

# TORONYHÁZAK ALAPOZÁS- ÉS SZERKEZETTERVEZÉSE – 1. RÉSZ



Kanizsár Szilárd

DOI: 10.32969/VB.2018.4.1

*A 100 m magasságot meghaladó épületek tervezése a hazai mérnöki gyakorlatban kevésbé ismert területnek számít. A cikkben a terjedelmi korlátok ellenére törekszem arra, hogy átfogó képet adjak a téma iránt érdeklődők számára mind szerkezettervezési, mind geotechnikai szemszögből. Külföldi szakirodalmi művek alapján, és megépült szerkezetek példáin keresztül alapozási és szerkezettervezési koncepciókat ismertetek, melyeket értékelve szó esik a budapesti lehetőségekről is. A magasház fogalmának tisztázása után kitérek a tervezéshez szükséges hazai előírások alkalmazhatóságára, valamint a toronyházak építésszerűen szóba jöhető méreteinek szerkezeti vonatkozásaira. Szót ejtek a külföldi magasépületeknél felhasznált szerkezeti anyagok szilárdsági jellemzőiről, valamint ezek alkalmazása kapcsán a világban megfigyelhető trendekről. Betekintést nyújtok a toronyházak tartószerkezeti rendszereinek típusaiba. Külföldi példákon keresztül szemléltetem a leggyakrabban alkalmazott alapozási megoldások elvi működését, gyakorlati kialakítását. Röviden vázolom Budapest geotechnikai adottságait a toronyházak vonatkozásában. A tartószerkezetéről és az alapozásról szóló fejezetek végén áttekintem, hogy az ismertetett tervezési koncepciók melyike jöhet számításba a hazánkban megvalósuló projektek esetében.*

**Kulcsszavak:** toronyház, magasépület, belső szerkezeti rendszer, külső szerkezeti rendszer, outrigger, alapozás, CPRF

## 1. BEVEZETÉS

A Fővárosi Közgyűlés az 5/2015.(II.16.) sz. rendeletével elfogadta Budapest Főváros Rendezési Szabályzatát (továbbiakban BFRSZ), amely szakított a korábbi konzervatív hozzáállásával, és bizonyos területeken 120 m-re emelte a korábbi 55 m magassági korlátot.

A Budapest városképét napjainkban jellemző épületek magassági mérettartománya a szerkezet- és alapozástervezésben elméleti és gyakorlati szempontból is jól ismert, megszokott és a mérnökök által biztos kézben tartott tervezési kategóriát jelent. Nincs ez így azonban a toronyházak esetében, hiszen a korábbi építési szabályok korlátozó előírásai miatt az előbb említett mérettartományt jelentősen meghaladó épületek idáig nem épülhettek. Így az ezekkel kapcsolatos korszerű műszaki igények és azokra adandó válaszok természetesen még meg sem fogalmazódtak. Míg a megszokott mérettartományba eső épületek esetében a geotechnikai körülmények, a tervezési és építési eljárások többé-kevésbé rutinszerűen kezelhetők, addig a toronyházak esetében ezek egyértelműen speciális megközelítést igényelnek.

Jelen cikk a toronyházak alapozási és tartószerkezeti koncepcióinak kérdéskörével kapcsolatos alapfogalmak ismertetése mellett igyekszik rámutatni arra, melyek a legfontosabb, a tervezést megelőzően tisztázandó, mérlegelendő és megválaszolható kérdések, illetőleg melyek azok a ma még hiányzó ismeretek, amelyek pótlása elengedhetetlen. Külföldön (pl. Ausztria, Németország, Spanyolország) megépült 100-200 m magassági tartományba eső épületeket elemeztem geometriai kialakítás, beépített szerkezeti anyagok, felszerkezeti és alapozási rendszerek, terhek, deformációk és építési technológiák

szempontjából. Az összegyűjtött adatok alapján megállapíthatók, melyek az említett mérettartományba eső épületek esetén leginkább alkalmazott műszaki megoldások, amelyek kifejlődése mögött több évtizedes tapasztalat áll. Ezek ismerete mindenképpen hasznos segítséget jelenthet a hazai projektek esetében, de természetesen mindig mérlegelni szükséges, hogy egy-egy műszaki megoldás mi módon adaptálható a hazai körülmények között.

## 2. A MAGASÉPÜLET FOGALMA A VILÁGBAN ÉS HAZÁNKBAN

Két felfogás létezik a magasépület (high-rise / tall building) definiálásáról. A CTBUH (Council on Tall Buildings and Urban Habitat) ajánlása szerint a magassági kategóriák a következők:

- 200-300 m: magas épület (tall building)
- 300-600 m: szuper-magas épület (super-tall building)
- > 600 m: extra-magas épület (megatall building)

Látható, hogy e kategóriarendszer szerint egy Budapestre tervezett 120 m magas épület nem minősül magasnak, hiszen még a legalsó mérettartományba sem sorolható be. A másik, kevésbé egzakt megközelítésmód szerint a magas épület fogalma általánosságban nem definiálható egyértelműen a szintek száma vagy a felszerkezet terepszint feletti magassági mérete alapján. Az abszolút méreteket rögzítő felfogáshoz képest ez utóbbi értelmezés nem számszerűsíti azt a „bűvös” magassági határt, szintszámot vagy karcsúságot, amely felett az épület a „magas” kategóriába sorolandó, alatta pedig nem illeti meg ez a jelző. Amikor egy szerkezet tervezése során a hangsúly a

statika területéről a szerkezeti dinamika irányába eltolódik, a függőleges teherhordó szerkezet kialakításának problémájánál dominánsabb kérdéssé válik a vízszintes teherhordó szerkezet megkonstruálása, akkor lehet érzékelni, hogy az épület a „magas” kategóriába tartozik. Utóbbi álláspont szerint a mérnökök számára semmiféle éles határvonal meghúzásának nincs értelme, hiszen az épületek magasságának növekedésével a statika illetve dinamika kérdései fokozatos átmenettel válnak hangsúlyosabbá, vagy éppen kevésbé dominánssá.

A hazai jogi szabályozás természetesen e filozofikus gondolkodásmódot félretéve és a CTBUH kategóriákat mellőzve megoldotta a mérnökök által objektív módon nem definiálható magassághatárok kijelölését, így jelenleg a hatályos Budapest Fővárosi Rendezési Szabályzata a következőképpen rendelkezik:

„Magasháznak nevezzük azokat a magasépületeket, amelyek legmagasabb pontja (OTÉK fogalom) legfeljebb 65 méter. Az ennél magasabb épület már toronyház, amelynek legmagasabb pontja – jelen szabályozás szerint – nem haladhatja meg a 120 métert.”

Ha világviszonylatban kitekintést teszünk, érzékelhetjük, hogy a magasság fogalma mennyire relatív. Bár csodálattal személhetjük a lenyűgöző méretű arab, ázsiai, amerikai épületeket, e tornyok megvalósításához szükséges know-how jóval meghaladja azt a szintet, amelyet a mi majdani 120 m magas épületeink igényelnek. Világos, hogy ezért elsősorban a kisebb léptéket képviselő nyugat-európai példák lehetnek relevánsak számunkra, ezek tanulmányozásából nyerhetünk közvetlenül hasznosítható tudást. Az 1. ábra egy Budapestre tervezhető toronyházat ábrázol a nyugat-európai magasépületek viszonylatában. Bár ebben a közegben is szembetűnő a méretkülönbség, az európai léptékkel épült magasházak műszaki megoldásai képviselik azt a sok évtized alatt összegyűlt tapasztalatot, amelyet a hazai mérnököknek is érdemes megismerni.

### 3. TERVEZÉS FELTÉTELEI, A HAZAI SZABVÁNYOK ALKALMAZHATÓSÁGA

Bizonyos, hogy a címben szereplő szerkezetek tervezése kizárólag a hatályos, Eurocode alapú magyar szabványok szerint nem végezhető el, hiszen az építmény méretéből adódó különlegessége miatt több hazai előírást sem lehet a tervezés során alkalmazni. Ezeket a hiányzó előírásokat egyrészt külföldi szabványok adaptálásával lehet pótolni, másrészt a tudományos

szakirodalmi ajánlások, valamint a külföldi tervezési gyakorlat követése jelenthet támpontot.

Természetesen a mérnöki tervezés, az Eurocode-ok elvei, fogalomrendszere érvényes, s ezeknek megfelelően a tervezésben három lényeges feltételnek teljesülnie kell:

- az összes teher és hatás számítható legyen, belőlük a mértékadó teherkombinációkat meg lehessen határozni a megfelelő parciális tényezők alkalmazásával,
- az egyes szerkezetek ellenállása megbízható módon számítható, elmozdulásaik a szükséges pontossággal becsülhetők legyenek,
- az egyes tervezési határállapotokhoz rendelhető megfelelőségi kritériumok világosak, egyértelműek legyenek.

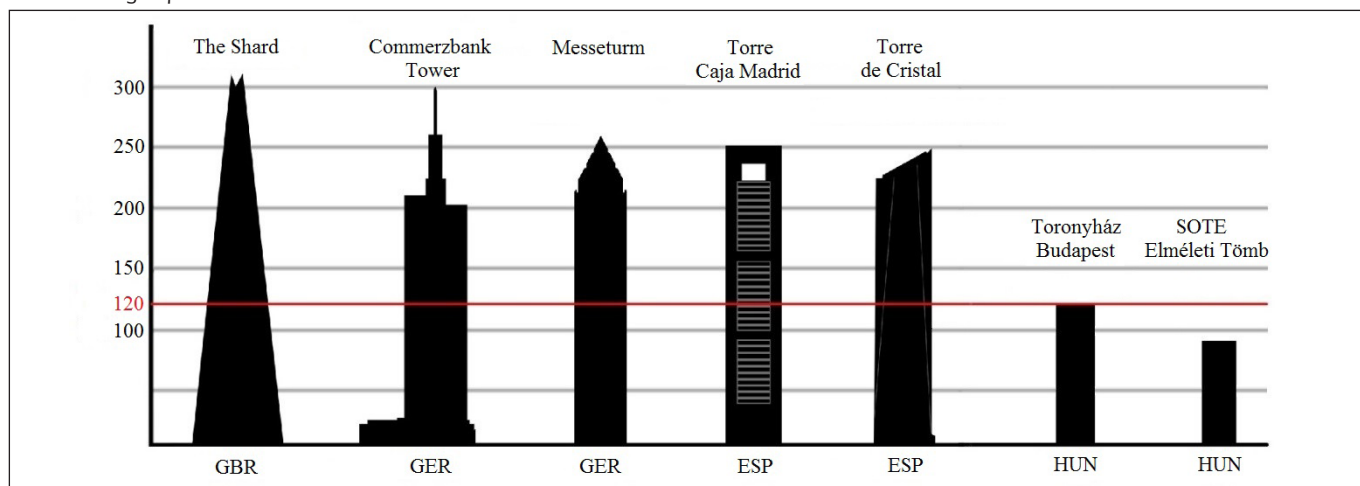
Jelenleg a felsorolt három pont mindegyikéhez említhető legalább egy-egy olyan példa, amivel kapcsolatban a hatályos hazai szabványunk nem ad útmutatást. Ilyenek rendre a következők:

- az MSZ EN 1991-1-4:2007 Eurocode 1: A tartószerkezeteket érő hatások 1-4. rész: Általános hatások. Szélhatás c. szabvány nem vonatkozik az alábbi esetekre
  - a) szél miatti „csavarási rezgések, pl. központi merevítőmaggal készült magasépületek esetén,”
  - b) „olyan rezgések, ahol az alaprezgésnél magasabb sajátrezgéseket is figyelembe kell venni,”
- az MSZ EN 1997-1:2006 Eurocode 7: Geotechnikai tervezés. 1. rész: Általános szabályok c. szabvány cölöpökről szóló része rögzíti, hogy a cölöpökre vonatkozó előírások nem alkalmazhatók közvetlenül a magas épületek legelterjedtebb alapozási rendszerének, a CPRF-alapozásnak a cölöpjeire,
- MSZ EN 1997-1:2006 Eurocode 7: Geotechnikai tervezés. 1. rész: Általános szabályok c. szabvány H melléklete tájékoztatást ad a tartószerkezetek alakváltozásaira és az alapozásokra vonatkozó határértékekre, de ugyanakkor világosan kimondja, hogy „A süllyedések korlátozására adott ezen irányelvek a szokványos, rutinszerű tartószerkezetekre vonatkoznak. Nem helyes olyan épületek vagy tartószerkezetek esetében alkalmazni őket, amelyek a szakosztól eltérnek, vagy amelyek terhelése markánsan egyenetlen.”

A használhatósági határállapotok vizsgálata előtt meg kell határozni azokat a kritikus értékeket, amelyekhez viszonyítva eldönthető, hogy a vizsgált szerkezet, vagy szerkezeti elem a teherbírási követelmények mellett megfelel-e a használhatósági vagy éppen a rendkívüli állapotra vonatkozó elvárásoknak. Ilyenek többek között az alábbiak:

- alapozásra vonatkozóan például a süllyedés, relatív süllyedés, dőlés,

1. ábra: Magasépületek az EU-ban



- felszerkezetre vonatkozóan többek között az épület legfelső pontjának kilengése 50 éves gyakoriságú szélteher hatására (wind deformation limit), a szintek közötti vízszintes irányú, rövid ideig tartó relatív eltolódás szél, illetve földrengés hatására (max interstory drift) vagy éppen a legfelső lakott szint vízszintes irányú gyorsulásának átlagértéke 5 éves gyakoriságú szélteher esetén (5-year rms acceleration)
- Mielőtt a toronyházak tervezésébe fognánk, tisztázni kell, hogy a jelenlegi hazai szabványok tartalmaznak-e ilyen kritériumokat, s a külföldi szabványok tükrében mérlegelni kell, hogy azok toronyházakra is vonatkoztathatók-e, ha vannak, illetve meg kell alkotni őket azokra támaszkodva, ha nincsenek.

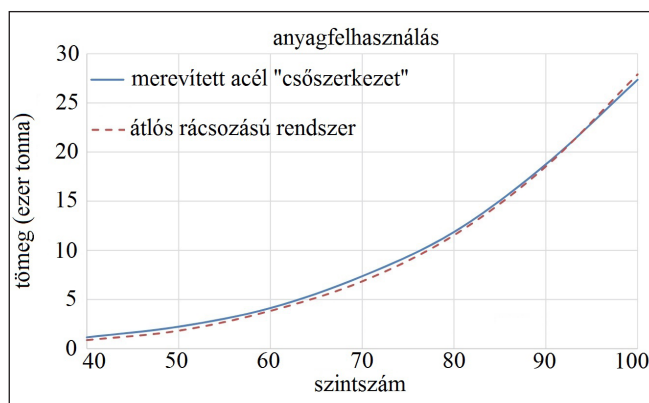
## 4. JELLEMZŐ MÉRETEK ÉS KARCSÚSÁG

Budapest Főváros Rendezési Szabályzata rögzíti a toronyházak fő méreteinek maximális értékeit (1. táblázat). Ezek a méretek kizárólag az építészeti funkciók (pl. használható alaprajz) és a városépítészeti szempontok (pl. kitakarás, sziluett látvány) alapján születtek, szerkezeti megfontolások nem kerültek szóba.

Az előzetes számítások azt mutatják, hogy 27-30 m minimális szélességi méret, és legalább 700 m<sup>2</sup> hasznos alapterület szükséges ahhoz, hogy építészeti szempontból olyan alaprajzot lehessen kialakítani, amely kielégíti a közlekedőmagokra vonatkozó szigorú előírásokat (liftek száma, menekülőlépcső stb.). Ezt figyelembe véve, egy ilyen befoglaló méretekkel rendelkező épület szerkezeti szempontból nem számít karcsú építménynek, hiszen a 120 m magassághoz tartozó minimálisan szükséges 27-30 m szélesség körülbelül 1:4 arányú építészeti karcsúságot jelent.

Külföldi példákat tekintve azt találjuk, hogy a hasonló magasságú épületek karcsúsága 1:3 – 1:4 körüli érték (pl. Orbi Tower – Bécs 115 m/38,6 m vagy Vienna City Gate – Bécs 108 m/26,5 m). A magasabb, 200 métert meghaladó tornyoknál ez az arányszám 1:6 – 1:8 között változik (pl. Torre de Cristal – Madrid 230m/33m). Az 1:4 karcsúságú épületekbe speciális, a szélterhekből származó lengések kompenzálására szolgáló csillapítószerkezetet nem építettek be, ellentétben az 1:8 karcsúsági arányt meghaladó, bécsi DC Tower 220 m magas épületével, amely 26,5 m rövidebb alaprajzi oldallal, így 1:8,5 arányú karcsúsággal épült. A szélterhekből származó lengések csillapítása miatt ez a karcsúság már egy 300 tonnás TMD (tune mass damper) csillapító inga alkalmazását tette szükségessé az emberi tartózkodás miatt előírt használhatósági követelmények betarthatósága végett.

Megépült külföldi épületek adataiból jól látszik, hogy az építészeti karcsúságnak milyen ára van. Alsóbb éves mechanikai tanulmányainkból, számítások nélkül is sejthető, hogy a szintszám lineáris növekedésével az épületszerkezet tömege korántsem lineárisan nő. Mivel egy egyszerű, egyen-



2. ábra: Épülettömeg a szintszám függvényében (Forrás: Poulos, 2017)

letesen megoszló teherrel terhelt konzol esetén is a konzol hosszának növekedése a konzolnyomaték nagyságát négyzetesen befolyásolja, ez a fajta exponenciális tömegnövekedés figyelhető meg az épületmagasság változása esetében is, de természetesen más mértékben. A 2. sz. ábra acélszerkezeti tartórendszerekkel megépült épületekre vonatkozóan azt mutatja, hogy a szintszám növekedése 50-ről 100-ra, azaz 2-szeresre, körülbelül 11-szeres tömegnövekedést eredményez. E példa jól szemlélteti, hogy a merevségi követelmények kielégítése a szintszám növekedésével egyre nehezebb feladattá válik.

A hazai magassági korlátozások miatt ilyen szélsőséges esetekre nem kell felkészülni. A külföldi tapasztalatok alapján azt lehet mondani, hogy az említett 1:4 körüli karcsúság esetén a hazai épületek szükséges merevsége megfelelően méretezett szerkezetekkel is biztosítható lesz, speciális csillapítószerkezetekre valószínűleg nem lesz szükség.

## 5. SZERKEZETI ANYAGOK

A toronyházak fejlődése szükségessé tette, hogy a szokásos mérettartományú épületekben használt anyagokhoz képest lényegesen nagyobb teherbírású szerkezeti anyagokat (is) alkalmazzanak. Ez egyrészt magasabb szilárdsági jellemzőjű anyagok, másrészt a hazai hagyományos magasépítésben kevésbé használt kompozit (ösvér) szerkezetek alkalmazásával érhető el. Természetesen mindkét megoldás új ismereteket, szofisztikáltabb tervezést, és a kivitelezés során szigorúbb technológiai fegyelmet igényel.

A hazai magasépítési gyakorlat helyszínen betonozott monolit szerkezetekben ritkán alkalmaz C35/45 jelű betonnál nagyobb szilárdságú keveréket. A betongyárak termékpalettáin legfeljebb a C40/50 szilárdságú beton található meg, amit jellemzően az infrastruktúraépítésben használnak, ám nem elsősorban statikai okokból, hanem valamilyen speciális kitéti osztályba való besorolás igénye miatt (pl. fokozott kopásállóság). Ezzel szemben az európai gyakorlat azt mutatja, hogy a toronyházak függőleges teherviselő elemei statikai okok miatt

1. táblázat: Magasépületek egyes méreteinek legnagyobb értékei (Forrás: Budapest Főváros Rendezési Szabályzata, 2017)

Magasépület	Az épület legmagasabb pontja [m]	Magasépület 30 m feletti önálló közlekedőmaggal rendelkező szintjeinek	
		bruttó alapterületeiből számított átlagérték maximuma [m <sup>2</sup> ]	legnagyobb alaprajzi kiterjedéseiből számított átlagérték maximuma [m]
Magasház	33-45	750	45
	46-65	900	50
Toronyház	65-90	1050	55
	90-120	1200	60

megkívánják a C50/60 (pl. Torre Espacio – Madrid, 223 m), (Calzón, Navarro, 2008), de akár C70/85 (pl. DC Tower – Bécs, 220 m) jelű betonok alkalmazását is (Bollinger, Grohmann, Berger, 2015). Ez a fajta igény természetesen a gyártást-szállítást, valamint a bedolgozást végzők számára betontechnológiai szempontból is különleges kihívást jelent.

A többszáz méter magas, betonszerkezetű épületek létüket a mikroszilikát (silica fume) tartalmazó beton 1900-as évek utolsó évtizedeiben történő kifejlesztésének köszönhetik. Az akkortájt forradalmian új betontechnológiai eljárásnak köszönhetően sikerült a betonok nyomószilárdsági értékeit jelentősen, 80 N/mm<sup>2</sup> fölé növelni. A cementszemcsékhez képest két nagyságrenddel kisebb, 0,1-0,3 mm szemcseméretű mikroszilikának a cement tömegére vonatkoztatott 5-10%-os adagolásával nagyobb szilárdság és rugalmasság érhető el, fokozottabb korrózióvédelem, kedvezőbb szulfát- és kloridállóság tapasztalható. Az ilyen betonoknak nagyobb a tömörségük, kisebb a vízáteresztőképességük, erősebb a tapadásuk a betonacélra, és kúszásjellemzőik is kedvezőbbek a hagyományos betonokéhoz képest.

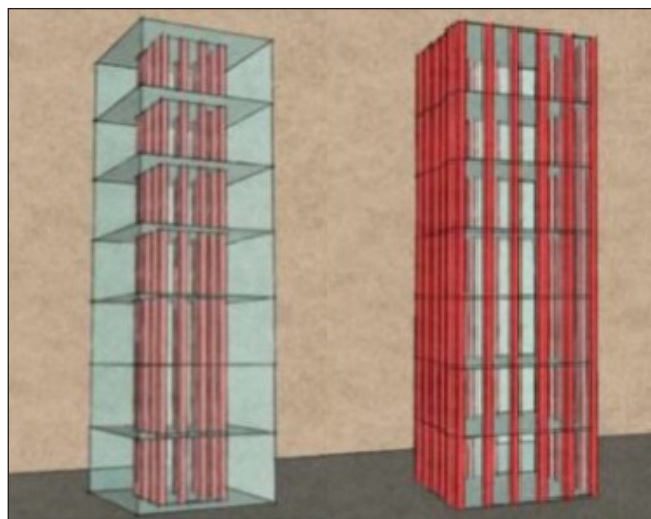
Hasonló fejlődés figyelhető meg a szerkezeti acélok vonatkozásában is. A hazai magasépítési gyakorlat jellemzően megelégszik az S235 szilárdságú acél nyújtotta mechanikai jellemzőkkel, az európai példákat tekintve azonban fel kell zárkózni a fokozottabb statikus és dinamikus igénybevételek esetén előnyösebben használható, magasabb szilárdsági osztályú acélok alkalmazásával. Példaként említhető a Madridban épült Torre de Cristal (230 m) toronyház, ahol a beépített szerkezeti acélok legmagasabb szilárdsági osztálya S460 volt (Temprano, Castilla, Vinals, 2008), vagy a bécsi DC Tower (220 m) épülete, amelynél S690 jelű acélokat is használtak.

A tisztán acélból, illetve vasbetonból épült szerkezetekhez képest sok szempontból előnyösebb a beton és az acél elemek speciális kapcsolóelemekkel együtt dolgoztatott szerkezete. A kompozit (öszvér) szerkezetek alkalmazása a magasépületek területén a 80-as években indult hódító útjára, és mára a külföldi gyakorlatban olyannyira uralkodó szerephez jutott, hogy a világ 300 méternél magasabb épületeinek 60%-a kompozit anyagú. A világtrendet az európai épületszerkezetek a kisebb magasságaik miatt visszafogottabb módon követik, a több, mint 700 db 100 métert meghaladó épület kevesebb, mint 10%-a épült öszvérszerkezetként (pl. európai kompozit szerkezetű toronyház a 202 m magas bécsi Millennium Tower), a legtöbb európai toronyépület anyaga vasbeton.

Magyarországon az öszvérszerkezetek elsősorban a hídépítésben, kevésbé a magasépítésben terjedtek el. Az ok egyszerű: az öszvérszerkezet előnyeit annál jobban lehet kihasználni, minél magasabb az épület. A hazánkban szokásos méretű épületek esetében az említett előnyök költséghatékonysága nem feltétlenül jelentkezik a hagyományos anyagú épületekkel szemben, azonban a majdani toronyházak esetében célszerű megvizsgálni a kérdést. Az öszvér anyagú épületek ugyanis a szerkezeti és építészeti előnyökön túl egy további fontos előnnyel is rendelkeznek, ami a magasságukból adódóan kiemelt jelentőségű, ez pedig a tűzvédelmi szempont.

## 6. TARTÓSZERKEZETI KONCEPCIÓK

A magas épületeket tartó szerkezeti rendszerüket tekintve a vízszintes terhek felvételére kialakított szerkezet szempontjából szokás megkülönböztetni, hiszen koncepcionális szinten a magasság növekedésével elsősorban a vízszintes teherhordó rendszer kialakítása változhat. A szerkezeti rendszereket két



3. ábra: Belső és külső szerkezeti rendszer

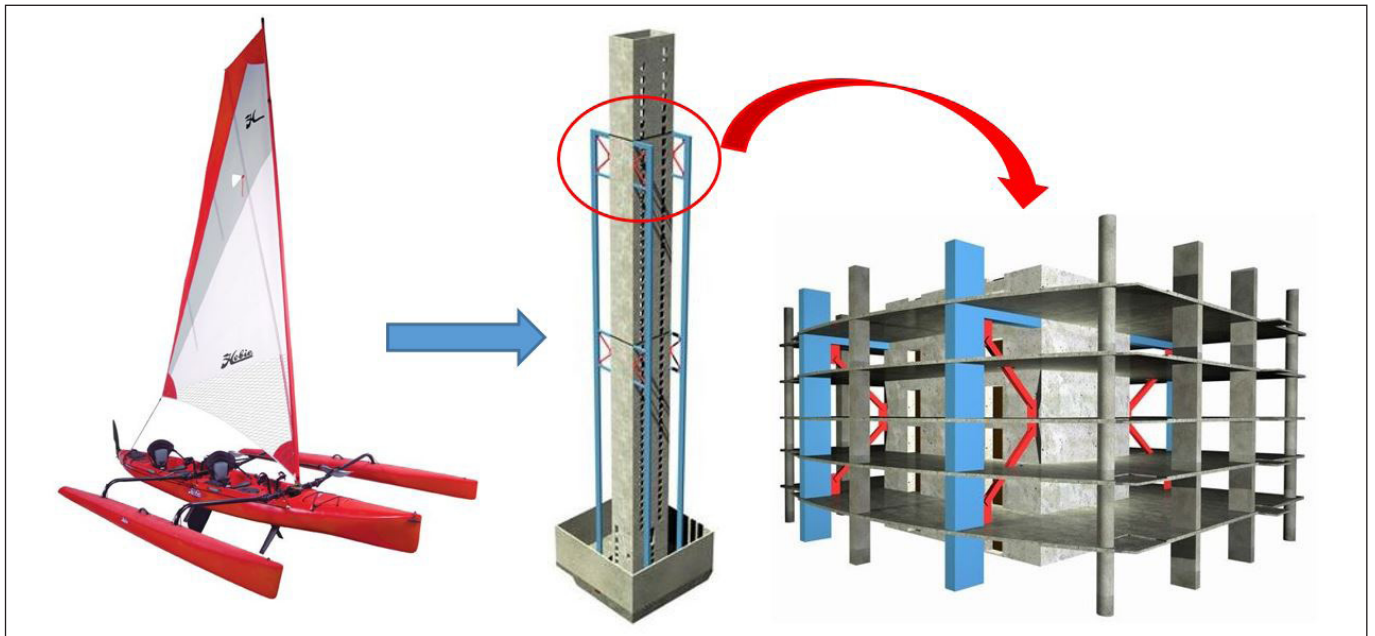
fő csoportba osztva aszerint különböztetjük meg, hogy az elsődleges vízszintes teherviselő rendszer szerkezeti elemei az épület mely részén koncentrálnak. Ennek megfelelően beszélhetünk belső és külső (3. ábra) szerkezeti rendszerekről (Ali, Moon, 2007), amelyek közül az épület magasságának és a várható vízszintes terhelés nagyságának függvényében kell választani.

A belső rendszerek szükséges vízszintes irányú merevségét az épület belsejében, annak alaprajzi súlypontjában elhelyezett teherviselő elemek (merevítő falak, rácszatok) biztosítják. A belső rendszereken belül három különböző szerkezet létezik: a sarokmerev keret, a belső merevítő maggal ellátott szerkezet, valamint az outrigger rendszer. Az első két típus hazánkban is közismert és alkalmazott megoldás, ezért a hazai mérnökök körében a kevésbé ismert outrigger rendszert érdemes legalább alapszinten megismerni. Az említett előbbi két szerkezeti kialakítás 25-30, illetve 60-70 szintig hatékony, outrigger rendszerrel azonban akár 140-150 szintet is el lehet érni.

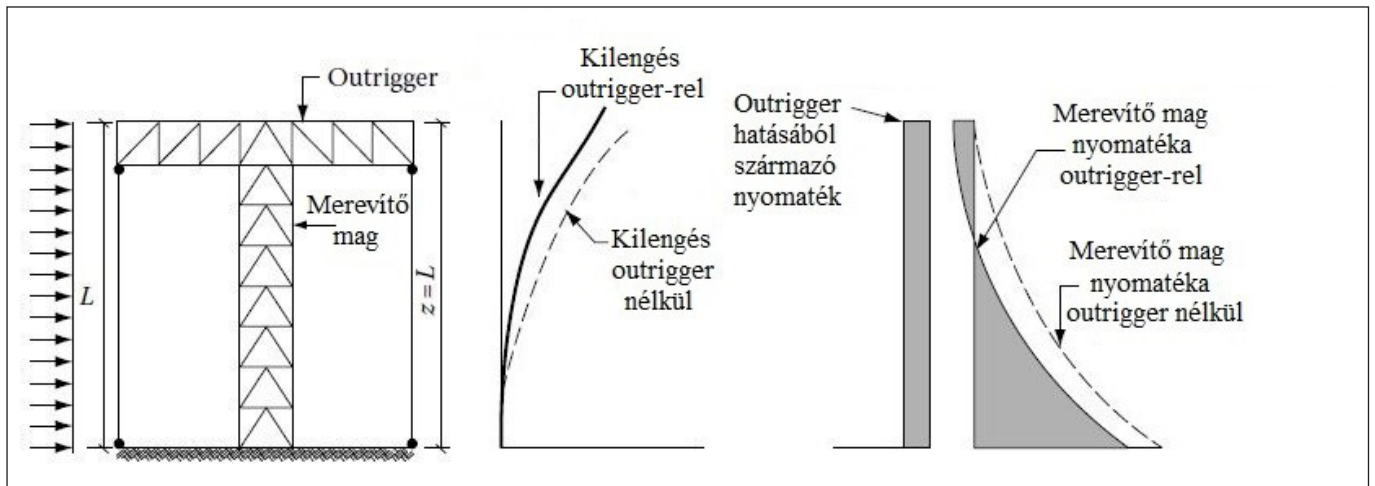
Ez a horizontális terhek viselésére szolgáló szerkezet a merevítő maggal ellátott épületek vízszintes irányú merevségének növelésére egy vagy több szinten elhelyezve a konzolnyomatékok csökkentésére szolgál. Az elvet a mérnökök a toronyházak szerkezeteiben egy ideje az ősi kenuk stabilizálására használt eszköz mintájára alkalmazzák (4. ábra). Az angol szónak a hazai alkalmazás hiánya miatt nincs meg a magyar nyelvű megfelelője. A német gyakorlat is a fordítás nélküli, angol szóalakat használja, ezért az a jelen cikkben is így szerepel. A konzolnyomatékok redukálása (5. ábra) úgy valósul meg, hogy az outrigger szerkezet a nyomatékok egy részét húzó-nyomóerőkké transzformálja, melyeket az alaprajzi súlyponttól minél távolabb elhelyezett pillérek vezetnek le az alapozásig. A konzolnyomatékok mellett természetesen a vízszintes irányú elmozdulások és elfordulások is csökkennek.

Az outrigger szerkezeti rendszer elemei (6. ábra) (Taranath, 2010, 2012):

- merevítő mag, merevítő falak,
- outrigger, azaz a maghoz/merevítő falhoz sarokmereven kapcsolt, annak hosszengelyére merőleges, vízszintes síkban terhelt vb. födém vagy rácsos tartó, mely az épület magassága mentén, több szinten is elhelyezhető,
- övtartó (belt truss), az outrigger tartók (ha az nem vb. födém) végeit köti össze az épület kerülete mentén,
- húzott-nyomott oszlopok, melyek az övtartó, vagy az outrigger födém pereme mentén helyezkednek el, minél távolabb a magtól, hogy az erőkar növekedjen.



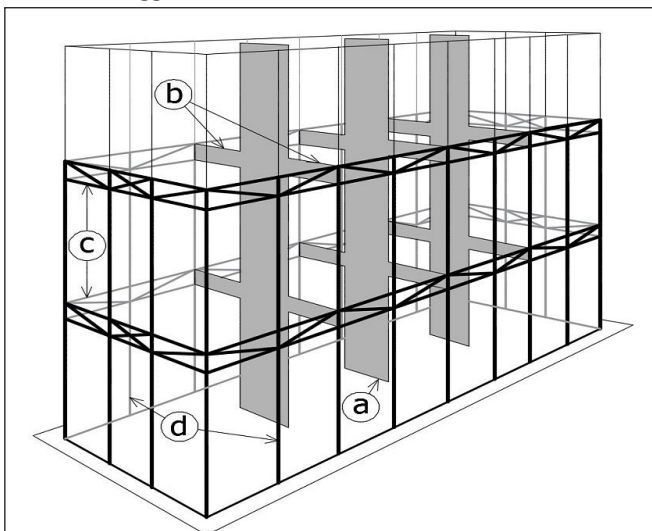
4. ábra: Kettős outrigger vitorlás és az outrigger szerkezeti rendszer



5. ábra: Az épület tetején elhelyezett outrigger és erőjátéka (Forrás: Taranath, 2010)

A külső szerkezeti rendszerek értelemszerűen az alaprajzi kerület mentén, az épület külső részén helyezkednek el, pillérek, falak, ferde merevítések stb. együttesen alkotják a hajlítónyírt konzol öveit és gerincét, valamint sokszor a homlokzaton építészeti megjelenítéssel ferde merevítésekkel biztosítják az épület vízszintes terhekkel szemben szükséges ellenállását.

6. ábra: Outrigger szerkezeti rendszer



A külső szerkezeti rendszerek alkalmazása az európai léptékű épületeknél kevésbé indokolt, főképpen a világviszonylatban is magasnak számító épületek esetén használt szerkezeti koncepció, ezért e rendszer típusait a következőkben csak röviden ismertetem. A rendszerek nevei ugyan magyar fordításban olvashatók, de mivel nem mindegyik angol kifejezésnek van magyar megfelelője, a néha kissé esetlen magyar fordítás mellett is szerepeltetem az eredeti angol megnevezést. A külső szerkezeti rendszerek (Poulos, 2017) következő példái a cikk terjedelmi korlátja miatt nem illusztrálhattam képekkel, de érdemes interneten megkeresni azokat, mert egy, az adott épületre jellemző kép sokszor beszédesebb, mint a szöveges leírás.

- Csőszerű rendszer (tube systems): egy vízszintes erővel terhelt függőleges tengelyű, alul befogott, vékonyfalú cső analógiájára működő térbeli szerkezeti rendszer, melyben a csőnek az átmérőjéhez képest vékony falát az épület teljes kerülete mentén elhelyezett teherviselő szerkezeti elemek alkotják. Legfeljebb ~150 szintig jelent hatékony megoldást. E rendszernek négy altípusa ismert:
  - Keretvázis „csőszerkezet” (framed tube): az épület kerülete mentén egymáshoz közel elhelyezett oszlopokból és azokkal sarokmereven összekapcsolt, nagy szerkezeti magasságú peremgerendákból álló keretrendszer (pl.: World Trade Center Twin Towers).
  - Merevített „csőszerkezet” (braced tube): az előbbihez

hasonló rendszer azzal a különbséggel, hogy az épület kerülete mentén az oszlopok nem sűrű kiosztásban, hanem egymáshoz képest nagyobb távolságban helyezkednek el, de köztük keresztirányú merevítések vannak (pl.: John Hancock Building, Chicago).

- Kötegelt „csőszerkezet” (bundled tube): egyedi „csövek” összekapcsolt csoportja, mely egy összefüggő szerkezeti egységet képez. Az egyedi „csövek” különböző alakúak lehetnek, és különböző magasságban végződhetnek. Átlós merevítésekkel a hatékonyan elérhető magasság növelhető. (pl.: Willis/Sears Tower, Chicago)
- „Cső a csőben” szerkezet (tube in tube): ezzel a rendszerrel fokozható a keretváz „csőszerkezet” merevsége. A belső magot a külső „csővel” összekötő födém tárcsák megosztják a vízszintes terheket a két szerkezet között, a belső „cső” besegít a külső rész teherviselésébe, fokozza a merevséget.
- Átlós rácozású rendszer (diagrid system): az átlós irányú merevítő elemek vízszintes terhekek szembeni ellenállását hatékony módon használja ki, mivel az ilyen szerkezetek hajlítási és nyírási merevséggel is rendelkeznek, ezért szükségtelenné válik a nagy nyírási merevségű belső mag alkalmazása. (pl.: Hearst Tower, New York). Nagyjából 100 szintig jelent célszerű szerkezeti koncepciót.
- Térbeli rácozat (space truss): a merevített „csőszerkezet” (braced tube) egy módosult változata, ahol az átlós irányú merevítések nem csak a fő homlokzati síkokban helyezkednek el, hanem azok a térbeli elhelyezkedésük révén új homlokzati síkokat is létrehozhatnak, adott esetben a külső „csövet” az épület belsejébe hatolva összeköthetik a belső résszel (pl.: Bank of China, Hong Kong). Maximum ~150 szintig alkalmazható előnyösen.
- Külső váz (exoskeleton): az épület vízszintes teherhordó rendszere egy külső vázként az épületen kívül, a homlokzatoktól távolabb helyezkedik el. Az ilyen szerkezeteknél a többi rendszertől eltérően kiemelt jelentősége van a hőmérsékletből származó mozgásoknak, illetve kényszereknek. (pl.: Hotel Arts, Barcelona). Az alkalmazhatóságának felső korlátja körülbelül 100 szint.
- Óriáskeret (superframe): extra méretű oszlopokból (megacolumns) és az azokat 15-20 szintenként összekötő többszintes rácos tartókból alakítják ki. Az oszlopok mindegyike maga is egy-egy merevített keret, melyeket az épület sarokpontjaiban helyeznek el. (pl.: HSBC Headquarters Building, Hong Kong). A legmagasabb, 160+ szintszámú épületek szerkezeti rendszere.

Az egyes szerkezeti típusok alkalmazásának nem csak felső korlátja van, de létezik egy olyan minimális szintszám is, amely alatt az adott szerkezettípus műszakilag indokolatlan és gazdaságtalan. A belső szerkezeti rendszerek merevítő magos megoldása nagyjából 60-70 szintig biztosít kellő vízszintes irányú merevséget, az ennél magasabb épületek esetén a merevítő magon kívül egy vagy több szinten beépített outrigger szerkezetet ajánlatos alkalmazni, ami viszont építészeti értékes területek elvesztésével jár. Erre a problémára nyújtanak megoldást 60-70 szint felett a külső szerkezeti rendszerek.

A Budapestre tervezhető toronyházak 120 m magassági korlátozása ~30-40 szintszámot enged meg. Ez mérlegelés nélkül is egyértelműen indokolatlanná teszi a külső szerkezeti rendszerek választását, hiszen ez a szintszám a belső szerkezeti rendszerek alsó kategóriájába pozicionálja őket. Ennek megfelelően a budapesti toronyházak várhatóan vasbeton maggal merevített csuklós keretként kialakított szerkezetekkel (pl. merevítő maghoz kapcsolt vasbeton pillérekkel alátámasztott síklemez födémek) épülhetnek meg. Ez a szerkezeti rendszer

megfelelő méretezés esetén rendelkezhet a szükséges vízszintes irányú teherbírással és merevséggel, s előzetes számítások nélkül, az európai példákat értékelve megállapítható, hogy outrigger szerkezetre nem lesz szükség.

## 7. ALAPOZÁSI ALAPELVEK

### 7.1. Tiszta alapozási rendszerek

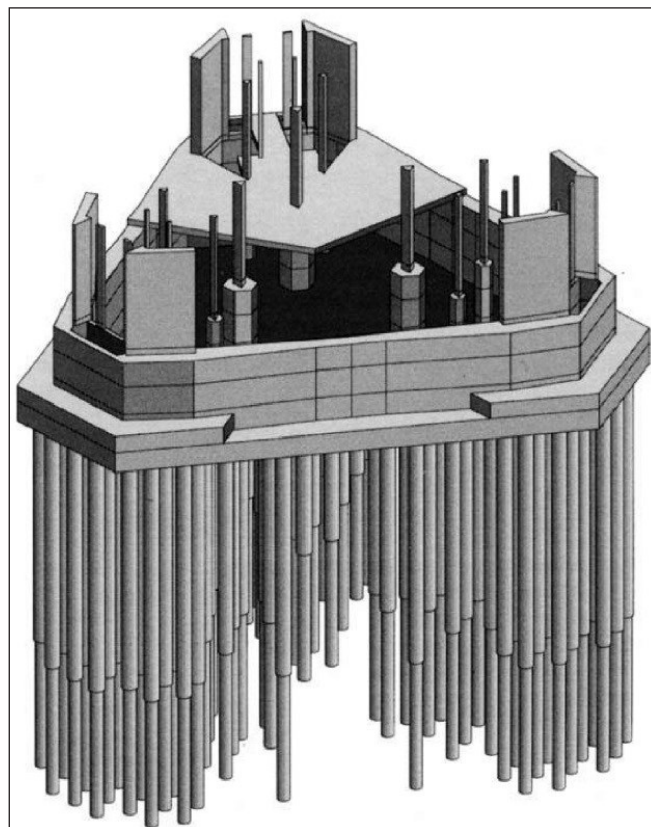
A megépült európai toronyházak alapozási szerkezeteit tanulmányozva megállapítható, hogy jellemzően mélyalapozással hárítják a terheket az altalajra, de akad példa síkalapozásra is. A Madridban épült Torre Espacio (223 m) (7. ábra) 53x43 méter alapterületű, 4,0 m vastag feszített vasbeton lemezen nyugszik, mely sem cölöppel, sem réspillérekkel nem lett alátámasztva. A különösen jó teherbírási homok alatti merev agyagra 1100 kPa maximális, 700 kPa átlagos feszültséget engedtek meg az alaplemez alsó síkján (Calzón, Navarro, 2008).

Hagyományos cölöpalapozással épült a frankfurti Commerzbank Tower (259 m), mert bár a cölöpök tetején

7. ábra: Torre Espacio (223 m), Madrid



8. ábra: Commerzbank Tower (259 m) cölöpalapozása



egy viszonylag vastag vb. lemez is van, az épület terhét gyakorlatilag teljes mértékben a frankfurti agyag alatti mészkőre állított cölöpök hordják. A közvetlen szomszédságban álló banképületekre tekintettel a süllyedések minimalizálása volt a legfőbb cél, ezért 111 db nagytérű, teleszkópikus formájú cölöpöt (a felső rész átmérője 1,80 m, az alsóé 1,50 m) fúrtak ~50 m mélységig, befogva azokat a mészkőbe (8. ábra). A köpenyellenállásnak a béléscső használatából eredő csökkenését kompenzálандó utólagos köpeny menti injektálást végeztek, a cölöp talpellenállását pedig 20 bar-os utóinjektálással fokozták. Az alkalmazott alapozási módszernek köszönhetően, mely egyébként meglehetősen költséges volt (átszámítva ~5 Mrd HUF 1995-ben!), a süllyedések valóban csekélyek ( $s_{max} \approx 2,1$  cm) maradtak (Katzenbach, Bachmann, Boled-Mekasha, Ramm, 2005).

A két megoldás egy-egy szélsőséges példa a tiszta síkalapozási és mélyalapozási megoldásokra. Az esetek túlnyomó részében azonban a különböző szerkezeti funkciók és igények miatt a sík- és mélyalapozás elemei egy komplex alapozási szerkezetben egyesülnek, melyek együtt elégítik ki a teherbírás követelményeket, a süllyedési- és alakváltozási kritériumokat, és megfelelnek a vízzárósági követelményeknek is.

## 7.2. Kombinált alapozás

A külföldi példák azt mutatják, hogy a kombinált alapozási mód legelterjedtebb képviselője a CPRF (combined pile raft foundation) szerkezet, melyet a magyar gyakorlat cölöppel gyámolított lemezalaprak nevez. Bár a CPRF és a magyar elnevezés is egy kissé kisajátítja a névhasználatot a cölöpök számára, a mélyalapozási elemek azonban lehetnek természetesen más mélyalapok, elsősorban réspillérek is.

A frankfurti agyagtalajon a 70-es, 80-as években síkalapozással épített első generációs magasépületek (pl. Deutsche Bank Twin Towers (155 m), Dresdner Bank Tower (166 m)) süllyedési problémái miatt fogalmazódott meg az igény a süllyedéseket csökkentő, gazdaságos alapozási módszerre. A 2-4 méter vastag lemezalapokra állított toronyépületek 20-34 cm-t süllyedtek, aminek következtében a felszerkezetet dölések, billenések terhelték, s ezek kompenzálása az építés alatt és után nehéz feladat volt. A kompenzálásra különféle technológiákat és eszközöket fejlesztettek ki, de a CPRF-rendszer bevezetése

után ezek szükségtelessé váltak (Katzenbach, Bachmann, Boled-Mekasha, Ramm, 2005).

A kombinált alapozási szerkezetek egyeduralkodója a torony-szerű épületek esetében azzal magyarázható, hogy a viszonylag nagy terhelések miatt síkalapozás csak a legkritikusabb esetben, kivételesen kedvező felszín közeli talajok esetében jöhet szóba. Többnyire süllyedési és nem teherbírás problémával kell szembenézni, s csak a cölöpözés hoz megoldást. Az általában többszintes mélygarázsok alsó vízzárásához viszont szükség van egy vízzáró vasbeton alaplemezre. Ha tehát lemez- és mélyalapot is indokolt építeni, akkor a kettőt kombinálva kihasználható a két szerkezet előnye: a cölöpökkel csökkenthető a lemezalap abszolút és relatív süllyedései, vagy másíkl oldalról nézve, a lemezalap teherviselését **hasznosítva a cölöpökre** kisebb erők hárulnak. Azt, hogy a cölöpökre csupán a süllyedések és süllyedéskülönbségek csökkentése végett van-e szükség, vagy alkalmazásuk nélkül, tisztán síkalapozással meg sem oldható-e a feladat, már az előtervezés során látni kell.

Az európai és így a hazai szabványok nem térnek ki a kombinált alapozásra. A külföldi tervezési gyakorlat bizonyos esetekben megengedi, hogy a cölöpök összegzett teherbírásánál nagyobb terhek is működjenek. Ha ugyanis a cölöpteherbírás kimerül, a kombinált szerkezet kontrolálható süllyedések mellett képes többletterhek viselésére. Ezen ok miatt a várható süllyedések előzetes, minél pontosabb meghatározásának van kiemelt jelentősége. A tervezőnek értenie s modelleznie kell a kombinált szerkezet viselkedését, tisztázni s értékelnie kell, hogy az elemei miként működnek külön-külön és együtt, milyen részt vállalnak a teherviselésből és milyen interakciók működnek a talaj és az alapozási szerkezetek között (Bak, Koch, Palotás, Szepesházi, 2010). A toronyházak optimalizált alapozástervezése ugyanúgy nem képzelhető el a legkorszerűbb anyagmodellekkel dolgozó 3D-s geotechnikai szoftverek nélkül (Ray, Scharle, Szepesházi, 2010), mint ahogy már jó ideje a felszerkezet számításához sem a legfeljebb síkbeli ke-retekkel dolgozni képes, elavult szerkezettervező szoftverek használatosak.

*(Jelen cikk folytatódik, kérjük, azt is olvassa majd el. A 2. rész tartalmazza mindkét részre vonatkozóan a Hivatkozások listáját és a szerző adatait.)*