

ÖNHORDÓ JÁRMŰSZEKRENYEK MÉRETEZÉSI MÓDSZEREI

Prof.Dr.Zobory István

Budapest
2014

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés.....	3
2. Az önhordó járművek szerkezetei	3
2.1 A vontatójárművek esete.....	3
2.2 A vontatott járművek esete.....	3
2.3 Szerelési szempontok	4
3. A szilárdsági számítás módszerei	4
3.1 A terhelőerők számbavétele.....	4
3.2 A járműszerkevény belső erőinek meghatározása.....	5
3.2.1 Számítás gerendaként	6
3.2.2 Bieck számítási módszere.....	6
3.2.3 A keretszerkezet szerint számoló eljárások	7
4. A Vierendeel tartó.....	8
4.1 Egyszerűsített számítások	8
4.2 A klasszikus megoldás	8
4.2.1 Megoldás erőmódszerrel.....	8
4.2.2 A σ -ponti módszer	9
4.2.3 A klasszikus megoldás értékelése	10
4.3 Iterációs módszerek	11
4.3.1 A Cross-módszer és törzstartója	11
4.3.2 A Cross-Morris módszer.....	11
4.3.3 Csonka Pál módszere	13
4.3.4 A Mina-Bognár módszer.....	15
4.3.5 Az iterációs módszerek értékelése.....	16
4.4 A számítástechnika alkalmazása	16
5. A feszültségeloszlás vizsgálata	17
5.1 Gerenda és héjszerkezet	17
5.2 Bordákkal merevített lemezszerkezet	17
5.3 Az erőbevezetés kérdése.....	19
6. A számított és valóságos feszültségek	20
7. Irodalomjegyzék	21

1. BEVEZETÉS

A korszerű vasúti üzemben a továbbítandó utas- és árútömeg növekedésével lehet számolni, ezért ahhoz, hogy azonos mozdonyvonóerővel nagyobb hasznos tömeget lehessen továbbítani, a vasúti járművek - elsősorban a vontatott járművek – tömegét kell csökkenteni. A jármű saját tömegének csökkentése a szilárdságilag ki nem használt szerkezeti részeknek a teherviselésbe való bevonásával lehetséges, miáltal az eddiginél könnyebb rúd szelvényeket lehet alkalmazni. Még egy fontos aspektust kell említeni, amely az önhordó szekrényvázaz járművek bevezetését indokolta, ez pedig a nem kívánt járműütközéseknél (karamboloknál, *crash*-eseményeknél) fellépő ütközőerők hatása. Ismeretes, hogy *crash* esetén a járművek kinetikus energiájának deformációs munkává kell alakulnia. Ez a probléma főként a vasút hőskorában alkalmazott személykocsiknál jelentkezett, a gyenge szekrénytámok és a hozzájuk kapcsolt faoszlopok az ütközéskor kialakuló hatalmas igénybevételt nem tudták törés nélkül felvenni a járművek egymásra torlódásakor. A jelenleg gyártott személykocsik már mind acél vagy alumínium szekrényvázal készülnek. A kutatási és fejlesztési tevékenység több járműgyárnál és intézménynél a kompozit alkalmazhatóságának vizsgálatára és kompozitból készült merevített héjszerkezetű kocsiszekrények kialakítására irányul. Általánosan megállapítható, hogy ha a kocsi lehető legnagyobb részét bevonjuk a teherviselésbe, akkor a kocsiszerkezet könnyebb lesz, és ezzel önsúly okozta szerkezeti igénybevételek csökkennek, valamint az előállítási költségek is csökkenthetőek bizonyulhatnak.

2. AZ ÖNHORDÓ JÁRMŰVEK SZERKEZETEI

2.1 A vontatójárművek esete

A korszerű vontatójárművek nagy hányada is önhordó szekrényvázalal van felszerelve. Ezeknél azonban a tető egyáltalán nem vonható be a teherviselésbe a gépbeemeléshöz szükséges kivágások miatt. Csak a jármű oldalfala vehető igénybe, melyet sokszor rácsos tartóként vagy keretszerkezetként alakítanak ki egymás mellé sorakoztatott zárt tartórészekkel. Sok olyan megoldás is van, hogy tömörgerincű gerendához és rácsos tartót vagy keretszerkezetet kötve alakítanak ki együttdolgozó szerkezetet. A vontatójárművek esetében a vázszerkezetre erősített lemezburkolat merevítő hatását sokszor elhanyagolják a teherbírás megállapításakor.

2.2 A vontatott járművek esete

Általánosan kijelenthető, hogy a vasúti kocsik mindig kiképezhetőek úgy, hogy a kocsiszekrényt vagy az annak megfelelő szerkezeti részt bevon-

juk a teherviselésbe. Klasszikus példa erre a tartálykocsik esete, ahol tulajdonképpen alváz nincs, csak a jelentős másodrendű nyomatékkaal bíró henger veszi fel a terhelést. Nyitott teherkocsiknál is be lehet vonni az oldalfalakat, ezek mint telitartók, vagy sokszor statikailag határozatlan keretek vagy rácsos tartók szerepelhetnek. Nyitható oldalfalú kocsiknál – ha az ajtó fölött kötővasak vannak fixen beépítve – a fal mint függesztőmű csökkenti az alváz igénybevételét. Zárt teherkocsiknál az oldalfalat mint rácsos tartót, vagy mint kerettartót lehet kiképezni. A személykocsik, vagy az azokhoz hasonló járművek (motorkocsik, stb.) szekrényvázai a ráhegesztett lemezburkolattal együtt dolgozva képezik a tartórendszert, ez a merevített héjszerkezet tipikus esete.

2.3 Szerelési szempontok

Az önhordó szekrényvázak általában hegesztéssel (újabbán ragasztással) készülnek, s mint ilyenek, jól diszponált munkaerőt kívánnak. A korszerű járműgyártásban döntő szerepet kap az automata hegesztőeljárás, a hegesztőrobotok alkalmazása. A járműszekrény egyes részei specializált munkahelyeken készíthetők. Az alváztartórács, az oldalfalak és a tető külön-külön készül, és a végén hegesztik össze őket egységes szerkezeté.

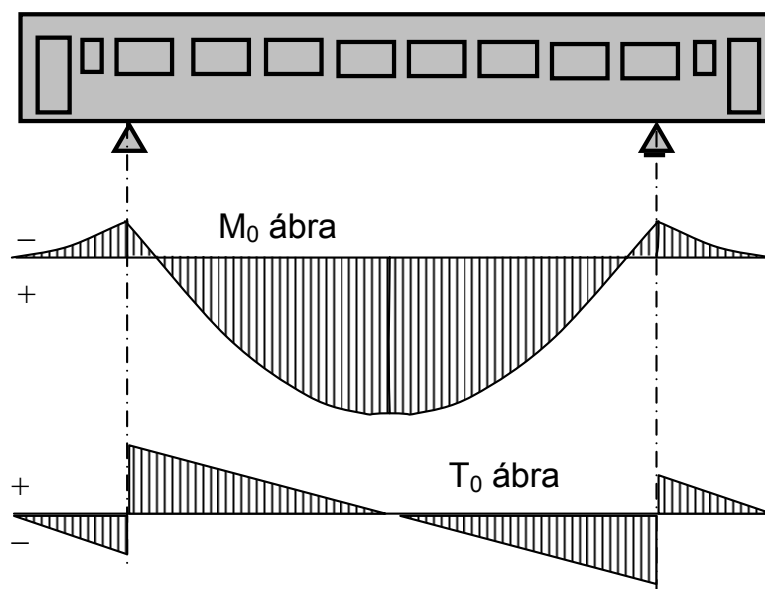
3. A SZILÁRDSÁGI SZÁMÍTÁS MÓDSZEREI

A vasúti járművek önhordó szekrényvázainak méretezési szabályai nagyobb részét kialakultak, az egyes járműgyártó cégek saját eljárásokat alkalmaznak. A szilárdságtan szabályait alkalmazva olyan szerkezeti kialakítások hozhatók létre, amelyben az üzem során kialakuló feszültség-szintek alatta maradnak az anyagkifáradás elkerülésének figyelembe vételével, illetve a lemezmezők horpadási hajlama kiküszöbölésre került. Csupán tájékoztatásul megemlítjük, hogy a megengedett feszültség-szint legtöbbször a 80...100 MPa értéktartományba esik.

3.1 A terhelőerők számbavétele

A szilárdsági számításához szükséges a tartószerkezetre ható erők számbavétele. Meg kell különböztetni a statikus (a jármű álló állapotában kialakuló) és a dinamikus (a futásközben fellépő) terheléseket. A statikus terhelések közé tartozik az önsúlyból adódó és a hasznos terhek súlyából adódó terhelések. Az utóbbi terhelésfajta tovább osztható, egyik része megoszló (nem szükségképp egyenletesen megoszló) terhelés lehet a másik rész pedig koncentrált erőkkel jelenik meg. A dinamikus terhelések egyrészt a jármű gyorsítása, ill. lassítása közben fellépő tömegerőkől, másrészt az üzem közben a vasúti pálya geometriai és merevségi egyenetlen-

ségei által kiváltott függőleges és bólintó lengésekkel kapcsolatos tömeg-erőkből, harmadrészt az ívben haladáskor kialakuló tömeg-erőkből adódnak. Negyedrészt További dinamikus terhelések adódnak a vonóerő és a fékezőerő-változások miatti – a vonat hosszdinamikai viselkedésével összefüggően fellépő – lengésekből adódóan kialakuló erőket, és végül ötöd-
részt a karamboloknál fellépő drasztikus erőhatásokat kell számításunk. A szekrényvázak méretezésekor kiindulásként egy a statikus terheléseket egy dinamikus faktorral felszorozva helyezik rá a tartómodell tengelyábrájára, és ezen terhelésekre határozzák meg az igénybevételi ábrákat, mely ábrák alapján a tervező első áttekintést kap a szerkezet erőjátékáról (lásd az 1. ábra szerinti M_0 hajlítónyomatéki és T_0 nyíróerő ábráját a kocsis hossza mentén egyenletesen megoszlónak tekintett terhelés esetére). Figyelembe véve a kritikus helyek keresztmetszeti jellemzőit első kép adódik a szerkezet teherbíró képessége tekintetében is.



1. ábra A vasúti személykocsiszekrénynek mint kéttámaszú gerendatartónak a függőleges külső terhelésből adódó igénybevételi ábrái

3.2 A jármű-szekrényváz belső erőinek meghatározása

A szekrényváz belső erőinek pontos behatárolása igen bonyolult feladatot jelent. Bizonyos egyszerűsítő feltevésekkel azonban a kialakuló belső erőket közelítő modelleken, numerikus módszerrel határozzák meg. Az ilyen közelítő eljárásokkal méretezett szekrényvázakat azután alapos próbapadi (statikus) feszültségméréseknek, és futópróba keretében végzett (dinamikus) feszültségméréseknek vetik alá. Az ilyen módszeres eljárás végül is összerendelhetővé teszi a közelítő módszerrel számított feszültségeket a mérések során ugyanolyan terhelések mellett adódó feszültségekkel, ami a gyártó műszellemi potenciáljaként biztosítja a továbbiakban tervezendő járművek biz-

tonságos méretezését. Ilyen megvilágításban nem meglepő, hogy az egyes gyártó művek nem publikálják, sőt titokban tartják a méretezési módszereiket.

A következőkben személykocsi szekrényvázat vizsgálunk, mert az ilyen szerkezet bonyolultsága és sokféle ismert vizsgálati módszere folytán magába foglalja a többi jármű-szekrényváz vizsgálati elveit is. A kocsi-szekrény szerkezet sokszorosan belsőleg statikailag határozatlan tartó. Első közelítésben ezt a tényt háttérbe helyezve olyan első tájékozódásra alkalmas módszereket alkalmaznak a gyakorlatban, amelyeknél a számítási munka kevesebb.

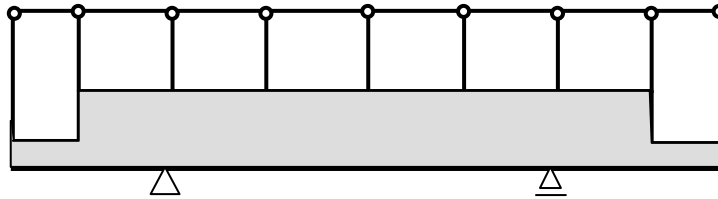
3.2.1. Számítás gerendaként

Ez a módszer a merevített héjszerkezetű kocsitestet egységes gerendának tekinti. Feltételezi a módszer, hogy az alsó és felső öv szabályosan együtt dolgozik, és a terhelés előtt tekintett keresztmetszeti síkok a *Bernoulli-Navier* féle feltevés szerint a terhelés után is síkok maradnak. A hajlításból származó feszültségek meghatározására a módszer a *Navier*-formulát használja. A keresztmetszeteket terhelő nyíróerőket az övinerciák arányában lehet szétosztani. A nyíróerők ilyen felosztás szerinti értékeit ablakmezők középpontjában működőnek véve, az alsó és a felső övet az ablaknyílás félszélességgel egyenlő hosszú konzolokként tekintve meghatározható az alsó és a felső övre vonatkozóan olyan járulékos hajlítófeszültség eloszlás nyerhető melynek szélsőszábeli értékei összegezzelők az egységes gerendamodellre az ablakok szélső pontjaihoz tartozó keresztmetszetekben kialakuló hajlítófeszültségekkel. Ez a számítási mód akkor alkalmazható előnyösen, ha az ablakközi lemezmezők (az oszlopok) elég merevek az övekhez képest. Ezen módszer válfajai a tető keresztmetszetnek a számításba történő figyelembe vétele módjától függően más és más elnevezéssel ismertek a szakirodalomban: csőtartó számítás, magasövű lemeztartó számítás, stb.

3.2.2. Bieck módszere

Ez az eljárás a sokszorosan statikailag határozatlan kocsiszekrény szerkezetet csuklók behelyezésével egyszerűbben számítható modellé transzformálja. *Bieck*-szerint a tető nem vehető igénybe hajlításra, benne csak derékerők (normálerők) ébredhetnek. Ez a közelítő feltételezés azt jelenti, hogy a felső övrudakat egymáshoz és az ablak-oszlopokhoz csuklóval kapcsoltnak tekintjük, mely csuklópontokon nyomaték nem vihető át. (lásd a 2. ábrát). Ebben a modellben n -számú keretmező esetén az n -számú felső övrúdi ismeretlen (statikailag határozatlan) normálerejére vonatkozóan n -számú egyenlet írható fel. A *Bieck*-modell a következőkben ismertetésre kerülő erőmódszerrel könnyen megoldható, a feladat felsőövi ismeretlen normálerőit X_1, X_2, \dots, X_n jelöléssel felvéve és egy

ismeretlen n -dimenziós \mathbf{X} vektorba foglalva, kimutatható hogy az \mathbf{X} vektor eleget tesz egy $\mathbf{AX}=\mathbf{b}$ alakú *lineáris inhomogén egyenletrendszernek*.



2. ábra. A Bieck-féle számítási modell

Ebben \mathbf{A} jelöli a szerkezet méreteitől és anyagától függő négyzetes együttható mátrixot, amely nonszinguláris, \mathbf{b} pedig a szerkezetre ható terhelésektől, a geometriai jellemzőktől és az anyagjellemzőktől függő konstans ugyancsak n -dimenziós vektor. Megjegyezzük, hogy a későbbiekben a \mathbf{b} vektort a terhelési tényezők vektorának fogjuk nevezni. Az \mathbf{A} nonszinguláris tulajdonsága miatt a feladathoz tartozó lineáris inhomogén egyenletrendszer egyértelműen oldható meg a tetőrudakban keletkező X_1, X_2, \dots, X_n ismeretlen normálerőkre.

A *Bieck*-módszer továbbfejlesztését az tette szükségessé, hogy egyre inkább nagyobb hajlítási merevségű tetőkkel rendelkező kocsik méretezését kellett elvégezni. Ilyen kocsikhoz kialakított közelítő modellekben a tetőrész már folytonos, vagy ablakköz közepben csuklós tulajdonsággal jelent meg, ami azt jelenti, hogy a tetőnek - a valóságos esetnek megfelelően - hajlítónyomatékot is fel kell vennie. A most mondott modellek *Erdős* és *Fábry* nevéhez fűződnek.

3.2.3. A keretszerkezet szerint számító eljárások

A szekrényváz, a merevített szekrényhéjázat sarokmerek kiképzésével és nagy oszlopközi kivágásaival keretszerkezetet alkot. Ezen keretszerkezetenél a keretet a felső övrész (a tető), az oszlopok és az alsó öv képezi. Ily módon ahány ablak és ajtókivágás van a szerkezetünkben, annyi zárt keretből áll a képzett síkbeli modellünk. Egy zárt keret – mint ismeretes – háromszorosán statikailag határozatlan, egy keresztmetszet átmetszésében ismeretlen hajlítónyomaték, nyíróerő és normálerő ébred. Ezért a kocsitestet leképező síkbeli modell n -számú zárt keret esetén $3n$ -szeresen statikailag határozatlan, azaz $3n$ -számú statikailag ismeretlen, a szerkezet alakváltozási viszonyaitól függő erőtan jellemzőt, nevezetesen $2n$ -számú belső erőt és n -számú belsőnyomatékot kell meghatározni. Az ilyen módon egymás mellé sorakoztatott keretkből álló szerkezetet *Vierendeel*-tartónak nevezik, tehát a kocsitest tervezőjének ezen *Vierendeel* tartó erőjátékát kell elemezni.

4. A VIERENDEEL TARTÓ

4.1. Egyszerűsített számítások

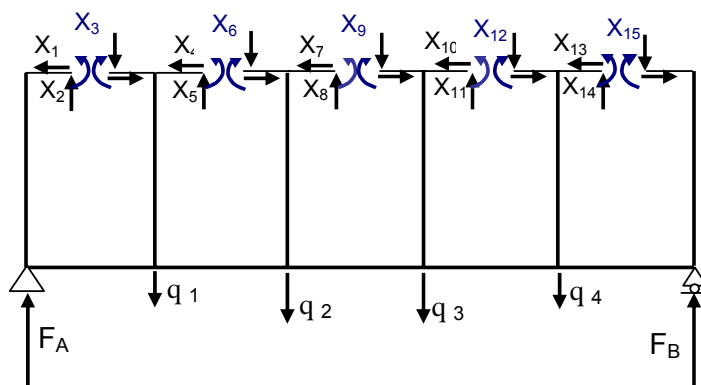
A Vierendeel tartót kinematikai szempontból vizsgálva megállapítható, hogy sarokmerev csomópontjai síkjukban elfordulhatnak és eltolódhatnak. Az ilyen keretszerkezetet eltolható csomópontú vagy kilengő csomópontúnak nevezik. Az általában alkalmazott kéttámaszú *Vierendeel* tartók n -szeresen kilengők, amiből $(n-1)$ kilengés függőleges, 1 pedig vízszintes. Az n -számú keret alkotta *Vierendeel* tartó statikai megoldásához $3n$ alakváltozási egyenletet kell felírni. A jelentős mennyiségű számítási munkát csökkentendő kidolgoztak egyszerűsített módszereket is, amelyek azonban bizonyos esetekben (bizonyos alakú tartók és terhelési esetek esetében) a pontos megoldást is szolgáltatathatják. Első közelítésként minden övrúd és oszlop közepén csuklót helyeznek be. Második közelítésnél az övekbeli csuklókat elhagyják, de az oszlopközépnél lévőt az övmerevségi viszonyoktól függően meghagyják. A második közelítés a szimmetrikus övű tartóra az abszolút deformációk elhanyagolásával pontos megoldást adja. Az ily módon történő számítást „egyszerűsített keretszerkezeti számítás”, illetve *Engesser*-módszer néven ismeretes. A most mondott közelítő módszerek tipikusan „erő módszer” jellegűek, mivel a törzstartó mozgékonyabb az eredeti keretszerkezetnél.

4.2. A klasszikus megoldás

A klasszikus megoldásnál a statikailag határozatlan mennyiségeket az erő módszer keretében $3n$ ismeretlenes lineáris inhomogén egyenletrendszer megoldásával állítják elő.

4.2.1. Megoldás erő módszerrel

A $3n$ -szeresen statikailag határozatlan keretszerkezet törzstartóját az erő módszer keretében a felső övek átmetszésével szokásos felvenni. Minden egyes rúdátmetszésben működtetni kell az ismeretlen X_i metszeterőket a 3. ábra szerint.



3. ábra Öt zárt keret alkotta (15-szörösen belsőleg statikailag határozatlan) Vierendeel tartó törzstartója és metszeterői

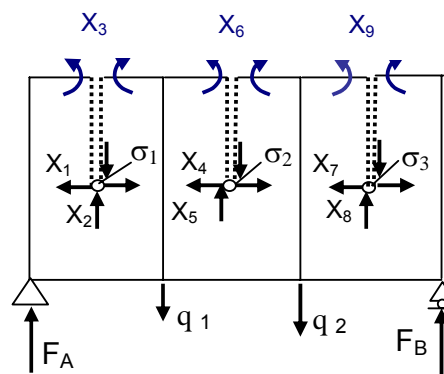
A tartó alakváltozási tényezők – a terhelési és egységtényezők – meghatározása után a csatlakozási feltételi egyenletrendszer felállítása és megoldása következik. Az említett csatlakozási egyenletrendszer alakja a következő:

$$\begin{aligned}
 a_{11}X_1 + a_{12}X_2 + \dots + a_{1m}X_m &= a_{10} \\
 a_{21}X_1 + a_{22}X_2 + \dots + a_{2m}X_m &= a_{20} \\
 \vdots & \\
 a_{m1}X_1 + a_{m2}X_2 + \dots + a_{mm}X_m &= a_{m0}
 \end{aligned}$$

A felírt m -ismeretlenes egyenletrendszer együttható mátrixa m^2 egységtényező, jobboldali vektora pedig m terhelési tényező meghatározását teszi szükségessé. Sok esetben ezen $m(m+1)$ különbözőtényező számát csökkentheti a szerkezet szimmetriája, és a mindig fennálló *Maxwell*-féle egyenlőség, miszerint az egységtényezők esetében minden i, j indexpárra teljesül, hogy: $a_{ij} = a_{ji}$. A lineáris inhomogén csatlakozási egyenletrendszert akár a *Gauss*-féle kiküszöböléses (eliminációs) módszerrel, vagy annak pontosítását szolgáló más direkt módszerrel, illetve valamely iterációs módszerrel oldható meg. A megoldáshoz számítógépi programok használhatók fel. A számításokon egyszerűsíteni lehet a törzstartó speciális felvételével. Jelen tárgyalásunkban csak a leggyakoribb u.n. σ -ponti módszerrel foglalkozunk.

4.2.2. A σ -ponti módszer

Ennél a módszernél a statikailag ismeretlen mennyiségeket (erőket és nyomatékokat) a keretmező rugalmas súlypontjában, a σ -pontban vesszük fel. A σ -pont különleges helyzetű pont, amelyet a keret átmetszett rúdcsonkjaival mereven összekapcsoltnak vesszünk fel. A merev kapcsolatokat a 4. ábra pontvonallal mutatja.



4. ábra A σ -ponti módszer 3 mezős Vierendeel tartó esetén

A σ -ponti módszert befogott vagy zárt ívek és keretek megoldására dolgozták ki. A σ -pontot a szereplő zárt keretekre egymástól függetlenül lehet meghatározni a következő ívhossz-szerinti integrálkifejezések alkalmazásával:

$$y_{\sigma} = \frac{\int y \frac{ds}{IE}}{\int \frac{ds}{IE}}, \quad x_{\sigma} = \frac{\int x \frac{ds}{IE}}{\int \frac{ds}{IE}},$$

Ahol az integrálokat a vonatkozó keretmező minden rúdelemére ki kell terjeszteni. A vasúti kocsiszekrények *Vierendeeel*-tartó modelljeinél megjelenő keretmezők esetén a konjugált irányok – az ismeretlen erők hatásvonalai – a főtehetetlenségi irányokkal esnek egybe. Ha a tartónak van vízszintes merevségi szimmetriatengelye, akkor a csatlakozási feltételi egyenletrendszer két független egyenletcsoportra esik szét: m -számú hosszirányú erőkre felírt, és $2m$ -számú vertikális erőkre és nyomatékokra felírt egyenlet jelenik meg.

A σ -pontbeli erőfelbontás következtében az egységtényezők egy része eleve zérus. A szimetriaviszonyok miatt pedig egy részüknek arányossága áll fenn. Ezek a körülmények az egyenletrendszer megoldását egyszerűsítik. Ha a tartónak nincsen vízszintes szimmetriatengelye, akkor csak közelítő eredményt adhat az a megoldás, amelyik a σ -pontot továbbra is a rugalmas oszlophossz közepének megfelelő magasságban helyezi el. A σ -pont helyét a lágyabb elemek jelentősen befolyásolják. Mivel a korszerű járműszerkezetek ablakközi oszlopai általában jóval lágyabbak (hajlékonyabbak) az öveknél, az oszlopközépi σ -pont elhelyezés által adott közelítés elég jó. A vasúti személykocsik esetében, ahol a tető és az alsó öv másodrendű nyomatékának aránya $1/3 - 1/4$, a σ -pont y koordinátájának eltérése az oszlopféltől legfeljebb 1 - 2 cm.

4.2.3. A klasszikus megoldás értékelése

A klasszikus erőmódszerrel történő megoldás különösen a modern számítástechnika alkalmazásával kivitelezhető. Némileg egyszerűsítheti a számítást a σ -ponti módszer alkalmazása, azonban nehézség jelentkezik, ha a keretek száma nagy és a keretek aszimmetrikusak. Mindazonáltal az erőmódszer teljesen egzakt, és az egységtényezők valamint a terhelési tényezők számítása során mind a hajlító nyomatékok, mind a nyíróerők, mindpedig a derék-

erők hatását primer módon lehet figyelembe venni. A klasszikus megoldáshoz kapcsolódnak a numerikus kivitelezés gyorsítását célzó *iterációs megoldások*, melyek a tiszta numerikus matematikai megfontolásokon kívül célszerű módon a mérnökökhöz közel álló mechanikai elvek teljesülésének ellenőrzését is beiktatják a számítási eljárások konstrukciójába.

4.3 Iterációs módszerek

4.3.1 A Cross-módszer és törzstartója

A keretszerkezetek számítására alkalmazott iterációs módszerek mindegyike a *H. Cross* amerikai professzor által kidolgozott *nyomatékosztási elven* alapszik. A *Cross*-módszer törzstartója statikailag határozatlan és jóval merevebb a valóságosnál. A végleges igénybevételeket a törzstartó igénybevételeiből sorozatos közelítéssel (szukcesszív approximációval) mint részigénybevételek összegét állítja elő. A *Cross*-módszer törzstartója a két végén befogott gerenda. A vizsgált keretszerkezet minden rúdját tehát képzeletben előzetesen befogási kényszerrel rögzíteni kell. A terhelés alatt a törzstartóban kialakuló befogási nyomatékokat a szilárdságtan valamelyik módszerével, pl. a *Castigliano*-tétellel, a rugalmas szál egyenletével, stb. *Cross* maga az „analog oszlop” módszert használta a kezdeti befogási nyomaték meghatározására. Ez utóbbi módszer tökéletes analógiát mutat ki és használ fel a két végén befogott tartó nyomatékainak alakulása és a külpontosan nyomott oszlop keresztmetszetében ébredő feszültségeloszlása között. Míg *Mohr* a nyomatéki ábrát redukálta $1/(IE)$ -vel, addig az oszlop analógiánál a tartót redukáljuk $1/(IE)$ szélességűre, és az így kapott oszlopkeresztmetszetet terheljük a törzstartó (kéttámaszú tartó) nyomatékaival, mint fajlagos felületi terheléssel. Az ilyen módon nyomásra és hajlításra terhelt oszlop feszültségei a szélső szálakban a keresett befogási nyomatékokat szolgáltatják. *Cross* eredeti módszere az el nem tolódó csomópontú keretszerkezetek megoldására alkalmas. A vizsgálatunk tárgyát képező vasúti kocsiszekrény *Vierendeel*-tartóval felvett keretmodellje nem ilyen, azonban a nyomatékosztási módszer és az iteráció a kiindulás módosítása után most alkalmazhatónak bizonyul. Az eltolódó csomópontú keretek megoldására alkalmas módszer lényegét következőkben összegezzük.

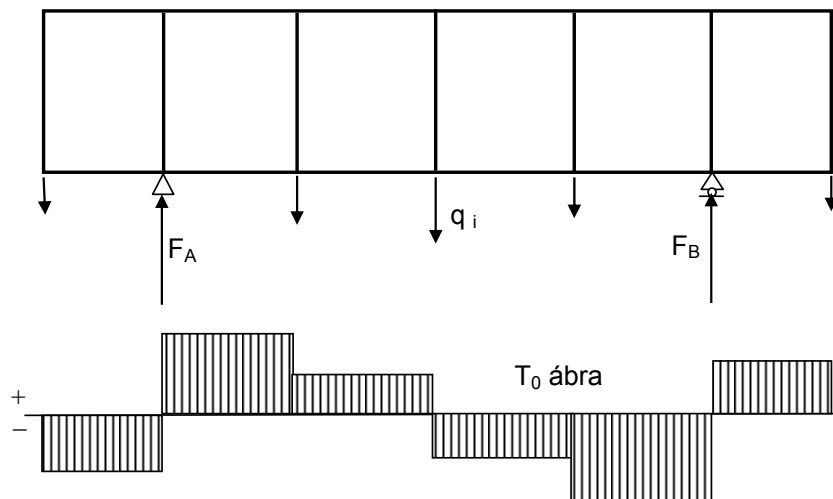
4.3.2 A Cross-Morris módszer

Az eltolódó csomópontú keretszerkezet l távolságban lévő két csomópontjának párhuzamos relatív eltolódása legyen Δ cm. Ekkor a

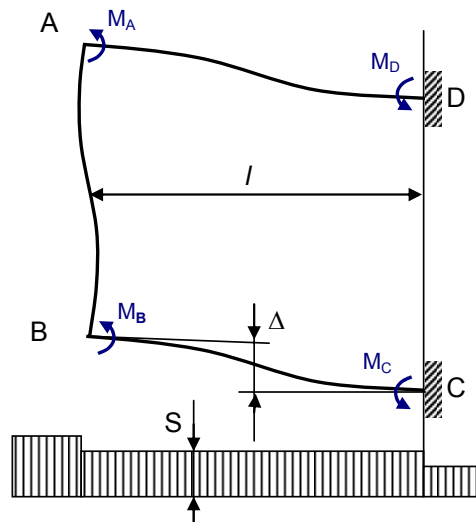
rúd két végén a hajlítás következtében $M = [6IE / l^2] \Delta$ nagyságú (el-
lentétes előjelű) befogási nyomaték lép fel. Ha a *Vierendeel*-tartó
csomópontjait képzeletben csak egymással párhuzamosan eltolódni
engedjük, akkor az eltolódások után a most megadott képlet szerinti
befogási nyomatékok lépnek fel. Ezekkel a kezdeti nyomatékokkal
terhelt csomópontokat azután a *Cross*-féle eredeti módszerrel sor-
ban elfordulni engedjük. Ha a tartó végleges helyzetbeli eltolódásai
ismertek lennének, akkor a végleges saroknyomatékok meghatározá-
sa csak a *Cross*-módszer alkalmazását kívánná. A tartószerkeze-
tünk csomópontjainak végleges egyensúlyhoz tartozó eltolódásai
azonban a számítás kezdetekor nem ismeretesek. Az eltolódásokat
a nyíróerők okozzák. Az 5. ábrán vázolt tartóra az egyik keretmező-
ben működő nyíróerő és a rudak végnyomatékai közötti összefüg-
gést a 6. ábra jelöléseivel a $\Sigma M_D = 0$ egyensúlyi egyenlet adja:

$$Sl = M_A + M_B + M_C + M_D .$$

Ez az egyenlet azt mondja, hogy ha a nyomatékosztás eredménye ezt a
feltételt nem elégíti ki, akkor a tartó még nincs egyensúlyban, tehát újabb
nyomatékokat kell szétosztani, mindaddig, amíg az $Sl = \Sigma M$ egyenlet az
össze keret vonatkozásában egyidejűleg teljesül.



5. ábra Az eltolóerők (nyíróerők) eloszlása az alsó csomópontokon
függőleges erőkkel terhelt Vierendeel tartó esetén

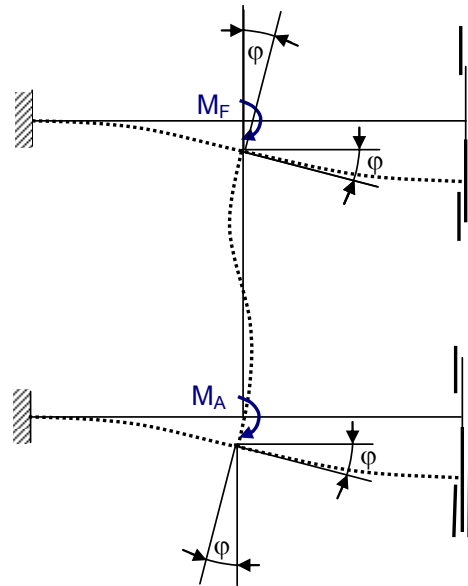


6. ábra A keretmező kilengése

A nyomatékosztás a gyakorlati esetekben addig tart, amíg a maradék nyomatékok az összes keret vonatkozásában elhanyagolhatóan kicsik lesznek. Ekkor a számítás lezárható és a résznyomatékok összegzésével előáll a megoldás.

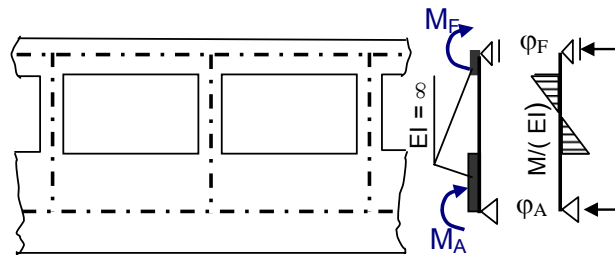
4.3.3. Csonka Pál professzor módszere

Csonka Pál professzor módszere a *Cross-Morris* módszer konvergenciáját javítja meg. A jármű-szekrényváz *Vierendeel*-tartóként felvett modelljénél az oszlopok és az övek merevségei meglehetősen eltérőek, és ezért a *Cross-Morris* módszer konvergenciája lassú, sok ismételt nyomatékosztásra és nyomatékátvitelre van szükség a megfelelő közelítés eléréséhez. A csonka-féle eljárásnak az első része megegyezik a *Cross-Morris* módszernél megadottakkal, tehát egyszerű nyomatékosztás és átvitel történik. Az eltérés a csomópontok eltolódásából eredő nyomatékváltozások meghatározásánál jelentkezik. *Csonka* módszere a csomópontkilengés hatását egy különleges alakváltozási lépés az ún. „*tiszta elferdülés*” vizsgálatával oldja meg. A 7. ábrán látható a tiszta elferdülés alakváltozási állapotába jutott keretmező-pár. Ez a speciális alakváltozási mód a két csomópontban működtetett koncentrált M_A és M_F nyomatékok hatására jön létre. Következésképpen az alsó és felső öveken a nyomaték állandó értékű, és ezért az övek körívben hajlanak meg (a két tartórész öve ellenívben). A középső oszlop pedig úgy viselkedik, mint a két végén koncentrált nyomatékkal terhelt kéttámaszú gerenda. Az elmondottaknak megfelelően az övek merevségei a tiszta elferdülésnél az $s=IE/l$ képlettel számíthatók, az átvivő pedig $c= -1$ értékű.



7. ábra Tiszta elferdülést végzett keretmező-pár

Az oszlopokon pedig állandó I keresztmetszeti inercianyomaték jelenléte esetén a merevségi tényező $s=6IE/l^2$, és az átvivő zérus. Az ilyen alakváltozásnál az övek mentén a hajlítónyomaték (övrudanként) állandó és így fennáll, hogy $S = dM(x)/dx = 0$, azaz a tiszta elferdülés a nyíróerők egyensúlyát nem bontja meg. Itt kell megemlíteni, hogy a kocsiszekrény modellbeli oszlopok merevségi tényezőjét úgy számítjuk, hogy az övekbe eső rész merev lásd a 8. ábrát.



8. ábra Vázlat az oszlopmerevség számításához

Ezek szerint az oszlop merevségi tényezőjének számítása csupán a *Mohr*-tétel alkalmazását igényli. A gyakorlati számítás mármost a következőképp történik. Először meg kell határozni a kezdeti befogási nyomatékokat az eltoló erők egyensúlyából a 6. ábrának megfelelően a két szomszédos keretmező csomópontjaira. Az oszlop két végén jelentkező kezdeti befogási nyomatékokat össze kell adni, és az eredőt szét kell osztani a sorozatos nyomatékosztás osztási tényezői alapján. Ezután az öveken sorozatos nyomatékátvitelt kell végrehajtani a $c = -1$ szorzó segítségével. A műveletsort a

Vierendeel-tartó minden keretpárjára el kell végezni, és mindaddig sorozatosan folytatni kell, amíg a kiegyensúlyozatlan nyomatékok elenyésznek. Ezt a helyzetet elérve a részeredmények összegzésével a számítási folyamat véget ér. Lehetséges azonban, hogy az így nyert végeredmények nem elégítik ki a csomópontok egyensúlyi feltételét. Ekkor újból egyszerű nyomatékosztás vagy sorozatos nyomatékosztást végzése szükséges. A megoldás tehát akkor végleges, ha az eltoló erőkre vonatkozó $Sl = \Sigma M$ feltétel minden keretmezőre megfelelő pontossággal ki van elégítve.

4.3.4. A Mina-Bognár módszer

Ezt az eljárást a Ganz gyár mérnökei dolgozták ki a *Vierendeel* tartóval modellezett kocsitestek méretezéséhez.

1. Első lépésként a gerendaként felfogott kocsitest nyomatéki ábráját kell meghatározni.
2. Másodiknak a kocsi hossza menti hajlítónyomatékokat fel kell osztani az alsó és felső öv inercianyomatéka arányában,
3. Harmadik lépésként a felosztott nyomatékrészeket $1/I_E$ -vel redukálni kell.
4. A felosztott és redukált nyomatéki ábrákat a kocsi hossza mentén *Mohr* tétele szerint integrálva kiadódnak a felső és alsó öv szögelfordulás függvényei, azon feltétel mellett, hogy az oszlopok bekötése az övekhez csuklós, azaz nem visznek át nyomatékot, más szóval: az oszlopok végtelenül hajlékonynak tekintettek.
5. Mivel az oszlopok nem jelentenek visszatérítő nyomatékot az övek szögelfordulásai a tényleges egyensúly helyzetéhez képest nagyobbak
6. Ezekkel (a valóságosnál nagyobb) szögforgásokkal az oszlopmevségek figyelembe vételével oszlopvég nyomatékokat állapítunk meg amelyek a valóságosnál nagyobbak
7. Összeadjuk az alsó és felső oszlopvégnyomatékokat, majd a kapott összeget az alsó és felső öv inercianyomatékának arányában felosztva és $1/I_E$ -vel redukálva hozzáadjuk a kiindulási felosztott és redukált nyomatéki ábrához, az így kapott nyomatékok a valóságosnál kisebbek.
8. A 7. pont szerinti felosztott és redukált nyomatéki ábrát a kocsi hossza mentén integrálva szögelfordulás ábrákat kapunk, mely szögelfordulások a valóságosnál kisebbek, mert nagy oszlop-végnyomatékok befolyásolták az értékeket.
9. Az eljárás folytatódik, a 8. pont szerint szögelfordulásokkal meghatározott oszlopvég nyomatékok meghatározásával, amelyek a

valóságosnál kisebbek, majd a 7. szerinti lépés ismétlésével újabb redukált nyomatéki ábrákat készítünk, stb.

A fent bemutatott eljárást többször ismételve a valóságos szögelfordulásokhoz tartó konvergens közelítő sorozatot kapunk. Az eljárás gyorsítható. Az első 3 – 4 lépés után meg lehet határozni ezek valószínű középértékeit, és több lépést átugorva megállapítani a szögelfordulást és a nyomatékot, majd az itt kiszámolt értékekből újabb középérték képzéssel megállapíthatók a végleges nyomatékok. A számítási pontosság tetszőlegesen növelhető. A végleges szögelfordulások értékei két szempontból fontosak. Egyrészt ezek adják a számítás végeredményeit, az ismeretlen nyomatékokat, másrészt a szögelfordulási függvény integrálgörbéje – a $tg\varphi \approx \varphi$ közelítéssel – a behajlásokat adja. Így a terhelési próba eredményeinek a számítással való egyezése már a tényleges feszültségeknek a számítással való egyezését is biztosítja.

4.3.5 Az iterációs módszerek értékelése

Az iterációs módszerek kiválóan alkalmasak a vasúti járműszekrényvázak szilárdsági számításának megalapozásához. A bemutatott módszereken kívül több hasonló módszer található a szakirodalomban. Ezen további módszerek is fokozatosan közelítő jellegűek, és így a számítási pontosság tetszőlegesen növelhető. Az iterációs módszerek előnye, hogy már az első közelítő ciklusok után jó áttekintést ad a tartószerkezet erőjátékáról. Ez azon szempontból is kedvező, mert az elkövetésre került esetleges durva hibákra felhívja a figyelmet, míg a klasszikus egyenletrendszer megoldó módszereknél az esetleges hiba csak a számítás végén derül ki. Az iterációs módszerek előnyére írható, hogy a számítás mechanika jelentése nem vesz el, szinte szemlélhető az erőjáték alakulása. A módszerek közül a *Csonka*-féle módszer preferálása javasolható, mert ez nem szimmetrikus ajtó- és ablakkivágás elrendezésű kocsiszekrények esetében is jól alkalmazható.

4.4 A számítástechnika alkalmazása

A korszerű számítástechnika széleskörű alkalmazásra talál a vasúti járművek méretezési folyamatában, de kiemelt a szerepe a merevített héjszerkezetként megvalósítandó jármű-szekrényvázak tervezésében. Ez mind mozdonyok, mind motorkocsik, mind pedig a személy- és teherszállító vontatott járművek esetére is jellemző. A bemutatott számítási modellek és eljárások mindegyike lineáris

egyenletrendszer megoldását igényli. Sok esetben a nagyméretű együtthető mátrixokban nagyon sok zérus elem szerepel, ezért célszerű a ritka mátrix-algoritmusokkal dolgozni. A numerikus megoldások pontossága a mérnöki feladatoktól függő követelményeket mindig ki tudja elégíteni. Sok célszerűen alkalmazható programcsomag áll rendelkezésre a számítások lefolytatására, úgy hogy csak ritkán van szükség az algoritmusok sajátkezű programozására. A mérnök feladata a számítás mechanikai hátterének kialakítása és az egyenletek konstrukciója.

5. A FESZÜLTSEGELOSZLÁS VIZSGÁLATA

5.1 Gerenda és héjszerkezet

Az előzőekben tárgyalt számítási módszerek hallgatólag feltételezték, hogy a szekrényváz elemei gerendaként viselkednek, és a hajlított elemekben a keresztmetszeti síkok a terhelés után is síkok maradnak, és kialakuló feszültségeloszlás követi a *Navier*-formula szerinti lineáris eloszlást. A szekrényváz rúdelemei és a ráerősített lemezburkolat egységes héjszerkezetet alkot. A vékony (2...2,5 mm vastag) lemezek viselkedése azonban eltér a klasszikus gerendaszerkezetek tulajdonságaitól, a nyomásra igénybevett lemezmezők még a rugalmassági határ előtt elvesztik stabilitásukat és kihajlanak. Ha nem lép fel helyi kihajlás, akkor a *Navier*-formula helytálló, mivel a keresztmetszeti síkok a terhelés után is síkok maradnak. A húzott lemezmezők viselkedése komolyabb problémát nem vet fel. A nyomott és nyírt lemezmezők teherbírása erősen függ a merevítő kiosztástól, ez szabja meg a horpadási (stabilitásvesztési) peremfeltételeket. A vasúti járműszerkezetek esetében a horpadási határfeszültséget nem szokták túllépni a tervezéskor. Megjegyezzük, hogy a horpadás nem jelenti a teherbírás megszűnését, csak a horpadt lemezrészben átrendeződött a feszültségeloszlás. A behorpadt rész tehát teherbíró marad, azonban a horpadás ténye számos további probléma kiindulópontját adja: a szerkezet ledobja a festéket, megindul a korrózió, az ilyen szerkezet látványa bizalmatlanságot kelt az utazóközönségben, stb.

5.2 Bordákkal merevített lemezszerkezet feszültségeloszlása

Az előzőekben tárgyaltak szerint merevített lemezszerkezet nem elegendő, ha a számításból kiadódó hajlítónyomatékok (nyíróerők és derékerők) okozta feszültségek kisebbek a megengedett maxi-

mális értéknél, mert lehetséges, hogy a lemezrészek hamarabb horpadnak, és horpadt részekben a tervezettől eltérően megváltozik a feszültségeloszlás. A lemez lokális kihajlásait elkerülendő megfelelő kiosztású merevítők elhelyezése szükséges. A kialakuló feszültségeloszlás nagyban függ attól, hogy a merevítő rúdszerkezet hogyan kapcsolódik a lemezhéjazathoz. A nagyvasúti szerkezeteknél a lemezeket általában hozzáhegesztik a merevítő rudakhoz. A közúti vasutaknál egyes szabályrendeletek nem engedik meg a lemezhéjazatnak magában is el kell tudni viselnie az üzemi húzó-nyomó terheléseket). Ha lemezek és a rúdszerkezet kapcsolata csak csavarolt, akkor héjburkolatról beszélünk, ebben az esetben a lemezmezők csak nyírófeszültségeket vesz fel. Ha lemezek hegesztett kötéssel kapcsolódnak a merevítő rúdszerkezethez, akkor a szerkezeti részek szabatosan együttdolgoznak, és mind nyíró, mindpedig húzó és nyomófeszültségek átvitelre kerülnek. Ez utóbbi eset adja a valódi merevített héjszerkezetet. Héjburkolat esetén Wágner-tartóként átlós húzómezőre méretezik a lemezt, míg együttdolgozó héjszerkezetnél külön kell vizsgálni a normálfeszültségek és a nyírófolyamok hatását. A normálfeszültségeket vizsgálva a problémát a nyomófeszültségek eloszlása jelenti. A kritikus feszültségen túl terhelt lemez esetén – szemléletből következően is érzékelhetően – a merevítőhöz kapcsolt lemezrészben és a szabad lemezmezőben ébredő nyomófeszültség nem egyforma. Ennek a matematikailag nem könnyen követhető eloszlásnak a helyettesítésére a méretezési gyakorlatban bevezették az együttdolgozó lemezszélesség fogalmát. Ezt úgy kell megállapítani, hogy az együttdolgozó lemezszélesség mentén ébredő állandó nagyságú (közepelt) feszültség mechanikailag helyettesítse a ténylegesen kialakuló feszültségeloszlást. Ha a merevítők távolsága b és a merevítőben ébredő feszültség σ_m , és a merevítőtől x távolságra a valóságos feszültségeloszlás értéke $\sigma(x)$, akkor az együttdolgozó b_m lemezszélesség a rugalmasságtani eszközökkel kezelt feszültségeloszlás tekintetbe vételével:

$$b_m = \frac{1}{\sigma_m} \int_{-b/2}^{b/2} \sigma(x) dx ; \quad \text{jó közelítéssel: } b_m = b \sqrt[3]{\frac{\sigma_k}{\sigma_m}} .$$

A képletben σ_k a kritikus (horpadási) feszültség. A bemutatott képlet tiszta nyomás esetén érvényes. Vasúti járműszerkezeteknél a nyomott lemezmezők általában a tetőn vannak. Itt azonban belép egy újabb

probléma a tetőívek görbültsége miatt. Egyrészt a görbültség miatt a feszültségeloszlás megváltozik a tisztán nyomásra igénybevett lemezmezőhöz képest, másrészt pedig a tetőn a kezdeti sík keresztmetszetek nem maradnak síkok, ugyanis az öveket együttdolgozásra kényszerítő erő a gerinclemezekről (az oldalfalokról) nyírt lemeztáblák formájában adódik át, és mivel az utóbbiak eközben rugalmas alakváltozást szenvednek a tető közepe közelítően lineárisan felé csökken a deformáció és a feszültség is. Különböző járműgyártók sok mérést végeztek a tetőben keletkező feszültségek meghatározására. A mérési eredmények alátámasztják a fentiekben ismertetett keresztirányban a tető ívhossza mentén a lineáris deformáció és feszültség alakulást. A vasúti személykocsik tervezésénél a tető teherbírásának kérdésében elterjedt az a közelítő eljárás, miszerint a tető keresztmetszetet csak a hosszmerítőkhez kapcsolódó együttdolgozó lemezszélességekkel veszik figyelembe. Ennek az elvnek egy gyakorlati megvalósítása az *Erdős*-féle redukció, mely szerint az együttdolgozó lemezszélességeket, a lemezvastagságot és a hosszmerítők magassági helyzetét figyelembe véve ezekkel azonos inercianyomatékot képviselő függőlegesen hosszabb oldalú derékszögű négyszöggé transzformálja és a tetőinercia számítását ennek az alakzatnak az ablakok feletti keresztmetszethez való hozzávételével végzi.

A lemezmezőket terhelő nyírófolyamok átlós húzómezőket hoznak létre. Ezeknek a nyírófolyamoknak a meghatározása nem egyszerű, mert ezek sok esetben statikailag határozatlanok. Az utóbbi kérdést az oldalfalak vonatkozásában a „helyettesítő rácsos tartó” vizsgálattal lehet megállapítani. A lemezkihajlással kapcsolatos kritikus feszültségek meghatározásához szükséges konstans tényezők a szakirodalomban közölt „csipkegörbék” rendelkezésre állnak [11], így a szerkezet horpadásra is ellenőrizhető.

5.3 Az erőbevezetés kérdése

Héjszerkezeteknél a *De-Saint Venant* féle elv nem érvényes. A koncentrált erők hatására a klasszikus szilárdságtan módszereivel számított feszültségeket módosítani kell. A vasúti járművek szekrényszerkezeteinél az erőbevezetés általában az alsó övön történik. A forgóvázakkal való kapcsolat csúszótámon vagy főcsapszegen át történik, azonban mindig (fő)kereszttartón át. Ezért a keresztartó felett mindig keresztbordát (bordákat) kell vezetni a vázszerkezetben, mert ezek segítségével biztonságosan lehet szétosz-

tani a bevezetett támaszerőket. A merevített héjszerkezet nagy kivágásainál az ajtóknál és az ablakoknál feltétlenül szükséges körbefutó merevítőkeretek beépítése az elmaradó lemezmezők kiváltására, ugyanis a nagy kivágások környezetei – főként a sarkoknál – feszültségtorlódási helyekként jelentkeznek.

6. A SZÁMÍTOTT ÉS A VALÓSÁGOS FESZÜLTSEGEK KÉRDÉSE

A héjszerkezetekben ébredő feszültségek meghatározása összetett feladatot jelent. Ismeretesek közelítő eljárások, amelyek sok változó elhanyagolásával hozzávetőleges képet adnak a kialakuló feszültségi állapotról. A bizonytalanságot növeli az a körülmény, hogy a szerkezet gyártása során sok olyan tényező hatása is jelentkezik, amelyet a számítás során aligha lehet követni. Ilyenek a hegesztés miatt keletkező azon feszültségek, amelyek a kialakuló gátolt dilatációból erednek. Ezek gyakorlatilag véletlenszerűen (sztochasztikusan) jelentkeznek, és sokszor nagy értéket képviselnek. Ez azt jelenti, hogy a gyártás után kialakuló feszültségek jelentős eltérést mutathatnak a számítási modellel nyert feszültségektől. Ezen bizonytalanság az által csökkenthető a gyakorlatban, hogy a szerkezet méretezéskor a megengedhető feszültség szintet alacsonyan kell megszabni.

A számítási módszerek jelentősége főleg az új járművek tervezésénél van, eredményei megközelítő pontossággal tájékoztatnak a szerkezetben üzem közben kialakuló feszültségekről. A legyártott szerkezetben kialakuló tényleges feszültségekről azután tenzometrikus mérésekkel kell tájékozódni, és a mért értékeket összevetni a megengedett feszültség szinttel.

A szerkezetbeli feszültségek behatárolásának másik gyakorlati módszere a modellkísérletek alkalmazása. Ennél a módszernél gondos munkával elkészítik a merevített héjszerkezetű járműszekrény mechanikailag helyes kicsinyített modelljét, és a modell lépték figyelembe vételével meghatározott terheléseknek alávetett modellen végeznek tenzometrikus méréseket. A modellkísérletek kategóriájában célszerű eljárás lehet a repedőlakkos vizsgálat, illetve a modell léptékben átlátzó anyagból elkészített járműszekrény-modellen végzett feszültség-optikai vizsgálat. Az utóbbi különösen érdekes lehet, mivel ez szám-

szerűen is értékelhető eredményeket ad, így a szingulárisnak tekinthető helyeken, pl. a csomópontokban és a sarkokban is meg lehet vizsgálni a kialakult feszültségeloszlást.

7. IRODALOMJEGYZÉK

- [1] **Baránszky-Jób, I. – Fekete, K.:** Közúti és gyorsforgalmú villamos járművek. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1963.
- [2] **Csonka, P.:** Eljárás elmozduló sarokpontú derékszögű keretek számítására. Mérnöki Továbbképző Intézet, Budapest, 1950.
- [3] **Fekete, T.:** Tartószerkezetek. Egyetemi jegyzet. Tankönyvkiadó, Budapest, 1965.
- [4] **Halász, T.:** Vasúti vontatott járművek. Egyetemi jegyzet. Tankönyvkiadó, Budapest, 1964.
- [5] **Keszler, Gy.:** Vasúti járművek fenntartása – javítása. Egyetemi tankönyv. Tankönyvkiadó, Budapest, 1962.
- [6] **Korányi, I.:** Tartók sztatikája. Egyetemi tankönyv, Tankönyvkiadó, Budapest, 1962.
- [7] **Korányi, I.:** Acélszerkezetek. Egyetemi tankönyv, Tankönyvkiadó, Budapest, 1960.
- [8] **Mina, A.:** Vasúti járművek önhordó szekrényvázainak méretezési elvei II. Mérnöki Továbbképző Intézet, Budapest, 1953.
- [9] **Palotás, L.:** Keretek elmélete és számítása. Közlekedési kiadó, Budapest, 1950.
- [10] **Pelikán, J.:** Tartószerkezetek. Egyetemi tankönyv, Tankönyvkiadó, Budapest, 1963.
- [11] **Petúr, A.:** Repülőgép szilárdságtan. Egyetemi tankönyv, Tankönyvkiadó, Budapest, 1952.
- [12] **Rudnai, G. – Michelberger, P.:** Könnyűszerkezetek szilárdságtana. Egyetemi jegyzet. Tankönyvkiadó, Budapest, 1965.
- [13] **Szondy, Gy.:** Vasúti kocsik. Egyetemi tankönyv. Tankönyvkiadó, Budapest, 1958.
- [14] **Vizely, Gy.:** Vasúti járművek önhordó szekrényvázainak méretezési elvei IV.. Mérnöki Továbbképző Intézet, Budapest, 1953.
- [15] **Balogh, V.:** Vasúti kocsik. Egyetemi jegyzet. Tankönyvkiadó, Budapest, 1984.
- [16] **Sostarics, Gy. – Balogh, V.:** Vasúti járművek. Egyetemi tankönyv. Tankönyvkiadó, Budapest, 1991.