = \frac{\pi \cdot \sqrt{E_{0,05} \cdot I_z \cdot G_{0,05} \cdot I_x}}{(K_{LT} \cdot L_{tot} + dL) \cdot W_y} = \frac{\pi \cdot \sqrt{910 \cdot 8,8542 \cdot 10^5 \cdot 55 \cdot 2,2411 \cdot 10^6}}{(1,00 \cdot 1050 + 170) \cdot 6,0208 \cdot 10^4} = 13 \text{ kN/cm}^2 \quad (6.31)$$

$$\lambda_{rel,m} = \sqrt{\frac{f_{m,k}}{\sigma_{m,crit}}} = \sqrt{\frac{2,4}{13}} = 0,42 \quad (6.30) \quad \text{Oktatási változat}$$

$$k_{crit} = 1,00 \quad (6.34)$$

$$\eta_1 = \frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,z} \cdot f_{c,0,d}} + \left(\frac{|\sigma_{m,y,d}|}{k_{crit} \cdot f_{m,y,d}} \right)^2 = \frac{0,58}{0,66 \cdot 1,9} + \left(\frac{|0,082|}{1,00 \cdot 2,1} \right)^2 = 46,5 \% \quad (6.35)$$

$$\eta_2 = \frac{|\sigma_{m,y,d}|}{k_{crit} \cdot f_{m,y,d}} = \frac{|0,082|}{1,00 \cdot 2,1} = 3,9 \% \quad (6.33)$$

$$\eta_{N,MLTB} = \max(\eta_1; \eta_2) = 46,5 \% \quad \text{megfelel}$$

7.4.10. Nyírás-Csavarás

DIN EN 1995-1-1/NA:2010-12 NCI NA.6.1.9 (no EN 1995-1-1 formula)

Mértékadó teherkombináció: $\{\pm FR1\}$ (0,3*Üzletek)

Teheridőtartam-osztály: **Pillanatnyi**

Mértékadó keresztmetszet: $x = 0,00 \cdot L = 0,00 \cdot 1050 = 0$ cm

A pontban (a b oldal közepén a szélső pontban); $\tau_{V_z,d} = 0$

$$\tau_{tor,dA} = 0,00027 \text{ kN/cm}^2$$

$$\tau_{V_y,d} = \frac{1,5 \cdot |V_y|}{k_{cr} \cdot h \cdot b} = \frac{1,5 \cdot |(-1,7)|}{0,67 \cdot 85 \cdot 50} = 0,0009 \text{ kN/cm}^2$$

$$\eta_A = \frac{|\tau_{tor,d,A}|}{k_{shape} \cdot f_{v,d}} + \left(\frac{\tau_{V_y,d}}{f_{v,y,d}} \right)^2 = \frac{|0,00027|}{1,085 \cdot 0,31} + \left(\frac{0,0009}{0,31} \right)^2 = 0,1 \% \quad (NA.55)$$

B pontban (a h oldal közepén a szélső pontban); $\tau_{V_y,d} = 0$

$$\tau_{tor,d,B} = 0,00033 \text{ kN/cm}^2$$

$$\tau_{V_z,d} = \frac{1,5 \cdot |V_z|}{k_{cr} \cdot h \cdot b} = \frac{1,5 \cdot |(-0,51)|}{0,67 \cdot 85 \cdot 50} = 0,0027 \text{ kN/cm}^2$$

$$\eta_B = \frac{|\tau_{tor,d,B}|}{k_{shape} \cdot f_{v,d}} + \left(\frac{\tau_{V_z,d}}{f_{v,z,d}} \right)^2 = \frac{|0,00033|}{1,085 \cdot 0,31} + \left(\frac{0,0027}{0,31} \right)^2 = 0,1 \% \quad (NA.55)$$

O pontban (a keresztmetszet középpontjában); $\tau_{tor,d,O} = 0$

$$\eta_O = \left(\frac{\tau_{V_y,d}}{f_{v,y,d}} \right)^2 + \left(\frac{\tau_{V_z,d}}{f_{v,z,d}} \right)^2 = \left(\frac{0,0009}{0,31} \right)^2 + \left(\frac{0,0027}{0,31} \right)^2 = 0 \% \quad (NA.55)$$

$$\eta_{V_y, V_z, M_x} = \max(\eta_A; \eta_B; \eta_O; \eta_{V_y}; \eta_{V_z}) = \max(0,1; 0,1; 0; 0,3; 0,9) = 0,9 \% \quad \text{megfelel}$$

7.4.11. Tetőponti keresztirányú feszültség

EN 1995-1-1: 6.4.3

Mértékadó teherkombináció: $\{\pm FR1\}$ (0,3*Lakások2 és váró)

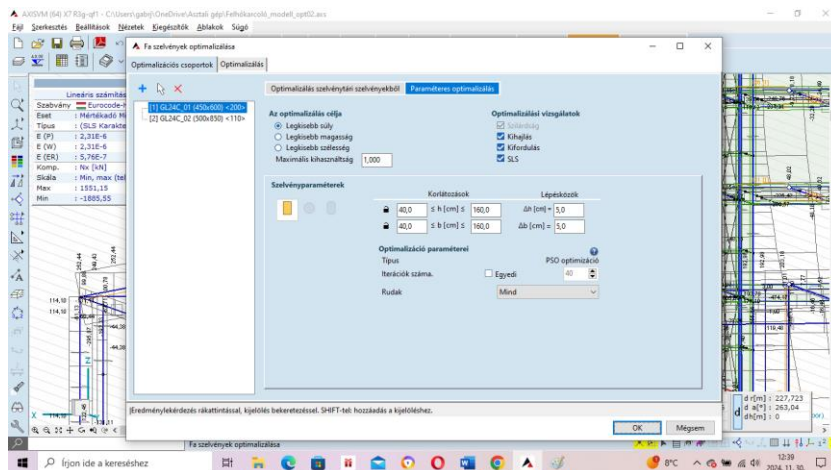
Teheridőtartam-osztály: Pillanatnyi

Mértékadó keresztmetszet: $x = 0,00 \cdot L = 0,00 \cdot 1050 = 0 \text{ cm}$

$$\eta_{Apex} = 0 \% \quad (6.53) \quad \text{megfelel}$$

7.4.12. Szerkezet optimalizálása

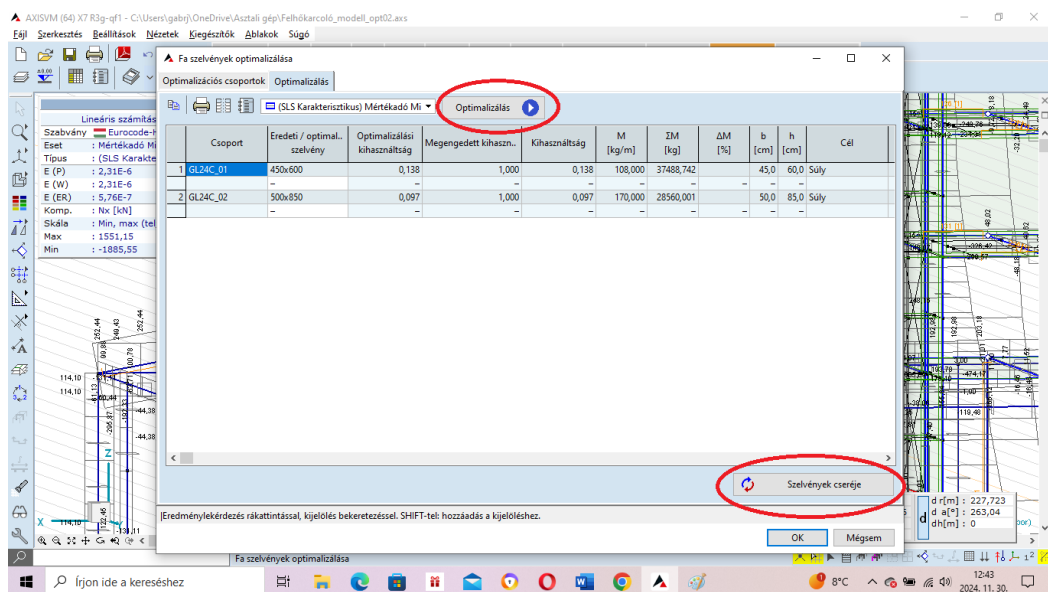
Miután mindegyik elemre meghatároztuk ezeket a paramétereket, azután lehet optimalizálni (22. ábra). Ismerjük a terheléseket az épületnél, a leginkább igénybe vett csomópontokat és keresztmetszeteket, így a program egy számítást követően megtudja határozni, mi is az a szelvényméret, ami még megfelel a követelményeknek, de mint ahogy a jelen eset is mutatja majd, jelentősen tudja csökkenteni az épület önsúlyát, ezáltal például gazdaságosabbá, olcsóbbá és környezetbarátabbá téve az esetleges kivitelezést.



22. ábra: Fa optimalizálás

Elsőnek ki kell választani a szelvényeket. Ebben az esetben a főtartó, illetve az összekötő gerendák lettek megjelölve. A legkisebb súly szerint kívánom optimalizálni a szerkezetet, figyelembe véve a kihajlás, kifordulás és SLS állapotokat. Megadtam egy célszerűen 5 cm lépcsőket tartalmazó keresztmetszeti korlátot is.

A másik fülre kattintva, az optimalizálásra (23. ábra), el tudjuk indítani ezt a folyamatot.

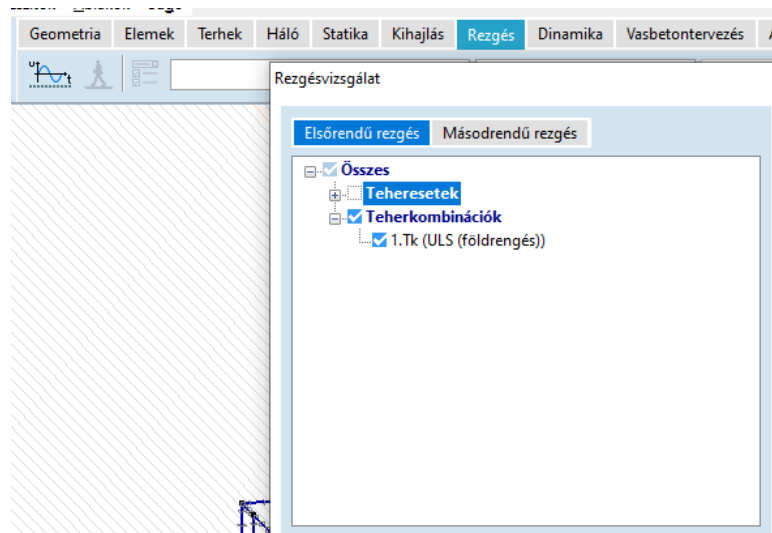


23. ábra: Optimalizálás

Itt maradtam az SLS határállapotnál, majd elindítottam a számítást, ami kézzel igen hosszadalmas lenne, az ebben az esetben nagyjából 30-40 perc volt. Miután végig vitte a folyamatot, van lehetőségünk az összes szelvényt kicserélni, ha úgy gondoljuk. A felülbecsítés majdnem 2-szeres mértékű lett ebben az esetben, így az épületre ható terhekkel szemben főtartóként egy 55x80 cm-es keresztmetszeti kialakítás is tökéletesen megfelel.

7.5. Földrengés méretezés

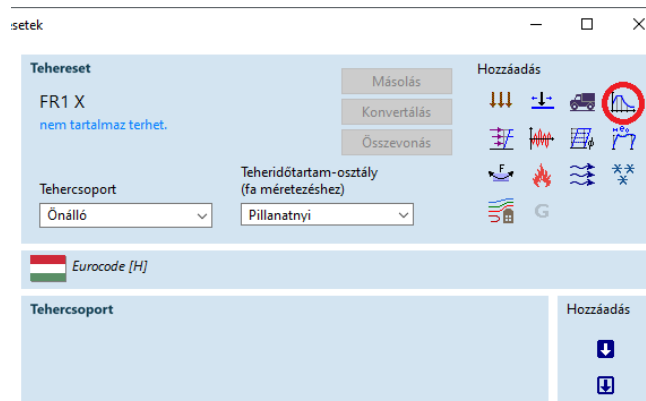
Utolsó lépésben a földrengés maradt. Elsőnek egy teherkombinációt kell létrehoznunk, amelyben csak a tömegeket vesszük figyelembe. Mindenféle meteorológiai terhet (szélteher, hóteher) ki kell vennünk, az esetleges terheket, csökkentő tényezővel kell figyelembe vennünk. Ezután rámegyünk a rezgések (24. ábra) fülre, akkor ott kiválasztjuk az általunk létrehozott teherkombinációt. Rezgési alaknak meghatározunk egy számot (ebben az esetben én 20-at írtam be, de mint a példa is mutatja kevesebb is megfelelő lett volna), amit előre nehéz megmondani. Lefuttatjuk a számítást.



24. ábra: Rezgés számítás

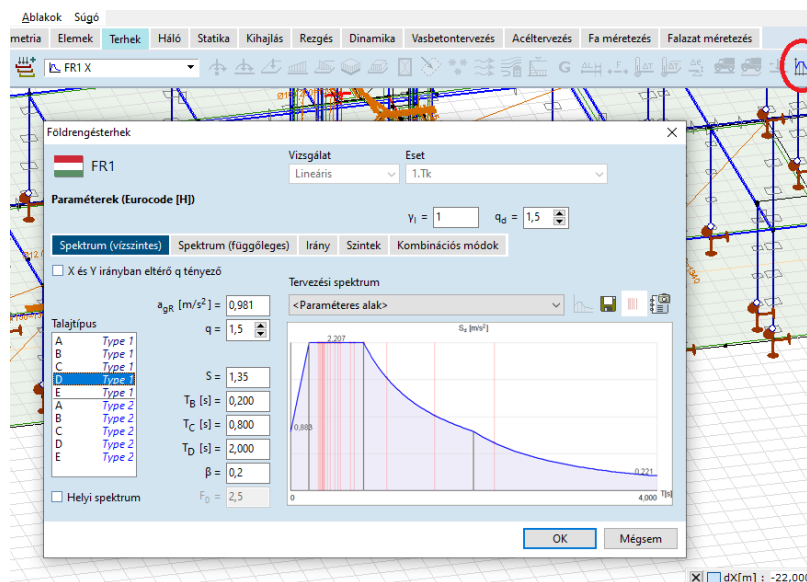
Az eredményként nagyon fontos az, hogy a szabvány által előírt 90% felett legyenek a tömegrészesedések, ami az különböző frekvenciákra adott megfelelő tömegeloszlás az érintett szerkezetben, a teljes tömeghez képest. Megfigyelhető, hogy itt ULS értékről beszélünk, tehát a szerkezet teljes kimerülését jelenti ez a fajta igénybevétel. Jelen esetben a tömegrészesedés minimum 94% volt, tehát megfelel az előírásnak.

A következő lépés a terhek menüpontban, a tehercsoport létrehozása föltnél, földrengés teher generálása (25. ábra).

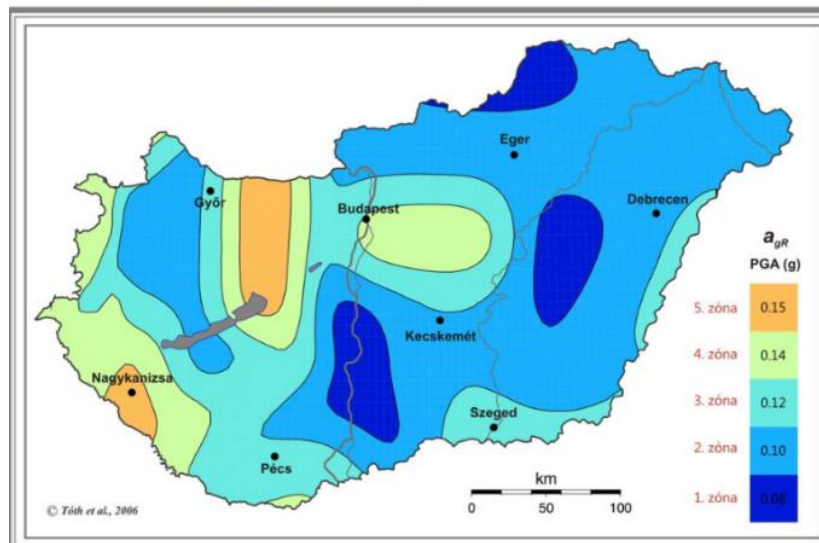


25. ábra: Földrengés teher generálása

A teher létrehozása után, a szintén kiemelt résznél megint rá kell kattintani, ebben az esetben, csak ezt az egy opciót ajánlja fel a program. Mivel az AXIS válaszspektrum módszerét használja (26. ábra), ami megmutatja, hogy a szerkezet hogyan viselkedik a különböző rezgésekre. Többek között a talajtípust (talajvizsgálati jelentésben leírtak szerint, esetünkben kötött talajról van szó, ez „D” típust jelent), a referenciagyorsulást – az épület fiktív módon a 2.zónába esik (27. ábra mutatja a zónák elosztását), ami 0,1-es szorzót jelent, így 0,981-es értéket kell, hogy beírjunk. [35] A szintek esetében, a főbb magasságokat be kell állítani, ami itt a 80-, a 70-, illetve a 10,5 métert jelenti.



26. ábra: Földrengés teher, válaszspektrum analízis beállítás



27. ábra: Szeizmikus zónatérkép [35]

Ha ezt is beállítottuk, akkor már csak le kell futtatnunk a számítást. A lefutott számítás igazolja a szerkezet megfelelőségét.

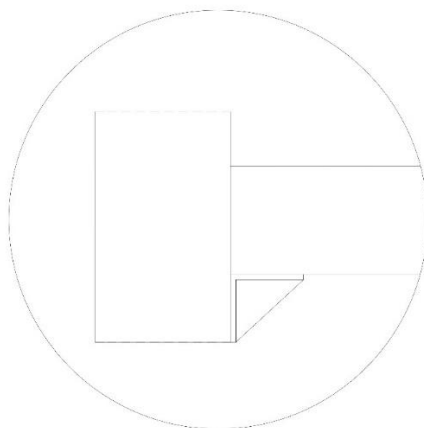
8. Kapcsolatok kialakítás

Szintén fontos kérdés - nem csak szilárdsági, hanem hőtechnikai szempontból is – a kapcsolatok méretezése, kialakítása.

Jelen dolgozatban, a fa kapcsolatok, azon belül is a pillér-gerenda, illetve a CLT panel födém kialakítás csomóponti megoldásának kidolgozása volt az egyik feladat.

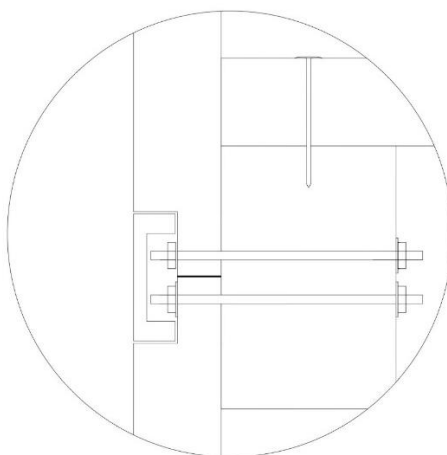
Egy, már erre a célra méretezett csomóponti lemeztípus használatát vettem igénybe, így nekem csak a csomópont praktikus kialakítására kellett megoldást találni.

A pillér és összekötő gerenda (28. ábra) esetében nem bonyolult a megoldás. Mivel ezek a szögvasak két szélükön erősített bordát tartalmaznak, így a gerenda által közvetített terheket képesek fogadni.



28. ábra: Függőlegesen a pillér látható, amelyhez vízszintesen csatlakozik a gerenda

A CLT panel által kiképzett függőleges térelhatároló fal és osztófödém kapcsolata (29. ábra) már kicsit bonyolultabb.



29. ábra: CLT panel csomópont

A 29. ábra mutatja, hogy az osztófödém facsavarokkal, 50 cm-ként hozzá van rögzítve a gerendához. Ugyanígy a CLT panel kiképzése is úgy lett kialakítva, hogy az alsó részén és a felső csatlakozásnál is, ugyanabban a síkban, 2 db $\phi 20$ -as átmenő csavar rögzíti a gerendához.

A csatlakozási pontot ezután letömítjük, majd pedig egy záró elemmel, ami szintén rétegelt-ragasztott technológiával készül, eltakarjuk a csavarokat. Egyben díselemként funkcionál ez a takaró.

A mechanikai rögzítés 50 cm-ként történik, egy CLT panel csak az alsó és felső „fül”-nek kiképzett részen lesz rögzítve.

9. Összefoglalás

A számítás is igazolta, sokkal könnyebb és környezettudatosabb szerkezet kialakítás elérhető, ha a rétegelt-ragasztott fa, illetve a CLT panel rendszert vesszük igénybe. Az optimalizáció után kiderült, csaknem felére tudtuk csökkenteni, az eredetileg felvett szelvények keresztmetszetét, ezzel is gazdaságosabbá és környezetbarátabbá téve épületünk kivitelezését. A keletkező igénybevételek ellensúlyozására tökéletesen alkalmas, közel 85-90%-os kihasználtságot produkálva.

Sajnos ahhoz, hogy jobban elterjedjenek a fából készült toronyházak szemléletváltásra is szükség van, nem csak Magyarországon, de Európán belül is számos országban, hiszen nincsenek egységes szabályozások a tűzvédelmi előírásokban. Finnországban a fa tartószerkezetű, sprinklerek nélküli lakóépületek megengedett legnagyobb magassága két emelet. A szomszédos Svédországban nincs korlát. Néhány ország, köztük az Egyesült Államok, Franciaország és Svájc a közelmúltban megváltoztatta a szabályokat, hogy megkönnyítse a fából készült épületek építését, más országok azonban – például az Egyesült Királyság – szigorítottak rajta. [36]

A hatályos OTSZ alapján, hazánkban maximum 3 szintes faépületet lehet építeni égéskésleltetett vagy védőburkolattal ellátott 45 perces tűzállósági határértékkel rendelkező falakkal. Magasabb faépületek az OKF egyedi eltérési engedélyével építhetők. [37]

Ahhoz, hogy környezettudatosabb lehessen az építőipar, a faszerkezetes építés egyik visszatartó erejét a szigorú tűzvédelmi szabályozást kellene megváltoztatni, természetesen a biztonságosság és a külföldi fontos tapasztalatok figyelembevételével.

10. Képjegyzék, Ábrajegyzék, Táblázatjegyzék

1. kép: Gízai nagy piramis és az Eiffel-torony [2], [3]	2
2. kép: Sibám, a sivatag Manhattanje [4]	2
3. kép: Home Insurance Company Building [5]	3
4. kép: Woolworth Building, A Kereskedelem Katedrálisa [6]	4
5. kép: Empire State Building [7]	4
6. kép: Sears Tower vagy Willis Tower [8]	5
7. kép: Ide épült a Világkereskedelmi Központ [10]	6
8. kép: Déli torony alapozási munkálatai [10]	7
9. kép: Visszahorgonyzás, földmegtámasztás alapozás közben [10]	7
10. kép: Előregyártott elemek beemelése a pozíciójukba, jól érzékelhető dimenzió, amiben gondolkodni kellett [10]	7
11. kép: Ikertornyok látképe [10]	8
12. kép: 2001. szeptember 11. [11]	8
13. kép: Szeizmikus csillapító (1. horgonylemez, 2. csatlakozók a vízszintes terhek átvételére, 3. elasztomer központi elem vízszintes acél merevítő lemezekkel, 4. horgonylemez) [12]	10
14. kép: Tömeginga a Taipei 101 épületben [13]	11
15. kép: A világ legmagasabb felhőkarcolója (828 méter), a Burdzs Khalifa [14]	12
16. kép: Ascent [15]	13
17. kép: MOL Campus [16]	13
18. kép: Tetőszerkezeten elhelyezkedő napelemrendszer [23]	21
19. kép: Zárófödémén található vertikális szélérőmű [24]	22
20. kép: Helyszínrajz [25]	24
21. kép: outrigger kajak [27]	26

1. ábra: A Föld rétegződése [17]	14
2. ábra: Tektonikai lemezek [18]	15
3. ábra: Vetődés következtében létrejött földrengés mechanizmusa [18]	16
4. ábra: Felhőkarcoló látványterve.....	18
5. ábra: Rétegelt-ragasztott keresztmetszetek 3 kialakítási módja [20].....	19
6. ábra: CLT panel [22].....	20
7. ábra: Belső mag szerkezete.....	23
8. ábra: Általános szinten, 2 lakás kialakítása	23
9. ábra: Alsó vasbeton szabadidő központ és összekötő gerenda	24
10. ábra: Az 1.ábrán a belső magos verzió, majd pedig az outrigger különböző kialakításai láthatóak [28]	26
11. ábra: Geometriai modell felvétele.....	28
12. ábra: Csomóponti támasz rugóállandó meghatározása	29
13. ábra: Szelvénymeghatározás beállításai.....	30
14. ábra: Teherfelvétel	30
15. ábra: Háló generálása.....	31
16. ábra: Süllyedés alakulása	32
17. ábra: Vasalási paraméterek	33
18. ábra: Szintvonalak 3D-ben vasalástervezésnél	33
19. ábra: Kihajlás vizsgálat [34]	38
20. ábra: Fatervezés	39
21. ábra: SLS határállapot.....	40
22. ábra: Fa optimalizálás	46
23. ábra: Optimalizálás	46
24. ábra: Rezgés számítás	47
25. ábra: Földrengés teher generálása.....	48
26. ábra: Földrengés teher, válaszspektrum analízis beállítás	48
27. ábra: Szeizmikus zónatérkép [35].....	49
28. ábra: Függőlegesen a pillér látható, amelyhez vízszintesen csatlakozik a gerenda..	50
29. ábra: CLT panel csomópont.....	50

1. táblázat: Szilárdsági osztály RRfa szerkezeteknél [33]	35
2. táblázat: kmod módosító tényezők [33]	36
3. táblázat: Parciális tényezők [33]	36

Irodalomjegyzék

- [1] Reg Cox és Neil Morris: *Az ókori világ 7 csodája*, Magyar Könyvklub, Budapest, (1997) ISBN 963-548-503-4
- [2] https://hu.wikipedia.org/wiki/G%C3%ADzai_piramisok#/media/F%C3%A1jl:All_Gizah_Pyramids.jpg; https://hu.wikipedia.org/wiki/G%C3%ADzai_piramisok#/media/F%C3%A1jl:All_Gizah_Pyramids.jpg (2024.09.12)
- [3] <https://hu.wikipedia.org/wiki/Eiffel-torony> (2024.09.12.)
- [4] Bán Dávid: Miért éppen magasház? (2017) <https://epiteszforum.hu/miert-eppen-magashaz> (2024.09.12)
- [5] https://en.wikipedia.org/wiki/Home_Insurance_Building (2024.09.12)
- [6] https://tinkmara.com/wp-content/uploads/2015/06/10408063_683841524999138_4711371632898931036_n.jpg
- [7] https://hu.wikipedia.org/wiki/Empire_State_Building#/media/F%C3%A1jl:Empire_State_Building,_New_York,_NY.jpg (2024.09.12)
- [8] https://en.wikipedia.org/wiki/Willis_Tower#/media/File:Willis_Tower_From_Lake.jpg (2024.09.12)
- [9] https://hu.wikipedia.org/wiki/Vil%C3%A1gkereskedelmi_K%C3%B6zpont (2024.09.16.)
- [10] Mdavid89: Így épültek ők – 2. rész https://548oranyorkban.blog.hu/2012/04/12/igy_epultek_ok_2_resz (2024.09.12.)
- [11] maszol/MTI Tizenegy éve támadta meg az al-Kaida Amerikát (2012) <https://maszol.ro/belfold/2475-tizenegy-eve-tamadta-meg-az-al-kaida-amerikat>
- [12] MAGEBA: Amit minden mérnöknek érdemes tudni a „földrengésvédelemben használatos szigetelőkről” <https://www.mageba-group.com/hu/hu/1078/223329/Amit-%C3%A9rdemes-tudni-f%C3%B6ldreng%C3%A9sv%C3%A9delemben-haszn%C3%A1lt-szigetel%C5%91k-haszn%C3%A1lat%C3%A1r%C3%B3l.htm> (2024.09.13.)
- [13] <https://www.vizzitor.hu/taipei-101-felhokarcolo-inga/> (2024.09.13.)
- [14] https://hu.wikipedia.org/wiki/Burdzs_Kalifa (2024.09.13.)
- [15] Tóth János szerk.: Megnyílt a világ legmagasabb faépülete (2022) <https://fataj.hu/2022/07/megnyilt-a-vilag-legmagasabb-faepulete/> (2024.09.13.)
- [16] https://hu.wikipedia.org/wiki/Mol_Campus#/media/F%C3%A1jl:Mol_Campus.jpg (2024.09.13.)
- [17] <https://www.vilaglex.hu/Csillag/Html/Fold.htm> (2024.11.29.)
- [18] Dr. Goschy Béla: A magasházak dinamikája, Budapesti Műszaki Egyetem Továbbképző Intézete, Budapest (1971)
- [19] Dulácska Endre, Joó Attila, Kollár László, Tartószerkezetek tervezése földrengési hatásokra: az Eurocode alapján, Budapest, Magyarország : Akadémiai Kiadó (2008) , 353 p. ISBN: 9789630585194 OSZK BME OMIKK

- [20] https://kreativlakas.com/wp-content/uploads/2018/06/kep_089_28062018_192947.jpg (2024.11.29.)
- [21] <http://www.euroglulam.ro/hu/retegelt-ragasztott-fa-technologiaja.html> (2024. 12. 01.)
- [22] Eco Wood Homes: Mi az a CLT? <https://ecowoodhomes.hu/clt-technologia/> (2024.11.29.)
- [23] https://www.napelem.net/wp-content/uploads/2023/05/napelem_eu.png (2024.12. 01.)
- [24] Eszter: Zöld fül program Helytakarékos, mégis hatékony a vertikális szélgenerátor (2021) <https://www.zoldfulprogram.hu/helytakarekos-megis-hatekony-a-vertikalis-szelgenerator/>
- [25] <https://www.google.hu/maps/preview> (2024.12.01.)
- [26] Skorka Henrik, Dr. Bánszky József: Talajvizsgálati jelentés és geotechnikai adatszolgáltatás (2020)
- [27] John C. Harris: Three Hulls: A Sailing Outrigger for Adventures Near and Far (2023) https://clcboats.com/life-of-boats-blog/Talulah_Sailing_Outerigger.html (2024.12.17.)
- [28] https://media.springernature.com/lw685/springer-static/image/chp%3A10.1007%2F978-981-16-2826-9_5/MediaObjects/500648_1_En_5_Fig6_HTML.png (2024.12.02.)
- [29] Eurocode 1: A tartószerkezeteket érő hatások MSZ EN 1991
- [30] Eurocode 2: Betonszerkezetek tervezése, Általános és az épületekre vonatkozó szabályok MSZ EN 1992-1-1:2010
- [31] Eurocode 5: Faszerkezetek tervezése, MSZ EN 1995-1-1:2009 Általános szabályok. Közös és az épületekre vonatkozó szabályok
- [32] Eurocode 8: Tartószerkezetek tervezése földrengésre 1.rész: Általános szabályok, szeizmikus hatások és az épületekre vonatkozó szabályok MSZ EN 1998-1-1:1998.
- [33] Armuth M, Bodnár M: Fa Tartószerkezetek Tervezés az Eurocode alapján, Budapest, Magyarország, Artifex Kiadó (2011)
- [34] Armuth M, Bodnár M: Fa tartószerkezetek segédlet, BME egyetemi jegyzet, (2009)
- [35] https://www.georisk.hu/Maps/EC8_zones_A4.jpg (2024.11.30.)
- [36] Nat Barker: Are mass-timber buildings a fire safety risk? (2022) <https://www.dezeen.com/2023/03/22/mass-timber-fire-safety-timber-revolution/> (2024.12.02.)
- [37] Mózes Lajos: Lehetőségek a faépítészetben, Faipar.hu, <https://faipar.hu/cikkek/faszerkezet/3755/lehetosegek-a-faepiteszetben> (2024.12.02)