

## KIKÖTÖTT TORONYSZERKEZETEK STATIKAI VIZSGÁLATA SZÁMÍTÓGÉPPEL

A toronyszerkezeteknek két alaptípusa van: az öntartó és a kikötött szerkezetek. Kivételesen kombinációjuk is előfordul. Nagyobb magasságok esetén a kikötött szerkezet építése a gazdaságosabb, de figyelembe kell venni, hogy a kikötések miatt a létesítmény helyigénye nagyobb, ami beépített környezetben erősen befolyásolhatja, hogy ezt a típust alkalmazzák-e.

A kikötött toronyszerkezeteket elsősorban a rádió- és tv-műsort sugárzó, illetve átjátszó állomások tornyainak építik, de egyéb célra, például ipari létesítmény magaskéményének tartószerkezeteként is alkalmazzák. A torony törzse többnyire párhuzamos vonalazású szerkezet, amelynek vonalát a ráépített sugárzó- és kezelőberkelemek vagy zárt kabinok szakítják meg. Amennyiben a torony füstcsöveket tart, úgy ezek tartókonvoljait és kompenzátorait kell szakaszonként megépíteni.

A toronytörzs lehet acélszerkezet; vegyes építés esetén — ha a torony talpa befogott — az alsó része vasbeton is lehet. A kihorgonyzó kötélzet nagy szilárdságú acélhuzalokból készül, fonott pászma vagy párhuzamos huzalrendezésű köteg formájában. A párhuzamos szálú köteget a kisebb nyúlás érdekében alkalmazzák. Műanyag kötélzetet — viszonylag nagy nyúlása miatt — csak akkor használnak, ha a sugárzási feltételek azt megengedik (1. ábra).

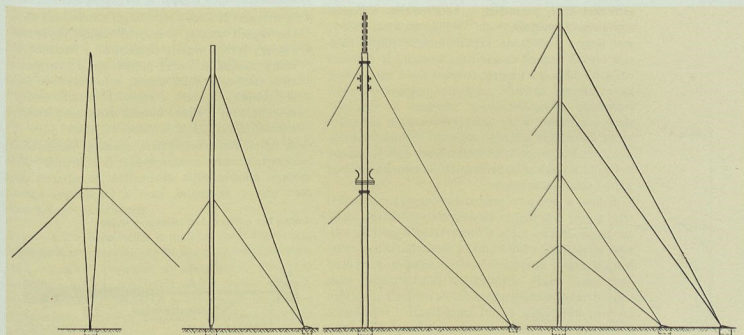
A magasságtól függően a tornyot egy vagy több szinten is kiköthetik. Egy szintre legalább három kötél fut be, alaprajzilag egymással  $120^\circ$ -ot bezáró irányokból.

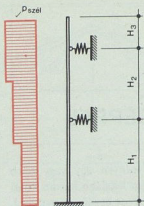
A kikötött torony statikailag tekintve többszörösen határozatlan tartószerkezet, mely a talpnál befogott vagy csuklós megtámasztású lehet. A kikötések a toronytörzs rugalmas megtámasztását jelentik. A megtámasztás rugalmasságát az egy szinten több irányból összetartó kötelek alakváltozása adja. A kikötés szintjén a kötélzet együttesének vízszintes elmozdulása függ a terhelésnek a kötelek irányával bezárt szögétől. A teher és az elmozdulás között nincs lineáris összefüggés, mivel a kötélzet belógása miatt a felső végpont elmozdulása a kötél megnyúlásából származó rugalmas részből, továbbá a kötél alakváltozásának (belógásváltozásának) megfelelő részből tevődik össze.

A toronyszerkezet számítása során az állandó terhelket, a szélterhet, továbbá egyéb meteorológiai terhelést (hőmérséklet-változás, jég stb.) kell figyelembe venni. Ezenkívül a tervezésnél még számos más feltételt is szem előtt kell tartani: például azt, hogy a szerkezet egyes szintjeinek legnagyobb vízszintes elmozdulása vagy szögváltozása behatárolt.

A méretezést lényegesen nehezíti, hogy a terhek a

1. ábra. Toronyszerkezetek





2. ábra. Rugalmasan támasztott tartó

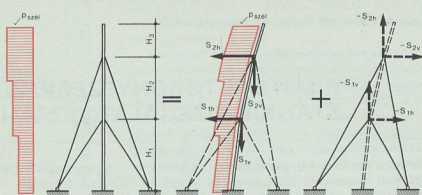
szerkezet egyes elemeinek méreteitől függenek, tehát csak többszöri iterációval érhető el az optimális megoldás.

### A toronyszerkezetek számításának fejlődése

A hagyományos kézi számítás a szerkezet statikai modelljét folytatlagos többszörös, a kikötések helyén ismeretlen állandójú rugókkal megtámasztott tartóként veszi fel (2. ábra). A tervező többszörös iteráció segítségével meghatározza azokat a rugóállandókat, amelyek mellett a kikötési pontokban a toronyelmozdulás kompatibilis a kikötő köteleket reprezentáló rugó elmozdulásával. A kézi számítást nehezíti az a körülmény, hogy a kikötő köteleknél az összetartozó erő és elmozdulás értékeinek meghatározása munkaigényes feladat.

A statikai vizsgálatot nemcsak különböző külső terhelésekre, hanem több eltérő kötel-előfeszítő feszültségre, valamint módosított keresztmetszeti jellemzőkre kell elvégezni. Az első, tervezést segítő számítóprogram adott tervezési feladat esetén táblázatos formában adta meg a kikötő kötéltre az erő-elmozdulás- és rugóállandó-értékeket több paraméter – kötelterhelés, előfeszítő feszültség, hőmérséklet stb. – függvényében. Előnye volt, hogy a rugóállandó meghatározására szolgáló iterációs lépések számát csökkenteni lehetett, de a munka zöme továbbra is a tervezőt terhelte. Ezért fejlesztették ki a jelenleg használt, „Kikötött toronyszerkezetek mértékadó igénybevételeinek számítása és rajzolása” című programot, amely már egyetlen futás keretében képes különböző szélirány vizsgálataiban, többféle terheléscsoportra, különböző kötel-előfeszítések mellett a torony és kikötő kötelek igénybevételeinek és alakváltozásainak adatait számítani és rajzolni.

Ebben a komplex programban azonban el kellett térni a kézi számítások alkalmazott módszertől, mely szerint az iteráció során a toronykikötési pontok, valamint a megfelelő kikötő kötelek elmozdulásainak összehangolásánál a következő iterációs lépésben a kikötést helyettesítő rugók állandója az előző iterációs lépés végeredménye alapján vehető fel. Ez nem vált be minden esetben, mert amíg a kézi számolásnál a rugóállandó korrekcióját a tervező határozta meg, és így a számítás



3. ábra. Polygon alakú rúdszerkezetre és a kötelek rendszerére bontott feladat

mindig konvergenciát lehetett tenni, addig ez a módszer a gépi programnál nem volt járható út. Ehelyett – több megoldási eljárás közül – a torony kikötési pontjaira felírt kompatibilitási egyenletek megoldása bizonyult a legcélszerűbbnek (3. ábra). Ezenkívül a számítógép alkalmazása lehetőséget nyújtott a torony görbült egyenüllyi alakja által okozott hatások figyelembevételére is.

A fejlesztés következő lépésében került sor a nyírási alakváltozások pontos figyelembevételére. A toronyszerkezeteket gyakran tervezik rácsos tartóként, melynek erőjátéka leírható a tömör tartó erőjátékával, ha az utóbbinál a nyírási alakváltozás hatását is figyelembe veszik. Ez a hatás nem hanyagolható el, különösen a másodrendű elmélet szerinti számításnál. A szakirodalomban ajánlott úgynevezett „redukált hajlítási merevség” bevezetése nem elég megbízható, ha a szerkezetet nagy koncentrált erők is terhelik.

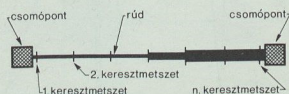
### Kikötött toronyszerkezetek mértékadó igénybevételeinek számítási módszerei

Az előzőeknek megfelelően a számítási modell a következőkre épül:

- A szerkezet és a terhelés elhelyezését a különböző síkokban végzett statikai vizsgálatnál vesszük figyelembe.
- Egy-egy síkban végzett vizsgálattal a feladatot két részre bontjuk: a torony polygon alakú rúdszerkezetére, amelyre a külső terhek, a toronytalpon ható reakcióerők, valamint a kikötő kötelekről átadódó erők; továbbá a kikötő kötelek rendszerére, amelyre a toronyról átadódó erők hatnak (3. ábra).

A toronytörzs számítására speciális rúdszerkezeti módszert, a mátrix mozgásmódszert és az átviteli mátrix módszer kombinációját alkalmaztuk. A választás azért esett erre a módszerre, mert a toronytörzs görbült

4. ábra. Egy toronyszakasz rúdelem-modellje



egyensúlyi alakjának meghatározása, valamint a torony kikötési pontjainak és a kikötő kötelek kompatibilis elmozdulásainak számítása miatt szükséges kettős iterációval járó munkavolumen az egyenletrendszer nagyságától, az pedig a felvett csomópontok számától függ. Míg az alkalmazott módszerrel csak a tartóvégpontokban és a kikötési pontoknál szükséges csomópontot felvenni, addig a szokásos mátrixos rúdszerkezeti módszereknél a közbeneső keresztmetszeteknél is be kell iktatni további csomópontokat. Így az utóbbi esetben az egyenletrendszer nagysága sokszorosra lehet az előbbinek.

Egy-egy toronyszakaszt egy-egy rúdelem-modell reprezentál (4. ábra). A rúdelem mozgásmódszerbeli egység-tényezőit – az úgynevezett merevségi mátrixot – az átviteli mátrix eljárással határozzuk meg. Ennek lényege, hogy egy rúdon valamely keresztmetszet összes igénybevételei és alakváltozási jellemzőinek vektorát megkaphatjuk egy másik keresztmetszet ugyanilyen jellemzőinek vektora és a két keresztmetszet közötti rúdrés differenciálegyenletének megoldásmátrixa – azaz az átviteli mátrixa – segítségével.

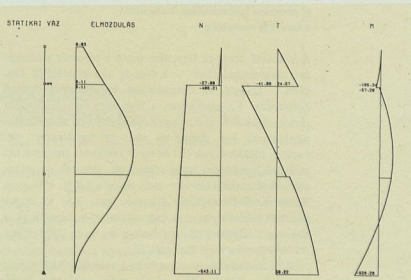
A rúdelemen keresztmetszetről keresztmetszetre végighaladva háromismeretlenes egyenletrendszert kapunk, amelynek megoldása adja egy rúd merevségi mátrixát, és ezek szuperonálásával írhatjuk le a teljes torony mozgásmódszerbeli egyenletrendszerét. A tehervektort hasonló módon számítjuk ki.

A kikötő kötelek modellje – a szokásos háromirányú kikötésnek megfelelően – három önálló kötélből áll, melyek alul külön-külön a talajhoz, felül pedig a toronytörzs révén egymáshoz kapcsolódnak. Ebben a rendszerben a vízszintes erő és elmozdulás közötti összefüggésre egy ötödfokú algebrai egyenlet írható fel, amely figyelembe veszi a kötél rugalmas tulajdonságait, a kötélbelógást és a kötélterheléseket.

A statikai vizsgálatban a két szerkezeti rendszer – a torony és a kikötő kötelek – együttoldozását a csatlakozási pontokon az azonos elmozdulásokra felírt nemlineáris egyenletrendszerrel számoljuk, amelynek megoldásából kaphatók a szerkezet alakváltozásai. Ezek felhasználásával módosítjuk a torony alakját, és a számítást az elejétől megismételjük. Még kétszer elvégezzük ezt a korrekciót, az egyensúlyi toronyalakot igen jól megközelítő alakhoz jutunk, és ezzel megvalósítottuk a másodrendű elmélet szerinti számítás követelményeit. Az egyes keresztmetszetekhez tartozó igénybevételeket és alakváltozásokat az egyensúlyi toronyalak erőjátékának megoldásából számítjuk ki.

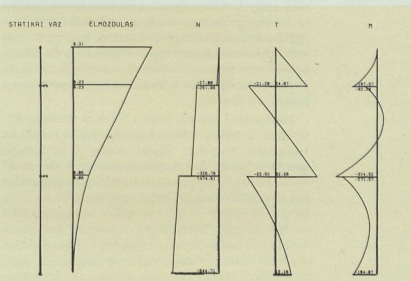
#### A csatlakozó rajzolómódul

A programba beépítettük a grafikus eredményszolgáltatást is. Az ezt megvalósító modul a nyomatéki, nyíróerő-, normálerő-, valamint az alakváltozási ábrákat a diszkrét pontokon átfektetett simuló görbék alkalmazásával állítja elő, azonban a koncentrált erők és a nyomatékok helyén a megfelelő igénybevételi ábrán a szakadást feltünteti.

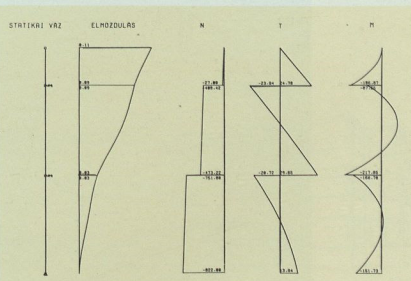


5. ábra. Egy szinten kikötött torony pontjainak elmozdulása és igénybevételei

6. ábra. Két szinten kikötött torony pontjainak elmozdulása és igénybevételei



7. ábra. Két szinten kikötött torony pontjainak elmozdulása és igénybevételei lágyabb kötélzettel



## A program felhasználása, beiktatása a tervezés menetébe

A kikötött tornyok tervezése során a tervezőt a szerkezet megválasztásában — a torony rendeltetésétől függően — számos, az üzemeltetést befolyásoló tényező korlátozza. Ez elsősorban a leggyakrabban előforduló rádiótechnikai létesítmények adótornyaira vonatkozik, amelyeknek két alaptípusa van: az úgynevezett önsugárzó rádiótornyok (itt az egész szerkezet antennaként működik), valamint azok a tornyok, amelyek az antennák tartószerkezetei. Az első típusra példa a Magyar Rádió Kossuth műsórát sugárzó, solti 300 m magas kikötött rádiótorony; a másodikra a budapesti és a kab-hegyi adótornyok, amelyek a tv- és az URH-műsorokat sugárzó antennákat tartják.

A rádiótornyoknál a geometriai méretek, a kikötések helyei és száma mind olyan tényezők, amelyek a sugárzást befolyásolják. A szerkezet alul mindig csuklós, mivel talpszigetelően nyugszik. Azoknál a tornyoknál, amelyek antennarendszerek tartószerkezetei, a felhasználói igények más jellegűek. A keresztmetszet méreteit ez esetben is meghatározzák az antennák típusai, és figyelemmel kell lenni például arra is, hogy a tornyon lévő mikrohullámú antennák sugárzási irányába kikötött kötelek nem eshetnek. Általában szigorúan korlátozzák a torony alakváltozását is, ami kihat a vétel minőségére a besugárzott területen.

Mindezekből látható, hogy a kikötött toronyszerkezeteknél a legkedvezőbb, leggazdaságosabb szerkezet kiválasztása bonyolult feladat, hiszen a felhasználói igények teljesítése nem feltétlenül eredményez konstruktív megoldást, a tervezőnek a korlátok között maradnia kell megtalálnia a legjobb kialakítást.

Az évek során az igényeknek megfelelően módosított számító- és rajzolóprogram ma már gyakorlatilag alkalmas a feladatok elvégzésére. Komoly előrelépést jelentett ebben a rajzolóprogram elkészítése. A korábbiakban a számítógép az eredményeket táblázatos formában adta meg, amely ugyan lehetővé tette a maximális igénybevételek nagyságának és helyeinek kiválasztását, de az egész erőjáték áttekintésére nem volt alkalmas. Az igénybevételek és elmozdulások vizuális megjelenítésével az egész szerkezet viselkedése láthatóvá válik, ezáltal a tervező könnyen megállapíthatja, hogy egy kedvezőbb erőjáték eléréséhez milyen paramétereket célszerű megváltoztatni, illetve következtetni lehet a változás irányára is.

A hatások érzékeltetésére példának választott torony az első vizsgált felvételben egy szinten van kikötve (5. ábra). Az ábrán látszik a nagymértékű elmozdulás, illetve a megengedett értéket túllépő feszültségcsúcs. Legcélsezerűbb ilyenkor még egy kikötést alkalmazni (6. ábra). Ez már mutatja a beiktatott kikötés hatását, de azt is, hogy most a kötelek „visszahúzzák” a toronyt és az egész szerkezet túlméretezett. Következő lépésként lehet a kötelek keresztmetszeti területét vékonyabb kötéll felvételével csökkenteni (7. ábra).

## Fejlesztési terveink

A jelenlegi számító- és rajzolóprogram a kikötött toronyszerkezetek szilárdságtani ellenőrzésére alkalmas. A jövőben azonban több figyelmet kívánunk fordítani a szél- lökésektől lengésbe jött toronyszerkezetek vizsgálatára is. Ezért a programot dinamikai számításokkal tervezzük kiegészíteni.

