
4 A hajók szerkezeti felépítése

A hajó alapján olyan vízi-jármű, amelynek feladata személyek vagy áruk eljuttatása egyik kikötőből a másikba. Feladatát akkor tudja teljesíteni, ha rendelkezik a következőkkel:

- hajótest, amely vízmentes, tehát biztosítja az úszóképességet nehéz időjárási viszonyok között is; kellő szilárdsággal rendelkezik ahhoz, hogy a víznyomásból adódó keresztirányú és a súlyok illetve felhajtóerők nem azonos eloszlásából eredő hosszirányú terheléseket elviselje; kellően időtálló ahhoz, hogy a jármű üzemeltetését tartósan biztosítani tudja,
- gépi berendezések és rendszerek, amelyek egyik része (erőgépek) a hajó és a hajón tartózkodó személyek szükségleteiből adódó és a biztonságos üzemeltetéshez elengedhetetlen energiát biztosítja; másik része (munkagépek: csörlők, szivattyúk, stb.) az üzemi, biztonsági és kényelmi követelményekből eredő feladatokat ellátja,
- propulziós berendezés, amely a hajó haladásához szükséges tolóerőt biztosítja.

A felsorolás a hajó szerkezeti felépítésének természetes összetevőit tartalmazza, a következő fejezetekben tehát ezeket fogjuk részletesen ismertetni.

4.1 Hajótest

A felsorolt követelmények közül az első a vízmentesség, amely magától értetődik ugyan, tehát ebben a vonatkozásban nem kell vele foglalkozni, azonban a *hajótest* részeinek tárgyalása során látni fogjuk, hogy mind a nemzetközi egyezmények, mind az osztályozó intézetek részletes követelményrendszert állítottak fel annak érdekében, hogy a hajó belsejébe ne juthasson be a víz olyan módon, ami a hajó elvesztését eredményezi.

A harmadik a sorban a tartósság kérdése, ami ismét nyilvánvalónak tűnik, azonban számtalan tényező befolyásolja, és ezekkel a hajótest anyagának, az anyagok előkészítésének és a hajótest gyártásának tárgyalásakor foglalkozunk.

A második követelmény azonban a hajótest megfelelő szilárdságának biztosítása, és ennek vizsgálatára az alábbiakban kerül sor.

4.1.1 A hajók szilárdsága

A *hajótest szilárdságát* három különböző típusú igénybevétel szempontjából kell megvizsgálni: *hosszirányú hajlítás és nyírás, keresztirányú hajlítás és nyírás* illetve *csavarás*, amely hullámos vízen a hullámok haladási irányára átlósan történő mozgáskor lép fel. Az első esetben egy *hajlított tartó* különböző pontjaiban ébredő feszültségeket kell meghatározni. A második fajta igénybevétel a bordakeretet hajlításra és nyírásra terheli, forrása a víz nyomása, amely a hajó oldal- és fenékszerkezetére hat. A harmadik fajta igénybevétel a legösszetettebb, amint látni fogjuk.

4.1.1.1 Hossz-szilárdság

A hajó vasszerkezete lényegében egy hajlított tartó, amely egyes keresztmetszetekben *zárt*, másutt *nyitott szelvényű*. Terhelését egyrészt az alulról felfelé ható felhajtóerő adja, amelynek forrása a vízkiszorítás, illetve a felülről lefelé ható súlyterhelés, amely magának a hajónak a súlyából és a berakott áru, valamint a legénység és az ellátmány súlyából tevődik össze. A *súlyerők* és a vízkiszorításból eredő *felhajtóerők eredője* adja a *hajótest*, mint *úszó hajlított tartó igénybevétele*t. A hajó úszásának és stabilitásának vizsgálatával ellentétben a szilárdsági számítások során nem csupán az erők nagyságával és hatásvonalukkal kell törődnünk, hanem azok pontos eloszlásával is a hajó hossza mentén. A másik lényeges különbség a korábban bemutatott vizsgálatokhoz képest, hogy azoknál a hajótestet merev testként kezeltük. Nem foglalkoztunk azzal, milyen változásokat idéznek elő a hajó alakjában a külső erőhatások, legfőképpen a súly és a felhajtóerő eloszlása. A hossz-szilárdság vizsgálata során azonban a *hajót deformálható testként* kell kezelnünk, amely a súly- és felhajtóerő hatására behajlik. Az alakváltozást a *hajótest szerkezeti elemeiben ébredő feszültségek* idézik elő hasonlóan ahhoz, amint egy bármilyen más tartó deformálódik terhelés alatt.

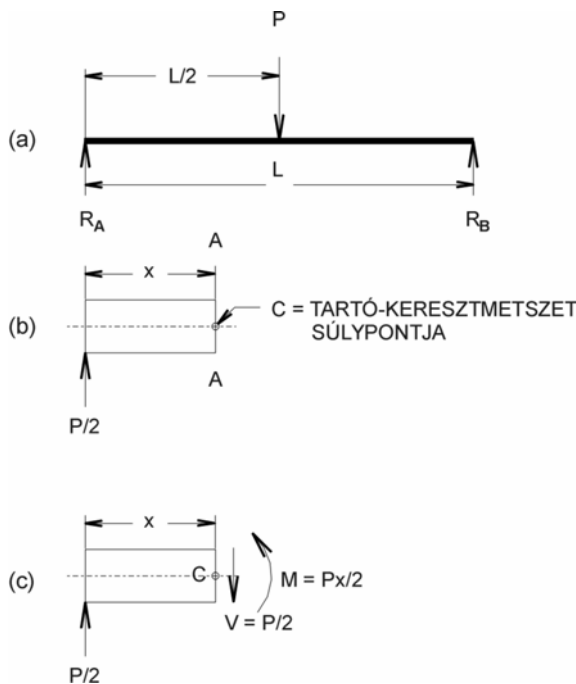
A fentiek alapján a hajók hossz-szilárdságának meghatározásánál a mechanikából jól ismert tartók szilárdságtanát kell követnünk. A nehézség abból adódik, hogy a terheléseket, amelyek az igénybevételeket okozzák, nagy részben a természeti erők hozzák létre, emiatt jelentős szerepet kap a statisztikailag összegyűjtött adathalmaz, amelyből következtetni lehet arra, milyen erők fognak hatni a vizsgált hajóra adott környezetben. Látni fogjuk a kidolgozott példákban, hogy a legegyszerűbb hajótest formák esetén sem kevés munkával jár egy számítás elvégzése, nem szabad tehát megfélemedezni arról, hogy a valóságos hajótestek sokkal bonyolultabb geometriával bírnak. Nincs tehát semmi különleges abban, hogy a hossz-szilárdsági számításokhoz is rendelkezésre állnak számítógépes programok, és a nagy mennyiségű számítást azokkal hajtatjuk végre.

Tartók hajlító és nyíró igénybevétele

Egy tartónál akkor beszélünk hajlításról, amikor a terhelő- és reakcióerőknek a tartó hossz tengelyére merőleges összetevőjük is van. A hajlított tartó legegyszerűbb esete egy elméletileg súlytalan vízszintes gerenda, amelyet két végén alátámasztunk, középen pedig koncentráltan hat a *terhelő erő*. Ezt mutatja a 4.1.1.1.1 ábra (a) részlete. Az *alátámasztások* úgy nevezett egyszerű alátámasztások, amelyek oldalirányú erőt nem képesek a tartóra átadni, tehát a *reakcióerők* is kizárólag függőlegesek lehetnek. Először a reakcióerők nagyságát kell meghatározni, amelyek a tartó szempontjából külső erők, majd a tartó egyes keresztmetszeteit terhelő belső erőket és hajlító-nyomatékokat. A reakcióerők meghatározásához felírjuk a *sztatikai erőegyensúly egyenleteit*, amely szerint bármely pontban a függőleges erők és a nyomatékok eredője zéró. A kiválasztott pont a nyomatékok szempontjából a tartó közepe, ahol $x = L/2$.

$$\begin{array}{ll} \Sigma F_V = 0, \text{ azaz} & R_A + R_B = P \\ \Sigma M = 0, \text{ azaz} & R_A L/2 = R_B L/2 \\ \text{Tehát} & R_A = R_B = P/2 \end{array}$$

Ebben az egyszerű esetben természetesen maga a szimmetria is elvezetett volna a helyes következtetéshez, hogy a reakcióerők a terhelés felét teszik ki egyenként. A műveletet inkább a módszer bemutatására végeztük el, amelyet bonyolultabb esetben is ugyanígy kell alkalmazni.



4.1.1.1.1 ábra Tartó igénybevétele nyírásra és hajlításra

A tartóban ébredő erőket úgy határozzuk meg, hogy felírjuk az egyensúlyi egyenleteket a tartó egy szakaszára egyik vége és egy adott keresztmetszete, pl. a (b) részleten bemutatott A-A szelvény között. Általában a tartó bármelyik keresztmetszetében csak akkor áll fenn a feltételezett egyensúly, ha a képzeletben elmetsett szelvény súlypontjában (az ábrán a C pont) van egy erő és egy nyomaték, amely a külső erőkkel és nyomatékokkal egyensúlyt tart. A tartóban ébredő belső erő a *nyíróerő (V)*, a nyomaték pedig a *hajlító-nyomaték (M)*. Az ábra (c) részletéből világosan látható,

hogy ebben az esetben a nyíróerőnek lefelé kell hatnia, hogy a reakcióerővel egyensúlyban lehessen, a hajlító-nyomatéknak pedig az ábrázolt értelműnek kell lennie, hogy kiegyenlítse a $P/2$ és V erők által álló erőkar forgatónyomatékát. A konvenciók értelmében az ábrán látható értelmű V és M pozitív előjelű. A szabályok értelmében *a tartó baloldali végénél a felfelé ható külső erők pozitív értelmű nyíróerőket és hajlító-nyomatékokat hoznak létre a keresztmetszetben*. A lefelé ható külső erők ezzel szemben negatív nyíróerőket és hajlító-nyomatékokat hoznak létre ugyanebben a keresztmetszetben. A tartó jobboldalát is vizsgálhatjuk, azonban ott a szabály fordítva érvényes a nyíróerőkre, a nyomaték esetében változatlan. Tehát *a jobboldalon a felfelé ható külső erők negatív értelmű nyíróerőket és pozitív hajlító-nyomatékokat hoznak létre a keresztmetszetben*.

Mekkora tehát az ábra (c) részlete szerint a V és M értéke? A már ismert egyensúlyi egyenletekből határozható meg.

$$\begin{aligned} \Sigma F_V = 0, \text{ azaz} & \quad V = P/2 \\ \Sigma M = 0, \text{ azaz} & \quad M = Px/2 \end{aligned}$$

Ezeket a kifejezéseket, amelyek az ábrán bemutatott helyzetre vonatkoznak, általánossá tehetjük azzal a feltételezéssel, hogy vannak további (pozitív és negatív) erők, amelyek a tartó baloldali végénél hatnak. A V és M értékeire felírt egyenleteket tehát a tartó adott

BBBZ-kódex

metszete esetén átírhatjuk az erők és nyomatékok összegére:

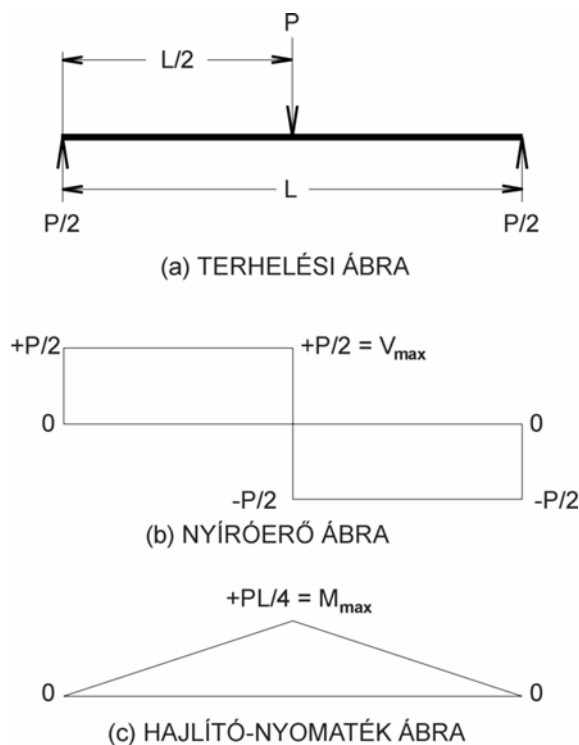
$$V = \sum_{\text{bal}} F_V = -\sum_{\text{jobb}} F_V$$
$$M = \sum_{\text{bal}} M_C = -\sum_{\text{jobb}} M_C$$

ahol a bal és jobb arra utal, a tartónak melyik végét vizsgáljuk.

F_V = függőleges külső erők és reakcióerők, amelyek pozitívak, ha felfelé mutatnak

M_C = külső erők nyomatéka a keresztmetszet súlypontja körül, pozitívak, ha az erő felfelé mutat

A nyíróerők és a hajlító-nyomatékok ábrázolása. Az ábrán látható tartóra vonatkozó egyenletekből egyértelmű, hogy bármely keresztmetszetenél, amely a tartó közepét terhelő erőtől balra esik ($0 < x < L/2$), a V nyíróerő állandó, és megegyezik a $P/2$ reakcióerővel. A hajlító-nyomaték azonban nem állandó, annak értéke lineárisan növekszik a baloldali végpontnál ($x = 0$) érvényes nulla értéktől $(P/2)(L/2) = PL/4$ maximális értékig a tartó közepénél ($x = L/2$). A trend a nyíróerő és a hajlító-nyomaték változására akkor látható világosan, ha a V és az M értékét diagramban ábrázoljuk a tartó mentén az x változó függvényében. Az előző ábra szerinti tartó diagramjai a 4.1.1.1.2 ábrán láthatóak, ahol az előzőekben elmondott tendencia világosan kitűnik.



4.1.1.1.2 ábra A nyíróerő és hajlító-nyomaték ábrája

A tartó jobboldali keresztmetszeteinek vizsgálatához vagy az összegző egyenlőségeket alkalmazzuk, vagy a jobboldali tartóvégre érvényes szabályt vesszük figyelembe. Ha maradunk a baloldalnál, a következő megállapítást kell figyelembe venni:

$$V = P/2 - P = -P/2$$

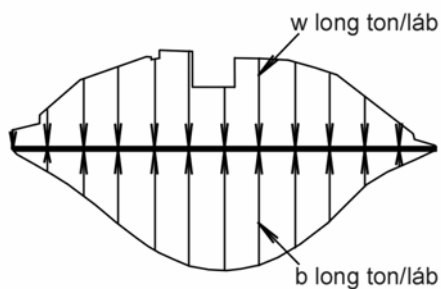
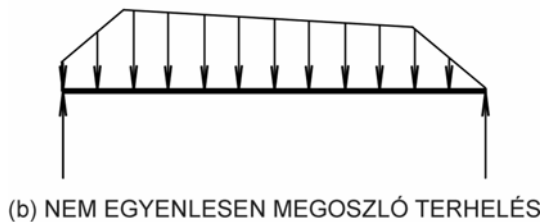
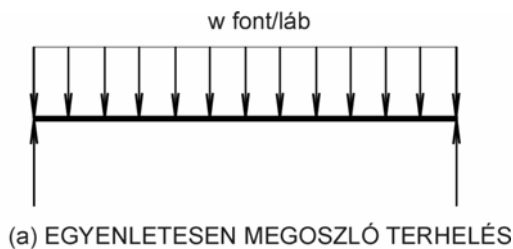
A kifejezésben a baloldali előjel konvenció érvényes, a felfelé ható külső erő pozitív, a lefelé ható negatív. A hajlító-nyomaték tehát a tartó jobboldali felénél:

$$M = (P/2)x - P(x - L/2) = PL/2 - Px/2$$

Az $x = L/2$ keresztmetszetben ez $PL/2 - PL/4 = PL/4$ értéket ad, ami igazolja a már

kiszámított nyomatékot a tartó közepénél. A jobboldali végpontban, ahol $x = L$, ez a $PL/2 - PL/2 = 0$ értéket adja, a maximális értéktől pedig a csökkenés lineáris. Tehát a hajlító-nyomaték ábra háromszög alakú, a maximális nyomaték a tartó közepén ébred. A szimmetria miatt ezekre az eredményekre egyszerűbben is rátalálhattunk volna, de a módszer alkalmazásának bemutatása volt a cél.

Az előző példában szereplő *koncentrált terhelés* a hajók esetében alig fordul elő. Helyette olyan terhelési formákkal kell dolgozni, amelyeket a legjobban a *megoszló terhelés* közelít, amelyek a tartó egy részén oszlanak el. A teher megoszlását ugyanolyan diagramban kell ábrázolni, amilyen diagramot készítünk a nyíróerőről és a hajlító-nyomatékokról, ennek neve *terhelési ábra*. A megoszló terhelés alapesete pl. a tartó önsúlya.



(c) NEM EGYENLESEN MEGOSZLÓ SÚLY
NEM EGYENLETESEN MEGOSZLÓ
(VÍZKISZORÍTÁSBÓL EREDŐ)
REAKCIÓERŐ

4.1.1.1.3 ábra Megoszló terhelések

Ha a tartó állandó keresztmetszetű, akkor egyenletesen megoszló terhelésről beszélhetünk. A legtöbb teher azonban nem ilyen jellegű, például a hajó rakterében elhelyezett rakomány. A változó eloszlású terhelések legfontosabbak a hajók hosszszilárdság számításánál. A mérleg másik serpenyője, hogy a hajóra ható reakcióerő is megoszló terhelés, mégpedig a hajótest alakjától függő megoszlásban, mégpedig a vízkiszorításból eredő felhajtóerő. A 4.1.1.1.3 ábra különböző megoszló terheléseket mutat, a (c) részlet egy hajó egyszerűsített terhelési ábrája. Az ábra az x tengely (a hajóhossz) egyik felén a súlyokat összegzi, a másikon a vízkiszorítás eloszlását tünteti fel. A terhelések és a reakcióerők egyaránt súly/hossz mértékegységben szerepelnek. A teljes terhelést tehát a görbe alatti terület adja ki. A diagram gyakran nyilakkal mutatja az erők hatásának értelmét. Ha a hajó az ábrázolt terheléseknél sztatikus egyensúlyi állapotban úszik, a következő megállapítások igazak.

- A terhelések (súlyok) görbéje alatti terület a hajó vízkiszorításával egyenlő, amely tulajdonképpen a hajó saját súlyából és a berakott rakomány súlyából adódik ki.
- A terület súlypontjának hosszirányú helyzete megegyezik a hajó rendszersúlypontjának hosszirányú helyzetével.
- A felhajtóerő görbe alatti terület egyenlő a hajó vízkiszorításával, amelyet a

jellemző görbékből lehet leolvasni.

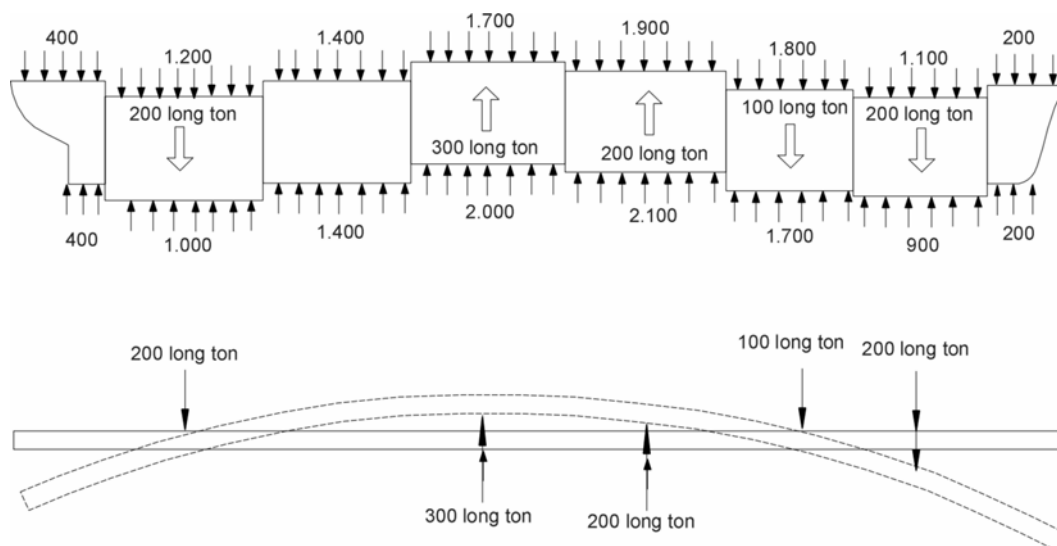
- A terület súlypontjának hosszirányú helyzete megegyezik a hajó vízkiszorítás-súlypontjának hosszirányú helyzetével.

Ezek a megállapítások lényegében a sztatikus egyensúlyi állapotban úszó hajó egyenleteinek megfogalmazásai.

A hajó igénybevételét jelentő feszültségek

Ezek után tegyünk egy kis kitérőt, és nézzük meg, milyen feszültségeket jelentenek azok a nyíró és hajlító igénybevételek, amelyek a terhelés és a vízkiszorítás eloszlásának eltérése miatt keletkeznek. Külön kell vizsgálni azokat a feszültségeket, amelyek akkor ébrednek a hajótestben, amikor az sima vízben úszik, illetve azokat, amelyek a hullámzó vízben vesznek igénybe.

Függőleges nyíró- és hosszirányú hajlító igénybevétel sima vízben. Ha sima vízben úszik egy tömör test, amelynek keresztmetszete és anyaga a hossz mentén változatlan, a test bármely metszetében a súly- és a vízkiszorítás által kiváltott felhajtóerők egyenlő nagyságúak és egymással ellentétes értelműek. Ennek következtében a metszetben nincs eredő erő, a testben pedig nem ébrednek feszültségek, és nem szenved alakváltozást.

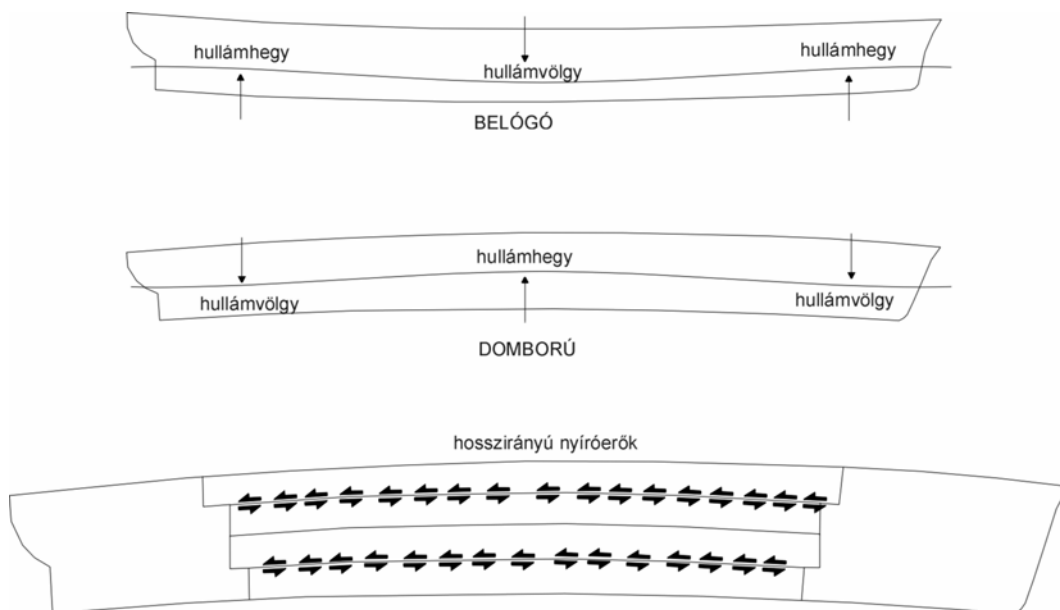


4.1.1.1.4 ábra Függőleges nyíró- és hosszirányú hajlító igénybevétel sima vízben

A sima vízben úszó hajó súlyelosztása azonban, mint láttuk, nem egyenletes, aminek oka részben a rakomány, részben a hajó vasszerkezetének eloszlása. A vízkiszorítás miatt ébredő felhajtóerő szintén nem egyenletesen oszlik meg, mivel a vízbemerült rész keresztmetszete szintén nem állandó a hossz mentén. A teljes súly és a teljes felhajtóerő természetesen egyensúlyban van, de mindegyik metszetben van eredő erő illetve terhelés, amely vagy a felhajtóerő vagy a súly többletéből ered. Függőleges fel- és lefelé ható erők vannak a hajótest egyes keresztmetszeteiben, amelyek azt szétfeszíteni

igyekeznek (ld. 8.1 ábra), ezeket függőleges nyíróerőknek nevezzük, mivel a hajótest anyagát függőleges síkban próbálják az egyes keresztmetszetek síkjában elcsúsztatni. Az ábrán látható hajó az alatta ábrázolt gerendához hasonló terhelést kap, és a függőleges terhelés eloszlási módja miatt hasonló *alakváltozást* szenved. Látható, hogy a gerenda *felső szálában húzó igénybevétel* lép fel; ugyanez történik a *hajó fedélzetének anyagában* ennél a terhelési formánál. Az *alsó szélső szálban* ezzel ellenkezőleg, illetve a *hajó fenékszerkezetében, nyomó igénybevétel* van. Az ilyen hajlításnak igénybevett hajóra azt mondják, hogy *'púpos'* (hogging angolul a sertés hátformája miatt), ha viszont a többletsúly a hajóközépen van, akkor azt mondják, hogy *'belógó'* (sagging angolul). A belógó hajó fedélzetében van nyomó igénybevétel, a fenék pedig húzásra van terelve. A sima vízben úszó hajót ennek megfelelően hajlító-nyomaték terheli, belógó vagy púpos a súly és a felhajtóerő relatív eloszlásától függően, ugyanakkor függőleges nyíróerők ébrednek.

Hajlító-nyomatékok hullámos vízben. Amikor a hajó a nyílt vízben halad, a hullámok a hullámhegyek és hullámvölgyek miatt nagyobb különbségeket hoznak létre a felhajtóerő eloszlásában, emiatt megnövelhetik a hajlító-nyomatékot, a *függőleges nyíróerőket*, és ezzel a feszültségeket.



4.1.1.1.5 ábra Hajlító igénybevétel hullámos vízben

A legkedvezőtlenebb hatásokat klasszikus módon egy olyan hajón lehet szemléltetni, amely olyan hullámon helyezkedik el, amely a hajó hosszának irányában halad, a hullámok így a hajóra merőlegesek, a hullámhossz pedig a hajóhosszal egyezik meg. Ha a hullámhegy a hajó közepére esik, a felhajtóerő púpossá teszi a hajót; ha a hullámvölgy kerül hajóközépre, a felhajtóerők hatására a hajó belógó alakot vesz fel (8.2 ábra). Ez a

BBBZ-kódex

hatás hozzáadódik ahhoz a hajlító igénybevételhez, amelyet a sima vízben úszó hajó szenved.

Hosszirányú nyíróerők. Amikor a hajó púpos vagy belógó deformációt szenved sima vagy hullámos vízben, hosszirányú nyíróerők ébrednek a függőleges nyíróerők mellett. A függőleges és hosszirányú nyírófeszültségek összeadódnak, és a hajó teherhordó keresztmetszetének szomszédos szelvényei között fennálló hajlító-nyomaték különbséggel állnak kapcsolatban. A hosszirányú nyíróerő értéke a semleges szálon a legnagyobb, az alsó és felső szál felé haladva csökken.

Hajlítófeszültségek. A klasszikus szilárdságtani elvek szerint a σ hajlítófeszültség egy gerenda tetszőleges pontjában a következő formulával számítható ki:

$$\sigma = (M/I) y$$

ahol M = a terhelő hajlító-nyomaték,
 y = a vizsgált pont távolsága a semleges szálától,
 I = a tartó keresztmetszetének a semleges szálon számított másodrendű (inercia-) nyomatéka.

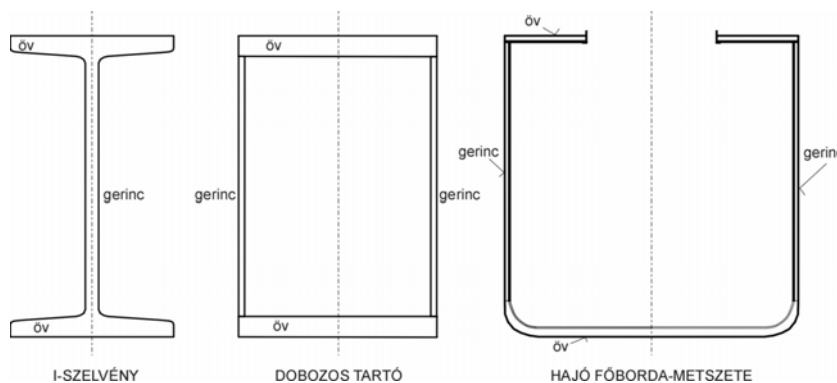
Amikor a tartó meghajlik, pl. púpos alakot vesz fel, a szélső szálakban fent húzófeszültség, lent nyomófeszültség ébred. Valahol a kettő között van olyan hely, ahol sem húzó-, sem nyomófeszültség nincs. Ez a hely a *semleges szál*, attól távolodva pedig a szélső szálakban ébred a legnagyobb húzó- ill. nyomófeszültség tiszta hajlítás esetén. Fontos megjegyezni, hogy a semleges szál síkja mindig a *keresztmetszet súlypontján* halad át. A képletben a felület másodrendű nyomatéka (I) a nevezőben van; emiatt minél nagyobb a másodrendű nyomaték értéke, annál kisebb lesz a hajlításból eredő feszültség. A *keresztmetszet másodrendű nyomatéka* a szelvénymagasság négyzetével arányos, ezért a szelvény magasságának kis mértékű növelése is kedvező hatású, csökkenteni a hajlításból eredő feszültséget. Használjuk a *keresztmetszeti tényező* (Z) fogalmát is hajlított tartók esetében; ez egyszerűen a másodrendű nyomaték és a vizsgált pont semleges szálától mért távolságának hányadosa, vagyis $I/y = Z$. A hajlítófeszültség (σ) így $\sigma = M/Z$.

A hajó mint hajlított tartó

Azt már láttuk, hogy a hajó úgy hajlik be, mint egy tartó; a hajótestet pedig valójában egy dobozos tartó teherhordó keresztmetszeteként foghatjuk fel, amelynél számítással meg lehet határozni a semleges szál helyét és a másodrendű nyomatékot. A *hajótest teherhordó profiljában az öveket* a fedélzet és a fenék alkotja, ezért ezek fontossága sokkal nagyobb a *hossz-szilárdságban*, mint az oldallemezeké, amelyek a *gerincet* képezik a hajlított profilban, illetve a nyíróerőknek állnak ellen. A hajótest dobozos profilját és a hagyományos I-tartót a 4.1.1.6 ábra hasonlítja össze. Hajónál a semleges szál általában közelebb van a fenékhez, mivel a fenéklemez vastagabb a fedélzetnél, a hajlításból eredő feszültségeken kívül ugyanis ki kell állnia a

víznyomást is. A keresztmetszet másodrendű nyomatékának számításánál valamennyi profil vagy lemezanyag, amely hosszmerítőként szolgál, nagy fontossággal bír, azonkívül minél messzebb van az adott anyag a semleges száltól, annál nagyobb a másodrendű nyomatéka a semleges szálra vonatkoztatva. A semleges száltól legmesszebb eső helyen azonban a keresztmetszeti tényező csökken, és ennek megfelelően a legmagasabb feszültségek a legmesszebb eső helyeken fognak ébredni, amilyenek pl. a *fedélzeti hosszmerítő*, a *mestersor* és a *medersor*. Ezek a lemezsorok emiatt általában vastagabbak a szomszédos soroknál.

A hajlítófeszültségek a hajóhossz középső szakaszán nagyobbak lehetnek, ez az oka annak, hogy az osztályozó intézetek a hajó középrészén a maximális merítők-méreteket írják elő, pl. a Lloyd's esetében ez a hajóhossz 40%-a. A merítők mérete fokozatosan csökkenhet a hajó végei felé haladva, kivéve néhány lokálisan erősen igénybe vett területet, ahol egyéb terhelési formák várhatóak.



4.1.1.1.6 ábra
Dobozos és I-tartó
összehasonlítása

Szilárdsági fedélzet.
Azt a fedélzetet,
amely a hajótest
teherhordó
keresztmetszetében a
legfelső övet képezi,

gyakran nevezik *szilárdsági fedélzetnek*. Bizonyos fokig ez félrevezető megfogalmazás, hiszen valójában mindegyik folyamatos fedélzet, amennyiben helyesen van kialakítva, szilárdsági fedélzet. A hajó hossza mentén a teherhordó keresztmetszet legfelső öve, azaz a szilárdsági fedélzet válthat egyik fedélzetről a másikra, ahol nagy felépítményeket alakítanak ki, vagy természetes törés van, mint amilyen egy emelt lakófedélzet. A nagyobb felépítmények hajlamosak *együtt dolgozni* és együtt deformálódni a hajótesttel, emiatt a szerkezetben jelentős mértékű feszültségek ébrednek. A korábban épült olyan hajók, amelyek könnyű szerkezetű nagy felépítménnyel készültek, erre már mutattak rossz példákat. A repedések megelőzése érdekében *expanziós csatlakozásokat* helyeztek el, amelyek megszakították a szerkezet folyamatosságát. Ezek a megoldások nem mindig voltak sikeresek, és maguk az *expanziós csatlakozások* is feszültségkoncentrációt okozhatnak a szilárdsági fedélzetnél, amelyet jobb elkerülni. A korszerű hajóépítésnél az az elfogadott megoldás, hogy a felépítmény végigmenő és olyan szilárd konstrukciójú, hogy keresztmetszeti tényezője egyenértékű azzal, ami a szilárdsági fedélzetnél akkor lenne, ha nem lenne felépítmény.

A terhelés, a nyíróerő és a hajlító-nyomaték kapcsolata.

Amint láttuk korábban, a hajó hossz-szilárdságának vizsgálatánál elengedhetetlen a vizsgált terhelési állapotban érvényes terhelési ábra megrajzolása. A hajó mindegyik

keresztmetszetében érvényes, hogy

$$p = b - w$$

ahol b = vízkiszorítás per hosszegység

w = súly per hosszegység

p = terhelés per hosszegység

A terhelési ábra közvetlenül mutatja a vízkiszorítás és súly különbségét, ha egymásra rajzoljuk a két görbét, és a különbséget vesszük, ahol a vízkiszorítás meghaladja a súlyt, ott a p értéke pozitív, ellenkező esetben negatív.

Amennyiben az összes terhelés megoszló jellegű, a nyíróerő meghatározására egy adott keresztmetszetben az integrálás a helyes kifejezés, nem az összegzés:

$$V = \int (b-w)dx = \int pdx$$

amelyben az integrálást a tartó baloldali végétől, vagyis a hajó farától addig a pontig végezzük a hajóhossz mentén, ahol a nyíróerőt meg akarjuk határozni. Jól látható az egyenletből, hogy *a hajótestnek, mint hajlított tartónak bármelyik keresztmetszetében a nyíróerő egyenlő a terhelési görbe alatti területtel a fartól a kérdéses keresztmetszetig.*

A területnek vannak pozitív ($b > w$) és negatív ($b < w$) részei, a teljes hajóhossz mentén azonban, mivel a hajó sztatikus egyensúlyi állapotban van, a teljes súly megegyezik a teljes vízkiszorítással. Tehát a helyesen megszerkesztett terhelési ábra esetén a görbe alatti teljes területnek zérónak kell lennie.

A hajlító-nyomaték kapcsolata a nyíróerővel hasonló, mint a nyíróerőé a terheléssel, vagyis *bármelyik keresztmetszetben a hajlító-nyomaték egyenlő a nyíróerő görbe alatti területtel a fartól a kérdéses keresztmetszeti.* Egyenletalakban ez a következő:

$$M = \int Vdx$$

Ezt az állítást ellenőrizhetjük a 4.1.1.1.2 ábra szerinti nyíróerő és hajlító-nyomaték ábrából, nem lehet nem észrevenni a hajlító-nyomaték ábra maximális ordinátájának kapcsolatát a nyíróerő ábrának a tartó baloldali vége és közepe közötti területével:

$$\text{nyíróerő ábra területe} = (P/2)(L/2) = PL/4 = M_{\max}$$

Természetesen más keresztmetszeteknél is elvégezhetjük ugyanezt az ellenőrzést, igaznak fog bizonyulni az állítás, hiszen minden tartóra érvényes a terhelés fajtájától függetlenül.

Az elmondottak alapján a terhelési ábrából megszerkeszthetjük a nyíróerő és hajlító-nyomaték ábrát. A művelet fordítottja az egyes *görbék meredekségének* meghatározásában segít. Például a hajó hossza mentén bármelyik pontban

$$P = dV/dx$$

$$V = dM/dx$$

Szavakba öntve ez azt jelenti, hogy van két olyan kapcsolati formánk, amellyel a görbék alakjához eljuthatunk.

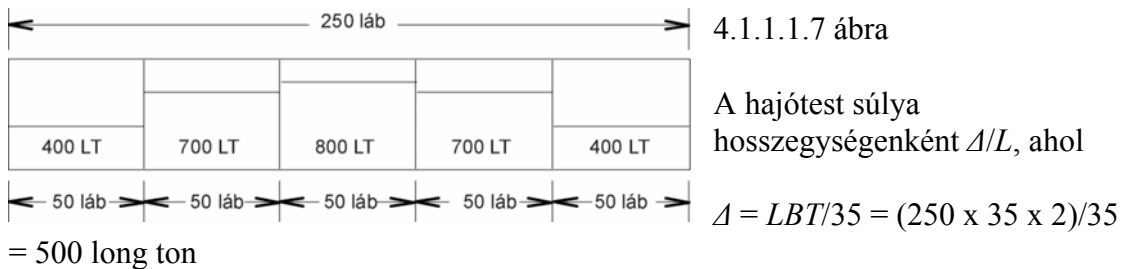
1. A *nyíróerő ábra* meredeksége a hajóhossz bármelyik pontjában egyenlő az ott ható terheléssel.
2. A *hajlító-nyomaték ábra* meredeksége a hajóhossz bármelyik pontjában egyenlő az ott ébredő nyíróerővel.

Folyamatos görbe esetén a zéró meredekség a maximum vagy minimum (negatív maximum) helyét jelzi, tehát a fenti állításokból következnek az alábbiak.

1. A nyíróerő maximális értéke abban a pontban ébred, ahol a terhelés értéke zéró, azaz, ahol a *terhelési görbe* metszi a tengelyt.
2. A hajlító-nyomaték maximális értéke abban a pontban ébred, ahol a nyíróerő értéke zéró, azaz, ahol a nyíróerő görbe metszi a tengelyt.

Számítási példa megrakott bárka esetében

A 4.1.1.1.7 ábra szerinti téglatest alakú bárka hossza 250 láb, szélessége 35 láb, és üres állapotban tengervízben 2 láb a merülése. Az üres hajó súlyát jó közelítéssel a teljes hossz mentén egyenletesen megoszló terhelésként tételezhetjük fel. A bárkán 5 raktér van kialakítva, mindegyik 50 láb hosszúságú. A rakomány elosztása is látható az ábrán, a bárka tengervízben úszik. A rakomány feltételezés szerint az egyes rakterek hossza mentén egyenletesen megoszló terhelést jelent. Számítsuk ki és rajzoljuk meg a súly, a vízkiszorítás, a terhelés, a nyíróerők és a hajlító-nyomaték görbéjét. A görbék értékeit az egyes válaszfalaknál és a maximumoknál határozzuk meg.



A hosszegységre eső hajótest súly ezzel

$$w_{\text{hajótest}} = 500/250 = 2,0 \text{ long ton/láb}$$

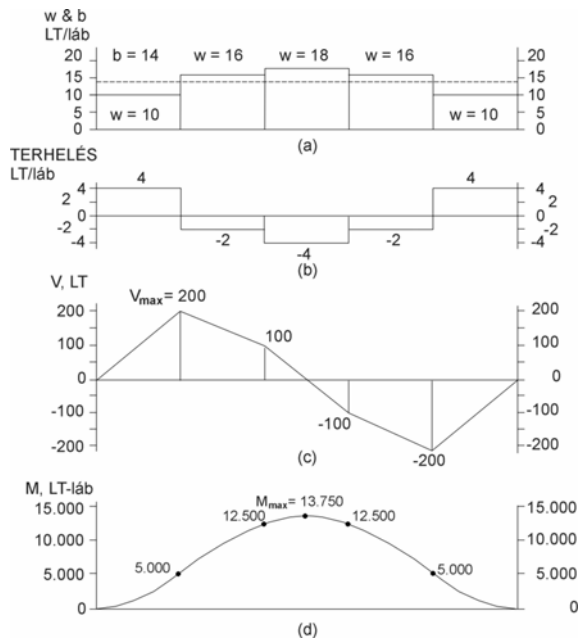
Az egyes rakterekben levő rakomány hosszegységenkénti súlya hasonlóan számítható ki.

#1 raktér: $400/50 = 8 \text{ long ton/láb}$
 #2 raktér: $700/50 = 14 \text{ long ton/láb}$

BBBZ-kódex

#3 raktér:	$800/50 = 16$ long ton/láb
#4 raktér:	$700/50 = 14$ long ton/láb
#5 raktér:	$400/50 = 8$ long ton/láb

Az üres hajó megoszló súlyát hozzáadva megkapjuk a bárka 5 szakaszának rakott súlyát hosszegységenként, azaz rendre 10, 16, 18, 16 és 10 long ton/láb. Ezek az értékek vannak jelen a 4.1.1.1.8 ábra (a) részletében megrajzolt súlygörbén.



4.1.1.1.8 ábra

A hosszegységre eső megoszló vízkiszorítás (felhajtóerő) a téglalakú hajótestnél egyenes úszáshelyzetben fartól orrig állandó, és megegyezik a súlyból adódó vízkiszorításnak a hosszal elosztott értékével. A súlyból adódó vízkiszorítás (üres hajó és rakomány együtt)

$$\Delta = 500 + 400 + 700 + 800 + 700 + 400 = 3.500 \text{ long ton}$$

Tehát a hosszegységenkénti vízkiszorítás

$$b = 3.500/250 = 14 \text{ long ton/láb}$$

A vízkiszorítás görbét a súlygörbébe rajzoltuk meg szaggatott vonallal. Észre kell vennünk, hogy az alatta levő terület egyenlő a súlygörbe alatti területtel. A terhelési ábra a $b-w$ értékek felrajzolásával adódik. A többlet vízkiszorítás pozitív előjellel szerepel. Tehát a terhelési ábra a (b) részleten látható. Az ordináták mértékegysége long ton/láb, a nyíróerő ábrát úgy rajzoljuk meg, hogy mindegyik válaszfalig a hajófartól kiindulva meghatározzuk a terhelési ábra görbéje alatti területet. Az egyes válaszfalakig a kapott területértékek az alábbi táblázatos számításban láthatóak. A terhelési ábra görbéjének negatív értéke esetén a területértékek negatív előjellel szerepelnek, csökkentik a nyíróerő értékét.

#1 válaszfal:	$V = 4 \times 50 = 200$ long ton
#2 válaszfal:	$V = 200 - 2 \times 50 = 200 - 100 = 100$ long ton
#3 válaszfal:	$V = 100 - 4 \times 50 = 100 - 200 = -100$ long ton
#4 válaszfal:	$V = -100 - 2 \times 50 = -100 - 100 = -200$ long ton
Orr:	$V = -200 + 4 \times 50 = -200 + 200 = 0$ long ton

Ezeket az értékeket rajzoltuk fel a nyíróerő ábrán az ábra (c) részletében. A korábban elmondott megállapítások igaznak bizonyultak, pl. a terhelési görbe a #1 és #4

4 A HAJÓK SZERKEZETI FELEPÍTÉSE 4.1 HAJÓTEST

2. kiadás 2009.

4.1.1 A HAJÓK SZILÁRDSÁGA

válaszfalnál metszi át a tengelyt, és a nyíróerőnek ott van a maximális pozitív illetve negatív értéke. Ellenőrizhető, hogy a nyíróerő ábra egyes szakaszainak meredeksége megegyezik a felette levő terhelési ábra ugyanazon szakaszban mérhető ordinátaival. A nyíróerő ábra meredeksége csak a két végnél pozitív értékű, ahol a terhelés is pozitív. A nyíróerő azonkívül zéró értékű a bárka két végénél. A hajók esetében mindig ez a helyzet, amennyiben nincs koncentrált terhelés vagy alátámasztás.

A hajlító-nyomaték ábra a nyíróerő ábra görbéje alatti terület összegzéséből nyerhető. Mivel a nyíróerő zéró értékű a bárka végeinél, a hajlító-nyomaték görbe értéke és meredeksége egyaránt zéró értékű a végeknél. A hajlító-nyomaték görbe egyes szakaszai másodrendű parabolák, mert az egyenes szakaszokból álló nyíróerő görbe integrálásakor másodrendű görbét kapunk. Azonban az intervallumokban, ahol a nyíróerő növekedő tendenciájú (pozitív meredekség, ebben a példában a végeknél levő két raktér), a hajlító-nyomaték görbe meredeksége nő, alulról domború. Az olyan szakaszoknál, ahol a nyíróerő csökken (negatív meredekség, ebben az esetben a hajó középső része), a hajlító-nyomaték görbe meredeksége csökken, a görbe alulról homorú. Ahol a nyíróerő görbe átmetszi a tengelyt (jelenleg a hajó főborda-metszete), a hajlító-nyomaték görbe meredeksége zéró, mivel maximális értékét ott éri el. A hajótest és a terhelés ebben az esetben egyaránt szimmetrikus a főbordára, ezért a hajlító-nyomaték ábra is szimmetrikus. A kezdeti minőségi megállapítások után számszerűen is határozzuk meg a hajlító-nyomaték görbe értékeit.

$$\#1 \text{ válaszfal: } M = 1/2 \times 200 \times 50 = 5.000 \text{ láb-long ton}$$

$$\#2 \text{ válaszfal: } M = 5.000 + 1/2(200 + 100)50 = 5.000 + 7.500 = 12.500 \text{ láb-long ton}$$

$$\text{Főborda: } M = 12500 + 1/2 \times 100 \times 25 = 12.500 + 1.250 = 13.750 \text{ láb-long ton}$$

A szimmetria miatt a további számítás elhagyható. A hajlító-nyomaték ábra a (d) részletben látható. A hajlító-nyomatékgörbe értékeit közvetlenül a terhelési diagramból is meg lehet határozni, ha a nyíróerő ábrára nincs szükség. A hajlító-nyomaték a hajóhossz bármelyik pontján egyenlő a terhelési görbének az adott pont és valamelyik végpont közötti szakasza alatt levő terület nyomatékával az adott pontra. Ellenőrizzük például a #1 válaszfal keresztmetszetében a hajlító-nyomaték értékét úgy, hogy az attól balra eső terhelési görbe alatti terület nyomatékát kiszámítjuk a #1 válaszfalra. A nyomaték a terület szorzata a terület súlypontjának karjával.

$$\text{Terhelési görbe alatti terület a \#1 válaszfalig} = 4(50) = 200 \text{ long ton}$$

$$\text{Nyomaték karja a súlyponttól a \#1 válaszfalig} = 25 \text{ láb}$$

$$M = 200(25) = 5.000 \text{ láb-long ton}$$

A hajóhossz tetszőleges pontjára elvégezhető a számítás, a raktérekben belül levő pontokra is.

A példa az eljárást szemlélteti, amelyet a hajó egyes keresztmetszeteiben ébredő nyíróerők és hajlító-nyomatékok és azok hossz menti eloszlásának meghatározásánál

kell alkalmaznunk. A hajó acélszerkezetének tervezője számára a maximális nyíróerők és hajlító-nyomatékok a fontosak, illetve azok helye a hossz mentén. A számítás egyszerűsége érdekében választottunk egyszerű hajótestet illetve rakományelosztást.

A hajótest alakjából és a rakodás módjából eredő komplikációk.

A szokásos hajótestek esetében sem a hajótest, sem a rakomány eloszlása nem szimmetrikus a főbordára, és trim is van szinte minden esetben, először tehát a sztatikus egyensúlyi állapot jelentő úszáshelyezethez a vízvonalat kell meghatározni. Ha a számítás elvégzésének az a célja, hogy a hajó hullámos vízen kialakuló terhelését határozzuk meg, a sztatikus egyensúlyt tovább nehezíti a hullámrendszer alakja. Minden esetben a bordametszetek felületét kell a vízvonaltól meghatározni (pl. a *Bonjean-görbék* segítségével), és abból felrajzolni a bordafelület görbét. A hajóhossz bármelyik pontjában a hosszegységre eső vízkiszorítás egyenlő a bordametszet-felületnek és a víz fajsúlyának (ρg) a szorzatával. Emiatt a vízkiszorítás eloszlásának görbéje azonos alakú, mint a bordafelület görbe. A görbe alatti terület a hajó vízkiszorításával egyenlő, súlypontja pedig ott helyezkedik el hosszirányban, ahol a hajó vízkiszorításának súlypontja. A vízkiszorítás görbét gyakran helyettesítik lépcsőzetes közelítéssel, ahol 20 vagy 40 részre osztják a hajóhosszt, és a hosszegységre eső vízkiszorítást egy szakaszon belül konstansként kezelik. A közelítés miatt a számítás nagyon jól alkalmazható a számítógépes gyakorlatban.

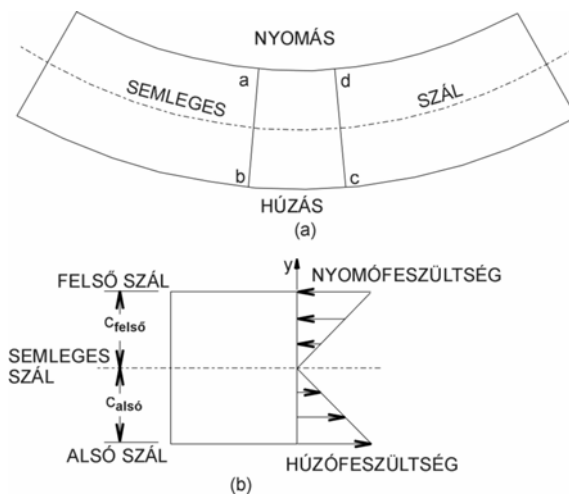
A hajó súlyeloszlásának meghatározásakor is alkalmazzák a hossz 20-as vagy 40-es felosztását, és ennek megfelelően határozzák meg az egyes szakaszokra a hosszegységre eső súlyt, amelynek során a lépcsős görbe alatti területnek és a terület súlypontjának meg kell egyeznie a vízkiszorítás területével és súlyponthelyzetével. A súlyok és vízkiszorítás görbéjének megszerkesztése után a terhelési ábra a már ismert módon szerkeszthető meg, az eljárás többi lépése pedig megegyezik a az előző példában követett eljárással. Ha a hajót 20 szakaszra osztjuk, a terhelési ábra 20 vízszintes lépcsőből áll, a nyíróerő ábra ugyanannyi ferde egyenes szakaszból, amelyek folytonos görbét alkotnak, a hajlító-nyomaték ábra görbéjét pedig 20 parabolikus szakasz alkotja, amelyek törés nélkül csatlakoznak, és folytonos görbében állnak össze.

A hajó szerkezetének igénybevétele az ébredő terhelések miatt

Korábban már láttuk, hogy a szilárdságtani elveknek megfelelően a hajóban, mint úszó tartóban érredő nyíróerők és hajlító-nyomatékok feszültségeket ébresztenek, amelyekre a hajótest deformációkkal reagál. A 4.1.1.1.9 ábra egy tartót mutat, amelyet tisztán hajlító igénybevétel terhel. A tartó meghajlása túlzott az érthetőség érdekében.

A keresztmetszetek a tartó deformációja során síkban maradnak, ezért a tartó olyan szakaszai, amelyek a deformáció előtt derékszögűek voltak, mint az ábrán az *abcd* négyszög, a látható módon eltorzul. Világosan látható, hogy a tartó szakaszának felső része összenyomódik, tehát nyomó feszültség ébred benne, ezzel szemben az alsó rész megnyúlik, tehát húzófeszültséget szenved. Az is következik ebből, hogy kell lennie egy semleges síknak (a deformáció előtt síkalakú), az ábrán a *semleges szál (NA)* jelöli, ahol sem nyomó-, sem húzófeszültség nem ébred a tartóban. A tartó mindegyik szálában ébredő húzó- vagy nyomófeszültség (és ezzel a keletkező deformáció)

egyenesen arányos a szálnak a semleges száltól való távolságával, akár alatta van, akár felette. Tehát a tartó alsó és felső (szélső) szálában ébred a legnagyobb feszültség. (Tulajdonképpen ez az oka annak, hogy a hajlító-igénybevételt szenvedő szerkezeti elemek általában olyan alakúak, ld. 4.1.1.1.6 ábra, ahol a szélső szálakban van koncentrálni az anyag. Az is világos ebből, miért a fedélzet és a fenék lemezeiben ébred a legnagyobb feszültség, amikor a hajó púpos vagy belógó alakot vesz fel.) A tartók semleges szála a keresztmetszetek súlypontjával egyezik meg. A szimmetrikus keresztmetszetű tartók esetében ez tehát a szelvény fele magasságánál helyezkedik el. Az ábrán látható tartó egy belógó alakú hajónak felel meg, ahol a fenéklemez húzó, a fedélzet pedig nyomó igénybevételt szenved. Púpos alaknál a feszültségek az ellenkező értelműre váltanak, a fedélzetben van húzó a fenékben nyomó igénybevétel.



4.1.1.1.9 ábra Tartó tisztán hajlító igénybevétele

A hajlítás miatt ébredő hosszirányú feszültségek. Amint már korábban bemutattuk, a tartó szálaiban ébredő hosszirányú feszültségeket a szilárdságtanból ismert következő képlet fejezi ki.

$$\sigma_y = My/I$$

ahol σ_y = a húzó- ill. nyomófeszültség a

semleges száltól y távolságban

M = a vizsgált keresztmetszetet terhelő hajlító-nyomaték

y = a keresztmetszet vizsgált pontjának függőleges távolsága a semleges száltól

I = a tartó keresztmetszetének inercianyomatéka a semleges szála

A következőkben bemutatjuk az *inercianyomaték számítási módját*.

A képletet leggyakrabban csak arra használják, hogy a tartó keresztmetszetének szélső szálaiban ébredő feszültségeket határozzák meg. Ezek távolságát a semleges száltól c betűvel jelölik, a hajók esetében, ahol a keresztmetszet nem szimmetrikus a semleges szál körül, két különböző értéke van a c -nek, amelyeket a következő képletek tartalmaznak:

$$\sigma_{\text{felső}} = Mc_{\text{felső}}/I$$

$$\sigma_{\text{alsó}} = Mc_{\text{alsó}}/I$$

Ezek a képletek tehát a hajó adott keresztmetszetét terhelő hajlító-nyomaték hatására a fedélzeti és fenékszálban ébredő feszültségek meghatározására szolgálnak.

A hajók szilárdsági számításainál alkalmazott mértékegységek. A hajótest méretei és a

BBBZ-kódex

terhelő nyomatókok más tartókhöz képest különlegesen nagyok, ezért a hajók szilárdsági számításainál teljesen egyedi mértékegységeket alkalmazunk. Amikor a számításokat még tisztán kézzel végezték, és el akarták kerülni, hogy túlzottan nagy számokkal kelljen dolgozni, egy bizonyos *hibrid mértékrendszer*t fejlesztettek ki, amelyben a hüvelyk és a láb, illetve a centiméter és a méter együtt volt használatban. A következő táblázat ezeket a mértékegységeket tünteti fel, és összeveti azokkal, amelyeket már szilárdságtani számításoknál használnak. A területek, amelyek jele a, a szerkezeti elemek keresztmetszetének felületét jelenti.

	<i>Szilárdságtani számítások</i>		<i>Hajószilárdsági számítások</i>	
	<i>U.S.</i>	<i>SI</i>	<i>U.S.</i>	<i>SI</i>
σ	font/hüvelyk ²	Pa	long ton/hüvelyk ²	MN/m ²
M	hüvelyk-font	Nm	láb-long ton	MNm
c	hüvelyk	cm	láb	m
I	hüvelyk ⁴	cm ⁴	hüvelyk ² -láb ²	cm ² m ²
a	hüvelyk ²	cm ²	hüvelyk ²	cm ²

A keresztmetszeti tényező

A feszültség kifejezésében a hajlító-nyomaték a tartó hosszától és terhelésétől függ, az I és c azonban egyaránt a tartó keresztmetszetének jellemzőitől függ. Emiatt az I/c mennyiség szintén a tartó keresztmetszetének jellemzője. Elnevezése *keresztmetszeti tényező*, jelölésére pedig a Z betűt használják:

$$Z = I/c$$

A tartó keresztmetszeti tényezője jó mérőszáma a hajlításnak való ellenállási képességének. A Z mértékegysége hossz a köbön. A hajószilárdsági számításoknál a hüvelyk²-láb ill. cm² x m a járatos egység. Hajók esetében, mivel nem szimmetrikus keresztmetszetekkel van dolgunk, a $Z_{\text{felső}}$ és $Z_{\text{alsó}}$ értékét számítjuk ki, a képletbe a c helyébe $c_{\text{felső}}$ illetve $c_{\text{alsó}}$ kerül. A feszültség képlete ezzel a következőképpen írható:

$$\begin{aligned}\sigma_{\text{felső}} &= M/Z_{\text{felső}} \\ \sigma_{\text{alsó}} &= M/Z_{\text{alsó}}\end{aligned}$$

A keresztmetszeti tényező kiszámítása. A hajótestben a hosszirányú hajlító-nyomaték hatására ébredő maximális feszültségek meghatározásához ki kell számítani a hajó mindkét (fedélzet és fenék) keresztmetszeti tényezőjét abban a keresztmetszetben, amely várhatóan a maximális nyomaték környezetében van. A szokásos hajótestek és rakodási formák esetében a maximális hajlító-nyomaték a főborda környékén alakul ki. Az osztályozó intézetek előírásai megkövetelik, hogy a főbordánál alkalmazott szerkezeti elemeket, amelyek méretét a szabályok előírják, a hajóhossz középső negyted részén azonos módon végig kell vinni annak érdekében, hogy a hajó rendelkezzen a megfelelő hossz-szilárdsággal.

A keresztmetszeti tényező számításánál csak azokat a hossz-szilárdságot biztosító

4 A HAJÓK SZERKEZETI FELÉPÍTÉSE 4.1 HAJÓTEST

2. kiadás 2009.

4.1.1 A HAJÓK SZILÁRDSÁGA

 szerkezeti elemeket veszük számításba, amelyek folyamatosan áthaladnak a keresztválaszfalakon is, mert a kereszttartók és a rövid hosszuelemek nem vesznek részt a hosszirányú hajlító-nyomaték viselésében. Tehát ahhoz, hogy a főborda környezetében levő négytized hajóhosszon belül a legkisebb keresztmetszeti tényezőt meghatározhassuk, azt a keresztmetszetet kell kiválasztanunk, ahol a fedélzeten a legszélesebb nyílás van kialakítva. A folyamatos hosszirányú szerkezeti elemek közül a keresztmetszeti tényező számításánál a következőket lehet figyelembe venni:

- fedélzetlemez a rakodónyíláson kívül,
- oldallemez, fenéklemez és hosszválaszfalak,
- hossz-szimmetriasíokban levő függőleges gerinc, oldal-hosszmerevítők és fedélzeti hosszmerítők,
- hosszbordák a fedélzeten, oldalakon, fenéken, belső fenéken és hosszválaszfalakon.

A hajó bordakereteinek szimmetrikus kialakítása miatt a szerkezeti elemeket csak egyik oldalon vesszük számításba, és a kapott eredményt kettővel szorozzuk.

A szerkezeti elemek kiválasztása után a számítást kézzel vagy számítógéppel is el lehet végezni. Ha kézzel végezzük, célszerű a nyomaték számításához a tengelyt a becsült súlypont közelében kiválasztani, hogy a számértékek, amelyekkel dolgozunk, minél kisebbek legyenek. Számítógépes számításnál az alapvonalat érdemes választani, ott nincs jelentősége a számok nagyságrendjének, a számértékek pedig pozitív előjelűek lehetnek. A számítás menete a következő.

1. Válasszuk ki a nyomaték tengelyét a fentiek szerint.
2. A következő három jellemzőt mindegyik szerkezeti elemre ki kell számítani a sablon szerinti méretek felhasználásával, nem szükséges korrekció a lemezvastagság miatt:

a = keresztmetszet, hüvelyk² vagy cm²

d_n = a felületelem súlypontjának függőleges távolsága a tengelytől, láb vagy m

i_0 = saját súlypontra vett inercianyomaték hüvelyk²-ft² vagy cm²-m²

A kereskedelmi acélszelvények esetében a gyártók megadják az i_0 értékét. A mértékegységeket azonban a fentiek szerint meg kell változtatni. A függőleges lemezeknél $i_0 = (1/12)ah^2$, ahol 'a' a keresztmetszet felülete (hüvelyk² vagy cm²), h pedig a lemez függőleges mérete láb vagy m mértékegységben. A vízszintes lemezek i_0 értéke kihagyható a számításból, mivel elhanyagolhatóan kis számértékeket adnak.

3. Számítsuk ki mindegyik szerkezeti elemnél az első és másodrendű nyomatékokat a kiválasztott tengelyre:

ad_n , hüvelyk²-láb vagy cm² x m

ad_n^2 , hüvelyk²-láb² vagy cm² x m²

4. Számítsuk ki a következő összegeket az összes szerkezeti elemet figyelembe véve, majd szorozzuk meg kettővel:

A = a keresztmetszet teljes felülete = $2\Sigma a$

M_A = a keresztmetszet nyomatéka a kiválasztott tengelyre = $2\Sigma ad_n$

I_n = a keresztmetszet inercianyomatéka a kiválasztott tengelyre = $2\Sigma(i_0 + ad_n^2)$.

BBBZ-kódex

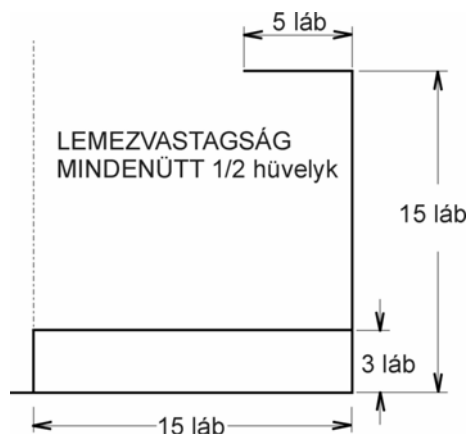
5. Számítsuk ki a kiválasztott tengely függőleges távolságát a valódi semleges száltól:

$$D_g = \frac{\sum a d_n}{\sum a}$$
6. A párhuzamos tengelyekre vonatkozó szabállyal számítsuk ki a teljes keresztmetszet inercianyomatékát a semleges szálra:

$$I_0 = I_n - A D_g^2$$
7. Számítsuk ki a $Z_{\text{felső}}$ és $Z_{\text{alsó}}$ értékét:
 $c_{\text{felső}}$ = a felső fedélzet távolsága a hajóoldalnál a semleges száltól, láb vagy méter
 $c_{\text{alsó}}$ = a fenéklemez távolsága a semleges száltól, láb vagy méter
 A keresztmetszeti tényezők mértékegysége hüvelyk²-láb vagy cm² x m.

A keresztmetszeti tényezőt legjobb táblázatos módon kiszámítani, amint a következő példa demonstrálja.

Példa



4.1.1.1.10 ábra

A 4.1.1.1.10 ábra egy bárka folyamatos hossz-szerkezeti elemeit mutatja, amelyeket a keresztmetszeti tényező számításánál figyelembe lehet venni. A bárka hossza $L = 150$ láb, szélessége $B = 30$ láb, oldalmagassága $D = 15$ láb. A lemezek vastagsága mindenütt $1/2$ hüvelyk. Határozzuk meg a semleges szál helyét, a főbordametszet teljes inercianyomatékát és mindkét keresztmetszeti tényezőt. Határozzuk meg a feszültségeket is, amikor a bárka púpos alakot vesz

fel, és a hajlító-nyomaték 10.000 láb-long ton értékű. A számítást az alábbi táblázatban végeztük el. A szerkezeti elemek oszlopban a méretek hüvelykben vannak megadva, tehát azok szorzata adja ki a felületet négyzethüvelykben. A függőleges gerincet a hajó szimmetriásikja kettéosztja, ezért annak csak a fele került bele a számításba. A táblázat összegzése tehát a fél keresztmetszet értékeit tartalmazza.

A nyomatékok tengelyének a bárka alapvonalát választottuk. A saját súlypontra vett inercia csak az oldallemeznél és a függőleges gerincnél szerepel, mivel a többieknél elhanyagolható.

Tétel	Szerkezeti elem	a hüvelyk ²	d_n láb	$a d_n$ hüvelyk ² -láb	$a d_n^2$ hüvelyk ² -láb ²	h láb	i_0 hüvelyk ² -láb ²
Főfedélzet	60x0,5	30	15,0	450,0	6.750,0		
Oldallemez	180x0,5	90	7,5	675,0	5.062,5	15	1,688
Tankfedélzet	180x0,5	90	3,0	270,0	810,0		

Feneklemez	180x0,5	90	0,0	0,0	0,0		
Függ. gerinc	½ (36x0,5)	9	1,5	13,5	20,3	3	7
Metszet fele összesen		309		1,408,5	12.642,8		

$$\begin{aligned}
 A &= 2\Sigma a = 2 \times 309 = 618 \text{ hüvelyk}^2 \\
 D_g &= \Sigma ad_n / \Sigma a = 1.408,5 / 309 = 4,56 \text{ láb} \\
 I_n &= 2\Sigma(i_0 + ad_n^2) = 2(1.695 + 12.642,8) = 28.676 \text{ hüvelyk}^2\text{-láb}^2 \\
 I_0 &= I_n - AD_g^2 = 28.676 - 618(4,56)^2 = 15.826 \text{ hüvelyk}^2\text{-láb}^2 \\
 c_{\text{felső}} &= D - D_g = 15,00 - 4,56 = 10,44 \text{ láb} \\
 Z_{\text{felső}} &= I_0 / c_{\text{felső}} = 15.826 / 10,44 = 1.516 \text{ hüvelyk}^2\text{-láb} \\
 c_{\text{alsó}} &= D_g = 4,56 \text{ láb} \\
 Z_{\text{alsó}} &= I_0 / c_{\text{alsó}} = 15.826 / 4,56 = 3.471 \text{ hüvelyk}^2\text{-láb}
 \end{aligned}$$

A púpos úszáshelyzet miatt a fedélzet lemezében húzó, a fenék lemezében pedig nyomó feszültség ébred.

Húzófeszültség a fedélzetben:

$$\sigma_{\text{felső}} = M / Z_{\text{felső}} = 10.000 / 1.516 = 6,60 \text{ long ton/hüvelyk}^2 = 14.784 \text{ font/hüvelyk}^2$$

Nyomófeszültség a fenékben:

$$\sigma_{\text{alsó}} = M / Z_{\text{alsó}} = 10.000 / 3.471 = 2,88 \text{ long ton/hüvelyk}^2 = 6,451 \text{ font/hüvelyk}^2$$

Hajlításból eredő feszültség megengedett értéke és minimális keresztmetszeti tényező. A világ összes osztályozó intézete nyilvánosságra hozta előírásait, amelyek a kereskedelmi hajók elégséges hossz-szilárdságát definiálják. Amikor egy adott osztályozó intézet előírásai szerint egy bizonyos hajó középső részén a keresztmetszet konstrukcióját ellenőrizzük, meglehetősen sok számítást kell végezni, egy sor képletet kell alkalmazni hajótípustól és a szolgálat körülményeitől függően. Az egyes osztályozó intézetek előírásai között vannak különbségek, de a következő mennyiségek mindegyiknél központi szerepet kapnak:

- a hajó középrészét terhelő maximális hajlító-nyomaték, amely független attól, hogy a hajó sima vagy hullámos vízben úszik,
- a hajlításból eredő névleges megengedhető feszültség,
- minimálisan szükséges keresztmetszeti tényező a hajó középső szakaszán.

Emellett az előírások hossz-szilárdsággal foglalkozó fejezete foglalkozik a nyíróerővel és nyírófeszültséggel, a fedélzet és a rakodónyílások kialakításával, valamint a *nagyobb szilárdságú szerkezeti anyagok* felhasználásával. Ezek a képletek általában a hajó hosszának, szélességének és hasábos teltségének függvényében fejezik ki a hajlító-nyomatékot. Szemléltetésül négy különböző hajóra alkalmaztuk az ABS (American Bureau of Shipping, amerikai osztályozóintézet) képleteit és az alábbi táblázatokban foglaljuk össze a jellemzők értékeit.

BBBZ-kódex

	<i>Típus</i>	<i>L, láb(m)</i>	<i>B, láb(m)</i>	<i>C_B</i>
1-es hajó	Szárazáru szállító	528 (161)	76,0 (23,2)	0,612
2-es hajó	Kőolajtermék tankhajó	630 (192)	90,0 (27,4)	0,772
3-as hajó	Konténerszállító	810 (247)	105,7 (32,2)	0,579
4-es hajó	Kőolajszállító tankhajó	1.060 (323)	178,0 (54,3)	0,842

Hajlító-nyomaték a főbordánál. A hajónak olyan konstrukcióval kell rendelkeznie, hogy elviselje az alábbi teljes maximális hajlító-nyomatékot (M_t):

$$M_t = M_{sw} + M_w$$

A simavízi hajlító-nyomaték (*still-water bending moment*, M_{sw}) a tervezés során különféle rakodási helyzetekre meghatározott nyomatékok közül a legnagyobb. Az intézet emellett „standard” simavízi hajlító-nyomaték értékeket is megad, amelyet a tervező használhat, hogy ne kelljen a részletes számításokat elvégeznie az M_{sw} meghatározásához, mielőtt a részletes számításokra sor kerülne. A hullámos vízi hajlító-nyomaték (M_w) egy sokéves tapasztalat alapján megalkotott statisztikai formulával fejezhető ki. A hajótervező megteheti azt is, hogy ezeket a formulákat jóváhagyott számítógépes programokkal helyettesítse az M_w kiszámításánál. Az alábbi táblázatban található eredményeket az említett standard formulákból nyertük. Az értékek kerekítve vannak.

	<i>1-es hajó</i>		<i>2-es hajó</i>		<i>3-as hajó</i>		<i>4-es hajó</i>	
	<i>láb-LT</i>	<i>MT-m</i>	<i>láb-LT</i>	<i>MT-m</i>	<i>láb-LT</i>	<i>MT-m</i>	<i>láb-LT</i>	<i>MT-m</i>
M_{sw}	158.000	48.900	318.000	98.500	619.000	191.700	2.222.000	688.100
M_w	229.000	70.900	466.000	144.300	912.000	282.400	3.247.000	1.005.600
M_t	387.000	119.800	784.000	242.800	1.531.000	474.100	5.469.000	1.693.700

Hajlításból eredő névleges megengedhető feszültség. Az építési és gyártási előírásoknak nemcsak a terhelés és a szerkezeti elemek vonatkozásában kell garantálni, hogy a megfelelően elkészített szerkezetek, gépek, eszközök nem romlanak el üzemelés közben, hanem az azokban ébredő feszültségek értékét is maximálni kell, még abban az esetben is, ha a megengedett maximális terhelés hat rájuk. A legnyilvánvalóbb követelmény az, hogy sem a folyáshatárt, sem a szakítószilárdságot nem szabad elérnie a feszültség értékének üzem közben. A maradó alakváltozás a szerkezeti elemekben azok használhatóságát komolyan veszélyezteti, a szerkezet törése pedig katasztrofális következményekkel jár.

Az olyan szerkezeteknél, amilyen a hajó is, a legszélsőségesebb terhelések a természeti erőktől erednek, amelyek az ember ellenőrzésén kívül esnek. A mérnökök és az ős segítségükre siető tudósok legfeljebb azt tehetik, hogy olyan kutatásokat végeznek, amelyek a maximális értékek becslésére lehetőséget adnak. A tengeren mindig van annyi kiszámíthatatlanság, hogy szükséges a nagyobb biztonsági tényező alkalmazása a megengedhető feszültségek specifikálásánál.

4 A HAJÓK SZERKEZETI FELEPÍTÉSE 4.1 HAJÓTEST

2. kiadás 2009.

4.1.1 A HAJÓK SZILÁRDSÁGA

Az ABS előírásai alapján a hajlításból eredő névleges megengedhető feszültsége (f_p) értékét a kiszámítottuk a fenti négy hajóra, ezek a következők:

	Hajlításból eredő névleges megengedhető feszültsége (f_p)	
	long ton/hüvelyk ²	MT/cm ²
1-es hajó	10,25	1,614
2-es hajó	10,37	1,633
3-as hajó	10,57	1,665
4-es hajó	10,69	1,684

Az ABS a hajók hossz-szilárdságához hozzájáruló szokásos szerkezeti elemekhez olyan acélokat ír elő, amelyek folyáshatára minimálisan 45.500 font/hüvelyk², amely 20,31 long ton/hüvelyk², illetve 3,20 MT/cm². Látható, hogy ez az érték kb. kétszerese a megengedett feszültségnek, tehát a biztonsági tényező kettő körül van. Amint láttuk, a nagyobb hosszal rendelkező hajóknál a megengedhető feszültség is nagyobb, ezt azonban nem szabad úgy felfogni, hogy a hosszabb hajókat kisebb biztonsági tényezővel építhetjük. Ugyanis a megengedhető feszültségek értékét úgy dolgozták ki, hogy figyelembe vették a teherhordó lemezek és profilok előre látható korróziós folyamatát is, amely a sokéves szolgálatban azok elhasználódását okozza. A lemezeket vastagabbra választják, mint amilyenre kezdetben szükség lenne, hogy hosszabb idő, kb. 25 év után is még megfelelően ellenállhassanak a hajlító-nyomatékoknak. A korrózió pedig a vékonyabb és a vastagabb lemezeknél azonos sebességgel használja el az anyagot, ezért százalékosan a rövidebb hajókhoz használt vékonyabbaknál magasabb arányt jelent. Ez tehát azt jelenti, hogy kezdetben nem azonos a megengedhető feszültség, azonban élettartamuk végén ez kiegyenlítődik. Másképpen fogalmazva az új hajók közül a rövidebbek százalékosan több felesleges vasat tartalmaznak, amelyet életük során azonban a korrózió miatt elveszítenek.

Előírt keresztmetszeti tényező. Az előírt keresztmetszeti tényező a hajó középső részén (SM) a következő képlettel határozható meg:

$$SM = M_t/f_p$$

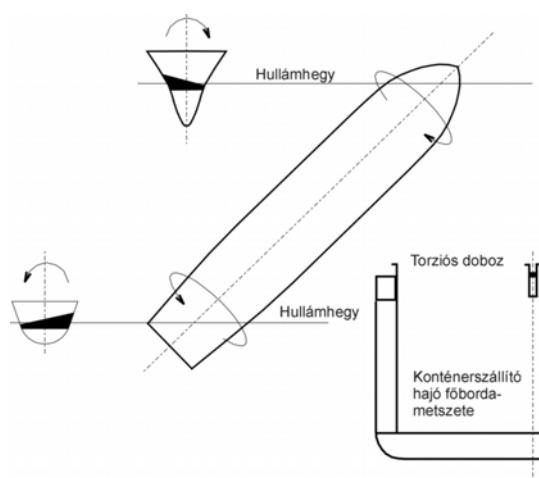
Vagyis az előírt keresztmetszeti tényező a maximális hajlító-nyomaték és a megengedhető feszültség hányadosa. Az előbbi négy hajónál az alábbi táblázat szerint alakul.

	Előírt keresztmetszeti tényező a hajó középső részén (SM)	
	hüvelyk ² -láb	cm ² -m
1-es hajó	37,800	74,200
2-es hajó	75,600	148,700
3-as hajó	144,800	284,700
4-es hajó	511,600	1,005,800

A hajó tervezésének kezdeti stádiumában a szerkezeti elemek osztályozó intézeti előírások szerinti kiválasztása után a hajó középső részének két keresztmetszeti tényezőjét a példában látható eljárással határozzák meg. A keresztmetszeti tényezők mindegyikének legalább akkorának kell lennie, mint az osztályozó intézet standard formuláiból kiadódó érték. Ha nem ez a helyzet, a megfelelő helyeken (leginkább a fedélzetnél és a fenéken) meg kell növelni a szerkezeti elemek méretét, hogy a minimális értéket el lehessen érni.

4.1.1.2 Keresztzilárdság

Amikor a hajóra keresztirányú erők hatnak, azok a jármű keresztmetszetének alakját igyekeznek megváltoztatni, ezért keresztirányú feszültségeket ébresztenek benne.



4.1.1.2.1 ábra Torziós igénybevétel

Ezeket az erőket okozhatja pl. a hidrosztatikus nyomás, a hullámok dinamikus terhelése vagy a rakomány és a szerkezeti súly akár közvetlenül, akár a hajó mozgásából fakadó változások eredményeként.

A *keresztzilárdság* számításával a legtöbb hajótervezési és építési szakkönyv nem foglalkozik részletesen. Ennek több oka is van, elsődlegesen az, hogy a keresztirányú terhelések nagyságrendileg a hosszanti

terhelések alatt vannak, a másik pedig az, hogy a hossz-szilárdságot biztosító szerkezeti elemek merevségének biztosítása (alátámasztása) garantálja, hogy a hajóosztályozó intézet előírásainak megfelelően kiválasztott szerkezeti bordaosztás szerinti keresztmetszeteknél olyan merev keretszerkezet legyen kialakítva, amely ellenáll a *keresztirányú hajlító, nyomó és nyíró igénybevételeknek*.

Az elmondottak nem jelentik azt, hogy a hajótervezőnek nem kell foglalkoznia a keresztzilárdság biztosításával és ellenőrzésével. A hajótervező a kiválasztott szerkezeti elemekből álló bordakeretre felrajzolja a várható legkedvezőtlenebb terhelési formát, és elvégzi a számítást, azonban a kapott feszültségértékek rendszerint egy nagyságrenddel vannak a hosszanti igénybevételből adódó feszültségek alatt, tehát a hossz-szilárdságnál biztosított biztonsági tényező elégséges.

Az alábbiakban néhány olyan terhelési formát mutatunk be, amelyet a bordakereteknek kell elsősorban elviselniük.

Torzulás

Amikor a hajó keresztirányú lengőmozgást végez, a fedélzet saját síkjában vízszintesen elmozdul a fenékszerkezethez képest, az oldalszerkezet pedig egyik oldalon függőlegesen mozdul el a másik oldalhoz képest. Ez a deformáció *torzulás* (angolul

racking) néven ismeretes. Ennek a deformációnak legjobban a keresztválaszfalak képesek ellenállni, a bordakeret ellenálló-képessége jelentéktelen, feltéve, hogy a keresztválaszfalakat a szokásos egyenlő távolságban építették be.

Csavarodás (torzió)

Amikor bármilyen testet csavaró nyomaték terhel, a test ennek megfelelő alakváltozást, *csavarodást* szenved. Az olyan hajó, amely a hullámok haladási irányára ferdén (45°) halad, a két végénél ellentétes értelmű visszatérítő nyomatékoknak van kitéve, amelyek a hajótestet csavarodásra készítik. A legtöbb hajónál ezek a csavaró-nyomatékok jelentéktelenek, de a különlegesen széles és hosszú fedélzeti nyílások esetén figyelembe kell őket venni. A legjobb példa egy nagy konténerszállító hajó, ahol a legfelső részen erős *torziós dobozt* építenek be, amely magában foglalja a felső fedélzet azzal érintkező szalagját is, hogy ezeket a csavaró feszültségeket fel tudja venni (ld. 4.1.1.2.1 ábra).

Helyi feszültségek

Pumpálás (panting). A pumpálás a hajótest lemezelésének olyan deformációját jelenti, amikor az fűjtató-szerűen ki- és befelé deformálódik, és amelyet a hullámos vízben haladó hajótestben levő nyomás váltakozása okoz. Ezek az erők akkor a legnagyobbak, amikor a hajó a hullámokkal szemben halad és erősen bukdácsol, a nagy nyomás rövid idő alatt alakul ki. A pumpálásnak ellenálló mellső és hátsó szerkezeti megerősítéseket a hajóosztályozó intézetek írják elő.

Döngetés. Komoly lokális feszültségek ébrednek a hajó első részének fenéklemezeiben és bordáiban olyankor, amikor a hajó hullámokkal szemben halad. Ezek a döngető feszültségek, amint leggyakrabban emlegetik őket, könnyű ballasztmenetben a legkomolyabbak, előfordulásuk helye a kollíziós válaszfal mögötti fenéklemez terület. Ezen a területen szükség van a szerkezet fokozott merevítésére.

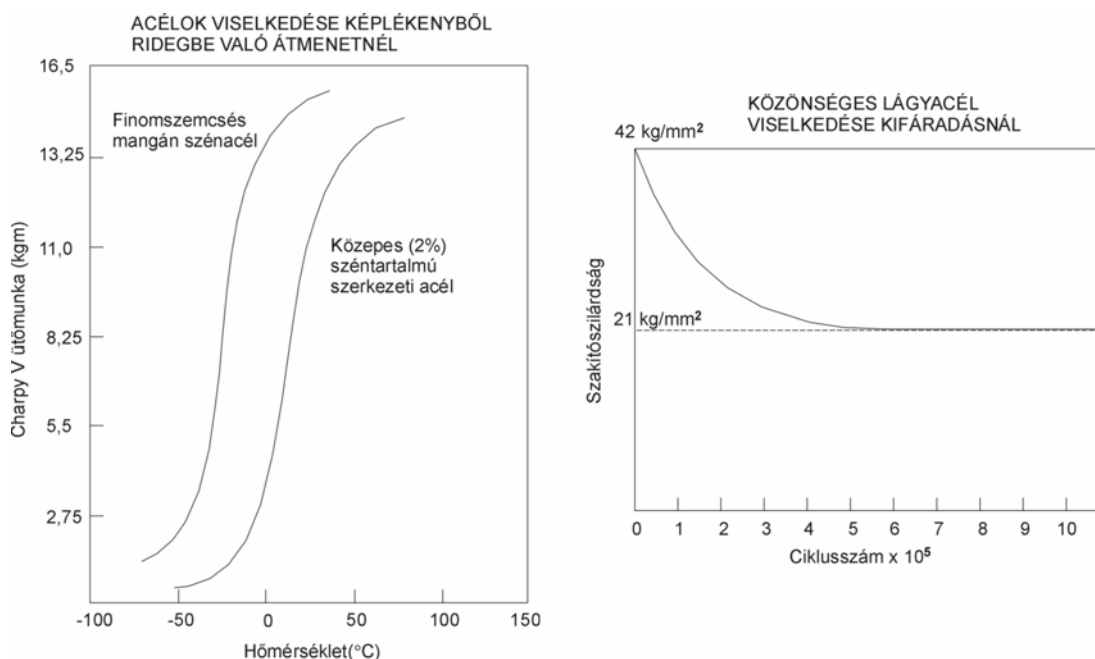
Egyéb helyi feszültségek. Egyes területeken a hajók szerkezeti elemeiben jelentős *lokális feszültségek* ébrednek, és ezek helyes tervezésére nagy gondot kell fordítani. Különösen olyankor fordulhat ez elő, amikor a hajótest különböző merevítői vagy fő szerkezeti elemei egymást keresztezik, pl. ahol a hosszmerevítők a keresztválaszfalakkal találkoznak, illetve kereszt- és a hosszválaszfalak találkozásánál. Másik példa lehet a feszültségkoncentrációra, ahol a keretborda meg van szakítva a fedélzeti ház szélénél, valamint a rakodónyílások és egyéb nyíláskeretek sarkánál, és ahol a mellvéden hirtelen keresztmetszet-változások vannak.

Rideg törés

Amióta a hajóépítésben a hegesztés alapvetővé vált, sokat foglalkoznak a szakemberek a helyes anyagválasztás és szerkezeti kialakítás kérdésével, hogy elkerülhető legyen a *rideg törések* előfordulása. A II. Világháború alatt sokszor fordult elő ez a jelenség abban a hajónagyságban, amelyekből meglehetősen sietséggel sokat építettek, abban az időben a rideg törés természetéről még keveset tudtak. Annak ellenére, hogy a rideg törések előfordultak szegecselt hajóknál is, a következmények sokkal súlyosabbak

BBBZ-kódex

voltak a hegesztett járműveknél, mivel a hegesztés közvetlen anyagfolytonosságot jelent a szegecsléssel szemben, ahol az átlapolt lemezek és profilok megállították a kezdődő repedés továbbterjedését.



4.1.1.2.2 ábra

A rideg törés az a jelenség, amikor egy más szempontból rugalmas anyag megreped anélkül, hogy bármilyen külső jel vagy az anyagban jelentkező alakváltozás a hibát előre jelezné. A törés nagyon gyorsan történik, semmi sem jelzi előre, sőt, a jármű szerkezete esetleg nincs is kitéve semmilyen nagy terhelésnek az adott pillanatban. A hajóépítésnél elterjedten használt lágyacél különösen hajlamos rideg törésre, mivel azok a feltételek, amelyek a jelenséget elindítják, jelen vannak. A téma túl bonyolult a részletes tárgyaláshoz, és jelenleg még mindig vizsgálat alatt van számos tényező, az viszont ismeretes, hogy a rideg törés esetleges bekövetkezését a következő tényezők befolyásolják.

- Éles sarok vagy bevágás van a szerkezetben, ahonnan elindul a repedés.
- Húzófeszültség ébred a szerkezetben.
- Létezik olyan hőmérséklet, amely felett a rideg törés nem fordul elő.
- Az acéllemez metallurgiai tulajdonságai.
- A vastag lemez hajlamosabb a rideg törésre.

Rideg törésre utal a képlékenység hibája a repedés végénél, amelyre az alakváltozás hiányából lehet következtetni, illetve a törés fényes szemcsés felülete. A képlékeny anyag törési felülete matt szürke. A rideg törés másik jellegzetes jele a háztető minta,

amely segít a törés kiindulópontjának megtalálásában, mivel a minta abba az irányba mutat.

Amennyiben a rideg törést el akarjuk kerülni, tekintetbe kell venni azokat a tényezőket, amelyek feltételezhetően jelen vannak, ahol rideg törés előfordulhat. Fontos, hogy amikor a hajó szerkezetének egyes részleteit tervezzük, elkerüljük az éles bemetszéseket és sarkokat, ahonnan a törések kiindulhatnak. Olyan nagy méretű hegesztett szerkezeteknél, amilyen egy hajó, megvalósíthatatlan, hogy egyáltalán ne legyenek olyan részletek, ahonnan repedés indulhat ki, mivel a hegesztésekben előfordulnak kisebb hibák, az összes hegesztési varrat teljes vizsgálatára nincs lehetőség. Emiatt a hajótest építésére specifikált acélnak rendelkeznie kell azzal a tulajdonsággal, hogy éles sarkoknál képlékenyen viselkedik az üzemi hőmérsékleten, különösen, ha vastag lemezről van szó. Azoknál az acélananyagoknál, amelyek képesek képlékenyen viselkedni éles bemetszéseknél, a keletkező repedések nem tudnak továbbterjedni. Az éles sarkoknál tanúsított képlékenységi az acél viszonylagos szívósságának mutatószáma, amelyet, mint látni fogjuk, az ütőpróba teszt képes mérni. A hajóépítő acélok olyan ötvöző-anyagokat kapnak (különösen mangánt szénttartalom korlátozással), és olyan kontrollált hőkezeléseken mennek át, amelyek javítják a bemetszéseknél tanúsított képlékenységet. A 4.1.1.2.2 ábra mutatja a mangánnal ötvözött szénacél jobb ridegtörési tulajdonságait az egyszerű szénacélhoz képest. Olyan helyeken, ahol vastagabb lemezeket kell használni, illetve a jobban igénybevett helyeken, ezekről a későbbiekben a szerkezet részleteinek tárgyalásánál több szó esik. Korábban a rideg törés témakörében gyakran elhangzott az a kifejezés, hogy 'repedésmegállító'. A kifejezés arra a ma már nem alkalmazott gyakorlatra utal, hogy a teher szállító hajókat szegecselt kötésekkel felosztották kisebb egységekre, amelyek teljes egészében hegesztett kötésekkel rendelkeztek, így biztosítva volt, hogy bármilyen repedés a részegységre korlátozódik. Ilyen repedésmegállítót helyeztek el általában a nagyobb hajókon a mestersor/koszorúsor környezetében. A mai gyakorlat szerint az ilyen helyeken jobb ridegtörési jellemzővel rendelkező lemezsor helyeznek el. A Lloyd's pl. megköveteli, hogy 250 méter hosszú vagy annál is hosszabb hajóknál a szilárdsági fedélzetnél a lágycél mestersor és koszorúsor a hajó középső szakaszán Grade D minőségű legyen, ha kevesebb, mint 15 mm vastagságú, és Grade E, ha vastagabb.

Kifáradási (fatigue) törések

A rideg töréssel ellentétben a *kifáradási törések* nagyon lassan következnek be, valójában évekbe telik, hogy kialakuljanak. A kifáradási törések legnagyobb veszélye az, hogy kis feszültségértéknél alakulnak ki, amelyek azonban a szerkezetet hosszú időn át ismételt igénybe (4.1.1.2.2 ábra). A kifáradási repedés, ha egyszer létrejött, észrevétlenül terjed tovább mindaddig, amíg a teherhordó szerkezeti elem állandóan csökkenő keresztmetszete elégtelenné válik a terhelés elviselésére. A kifáradási törések a szerkezetben levő éles sarkokhoz vagy anyaghibákhoz, főként olyan helyeken jelentkeznek, amelyeket a szerkezet súlyponti helyeinek neveznek, mert a hajó szerkezetében nagyobb merevséget jelentenek.