

DR. GILYÉN NÁNDOR

SZERKEZET ÉS FORMA AZ ÉPÍTÉSZETBEN

MŰSZAKI KÖNYVKIADÓ, BUDAPEST, 1982

TARTALOMJEGYZÉK



1989 júl 14.

KOTELESPÉLDÁNY

LEKTOROK:

DR. BECKER SÁNDOR
OKL. ÉPÍTÉSZMÉRNÖK

FINTA JÓZSEF
OKL. ÉPÍTÉSZMÉRNÖK

A KÖNYV ILLUSZTRÁCIÓIT A SZERZŐ KÉSZÍTETTE
AZ 1. FÉNYKÉP DR. HAJNÓCZY GYULA, AZ 5. KASSÁNYI MÁRIA, A 25. DR. GILYÉN NÁNDOR,
A 32., 129. ÉS 136. FÉNYKÉP PENNER GYULÁNÉ FELVÉTELE
A BORÍTÓN A BUDAPESTI METRÓ KIPSZER TÉRÁCS LEFEDÉSŰ ÜZEMI ÉPÜLETE
(ÉPÍTÉSZ ÉS GENERAL TERVEZŐ FÖLDESI LAJOS, IPARTERV, SZERKEZETTERVEZŐ ÁRVA PÁL,
KIPSZER, FOTÓ MTI)

© DR. GILYÉN NÁNDOR, BUDAPEST, 1981



ETO: 72.01

ISBN 963 10 4220 0

FELELŐS SZERKESZTŐ:

PAMER NÓRA

Előszó	9
Bevezető	15
I. A szerkezeti esztétika alapjai	21
Szerkezet és forma	23
A szerkezet esztétikai értékelésének alapjai	27
A szerkezetszerűség	29
Az anyagnak megfelelő forma (anyagszerűség)	29
Az erőjátéknak megfelelő forma	34
A technológiának megfelelő forma	40
A szerkezet szubjektív értékelése	45
Az egyensúlyélmény	45
A biztonságélmény	46
Az erőélmény	46
A megértésélmény	47
A rendeltetészerűség	48
II. Történeti áttekintés	51
Szerkezet és forma ösztönös kapcsolata	53
Őskor	53
Ókor	56

Középkor	58
Újkor	60
A statika fejlődése	62
A tudatos szerkezettervezés	66
III. A szerkezet hatása a formára	69
Az építőanyag hatása a formára	71
A szerkezeti anyagok összehasonlítása	71
Az egyes építőanyagok hatása a formára	73
Kőszerkezetek	73
Téglszerkezetek	75
Faszerkezetek	76
Betonszerkezetek	77
Vasbeton szerkezetek	78
Vasszerkezetek	81
Alumínium szerkezetek	83
Műanyag szerkezetek	85
Az erőjáték hatása a formára	86
A méretek hatása a szerkezetre és a formára	87
A szerkezetek erőjátékának formai következményei	95
Hajlított szerkezetek	96
Síkbeli hajlított szerkezetek (gerendák)	96
Térbeli hajlított szerkezetek (lemezek)	109
Nyomott szerkezetek	111
Síkbeli nyomott szerkezetek (ívek)	111
Térbeli nyomott szerkezetek I. (boltozatok)	116
Térbeli nyomott szerkezetek II. (héjszerkezetek)	127
Húzott szerkezetek	139
Síkbeli húzott szerkezetek (láncok, kötelek)	139
Térbeli húzott szerkezetek (sátrak, függőtetők, ballonok)	142
Függőleges teherhordó szerkezetek	148
Pillérek, falak	148
Magas épületek	151
Az építéstechnológia hatása a formára	161
A hagyományos építéstechnológia hatása a formára	161
Az új építéstechnológiák hatása a formára	162

IV. A forma hatása a szerkezetre	173
A forma hatása az építőanyagra	175
A forma hatása az erőjátékra	177
A forma hatása az építéstechnológiára	182
Utószó	185
Jegyzetek	190
Irodalom	198
Summary	201



Történeti előszó
 I. fejelet. A görög templom építészete
 II. fejelet. A görög templom építészete (folytatás)
 III. fejelet. A görög templom építészete (folytatás)
 IV. fejelet. A görög templom építészete (folytatás)
 V. fejelet. A görög templom építészete (folytatás)
 VI. fejelet. A görög templom építészete (folytatás)
 VII. fejelet. A görög templom építészete (folytatás)
 VIII. fejelet. A görög templom építészete (folytatás)
 IX. fejelet. A görög templom építészete (folytatás)
 X. fejelet. A görög templom építészete (folytatás)

1. ábra

Az athéni Parthenon.

Az építőművészet jelképévé vált görög templom formáiban felfedezhető az anyag és az erőjáték ismerete

ELŐSZÓ

A művészet mindig is az emberiség lelkének tükröz, és az építőművészet nem kivétel. Az athéni Parthenon nem csupán egy templom, hanem egy civilizáció jelképe. Az építők a kő és a szobor segítségével megalkották ezt a csodát, amely ma is áll, és amelynek minden egyes köve a múltat idézi. A görög templom építészete nemcsak a művészet, hanem a tudomány és a technika jele is. Az építők a természet törvényeire támaszkodva hozták létre ezt a csodát, amely ma is áll, és amelynek minden egyes köve a múltat idézi.

A művészet mindig is az emberiség lelkének tükröz, és az építőművészet nem kivétel. Az athéni Parthenon nem csupán egy templom, hanem egy civilizáció jelképe. Az építők a kő és a szobor segítségével megalkották ezt a csodát, amely ma is áll, és amelynek minden egyes köve a múltat idézi. A görög templom építészete nemcsak a művészet, hanem a tudomány és a technika jele is. Az építők a természet törvényeire támaszkodva hozták létre ezt a csodát, amely ma is áll, és amelynek minden egyes köve a múltat idézi.

Szerkezet és forma kapcsolata nem lehet teljesen idegen annak, aki az építészettel már tudatosan is foglalkozott. Sőt, voltak időszakok, amikor az elméleti vizsgálódás és az építészeti gyakorlat egyik fő kérdésévé vált, mint például a múlt század közepe utáni évtizedekben, és legfőképpen a mi századunk ötvenes, hatvanas éveiben, amikor az építési feladatok mennyiségi és minőségi fejlődése irányította rá a figyelmet. A hetvenes években más irányzatok tűntek fel, amelyek egyike-másika a teherhordó szerkezet és az építészeti forma összefüggéseit szinte tagadni szeretné – véleményem szerint szoros összefüggésben azzal, hogy az utóbbi évek csökkenő számú, és a korábbiaknál nagyobb térigényt szinte sohasem felvető feladatai, már kialakult jó szerkezetei nem feleltek meg a minden áron újat akarás vitatható igényének. Erre is vonatkozik Doxiadis megjegyzése: „Előbb keressünk jó megoldásokat, mint újakat, de ne ijedjünk meg, ha a jó megoldások visszavisznek a hagyományokhoz.”¹⁾ Hasonló gondolatot fejez ki Mies van der Rohe is: „... a legtöbb építész minden alkalommal valami újat próbál feltalálni. Holott ami tényleg a legfontosabb, az a forma lassú kibontása. Az ismeretet kell tovább finomítanunk. És ha új probléma merül fel, tudni fogjuk, hogyan kell megoldani.”²⁾ „Aki feltűnővé akarja tenni magát és művészetét, annak kezére játszik a divat. Számára bizonyos a nap sikere. Hogy a történelem színe előtt is helytálló-e, az attól a mértéktől függ, mennyi személyen túlmenően rejtezik műveiben... Az új viselje magán a szükségesség jegyét.”³⁾

Már itt hangsúlyozni szeretném, hogy – nem tagadva meg a szerkezeti eszközökkel megvalósuló építészeti gondolat iránti vonzódásomat – az egyoldalúságot mindenképpen kerülni szeretném, és remélem, ez a törekvésem sikerrel is jár. Nem céлом tehát a technikai értelemben vett konstruktivizmus hirdetése, hiszen a valóság – és ezen belül az építészet – olyan sokrétű, hogy nem férhet be egyetlen „izmus” szűk kereteibe. E szélsőséges irányzatok szükségképpen zsákutcába vezetnek (bár a fejlődésben egy ideig pozitív szerepük lehet, ha a korábbi időszak ellenkező értelmű egyoldalúságát tagadják).^{3a)} Ezért a szerkezet és forma kapcsolatának most következő tárgyalásánál is igyekszem mindig szem előtt tartani, hogy az építészetre, és ezen belül a formára még számos egyéb tényező hat, amelyek jelentősége, fontossága is változó, az építési feladattól, a kortól, és még sok egyébtől függően. Egy-egy részlet kiragadása azonban minden kutatás elengedhetetlen feltétele, így a későbbiekben a szerkezet

és a forma viszonyát, sőt annak egyes részleteit önállóan kell tárgyalni, de remélem, hogy mindig sikerül ezeket a részleteket az építészet egészébe illeszteni. Viszonzásképpen az esetleg más véleményt valló olvasótól csak annyit kérek, fogadja el, hogy a szerkezet hatása a formára építészetileg – az építészetet elsősorban művészetnek tekintve is – értékes lehet.

Felmerülhet a kérdés, milyen haszna van az ilyen vizsgálatoknak? Közvetlen, gyakorlati hasznosságról természetesen nem beszélhetünk, ahogy nem várhatjuk ezt semmilyen építészetelméleti vagy építésztörténeti munkától sem. Az összefüggések jobb megismerése azonban mindenképpen tudatosabbá és így eredményesebbé teheti az építészeti (és esetünkben még a szerkezettervezési) alkotómunkát. A hangsúly itt a történyszerűségek megértésén, tudatosításán van, mert ahogy ma már általában egy építész sem akarja történeti formák másolására használni az építésztörténeti irodalmat, ugyanúgy e könyv sem szándékozik – és nem is képes – „receptet” adni a szerkezet és forma ideális viszonyának konkrét megvalósításához. De közvetve segítséget nyújthat egy feladat megoldásához. Hasznát növeli talán határterületi jellege, mivel mind az építész, mind a szerkezettervező munkájához szorosan kötődik, e két – a szükséges ismeretek gyarapodásával ma már szükségszerűen elváló – szakterület sokat hiányolt kapcsolatát javítja. Segíti a másik fél problémáinak jobb megértését, így a saját területen is eredményesebbé teszi a munkát a végső soron közös cél, az építési feladatnak minden szempontból jól megfelelő épület tervezése és megvalósítása érdekében. Szükség van a szintézisre, mert az építészet művelése ennyi szerteágazó ismeretet még sohasem kívánt, ami egyre újabb, önálló részs szakmák kialakulásához vezet, amelyek saját szűk területükön a legjobb teljesítményt igyekeznek nyújtani, de eközben könnyen szem elől tévesztik a nagyobb összefüggéseket. Nagy a veszély, hogy egyesek csak a funkció vagy az esztétika, mások csak az erőjáték vagy a technológia oldaláról, sőt esetleg csak ezek egy szektorának szempontjából közelítik meg a feladatokat. Pedig igazán értékes alkotások csak az épületnek, mint egésznek együttlátásából szülehetnek.

Hasznos segítséget adhat ez a könyv a sokat hiányolt építészeti kritika fejlődéséhez is, hiszen a szerkezet mindenképpen az építészet egyik lényeges, sőt nélkülözhetetlen eleme, amely nélkül az építészeti forma meg sem valósulhat. Az építészeti kritika elmaradottságának egyik oka talán éppen az, hogy az építészet megértéséhez nélkülözhetetlenek a technikai, műszaki ismeretek, ezért az esztétikai művek az építészzel vagy egyáltalán nem, vagy csak nagyon felszínesen foglalkoznak.

Haszonnal forgathatják talán azok is ezt a könyvet, akik nem szakemberek, de az építészet, mint művészet, és mint mindennapi életünk kerete iránt érdeklődnek. Ahogy a zene mélységeibe jobban behatolhatunk, ha elméleti ismereteket is szerzünk, az építészet szépsége is jobban kibontakozik annak számára, aki a külső megjelenés, a forma mögött felismeri a rejtett összefüggéseket.

A statikában kevésbé járatos építészeket, de a más képzettségű érdeklődőket se ijesszék el a könyv olvasásától a közölt képletek, levezetések. Ezek nyugodtan kihagyhatók – az ilyen jellegű, hosszabb szakaszokat az apróbb szedés is jelzi – a lényeg a végkövetkeztetésekből is érthető. Viszont úgy éreztem, ezek a részek mégsem hagyhatók ki teljesen, mert jellemzően bizonyítják, hogy az esztétikai kérdéseknek is van objektív, természettudományos oldala.

Végül néhány szubjektív megjegyzés, hogy mi indított a szerkezet és forma kérdéseinek vizsgálatára. Idestova 30 éve statikusként, szerkezettervezőként dolgozom a gyakorlatban és az oktatásban. Így közvetlen tapasztalatból ismerem az említett

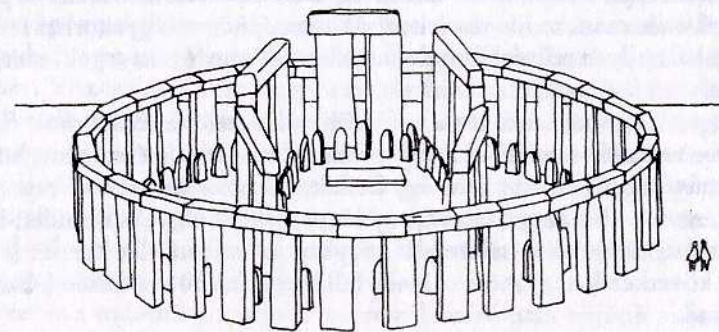
kérdéseket, nehézségeket, és sohasem vesztettem el az érdeklődésemet az építészet egészé iránt. A szerkezet és forma viszonyának elméleti vizsgálatára ösztönzött professzorom, *Dr. Pelikán József*, akinek tanítványa és később évekig tanársegédje voltam. E könyv sok gondolata közvetlenül tőle származik, vagy az ő hatására alakult ki bennem. Igen sokat köszönhetek *Dr. Pogány Frigyes* professzornak, aki az építészetelmélet, az esztétika oldaláról jutott el a szerkezet értékeléséhez, és gondolatai nagy segítséget nyújtottak a szerkezet és forma kapcsolatáról alkotott véleményem kialakulásához. Köszönettel tartozom ezenkívül igen sok kollégának, akiket itt név szerint nem sorolhatok fel; a velük folytatott rövidebb-hosszabb beszélgetések eredménye szintén megtalálható a következő lapokon.

Ez úton is köszönetemet fejezem ki a két lektornak, *Dr. Becker Sándornak* és *Finta Józsefnek*, akik a kézirat alapos átnézésén, számos kisebb hibájának felfedésén túl a szerkezettervezés, ill. az építészet oldaláról sok értékes, elvi jelentőségű észrevételükkel is kiegészítették, helyesbítették mondanivalómat.

Végül, de nem utolsósorban köszönetet mondok a Műszaki Könyvkiadó Vezetőségének és munkatársainak, hogy e könyv megjelenését lehetővé tették.

Mielőtt a szerkezet és forma részletesebb tárgyalásába bocsátkoznánk, célszerű az építészet és más művészetek, elsősorban a szobrászat és az iparművészet viszonyát is megvizsgálni. E két említett művészet áll ugyanis legszorosabb kapcsolatban az építészettel.⁴⁾ A művészi kifejezés alapvető eszköze e három művészetben közvetlenül az anyag. A festészetben az anyag (a festék) már két dimenzióba absztrahálódik, a többi művészet pedig csak közvetve használja fel az anyagot.

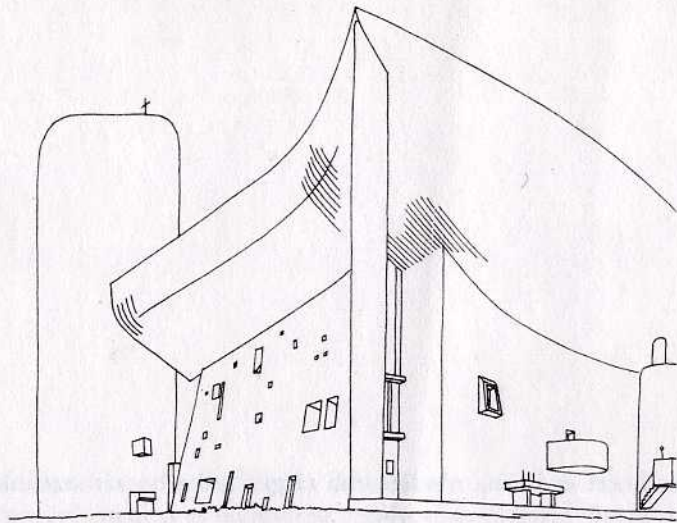
A szobrászat, mint térbeli művészet, nagyon közeli kapcsolatban van az építészettel. A kapcsolat leginkább akkor nyilvánvaló, ha olyan művekkel találkozunk, amelyekről nehezen dönthető el, hogy melyik műfajhoz tartoznak. A szoborszerű, tehát nem a belső tér érdekében létesített épületek végigkísérik az építészet történetét. Az őskori kultikus építményeknek például egyáltalán nincs belső terük (2. ábra), de az egyiptomi piramisok sírkamrája is szinte elenyészik a monumentális tömegben.⁵⁾ A szoborszerű építészeti alkotások közé sorolhatjuk minden kor nagyszabású emlékműveit. Lényegüket tekintve már nem tartoznak ebbe a kategóriába a szoborszerűen formált valódi épületek, ahol a szoborszerűség csupán az építész formai elképzelé-



2. ábra

A Stonehenge-i cromlech.

A zárt teret nem tartalmazó építészeti alkotás korai példája; megfigyelhető, hogy formái már az oszlopperendás kőszerkezet minden lényeges jegyét tartalmazzák

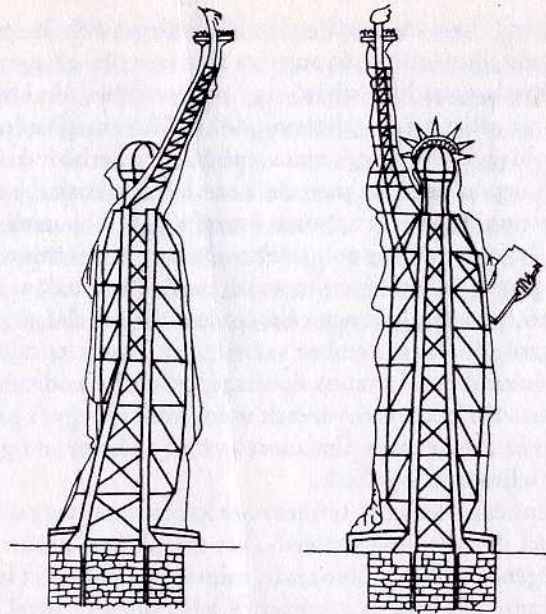


3. ábra
A Ronchamp-i Notre-Dame kápolna.
A szobrászi jellegű épületformálás jellegzetes példája

séből fakad (leggyakrabban idézett példája Le Corbusier Ronchamp-i temploma, 3. ábra). A műfaji határok a szobrászat oldaláról is elmosódhatnak. A szokásosnál lényegesen nagyobb méretű szobrok pl. belső tereket zárnak körül, ha ezeknek legtöbbször nincs is lényeges funkciójuk. Számunkra különösen fontos, hogy ilyen esetben megtalálhatók a szoborban az épületekre jellemző teherhordó szerkezetek is (4. ábra). Ez a jelenség arra utal, hogy az építészet és a szobrászat közötti műfajbeli különbség részben az eltérő méretekből fakad. Még jobban közeledik egymáshoz a két művészet az „épületszobrok” esetében. Ezek olyan alkotások, amelyek művészi, eszmei mondanivalójukat belső terek segítségével fejezik ki. A felületes szemlélő számára épületnek tűnnek – annak külső ismérveit tartalmazzák is, pl. falaik, földmük, nyílásaik vannak – de rendeltetésük nem építészeti, gyakorlati funkciójuk nincs, csupán valamilyen művészi gondolatot akarnak a térben anyagok, szerkezetek, burkolatok stb. segítségével kifejezni.⁶⁾

Az építészetet a szobrászattól tehát – az előbbi, kivételes eseteket most figyelmen kívül hagyva – a téralkotáson kívül a gyakorlati cél és a nagy méret is megkülönbözteti. Az iparművészettől viszont néha úgy látszik, csupán a nagyobb méretek választják el az építészetet. Van azonban még egy lényeges különbség: az épület, bár nagy méretű használati tárgynak is tekinthető, egyben az emberi élet keretét is alkotja. Éppen ebből következik nagy mérete, amelyből a teherhordó szerkezetek hangsúlyos szerepe is fakad.

A szerkezet (teherhordó szerkezet értelemben) az építészet egyik sajátossága tehát, amely egyben nyilvánvalóvá teszi, hogy az építészet, mint művészet szoros kapcsolatban áll a természettudománnyal is, mert a szerkezet a mechanika törvényei szerint működik, és megvalósításakor ezeket a törvényeket (tudatosan vagy ösztönösen)



4. ábra
A New York-i Szabadság-szobor.
A nagyméretű szobornak az épületekhez hasonló tartószerkezete van

figyelembe kell venni. A művészet és a tudomány merev szétválasztása egyébként sem indokolt, mai gondolkodásunkban valószínűleg a „l'art pour l'art” elvének helytelen és szélsőséges értelmezéséből ered. Korábban a művészek nem tekintették lealázónak a tudomány vagy a technika eredményeinek felhasználását. Jean Mignot szerint „ars sine scientia nihil est”⁷⁾. Jellemző példa a festészet egyik nagy korszaka, a reneszánsz, amikor a geometria fejlődése, a perspektíva törvényeinek megismerése a művészi kifejezés lényeges elemévé vált, sőt maguk a művészek fejlesztették tovább a geometriát. Hasonló volt a helyzet az építészet területén: Vasari a későreneszánsz idejében is ugyanolyan csodálattal ír a firenzei dóm építéstechnológiai megoldásáról, mint más, mai értelemben vett művészi teljesítményről.⁸⁾ A mai felfogás annyiban jogos, hogy sem a tökéletes perspektíva nem elegendő (és a reneszánsz korában sem volt elegendő) a jó festményhez, sem a szellemes technológia, vagy akár a célnak megfelelő szerkezet a jó épülethez. Viszont az is tény, hogy a tudomány eredményeinek az építési feladat által megkövetelt szerves felhasználása nélkül nincs a kor igényeit kielégítő épület, tehát építőművészet sem. Ez a megállapítás nemcsak a szerkezetekre érvényes, hanem sok egyébre is, pl. az épületfizikai követelmények kielégítésére, vagy egy üzemi épületben a gyártási technológia minden vonatkozásának figyelembevételére. A művészetek közül – éppen alkotásainak gyakorlati célja miatt – az építészet van tehát legszorosabb kapcsolatban a tudománnyal.

A művészet és a tudomány világába tett rövid kitérő után térjünk vissza az építészethez. A kezdeteket vizsgálva megállapíthatjuk, hogy az épülettel szemben támogatott alapvető igény a védelem. Az építészet elsődleges célja ezért az életfunkciók számára védett, zárt tér létesítése. E cél elérése olyan térelhatároló szerkezettel válik lehetővé, amely a környezetből ráháruló hatásoknak (pl. szél, hó) ellenállni és saját

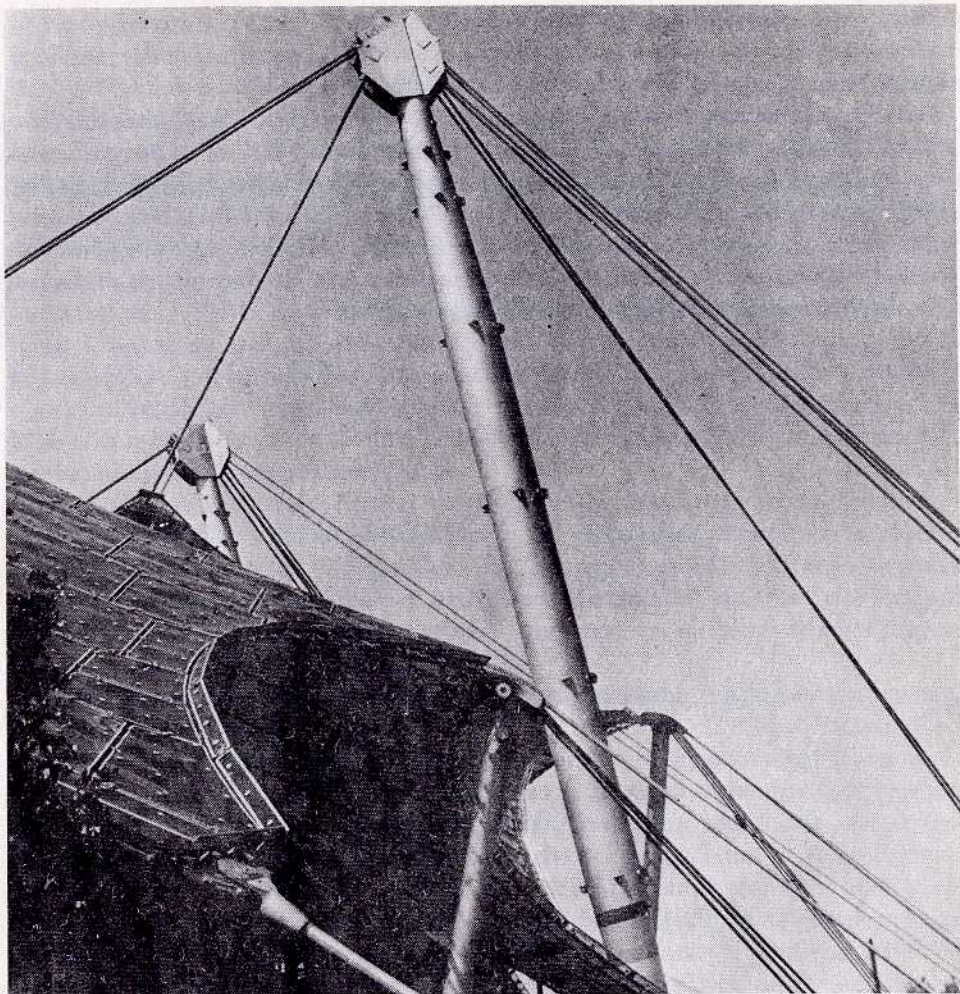
súlyát is hordani képes.⁹⁾ Ez a meghatározás a kezdetleges őskori épületekre éppúgy érvényes, mint korunk alkotásaira, sőt annyira általános, hogy egyes állatfajok által létesített építményekre is vonatkoztatható. Így máris sejthetjük, hogy ennél árnyaltabban kell az építészet célját megfogalmazni, de az előbbi meghatározás mégis hasznos, mert nyilvánvalóvá teszi, hogy nincs építészet teherhordó szerkezet nélkül (viszont lehetséges, hogy az épületet pusztán a szerkezet alkotja), a teherhordó szerkezet az épület alapeleme. Hogy ezt a szoros összefüggést jobban megértsük, vegyük például figyelembe, hogy az ember sok tízezer éven át nem támasztott az épülettel szemben esztétikai igényt, és mai fejlett társadalmunk is számtalan, csupán az előbbi meghatározás szerinti, pusztán hasznos célú épületet létesít. Vagy gondoljunk arra, hogy a kényelmet szolgáló, a mai ember számára az elvont tartalmú szerkezethez képest sokkal nyilvánvalóbban hasznos épületgépészeti berendezések – a korábbi, olyan általánossá nem váló kezdeményezések után, mint pl. egyes paloták vízvezetékai – csak mintegy száz éve kezdtek általánossá válni, egészen addig az épületek túlnyomó többségéből teljesen hiányoztak.

A szerkezet és az építészet lényegi, természetes kapcsolata magyarázza talán az építészetelmélet kezdeti óta állandóan kísértő, két szélsőséges nézetet: egyik oldalon a szerkezet jelentőségének túlhangsúlyozását, mintegy az építészet lényegének tartva azt, másik oldalon fontosságának és szerepének lebecsülését, mivel annyira magától értetődőnek, az építészet magasabb rendű – vagy csak annak vélt – céljaitól függetlennek, azokhoz képest lényegtelennek tűnik.

A kérdés megoldásához az építészet céljának pontosabb megfogalmazása vezet. Azt mondhatjuk, hogy az építészet feladata, a természet ellenséges hatásai elleni védelmen túl, a különféle emberi – fizikai és szellemi – funkciókat megfelelően szolgáló tér létesítése.¹⁰⁾ Ez a cél konkrét esetben a sokszor csak ösztönösen, de újabban egyre inkább tudatosan megfogalmazott *építési feladatban* jelentkezik. Az építési feladat tartalmazza azokat az igényeket, amelyeket az épülettel ki kell elégíteni. Az igényeknek itt olyan széles a skálája, mint például valamilyen üzemi funkció ellátásának négyzetméterben és felszerelési tárgyakkban kifejezhető szükséglete, vagy egy közösség számszerűen meg nem határozható reprezentációs igénye. A használó részéről a szerkezettel kapcsolatban kívánalmak nem merülnek fel (ha szélsőséges esetben egy szerkezet bemutatása az igény, a lényeg itt is a bemutatás szellemi igénye). Az építési feladatnak megfelelő épület megvalósíthatóságának technikai és gazdasági feltételeiben viszont a szerkezetnek igen nagy szerepe van, sőt sokszor visszahat az építési feladat reális megfogalmazására. Közismert, hogy a térlefedő szerkezetek fejletlensége évezredekig gátolta a nagy egységes terek létesítését, míg ma éppen fejlettségük csábít sokszor indokolatlan, gazdaságilag nem reális igények támasztására. Az épületet tehát sohasem a szerkezetért építjük – vagyis a szerkezet nem lehet öncélú – de a szerkezet a megvalósítás elsődleges technikai eszköze. Ebből viszont következik, hogy az építészeti forma is összefügg a szerkezettel. Így az építészet technika változása, fejlődése szükségszerűen befolyásolja a formát is. Otto Wagner, a modern építészet egyik korai előfutára szerint „mindig van valamilyen szerkezeti ok, amely a formákat befolyásolja, és ebből biztosan következtethetünk arra, hogy az új szerkezetekből is új formák születnek.”¹¹⁾ Az építészet ettől akarva sem tudja függetleníteni magát, de ha mint igazi művészet, saját korát ki akarja fejezni, nem is lehet ilyen törekvése. „Az építészet sajátyszerűségéből ... önként adódik ... a szerkezeti funkció viszonylag jelentős tartalmi szerepe ... Az architektonika az építészet egyik tipikus és alapvető művészi kifejező eszköze ... a szerkezetiség számos esetben,

szűkebb funkcionális körén tülemelkedve, az eszmei szférában is jelentős szót kér”.¹²⁾ A szerkezet tehát másodlagosan az *építőművészet* formaalakító eszközévé is válhat, nemcsak mint kényszerű adottság, hanem mint pozitív tényező.

Csak ilyen szemlélettel érthető, hogy miért lényeges a szerkezet és forma kapcsolatának vizsgálata. Nem a szerkezetek – a teherhordó szerkezetek – hangsúlyozásának szükségét hirdetjük, hanem célunk az építészeti szerkezet és forma kölcsönhatásának vizsgálata, és a „szerkezeti esztétika” körvonalainak felvázolása. A továbbiakban ezért az építészeti „tartalom”¹³⁾ egy részének, a szerkezetnek megjelenését, formáját, ill. az egész épület megjelenésére való hatását, és a formának a szerkezetre való visszahatását fogjuk részletesen megvizsgálni.



5. ábra
A müncheni olimpiai stadion.
A húzott szerkezetek egyik jellegzetessége a szerkezet és forma teljes egysége

I. A SZERKEZETI ESZTÉTIKA ALAPJAI

A művészi tevékenység tudatossá válása nyomán már a görögöknél kialakult az esztétika, mint a filozófia egyik ága. Ez a tudományág azonban – elsősorban művelőinek érdeklődési köre, képzettsége folytán – mindig inkább az irodalom, a festészet és a szobrászat, majd a zeneművészet kérdéseit vizsgálta, az építészet mindvégig érdeklődésének perifériáján maradt. A jelenség oka csak kis mértékben az, hogy az építészet műveit, mint gyakorlati célú alkotásokat, nem tekintették „tisztá” művészetnek. Sokkal inkább azért nem foglalkoztak az építészet esztétikájával, mert ennek műveléséhez más irányú, műszaki ismeretek is szükségesek.¹⁴⁾ Még sokkal jellemzőbb ez a megállapítás a szerkezeti esztétikára, az építészeti esztétika egyik ágára, ahol szerkezeti – anyagtani, statikai, technológiai – ismeretek nélkül csak igen általános, a lényegét alig érintő megállapítások tehetők. De éppen az ilyen, két egymástól eltérő tudományág kutatási módszereit felhasználó „hibridtudományok” hatnak termékenyítően mindkét tudomány egészére, a másik területről behatoló új eszmék és módszerek útján.¹⁵⁾ A szerkezeti esztétika ilyen szempontból is különleges helyet foglal el, mert három terület, a természettudományos alapokon nyugvó szerkezettervezés, a művészetek között is sajátos – gyakorlati célú, ugyanakkor magasrendű eszmei tartalmat kifejező – építészet és az esztétika érintkezési területe.

SZERKEZET ÉS FORMA

A szerkezeti esztétika fő kérdésének, a szerkezet és forma viszonyának tárgyalása előtt tisztáznunk kell e két alapfogalmat.

A szerkezet szón a továbbiakban az épületnek a külső erőket és saját súlyát felvevő alkotóelemét, a teherhordó szerkezetet értjük. Az épület ugyan csupa szerkezetből áll, amelyek kivétel nélkül bizonyos erőhatásoknak vannak kitéve, és ezeknek a hatásoknak ellen is kell állniuk, de egyeseknél a teherhordó funkció másodlagos, és ha a terhek jelentősebbek, átadják a teherhordó szerkezetekre (pl. egy homlokzati üvegfallal közvetlenül felveszi a szélterhet, de – általában merevítő, üvegosztó bordák közvetítésével – átadja az épület fő teherhordó szerkezetének). Az ilyen, nem teherhordó szerkezetek (pl. a burkolatok, nyílászárók, gépészeti berendezések) elsődleges célja

viszont más. Az építészeti formával is más a kapcsolatuk, és a kapcsolat az épület tervezési folyamatával egyszerűbben befolyásolható. A továbbiakban csak a teherhordó szerkezetekkel foglalkozunk, és azokat a szakmai köznyelvvvel egybehangzóan röviden szerkezetnek nevezzük.

A szerkezet idegen neve, a „konstrukció” a latin *struo* = építék igéből származik, amely jól érzékelteti az építészetben betöltött fontos és sajátos szerepét.¹⁶⁾ A fogalmak tisztázása érdekében meg kell említeni, hogy a szerkezet szó más, rokon fogalmat is jelöl, amely sokkal általánosabb jellegű. Ennek latin megfelelője a „struktúra” (szintén a *struo* ige származéka) bármilyen alakulat (anyag, élő szervezet, sőt szellemi alkotás) részei közötti összefüggések módját és rendjét jelenti. Ilyen értelemben a szerkezetnek is van struktúrája (pl. egy gerenda lehet homogén anyagú, de készülhet rudakból összeépített rácsos szerkezetként is), amiről a szerkezet és forma összefüggéseinek részletes tárgyalásánál még bővebben szólnunk.

A teherhordó szerkezet csak anyagból valósítható meg. Az építőanyag tehát a szerkezet egyik alapvető összetevője, ha nem is meghatározója (pl. egy kupola építhető téglából, betonból, de akár rácsos vasszerkezetből is). A szerkezet viszont sohasem öncélú. Sajátos teherhordó funkciójával mindig valamilyen építészeti funkciót lát el. A funkciót viszont az építési feladat, az igény szabja meg. Ezek együtt – építési feladat, funkció, szerkezet (itt most ismét általánosabban, nemcsak teherhordó szerkezet értelemben) és anyag – adják az építészet tartalmát.¹⁷⁾

Az építészeti forma az építészeti tartalom megjelenése, és mint ilyen, szükségszerűen létezik. Számunkra akkor válik lényegessé, ha a művészi forma kialakulását vizsgáljuk. Formája ugyanis minden tárgynak van, sőt a forma valamilyen módon mindig kifejezi a tartalmat. Művészivé akkor válik, ha a tartalmat kifejezőerővel, eszmei szintre emelve jeleníti meg. Így a művészi forma mindig tudatos emberi tevékenység eredménye. Például a teherhordó szerkezetek formái is mindenképpen tükrözik az erőjátékot, ezt nevezzük tektonikának. Ez azonban csak akkor válik művészi értékűvé, architektonikává, ha kifejezi az adott szerkezet saját logikáját, az egész épületben betöltött szerepét, funkciónak megfelelő voltát. (Külön fel kell hívni a figyelmet, hogy formán – a köznyelvvvel ellentétben – nem díszítéseket, esetleg a homlokzat kiképzését értjük, hanem ide tartozik az épület teljes megjelenése, a tömegformálástól, a belső terek megjelenésétől a legkisebb szerkezeti részlet külső szemlélő által észlelhető megoldásáig.)

Az alapfogalmak tisztázása után már megvizsgálható – egyelőre csak általánoságban – szerkezet és forma kapcsolata. A tisztánlátás érdekében előljáróban említünk meg néhány gyakran felbukkanó tévhitet, amely felszíni formai hasonlóság alapján akar mélyebb összefüggésre lelteni. Például egy út fölé boruló fasor emlékeztethet egy gótikus katedrálisra, de itt nem szerkezet és forma kapcsolatáról van szó: a fa, mint szerkezet, teljesen másként viselkedik, mint a boltozat. Egy olajcsepp is meglepően hasonlíthat az orosz hagymakupolákra, mégsem valószínű, hogy szorosabb kapcsolat volna köztük. Számatalan hasonló példát lehet találni, például a római Palazzetto dello Sport alaprajza is hasonlítható egy napraforgóvirághoz (ezeknek a formai összehasonlításoknak meglepően nagy irodalmuk is van), de ebből sem vonhatunk le semmiféle hasznos következtetést.

Szerkezet és forma kapcsolatát érdemben vizsgálva először is arra, a már említett igazságra kell utalnunk, hogy a filozófiai, esztétikai értelemben vett forma egyenrangú párja a tartalom, a kettő ugyanannak a valóságnak más irányú megközelítése. Az építészeti tartalomban azonban a szerkezetnek kiemelkedő szerepe van, ezért

indokolt a vizsgálatot szerkezet és forma viszonyára leszűkíteni. Már most, előljáróban le kell szögezni, hogy a szerkezet és forma kapcsolata nem szűkíthető le a teherhordó szerkezet formájára, hiszen a szerkezet az épület szerves és lényeges alkotóeleme, amelynek az egészre jelentős hatása van. Ezért a szerkezettervezés elvben nem választható el az épület tervezésétől, a gyakorlati szétválasztás pedig káros mind az épület egészére (annak tartalmára és formájára), mind magára a szerkezetre nézve. Le Corbusier mondta még a húszas években, hogy „mérnöki esztétika és építőművészet: e kettő a legmélyebb okoknál fogva egy ... A mérnök, a gazdaságosság törvényétől ihletve és számításaitól vezetettve, a világmindenség törvényeivel hoz minket összhangba ... Az építész a formák rendszerező egybeillesztésével olyan törvényt juttat érvényre, amelyet mi a világmindenséggel való egybecsengésnek, szépségnek fogunk fel.”^{17a)} E talán túlzottan elméletinek tűnő gondolatok után világítunk meg a szerkezet és forma összefüggését egy példával, ismét Le Corbusiert idézve, aki az előbbi elvek gyakorlati következményeit is az elsők között vontta le: „A teherhordó funkciók (pillérek és gerendák) és a hordozott részek (kitöltő falak vagy válaszfalak) szétválnak; a vázszerkezet független lesz (acél vagy vasbeton); pontalapokon nyugszik a föld alatt, és nincs szüksége a hagyományos alapfalakra. A homlokzat, mivel nincs már semmiféle kötelező teherhordó szerepe, úgy tekinthető, mint egyszerű hártya, amely elválasztja a bent levőt a kint levőtől. Nem hordozza többé a födémek terhét, és ilyen körülmények között meghozza a századok erőfeszítéseinek gyors megoldását; ezek ugyanis arra irányultak, hogy a fény maximális mennyisége jusson az építmények belsejébe.”¹⁸⁾

A tervezésben – különös tekintettel a szerkezetekre – három lényeges irányzatot különböztethetünk meg. Az első a formából (pl. egy elképzelt tetszetős tömegből, vagy homlokzathoz) indul ki, és kisebb-nagyobb mértékben ennek rendel alá a tartalmat, így a szerkezetet is. Az építészet e felfogás szerint a szobrászathoz hasonló, plasztikus művészet. Semmi biztosítékunk sincs azonban arra, hogy ebből az egyoldalú szobrászi szemléletből jó épület alakulhat. Ezt támasztja alá a tapasztalat is. A szobrászatban ugyanis műfaji adottságainál fogva sokkal egyszerűbb a tartalom és a forma kapcsolata, mivel egyrészt – mint látni fogjuk – a technikai feltételek kevésbé hangsúlyosak, másrészt a szobornak nincs gyakorlati rendeltetése. Sőt, elvileg is vitatható „vajjon egy magasabb rendű feltételnek – például a formának – szabad-e olyan mértékig eluralkodnia az alkotáson, hogy az alacsonyabb rendű feltételek – például ... a szerkezet – sajátos érvényesülését nagymértékben, vagy teljesen elfedje, sőt elnyomja, ezek ellenében érvényesüljön ...”¹⁹⁾ Muthesius szerint az új építészetnek – a XIX. század dekadenciája után – nem a külső új alakjából, hanem az új szerkezet- és térszemléletből kell kialakulnia.²⁰⁾ A következő, az ipari formatervezés alapelveit összefoglaló mondatok is változtatás nélkül alkalmazhatók az építészetre: „A szép forma – amely egyet jelent a jóval – nem külső máz, nem felszínes burkolat, melyet roszszul értelmezett dísként akasztanak egy céltudatos szerkezetre. A „szép és jó” forma egy a tartalommal, annak valóságos látható formája. A külső forma elválaszthatatlan a tartalomtól. A rossz tartalom mindig csúnya formát mutat, míg a jó mindig szép külsőt eredményez.”²¹⁾

A másik szélsőséges felfogás, a technikai értelemben vett konstruktivizmus²²⁾ szerint az épület tervezésének a szerkezetből kell kiindulnia, sőt a szerkezet alkotja az épület lényegét, így a formát is egyértelműen meg kell határoznia. Ez a felfogás is nyilvánvalóan téves, hiszen az épület megvalósításának eszközét, a szerkezetet céllá teszi. Így az épület rendeltetésének nem megfelelő, öncélú szerkezettel ugyanolyan

formalistává válhat, mintha a formából indult volna ki. Ez a felfogás megfelelkezik arról, hogy a szerkezet mindig is eszköz volt az építészetben. A konstruktivizmus pl. a történeti stílusok közül általában a gótikát becsüli legtöbbször. A középkori építőmesterek ösztönös szerkezeti, statikai tudása valóban csodálatra méltó, és alkotásaikban zseniálisan mutatkozik meg a szerkezetek építészetalakító ereje. Mégsem szabad megfeleledkeznünk róla, hogy a szerkezeti bravúrokat egy teljesen más, elvont cél, a kor felfogását tükröző, ég felé törő tér igénye miatt valósították meg. Sőt azt figyelhetjük meg, hogy a szerkezet régebben fékezően hatott az építészetre, elsősorban a nagy terek lefedésének nehézségei miatt. Ez a fékező hatás egyrészt a technikai lehetőségek hiányában, de nem kevésbé gazdasági lehetőségekben jelentkezett. Csak korunkban fejlődtek annyira a szerkezetek, hogy a technikai lehetőségek szinte korlátlanok. Ma már nem az a kérdés, hogy megépíthető-e a kívánt épület, sokkal inkább az, hogy *szabad-e* megépíteni – vagyis nem kíván-e a kitűzött cél elérése túlzott anyagi áldozatot.

Meg kell itt jegyezni, hogy a közfelfogás olyan építészeket és mérnököket is az ún. konstruktivista tervezők közé sorol, akik a következő, helyesnek tekintett elvek szerint alkottak, de alkotásaikban a szerkezet a szokásosnál lényegesebb szerepet kap (pl. Au. Perret, P. L. Nervi, F. Otto). Műveik elemzése azonban azt mutatja, hogy a szerkezetek funkcionális és formai szerepe mindig a feladatnak megfelelő, legfeljebb a tervező egyéniségének, képzettségének folyamányaként talán kissé nagyobb hangsúlyt kap.

A harmadik, és helyesnek tekinthető tervezési módszer az építési igényből, feladattól indul ki, ennek megfelelően alakítja ki az épületet és annak minden részletét. Így a szerkezet is az adott feladatnak megfelelően jut szóhoz. Egy nagy csarnoknál a szerkezet jelentőségének megfelelően mutatkozik meg a formában is – pl. a fő tömegformát is erősen befolyásolja – míg egy kisebb épületnél esetleg teljesen rejtve marad. Ezzel a helyes szemlélettel „... a funkcionális igény kielégítéséhez, s egyúttal művészi formába öntéséhez meg lehet találni a technikát, az eszközt, szerkezetet, amely nemcsak a gyakorlati funkció megvalósítását teszi lehetővé, hanem kifejezőeszközzé válva a művészi forma egyik szülője.”²³⁾ A helyes elvekből azonban nem következik automatikusan a jó eredmény. Helyes elvek alapján is terveztek már rossz épületet, és a tehetséges tervező hibás ideológiával is alkothat jót.

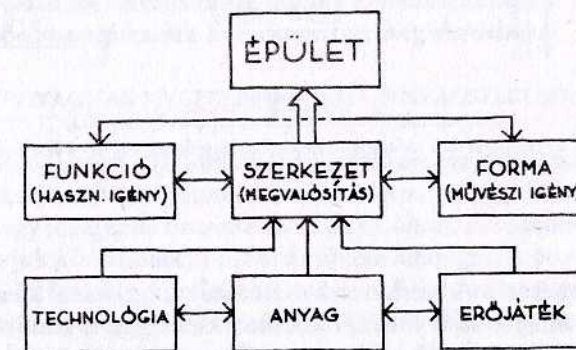
Ez utóbbi megállapítás felveti a tervezési folyamat objektivitásának és szubjektivitásának kérdését, amely szintén kapcsolatban van a szerkezet és forma viszonyával. A szerkezet természetesen az objektív tényezők között foglal helyet, az építési feladattól származó követelmények nagy részével együtt. Az is megállapítható, hogy a tervezési folyamat egyre gyorsuló objektívizálódásának vagyunk tanúi. Százötven éve például még a szerkezetek statikai méretezése rendkívüli eset, a funkciók egzakt meghatározása teljesen ismeretlen még a századfordulón is, ma pedig már az automatizált tervezés lehetőségeit kutatjuk. Közben azonban a feladatok, a követelmények is egyre bonyolultabbá váltak, így a szubjektív tényezőknek várhatóan továbbra is fontos szerepük marad. Ezért a tervezéssel kapcsolatban felmerül az intuíció – a művészet nyelvén az ihlet – kérdése is. Az intuíció a közhiedelemmel ellentétben nem ellentéte az egzaktitásnak, az objektivitásnak. (Gondoljunk arra, hogy a leegzaktabb tudományban, a matematikában milyen nagy szerepe van!) A sterilen tudományos tervezésnek sok akadálya van: a sok adottságot és követelményt, valamint ezek egymásra hatását nem tudjuk maradéktalanul figyelembe venni (ebben még segíthet a számítógép), de sok tényezőt egyáltalán nem is ismerünk, vagy a róla alkotott ismer-

teink hiányosak stb. Így a jó terv – az egész épületé és annak egyes részleteié, így a szerkezeteké is – igen sokszor intuíció, ihlet eredménye, ami nem jelenti azt, hogy a megoldás legalább fő vonásaiban nem elégíti ki az ismert objektív feltételeket. Elméletileg azonban az építészeti alkotás folyamata a tervezés technológiájának tökéletesítése útján (az elektronikus számítógépek erre szinte határtalan lehetőséget adnak) egyetlen, tökéletes megoldáshoz juthat el. Ez azt jelentené, hogy adott körülmények közt objektív elemzés útján optimálisan meg lehetne határozni egy épület minden részletét, szerkezetét és formáját is beleértve. Ez az abszolút objektivitás mégsem vezetne az építészet uniformizálásához, mert a körülmények, az optimális megoldást meghatározó tényezők olyan sokrétűek és esetenként változóak, hogy sohasem épülne két egyforma épület.²⁴⁾

Az objektív tényezők érvényesülése nem veszélyezteti a művészi értékek kibontakozását sem. Más művészetben is megfigyelhető bizonyos objektív adottságok, sőt kényszerek²⁵⁾ kedvező esztétikai hatása, az építészetnek azonban jellegzetes műfaji sajátossága, hogy az esztétikum az objektív és gyakorlati célú tartalom kifejeződése.

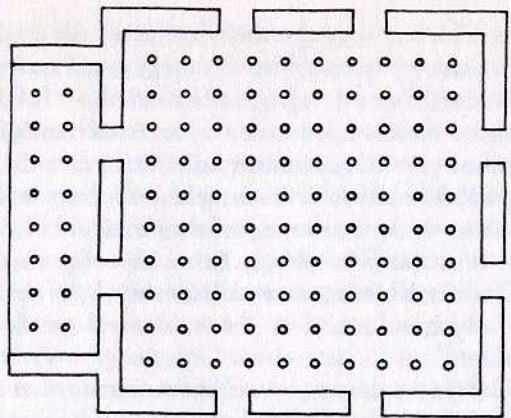
A SZERKEZET ESZTÉTIKAI ÉRTÉKELÉSÉNEK ALAPELVEI

Említettük már, hogy a szerkezet és forma kapcsolatánál, mint minden részletvizsgálat esetében, sohasem szabad az egészről – az épületről – megfeleledkezni. Nézzük meg ezért, milyen elvi fázisokra bontható egy épület létrejöttének folyamata (6. ábra). Az ábra felső részén az építészeti tevékenység eredményét, az épületet jelképező négyszög alatti sorban az építészet három fő elemét, a funkciót, a szerkezetet és a formát látjuk. Ezek természetesen erősen hatnak egymásra (ezt jelképezik a két irányú nyilak). Az alsó sorban a szerkezet elvi összetevőit ábrázoltuk, a technológiát, az anyagot és az erőjátékot. Magától értetődően ezek is kölcsönhatásban vannak. Érdemes még megemlíteni, hogy az ábra középső oszlopa a megvalósítás anyagi oldalát mutatja, bal oldalon a társadalmi, jobb oldalon a szellemi (művészi és tudományos) feltételek állnak. Az említett tényezők között számtalan, igen bonyolult összefüggés van (pl. a használati igény is hat a technológiára, sőt viszont – gondoljunk



6. ábra

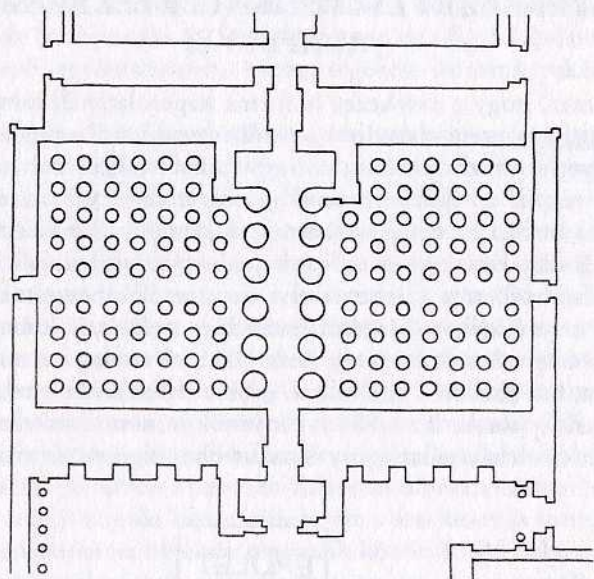
Az építészeti alkotás folyamatának alapvető tényezői. Középen az anyagi megvalósulás, bal oldalon a társadalmi, jobb oldalon az elvont (művészi és tudományos) tényezők



7. ábra

A persepolisi „százoszlopos” csarnok.

Az egységes térhatást akadályozó sűrű oszlopállás a szerkezet fejletlenségének következménye; a perzsa építészet a lehetőség szerinti tág oszlopállással és karcsú pillérekkel az ellentmondás megszüntetésére törekedett



8. ábra

A karnaki Amon-templom hiposztíl csarnoka.

Az egyiptomiak a szerkezet és a térképzés ellentmondását hangsúlyozva érték el a misztikus hatást

az iparosított építésre!). A szerkezetek esztétikai vizsgálatánál kiemeljük ezek közül a szerkezet tartalma és saját formája közötti összefüggést, amit röviden szerkezet-szerúségnek nevezhetünk. Ennek összetevői az anyag és forma (anyagszerúség), az erőjáték és forma, valamint a technológia és forma közötti kapcsolat. Megvizsgáljuk továbbá a szerkezet és a használati igény kapcsolatát, amelyet röviden rendeltetés-szerúségnek nevezhetünk.

A szerkezeti esztétikával kapcsolatos megállapításainkban igyekszünk csak egyetlen nem bizonyított (vagy nem is bizonyítható) feltevést felhasználni: az épület egyes alkotóelemei között, így a szerkezet és a forma között sem szabad alapvető ellentmondásnak lennie. Nem zárja ki ez az elv a kisebb kényszerű (az építészet fejlettségének pillanatnyi állapotából következő), sőt esetleg tudatos ellentmondásokat, amelyek az esztétikai hatást még fokozhatják is. Ennek az első pillanatban kissé meglepő állításnak illusztrálására lássunk példát, mégpedig az általánosság érzékeltetésére ne is csupán a szerkezet és esztétika területéről. Nagy tér indokolt igénye esetében ma nyilvánvalóan funkció és szerkezet alapvető ellentmondása lenne gazdasági vagy statikai megfontolásokból sűrű alátámasztást építeni. De ugyanez nem volt alapvető ellentmondás az ókori Egyiptom vagy Perzsia építészetében. Perzsiában az ellentmondást viszonylag ritka oszlopállással, karcsú oszlopokkal – amit a fagerendás tetőszerkezet lehetővé tett – igyekeztek feloldani, de a kor technikai színvonalán ez a törekvés nem járhatott teljes sikerrel. A funkció és a szerkezet tehát ellentmondó (7. ábra). Az egyiptomi építészek viszont a templomok hiposztíl csarnokaiban az ellentmondást – talán tudatosan is – még fokozták az igen sűrűn álló, nagyon zömök oszlopokkal, és éppen így érték el szakrális épületeik jellegzetesen misztikus, esztétikailag is értékelhető hatását (8. ábra). Ugyanígy elfogadhatatlan, ha egy elképzelt tömeg vagy homlokzat (tehát forma) érdekében lemondunk a funkciónak megfelelő építészeti térről, de a szubjektív térhatás fokozására elfogadott eszköz, sőt jó megoldás lehet egy helyiség viszonylag szűkös – de a fizikai funkcióknak még megfelelő – méretezése, ha ezzel a következő, az építési feladat lényegét alkotó tér tágasságát tudjuk hangsúlyozni.

A SZERKEZETSZERŰSÉG

A szerkezet – általános értelemben – az épület anyagi megvalósításának eszköze. Ezen belül, mint láttuk, kiemelkedő szerepe van a teherhordó szerkezetnek.²⁶⁾ Szerkezetszerúségen a szerkezetnek, mint önálló, kiragadott elemnek saját tartalmának megfelelő formai megjelenését értjük. Mint láttuk, a szerkezet három fő tényező, az anyag, az erőjáték és a technológia egységéből valósul meg. Van de Velde szerint a lényeg „a termékek logikus szerkezete, az anyag megalkuvást nem ismerően logikus alkalmazása és az előállítás folyamatának büszke és nyílt feltárása”.²⁷⁾

Ennek megfelelően vizsgálhatjuk a szerkezetszerúség elemeit is.

AZ ANYAGNAK MEGFELELŐ FORMA (ANYAGSZERŰSÉG)

A szobrászatból jól ismert fogalom az anyagszerúség, az alkotások megítélésének egyik alapvető szempontja. Számunkra is tanulságos, ha egy kőszobrot (9. ábra) összehasonlítunk egy jellegzetes bronzszoborral (10. ábra). A kőszobor formái összefogottak, szinte látjuk a kőtömböt, amiből a művész kifaragta. A bronzfigura viszont könnyed, karcsú, áttört. Ha közelebről megvizsgáljuk az anyagszerúségnek ezt a szokásos (de nem kizárólagos) értelmezését, világossá válik, hogy itt tulajdonképpen az anyagok szilárdsági tulajdonságairól van szó. A kőnek, bár igen nagy nyomóerőt képes viselni, kicsi a húzó- és következképpen a hajlítószilárdsága. Kőből ezért nem szabad kis keresztmetszetű, karcsú tagozatokat faragni, mert már kis igénybevétel (ütés stb.) hatására is könnyen letörnek. A különböző kőfajták sem egyformák: pl.



9. ábra
Michelangelo: Mózes.
Kőszobor

10. ábra
Milles: Pegazus.
Bronzszobor.

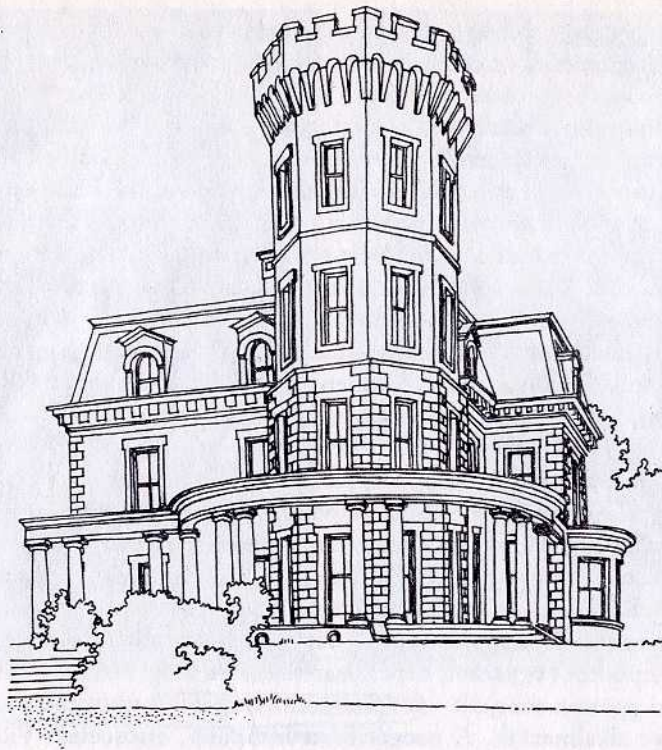
A szobrok formáinak egyik meghatározója az anyagszerűség, amely nagyrészt az anyag szilárdsági tulajdonságaiból ered

a márvány hajlítószilárdsága viszonylag nagy a közönséges mészkövekhez képest, ezért ami márványból anyagszerű, nem biztos, hogy mészkőből is az. A bronznak, mint fémötvözetnek viszont jelentős húzó- és hajlítószilárdsága van, így karcsú szobrok öntésére alkalmas, sőt a tömzsi bronzszobor sokszor nem is elégíti ki esztétikai érzékünket, mert nem használja ki az anyagban rejlő lehetőségeket. (Meg kell jegyezni, hogy mégis sokkal kisebb hiba nem kihasználni a lehetőségeket, mint az anyag tulajdonságaival ellentétes formákat – pl. filigrán kőtagozatokat – erőltetni.) Az anyagszerűség szilárdságtani, statikai alapja legjobban a szokatlanul nagy méretű szobrok példáján mutatkozik meg. Már a kisebb bronzszobrok üreges testébe is szoktak a bronznál sokkal szilárdabb acél merevítőket rejteni, a nagy szobroknak pedig az épületekhez hasonló szerkezetük van (4. ábra).

Az anyagszerűség a szobrászathoz hasonlóan az építészetben is megnyilvánul. A hagyományos anyagoknak (a fát kivéve) nincs számottevő húzó és hajlítószilárdságuk, ezért az épületek stabilitását csak az önsúllyal, nagy tömeggel lehet biztosítani. Különösen a vízszintes erőt kifejtő boltozatoknál nyilvánvaló ez a törvényszerűség, ahol a szerkezetileg legfejlettebb gótikának – a súly lehetőség szerinti csökkentése miatt – a célszerű leterhelő szerkezetek egész rendszerét kellett kifejlesztenie. Ezzel szemben az új anyagok húzószilárdsága korunkban lehetővé tette, hogy az épület

minimális önsúllyal is stabil legyen, sőt gazdaságtalan, ha a súlyt növeljük. Ezek az új lehetőségek egészen új építészeti formákat is hoztak magukkal. Azt mondhatjuk, hogy a hagyományos építészet jelképe a kőszobor, a modern építészeté a fém-szobor.^{27a)} Az építészetben azonban sokkal nyilvánvalóbb, hogy itt tulajdonképpen az erőjáték anyagban rejlő lehetőségeinek kibontásáról van szó, ennek köszönhető az új, könnyed formák. Így az anyagszerűség az építészetben ilyen értelemben inkább az erőjátéknak megfelelő forma kérdéséhez tartozik. Az anyagszerűség kritériuma azonban mégis fontos marad. Az építészet története folyamán az építőanyagok fejlődése igen lassú volt. Az építészet anyagszerű formáinak felismerése is évszázadokig tartott, sőt sokszor el sem jutottak az anyagszerű formákhoz. Gondoljunk a görög építészet faszervezetet utánzó formáira, amin az sem változtat, hogy az arányokat a kő szilárdsági tulajdonságainak megfelelően módosították. A természetben található fa és kő mellett a szárított, majd később égetett agyag elemek, téglák inkább csak az építéstechnológiában jelentettek változást, alapvető szilárdsági tulajdonságaik a kőhöz hasonlóak. A legfontosabb új építőanyag a rómaiak természetes hidraulikus kötőanyaggal, puzzolánfölddel készített betonja, amely az építéstechnológiában valóságos forradalmat jelentett, de a beton is mesterséges kőnek tekinthető. Az építőanyagok fejlődésében új korszak kezdetét jelenti a XVIII. és XIX. század fordulóján a vas nagyipari előállítás. Az öntöttvas, majd a kovácsolt- és folytvas szerkezetek új lehetőségeket teremtettek az építészetben, bár az új anyag tulajdonságait, objektív és szubjektív szempontból egyaránt, csak lassan ismerték meg. Sokáig – bár a mérnöki szerkezetekben gyorsan elterjedt – az építésztől idegennek tartották a vasat és ezért legfeljebb rejtve alkalmazták. A neogótika teoretikusai, elsősorban Viollet-le-Duc fedezték fel – inkább csak elméletben – a vas anyagszerűségének esztétikai értékét. Viollet-le-Duc szerint „... sokan állítják, hogy a vasat nem szabad épületeinkben látható formában alkalmazni, mert ez az anyag egyáltalán nem illő a monumentális formákhoz. Igazabb és ésszerűbb volna azt mondani, hogy a mai monumentális formák a vastól eltérő tulajdonságú anyagok következményei, és ezért nem alkalmazhatók erre az anyagra. Ennek az lenne a logikus következménye, hogy nem kell őrizni ezeket a formákat, hanem meg kell találni azokat, amelyek a vas tulajdonságaiból következnek.”²⁸⁾ „... a kő kőként, a vas vasként jelenjék meg...”²⁹⁾ Szerinte a vas új stílust teremt, amelynek minden részletét úgy meg fogja határozni, mint a kő a gótikát.³⁰⁾ Wyatt a londoni Kristálypalotával kapcsolatban állította, hogy az üveg és a vas együttes alkalmazása új korszakot nyit az építészetben. Ezzel szemben Maupassant évtizedek múlva „elmenekült Párizsból, hogy ne kelljen látnia az Eiffeltornyot, ezt a vaslétrából álló, ég felé meredő sovány piramist”³¹⁾, sőt még a modern építészet sok előfutára, így Pugin, Ruskin is értetlenül állt előtte. Az is kétségtelen, hogy az acélszerkezet és az üveg építészeti lehetőségei csak a századforduló táján bontakoztak ki teljesen. E két anyag együttes alkalmazása az építészeti tér egészen új megfogalmazásához vezetett. „A technika új termékei és felhasználásuknak növekvő lehetőségei révén máris rengeteg csodálatos új tér-forma látott napvilágot, és még több születését remélhetjük.”³²⁾

A vasbetonnak is le kellett küzdenie a meg nem értést, az ellenállást. Míg a vas teljesen újszerű anyag volt, és formái idegennek hatottak, a vasbeton sajátosságainak kibontakozását éppen az nehezítette, hogy külső megjelenése kőszzerű, így húzószilárdsága nem felelt meg az évezredek át beidegződött ismereteknek. A korai vasbeton épületek a kő formáit utánozták. A beton valóban kőszzerű anyag, tulajdonságai szilárdsági szempontból ahhoz hasonlóak. A vasbeton, amely a nyomóerőt

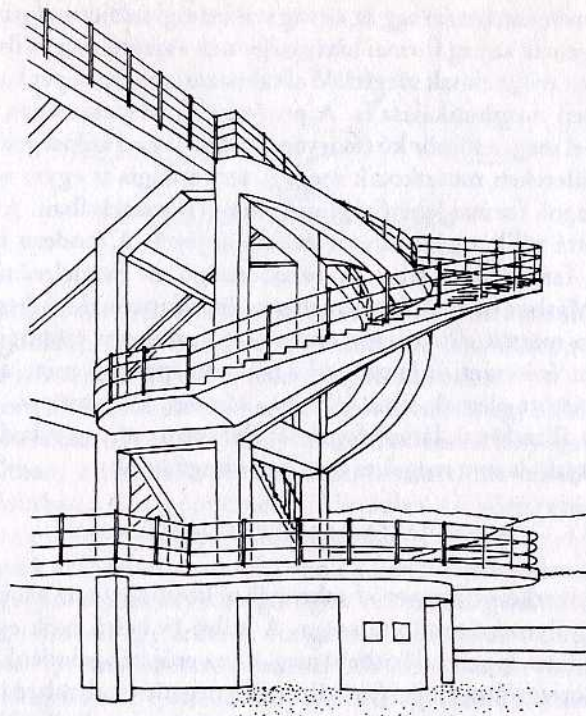


11. ábra

Az első vasbeton ház.

Összes teherhordó szerkezete vasbetonból készült, de a formák még hagyományosak

betonnal, a húzóerőt vassal veszi fel, nem tekinthető klasszikus értelemben homogén anyagnak. De éppen új szilárdsági tulajdonságai, amelyek mind a betontól (és a kőtől), mind a vastól eltérőek, indokolják, hogy egységes szerkezeti anyagnak tekintsük. Tudomásunk szerint az első vasbeton ház 1873–1876-ig épült az Egyesült Államokban (Rye, New York, tervezője W. E. Ward, 11. ábra). Homlokzata jól mutatja, hogy az új anyag nem találta még meg építészeti formáját.³³⁾ Csak évtizedek múlva kezdték egyes építészek ezt felfedezni. Elsősorban a franciák, Auguste Perret és Tony Garnier érdeme, hogy már századunk elején megalkották a jellegzetes vasbeton architektúrát, nem rejtették el az új anyagot, és nem törték be régmúlt korok jármába.³⁴⁾ A magyar Medgyasszay István is „nemzetközi viszonylatban az első közt ismerte fel az akkor új építőanyagot, a vasbetontak jelentőségét az új építészet tér-tömeg, valamint szerkezeti-formai sajátosságainak megfogalmazásában. Elméleti fejtegetései, amelyek a vasbeton szerkezet formai megnyilvánulásaival foglalkoznak, úttörő jelentőségűek”.³⁵⁾ Korszerű elveit a gyakorlatban is igyekezett valóra váltani. Az első közt volt, aki a ma is helyesnek tekinthető, statikai számításokon alapuló Hennebique-rendszert reprezentatív épületeken (pl. a veszprémi színházban) sikerrel alkalmazta. Medgyasszay érdemeit nem csökkenti, hogy az Hennebique-rendszerben a faszervezetek hatása fedezhető fel, ami bizonyos mértékig indokolt is, hiszen a zsaluzat, a beton öntőformája és egyben ideiglenes tartószerkezete – akkor, de nagyrészt még ma is – fából készül.



12. ábra

A firenzei stadion lépcsője.

Az új formák a vasbeton lehetőségeinek felismeréséből adódnak

A vasbetonban rejlő igazi lehetőségeket azonban csak két-három évtizeddel később sikerült az építészeti gyakorlatban megvalósítani. Két kiemelkedő eredmény ezen az úton Nervi firenzei stadionja (1931) (12. ábra) és F. L. Wright „Vízesház”-a (1936). Ezek olyan épületek, amelyek hagyományos anyagokból (kőből, fából) meg sem építhetők, de acélszerkezettel is csak nehezen, sok felesleges és drága burkolat árán. Különösen figyelemreméltó a firenzei stadion lépcsője, amely a vasbeton hajlítoszilárdságán kívül a csavaró-ellenállást is szemmel láthatóan felhasználja. A „Vízesház”-ról írja Wright: „Vasbeton épületek ne akarjanak műköre vagy márványra hasonlítani. Legyen minden anyagnak a saját természetéhez szabott abécéje. Ezt tükrözi első vasbeton házam...”³⁶⁾

A technikai fejlődés lassan megszokottá tette az új építőanyagokat. Ma már az építészek örömmel fogadják az új lehetőségeket, ha nem is mindig sikerül ezeket megfelelően felhasználni. Az építőanyagok anyagszerű alkalmazásához ugyanis alaposan meg kell ismerni tulajdonságaikat. Enélkül nem válnak valóra F. L. Wright szavai, hogy az alkotóművésznek minden anyag kinyilatkoztatja sajátos küldetését. „Természetes módon kell alkalmazni a természetes és a szintetikus építőanyagokat egyaránt; rá kell találni a célnak leginkább megfelelő építési módszerekre. A tudomány új építőanyagokkal ajándékozott meg bennünket... állandóan új formákat kell segítségükkel fejlesztenünk.”³⁷⁾

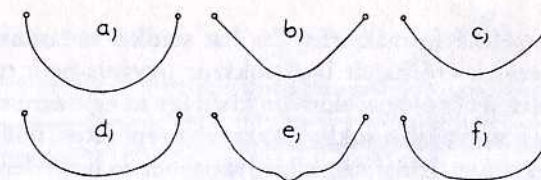
Az eddigiekből láhattuk, hogy az anyagszerűség mind a szobrászatban, mind

az építészetben szorosan összefügg az anyag szilárdsági tulajdonságaival. Ha azonban az anyagszerűsége az anyag formai lehetőségeinek ésszerű megnyilvánulását értjük, ez nem merül ki az erőjátéknak megfelelő alkalmazásban. Szerepet kap többek között az anyagok felületi megmunkálása is. A porózus kő természetének például a durva megmunkálás felel meg, a tömör kő (márvány, gránit) igazi szépsége a finom, csiszolt, sőt fényezett felületeken mutatkozik meg. A technológia is egyre nagyobb jelentőséget kap az anyagok formai lehetőségeinek kibontakoztatásában. A nehézkes kő pl. könnyű burkolattá válik a gépi fűrészelés segítségével. A modern fafeldolgozásnak (rétegelt lemez, farostlemez stb.) új tulajdonságú és megjelenésű építőelemeket köszönhetünk. Máskor jelentős hatása lehet az öntőformának. A betont azelőtt burkolat nélkül nem merték alkalmazni, ma a szép fazsaluzat textúrájának lenyomata a beton felületén építészeti kifejezőeszközzé vált éppúgy, mint az acélsablonban készült, előregyártott elemek sima felülete. Mindez azt mutatja, hogy az anyagszerűség annyira állandónak látszó fogalmát (hiszen az anyag tulajdonságai gyakorlatilag változatlanok) is újra meg újra meg kell vizsgálnunk.

AZ ERŐJÁTÉKNAK MEGFELELŐ FORMA

A teherhordó szerkezet alapvető funkciójából következik az erőjáték, az épületre ható erők egyensúlyozásának fontossága. A külső és belső erők egyensúlya ugyan legtöbbször többféleképpen valósítható meg, de az erőjáték mindenképpen hat a szerkezetre és ezen keresztül az épület formáira (még negatív értelemben is, ha a szerkezeti formák elrejtése a tervező célja). Már az anyagszerűség vizsgálatánál láttuk, hogy az is nagyrészt az anyag engedte erőjáték kifejeződése, akár szoborról, akár épületről van szó. Az építészeti formák alakulásában azonban a szerkezetnek lényegesebb szerepe van, mint az anyagnak. Egy szerkezet, amely erőjátékánál fogva akarva, nem akarva lényeges építészeti elemmé válik, többféle anyagból is megvalósítható (pl. egy pillér kőből, téglából, betonból, de tömör vagy rácsos acélszerkezetből is). Az erőjátéknak megfelelő, tektonikus forma szinte kínálkozik, hogy az épületbe szervesen beépítve az architektonika elemévé váljék. Au. Perret szerint „a szerkezet az építész anyanyelve és az építész költő, aki szerkezetben gondolkodik és beszél.”³⁸⁾ F. Otto szerint „a formák megvannak, az építésznek csak fel kell fedeznie azokat” (ti. a húzott szerkezetek erőjáték-megszabta formáit).³⁹⁾ Az építészettörténeti vizsgálatok is azt mutatják, hogy „az architektonikus formák az épület tektonikus elemeiből keletkeztek. A tektonikus elemet ugyan a forma teszi művészi alkotássá, de a szerkezeti jelentőség és szükségszerűség adja meg az építészeti formák létjogosultságát és azt a képességét, hogy szervesen illeszkedhessenek bele az épület egészébe.”⁴⁰⁾

A szerkezeti formák kibontakoztatása kétségtelenül esztétikai többletet jelent, sőt néha – a rendeltetéssel összhangban – az építészeti kifejezés legfontosabb eszközévé válik. Különösen nagy feszítávolságú vagy nagy magasságú épületeknél természetes, hogy a szerkezet a leghangsúlyosabb formai elem (l. a III. fejezetben a 87. oldalon). Az építész szerepe ilyenkor szinte arra korlátozódik, hogy szerényen háttérben maradva ne akadályozza a szerkezeti forma érvényesülését (98. ábra). Az erőjátéknak megfelelő forma szépségét legjobban a két pontban felfüggesztett kötél példáján szemlélhetjük. A 13. ábrán több, két pont közé szerkesztett görbét láthatunk. Valószínű, ha közvéleménykutatást végeznénk, a c) jelű görbe tetszene a túlnyomó többségnek, amely egy másodfokú parabola (az olyan egyenletesen terhelt kötél alakja, amelynek önsúlya a teherhez képest elhanyagolható – az önsúlyával terhelt



13. ábra
A görbék közül melyik a legszebb?

kötél lánccgörbe alakot vesz fel, amely a parabolához nagyon hasonló). Ki ne hallotta volna már a függőhidak, pl. a budapesti Erzsébet-híd lendületes vonalát dicsérni – holott ez a görbe az erőjáték következtében magától adódott.

A szerkezeti formák fontos szerepe arra a nyilvánvalóan egyoldalú megállapításra vezetett egyes építészteoretikusokat, hogy az építőművészet lényege az erőjáték érzékeltetése. A múltban, a statikai ismeretek hiánya miatt, ezt inkább metaforikusan értelmezték, elsősorban a görög építészetből kiindulva. (A görög építészet formáinak nagy része – pl. az oszlopok sudarasodása, tagozatai – valóban az elemek teherhordó funkcióját igyekszik érzékeltetni, mintha azok a kőnél lényegesen nagyobb alakváltozásra képes anyagból volnának; bár a görögök valószínűleg már a tényleges erőjátékot is érzékelték, mint azt egy érdekes vizsgálat kimutatja az oszloprendek fejlődésével kapcsolatban.⁴¹⁾ A mai konstruktivista elmélet a statikai törvényeknek megfelelő szerkezeti formákban látja az építészet lényegét. Az egyoldalú konstruktivizmus, bár látszólag ellentéte a formalizmusnak, könnyen odatéved. Gyakori például az épület léptékéhez nem illő szerkezeti forma megjelenése.⁴²⁾ Ha a szerkezet – egy eszköz – öncélúvá válik, éppoly káros az építészetre, mintha tagadni próbálják.

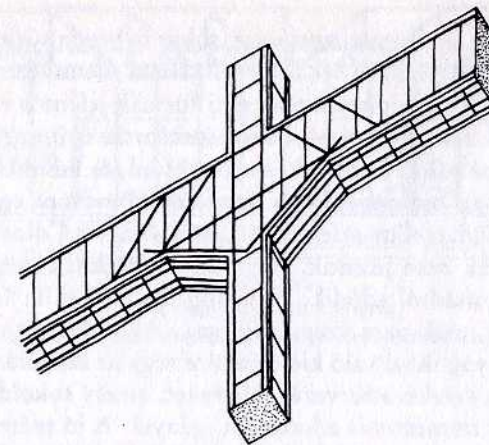
Az erőjátéknak megfelelő szerkezeti forma lényegének félreértése az is, ha csak az egyszerű geometriai formákat (derékszög, sík felület stb.) tekintjük szerkezet-szerűnek. Ez a felfogás nagyrészt a képzőművészeti konstruktivizmus hatása az építészetben, de objektív (bár nem az erőjátékból következő) alapja is van. Így a következő fejezetben tárgyalt technológia szempontjából kétségtelenül előnyösek az egyszerű geometrikus formák, különösen az iparosított építés mai fokán. De az egyszerű formáknak sokszor funkcionális előnyük is van: gondoljunk egy lakás bútorozására, ahol már a derékszögtől való eltérés is gondot okoz. Viszont a szerkezetek erőjátéka legtöbbször éppen nem az ilyen egyszerű formáknál kedvező. A hajlított szerkezetnél – amelynél többé-kevésbé indokolt az egyenes vonal – előnyösebb a húzott vagy a nyomott, ezek pedig térlefedő szerkezetként már csak görbe vagy tört vonalú elemekkel valósíthatók meg. Az elmondottak fokozottan érvényesek a térbeli szerkezetekre, héjakra, függőtetőkre, amelyek felülete bonyolultabb alaprajz esetén pontos matematikai formulával sokszor le sem írható. Viszont semmiképpen sem állíthatjuk, hogy nem szerkezet-szerűek, hiszen formájuk az erőjátékból adódik. Egyben jó példa ez arra is, hogy nemcsak a szerkezet és forma között lehet ellentmondás, hanem a szerkezeten belül is, így többek közt a kedvező erőjáték és a technológia között. Gaudi szerint pl. a gótika szerkezeti rendszere tökéletlen, a függőleges pillérek és a támvékek kényelmes és fantáziátlan segédszerkezetek. Ő a pillérek az oldalnyomásnak megfelelően ferdén építette, amellyel valóban egészen új építészeti formákat valósított meg, de épületei csak fejlett kézműipari technológiával voltak kivitelezhetőek, így elvei minden szerkezeti és esztétikai értékük ellenére nem terjedhettek el.⁴³⁾

Az egyszerű geometriai formák irányába hat statikai tudásunk fogyatékosága. A bonyolult szerkezetek erőjátékát igen sokszor ugyanis nem tudjuk számítással követni. A kétségtelen technológiai előnyön kívül így az egyszerű számítási módszer is hozzájárult, hogy gömbhéjakat sokkal gyakrabban építettek, mint más, kedvezőbb erőjátékú héjszerkezeteket. Ismereteink hiányát azonban helytelen lenne az állítólagos szerkezetszerűséggel leplezni.

A szerkezetek erőjátékának érzékeltetése kapcsán adódik az „őszinte szerkezet” kérdése is. Ez a kérdés, amely az utóbbi évtizedek szinte legtöbb építészeti vitáját kavarta fel, először a reneszánsz kor öntudatosodó világában merült fel. L. B. Alberti szerint „boltívek építésénél az oszlopoknak négyzeteseknek kell lenniük, mivel kör alaknál a kivitel hazug, mert a boltív végei nem ülnek fel teljesen az oszlopra, hanem amennyire a négyzet felülete nagyobb a beírt körnél, olyan mértékben a levegőben vannak. Ezt elkerülendő a tapasztalt régiek az oszlopfőre még egy másik négyszögletes lemezt helyeztek”.⁴⁴⁾ Ez a naív vélekedés mindenestre már kifejezi az igényt, hogy az építészeti forma tükrözze az erőjátékot. Aloys Hirt, F. Schinkel egyik tanára „Az építőművészet kritikai története” címmel tartott előadássorozatot az 1810-es években, amelyben az ókori műemlékeket tektonikus szempontból vizsgálta: hordanak-e az oszlopok, pillérek, gerendák valamit, vagy csak üres formák? Ő még úgy találta, hogy a klasszikus stílusok e tekintetben is tökéletesek, de Schinkel, átvéve módszereit, észrevett hibákat is, és felfedezte a középkori építészet egyes értékeit.⁴⁵⁾

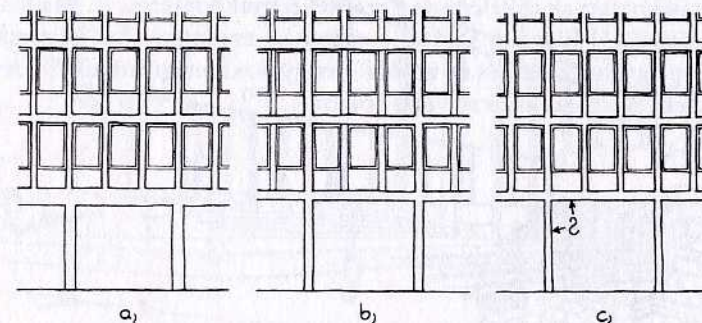
Az őszinte szerkezet elvének első igazi hirdetői a múlt század közepén és második felében a neogótika teoretikusai voltak (Angliában Pugin, Ruskin, Morris, Franciaországban Viollet-le-Duc, Hollandiában Cuipers, Németországban Reichensperger, Ungewitter). Reichensperger a Gothisches Musterbuchban pl. az anyagnak megfelelő formálásra ír 1856-ban; Ungewitter szerint a gótikában minden részlet szerkezeti céljának megfelelő formájú.⁴⁶⁾ Századunk első felének legjobb építészeti nem pusztán az őszinte szerkezetet, hanem az őszinte építészetet teremtették meg. Az ő működésük tudatformáló hatása is hozzájárult, hogy „mai művészetünkben az anyag, a szerkezet régebben még elfogadott ellentmondásait már nem bocsátjuk meg. Őszinteségünk, igazságszeretetünk az ilyen objektív ellentmondásokat nem tűri meg... Az anyagban szunnyadó szerkezeti lehetőségek tiszta, teljesen szűkszavú kibontásának vagyunk tanúi.”⁴⁷⁾ De mi is az „őszinte szerkezet”? Egyszerűen a szerkezet tulajdonságaiból adódó formák integrálása az épület egészébe. A szerkezetnek nem kell feltétlenül közvetlenül meg sem jelennie. Ahogy az emberi test szépségében a formák mögött csak sejtjük a csontvázat, úgy a szerkezet is maradhat láthatatlan, de a külső nem lehet vele ellentétes. Sokszor nem is lehet elkerülni, hogy a szerkezet rejtve maradjon. A vasbetonban is rejtve vannak a vasbetétek (éppen szerkezeti okok, a betonhoz való tapadás és a rozsdavédelem miatt), és nem is lesz őszintébb a szerkezet, ha a felületén festéssel érzékeltetjük, mint a vasbeton hőskorában ezzel meg is próbálkoztak⁴⁸⁾ (14. ábra). A belső térben megjelenhet a tartószerkezet (és az az esztétikai hatást is fokozhatja), de nem vétünk az őszinte szerkezet elve ellen, ha a rendeltetés, pl. a megfelelő akusztika érdekében álmennyezettel eltakarjuk. Az őszinteség ellen vétünk viszont, ha megmutatjuk a szerkezetet, de nem az erőjátékunk megfelelően formáljuk. Az erőjátékunk ugyan ez a forma is szükségszerűen megfelel – különben a szerkezet nem volna állékony – bár kedvezőtlen, valószínűleg gazdaságtalan és ellentmondás keletkezik a tartalom (a szerkezet) és a forma között.

A szerkezetformálás esztétikai következményeit jól tanulmányozhatjuk a 15. ábrán, amelyen egy több szintes, sűrű raszterű vázszerkezet gyakran szükséges föld-



14. ábra

Vasbeton szerkezetre felfestett vasbetétek.
Ettől nem válik a szerkezet „őszintébbé”



15. ábra

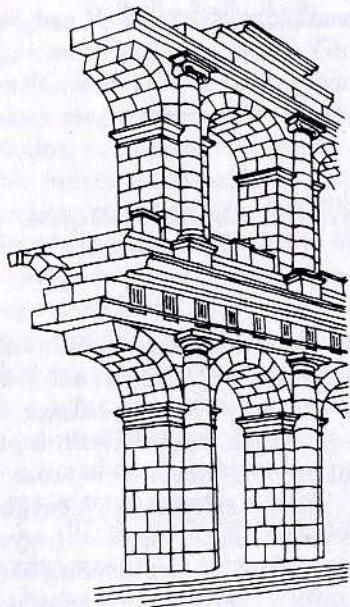
Vázszerkezet kiváltása a földszinten

az a) és b) eset formailag kielégítő; a c) megoldás bántó, mert a teherhordó és a másodlagos szerkezetek (ablakostó pillérek, parapetfalak) azonos formájúak

szinti kiváltását látjuk. A földszinten az emeleti pillérek kiváltása miatt nyilvánvalóan nagyobb gerenda kell, és a pillér szükséges mérete is nagyobb, mint az emeleteken. Az a) és b) megoldás mindegyike kielégítő élményt nyújt, mert az a)-nál nagyobb méretű gerenda és pillér van, a b) esetben pedig megmutatjuk, hogy a kiváltott pilléreknek nincs lényeges teherhordó szerepük, tehát a földszinten sem szükséges nagyobb kiváltás, mint az emeleten. A c) megoldás viszont az egyensúlyigényünket nem elégíti ki, mert a közbenső pillérek teherhordónak látszanak, mégis nagyobb kiváltó, és a földszinti pillér mérete is azonos az emeletivel, holott látszólag lényegesen nagyobb terhet hord. A valóságban pedig a szerkezet lényege mind az a), mind a b) esettel azonos lehet: ha az a)-val azonos, a kiváltó a mellvéd mögé van rejtve, az emeleti pillérek pedig túlméretezettek, ha a b)-vel, a közbenső pillérek a látszattal ellentétben nem teherhordóak. A szerkezeti megoldás azonban nem őszinte és így esztétikailag sem kielégítő.

Ilyen eset továbbá, ha egy egyirányban teherhordó gerendasor két irányú tartórácsként jelenik meg hosszirányú tér fölött. Ez utóbbi példa egyben azt is mutatja, hogy a kérdés helyes megítéléséhez is szerkezeti és építészeti ismeretekre van szükség.

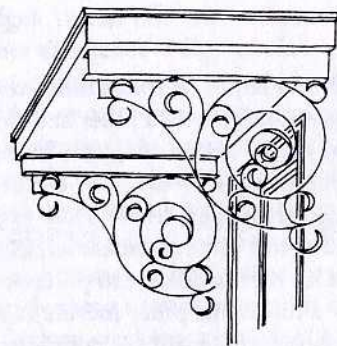
Fejlettségünk mai fokán az ilyen ellentmondásokat nehezen tűrjük meg,⁴⁹⁾ de a hasonló hibákat – pl. a hosszirányú tér fölötti kazettás mennyezetet – a régi mestereknek megbocsátjuk. Sőt az építészettörténeti formák jelentős részénél megfigyelhető, hogy az eleinte tisztán szerkezeti, tektonikus forma építészeti kifejezőerőt kap, architektonikus elemmé válik, majd sokszor önállósul, és később pusztán dekorációként él tovább (mint az oszlopperendés szerkezeti rendszer egyszerű, plasztikus dekorációként a római Marcellus-színház (16. ábra), vagy a Colosseum íves homlokzatán). Az elmondottak nem jelentik, hogy az erőjátéknak megfelelő forma egyszerűen a statikai számításból adódik. Nem fogadhatjuk el T. Garnier szélsőséges nézetét, mely szerint „csak az a szép, ami igaz. Az építészet igazsága: az ismert szükségletek ismert anyagokkal való kielégítésére végzett számítások eredménye.”⁵⁰⁾ F. Leonhardt szerint a szerkezettervezés művészet, amely sokoldalú tudást, tapasztalatot, gyakorlatot és természetes adottságot igényel. A jó mérnöknek nemcsak jó szerkezetre, hanem szép formára is kell törekednie.⁵¹⁾ E látszólagos ellentmondás valószínűleg abból ered, hogy még ma sem ismerjük az anyag és a mechanika bonyolult törvényeit olyan jól, hogy számításaink ne csak durva közelítések legyenek, amelyek nem tájékoztatnak tökéletesen a szerkezet működéséről. R. Maillart szavaival „a körülményektől függően szabad a számítási eredményeket közvetlenül felhasználni vagy megváltoztatni, és ez utóbbi eset gyakran megtörténik, ha nem „számológép”, hanem igazi szerkezettervező dolgozik.”⁵²⁾



16. ábra

A római Marcellus-színház részlete.

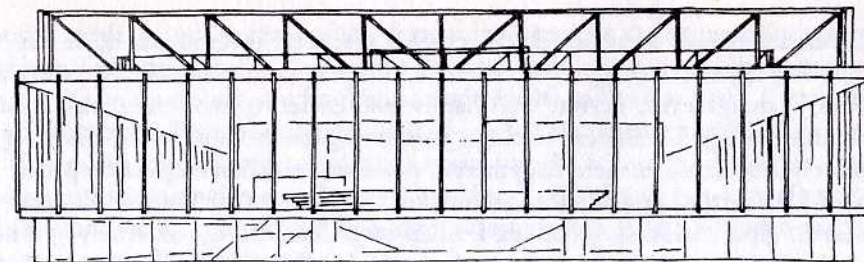
A római építészet megtalálta a kőnek megfelelő szerkezetet és arányokat, de a faszervezetből származó oszlopperendés rendszer már évezredek óta megszokott formái is tovább éltek, sokszor már csak pusztán dekorációként



17. ábra

A szerkezeti formák sokszor díszítőelemmé válnak.

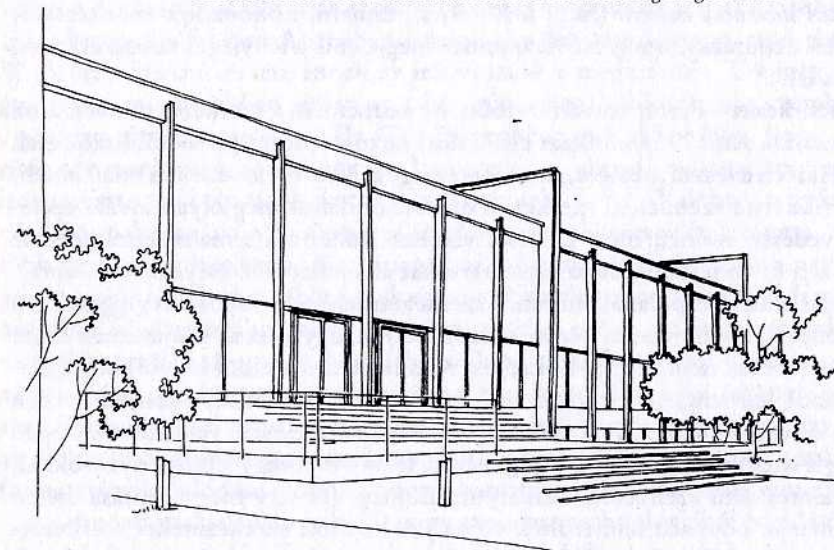
A vasgerenda alatti könnyű, áttört dísz a kőkonzol formai emléke



18. ábra

A mannheimi színház terve.

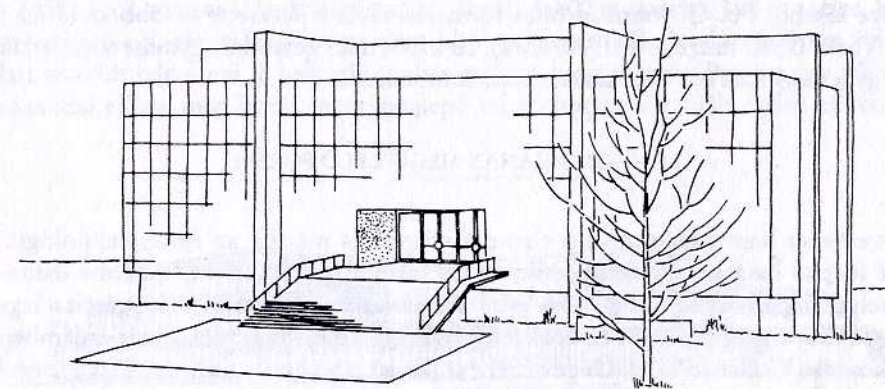
A tető fölötti merevítetlen rácsostartó szerkezeti megoldatlan



19. ábra

Az Illinois Institute of Technology aulája.

A tető fölé helyezett tömör gerincű keret már nem okoz nagyobb szerkezeti problémát



20. ábra

A Modern Művészetek Múzeuma (Utica, USA).

Az egymást keresztező keretekkel Ph. Johnson mesterét, Mies van der Rohe túlzárnivalva, szerkezeti is megnyugtató megoldást talált

Az őszinteség elve tehát nem kívánja meg a szerkezet megmutatását, de nem tűri a hamis formákat. „Aki egy támaszt elrejt, hibázik. Aki hamis támaszt épít, bünt követ el” – mondta Au. Perret.⁵³⁾ (A hamis szerkezetet sokszor elárulták a háborús károk, mint az egyik budapesti neoklasszicista templom homlokzatán, ahol az egyik leomlott oszlop az alig terhelt, nagyméretű vasbeton gerendán még csak repedést sem okozott.) Ide tartoznak a hajlított gerendákra függesztett rabciboltozatok, a semmit nem tartó, gipsz Atlaszok (amelyek fejében acélkonzol hordja az erkélyt), a homlokzati burkolattal imitált vázszerkezetek, és más hasonló, az igazi építészettől idegen megoldások. Éppen az őszinteség igénye miatt sokkal kevésbé bántóak az olyan pusztán díszítő formák, amelyeken ugyan látszik szerkezeti eredetük, de nem akarják a teherhordás látszatát kelteni (mint a 17. ábrán látható, kőkonzolra emlékeztető, vasból készült dekoráció, amely fölött azonban megjelenik a tényleges tartószerkezet, a vasgerenda is).

A hamis szerkezet – Perret szavaival – bűn, de nem érdem a szerkezet minden áron való megmutatása sem. A homlokzat elé állított tartószerkezet pl. legtöbbször csak feleslegesen növeli a feszítávolságot, és a szerkezet árát a korrózióvédelem miatt emeli. Ez a konstruktivista szemléletű szerkezeti exhibicionizmus még olyan kiváló építészeket is tévedésbe sodort, mint L. Mies van der Rohe, aki a mannheimi színház pályatervénél a 81 m feszítávolságú rácsostartókat az épület fölé helyezte (18. ábra). Ez a megoldás csak első pillanatban tűnik szerkezetszerűnek. Jobban végiggondolva következményeit, két fő hibáját hamar felfedezhetjük: egyrészt az időjárásnak kitett acélszerkezet (hacsak nem az igen költséges, rozsdamentes acélból készül) korrózióvédelme állandó karbantartást igényel, másrészt a rácsostartó felső, nyomott övének oldalirányú kihajlása miatt ez a szerkezet ilyen formában meg sem valósítható. Éppen könnyedségét veszti el, ha a kihajlást nagyméretű felső övvel vagy lehorgonyzásokkal, esetleg vízszintes síkú szélráccsal akadályozzuk meg. (A terv megvalósítása esetén ezek a problémák biztosan felmerültek volna.) A hajlított szerkezeteket szerkezetszerűbb az épületbe rejtetni, annál is inkább, mert a szerkezet által adott többlettér legtöbbször jól felhasználható a gépészeti vezetékek elhelyezésére. Építészeti formává válik a szerkezet Mies van der Rohe egy másik épületén, a chicagói egyetem auláján is (19. ábra). A tető fölé nyúló acélkeretek a rácsostartónál alkalmasabbak erre a szerepre, a tömör gerincű és sarkain negatív nyomatékra igénybe vett tartó kihajlási veszélye kisebb. Ph. C. Johnson Mies formálási elvét fejlesztette tovább az Utica-i (New York, USA) múzeumnál (20. ábra). Itt a keretrács gerendái egymást támasztják meg, így a megoldás már szerkezetszerűnek mondható.

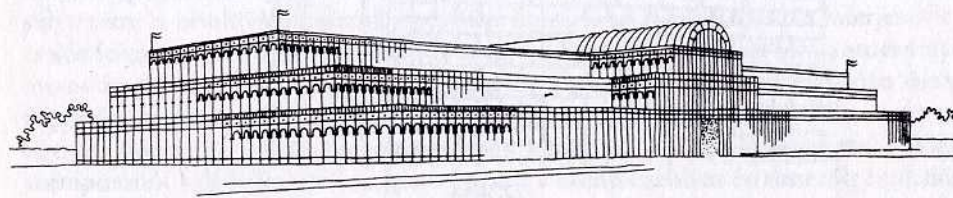
A TECHNOLÓGIÁNAK MEGFELELŐ FORMA

A szerkezet harmadik alapvető eleme a megépítés módja, az építéstechnológia. Ennek formai hatásai is nyilvánvalók, mégis talán a technológia és a forma összefüggéseivel foglalkoztak eddig legkevésbé. Az anyag és a forma összefüggéseit a legrégibb időkben megsejtették, az erőjáték hatásával a múlt században már érdemben foglalkoztak (Viollet-le-Duc, Ungewitter és mások), a technológia és építészeti forma napjainkban igen lényeges kérdését csak a legutóbbi évtizedekben kezdték vizsgálni.⁵⁴⁾ Kétségtelen, hogy a hagyományos technológia annyira egyértelmű, régebben szinte évszázadokig változatlan volt, hogy formai hatásait is az építés egyértelmű következményének lehetett tekinteni. Ennek ellenére az építészettörténetben is

számtalan példát látunk a technológia formai hatására. Az őskori megalitikus építmények monumentalitása (2. ábra) csak e hatalmas kőtömbök mozgatásának és emelésének – máig sem ismert – technológiája segítségével valósulhat meg. A klasszikus görög építészeti szépségének feltétele volt a kő pontos és szép megmunkálásának ma is csodálatra méltó tökéletessége. A római császári paloták és fürdők változatos, boltozott terei az akkor megismert „betontechnológia” nélkül nehezen képzelhetők el. A gótikus boltozati és ablakbordák bonyolult áthatásai a fejlett kőfaragó-technika segítségével valósulhattak csak meg.

A modern építészet formáinak kialakulásánál is kezdettől fogva lényeges szerepet kapott a technológia. Éppen az építészettörténeti stílusokból örökölt, már értelmét veszített dekorációval állították szembe az anyag megmunkálásának szépségét. A múlt század második felében Angliában Ruskin elméleti munkássága, az ő elveit követő W. Morris iparművészete ennek az irányzatnak a megindítója. Ők még elméleti és gyakorlati munkáikban egyaránt a kézműiparhoz kötődtek, sőt szembeállították a gépipari tömegtermeléssel. Th. Gautier azonban már akkor látta, hogy „az emberiség egy merőben új építészetet fog létrehozni ... abban a pillanatban, amint ... az ipar teremtette új eljárások használhatóak lesznek ...”.⁵⁵⁾ Valóban, a gyáripár fejlődése, bár nehezen, nagy késéssel, az építőipart is gyökeresen átalakította. A fejlődést több tényező is lassította. A gyáripár gazdaságosságának feltétele a nagy sorozat, amely az építészetben régebben csak egészen kivételes esetekben valósult meg. Sokkal nagyobb feladat továbbá nagy elemeket, esetleg egész házakat gyártani, mint kis méretű használati tárgyakat. Nem lebecsülhető a szubjektív tényezők hatása sem, így az építőipar nagy kézműves hagyománya, és még inkább az építészettel, mint művészettel szembeni elvárások. A művészi alkotás klasszikus fogalmához különösen az utóbbi századokban szorososan hozzá kötődött az egyediség. Ezzel szemben az ipari formatervezés fejlődése mutatja, hogy a sorozattermékeknek is lehet esztétikai értéke.

Az elmondottak alapján érthető, hogy a modern technológiából fakadó új esztétika jelei az építészet perifériális területén alakultak ki. J. Paxton – aki kertépítő volt – még a múlt század közepén olyan acél-, fa- és üvegelemekből álló növényházakat fejlesztett ki, amelyek sorozatban gyárthatók és gyorsan összeszerelhetők. Legismertebb és legnagyobb szabású műve, a londoni Kristálypalota már kiállítási csarnok, amelyet a korábban kialakult és az ilyen célú épületeknél igen előnyös elvek szerint tervezett az 1851. évi Londoni Világkiállításra (21. ábra). A 600 m hosszú, 120 m széles, hatalmas méretű épületet előregyártott elemekből az újszerű eljárással mindössze 9 hónap alatt sikerült felépíteni, a helyszíni építés csak 16 hétig tartott. Paxton egy teljes évszázaddal előzte meg korát, nem meglepő tehát, hogy nem talált méltó követőkre.



21. ábra

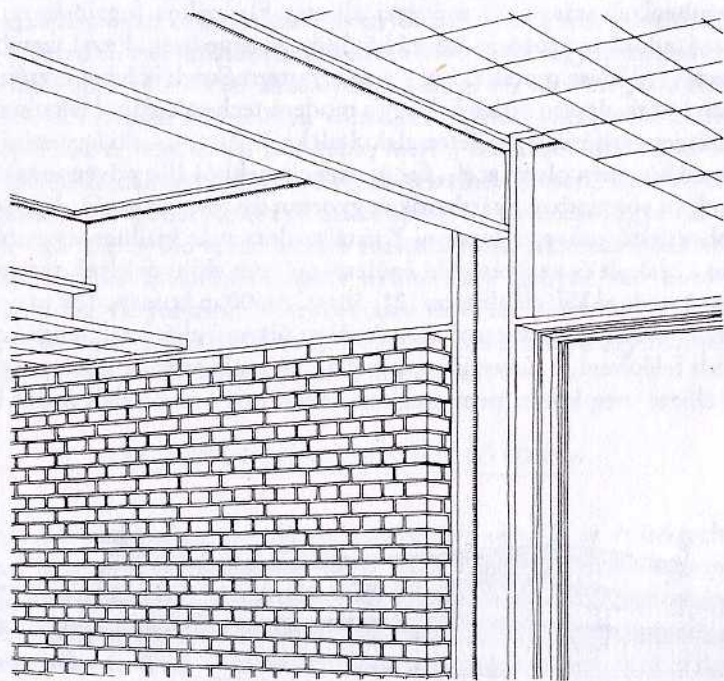
A londoni Kristálypalota.

Az előregyártott elemekből szerelt könnyűszerkezetes épületek korai előképe

Az előregyártás gondolata ugyan már Paxton előtt is többször felmerült, de nem emelkedett az igazi építészet színvonalára, inkább csak szükségépületeket, barakkokat állítottak elő előregyártott panelekből.⁵⁶⁾

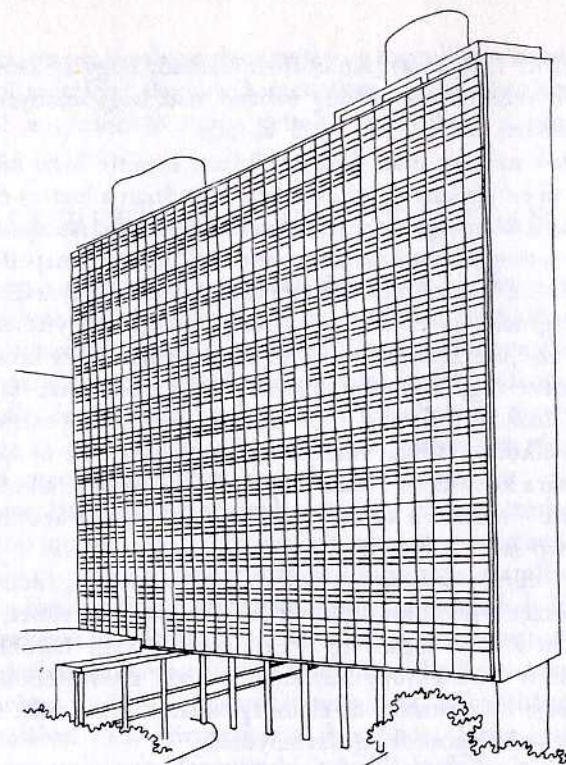
Az első világháború után a Bauhaus eszméjében jelenik meg a modern ipar megbecsülése és felhasználása a művészetben, így az építészetben is. A kor azonban még ekkor sem volt alkalmas az új eszmék megvalósítására, így a Bauhaus gyakorlati működése még nagyrészt a fejlett kézműipar szintjén maradt, de elegánsan finom, puritán formavilágával az iparosított építészet esztétikájának megalapozójává vált. A szigorú mértani formák, az alaprajzi raszter rendje és az ebből következő sok azonos elem a szériagyártás lehetőségét teremtették meg. A Bauhaus eszméit ebben a vonatkozásban legjobban Mies van der Rohe valósította meg, aki ugyan csak rövid ideig tartozott az iskola kötelékébe. Alkotásaiban a hagyományos és az új építőanyagok (tégla, acél, üveg) és az ezekből készült szerkezeti elemek összeépítése, a kapcsolatok minden kis részletének gondos megoldása az épület esztétikai értékének fő hordozójává válik (22. ábra).

Csak a második világháborút követő évtizedekben – a modern gyáripár kifejlődése után egy évszázaddal – érlelődtek meg az építészetben a nagyipari termelés feltételei. A háború pusztításai és a nem várt, gyors gazdasági fellendülés nyomában jelentkező, addig ismeretlen mennyiségű építési feladat kényszerítette ki a modern technológia elterjedését.⁵⁷⁾ Egymás után fejlesztették ki az új építési eljárásokat, amelyek mind az építés gyorsabbá, olcsóbbá tételét, a munkaráfordítás csökkentését



22. ábra

Az Illinois Institute of Technology könyvtárának terve.
Mies van der Rohe puritán épületeinek szépsége a kiérlelt arányok mellett a minden részletre kiterjedő gondos tervezésnek (és a tökéletes kivitelezésnek) köszönhető



23. ábra

Oktatási és Egészségügyi Minisztérium, Rio de Janeiro, 1937–1943.
Az ismétlődő elemek esztétikai értékét az építészet az előregyártás elterjedése előtt felfedezte

igyekeztek szolgálni. Érdekes, hogy míg az új anyagokat a mai építészek szinte kivétel nélkül szívesen fogadják, az építés iparosítása erős ellenállást váltott és részben még vált is ki. Valószínűleg a fejlett technológiák által megkövetelt tipizálás esztétikai következményeitől féltették az építészetet. A tipizálás előnyeit egyesek már jóval korábban felismerték. Muthesius már 1914-ben kifejtette, hogy „az építészet és a Werkbund teljes tevékenységi szférája a tipizálás felé tendál. (A művészet) csak a tipizálás révén nyerheti vissza azt az egyetemes jelentőségét, amely a civilizáció harmonikusabb periódusaiban sajátja volt.”⁵⁸⁾ Van de Velde, a modern építészet másik úttörője, ezt nem tudta elfogadni, és ki is vált a Werkbundból. Pogány Frigyes hatvan évvel később így szűrte le e viták tanulságát: „Mi, idős építészek, az elmúlt évtizedek alatt a szakmában a szemlélet és a tudat fejlődését pontosan lemérhettük. Kezdetben minden tipizálással szemben ellenszenvet tapasztalhattunk, ma pedig azt hiszem építészeink közül senki sem vonja kétségbe, hogy feladatainkat – hangsúlyozom: a célok és eszközök optimális arányát társadalmi szintre kiterjesztve – csakis fokozott iparosítással oldhatjuk meg... Éppen az építészet fokozott és folyamatos iparosítása bizonyítja talán legjobban a szerkezet, funkció és forma összefüggését, hiszen minden nagy elem egyidejűleg szerkezeti, funkcionális és formai egység. Éppen ez a tény bizonyítja, hogy nemcsak steril szerkezeti, technológiai szempontból kell fejleszteni az ipart, hanem a komplexebben értelmezett funkciók, azok differenciáltsága és a korszerűen értelmezett esztétikus forma érdekében.”⁵⁹⁾

Az iparosított építéstechnológiák közül itt a két legjellemzőbbet, a vasbeton paneles és a könnyűszerkezetes építésmódot említjük meg. Mindkettő teljesen új for-

mákat is hozott (125., 128. ábra). Különösen feltűnő, hogy az előregyártás a vasbetonnak a monolit szerkezetek néhány évtized alatt hagyományossá vált formáit mennyire megváltoztatta (vö. a 12. és a 125. ábrát).

Érdekes, hogy sok művész már jóval korábban, intuitív úton felismerte a technológiából fejlődő új esztétikát. A festészetben Mondrian a húszas években tárta fel előttünk az egyszerű, sorolt geometriai formák szépségét. Az építészetben is már a negyvenes években megjelenik a raszter, mint burkolat vagy napellenző (23. ábra). „A négyzetes modulháló az elemek méretegységesítésének, gyártásának, szerelésének és cserélhetőségének, az építés egyszerűsítésének, könnyítésének lehetőségét nyújtja elsősorban az építészetet megvalósító építőiparnak. Még kötöttebb az előreformálás, ha a hálózat vagy a kompozíció alapjául három-, hat- stb. szögek vagy éppen körök szolgálnak. Mindaddig nincs baj az ilyen módon megvalósuló épületalkotással, amíg az alkotót e vállalt formálási kényszer nem az új építészet elveinek torzítására, tagadására kényszeríti, hanem éppen ellenkezőleg, alkotó képességének maximális kifejtésére – miként a költőt a mérték és a rím. Ez azonban nem mindig sikerül. S akkor csap át ez a kísérlet a másik irányzatba, ha az a priori formálás, a formában újnak, a mindenáron újnak akarásában, az extravagancia világába téved, melyben az új építészet elvei külön-külön is, együttesen is sérelmet, torzulást szenvednek, elsodródván a teljes tagadásig.”⁶⁰⁾ Az azonos vagy hasonló előregyártott elemekből összeépített épületek új esztétikai normákat alakítottak ki.⁶¹⁾ Az esztétikai hatás fő tényezője itt a ritmus, az elemkapcsolatok átgondolt, szép megoldása és a gépi munkára jellemző pontosság, szabályosság.

Nem kell azonban azt gondolnunk, hogy a fejlődés ezzel lényegében megállt. Nem lehetetlen, hogy éppen a technológia fejlődése (talán nem is olyan távoli jövőben) az egyedi formák visszatérését teszi majd lehetővé, talán a régi kézműiparnál is nagyobb mértékben, ahol a munka racionalizálása szintén bizonyos tipizáláshoz vezetett. Elvben ugyanis már ma is megvalósítható egy olyan fejlett automatizált üzem, ahol a termék igen sok paramétere szabadon választható, és így a változatos elemek gyártása mindössze programozási kérdéssé válik.

* * *

A szerkezetszerűség kérdéseit röviden áttekintve felmerül a kérdés, miért nincs ennek olyan fontos szerepe az építészet esztétikájában, mint az anyagszerűségnek már a hagyományos szobrászati kritikában is jutott. Pedig láttuk, hogy a szobor anyagszerűsége nagyrészt megfelel az építészet szerkezetszerűségének, az anyag közvetlen, felületi megjelenésén túl sokkal nagyobb súlya van ott is a szerkezeti-statikai törvényeknek. Az építészetben sokkal fontosabb a szerkezet, már az alkotások nagyobb méreteinél fogva is. (Ezzel természetesen nem állítjuk, hogy a jó épület és a szerkezetszerűség közé egyenlőségjelet tehetünk, csupán azt, hogy a jó épület egyik elengedhetetlen feltétele a szerkezetszerűség.) Aláhúzza a szerkezet jelentőségét pusztán esztétikai szempont is. Az építészet, mint lényegénél fogva absztrakt művészet, kifejezőeszközei sokkal szűkebb skálán mozognak, mint a szobrászaté, amely a természet művészi ábrázolásának lehetőségéről legfeljebb önként mond le egyes esetekben. A szerkezetszerűség háttérbe szorulásának tehát máshol kell az okát keresnünk. Valószínűleg abban, hogy a szerkezetszerűség megítélése mind a műélvezőtől, mind a kritikustól több ismeretet kíván, mint a szobrászati anyagszerűség közvetlen tapasztalaton alapuló értékelése. A szerkezetet ezért az ilyen ismeretekkel nem rendelkező szemlélő sokszor nem is érti, sőt abban a gyakori esetben, mikor

a szerkezet egyes részei, esetleg egésze rejtett, a megoldás a hozzáértő számára sem evidens egyszerű szemlélet alapján. A szerkezeti esztétikában ezért sem hagyhatók figyelmen kívül a szubjektív szempontok, amelyekről a következő fejezetben szólnunk.

A SZERKEZET SZUBJEKTÍV ÉRTÉKELÉSE

Az eddigiekben a szerkezetek esztétikai értékének objektív alapjait igyekeztünk megismerni. Nyilvánvaló azonban, hogy az esztétikai értékelés mindig szubjektív, akkor is, ha tárgyi alapjai vannak. Vannak viszont olyan tényezők, amelyek pusztán a tudat reagálását jelzik az esztétikai értékítélet kialakításában. De ez a reagálás szubjektivitása ellenére sem önkényes, hanem a pszichológia törvényei szerint alakul. És tekintve, hogy az ítélet kialakításában az egész szubjektum részt vesz, esetünkben erősen hatnak rá az egyén építészeti és szerkezeti ismeretei is.

Aki egy épületet lát, tudatosan vagy tudat alatt, minden esetben véleményt alkot róla. Sőt mint látni fogjuk, e véleményben sok ösztönös szerkezeti, statikai szempont is helyet kap akkor is, ha a teherhordó szerkezetet a szemlélő nem választja el tudatosan a más funkciójú épületrészekről (vagy ismeretek hiányában, vagy mert a teherhordó szerkezet nem feltűnő, esetleg teljesen rejtve van). Az épületről és ezen belül a tartószerkezetről alkotott ítélet – különösen, ha nem szakemberről van szó – így legnagyobbbrészt szubjektív elemeket tartalmaz, a korábban kifejtett objektív szempontok általában csak közvetve jutnak szóhoz. Ezért indokolt, hogy megkíséreljük a szerkezettel kapcsolatos szubjektív állásfoglalást is elemezni.

AZ EGYENSÚLYÉLMÉNY

Épületeinknek statikus egyensúlyi állapotban kell lenniük, éppen ezt biztosítják a megfelelően tervezett és megvalósított szerkezetek. Az egyensúly objektív értelemben természetesen mindig fennáll – különben az épület összedőlné –, de ennek a szemlélő számára szubjektív értelemben is meggyőzően kell megjelennie, amit a szerkezet és az épület formálásával érhet el a tervező. A bizonyításnak egyszerű eszközökkel kell történnie, amely az ösztönös statikai érzéket kielégíti. Honnan származik ez az érzék? Valószínű, hogy évszázadok, évezredek tapasztalata át is öröklődik, de nem is szükséges ilyen messzire mennünk: a gyermekkori építőjátékok, a mindennapi élet jelentéktelen eseményei – árkon, patakon átfektetett gerenda, álló és ledőlő téglarakás stb. – mind hozzájárulnak a statikai érzék kialakulásához. Maga az *egyensúly* szó is egy köznapi jelenségből, az egyenlő karú mérleg megfigyeléséből ered: az egyenlő karok miatt akkor van a mérleg egyensúlyban, ha egyenlő súlyok terhelik a két serpenyőt. Talán a szimmetria, mint esztétikai fogalom is innen ered. Évezredek át a szép forma egyik feltétele volt a szimmetria nemcsak az építészetben, hanem más művészetekben is, sőt szerepe ma sem szűnt meg.

Az egyensúlyélmény természetesen nem ilyen egysíkú. Megkülönböztethetünk – szubjektív szempontból is – statikus és dinamikus egyensúlyt (a dinamikus egyensúly itt fizikai értelemben természetesen szintén statikus egyensúly, hiszen a szerkezet nem mozog). Statikus egyensúlyélményt általában a régen megszokott, leginkább a szimmetrikus formák keltenek. Ilyen pl. a függőleges pillér vagy oszlop, a támaszok közötti áthidaló gerenda stb. (1., 22. ábra). Dinamikus egyensúlyélményt a bonyolultabb erőjátékú és szokatlanabb szerkezeti formák váltanak ki, pl. a ferde támasz,

a konzolgerenda, a boltív (ez utóbbi talán legkevésbé, de az arab közmondás – „a boltív sohasem alszik” – mindenesetre a dinamikus egyensúlyi állapothoz utal) (5., 12., 84., 92. ábra). A statikus egyensúly megnyugtató, klasszikus hatású, a dinamikus egyensúlyi állapothoz vált ki a nézőben, míg az egyensúlyi állapothoz hiánya félelmet kelt, az egyéb esztétikai értékeket is lerontja.

A BIZTONSÁGÉLMÉNY

Ha az egyensúlyi állapothoz megfelelője a statika tudományában a statikai egyensúly, a biztonságélmény a stabil egyensúlyi állapothoz kapcsolódik. Mindkettő azt jelenti – az egyik szubjektív, a másik objektív értelemben –, hogy az egyensúly tartósan megmarad, mert az egyensúlyi állapotot az építményre ható erők elkerülhetetlen változása (pl. szél, a hasznos teher növekedése) nem szünteti meg. Ezért mindig negatívan hatnak a biztonságélményre a szemmel látható nagy alakváltozások, legfőképpen a repedések, még akkor is, ha azok ténylegesen nem veszélyeztetik az épület állékonyságát, mivel a tönkremenetel labilis egyensúlyi állapotának képzetét keltik.

A biztonságélmény természetesen feltételezi az egyensúlyi állapothoz, amely önmagában nem is kielégítő. A biztonság élménye nehezen definiálható, és az ismeretek növekedése, az építéstechnika fejlődése is erősen befolyásolja. Így az egyiptomiak valószínűleg csak a zömök oszlopokat és kőgerendákat érezték biztonságosnak, a középkor embere pedig már a csipkeszerű kőszervezetet is. A múlt század közepén többek közt éppen a biztonságérzet hiánya váltotta ki a vasszerkezetek elleni kritikákat, ma pedig a még sokkal karcsúbb acélszerkezeteket is biztonságosnak érezzük. (De még napjainkban is előfordulnak a múlt századhoz hasonló esetek: a budapesti Erzsébet-híd tartóköteleit pl. sokan, akik addig nem ismerték ezt a nálunk szokatlan szerkezetet, nem érezték elég erősnek.)

Az ismeretekhez hasonló hatása van a biztonságélményre (és részben az egyensúlyi állapothoz) a megszokásnak is. Ami ezelőtt száz évvel még a szakemberek többségének sem adta meg a biztonságérzetet – ezért esztétikai értékét sem tudták elfogadni – az ma már természetes, megszokott csaknem mindenki számára. „A vizuális beidegződések megújíthatnak ... a zömök kő- és téglapilléreket s a vastag falakat, melyeknek szélességét teherhordó feladatuk diktálta, a plasztikai érzékelés mindeme elsődleges tényezőjét, úgyis mint sajátos érzelmekeltőket, kiszorítják a karcsú és ritka vas- vagy vasbeton pillérek. Megjelenésük idején általános volt a vélemény, hogy sohasem lesznek képesek a teherviselés benyomását kelteni és kellőképpen megnyugtanni a szemlélőt ... Azóta évek múltak el, a szem megszokta őket, és kibontakozott belőlük az elegancia, a ma stílusának lényeges vonása.”⁶²⁾

AZ ERŐÉLMÉNY

Az eddig tárgyalt egyensúly- és biztonságélménynek alig van önálló esztétikai értéke, inkább az esztétikai élmény kialakulásának szükséges, de nem elégséges feltételei. Ha hiányoznak, az épület egész egyszerűen nem tetszik, sőt a benntartózkodás kifejezetten kellemetlen érzést vált ki. A terheket és az azokat egyensúlyozó erőket azonban érzékeltetni is lehet, ami már pozitív hatást válthat ki. Az erőjáték metaforikus érzékeltetése a régebbi korok építészeti eszköztárába tartozik, de ma is hozzájárul pl. a görög oszloprend szépségéhez a tagozatok és a sudarasodó oszlop megfeszülő izomhoz hasonló formai kezelése, bár ez a merev kőanyag természeté-

nek ellentmond. Felismerve a formában rejlő jelképet, ennek az elvnek a legszélsőséges megfogalmazása a támasz helyett alkalmazott, teher alatt görnyedő Atlasz-szobor (amiből a múlt században gipsz díszítés vált). Mai gondolkodásunkhoz közelebb áll a szerkezetek metaforák nélküli, de az erőjátékot a kevésbé képzett szemlélő számára is érthető formálása. Ennek számtalan példáját láthatjuk: ide tartozik a szerkezet ésszerű megmutatása (12., 116. ábra), a keresztmetszetek változtatása az igénybevételnek megfelelően (47., 50. ábra), a támaszoknak a ferde erő irányába való vezetése (86., 92. ábra) stb. Jól alkalmazva ezek mind fokozzák az esztétikai hatást.

Az erőélmény kategóriájába tartozik a szerkezet és az épület nagy súlyának, vagy éppen könnyedségének formai kifejezése. A hagyományos szerkezetekre, amelyeknek tipikus építőanyaga a kő, a nagy súly a jellemző. Ezt például az egyiptomiak a zömök arányokkal, a görögök az említett, erőt kifejtő izomzat formáinak hasonlatával ki is fejezték (1., 27. ábra). A gótika viszont kifinomult szerkezeti megoldásaival szinte tagadja az építőanyag nehézségét és az adott lehetőségek határain belül kétségtelenül megközelítette a minimális anyagfelhasználást (28. ábra). Talán ezért sem érzünk gótikus épületekben ellentmondást. Korunkban viszont a nagy húzószilárdsággal bíró anyagok eddig elképzelhetetlenül könnyű épületek létesítésére adnak lehetőséget, aminek formai kifejezése esztétikai élményt is nyújt.⁶³⁾

A MEGÉRTÉSÉLMÉNY

F. Schinkel, a modern építészet gondolatainak korai felvetője szerint az épület mint műalkotás élvezete akkor a legnagyobb, ha egyszerre áttekinthetjük és megérthetjük minden részletét.^{63a)} Ha ezt az elvet ilyen szélsőséges formában nem is fogadjuk el, kétségtelen, hogy különösen a szerkezetek esztétikai értékének felismeréséhez nagyban hozzájárul azok lényegének megértése. Elősegíti pl. – ha valóban jó a szerkezet – az egyensúly- és biztonságélmény kialakulását. Egy függőleges falakkal alátámasztott sík födém nyilvánvalóan mindenki számára érthető, már a megszokás miatt is, a tényleges erőjáték alaposabb ismerete nélkül. Az építészeti és szerkezeti szakismeretek hiánya nem akadály a hagyományos boltozatok, sőt még a szokásosabb, egyszerűbb héjszerkezetek szubjektív – nem tudományos – értékelésének sem. De az olyan szerkezet, mint E. Torroja madridi sportcsarnokának lefedése, már csak szerkezeti ismeretekkel fogható fel. Aki nem ismeri a dongahéj működését, annak egyensúly- és biztonságérzetére esetleg kellemetlenül hat, vagy ha építész, csalásnak, formalista álmenyvezetnek sejtetheti, holott ez az épület egyik legszebb példája a funkció, szerkezet és forma egységének (79. ábra, az épület részletesebb tárgyalását I. a III. fejezetben a 130. oldalon).

A megértés szükségessége egyszerűbb esetekből is látható. Például a tömör gerendatartó általában esztétikusabb, mint a rácsostartó. Ennek az lehet a magyarázata, hogy a gerenda működését egyszerű köznapi tapasztalatból mindenki érzi, a rácsostartó erőjátékának megértése viszont statikai ismereteket kíván (annak ellenére, hogy a gerenda erőjátéka elméletileg bonyolultabb).

A szerkezet működésének szubjektív megértéséhez nem szükséges feltétlenül elméleti tudás, elégséges az erőjáték kvalitatív ismerete (így pl. a rácsostartóknál a húzott és a nyomott rudak érzékelése). Ez a jelenség a szerkezettervező számára is hasznos, két oldalról is. Egyrészt a pontos számítás elvégzése előtt nagy vonalakban kialakíthatja az esztétikailag is megfelelő szerkezeti formákat, másrészt az elvégzett

számításokat esztétikai kontrollnak veheti alá. A számítások eredményeit célszerű mindig vizuálisan érzékelni: a számításból adódó, esztétikailag nem kielégítő forma súlyos hibákra hívhatja fel a gyakorlott tervező figyelmét.

A RENDELTETÉSSZERŰSÉG

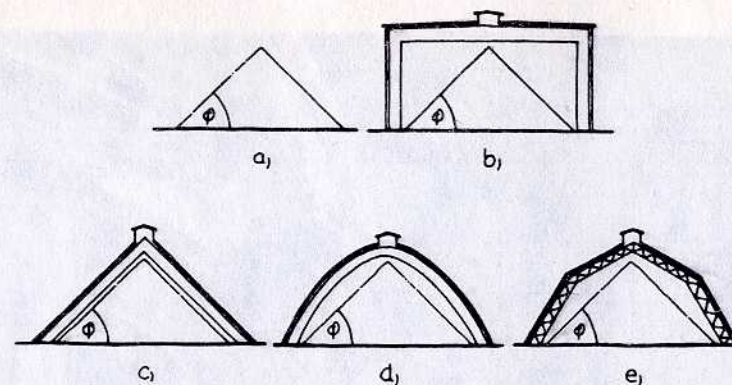
Többször hangsúlyoztuk már, hogy a szerkezet nem cél, hanem eszköz. Ezért a szerkezet csak akkor valósítja meg saját célját, ha rendeltetészerű, vagyis az épület rendeltetésének megfelelő. Ezért nem lehet pozitívan értékelni az olyan bravúros szerkezeteket, amelyeknek elsődleges céljuk, hogy a figyelmet magukra vonják. Elhibázott és esztétikailag sem értékelhető például egy kis épületet bonyolultan megvalósítható, bár elvben kedvező erőjátékú héjszerkezettel lefedni. Ugyanígy hiba a szerkezeti tudás fitogtatása érdekében a szükségesnél nagyobb fesztávot áthidalni. Ezek a szélsőséges esetek azonban nem merítik ki a kérdést. A rendeltetészerűség alapvető követelménye, hogy a szerkezet ne legyen ellentmondásban a funkcióval. Nem szabad például szerkezeti indokkal a közlekedést gátló támaszt elhelyezni; íves lefedésnél meg kell vizsgálni a támaszok közelében levő terek használhatóságát, és ez is szempont lehet a szerkezeti elképzelés megvalósításában vagy elvetésében.

A rendeltetészerűség körébe sorolhatók a szerkezetekkel kapcsolatos gazdasági megfontolások is. Az anyag, a szerkezeti rendszer, a technológia megválasztásánál az időben és térben adott helyzethez kell igazodni. Ilyen értelemben a megoldások értéke teljesen relatív. Például Nervi zseniális, ferrocement szerkezetei (58. ábra) a század közepén, Olaszországban optimálisak voltak, de ugyanakkor, viszonylagos munkai igényességük miatt, Amerikában nem lettek volna célszerűek, mint ma már valószínűleg Olaszországban sem lennének gazdaságosak.

A rendeltetészerűség azt jelenti, hogy a szerkezet megfelel az építési feladatnak, annak optimális megoldását segíti elő. *Nem a szerkezetet kell összefüggéseiből ki-ragadva optimalizálni, hanem az egész épületet.*⁶⁴ Adott esetben nem biztos, hogy az önmagában legjobb szerkezet a cél szempontjából a legelőnyösebb, még akkor sem, ha csupán a gazdaságosság többé-kevésbé jól számszerűsíthető kérdését vizsgáljuk. Például egy nagy fesztávolságú teret szerkezeti szempontból általában íves szerkezettel célszerű lefedni. Ez természetesen nagy belmagassággal jár. Ha ezt a teret fűteni is kell, lehetséges, hogy az üzemeltetési költségeket is figyelembe véve, mégis a vízszintes lefedés a gazdaságosabb. A szerkezet költségei viszont a fesztávolság növekedésével rohamosan nőnek, így bizonyos méret felett már az íves szerkezet javára billen a mérleg. A valóságban a feladatok ennél sokkal bonyolultabbak, a tényezők nagy része mai ismereteink szerint számszerűen ki sem fejezhető. Ilyenkor csak a józan mérlegelés dönthet. Mégis lehet tipikus eseteket találni, amelyeknél a szerkezetnek döntő szerepe van az épület kialakításában. Ezek: a nagy fesztávolság, az egyszerű funkció és a sokféle funkció ellátására alkalmas semleges tér esetei.

Nagy fesztávolság esetén a szerkezet költsége olyan tetemes, hogy az épület kialakításában a kedvező erőjátékot gazdasági szempontok miatt feltétlenül figyelembe kell venni. Sőt, igen nagy méreteknél, mint később látni fogjuk, a szerkezet már erősen meghatározza a megoldást.

Egyszerű funkció esetében a szerkezet szinte önmagában optimalizálható, mert mindössze néhány paramétert kell, mint adottságot figyelembe venni. Ennek megvilágítására lássunk egy példát: a feladat egy szállítószalag segítségével felhalmozott,



24. ábra
Műtrágyarakartár különböző megoldásai.
Az optimális megoldás keresése

ömlesztett anyag (pl. műtrágya) tárolása zárt térben [24. ábra a)]. A sablonos megoldás egy keretszerkezetű csarnok lehetne (b), amely hajlított szerkezettel hidalja át a nagy fesztávolságot, és ezért nem gazdaságos. Elképzelhető a prizmat pontosan követő, háromszög keresztmetszetű csarnoktér is (c), de előnyösebb az ívtartó (d) erőjátéka. Ez lehet az optimum, mégis az építéstechnológiai előny indokolhatja az ívet megközelítő, tört vonalú tartót is (e). Ha azonban csak egyetlen új követelmény, mint pl. a fűtés járul az eddigiekhez, a kérdést újra meg kell vizsgálni, és lehetséges, hogy a legkisebb, csak a feltétlenül szükséges teret határoló – szerkezetileg hátrányosabb – c) megoldás válik optimálissá.

Semleges tér alakításakor természetes, hogy a szerkezetnek még akkor is jelentős szerepe van, ha a nagy fesztávolság nem igény – bár az ilyen ritkán fordul elő. Ez az egyik, már említett eset, amelynél az épület úgyszólván csak szerkezetből áll. Ilyenek például a ma még utópisztikus védőtető, amelyek egész városokat óvhatnak meg a mostoha időjárástól, az állandó kiállítási csarnokok és határesetként az ún. több célú csarnokok, nagyobb közösségek tömeget mozgató, különféle funkcióinak befogadására.

E három említett esetben a szerkezetnek, természetétől fogva, lényeges szerepe van az egész épületben, így a formák alakításában is. Lehet azonban a szerkezet más, sőt ezekkel ellentétes körülmények közt is hangsúlyos formaalakító elem, akár csupán formai igényből. Ennek határa mindig a rendeltetészerűség, hogy a szerkezet (és a forma) az építési feladatnak megfeleljen.

Ez utóbbi gondolat adja meg a választ arra is, mikor válhat a forma indokoltan elsődlegessé: ha az építési feladat nem, vagy alig tartalmaz gyakorlati funkciót. Tipikus példája ennek az emlékmű, de ide sorolhatók még az elsődlegesen reprezentatív épületek is. A forma viszonylagos elsődlegessége nem jelenti azonban a szerkezet tagadását. Sőt a nagy méretű emlékművekben a szerkezet kényszerítően jut jelentős szerephez, és az építészeti gondolat előnyére válik, ha ezt tudatosan fel is használja (62. ábra).

A rendeltetészerűség a szerkezet és az egész épület optimalizálásának egyik legfontosabb kérdése, amely külön részletes vizsgálatot követel. Itt csak ezt a néhány gondolatot említettük meg, mivel ez a kérdés nem tartozik közvetlenül szorosan vett tárgyunkhoz, szerkezet és forma kapcsolatához.



25. ábra

A római San Pietro kupolája.

A díszítésnek tűnő golyvás oszlopok, a mögöttük rejtőző támpillérekkel az oldalnyomás felvételében vesznek részt; az oldalnyomás azonban nem volt kellőképpen kiegyensúlyozva, így az 1743-ban elkészült első statikai szakvéleménynek köszönhető, hogy a kupola mégis eredeti formájában maradt meg.

II. TÖRTÉNETI ÁTTEKINTÉS

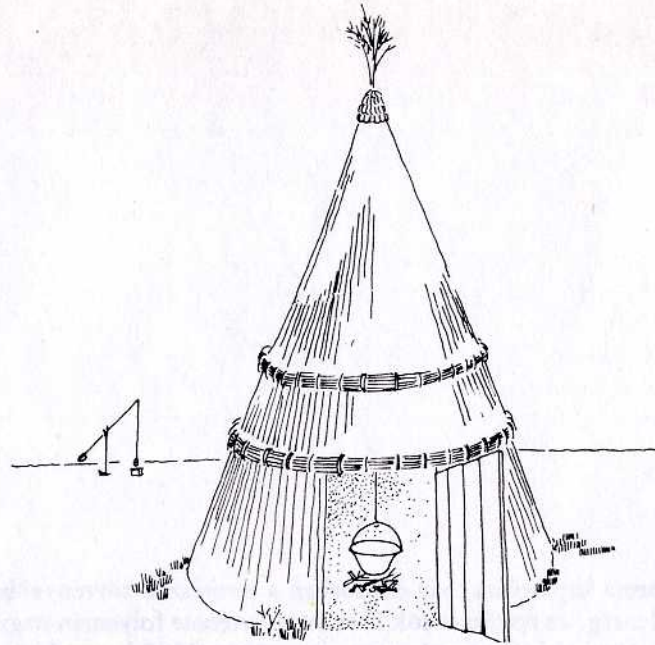
Szerkezet és forma kapcsolata, bár elsősorban a természeti törvényekből következő, objektív jelenség, az építészet sok ezer éves története folyamán nagy változásokon ment át. A kezdeti idők természetes, magától értetődő kapcsolatát is módosították az építési tapasztalatok és a művészi igények, még mielőtt a XVIII. és XIX. század fordulójától megjelenő új építőanyagok, a statika és az építéstechnológia fejlődése a szerkezet és forma közötti összefüggés lényegének tudatos, tudományos vizsgálatát lehetővé és egyre sürgetőbbé tette volna. Ennek megfelelően először a szerkezet és forma – emberi tevékenység oldaláról nézve – ösztönös kapcsolatának korszakát vizsgáljuk meg, amely kb. a XVIII. század közepéig egyértelműen jellemezte az építészetet, majd röviden áttekintjük a statika fejlődését, mint a tudatos szerkezettervezés legfontosabb feltételét. Végül főbb vonásaiban emlékezetünkbe idézzük a szerkezet és forma tudatos kapcsolatának mintegy kétszáz évet felölelő történetét.

Nem célunk itt az építészet történetét, de a szerkezetek történetét sem lépésről lépésre nyomon követni. Az előbbi számtalan mű tárgyalja, de ma már a szerkezetek történeti fejlődése is többé-kevésbé ismertnek tekinthető. E fejezetben csupán a szerkezet és forma kapcsolatának megvalósulását és a jelenség tudatosodását vizsgáljuk meg röviden, hogy ezáltal is közelebb kerüljünk ennek az érdekes jelenségnek a megértéséhez.

SZERKEZET ÉS FORMA ÖSZTÖNÖS KAPCSOLATA

ŐSKOR

Már a bevezetőben utaltunk az építészet legáltalánosabb meghatározására, ill. elsődleges céljára, amely a védett, zárt tér létesítése. E meghatározásból is kitűnik, hogy az építészet együtt született a szerkezettel, hiszen a térelhatároló felületeknek saját súlyukat még akkor is hordaniuk kell, ha a külső hatások nem mechanikai jellegűek (pl. a hideg elleni védelem esetében). Más kérdés, hogy ezek a „szerkezetek”



26. ábra

Alföldi pásztorkunyhó.

Az őskori építményekre emlékeztető formák szépsége elsősorban az építéstechnológiából ered

a természetben talált anyagokból minden nehézség nélkül elkészíthetők, sőt a természet olyan előképeket is nyújt, mint pl. a lombsátor. (Bár nem szabad arról sem megfeledkeznünk, hogy a kezdetleges, korunkban szinte minden szakértelem nélkül megvalósítható építmények nemzedékek hosszú sorának tapasztalatai, kísérletezései nyomán alakulhattak csak ki.) A szerkezet egyidős tehát az építészettel, sőt kezdetben az építészettel szemben támasztott egyetlen követelményt, a védelmet, kizárólag szerkezettel elégítették ki. Így természetes, hogy a kezdetleges építmények formái a szerkezetből adódnak. Kis méreteik miatt a statikai tényezők ugyan háttérbe szorulnak, inkább az építőanyag és az építéstechnológia határozza meg a formákat. Építőanyagként a helyben található földet, levelet, szárat, gallyat stb. használták és a technológia ezek megfelelő összeállítása, rögzítése volt. Az őskori kunyhók ugyan nyomtalanul elpusztultak, de némileg fejlettebb változataik ma is megtalálhatók. Ilyenek például a pásztorok kunyhói a magyar Alföldön (26. ábra).⁶⁵⁾ Ezek a jobbra kör alaprajzú építmények nádból épülnek. A nádkévéket kör alakban a földbe ássák, felül és közben egy-két helyen fűzfavesszővel összekorcolják, alul kis nyílást vágnak rajta, és már kész is a kunyhó. A bugák természetesen felfelé állnak, hiszen a nád ezen a részén nem elég szilárd. Meglepő, hogy ez az egyszerű, igénytelen alkotás is bizonyos jellegzetes formai jegyeket mutat, sőt esztétikai értéket is fedezhetünk fel benne (bár építők ezt nem tudatosan keresték, különösen nem a hasonló őskori építményeknél). A kúpos tömeg, a korcolás, a csúcson a nád bugái a felületes szemlélő előtt díszítésnek tűnhetnek, és valóban esztétikai hatást is váltanak ki. Az alaposabb vizsgálat szerint azonban mindez az építőanyag és a technológia következménye.

Érdeemes itt egy pillanatra a művészet kezdeteire is gondolni. A művészet eredetéről több elmélet alakult ki (pl. a művészet a szexualitásból, a kultikus cselekményekből

stb. ered). Valószínű, hogy a kérdést a kellő tárgyi ismeretek hiányán kívül azért sem lehet egyértelműen megoldani, mert az egyes művészetek eredetét különböző helyen kell keresni. Talán nem tévedünk, ha azt sejtjük, hogy az építőművészet kezdeteit a szerkezeti megoldásokban, közelebbről a technológiában találhatjuk meg. Az ősember építményeinek sokáig csak gyakorlati rendeltetése volt. Az építőanyag választéka a helyszínen található néhány fajtára korlátozódott, a statikai megoldás pedig a csekély tapasztalat miatt gyakorlatilag adott volt. Ugyanezt mondhatjuk az építéstechnológiáról is, ahol azonban az egyéni ügyességnek és tapasztalatnak mégis nagy szerep jutott (az előbb említett pásztorkunyhó nádkévéinek elrendezését, korcolását sem tudja mindenki egyforma ügyességgel elkészíteni). A jól és szabályosan kivitelezett építmények váltottak ki talán először tetszést, amelyet ezek hatására később már tudatosan is kerestek, és a technológiailag szükséges részletek dekoratív megoldására törekedtek. Később a megszokott és megkedvelt megoldásokat már esetleg formai igények szerint fejlesztették tovább, sőt ha a technológia megváltozott, a régi formákhoz pusztán az esztétikai igény miatt továbbra is ragaszkodtak, és így már viszonylag korán – legalábbis egyes részleteket tekintve – különvált a szerkezet az építőművészettől.

Az őskor építészetének fejlődése igen lassú volt. Valószínűleg a természeti körülmények változása is hozzájárult új szerkezetek kialakulásához. Így pl. egyes vidékek lakóit a fa hiánya kényszeríthette a föld építőanyagként való felhasználására. Ezt tételezhetjük fel a kő első alkalmazásáról is, de itt valószínűleg viszonylag hamar új szempont is jelentkezett, a maradandóság igénye, amely viszont talán már kultikus okokból eredhet. Mindenesetre az őskori építészet legmaradandóbb alkotásainak, a megalitoknak, e hatalmas kövekből összeállított építményeknek más rendeltetését nehéz elképzelni. (Sohasem szabad azonban elfelejtenünk, hogy e néhány mondattal tízezer éveket íveltünk át. És azt sem, hogy az őskor vizsgálatánál nagyrészt feltevésekre vagyunk utalva, hiszen a tárgyi emlékek száma a régészet eredményeit felhasználva is minimális, és az emlékek nem alkotnak a fejlődést egyértelműen ábrázoló láncolatot.)

Vegyünk jobban szemügyre egy ilyen jellegzetes őskori építményt, az angliai Stonehenge közelében található cromlech-et (2. ábra). Közte és a kunyhó között az építészet hatalmas fejlődését mérhetjük le. Mielőtt ilyen, pillérekből és gerendákból álló, oszlopgerendás kőszerkezetet építettek, nagyon valószínű, hogy előbb évezredek keresztül fából készítettek hasonló építményeket, természetesen a fának megfelelő, sokkal karcsúbb arányokkal. Újabb hosszú kísérletezés, összetört és leomlott kőgerendák nehéz tapasztalata alakította ki a kőépítészet itt látható arányait. A szerkezeti tudás kezdetlegessége miatt viszont az anyag és szerkezet közötti ellentmondás megmaradt, mert húzószilárdság nélküli anyagból, kőből hajlított szerkezetet – gerendát – építettek. A tapasztalatok azonban kikényszerítették a kő természetének megfelelő arányokat, amit e több évezredes építmények megmaradása bizonyít legjobban: a támaszközök kicsik, és a gerendák magassága a fesztávhoz képest nagy (mert a kő hajlított szerkezetnek, gerendának tulajdonképpen nem alkalmas anyag). A támaszok zömök arányát nem a viszonylag csekély teher, hanem inkább a feldőlés (amely a talaj süllyedése, földrengés stb. miatt következhet be) elleni biztonság szabta meg. Az arányok tehát az adott anyagnak és szerkezetnek megfelelőek. Egy ilyen, több tonna súlyú elemekből álló építmény feltételezi a fejlett építéstechnológiát is. Ma sem tudjuk, hogyan szállították és emelték helyükre a hatalmas kőtömböket. A technológia tehát szintén a megvalósítás fontos feltétele volt. Így a formában jelentős szót

kapnak a szerkezeti tényezőket. Az anyag megválasztása viszont, amelynek ilyen sok következménye van, nem szerkezeti, hanem eszmei okokra vezethető vissza. Nem valószínű, hogy itt a fahiány miatt használtak követ, sokkal inkább a maradandóság igénye determinálta a választást. Az emberiség őskorának késői szakaszában már lehetőség volt arra, hogy az építészet tülelmedjék – legalábbis egyes kivételes esetekben – eredeti, pusztán gyakorlati célján. Így az említett cromlech is minden valószínűség szerint kultikus építmény, amelynek jelképes jelentősége volt, hiszen nem látjuk nyomát, hogy valaha is zárt teret képezett volna.^{65a)} Az újszerű építési feladat megvalósítása sem nélkülözheti azonban a szerkezetet, és ennek következményei az építészeti formákban is megnyilvánulnak. Sőt éppen a még mindig kezdetleges fokon álló építészet jellemzőjeként közvetlen módon, a szerkezet és forma teljes egységében. Az is nyilvánvaló, hogy ez az egység nem tudatos, még fel sem merült a szerkezettől független forma lehetősége és igénye.

Mindez azonban mintegy másodlagosan, és eleinte bizonyára nem tudatosan, egy új esztétikai tartalmat hordoz, a monumentalitást. A kő súlyossága és a nagy méretekkel párosuló egyszerű szerkezeti formák az emberfeletti hatalmat metaforától mentes, tiszta építészeti eszközökkel jelenítik meg. Ez az első eset, amikor „a szerkezetiség ... szűkebb funkcionális körén tülelmedve, az eszmei szférában is jelentős szót kér.”⁶⁶⁾

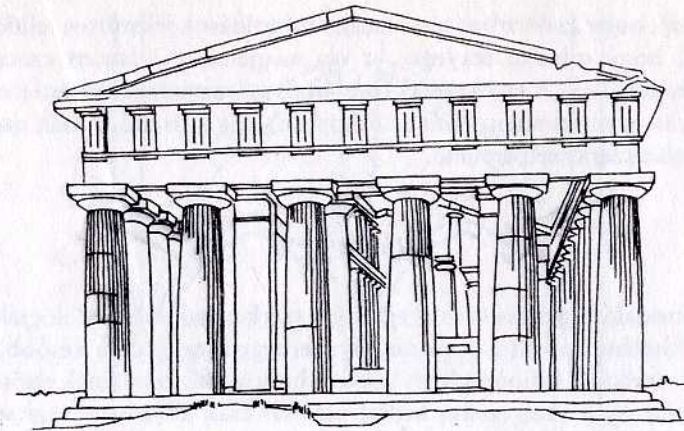
ÓKOR

Míg a történelem előtti idők építészetének vizsgálatánál sok feltevésre vagyunk utalva, az ókorból maradt számtalan emlék elég biztos következtetésekre ad lehetőséget a szerkezet és forma összefüggéseinek kérdésében is.

Az oszlopperendés szerkezeti rendszer lényege, mint láttuk, már az őskorban kialakult, de most további változását és fejlődését figyelhetjük meg. A görög építészetben látjuk, hogy a korábban használt, gyengébb minőségű köveknek megfelelő, zömök arányok mint alakulnak át a nagyobb szilárdságú márvány alkalmazásával (l. a 27. és az 1. ábrát). Mindez a tapasztalatokon alapuló statikai ismeretek fejlődését mutatja. Szerkezet és forma viszonyának új fejezetét nyitotta meg az általánossá vált építészeti imitáció. Az egyiptomi papyrus- és pálmafejezetek, a görög jon oszlop volutái lehet, hogy kezdetleges, növényi szárakból összerótt építmények emlékei, de a görögök elsősorban az oszlopperendés rendszer eredetét, a faszervezetet jelenítik meg a kőben. Az ácsszerkezetek nyomait közismerten nemcsak a kisázsiai sziklasírok, hanem a klasszikus oszloprendek is őrzik (l. az 1. és 27. ábrát). A tényleges szerkezet tehát fő elemeiben (oszlop és gerenda) az építészeti forma alapja marad, de a korábbi megoldások emléke önálló formai elemként is megjelenik. Ez a jelenség végigkíséri a történelmi korokat (egészen az új anyagnak megfelelő karcúságú, de a kőoszlopoknál megszokott részleteket utánzó vasoszlopokig, valamint a kőarchitektúrát imitáló korai vasbeton szerkezetekig), és másodlagosan szintén a szerkezet fontos formaalakító szerepét bizonyítja.

Az erőjáték ösztönös megsejtését is leolvashatjuk a görög oszloprendről, amelynek tagozatai és oszlopainak sudarasodása a kőnél sokkal lágyabb anyag, izomzat alakváltozását szimbolizálják. A mai kor felfogásától ugyan eltérően, de itt is a szerkezet – jelen esetben az erőjáték – formai kifejezését láthatjuk.

Az ókori társadalmakban kialakult már a nagyobb terek lefedésének igénye. A görögök még csak faszervezettel tudták ezt az igényt kielégíteni. Így fedték le a viszony-



27. ábra

A paestumi Poszeidón-templom.

A görög templomokon jól látszik a faszervezet formai emléke. Érdekes az archaikus arányokat szerkezeti szempontból is összehasonlítani a klasszikus kor alkotásaival (l. az 1. ábrát); a formák a jobb anyag alkalmazásával és a szerkezeti tapasztalatok gyarapodásával váltak könnyedebbek

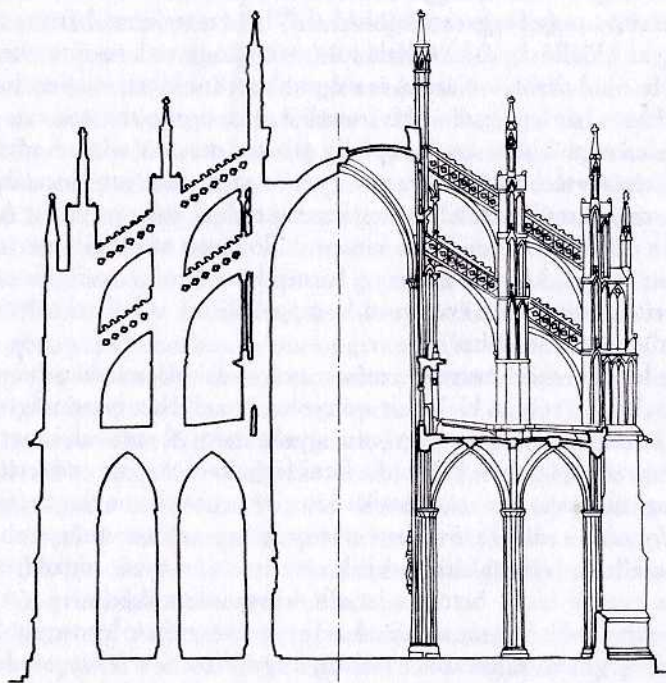
lag kis feszítávolságú, tömeg befogadását nem igénylő templomaikat, de a hellenisztikus korban a nagyobb közösségi tereket is, ez utóbbiakat minden valószínűség szerint már feszítő- vagy függesztőművekkel.^{66a)} A faszervezet hátránya volt, hogy nem felelt meg az időállóság akkor általános (mai felfogásunk szerint túlzott) igényének. A sokkal bonyolultabb erőjátékú és nagyobb technológiai felkészültséget kívánó boltozat azonban – bár legegyszerűbb formáját, a dongaboltozatot már az egyiptomiak és más keleti népek is ismerték – sokáig nem tudott elterjedni. A rómaiakra várt, hogy a boltozatépítés technikáját olyan fokra fejlesszék, amelyet – legalábbis a feszítáv tekintetében – csak a múlt század vasszerkezetei tudtak túlszárnyalni. A boltozatok építése jelentős statikai ismereteket is kívánt, különösen az oldalnyomások felvétele miatt, amit igen jó érzékkel oldottak meg, formai következményeivel is számoltak, és ezt a kényes adottságot az építészeti kompozícióban is felhasználták (bővebben l. a III. fejezetben a 119. oldaltól).

Érdekes kérdés a szerkezettervezési módszerek kialakulása az ókorban. Valószínű, hogy a tapasztalatok nyomán kialakult arányokat, amelyeket biztonságosnak és egyben szépnek láttak, már korán rögzíteni igyekeztek. A statikai ismeretek hiánya – mint a következő fejezetben (62. old.) látni fogjuk – lehetetlenné tette az erőjáték pontosabb megismerését, de a matematika és a geometria viszonylagos fejlettsége már korán, az egyiptomiaknál lehetővé tette a lényegében szerkezeti és ezen belül nagyrészt statikai eredetű, hosszú idő alatt kikísérletezett arányok rögzítését és továbbadását. Sajnos ezekre nincs biztos adatunk Vitruvius működéséig. (Az építészettörténeti művekben sok helyen található arányszerkesztések legnagyobb részét a mai szerzők feltevései.) Nem valószínű azonban, hogy Vitruvius fejlett modulrendszerének ne lettek volna előzményei. A modulban (az oszlop alsó keresztmetszetének sugarában, mint egységben) megadott arányok mindenesetre a klasszikus szépségű, egyben a statikai követelményeket is kielégítő görög és római oszloprendek formáit, arányait rögzítik.

Láttuk tehát, hogy az ókorban a szerkezeti megoldások jelentősen fejlődtek, sőt azt mondhatjuk, hogy minden lényeges, a vas megjelenéséig ismert szerkezetet már a rómaiak is használtak. A szerkezetek formáit természetesen jelenítették meg (ha nem is mindig olyan egyértelműen, mint az őskorban), sőt a díszítőformák nagy részének is kimutatható a szerkezeti eredete.

KÖZÉPKOR

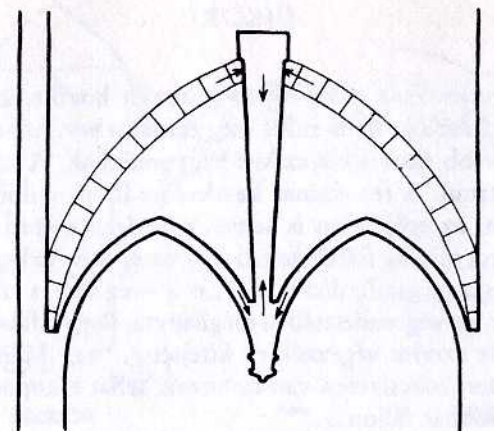
A római birodalom bukása után a fejlettebb szerkezetek és technológiák nagy része tovább élt. Általánossá vált a boltozás, és szerkezeti megoldása később, különösen a gótikában, rendkívül kifinomult. A gótikus boltozatok bordáinak elsősorban technológiai jelentőségük van, ezeket kellett ugyanis csak állványzat segítségével megépíteni, a köztük levő, kisebb boltcikkelyeket szabadon tudták már falazni. Az építés módja azt a hitet keltette, hogy a kész boltozatban is az erőket a bordák veszik fel. Kétségtelen, hogy a boltmezőknél merevebb bordák nagyobb részt kapnak a terhekből, de különösen az akkor szokásos, jó minőségű, viszonylag nagy húzószilárdságú habarcsok az egész boltozatnak nagyjából homogén együttműködését biztosítják, amit a rajtuk keletkezett, bordán és boltmezőn átmenő repedések is bizonyítanak. A bordák így technológiai szerepük mellett inkább az erőjáték metaforikus kifejezői.



28. ábra

A kölni dóm metszete a támpilléreken és a boltmezőn keresztül.

A gótika eszmei és gazdasági okból egyaránt a minimális anyagfelhasználásra törekedett, ezért az anyagot a leghatásosabb módon a pillérek keresztmetszetébe tömörítette



29. ábra

Későgótikus függőboltozat.

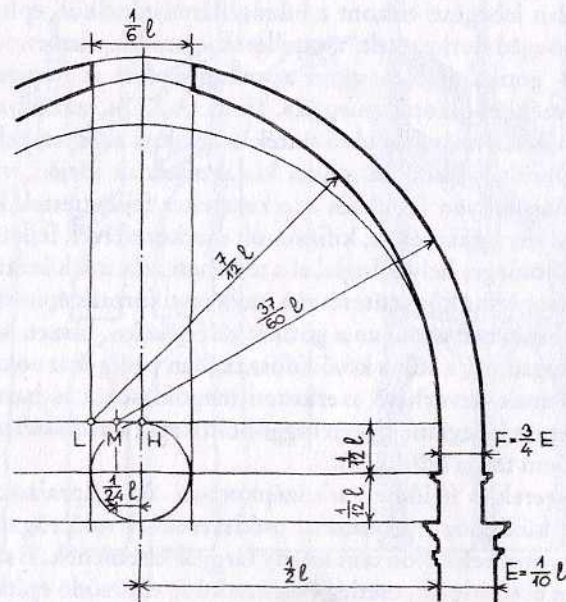
Az ellentmondásos, formalisztikus szerkezet példája

A gótikában ugyan nem épültek a római boltozatok fesztávolságát megközelítő nagy terek, sőt, a katedrálisok magassága is alig éri el a Pantheonét, mégis jelentős szerkezeti újítást jelent, hogy a felhasznált anyag mennyisége csak törtresze a római építményekének (28., 70. ábra). Ennek csak részben vannak gazdasági természetű okai (a rabszolgák ezrei nem álltak rendelkezésre), inkább eszmei igény volt a templomok szinte anyagtalán belső tere, ahol a pillérek, bordakötegek már csak erővonalaknak hatnak. (Az e korban épített polgári épületek nem ilyen könnyedek.) A gótika az első stílus, amely tiszta vázszerkezetet fejlesztett ki, és ezzel egészen új térhatást ért el. A belső tér anyagtalán lebegése viszont a húzószilárdság nélküli építőanyag következtében csak külső segédszerkezetek, támpillérek, támívek, fiatornyok sokaságával volt megoldható. A gótika építőmesterei azonban ezeket is imponáló szerkezeti tudással és statikai érzéssel oldották meg (28. ábra). A XIX. században, a neogótika idején a statikai ismeretek már lehetővé tették a gótikus szerkezetek erőjátékának vizsgálatát. Ekkor derült ki, hogy a gótika kialakulásának idején, viszonylag igen rövid kísérletezés után milyen tökéletes szerkezeteket fejlesztettek ki a középkori mesterek.⁶⁷⁾ A gótika anyagtakarékos, kifinomult szerkezeteivel, fejlett építéstechnológiájával valóban különleges helyet foglal el a történeti stílusok között, és méltán lett a múlt században a neogótika közvetítésével a szerkezeti formák építészeti újraértékelésének ihletője. Nem szabad azonban a gótikát túlértékelni, hiszen kőcsipkái szinte az anyagszerűséget tagadják, a stílus késői időszakában pedig már sokszor erőltetett, mai szóval formalistának nevezhető szerkezeti megoldásokat is használt. Jó példa erre, hogy a kőszerkezet jellegétől idegen függőboltozatot a padlástérbe rejtett íveken nyugvó, húzott kőelem tartja (29. ábra).

A tervezési módszerek is fejlődtek a középkorban. Az alaprajzok, metszetek és szerkezeti részletek különböző geometriai módszerekkel való rögzítésére többféle eljárást alkalmaztak, amelyek külön tanulmány tárgyai lehetnének. E szerkesztéseket, különösen a gyakran évtizedekig, esetleg évszázadokig elhúzódó építkezések, a mesterek kényszerű változása miatt általában nem alkalmazták következetesen (éppen ez különbözteti meg többek közt az eredeti épületeket a neogótika „tökéletes” alkotásaitól).

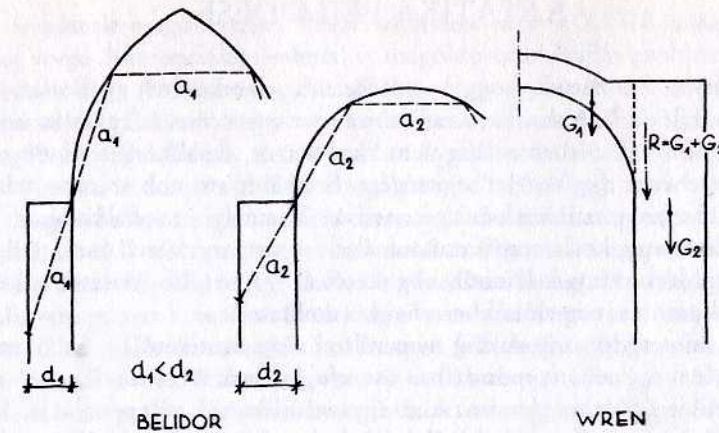
A gótika után a reneszánsz stílus olyan változást hozott, amelyet csak az tesz érthetővé, hogy Itáliában a gótikus stílus még északon sem honosodott meg igazán, hanem lappangva tovább éltek a klasszikus hagyományok. A középkor azonban itt sem múlt el nyomtalanul. A reneszánsz kezdetén a firenzei dóm kupoláját Brunelleschi még tudatosan, az erőjátékot is sejtve, csúcsívesen építi „ugyanis az effajta csúcsíves boltszerkezet mindig fölfelé fejt ki nyomást, és ha rá kerül a lanterna, akkor az egyik a másikat fogja megszilárdítani...” „már öreg volt, s ezért nem érthette meg a lanterna befejezését, de végrendeletében meghagyta, hogy a falazást az ő modellje és írásban rögzített terve szerint végezzék el; kifejtette, hogy különben az egész építmény összeomlik, mert csúcsívesen van boltozva, tehát a kupolát súllyal kell megterhelni, hogy szilárdabban álljon...”⁶⁸⁾

Ennél sokkal jelentősebb a reneszánsz építészetben a római termákból megismert, összetett boltozatos terek továbbfejlesztése, az oldalnyomás felvételének természetes, szinte magától értetődő megoldása ebben a térkompozícióban. Ez – a közfelfogással ellentétben – a gótika csak szerkezeti célú támpillér- és támvív-rendszerével legalábbis egyenértékű, de inkább fejlettebb módszer (71., 72. ábra) (erről a kérdésről bővebben szólunk a III. fejezet 125. oldalán). Különösen a sokszor nem is önálló stílusnak, hanem a reneszánsz hanyatlásának tartott barokkot szokás a szerkezet-szerűtlenség vádjával illetni. Az újabb kutatások rámutatnak e stílus téves szemléletének gyökereire.⁶⁹⁾ Szerkezeti szempontból elegendő a kor egyik típusalkotó épületét, a római II. Gesut megvizsgálni, hogy e felfogás tarthatatlanságáról meggyőződjünk (75. ábra, részletesebb ismertetését l. a III. fejezet 126. oldalán). Figyelemre méltóak a késői barokk zseniális szerkezeti megoldásai is. Sőt a reneszánsz elfogultságával szemben Guarino Guarini a XVII. század második felében már elismeréssel



30. ábra

Kupola szerkesztése Carlo Fontana szerint.
A szerkesztések rögzítik a formai és szerkezeti tapasztalatokat



31. ábra

Boltozatok támfalának szerkesztése (XVIII. sz.).

A statikai ismeretek hiánya miatt a tapasztalatokat igyekeztek általánosan használható szabályokba foglalni

szól a gótikus szerkezetekről. Felfogásának nyomai művein is felfedezhetők, ahol a reneszánsz térképzést a gótikából megismert bordás szerkezetekkel valósítja meg. Az újkorban, ha alapvetően új szerkezetek és technológiák nem is alakultak ki, a meglévők az új szerkezeti tapasztalatokkal párhuzamosan, jelentősen fejlődtek.

Sokat haladtak a tervezési módszerek is. Eltűnt a középkori, misztikus köntös (a tervezési eljárások misztifikálása részben az elméleti tudás kezdetlegességéből, másrészt az építőpályók érdekvédelméből fakadt). Sok építészeti munka jelent meg, amelyek a szerkezetek tervezését is tárgyalták, elsősorban szerkesztések formájában. Ezek közös jellemzője, hogy az előző korokéhoz hasonlóan, nem tesznek különbséget az építészeti és a szerkezeti arányok között. Jellemző típusa ennek C. Fontana kupolaszerkesztése, amely a római San Pietro kupolájának – más előképektől is befolyásolt – tapasztalatait összegezi (30. ábra). Fontos szerkezeti szerepe miatt érthetően sok szabályt állítottak fel a boltozatok támfalainak szerkesztésére. Ch. Wren, a londoni Szt. Pál székesegyház tervezője egyszerű statikai vizsgálatra próbálja visszavezetni a támfal méretezését: szerinte a boltív és a támfal együttes súlypontjának a támfalba kell esnie, tehát ő az oldalnyomás lényegét még nem ismerte fel. B. F. Bélidor egyszerű szerkesztése viszont az erőjáték kvalitatív ismeretére mutat, mert minél laposabb a boltozat, annál erősebb támfal adódik (31. ábra). Bélidor működése egyébként átvezet a szerkezettervezés új, tudatos korszakába. A barokk kor alkonyán, a XVIII. század közepén, a statika tudományának fejlődése már lehetővé tette eredményeinek gyakorlati felhasználását. És ha a hagyományok késleltették is a tudományos eredményeket felhasználó szerkezettervezés térhódítását, a kezdeti lépéseket ebben az időben tették meg. Ennek jobb megértése érdekében szakítjuk meg most a szerkezet és forma kapcsolatának történeti vizsgálatát, és kiterészképpen röviden összefoglaljuk a statika kialakulásának történetét.

Az előző fejezetben láttuk, hogy az építészet és a szerkezetek gyakorlati tapasztalatok alapján fejlődtek. A statika, amely ma a szerkezettervezés egyik fontos segítőeszköze, ebben a fejlődésben sokáig nem kapott szót, de akkori kezdetlegességénél fogva nem is lehetett a gyakorlat segítségére. Sokkal fontosabb szerepe volt a tudományok közül a matematikának és a geometriának, amely a gondolkodás fejlesztésén túl lehetővé tette a gyakorlati tapasztalatok által leszűrt, szerkezeti és esztétikai szempontból elfogadott arányok leírását, rögzítését és így tovább adását is a következő nemzedéknek, mint azt az előzőkben röviden említettük.

A statika, mint tudomány sokáig nem vált el a mechanikától.⁷⁰⁾ Az ókor statikai ismereteinek lényege néhány mondatban összefoglalható. Arisztotelész leírta az emelők elvét, Arkhimédész meghatározta az egyszerű idomok súlypontját is. Vitruvius utolsó, tizedik könyve a mechanikáról szól, ahol az építéstechnológiában felhasznált egyszerű gépeket (emelő, csiga stb.) is tárgyalja. A középkorban is foglalkoztak mechanikával, de jelentősebb haladást csak Jordanus de Nemore (csupán műve ismert, csak sejtendő, hogy a XIII. században élt) ért el, aki az emelők vizsgálata közben a virtuális elmozdulások elvét, a lejtőn mozgó testtel kapcsolatban pedig az erővektormennyiség jellegét sejtette meg. Természetes, hogy ezek a szerény eredmények nem hatottak az építés gyakorlatára.

A reneszánsz korában is eleinte még pusztán spekulációval akarták a természettudományos problémákat megoldani. Általában azt hitték pl., hogy a boltív nyomásvonala mindig követi az ív vonalát. L. B. Alberti szerint a félgömb kupola a legerősebb, mert „ha a mű hajlamos lenne leomlani, hol kezdődne, mivel minden kő kapcsolata az egy középpont felé irányul egyenlő erővel és nyomással.”⁷¹⁾

A statika igazi fejlődése, a többi természettudományhoz hasonlóan, mégis ebben a korban indult meg. Kezdetben két alapvető kérdés merült fel: az erők összetétele és a hajlított gerenda belső erőinek meghatározása. Az első a statika, a második a szilárdságtan alapproblémája.

Az első kérdéssel Leonardo da Vinci is foglalkozott, jegyzetei szerint a függőleges erőt két ferde erővel (kötelekkel, huzalokkal) egyensúlyozta.⁷²⁾ Az erővektormennyiség jellegét és ezen alapuló összegezését Simon Stevin németalföldi matematikus ismerte fel először világosan, 1586-ban. Az erőket nagyságukkal arányos vonaldarabokkal ábrázolta, így egyben a grafostatika első művelője is.

A szilárdságtan megalapítójának Galileit tekinthetjük, ő ad először magyarázatot a befogott konzoltartóra 1638-ban megjelent művében.⁷³⁾ Elgondolása azonban helytelen, a kérdést statikai alapon megközelítve, a külső és a belső (egyenletesen megoszlónak feltételezett) erők nyomatéki egyensúlyát felírva, a keresztmetszeti tényezőre helytelen eredményt, $bh^2/2$ -t kap. Utána is sokan foglalkoztak ezzel a kérdéssel (pl. Mariotte, Jacob Bernouilli, Leibnitz, Varignon), a helyes megoldáshoz mégis csak 1713-ban jutott el Parent, de az ő eredménye sem vált közismertté.

Közben természetesen más kérdések is foglalkoztatták a tudósokat. Így Varignon általánosítja a statikai nyomatékok összegezését, a virtuális munka fogalmát. A szilárdságtan további fejlődése szempontjából alapvető Hooke felfedezése, hogy (a rugalmas állapotú anyagban) a megnyúlás arányos az erővel. Newtonnak köszönheti a statika az erő és a tömeg fogalmának általánosítását és a hatás-ellenhatás törvényének felismerését. Legalább ennyire jelentős a későbbi fejlődést tekintve, hogy ő és Leibnitz vezette be a magasabb matematikát (a differenciál- és integrálszámítást)

a fizikai feladatok megoldásába. Euler határozta meg a XVIII. század közepén a rugalmas vonal differenciálegyenletét, és megoldotta a kihajlás problémáját.

A boltozatok az építészet legjelentősebb, legnagyobb feszítávolságot áthidaló szerkezetei voltak. Érthető, hogy viszonylag korán felkeltették a mechanikával foglalkozó tudósok érdeklődését is. De la Hire foglalkozott először sikerrel a legegyszerűbb boltozat, a donga elméleti vizsgálatával.⁷⁴⁾ Elméletét arra a megfigyelésre alapozta, hogy a boltozatok a támfalak elmozdulása esetén a negyedpontban szoktak megrepedni. Ő és D. Gregory skót matematikus állította fel egymástól függetlenül a tételt, hogy az elméletileg helyes boltozat a fordított lánccörbe alakját követi.⁷⁵⁾

Az eddig ismert kutatások kizárólag a természet megismerését tűzték ki célul, gyakorlati felhasználásukra maguk a törvények felfedezői sem gondoltak. De nagy érdemük, hogy a XVIII. század közepére a statika alapjai le voltak fektetve (erők és nyomatékok összegezése, virtuális elmozdulások, munkatételek stb.). Közben az építőanyagok megismerésében is jelentős volt a haladás. Vizsgálták pl. az anyagok törőszilárdságát és erről táblázatokat is adtak ki. Szerkezetekkel is végeztek kísérleteket, így Danisy kimutatta, hogy a boltív törése néhány, legkülönösebb igénybevételű keresztmetszeten következik be. Ennek a jelenségnek és az alakváltozási munkának ismerete már lehetővé teszi a boltív statikai számítását.⁷⁶⁾

Ilyen előzmények után vizsgálta meg XIV. Benedek pápa megbízására három matematikus, Le Seur, Jacquier és Boscovich 1742–1743-ban a római San Pietro kupoláját, amelyen aggasztó repedések mutatkoztak.⁷⁷⁾ Jellemző a korra, hogy a matematikusok a szakvélemény elején bocsánatot kérnek az építészeketől, hogy ilyen módon közelítik meg a problémát, de az épület egyedülálló jellege ezt szükségessé teszi. Ezután leírják az épületet és a keletkezett károkat, majd megállapítják, hogy a károk oka nem lehet az alapok süllyedése, sem a pillérek fülkékkel, lépcsőkkel való gyöngítése. A repedéseket a vonógyűrű gyengesége okozza. Ennek igazolására számítást végeznek. A boltívekre már valamivel korábban kidolgozott eljárást alkalmazzák a kupolára, a repedéseket csuklónak, a közöttük levő boltszakaszokat merev testnek tekintve. E megengedhető közelítések mellett azonban elvi hiba is csúszott a számításba: az anyagok rugalmas viselkedése ekkor még nem volt tisztázva, így a vonóvasban működő erőt az alakváltozástól független állandónak vették, Musschenbroek leideni fizikus 1729-ben megjelent szilárdsági táblázata alapján. A számítás eredményeként 3 237 356 római font (kb. 11 000 kN) erő hiányát állapítják meg, amelynek felvételére, 2-es biztonsági tényezőt alkalmazva, újabb vonógyűrűk beépítését javasolták.

A San Pietro kupolájáról készített szakvélemény még sokáig kuriózum maradt, a gyakorlati szakemberek sokat is támadták. Történelmi jelentősége mégis igen nagy, mert ez volt az első eset, hogy egy épületet tudományos alapon álló, tudatos szerkezettervezési módszerrel alakítottak. Ennek a szakvéleménynek köszönhetjük, hogy az építészet történetének egyik legjelentősebb alkotása eredeti formában maradt ránk. Vanvitelli ugyanis 1743–1744-ben elhelyezte a vonógyűrűket, amelyek a további károkat, repedéseket megakadályozták, és nem került sor az olyan tervbe vett megerősítésekre, mint a boltozatot tartó pillérek fülkéinek befalazása, a laterna lebontása, négy nagy támpillér építése stb.

Az építészet ennek ellenére még sokáig nem vette igénybe a statika segítségét. Ebben az időben a régi tapasztalatok valóban elegendőek is voltak a lényegében változatlan tégigényeket felvető feladatok megoldásához. A XVIII. században azonban a haditechnika fejlődése az erődítményekkel szemben fokozott igényeket támasz-

tott, amelyek megkövetelték a korszerű szerkezettervezési módszereket. A szerkezettervezés terén így elsősorban a francia hadmérnökök szereztek elévülhetetlen érdemeket. Eredményeiket a polgári célú mérnöki létesítményeknél is szinte egyidejűleg hasznosították. B. F. Bélidor már 1729-ben kiadja „Science des Ingénieurs” című művét, amely a mai mérnöki kézikönyvek elődje. Az 1747-ben megnyitott „École des ponts et chaussées”, a francia katonai műszaki akadémia tanárai, elsősorban Ch. Au. Coulomb és L. Navier teremtették meg a gyakorlati statikát. Coulomb 1773-ban megjelent, alapvető művében⁷⁸⁾ közkinccsé teszi a hajlított gerenda helyes számítását (amelyet Parent már hatvan évvel korábban megoldott), sőt foglalkozik a nyírás kérdésével is, bár megoldani még nem tudja. A boltozatokat már a súrlódás és a kohézió figyelembevételével vizsgálja, és megállapítja, hogy az eredő nem lehet a keresztmetszet szélén, a támaszvonalnak (ez is tőle eredő fogalom) mindig a boltozat belsejében kell maradnia. Megalkotja a földnyomás róla elnevezett, máig használt elméletét.

Navier előadásában rendszerezte az eddig szétszórtan található statikai ismereteket, és sok gyakorlati feladat helyes megoldását adta meg (pl. befogott és többtámaszú tartók, kétcsuklós ívtartó, egyszerűbb lemezek).

A XIX. század fordulójára így már lehetővé vált a statika felhasználása az épületek tervezésében is. Sokáig megmaradtak azonban még a korábbi arányszerkesztések és „ököl szabályok”⁷⁹⁾, amelyek sok esetben valóban hasznosak, még a mai méretezési előírásokban is megtalálhatók. A tudományos módszerek nehéz térhódítására jellemző, hogy még 1805-ben is Ch. F. Viel, a párizsi kórházak építésze „De l'impuissance des mathématiques pour assurer la solidité des bâtiments” (a matematika tehetetlensége az épületek állékonyosságának biztosításában) címmel vitaíratot adott ki.

A retrográd vélemények mégsem tudták megakadályozni a tudatos szerkezettervezés elterjedését. Ma pedig már nyilvánvaló, hogy az építészet megújulását az új építőanyagok mellett a szerkezetek elméleti ismerete tette lehetővé. Elvileg ugyan az acél- és a vasbeton szerkezetek is kialakulhattak volna gyakorlati tapasztalatok, kísérletezések útján, de ehhez igen hosszú időre lett volna szükség, amire a XIX. században a fejlődés ütemének általános, az élet minden területére kiterjedő gyorsulása nem adott lehetőséget. Így az új anyagok mintegy kikényszerítették az elmélet fejlesztését is.

A XIX. század első felében inkább az elméleti szilárdságtanban születtek számottevő, új eredmények, amelyek jelentősége igazán csak századunkban mutatkozott meg. Au. L. Cauchy meghatározta a rugalmasságtan alapegyenleteit, S. D. Poisson és Navier a molekuláris erők vizsgálata útján eljutott a harántkontrakció magyarázatához és több kutató megalkotja feszültségelméletét.

A század második felében ismét a gyakorlati alkalmazások kerülnek előtérbe, különösen a hídépítéssel kapcsolatban. K. Culmann, L. Cremona, M. Lévy, Willot, W. Ritter, O. Ch. Mohr fejlesztik ki a közelmúltig általánosan használt grafostatikát, amellyel a rácsostartókon túl szinte minden akkor szokásos szerkezetet meg lehetett oldani.

Különösen nagy jelentőségűek a vasbeton erőtan működésének tisztázása érdekében végzett kutatások, amelyek lehetővé tették, hogy századunk első felében ez az új szerkezeti anyag forradalmasítsa az építészetet.⁸⁰⁾ W. B. Wilkinson már 1854-ben szabadalmaztatta tűzbiztos födémét, amelybe a húzott oldalon acélhuzalokat helyezett. Lambot ugyanebben az évben készítette első vasbeton csónakját. Szaba-

dalmi leírásában vasbetétes betongerendák és négy gömbvassal erősített pillérek is szerepelnek. F. Coignet 1861-ben adja ki az első vasbetonról szóló könyvet.^{80a)} A vasbeton feltalálójának tekintett J. Monier ezzel szemben csak 1867-ben nyújtotta be első szabadalmát – vasalt beton virágédények készítésére. Későbbi szabadalmi is arra mutatnak, hogy a vasbeton szerkezet lényegét nem értette meg.

A vasbeton erőjátékát először az amerikai Th. Hyatt tisztázta 1877-ben megjelent könyvében. Különböző vasalású gerendákkal végzett kísérletek alapján megállapította a vas és a beton közötti tapadást. Vasbetéteket csak a húzott övbe helyezett, ezeket a támaszoknál felgömböztette. Kengyeleket is alkalmazott. Eredményei Európában nem váltak ismertekké, itt tőle függetlenül, valamivel később, a francia F. Hennebique és a német M. Koenen dolgozta ki a vasbetonépítés elméleti alapjait.

Az elméleti kutatások közül erre az időszakra esik a munkatételek általánosítása. Segítségükkel J. Maxwell, Castigliano és H. Müller-Breslau az egész statikát a virtuális elmozdulásra és az alakváltozásokra vezeti vissza.

A századforduló után a statikai kutatás annyira szerteágazó lett, hogy meg sem kísérelhetjük összefoglalását, de témánk szemszögéből ez már nem is fontos. Az eddigiekből is eléggé kitűnik, hogy az elméleti kutatások előrehaladása nemcsak az ismert szerkezetek, szerkezet típusok erőjátékának megértését és így az új épületek gazdaságosabb megvalósítását tette lehetővé, hanem új szerkezet típusok pusztán elméleti úton való felfedezését is. Ilyesféle volt a helyzet például a héjszerkezetekkel, amelyek számítása – bár igaz, hogy néhány gyakorlati megvalósítás kapcsán – már a húszas években kifejlődött, de igazi felhasználásukra csak az ötvenes és hatvanas években került sor. De megmaradt – fejlettebb formában – az elmélet előtt járó megvalósítás gyakorlata is. Erre legjobb példa a függőtartók gyors elterjedése az ötvenes évektől. Ez az új szerkezet típus az építészeti formák terén is lényeges újdonságot jelentett. Elmélete, méretezésének sok kérdése azonban máig sem tekinthető lezártnak. A kísérleti technika fejlődése nyomán az ilyen módszereknek is sokkal nagyobbak ma a lehetőségei, mint korábban. A modellkészítés ugyan régen is ismert volt, de ezek terhelése, a modelltörvények ismerete és megfelelő mérőberendezések nélkül nem adott megfelelő tájékoztatást a szerkezet erőjátékáról, inkább csak szemléltetésre volt alkalmas. Így az új szerkezet kikísérletezésére csak a sok veszéllyel járó, építés közben végzett kísérletek voltak megfelelőek. Ma viszont egy új szerkezetet biztonságosan meg lehet valósítani az elméleti számítási eljárás ismerete nélkül is, pusztán jól felépített kísérletek segítségével. E két út – az elméleti és a fejlett kísérleti módszer – külön, vagy együttes alkalmazása régebben elképzelhetetlen lehetőséget ad az újabb építési feladatok által megkívánt új szerkezetek alkotására, és ezáltal új építészeti formák megvalósítására.

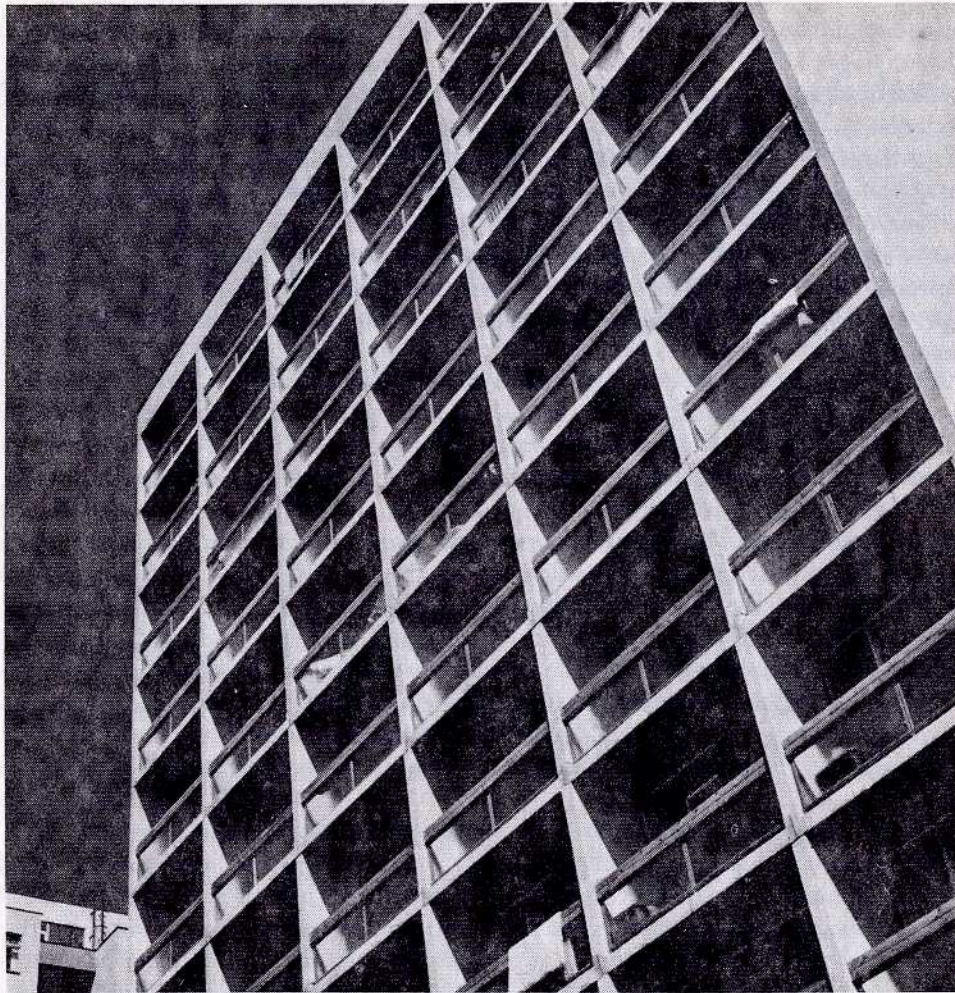
Az elméleti statika első gyakorlati felhasználása, mint láttuk, a római San Pietro kupolájának 1742–1743-ban végzett vizsgálatához fűződik. Mégis évtizedeknek kellett még eltelniük, míg az erőjáték kvantitatív figyelembevétele elterjedt a tervezésben. Először a XIX. század első felében, a hídépítés fellendülése kapcsán vált az új módszer általánossá. Különösen a vasútépítések miatt volt szükség sok híd építésére. Itt egyrészt a nagy fesztávolságok tették szükségessé a körültekintő tervezést, másrészt az alkotók mérnökök voltak, akiket nem kötöttek az építészet több évszázados hagyományai és beidegződései. A vashidak tervezésénél szinte már kezdettől fogva kialakult a számítások és a tudományos alapon megtervezett kísérletek párhuzamos módszere.⁸¹⁾ E hidak több olyan új szerkezetet honosítottak meg, amelyek később az építészetben is jelentős szerepet kaptak. A többtámaszú tartók, a rácsos szerkezetek, láncok, kötelek első alkalmazása mind a hídépítéshez fűződik.

A magasépítésben is megjelennek az új szerkezetek és anyagok, de nehezen szabadulnak meg a hagyományos formáktól. A méltán híres párizsi Nemzeti Könyvtár olvasótermének vasszerkezete is még a hagyományos kupolák formáját követi, sőt az új anyagnak megfelelő, karcsú oszlopain is a klasszikus görög oszlopok elkorcsosult tagozatai láthatók, az épület külseje pedig semmit sem árul el az alapjában véve modern szerkezetből. Ezeket és a hasonló épületeket is még a régi, empirikus módszerekkel tervezték. A statika felhasználását az építészetben először a neogótika mesterei propagálták. Többek közt így igyekeztek tudományos módszerrel igazolni a gótika felsőbbrendűségét a klasszikus stílusokkal szemben, megmutatva, hogy a gótikus formák az erőjátékból adódnak. A kapott eredményeket az új templomok építésénél fel is használták.

A múlt század második felében már általános a vasszerkezetek, sőt a beton és a vasbeton felhasználása, amelyek tervezése során, a gazdaságosság és a biztonság érdekében, általában már statikai méretezést is végeztek. Az új szerkezetek azonban a historizáló homlokzatokon nem jelentek meg, sőt a nagy belső terekben sem, ahol megmutatásuk még indokoltabb. Érthető, hogy az „őszinte szerkezet” kérdése éppen e kor építészetének bírálata kapcsán vetődött fel először igazán polémikus éllel.

Közben a mérnöki szerkezetek a magasépítésben is terjedtek. Az építési feladatok, amelyek a társadalmi fejlődés és a gazdasági lehetőségek javulása következtében egyre nagyobb igényrel jelentkeztek, szükségessé tették az új szerkezeti megoldások átvételét. Sorra épültek a nagy fesztávolságú pályaudvari csarnokok, vásárcsarnokok, kiállítási épületek. Különös lökést adtak a fejlődésnek az ekkor meghonosodó világkiállítások. Itt fontos szempont volt a technikai eredmények látványos bemutatása. Az első világkiállításra (1851) épült a londoni Kristálypalota (21. ábra). Az 1889-es Párizsi Világkiállítás szenzációja volt a 300 m magas Eiffel-torony és a 115 m fesztávolságú Gépcsarnok (63. ábra). Ezek a hagyományos szerkezetekkel meg sem valószínűsíthetők, és ezeknél a szerkezet elrejtése sem képzelhető el. Az ilyen és hasonló alkotások már mind tudatos szerkezettervezés eredményei. A tervezők a formai, esztétikai igényeket is szem előtt tartották, így az új szerkezet ilyen téren is újat hozott. Különösen a Gépcsarnok jó példa rá, hogy az új szerkezet új esztétikai értékek forrása is – a konzervatív építészek kritikája ellenére. Elsősorban a hatalmas egységes tér méltó figyelemre, amely csak ilyen könnyű szerkezettel valószínűsíthető meg. A szerkezet könnyedsége közvetlenül is érzékelhető. A háromcsuklós ívtartók rácsosítása, de különösen az alsó csuklók – ahol a szerkezet minden eddigi megszokásnak ellent-

mondva, de mégis logikusan elvékonyodik – szinte lebegővé teszik ezt a hatalmas, viszonylagos könnyűsége ellenére is igen nagy súlyú szerkezetet. A merőben új esztétikai hatás így az új szerkezeti megoldás egyenes következménye. Valószínűleg nem véletlen, hogy talán ez az első reprezentatív, nagy fesztávolságú belső tér, ahol az ornamentika teljesen háttérbe szorult. A huszadik században egyre természetesebbé válik a szerkezet és forma egysége, a szerkezeti formák esztétikai értékének elismerése, sőt keresése. Példaképpen a héjszerkezetekre hivatkozhatunk, amelyeknél a szerkezet és a forma szükségképpen azonosul, és így számtalan, az építészet korábbi kiváló alkotásaival művészi szempontból is egyenrangú épület született (pl. 86., 89. ábra). Ezek elemzése azonban már nem tartozik a történeti áttekintés keretébe.



32. ábra

Gyöngyös, Mérges utcai lakóház (ép.: Ligeti Gizella, szerk. terv.: Spányi Balázs).
A kedvező megjelenésű homlokzat a szerkezet, a térszalus építéstechnológia formai jegyeinek felhasználásából adódott

III. A SZERKEZET HATÁSA A FORMÁRA

Az eddigi elméleti és történeti vizsgálatok után nézzük meg közelebbről szerkezet és forma kapcsolatát az építészet gyakorlatában. E nagyon szerteágazó kérdést két irányból közelítjük meg: megvizsgáljuk a szerkezet hatását a formára, majd – a következő fejezetben – a forma hatását a szerkezetre. Mindkét irányú vizsgálatot a szerkezeti tényezők, az építőanyag, az erőjáték és a technológia szempontjából végezzük el. Végül ezeken belül megkülönböztetjük az objektív és a szubjektív elemeket.

Következtetéseinket igyekezni fogunk a történeti és a mai építészetből vett példákön bemutatni. A részletes vizsgálatot azonban nagyon megnehezíti a megfelelő adatok hiánya. A műemlék-felmérések általában csak a külső formákra vonatkoznak, a szerkezeteket legtöbb esetben nem tisztázzák, a felhasznált anyagok minőségét pedig úgyszólván sohasem. Nem sokkal jobb a helyzet a modern épületekkel sem. A publikációkban ritkán találkozunk olyan tervekkel, amelyek alapján a szerkezeti részletek egyértelműen tisztázhatók. Az említett nehézségek miatt sok esetben csak általános, elvi megállapításokat tehetünk.

AZ ÉPÍTŐANYAG HATÁSA A FORMÁRA

Az elméleti esztétikai fejezetben láttuk, hogy az építőanyag többféle módon hat az építészet formáira, de ezek közül az egyik legjelentősebb az anyagszerűség, amely az erőjáték anyagban rejlő lehetőségeinek ésszerű kibontása. A következőkben azt vizsgáljuk, hogy a legfontosabb építőanyagok milyen szerkezeti és formai lehetőségeket rejtenek magukban.

A SZERKEZETI ANYAGOK ÖSSZEHASONLÍTÁSA

Az anyagok számtalan jellemzője közül ki lehet emelni néhányat, amely a szerkezetre és ezáltal egyben az építészeti formára is lényeges hatással van. Említettük már korábban is, hogy az építészet szempontjából talán legfontosabb az építőanyag húzószilárdságának megléte vagy hiánya.⁸²⁾ A húzószilárdság nélküli anyagok felhasz-

nálási köre sokkal szűkebb, nemcsak húzásra nem vehetők igénybe, de gyakorlatilag hajlításra sem. Sőt még nyomóerő felvételére is kevésbé alkalmasak, mert a karcsú nyomott rúd kihajlási veszélye is nagyobb, ha nincs húzószilárdsága, de a zömök nyomott rúd tönkremenetele is végső soron a harántirányú húzófeszültségek miatt következik be.⁸³⁾ A múltban, a XIX. század előtt, túlnyomó többségében csak húzószilárdság nélküli anyagok álltak rendelkezésre, és ez a tény sokkal jobban meghatározta az építészetet, mint például a hiányos szerkezeti ismeretek. Teljesen más formákat igényel a húzószilárdság nélküli anyag, mint a húzószilárdsággal rendelkező (70., 98. ábra).

Az építőanyagok fontossági sorrendben következő jellemzője a szilárdság, amely szintén nagy mértékben befolyásolja a szerkezet és az egész épület arányait, formáit. Ezt láttuk már a görög oszloprend arányainak a kő minőségével párhuzamos változásán (1. és 27. ábra), de még kifejezöbben a mai acélvázaz épületeken (22. ábra). Ugyanakkor nyilvánvaló, hogy nagy jelentősége van az anyag térfogatsúlyának is, különösen a nagy fesztávolságú terek lefedésénél, vagy nagy magasságú épületeknél, ahol a teher nagy részét a szerkezet önsúlya adja.

A szerkezeti anyagok egyik legjobb jellemzője ezért a szilárdság és a térfogatsúly aránya. Nem egyértelmű azonban a szilárdság fogalma. Jelentheti a (statisztikai átlag szerinti) tönkremenetelt okozó feszültséget, vagy a szerkezetek méretezési előírásai szerinti, már a biztonságot is részben vagy egészben magába foglaló határfeszültséget vagy megengedett feszültséget. Nyomott elemeknél ezek bármelyike is csak akkor egyértelmű, ha kizárjuk a kihajlás lehetőségét. A következőkben néhány fontosabb szerkezeti anyag (ill. építőanyagnak tekinthető szerkezet, mint a téglafalazat és a vasbeton) hazai szabványok szerinti határfeszültségének és térfogatsúlyának arányát, a σ/γ hányadost tüntetjük fel:

kő (márvány)	357 m (nyomott szerkezet)
téglafalazat (T200, H50)	122 m (nyomott szerkezet)
beton (B 200)	318 m (nyomott szerkezet)
vasbeton (B 400, max. vasalás)	1 184 m (nyomott szerkezet) ⁸⁴⁾
fa (I. oszt. puhafa)	1 917 m
acél (A 38)	2 548 m
acél (180.30)	17 197 m
alumínium (AlCu 4M22-43.28)	7 889 m
műanyag	1 500 m ⁸⁵⁾

Az előbbi táblázat, bár kizárólag műszaki adatokat tartalmaz, több tanulságot rejt számunkra is. Először is feltűnő, hogy a σ/γ arány dimenziója hosszúság: az illető anyagból készült állandó keresztmetszetű, központosan húzott (vagy kihajlás veszélye nélkül nyomott), csak saját súlyával terhelt rúd maximális hosszát adja meg. Az ilyen képzelt szerkezetnek természetesen aligha lehet gyakorlati jelentősége, de segítségével a szerkezeti anyagokat rangsorba lehet állítani (bár nem teljesen egyértelműen, mivel más fontos szempontok is vannak). A hányados mintegy az anyagok tartószervezeti kapacitásának a mérőszáma. Minél nagyobb ez a hosszúság, annál könnyebb és nagyobb méretű szerkezet építésére alkalmas az anyag. Hogy mennyire fontos ez a jellemző, a következő fejezetben, az erőjáték hatásának vizsgálatánál fogjuk látni, ahol majd kiderül, hogy nemcsak a központosan igénybe vett rúd, hanem mindenféle szerkezet egyik alapparamétere: bármely szerkezet lehetőségeiben az anyag szerepét ez a hányados mutatja meg.

A táblázatból az is kiolvasható, hogy a hagyományos építőanyagok (tégla, kő, beton,⁸⁶⁾ fa) közül egyedül a fa mérhető az új anyagokhoz (vasbeton, acél⁸⁷⁾, alumínium, műanyag). Így számszerűen is bizonyítható, hogy a történeti építészet lehetőségei a szerkezeti tudástól függetlenül milyen korlátozottak voltak.

Az építőanyagok további fontos jellemzője az alakváltozás mértéke. Ha a határfeszültség túlzott alakváltozást okoz, hiába a nagy σ/γ arány, a szerkezet gyakorlati célra nem alkalmas, mert nő a stabilitásvesztés veszélye és a nagy alakváltozások legtöbbször esztétikailag sem engedhetők meg (pl. hátrányosan hatnak a korábban említett biztonságélményre). Érdemes ezért az anyagok alakváltozását is megvizsgálni. A következő táblázat azt adja meg, hogy ha az anyagban a határfeszültség működik, hány ezrelék a rúd megnyúlása, ill. összenyomódása tartós terhelés hatására:⁸⁸⁾

kő	0,20‰
téglafalazat	0,77‰
beton	0,88‰
vasbeton	1,97‰
fa	1,15‰
acél (A 38)	0,95‰
acél (180.30)	7,11‰
alumínium	3,86‰
műanyag (üvegszál-erősítéssel)	3,00‰ ⁸⁹⁾

A táblázat azt mutatja, hogy itt az előbbi rangsor erősen megváltozik, pl. az alumínium és a nagy szilárdságú acél már egyáltalán nem olyan kedvező, mint a σ/γ aránynál volt.⁹⁰⁾ Mint látjuk, a húzószilárdsággal rendelkező anyagok közül a legkisebb alakváltozása a normál minőségű acélnek van, így érthető, hogy máig leggyakrabban ebből készülnek a nagyobb szerkezetek.

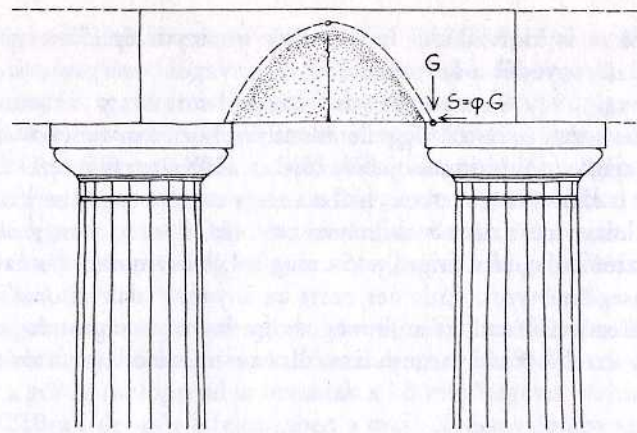
A szerkezeti anyagoknak ezenkívül még több fontos jellemzője van, így a korrózióállóság, a megmunkálás lehetőségei, az ár (amely az alapanyag előfordulásának gyakoriságától és az előállítás energia-, munka- és segédanyagigényétől függ). Ma, amikor a tervező sokféle anyag között válogathat, gondos mérlegeléssel kell kiválasztania a legmegfelelőbbet. A választásnak nemcsak műszaki és gazdasági, hanem jelentős formai, esztétikai következményei is vannak.

AZ EGYES ÉPÍTŐANYAGOK HATÁSA A FORMÁRA

KÖSZERKEZETEK

Az utókorra maradt legrégebb építészeti emlékek kőből épültek. Ez a tartós és szép építőanyag, mint burkolat, napjainkig szerepet kap a reprezentatív épületeken, régebben pedig a legfontosabb szerkezeti anyag is volt. Értéktelenebb, nem megmunkálható fajtáit szárazon, vagy sár- majd mészhabarcsba rakva, falazáshoz használták. A kő igazi jellegzetessége azonban akkor mutatkozik meg, ha nagy tömbökben, láthatóan használják fel. Már a prehisztorikus építészetben láttuk a szerkezeti anyagként használt kő jellegzetességeit és formai hatásait (2. ábra).

A kő a legtöbb történelmi kor reprezentatív építészetének jellegzetes építőanyaga. A kőarchitektúra klasszikus megvalósításának mégis mindmáig a görög építészetet tekintjük. A rómaiak közvetítésével a görög oszloprend a XX. századig erősen hatott



33. ábra

A görög oszloprend gerendájának erőjátéka.

A hajlított kőgerenda könnyen megreped, de a klasszikus arányok biztosítják, hogy – háromcsuklós ívként működve – így se szakadjon le

az európai kultúrkör építészetére. Már korán észrevették azonban, hogy a görög oszloprend formái a faszervezetekből származnak, és éppen ezért bizonyos mértékig a szerkezetnek ellentmondóak. Legnagyobb ellentmondás látszik a gerendaszerkezet, valamint a húzó- és hajlítószilárdság nélküli kő között. A pontosabb vizsgálat mégis azt mutatja, hogy a klasszikus arányú, zömök kőgerenda húzófeszültség nélkül (pl. megrepedt állapotban is) egyensúlyban lehet. A gerenda arányai ugyanis lehetővé teszik, hogy a hajlítás helyett csupán nyomófeszültséggel, a gerendában kialakuló, nyomott ívvel valósuljon meg az áthidalás (33. ábra). A gerendában kialakuló rejtett ívtartó vízszintes támaszeréjét általában a szomszédos gerendák egyensúlyozni tudják, de ha ezek nincsenek is ott (pl. az oszlopsor végén vagy építés közben), a nem túl lapos szögben ható ferde erő vízszintes komponensének felvételére a gerenda és az oszlopfő közötti súrlódás is alkalmas (kb. $H/V = 0,5$ arányig). Nem is maradhatna volna meg napjainkig a görög templomok, ha az építőanyag alkalmatlan lenne a rá ható erők felvételére. Kétségtelenül továbbra is ellentmondás marad szerkezet és forma között annyiban, hogy a forma hajlított szerkezetet mutat, a valóságban azonban az anyag nagy része felesleges (a 33. ábrán pontozva). A görögöknél a kőarchitektúra továbbfejlesztésének tehát a szerkezeti ismeretek kezdetlegessége szabott korlátokat.

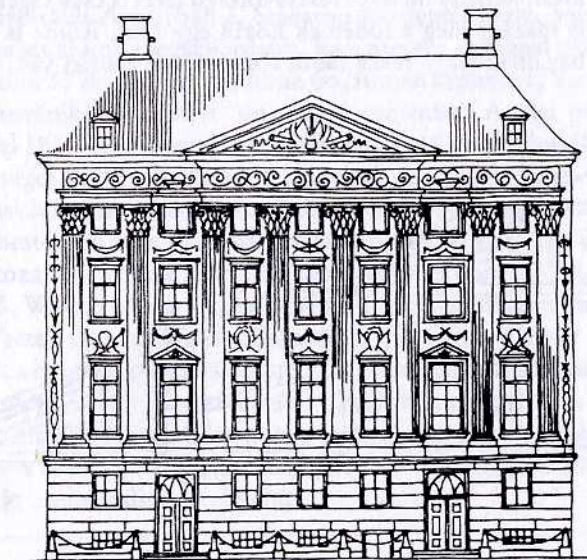
Az ellentmondástól mentes kőépítészet csak a boltozás technológiájának megismerése után alakulhatott ki, mivel itt az erőjáték az anyagban egyértelműen csak nyomófeszültséget tételez fel. A római építészetben meg is jelennek pl. a kő természetének megfelelő íves homlokzatok (16. ábra). A kő anyagszerű felhasználásának legszebb példáit talán a román stílusban találjuk. Az egyértelműen nyomott falak, boltívek és boltozatok arányai, tagozatai is az anyagnak megfelelőek (vö. 52–54. ábra). A gótika elsősorban a román stílus szerkezeti rendszerének továbbfejlesztése, amely az erőjáték tapasztalati úton kikísérletezett és intuitív módon megérezett pontos ismerete nyomán alakult ki (mint láttuk, az elméleti ismeretek ebben a korban legfeljebb a ferde erő megsejtéséig jutottak el). A gótika azonban a kő lehetőségeinek végső kihasználására törekedett, amely néha már túllép az anyagszerűség határain. Egyes elemei már nem is igazi kőszerkezetek, pl. a hatalmas mérművek bordáit az ablak merevíti, magukban nem is állékonyak. A késői gótika pedig egyes

szélsőséges, formalista megoldásainál, mint a függőboltozatok esetében, a követ már hűzésre is igénybe vette (29. ábra).

A kő az az építőanyag, amelyhez talán a legtöbb szubjektív hatás is tapad. Már maga az a tény mutatja a kő szubjektív esztétikai értékét, hogy a gyakorlati célra teljesen megfelelő, egyszerű falak és fa áthidalók helyett a jelentősebbnek tartott épületeket sokkal nagyobb anyagi áldozattal, szinte az örökkévalóság számára, kőből építették. Említettük, hogy a monumentalitást, a földi vagy égi hatalom érzékeltesét talán már az őskori, megalitikus építményeknél is tudatosan keresték – és ha nem is tudatosan, de megvalósították. Az egyiptomi piramisok, a templomok hatalmas pilonjai, lenyűgöző méretű oszlopokkal épített hiposztál csarnokai pedig már biztosan tudatosan keresik az embert lenyűgöző hatást, amelyet a súlyos köelemek segítségével értek el. Az egész történelem folyamán a reprezentatív épületek, templomok, paloták nagyrészt kőből épültek, és napjainkig megmaradt a kő ünnepélyes, monumentális hatása, amely az anyag tulajdonságaiból (keménységéből, súlyosságából, tartósságából) ered, de hatását évezredek beidegződése is fokozza.

TÉGLASZERKEZETEK

Mezopotámia ókori építészetétől napjainkig szinte minden korban fontos építőanyag volt a tégl. Az építéstechnológia egyszerűsége miatt (pl. nem kell nagy kőtömböket szállítani, emelni) különösen a tömeges építési feladatoknál alkalmazták (a más anyagú falazatokkal együtt). A falazott szerkezetű épületek jellegzetes formái annyira megszokottak, hogy fel sem tűnnek. A lakóházak és nem nagy térigényű középületek jelentős része ezeket az alapvető formákat mutatja. Ilyenek voltak már Róma dísztelen bérkaszárnái, a középkori polgári lakóházak, városházák gótikus díszítésű (de nem gótikus szerkezetű) homlokzatai, a reneszánsz palotáktól az eklek-



34. ábra

Az amszterdami Trippenhuis.

A tégláépület jellegzetessége a tömör fal és a viszonylag kis nyílások

tikus városi bérházakig a koronként változó stílusú díszekkel felöltöztetett épületek (34. ábra), sőt még napjaink egyszerű lakóházai és középületei is. A téglapületek közös jellemzője a legfeljebb néhány emeletnyi magasság, a két irányú falrendszer, a viszonylag kis nyílások.⁹¹⁾

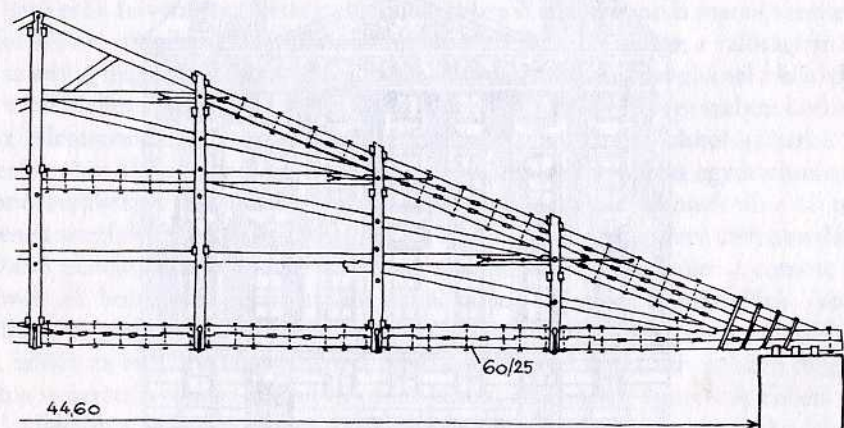
Téglafalazattal azonban különlegesen jó anyagminőség és gondos falazás esetén rendkívüli eredmények is elérhetők. Érdekességként említjük meg, hogy Zürichben 18 szintes téglapületeket is építettek. Ehhez természetesen különleges, nagy szilárdságú téglá, cellás rendszerű alaprajz, viszonylag tömör homlokzat volt szükséges. A falak téglakötését is megtervezték, a villanykapcsolók és egyéb szerelvények számára idomdarabokat gyártottak, mert a falakat nem szabad megvénsni. Így sikerült elérni, hogy a falak a 18 szint ellenére mindössze 38 cm vastagok.^{91a)}

A téglát viszonylag kis súlya miatt gyakran használták boltozott szerkezetekhez. Üreges téglatestekkel is könnyítették már a késői római korban a boltozatokat. Az üreges téglá ma is a födém- és falszerkezetek súlycsökkentésének bevált eszköze.

A jó minőségű téglafal a homlokzaton is megjelenhet. Olyan tájakon, ahol nincs kő, a téglá volt az építészeti hatás egyik fontos tényezője (pl. az ókori Mezopotámiában, a középkorban Németország északi részén).

FASZERKEZETEK

A történeti korokban az egyetlen, nagyobb mennyiségben rendelkezésre álló, megfelelő húzószilárdságú építőanyag a fa volt. Használata alárendeltebb helyeken általános volt, de reprezentatív épületeken – legalábbis a Földközi-tenger vidékén és Európában – a lehetőséghez képest kerültk, mivel nem tartották eléggé időállóknak. Valóban, az ókorból egyetlen faszervezet sem maradt ránk. Leginkább az elég gyakori tűzvészek okoztak nagy pusztítást. A boltozatok fejlődését éppen a fának ez a hátrányos tulajdonsága segítette elő. A boltozatok elterjedése előtt még a görög templomok viszonylag kicsi, néhány méteres fesztávolságú terét is csak fagerendákkal tudták áthidalni. Nem is maradt meg a födémek közül egy sem. Róma is elpusztult Néro idejében, mivel házainak nagy része fából épült. Csak ezután vált általánossá a kő,



35. ábra

A moszkvai lovarda tetőszerkezete.

A többfás ékelt tartók a nagyobb faszervezeteknek az elemek méretéből adódó szerkezeti és formai jellegzetességei

tégla és a puzzolánfölddel készített beton használata, a nagyobb terek boltozása. A kisebb fesztávolságú födémek azonban egészen a XIX. századig legtöbbször fagerendákkal épültek, nemcsak a közönséges lakóházakban, hanem még sokszor a királyi palotákban is.

A fagerendák méretét – hosszát és keresztmetszetét – a természetes előfordulás szabta meg. Nagyobb tömegben a régi érintetlen erdőkből is csak legfeljebb 8–10 m hosszú, 30–40 cm oldalméretű gerendák faragására alkalmas fákat tudtak kitermelni. Az erdők pusztulásával ezek a méretek is fokozatosan csökkentek. Így hamar – minden valószínűség szerint már a hellenisztikus korban – kialakultak a különböző feszítő- és függesztőművek, és a többfás, ékelt vagy betétes tartók. Az így készült szép szerkezetek sokszor láthatóak, sőt a belső tér építészeti hatásának fontos elemei (35. ábra). Úgy látszik, hogy a faszervezeteket a vas és a vasbeton csak időlegesen szorította vissza, napjainkban a világszerte mutatkozó fahiány ellenére, a modern fafeldolgozó eljárásoknak és a gazdaságos kapcsolati módszereknek köszönhetően, újra terjedőben vannak.

BETONSZERKEZETEK

A beton – lényegét tekintve hidraulikus kötőanyaggal előállított mesterséges kő – bár általában az új építőanyagok között tartják számon, nagyon régóta ismert. Már a föníciaiak készítették mészből és vulkáni hamuból, vagy mészből és téglaporból vízálló habarcsot.⁹²⁾ A görögök a Santorin-szigeti vulkánkitörésből visszamaradt hamut keverték mésszel.⁹³⁾ A beton végül a római korban terjedt el, és itt, az addig elképzelhetetlen méretű építőtevékenység miatt, igen nagy jelentőségűvé vált, rendkívül alkalmas ugyanis nagy tömegű szerkezetek gyors építésére. A rómaiak is vulkáni hamuval (puzzolánnal) és mésszel készítették a betont.

A beton készítése később feledésbe merült. A XVIII. század végén kezdték újra felfedezni, a francia hidépítők örölt traszt használtak a beton készítéséhez. A mesterséges cement előállítását Angliában J. Smeaton kezdeményezte, miután azt tapasztalta, hogy a habarcs akkor a legszilárdabb, ha a meszet agyaggal szennyezett mészkőből égetik. Parker 1796-ban fedezte fel az ún. román cementet. Vicat 1813-ban már agyag és mész keverékéből égetett ún. angol cementet. A mai portlandcementet Aspdin fedezte fel 1824-ben. Nagyipari előállítását 1845-ben oldották meg. 1832-ben Ranger „mesterséges kő”, azaz beton falazóelem előállítására kapott szabadalmat. Ipari épületek vasvázás szerkezetében a födémgerendák közeit sokszor betonnal töltötték ki. Manchesterben már 1801-ben betonkiöntést készítettek egy vasgerendák közötti téglaboltozat felett. Fox 1829-ben betonfödémeket épített.⁹⁴⁾ Az első, betonnal készült házat J. B. White építette 1837-ben Angliában.⁹⁵⁾ Egészen századunk második feléig azonban a beton csak alárendelt jelentőségű épületeken maradt burkolat nélkül. Esztétikai értékét a brutalizmus néven ismert építészeti irányzat fedezte fel az ötvenes években. A korszerű, gondosan kivitelezett gyalult fa, vagy sima fémzsaluzatok, sokszor a zsaluzatba helyezett felületképző lécekkel, gumi- vagy műanyag matricákkal sok lehetőséget adnak a szerkezeti anyagot őszintén megmutató, tartós és szép felületek képzésére, minimális költség árán.

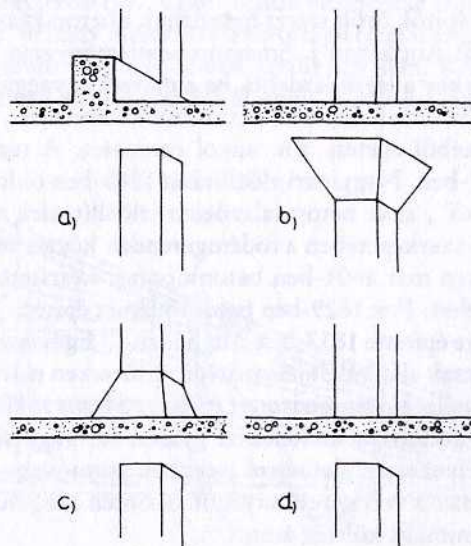
A betonnak, mint mesterséges kőnek nincs számottevő húzószilárdsága, így a hagyományos építőanyagokhoz képest inkább technológiai téren jelent fejlődést. Jelentősége elsősorban nem önmagában, hanem vasalással alkalmassá téve a húzóerő felvételére, mint vasbetonnak van. A vasbetont – új szilárdsági tulajdonságai miatt – szerkezeti szempontból indokolt új anyagnak tekinteni.

A vasbeton elméletének fejlődését már a II. fejezetben ismertettük, itt csak annyit jegyzünk meg, hogy nagyjából a XIX. század utolsó évtizedére jutott olyan fokra a kutatás, hogy a vasbeton szerkezetek egzakt méretezése lehetővé vált. M. Koenen 1886-ban így fogalmazta meg a vasbeton statikai működésének lényegét: 1. a nyomóerőt a beton, a húzóerőt a vas veszi fel; 2. a két anyag közötti együttlőzést a beton és a vas közötti tapadás, és 3. az azonos hőtágulás teszi lehetővé.⁹⁶⁾

Az új anyag másik fontos tulajdonsága a monolit jelleg, amelynek szintén számtalan előnye van. Eddig nagy méretű hézagmentes szerkezetet nem lehetett készíteni: a kő méretét a kifejtés, a szállítás és a beemelés korlátozza, a beton pedig, bár egyben önthető, a hőmozgások, zsugorodás stb. miatt vasbetétek nélkül megreped.

A monolit jellegből következik a vasbetonnak az a tulajdonsága, hogy a szerkezeti elemek nem válnak el egymástól, pl. az egymásra merőleges gerendák – a teherbírás csökkenése nélkül – áthatnak egymáson. Így teljesen más szerkesztési elvek érvényesülnek, mint a fa- vagy acélszerkezetekben. Ugyanezen okból vasbetonból könnyen megvalósítható az alul teljesen sík födém is, amely technológiai előnyei mellett egészen új, addig legfeljebb álmennyezettel elérhető esztétikai hatást vált ki (36. ábra).

A vasbeton elterjedését a múlt században a tűzbiztos szerkezetek igénye segítette elő, sokkal inkább, mint a statikai szempontok. W. B. Wilkinson, mint már említett-

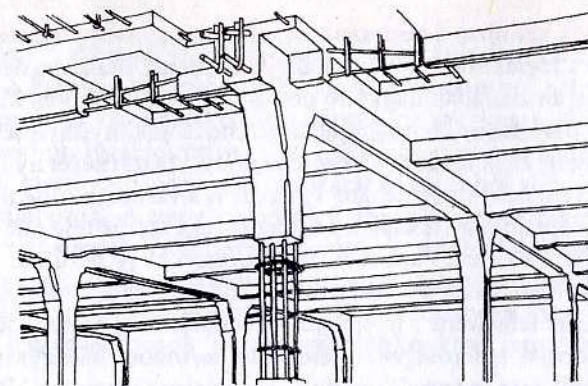


36. ábra

Vasbeton födémek megoldásai.

Az új anyag új formai lehetőségeket teremtett

a) a gerenda a födémbe rejthető; b) a lemez gombafejezetes oszlopokra vagy pillérekre pontszerűen is támaszkodhat; c) a fejezetek a lemez fölé is kerülhetnek; d) a fejezetek el is maradhatnak



37. ábra

Hennebique vasbeton födémé.

A faszerkezet hatását mutatja, de ez a zsaluzás miatt nem is teljesen indokoltan

tük, 1854-ben „Construction of Fire-proof Dwellings, Warehouses and Other Buildings or Parts of the Same” (Tűzbiztos lakások, áruházak és más épületek konstrukciója, vagy azok részeinek építése) címen szabadalmaztatta födémét. Már ő megsejtette, hogy a vasbetéteknek a húzott oldalon kell lenniük. A szabadalmi leírásban az acélhuzalok vezetése legalábbis erre mutat. Wilkinson 1865-ben szabadalmaztatta szerkezetével házat épített, amelyet 1954-ben bontottak le, bár teljesen jó állapotban volt.⁹⁷⁾ A vasbeton szerkezetek alkalmazása a magasépítés területén még jó ideig szinte kizárólag a födémekre korlátozódott, sőt ezek sem voltak jellegzetes vasbeton födémek, mert az új anyagot csak vasgerendák között használták.

Ismereteink szerint az első vasbeton házat W. E. Ward tervezte és építette 1873–1876-ig Rye-ban (New York, USA). A födémek itt is I vas gerendákkal készültek, de ezeket teljesen a betonba ágyazták. A kiegészítő vasalás gömbvasakkal készült. Az igazi újdonság, hogy vasbetonból épültek a falak is. Az új anyagnak azonban még nem sikerült megtalálni a kifejező formát, a homlokzat hagyományos kőarchitektúrát imitál (11. ábra), legfeljebb közelebbről vehető észre, hogy a tagozatokat a zsaluzási nehézség miatt egyszerűsítették. Az épületet 1978-ban műemlékké nyilvánították.⁹⁸⁾

A modern vasbeton szerkezet első megvalósítója a francia F. Hennebique volt. Az erőjáték ismeretét mutatja, hogy nyírás miatt felhajlított vasakat és kengyeleket is alkalmazott. Sokszor idézett födémét általában az a kritika éri, hogy a faszerkezetek hatása alatt áll (37. ábra). Hennebique még valóban nem ismerte a térbeli erőjáték vasbetonban rejlő – és az ő szerkezetében is részben megvalósuló – lehetőségeit, de arról sem szabad megfeledkeznünk, hogy a zsaluzat miatt van rokonság a vasbeton és a faszerkezet között. A vasbeton természetének jobban megfelelő, az erőjátékot követő formák a monolit szerkezetek zsaluzását sokszor nagyon megnehezítik (12., 92. ábra). Hennebique ismerte fel viszont, hogy a vasbeton más keresztmetszetet igényel, mint a homogén anyagú gerenda. Míg ez utóbbinál a húzást és a nyomást ugyanolyan anyag veszi fel, ezért a vízszintes tengelyre nézve is szimmetrikus □, I stb. keresztmetszet a logikus, a vasbetonban a húzott oldalon a beton csupán a vasbetétek lehorgonyzása miatt szükséges, de az erőjátékban közvetlenül nem vesz részt. Ezért sokkal ésszerűbb a T keresztmetszet, amelyet az egyébként is szükséges födémlemezrel lehet kialakítani, a monolitikus szerkezetnek köszönhetően. Ellent-

mondás mutatkozik azonban a támaszoknál, ahol a negatív nyomaték miatt alul van a nyomott öv, de a lemez síkját funkcionális okok miatt általában nem lehet változtatni.⁹⁹⁾ Így éppen az általában nagyobb negatív nyomaték helyén kisebb a keresztmetszet nyomott öve. Ezen Hennebique a gerendák kikönyökölésével segített. Ez a logikus forma – amelynek tehát más a szerepe, mint a faszervezet nyeregfaínak, vagy a kőoszlopok fejezeteinek – még néhány évtizede is a vasbeton födéme egyik jellegzetessége volt, és napjainkban is csak a zsaluzatok egyszerűsítése miatt, technológiai okból marad el. Az 1900. évi Párizsi Világkiállításon nagy feltűnést keltett Hennebique 10 m fesztávolságú födéme, amelyből 3,33 m-es konzol nyúlt ki. Érthető, hogy ez a merész szerkezet felkeltette a jó építészek érdeklődését, észrevették a benne rejlő funkcionális és formai lehetőségeket. Közéjük tartozott Medgyasszay István is, akinek működéséről már megemlékeztünk. Franciaországban Au. Perret látta meg a vasbeton építészeti lehetőségeit. A párizsi Rue Franklin 25. sz. lakóháza 1902–1903-ban épült, és már megvalósítja a tiszta vasbeton vázszerkezetet, amely a nem teherhordó homlokzati felületeken is megjelenik. Perret további működésére is a vasbeton lehetőségeinek kibontakoztatása jellemző. Valószínűleg ő az első építész, aki Hennebique rendszerén túljutva, vasbeton héjszerkezetet alkalmaz reprezentatív épületen (l. a 77. ábrát). Ezzel szemben Hennebique ugyan már 1900-ban megépíti bérházát (Paris, Rue Danton 1.),¹⁰⁰⁾ ahol a födéme, falak, lépcsők egyaránt vasbetonból készültek, de még 1904-ben épült háza is (Bourg-la-Reine, Rue Lycée Lacanal) a kőépítészet hatását mutatja – bár itt már a nagy erkélyekkel a külsőben is jelzi az új anyag lehetőségeit.¹⁰¹⁾

A vasbeton legnagyobb újdonsága, hogy kőszerű megjelenése ellenére hajlított szerkezetek, nagy fesztávolságú gerendák, nagy kiülésű konzolok építésére alkalmas. Eleinte, szokatlansága miatt, inkább kőszerűségét hangsúlyozták, de rövidesen éppen új lehetőségeinek formai hatását igyekeztek kiaknázni (12., 61., 82. ábra). Másik jellegzetessége, hogy az öntőforma (zsaluzat) segítségével tetszőleges alakú szerkezet építhető belőle. Ebből szintén érdekes megoldások születtek, amelyek, ha egyébként is – pl. a funkció vagy az erőjáték miatt – indokoltak, maradandó értékűnek bizonyulnak (92. ábra).

A vasbeton további fejlődése már inkább az egyes szerkezetípusokhoz kapcsolható, így erről később szólunk. De itt is megjegyezzük, hogy bár a vasbetont elsősorban hajlított szerkezetek céljára fejlesztették ki, igen nagy a jelentősége a nyomott elemeknél is, mivel mint láttuk már, a húzószilárdsággal rendelkező szerkezet kihajlási veszélye is kisebb. Ennek különösen a vázszerkezeteknél és a zömében nyomásra igénybe vett héjszerkezeteknél van nagy jelentősége.

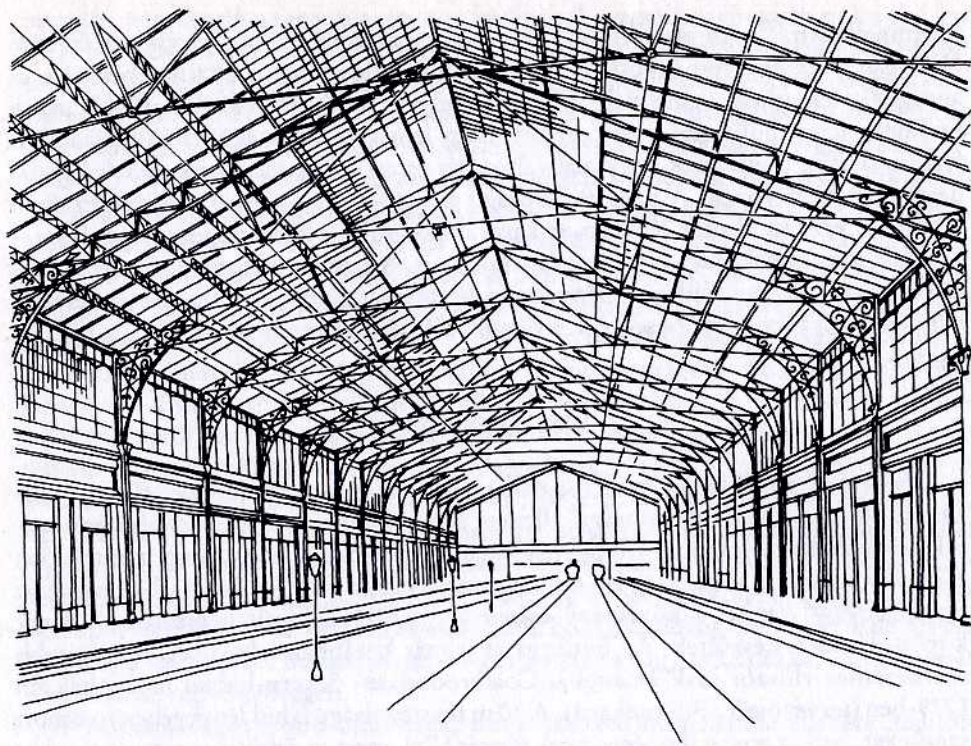
A vasbeton hátránya viszont, hogy a húzott övben megreped, mivel a betonnak nincs húzószilárdsága. A repedés csak a keresztmetszet igen kismértékű kihasználása esetén kerülhető el. Ez az oka, hogy húzott elemet tulajdonképpen nem is érdemes vasbetonból készíteni. A vasbetétek feszítésével, a húzott öv betonjára ráengedett nyomóerővel már korán megkísérelték a repedések keletkezését megakadályozni. Először P. H. Jackson szabadalmaztatott feszített vasbetétes födémet San Franciscóban, 1886-ban. A feszített szerkezet lényegét a német Doehring ismerte fel 1888-ban végzett kísérletei kapcsán. Szabadalmi leírásában a repedések elkerülését hangsúlyozza. Kezdetben azonban a feszítőerő hatása gyorsan megszűnt, mert a kis szilárdságú acélbetétek relaxációs feszültségvesztése nagyságrendileg azonos volt a feszítőerővel. Az első hatásos feszítést K. Wettstein alkalmazta 1921-ben 0,3 mm átmérőjű, 1400 . . . 2000 N/mm² szakítószilárdságú zongorahúrokkal feszített

födempallóban.¹⁰²⁾ Az első jelentős feszített szerkezeteket Eu. Freyssinet építette 1930-ban a Le Havre-i kikötőben. Bizonyos szempontból a feszített beton is új anyagnak tekinthető, amellyel elvileg bármilyen szerkezet előállítható kizárólag nyomott elemekből. Igazi jelentősége az, hogy lehetővé teszi nagy szilárdságú acélok felhasználását, mivel ezek nagy alakváltozását és az ebből adódó repedések képződését megakadályozza. A nagy szilárdságú anyag – acél és beton – következtében viszont a feszített elemek lényegesen karcsúbbak, mint a közönséges vasbeton szerkezetek, ami jelentkezik az építészeti formában is. A feszített betonnál azonban – legalábbis a mi szempontunkból – lényegesen fontosabb maga a feszítés elve, amelynek felfedezése új szerkezetípusok (pl. a függőtető) építését tette lehetővé (l. a 144. oldalon).

VASSZERKEZETEK

A betonhoz hasonlóan a vas¹⁰³⁾ is már régóta ismert anyag, de nagy tömegű előállítására előtérbe kedvező tulajdonságai ellenére sem terjedhetett el. Leginkább boltozatok vonóvasaként, kupolák vonógyűrűjeként használták. Láttuk, hogy a római San Pietro kupolájában eredetileg is volt vas vonógyűrű, de az 1742–1743-ban készített szakvélemény alapján a következő évben két további gyűrűt helyeztek el. Ezek kovácsoltvasból készültek. Az öntöttvasat is már korábban feltalálták, de nagyobb szerkezethez először csak az angliai Coalbrookdale-i Severn-hídnál használták fel 1779-ben (tervezője T. F. Pritchard). A 30 m fesztávolságú ívhíd lényegében nyomott szerkezet, ami az anyag természetének meg is felel, mert az öntöttvas ridegsége miatt nem is alkalmas nagyobb húzóerő felvételére. 1779–1781 között építi Soufflot a párizsi Louvre öntöttvas lépcsőjét, majd V. Louis 1785–1790-ban a Palais Royal színházát. Angliában Soane 1792-ben öntöttvas szerkezettel építi meg a Bank of England új szárnyát. Ezután a vas felhasználása a reprezentatív épületeken mintha háttérbe szorulna, főként valószínűleg az új anyagból következő arányok, új formák szokatlansága miatt. Annál gyorsabban terjed az ipari építészetben, különösen Angliában. Már 1796-ban egy ötszintes fonoda épül Ditheringtonban, téglakörítőfalakkal, de öntöttvas belső vázzal. 1801-ben Manchesterben 43×13 m alapterületű, hatemeletes, két öntöttvas oszlopsorral három hajóra osztott gyapjúfonót építenek Boulton és Watt tervei szerint. Az épület sok ipari üzem példaképe lett.^{103a)} Franciaországban nem folyt hasonló nagyszabású ipari építkezés, de öntöttvas bordákkal épült pl. a párizsi gabonapiac (1809–1811) 40 m átmérőjű kupolája. H. Labroust használta fel ismét az öntöttvasat reprezentatív épületen, két párizsi könyvtárának olvasótermében (Ste. Geneviève könyvtár, 1843–1850, Nemzeti Könyvtár 1858–1868), ahol az olvasótermet lefedő vasszerkezetű ívtartókat, ill. kupolákat karcsú öntöttvas oszlopok támasztják alá. A homlokzat még itt sem mutat semmit a vasszerkezetből. Az üvegfelülettel megnyitott, vasvázás homlokzatokat funkcionális igény, a melegházak építése honosította meg. Ezekből fejlődtek a kiállítási csarnokok is, amelyek legnevezetesebbje a londoni Kristálypalota volt (21. ábra). A vasszerkezet a század közepén már más épületek homlokzatán is megjelenik. Az egyik első példa J. Bogardus New York-i Harper Bros áruháza 1854-ből. Szinte a Bauhaus szigorúan konstruktív formáit véljük felfedezni G. T. Greene 1858-ban épült csónakraktárán.^{103b)}

A vasszerkezetek elterjedéséhez hozzájárultak a fedett pályaudvari csarnokok, mert a nagy fesztávolságot csak vasszerkezettel tudták áthidalni. Ez a belsőben ugyan



38. ábra

A budapesti Nyugati pályaudvar acélszerkezete.

A vasszerkezetek tették lehetővé a múlt században a nagy terek iránt mutatkozó fokozódó igények kielégítését

látható volt (38. ábra), de a homlokzatot még legtöbbször kulisszaszerű historizáló formákkal alakították ki. Hasonlóak voltak a fedett vásárcsarnokok is.

Az öntöttvasat egészen az 1870-es, 1880-as évekig használták szerkezeti célra, bár Angliában már 1830 körül hengereltek L vasakat, és a század közepére már egész Nyugat-Európában elterjedtek a hengerelt I és U keresztmetszetű gerendák. Ennek természetesen alapvető feltétele volt a vasgyártás fejlődése, a Bessemer, majd a Siemens-Martin eljárás felfedezése és nagyipari technológiájának kialakulása. A modern vasszerkezetek igazi fejlődése innen számítható. A fejlődés útját az építészetben olyan alkotások jelzik, mint a párizsi Eiffel-torony és a Gépcsarnok (63. ábra), majd Amerikában az első felhőkarcolók.

Már a korai vasszerkezeteken megjelennek a rácsozott elemek, amelyek a szerkezetek tényleges és esztétikai értelemben vett könnyítését hivatottak szolgálni. Az anyag nagy szilárdsága és kis alakváltozása teszi lehetővé ezt a szerkezetet és formát forradalmasító megoldást, amelynek köszönhetően a vasból, az egyik legnagyobb sűrűségű építőanyagból gazdaságos és könnyű szerkezeteket, épületeket lehet építeni.

Az acél máig megőrizte fontos szerkezeti és építészeti szerepét. Kedvező szerkezeti tulajdonságait ugyanis az utóbb felfedezett új anyagok is csak egy-egy szempontból tudták túlszárnyalni, így a nagy szerkezeteknél ma is nehezen nélkülözhető. De jelentősek esztétikai tulajdonságai is, elsősorban könnyedsége, amely szintén nagy

szilárdságából következik. Ez tette lehetővé, hogy az acélvázás épületek hatására az építészeti tér teljesen új felfogása alakulhasson ki a huszadik században (54., 5. ábra).

ALUMÍNIUM SZERKEZETEK

Az alumíniumnak a vasnál sokkal kisebb múltja van. Bár H. Davy már 1807-ben megsejtette az új elem létezését, szinalumíniumot csak 1825-ben sikerült H. C. Oersted-nek előállítani. Nagyipari gyártását pedig csak 1886-ban fedezte fel egymástól függetlenül Ch. M. Hall és P. L. J. Héroult. A szerkezeti célokra felhasználható első nemesíthető ötvözetet, a duralumíniumot 1906-ban fedezte fel A. Wilm. Az alumínium szilárdsági tulajdonságai látszólag igen kedvezőek (l. a táblázatot a 72. oldalon), ennek ellenére máig sem tudott elterjedni. Magas árán kívül (az acél-
nak kb. négyszerese) ennek szerkezeti okai is vannak. Például más anyagokkal, sőt másféle ötvözetével érintkezve is erős korrózió indul meg. További hátránya a nagy alakváltozás (l. a táblázatot a 73. oldalon), amely egyben a nyomott elemek és a hajlított tartók nyomott övének stabilitásvesztéséhez vezethet. Ennek elkerülése érdekében gyártják az alumínium idomokat jellegzetes Γ \square és más hasonló profillal, ami természetesen a szerkezeti elemek megjelenésére is hat. A stabilitási problémák miatt a nyomott rudakat (pl. a rácsostartók nyomott rúdjaikat), ha azok alumíniumból készülnek, sűrűn meg kell támasztani. Ezért az alumínium szerkezetekhez is meg kellett találni az anyag tulajdonságainak megfelelő szerkesztésmódot és formát.

Az első alumínium tartószerkezetek az Egyesült Államokban épültek a harmincas években.¹⁰⁴⁾ Több régi acélhid pályaszerkezetét ötletesen, kis súlyú alumínium szerkezettel cserélték ki, és így a főtartók a megnövekedett forgalom terhét fel tudták venni. Elsőként 1933-ban a Pittsbourgh-i Smithfield-hídon készült a régi 680 t helyett 330 t tömegű alumínium pályaszerkezet. A második világháború megakasztotta az alumínium szerkezetek fejlődését, de már 1946-ban Massena-ban (New York, USA) egy 30,5 m fesztávolságú, teljesen alumínium szerkezetű hidat építettek. Az európai kontinens első alumínium hídja hazánkban, Szabadszálláson épült 1950-ben Bölscei Elemér tervei szerint. Ezeknél a hidaknál – az alumínium említett kedvezőtlen tulajdonságai ellenére – 50 . . . 60%-os súlymegtakarítást lehetett elérni az acélszerkezethez képest. Az alumínium szerkezetek formai megjelenése azonban kezdetben – az anyag jellegzetes színét kivéve – az acélszerkezetekhez volt hasonló, mert a tervezők még nem ismerték az új anyag lehetőségeit. „... az új szerkezeti anyag először mindig a megszokott szerkezeti formákban jelenik meg. Így készítettek kőből nádköteg és fagerenda, betonból téglaboltozat formájú szerkezeteket és öntöttvasból korinthuszi oszlopokat. A már megismert és bevált építőanyag később megkeresi a saját szerkezeti formáját.”¹⁰⁵⁾ Ez a megállapítás nemcsak az előbb említett hidakra, hanem az alumínium épületszerkezetekre is érvényes. „Az elmúlt fél évszázadban sok csarnok lefedésénél alkalmazták a főtartóból, szelemenekből és héjazatból kialakított tetőszerkezetet. Ebben a hierarchikus rendszerben néhány alumínium szerkezet is készült, azonban ezt a szerkezeti kialakítást nem tarthatjuk az alumínium korszerű, anyagszerű formájának.”¹⁰⁶⁾ Így épült az egyik első alumínium szerkezetű csarnok, a londoni repülőtér 54,7 m fesztávolságú, kétsuklós rácsos keretekkel lefedett hangárja 1951-ben, majd szintén Angliában a Hathfield-i repülőtér 66 m feszt-

mondás mutatkozik azonban a támaszoknál, ahol a negatív nyomadék miatt alul van a nyomott öv, de a lemez síkját funkcionális okok miatt általában nem lehet változtatni.⁹⁹⁾ Így éppen az általában nagyobb negatív nyomadék helyén kisebb a keresztmetszet nyomott öve. Ezen Hennebique a gerendák kikönyökölésével segített. Ez a logikus forma – amelynek tehát más a szerepe, mint a faszervezet nyeregfaínak, vagy a kőoszlopok fejezeteinek – még néhány évtizede is a vasbeton födécek egyik jellegzetessége volt, és napjainkban is csak a zsaluzatok egyszerűsítése miatt, technológiai okból marad el. Az 1900. évi Párizsi Világkiállításon nagy feltűnést keltett Hennebique 10 m fesztávolságú födéme, amelyből 3,33 m-es konzol nyúlt ki. Érthető, hogy ez a merész szerkezet felkeltette a jó építészek érdeklődését, észrevették a benne rejlő funkcionális és formai lehetőségeket. Közéjük tartozott Medgyasszay István is, akinek működéséről már megemlékeztünk. Franciaországban Au. Perret látta meg a vasbeton építészeti lehetőségeit. A párizsi Rue Franklin 25. sz. lakóháza 1902–1903-ban épült, és már megvalósítja a tiszta vasbeton vázszerkezetet, amely a nem teherhordó homlokzati felületeken is megjelenik. Perret további működésére is a vasbeton lehetőségeinek kibontakoztatása jellemző. Valószínűleg ő az első építész, aki Hennebique rendszerén túljutva, vasbeton héjszerkezetet alkalmaz reprezentatív épületen (l. a 77. ábrát). Ezzel szemben Hennebique ugyan már 1900-ban megépíti bérházát (Paris, Rue Danton 1.),¹⁰⁰⁾ ahol a födécek, falak, lépcsők egyaránt vasbetonból készültek, de még 1904-ben épült háza is (Bourg-la-Reine, Rue Lycée Lacanal) a kőépítészet hatását mutatja – bár itt már a nagy erkélyekkel a külsőben is jelzi az új anyag lehetőségeit.¹⁰¹⁾

A vasbeton legnagyobb újdonsága, hogy kőszerű megjelenése ellenére hajlított szerkezetek, nagy fesztávolságú gerendák, nagy kiülésű konzolok építésére alkalmas. Eleinte, szokatlansága miatt, inkább kőszerűségét hangsúlyozták, de rövidesen éppen új lehetőségeinek formai hatását igyekeztek kiaknázni (12., 61., 82. ábra). Másik jellegzetessége, hogy az öntőforma (zsaluzat) segítségével tetszőleges alakú szerkezet építhető belőle. Ebből szintén érdekes megoldások születtek, amelyek, ha egyébként is – pl. a funkció vagy az erőjáték miatt – indokoltak, maradandó értékűnek bizonyulnak (92. ábra).

A vasbeton további fejlődése már inkább az egyes szerkezetípusokhoz kapcsolható, így erről később szólunk. De itt is megjegyezzük, hogy bár a vasbetont elsősorban hajlított szerkezetek céljára fejlesztették ki, igen nagy a jelentősége a nyomott elemeknél is, mivel mint láttuk már, a húzószilárdsággal rendelkező szerkezet kihajlási veszélye is kisebb. Ennek különösen a vázszerkezeteknél és a zömében nyomásra igénybe vett héjszerkezeteknél van nagy jelentősége.

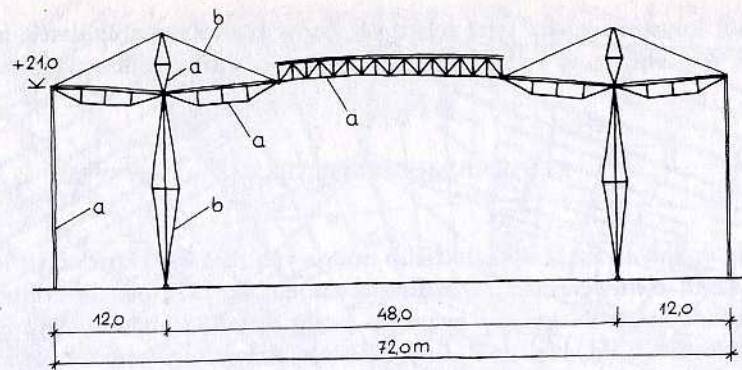
A vasbeton hátránya viszont, hogy a húzott övben megreped, mivel a betonnak nincs húzószilárdsága. A repedés csak a keresztmetszet igen kismértékű kihasználása esetén kerülhető el. Ez az oka, hogy húzott elemet tulajdonképpen nem is érdemes vasbetonból készíteni. A vasbetétek feszítésével, a húzott öv betonjára ráengedett nyomóerővel már korán megkísérelték a repedések keletkezését megakadályozni. Először P. H. Jackson szabadalmaztatott feszített vasbetétes födémet San Franciscóban, 1886-ban. A feszített szerkezet lényegét a német Doehring ismerte fel 1888-ban végzett kísérletei kapcsán. Szabadalmi leírásában a repedések elkerülését hangsúlyozza. Kezdetben azonban a feszítőerő hatása gyorsan megszűnt, mert a kis szilárdságú acélbetétek relaxációs feszültségvesztése nagyságrendileg azonos volt a feszítőerővel. Az első hatásos feszítést K. Wettstein alkalmazta 1921-ben 0,3 mm átmérőjű, 1400 . . . 2000 N/mm² szakítószilárdságú zongorahúrokkal feszített

födempallóban.¹⁰²⁾ Az első jelentős feszített szerkezeteket Eu. Freyssinet építette 1930-ban a Le Havre-i kikötőben. Bizonyos szempontból a feszített beton is új anyagnak tekinthető, amellyel elvileg bármilyen szerkezet előállítható kizárólag nyomott elemekből. Igazi jelentősége az, hogy lehetővé teszi nagy szilárdságú acélok felhasználását, mivel ezek nagy alakváltozását és az ebből adódó repedések képződését megakadályozza. A nagy szilárdságú anyag – acél és beton – következtében viszont a feszített elemek lényegesen karcsúbbak, mint a közönséges vasbeton szerkezetek, ami jelentkezik az építészeti formában is. A feszített betonnál azonban – legalábbis a mi szempontunkból – lényegesen fontosabb maga a feszítés elve, amelynek felfedezése új szerkezetípusok (pl. a függőtető) építését tette lehetővé (l. a 144. oldalon).

VASSZERKEZETEK

A betonhoz hasonlóan a vas¹⁰³⁾ is már régóta ismert anyag, de nagy tömegű előállítására előtérbe kerülő tulajdonságai ellenére sem terjedhetett el. Leginkább boltozatok vonóvasaként, kupolák vonógyűrűjeként használták. Láttuk, hogy a római San Pietro kupolájában eredetileg is volt vas vonógyűrű, de az 1742–1743-ban készített szakvélemény alapján a következő évben két további gyűrűt helyeztek el. Ezek kovácsoltvasból készültek. Az öntöttvasat is már korábban feltalálták, de nagyobb szerkezethez először csak az angliai Coalbrookdale-i Severn-hídnál használták fel 1779-ben (tervezője T. F. Pritchard). A 30 m fesztávolságú ívhíd lényegében nyomott szerkezet, ami az anyag természetének meg is felel, mert az öntöttvas ridegsége miatt nem is alkalmas nagyobb húzóerő felvételére. 1779–1781 között építi Soufflot a párizsi Louvre öntöttvas lépcsőjét, majd V. Louis 1785–1790-ben a Palais Royal színházát. Angliában Soane 1792-ben öntöttvas szerkezettel építi meg a Bank of England új szárnyát. Ezután a vas felhasználása a reprezentatív épületeken mintha háttérbe szorulna, főként valószínűleg az új anyagból következő arányok, új formák szokatlansága miatt. Annál gyorsabban terjed az ipari építészetben, különösen Angliában. Már 1796-ban egy ötszintes fonoda épül Ditheringtonban, téglakörítőfalakkal, de öntöttvas belső vázzal. 1801-ben Manchesterben 43×13 m alapterületű, hatemeletes, két öntöttvas oszlopsorral három hajóra osztott gyapjúfonót építenek Boulton és Watt tervei szerint. Az épület sok ipari üzem példaképe lett.^{103a)} Franciaországban nem folyt hasonló nagyszabású ipari építkezés, de öntöttvas bordákkal épült pl. a párizsi gabonapiac (1809–1811) 40 m átmérőjű kupolája. H. Labroust használta fel ismét az öntöttvasat reprezentatív épületen, két párizsi könyvtárának olvasótermében (Ste. Geneviève könyvtár, 1843–1850, Nemzeti Könyvtár 1858–1868), ahol az olvasótermet lefedő vasszerkezetű ívtartókat, ill. kupolákat karcsú öntöttvas oszlopok támasztják alá. A homlokzat még itt sem mutat semmit a vasszerkezetből. Az üvegfelülettel megnyitott, vasvázas homlokzatokat funkcionális igény, a melegházak építése honosította meg. Ezekből fejlődtek a kiállítási csarnokok is, amelyek legnevezetesebbje a londoni Kristálypalota volt (21. ábra). A vasszerkezet a század közepén már más épületek homlokzatán is megjelenik. Az egyik első példa J. Bogardus New York-i Harper Bros áruháza 1854-ből. Szinte a Bauhaus szigorúan konstruktív formáit véljük felfedezni G. T. Greene 1858-ban épült csónakraktárán.^{103b)}

A vasszerkezetek elterjedéséhez hozzájárultak a fedett pályaudvari csarnokok, mert a nagy fesztávolságot csak vasszerkezettel tudták áthidalni. Ez a belsőben ugyan

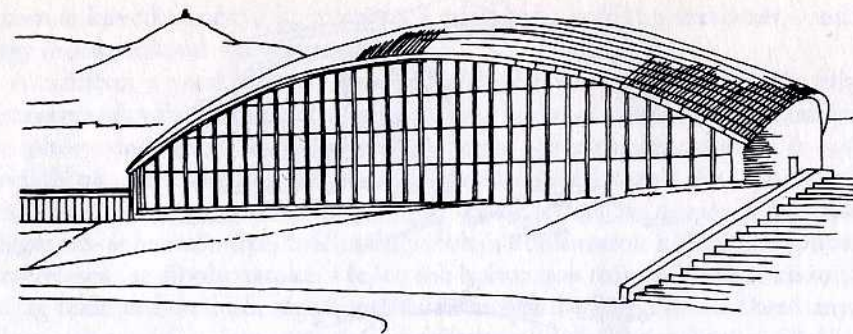


39. ábra
Az 1958. évi Brüsszeli Világkiállítás szovjet pavilonja.
Jellegzetes, acéllal kombinált alumínium szerkezet
a) alumínium, b) acél szerkezeti elemek

távolságú hangárja. Ezekon a szerkezeteken kiütközött a nyomott alumínium szerkezetek, elsősorban a keretlábak hátránya. Ezt a következő években kombinált, acél-alumínium szerkezetekkel igyekeztek elkerülni. Az új irányzat egyik legsikerültebb példája az 1958. évi Brüsszeli Világkiállítás szovjet pavilonja (39. ábra). A 150×72 m alapterületű csarnokot két sorban, 48 m távolságban elhelyezett, 20 m magas acéloszlopok osztják három hajóra. Az acéloszlopokhoz 12 m magas alumínium oszlopok csatlakoznak, amelyek csúcsából két irányba induló acélkötelek tartják az acéloszlopok végeire kereszt alakban támaszkodó 12 m-es alumínium tetőszerkezetet. E szerkezet belső tér felé nyúló szárán nyugszik a középhajó 24 m-es támaszközü függesztett alumínium-üveg tetőszerkezete, míg a külsőre az alumínium keretű üvegfal van függesztve. Ezáltal a rendszer ki van egyensúlyozva.

Időközben az alumínium szerkezetek tervezőinek figyelme egyre inkább a vékony falú sajtoltszervényekből álló térbeli rácsos szerkezetek és a merevített vékony lemezszerkezetek felé fordult. Már az ötvenes években épültek alumíniumból rácsos geodéziai kupolák, amelyeket feltalálójukról, R. B. Fullerről Fuller-kupolának is neveznek.¹⁰⁷⁾ Az elsők között megvalósított geodéziai kupola a Detroit-i Ford-művek udvarát lefedő 28 m átmérőjű félgömb kupola, 1953-ban épült. Oktaéder alakú elemekből szerelték össze, így a kupola rácsozása kétrétegű. Az elemeket 1 mm vastag alumínium lemezből hajlított rudakból állították össze. E szerkezet továbbfejlesztése a Kaiser-kupola, amelynek elemei háromszög alakú alumínium lemezek, a széleken hajlított bordákkal merevítve. Az első Kaiser-kupola 1957-ben Honolulu-ban épült, 44 m-es átmérővel. Az alumínium természetéhez kiválóan alkalmazkodik Menyhárd István pasaréti teniszcsarnoka, amely 1960-ban épült és világviszonylatban is számottevő eredmény volt. A 24×42 m alapterületű csarnokot 2 mm vastag, Nautal anyagú hullámlemezéből készített, oldalnyomásmentes translációs héj fedi le. A héj merevségét a hosszabb irányban a bordák, másik irányban alul-felül 1 m-enként rászegesztett I profilok biztosítják (40. ábra). A pasaréti Vasas teniszcsarnok szerkezeti megoldása és formái már teljesen elszakadnak az acélszerkezetektől, az alumínium anyagának megfelelőek.

Az alumínium szerkezetek további fejlődése lelassult, mert bár az új anyag sok előnyös tulajdonsága van, és hátrányainak többségét a korszerű, anyagszerű szerkesztési elvekkel ki lehet küszöbölni, nagy ára miatt mégsem versenyezhet az acéllal.



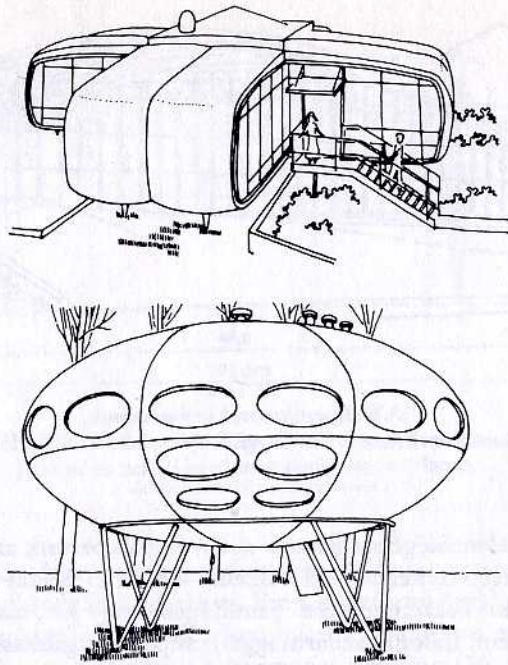
40. ábra
A budapesti pasaréti teniszcsarnok.
Az alumínium héjszerkezet világviszonylatban is kiemelkedő példája

Mégis, gyakorlati jelentőségéhez képest sokat foglalkoztunk az alumínium szerkezetekkel, mert az acélszerkezetekkel összehasonlítva jó példát mutatnak az anyag, a szerkezet és a forma összefüggésére. Tanulságos, hogy két, alapjában véve hasonló anyag (mindkettő fém, hasonló szilárdsággal) csupán a rugalmassági modulus különbözősége, és ennek következtében az eltérő alakváltozás miatt milyen más szerkesztési elveket kíván, és ennek következtében milyen eltérő formákat követel.

MŰANYAG SZERKEZETEK

A legújabb építőanyag, a műanyag, számtalan válfaja közül több tartószerkezeti célra is felhasználható.¹⁰⁸⁾ A műanyag szakítószilárdsága elég nagy, térfogatsúlya kicsi, így a σ/γ arány szempontjából kedvező, de az alumíniumnál említett alakváltozási problémák itt hatványozottan jelentkeznek. Szerkezeti célokra szinte kizárólag a textil- vagy üvegszál-erősítésű műanyagok használhatók, de még ezeknek is tetemes a gyors és különösen a lassú alakváltozása, amely ráadásul erősen függ a hőmérséklettől is. Az alaktartó műanyag szerkezetekhez leggyakrabban használt üvegszál-erősítésű poliésztergyanták szakítószilárdsága pl. $7 \dots 25$ kN/cm², térfogatsúlya csak $14 \dots 18$ kN/m³, de rugalmassági modulusa is csak $600 \dots 1500$ kN/cm², így a szerkezetben 10 kN/cm² feszültséggel és 1000 kN/cm² rugalmassági modulusal számolva az alakváltozás 1%! Ezért műanyagból csak nagy merevségű felületszerkezetek készíthetők, amelyekben az anyag kihasználási foka az alakváltozások csökkentése érdekében nagyon csekély.

A műanyagok könnyen alakíthatóak, így kiválóan alkalmasak kisebb épületek egyszerű sorozatgyártására. Az anyag természete és az alakítás miatt az éleket és hegyes csúcsokat kerülni kell, így alakult ki jellegzetes formájuk (41. ábra). Kisebb épületek céljára alkalmas az igen jó hőszigetelő tulajdonságú, kb. $0,5$ kN/m³ térfogatsúlyú polisztirolhab is. Ebből készült pl. a Bayer cég szükséglakása földrengés sújtotta vidékek lakói részére.¹⁰⁹⁾ A habanyag kis szilárdsága (kb. 2 kN/cm²) a kedvező erőjátékú kupolaforma következtében elegendő. Az épület súlya mindössze $2,5 \dots 3$ kN (ezért a talajba kell horgonyozni). Érdekes a kupola gyártása is: felfújt ballonra szórják fel 1 cm-es rétegekben a folyékonyra tett polisztirolt.



41. ábra

Műanyag lakóházak.

A műanyagok könnyen alakíthatók, így különösen alkalmasak karosszéria jellegű elemek előállítására

A műanyag igazi területei azonban a különböző pneumatikus és sátor szerkezetek, ahol a szálerősítésű ponyvák kedvező tulajdonságai jól kihasználhatók. Ezekről részletesen a szerkezetek erőjékével kapcsolatban szólunk.

A műanyag a legújabb építőanyag és már is kibontakozóban van egy érdekes szubjektív hatása: minden más építőanyagtól eltérő jellege, tulajdonságai és az ebből keletkező szokatlan és új formák miatt a műanyag épületek sokszor az elképzelt fantasztikus jövő jelképévé válnak (41. ábra).

AZ ERŐJÁTÉK HATÁSA A FORMÁRA

A szerkezeti tényezők közül kétségtelenül az erőjáték hat legjobban a formára. Ez abból is látszik, hogy a szerkezet és forma összefüggéséről beszélve általában az erőjátéknak megfelelő formára gondolunk. Sőt az anyagszerűség közismert fogalma is lényegében az erőjáték anyagban rejlő lehetőségeinek formai kibontakoztatását jelenti. Az építőanyag egyébként sem határozza meg a szerkezetet, ugyanaz a szerkezet típus többféle anyagból készíthető (pl. gerenda fából, vasból, vasbetonból stb.), sőt szélsőséges esetben húzószilárdság nélküli anyagból, így kőből is). A technológia hatása sem olyan jelentős, amellyel időben változó. A statikai törvények, a szerkezetek erőjékéke viszont nem változik, így hatása is állandó.

Az erőjáték formai hatása sem tűnik azonban teljesen egyértelműnek. Egyrészt egy adott feladat általában többféle szerkezettel oldható meg, amelyeknek más-más

a formai következménye is, másrészt a tapasztalat szerint a szerkezet – indokoltan vagy indokolatlanul – el is rejthető.

A múltban a szerkezet és forma összefüggése sokkal egyértelműbb volt, mivel a szerkezetek választéka és lehetőségei sokkal kisebbek voltak, a szerkezeti megoldás az építőmesterségben jártos tervezők szinte egyértelműen adódott, és csak a legkiválóbbak merészkedtek újszerű szerkezettel kísérletezni. Az építészettörténeti emlékeket vizsgálva azt látjuk, hogy pl. térlefedés céljára csupán a gerenda, egyes függesztő- és feszítőműves fedélszék típusok és a boltozatok különböző formái voltak ismeretesek (az álboltozatokat a fejlettebb boltozatok már az ókorban kiszorították), anyag tekintetében a kő, téglá és egyetlen húzószilárdsággal rendelkező anyag, a fa állott csak rendelkezésre. A technikai fejlettség fokából következően általában csak 15 . . . 20, rendkívüli esetben 40 m körüli feszőtávolság volt gyakorlatilag megvalósítható (annak ellenére, hogy elméletileg ennél jóval nagyobb terek lefedésére is volt lehetőség az ismert anyagok és szerkezetek felhasználásával is).

A múlt században megindult és egyre rohamosabb fejlődés azonban új anyagok (acél, beton, műanyagok) felfedezése és tömeges gyártása, valamint új szerkezet típusok kialakulása folytán egészen más lehetőségeket teremtett mind a méretek, mind az alternatív megoldások terén. Ma pl. 40 . . . 50 m körüli feszőtávolság áthidalása nem okoz különösebb problémát, sőt sok szerkezet típus közül (pl. tömör gerinclemezes tartó, síkbeli, vagy térbeli rácsostartó, ívtartó, függőtető stb.) választhat a tervező. Mégis ezek szerkezeti, építészeti és gazdasági szempontból korántsem egyenértékűek. A jó választáshoz segítséget jelenthetnek a szerkezetesztétikai vizsgálatok is.

A MÉRETEK HATÁSA A SZERKEZETRE ÉS A FORMÁRA

A tapasztalat szerint a szorosán vett szerkezeti, statikai szempontok jelentősége a szerkezet méreteivel arányosan növekszik. Míg kis méreteknél az egyéb, funkcionális, formai szempontok megelőzhetik a szerkezetieket, nagy feszőtávolság vagy nagy magasság esetén a szerkezet megválasztásakor a kedvező erőjáték döntő tényezővé válik. Ezt a többé-kevésbé tudatosan ismert tételt a modell törvények segítségével egzakt módon is bebizonyíthatjuk.

A modell kísérletek felhasználása szilárdságtani törvények felismerésére, vagy számítással nem követhető erőjátékú szerkezetek tervezésére a gyakorlati statika kialakulásával egyidős. A modell kísérletek során hamarosan kiderült, hogy bármilyen pontosan igyekeztek a szerkezetet mind arányok, mind anyag és egyéb, más szempontok szerint utánozni, a szerkezetnél lényegesen kisebb modell másként viselkedett.

A szerkezet és modell közötti különbséget, ill. hasonlóságot a modell törvény fejezi ki.

A szerkezet és a modell hasonlóságát általában a

$$k = sm$$

képlettel jellemezhetjük, ahol

k a szerkezetre (konstrukcióra) vonatkozó mennyiség,

s az arányossági tényező,

m a modellre vonatkozó mennyiség.

Ennek alapján:

$$s_L = \frac{L_k}{L_m} \quad \text{hossz-léptéktényező,}$$

$$s_F = \frac{L_k^2}{L_m^2} = s_L^2 \quad \text{területi léptéktényező,}$$

$$s_V = \frac{L_k^3}{L_m^3} = s_L^3 \quad \text{térfogati léptéktényező,}$$

$$s_\sigma = \frac{\sigma_k}{\sigma_m} \quad \text{feszültség-léptéktényező.}$$

A előbbiekből a statikai hasonlóság kifejezéséhez szükséges léptéktényezők egyszerűen meghatározhatók, pl.:

$$s_P = s_\sigma s_L^2 \quad \text{erő-léptéktényező.}$$

A mi szempontunkból még az ún. sűrűség-léptéktényezőnek van jelentősége. Mivel

$$\text{sűrűség } (\rho) = \frac{\text{tömeg}}{\text{térfogat}} = \frac{\text{súlyerő}}{\text{nehézségi gyorsulás} \cdot \text{térfogat}},$$

$$s_\rho = \frac{\rho_k}{\rho_m} = \frac{\frac{P_k}{g} \cdot \frac{1}{V_k}}{\frac{P_m}{g} \cdot \frac{1}{V_m}} = \frac{P_k}{P_m} \cdot \frac{V_m}{V_k} = s_P \cdot \frac{1}{s_V}$$

továbbá, mivel $s_P = s_\sigma s_L^2$ és $s_V = s_L^3$, ezért:

$$s_\rho = s_\sigma s_L^2 \frac{1}{s_L^3} = \frac{s_\sigma}{s_L},$$

amiből már közvetlenül adódik a számunkra fontos összefüggés:

$$s_\rho = s_\sigma s_L.$$

Szerkezettervezési szempontból különböző méretű, de azonos anyagú szerkezeteket hasonlítunk össze, tehát a sűrűség azonos, vagyis $s_\rho = 1$. Ebben az esetben

$$s_\sigma = s_L.$$

A modellben keletkező feszültség tehát arányos a léptékkal, vagyis az önsúly hatására keletkező feszültség a lépték arányában csökken. Ez egyben azt jelenti, hogy a kisebb léptékű modell – a tapasztalattal egyezően – önsúlyához viszonyítva nagyobb terhet bír. A másik irányba kiterjesztve a következtetést, *minél nagyobb egy szerkezet mérete, viszonylag annál kevesebb terhet képes hordani.*

Az elmondottakból jól látható, hogy elvileg helytelen a szerkezetek arányait abszolút méretüktől függetlenül rögzíteni, amire az építészet történetében sok példát találunk, de az eljárás a mai tervezési gyakorlattól sem idegen. A régi arányszerkesztések csak azért váltak be a gyakorlatban, mert a tervezett építmények mérete nem tért el lényegesen egymástól, legalábbis nagyságrendi különbség nem volt közöttük.

A modelltörvény sok természeti jelenség magyarázatát is megadja. Így érthető, miért lehet olyan karcsú a rovarok lába, és miért vastag az elefánté, miért nem tudnak repülni a nagy testű madarak, és miért vannak csak a mesében óriások.

A teljes hasonlóság is csak bizonyos határok között tartható a szerkezet és a modell között. A méretek csökkentésével ugyanis mint láttuk, az önsúly köbösen csökken, így egy határon túl az addig elhanyagolható erők jelentőssé válnak. Ezért áll meg a molekuláris erők hatására a vízcsepp, holott a víz folyékony anyag. A modelltörvények miatt is helytelen egy több száz méter magas torony karcsúságát egy fűszáléval

összehasonlítani (továbbá azért is, mert a fűszál alakváltozását nem tűrhetjük meg a toronynál). A nagy méret egyetlen előnye talán, hogy az épületre ható erők sokkal pontosabban előre láthatók, mint a kis méretű tárgyakra hatók (még a legváratlanabb földrengés által keltett vízszintes dinamikus erő is csak legfeljebb az önsúly 5%-a). A természeti formák közvetlen építészeti, szerkezeti felhasználása tehát semmiképpen sem indokolt (ami nem zárja ki azt, hogy a tervező a természeti analógiából ötletet merítsen, de ezt alkalmazni kell az épület eltérő körülményeihez és feltételeihez).

Szerkezet és forma kapcsolata szempontjából még nagyobb jelentőségű a modell-törvényekből levonható másik következtetés, hogy ha a méretekkel a szerkezetnek nemcsak az abszolút, hanem a relatív súlya is növekszik, kell lennie egy felső határnak, amelyen túl a szerkezet már saját súlyát sem képes hordani. A szerkezeteknek ez a határmérete viszonylag könnyen meghatározható. Már a 72. oldalon láttuk, hogy a szerkezeti anyagok jellemzője a σ/γ arány, amely tulajdonképpen az adott anyagból készíthető leghosszabb állandó keresztmetszetű, csak saját súlyával központosan terhelt elem hossza.

A σ/γ hosszúság természetesen csak elméleti jelentőségű és a különböző építőanyagok többé-kevésbé helyes összehasonlítására ad módot. Ha konkrét szerkezetet akarunk megvalósítani, bizonyos paraméterek bevezetése szükséges ahhoz, hogy eredményt kapjunk. Így ha csak az egyszerű felfüggesztett kötél maximális hosszát keressük, figyelembe kell vennünk a teljes teher és az önsúly arányát, célszerűen a $\rho = q/g$ tényezővel, ahol q a kötél teljes terhelése, g az önsúly. Hasonlóképpen, ha a mai méretezési eljárás értelmében σ -n a határfeszültséget értjük, a biztonsági tényezőnek is szerepelnie kell, amit jó közelítéssel átlagosan $k=1,2$ értékkel vehetünk figyelembe. A kötéltre ható külső erő így:

$$N_k = k_{\rho} q = k_{\rho} F l.$$

A kötél határerője:

$$N_b = F \sigma.$$

$$\text{A kettő egyenlőségéből } l = \frac{1}{k_{\rho}} \cdot \frac{\sigma}{\gamma}.$$

l helyébe l_H -t írva (határhosszúság) és a λ jelölést bevezetve:

$$l_H = \lambda \cdot \frac{\sigma}{\gamma}, \quad \text{ahol } \lambda = \frac{1}{k_{\rho}}.$$

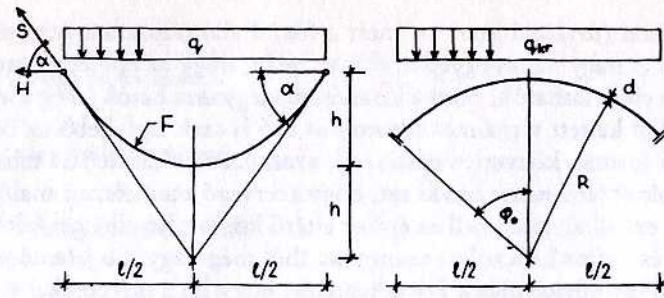
λ az adott szerkezetre nézve jellemző tényező, amely megmutatja, hogy a σ/γ – anyagra jellemző – hosszúság hányad részét érheti el a szerkezet.

Például a szokásos acélminőség (A 38) esetén, ha a kötelet önsúlyának háromszorosra terheli ($\rho=3$):

$$\lambda = \frac{1}{1,2 \cdot 3} = 0,28 \quad \frac{\sigma}{\gamma} = \frac{200\,000 \text{ kN/m}^2}{78,5 \text{ kN/m}^3} = 2548 \text{ m},$$

ebből $l_H = 0,28 \cdot 2548 = 708 \text{ m}$.

A függőlegesen felfüggesztett kötél határhosszúságának alig van gyakorlati jelentősége. Annál érdekesebb a két pont közé függesztett kötél – kábel vagy lánc – vizsgálata. A hidépítésben már régóta alkalmazzák ezt a sok szempontból kedvező tulajdonságú szerkezetet, újabban pedig a magasépítésben is elterjedt, mint a függőtörök tartószerkezete. A kötél határfeszításválságát az előzőhöz hasonló, de kissé bonyolul-



42. ábra
A határfesztávolság vizsgálata
kötél és gömbhéj statikai vázlata

tobb számítással határozhatjuk meg. A terheket az egyszerűbb számítás érdekében, vízszintes vetületben egyenletesen megoszljának tételezzük fel, mivel ez a közelítés a gyakorlatban szóba jövő, viszonylag kis ívmagasságoknál az önsúlyból származó igénybevételekben sem jelent számottevő hibát.¹¹⁰⁾ A szerkezet sémája a 42. ábrán látható. A felvett teher esetén a kötél parabola alakot vesz fel.

A kötél belógását $\chi = h/l$ -lel jellemezve, az előbbi $q = q/g$ és k jelölést alkalmazva, a kötél erő vízszintes komponense az ismert összefüggés alapján:

$$H = \frac{kqgl}{8\chi} = \frac{kqFyl}{8\chi}$$

A maximális kötél erő a felfüggesztésnél keletkezik:

$$S_k = \frac{H}{\cos \alpha}$$

α a kötél parabola alakját figyelembe véve könnyen meghatározható, mivel $\tan \alpha = 4\chi$, ebből

$$\cos \alpha = \frac{1}{\sqrt{16\chi^2 + 1}}$$

$$\text{tehát } S_k = \frac{kqFyl \sqrt{16\chi^2 + 1}}{8\chi} l$$

A kötél határerője $S_b = F\sigma$, $S_k = S_b$ -ből

$$l_H = \lambda \frac{\sigma}{\gamma}, \text{ ahol } \lambda = \frac{8\chi}{kq \sqrt{16\chi^2 + 1}},$$

λ értékeit a szokásos χ arányok esetén $q = 1$ és $k = 1,2$ figyelembevételével a következő táblázat tartalmazza:

$\chi = h/l$	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1	0,05
λ	1,491	1,413	1,280	1,041	0,619	0,327

Például, ha $\chi = 0,1$ (vagyis a kötél belógása a fesztáv tizedrésze) és $q = 10$ (a teljes teher – a kötél önsúlya, a héjazat súlya, a feszítőkötélekből adódó terhelés, az esetleges teher stb. – a kötél súlyának tízszerese), nagy szilárdságú acél ($\sigma_H \approx 500\,000 \text{ kN/m}^2$, $\gamma = 78,5 \text{ kN/m}^3$) alkalmazása esetén $\sigma/\gamma = 6369 \text{ m}$, a $\chi = 0,1$ -hez tartozó $\lambda = 0,619$ a táblázat szerint, tehát

$$l_H = \frac{0,619}{10} \cdot 6369 = 394 \text{ m.}$$

A táblázatból is látható, hogy a λ értékek meglehetősen tág határok között változnak. A nagy λ érték nagy fesztávolságot, de egyben nagy anyagfelhasználást jelent. A táblázat a $q = 1$ -hez tartozó λ -kat adja meg, ami azt jelenti, hogy ilyenkor a kötél csak saját magát hordja. Minél nagyobb a q , annál gazdaságosabb a szerkezet, de az elérhető fesztáv ezzel fordított arányban csökken.

További példaként vizsgáljuk meg a gerendatartó esetét. A lehetőség szerinti általános érvényű megoldás és a bonyolultabb erőjáték miatt itt már olyan sok jelölést és paramétert kell bevezetnünk, hogy célszerű ezeket előbb külön összefoglalni:

- b a keresztmetszet legnagyobb szélessége,
- d a keresztmetszet magassága,
- l a tartó fesztávolsága,
- g a tartó önsúlya,
- q a tartó teljes terhének intenzitása,
- k a biztonsági tényező, $k \approx 1,2$,
- $\beta = b/d$ a keresztmetszet aránya,
- $\delta = d/l$ a relatív tartómagasság,
- $\varphi = F/bd$ a keresztmetszet könnyítésének mértéke,
- $\kappa = K/bd^2$ a keresztmetszet nyomatek bírásának jellemzője (K itt nem a rugalmas alapon történő számításnál szokásos keresztmetszeti tényező, hanem általában az M_H/σ hányados),
- $\mu = M/q l^2$ a nyomaték jellemzője,
- $\varrho = q/g$ a teljes teher és az önsúly aránya.

A hat görög betűvel jelzett paraméter előnye elsősorban nem a számítás egyszerűsítése, hanem az, hogy viszonylag általános érvényű összefüggés felírását teszi lehetővé. Így a β és a φ tényező változtatásával tetszőleges keresztmetszeti alak állítható elő, κ e tetszőleges keresztmetszet nyomatek bírásának jellemzését rugalmas, képlékeny vagy egyéb módon adhatja meg (meg kell jegyezni, hogy φ és κ természetesen nem független egymástól). A μ paraméter segítségével tetszőleges terhelést, a többtámaszúságot, a különböző elméleteken alapuló nyomatékszámítás eredményeit, a kétirányú teherviselést, a szélső igénybevételi eseteket, sőt a változó keresztmetszetet is többé-kevésbé pontosan figyelembe vehetjük.

A külső nyomaték gerenda esetében tehát:

$$M_K = k\mu\varrho gl^2 = k\mu\varrho\varphi b d \gamma l^2 = k\mu\varrho\varphi\beta\delta^2 \gamma l^3$$

A keresztmetszet határnyomatéka:

$$M_B = K\sigma = \kappa b d^2 \sigma = \kappa\beta\delta^3 \sigma l^3$$

A két nyomaték egyenlőségéből:

$$l_H = \lambda \frac{\sigma}{\gamma}, \text{ ahol } \lambda = \frac{\kappa\delta}{k\varrho\mu\varphi}$$

λ értékeit δ és μ függvényében a következő táblázatban találjuk. A táblázat $k = 1,2$, $q = 1$ és $\kappa/\varphi = 0,3$ figyelembevételével készült. A $\kappa/\varphi = 0,3$ a gyakorlatban szokásos gazdaságos kialakítású közönséges vagy feszített vasbeton és acélgerenda-keresztmetszetek esetén elég jó közelítés. A 0,3-tól eltérő κ/φ esetén a táblázat értékei lineárisan változnak. Ha $\varphi \neq 1$, a táblázat értékeit q -val osztani kell.

$\delta \backslash \mu$	$\frac{1}{8} = 0,125$	$\frac{1}{10} = 0,100$	$\frac{1}{12} = 0,083$	$\frac{1}{14} = 0,071$	$\frac{1}{16} = 0,063$	$\frac{1}{20} = 0,050$
$\frac{1}{10} = 0,100$	0,200	0,250	0,301	0,352	0,396	0,499
$\frac{1}{15} = 0,067$	0,133	0,166	0,200	0,234	0,264	0,333
$\frac{1}{20} = 0,050$	0,100	0,125	0,151	0,176	0,198	0,250
$\frac{1}{25} = 0,040$	0,080	0,100	0,121	0,140	0,159	0,200
$\frac{1}{30} = 0,033$	0,067	0,083	0,100	0,118	0,132	0,166

A gerendák határfesztávolságát is vizsgáljuk meg néhány példán:

1. Mekkora lehet a fesztávolsága egy többtámaszú, állandó keresztmetszetű, B200 minőségű betonból készülő vasbeton gerendának, ha azt akarjuk, hogy magassága a fesztáv 1/10-e és teljes terhelése önsúlyának ötszöröse legyen?

$$\text{A feladat szerint } \frac{\sigma}{\gamma} = \frac{10\,000 \text{ kN/m}^2}{25 \text{ kN/m}^3} = 400 \text{ m,}$$

$\delta = 0,1 \mu \approx 1/16$ (a legkedvezőbb esetben, ha $|+M_{\max}| = |-M_{\max}|$), $\varrho = 5$. A táblázat szerint $\lambda = 0,396$, így

$$l_H = \frac{0,396}{5} \cdot 400 = 31,7 \text{ m.}$$

2. Mekkora a maximális fesztávolsága egy csak saját súlyával terhelt, kéttámaszú, négyzet alaprajz fölé szerkesztett, két irányban teherbíró lemeznek B200 minőségű beton és $\delta = 0,05$ arány esetében?

Az adatok szerint $\sigma/\gamma = 400 \text{ m}$ (mint előbb), $\varrho = 1, \mu \approx \frac{1}{8} \cdot \frac{1}{3} = \frac{1}{24}$,

$\lambda = 0,302$ (a táblázat $\mu = \frac{1}{12}$ értékéhez tartozó λ kétszerese), tehát

$$l_H = 0,302 \cdot 400 = 120,8 \text{ m.}$$

(A $\delta = 0,05$ arány szerint a lemez vastagsága 6 m, ami természetesen nem tömör, hanem bordázott kialakítású, ezt különben a $\kappa/\varphi = 0,3$ értékkel hallgatólágyosan már figyelembe vettük.) Ha ugyanez a szerkezet csak egy irányban teherbíró, $l_H = 0,100 \cdot 400 = 40,0 \text{ m}$.

A szokásos gerendatartók, mint közismert – és a levezetett képletekből is látható – nagy fesztávolságoknál rendkívül nagy anyagfelhasználással járnak.¹¹¹⁾ Az önsúly csökkentése a keresztmetszet nagyfokú könnyítését kívánja (amely természetesen a stabilitásvesztés veszélyével jár együtt, a szükséges merevítőszervezetek miatt ezért a nyereség nem akkora, mint első pillanatban látszik). Ilyen könnyített gerendatartók a rácsostartók is, amelyek határfesztávolsága is hasonlóan állapítható meg, de még több és nehezen meghatározható paraméter bevezetését teszi szükségessé.¹¹²⁾

A nagy terek lefedésére alkalmas héjszerkezetek határfesztávolságának megállapítása is érdeklődésre tarthat számot. A sokféle héjforma közül a viszonylag egyszerűen tárgyalható gömbkupola esetét ragadjuk ki. Az erre vonatkozó eredmények természetesen a többi héjformára, különösen az elliptikus felületekre nézve is legalább nagyságrendi tájékoztatást adnak. A héjkupola vizsgálata az eddigiektől annyiban tér el, hogy – nagyrészt nyomott szerkezet lévén – itt a fesztávolságnak a stabilitási feltételek ki-elégítése szab határt. Ennek megfelelően a számításban σ helyett az E rugalmassági modulus szerepel.¹¹³⁾

Ismeretes, hogy a gömbkupola kihajlása

$$q_{kr} = cE \frac{d^2}{R^2}$$

kritikus tehernél következik be. A határfesztávolság meghatározásához az előbbi összefüggést kissé átalakítjuk. Az előzőkhöz hasonlóan bevezetjük a $\varrho = q/g$ és a $\delta = d/l$ jelölést, ahol l a kupola alapkörének az átmérője. A 42. ábrából láthatóan $R = \frac{l}{2\sin\varphi_0}$.

$$R = \frac{l}{2\sin\varphi_0}$$

Figyelembe véve, hogy $g = d\gamma = \delta\gamma l$, és a k biztonsági tényezőt alkalmazva a kihajlás képlete a következő alakot ölti:

$$k\varrho\delta\gamma l = cE \frac{\delta^2 l^2}{l^2}, \text{ ebből}$$

$$4\sin^2\varphi_0$$

$$l_H = \lambda \frac{E}{\gamma}, \text{ ahol } \lambda = \frac{4c\delta\sin^2\varphi_0}{k\varrho}$$

A c tényező megállapításának gazdag irodalma van, értékét Csonka nyomán megfelelő biztonsággal 0,05-nek vehetjük.¹¹⁴⁾ Nincs akadálya, hogy az l_H képletét az előzőkhöz hasonlóbbá alakítsuk. A φ_0 szög helyett bevezethető itt is a $\chi = h/l$ arány, és a szokott σ/γ is, mivel E/σ adott anyagra nézve állandónak vehető. Így azonban bonyolultabb összefüggést kapnánk, ami már azért sem indokolt, mert a héjkupola határfesztávolságának megállapításához felhasznált q_{kr} érték csak jó közelítésnek tekinthető, tehát az ebből kapott l_H átmérők is csak tájékoztató jellegűek.

Az l_H meghatározásához felhasznált q_{kr} képlet tömör keresztmetszetű héjakra érvényes. Nagy fesztáv esetén kézenfekvő a szerkezet könnyítése, amely ugyan csökkenti a merevséget és ennek következtében a kritikus erőt, de csökkenti az önsúlyt is, amely mindig a teher jelentős hányadát teszi ki. Ez utóbbi hatás – helyes szerkezeti megoldás esetén – nagyobb mértékű, és segítségével a határfesztávolság 1,5 . . . 2-szeres növelése is elérhető.

Példaképpen számítsuk ki egy gömbkupola határfesztávolságát, amelynél $\varphi_0 = 25^\circ$ (az ennek megfelelő ívmagasság/fesztáv aránya kb. 1/10). Legyen $\delta = 0,01$ (ami meglehetősen vastag héjat jelent), $\varrho = 2$ (a héjszerkezet általában tetőfödém, így a hó- és szélterheken kívül legtöbbször csak a könnyű héjazatot hordja). Alkalmazzunk B200 minőségű betont, így – tekintettel arra, hogy a terhek legnagyobb része állandó teher – $E \approx 1000 \text{ kN/cm}^2 = 10\,000\,000 \text{ kN/m}^2$, $\gamma = 25 \text{ kN/m}^3$,

$$\lambda = \frac{4 \cdot 0,05 \cdot 0,01 \cdot 0,423^2}{1,2 \cdot 2} = 0,000\,149,$$

$$\frac{E}{\gamma} = \frac{10\,000\,000}{25} = 400\,000 \text{ m,}$$

$$l_H = \lambda \frac{E}{\gamma} \approx 60 \text{ m.}$$

A határfesztávolságok vizsgálata sok jelentős elméleti és gyakorlati kérdést vet fel. Megállapíthatjuk az egyes szerkezet típusokkal elérhető legnagyobb fesztávolságot, amely a $\varrho = 1$ értékhez tartozó, szerkezetre jellemző λ tényező és az anyagtól függő σ/γ hosszúság szorzata. A $\varrho = 1$ érték annak az esetnek felel meg, amelynél a szerkezet csak saját magát képes már hordani. Ez természetesen legfeljebb emlékműszerű, használati célt nem szolgáló építményeknél közelíthető meg, minden más esetben $\varrho \gg 1$.

A határméret kérdése így elméletileg teljesen tisztázottnak látszik, de egy érdekes új hipotézis ezzel kapcsolatban is új szempontokat vet fel. Szabó Géza új feszültség-elmélete¹¹⁵⁾ ha megbízható kísérletekkel igazolható lesz, az egész szilárdságtant forradalmasítja, de a határméretek és általában a szerkezet és forma kapcsolatában is új felismerésekhez vezethet. Az elmélet abból a nagyon valószínű feltevésből indul ki, hogy a szilárd testek terheletlen állapotban sem feszültségmentesek, mert a szilárdság az anyag részecskéi közötti vonzás, ill. taszítás következménye. Ebből viszonylag nagyon egyszerű gondolatmenettel az a következtetés vonható le, hogy a szilárdság nem az anyagot jellemző állandó, függ a test méretétől és formájától. Minél nagyobbak a test méretei, szilárdsága viszonylag annál kisebb. Az összefüggés nem is lineáris, éppen a nagy keresztmetszetenél ad nagyon kis értéket. Az elmélet tehát éppen a határméretekhez közelítő, nagy szerkezetekről megállapított egyszerű összefüggéseket teszi kérdésessé. (A szilárdság változása nem is egy irányú, mert pl. a kis keresztmetszetű huzalokból készített kötéll szilárdsága valószínűleg nagyobb, míg egy nagy beton keresztmetszeté kisebb, mint a ma ismert törő-, ill. szakítószilárdság.) Az új feszültségelmélettel mégis nem most foglalkozunk részletesen, hanem a IV. fejezetben, mivel ott szólunk a formának a szerkezetre gyakorolt hatásával.

A határméretek vizsgálata tehát arra az eredményre vezet, hogy bizonyos szerkezet típusok, így pl. a hajlított tartók alkalmazása, már a gyakorlatban előforduló fesztávok esetében is lehetetlenné válik. A legkedvezőbb rácsos gerendatartók fesztávolsága sem haladhatja meg az 5 . . . 600 m-t.¹¹⁶⁾ Hídszerkezeteknél, ahol az adott természeti akadályok leküzdése miatt már régen lényegesen nagyobb fesztávolságok fordultak elő, mint a magasépítésben, ezt a nyílásméretet túl is haladták. Ilyen esetben nincs más lehetőség, mint az ívtartó vagy a függőhíd. A legnagyobb fesztávolságok a kötél szerkezetekkel érhetők el. Itt a lehetőségek még mindig nagyok annak

ellenére, hogy pl. a világ egyik legnagyobb feszítávolságú hídjának, a New York-i Verrazano-hídnak szabad nyílása 1298,45 m (93. ábra). (A hidat 1964-ben, a budapesti Erzsébet-híddal egy napon nyitották meg.) Érdekes az előbbi számítást ezzel a híddal kapcsolatban is elvégezni. A $\chi = b/l$ arány itt a kábelek 117,36 m-es belógását figyelembe véve $1/11 = 0,091$ -nek vehető. A kábel λ értékeihez adott táblázatból interpolálva $\lambda \approx 0,566$. A felhasznált nagyszilárdságú acél megengedett feszültsége $61,5 \text{ kN/cm}^2$.^{116a)} $l_H = 1298,45 \text{ m}$ esetén tehát

$$1298,45 = \frac{0,566}{\rho} \frac{615\,000 \cdot 1,2}{78,5}, \text{ ebből } \rho \approx 4,1,$$

ami azt mutatja, hogy a feszítáv még az adott χ arány esetében is tovább növelhető, $\rho = 3 \dots 4$ értékig ugyanis a szerkezet gyakorlatilag megvalósítható. Az anyagfelhasználás azonban rohamosan nő ilyenkor, pedig az már a Verrazano-hídnál is jelentős, mintegy 150 000 t (csak a 4 db, egyenkint 26 108 db $\varnothing 5 \text{ mm}$ -es elemből készült fő tartókötel tömege 16,4 t/m!).

A határméreték felismerése a szerkezet és forma közötti összefüggés egyik teljesen egzakt oldalát mutatja meg. Bizonyos méretek felett nem lehet már a szerkezetet formai (vagy egyéb) igények szerint megválasztani. Ez az eljárás csak kisebb méreteknél követhető, ahol az építési feladat szem előtt tartásával helyes is lehet. Ilyenkor pl. egyáltalán nem csupán szerkezeti szempontok döntenek el, hogy vízszintes (hajlított) vagy íves (pl. nyomott) szerkezetű áthidalást célszerű-e választani. Nagy méreteknél azonban a szerkezet jelentősége – a tapasztalattal egyezően, de egzakt módon is bizonyíthatóan – növekszik. Először csak gazdasági megfontolások vezetnek a kedvezőbb erőjátékú megoldás felé, míg a méretek további növekedése után a szerkezet abszolút követelményeket támaszt (pl. nem készíthető gerendatartó), sőt nemcsak a szubjektív formai elképzelések megvalósítását teszi lehetővé, de döntő módon szól bele az építési feladat követelményeinek kielégítésébe is.

Mindez nem zárja ki, hogy adott esetben szubjektív igények kívánják meg a nagy méreteket. Ilyen pl. a reprezentációs igény, a hatalom, a gazdaság, vagy éppen a szerkezeti tudás szándékos kifejezése. Az elmondottak szerint azonban nem igényel magyarázatot, hogy az ilyen indokok alapján megtervezett nagy méretű szerkezetek, épületek nem valósíthatók meg az erőjáték figyelembevétele és ennek formai következményei nélkül.

A méretek növekedésével tehát mint láttuk, szűkül a szerkezetek választéka, emellett a levezetett alapösszefüggés ($l_H = \lambda \frac{\sigma}{\gamma}$) szerint egyre fokozódik a nagy szilárdságú és viszonylag kis térfogatsúlyú anyagok alkalmazásának (σ/γ arány növelése, pl. nagy szilárdságú acélok, alumínium), valamint a szerkezetre jellemző paraméterek helyes megválasztásának jelentősége. A térigény növekedése tehát egyre inkább meghatározza a szerkezetek anyagát és formáját, és ezen keresztül az építészeti alkotást. Nervi szerint itt az emberi kultúra legnagyoserűbb jelenségének vagyunk tanúi: az egész emberiség közös kincsét képező építészeti stílus kialakulásának, amely a természet törvényein állva nem tűr meg egyénieskedést, hanem az objektív igazság fokozatos megközelítése által valósul meg.¹¹⁷⁾ Nervi példát is említ, a közlekedési eszközöket. A lovaskocsi formáit – az egyszerű funkcionális követelmények kielégítésén túl – szabadon lehetett megtervezni. A gyorsabb gépkocsinál a légellenállás miatt már nem közömbös a forma, az önkényes formatervezés gazdaságtalanná teszi a járművet, mivel ugyanazt a célt a nagyobb légellenállás miatt

csak több üzemanyag-fogyasztással tudja elérni. A mai, a hangnál nagyobb sebességgel közlekedő repülőgépek formáit viszont az aerodinamikai törvények egyértelműen meghatározzák, elképzelhetetlen lenne az így adódó formákon esztétikai megfontolások szerint változtatni. De azt tapasztaljuk, hogy a fizikai törvényekből adódó formák szépek, sőt a szerkezettervezésnél korábban említett „esztétikai kontroll” itt is használható, mert a csúnya forma a tervezés közben elkövetett hibára hívja fel a figyelmet. Így valószínűleg az építőművészetet sem kell féltenuünk a statikai törvények fokozott érvényesülésétől, az „abszolút formák” terjedésétől.

A SZERKEZETEK ERŐJÁTÉKÁNAK FORMAI KÖVETKEZMÉNYEI

Bármennyire lényeges és érdekes elméleti kérdés a határméretek vizsgálata, az építészet mai gyakorlatában még nincs nagy jelentősége, mivel korunkban a szerkezetek fejlődése – ellentétben az építészet korábbi korszakaival – előbbre jár, mint a térigények. (Nem mondhatjuk el ugyanezt pl. a hídépítésről, ahol a természeti akadályok leküzdése és a funkcionális igény – a hajózás zavartalansága – sokszor a határfeszítávolságot megközelítő méretű áthidalásokat tesz szükségessé. Így a hídépítés az építészet számára is tanulságos eredményeket ért el, ezért az egyes szerkezettypusok tárgyalásánál több hidat is meg fogunk említeni.)

A szerkezet – és ennek következtében az épület – gazdaságossága, amely sok esetben a megvalósítás feltétele, kisebb méreteknél is fontossá teheti a kedvező erőjátékú szerkezetek választását, és ennek természetesen formai hatásai is vannak. Nem hanyagolható el a szerkezetek építészeti kifejezőerejének tudatos felhasználása sem, amely indok arra, hogy a szerkezetek erőjátékának formai hatását részletesebben elemezzük.

Míg régebben, a XIX. századig, csak néhány szerkezettypus volt ismeretes, ma a szerkezetek – és szerkezeti anyagok – olyan választéka áll rendelkezésünkre, amelyek hiánytalan felsorolása is szinte lehetetlen. Ezért meg kell elégednünk a főbb, jellegzetes szerkezettypusok vizsgálatával.

Már a szerkezetek osztályozása is nehéz feladat. A szerkezettervezés irodalmából két osztályozási rendszer figyelemre méltó. Engel a szerkezetek öt alaptípusát különbözteti meg:

1. „Formaaktív” szerkezeti rendszerek (alakjukat a terhelés határozza meg – pl. függőtető);
2. „Vektoratív” szerkezeti rendszerek (a terheket komponensekre bontva veszik fel – pl. rácsostartó);
3. „Tömögaktív” szerkezeti rendszerek (pl. gerenda);
4. „Felületaktív” szerkezeti rendszerek (pl. héj);
5. Függőleges szerkezeti rendszerek.¹¹⁸⁾

Pelikán szerkezetosztályozási rendszere különös figyelmet érdemel, mivel több lényeges jellemzőt vesz egyidejűleg figyelembe, és segítségével egy szerkezeti rendszer célszerűségére nézve egyszerűen következtetni lehet.¹¹⁹⁾ A szerkezetet három számmal jellemzi, amelyek közül az első – egész szám – az igénybevétel módját, a második – közönséges tört – a teherhordás módját, végül a harmadik – tizedes tört – a szerkezet alakját jellemzi. Az adott szempontból legkedvezőbb szerkezetet kapja a legkisebb számot, a legkedvezőtlenebb a legnagyobbat, így az osztályozó számok összege a szerkezet célszerűségére nézve támpontot nyújt, különböző megoldások

összehasonlítását teszi lehetővé. Például az igénybevételi módoknál a legkedvezőbb központos igénybevétel jele 1, a legkedvezőtlenebb általános – a gyakorlatban legtöbbször hajlító – igénybevételé 5, így minél kisebb az osztályozó számok összege, annál célszerűbb – általában egyben gazdaságosabb – a szerkezet. A részletesebb ismertetéstől azonban itt eltekintünk, mivel az idézett, könnyen hozzáférhető irodalom ezt az osztályozási rendszert részletesen kifejti.

Más felosztás a szokásos méretű és a nagy szerkezetek kategóriáját állítja fel, ami a szerkezetek méretének jelentőségét ismerve logikusnak látszik.

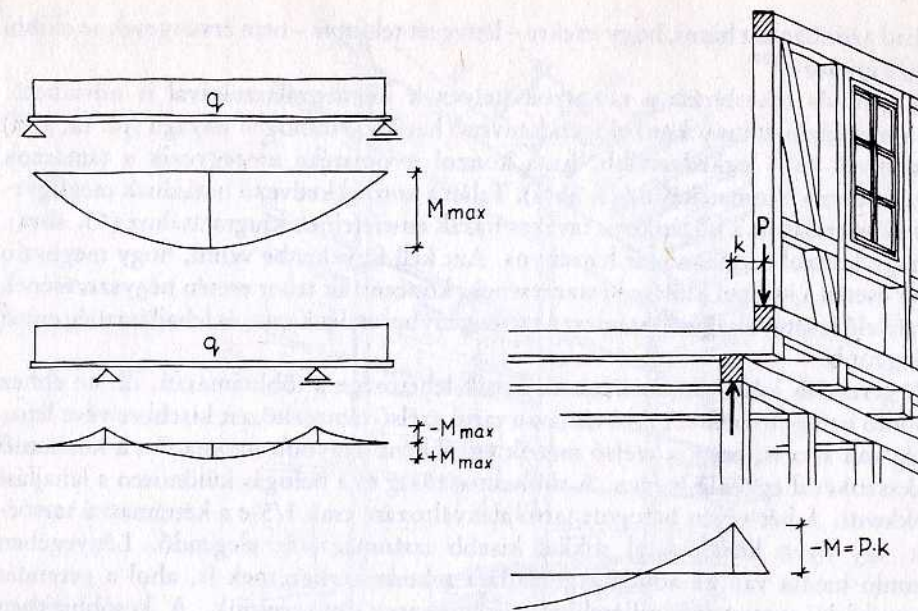
A legáltalánosabb, a továbbiakban általunk is követett osztályozás a szerkezetek építészeti funkciójából kiindulva, a térlefedések és a függőleges teherhordó szerkezetek fő csoportját különbözteti meg. A térlefedések lehetnek hajlítottak, nyomottak és húzottak (itt természetesen csak a tipikus igénybevételeket tekintve), továbbá ezek mindegyike lehet síkbeli vagy térbeli, ami az erőjátékban szintén alapvető különbséget jelent. A függőleges teherhordó szerkezetek további osztályozása szintén lehetséges az előző szempontok szerint, de a további felosztásnak itt kisebb a jelentősége. Külön tárgyalást igényelnek azonban a különleges problémákat felvető magas építmények (toronyok, magasházak).

A szerkezetek osztályozásánál más szempont is felmerül. Minden szerkezetnek van egy alapvető statikai modellje, amely az erőjátékra nagy vonalakban jellemző, és van struktúrája, szerkezete abban az értelemben, ahogy erről az I. fejezetben már szóltunk. Azt értjük ezen, hogy a szerkezeti modell csak a szerkezetnek, mint egésznek az erőjátékát jellemzi, a szerkezet egyes részeinek működése azonban már erősen függ a szerkezet felépítésétől, a struktúrától. Nagyjából ugyanez vonatkozik a formai megjelenésre is, azzal a különbséggel, hogy ebben a struktúra talán nagyobb hangsúlyt kap. E látszólag elvont kérdést egy példával világíthatjuk meg. Vizsgáljunk meg egy egyszerű kéttámaszú gerendatartót. Erőjátékát a nyíróerő- és nyomatékbárával jellemezhetjük. Ez bármilyen felépítésű gerendára érvényes. De a gerenda megvalósítható – többek közt – tömör, homogén keresztmetszettel és rácsostartóként. Egy tetszőleges metszetet felvéve a tömör gerendában, a homogén keresztmetszetben keletkező húzó-, nyomó- és nyírófeszültségek egyensúlyozzák a külső erőket, a rácsostartóban pedig a három központos rüderő. Így, bár a rácsosan kialakított gerenda is végül nyomatékot és nyíróerőt vesz fel, egyes elemei csak központos igénybevételt kapnak. Az eltérő struktúra természetesen a formában is megmutatkozik, sőt jellemzővé válik, így csak a szakember veszi észre, hogy lényegét tekintve a két szerkezet azonos. Az elmondottak természetesen általános érvényűek, így vannak pl. rácsos héjszerkezetek, sejszerű elemekből összeépített lemezek, lemezű keretek, héjszerkezetű ívtartók stb. Az egyes szerkezet típusok tárgyalásánál több ilyen példát fogunk látni.

HAJLÍTOTT SZERKEZETEK

Síkbeli hajlított szerkezetek (gerendák)

A gerenda a legősibb szerkezetek közé tartozik. Használatára valószínűleg a természet tanította meg az embert a természeti akadályokon, patakon, árkon véletlenül átdőlt fa útján. Valószínűleg ezért hat a legegyszerűbb, legtermészetesebb szerkezetnek, amelynek erőjátékát ösztönösen érezzük, holott a valóságban bonyolultabb, mint pl. a boltív. Igaz, hogy a gerenda építéstechnológiai szempontból sokkal egy-



43. ábra

A konzol hatása az erőjátékra.

A konzol az erőjátékot kedvezőbbé teheti; talán ezt érezték már a középkori favázas házak építői is

szűrűbb, és általában a támaszokra is csak függőleges erőt ad át, így szükségtelenné teszi a ferde reakcióerő vízszintes összetevőjének mindig szerkezeti problémát jelentő felvételét. A nyomott szerkezetekkel szemben további előnye, hogy a hajlított szerkezet stabilitásvesztése csak ritkán (pl. igen karcsú acélgerendáknál) jelent veszélyt.

Bár a gerenda a legegyszerűbb szerkezetnek számít, itt is a szerkezet és forma számátalan kapcsolatát fedezhetjük fel. Először csak a legegyszerűbb esetet, a négyzetes keresztmetszetű gerendát vizsgáljuk meg, hogyan alkalmazkodhat ez az egyszerű szerkezet az igénybevételek változásához (a terhek vagy fesztávolság növekedéséhez). A hajlított keresztmetszet által felvehető nyomatékot a keresztmetszettől függő K tényező és az anyagban megengedhető σ feszültség szorzata adja.¹²⁰⁾

$$M = K\sigma = \kappa b d^2 \sigma.$$

Az egyszerű összefüggés mutatja, hogy az anyagminőségtől és a keresztmetszet szélességétől csak lineárisan függ a nyomatékbírás, a magasságtól viszont négyzetesen, tehát az igénybevétel növekedésével – amely legtöbbször a fesztáv építészeti szempontok szerinti növelésének következménye – a gerenda magassági méretét is növelni kell. Különösen fontos ez, ha nem engedjük meg az alakváltozások túlzott növekedését, aminek gerenda esetében legtöbbször szintén elsődlegesen esztétikai jelentősége van (mint láttuk, hátrányosan hat a biztonságélményre). Az alakváltozás ugyanis a gerenda magasságának negyedik hatványával arányos (a kétszeres magasságú gerenda lehajlása csak az eredetinek 1/16-a!).

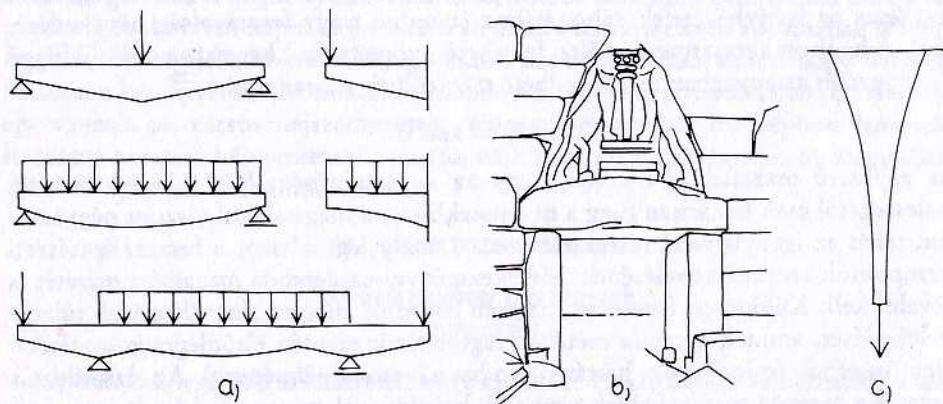
Különleges helyet foglalnak el ilyen szempontból a vasbeton gerendák, amelyek nyomatékbírása bizonyos határok között a vasalás növelésével fokozható. Nem

szabad azonban azt hinni, hogy ezekre – lényegét tekintve – nem érvényesek az előbbi megállapítások.¹²¹⁾

A gerenda teherbírása a támaszok helyének jó megválasztásával is növelhető. Pl. a megfelelő arányú konzol igen kedvező hatású. Homogén anyagú (pl. fa, acél) gerendánál az a legkedvezőbb, ha a konzol nyomatéka megegyezik a támaszok közötti mező nyomatékával (43. ábra). Talán a konzol kedvező hatásának megfigyelése is hozzájárult a középkori favázas házak emeleteinek kiugratásához (43. ábra). A nagy konzol azonban már hátrányos. Azt kell figyelembe venni, hogy megoszló teher esetén a konzol kiülése kétszeresének, koncentrált teher esetén négyszeresének megfelelő fesztávolságú, kéttámaszú tartó igénybevételét kapja, és lehajlása még ennél is nagyobb.

A gerendák jobb kihasználásának másik lehetősége a többtámaszú, ill. az ehhez hasonló befogott tartó. A többtámaszú tartó szélső támaszközeit kisebbre véve lehetőség van arra is, hogy a szélső mezők egyébként nagyobb nyomatéka a közbelső szakaszokéval egyenlő legyen. A többtámaszúság és a befogás különösen a lehajlást csökkenti. A két végén befogott tartó alakváltozása csak 1/5-e a kéttámaszú tartónak, így ilyen kialakítással sokkal kisebb tartómagasság elegendő. Lényegében hasonló hatása van az áthidaló gerendára a keretszerkezetnek is, ahol a gerendát a megfelelő merevségű pillérekkel sarokmereven összeépítjük. A későbbiekben a keretszerkezetek többféle megoldását fogjuk még látni (132. ábra).

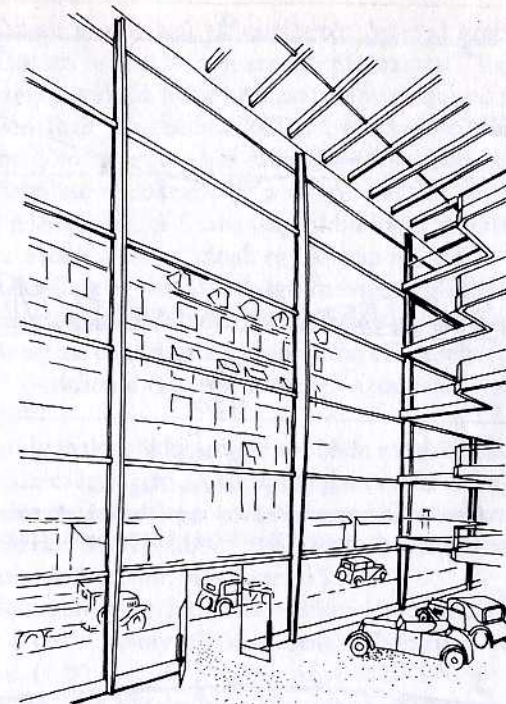
Az erőjátékot változó keresztmetszetű gerendával követni is lehet. Az elvileg ideális, ún. egyenszilárdságú tartó magassága (esetleg szélessége) követi az igénybevétel változását. Így a statikai megfontolásból érdekes formák alakulnak ki, amelyek közül csak néhány jellegzetes példát mutatunk be [44a] ábra]. Megfigyelhető, hogy az egyenszilárdságú tartó feladata nem oldható meg következetesen, mert ha nyomatékra tervezzük, a kéttámaszú tartó keresztmetszete a támasznál zérusra adódna, ami nyilvánvalóan lehetetlen, még ha a nyírást figyelmen kívül is hagyjuk. Ezzel kapcsolatban általában is megjegyezhetjük, hogy a merev szerkezetek formája sohasem követheti pontosan az erőjátékot a többféle igénybevétel (pl. hajlítás és nyírás) és a változó, sokszor pontosan előre nem látható hatások miatt. (Más a nem alaktartó



44. ábra

Egyenszilárdságú tartók

a) általában a nyomaték változását igyekeznek követni; b) az egyenszilárdságú gerenda formáját fedezzük fel a mükénei Oroszlánkapu kőgerendáján is; c) hajlított szerkezeten kívül készíthető pl. egyenszilárdságú húzott rúd is



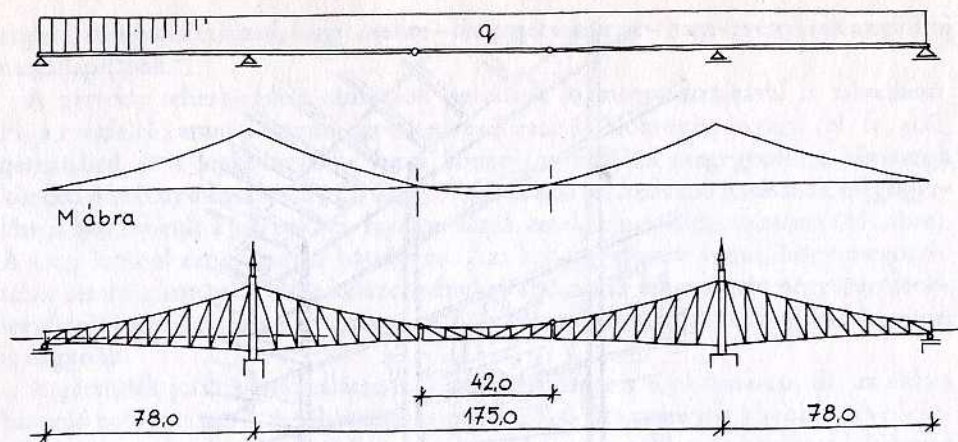
45. ábra

Autóüzlet, Paris, rue Marbeuf.

A hatalmas üvegportál egyetlen dísz a nyomaték változása szerint alakított ablakosztó borda

szerkezet, amely formáját a pillanatnyi igénybevétel szerint változtatja, mint pl. a kötél.)

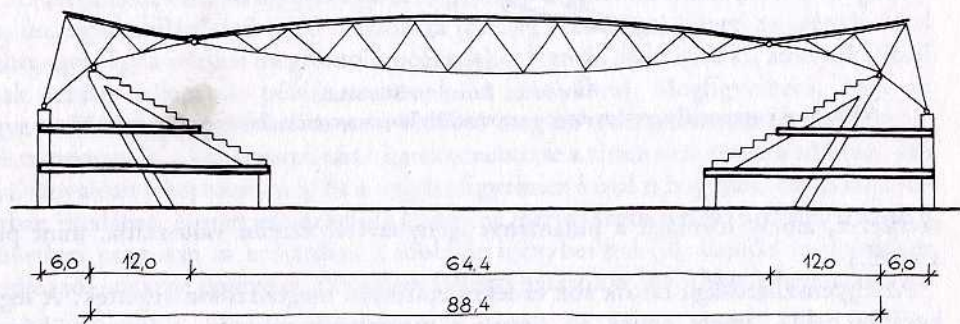
Az egyenszilárdságú tartók sok érdekes építészeti megoldáshoz vezettek. A legkorábbi példa, amely ennek az elvnek a megsejtését mutatja, a híres mükénei Oroszlánkapu [44b] ábra], amelynek gerendája ugyan alig hord terhet. Nem is találunk más példát a régi korokból, lehet, hogy a forma itt csak véletlenül adódott. Az egyenszilárdságú tartók a századforduló táján kezdtek elterjedni. Ilyen kísérletnek tekinthető a vasbeton gerendák említett kiékelése is (37. ábra). Az egyenszilárdságú szerkezetek egyik szép példája egy párizsi autósaküzlet több szint magas portáljának ablakosztó bordája (45. ábra).¹²²⁾ Itt a fő igénybevétel a szélteher, amely a bordákat kéttámaszú tartóként veszi igénybe. A bordák elegáns vonalvezetése, az egész üvegfal egyetlen „dísz” az egyenszilárdságú szerkezet tudatos alkalmazásából ered. Természetesen megoldható lett volna a feladat állandó keresztmetszettel is. Jó példa ez arra, hogy az erőjáték ismerete az építészeti megoldás forrása lehet. Hasonló formájúak az ablakosztó bordák Nervi torinói Munkapalotáján is. Itt említjük meg, hogy Nervi egyik földménéél láthatjuk az egyik ritka példát arra is, hogy az igénybevételt a tartó szélességével is lehet követni. Az egyenszilárdságú formát az említett esetekben inkább az építészeti előnyök indokolják. Ezért a kisebb szerkezetekben technológiai hátránya miatt (íves formák előállítás) ma már nem alkalmazzák, bár a tömeges előregyártásban, ahol a sablon egy elemre eső előállítási költsége nem számottevő, kérdés, indokolt-e ez a tartózkodás. Nagy szerkezeteknél azonban az egyenszilárdságú



46. ábra

A budapesti Szabadság-híd.

Lánchídhoz hasonló formája az egyenszilárdságú gerendatartó előnyeinek tudatos felhasználásából adódik; a szerkezet lényege a nyomatéki ábrából és a föléje rajzolt statikai vázlatból világossá válik



47. ábra

A rotterdami sportcsarnok.

A rácsos szerkezet rúderői nagyjából állandóak, ami az igénybevételnek megfelelően változó magasságú, szép vonalvezetésű tartónak köszönhető

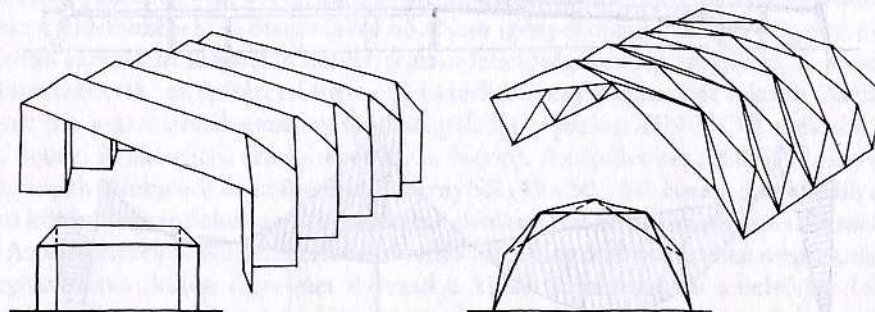
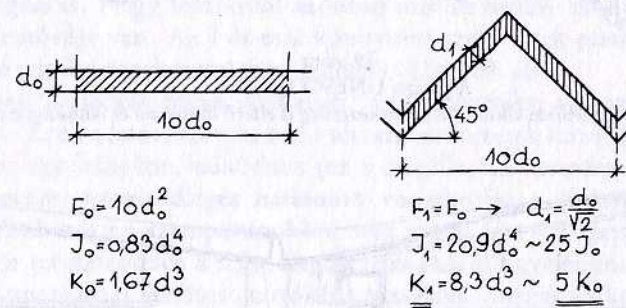
ságú vonalvezetésnek nagy jelentősége van, az önsúly csökkentésének egyik fontos eszköze. Szép példa erre a budapesti Szabadság-híd, amelyet sokszor ér az a vád, hogy szerkezetszerűtlen, mert lánchídat utánoz, a valóságban pedig rácsosított csuklós gerendatartó. Lehetséges, hogy a tervező Feketeházy János (1842–1927) előtt valóban a Lánchíd formája lebegett példaként, de a feladatot mintaszerűen oldotta meg. A 78+175+78 m fesztávolságú híd főtartójának magassága a nyomatékok változását követi (46. ábra), így pontról pontra az igénybevételhez igazodik, ami ilyen nagy szerkezetnél jelentős anyagmegtakarítással jár. Mivel mint közismert, a nyomatéki ábra az adott terhet felvevő kötélt vonalát követi, természetes, hogy a tartó hasonlít a Lánchídnak. Szerkezetileg indokoltak a szintén lánchídra emlékeztető pilonok is,

ezek merevítik a két nagy magasságú ráncsostartót (sokkal szebb megoldás, mint a két főtartó hídpálya fölötti összekötése merevítő rácsoszattal). Egyetlen helyen nem következetes a szerkezet, a csuklók közé beakasztott tartószakasznál, ahol a keresztmetszetnek parabolavonalban növekednie kellene, ehelyett tovább követi a nagy ív vonalát. Elvileg ez is megoldható, ha a híd ezen a rövid szakaszon felső pályás, vagy a beakasztott tartó görbülete ellenkező, de a viszonylag kis fesztáv miatt az egész kérdésnek nincs nagy jelentősége. A Szabadság-híd tehát a szerkezet és forma összhangjának, a szerkezeti eredetű esztétikának egyik szép példája.

Nagyobb szerkezeteknél az egyenszilárdságú formát ma is sokszor alkalmazzák. Egy rotterdami sportcsarnok érdekes belső térhatását az így kiképzett rácsos főtartók adják (47. ábra). Az esztétikai és akusztikai előnyökön túl ezzel a formálással érték el, hogy az alsó és a felső övekben a rúderők csaknem azonosak a tartó egész hosszán (kb. 910 . . . 947 kN).¹²³⁾

A gerendatartók önsúlyának csökkentésére többféle mód kínálkozik, amelyeknek csak egyike az egyenszilárdságú tartó. A technológiai és más szempontból is sokszor kedvezőbb állandó keresztmetszetű gerenda is könnyíthető a keresztmetszet alakjának ésszerű megválasztásával. További, igen nagy lehetőséget adnak az áttöréssel könnyített tartók (Vierendeel-tartók, rácsostartók).

Mielőtt ennek részletesebb vizsgálatába bocsátkoznánk, nézzük meg, mikor van egyáltalán jelentősége a tartó önsúlycsökkentésének? Nézzünk erre két példát. Az elsőben a fesztáv kicsi (4,00 m), de a terhelés nagy (100 kN/m). Itt megfelel egy 40×40 cm keresztmetszetű, 4 kN/m súlyú vasbeton gerenda, vagy egy I 360-as acélgerenda, amelynek súlya 0,76 kN/m. Az előbbinek súlya a terhelés 4%-a, az utóbbié



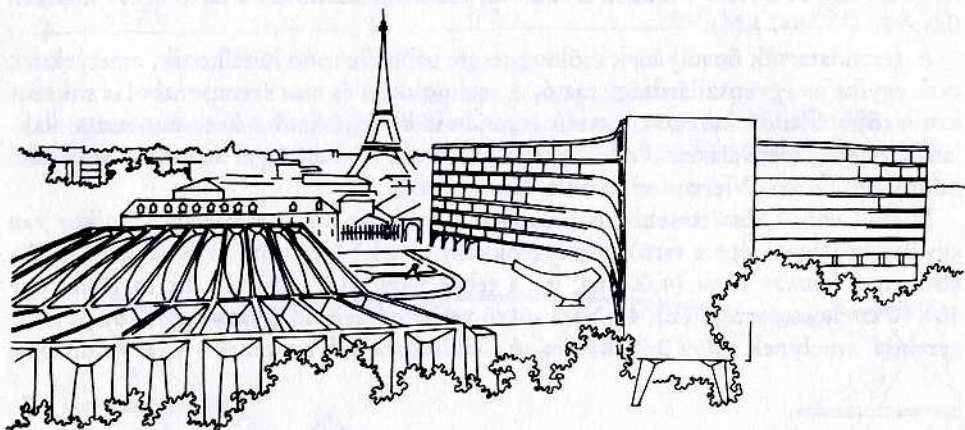
48. ábra

Redős szerkezetek.

A lemez redőzése a nyomatékírást lényegesen növeli, és egyben érdekes formai megoldásokra is alkalmas ad

0,76%-a, vagyis mindkettő gyakorlatilag elhanyagolható. Ilyen esetben tehát a tartó önsúlycsökkentésének nincs jelentősége. A másik példában nagy a fesztáv (25,00 m), a terhelés viszont kicsi (12 kN/m, pl. egy könnyű tetőfödém, 3 . . . 4 m-es főtartó tengelytávolságot feltételezve). Itt a nagy fesztáv miatt minimálisan egy 40×120 cm-es vasbeton gerenda szükséges, amelynek önsúlya 12 kN/m, tehát a terhet 100%-kal növeli. Ugyanakkor egy 2,50 m magas acél rácsostartó megfelel 2 U 160-as felső és 2 U 120-as alsó övvel, amelynek önsúlya 0,64 kN/m, így a teljes szerkezet (rácsrudakkal, szélrácsokkal) mindössze kb. 1,2 kN/m súlyú. Ez a tartó terhét csak 10%-kal növeli. Nagy fesztávnál tehát a tartó önsúlyának csökkentése igen jelentős kérdés.

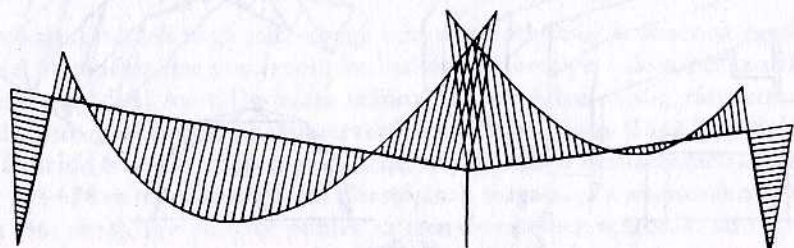
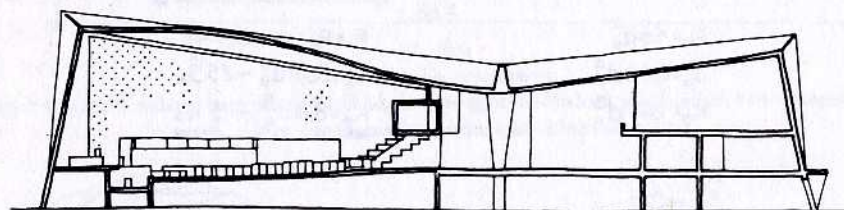
A gerenda könnyítésének legegyszerűbb módja, ha a fagerendák hagyományával magyarázható négyszög-keresztmetszetet I vagy ehhez hasonló, az anyag zömét



49. ábra

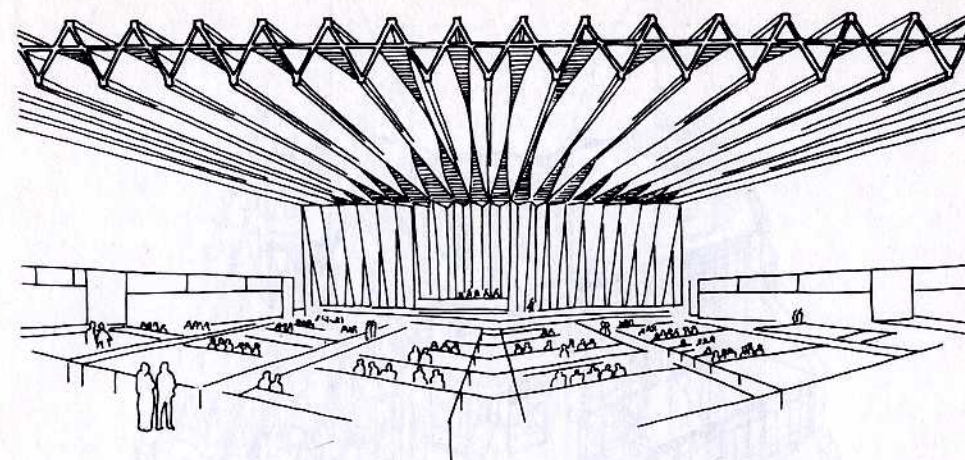
A párizsi UNESCO székház.

A funkcióknak megfelelően elkülönül a szerkezetileg is eltérő üléstermi és adminisztratív szárny



50. ábra

A párizsi UNESCO székház üléstermének metszete.
A szerkezet kialakítása az erőjátékot követi



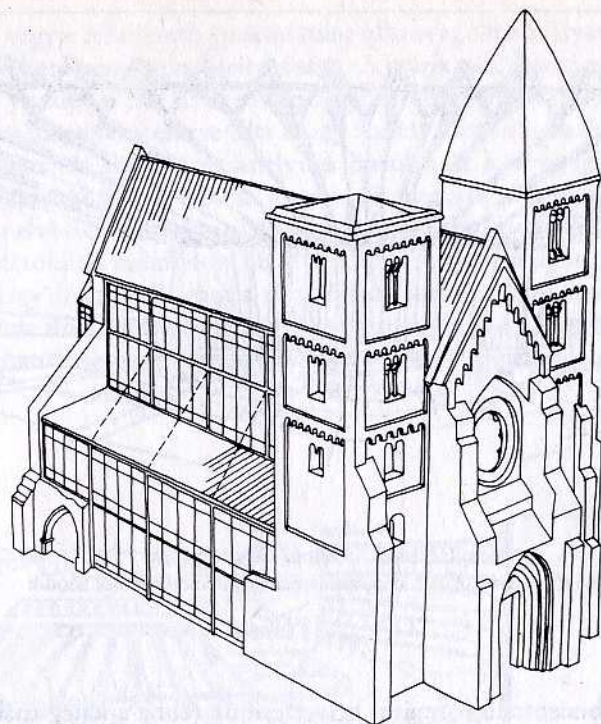
51. ábra

A párizsi UNESCO székház nagyterme.

A szép belső tér az erőjátéknak megfelelően alakított szerkezetből adódik

a súlyponttól távol koncentráló formával helyettesítjük (ebbe a kategóriába tartoznak a vasbeton T keresztmetszetek is). Az ilyen megoldások célja elsősorban nem is az önsúly csökkentése, hanem a drága acéllal való takarékoskodás. Ezért használjuk kis fesztávolságnál is. Nagy fesztávnál azonban már az önsúly csökkentése szempontjából is jelentősége van. Az I és más könnyített szelvények esztétikai hatása, hogy könnyeddé teszik a szerkezetet és az épületet (22., 129. ábra).

Különösen hatásosak mind szerkezeti, mind esztétikai szempontból a redőzött áthidalások. Ezek a lemezművek, bár a térbeli szerkezetek közé szokás őket sorolni, legtöbbször egy irányban működnek (ez a megállapítás természetesen csak az erőjáték lényegére, az elsődleges hatásokra vonatkozik, a pontosabb vizsgálatnak – amely azonban a mi szempontunkból nem mond újat – a szerkezet terveinek elkészítésekor természetesen a másodlagos hatásokra is figyelemmel kell lennie). Egy egyszerű lemezművet hajlított tartóként vizsgálva, megmutatkozik nagy előnye. Az adott példában (48. ábra), azonos anyagfelhasználás és súly mellett a nyomaték-bírás a síklemezének az ötszörösére nő. Nem igényel magyarázatot, hogy ez a kedvezőbb szerkezeti megoldás milyen formai lehetőségeket rejt magában. A lemezmű alkalmazásának, az építészeti forma és a szerkezet egymás hatását fokozó összhangjának ma már klasszikusnak nevezhető példája a párizsi UNESCO székház (ép.: M. Beuer, B. Zehrfuss, szerk. terv.: P. L. Nervi). Az épület két részből áll, a hivatali helyiségek tömbjéből és az üléstermi szárnyból (49., 50., 51. ábra). A funkciók alapvető különbsége indokolja a két épületrész elválasztását és más szerkezet alkalmazását is. Az üléstermek redőzött szerkezete ennek az épülettömbnek formai megjelenését is meghatározza (külön figyelmet érdemel a külső homlokzat és a belső tér formai egysége). Könnyen észrevehetjük, hogy a lemezmű első közelítésben keretnek fogható fel, tehát síkbeli hajlított szerkezet. A tört lemez hátránya az ilyen igénybevétel-nél, hogy a nyomott öv nagyon kis keresztmetszetű. Ezért a nyomott részen célszerű erősítő lemezt alkalmazni. Példánkban a lemez követi a nyomatékok változását,

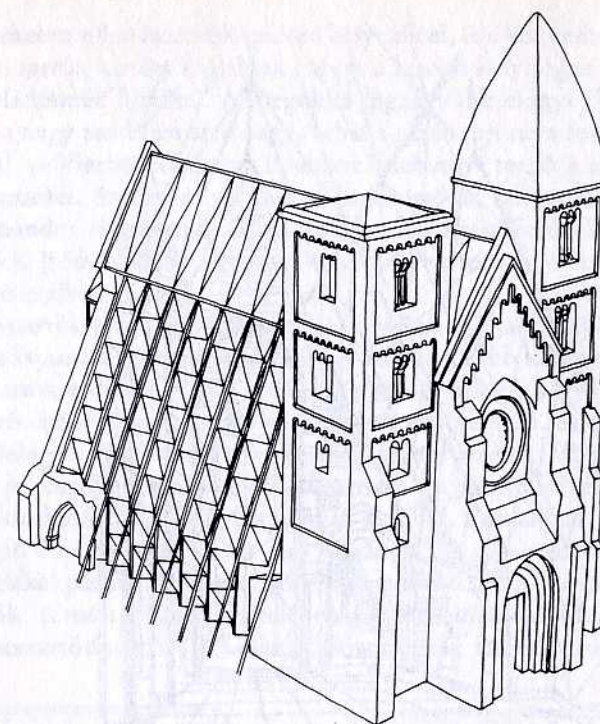


52. ábra

Első javaslat a zsámbéki templomrom megvédésére.
A régi épület kontúrját követi, de szerkezeti hátrányos

ill. a nyomott övet. A nagyteremben így érdekes hullámvonal jelentkezik, hatásosan feloldva a lemezű merevségét. A kisebb fesztávolságú részen gyakorlatilag alul van a nyomott öv, ezért a lemez ide került, így a födém alulról sík. Ez formailag is előnyös, mert itt kisebb helyiségek vannak, ahol a nagyteremhez hasonló mennyezet zavaros belső képet adna. Megfigyelhető még a lefelé csökkenő keresztmetszetű oldalfal, amely a csuklós kialakítás logikus következménye.

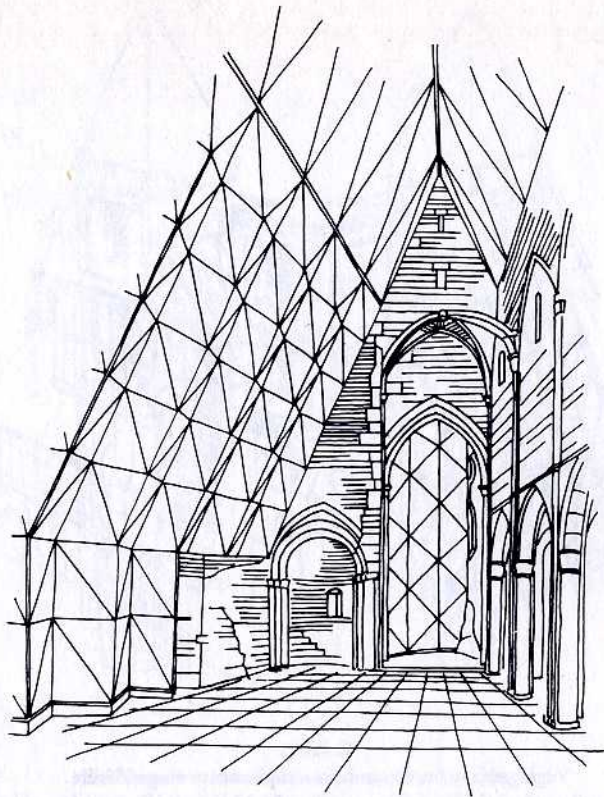
A rácsos szerkezetté feloldott lemezű érdekes szerkezeti és építészeti felhasználása a zsámbéki templomrom megvédésére készített terv, amely sajnos csak vázlaterv stádiumában maradt. A modern szerkezettel kiegészített és lefedett rom egyben román kori építészeti múzeum céljára lenne felhasználható. A helyreállítási terv (ép.: Pogány F., Balázs É., szerk. terv.: Pelikán J., Gilyén N.) készítése során, több igényt egyeztetve, az acélszerkezetet választottuk. Az első kialakult elképzelés, amely építészeti látszólag kielégítő volt, az eredeti pillérállásoknak megfelelő karcsú acélszlopokat kívánt, közölte nagy üvegfelületekkel, amelyek a modern kiegészítést egészen könnyeddé tennék. Szerkezeti szempontból azonban nagy hátrányt jelentett, hogy a kb. 18 m magas pillérek nem lehetett megtámasztani, mert így a sokkal hajlékonyabb acélszerkezet a szélteher nagy részét a főhajó egyébként is rossz állapotban levő déli falára adta volna át. A függőleges konzolként működő pillérek megtámasztására ezért a mellékhajó eredeti tetősíkjának vonalában ferde támaszok elhelyezését javasoltuk (az ábrán szaggatott vonallal jelölve), amelyet viszont az építésztervezők nem fogadtak el (52. ábra). A nehézségek utólagos elemzése azt mutatta,



53. ábra

Végleges javaslat a zsámbéki templomrom megvédésére.
A redőzött rácsos acélszerkezetből kialakított védőtető az építészeti és a szerkezeti követelményeket egyaránt kielégíti

hogy azok a tervezés egyik indokolatlanul felvett alapelvéből, a régi épület tömegének és szerkezeti vázának utánzásából adódtak. Pelikán professzor – a hazai szerkezet-tervezés egyik elméleti és gyakorlati úttörője – lendítette át a tervezést a holtpontra, mégpedig nem is szorosan vett szerkezeti megfontolással, hanem az építési feladat következetes újabb átgondolásával. Az építési feladat ugyanis elsődlegesen a meglévő értékes, de rossz állapotban levő rom védelmét kívánta meg, nem a régi épületmaradványok kiegészítését. Védőtetőre van tehát szükség az északi oldalon, amely az épület épebb déli részét óvja, de lényegesen nem terheli. A feladat ilyen felfogása esetén már felesleges, sőt erőltetett, ha a védőtető tartószerkezetét a régi vázrendszerhez kötjük. Logikusabb a védőtetőt talajba befogott konzolként kialakítani, a méreteknak megfelelő szerkezeti magasságot pedig redőzéssel biztosítani. A redős szerkezet teljesen áttört, rácsos kialakítású lehet (53. ábra). Így nincsenek formailag kedvezőtlen elemek, a rácsostartó rúdjai az épület méreteihez képest igen karcsúak lehetnek. Az egész szerkezet mind a külsőben, mind a belsőben jól kifejezi a védőtető jellegét, nem hat a régi falak modern pótlásának, mégis harmonikusan illeszkedik a romépület hagyományos képehez. Kedvező a belső tér is (54. ábra), szemben az első megoldással, amely a függőleges tendenciájú későromán térben szokatlan arányú ipari csarnokra emlékeztetett. Az építésztervezőket az új megoldás helyességéről végül is a két belső kép összehasonlítása győzte meg. Csak sajnálni lehet, hogy ez a mind műemlékvédelmi, mind szerkezettervezési szempontból világviszonylatban is úttörő kezdeményezés a vázlaterv stádiumában maradt.



54. ábra

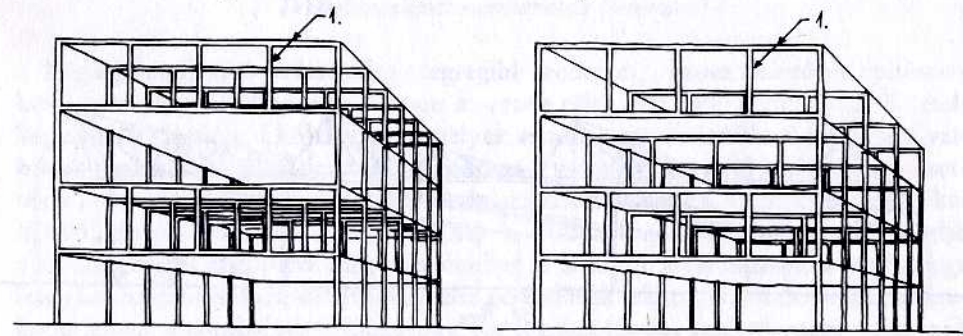
Végleges javaslat a zsámbéki templomrom megvédésére.
A megoldás helyességét a belső kép is érzékelteti

A gerenda súlya nemcsak a keresztmetszet kedvezően megválasztott alakjával és rácsos kialakítással csökkenthető, hanem a gerinc áttörésével is. A gerinc ugyanis kevésbé van kihasználva, a kisebb nyílások nem vetnek fel újabb statikai problémákat (bár az önsúlyt alig csökkentik). A gerinc áttörése hasznos lehet viszont vezetékek elhelyezésére, vagy a szerkezet formai könnyítésére. Az áttört gerincű tartók érdekes esete az I acélok szétvágásával előállított sejtartó, amelynél azonban nem az önsúly csökkentése, hanem a nyomatékbírás növelése az elsődleges cél. A hatásos, belső térben is kedvező forma azonban már inkább a gyártástechnológia következménye (129. ábra). Az áttörések növelése fokozatosan új erőjátékhoz is vezet. A Vierendeel-tartók rúdjaiban derékerők, nyíróerők és nyomatékok működnek, de a tartó nagy magassága miatt ezek viszonylag nem nagyok. Természetes, hogy az önsúly a tömör tartóhoz képest jelentősen csökken, ami szintén kedvezően hat az igénybevételre. A Vierendeel-tartók sokszor emeletmagasságúak, és a gyakoribb, kedvezőbb erőjátékú rácsostartókhoz képest nagy előnyük, hogy lehetőséget adnak ajtóknak, vagy nagy homlokzati nyílások zavartalan elhelyezésére (55. ábra).

Emeletes épületekben a nagy tereket célszerű a felső szintre helyezni, ahol a nagy fesztávolságú födémeket csak a könnyű tetőfödém terheli. Ez az ésszerű megoldás azonban nem mindig valósítható meg, pl. ha az építési feladat sok nagy teret igényel. Ilyen nehéz esetben is az építészeti és a szerkezeti megoldás összhangja érhető el, ha

a nagy tereket minden második szinten helyezik el, és a közbenső szinteken az emeletmagasságú tartók között foglalnak helyet a kisebb helyiségek (pl. áruházban a rak-tárak az eladóterek között). A megoldás legnagyobb előnye, hogy a födémek fesztávolsága a nagy terekben sem nagy, tehát a szerkezet nem foglal el hasznos légteret [55a] ábra]. A Vierendeel-tartók ilyenkor is lehetővé teszik a szükséges ajtóknak, nyílások elhelyezését. Szellemes megoldás, ha a tartókat szintenkint eltolva helyezik el, ilyenkor minden emeleten a födém fesztávolság kétszeresének megfelelő méretű tér alakítható ki [55b] ábra]. Vierendeel-tartó helyett természetesen tömör faltartó vagy rácsostartó is alkalmazható.

A rácsostartók erőjátéka a Vierendeel-tartónál sokkal előnyösebb, mivel a rudakban csak központos igénybevétel van, így sokkal kisebb keresztmetszetűek lehetnek. A rácsostartók erőjátéka tehát elvileg nagyon egyszerű, a gyakorlatban, viszonylagos újszerűségénél fogva, mégis nehezebben érzékelhető, és ezért esztétikailag sem mindig kielégítő. Bár lényegében hasonló szerkezetek fából már évszázadokkal korábban is készültek, a különböző függesztő- és feszítőművek is a rácsostartók elődeinek tekinthetők, Palladio pedig már a XVII. században modern rácsostartóra emlékeztető főtartóval tervezett egy fahidat.¹²⁴⁾ A rácsostartók mégis csak az acélszerkezetekkel párhuzamosan terjedtek el, mivel legkönnyebben ebből az anyagból készíthetők. A múlt század első felében a vasúti hidak építésénél alakultak ki különböző rácsostartótípusok (56. ábra). Először még ezek is sokszor fából készültek



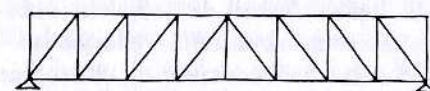
a,

b,

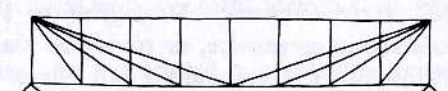
55. ábra

Az emeletmagas tartók sok építészeti problémát megoldanak

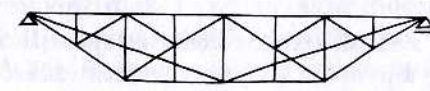
a) emeletmagasságú tartók minden második szinten; b) emeletmagasságú tartók eltoló rendszerben; 1 emeletmagasságú Vierendeel-tartó



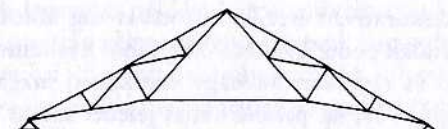
a,



b,



c,

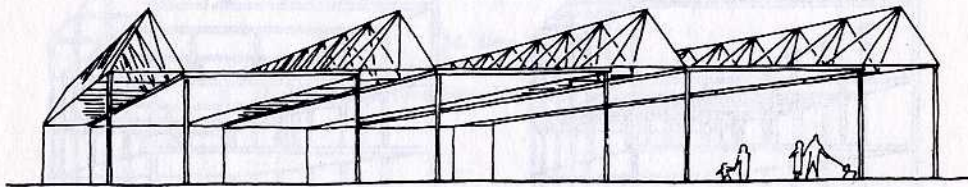
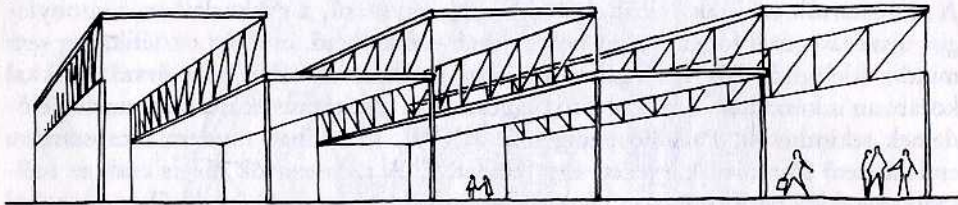
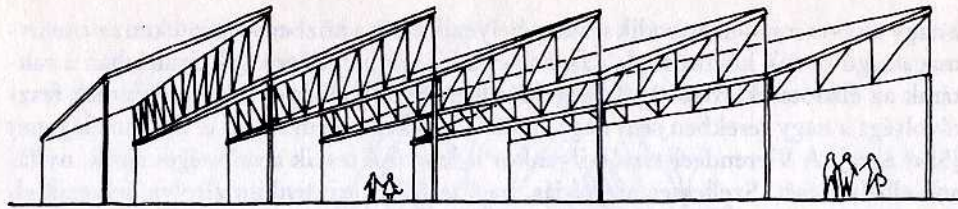


d,

56. ábra

Korai rácsostartó-típusok

a) Howe (1840); b) Whipple (1847); c) Fink (1852); d) Polonceau (1850 k.)



57. ábra

Nagy magasságú rácsostartó és felülvilágító egyesítése.
A tartószerkezet az építészeti megoldás szerves részévé válik

(pl. a Howe-tartók). Megfigyelhető a formák kialakításában az erőjáték többé-kevésbé jó megérzése, de rövidezen kialakult a rácsostartók számítási eljárása is.¹²⁵⁾ A magasépítésben inkább a tető lejtését követő formák honosodtak meg, elsősorban a Polonceau-tartó, amely a belső tér hatását is fokozta. Itt „az erőjáték logikája szinte vizuálissá válik és architektonikus megjelenésű ... nyomott rácsrúdjaik sokszor dekoratívan kezelt öntöttvas tag alkotja”¹²⁶⁾ a szarufaként alkalmazott nyomott rudak pedig gyakran még fából készülnek.

A rácsostartók nagy szerkezeti magassága a rudak igénybevétele szempontjából előnyös, de problémát is jelent: szerkezeti szempontból a nyomott ív merevítésének szükségességét, építészeti szempontból felesleges légtér. Ez utóbbi hátrányon kíván segíteni a szerkezet kiemelését az épület tömegéből, amire Mies van der Rohe említett terve adta az ötletet (18. ábra). A megvalósult épületeken természetesen megoldották a tartó merevítését, sokszor vízszintes rácszórással kapcsolt ikertartókkal. Sokkal kedvezőbb,

ha az amúgy is áttört rácsostartókkal egyben a nagy terű csarnok belső, rosszul világított részeinek felülvilágítóit is kialakítjuk. Ez többféleképpen is megoldható (57. ábra). A hernyó felülvilágító háromszög metszetű főtartója ezek közül önmagában is merev. Ilyen pl. a Dunai Vasmű 30 m fesztávolságú ipari típuscsarnoka.

A gerendához, mint legrégebbi szerkezethez, érthetően sok szubjektív jelenség is kötődik. Ide tartozik pl. a görög oszloprend gerendázatának faszerkezetet utánzó formája, amely azután a nyílások keretezésénél, sőt az íves nyílások lezárásánál is megmarad, jól szemléltetve a szerkezeti eredetű formák későbbi önállósult életét. Az oszlopperendás rendszer, mint már említettük, nagyrészt formai elemként, évezredekig keresztül tovább élt, még korunkban sem szűnt meg a hatása. Valószínűleg ennek tulajdonítható, hogy a római építészet íves kiváltású homlokzatain is megjelenik, mint szerkezeti szerep nélküli dekoráció (16. ábra).

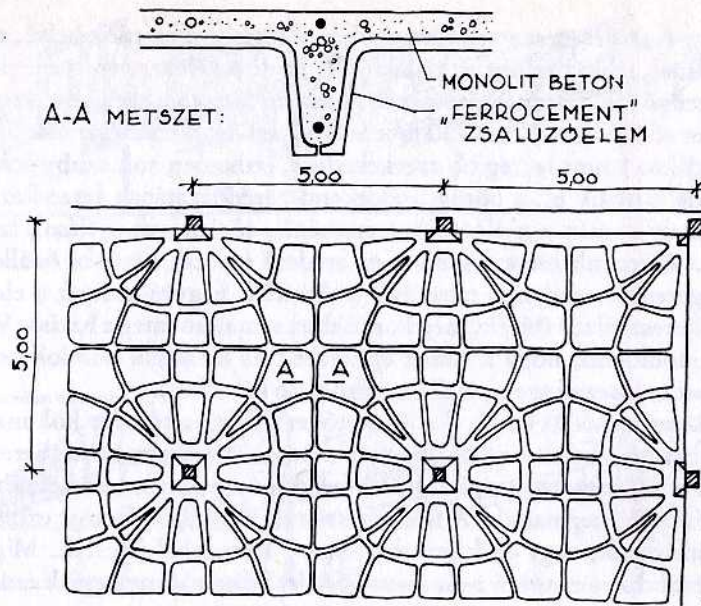
Megszokottá váltak az erkélyeket, előtetőket alátámasztó nagy kőkonzolok is, így amikor már szerkezeti szerepüket elvesztették – az alátámasztást kis keresztmetszetű vasgerenda adta, vagy egyszerűen borda nélküli vasbeton lemez készült – a formai igény továbbra is megmaradt. A feleslegessé vált szerkezeti formát ezután rabciból, gipszből utánozták, vagy csak áttört, könnyű formákkal jelezték. Míg az előbbit hamisnak érezzük, az utóbbi a szerkezeti eredetű díszítőforma egyik érdekes példája (17. ábra).

Térbeli hajlított szerkezetek (lemezek)

Míg a gerendatartó valószínűleg a legrégebbi szerkezet, a lemez a történeti építészetben ismeretlen, mivel nem volt ismert az erre a célra megfelelő építőanyag. Kivételt képeznek a kis méretű kölemezok, amelyek azonban már méretüknél fogva sem válhattak fontos szerkezeti elemmé. Elsősorban a vasbetonban rejlő lehetőségek vezettek a lemezszerkezetek széles körű alkalmazásához. Eleinte a vasbeton lemezek két irányú, térbeli erőjátékát sem használták ki. Hennebique fődéme, amelyet kisebb változtatásoktól eltekintve még napjainkban is sokszor alkalmaznak, a lemezt egy irányban teherhordó szerkezetnek, széles gerendának tekinti. Az oszlopokra támaszkodó lemez, a gombafödém (36. ábra), bár logikus forma, szokatlansága miatt csak R. Maillart zseniális ötleteként valósult meg 1908-ban (tőle függetlenül 1910-ben Amerikában Turner is épített gombafödém). Maillart szerint, ha a tervezők nem ragaszkodtak volna az ismert számítási sémákhoz, már jóval előbb megvalósították volna. Ő maga is kísérletek alapján tervezte fődémeit, a számítási módszer még sokáig tisztázatlan maradt. Ennek ellenére nagy raktárakat épített gombafödémrel, pl. egy ötszintes gabonatarházat Altdorfban (Svájc).¹²⁷⁾

A lemezek, bár az anyag jobb kihasználása – a két irányú teherviselés – miatt a gerendáknál eleve könnyebb szerkezetek, még tovább könnyíthetők. A könnyítés legegyszerűbb módja a bordás lemez, amelyet tulajdonképpen már Hennebique is alkalmazott. A két irányban bordás lemezek legszebb példáit Nervi művein tanulmányozhatjuk. Egyszerű raktár fődémeinek pusztán célszerű rendeltetésük van – de Nervi zsenialitásának köszönhetően – esztétikai élményt is nyújtanak (58. ábra). A bordák érdekes és szép vonalvezetése nem esztétikai megfontolások eredménye, hanem a pontokon megtámasztott lemez maximális, ún. főnyomatékainak irányából adódik.^{127a)} A szerkezet ésszerű megvalósításának feltétele volt azonban az új építéstechnológia is. Nervi a bordákat és a közöttük levő kazettákat vékony huzalokkal vasalt, előregyártott elemekből alakította ki (ferrocement elemek), ezek alkották

Síkbeli nyomott szerkezetek (ívek)



58. ábra

Bordás gombafödém (szerk. ter. : P. L. Nervi).

A bordák, a lemez főnyomatékainak irányát követve, szép vonalvezetésűek; a bonyolult íves vonalakat benmaradó ferrocement (vékony huzalokkal vasalt cementhabarcs) zsaluzóelemekkel állították elő

a felülről betonozott bordás lemez benmaradó zsaluzatát. Ez a födém típus később reprezentatív épületein, pl. a torinói Munkapalotában is megjelenik.

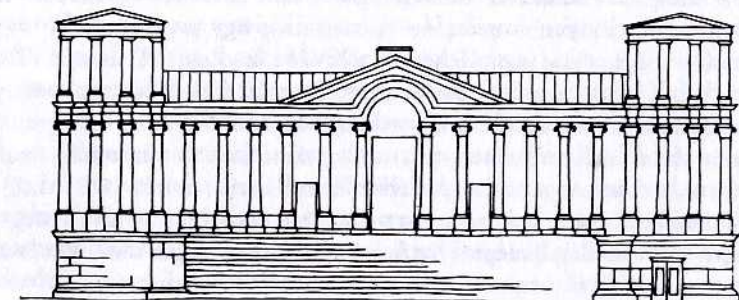
A lemez további könnyítésének tekinthető a tartórács is.¹²⁸⁾ Ez az egyetlen térbeli hajlított szerkezet, amely a régi építészetben is előfordul, bár a fa erre kevésbé alkalmas, mivel a gerendák keresztmetszetét a keresztezéseknél nagyon gyengíteni kell, vagy a gerendák két síkban helyezkedhetnek csak el. Az általánosan elterjedt kazettás mennyezetek azt mutatják, hogy a tartórács elvét legalábbis megsejtették, de inkább formai elemként használták fel. A kazetta sokszor csak a valódi szerkezetre függesztett dekoráció.

Könnyített lemeznek foghatók fel az utóbbi húsz évben elterjedt térbeli rácsostartók is. Segítségükkel nagy terek könnyű, anyagtakarékos lefedése valósítható meg. Ezek is, mint a rácsos gerendatartók, egészüket tekintve hajlított szerkezetek, de a szerkezeti struktúra következtében az egyes elemek csak központos igénybevételt kapnak.¹²⁹⁾ E statikai megfontolások régebben is ismertek voltak, a bonyolult térbeli rácsos az azonban fejlett ipari gyártástechnológiát kíván, amelynek feltételei csak az utóbbi évtizedekben valósultak meg. A térbeli rácsostartók, amelyek szinte az új építészet jelképévé váltak, így elsősorban szerkezeti (statikai és technológiai) előnyök miatt terjedtek el (128. ábra).

A nyomott szerkezetek, ha erőjátékuk elvileg egyszerűbb is, mint a hajlított tartóké, nem olyan magától értetődőek. A természet is kevesebb példát mutatott. Különösen ritka a természetben az egyszerűbb, síkbeli ív (pl. Capri-szigetén a híres Arco Naturale, egy természet alkotta kőkapu a tengerparton). Igen hosszú időre is volt szükség, míg az ívszerkezetek építésének nehézségeit az ember le tudta győzni. Az építéstechnológiai problémákon kívül (amely elsősorban abban nyilvánul meg, hogy míg a korábban ismert szerkezetek – falak, gerendák – építés közben is stabilak, addig a boltívet meg kell támasztani) olyan statikai kérdések is felmerültek, mint a nyomott szerkezet kihajlása, ill. a húzószilárdság nélküli, különösen nyomott pillérek stabilitása és az oldalnyomás felvétele. Ezeket, ha elméletben nem is, de a gyakorlatban feltétlenül meg kellett oldani. Mindenesetre a nagyobb terek és az épületek tartósságának igénye kitartó kísérletezésre serkentett. Ettől függetlenül az egyetlen hajlított szerkezet építésére alkalmas anyagból, fából is építettek nagy fesztávolságú ívtartókat. Részben ilyennek tekinthetők a már régen ismert feszítőművek is, de különösen hidaknál, ahol a nagyobb fesztávolság elkerülhetetlen volt, építettek fa ívtartókat. Ezek egyik legnagyobb mestere a svájci H. U. Grubenmann (1709–1783) volt.¹³⁰⁾

A húzószilárdság nélküli anyagból épített boltívek lassú fejlődésének kezdetén olyan érdekes szerkezet is kialakult, mint az álboltív. Legismertebb példája a mükénei Oroszlánkapu [44b] ábra]. (Ezzel a szerkezettel – amely az erőjátékot tekintve ugyan nem is rokon a boltívvvel, de célja hasonló – a boltozatokkal kapcsolatban fogunk részletesen foglalkozni.)

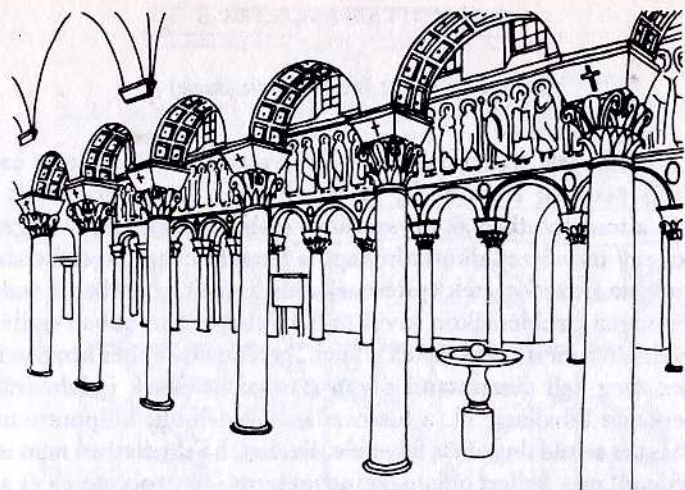
Csak a statika legújabbkori fejlődése derítette ki, hogy megrepedésük után a kőgerendák is ívtartóként működnek, és ezért ha megfelelő magasságúak, a repedés ellenére sem omlanak le. A gerenda belsejében kialakuló rejtett boltív oldalnyomását ebben az esetben a szomszédos szerkezetek, vagy a gerenda és támasz közötti súrlódás veszi fel (33. ábra). (Lapos gerendánál az ilyen erőjáték nem tud létrejönni, és a gerenda leomlik.) Ezek a tapasztalatok nagymértékben hozzájárulhattak a görög oszloprend máig is csodált, klasszikus szépségének kialakulásához.



59. ábra

A baalbeki Naptemplom.

A nagyobb nyílás fölötti, szerkezetileg indokolt íves áthidalás egyben a főbejáratot hangsúlyozza



60. ábra

A római S. Agnese.

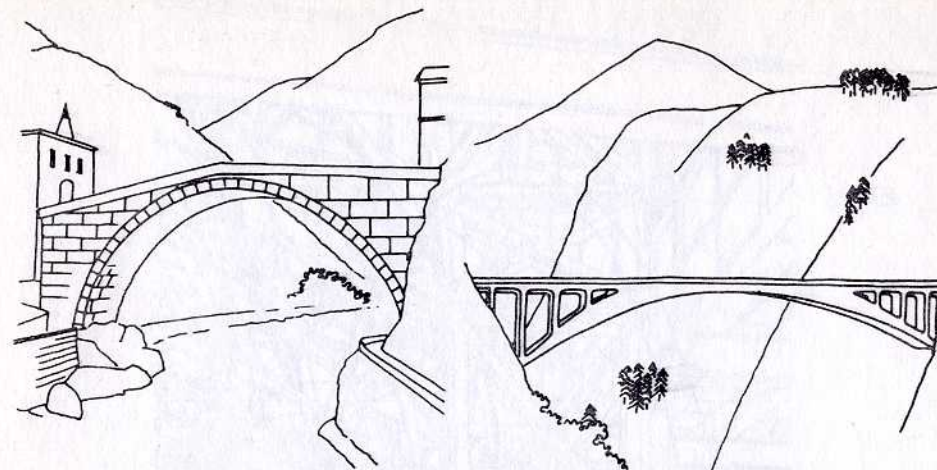
Boltívvél nagyobb nyílás hidalható át, mint gerendával; az ókeresztény templomokban ez teszi lehetővé az igényeknek megfelelőbb, egységesebb tér kialakítását

A húzószilárdság nélküli lapos ívek mindig veszélyesek, mert a nyomóerő összenyomódást okoz, emiatt az ív hossza csökken, így még laposabbá válik, és végül elvesztheti stabilitását. Ugyanilyen hatása lehet a támaszok kismértékű elmozdulásának is, ami annál is inkább bekövetkezik, mert a lapos ív nagy oldalnyomást fejt ki.¹³¹⁾ Ez a jelenség ismét jó példa arra, hogy a kedvezőtlen szerkezet (a nagyon lapos ív) formailag sem kielégítő (bizonytalan forma).

A boltívek tették lehetővé a kőszerkezetekben nagyobb nyílások áthidalását. Ezt a lehetőséget először a római építészet aknázza ki. Építészeti hangsúlyt képez például a kisebb, gerendával áthidalt nyílások közötti nagyobb boltíves kiváltás (59. ábra). A birodalom késői korában egyre általánosabbá vált az íves nyílások építése, amely pl. az ókeresztény bazilikák tágasabb térképzésének is egyik eszköze. A tulajdonképpeni igény az egységes tér volt, amelyet még nem tudtak maradéktalanul megvalósítani, de a fő- és mellékhajó közötti oszlopsor az íves áthidalások miatt ritkább állású lehetett (60. ábra), így a tér áttekinthetőbbé vált.

A kisebb boltíveket általában körív, legtöbbször félkörív formában falazták, aminek technológiai előnyei vannak, de valószínűleg úgy is gondolták, hogy ez az ideális forma (még Alberti is így vélekedett a XV. században). Csak a XVII. század végén fedezték fel, hogy a boltívnek a nyomásvonalat kell követnie, amely a vele azonosan terhelt kötél alakjának megfordításából adódik. A másképpen formált boltívek csak azért állnak meg, mert viszonylag zömökek és a nyomásvonal a boltívben belül marad. Ahol azonban a széléhez közel kerül, a húzószilárdság nélküli anyag az ellenkező oldalon megreped. Bár a körív vezérgörbéjű boltívek megszokottságuknál fogva esztétikailag kielégítő hatásúak, a kedvezőbb parabolaívet és az ehhez közelálló, hasonló erőjátékú csúcsívet általában szebbnek tartjuk.

Az építészettörténetből ismert legnagyobb ívtartót – amely ugyan csak vázlat maradt – Leonardo da Vinci tervezte az isztambuli Aranyszarv-öblöt átívelő híd számára. A fontos kikötőben a hajózás zavartalansága érdekében 400 könyök



61. ábra

Ívszerkezetű hidak: római kőhid Aostában és vasbeton ívtartós híd (R. Maillart).

A vasbeton formái, arányai a hagyományos anyagokhoz szokott szemnek szokatlanok, új esztétikai érzék és normák kialakulását kívánják

(kb. 240 m) fesztávolság áthidalására lett volna szükség. Leonardo két egymásnak támaszkodó kő boltívet tervezett, így a nagy ívek oldalirányban kölcsönösen megtámasztják egymást. Leonardo zsenialitására vall az is, hogy a fantasztikus terv statikailag reális (a megfelelő számítási módszerek csak 300–400 évvel később alakultak ki!), a kőben ébredő maximális feszültség 1 kN/cm^2 körül lenne. A kivitelezéshez azonban kb. $140\,000 \text{ m}^3$ jó minőségű kváderkő lett volna szükséges, és valószínűleg nem utolsósorban ezért maradt el az építkezés, pedig adatok vannak arra, hogy a szultán foglalkozott a gondolattal és Leonardo fel is ajánlotta szolgálatait.¹³²⁾

Bár a boltív lényegénél fogva nyomott szerkezet, a húzószilárdsággal rendelkező anyagok megismerése ezen a téren is újabb lehetőségeket teremtett. Ennek megvilágítására érdemes egy hagyományos kőhidat R. Maillart bármelyik vasbeton hídjával összehasonlítani (61. ábra). A vasbeton szerkezet karcsúsága eleinte olyan szokatlan volt, hogy évtizedeknek kellett eltelniük, míg az átlagos esztétikai érzék is elfogadta. Maillart tervei nagy ellenállást váltottak ki, és végül csupán az Alpok olyan eldugott völgyeiben valósulhattak meg, ahol a hatóságok az esztétikai szempontokat elhanyagolhatónak vélték, viszont a nehéz építési körülmények miatt a gazdaságosság a szokatlanul is fontosabb tényező volt. Ma már viszont látjuk, hogy az új szerkezeti lehetőségek és a gazdasági kényszer új esztétikai értékek forrásai lettek.¹³³⁾

Az ív anyagának húzószilárdsága egyrészt azért előnyös, mert csökkenti a kihajlás veszélyét, de lehetővé teszi azt is, hogy a nyomásvonal kilépjen az ívből. Itt ugyan hajlítás lép fel (a nyomásvonaltól való távolsággal arányosan), de a nyomatékok lényegesen kisebbek, mint a tipikus hajlított szerkezetben, a gerendában. Érdemes itt egy pillanatra Maillart hídjához visszatérni. Az ívtartó változó vastagságával a tervező arra törekedett, hogy a nyomásvonal aszimmetrikus terhelés esetén se lépjen ki az ívből, ami a vasbeton szerkezetnél is előnyös, ha nem is feltétlenül szükséges (61. ábra). A nyomásvonaltól eltérő alakú szerkezetek a funkcionális igények és az építéstechnológia egyszerűsítése miatt mégis talán gyakoribbak, mint a tökéletes ívek.



62. ábra

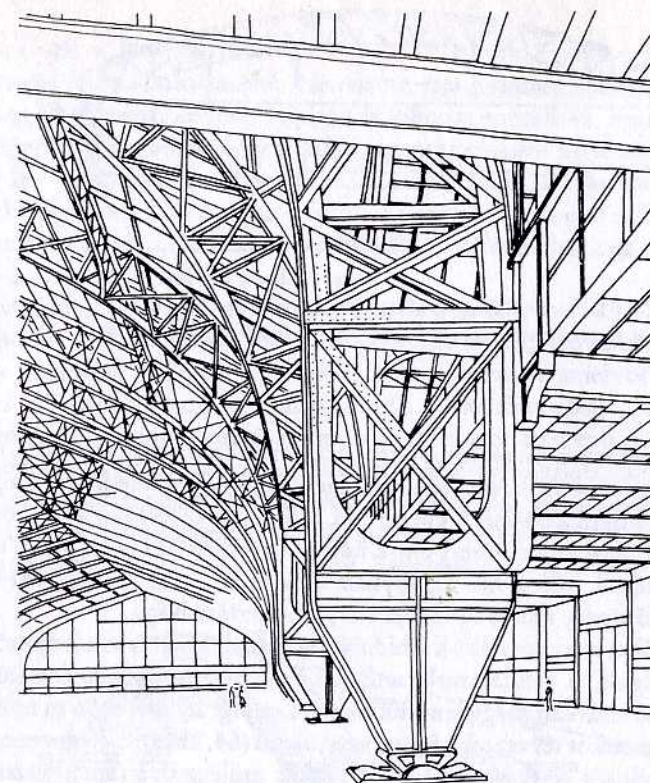
A „Nyugat kapuja” St. Louis-ban.

A nagy ívszerkezet az erőjátékot szükségszerűen követi, de az így adódó forma jellegzetes és szép is

A szerkezetet azonban nem önmagában kell csak vizsgálni, és a végső döntéskor mindenképpen figyelembe venni az összes lényeges szempontot, így adott esetben az épületet tekintve a kevésbé kedvező erőjáték lehet a jó megoldás.

Minél nagyobb az ív fesztávolsága, a nyomásvonaltól való eltérés természetesen annál nagyobb áldozatot jelent. Pontosán követi pl. a nyomásvonalat a 192 m fesztávolságú „Nyugat kapuja” St. Louis-ban (Missouri, USA), amely a város alapításának 200. évfordulójára, 1966-ra készült el (ép.: E. Saarinen, szerk. terv.: Severud, Elstad, Krueger) (62. ábra). Annak ellenére, hogy ez tulajdonképpen egy emlékmű (amelynek csupán másodlagos funkciója, hogy csúcsán kilátót alakítottak ki), formáját nagy méretei miatt az erőjáték határozza meg. A nyomásvonaltól való kis eltérés is igen nagy anyagi áldozatot követelt volna. A nagy méret indokolja a keresztmetszet igénybevétel szerinti változtatását is (ami, ha csak kis mértékben is, de ismét visszahat az ív vonalára, mert változik a teher). Az egyenlő oldalú háromszög keresztmetszetű ív oldalhossza az alsó 16,46 m-ről fokozatos átmenettel 5,19 m-re csökken. Ez a kedvező szerkezeti megoldás is esztétikai előnnyel jár: a magasba törő, csillogó, rozsdamentes acélból készült ív méreteit a felfelé csökkenő keresztmetszet vizuálisan is növeli.¹³⁴⁾

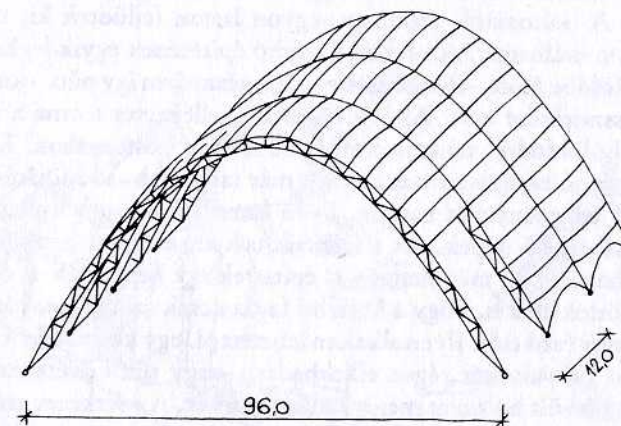
Az ívszerkezet könnyítésének is vannak hasonló módjai, mint a gerendák tárgyalásánál ismertetett példák. Gyakori a keresztmetszet áttörése, egészen az ívtartó rácsos



63. ábra

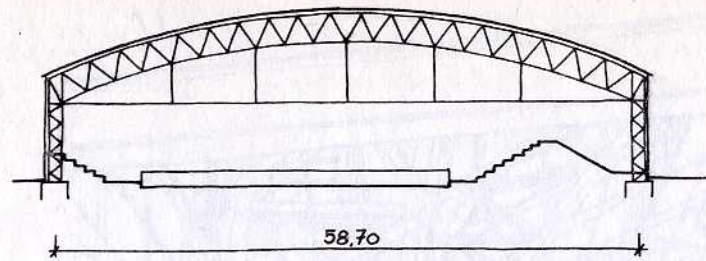
A párizsi Gépcsarnok.

115 m fesztávolságával, csuklós támaszaival nemcsak szerkezeti, hanem építészeti szempontból is úttörő alkotás volt



64. ábra

Típus ipari csarnok Leningrádban.
Rácsos ívtartóval fedett csarnok



65. ábra
Műjégpálya Karl-Marx-Stadtban.
A rácsos ívtartó reprezentatív épületek lefedésére is alkalmas

kiképzéséig. A vasszerkezetű rácsos ívtartó már a múlt században elterjedt, mint nagy terek, pályaudvari csarnokok, kiállítási épületek gazdaságos lefedése. A legnagyobb teljesítmény ezek közül a párizsi Gépcsnok 115 m fesztávolságú háromcsuklós íve (63. ábra). A hídépítésben az ismert okok miatt már korábban is nagyobb távolságot hidaltak át ívtartóval, pl. a St. Louis-ban (Missouri, USA) 1869–1874-ig épült Mississippi-híd középső, rácsos ívtartója 158,5 m fesztávolságú.¹³⁵⁾

A rácsos ívtartókat nagy fesztávok áthidalására napjainkban is sok helyen alkalmazzák gazdaságosságuk, a felületszerkezeteknél egyszerűbb építéstechnológiájuk és nem utolsósorban kedvező megjelenésük miatt. Leningrádban pl. 96 m nyílású, több célú ipari típuscsarnokot terveztek rácsos ívtartókkal (64. ábra).¹³⁶⁾ Reprezentatív célú felhasználására példa a Karl-Marx-Stadtban épült műjégpálya (ép.: Petzold, szerk. terv.: H. Rühle, 1964–1965) (65. ábra).¹³⁷⁾ Rácsos acélszerkezet a jelenlegi legnagyobb fesztávolságú ívtartó is, a New River George Bridge (West Virginia, USA) 518 m-es középső nyílása.¹³⁸⁾

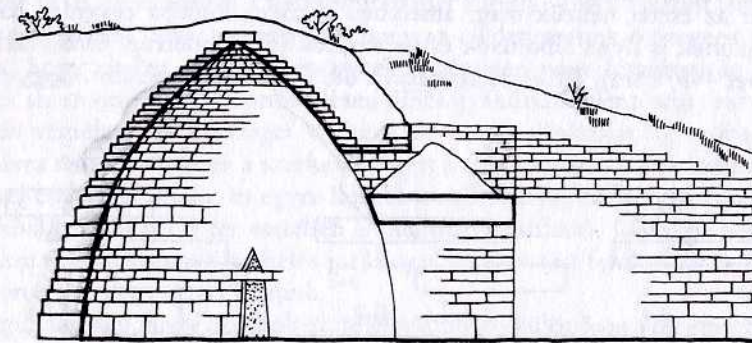
Térbeli nyomott szerkezetek I. (boltozatok)

A közbenső alátámasztások nélküli nagy terek lefedését a múltban a boltozatok tették lehetővé. A boltozatok azonban nagyon lassan fejlődtek ki, megismerésük szinte a véletlenül mulhatott. Az őskori kunyhó építésének egyik legkezdetlegesebb módja a körben földbe ásott – eleinte esetleg a természetben így nőtt – lombos gallyak, vesszők felső összekötése volt. Az így kialakuló jellegzetes forma a végein terhelt hajlított konzolból adódik, tehát semmi köze sincs a boltozathoz. Később ezeket a lombosátrakat sárral betapasztották, és így már tartósabb, az időjárás ellen is jobb védelmet nyújtó építményeket kaptak. Ilyen kunyhókat ma is építenek a fejlődés korábbi szakaszában élő népek, sőt alárendelt célokra a fejlett országokban is máig használják (pl. hazánkban még nemrég is építettek így kemencéket, ólakat). Idővel valószínűleg rájöttek arra is, hogy a kunyhó faváza csak az agyagos sár megszáradásiáig tölt be lényeges funkciót. Ilyen alkalom lehetett pl. egy kunyhó lebontása, amikor kiderült, hogy a gallyak már régen elkorhadtak, vagy tűz következtében elszeneledtek, a sárból készült boltozat mégis szilárd maradt. A szerkezet erőjátékát azonban még csak meg sem sejtették, legalábbis erre mutat, hogy a valódi boltozatok megjelenése előtt csaknem minden kultúrkörben (a Földközi-tenger vidékén kívül pl. Indiában és Amerikában is) a kőépítkezés elterjedésével megjelentek az álbolto-

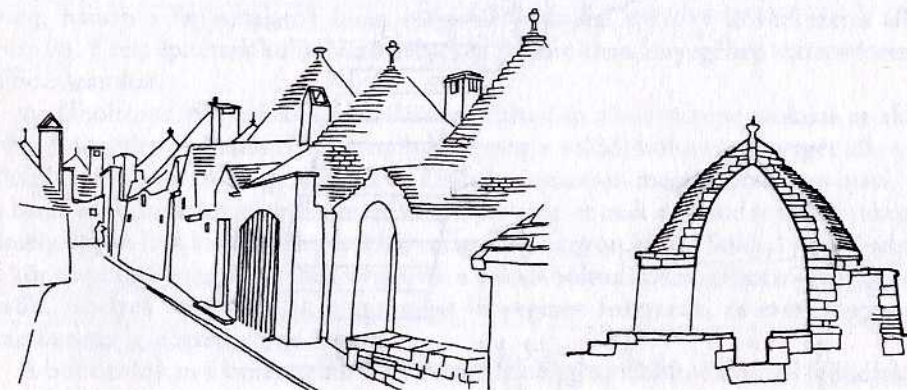
zatok, amelyek a kunyhó formáját nagyjából követő, szellemes szerkezetek, de lényegük más, mint a boltozatoké. Nem ismeretes, honnan származik az egymás fölé konzolosan elhelyezett, kövekkel épített álboltozat gondolata. Az álboltozat ugyanis tulajdonképpen egy görbén épített pillér, az egyes kövek közt csak függőleges erők adódnak át. Az álboltozatot csaknem az összes ókori építészeti kultúrában megtalálhatjuk. Egyiptomban a tébai Tutmozis templomban egy 3,35 m fesztávolságú álboltozatot építettek. Kisásziában több emléket ismerünk, pl. az ún. Tantalusz tumulusa 2,17 m átmérőjű álkupola.

Legismertebbek és legjelentősebbek a prehellén építészet álboltozatai. Mükénében találjuk az álboltozatok klasszikus példáját, az ún. Atreusz kincsházát. (66. ábra). Az építmény bejárata áldongával fedett folyosó, amelyből egy teherhárító álboltívvel ellátott nyíláson keresztül jutunk a kör alaprajzú, 14,5 m átmérőjű álkupola terébe. Ez a nagyméretű álkupola e szerkezet legszebb példája, és csaknem teljesen pontosan követi a helyesen kialakított álboltozat sajátos vonalát.

Az etruszk építészet kezdeti időszakában is megtaláljuk az álboltozatokat. A cor-tonai tumulus pl. kezdetlegesen, szabálytalanul készített, 2,50 m átmérőjű álkupola. Az álboltozat-építésnek Itáliában nagy hagyományai vannak – az etruszkok és



66. ábra
Az ún. Atreusz kincsháza Mükénében.
A legnagyobb álboltozat íve pontosan követi az erőjátékot

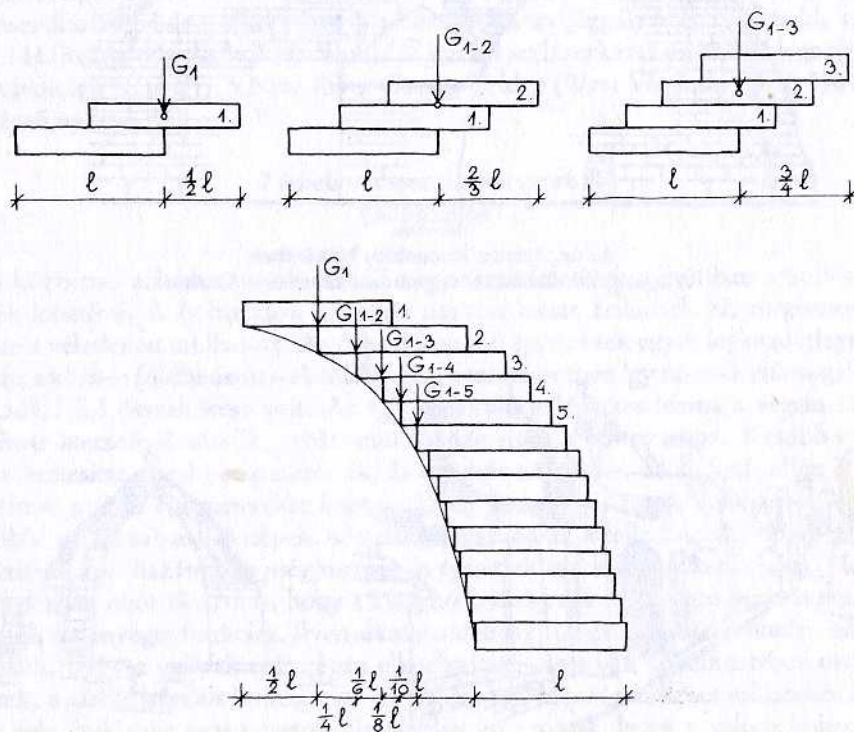


67. ábra
Alberobello.
A dél-itáliai falu jellegzetes képét az álkupolás lefedésű házaknak köszönheti

rómaiak fejlett boltozati technikája ellenére – amit az is mutat, hogy a nép építészetben évezredek át fennmaradt. Legismertebb példája ennek az apuliai Alberobello: a falu jellegzetes képe a rendelkezésre álló építőanyag, a kő egyik kezdetleges, de szerkezetileg helyes felhasználásának köszönhető (67. ábra). Itáliában a legjelentősebb álboltozatok egyike egy körtemplom a Nápoly melletti Nocera Superioreben.¹³⁹⁾ Prehisztórikus álboltozatokat találunk Szardínia szigetén („nurago”),¹⁴⁰⁾ a közelmúltig építették Trieszt környékén („casita”, „trulli”, kör alaprajzzal),¹⁴¹⁾ Dél-Franciaországban („cabane”, négyzet alaprajzú), Angliában („beehive”, kör alaprajzú), Írországban (téglalap alaprajz fölé).¹⁴²⁾ Ez utóbbi helyen legjelentősebb egy VI. vagy VII. században épült kápolna, az Oratory of Gallerus Dingle-ben (County Kerry), 5,7×6,7 m alaprajzi mérettel.¹⁴³⁾

Vizsgáljuk meg ezután az álboltozat erőjátékát. Keressük meg, milyen módon lehet a lehető legkevesebb konzolosan kiálló köréteggel a lehető legnagyobb fesztávolságot áthidalni. A számításban egyszerűsítő feltevéseket vezetünk be, amelyek azonban az álboltozat lényegét nem érintik. Feltesszük, hogy az alkalmazott kövek azonos méretű és súlyú téglatestek. Az álboltozatot csak saját súlya terheli, a csatlakozó szerkezetek kedvező vagy kedvezőtlen hatását nem vesszük figyelembe. Végül a köveket merev testnek, vagyis végtelen nagy feszültség felvételére alkalmasnak tekintjük.

Először azt az esetet nézzük meg, amelyben a kövek kiállása egyenlő. Kisebb méretben készültek is ilyen álboltívek és boltozatok (pl. a mükénéi Oroszlánkapu teherhárító íve, 44b) ábra). Könnyű azonban a 68. ábra alapján belátni, hogy mivel



68. ábra

Az álboltív statikai vázlatja.

A régi korok építői tapasztalati úton jutottak el a szerkezetileg legkedvezőbb formához

bármelyik követ terhelő falazat súlypontjának a kő fölé, legfeljebb annak szélére kell esnie, a konzolos kiállások összegének határértéke – végtelen számú köréteg elhelyezése esetén is – csak egy elem l hosszmérete, gyakorlatilag természetesen ez sem érhető el.

Sokkal kedvezőbb az eredmény – és az álboltozatok építői a gyakorlati tapasztalatok alapján ezt tudták is – ha az egyes kövek kiülését változóan vesszük oly módon, hogy mindegyiké a lehető legnagyobb legyen. A legfelső kő nyilvánvalóan $1/2l$ kiülésű lehet. A második sor annyira állhat ki, hogy a két felső kő együttes súlypontja a harmadik kő szélére essék. Így a második sor kiülése $1/4l$ lehet (68 ábra). Ezt a gondolatmenetet tovább folytatva azt találjuk, hogy az egyes sorok kiülése

$$1/2l, 1/4l, 1/6l, 1/8l, 1/10l, 1/12l \dots$$

Kérdés ezek után, hogy így a teljes szerkezet milyen fesztávolságot tud áthidalni, matematikai nyelven megfogalmazva az

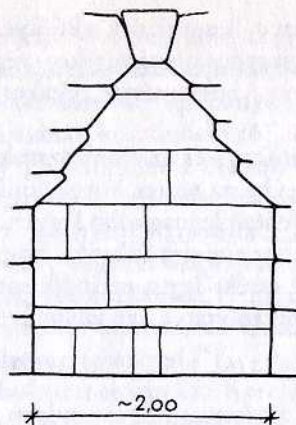
$$1/2 + 1/4 + 1/6 + 1/8 + 1/10 + 1/12 + \dots \text{ ad inf.}$$

sor összegét kell meghatároznunk. Az összeg az ún. harmonikus sor ($1 + 1/2 + 1/3 + 1/4 + 1/5 + 1/6 + \dots$ ad inf.) segítségével határozható meg. Az előbbi sort ugyanis kétszer véve, eredményül a harmonikus sort kapjuk. Erről viszont ismeretes, hogy összege végtelen, tehát nyilvánvaló, hogy az eredeti sorunk összege is az. Ez annyit jelent, hogy elvileg az előbbi módszerrel végtelen nagy fesztávolság hidalható át. Ennek az eredménynek természetesen nincs gyakorlati jelentősége, mivel a végtelen fesztáv végtelen sok köréteget kívánna, de még a gyakorlatilag szóba jöhető nagy fesztávra sem alkalmas ez a szerkezet, mert a sor összege a tagok számának növekedésével csak igen lassan, és egyre lassabban növekszik, ezért nagy fesztávolság csak rendkívül magas belső tér esetében lenne megvalósítható. Ilyenkor pedig az alsóbb kövekre már olyan nagy terhelés jut, hogy a merev test feltételezésével a valóságtól nagyon eltérő eredményt kapunk.¹⁴⁴⁾

Figyeljük meg, hogy az álboltozatok legőbbje – különösen a fejlettebbek, nagyobb fesztávolságúak – szinte pontosan követik a 68. ábrán kialakuló görbét! Az álboltozatok tehát a statikai, szerkezeti ismeretek kezdetlegessége miatt alkalmazott, de a felismert törvényeket – ha nem is tudatosan – mégis helyesen követő szerkezetek. Az álboltozatok alakját nem szubjektív esztétikai igény vagy a véletlen határozta meg, hanem a tapasztalatok útján megismert statikai törvény következetes alkalmazása. Ezért építettek különböző helyeken és korokban lényegében azonos formájú álboltozatokat.

Az álboltozat formájának kialakulásában láthatóan nincs szerepe azoknak az akkor még ismeretlen erőhatásoknak, amelyek éppen a valódi boltozat lényegét alkotják. Például nem tudták, hogy az álboltív két fele a csúcban megtámasztja egymást. (Ez a hatás azonban nem jelentős, mert vízszintes erőt itt csak a súrlódás tud létrehozni, amely éppen itt a kis függőleges teher miatt még nagyon kicsi.) Sokkal jelentősebbek a kör alaprajzú építményekben létrejövő, a valódi boltozatokra jellemző gyűrűirányú erők, amelyek az álkupolák biztonságát lényegesen fokozzák, és ezért merészebb szerkezetet is lehetett volna építeni.

A boltozatok mai ismereteink szerint valószínűleg az álboltozatokból fejlődtek ki. Legalábbis erre mutat az az orvietói sírkamra, amelyet még az etruszkok – a valódi boltozat építésének korai mesterei – építettek: a sír álboltozatának csúcán zárókövet látunk, amely már a boltozati technika kezdetét és a boltozat erőjátékának meg-



69. ábra

Etruszk sírkamra Orvietóban.

Az álboltozat záróköve a boltozatépítés kezdetét mutatja

sejtését mutatja (69. ábra). Egyszerű boltíveket és dongákat már Mezopotámiában és Egyiptomban is építettek. Az első téglából falazott donga Egyiptomban a III. dinasztia idejéből ismeretes, egy sírkamra lefedéseként. A Ramasszeumban nagyobb fesztávolságú dongaboltozatos folyosó épült.¹⁴⁵⁾ Mégis csak a gazdag etruszk hagyományokat tovább fejlesztő római építészetben vált a boltozat az építészet lényeges elemévé, és a legújabb kor kezdetéig a nagy terek lefedésének szinte egyetlen lehetséges módja maradt.

Nagy terek lefedésére a térbeli erőjátékú szerkezetek, így elsősorban a kupolák a legalkalmasabbak. Nem véletlen tehát, hogy az építészettörténetből ismert legnagyobb fesztávolságokat kupolával hidalták át. A római építészet oldotta meg először a nagy centrális terek kupolás lefedését. A római félgömb kupolák közül a Pantheonon kívül Hadrianus Tivoli-i villájában a 12,5 m átmérőjű Tempio della Tosse-t, a Baiae-i termák romokban megmaradt 28 . . . 30 m fesztávolságú kupoláit és a római Caracalla-termák 35 m átmérőjű, elpusztult caldariumát említjük meg.¹⁴⁶⁾

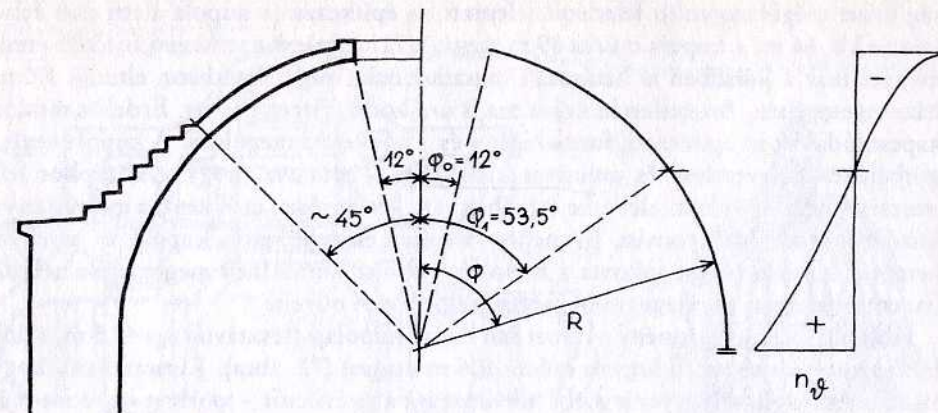
A római Pantheon kupolája (70. ábra) nemcsak a római kor, hanem az egész építészettörténet egyik legjelentősebb térlefedése, amelynek 43,2 m-es fesztávolságát csak az acél- és vasbeton szerkezetű épületek szárnyalták túl. A kupola erőjátékát érdemes részletesebben is megvizsgálni. A számításban a kupolát héjszerkezetként kezeljük. Ez a közelítés ott, ahol a héjban csak nyomóerők vannak, tehát repedés nem keletkezik, közel áll a valósághoz. Ahol azonban a szerkezet a húzóerők miatt megreped, az erőjáték lényegesen megváltozik.

A Pantheon kupolája pontos félgömb, amelynek átmérője 43,2 m. A kupola tetején 8,9 m átmérőjű opeion készült. A felülvilágítónak megfelelő φ_0 szög (l. 70. ábrát):

$$\sin \varphi_0 = \frac{8,9}{43,2}; \varphi_0 \approx 12^\circ.$$

A kupola egységnyi felületének súlyát g -vel jelölve, a tetszőleges φ szöghöz tartozó vízszintes metszet feletti teljes teher¹⁴⁷⁾:

$$Q = 2gR^2\pi(\cos \varphi_0 - \cos \varphi).$$



70. ábra

A római Pantheon.

Az építészettörténet legnagyobb térlefedése az építési tapasztalatok alapján figyelembe veszi az erőjátékot

(A számításban csak az önsúlyt vesszük figyelembe, ami több okból is indokolt: a nagy vastagságú kupola önsúlyához képest a többi teher általában elhanyagolható, jelen esetben hőteherrel a római éghajlat miatt sem kell számolni, a szélteher viszont azért hanyagolható el, mert mint a metszeten látható, a kupolának csak a felső, lapos része áll szabadon.)

Q ismeretében az n_φ meridiánirányú metszeterő

$$n_\varphi = \frac{-Q}{2R\pi \sin^2 \varphi} = -gR \frac{\cos \varphi_0 - \cos \varphi}{\sin^2 \varphi}.$$

A kupola egységnyi felületére jutó teher normális irányú komponense $q_n = g \cos \varphi$. q_n és n_φ segítségével az n_n gyűrűerő is számítható

$$n_n = -R \left(q_n + \frac{n_\varphi}{R} \right) = gR \left(\frac{\cos \varphi_0 - \cos \varphi}{\sin^2 \varphi} - \cos \varphi \right).$$

A meridiánerő, mint ismeretes, és mint függvényéből is látható ($\cos \varphi_0 > \cos \varphi$), végig nyomóerő. A gyűrűerő ezzel szemben a kupolánál előjelet vált. Számítsuk ki, milyen φ_1 szögnél következik be az előjelváltás, amely a húzószilárdság nélküli anyagból készült boltozatoknál nagy jelentőségű, mivel ha n_n pozitívvá, vagyis húzóerővé válik, a szerkezet megreped. Keressük meg tehát azt a φ_1 szöveget, amelyhez tartozó $n_n = 0$! Ehhez a

$$gR \left(\frac{\cos \varphi_0 - \cos \varphi_1}{\sin^2 \varphi_1} - \cos \varphi_1 \right) = 0$$

harmadfokú trigonometriai egyenletet kell megoldanunk.

Figyelembe véve, hogy $\varphi_0 = 12^\circ$, a megoldás: $\varphi_1 \approx 53,5^\circ$. Tehát ha $\varphi > 53,5^\circ$, gyűrűirányban húzóerők keletkeznek. Ha ezt az eredményt a Pantheon kupolájával összehasonlítjuk (70. ábra), azt találjuk, hogy $\varphi = 45^\circ$ -ig a kupola vastagsága állandó és viszonylag kicsi. 45° -nál kezdődik a római gömbkupolákra jellemző lépcsőzetes felfalazás, amely tehát a gyűrűirányú húzóerők miatt keletkező, meridiánsíkba eső repedések elkerülése miatt készült. A Pantheon helyes szerkezeti megoldását közel kétezzer éves kora meggyőzően bizonyítja. A statikai szempontból megfelelő félgömb kupola építésnek azonban formai következményei is vannak, ez az oka, hogy a római kupolák az épület külsején a felfalazás miatt alig látszanak.

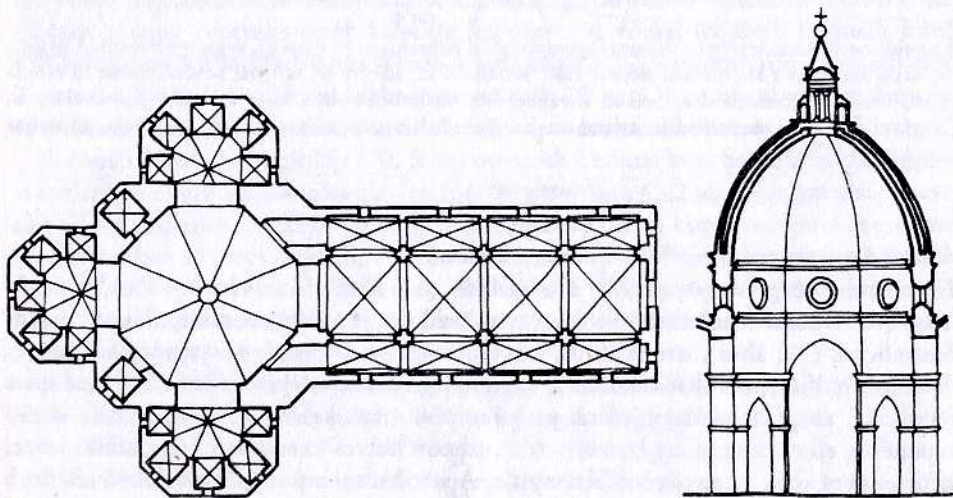
A Pantheonhoz fogható kupola építésére csak a reneszánsz hajnalán, a firenzei dómnál került sor. A fesztávolság ugyan itt valamivel kisebb (42 m), de a nagy magas-

ság miatt mégis nagyobb feladatot jelentett az építkezés (a kupola alatti dob felső szintje kb. 66 m, a kupola csúcsa 89 m magas) (71. ábra). A szerkezeti fejlődés eredményei már a külsőben is hatásosan mutatkoznak: míg a Pantheon eltűnik Róma házrengetegében, Brunelleschi műve ma is uralkodik Firenze felett. Érdekes módon kapcsolódik itt az építészeti, formai igény és a szerkezeti megoldás. A kupola vezérgörbéjének megemlése és csúcsíves kialakítása – mutatva, hogy a középkor felismerései nem merültek feledésbe Itáliában sem – jelentősen csökkenti a gyűrűirányú húzóerőt és az oldalnyomást. Brunelleschi épített először kettős kupolát is, amellyel nemcsak a külső hatást fokozta a belső tér túlzott, kürtöszzerű megemlése nélkül, hanem a hatalmas szerkezet merevségét is előnyösen növelte.

Hasonló nagy teljesítmény a római San Pietro kupolája (fesz távolsága 42,5 m, a dob felső szintje kb. 80 m, a kupola csúcsa 106 m magas) (72. ábra). Kimutatható, hogy az ellipszishez hasonló vezérgörbe alkalmazása a gyűrűerőt – amelyet itt, mint már láttuk, vonógyűrűkkel igyekeztek felvenni – több mint 20%-kal csökkenti a félgömb kupolához képest.¹⁴⁸⁾ A később épített kupolák már nem érték el e két hatalmas alkotás méreteit, és lényeges szerkezeti újítást sem hoztak.

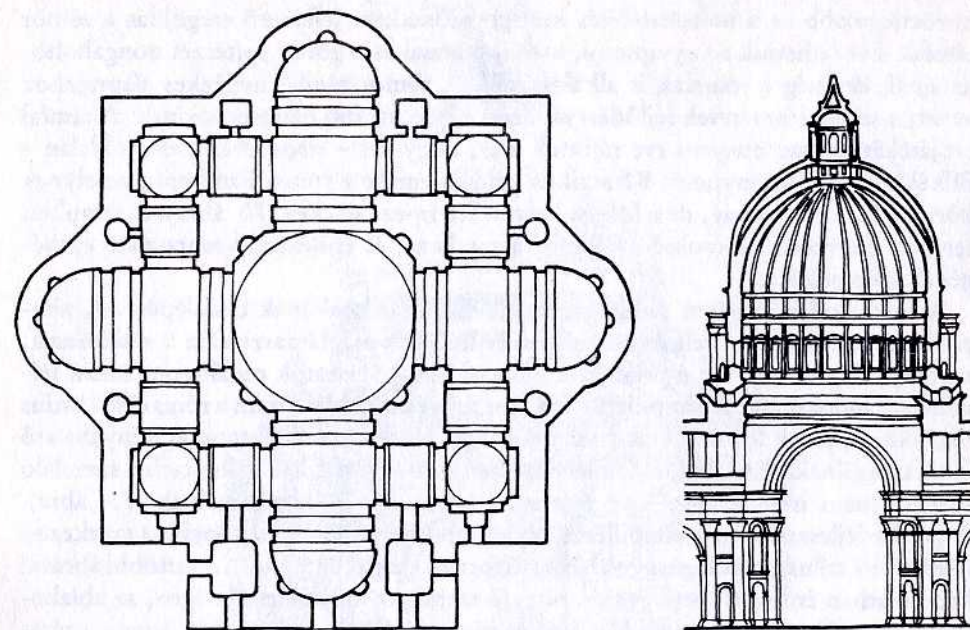
A dongaboltozat nagy alaprajzi kötöttséget jelent, ezért egyre inkább háttérbe szorult. Már a rómaiak megismerték azonban a dongaboltozatok áthatásából keletkező új formákat, amelyek közül különösen a keresztboltozatnak van nagy jelentősége. Ezt ugyanis elegendő csak a sarokpontokra helyezett pillérekre támasztani. A keresztboltozat oldalnyomást is csak ezeken a pontokon ad át. A keresztboltozatok fejlődése végül a gótikus vázszerkezet kialakulásához vezetett. A középkor szerkezeti újítása volt a vezérgörbe megemlése már a román korban, végül a gótika csúcsívei egészen új térhatást adtak, szerkezeti előnyük pedig, hogy kedvező feltételek mellett a boltozatban nem keletkezik húzófeszültség.

A gótikus boltozatok bordáinak régebben nagy statikai szerepet tulajdonítottak. Ma már tudjuk, hogy ezek a boltozatok is a jó minőségű habarcs és a bordák viszony-



71. ábra
A firenzei dóm.

A fesz táv valamivel kisebb, mint a Pantheoné, de a kupola nagy magassága, a kettős héjalás, a csúcsíves forma, az oldalnyomás felvételének megoldása a szerkezeti fejlődés jele



72. ábra
A római San Pietro.

Lenyűgöző méretei mellett elsősorban az oldalnyomás felvételét is szolgáló periferiális terek kialakítása figyelemre méltó Michelangelo tervén

lag kis keresztmetszete miatt nagyjából homogén szerkezetként működnek. Ezt bizonyítják a megrepedt boltozatok törésképei is. A bordáknak elsősorban építés-technológiai szerepük volt, de nem elhanyagolható a merevítő hatásuk sem.

A boltozatépítés a történelmi korok építészetének egyik legjelentősebb eredménye volt, lehetővé tette nagyobb terek lefedését húzószilárdság nélküli anyaggal. A húzószilárdság nélküli boltozatok közös jellemzője, hogy az alátámasztó szerkezetre mindig vízszintes erőt, oldalnyomást adnak át. Az oldalnyomás felvétele a boltozatépítést szükségszerűen kísérő műszaki probléma, amelynek formai hatása a legjelentősebbek közé tartozik.

Ma az oldalnyomást legtöbbször vonóvassal – kör alaprajz esetén vonógyűrűvel – veszik fel. Ez az egyszerű megoldás már régóta ismert. Első alkalmazásai a középkorból származnak (pl. a velencei SS. Giovanni e Paolo fa vonórudas belső tere), de a vonórudas boltozatok elterjedését gátolta, hogy nem állt rendelkezésre elég vas – ami erre a célra a legalkalmasabb – másrészt a vonórúd nem szép látvány. A vonógyűrű ugyan formailag nem jelentkezik, de az erőt nem ismerve, általában túl kicsire méretezték, így nagy alakváltozása miatt hatása sem volt megfelelő. Emiatt terjedtek el az oldalnyomás felvételének egyéb módjai, amelyek mind megegyeznek abban, hogy a vízszintes erőket nyomófeszültségekkel veszik fel. Ezek a megoldások, bár nehezebbek és bonyolultabbak, mint a vonórúd, de sokkal tartósabbak, és a belső teret sem zavarják.

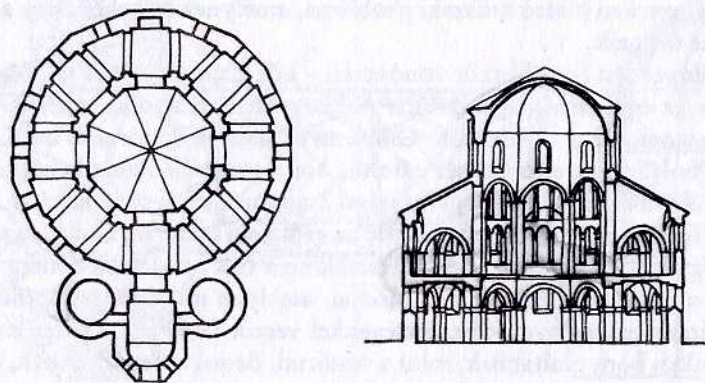
Az oldalnyomás felvételére szolgáló szerkezetek egyik nagy – a történelmi építészetben legerjedtebb – csoportja a vízszintes erő kedvezőtlen hatását függőleges leterheléssel semlegesíti. (Az oldalnyomás és a függőleges leterhelés eredője ferde erő,

amely a megfelelő arányok esetén nem lép ki a megtámasztó szerkezetből.) Legkezdetlegesebb és a boltozatépítés kezdeti időszakára jellemző megoldás a tömör támfal. Ezt láthatjuk az egyiptomi, mezopotámiai és a görög építészet dongaboltozatainál, de még a rómaiak is alkalmazták. A tömör támfal nehézkes alaprajzhoz vezet, a statikai ismeretek fejlődésével ezért egyre inkább háttérbe szorult. A támfal erőjátékát jobban megismerve rájöttek arra, hogy azt – elsősorban belső oldalán – fülkékkel lehet könnyíteni. Klasszikus példája ennek a római Pantheon, amelynek körítő fala 4,5 m vastag, de a fülkék helyén 1,8 m-re csökken (70. ábra). A templom teréhez szervesen kapcsolódó fülkesor a szerkezet és építészeti kompozíció egységének szép példája.

A fülkékkel könnyített támfal a támpillérek kialakulásának első lépése. A támpillérek, bár folytonos felfekvést igénylő boltozatok megtámasztására is alkalmasak, szerkezetileg elsősorban a pontokon támaszkodó boltozatok oldalnyomásának felvételénél indokoltak. A támpillérek sokszor rejtve maradnak, mint a római Maxentius bazilikánál, és így formailag nem jelentkeznek. Máskor az oldalnyomás irányába eső falak szolgálnak támpillérként, amely esetben már – ha statikailag képzetlen szemlélő számára nem is feltűnően – az építészeti kompozíció részévé válnak (73. ábra). A gótika fejlesztette ki a támpillérek olyan rendszerét, amelynek logikus szerkezeti felépítése a stílus egyik legnagyobb hatású formai eleme (28. ábra). (Az utóbbi ábrával kapcsolatban érdemes megfigyelni, hogy a szerkezet milyen gazdaságos, az ablakon keresztül vett metszeten alig látszik metszett falrész, a beépített anyag a támpillérek síkjába koncentrálna igen kedvező elrendezésű.)

A gótika az önálló támrendszer esztétikai értékének kiaknázása mellett alkalmazta a rejtett támpillért is, legtöbbször úgy, hogy az alsó szinten fülkesort alakított ki, míg feljebb a támpillér már szabadon megjelenik.

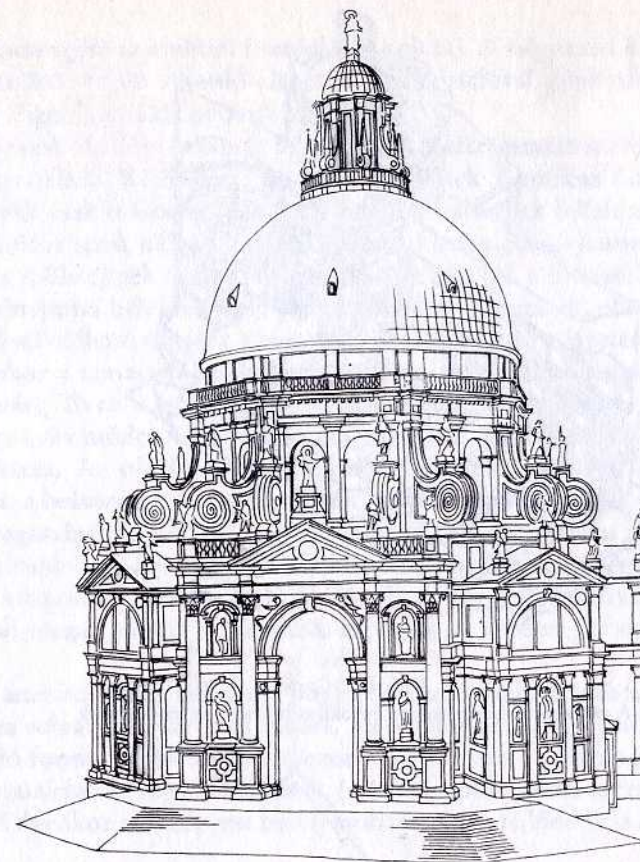
A reneszánsz és a barokk a klasszikus előképek nyomán inkább a rejtett támrendszert használta, de a támpillér is elég gyakori maradt, csak különböző formai megoldásokkal tették kevésbé feltűnővé. A római Il Gesu homlokzati volutája ugyan csak takarja a hajó boltozatának támpilléreit, de a velencei Sta. Maria della Salute, vagy a római S. Andrea al Quirinale kupolájának oldalnyomását részben már a barokk dekorációnak tűnő voluták veszik fel (74. ábra). Tanulságos a S. Pietro kupolája is,



73. ábra

Az aacheni palotatemplom.

A központi kupola oldalnyomását a körüljáró harántfalai az avatlan szem számára észrevehetetlenül veszik fel



74. ábra

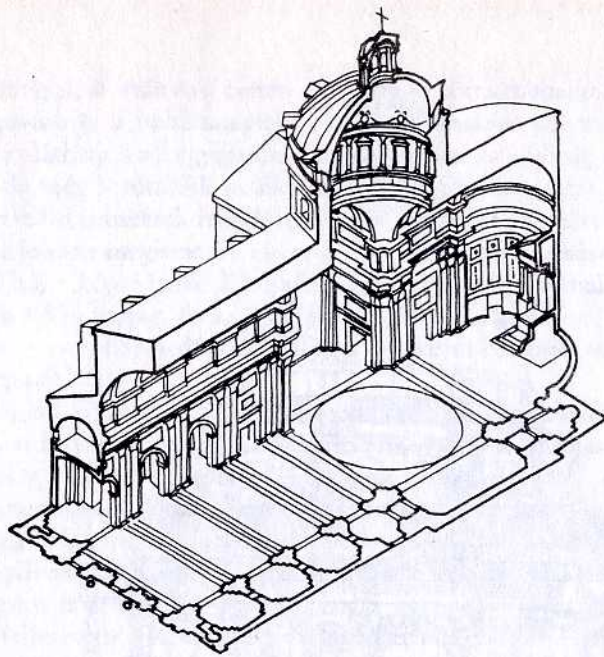
A velencei S. Maria della Salute.

A kupola oldalnyomását részben a díszítésnek ható voluták veszik fel; az épület lefelé szélesedő tömege vizuálisan is kifejezi a vízszintes erők felvételét, és ezért, a mozgalmas barokk részletek ellenére, megnyugtató hatású

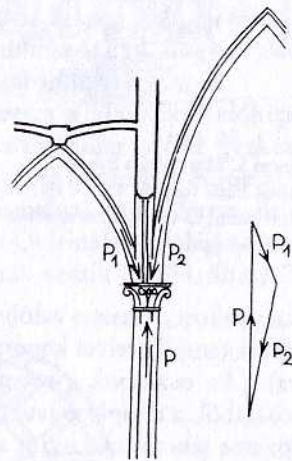
ahol a későrómai és barokk stílusban gyakori, sokszor valóban öncélú díszként alkalmazott golyvázatos oszlopok a kupola támpilléreivel kapcsolatban lényeges szerkezeti szerepet töltenek be (25. ábra). (Az oszlopok a támpillért könnyed hatásúvá teszik, a támpillér csak közvetlen közelből, a templom tetején járva tűnik fel.)

Az oldalnyomás felvételére változatos lehetőséget nyújt a boltozathoz csatlakozó sík vagy boltozott födém felhasználása. A dongák hosszirányú merevségét pl. már a rómaiak is felhasználták a boltozati oldalnyomás felvételére, hasonló megoldással a középkorban is találkozunk. A templomok keresztházának kialakulásában is lényeges szerepe lehet a négyzeti kupola oldalnyomásának. A hossz tengely irányában a hajó, ill. a szentély felveszi az oldalnyomást, de keresztirányban erről külön kell gondoskodni, amit a tér bővítésével oldottak meg (71. ábra).

Az oldalnyomás felvételét a szomszédos terek segítségével talán a reneszánsz és nyomukban a barokk mesterek tudták legszervezesebben az építészeti kompozícióba illeszteni. A nagy központi kupolás centrális tér és ennek legfejlettebb formája, a kilencosztású tér a szerkezet és forma összhangjának a gótikához hasonló csúcspontja (72. ábra).



75. ábra
A római Il Gesù.
A szerkezeti szempontok a barokk stílusban is érvényesülnek



76. ábra
A gótikus csarnoktemplom szerkezeti megoldása.
A boltzatok oldalnyomása kiegyenlíti egymást, így a karcsú, magas pillérek központos nyomásra vannak igénybevéve

A római Il Gesù templomnak, a barokk egyik típusalkotó épületének vizsgálata is mutatja, hogy ez a stílus sem tagadta a szerkezetet, csak változatosan használta fel a statikai törvényekből adódó kényszereket az építészeti megoldásban (75. ábra). A dongaboltzattal fedett hosszhajó oldalnyomását a templomtérhez funkcionálisan csatlakozó kápolnasor harántirányú elválasztó falai veszik fel, mint rejtett támpillér (amelyek a főhajónál itt alacsonyabb tető felett valódi támpilléreként folytatódnak,

ezek visszacsengése az említett homlokzati voluta). A négyzeti kupola körül pedig a kilencosztású térhez hasonló alaprajzi kompozícióval gondoskodott a templom tervezője, Vignola az oldalnyomás felvételéről.

A boltzatok oldalnyomásának felvételében az alátámasztó szerkezetek leterhelése is segítséget jelent. Közismert, hogy ezért épültek a gótikus fiatornyok, és mint díszítmények csak másodlagosak (28. ábra). A boltvállak felfalazása – a magukban álló, periferiális terek nélküli kupolák jellemző megoldása – hasonló jelentőségű, és ezeknek az épületeknek tipikus, magas tömegét adja (pl. a firenzei baptisterium).

Az oldalnyomás helyi felvétele leghatásosabban egy másik, ellenkező irányú vízszintes erővel oldható meg (ez a megoldás önmagában természetesen nem elégséges, mert ilyenkor a támasztó boltív vagy boltzat másik oldalán ismét jelentkezik az oldalnyomás). Ilyen a gótikus támív erőjátéka, amely a boltzat oldalnyomását nemcsak passzív módon továbbítja a támpillér felé, hanem saját oldalnyomásával is egyensúlyozza. Az oldalnyomás ilyen aktív felvételét a gótika máshol is gyakran alkalmazta: a boltzatok meredekségének, a csatlakozó boltvállak egymáshoz viszonyított magasságának helyes megválasztásával pl. tökéletesen megoldotta, hogy a csarnoktemplomok fő- és mellékhajói egymás oldalnyomását egyensúlyozzák, így a pillérek központos igénybevételek (76. ábra). Így tudták elérni, hogy a csarnoktemplomok magas pillérei is karcsúak legyenek és a belső tér egységes hatását ne zavarják.

E rövid áttekintésből is láthatjuk, hogy a boltzati oldalnyomás felvételének milyen nagy hatása volt az építészet alakulására. Az oldalnyomást egyensúlyozó szerkezetek vagy önálló formai elemként jelentkeznek (elsősorban a gótikában), vagy az építészeti kompozícióban rejtve maradnak (a legkiválóbb példái a reneszánsz korában épültek) és ilyenkor a térképzést befolyásolják, annak fejlődését is elősegítik.

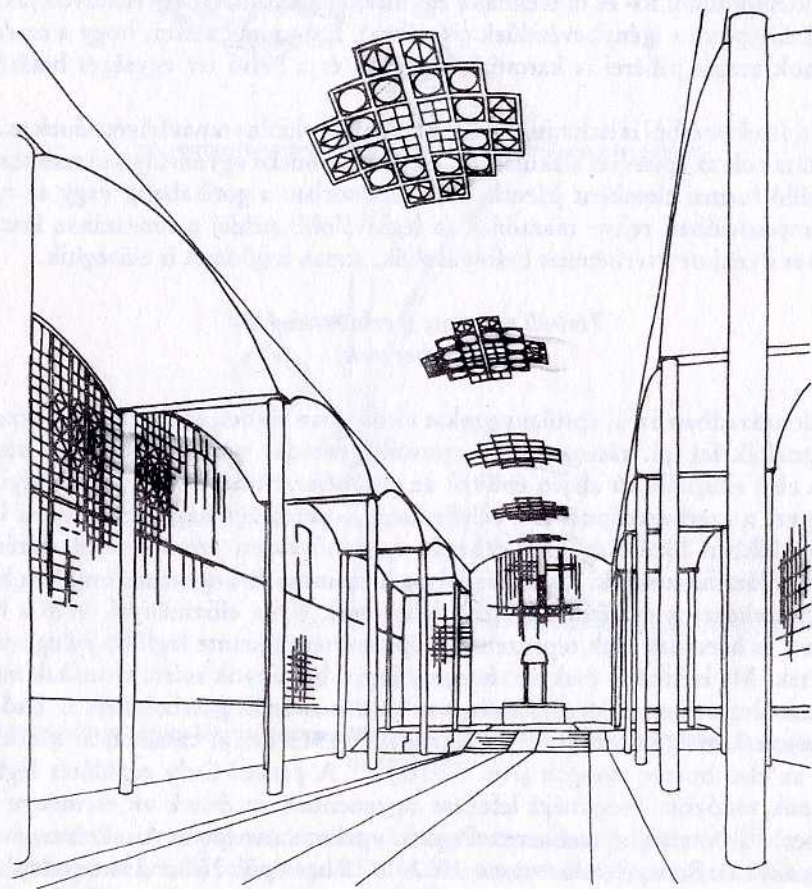
Térbeli nyomott szerkezetek II. (héjszerkezetek)

A múlt században az új építőanyagokat elsősorban síkbeli erőjátékú szerkezetekhez használták fel (pl. rácsostartók, ívtartók, gerendás vasbeton födémek készültek). Az első világháború idején épültek az első héjszerkezetek.^{148a)} Mint annyi más esetben, ezt a szerkezetípust is a célszerűség, a gazdaságosság igénye hozta létre. Az első időkben kizárólag ipari jellegű, építőművészeti szempontból alárendelt épületek céljára használták. Csak később, a harmincas és negyvenes években kezdtek a héjszerkezetek esztétikai értékeit felismerni. Ilyen előzmények után a héjak az ötvenes és hatvanas évek reprezentatív építészetének szinte legfőbb jellegzetességévé váltak. Ma is inkább csak építéstechnológiai hátrányok miatt szorultak vissza.

Valószínűleg a párizsi Bercy pályaudvar 1910-ben épült parabolahéja az első vasbeton héjszerkezet (tervezője S. Boussiron).¹⁴⁹⁾ 1915-ben a casablancai kikötőben épültek az első hosszú dongák (Au. Perret).¹⁵⁰⁾ A párizsi Orly repülőtér léghajóhangárának redőzött dongahéjú lefedése ugyanennek az évnek az eseménye (Eu. Freyssinet).¹⁵¹⁾ Az első héjszerkezettel fedett reprezentatív épület Au. Perret nevéhez fűződik, aki a Le Rancy-ban tervezett, 1922–1923-ban épült Notre-Dame templomot vasbeton dongával fedte le (77. ábra).¹⁵²⁾ Ugyanebben az időben W. Bauersfeld szabadalmat kapott vashálóra torkrét eljárással betonozott kupola építésére. 1923–1924-ben az ő eljárásával valósult meg a jénai Schott cég üzemi épülete.¹⁵³⁾ A kupola átmérője 40 m, vagyis megközelíti az építészettörténetből ismert legnagyobb kupo-

lákat, vastagsága viszont csak 6 cm. Így a vastagság és a fesztávolság aránya itt 1/666, a San Pietrónál pl. 1/13! A héjszerkezetek vékonysága túlszáz a tyúktojáson is, ahol ez az arány kb. 1/100.¹⁵⁴⁾

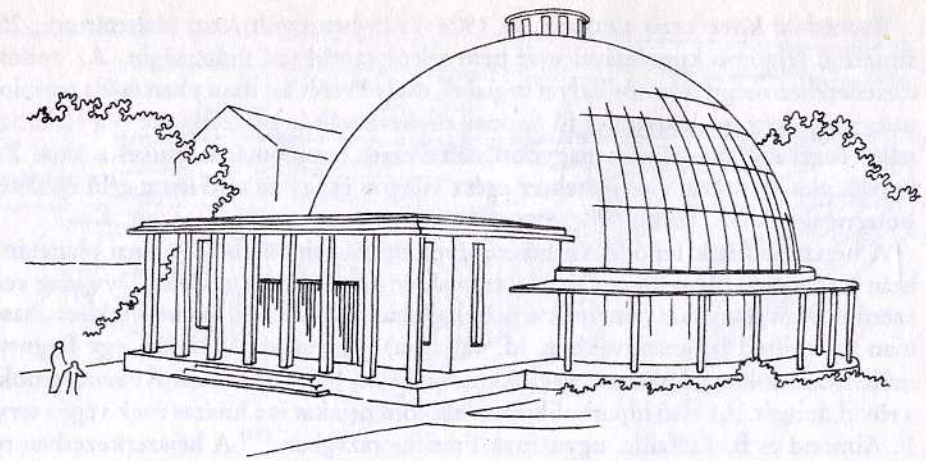
A héjszerkezetek addig elképzelhetetlen karcsúságát, amelynek esztétikai értékei csak később váltak igazán nyilvánvalóvá, a húzó- és hajlítószilárdsággal rendelkező anyag tette lehetővé. E megállapítással látszólag ellenkezik, hogy a héjakat nyomott szerkezetként tárgyaljuk. A nyomott szerkezet kategória azonban csak a fő igénybevételekre vonatkozik (bár a héjakban sok esetben húzófeszültség is van, de nem ez a jellemző igénybevétel). Míg a falazott boltozatokban már kis húzófeszültség is repedést okoz, és bármely lehetséges terhelésre szerkesztett nyomásfelület legfeljebb megközelítheti a boltozat kontúráját, a héjszerkezetből szükség esetén ki is léphet, mert a szerkezet képes az így keletkező nagy külpontosságú igénybevétel felvételére is. Különösen a támaszok környezetében kerülhetők el nehezen a támasz eltérő alakváltozásából adódó, ún. zavaró nyomatók, amelyeket azonban a megfelelően méretezett héjszerkezet fel tud venni.



77. ábra

A Notre-Dame templom Le Rancy-ban.

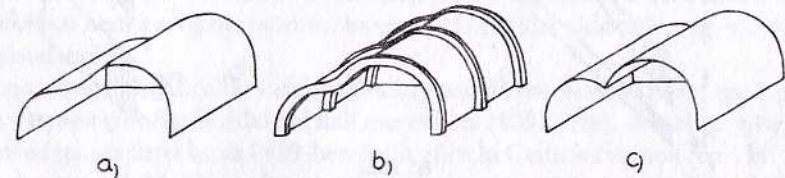
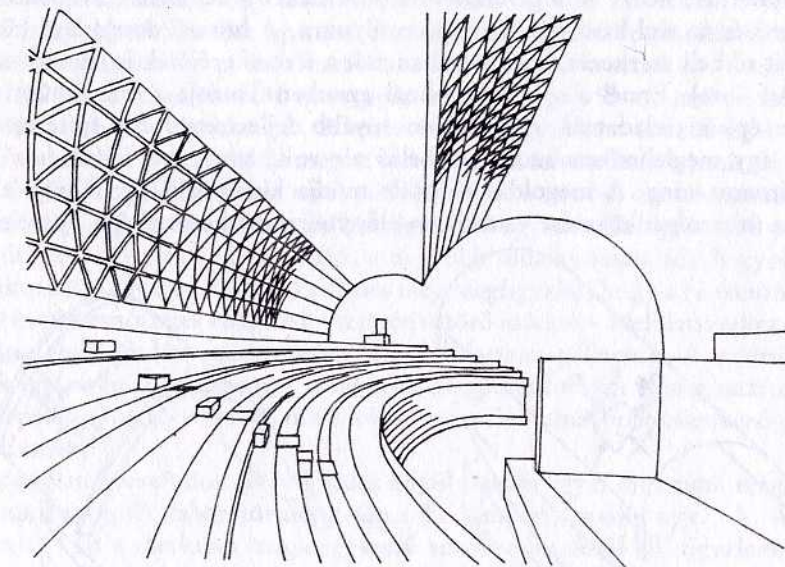
A vasbeton héjszerkezet első művészi igényű felhasználása; érdekes megfigyelni, hogy a lényegében hagyományos térképezés ellenére az új anyag és szerkezet formai hatása egészen újszerű



78. ábra

A jéni planetárium.

A héjkupola formáját a funkció határozta meg, és az épület legfontosabb formai elemévé is vált



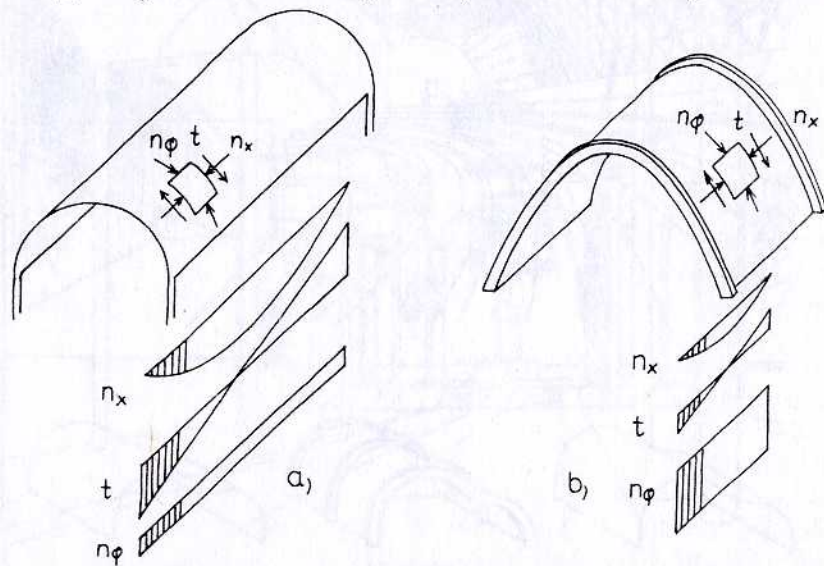
79. ábra

Sportcsarnok Madridban.

Az új szerkezet sokszor meglepő formákkal jelentkezik

Bauersfeld következő alkotása, az 1924–1925-ben épült jénai planetárium, 25 m átmérőjű félgömb kupolájával már nem jelent szerkezeti újdonságot. Az építészet történetében mégis jelentős helyet foglal el, mert Perret Le Rancyban épült temploma után itt is igényes középület fő formai elemévé vált a héjszerkezet – a funkcióval teljes összhangban. Hatása nagyobb volt Perret templománál, mivel a jénai Zeiss művek planetáriumai elterjedtek az egész világon és így az első ilyen célú épületet is ismertté tették (78. ábra).^{154a)}

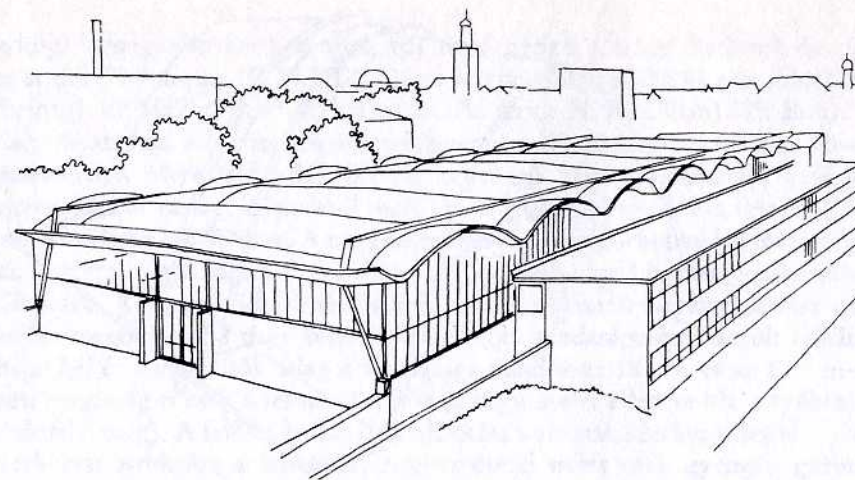
A héjszerkezetek fejlődése a húszas évek végén felgyorsult. A jénai planetárium után Bauersfeld, Dischinger és Finsterwalder kifejlesztette a Zeiss-Dywidag rendszerű hosszú dongákat (amelyek erőjátéka közel áll a síkbeli szerkezetekhez, hasonlóan az említett lemezművekhez, ld. 48. ábra). Freyssinet 1928-ban egy Bagneux-i műhelycsarnokon alkalmazta az első konoid héjat, 1929-ben a reimsi vásárcsarnoknál a rövid dongát. Az első hiperbolikus paraboloid héjakat is a húszas évek végén tervezi F. Aimond és B. Laffaille, ugyancsak Franciaországban.¹⁵⁵⁾ A héjszerkezetben rejlő új formai lehetőségek egyik korai megvalósítása E. Torroja madridi sportcsarnoka (ép.: S. de Zuazo, 1935.).¹⁵⁶⁾ Míg a korábban épült héjszerkezetek legtöbbször vékony boltozatnak foghatók fel, itt már a vasbeton húzószilárdságát az elsőrendű erőjátékban felhasználó új szerkezetről és formáról van szó, amelyet esztétikailag is csak az új szerkezet ismeretében lehet elfogadni (79. ábra). A hosszú domba erőjátéka ugyanis mint említettük, közel áll a gerendához, a terheket a héj felső részében működő nyomóerő és az alul ható húzóerő egyensúlyozza. A hosszú domba első közelítésben tehát síkbeli szerkezet, ahol azonban már a térbeli erőjáték is jelentős szerepet kap [80a) ábra]. Ennél a sportcsarnoknál azonban Torroja a már ismert szerkezetet az építési feladatnak megfelelően tovább fejlesztette. Az építészeti igény ugyanis egy meglehetősen szokatlan belső tér volt, amelyet a lelátó és a küzdőtér határozott meg. A megoldás többféle módja kínálkozik (79. ábra): a kívánt térforma (a) szolgálai követése valamilyen előnytelen szerkezettel (pl. hosszirányban



80. ábra

A hosszú és a rövid dongahéj belső erői.

A hosszú domba erőjátéka a gerendához, a rövid dongáé a hagyományos boltozathoz hasonló (n_x és t : gerendahatás, n_ϕ : boltozathatás)



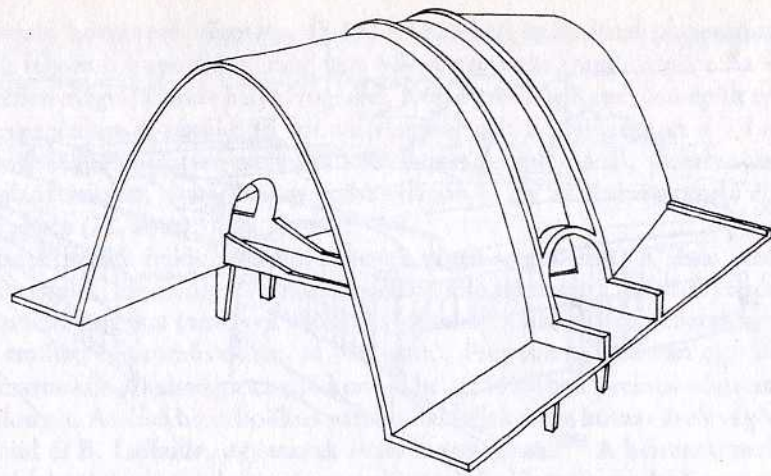
81. ábra

Vízügyi kísérleti laboratórium Darmstadtban.
Forma és szerkezet összhangban van

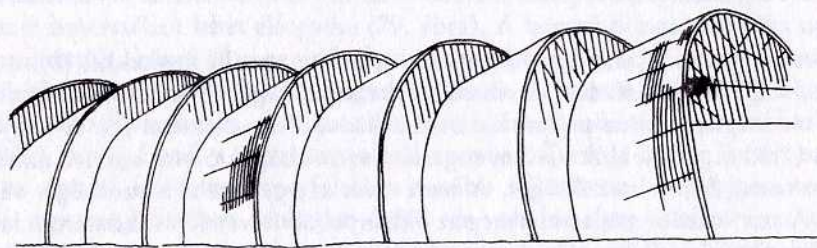
elhelyezett gerendákkal, vagy harántirányú, görbe vonalú keretekkel (b), a szükségesnél nagyobb tér lefedése egyszerű szerkezettel, végül az építési feladatnak megfelelő tér megközelítően pontos határolása kedvező szerkezettel (c). A nagyobbik domba 12,20 m, a kisebbik 6,40 m sugarú, fesztávolságuk 55 m, amihez mindössze 8,5 cm vastag héj volt szükséges. A merevítést az egyébként is szükséges végfalak adják. A szerkezet önmaga oldja meg az oldalnyomás felvételét is: a határoló falaknál a héj érintője függőleges, tehát nincs oldalnyomás, a két héj csatlakozásánál pedig a tervező úgy választotta meg a hajlásszöveget, hogy az oldalnyomások pontosan egyensúlyban legyenek (mint látható, a nagyobb oldalnyomást adó nagyobbik héj a csatlakozásnál a meredekebb). Érdemes még megfigyelni, hogy a funkcionak megfelelő irányú természetes világítást – szintén úttörő módon – a felületszerkezet rácsosításával, az erőjáték lényeges zavarása nélkül oldotta meg Torroja. A madridi sportcsarnok így az építési feladatnak megfelelő, az épület formáit is meghatározó szerkezet jó példája, amely elveiben ma is követésre méltó (ami éppen ellenkezőjét jelenti az utánzásnak).

A számtalan hosszú dongás térlefedés közül csupán egyet mutatunk még be, egy Dortmundban épült laboratóriumot (ép.: E. Neufert, szerk. terv.: A. Mehmel, 81. ábra).¹⁵⁷⁾ Itt a szerkezet maga egyszerű sorolt dongákból áll, figyelemre méltó azonban az építészeti és a szerkezeti tényezők összhangja a részletmegoldásokban. Az épület végein a párkány egyben a szélő dongák oldalnyomását is felveszi, a dongák merevítését viszont az elég mély csarnok jobb világítása és a kedvezőbb homlokzat érdekében nem a szokott módon, hanem a tető fölött oldották meg, szerkezetileg is kifogástalanul.

A rövid domba erőjátéka közelebb áll a hagyományos boltozathoz, így a gazdaságos, kis vastagságú héjat bordákkal kell merevíteni (80b) ábra). A vasbeton héjszerkezet lehetőségeit mutatta be az 1939-ben épült zürichi Cementcsarnok (ép.: H. Lenzinger, szerk. terv.: R. Maillart). A tervezők ezért a merevítést a minimálisra csökkentették, emiatt viszont a vezérgömbének a kis fesztávolság (kb. 15 m) ellenére a nyomásvonalat kell követnie. A szabadon megjelenő, merevítés nélküli héjperem (vastagsága



82. ábra
A zürichi Cementcsarnok.
A vasbeton és a héjszerkezet lehetőségeit mutatja be



83. ábra
Ipari csarnok, Gossau (Svájc).
A héjakat merevítő nagy rácsos ívtartó lehetőséget ad a csarnok jó megvilágítására

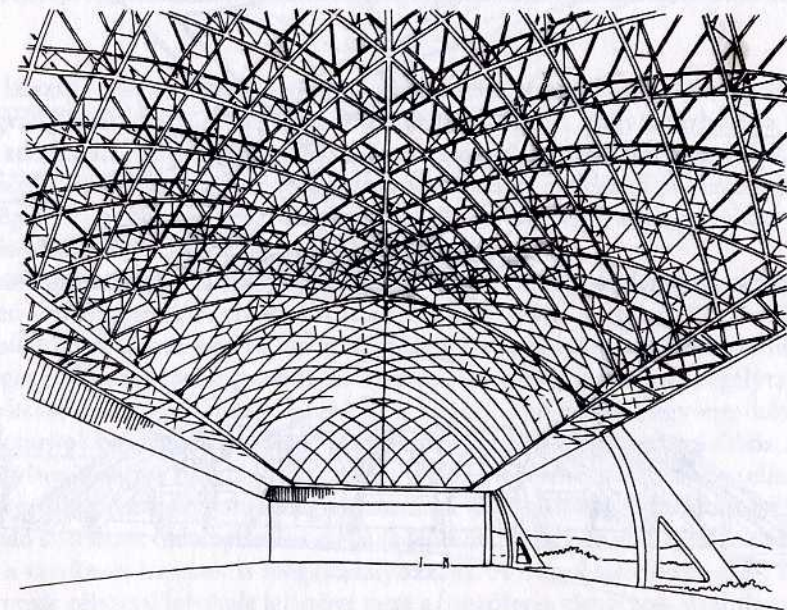
csak 6 cm) egészen új formai lehetőségeket mutatott meg (82. ábra).¹⁵⁸⁾ Később különösen F. Candela használta fel ezt a lehetőséget szinte lebegni látszó szerkezetein.

A merevítés szerkezeti szükségszerűsége is a funkcionális és formai megoldás szerves részévé válhat, mint egy svájci ipari csarnoknál, ahol a fűrészfogasan épített, ferde tengelyű rövid dongák merevítését a csatlakozásnál kialakított rácsos ívtartók adják meg. A dongák technológiai okból kör vezérgörbűjűek, így formájuk erősen eltér a támaszvonaltól, és ezért viszonylag nagy erők jutnak a merevítőkre, amelyek viszont ezért megfelelő méretű felülvilágítók elhelyezésére is alkalmasak (83. ábra).¹⁵⁹⁾

A dongák áthatásából keletkező formák már a történeti építészetből ismertek. Míg azonban régen a kolostor- és teknőboltozatot folyamatosan kellett alátámasztani, a héj erőjátéka lehetővé teszi ezeknél is a pontokon való megtámasztást. Ezt a lehetőséget használta fel Nervi a harmincas években épült hangárain. A szerkezet egyben arra is jó példát mutat, hogy a héjak is, mint más szerkezetek, rácozással elemekre bonthatók. Sőt, itt ez a felbontás két lépcsőben valósult meg, a boltozati felületet helyettesítő átlós lamellák is rácsos szerkezetűek ott, ahol az igénybevétel ezt lehetővé teszi. Így érdekes forma alakult ki, amit még fokoz az alátámasztó szerkezet különböző parciális terhelésekre és az építés közbeni állapotokra egyaránt megfelelően alakított formája (84. ábra).

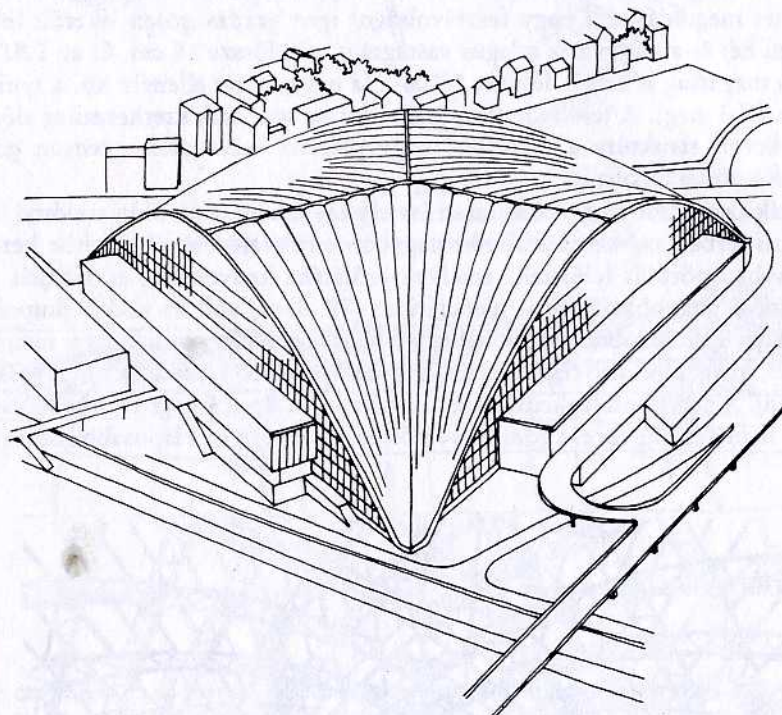
Az eddigi legnagyobb keresztboltozatos tér a párizsi Centre National des Industries et des Techniques (C.N.I.T.) 206 m fesztávolságú kiállítási csarnoka (ép.: R. Camelot, J. de Mailly, B. H. Zehrfuss, szerk. terv.: N. Esquillan) (85. ábra).¹⁶⁰⁾ Ilyen nagy fesztávnál a héj formája természetesen a lehető legpontosabban követi a nyomásvonalat. Merevítőbordák helyett kétrétegű héjat alkalmaztak, amelyek mindegyike 6,5 cm vastag, egymástól mért távolságuk 1,80 m. A két réteget 6 cm vastag merevítőfalak kötik össze. A nagy méretű és ezért kis görbületű héj merevségét fokozza, hogy a támaszoktól legezőszerűen szétfutó, kisebb szegmenthéjakból állították össze. A dongák áthatásából adódó vápának szintén merevítő hatása van. A szellemes megoldással a nagy fesztávolságot igen gazdaságosan sikerült lefedni, a kétrétegű héj és a merevítők átlagos vastagsága mindössze 18 cm, és az 1,93 m-es szerkezeti magasság is csak a fesztáv 1/106-a (a nagy méret ellenére kb. a tyúktojás arányának felel meg). A felület hullámos kialakítása sem csak szerkezeti előnyös, ez a szerkezeti struktúra a hatalmas, nagy méretei miatt csak gyengén görbült felületet előnyösen tagolja is.

A dongák az egy irányú görbület miatt (amely egyébként technológiai előnyt jelent) nem tipikus térbeli szerkezetek. Ezért nagyobb terek lefedésénél előtérbe kerülnek a két irányban görbült felületek, amelyek erőjátéka kedvezőbb, és kihajlás elleni merevségük is nagyobb. A jénai planetárium (78. ábra) volt az első héjkúpola. Itt a gömbfelület a funkcióból adódik, de egyébként, az erőjátékot tekintve, nem a legkedvezőbb, mivel a héj alsó részén gyűrűirányban húzóerő keletkezik, amit vasalással kell felvenni. A héjkúpola legkedvezőbb formája a teherre szerkesztett nyomásfelület. Laposabb héjnél ez alig tér el a gömbsüvegtől, és egyébként is, a laposabb gömbsüveg-



84. ábra
Repülőgéphangár (szerk. terv.: P. L. Nervi).
A kolostorboltozat pontszerű megtámasztását csak a héjszerkezet tette lehetővé; figyelemre méltó a héj bordázata – a nagyobb igénybevételek helyén tömör, máshol áttört – és a pillérek vonalvezetése, amely az erők irányát követi

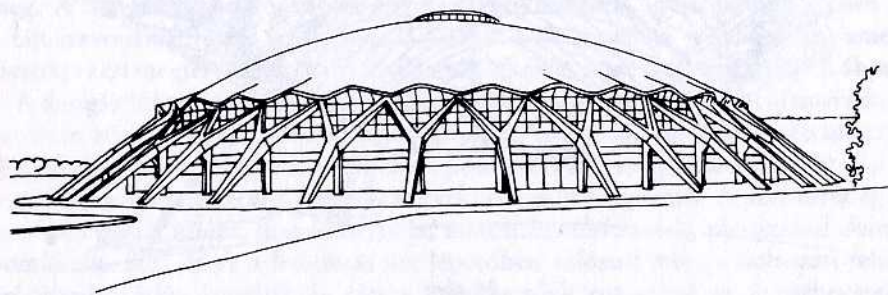
ben nem keletkezik húzóerő. A lapos héjaknál viszont a stabilitási kérdések kerülnek előtérbe, a két irányú görbület ellenére (a lapos ivtartókra vonatkozó megállapításaink lényegileg erre is vonatkoznak). A lapos szerkezet további hátránya a nagy oldalnyomás, amely ugyan hajlított héjjal kiküszöbölhető, de a hajlított szerkezet is gazdagságtalan. Az oldalnyomás felvételére több mód is kínálkozik, pl. feszített vonógyűrű, a kupolát körülvevő vízszintes födém, az oldalnyomás irányát követő ferde támaszok stb. Ez utóbbi megoldást alkalmazta Nervi a római Palazzetto dello Sportnál (86. ábra). Az Y alakú ferde támaszokon az 58,5 m átmérőjű, lapos kupola mintegy



85. ábra

A CNIT kiállítási csarnok Párizsban.

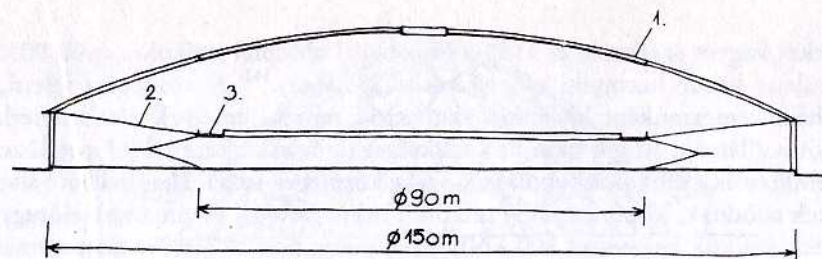
A 200 m-nél nagyobb fesztávolság megköveteli az épület erőjátékának megfelelő kialakítását



86. ábra

A római Palazzetto dello Sport.

Korunk egyik klasszikus szépségű épülete, amelyben a szerkezet és a forma elválaszthatatlan harmóniában egyesül

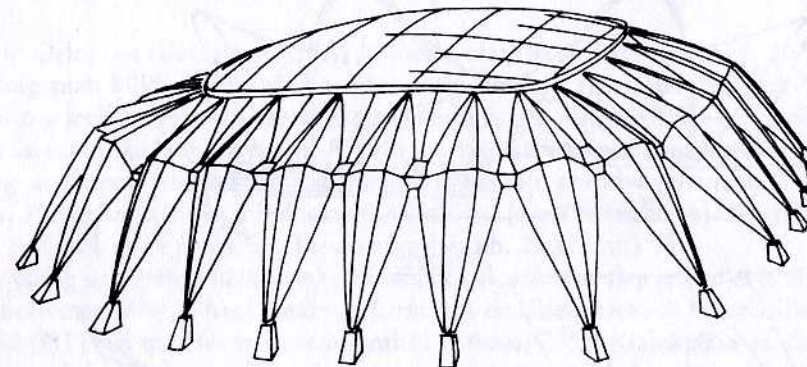


87. ábra

A moszkvai Népgazdasági Kiállítás építészeti pavilonjának terve.

Szellemes, új megoldás a vonógyűrű funkcionális felhasználása

1 héjív; 2 vonóvas; 3 lelátóként felhasznált vonógyűrű



88. ábra

A luznyiki stadion Moszkvában.

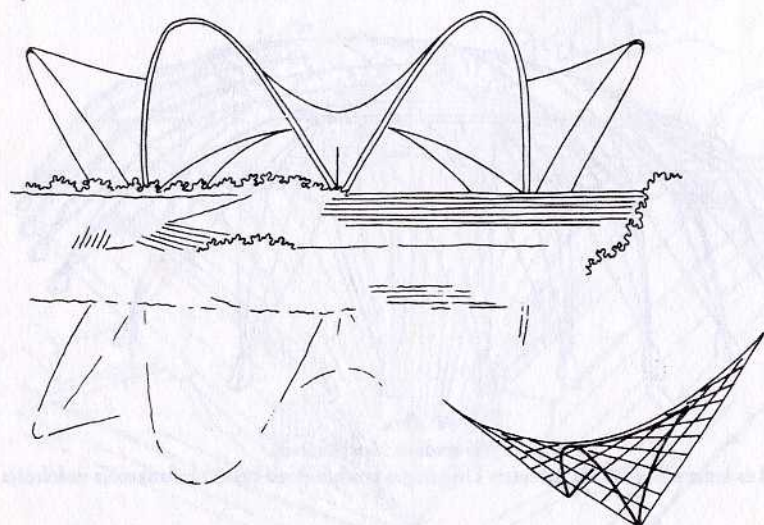
A héjből és lemezmű-ívekből összetett különleges szerkezetet a belső tér funkciója indokolja

lebegni látszik. A könnyedséget fokozza a héj peremének hullámossága, amely a belső tér megvilágítását javítja, és egyben formailag is kifejezi, hogy a terhelés a pillérek szárain adódik át. A héj Nervi szokásos ferrocement zsaluzóelemein monolit kivitelben készült. A zsaluzatból adódó bordázat az önsúlyt csökkenti és viszonylag nagy merevséget ad, egyben a belső felületet tagolja (a bordák iránya azonban itt nem az erőjátékból adódik, mint Nervi födémeinél).¹⁶¹⁾

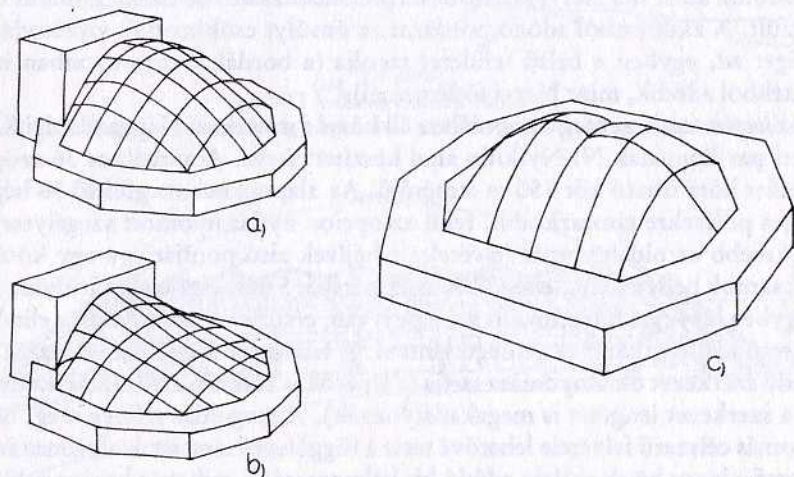
Formailag és szerkezetileg a kupolához áll közel a moszkvai Népgazdasági Kiállítás építészeti pavilonjának N. Nyikitin által készített terve. A szabályos 36 szög alaprajzú épület köré írható kör 150 m átmérőjű. Az alaprajznak megfelelő 36 héjív alul függőleges pillérekre támaszkodik, felül az opeion nyílás nyomott szegélytartójára. Legérdekesebb az oldalnyomás felvétele: a héjívек alsó pontját egy-egy kötél kapcsolja a csarnok belsejében „lebegő” 90 m átmérőjű, 5 m széles acélgyűrűhöz. A gyűrűnek egyben lényeges funkcionális szerepe is van, erről lehet a csarnokban elhelyezett nagyméretű kiállítási tárgyakat megtekinteni. A lelátónak függőleges támasza nincs, a tételédő szerkezet oldalnyomása tartja (a lépcsők is részben erre támaszkodnak, de egyben a szerkezet lengését is megakadályozzák). A megoldás előnye még, hogy az oldalnyomás célszerű felvétele lehetővé tette a függőleges támaszok alkalmazását, így elkerülhető a lapos héjak szélein adódó kis belmagasságú, nehezen hasznosítható tér-rész megjelenése is. A terv jelentőségét elsősorban abban láthatjuk, hogy az oldalnyomás húzóerővel való felvételét itt sikerült talán először az építészeti megoldással szervesen egyesíteni (87. ábra).^{161a)}

Érdekes vegyes szerkezet az 1980-as moszkvai olimpiai játékokra épült 90×90 m alapterületet lefedő luzsniki sportcsarnok (88. ábra).¹⁶²⁾ A középrész feletti, igen lapos héjat lemezműként kialakított támaszok tartják, amelyek részben térlefedő funkciót is ellátnak. Itt így sikerült a szükséges teret a szerkezettel jól megközelíteni (mint említettük a szokásos kupoláknál a talaj közelében rosszul használható alacsony térrészek adódnak, középen pedig túlzott a belmagasság). A támaszok előregyártva készültek (súlyuk egyenkint 800 kN), a héj pedig bordás ferrocement elemekből, amelyeket helyszíni betonozással monolit szerkezeté tettek.

A kupolák könnyítése végül a rácsos szerkezethez vezet. Ennek egyik példája

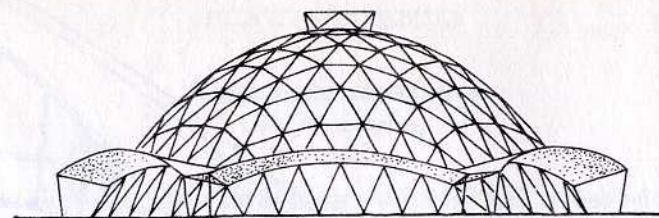


89. ábra
Étterem, Xochimilco (Mexikó).
Szerkezet és forma klasszikus szépségű összhangja



90. ábra
Hártyaszerkezetek.

Formájuk a felvett erőjátékból adódik: egyes esetekben kisebb (a) és nagyobb (b) feszültség esetén más alakot is vesz fel a hártya, nemcsak meredeksége változik; a héj görbülete és így fesztávolsága a felülethez hasonló erőjátékú bordákkal növelhető (c)



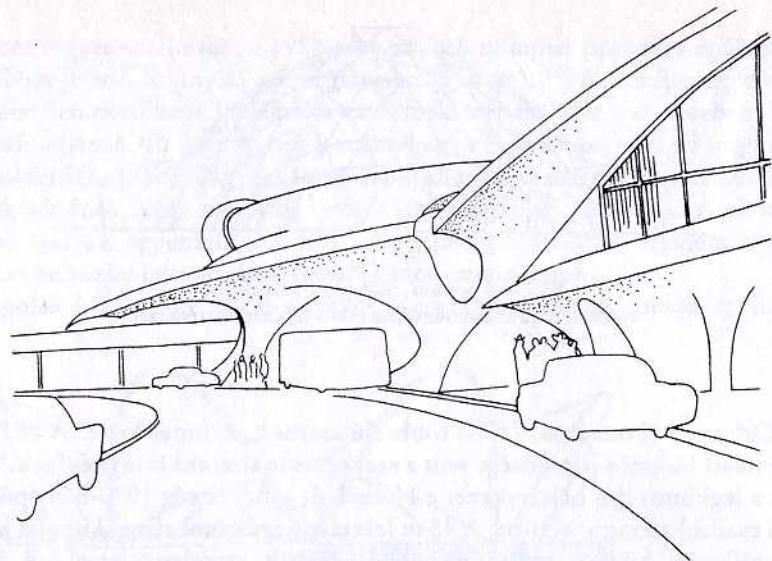
91. ábra
Kiállítási pavilon, Budapest, Városliget.
Háromszögű alumínium elemekből álló hártvaszerkezet

a New Orleans-i (Louisiana, USA) többcélú csarnok, a Superdome. A 207 m fesztávolság miatt különös jelentősége volt a szerkezet fokozott könnyítésének.¹⁶³⁾

Talán a legkönnyebb héjszerkezet a Hoesch és a Bayer cég 1970-ben épült közös kiállítási csarnoka Hannoverben. A 45 m fesztávolságú gömbsüveg kupolát két 1 mm vastag acéllemez közötti polisztirolhabból készült szendvics elemekből állították össze. A szerkezet súlya mindössze $0,33 \text{ kN/m}^2$ (összehasonlításként: a jéni planetárium $1,50 \text{ kN/m}^2$, a római San Pietro kupolája kb. 26 kN/m^2).¹⁶⁴⁾

Az eddig ismertetett héjtípusok, ha erőjátékuk sokszor alapvetően el is tért a falazott boltozatokétól, a hagyományos formákra emlékeztettek. A hiperbolikus paraboloid (HP) héj már formai szempontból is újszerű.^{164a)} Kialakulása és elterjedése azonban elsősorban nem formai, hanem szerkezeti okokkal magyarázható, hiszen az ötvenes évekig szinte kizárólag építészeti alarendelt helyeken, pl. raktáraknál alkalmazták. Előnye a nagy stabilitás, mivel a nyeregfelület az egyik irányban mindig húzott. Így ez a héjforma igen lapos is lehet. További előnye, hogy peremeinek kedvező megválasztása esetén nincs oldalnyomása, a szegélytartókra csak nyíróerő adódik át (amely a szegélyekre nézve központos igénybevételt jelent). Mivel két irányban egyenes alkotók képezik a felületet, egyszerű a zsaluzása is. Egyetlen hátránya, hogy egyik irányban az egész felületen húzófeszültségek keletkeznek, ezért viszonylag sok vasat igényel. (Ezért a HP héj már csak nagy fenntartással sorolható a nyomott szerkezetek közé.) A HP héj hagyományos kialakítása – ahol a szegélytartó párhuzamos az egyenes alkotókkal – formailag nem a legkedvezőbb, de nincs akadálya ugyanezt a felületet más kontúrokkal készíteni. A HP héjakat kitűnő szerkezeti és formai érzékkel használta fel F. Candela. Legérdekesebb a Xochimilco-i (Mexikó) étterem lefedése (89. ábra), ahol csak a figyelmes vizsgálat mutatja meg, hogy ez is HP felület (l. a magyarázó ábrát). A nyolc alátámasztási pont 30 m átmérőjű körön helyezkedik el, amely elé a héj még 6 m-t konzolosan előrenyúlik. A középpontban adódó síkpont csuklónak tekinthető, így a szerkezet nyolc háromcsuklós héjívből tevődik össze. A héj vastagsága mindössze 4 cm.

A számtalan egyéb héjtípus közül az ún. hártvaszerkezetet említjük még meg. Számunkra az az érdekessége, hogy egy statikai (gazdaságos erőjátékot adó és számítástechnikailag is előnyös) alapelv milyen újszerű formákhoz vezet, amelyek bizonyos esetekben a funkciónak is jól megfelelnek. (90. ábra). A hártvaszerkezet alapelve, hogy a metszeterők vízszintes komponense minden pontban azonos, a tervező által felvett érték. Az így adódó felület érdekessége, hogy ha a héj pereme nem sík, csupán a vízszintes komponens megváltoztatása is minőségi különbséget okozhat a formában [l. a 90a) és b) ábrát, ahol az egyik irányban homorú felület nagyobb



92. ábra

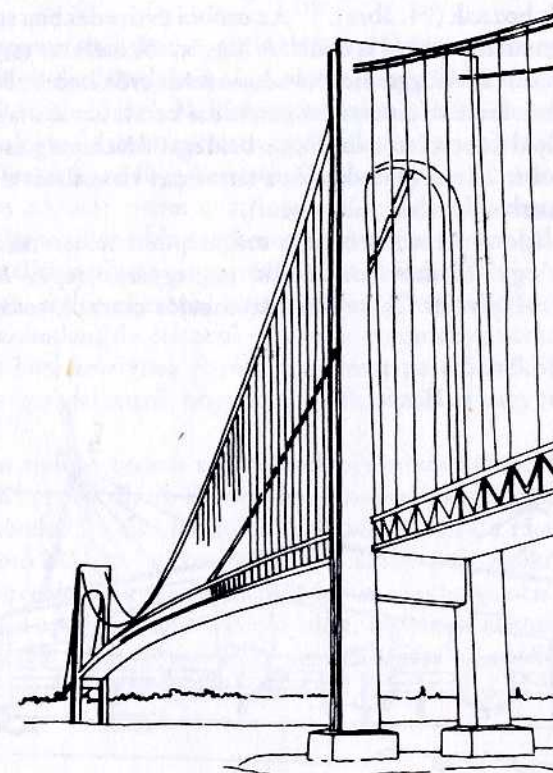
A TWA légitársaság felvételi épülete a New York-i Kennedy repülőtéren. Különleges formái ellenére a tervezők figyelembe vették az erőjátékot

inetszeterő felvétele esetén adódik].¹⁶⁵⁾ A hártyszerkezet egyik érdekes megvalósítása a budapesti Városligetben épült kiállítási csarnok, amelyet háromszögű alumínium elemekből szereltek össze és áttetsző műanyag lemezzel fedtek (terv: Kádár I. 91. ábra).

A héjszerkezetek formáinak kialakulásában nagy hatása volt a feladat geometriai és statikai megfogalmazásának, ill. megoldási lehetőségének, valamint a később tárgyalt építéstechnológiának. Ezért elsősorban az egyszerű, könnyen definiálható és számítható formák terjedtek el. Ez a tény szintén a szerkezet – ha nem is egyértelműen pozitív – formai hatását mutatja. Van azonban az alkotásnak más módja is. A New York-i Kennedy repülőtér felvételi épületén (ép.: E. Saarinen, szerk. terv.: Ammann és Whitney) pl. a formákat nem kötik geometriai sémák, és a szerkezet statikai működése sem követhető pontosan, a forma mégsem szakad el az erőjátéktól (92. ábra). Közelítő számításokkal és kísérletekkel ellenőrizték a szerkezetet, sőt ennek megfelelően alakították. Maga Saarinen így emlékezik erről: „Az volt az egyik legboldogabb napunk, amikor a támaszok modelljeit kiformáltuk. Amikor a rajzokat utána elkészítettük, olyan csodálatos formákat találtunk (pl. az alaprajzban), amilyenek nekünk rajzolás útján sohasem sikerültek volna.”¹⁶⁶⁾ Az ilyen szabad formálás azonban igen veszélyessé válhat, ha az alkotók tehetsége és felkészültsége nem elegendő a nehéz feladat megoldásához. „Egy népies Mies könnyebben elviselhető minden utcasarkon, mint egy népies Candela. A TWA repülőtér népi változata még sokáig vártni fog magára, mert tervezése és építése túl drága, és nehéz dió az utánpótlás számára.”¹⁶⁷⁾

Síkbeli húzott szerkezetek
(láncok, kötelek)

A múlt századig – megfelelő anyag híján – alig készültek síkbeli húzott szerkezetek. Legnevezetesebbek a Távols-Keleten épült lánhidak, a mai függőhidak ősei. A húzott szerkezet előnyei elsősorban nagy méreteknél mutatkoznak meg, így érthető, hogy a múlt században is elsősorban a hídépítésben jelentek meg. Eleinte lánc-hidak épültek, az első kábelhidat L. J. Vicat építette 1830-ban Franciaországban. 1851-ben Ellet már 315 m fesztávolságot hidalat át Wheelingben (Ohio, USA) az Ohio folyó fölött. Három év múlva azonban, nem egy elődjéhez hasonlóan, ez a híd is leomlott, mert nem ismerték még a megfelelő merevítés módját.¹⁶⁸⁾ Az utolsó ilyen katasztrófa a Tacoma-híd (Washington, USA) leszakadása volt 1940-ben, négy hónappal megnyitása után. A 850 m fesztávolságú híd hídpályatartója, amely egyben a merevítést is szolgálta, mindössze 2,45 m magas volt (kb. ugyanannyi, mint a sokkal kisebb budapesti Erzsébet-hídé). A tönkremenetel közepes erősségű szélnél, a hossz-tengetely körüli hullámmozgás miatt következett be (az eseményről véletlen folytán filmfelvétel is készült, amely a szenzáción kívül a későbbi elméleti vizsgálat számára is hasznos tanulságokkal szolgált).¹⁶⁹⁾ Ezután dolgozták ki a függőhidak dinamikus



93. ábra

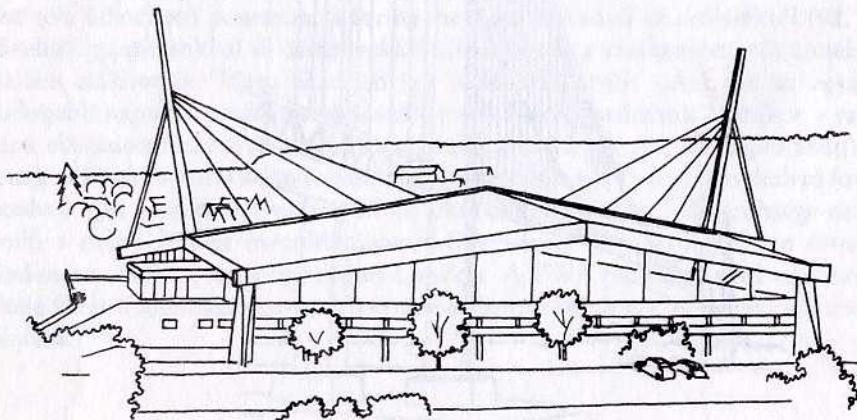
A Verrazano-híd New Yorkban. A nagy fesztávolság következtében az „abszolút forma” egyik jellemző példája

viselkedésének és a merevítő tartók méretezésének pontos elméletét, így remélhető, hogy további hasonló katasztrófa nem fog bekövetkezni. Azóta a merevítő tartók lényegesen nagyobb keresztmetszetűek, a hidak kevésbé karcsúak, ami azt mutatja, hogy a szerkezetek erőjátékának pontosabb megismerése nem mindig teszi a szerkezeteket könnyebbé.

Jelenleg nyolc 1000 m-nél nagyobb fesztávolságú híd van a világon, amelyek mind függőhidak. Ilyen nagy fesztávolság más szerkezettel, mint a 94. oldalon láttuk, aligha hidalható át. Sokáig az 1296 m fesztávolságú Verrazzano-híd volt a legnagyobb (93. ábra), de ezt túlszárnyalta az 1410 m nyílású, 1981-ben megnyitott angliai Humber-híd.¹⁷⁰⁾ A függőhidak esztétikus, elegáns formája, amely azonban a világ bármely táján lényegében azonos, a szerkezet formaalakító hatásának jó példája, a Nervi szerint kialakulóban levő „abszolút forma” egyik első megnyilvánulása.

A magasépítésben a húzott szerkezetek csak az utóbbi harminc évben terjedtek el. Addig inkább csak kisebb jelentőségű épületrészek, pl. előtetők függesztésére használtak húzott rudakat vagy köteleket, itt is sokszor nem annyira szerkezeti, mint funkcionális vagy esztétikai igény alapján. A húzott támasz ugyanis a nyomott rudakhoz, pillérekhez szokott szemnek olyan könnyed hatású, mintha az egész szerkezet lebegne. A legszigorúbb funkcionális szempont döntött viszont a rámpák lefedésénél, ahol a húzott felkötésekkel a rakodást zavaró pillérek elkerülhetők voltak, és nagy kiülésű, gazdaságtalan konzolt sem kellett alkalmazni. Újabban nagy fesztávolságú függesztett szerkezetek is épülnek. Ezek igen anyagtakarékosak lehetnek, és érdekes új formai megoldásokat is hoznak (94. ábra).¹⁷¹⁾ Az utóbbi évtizedekben sok, hasonló elv szerint függesztett gerendatartós híd is épült. A függesztőköteleket tartó nyomott árbocokat, pilonokat sokszor a felfüggesztésből adódó ferde erők kedvezőbb felvétele céljából ferdén építik. Ezek feszült, dinamikus esztétikai hatása azzal magyarázható, hogy a statikai egyensúllyal kapcsolatos ösztönös beidegződések még csak a függőleges erő megértésének fokán állnak (a ferde erőt a természet vizsgálatával foglalkozó tudósok is csak a középkorban kezdték megsejteni).

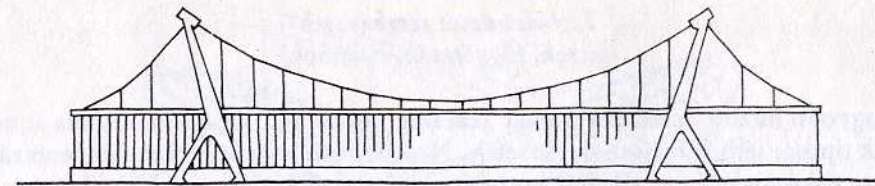
A síkbeli függesztett láncszerkezet igen ritka magasépítési felhasználására is bemutatunk egy példát, egy Mantovában épült papírgyárat (ép.: Berzano és Martinengo, szerk. terv.: Nervi és Covre). A háromhajós csarnok tetőszerkezetét



94. ábra

Műjégpálya, Braunlage (NSZK).

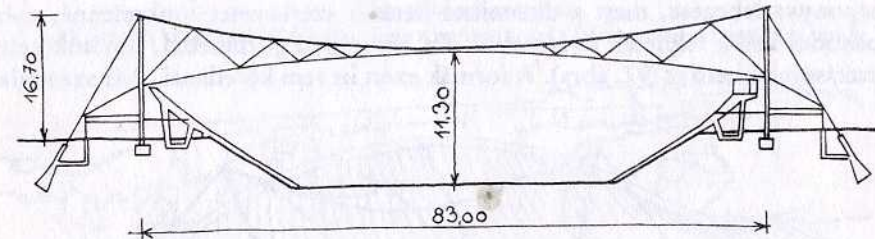
A húzott elemek a mai építészet tipikus, korábban elképzelhetetlenül karcsú, légius formáit tették lehetővé



95. ábra

Papírgyár Mantovában.

A függőhíd szerkezetének magasépítési alkalmazása



96. ábra

Sportcsarnok, Stockholm-Johanneshov.

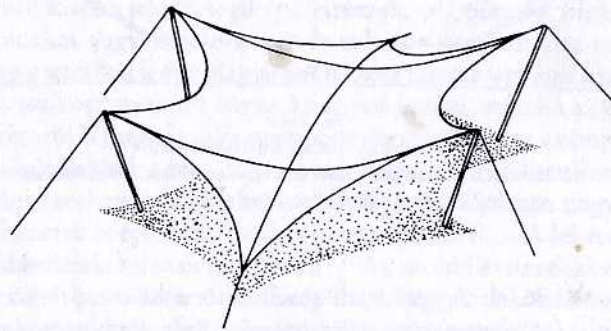
A teherhordó kötelek alaktartását rácsostartószerűen vezetett feszítőkötelek biztosítják, de a rácsos gerendatartóval ellentétben itt minden elem húzott

láncokra függesztették fel. A szokatlan szerkezetet a középső hajó 163 m-es fesztávolsága indokolja (amelyre a nagy automata gépsorok elhelyezése és a hossz tengely irányú bővítés lehetőségének biztosítása miatt volt szükség) (95. ábra). A láncokat, amelyeknek formája természetesen egyértelműen az erőjátékból adódik, 50 m magas vasbeton pilonok közé függesztették. A középső mezőben a vízszintes erő 1840 kN, a szélsőkben a kisebb méret miatt csak 730 kN, a különbséget a pilonok veszik fel, ezek ferdesége tehát szintén szerkezeti eredetű (az alsó, másik irányban ferdülő támaszok stabilizálják a pilonokat építés közben és szél esetén). A húzott lánc merevítését az ugyancsak acélszerkezetű, tárcsaszzerűen kiképzett földem adja meg. A magasépítésben szokatlan, de célszerű szerkezet eredménye nemcsak gazdaságos, hanem szép épület lett, amelynek formái nagyrészt az erőjátékból adódtak (a szerkezet gazdaságosságára jellemző, hogy az acélfelhasználás a nagy fesztávolság ellenére csak 1 kN/m^2).¹⁷²⁾

Az igazán tipikus húzott szerkezetek olyan könnyűek, hogy a szélszívás hatása ellen is védekezni kell. A Stockholm-Johanneshov-i jégstadion tetőszerkezetének felső tartóköteleit az alsó feszítőhuzalok stabilizálják a rácsostartószerűen elrendezett összekötő kábelek közvetítésével (96. ábra). A feszítőkötelek így a tartókábelek terhelését növelik, de a szerkezet még így is nagyon gazdaságos, mert a feszítésnek köszönhetően a héjazat igen könnyű lehet. Nyomott elemek itt csupán a szélső pillérek, amelyeket a húzott szerkezet nagy mozgásából adódó igénybevételek elkerülése érdekében csuklósan alakítottak ki.¹⁷³⁾

*Térbeli húzott szerkezetek
(sátrak, függőtetők, ballonok)*

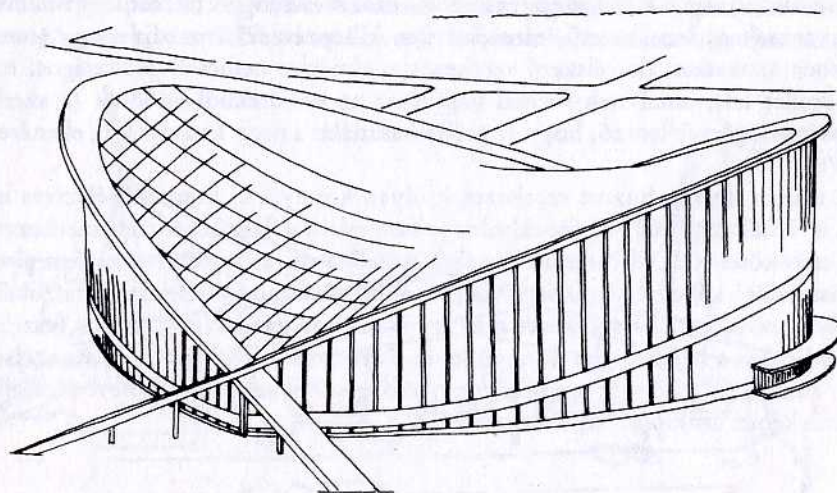
Nagyobb húzott szerkezet a múlt századig nem épült, de az ősidők óta ismert sátrak tipikus térbeli húzott szerkezetek. Napjainkban a sátor szerkezetek reneszánszukat élik. Az új anyagok (elsősorban a szálerősítésű műanyagok) eddig nem is sejtett lehetőségekre hívták fel a figyelmet. Főként a közvetlen időjárási hatások (eső, napsugárzás) elleni védelmet nyújtó, sokszor csak ideiglenes építményeknél indokolt a sátor szerkezet. A nagyobb méretek miatt azonban ma már nem engedhető meg a sátorponyva lebegése, mert a dinamikus hatás a szerkezetet tönkretenné, ezért gondoskodni kell a felületek feszítéséről. Ez két irányú görbülettel, feszítőkötelek alkalmazásával érhető el (97. ábra). A formák ezért itt sem kötetlenek, bár számtalan



97. ábra

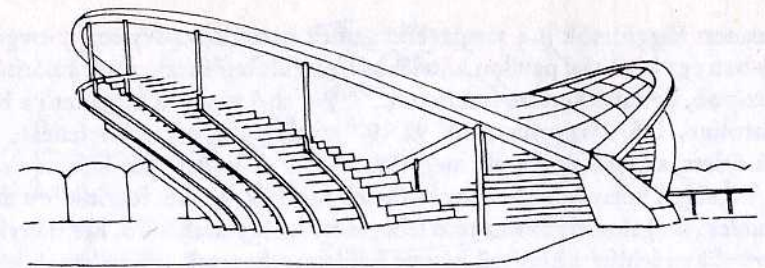
A sátor szerkezet elve.

Az alaktartás miatt a felület hiperbolikus pontokból áll (amelyekben az egyik irányú metszet domború, az erre merőleges metszet homorú)



98. ábra

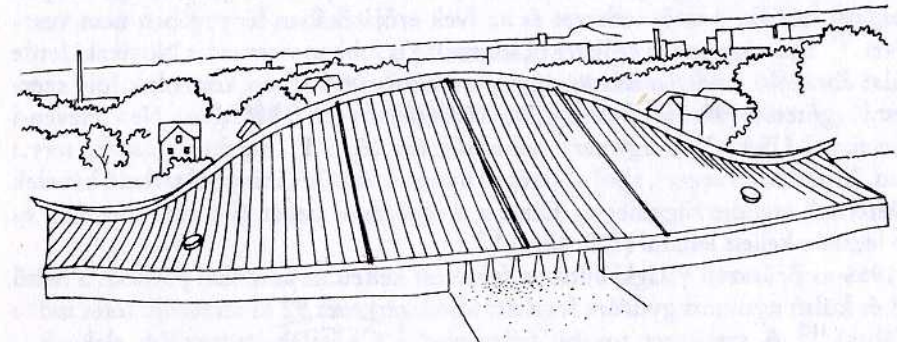
A Raleigh-i sportcsarnok.
Az első függőtető



99. ábra

A havannai sportcsarnok.

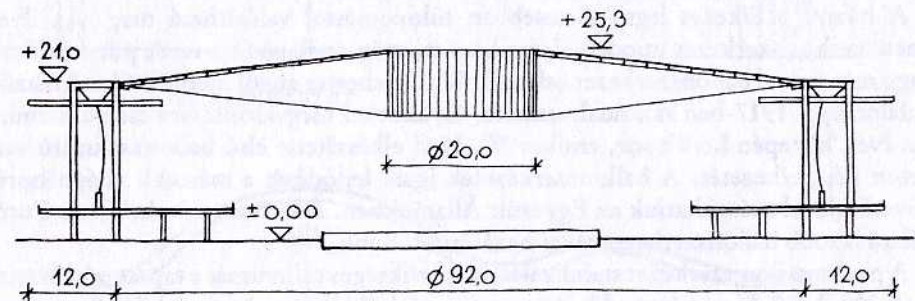
Konzolos kialakítása jól kifejezi, hogy a tetőszerkezet a falra nem ad át függőleges terhet



100. ábra

A Yale-egyetem hokistadionja.

A középső nyomott ívtartóval megosztott függőtető jobban alkalmazkodik a tégányhoz



101. ábra

Az USA pavilon az 1958. évi brüsszeli világkiállításon.
A kötél szerkezet egyik érdekes megoldása

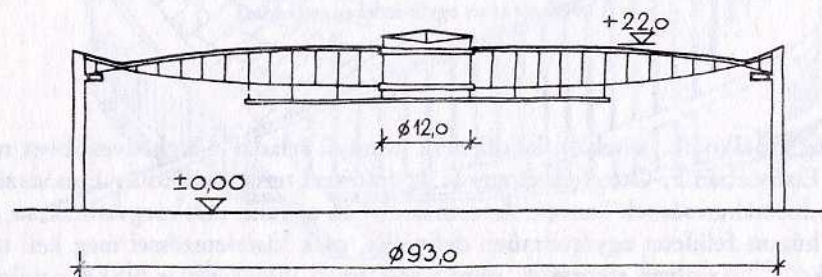
lehetőség kínálkozik, amelyek közül nem könnyű feladat a legkedvezőbbet megtalálni. Elsősorban F. Otto fejlesztette ki az építészet terén az alkotás új módszerét, amit ő „formakeresésnek” nevez. A formák elvben ugyanis már megvannak, az erőjáték a húzott felületet egyértelműen definiálja, csak kísérletezéssel meg kell találnunk őket.¹⁷⁴⁾ Az olyan alkotások, mint a Montreali Világkiállítás NSZK pavilonja, vagy az 1972. évi müncheni olimpiai játékok sportpályáinak lefedése (5. ábra) a szerkezet és forma húzott szerkezetre jellemző teljes egységét mutatják.¹⁷⁵⁾

A közismert függőtetők is a sátorszerkezethez hasonlóak. Nizsnij-Novgorodban már 1896-ban egy kiállítási pavilon kötelekből készült tetőszerkezetét a körítő falakra és egy középső, kétlábú keretre feszítették.¹⁷⁶⁾ Az első modern függőtető a Raleigh-i (Nort Carolina, USA) sportcsarnok 92×97 m alaprajzi méretű lefedése, amelyet Noviczki ötlete alapján építettek meg (98. ábra). A tető tiszta húzott szerkezet, a 0,3 kN/m² súlyú héjazatot a homorú kötelek hordják, ezeket feszítik le a domború feszítőkötelek, megakadályozva a tető lebegését. Az így kialakuló, két irányban görbült hiperbolikus felület a könnyű húzott felületszerkezetek erőjátékának következménye, amely jellegzetes építészeti formává vált.¹⁷⁷⁾ A kábeleket két, nagyjából parabola alakú (valójában a feszítőerőkre szerkesztett kötélgörbének megfelelő formájú) nyomott ívre horgonyozták le. Az épület falsíkjába eső pillérek így csupán az üvegfalat tartják, a tetőszerkezet és az ívek erőjátékában lényegében nem vesznek részt.¹⁷⁸⁾ Ezt a szokatlan erőjátékot formailag is jobban visszaadja Noviczki ferde üvegfalat ábrázoló eredeti vázlat, vagy pl. a havannai stadion konzolok fölé szerkesztett függőtetője (99. ábra). A függőtető érdekes tovább fejlesztése a New Haven-i (Connecticut, USA) Yale-egyetem hokistadionja (ép.: E. Saarinen, szerk. terv.: Severud, Elstad és Krueger), ahol a középső nyomott ívet két irányból terhelő kábelek feszítőerőinek eredője függőleges. Ezzel a megoldással ismét új forma jött létre és kisebb légteret kellett lefedni (100. ábra).¹⁷⁹⁾

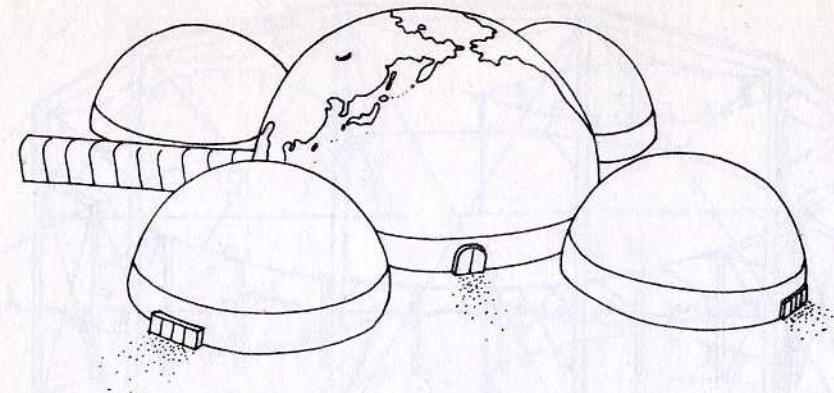
Az 1958-as Brüsszeli Világkiállításon feltűnést keltett az amerikai pavilon: a belső húzott és külső nyomott gyűrűre feszített kötélrendszer 92 m átmérőjű teret fed le (101. ábra).¹⁸⁰⁾ A szerkezet tovább fejlesztése – a kötelek kedvezőbb alakúak – a leningrádi sportcsarnok (102. ábra),¹⁸¹⁾ (amelyhez az új budapesti sportcsarnok is hasonló). Ennek a szerkezeti rendszernek is jellegzetes formai konzekvenciái vannak, mint pl. a középső húzott gyűrű, amely felülvilágítónak képezhető ki.

A húzott szerkezet legtökéletesebben túlnyomással valósítható meg. Az ilyen pneumatikus szerkezet minden eleme húzott, még az alapozása is. A pneumatikus, vagy más szóval ballonszerkezet ötlete F. W. Lanchester angol mérnöktől származik. Találmányát 1917-ben szabadalmaztatta. Gyakorlati megvalósítására csak a harmincas évek közepén került sor, amikor W. Neff elkészítette első ballonszaluzatú vasbeton héjszerkezetét. A ballonszerkezetek igazi fejlődését a második világháborút követő időtől számíthatjuk az Egyesült Államokban. A hatvanas évektől már Európában is több ballonszerkezet alkalmazásáról tudunk.¹⁸²⁾

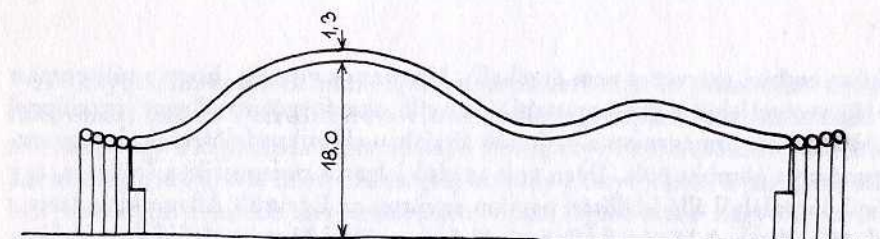
A pneumatikus szerkezet stabilizálásához szükséges túlnyomás a tapasztalat szerint csak 200 Pa körül van (ezt a kb. 16 m magasságkülönbségnek megfelelő légnyomás-



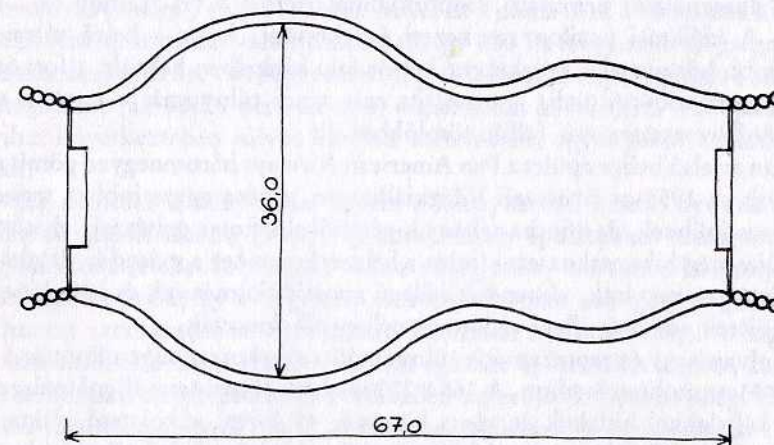
102. ábra
A leningrádi sportcsarnok.
Kedvező erőjátékú kötélrendszer



103. ábra
Kiállítási pavilon az Egyesült Államokban.
Az első jelentős ballonépület; a „tartószerkezet” itt a légnyomás

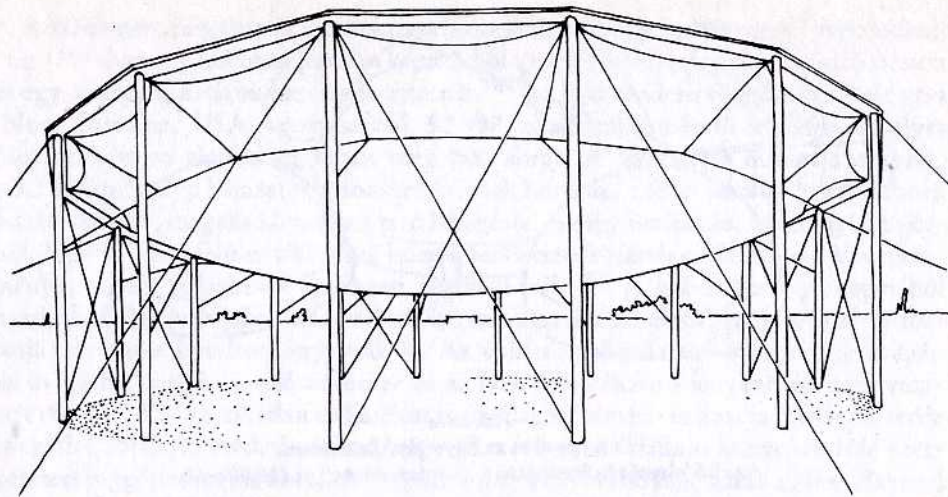


HOSSZMETSZET



ALAPRAJZ

104. ábra
Kiállítási pavilon az Egyesült Államokban.
A fejlődés a ballonszerkezeteknél is bonyolultabb formákhoz vezetett



105. ábra

Párnaszerkezettel fedett színház.

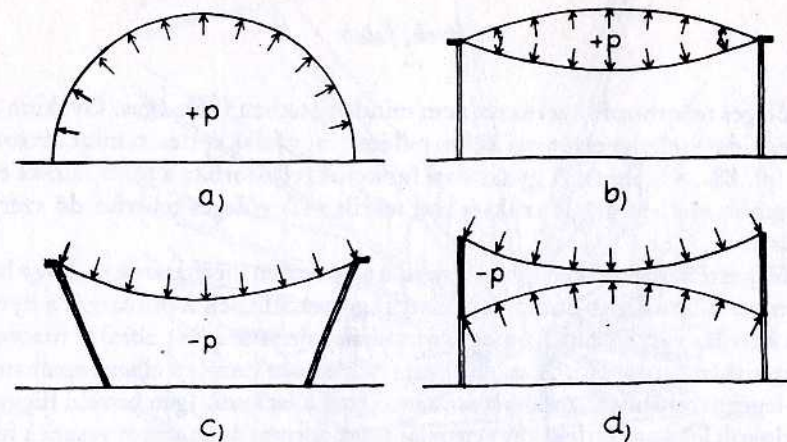
Szerkezeti hátrányos, de az épület használatában előnyt jelent, ha a túlnyomás nem a belső térben, hanem csak a szerkezetben van

változást az emberi szervezet nem érzékeli). Hátrányos viszont, hogy a túlnyomást állandó légcserével lehet csak fenntartani, és a nyílásokat forgóajtóval vagy légszilippel kell elzárni. A túlnyomás miatt a ballonok általában elliptikus felületűek, legegyszerűbb formájuk a gömbkupola. Ilyen volt az első jelentős pneumatikus épület is, egy öt félgömb kupolából álló kiállítási pavilon együttes az Egyesült Államokban (terv.: W. Bird, 103. ábra). A középső félgömb 49,5 m, a többi 33 m átmérőjű volt. A látogatók forgóajtón közlekedtek, a kiállítási tárgyak szállítását légszilippel oldották meg (az ábrán látható dongafedésű épületrész).

A későbbi fejlődés összetettebb felületekhez vezetett. 1960-ban nyílt meg az atomerő békés felhasználását bemutató vándorkiállítás (terv.: V. A. Lundy, W. Bird, 104. ábra). A kiállítási pavilon szerkezeti érdekessége, hogy a belső túlnyomás ellenére, a jobb hőszigetelés érdekében, kettős falú kivitelben készült, a forgóajtók előtti dongaszerű előtető pedig – mivel itt már nincs túlnyomás – egymás mellé helyezett kör keresztmetszetű, felfújt tömlőkből áll.

Európában az első ballonépület a Pan American Airways háromnegyed gömb alakú pavilonja volt az 1958-as Brüsszeli Világkiállításon. Azóta egyre jobban terjednek a túlnyomásos épületek, de mintha néhány kivételtől eltekintve építészeti lehetőségeit nem sikerülne még kibontakoztatni (mint a héjszerkezetekét a második világháború előtt). Elsősorban raktárak, alárendelt jellegű sportlétesítmények és ideiglenes felvonulási épületek, időjárás elleni védőtetők céljára alkalmazzák.

Ritka az olyan nagy és reprezentatív túlnyomásos szerkezet, mint a Pontiac-i (Illinois, USA) Metropolitan Stadion. A 168×220 m alapterületű teret függőtetőszerűen kialakított kábelekkel hidalták át, de a könnyű, 49 N/m^2 súlyú tető alaktartását $120 \dots 220 \text{ Pa}$ belső túlnyomással biztosították. A tető a belső túlnyomás miatt a függőtetőktől eltérően elliptikus felületű.¹⁸³⁾ A nagyméretű ballonoknál gyakori, hogy a felület görbületét kábelek beépítésével kell növelni. Ilyenkor a bordás hátrya-szerkezetekhez hasonló formák alakulnak ki [v. ö. 90c) ábra].



106. ábra

A pneumatikus szerkezetek alaptípusai

a) túlnyomás a belső térben; b) túlnyomás a szerkezetben; c) légrikítás a belső térben; d) légrikítás a szerkezetben

A túlnyomásos épületek másik típusa a párnaszerkezet. Itt a használati térben nincs túlnyomás, hanem a térelhatároló elemek felfújt gumipárnához hasonlóak. Annak ellenére, hogy a légszilipek elmaradása, a lehorgonyzó erők csökkenése (lehorgonyzás itt csak a szélszívás miatt szükséges) komoly előnyt jelent, a párnának teljes térhez viszonyított kisebb keresztmetszete miatt legtöbbször nagyobb nyomást és erősebb ballont kell alkalmazni, ezért a párnaszerkezetek összköltsége általában lényegesen nagyobb. Az eddigi legnagyobb párnaszerkezet, egy 2000 személyes színház, 1959-ben épült Bostonban (Boston Arts Center, ter.: C. Koch, M. Ross, P. Weidlinger, W. Bird). Alaprajza 44 m átmérőjű körbe írt tizenhatszög, maximális szerkezeti magassága 7 m (105. ábra). Mivel itt a párna csak a vízszintes lefedést adja, kedvező lencseformában volt kialakítható, így 250 Pa túlnyomás elégséges. A ballon acélszerkezetű gyűrűre van függesztve, a gyűrű tartóoszlopai egyben a sátorponyvával megoldott (az ábrán nem látható) oldalfalakat is hordják. Az épület falai egy szélvihar következtében súlyos károkat szenvedtek, ugyanakkor a lefedés sértetlen maradt.

Elvileg nemcsak a túlnyomás, hanem a környezetnél kisebb nyomás is alkalmas a ballonok stabilizálására [106c), d) ábra]. Ilyen épületekkel tudásunk szerint eddig csak kísérleteket folytattak, valószínűleg azért, mert nem horgonyozhatók le közvetlenül a talajba, így a kiegészítő szerkezetek miatt nem gazdaságosak.

A húzott szerkezetek az építészet új korszakát nyitották meg. A hagyományos megoldásoktól alapjaiban eltérő szerkezet egészen új formákat hozott, amelyet a húzott szerkezetek természetéből következően az erőjáték határoz meg. Ezért beszél F. Otto „formakeresésről” és a „forma megtalálásáról”. A tapasztalat szerint a jól megtervezett húzott szerkezetek, épületek esztétikai értéke is figyelemre méltó, sőt a szerkezeti újítások az építészeti esztétika fejlődésére is kedvezően hatottak.

Pillérek, falak

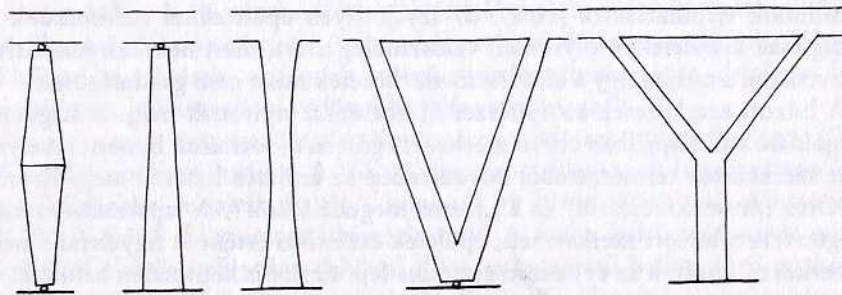
A függőleges teherhordó szerkezet nem minden esetben szükséges. Gyakran a térfeladás megoldása feleslegessé teszi külön pillérek vagy falak építését, mint ezt sokszor láthatjuk (pl. 88., 89. ábra). A gyakorlati funkciók, elsősorban a több szintes épületeknél, legtöbb esetben mégis szükségessé teszik a függőleges teherhordó szerkezet alkalmazását.

A függőleges teherhordó szerkezet formáját alapvetően meghatározza, hogy húzott vagy nyomott elemről van-e szó. A húzott függesztőelemek karcsúságát a nyomott pillérek a kihajlás veszélye miatt meg sem tudják közelíteni (94. ábra). Húzott elem viszonylag ritkán fordul elő. A szokott méretek esetén önsúlya elhanyagolható, így logikus a legegyszerűbb, állandó keresztmetszettel készíteni. Igen hosszú függesztőrúdnál indokolt lenne az érdekes egyenszilárdságú forma (ilyen alakot vesznek fel a lecsurgó sűrű folyadékok is, mint pl. a méz) [44c] ábra].

A nyomott egyenszilárdságú rúd az előbbi forma megfordításából adódik. Ez adta például az ötletet a párizsi Eiffel-torony tervéhez is. (Más kérdés, hogy ez a forma ott nem annyira a függőleges terhek, mint inkább a szélerő felvétele miatt indokolt, mivel a szélből adódó igénybevételek lefelé növekednek, amit egyre nagyobb keresztmetszet vesz fel.)

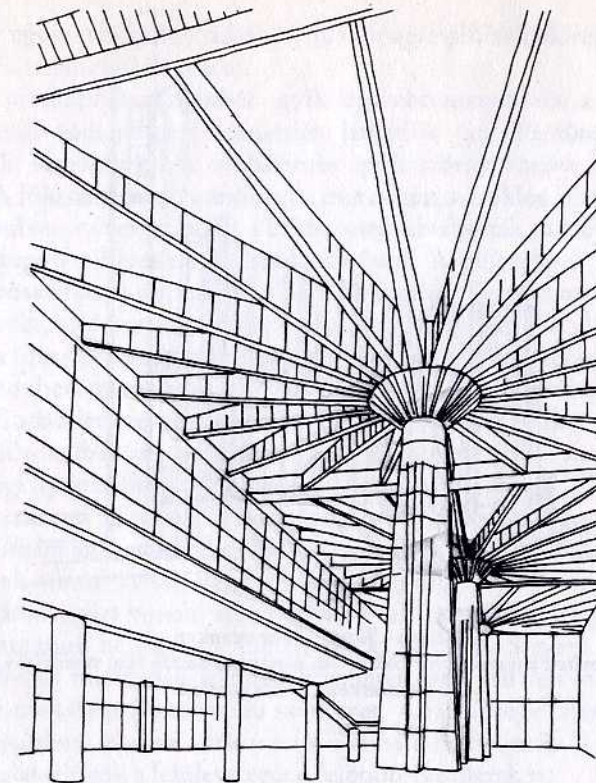
A központosan nyomott támaszok nagy része is, az egyszerű építéstechnológia érdekében, állandó keresztmetszettel készül. Ennek ellenére a kihajlási veszély csökkentése és az egyidejű anyagtakarékosság miatt hasznos a változó keresztmetszet, amit inkább csak nagy méretű szerkezetnél szoktak alkalmazni, bár előregyártott elemeknél könnyen megvalósítható lenne (107. ábra). Természetesen a keresztmetszeti forma sem közömbös, ezzel a IV. fejezetben foglalkozunk majd részletesen.

A pillérekre a függőleges terheken kívül legtöbbször vízszintes erő és nyomaték is hat. Ilyenkor változatos, az erőjátékot kifejező formák adódnak. A nagyobb keresztmetszet a befogás helyén indokolt (mint az Eiffel toronynál), a két végén befogott rúd állandó keresztmetszetű, vagy közép felé csökkenő méretű. A keresztmetszet növelése helyett Y és V formájú elágazó pillérek is készíthetők, amelyek a gerenda feszítávolságának csökkentésére is alkalmasak (107. ábra). (Ilyen támaszokat már előbb is láthattunk a 86., 95. ábrán.) Ugyanez térbeli szerkezetnél három (esetleg több) ágú támasszal oldható meg.



107. ábra

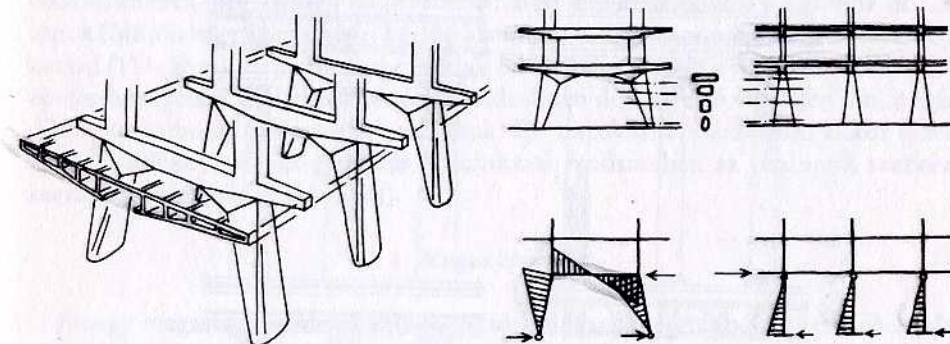
Az erőjáték szerint alakított pillérek változatos formákhoz vezetnek



108. ábra

A torinói Munkalota pillérei.

A hatalmas pillérek az igénybevétel szerint változó keresztmetszet teszi széppé, könnyedebbé

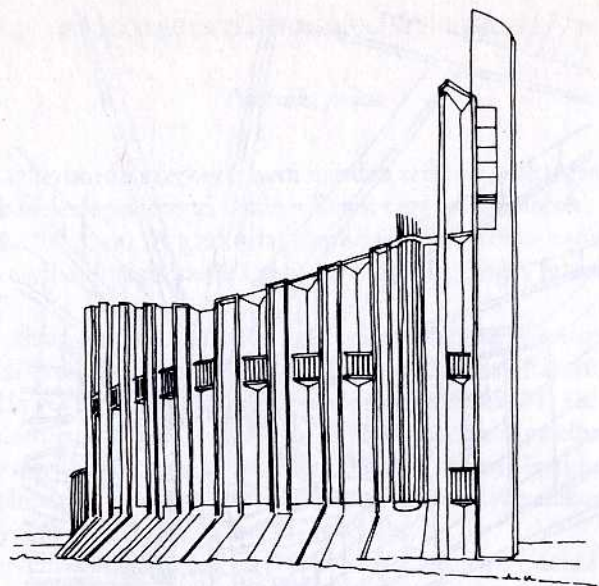


109. ábra

A párizsi UNESCO székház adminisztratív szárnyának földszinti pillérei.

A szép formák logikusan adódnak az erőjátékból

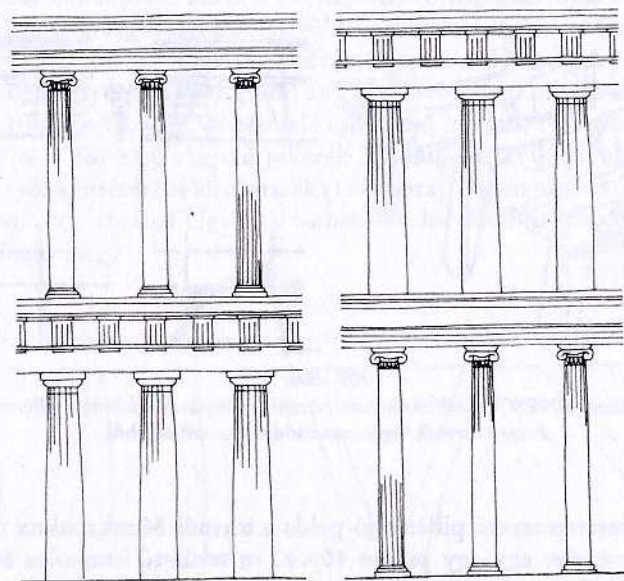
A változó keresztmetszetű pillerre jó példa a torinói Munkalota (P. L. Nervi, 1960–1961). Az épület egy-egy pillére 40×40 m területű konzolos födémszakasz terhet viseli. A szerkezet vízszintes merevségét az alapba befogott pillérek adják, így logikus a lefelé növekvő keresztmetszet. Alul, a nagyobb merevség érdekében, kereszt alakú a pillér, majd felfelé fokozatosan körbe megy át, lehetővé téve a sugár-



110. ábra

A Royan-i Notre-Dame templom.

Bordákkal merevített lemezmként kialakított, plasztikus hatású falai veszik fel a szélterhet és a tetőszerkezet oldalnyomását



111. ábra

Egymás fölötti oszloprendek.

Esztétkai érzékünk is megkívánja, hogy az emeleti oszloprend legyen a könnyedebb

irányú tartók egyszerű csatlakozását. A 20 m magas pillérek előregyártott elemekből összefeszítve készültek (108. ábra).

A változó keresztmetszetű pillér egyik legszebb megoldását a párizsi UNESCO székház hivatali épületének földszintjén láthatjuk (az előadótermi szárnyat már a 103. oldalon tárgyaltuk). A többszintes épületszárny haránt keretvázal készült (109. ábra). A földszinten a harántirányú merevítést a csuklós keret adja meg, hosszirányban azonban, mivel a falakat a földszinten kiváltották, a harántváz merevítését az alapba befogott pillérekkel kellett biztosítani. A pilléreknek tehát felül harántirányú, alul hosszirányú nyomatékot kell felvenniük. Keresztmetszetük ennek megfelelően változik, alul harántirányban, felül hosszirányban alakul ki csukló. A pillér szép, érdekes formája tehát a merevség, ill. az ezzel arányos tehetetlenségi (inercia-) nyomaték igénybevétel szerinti változásából adódik. Valószínűleg ilyen megoldások lebegtek Le Corbusier szeme előtt már a húszas években, amikor egy Buenos Airesben tartott előadásában ezt a kijelentést tette: „Igyekez jól megérteni, mit jelent a tehetetlenségi nyomaték. Amint megérted, szárnyakat kapsz.”¹⁸⁴⁾

A falak szerkezeti hátránya a hossz tengely síkjára merőlegesen kihajlás veszélye. Ennek elkerülésére anyagtakarékos és funkcionálisan is hasznosítható megoldás a formailag nem jelentkező cellás, vagy a különböző módon kialakított, esztétikailag is kedvező hullámos, tört vonalú stb. alaprajzú fal. Példának a Royan-i Notre-Dame templomot mutatjuk be (ép.: G. Gillet, szerk. terv.: R. Sarger). A falaknak a héjszerkezetű lefedés miatt elég jelentős vízszintes erőt kell felvenniük, ezért is vált szükségessé a szokásosnál merevebb szerkezet. A fal közepe táján látható erkélysor sem csak díszítőelem, hanem a vékony fal merevítő diafragmája (110. ábra). Hasonló elvek szerint alakíthatók a felületszerűen felbontott pillérek is.

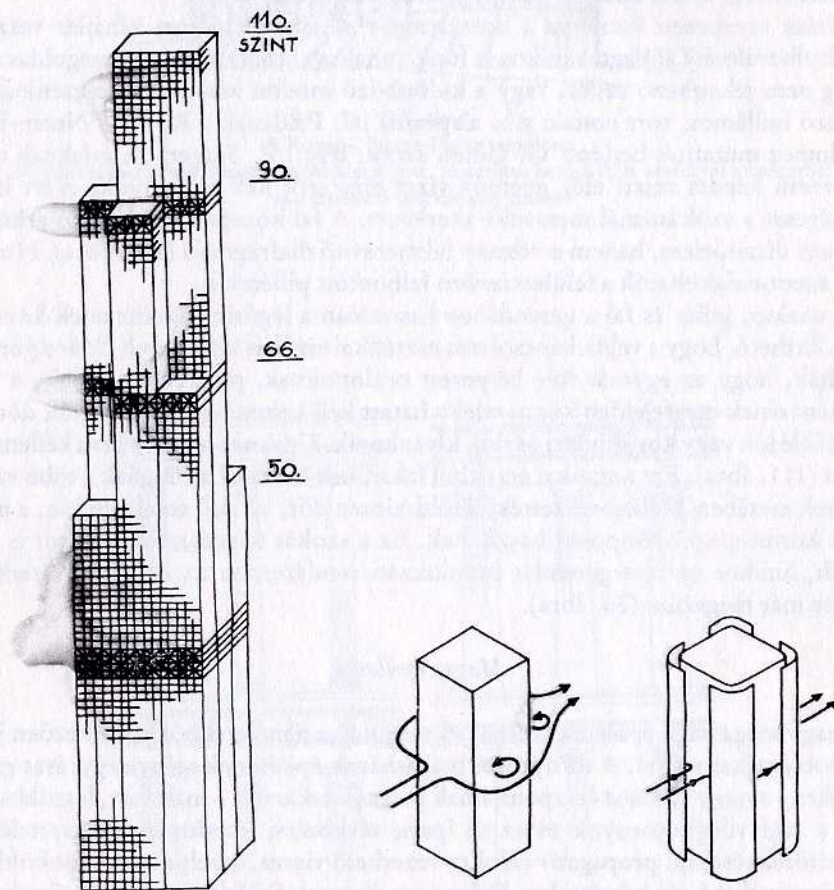
Az oszlop, pillér és fal a gerendához hasonlóan a legősibb szerkezetek közé tartozik. Érthető, hogy a velük kapcsolatos esztétikai érzék is kifinomult. Már a görögök is tudták, hogy az egymás fölé helyezett oszlopoknak, pilléreknek felfelé, a teher csökkenésének megfelelően könnyedebb hatást kell kelteniük; így a zömök dóroszlopok fölé jön vagy korinthuszi oszlop kívánkozik. Ugyanez megfordítva kellemetlen hatású (111. ábra). Ezt a statikai érzékből fakadó elrendezést a rómaiak a több szintes épületek esetében általánossá tették: a földszinten dóroszlop, az első emeleten jön, a második emeleten korinthuszi oszlopokat használtak. Ez a szokás természetesen akkor is megmaradt, amikor az íves-gerendás homlokzati rendszerben az oszlopok szerkezeti szerepe már megszűnt (16. ábra).

Magas épületek

A nagy magasságú épületek szerkezeti megoldása a méretekből következően jelentős problémákat vet fel. A tornyok és magasházak építésének igénye egyrészt gazdasági okra – a nagy városok központjainak magas telekáraira – másrészt, legtöbbször – talán a régi világítótornyok és az új ipari, távközlési létesítmények kivételével – rekordtörekvésekre, propagatív célokra vezethető vissza, amelyeknek indokolttsága sokszor vitatható, de kétségtelen, hogy a szerkezetek fejlődésére ösztönzően hatott.

A történelmi korokban elért eredmények közül megemlítjük a 146 m magas Keopsz-piramist (amely jellegzetes tömege miatt szerkezeti kérdéseket alig vet fel, inkább mesterséges hegynek tekinthető), a kb. 130 m magas, elpusztult alexandriai világítótornyot, az ulmi dóm 161 m magas tornyát, végül a római San Pietro 123 m magas kupoláját.

Korunk szimbólummá vált első magas építménye, az 1889-ben épült Eiffel-torony, 300 m-es magasságával messze túlszárnyalta a korábbi teljesítményeket. Ezt elsősorban az acél felhasználása tette lehetővé.¹⁸⁵⁾ A magasházak fejlődése sokkal lassúbb volt. Az első 10 szintes felhőkarcoló az 1884-ben Chicagóban épült Jenney's Home Insurance Building, szintén vasvázás volt, homlokzata téglakitöltő falakkal és nagy ablakokkal készült (1931-ben lebontották).¹⁸⁶⁾ Vasbeton vázas magasház is Amerikában épült először 1902–1903-ban Cincinattiban (Ohio, USA). A 16 szintes, 64 m magas Ingalls Building építéséhez tűzbiztonsági okból választották – egyes szakértők aggályoskodása ellenére – az új anyagot, amelyből addig legfeljebb egyemeletes házakat terveztek.¹⁸⁷⁾ Az Eiffel-tornyot csak 1930-ban szárnyalta túl a 77 emeletes, 306 m magas New York-i Chrysler Building. Egy év múlva már elkészült a 102 szintes, 380 m magas Empire State Building. Ezt a magasságot csak 1972-ben haladta meg a New York-i World Trade Center (410 m). 1974 óta a 109 emeletes, 442 m magas chicagói



112. ábra

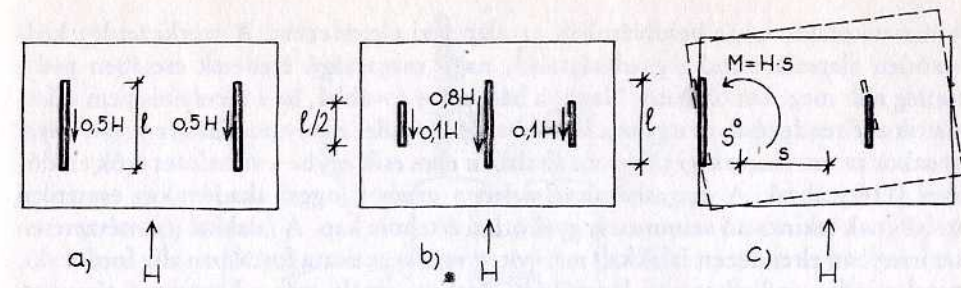
A Sears Building Chicagóban.

A homlokzaton megjelenő merevítőtartók csökkentik az épület vízszintes elmozdulását

113. ábra

Magasház szélterheinek vizsgálata.

Az épület melletti terelőlemezek megakadályozzák a légörvények kialakulását



114. ábra

Magasház merevítőfalainak elrendezése.
A falak elrendezése jelentősen hat igénybevételükre

Sears Building (Skidmore, Owings & Merrill) tartja a felhőkarcolók rekordját. Acélváz 9 négyzet alaprajzú, különböző magasságú „csőből” áll, amelyeket három helyen merevítő rácszás fog össze (112. ábra).¹⁸⁸⁾

A magasházak legnagyobb problémája nem a függőleges, hanem a vízszintes terhek, a szélterő és a földrengésből származó vízszintes tömegek felvétele. Míg a függőleges terhek a magassággal csaknem lineárisan növekednek, a szélterő négyzetes arányban. Ez arra mutat, hogy a szerkezet merevítésének nagy a jelentősége, de legalább ugyanakkora a szélellenállás csökkentésének. Közismert, hogy a szokásos, hasáb alakú tömeg esetén az épület mellett légörvények keletkeznek, de ez a jelenség, ha kisebb mértékben is, a hengeres tömegnél is fellép. Kísérletek szerint a légörvények a sarkok lekerekítésével és íves terelőlemezek építésével gyakorlatilag megszüntethetők, és ezáltal a szélterő 50%-kal is csökkenthető (113. ábra).¹⁸⁹⁾ Várható, hogy a jövőben ilyen megoldások is születnek, amelyek újszerű formai hatását nem kell bővebben részletezni.

A magasházaknak többféle merevítőrendszere alakult ki kb. 100 évet felölő fejlődésük alatt

- keretszerkezet,
- merevítőfalak,
- merevítő dobozszerkezet,
- cellás szerkezet,
- vegyes merevítőszerkezet,
- különleges merevítőszerkezet.

A keretszerkezet, amely az épület alakításában a legkisebb kötöttséget okozza, kis merevsége miatt csak alacsonyabb épületekben jöhet szóba. A merevítőfalak tervezésekor arra kell törekedni, hogy az egyes falak merevsége hozzávetőlegesen azonos legyen. A fal által felvett vízszintes erő ugyanis a fal keresztmetszetének inerciájával, tehát szélességével egyenesen, hosszúságával köbösen arányos. Ha pl. az egyik irányú merevítést két azonos méretű – szimmetrikusan elrendezett – fallal oldjuk meg [114a) ábra], egy fal nyilvánvalóan a felét veszi fel a vízszintes erőnek. Ha viszont az egyik fal helyett két, fele hosszúságú diafragmát iktatunk be [114b) ábra], az inerciaarány

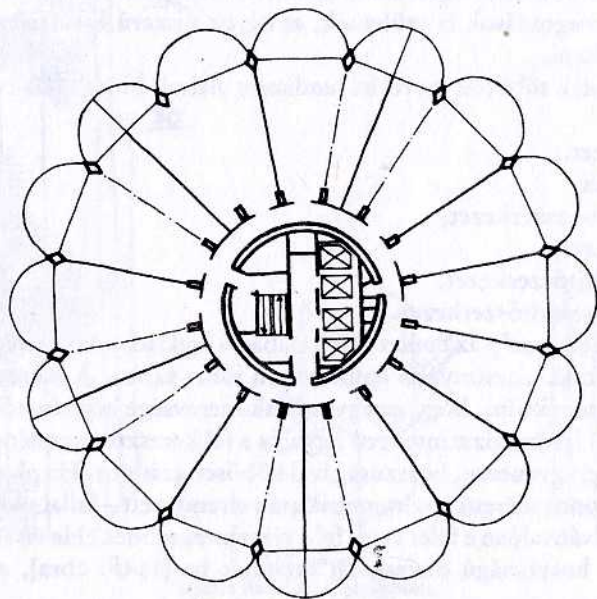
$$1^3 : 2^3 = 1 : 8 = 0,125, \text{ tehát az eredeti méretű fal a teljes vízszintes erő } \frac{8}{8+2 \cdot 1} = \frac{8}{10} =$$

= 0,8-szorosát veszi fel, így az eredeti megoldáshoz képest 60% túlterhelést kap.

A merevítőfalak tehát befolyásolják az alaprajzi elrendezést. A szerkezetileg kedvezőtlen alaprajz mindig gazdaságtalan, nagy magasságú épületek esetében pedig esetleg már meg sem oldható. Nagyon hátrányos továbbá, ha a merevítés nem szimmetrikus elrendezésű, ez ugyanis legtöbbször az épület elcsavarodásához vezet, mivel ilyenkor az ún. merevségi súlypont általában nem esik egybe a vízszintes erők eredőjével [114c] ábra]. A magasházaknál tehát a máshol joggal akadémikus esztétikai szabálynak tekinthető szimmetria gyakorlati értelmet kap. A falakkal (természetesen két irányban elrendezett falakkal) merevített rendszer tiszta formában alig fordul elő, mivel minden épületben van lépcsőház, liftakna, amely már a következő típushoz vezet át.

A központi maggal stabilizált épületeknél a szerkezet és az építészeti megoldás még szorosabb összefüggését figyelhetjük meg. A merevítőmagok ugyanis szinte maguktól adódnak a felvonók, a lépcsők, gépészeti berendezések helyigényéből. Szerkezeti szempontból azonban nem közömbös ezek megfelelő – általában szimmetrikus – elrendezése és megfelelő merevsége. Tipikus példa a 60 emeletes, kb. 200 m magas Marina City House Chicagóban (115. ábra), ahol a központi mag monolitikusan, csúszózszaluzattal épült, ez merevíti a körülötte elhelyezkedő, előregyártott szerkezetű épületet. A kedvező alaprajzi és statikai megoldásnak sok technológiai előnye is van.¹⁹⁰⁾ Kár, hogy az épület funkciója és szerkezete között – az alaprajzból láthatóan – nem sikerült teljes összhangot teremteni.

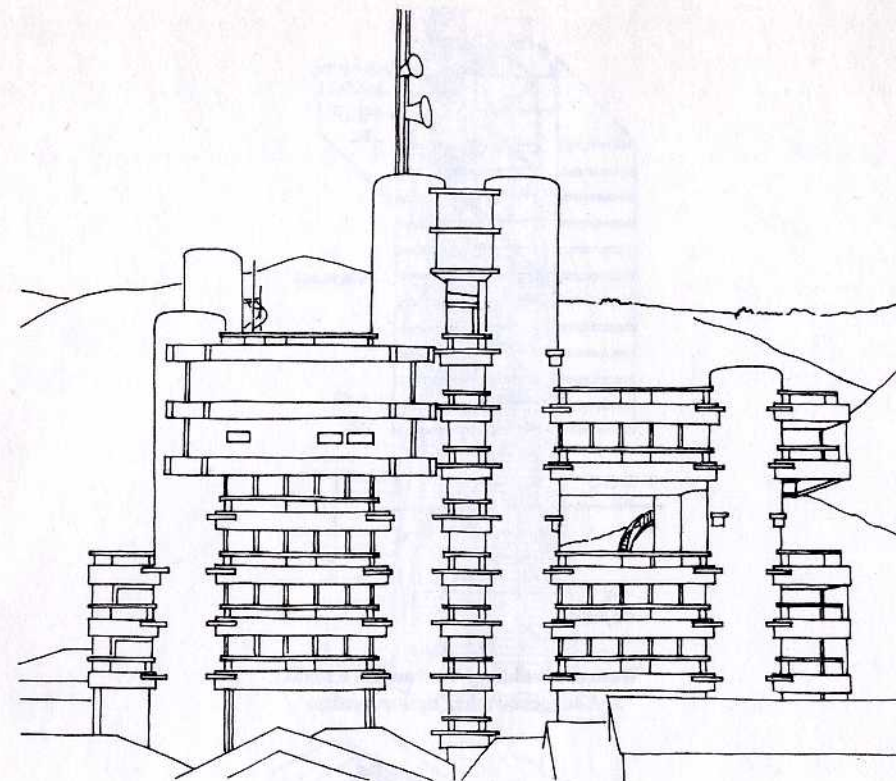
Jellegzetes példa a Kofu-i (Japán) rádió- és sajtóközpont (ép.: Kenzo Tange), amely ugyan még nem nevezhető magasháznak, de figyelemre méltó abból a szempontból, hogy a merevítőmagok hangsúlyos homlokzati elemek (116. ábra). Ez az épület társadalmi és urbanisztikai alapelvekből kiinduló építészeti irányzat, a meta-



115. ábra

A Marina City House Chicagóban.

A vízszintes erőket a középső monolit mag veszi fel, az épület többi része így a nagy magasság ellenére viszonylag könnyű előregyártott szerkezet lehet



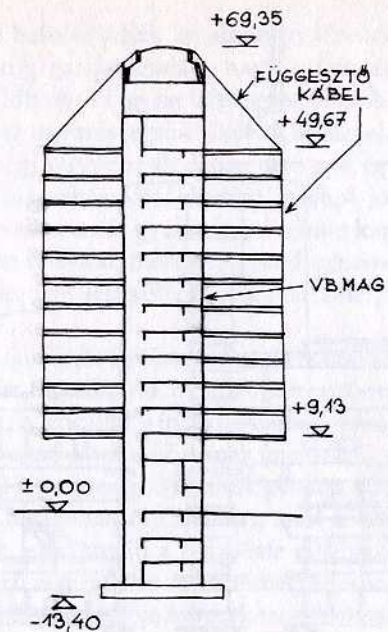
116. ábra

Rádió- és sajtóközpont, Kofu (Japán).

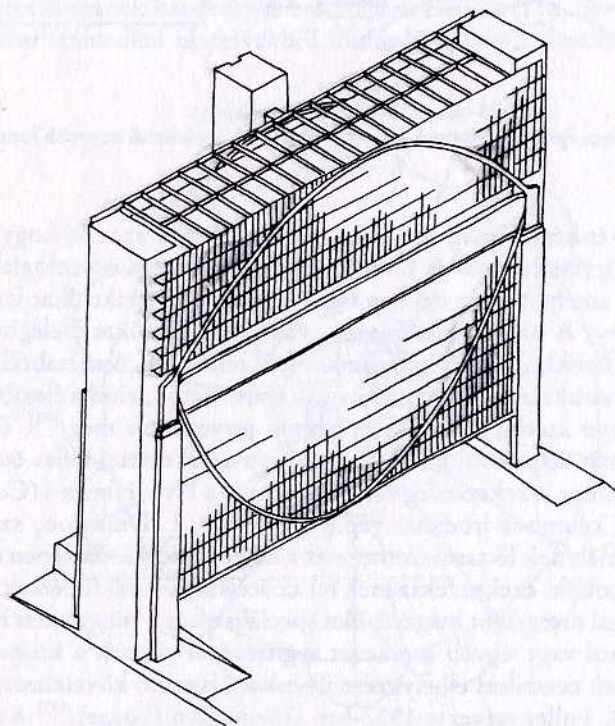
A szerkezet a metabolizmus építészeti elveinek következtében jut a szokottnál nagyobb formai szerephez

bolizmus egyik első építészeti megvalósulása. A tervezés elve az volt, hogy az állandó funkciójú helyiségek (közlekedő- és kiszolgálóterek) könnyen összefoglalhatók egy szuperstruktúrába, amely itt – az egyben tartó- és merevítőfunkciókat is ellátó – 16 kör alaprajzú torony. A nagy fesztávolságú, változó funkciókat kielégítő flexibilis terek födémei a tornyokból kiálló konzolokra fekszenek fel. A metabolista elmélet szerint ilyen szuperstruktúrákkal egész városok létesíthetők, ahol a flexibilis tereket a felhasználók igénye szerint más-más építészek tervezhetik meg.¹⁹¹⁾ Tanulságos, hogy egy egészen más alapokból kiinduló elmélet a szerkezettel teljes összhangban lehet. Az előző példához szerkezetileg nagyon hasonló a New Haven-i (Connecticut, USA) Knights of Columbus irodaház (ép.: K. Roche, J. Dinkeloo, szerk. terv.: Pfisterer & Co.), amelynek fő tartószerkezetét a négy sarkon és középen elhelyezett vasbeton magok alkotják, ezek fekszenek fel az acélszerkezetű födémeik.¹⁹²⁾

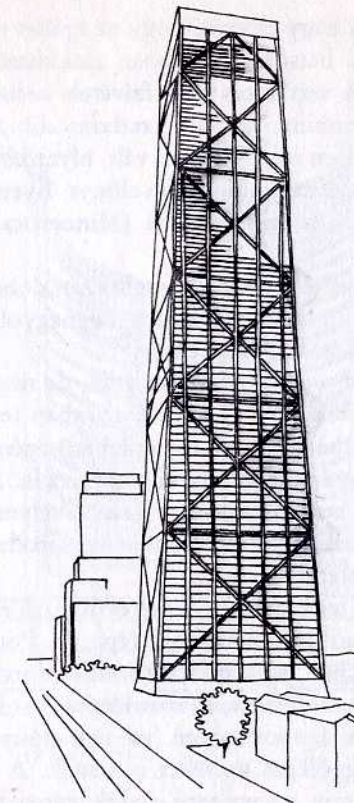
A központi maggal merevített magasépület speciális esete a függesztett ház. Ennek emeletei felső konzol vagy egyéb szerkezet segítségével vannak a központi magra függesztve, amelynek centrikus elhelyezése ilyenkor alapvető követelmény. Az első függesztett házat B. Fuller tervezte 1927-ben (Dymaxion House).¹⁹³⁾ Az 1966-ban épült hamburgi Finnlandshaus (ép.: Hentrich és Petschnigg, szerk. terv.: K. Boll) 13 szintes, 50 m magas, alaprajzi mérete 20,43 × 20,43 m, amelyből a csúszózszaluzattal készített központi mag 6,85 × 6,85 m.¹⁹⁴⁾ A felső függesztőkonzol helyett előnyö-



117. ábra
Westcoat Building, Vancouver (Kanada).
A függesztett ház tipikus példája



118. ábra
Federal Reserve Bank, Minneapolis (USA).
A hídszerkezettel függesztett magasház a különleges homlokzati megoldásban is jelentkezik



119. ábra
John Hancock Center, Chicago.
A merevítőszervezet egyben a leghangsúlyosabb formai elem is

sebb lehet ferde függesztőkábelek alkalmazása, mint a vancouveri (Kanada) Westcoat Building példája mutatja (117. ábra). A függesztett ház különleges megoldása a minneapolis (Minnesota, USA) Federal Reserve Bank irodaháza (ép.: G. Birkerts, szerk. terv.: Skilling és társai). Az épület alsó részét két vasbeton pilon közé függesztett, 84 m fesztávolságú kötélrendszer tartja, amely a földszinten lehetővé teszi a szabad közlekedést. A pilonokra ható vízszintes erőt egy vasbeton gerenda veszi fel, a felette levő emeletek egy kétcsuklós nyomott ívre vannak függesztve. A szerkezet (amelynek indokoltsága vitatható) az épület homlokzatának is fő motívumává válik (118. ábra).¹⁹⁵⁾

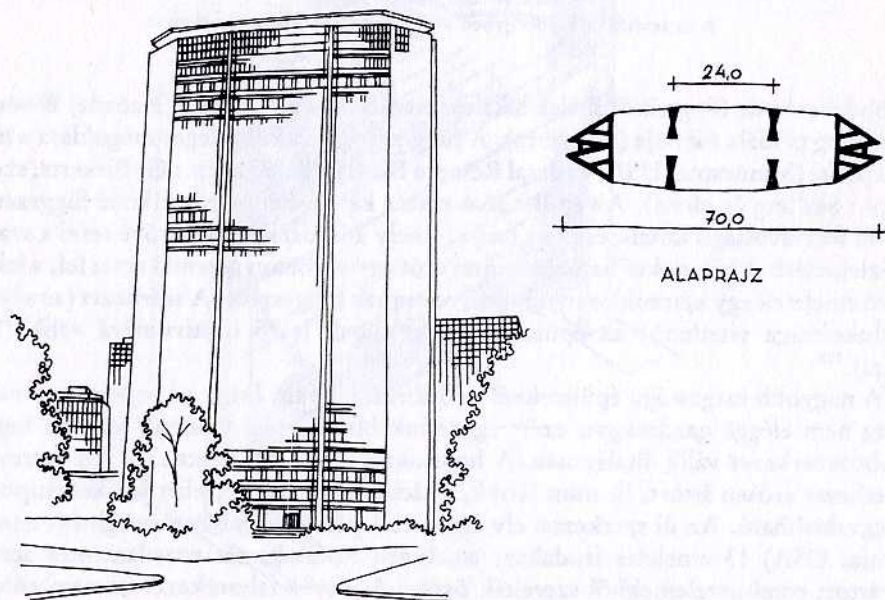
A nagyobb magasságú épületeknél nyilvánvalóvá vált, hogy a központi merevítőmag nem eléggé gazdaságos, ezért egyre inkább az egész épületet magába foglaló dobozszerkezet válik általánossá. A homlokzati nyílások miatt az ilyen merevítőszervezet erősen áttört, de mint láttuk, a rácsos struktúra minden szerkezetitípusnál megvalósítható. Az új szerkezeti elv egyik első példája egy Pittsbourgh-i (Pennsylvania, USA) 13 emeletes irodaház, amelynek homlokzatát rozsdamentes acélból gyártott rombuszelemekből szerelték össze. A merev falszerkezet itt nem annyira a szélterhelés felvétele, mint inkább a nagy földszinti kiváltás miatt előnyös.¹⁹⁶⁾ Az 1970-ben elkészült chicagói John Hancock Center (terv.: Skidmore, Owings & Merrill) homlokzata 20 emelet magas rácsoszással az új merevítőrendszer nyers megfogalma-

zása (119. ábra). A szerkezet nagy előnye, hogy az épület merevségét a homlokzati vázrendszer biztosítja, így a belső szabadabban alakítható, mert nem kötik meg a merevítőfalak és magok. (A vízszintes erők felvétele szempontjából kedvező még az is, hogy az épület emeletenkint 7,62 cm-t sudarasodik.)¹⁹⁷⁾ A merevítőrácszat, mint homlokzati elem, rövidesen szinte divattá vált, olyankor is alkalmazzák, amikor a kisebb szintszám miatt nem jelent különösebb előnyt. Ilyen pl. egy irodaház Southfieldben (Michigan, USA),¹⁹⁸⁾ a minneapolis-i (Minnesota, USA) kormányzósági palota.¹⁹⁹⁾

Az összetett dobozszerkezet elve a külső homlokzati doboz és a belső közlekedő-mag együttműködése („tube in tube” rendszer). Legnagyobb méretű megvalósítása a már említett New York-i World Trade Center.²⁰⁰⁾

A leghatásosabb merevítést a cellás rendszer adja, de nagy hátránya, az alaprajzi kötöttség miatt ritkán alkalmazzák. Így kellett azonban tervezni pl. a 76. oldalon említett, téglából épült magasházakat, az anyag lehetőségének határán álló méretek miatt. Ilyen a legtöbb panelos építési rendszer alaprajza is. A lakások ugyanis, mint sorolt azonos elemek, némi kompromisszum árán elhelyezhetők a cellás alaprajzi rendszerben. A magasházak többsége azonban igényes irodaház, ahol ezek a kötöttségek a funkcióval nem egyeztethetők össze.

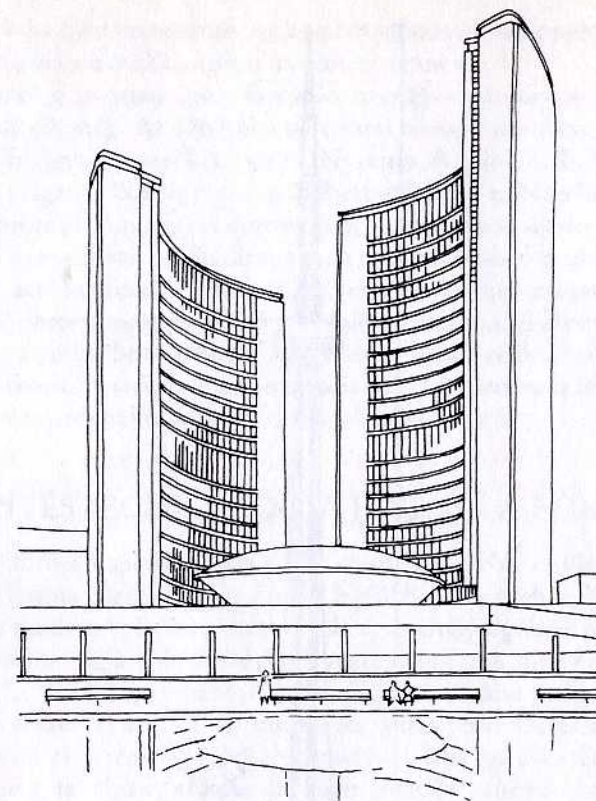
A egyes rendszerek közül leggyakoribb a merevítőfalak és -magok együttes alkalmazása. Jó példa erre a milánói Pirelli-székház (ép.: G. Ponti, szerk. terv.: A. Danusso, P. L. Nervi, 1955–1956). Az alaprajz szimmetrikus elrendezésű, a széleken kialakított magok és a beljebb helyezett, nyílásokkal áttört falak méretét úgy állapították meg, hogy merevségük azonos legyen (aminek előnyét már láttuk). A merevítőszervezetek egyben a függőleges terheket is viselik. A két fal közötti 24 m-es fesztávolságot a kötetlen alaprajz, a nagy terű irodák igénye indokolta (120. ábra).²⁰¹⁾



120. ábra

A milánói Pirelli-székház.

A külső összhangban van a szerkezettel anélkül, hogy az utóbbi válnék hangsúlyossá



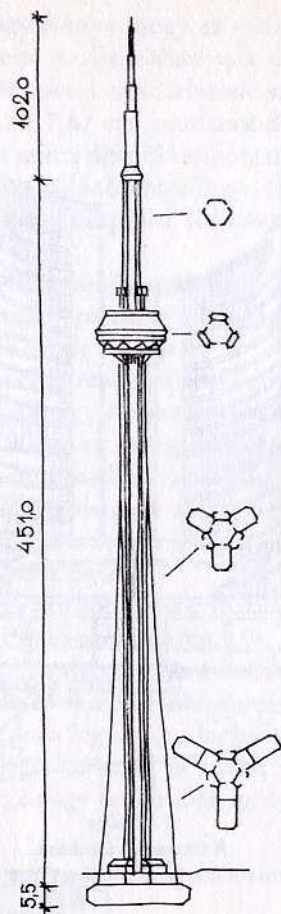
121. ábra

A torontói városháza.

Forma és szerkezet tökéletes összhangja

A különleges rendszerek közül egyre jobban terjed a vízszintes merevítőgerendák bevonása a toronyépület merevítésébe (112. ábra), így csökkentve az acélfelhasználást és a káros lengéseket. Az új szerkezet az alaprajzban és a homlokzaton is jelentkezik. A nagy, általában emeletnyi, vagy még nagyobb magasságú vízszintes tartók közötti teret gépészeti szintnek, vagy egyéb kiszolgálóhelyiségeknek használják, amelyek az egyébként erősen áttört homlokzatokon új motívumot is adnak, sokszor feloldják azok egyhangúságát. Ilyen pl. az US Steel Pittsbourgh-i (Pennsylvania, USA) irodaháza.²⁰²⁾ Foglalkoznak 900 . . . 1000 m magas épületek tervezési kérdéseivel is. A merevítést összetett, vízszintes merevítőtartókkal kapcsolt dobozszerkezettel javasolják megoldani. A nagy igénybevételek miatt olyan nagy alaprajzi terület szükséges, hogy a belső magot, a túlzottan mély traktus elkerülése miatt, belső udvar körül alakítsák ki.²⁰³⁾

Különleges megoldású a torontói városháza két íves alaprajzú tömbje. A szerkezet itt egy-egy függőleges tengelyű dongahéj, amelyet a födémek merevítenek. A két épülettömb, az általuk közrefogott, héjkupolával fedett nagyteremmel, szép példája a szerkezet és művészi forma egységének: minden forma szerkezetileg is indokolt, de a szerkezetekben járatlan szemlélő absztrakt szobrászi elvek szerint formált együttesre is gondolhat, a két magasház mint két kéz fogja közre a nagytermet. De láttuk, hogy ilyen nagy méret esetében szó sem lehet az erőjátéktól független, önkényes for-



122. ábra

A torontói kilátó és tv-adótorony.

Az igénybevételnek megfelelő sudarasodása esztétikai élményt is nyújt, és vizuálisan még jobban növeli a karcsú építmény magasságát

málásról. Az együttes egyik legfőbb értéke éppen az, hogy a szerkezet esztétikai értékét emeli magas szintre (121. ábra).

A magasházakat elsősorban a versengés, a propaganda miatt építik, a funkcionális és gazdasági szempontok – kivéve a nagyvárosok központjának sokszor fantasztikus telekárait – sokszor másodlagosak. A magas épületek másik csoportjánál a gyakorlati cél erősebben érvényesül. Ilyenek voltak régen a világítótoronyok, ma a kémények, víztornyok és más hasonló magas építmények, elsősorban a televíziós adótoronyok. Az építészetileg legkevésbé igényes kéményeknél is megfigyelhetjük a stabilitás szempontjából előnyös sudarasodást, amely egyben ezeket a ma már környezetvédelmi okból sokszor több száz méter magasságot is elérő, nagy területen látható építményeket karcsúbbá, szebbé is teszi. A víztornyok funkciójuknál fogva gyakran válnak a lakóterületek hangsúlyos elemévé, ezért építészeti szerepük is jelentős. A hazánkban épülő, ún. karéjos víztornyok (ép.: Zsuffa András) alap gondolata, hogy a függőle-

ges hengerhéjak kellő merevségűek és csúszózszaluzattal könnyen kivitelezhetőek. A kedvező szerkezet esztétikai értékei itt is megjelennek.²⁰⁴⁾

A világ számtalan pontján épült és épülő televíziós adótorony közül a két legmagasabbat említjük meg. Az 1967-ben befejezett moszkvai torony (ép.: D. Burdin, I. Batalov, V. Milasevszki, szerk. terv.: N. Nyikitin, B. Zlobin, T. Melik-Arakelian) összesen 533 m magas, 385 m-ig feszített vasbeton, feljebb acélszerkezet.²⁰⁵⁾ Az 1976-ban elkészült torontói (Kanada) tv-torony (ép.: J. Andrews, szerk. terv.: N. Roger) magassága még a moszkvait is túlszárnyalta, a feszített vasbeton törzs 451 m, felette még 102 m-es acélszerkezetű antennát helyeztek el, teljes magassága így 553 m (122. ábra).²⁰⁶⁾ A torony magját egy 5,5 m oldalhosszúságú szabályos hatszög alkotja, amelyet három, az igénybevételeknek megfelelően felfelé csökkenő keresztmetszetű merevítőborda erősít. A torony monumentális méretei ellenére is feltűnő karcsúsága nagyrészt éppen az erőjátékot követő formának köszönhető.

AZ ÉPÍTÉSTECHNOLÓGIA HATÁSA A FORMÁRA

Szerkezet és forma kapcsolatának talán legismeretlenebb területe a technológia és az építészeti forma összefüggése. Ennek legfőbb oka az lehet, hogy alig néhány évtizede, még a modern építészet kialakulásának és elterjedésének idején is a hagyományos építéstechnológia volt túlsúlyban, mert nem értek még meg az iparosított építészet feltételei.²⁰⁷⁾ A hagyományos technológiák fejlődése pedig olyan lassú volt, hogy létezésük szinte fel sem tűnt, hatásuk az építés természetes adottságának látszott. Gondoljunk pl. a téglafal építésére, amelynek lényege évezredekig változatlan maradt, eltekintve az olyan, számunkra nem jelentős változásoktól, mint a téglaméretének kisebb-nagyobb különbsége, a habarcs összetétele, a falazás munkafogásai. A technológia formaalakító hatása ennek ellenére a múltban is jelentős volt. Elég volna itt csak arra a sejtésünkre utalni, hogy valószínűleg magának az építőművészetnek a gyökereit is itt kell keresnünk.²⁰⁸⁾ De ha ez a megállapításunk vitatható is, Nervivel egyet kell értenünk, hogy a régi és új épületek vizsgálata egyaránt azt mutatja, hogy a jó technológia a jó épület szükséges – de nem elégséges – feltétele.²⁰⁹⁾ Annyira elválaszthatatlan eleme az épületnek és a szerkezetnek, hogy eddig is, az építőanyag és az erőjáték formai hatását vizsgálva, sokszor kellett utalnunk a technológiára.

A HAGYOMÁNYOS ÉPÍTÉSTECHNOLÓGIA HATÁSA A FORMÁRA

Láttuk, hogy már az egyszerű őskori kunyhó formáinak kialakulásában milyen fontos szerepe volt a technológiának (I. a II. fejezetet). A hagyományos technológia hatása azonban ritkán szembeszökő. Sokszor az építőanyaggal együtt jelentkeznek: az egyes anyagok megmunkálása, formálása tulajdonképpen mind ide tartozik. A kőfal építési módjai pl. nemcsak a munkafolyamatokban, vagy a fal szilárdságát tekintve különbözőek, hanem a formai hatásuk is jelentős. A szabálytalan terméskő fal rusztikus hatású, a rusztikázott, durva felületű kváderkő és a ciklopszfal erőt fejez ki, a szabályos, finoman megmunkált kváderkövekből épült fal az ünnepélyesség, a monumentalitás jelképévé vált. De a technológia hatása mutatkozik a kőből épített oszloprendek faszerkezetre emelkedtető formáiban is, hiszen tulajdonképpen nem a fát, hanem a faszerkezet építésmódjából adódó formákat utánozták.

Tágabb értelemben az építőanyagok gyártástechnológiájának formai következménye is a technológia hatása. Egyszerű példánál maradván, a téglagyártás módja: a felhasznált agyag tulajdonságai, az égetés mértéke, a téglafelületének és méreteinek szabályossága, a gyakorlati vagy díszítő céllal gyártott idomtégla mind számottevőek a téglahomlokzatú épületek megjelenésében. De a gyakorlati (pl. fagyállósági) és esztétikai követelményeket nem kielégítő téglafalazási technológia is nagy mértékben hatott az építészetre: e negatívum hatására fejlődött ki a vakolt homlokzatok esztétikája.

Az építőanyag gyártástechnológiája természetesen más szerkezeteknél is mutatkozik. További példaként a vasszerkezeteket említjük meg, ahol az öntöttvas és a hengerelt acél különbözősége nemcsak – a szilárdsági jellemzők következményeként – az arányokban, hanem a közvetlen formai megjelenésben is alapvető különbséget okoz.

A formára, sőt a szerkezeti formára azonban nemcsak a szerkezeti anyagok hatnak. A többször is említett londoni Kristálypalota (21. ábra) szerkezeti alapmodulját pl. a tömegesen gyártott legnagyobb üvegtábla méretének (4 láb, kb. 1,20 m) figyelembevételével állapították meg.^{209a)}

Az egyes szerkezet típusok kialakulásában és elterjedésében szintén nagy szerepe van az építéstechnológiának. Legjellemzőbb a boltozatok fejlődése, ahol a falazás technológiája, a mintaállvány készítése stb. is hatott a szerkezeti formákra. A gótikus boltozatok kialakulását is elősegítette, hogy a bordák közötti kisebb boltmezők általában állványzat nélkül voltak falazhatók.

Az építéstechnológia hatását tükrözi továbbá, hogy minden korban – még a saját eszméit dinamikus megmozgatott formákkal kifejező barokk stílusban is – túlsúlyban vannak az egyenes vonalak és a sík felületek. A görbe vonalak közül leggyakoribb a kör, az egyéb görbék is általában körívvekből szerkeszthetők. Meg kell azonban jegyezni, hogy míg a görbe vonalak és felületek a legtöbb esetben az építést nehezítik, tehát csak komoly indok esetén fogadhatók el, egyes anyagoknak és szerkezeteknek viszont természetes következményei. Az ívesen falazott téglafal pl. sokszor formalista tervezésre mutat, de a ballonépület íves alaprajza magától értetődő, s a merev geometria erőltetése volna itt formalizmus. A technológia formai hatása tehát ilyen szempontból sem elhanyagolható.

Az építéstechnológia kezdetlegességéből adódó szabálytalanságok is esztétikai értékek forrásai lehetnek. Ezt tapasztaljuk a kultúrák kezdetén és a népi építészetben, amelynek sajátos, utánozhatatlan szépsége nagyrészt ebből ered.

AZ ÚJ ÉPÍTÉSTECHNOLÓGIÁK HATÁSA A FORMÁRA

Annak ellenére, hogy a korszerű technológiák az új anyagokkal és szerkezetekkel kapcsolatban fejlődtek ki, gyökereiket mégis máshol kell keresnünk. Már az I. fejezetben láttuk, hogy a technológia a szerkezet társadalmi eredetű összetevője. Ezért nem változott alapvetően meg a múlt században, sőt a XX. század elején, az új anyagok és szerkezetek ellenére sem. A második világháború utáni gyors gazdasági fejlődés az építőipart olyan feladatok elé állította, amelyek kielégítése a hagyományos technológiával lehetetlen volt. Ha csak arra gondolunk, hogy a mérsékelt és a hideg égövben – ahol a fejlett országok zöme helyezkedik el – a hagyományos építőipar több

hónapos téli kényszerszünetet tart, könnyen megérthető pl. az előregyártás iránti igény. Ehhez egy másik, közvetlen társadalmi tényező is járul, az, hogy az építőipar nehéz munkakörülményei miatt éppen a jómódban élő országok építőipara munkakerőhiánnyal küzd. Ezek a tényezők a korszerű, elsősorban az előregyártás előnyeit hasznosító, a helyszínen lehető legkevesebb szerelési munkát igénylő építéstechnológiák kifejlődésének irányába hatottak.

Az építéstechnológia kezdetben egyszerűen az épület létrehozására irányult. De korán mutatkozott az igény, hogy az épület ne bármi áron, hanem lehetőség szerint kevés anyag és munka felhasználásával valósuljon meg. Kezdetben elsősorban az anyagtakarékosság volt a fő szempont az építőanyagok költséges előállítására és nehézkes szállítására miatt. Az anyagtakarékos szerkezetek a XIX. század végén és századunk első felében érték el fejlődésük csúcspontját. Az egyenszilárdságú szerkezetek (44. ábra) ennek az elvnek jellegzetes megnyilvánulásai. A gyorsan változó körülmények azonban hamar felhívták a figyelmet, hogy az anyagtakarékosnál bizonyos határokon belül fontosabb a munkával való takarékoskodás. Ez az elv általában egyszerű geometrikus formákhoz vezet. A két szempont optimális kielégítése az anyag- és munkatakarékos szerkezetekben valósul meg. Ennek legjellemzőbb példái egyes előregyártott könnyű szerkezetek, pl. a térbeli rácsostartók (128. ábra). Jelenleg kialakulóban van a legkorszerűbb, energiatakarékos szerkezetek elve, amelynek műszaki és formai következményeit ma még nem tudjuk felmérni.

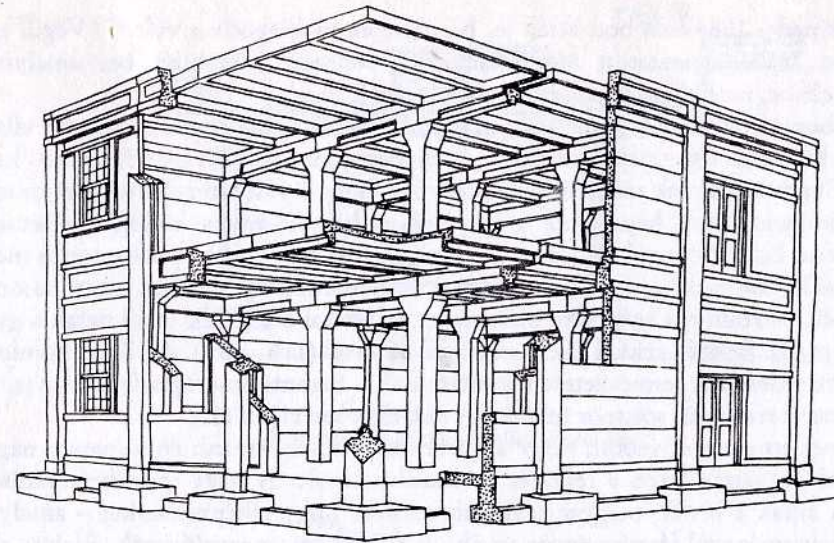
A monolit beton- és vasbeton szerkezetek a múlt században, sőt az utóbbiak csak századunkban terjedtek el, így előállításuk elvileg az új technológiákhoz tartozik. A helyszíni munka túlsúlya, a csak legújabbban megszűnő kézműipari módszerek mégis inkább a hagyományos eljárásokhoz kapcsolódnak. A beton- és vasbeton szerkezetek nagyrészt a zsaluzási technológia miatt emlékeztettek sokáig (és részben még ma is) a faszervezetekre (37. ábra). A zsaluzás az oka annak is, hogy a korai vasbeton szerkezetek a kő- és vakolatarchitektúrából megszokott tagozatokat, díszítéseket csak nagyjából követték, mint az első vasbeton házban látnánk (11. ábra). A zsaluzás technológiája később két irányban fejlődött. Egyrészt a formák egyszerűsítése volt a cél. Ennek következménye, hogy pl. a szerkezetileg előnyös és jellegzetes formájú könyökök, kiékelések elmaradtak. Ezért hagyták el a gombafödémek ugyancsak szerkezetileg előnyös, az erőjátékot kifejező fejezeteit is. Helyette egyes esetekben a fejezetet a födém síkja fölé helyezték, de újabban egyre gyakrabban a szerkezetileg ellentmondásos, formailag jellegtelen, pontokon felfekvő lemezeket alkalmazzák (36d) ábra). A zsaluzás technológiájának másik, lényegesebb fejlődési iránya a korszerű, kevés helyszíni munkát igénylő, előregyártott zsaluzóelemek kifejlesztése. Ide tartoznak a külön öntőformában gyártott bennmaradó, vagy ismételt felhasználható beton és műanyag zsaluzóelemek és a nagyelemes zsaluzatok. Az előbbiekkel különféle változatos formák állíthatók elő, amelyek a formai hatáson túl szerkezeti, statikai szempontból is előnyösek lehetnek, ugyanakkor a bonyolult forma előállítása sem okoz technológiai problémát (58. ábra). A nagyelemes zsaluzatok a monolit szerkezet és az iparosított építésmód előnyeit kívánják egyesíteni. Különösen a legfejlettebb térelemes zsaluzatok formai hatása jellegzetes, a technológia által befolyásolt építészeti megoldásnak jó példája (32. ábra).

A betontechnológia formai hatása is jelentős. Az ötvenes évektől terjedő nyers beton homlokzati felületek (akár monolit, akár előregyártott szerkezetnél) csak a betontechnológiai gépláncokkal biztosított egyenletes, folyamatos betonozás, a betonkiegészítő anyagok (plasztifikátorok, kötéslassítók) által váltak megvalósít-

hatóvá. Itt is, mint sok más esetben, felmerül a kérdés, hogy a formai igény (jelen esetben a szép betonfelület igénye) hatott-e a technológiára, vagy a technológia adta lehetőségek vezettek-e az új formához. Valószínű, hogy a fejlődés legtöbbször két oldalról indul, bár korunkban először általában a műszaki lehetőségek csirái alakulnak ki, de továbbfejlesztésükhöz a lendületet mégis sokszor a formai vagy funkcionális igények adják. Így történt a brutalizmus jellegzetes nyers beton homlokzatainak elterjedésekor is.

Az előregyártás, a legtöbb korszerű építéstechnológia alapelve, sem napjaink találmánya annak ellenére, hogy korunk építőiparára jellemző. Bizonyos mértékig minden kor fejlett építőipara felhasználta az előregyártás előnyeit. Ide sorolható már az építőanyagok egy részének előállításának is (pl. a téglák, a vasgerenda előregyártott elemek fogható fel). A teherhordó szerkezetek nagyobb fokú előregyártása azonban legfeljebb a vasszerkezeteknél volt szokásos (l. pl. a londoni Kristálypalotát, 21. ábra). A kisebb szerkezeteknél volt szokásos (l. pl. a londoni Kristálypalotát, 21. ábra). A kisebb szerkezeteknél volt szokásos (l. pl. a londoni Kristálypalotát, 21. ábra). A kisebb szerkezeteknél volt szokásos (l. pl. a londoni Kristálypalotát, 21. ábra). A kisebb szerkezeteknél volt szokásos (l. pl. a londoni Kristálypalotát, 21. ábra).

A mai értelemben vett előregyártásnak is nagy, de kevésbé ismert múltja van. Az előzmények közé sorolható pl. a nomád népek sátra, amelyet könnyen lehetett felverni, lebontani és a kívánt helyre szállítani. A középkorban és az újkor elején, az észak- és közép-európai népi jellegű faépítészeti virágkorában egyes ácsközpontokból messze földre, rendelésre szállították a fatemplomokat, haranglábakat.²¹⁰ Leonardo da Vinci, akinek több, korát messze megelőző tervét ismerjük, 1516-ban I. Ferenc francia király részére a Loire mentén építendő városokkal kapcsolatban kidolgozta egy központi telepen készülő, helyszínen összeszerelhető polgárház tervét.²¹¹ A XVI. század amerikai pionírjai kész fapanelokat vittek magukkal, hogy házukat gyorsan felépíthessék. Az 1778. évi török háború idején Bécsben 24 kórházi barakkot készítettek, amelyeket a szlavóniai hadszíntéren állítottak fel. Hasonló barakkokat használt az amerikai hadsereg is 1800 körül. Angliában 1830 táján öntöttvas panelokat készítettek, és ezeket a helyszínen csavarokötésekkel szerelték össze. Amerikába ezrével szállították az előregyártott faházakat az aranymezőkre a múlt század közepén. Ez volt talán az előregyártás első tömeges felhasználása.²¹² Nagy hatással volt az előregyártás fejlődésére Amerikában a vasútépítés is. A vasúti hidakat lakatlan területeken, lehetőleg gyorsan kellett megépíteni. Erre legalkalmasabbak a vasszerkezetű rácsostartók voltak abban az időben, mert az egyes rudakat készen, üzemből előregyártva tudták a helyszínre szállítani. Az egyszerű helyszíni szerelés érdekében a számításainkban ma is feltételezett csuklós kapcsolatokat alakították ki.²¹³ Később az épületek lefedéséhez is felhasználták a rácsostartókat. Legjellemzőbb a korábban már említett Polonceau-tartó, amelyet három elemből (a két rácsos szaruelemből és a vonórúdból) lehet egyszerűen összeszerelni.



123. ábra

Előregyártott vasbeton ház terve 1912-ből.

Az ilyen kezdeményezések ebben a korban még igény hiányában nem terjedhettek el

Európában a növényházak, majd a londoni Kristálypalota mutatja legjobban a fejlődés irányát. Paxton teljesen előregyártva tervezte a Kristálypalotát, amelyet 1851-ben 16 hét alatt szereltek össze.²¹⁴ Jól látható a korszerű előregyártás elveinek korai megvalósulása abból is, hogy kevés elemfajtából igyekezett a szerkezetet összeállítani. Ahol az anyagtakarékosság mégis a méretek igénybevétel szerinti változtatására kényszerítette, ott is figyelemmel volt a kapcsolatok egyöntetű megoldására (pl. az öntöttvas oszlopok falvastagsága az igénybevételtől függően változó, de külső átmérőjük állandó volt).²¹⁵ Jellemző a szerkezetre, hogy 1854-ben lebontották és London egyik külvárosában, Sydenhamben újra felépítették (itt pusztult el tűz következtében 1936-ban).²¹⁶

A korszerű előregyártás ma is érvényes elveit foglalta össze egy belgiumi kórház pályázati kiírása 1885-ben: „A barakknak úgy kell elemekből szerkesztettnek lennie, hogy könnyen szétszedhető, országúton vagy vasúton szállítható és lehetőleg rövid idő alatt ... felállítható legyen. Összeállítása után szilárdan összefüggő, stabil egészet alkosson, szél okozta oldalirányú elmozdulásra, ill. hóteherre kellően biztonságos legyen ... Az egyes részek kapcsolatai úgy legyenek megoldva, hogy kevésbé gyakorlott munkások könnyen és gyorsan tudják oldani és helyreállítani. Az összeszerelés könnyítése érdekében arra kell törekedni, hogy az azonos rendeltetésű szerkezeti elemek lehetőleg egybevágóak legyenek és a különböző elemek száma lehetőleg kevés legyen.”²¹⁷

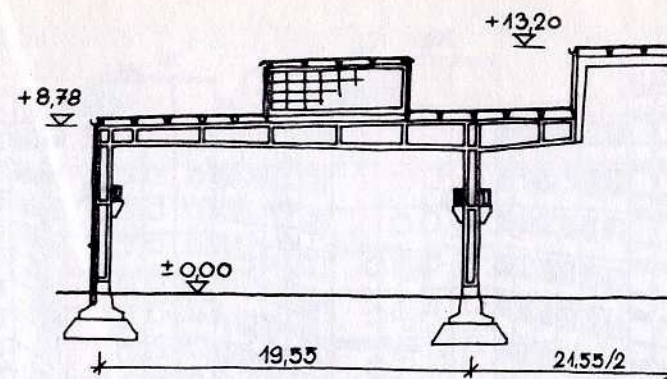
Az előregyártott vasbeton elemek gondolata is viszonylag hamar felmerült. Hennebique már 1891-ben előregyártott gerendát alkalmazott. J. Bodie 1901-ben vasbeton panelos építési rendszert szabadalmaztatott. A leírás szerint célja a lakásínség megoldása volt. A panelokat hálókkel és laposvasakkal vasalta, a kapcsolatokat habarccsal kitöltött hornyokkal és csavarokkal oldotta meg. A következő években több házat épített Liverpoolban, amelyek közül kettő még áll, az egyik 1904-ben épült 12 lakásos

bérházat pedig 1964-ben bontották le, bár teljesen jó állapotban volt.²¹⁸⁾ Végül egy 1912-ben szabadalmaztatott vasbetonépítési rendszert mutatunk be, amelynek minden eleme, még alapozása is előregyártott (123. ábra).²¹⁹⁾

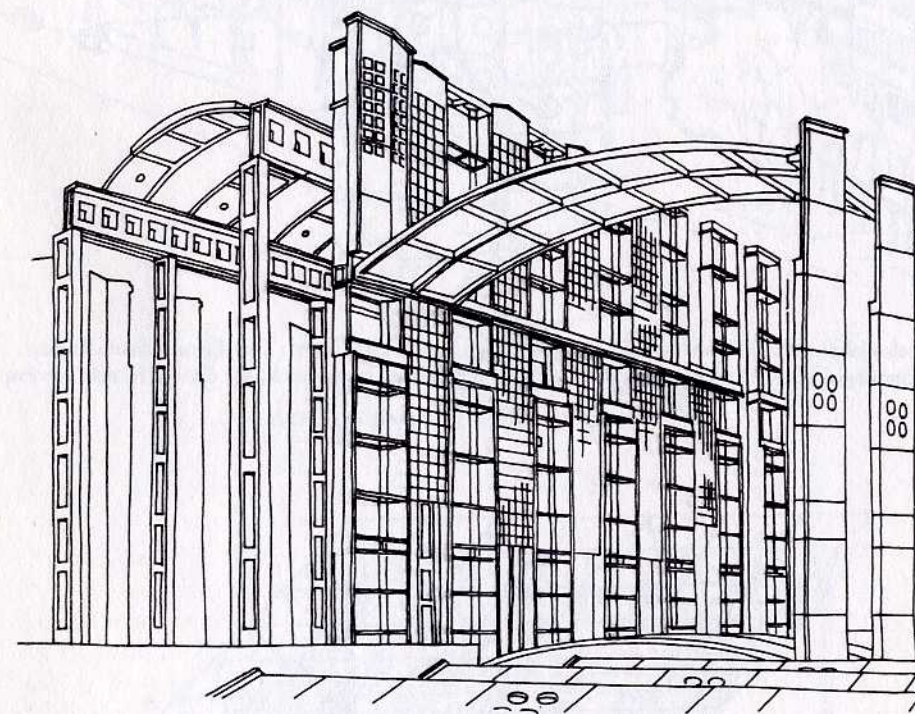
A vasbeton elemek előregyártása a biztató kezdetek után is csak a második világháborút követően terjedt el, mert akkor érték meg a társadalmi és ipari feltételei. Itt is tapasztalhattuk, ha csak rövid átmeneti időre is, hogy a vasbeton elemeket rejtetten, pl. födémgerendának használták a lényegében hagyományos külsejű épületben. Hamarosan kiderült azonban, hogy az előregyártott elemek a homlokzaton is megjelenhetnek, sőt ezzel új építészeti hatások is elérhetők. Az azonos, vagy hasonló elemekből összeállított struktúra már ismert esztétikai értékei itt találkoztak a gyakorlati, gazdasági igényekkel, az iparosított építéssel (116. ábra). Az ilyen homlokzatok elterjedésének természetesen feltétele volt a betontechnológia fejlődése is, az egyenletes szerkezetű, sokszor fehér vagy színes beton előállítás.

Érdemes itt arról is szólni, hogy az ötvenes években hazánk építőipara a nagyelemes előregyártás terén a fejlődés élvonalába került. A nagy ipari beruházások alkalmat adtak a kiváló magyar szakembereknek, hogy elképzeléseiket – amelyek szinte létesítményről létesítményre tovább is fejlődtek – megvalósítsák. Eleinte alig volt más célja az előregyártásnak, mint a nagy magasságú csarnokok monolit építéséhez szükséges nagy fafelhasználás csökkentése. Ez a törekvés szinte észrevétlenül vezetett – pl. a beemelendő nagy elemek súlyának mérséklése, a keresztmetszetek könnyítése útján – új formákhoz (124. ábra).^{219a)} E korai tervek, pl. az 1951-ben épült gyöngyösi Kitérőgyár (terv: Mátrai Gyula és Pászti Károly) jellemzője, hogy elsősorban a nagy szerkezeti elemeket tartja szem előtt, az ugyancsak előregyártott födém-, fal- és felüvilágító elemek másodlagosak, sőt egyes esetekben még a hagyományos technológiát is alkalmazták. Néhány év alatt ezen a téren nagy volt a fejlődés: a rúdszerkezetek helyett lemezes, térbeli erőjátékú teherhordó elemeket alkalmaztak, amelyek a tételhatároló fal funkcióját is átvették, végleges homlokzati felületet adtak, és az épületgépészeti csövezetékek elhelyezését is lehetővé tették. Így lényegesen csökkent az elemfajta száma és az elemek darabszáma is, minthogy az épület tulajdonképpen pillérpanelekkel és nagyméretű, általában vonóvasas dongahéj elemekből áll. (A technológia fejlettségére jellemző, hogy 25 . . . 30 t tömegű elemek beemelését kellett megoldani.) E fejlett, komplex előregyártási rendszer egyik jellemző példája az 1958-ban elkészült pécs-újhegyi erőmű (terv: Mátrai Gyula és Pászti Károly) (125. ábra).^{219b)} Az ilyen épületek formái jól tükrözik az építéstechnológia fejlődését, és a technológiából eredő forma egyben az építészeti kifejezés hatásos eszközévé válhat.

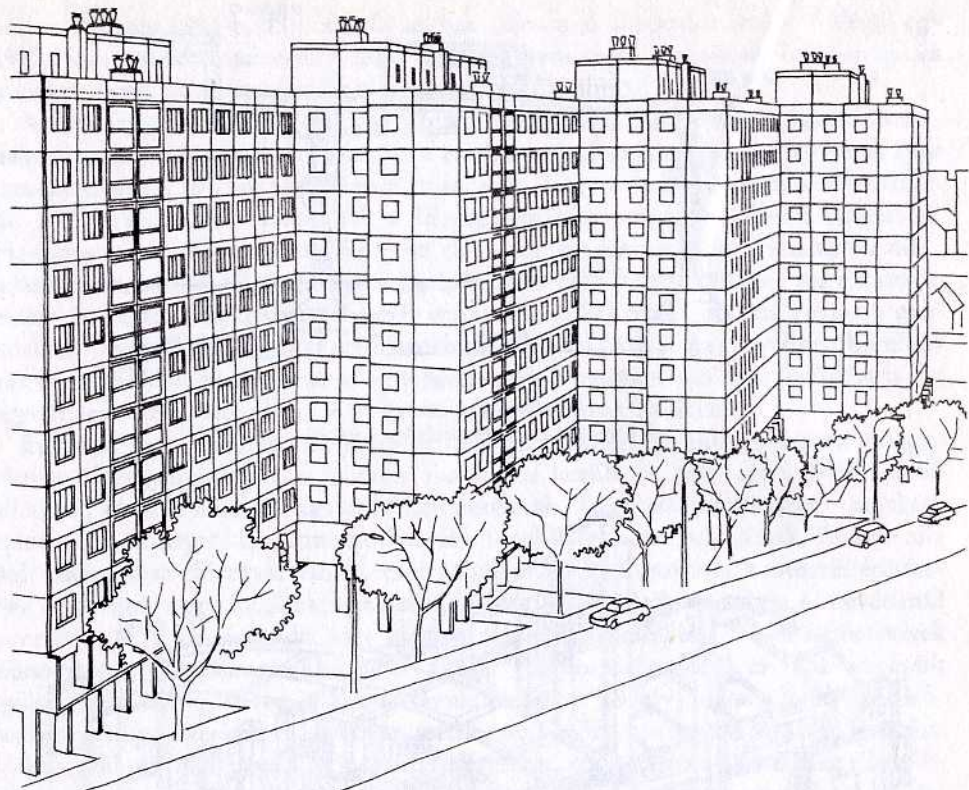
A házgyári panelos technológiának is az a lényege, hogy az egész épület előregyártott (általában helyiségméretű) elemekből készül. A panelek nemcsak a teherhordó vázat képezik, hanem – és éppen ez a technológia lényege – komplex elemek, amelyek a másodlagos szerkezeteket (nyílászárókat, gépészeti berendezéseket stb.) is magukba foglalják, így az építési idő és a helyszíni munka igénye lényegesen csökken. Egyben megvalósul a szerkezet és az építészeti forma egysége is, mivel minden nagy elem egyidejűleg funkcionális, szerkezeti és formai egység. Az ipari előállítás, a technológiából következő azonos elemek ellenére sem szükségszerű, hogy a házgyárban előállított panelos épületek monotonok, sívárák legyenek. Az épület és egyes részeinek jó arányával, egyszerű, de kiérlelt formákkal, a tömegek ésszerű játékával, a színezés mértéktartó és architektonikus felhasználásával elérhető, hogy a panelos épületek is az építőművészet szintjére emelkedjenek (126. ábra). Meg kell jegyezni, hogy



124. ábra
A gyöngyösi Kitérőgyár
A nagyelemes előregyártás korai példája

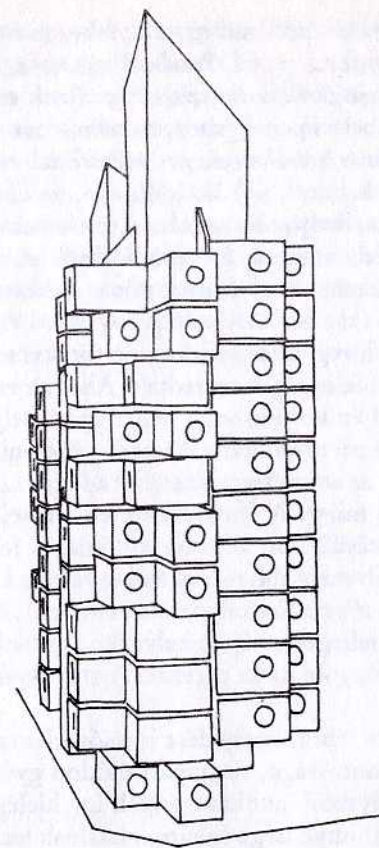


125. ábra
A pécs-újhegyi erőmű.
A fejlett, komplex nagyelemes előregyártás jó példája



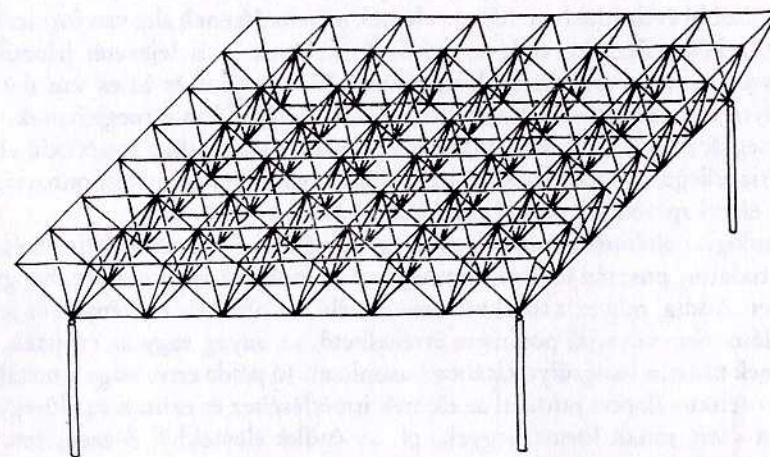
126. ábra

Panelos lakóházak az óbudai lakótelepen (ép.: Koltai Endre, szerk. terv.: Tóth Elemér, Szubi Tamás).
A technológiai kötöttségek sem akadályai az igényes építészeti tervezésnek, sőt újszerű formák forrásai lehetnek



127. ábra

Térelemes lakóépület Tokióban.
A technológia formai hatásának jellegzetes példája



128. ábra

Térbeli rácsostartó.
Könnyed formái a mai építészet egyik jelképévé váltak

a panelos építésmód nem jelent feltétlenül egyet a vasbeton elemekkel, csak a gyakorlatban vált a kettő szinte egy fogalommá. Panelok más anyagból (fémről, fából, műanyagból és ezek kombinációjából) is készíthetők. Ezek esztétikai problémái sok tekintetben hasonlóak a vasbeton panelokhoz, ha nem is azonosak azzal.

Hasonlóak a legújabbnak számító térelemes építésmód esztétikai kérdései is. Ez a technológia azért fejlettebb, mert még komplexebb, az egyes elemek az üzemben teljesen készre gyárthatók, a helyszíni munka a térelemek szerkezeti és gépészeti csatlakozásainak elkészítésére csökken. A technológia folyamányaként itt még tökéletesebben valósul meg a szerkezet és forma, sőt a szerkezet és építészet egysége (127. ábra).

A vasbeton szerkezetek előregyártására irányuló törekvések, mint láttuk, a negyvenes évek végéig elszigetelt jelenségek maradtak. Ahol az előregyártás mégis szükséges volt (pl. nagyon rövid építési idő vagy nehéz építéshelyi körülmények miatt), az acélszerkezet adott egyszerű megoldást. Az acél- (és alumínium) szerkezetek elemeinek előregyártása szinte az anyag természetéből adódik az elemek eszközigényes, nagy pontosságú előállítása miatt. A fémszerkezetek elemei viszonylag könnyűek, tehát szállításuk és elhelyezésük sem állította különleges feladat elé az építőipart. Ezért a vasszerkezetek kisebb-nagyobb mérvű előregyártása kezdettől fogva általános volt (ha nem is olyan fokon, mint a Kristálypalota esetében). A vasszerkezetek formai megjelenésének ezért egyik jellegzetessége a helyszíni kapcsolat, amelynek szerkezeti helyes és egyben szép megoldása az esztétikai hatás egyik fontos tényezője (22., 129. ábra).

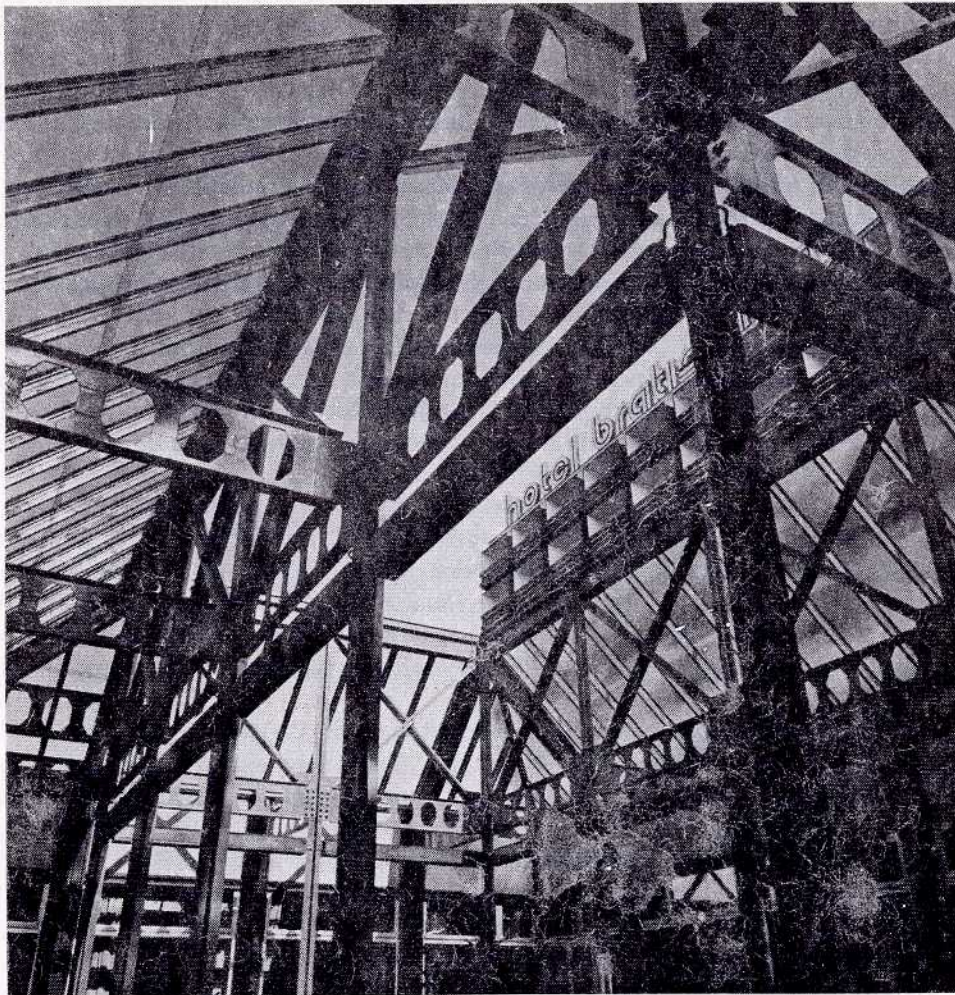
A térbeli rácsostartók (128. ábra) elterjedése is elsősorban a technológia fejlődésének köszönhető. A nagy pontosságú, nagyipari módon gyártott szerkezeti elemek összeszerelése minimális helyszíni munkát igényel, így kielégíti a mai kor gazdasági igényeit. Esztétikai hatása, könnyedsége és kapcsolatainak technológiai eredetű szépsége a mai építészet egyik leghatásosabb kifejezőeszközévé teszi ezt a szerkezetet.

A fémszerkezetek előregyártása természetesen más területeken is sokat fejlődött. Egyrészt az előregyártott elemek mérete és súlya növekedett a szállító- és különösen a beemelőkészítők fejlődésével, másrészt az iparosított építés és az épületsúlyok csökkentése iránti társadalmi igény a komplex könnyűszerkezetek kialakulásához vezetett az utóbbi évtizedekben. Míg az elemek növekedésének alig van formai következménye, a könnyűszerkezetek az építőművészetnek is új fejezetét jelentik. Bár a könnyűszerkezetek esztétikájának csírái már W. Gropius és Mies van der Rohe hagyományos technológiával készült épületein, sőt még előbb is megjelentek, valódi jellegzetességük csak a nagyipari előállítás nyomán, a sorozatban ismétlődő elemek, a karosszéria jellegű homlokzatok, az ipari előállításra jellemző méretpontosság, a jól megoldott elemkapcsolatok segítségével bontakozott ki (136. ábra).

A technológia, elsősorban az előregyártás esztétikai értékeinek felfedezése sokszor azok tudatos, pusztán formai vagy teoretikus indíttatású keresésére, hangsúlyozására vezet. Addig, míg ez a törekvés nem öncélú, az objektív törvények és igények érvényesülését nem zavarja, pozitívan értékelhető, az anyag vagy az erőjáték jellegzetességeinek tudatos hangsúlyozásához hasonlóan. Jó példa erre, hogy a metabolista irányzat teoretikus alapon jutott el az elemek ismétléséhez és ezúton az előregyártáshoz, éppen ezért annak formai jegyeit, pl. az épület elemekből összeépített voltát formailag kiemeli (116., 127. ábra).

A technológiai eredetű forma modoros felhasználására is sok példát találhatunk. Egyik legjellemzőbb, gyakori eset, mikor az előregyártott elemekből következő

rasztert téglafalú vagy monolit szerkezetű épület homlokzati kiképzéseként alkalmazták. Egyedi, de jellemző példa egy Budapest környéki nyaraló, amely az ipari feltételek hiánya ellenére a karosszéria jellegű, préseléssel vagy öntéssel előállított nagy elemekből szerelt házat (v. ö. 41. ábra) utánozza. (Más kérdés az ilyen jellegű épületek indokoltsága a funkció oldaláról nézve. A használatban mutatkozó hátrányokat legfeljebb az építés egyszerűsége, olcsósága indokolhatja – ez utóbbi előny jelenleg valószínűleg még sehol sincs meg.) A nyaraló elemei az adott lehetőségek közt bádogból, kisipari módszerekkel készültek. Az elemek ezért szabálytalanok, az állandó karbantartás elmaradása miatt rozsdásodnak, mechanikai hatásokra sérülnek, horpadnak, így a messziről látványos épület közletről nézve csalódást kelt.



129. ábra

A Bratislava Szálló Pozsonyban (ép.: Finta József, szerk. terv.: Dénes Loránd).
A szép szerkezet a szálló kiszolgáló szárnyának építészeti egységét is biztosítja

IV. A FORMA HATÁSA A SZERKEZETRE

Az előző fejezetben a szerkezetnek, mint az építészet egyik objektív tényezőjének formára gyakorolt hatását vizsgáltuk meg. Van azonban a szubjektív tényezőnek, a formának is hatása az objektív jelenségekre, az objektív törvények érvényesülését bizonyos határok közt az épület és a szerkezet formálásával befolyásolni tudjuk. Különösen az erőjátékokra hat erősen a szerkezet formája. Az objektív törvények ismeretében formai oldalról is elősegíthető a jó, biztonságos és gazdaságos szerkezet és épület megvalósítása.

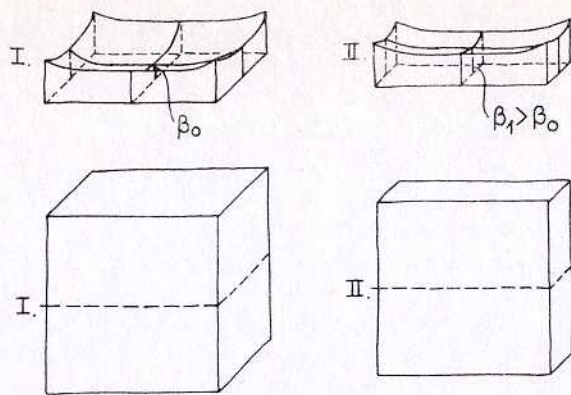
A FORMA HATÁSA AZ ÉPÍTŐANYAGRA

Ahogy a szobrász az elképzelt figura jellege szerint készíti művét kőből vagy fémből, az építész is egy olyan épülethez, amelynek funkciói tömör falakat kívánnak, téglát, betont, követ választ, míg az áttört homlokzatú, vagy nagy belső terű épület esetében tudja, hogy reálisan csak húzószilárdsággal rendelkező anyagok, vasbeton vagy fém jöhet szóba. Indokolt lehet az ilyen választás formai igény alapján is, ha az nem mond ellent a funkciónak és a szerkezet realitásának.

Az anyag megválasztásában is követhetők el hibák. Így néha a könnyű szerkezetet formai okból nehézkes burkolattal veszik körül, mint a múlt században, amikor a könnyű acélvázat vélt esztétikai szempontok miatt nehézkes kőburkolat mögé rejtették. Ennek a hibának ellenkező irányú határát súrolják egyes gótikus épületek valószínűtlenül karcsú – sokszor rejtett vasakkal is erősített – áttört kőszerkezetei.

Az eddigiekből úgy tűnik, hogy a forma csak szubjektív tényezők útján hat az anyagra. Egy új feszültségelmélet azonban – amelyről a 93. oldalon már egyszer röviden szóltunk – arra a következtetésre jutott, hogy az anyagok szilárdsági tulajdonságai a mérettől és alaktól függetlenül változnak.²²⁰⁾ A mi szempontunkból is igen érdekes hipotézis, ha megbízható kísérleti igazolása lesz, az egész szilárdságtan átértékelését fogja megkövetelni.

A hipotézis, mint már említettük, annak a modern fizikából közismert ténynek következetes végiggondolásán alapul, hogy az anyag részecskékből áll, amelyek között vonzóerő, ill. érintkezési felületükön (ami nem jelent „anyagi” érintkezést,



130. ábra
A keresztmetszeti formák hatása a sajátfeszültségekre.
Egy új feszültségelmélet szerint

mert a részecskék legvalószínűbben erőtereknek foghatók fel) taszítóerő működik, tehát a szilárd testek terheletlen állapotban sem feszültségmentesek, hanem nyomóerő működik bennük. A legegyszerűbb esetet, a húzást vizsgálva, ennek az igénybevételnek a részecskék közötti vonzás áll ellen, tehát a tönkremenetel (az egész folyamatot teljesen leegyszerűsítve) akkor következik be, ha a húzóerő nagyobb, mint a részecskék közötti, a húzóerővel egy irányú vonzóerők eredője. A homogén és izotróp anyagok belsejében a részecskék közötti elemi erők minden irányban egyenletesen elosztva hatnak, de az elem felületén, mivel a felszín szükségképpen feszültségmentes, ez a feszültségállapot nem jöhet létre, ezért a részecskék is deformálódnak, súlypontjuk a felülettel párhuzamos irányban közelebb kerül egymáshoz, így a vonzás is megnő (amely az általános érvényű fizikai törvény szerint a távolság négyzetével fordítottan arányos). Fokozottan áll ez a megállapítás az elem éleire. Így az anyagban általában perem- és magzóna keletkezik, kivéve a nagyon kis keresztmetszeteket, ahol a magzóna nem tud kialakulni. A szélke speciális részecske-elrendeződését figyelembe véve, különböző arányú hasábok metszetein terheletlen állapotban az anyag belsejében működő sajátfeszültségek a 130. ábra szerint alakulnak. Vagyis a kisebb keresztmetszetek szilárdsága viszonylag nagyobb, így a szakító- (törő-) szilárdság nem jellemzi egyértelműen az anyagot. Az elmélet sok jelenségre ad egyszerű magyarázatot. Példaképpen említsünk meg néhányat, ahol a klasszikus mód-szerekkel nem sikerült eddig elfogadható eredményre jutni:

- a különböző alakú próbatestek szilárdsága a tapasztalat szerint eltérő;
- a keresztmetszet kisebb gyengítése (pl. szegecslyukkal) nem csökkenti a szakítószilárdságot (mert a lyuk mentén is nagyobb szilárdságú peremzóna alakul ki);
- a zsugorodás és a lassú alakváltozás (kúszás) jelensége teljesen hasonló törvényszerűségeket mutat (mert a zsugorodás tulajdonképpen az anyag sajátfeszültségének hatására keletkező lassú alakváltozás).

Nagyon érdekes és elgondolkodtató a dél-franciaországi Fréjus-ban 1959-ben történt völgyzárógát-szakadás magyarázata az új elmélettel. A tragédia után végzett alapos vizsgálatok szerint a betonból kivett 20 cm-es próbakockák törőszilárdsága 4,5 kN/cm² körül volt. Az ellenőrző számítások szerint a betonban 0,9 kN/cm² volt a maximális feszültség, így a hagyományos módon a tönkremenetelt nem lehetett meg-

magyarázni. Az új elmélet szerint azonban, figyelembe véve a gát geometriai arányait és az alsó kritikus keresztmetszet – más szerkezetnél szokatlan – 6,91 m-es vastagságát, a törőszilárdság mindössze 0,87 kN/cm²-re adódik (mivel itt a nagy méret miatt a peremzóna nagyobb szilárdságának hatása már elenyésző). Így az elmélet alkalmazásával a katasztrófa előre látható lett volna.

Az elmondottak alapján úgy tűnik, hogy célszerű minél kisebb keresztmetszetet alkalmazni a tartószerkezetekben. Ez azonban a hipotézis érvényessége esetében is csak bizonyos határig igaz, mert a túl kicsi keresztmetszetben az anyag véletlen inhomogenitásának (a keresztmetszet nagy részére terjedő anyaghibának) veszélye nagy, valamint a kivitelezésből adódó méreteltérések is sokkal veszélyesebbek a kis keresztmetszetenél (pl. kis méretű, központosan nyomottnak tervezett pillérnél nagy külpontosságot okozhatnak). Azt viszont alátámasztja az új elmélet is, hogy nem előnyös a túl nagy méretű, nehézkes szerkezetek. Az igen kis méretű szerkezeti elemeknek is van azonban célszerű felhasználási területük, ez pedig a sodronykötél, amely sok, kis átmérőjű huzalból készül. A huzalok szilárdsága (az új elmélet, de a kísérleti eredmények szerint is) lényegesen nagyobb, mint a nagyobb keresztmetszetű rudaké, és az egész kötélt biztonságát egy-egy huzal esetleges anyaghibája még nem veszélyezteti. Így a kötélszerkezetek jelentősége várhatóan emiatt is tovább növekszik a jövőben.

A FORMA HATÁSA AZ ERŐJÁTÉKRA

Első pillanatban meglepőnek tűnhet, hogy a szerkezet formálásával, tehát szubjektív ráhatással az erőjáték, az objektív természeti törvény megnyilvánulása, befolyásolható. Érthetővé válik ez a jelenség, ha meggondoljuk, hogy a szerkezet formája nagyrészt a keresztmetszetek méretét, alakját és ezek változását jelenti. Ez pedig a szerkezet egyik meghatározó tényezője, amelynek jelentőségét az erőjáték alakulásában már a III. fejezetben is láttuk.

Figyeljük meg pl. egy állandó keresztmetszetű, központosan nyomott pillér teherbírásának változását a keresztmetszet alakjának függvényében. Az összehasonlítás érdekében legyen a pillér anyaga, hossza, befogási viszonyai, keresztmetszeti felülete állandó. Ebben az esetben a merevség, amely a kihajlási ellenállásra jellemző, csak az inercianyomatóéktól függ. A 131. ábrán láthatjuk a különböző keresztmetszetű vasbeton pillérek négyzet-keresztmetszethez viszonyított teherbírását. Az összeállítás szemléletesen mutatja, hogy a felhasznált anyagmennyiség változtatása nélkül (az F keresztmetszeti terület állandó) milyen különböző teherbírási értékek érhetők el pusztán a keresztmetszet formálásával. Előnyös a üreges és a kereszt alakú, két irányban szimmetrikus keresztmetszetek, míg a divatos pengepillérek a függőleges terhek viselésére kevésbé alkalmasak (további hibájuk, hogy az építési pontatlanságból adódó, nemkívánatos külpontosságra is sokkal érzékenyebbek). Az ilyen forma csak akkor indokolt, ha a pillér fő funkciója, hogy saját hossz tengelyének irányában merevítse az épületet. Az első pengepilléreknek ilyen szerepük is volt, de az utánpótlás többsége csak új formát látott bennük és a divatot követve indokolatlanul, sőt az épület stabilitását veszélyeztetve is alkalmazta.

Az épület merevítéséről szólva utalunk még a III. fejezetre, ahol azt láttuk, hogy a merevítőpillérek, falak egymáshoz viszonyított méretének megválasztása is milyen jelentősen befolyásolja az igénybevételeket (114. ábra).

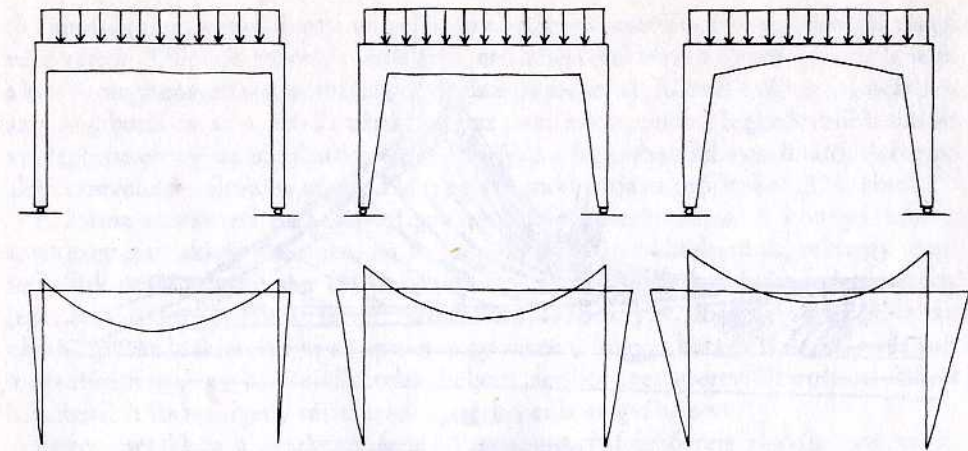
$F = a_0^2 = \text{konst.}$	a_n/a_0	J_n/J_0	$l_0/h^{(1)}$	$\varphi^{(2)}$	$N_H(\%)$
	1,000	1,000	15,0 ³⁾	0,678	100,0
	1,128	0,964	15,3	0,671	99,0
	1,667	4,578	7,0	0,846	124,8
	1,881	4,373	7,2	0,843	124,3
	0,447	1,169	13,9	0,703	103,7
	0,333	1,602	11,8	0,751	110,8
	0,577	0,337	25,9	0,451	66,5
	0,447	0,205	33,1	0,342	50,4

131. ábra

Vasbeton pillér teherbírásának változása a keresztmetszeti forma függvényében

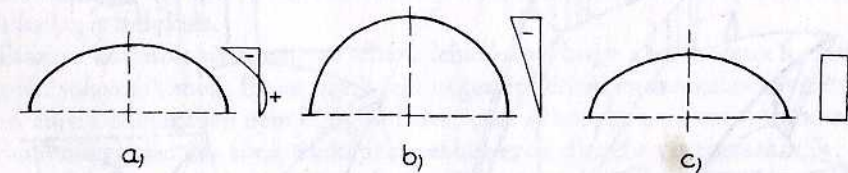
$$1 \quad \frac{l_0}{b_n} \approx \frac{l_0}{a_n} = \frac{l_0}{i_n \sqrt{12}} = \frac{l_0}{\sqrt{\frac{J_n}{a^2}} \cdot \sqrt{12}} = \frac{la}{\sqrt{12}} \cdot \frac{1}{\sqrt{J_n}} = \text{konst.} \cdot \frac{1}{\sqrt{J_n}};$$

2 az MSZ 15022/1 szerint számítva; az előbbi $h=a$ közelítés éppen a két utolsó, kedvezőtlen esetben jelent a biztonság kárára számottevő eltérést!
3 felvett érték



132. ábra

Különböző formájú keretszerkezetek.
Az erőjáték a formai kialakítástól függ



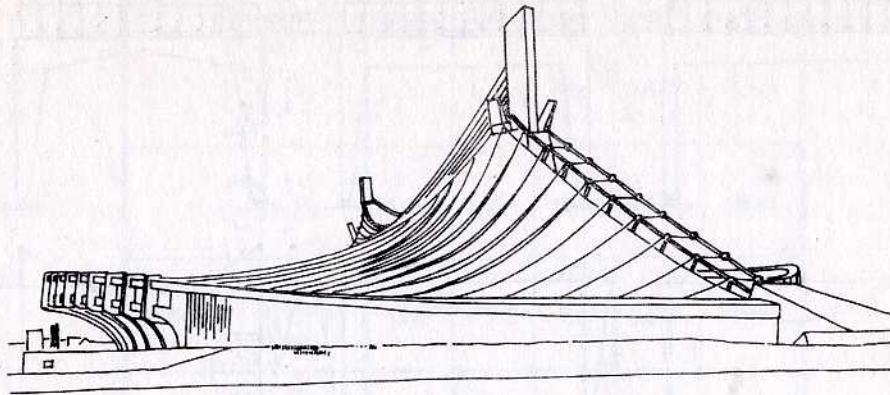
133. ábra

A hosszú dongahéj vezérgörbéje jelentősen hat az alkotóirányú erők eloszlására.
Az n_x metszeterő diagramja a) ellipszis, b) félkör, c) ciklois vezérgörbe esetén

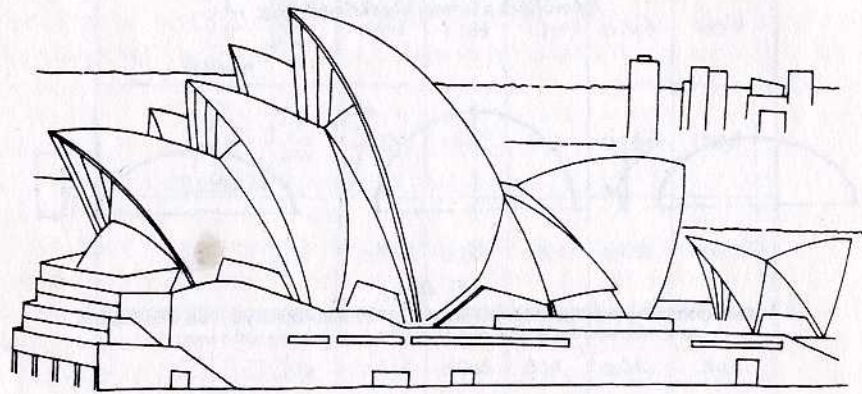
A szerkezet aránya egyes esetekben alapvetően hat az erőjáték minőségére is. Például egy nagyon kis magasságú vasbeton tartó vasbetétei a nagy lehajlás következtében kötélként kezdenek működni, ha a vízszintes erők felvételét lehetővé tettük (vékony lemezek tönkremeneteli állapotában gyakori eset). A szokásos arányok esetén alakul ki egyértelműen a gerendatartó ismert erőjátéka, míg a magasság további növelése a faltartó vonóvasas ívhez hasonló erőjátékához vezet.

A forma erőjátékra gyakorolt hatását legjobban a statikailag határozatlan rúd-szerkezeteken, pl. a kereteken tanulmányozhatjuk (132. ábra).²²¹⁾ A szerkezet merevebb részei szinte magukhoz vonzzák az igénybevételeket, tehermentesítve a gyengébb keresztmetszeteket. Az alak változtatásával átmenet is képezhető az egyes szerkezettypusok között. Egy rúd elvékonyításával csuklóhoz hasonló erőjáték alakul ki a nyomaték csökkenése miatt. Így pl., ha a kétsuklós keret gerendájának keresztmetszetét középen erősen csökkentjük, az erőjáték a háromcsuklós tartóhoz hasonlóvá válik.

A forma hatása a felületszerkezetek erőjátékára sem kevésbé jelentős. Említettük már a rövid és a hosszú dongahéj erőjátéka közötti lényeges különbséget: az előbbié a hagyományos boltozathoz, az utóbbi a gerendához áll közel (80. ábra). Az erőjáték itt is az általunk választott aránytól függően alakul ki.



134. ábra
Fedett uszoda Tokióban.
A formai igény visszahatótt a szerkezetre



135. ábra
Operaház Sydneyben.
A szerkezetet figyelmen kívül hagyó önkényes formákért nagy árat kell fizetni

Tanulságos a hosszú donga tengelyirányú n_x metszeterőinek vezérgörbétől függő változása is. Ellipszis vezérgörbénél az n_x erő a héj felső részén nyomóerő, de lejjebb a kis- és nagytengely arányától függően húzásba mehet át. Körnél a változás lineáris és az alsó alkotóban az n_x értéke zérus, míg az ilyen szempontból legkedvezőbb ciklois vezérgörbe esetén az n_x állandó, tehát az anyag a legjobban kihasználható. A forma alig észrevehető változása tehát itt lényegesen módosítja az erőjátékot (133. ábra).²²²⁾

A forma szerkezeti hatása megfigyelhető a függőtetőknél is. A könnyű húzott szerkezet csak akkor alaktartó, ha hatásos feszítőerőt működtetünk, mintegy megterheljük ezzel a tetőt. Az 1964. évi tokiói olimpiai játékokra épült fedett uszoda (ép.: Kenzo Tange, szerk. terv.: Yoshikatsu Tsuboi, 134. ábra) lefedését azonban olyan laposan alakították ki az épület nagy részén, hogy a hatásos feszítés nem volt megvalósítható, így a feszítőkötélek helyett acélból íves merevítőbordákat kellett készíteni. A formai igény miatt tehát a szerkezet is megváltozott.^{222a)}

Egyes esetekben a szerkezet formai, építészeti kifejezőereje elsődlegessé válik. A pozsonyi Bratislava Szálló (ép.: Finta József, szerk. terv.: Dénes Loránd) (129. ábra) belső udvarának acélszerkezete pl. – az üvegtető kis terhelését tekintve – sokkal egyszerűbb is lehetne, de a tervező elsősorban ennek segítségével foglalta építészeti egységbe az udvart a körülötte elhelyezett vendéglátó üzemekkel, ahol a szerkezet (pl. az I szelvényekből készített sejtartók) már jelentős terhet vesz fel, így statikailag is indokolt.

Ésszerű korlátok közt megvan tehát a lehetősége, hogy a szerkezetet formai igény alapján válasszuk meg. Ez az egyik lehetséges építészeti és szerkezettervezési módszer, amely önmagában nem kifogásolható, csak akkor, ha nem vet számot az egyéb követelményekkel és a formai elképzelésekhez ezek ellenében is ragaszkodik.

Az önkényes, a szerkezeti követelményeket teljesen figyelmen kívül hagyó formálás már klasszikussá vált példája a Sydney-i operaház. J. Utzon pályaterve első díjat nyert az 1957-ben rendezett nemzetközi tervpályázaton. Az építész formai elképzelésből indult ki, az épületet lefedő héjak dagadó vitorlákra emlékeztetnek. (Itt a szerkezettől függetlenül joggal felmerül a kérdés, miért kell egy operaháznak vitorlákra emlékeztetnie, még ha a tengerparton is áll?) A szerkezeti megoldás azonban tisztázatlan volt, és a bíráló bizottság sem vette figyelembe, hogy a feleslegesen nagy „vitorlák” valóban óriási szélterhet kénytelenek felvenni, nem is beszélve a bonyolult formájú szerkezet kivitelezésének nehézségeiről (csak egy jellemző adat: az épület magassága 67 m, amit a funkció egyáltalán nem indokol). A meggondolatlan döntés eredményeképpen az épület 14 évig épült (1959–1972). Az eredeti tervhez képest sok változtatást kellett végrehajtani, és költségei végül az előirányzat többszörösére emelkedtek (építése idejében még nem volt infláció!) (135. ábra).²²³⁾ Kétségtelen ugyan, hogy az épület (nemcsak negatív értelemben) világhírűvé, egy világváros jelképévé vált, de az amit egy gazdag állam egy esetben megengedhet magának, semmiképpen sem válhat az építészet ideáljává.

Az elképzelt forma megvalósítása azonban új, célszerű szerkezethez is vezethet, ha a tervező nem szakad el a realitásoktól, figyelembe veszi az építési feladat követelményeit és a megvalósítás lehetőségeit. Ilyen alkotói módszer figyelhető meg például a függőtők kialakulásánál (98. ábra), egyes héjformák alkalmazásánál (89., 92. ábra). de valószínűleg hatott többek közt a vázszerkezetek fejlődésére is (22., 23. ábra).

A bemutatott példák talán már eléggé érzékeltetik, milyen fontos a szerkezetek formálása az erőjáték alakulásának szempontjából. A szerkezetek alkalmazkodnak az általunk felvett formához – de csak bizonyos határig. Ez a határ a statikai egyensúly

kialakulásának lehetősége, amelyet viszont a külső erők és az anyagminőség szabnak meg. E határon belül a szerkezetformálás elvileg önkényes lehet, természetesen felesleges anyagi áldozatok, a biztonság csökkenése, sőt az építészeti kifejezőerő vesztesége árán. Ha pl. a vízszintes térelhatárolást, a hajlított szerkezetet erőltetjük az íves, nyomott vagy húzott szerkezet helyett olyankor, amikor ez már a lehetőségek határát súrolja, nagy anyagfelhasználás árán igen vastag, nyomasztó hatást érünk el, amely az épület esztétikai értékét is rontja. (Közben a szerkezet – szándékunk ellenére – a lehetőséghez képest kedvezőbb erőjátékot valósít meg, a nagy igénybevétel miatt szükséges magas gerendában pl. az említett módon ívtartóhoz hasonló erőjáték alakul ki.) A szerkezet formálásában tehát célszerű az objektív tényezőkre – az építési feladatra és ennek kedvező megvalósítására – figyelemmel lenni, mert ez a jó szerkezet és a jó épület alapfeltétele.

Az elmondottakból láthatjuk, milyen szoros kapcsolatban áll a szerkezettervezés az építőművészzel, és nem túlzás a szerkezettervezés művészetéről sem beszélni. Magának a szerkezetnek a megválasztása – amely a határeseteket leszámítva gondos mérlegelés, de a feladatok bonyolultságát tekintve nem kis részben intuíció eredménye – nemcsak az erőjátékot, annak kedvező vagy kedvezőtlen voltát határozza meg, hanem a szerkezet jellemző formái következtében az épület megjelenését is erősen, sokszor alapvetően befolyásolja.

A FORMA HATÁSA AZ ÉPÍTÉSTECHNOLÓGIÁRA

Már említettük, hogy a technológia szerepe régebben szinte észrevehetetlen volt, a hagyományos technológiák az építészet, az építés természetes feltételeinek látszóttak. Ugyanígy ritkán gondolunk arra, hogy a formai elképzelés is hatott és hat az építés módjára. Nem közömbös már az sem, hogy szabályos kőfal, vagy vakolt homlokzat az igény. A látható kőszerkezetek, mint már említettük, igen sokszor azért készültek, mert a kő az állandóság, az ünnepélyesség a monumentalitás egyik hatásos kifejező eszköze. Így a kőfaragótechnika múltbeli csodálatos virágzása nagyrészt formai igényből eredt – gondoljunk pl. a görög templomok pontosan illesztett kváderköveire és elemekből összeépített oszlopaikra, vagy a középkori bonyolult profilú boltozati bordákra. Az újabb időben vakolt homlokzatokkal utánozták a kőépítészetet. Ha ennek az elképzelésnek a helyessége vitatható is, kétségtelen, hogy hatott a vakolás technológiájára, a vakolatok összetételére, a tagozatok húzásának munkafogásaira stb. De nyilvánvalóan elősegítették a technológia fejlődését az olyan gyakorlati célt nem szolgáló, de igen nehéz feladatok is, mint az egyiptomi obeliszkek felállítása a reneszánsz korban a római Szt. Péter téren. A boltozatépítésre is serkentően hatott az új, érdekes boltozati és térformák keresése. A formai elképzeléshez az építészettörténet folyamán sokszor keresték a megvalósítás lehetőségét, és ha ez csírájában már megvolt, a formai igény hatására az új technológia meg is valósult. Ehhez azonban többnyire olyan tehetségekre volt szükség, mint Brunelleschi, aki meg tudta oldani a firenzei dóm kupolájának falazását és az építéséhez szükséges, reálisan megvalósítható állványzatot.

Korunkban nemcsak a technológia hatása erősödött, hanem a forma hatása is a technológiára. Az épület formai kialakítása nagy mértékben hozzájárul a technológia megválasztásához. Az egyedi formák legtöbbször a hagyományos technológia alkalmazását követelik meg (3. ábra) (más kérdés, hogy az egyedi formákról sokszor

éppen ezért kell lemondani). A modern technológiák is más-más formának felelnek meg. Egy zártabb homlokzatú épülethez a vasbeton nagyelemes előregyártás alkalmas (126. ábra), az egyik irányban nyitott homlokzathoz a térszaluval készített monolit szerkezet (32. ábra), a teljesen megnyitott tömeghez vasbeton váz vagy még könnyedebb hatás esetén az acélváz (22. ábra). Így vitathatatlan, hogy a formai igények hatnak a technológia megválasztására, de sokszor a fejlődésére is. A brutalizmus nyers beton homlokzatai kétségtelenül lendületet adtak a betontechnológia fejlődésének. Ugyanígy az azonos elemekből álló struktúra esztétikai értékének felfedezése bizonyára hatott – ha nem is olyan mértékben, mint a gazdasági és társadalmi tényezők – az előregyártás elterjedésére. Ez az utóbbi jelenség az egyik legjobb példa arra, hogy egyes művészeti gondolatok, irányzatok megelőzhetik az ésszerű megvalósítás lehetőségeit, a forma előbb ölt alakot, mint a megfelelő szerkezet, ill. technológia.



136. ábra

A budapesti Tanácsakadémia (ép.: Töröcsik Sándor, szerk. terv.: Szubi Tamás).
Jól érzékelhető a könnyűszerkezetes technológia formai hatása

UTÓSZÓ

Az előző fejezetekben részletesen áttekintettük a szerkezet és forma kapcsolatát az építészetben. Ha az Olvasónak valahol mégis hiányérzete maradt az elméleti részben, tekintse ezt az úttörés nehézségéből adódó hiánynak. Ezek a fejezetek ugyanis első kísérletnek tekinthetők a kérdés építészeti elméleti vonatkozásainak rendszeres feltárása terén. Az egyes szerkezetek és épületek elemzése pedig a terjedelem adta korlátoktól függetlenül sem lehet teljes. Számtalan tanulságos, talán az idézeteknél is jellemzőbb példát lehetne még felsorolni a szerkezet és forma kapcsolatának jobb megvilágítására.

A könyv elolvasása azonban azt az érzést is kelthette, hogy a szerkezetnek a forma alakulásában és általában az építészetben túlzott jelentőséget tulajdonítottunk. Ezzel kapcsolatban az előszóra és a bevezető fejezetre utalunk vissza, ahol hangsúlyoztuk, hogy a szerkezet az építészetnek csak egyik – bár nélkülözhetetlen és lényeges – eleme. Ha a vizsgálatot ebből a szempontból végezzük, mégis bizonyos mértékig óhatatlanul egyoldalúvá válunk. Ezért befejezésül tekintsük át még egyszer a szerkezet és forma kapcsolatát, hogy teljesen reálisan és világosan lássuk a szerkezet szerepét az építészetben.

Szerkezet és forma kapcsolata lehet objektív jellegű. Ebben az esetben többé-kevésbé természeti vagy gazdasági törvények határozzák meg a szerkezetet és ezáltal a formát.

Az objektív kapcsolat legjellemzőbb esete a nagyméretű épület vagy építmény, amelynek megoldásában a statikai törvényeknek meghatározó szerepük van (l. a III. fejezetben). A méretek növekedése egyre szűkíti a választható szerkezetek körét, és a választható szerkezet típus alakításában is egyre inkább megköveteli az erőjátéknak legmegfelelőbb formát. Ennek a viszonylag ritka esetnek legjellemzőbb példái a nagy fesztávolságú hidak, amelyek a világ bármely pontján – tervezőjüktől függetlenül – lényegében azonos szerkezetűek és formájúak (l. a III. fejezet ide vonatkozó részét és a 93. ábrát). A magasépítésben egyelőre nem fordulnak elő ilyen nagy nyílások, de ide sorolhatók már a 100 m-nél nagyobb fesztávolságú csarnokok (85., 95. ábra), ahol az erőjátékot figyelmen kívül hagyó formaalakítás gyakorlatilag már megvalósíthatatlanná teszi a szerkezetet. Ilyenkor tehát a szerkezet a formát – legalábbis nagy vonalakban – determinálja.

Az említett, ma még legalábbis igen ritka eseteket leszámítva, a szerkezet nem határozza meg egyértelműen a formát. A statikai törvényeknek, az egyensúly abszolút követelményeinek többféle szerkezetípussal és azoknak is többféle részletmegoldásával lehet eleget tenni. E megoldások azonban szerkezeti szempontból nem mind egyenértékűek. A szokásos nagyobb fesztávolságoknál (nagyágrendileg 10 és 100 m között) sem közömbös, hogy a választott szerkezet erőjátéka kedvező-e, vagy formai igény miatt, bár megvalósítható, de statikai szempontból hátrányos. Itt egy másik objektív törvény, a gazdaságosság lép előtérbe. Nem mindegy, hogy a kitűzött célt milyen úton érjük el, az építési feladat kielégítését milyen áron valósítjuk meg. Nem helyes természetesen az egyoldalú gazdasági szemlélet sem, sőt kifejezetten hibás, ha csupán a szerkezet és nem az egész épület gazdaságosságát tartja szem előtt. Viszont kétségtelenül helytelen a társadalom mindig korlátozott erőforrásait indokolatlanul pazarolni. Itt látszólag ellentmondás van a művészi igény és a mind nagyobb tömegű építési feladat kielégítése között. Az építési feladatok sokasodása miatt egyre kevesebb lehetőség van – a különleges, reprezentatív épületeket kivéve – öncélú építőművészetre. Az ellentmondás azonban csak látszólagos, mert a művészet elsősorban nem anyagi kérdés, hanem egy eszme magas fokú kifejezése, amely az építőművészetben az építési feladat maradéktalan megvalósítása útján nyilvánul meg. Így a valódi, nem önkényes művészi forma „ingyen” adódik, sőt az építési feladat tökéletes kielégítése, az építészeti gondolat megvalósítása útján a gazdaságosság követelményének is eleget tehet. Ennek az elvnek illusztrálására számtalan példát sorolhatnánk fel, zömében ilyeneket láttunk a III. és a IV. fejezetben.

Az igazi építőművészet az objektív feltételek és követelmények optimális kielégítése útján természetesen bontakoztatja ki az épület magasrendű esztétikai értékeit.

Az objektív törvények szerkezetre és formára gyakorolt hatásának vizsgálatánál még egy érdekes jelenségre kell utalnunk: a történelem során változott a statikai és a gazdasági törvények szerepe. Korábban a statikai ismeretek és a megfelelő anyagok hiánya miatt a statikai törvények sokkal meghatározóbbak voltak. Eleinte pl. csak az egyszerű gerendát ismerték, és csak néhány méteres fesztávolságot tudtak áthidalni. Később boltozattal már nagyobb teret is le tudtak fedni, de ezekkel is csak kivételesen voltak képesek a 40 m-t túlhaladni. A hagyományos szerkezetek jelentős formai hatását láttuk a II. és III. fejezetben. Viszont a gazdasági tényezők társadalmi okok miatt, a sokkal fejletlenebb termelési módszerek ellenére is, kevésbé voltak kényszerítőek. Az építészet művészi igényű alkotásai ugyanis csak kevesek – korábban szinte kizárólag az uralkodók, majd később is csak a kiváltságosak szűk köre – számára épültek, akik megengedhették a ma feleslegesnek ítélt fényűzést is. Ennek talán a legjellemzőbb példája a piramis, amelynek építése legfeljebb technológiai problémákat vetett fel (amely még a mai fejlett építőiparnak is óriási feladatot jelentene), de a hatalmas anyagi ráfordítással egyetlen ember, a fáraó dicsőségét szolgálta.

Mai építészetünk problémáira visszatérve, az objektív (statikai és gazdasági) törvények hatásának rövid összefoglalása után nézzük meg röviden, milyen szubjektív tényezők hatnak a szerkezet és forma kapcsolatára. A szerkezet esztétikai értékei ugyanis az építészeti forma alkotóelemeivé válhatnak. Szélsőséges esetben az épület azonos a szerkezettel (103. ábra), máskor – már sokkal gyakrabban – a szerkezet egyben az épület leglényegesebb formai eleme (86., 89. ábra). Ilyenkor nyilvánvaló, hogy az épület esztétikai értékét a szerkezet megválasztása és részleteinek jó kidolgozása nagyrészt meghatározza. Más, bonyolultabb esetben is lehetséges a szerkezet esztétikai értékének közvetlen felhasználása, de gyakori az építészeti kompozícióba

való integrálása is. Az előbbi legjellemzőbb példája, mint már említettük, a gótikus boltozatok és támaszok rendszere, az utóbbi a reneszánsz térkapcsolatoknak a boltozati oldalnyomás feltételét szinte észrevétlenül biztosító megoldása. A mai építészetben is megfigyelhető ez a két irányzat (pl. 119., és 121. ábra).

A szerkezeti formák megmutatása nem abszolút követelmény, sőt sokszor erőltetett is. Ilyen esetben pusztán formai igényből drága, sokszor az erőjátéknak sem megfelelő szerkezetek adódnak (18. ábra). Ez is mutatja, hogy nem szerkezet és forma kapcsolata a cél, hanem az építési feladat megoldása, amely többek közt a szerkezet és forma egysége útján valósul meg.

Szerkezet és forma ideális kapcsolata azonban nem oldható meg gyakorlati szabállyal, „recepttel”. Az alapfeltevés ugyanis, – hogy az igazán jó épület az összes (funkcionális, szerkezeti, esztétikai stb.) szempont optimális kielégítése által valósul meg, és ezek végső soron nem mondhatnak ellent egymásnak – egyelőre nem bizonyítható, csupán intuitív meglátás, amelyet azonban az építészetelmélet és a tapasztalat is valószínűsít. E vélemény alátámasztására Nervi szavait idézhetjük: „A jó szerkezet sajátosság esztétikai erejébe vetett hitem sohasem ingott meg. Sohasem találtam még jó épületet, akár régit, akár újat, amely eltávolodott volna ettől az elvtől. Állítom, hogy a részleteiben és általános megjelenésében jól kidolgozott szerkezeti rendszer a jó épület lényegéhez tartozik.”²²⁴⁾ Láthatjuk, hogy Nervi is hitről, vagyis logikai, tudományos módszerrel nem bizonyítható meggyőződésről beszél. A szerkezet és forma kapcsolatának általános törvényeit még nem ismerjük, ez azonban nem akadályozhat meg abban, hogy a szerkezetek építészeti hatását, értékét számba vegyük. Biztosan állíthatjuk, hogy amíg az építész legalább intuitív módon nem érzi az anyagokban rejlő lehetőségeket, a szerkezetre ható és annak ellenálló erőket, és nem ismeri az épület megvalósításának, az építéstechnológiának jelentőségét, nem remélheti, hogy tér- és tömegalkotási koncepcióját, a nagy építészet alapját a gyakorlatban is megvalósíthatja.

Természetesen a szerkezettervező sem állhat hivatása magaslatán, ha szakbarbárként bezárkózik az elvont számítások világába és nem veszi észre a szerkezetnek a valósággal és különösen az építészettel való elválaszthatatlan, szerves kapcsolatát.

Talán akkor valósul meg az igazi, ellentmondásoktól mentes építészet, ha majd az építészek és a szerkezettervezők őszintén tudnak Nervi szavaival szerényen dicsekedni: „Ha szakterületemen valamit alkotni tudtam, elsősorban annak köszönhetem, hogy mint tervező, mérnök és kivitelező mindig szoros kapcsolatban maradtam a valósággal.”²²⁵⁾

JEGYZETEK

- 1) Idézi Marinescu, C.: Hagymány és újítás az építészetben. Magyarra fordítása: Betekintés korunk építőművészetébe. Szerk.: Balogh Ferenc, Bukarest, Kritérion, 1975. p. 138.
- 2) Bonta János: Ludwig Mies van der Rohe. Bp. Akadémiai Kiadó, 1978. p. 18–19.
- 3) Platz, G. A.: Die Baukunst der neuesten Zeit. Berlin, Propyläen Verlag, 1927. p. 92.
- 3a) Ilyen értelemben lehet pozitív hatásuk a szerkezet szerepét tagadó irányzatoknak is a túlzott, egyoldalú technikai szemlélet ellenhatásaként.
- 4) Az iparművészet összes ágával kapcsolatot jelent, hogy ezek az építészethez hasonlóan gyakorlati célt is szolgálnak. De ha az építészetet, mint térbeli művészetet tekintjük, már csak az iparművészet egyes ágaival – pl. a kerámiával, a vasművességgel – mutat közeli rokonságot. – Szokás az építészetet a zenével is kapcsolatba hozni: „az építészet megfagyott muzsika”. E megállapítás lényege arra vonatkozik, hogy ez a két művészet valóban hasonló egymáshoz olyan tekintetben, hogy mindkettő formanyelve lényegét tekintve absztrakt. (Az újabb esztétikai terminológia szerint az építészet és a zene ún. nem-mimetikus művészet, vagyis művészi kifejezőmódja nem tükrözi közvetlenül a külső valóságot.)
- 5) A Keopsz-piramis térfogatának mindössze kb. egy ezredrészét teszik ki a belső terek.
- 6) Jellegzetes absztrakt épületszobor volt az 1962-i Velencei Biennale USA-pavilonja. Az „épület” három helyisége közül a középső, bejárati rész rendetlenül szétdobált, natúr fából készült, felismerhetetlen tárgyakkal volt berendezve, a bal felé nyíló helyiségben komor sötétség honolt, mindenfelé gyászos drapériák és feketére festett tárgyak sejlettek föl, míg a jobb oldali teremben rend és világosság fogadta a belépőt. Az egész pavilon tehát egy „belsőépítészeti szobor” volt (külseje jelentéktelen), amely nyilvánvalóan korunkat és a jövő lehetőségeit szimbolizálta. Természetesen ennek a műnek is voltak tartószerkezetei, annak ellenére, hogy nem nevezhető a szó szoros értelmében épületnek.
- 7) „A művészet tudomány nélkül semmit sem ér” – idézi Norberg-Schulz i. m. p. 202.
- 8) Vasari, G.: A legkiválóbb festők, szobrászok és építészek élete. Válogatta Vayer Lajos, ford. Zsámboki Zoltán. Bp. Magyar Helikon, 1973. p. 201–238.
- 9) Vö.: Bowyer i. m. p. 2.
- 10) Vö.: Bonta i. m. p. 7.
- 11) Wagner, O.: Moderne Architektur. Wien, Schroll, 1896. p. 57.
- 12) Pogány i. m. 1962.
- 13) Az építészeti tartalom és forma kérdését l. Major i. m. 1967. és Pogány i. m. 1962., 1964., 1965., 1974.
- 14) Az esztétikai művek építészeti vonatkozásainak jellemzésére idézzük a múlt századból Schopenhauert: „... amennyiben (az építészet) képzőművészet, már a görög időkben lényegében beteljesedett és lezárult... (az építészet) egyetlen állandó témája a támasz és a teher...” (Schopenhauer, A.: Die Welt als Wille und Vorstellung. Leipzig, 1873. p. 474., 468.). De mostohán kezelik az építészet kérdéseit a legújabb esztétikai munkák is. Jellemző pl. hogy a Marxista-leninista esztétika (szerk.: Kis Tamás), Bp. Kossuth Kiadó, 1973. 708 oldalból alig több, mint 8 oldalt szentel az építészetnek, míg pl. az irodalomról 42 oldal szól.

- 15) Boriszovszkij i. m. p. 29.
- 16) Pogány i. m. 1974.
- 17) Vö.: Major i. m. 1967. p. 69.
- 17a) Le Corbusier: Vers une Architecture. Paris, Cres, 1923.
- 18) Le Corbusier: A jövő nagyvárosai. Bp. Gondolat Kiadó, 1968. p. 29. Ez utóbbi idézettel kapcsolatban azonban meg kell jegyezni, hogy a fő teherhordó szerkezetektől függetlenül homlokzatoknak is van másodlagos – de nagy felületek esetén mégis jelentős – teherhordó szerepük, az üvegfal önsúlyát és a rá ható szélterhet ennek kell fellennie (vö.: 45. ábra).
- 19) Major i. m. 1967. p. 73.
- 20) Muthesius, H.: Die Englische Baukunst der Gegenwart. Leipzig, 1900. Idézi Kubinszky i. m. 1962. I.
- 21) Erdőss i. m. p. 17. Az építészet és az iparművészet viszonyáról l. a Bevezetőt.
- 22) Meg kell különböztetni ezt a konstruktívizmust a képzőművészeti konstruktívizmustól, amely a kép vagy szobor mértani formákból való felépítését jelenti. Ennek is vannak követői az építészetben, de ez az irányzat az előző, formai kiindulású tervezési módszer egyik válfaja.
- 23) Pogány i. m. 1964.
- 24) L. ¹⁾ jegyzet, p. 132.
- 25) Ismeretes, hogy Michelangelo a Dávidot egy elrontott márványtömbből faragta ki.
- 26) A teljesség kedvéért meg kell jegyezni, hogy a teherhordó szerkezet kivételes esetekben energia is lehet, pl. légnymás, mágneses tér stb.
- 27) Idézi Pevsner i. m. 1977. p. 22.
- 27a) Hasonlatunk természetesen csak a fő tendenciákra érvényes. Egy-egy rövidebb-hosszabb ideig tartó irányzat (pl. a késői gótika, vagy a modern brutalizmus) ellentétes jellegű is lehet.
- 28) Idézi Uniack i. m. p. 81.
- 29) Idézi Pevsner i. m. 1968. p. 16.
- 30) Posener i. m. p. 42.
- 31) Boriszovszkij i. m. p. 139.
- 32) Wright i. m. p. 121.
- 33) Raafat i. m. p. 24., Journal of the American Concrete Institute. N° 9. (1977), N° 9. (1978).
- 34) Pevsner i. m. 1977. p. 179.
- 35) Kathy Imre: Medgyasszay István. Bp. Akadémiai Kiadó, 1979. p. 31.
- 36) Wright i. m. p. 128.
- 37) Wright i. m. p. 118.
- 38) Idézi Uniack i. m. p. 120.
- 39) Idézi Drew i. m. p. 22.
- 40) Barát Béla: Szerkezet és forma Délfranciaország román építészetében. Bp. Franklin, 1914. p. 17.
- 41) Reimann i. m. p. 92–101.
- 42) Vö.: Siegel i. m. p. 75.
- 43) Más a húzott szerkezetek esete, ahol az erőjáték a formát automatikusan kialakíthatja.
- 44) Alberti, L. B.: Zehn Bücher über die Baukunst. Leipzig, Heller, 1912. p. 396.
- 45) Peschken, G.: Technologische Ästhetik in Schinkels Architektur. TU Berlin-Charlottenburg, 1968. p. 5–6. (Disszertáció.)
- 46) Ungewitter i. m.
- 47) Pogány i. m. 1962.
- 48) Michelis i. m. p. 185.
- 49) Vö.: Pogány i. m. 1962.
- 50) Idézi Pevsner i. m. 1977. p. 182.
- 51) Leonhardt, F.: Vorlesungen über Massivbau. III. Teil. 3. Ausg. Berlin, Springer Verlag, 1977. p. 1.
- 52) Bill i. m. p. 8.
- 53) Idézi Ragon i. m. p. 52.
- 54) Vö.: Nervi i. m. 1966.
- 55) Idézi Pevsner i. m. 1977. p. 133.
- 56) A korai előregyártásról bővebben l. a III. fejezetben, a 164. oldalon.
- 57) Vö.: Wachsmann i. m.
- 58) Pevsner i. m. 1977. p. 30.
- 59) Pogány i. m. 1974.
- 60) Major i. m. 1972.
- 61) Vö.: Boriszovszkij i. m.

- 111) Meg kell említeni, hogy a gerendatartó tárgyalásánál nem térünk ki a magas tartók esetére ($\delta = d/l \geq 0,2$), amely a faltartók problémájához vezet. Ezeknek vizsgálata azonban pusztán elméleti jelentőségű lenne, mivel nagy feszítávok áthidalására a faltartók gyakorlatilag nem jöhetnek szóba.
- 112) Stüssi i. m.
- 113) A stabilitási és alakváltozási kérdéseket – pontosabb vizsgálat esetén – minden szerkezetnél figyelembe kell venni. A héjszerkezetnél azonban még első közelítésben sem hagyható el, mint a nyomott szerkezeteknél általában.
- 114) Csonka, P.: The Buckling of a Spheroidal Shell Curved in two Directions. Acta Technika, Tom. XIV. fasc. 3-4. Bp. 1956.
- 115) Szabó i. m.
- 116) Stüssi i. m.
- 116a) Der Stahlbau Nr. 5. (1965). p. 129-134. A következőkben azért szorzunk az 1,2 átlagos biztonsági tényezővel, mert a méretezést a biztonságot magában foglaló megengedett feszültséggel végezték.
- 117) Nervi i. m. 1961-62.
- 118) Engel i. m.
- 119) Pelikán i. m. 1968. I.
- 120) Tekintettel arra, hogy itt elvi megoldásról van szó, σ lehet megengedett vagy határfeszültség, sőt a K (ill., a κ) is különféle képpen értelmezhető, a gerendák határfeszítávolságánál elmondottak szerint.
- 121) Pl. egy 30×40 cm méretű, B200 minőségű betonból készült vasbeton gerenda határnyomatéka minimális vasalással ($\mu = 0,2\%$) 25,5 kNm,
a keresztmetszet gazdaságos kihasználása esetén ($\xi = 0,4$) 124 kNm,
maximális húzott és nyomott vasalással 313 kNm.
- 122) Michaels i. m. p. 164.
- 123) Acier-Stahl-Steel. Nr. 4. (1971). p. 166-168.
- 124) Finch i. m. p. 114.
- 125) Finch i. m. p. 270-273.
- 126) Császár László: Korai vas és vasbeton építészetünk. Bp. Műszaki Kiadó, 1978. p. 19.
- 127) Bill i. m. p. 159.
- 127a) A szerkezet előnye, hogy a főnyomatékok irányában nincs csavaró nyomaték, ami a hajlítónyomatéknál sokkal hátrányosabb igénybevétel.
- 128) A lemez és a tartórács lényegi hasonlóságára mutat, hogy a lemezek közelítőleg tartórácsként számíthatók, és viszont, a tartórácsok egyik közelítő számítási módja pedig a lemezek elméletét veszi alapul. Ugyanez vonatkozik a lemez és a később tárgyalt térbeli rácsostartó esetére is.
- 129) A térbeli rácsostartó bizonyos szempontból hátrányosabb a csavarási szilárdsággal rendelkező tömör lemeznél, amely a csavarást általában másodlagos hatásként képes felvenni, erre a célra külön beépített anyag nélkül, míg a rácsostartót a csavaró hatásból származó igénybevételre méretezni kell. A térbeli rácsostartó a nagy szerkezeti magasság, az ennek ellenére igen kis önsúly és az egyes rudak kedvező központos igénybevétele miatt nagyobb feszítávolságoknál mégis egyértelműen gazdaságosabb.
- 130) H. U. Grubenmann működéséről I. Zollna i. m.
- 131) A lapos ív veszélyét egyszerű példával, az erőjének lényegét tekintve ívként működő, két egyenes rüdből álló háromcsuklós acéltartóval érzékeltethetjük. A $b/l = 0,25$ arány esetén a felvett kezdeti 10 kN/cm^2 feszültség a rudak összenyomódása és az ív ebből következő laposabbá válása miatt kb. 3%-kal növekszik, vagyis elhanyagolható. Az oldalnyomás még sokkal kisebb mértékben, kb. 3%-kal növekszik. Ha viszont $b/l = 0,025$ (tehát pl. egy 10 m feszítávolságú ív magassága csak 25 cm), a 10 kN/cm^2 (nem túlzottan nagy) kezdeti feszültség növekedése már kb. 60%, az oldalnyomásé 55%. Még kedvezőtlenebb arányok, vagy nagyobb kezdeti feszültség esetén nyilvánvalóan tönkremegy a szerkezet a túlzottan igénybe vett rudak kihajlása vagy az oldalnyomás növekedése által okozott támaszmozdulás, sőt esetleg a szerkezet ún. átpattanása miatt (ez utóbbi akkor következik be, ha az ív összenyomódása olyan mértékű, hogy hossza már nem több a két támasz távolságánál).
- 132) Stüssi i. m. p. 18-20.
- 133) Bill i. m. p. 28.
- 134) Der Stahlbau. Nr. 1. (1964). Civil Engineering ASCE. Nr. 10. (1965)., Nr. 1. (1967). Az ívszerkezet további, a formát csak közvetve befolyásoló adatai: a keresztmetszet kettős falú, ezek

- távolsága egymástól 91 cm, a külső, rozsdamentes acél fal 0,636 cm, a belső fal 0,953 cm vastag, a két fal köze 60 m magasságig betonnal van kitöltve; a felhasznált acél mennyisége 4652 t. A szerkezet olyan merev, hogy felső pontjának kilengése a legnagyobb szélvihárban sem haladja meg az 50 cm-t.
- 135) Finch i. m. p. 291.
- 136) Бетон и Железобетон 4. (1979). 17-19.
- 137) Bauplanung-Bautechnik. Nr. 11. (1969). p. 537-540.
- 138) Bauingenieur. Nr. 2. (1978). p. 264.
- 139) Hess i. m. p. 85.
- 140) Badr i. m. p. 4.
- 141) Sottriffer, K.: Die verlorene Einheit – Haus und Landschaft zwischen Alpen und Adria. Stuttgart, Hatje, 1975. p. 43.
- 142) Badr i. m. p. 5.
- 143) Fletcher, Sir B.: A History of Architecture on the Comparative Method. 17. ed. University of London, Athlone Press, 1961. p. 527.
- 144) Nincs akadálya az anyag szilárdságát is figyelembe vevő számításnak sem, ennek eredménye is hasonló görbe, de a végtelen feszítávolság így természetesen már elvileg sem érhető el. Vö.: Gilyén i. m. 1964. I. p. 479-480.
- 145) Rupp i. m. p. 17.
- 146) Durm, J.: Handbuch der Architektur II. Teil 2. Bd. – Die Baukunst der Etrusker, die Baukunst der Römer. 3. Ausg. Leipzig, Kröner, 1910. p. 278.
- 147) A gömbhéj metszeterőinek számítását I. pl. Pelikán József: Tartószerkezetek. 3. kiad. Bp. Tankönyvkiadó, 1966.
- 148) Gilyén i. m. 1964. I.
- 148a) A héjszerkezet húzó- és hajlítószilárdsággal rendelkező anyagból készített vékony boltozat.
- 149) Cent ans de béton armé. Szerk.: L. Scrépel Paris, Science & Industrie 1949.
- 150) Jamot, P.: A.-G. Perret et l'architecture du béton armé. Paris-Bruxelles, Vanoest, 1927. p. 8.
- 151) Raafat i. m. p. 79.
- 152) L. a¹⁵⁰⁾ jegyzetet p. 46-57.
- 153) Günschel, G.: Grosse Konstrukteure I. Berlin, Ullstein, 1966. p. 163-166.
- 154) Ez látszólag ellentmond a szerkezetek mérete és igénybevétele közötti összefüggésnek, amely szerint a nagy méretű szerkezetek kevésbé lehetnek karcsúak. Lényeges különbség azonban, hogy a tojásra esetenként koncentrált erők is hatnak, amelyeknek a vékony héjszerkezet nehezen áll ellen, míg egy nagy épület esetében ilyen kedvezőtlen igénybevétellel nem kell számolni.
- 154a) Günschel, G.: Grosse Konstrukteure I. Berlin, Ullstein, 1966. p. 167.
- 155) Badr i. m. p. 150.
- 156) Joedicke i. m. 1962. p. 68.
- 157) Joedicke i. m. 1962. p. 49-51.
- 158) Joedicke i. m. 1962. p. 66.
- 159) Schweizerische Bauzeitung. Nr. 51. (1954).
- 160) L'architecture d'aujourd'hui. N° 64. p. 54.
- 161) Nervi, P. L.: Neue Strukturen. Stuttgart, Hatje, 1963. p. 32-39.
- 161a) Boriszovszkij i. m. p. 139-140.
- 162) Архитектура СССР 2. (1979). p. 6-8.
- 163) Der Stahlbau. Nr. 3. (1973). p. 71-77.
- 164) Acier-Stahl-Steel. Nr. 9. (1970). p. 365-369.
- 164a) A hiperbolikus paraboloid felület legegyszerűbben egy paralelogramma egyik csúcsának felemelésével állítható elő. Az így kialakuló felületnek két irányban egyenes alkotói vannak.
- 165) Pelikán József: Tartószerkezetek. 3. kiad. Bp. Tankönyvkiadó, 1966.
- 166) Siegel i. m. p. 264.
- 167) Borchardt, H.: Freie Formen – gebunden durch Einheit der Form. Baumeister. Nr. 8. (1964). p. 868-874.
- 168) Finch i. m. p. 279-280.
- 169) Civil Engineering ASCE. No. 10. (1965). A tönkremenetel oka itt és a hasonló katasztrófáknál is az volt, hogy a szellőkések üteme a szerkezet önrezgésszámával megegyezett, így rezonancia keletkezett.
- 170) Fogarasi István: Építési tapasztalatok a közép-angliai Humber függőhídnál. Mélyépítéstudományi Szemle 1980. 11. sz. p. 515-519.

- 171) Acier-Stahl-Steel. Nr. 11. (1974). p. 456.
- 172) Der Stahlbau. Nr. 7. (1964). p. 220–222.
- 173) Der Stahlbau. Nr. 3. (1966).
- 174) Drew i. m.
- 175) A sátozserkezetek nagyvonalúságához még nem sikerült megtalálni a részletek hasonló színvonalú megoldását. Ez az ellentmondás nemcsak formai problémákat vet fel, hanem szerkezeti hibákban is jelentkezik (pl. beázások). Az ok valószínűleg elsősorban abban rejlik, hogy a teljesen új elveken alapuló húzott szerkezetekhez a hagyományos, hosszú tapasztalatokkal kiérlelt épületszerkezeti megoldások nem használhatók, az új módszerek kialakulásához pedig még nem volt elegendő idő.
- 176) Лебедев, Ю. С.: Конструкция и архитектурная форма в русском зодчестве XIX-начала XX. вв. Москва 1977. 7. ábra
- 177) A két irányú görbület a könnyű húzott szerkezet stabilitásának elengedhetetlen feltétele. A Raleigh-i sportcsarnokot még kellő tapasztalatok és a pontosabb számítási módszerek ismerete nélkül tervezték, így az építkezés közben derült csak ki, hogy a felület egyes részei mindkét irányban homorúak. A tető itt lengésbe is jött, amit a belső térbe utólag elhelyezett ferde feszítő kábelekkel kellett megszüntetni.
- 178) Siegel i. m. p. 277–279.
- 179) Der Bauingenieur. Nr. 6. (1958).
- 180) Acier-Stahl-Steel. Nr. 2. (1958).
- 181) Bauplanung-Bautechnik. Nr. 4. (1971). p. 177–180.
- 182) A ballonépületek történeti, szerkezeti és légtechnikai ismertetését I. Gilyén Nándor: Ballon-épületek. Magyar Építőipar. 10. sz. (1965). p. 597–602.
- 183) Civil Engineering ASCE. No. 11. (1975). p. 82–86.
- 184) Le Corbusier: Précisions sur un état présent de l'architecture et de l'industrie. Paris, Cres, 1930.
- 185) Jellemző az acélszerkezetek könnyűségére, hogy az Eiffel-toronyba beépített 97 000 kN acél tömege alig 4%-kal nagyobb a torony köré írt 300 m magas hengerben levő levegő tömegénél! Ma ugyanezt a feladatot még ennél is sokkal könnyebb szerkezettel lehetne megoldani.
- 186) Kirby, R. S.–Withington, S.–Darling, A. B.–Kilgour, F. G.: Engineering in History. New York, McGraw-Hill, 1956. p. 465–466.
- 187) Concrete International. Okt. (1979). p. 17.
- 188) Acier-Stahl-Steel. Nr. 7–8. (1973). p. 308–313.
- 189) Cahiers du CSTB. N° 188. (1978). p. 359.
- 190) Schmiedel, H. P.: Wohnhochhäuser. Berlin, Verlag für Bauwesen, 1967. p. 206–209.
- 191) Tempel, E.: Neue Japanische Architektur. Stuttgart, Hatje, 1969. p. 194.
- 192) Acier-Stahl-Steel. Nr. 10. (1972). p. 418–421.
- 193) Schneider, M.: Hochhäuser mit Hängenden Geschossen. Der Stahlbau. Nr. 3. (1968). p. 89–96.
- 194) Beton- und Stahlbetonbau. Nr. 3. (1967). p. 58–67.
- 195) Acier-Stahl-Steel. Nr. 6. (1973). p. 250–255.
- 196) Der Stahlbau. Nr. 6. (1963). p. 190.
- 197) Bauen + Wohnen. Nr. 6. (1969). p. 218–221.
- 198) Acier-Stahl-Steel. Nr. 7–8. (1975). p. 250–253.
- 199) Baumeister. Nr. 12. (1978). p. 1093.
- 200) Acier-Stahl-Steel. Nr. 6. (1970). p. 273–276.
- 201) Nervi, P. L.: Neue Strukturen. Stuttgart, Hatje, 1963. p. 10–17.
- 202) Der Stahlbau. Nr. 10. (1970). p. 298–305.
- 203) Beton- und Stahlbetonbau. Nr. 4. (1973). p. 92–94.
- 204) Műszaki Tervezés. 2. sz. (1974). p. 7–9.
- 205) Бетон и Железобетон. 5. (1966). 4–7.
- 206) La Technique des Travaux. Jan.–febr. (1976). p. 3–14. A világ legmagasabb építménye mégsem a torontói torony, hanem a varsói 650 m magas acélszerkezetű adótorony, amely azonban kötelekkel van kifeszítve, és építészeti megoldása igénytelen.
- 207) Vö.: I. fejezet 42. old.
- 208) Vö.: II. fejezet 55. old.
- 209) Nervi i. m. 1966.
- 209a) Schueller i. m. p. 50.
- 210) Vö.: Viski Károly: Díszítőművészet. A magyarság néprajza. II. k. 2. kiad. Bp. K. M. Egyetemi Nyomda, é. n. (1941).

- 211) Meyer-Bohe i. m. p. 13.
- 212) Voss i. m. p. 16–17.
- 213) Finch i. m. p. 273.
- 214) Pevsner i. m. 1977. p. 131.
- 215) Wachsmann i. m. p. 14.
- 216) Chadwick, G. F.: The Works of Sir Joseph Paxton. London, Architectural Press. 1961. p. 137–159.
- 217) Voss i. m. p. 17–18.
- 218) Moore, R.: Das Liverpool-System: Grosstafelbauweise 1904. Bauwelt. Nr. 6. (1970). p. 215–217.
- 219) Cowan i. m. p. 141.
- 219a) Mók i. m. p. 252–254.
- 219b) Mók i. m. p. 389–393.
- 220) Szabó G. i. m. Az itt közölt rövid ismertetés csak néhány, a forma és a szilárdsági jellemzők összefüggése szempontjából fontos kérdésre hívja fel a figyelmet, így csak vázlatos és egyoldalú betekintést nyújt a szerző sok anyagvizsgálati eredménnyel is alátámasztott elméletébe. Az elmélet első megfogalmazásának – amelyet azonban a szerző idézett művében lényegesen továbbfejlesztett – részletesebb ismertetése magyar nyelven: Gilyén Nándor: Egy új feszültségelmélet. Mélyépítéstudományi Szemle. 10. sz. (1969). p. 468–471.
- 221) A statikailag határozott szerkezetek erőjátékát a statikai egyensúlyi egyenletek egyértelműen meghatározzák, így ezeknél a forma nem hathat az erőjátékra, legfeljebb az erőjátékot követhetjük a formával, mint az egyenszilárdságú szerkezeteknél láttuk. A statikailag határozatlan szerkezetek egyensúlyi állapota sokféleképpen biztosítható, így ezeknél a forma is az egyik lehetőség az erőjáték módosítására, a statikai egyensúly adta lehetőségeken belül.
- 222) Girkmann, K.: Flächentragwerke. Wien, Springer Verlag, 1946. p. 344–347.
- 223) Der Stahlbau. Nr. 4. (1964). p. 126.
- 223) Baume, M.: The Sydney Opera House Affair. Sydney, Nelson, 1967.
- 224) Nervi i. m. 1957. p. VI.
- 225) Hart i. m. 1961. p. 62.

A következőkben csak a főbb irodalmi forrásokat soroljuk fel, amelyek vagy a szerkezet és forma kapcsolatának elvi kérdéseivel kapcsolódnak, vagy fontos összefoglaló művek. Az egyes épületekre vonatkozó irodalom a jegyzetekben található.

- Albrecht, R.*: Schönheit im Brückenbau – 2000 Jahre Brückenbau. Deutsches Museum – Abhandlungen und Berichte. Nr. 3. (1977).
- Andai Pál*: A technika fejlődése az őskortól az atomkor küszöbéig. Budapest, Akadémiai Kiadó, 1965.
- Badr, I. E. A.*: Vom Gewölbe zum räumlichen Tragwerk. (disszertáció) ETH Zürich, 1962.
- Бартнев, И. А.*: Форма и Конструкция в Архитектуре. Ленинград, Строиздат, 1968.
- Benjamin, B. S.*: Structural Design with Plastics. Polymer Technology Series. New York, 1969.
- Bill, M.*: Robert Maillart. Zürich, Les Ed. d'architecture, 1969.
- Birkeland, H. W.*: The Wisdom of the Structure. ACI Journal. Apr., 105–111. (1978).
- Bollig, H.*: Statische Schäden an Hallenkirchen im Rheinland. Rheinisch-Westfälische TH. Aachen, 1975. (Disszertáció.)
- Bonta János*: Építészet és tömegtermelés. Budapest, Műszaki Könyvkiadó, 1963.
- Borchardt, H.*: Freie Formen – gebunden durch Einheit der Form. Baumeister. Nr. 8. 868–874. (1964).
- Boriszovszkij, G.*: Szépség, ipar, forma. Budapest, Gondolat Kiadó, 1971.
- Bowyer, J.*: History of Building. London, Crosby Lockwood Staples, 1973.
- Braun, H.*: Historical Architecture – The Development of Structure and Design. London, Faber & Faber, 1953.
- Brett, D.*: Structural Structures. The Architect & Building News. Jun., 45–48. (1970).
- Broadbent, G.*: Design in Architecture. London, Wiley, 1973.
- Büttner, O.–Hampe, E.*: Bauwerk–Tragwerk–Tragstruktur 1. Berlin, Verlag für Bauwesen, 1977.
- Candela, F.*: Une seule conscience pour l'oeuvre à créer. L'architecture d'aujourd'hui. N° 99. 6–7. (1962).
- Cassie, W. F.–Napper, J. H.*: Structure in Building. Modern Building Construction Series, vol. 2., 3. ed. London, Architectural Press, 1966.
- Chadwick, G. F.*: The Works of Sir Joseph Paxton. London, Architectural Press, 1961.
- Collins, P.*: Changing Ideas in Modern Architecture, 1750–1950. London, Faber & Faber, 1965.
- Cowan, H. J.*: An Historical Outline of Architectural Science. Amsterdam etc. Elsevier, 1966.
- Dirlewanger, H.–Geisler, E.–Lampugnani, V.*: Erleben weitgespannter Flächentragwerke. DBZ Nr. 7. 969–972. (1978).
- Domke, H.*: Grundlagen konstruktiver Gestaltung. Wiesbaden, Bauverlag, 1972.
- Drew, Ph.*: Forma és szerkezet Frei Ottó alkotásaiban. Budapest, Műszaki Könyvkiadó, 1979.
- Dziewolski, R.*: Optimisation des Structures. Technique & Architecture, N° 294. 60–62. (1973).
- Engel, H.*: Tragsysteme – Structure Systems. Stuttgart, Deutsche Verlags-Anstalt, 1967.
- Erdőss Pál*: Ipari formatervezés. Budapest, 1967.
- Finch, J. K.*: The Story of Engineering. New York, Doubleday, 1960.
- Gatz, K.–Hart, F.*: Stahlkonstruktionen im Hochbau. München, Callway, 1966.
- Gilyén Nándor*: A statika szerepe az építészettörténeti formák kialakulásában. Építés- és Közlekedéstudományi Közlemények. 3–4. sz. 467–494. (1964).
- Gilyén Nándor*: A statikai törvények hatása a modern építészet formáira. Magyar Építőművészet. 4. sz. 54–55. (1964).
- Gilyén Nándor*: Nagy terek lefedésének határai. Építés- és Közlekedéstudományi Közlemények. 2. sz. 285–294. (1965).
- Gilyén Nándor*: Szerkezettervezés és építészet. A Budapesti Műszaki Egyetem Továbbképző Intézete előadássorozatából, 4738. sz. 1970.
- Gloag, J.–Bridgewater, D.*: A History of Cast Iron in Architecture. London, Allen and Unwin, 1948.
- Grötzebach, D.*: Der Wandel der Kriterien bei der Wertung des Zusammenhanges von Konstruktion und Form in den letzten 100 Jahren. TU Berlin, 1965. (Disszertáció.)
- Guidoni, E.*: Architettura primitiva. Venezia, Electa Editrice, 1975.
- Hajnóczy Gyula*: Építészet és imitáció. Építés- és Közlekedéstudományi Közl. 1. sz. 117–127. (1962).
- Hart, F.*: Architektur und Ingenieurbau. München, VDI Verlag, 1961.
- Hart, F.*: Kunst und Technik der Wölbung. München, Callway, 1965.
- Hess, F.*: Konstruktion und Form. Berlin, Henschel Verlag, 1958.
- Hofstadt, H. H.*: Raumeinschliessende Tragwerke. DBZ Nr. 9. 1165–1171. (1977).
- Horváth Sándor*: Vasbeton szerkezetek modellezhetősége. A Budapesti Műszaki Egyetem Továbbképző Intézete előadássorozatából, 4602. sz. 1968.
- Howard, H. S.*: Structure – an Architect's Approach. New York, McGraw-Hill, 1966.
- Huber, B.–Steinegger, J.-C.*: Jean Prouvé – une Architecture par l'industrie. Zürich, Les Editions d'Architecture Artemis, 1971.
- Joedicke, J.*: Modern építészettörténet – a forma, a funkció és a szerkezet szintézise. Budapest, Műszaki Könyvkiadó, 1961.
- Joedicke, J.*: Schalenbau – Konstruktion und Gestaltung. Stuttgart, Krämer, 1962.
- Joedicke, J.*: Moderne Architektur – Strömungen und Tendenzen. Stuttgart, Krämer, 1969.
- Kis Tamás* (szerk.): Marxista-leninista esztétika. Budapest, Kossuth Könyvkiadó, 1973.
- Komendant, A. E.*: Contemporary Concrete Structures. New York, McGraw-Hill, 1972.
- Krüger-Heyden, K.–Trost, P. G.*: Additive Bauweise. DBZ Nr. 3. 315–320. (1976).
- Kubinszky Mihály*: A szecesszió és a századforduló építésze. Építés- és Közlekedéstudományi Közlemények, 4. sz. (1962).
- Kubinszky Mihály*: Szerkezeti vívmányok a 19. század építészetében. Építés- és Közlekedéstudományi Közlemények, 1. sz. 129–156. (1962).
- Лебедев, В. И. (főszerk.)*: Конструкция и архитектурная форма в русском зодчестве XIX-начала XX. вв. Москва, 1977.
- Lecour, J.*: Architektur – Konstruktion und Technologie. DBZ Nr. 10. 1341–1345. (1978).
- Mainstone, R. J.*: Structural Theory and Design. Architecture and Building, No. 5. 186–195. (1959).
- Mainstone, R. J.*: Developments in Structural Form. London, Penguin, 1975.
- Mainstone, R. J.*: Brunelleschi's Dome. Architectural Review, Sept. 157–166. (1977).
- Major Máté*: Építészettörténet. I–III. köt. Budapest, Építésügyi Kiadó, 1954–1960.
- Major Máté*: Az építészet sajtószerűsége. Budapest, Akadémiai Kiadó, 1967.
- Major Máté*: Vannak-e „irányzatok” a mai építészetben? Magyar Tudomány, 5. sz. 278–287. (1972).
- Mann, W.*: Entwerfen Tragender Konstruktionen. DBZ Nr. 10. 1189–1199. (1975).
- Martienssen, H.*: The Shapes of Structure. London, Oxford University Press, 1976.
- Meyer-Bohe, W.*: Vorfertigung. Essen, Vulkan Verlag, 1964.
- Michaels, L.*: Contemporary Structure in Architecture. New York, Reinhold, 1960.
- Michelis, P. A.*: Esthétique de l'architecture du béton armé. Paris, Dunod, 1963.
- Minke, G.*: Zur Effizienz von Tragwerken. Stuttgart, Krämer, 1970.
- Mokk László*: Helyszíni előregyártás. 2. kiadás. Budapest, Műszaki Könyvkiadó, 1961.
- The Works of Pier Luigi Nervi. London, Architectural Press, 1957.
- Nervi, P. L.*: Le mouvement architectural actuel. L'architecture d'aujourd'hui. N° 91–92. 140. (1960).
- Nervi, P. L.*: Vers un style de vérité? Architecture formes + fonctions. N° 8. 45. (1961–62).
- Nervi, P. L.*: Relations entre architectes, ingénieurs et constructeurs. L'architecture d'aujourd'hui. N° 99. 4–5. (1962).
- Nervi, P. L.*: Aesthetics and Technology in Building. London, Oxford University Press, 1966.
- Niels, L.*: Principles of Structural Design. London, 1961.
- Norberg-Schulz, Ch.*: Intentions in Architecture. Oslo, 1963.
- Otto, F.*: Zugbeanspruchte Konstruktionen. Berlin, Ullstein, 1966.
- Otto, F.–Bubner, E.*: Introduction aux principes de la construction légère. Techniques & Architecture, Febr., 29–39. (1973).
- Patzelt, O.*: Wachsen und Bauen – Konstruktionen in Natur und Technik. 2. Ausg. Berlin, Verlag für Bauwesen, 1974.