

Hadházi Dániel

JÁRMŰVEK ÉS MOBILGÉPEK I.

(VIZIJÁRMŰVEK)

A II. Nemzeti Fejlesztési Terv Társadalmi Megújulás Operatív Program
TÁMOP-4.1.2/A/2-10/1-2010-0018 azonosító számú programja keretében készült jegyzet.

A projekt címe: „Egységesített jármű- és mobilgépek képzés- és tananyagfejlesztés”

A megvalósítás érdekében létrehozott konzorcium résztvevői:

Kecskeméti Főiskola

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

AIPA Alföldi Iparfejlesztési Nonprofit Közhasznú Kft.



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM
KÖZLEKEDÉSMÉRNÖKI KAR

HADHÁZI DÁNIEL

JÁRMŰVEK ÉS MOBIL GÉPEK I.
(VIZI JÁRMŰVEK)

Budapest, 2012

SZERZŐ:
HADHÁZI DÁNIEL

SZERKESZTŐ:
HADHÁZI DÁNIEL

RAJZOLÓ:
a szerző

LEKTOR:
DR. ZOBORY ISTVÁN

Tartalomjegyzék

VIZIJÁRMŰVEK	6.
8.1. Bevezető megjegyzések.....	6.
8.2. Hajók csoportosítása	6.
8.2.1. Működési terület szerinti felosztás	7.
8.2.2. Hajók rendeltetés szerinti felosztása	7.
8.2.3. Áruszállító hajók szállított áruféleségek szerinti felosztása	8.
8.3. Hajógeometria	11.
8.3.1. Geometriai alapfogalmak és főméretek.....	11.
8.3.2. Vonalter és vonatervi mérettáblázat	13.
8.3.3. Hajógeometriai számítások, hidrosztatikai jellemzők.....	15.
8.4. A hajó hidrosztatikai egyensúlya.....	18.
8.4.1. Statikus felhajtóerő	18.
8.4.2. A hajó úszáshelyzete	19.
8.4.3. Példák hajók úszáshelyzetének meghatározására.....	22.
8.4.4. Stabilizáló nyomaték. Stabilitás.	25.
8.5. Hajók hajtása	27.
8.5.1. Hajók ellenállása.....	27.
8.5.2. Hajók hajtása hajócsavar	30.
8.5.3. Példa hajó effektív hajtási teljesítményének és fajlagos szállítási teljesítményének meghatározása	33.

8. VIZI JÁRMŰVEK

8.1. Bevezető megjegyzések

A hajó az emberiség legősibb közlekedési eszköze. Az emberek régmúlt homályába vesző őstörténetének korában a legelső civilizációk nagy folyóvizek mentén alakultak ki – Tigris, Eufrátesz, Nílus, Indus, Gangesz, Sárga-folyó, Jangce, stb.. A folyók azon kívül, hogy ivóvíz- és élelemforrásul szolgáltak, védelmet, de egyúttal közlekedési és szállítási útvonalakat is jelentettek az ott élők számára. Kis túlzással azt állíthatjuk, hogy egészen a 18. század végéig, azaz az ipari forradalom kezdeteiig, az első vasutak, majd még később a megfelelő minőségű közutak megjelenéséig az emberek mindenkori áru- és személyszállítási igényeinek lebonyolítására más lehetőség, mint a hajók, a víziközlekedés, nem is állt rendelkezésre. A kontinensek közti kereskedelem tekintetében még ma, a repülés korában is a tengeri áruszállítás a leghatékonyabb módja az áruforgalomnak

Ennek tudatában talán megdöbbenő, hogy a mai korszerű hajóépítő mérnöki szakma műszaki alapjai mégis csupán a 18. században születnek meg. Addig a hajóépítés – a Kr.e. 3. század végén a szicíliai Siracusában élt görög tudósnek és feltalálónak, Archimédésznek az úszás törvényét megfogalmazó megállapítása ellenére – ösztönös mesterségnek számított. Az ókorban és később a nagy földrajzi felfedezések korában épített hajók, de még a későbbi idők több árbocos vitorlášajói is mind a mai értelemben vett tervrajzok nélkül épültek. De nem ismerték a hajó úszáshelyzetét, stabilitását, a hajótest szilárdságát és a hajó hajtásának törvényszerűségeit leíró egyenleteket sem. A mesterek – akik az esetek döntő többségében egyszerű ácsok voltak - először a megépítendő hajó modelljét készítették el, úgy mint egy szobrot, egyetlen rönk fából kifaragva. Ha a modell hajó formájával már elégedettek voltak – bár ez az elégedettség nagyon sok esetben csupán a bonyolult térbeli alakzatnak bizonyos praktikus, illetve esztétikai szempontok szerinti megfelelőségére korlátozódott csupán – a modellt annak hossz tengelyére merőlegesen több helyen szeletekre vágták, szétfűrészelték. Az így kapott bordametszetek alapján, a modell kiadódó méreteit a kívánt lépték szerint felnagyítva alkották meg a hajó bordázatának valódi térbeli alakját, valamint a bordákat összekötő szerkezeti elemek formáját.

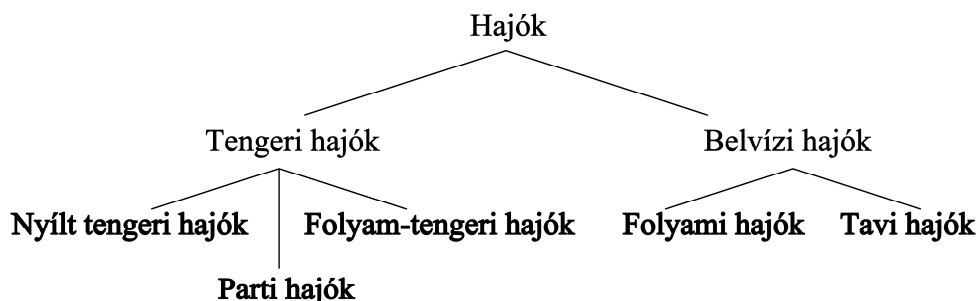
A hajóépítés, mint mérnöki tudomány ettől a kezdeti fázisától a mai napig nagyon hosszú utat tett meg, s mára a világ egyik legkorszerűbb tervezési, gyártási és ellenőrzési módszereket alkalmazó „hightech” iparágává vált. A következő néhány fejezet terjedelme azonban csupán a hajómérnöki szakma legfontosabb fizikai és műszaki alapjainak bemutatását teszi lehetővé.

8.2. A hajók csoportosítása

A hajók, a csónakokkal és a tutajokkal együtt az úszóművek egyik csoportját alkotják. Hajónak nevezzük azt az úszóművet, amelynek a bármilyen anyagból készült vízmentes külhéját felül vízmentes, vagy vízmentesen zárható fedélzet zárja le. A csónaknak csak vízmentes külhéja van, de nincs vízmentes fedélzete. A tutaj pedig olyan úszómű, amelyet önállóan is úszóképes, valamilyen módon egymáshoz erősített elemek alkotnak.

A továbbiakban az úszóművek kategóriáján belül a hajók felosztásáról szólnunk. A hajókat nagyon sok szempont szerint lehet csoportosítani. Ezek közül az alábbiakban csupán néhányra térünk ki.

8.2.1. Működési terület szerinti felosztás



8.1. ábra

8.2.2. Hajók rendeltetés szerinti felosztása



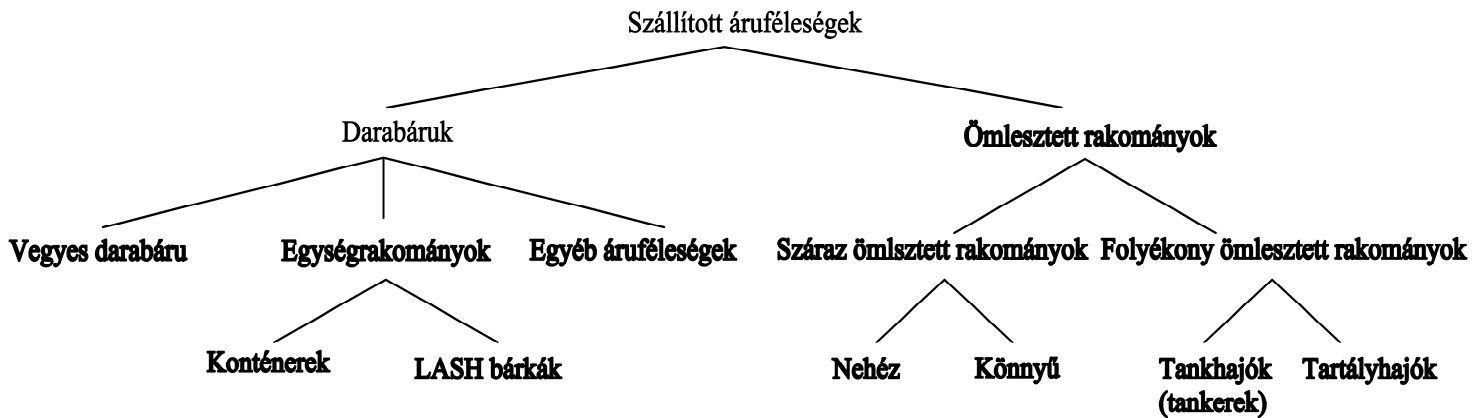
8.2. ábra

A hadihajók kategóriáját a felosztás külön nem részletezi. A hadihajók közé tartoznak a különféle csatahajók (cirkálók, rombolók, rakétahordozók, naszádok), parti őrhajók, monitorok, repülőgép anyahajók, helikopterhordozók, aknarakó és aknaszedő hajók, partraszállító hajók, harcászati és taktikai feladatokat ellátó tengeralattjárók, stb.

A szolgálati és munkahajók kategóriájába nagyon sok különféle rendeltetésű és típusú hajó tartozik. Az alábbi felsorolás ezek közül - a teljesség igénye nélkül - csupán a legjellegzetesebbeket ismerteti: kikötői és nyíltvízi vontatók, mentő- és tűzoltó hajók, tolóhajók, pilothajók, kitűző- és felmérőhajók, kutatóhajók, jégtörők, különféle kotrók, bunkerhajók, műhelyhajók, kórházhajók, kábel- és csőfektető hajók, úszódaruk és más típusú úszó munkagépek, világítóhajók, a nyílt vízben zajló munkavégzést segítő, kiszolgáló, illetve ellátóhajók, stb.

A személyhajók csoportjába tartoznak az üdülő és szállodahajók, kirándulóhajók, szárnyashajók, komp- és átkelőhajók (vasúti és közúti kompok, révhajók), személyszállító légpárnás hajók, stb.

8.2.3. Áruszállító hajók szállított áruféleségek szerinti felosztása



8.3. ábra

A szállított áruféleségek alapvetően meghatározzák a hajók konstrukcióját, felszereléseit, rakodó berendezéseit, rakterük kialakítását.

A vegyes darabáru fogalma a hajók rakterébe berakott különféle, de nem szabványos méretű ládák, bálák, zsákok, raklapokon tárolt áruféleségek, egyedi csomagolású gépek, gépalkatrészek, stb. közös gyűjtőfogalom szerinti elnevezése. A konténerizáció megjelenéséig a daruáru kategórián belül a vegyes darabáru forgalom volt a legjelentősebb. A vegyes darabáru forgalom mára sem tűnt el teljesen a világkereskedelemből. A legtöbb vegyes darabáru azonban ma már konténerekbe „csomagolva” közlekedik a világtengereken.



8.4. ábra – Vegyes darabáru szállító hajó



8.5. ábra – Konténerszállító hajó

A LASH (Lighter Aboard Ship) bárkák olyan szabványos méretű, több száz tonna hordképességű vízmentesen zárható úszó konténereknek tekinthetők, amelyek segítségével lehetővé válik, hogy a bennük elhelyezett áru bármely folyóparti feladóhelyről akár egy másik kontinens adott folyóparti rendeltetési helyére, az áru átrakása nélkül, vízi úton juthasson el. A folyókon lefelé a kötelékbe szervezett LASH-bárkákat tolóhajók továbbítják a tengeri kikötőkben várakozó bárkaszállító hajókig. A kontinensek közti tengeri utat a LASH-bárkák a bárkaszállító hajók fedélzetén egymásra halmazolva és egymáshoz rögzítve, szárazon teszik meg. A rendeltetési helyhez legközelebbi tengeri kikötőben a bárkákat újból vízre teszik és kötelékbe rendezik. A tengeri kikötőből a csatolt kötelékeket pedig ismét tolóhajók juttatják el a folyón a kirakás helyéig.



8.6. ábra – Bárkaszállító hajó

A darabáruk között az egyéb kategóriába tartozó áruféleségek, illetve ezen áruféleségek szállítására specializálódott hajók például: a hűtött rakományok, a rönk-, a gépkocsi, az élőállat szállító hajók, stb.

A nehéz ömlesztett rakományok a különféle ércek, a kő, a szén, a koks, a cement, stb., a könnyű ömlesztett rakományokat pedig a gabona- és más szemestermény félek jelentik.



8.7. ábra – Ércszállító hajó

A folyékony ömlesztett rakományok szállítására szolgáló hajók két csoportba sorolhatók: tankerek és tartályhajók. A tankerek azok a hajók, amelyeknek a folyékony rakomány befogadására szolgáló raktereit a hajó acélszerkezeti elemei határolják. Ezzel szemben a tartályhajók acélszerkezete csupán a folyékony rakományt tároló és általában külön egységként megépített tartályok alátámasztására, illetve rögzítésére szolgál. Napjainkban a leggyakoribb folyékony rakománynak a nyersolaj, illetve a különféle feldolgozott kőolajszármazékok (benzin, gázolaj, petróleum, kerozin, stb.) számítanak, de vannak édesvíz, bor, növényi olaj, cseppfolyós földgáz, propán, bután, kénsav és más vegyi anyagok szállítására szolgáló tank-, illetve tartályhajók is.



8.8. ábra – Tanker

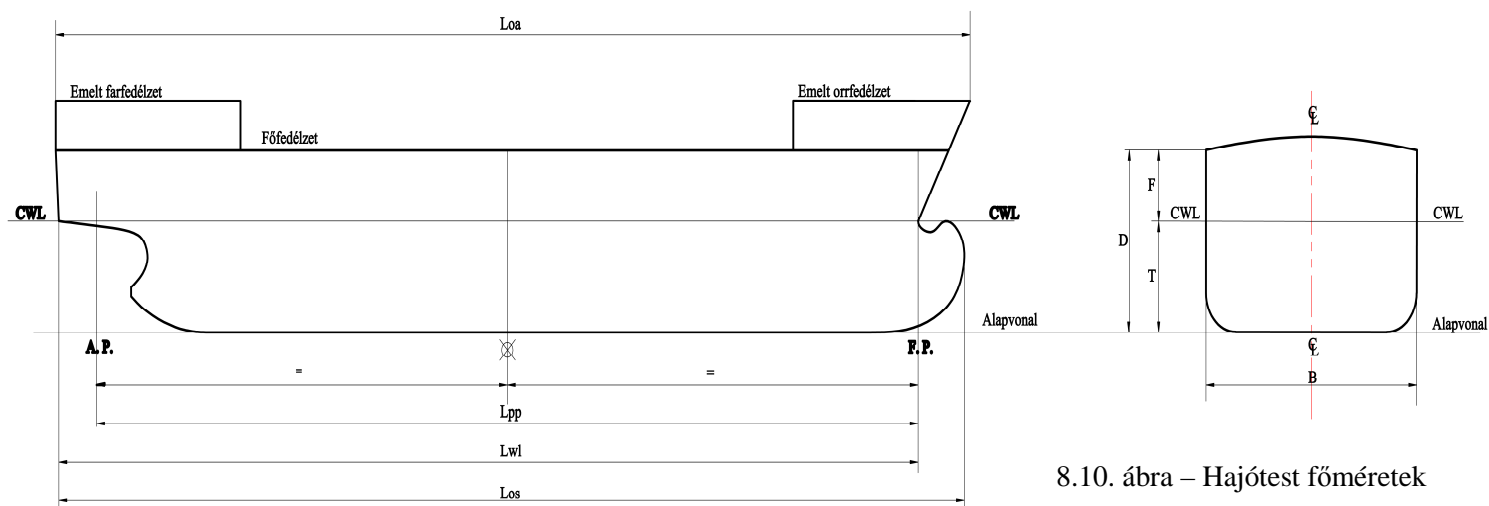


8.9. ábra – Tartályhajó

8.3. Hajógeometria

8.3.1. Geometriai alapfogalmak és főméretek

A hajótest bonyolult háromdimenziós, a legtöbb esetben szimmetrikus, zárt formában analitikai függvényekkel azonban nem leírható térbeli alakzat, amelynek pontos meghatározása csak geometriai módszerekkel lehetséges. Elengedhetetlen tehát a geometriai leíráshoz szükséges alapfogalmak tisztázása.



8.10. ábra – Hajótest főméretek

Geometriai alapfogalmak:

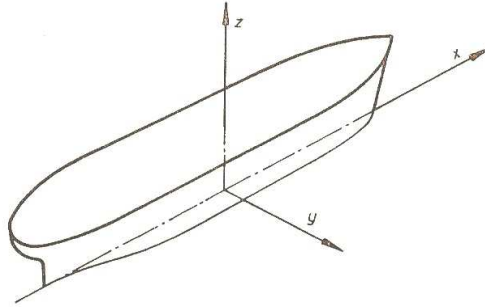
- | | |
|--|---|
| Alapvonal | a hajó középsíkjában a hajó legmélyebb pontján áthaladó, a tervezési vízvonallal párhuzamos egyenes |
| Tervezési vízvonal (CWL): | a hajó tervezésénél figyelembe vett legnagyobb vízkiszorításhoz tartozó vízvonal |
| Melső függély (F.P.): | a tervezési vízvonal (CWL) és az orrtőke metszéspontjában az alapvonalra bocsátott merőleges |
| Hátsó függély (A.P.): | a tervezési vízvonal és a hajó fartőkénének metszéspontjában az alapvonalra bocsátott merőleges. Fartőke hiányában a hajó leghátsó kormánylapátjának tengelyvonala. |
| Főborda (⊗): | a függélyek közti távolság felezőjében értelmezett bordametszet |
| Középsík (CL) | a hajó hosszirányú függőleges középsíkja |
| Főfedélzet (válaszfal fedélzet, szabadoldal fedélzet): | az a folytonos fedélzet, ameddig a hajó valamennyi vízmentes válaszfala felér |

Főméretek:

- Függélyek közti hossz (L_{pp}) [m]:
a mellső és a hátsó függély közti távolság
- Vízvonal hossz (L_{wl}) [m]:
a tervezési vízvonal két legmesszebb fekvő pontja közti távolság.
- Teljes hossz (L_{oa}) [m]:
a hajótest két egymástól legmesszebb fekvő pontja közti távolság. A teljes hossz tekintetében a hajótesthez tartozónak kell tekinteni a hajótesthez rögzített felszerelési tárgyakat is (pl. habvéd, orrárboc, kígyófej, stb.).
- Víz alatti maximális hossz (L_{os}) [m]:
a hajótest nedvesített felületének két egymástól legmesszebb fekvő pontja közti távolság
- Szélesség (B) [m]:
a hajótest víz alatti részeinek legnagyobb szélessége
- Oldalmagasság (D) [m]:
a hajó főbordájának síkjában a fedélzet és a külhøj találkozási pontja és az alapvonal közti merőleges távolság.
- Merülés (T) [m]:
a hajó főméretként értelmezett merülése az alapvonal és a tervezési vízvonal közti távolság. Általában pedig a hajó úszásvonala és a hajótest legmélyebben fekvő pontja közti távolság.
- Szabadoldal (F) [m]:
a hajó főbordájának síkjában a válaszfal fedélzet szélének távolsága a tervezési vízvonaltól.
- Víz kiszorítás (V) [m^3]:
a hajó főméretként megadott víz kiszorítása a tervezési vízvonal alatti hajótest térfogat. Általánosságban a hajótest adott merüléshez tartozó víz alatti részeinek térfogata.
- Víz kiszorítás tömeg (D) [tonna]:
a hajó összes tömege (a hajótest által kiszorított víz tömege)
- Hordképesség [tonna]:
Belvízi hajóknál a hajóba rakható rakomány tömege. Tengeri hajóknál a „deadweight” hordképesség a rakomány, az üzemanyagok, az ivóvíz és más készletek, valamint a személyzet és a személyzet ellátmányának együttes tömege.

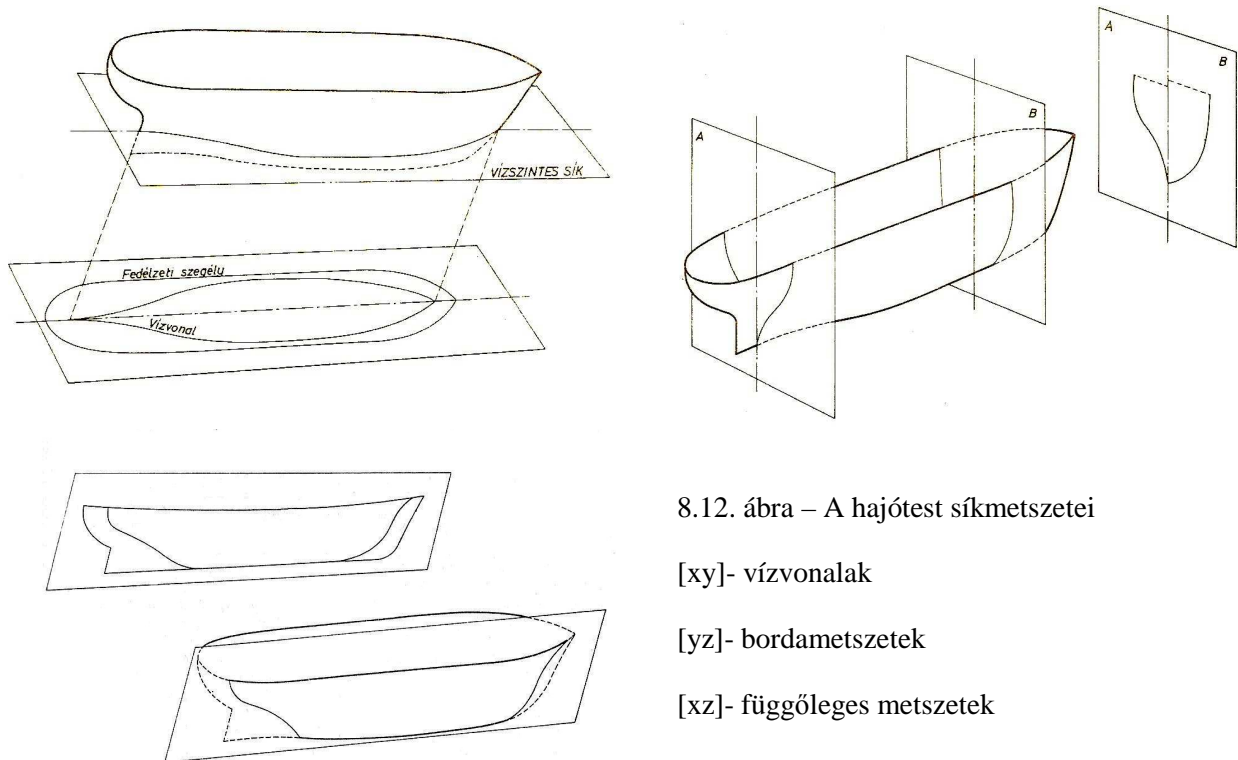
8.3.2. Vonalterv és vonaltervi mérettáblázat

A hajótest geometriájának pontos meghatározása a vonalterv megrajzolásával történik. A vonalterv a hajótesthez rögzített térbeli derékszögű koordináta rendszer (8.11. ábra) tengelyei által kifeszített síkokkal párhuzamos síkmetszetek segítségével definiálja a hajó külhéjának felületi pontjait.



8.11. ábra – Hajótest – Koordináta rendszer

Az $[xy]$ koordináta síkkal párhuzamos síkmetszetek a vízvonalak. Az $[yz]$ síkkal párhuzamos síkmetszetek a bordametszetek. Az $[xz]$ síkkal párhuzamos metszeteket pedig függőleges metszeteknek nevezik. Ezen metszetsokaságnak az ábrázoló geometria szabályai szerint egy közös lapon történő megrajzolásával kapjuk a hajó vonaltervét. A mai korszerű tervezési eljárások során a mérnök a számítógép cyber-terében felületgeneráló programok segítségével alakítja a hajó 3D külhép felületét, amelynek síkmetszeti automatikusan adódnak.



8.12. ábra – A hajótest síkmetszetei

$[xy]$ - vízvonalak

$[yz]$ - bordametszetek

$[xz]$ - függőleges metszetek

A vonalterv a hajótestfelület geometriai adatbázisa. A térbeli felület egy adott pontjának három [x;y;z] koordinátáját bármelyik két síkmetszet egyértelműen meghatározza. A harmadik síkmetszet – matematikai értelemben - tehát már redundáns. A mérnöki gyakorlatban azonban mindhárom síkmetszet halmazra szükség van, mert az adott feladatra tervezett hajótest a forma, a funkció és az esztétikum hármas egységét figyelembe véve csak mindhárom síkbeli görbesereg harmonikus és egymással összehangolt futású vonalai segítségével alakítható ki. Sőt a még precízebb forma definícióhoz esetleg ún. átlós, vagy diagonál metszetekre is szükség lehet. A diagonál metszeteknek, például vitorláhajók esetében, gyakorlati jelentőségük is van, mert a hajót előre hajtó, a vitorla felületen magasán a vízvonal fölött keletkező erő a vitorláhajót oldalra tolja és meg is dönti. Így a vitorláhajó nem függőleges, hanem megdőlt helyzetben, valamelyik „diagonálján” úszik.

A három különböző koordináta sík szerinti síkgörbe halmazra azonban csupán a hajó formájának pontos megrajzolása érdekében van szükség. A hajógeometria rögzítéséhez, illetve a későbbi számításokhoz elegendő egyetlen síkmetszet sorozat is, mert bármely síkmetszethez rögzített koordináta rendszerben elfoglalt helyzete egyértelműen megadja a kérdéses felületi pont hiányzó harmadik koordinátájának értékét.

A gyakorlatban a térbeli forma definiálásához és a későbbi hajógeometriai számítások elvégzéséhez a bordametszeteket használják. Minden egyes bordán az alapvonal fölött különböző magasságokban felvett vízvonalakon, azaz minden merüléshez (z) lemérhetők a bordaszélességek, illetve vízvonal félszélességek (y), mert a hajótest a középsíkra szimmetrikus felület. A felületi pontok hiányzó x koordinátáját az adott bordának a hajó hossza mentén elfoglalt helyzete definiálja. Ily módon készül el a hajó vonaltervi méretábrázolása úgy, ahogy az egy konkrét hajó esetében például a 8.13. ábrán látható.

L = 60 m D = 6,613 m
B = 10 m T = 3,360 m

Borda- szám	Vízvonalak $\Delta z = 0,672$ m							Főfedélzet		Felső fedélzet		Függőleges metszetek			Gerinc- magas- ság	Diago- nál metszet	Borda- szám
	WL 1/2	WL 1	WL 2	WL 3	WL 4	CWL= WL 5	WL 6	fél szé- lesség	oldal- magass.	fél szé- lesség	oldalma- gasság	V. I.	V. II.	V. III.			
0	-	-	-	-	-	627	1429	1906	2844	2844	6933	3870	5515	-	2912	428	0
1	94	104	127	264	670	1679	2599	3000	4469	3849	6869	3099	3947	6251	-	992	1
2	132	189	382	783	1575	2660	3491	3769	4395	4472	6805	2459	3259	4363	-	1585	2
3	241	425	939	1679	2618	3524	4118	4302	4341	4830	6763	1653	2608	3579	-	2237	3
4	481	915	1873	2830	3608	4189	4561	4660	4293	4972	6709	917	1776	2327	-	2966	4
5	1028	1783	3000	3821	4340	4651	4825	4863	4267	5000	6656	432	1029	1941	-	3676	5
6	1906	2835	3896	4476	4755	4892	4962	4972	4245	5000	6635	181	533	1211	-	4269	6
7	2849	3679	4481	4830	4953	4991	5000	5000	4213	5000	6613	80	256	704	-	4716	7
8	3519	4208	4788	4967	5000	5000	5000	5000	4213	5000	6613	75	160	411	-	5027	8
9	3887	4448	4887	5000	5000	5000	5000	5000	4213	5000	6613	75	160	288	-	5188	9
10	4000	4486	4896	5000	5000	5000	5000	5000	4213	5000	6613	75	160	251	-	5212	10
11	3868	4377	4807	4953	4976	4986	4995	5000	4213	5000	6613	75	160	299	-	5134	11
12	3509	4080	4585	4797	4862	4925	4962	4962	4213	5000	6613	75	160	448	-	4920	12
13	2943	3585	4208	4505	4679	4774	4849	4868	4235	5000	6635	75	213	805	-	4580	13
14	2292	2972	3679	4071	4311	4472	4608	4657	4293	4925	6709	96	421	1451	-	4162	14
15	1660	2283	3009	3453	3764	4005	4203	4288	4395	4792	6789	192	832	2667	-	3637	15
16	1113	1585	2222	2679	3033	3325	3590	3750	4507	4547	6922	427	1744	4491	-	2985	16
17	642	958	1453	1840	2179	2486	2788	3057	4561	4175	7076	1061	3387	6203	-	2261	17
18	321	491	783	1052	1321	1604	1887	2236	4821	3604	7237	2496	5355	-	0	1498	18
19	75	146	269	401	557	736	958	1340	4992	2792	7313	4667	6973	-	219	729	19
20	-	-	-	-	-	-	108	382	5184	1708	7595	6944	-	-	3360	0	20

8.13. ábra – Vonaltervi méretábrázolás

A vonaltermi mérettáblázat a vízvonál felszélességeken kívül minden egyes bordánál megadja a függőleges és diagonál metszetek, valamint a hajó gerincének alapvonalától mért magasságát, valamint a fedélzetek felszélességének és magasságának adatait is.

8.3.3. Hajógeometriai számítások, hidrosztatikai jellemzők

A fentiek szerint értelmezett vonaltermi mérettáblázat lehetőséget ad az ún. hajógeometriai számítások elvégzésére, amelyek célja a hajótest adott merüléshez tartozó hidrosztatikai jellemzőinek meghatározása.

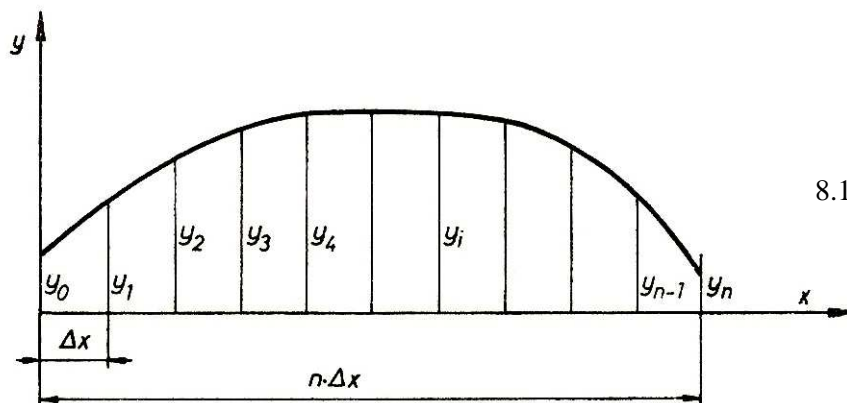
A legfontosabb hidrosztatikai jellemzők a következők:

- vízkiszorítás (V) [m³]
- vízkiszorítás tömeg (D) [tonna]
- a vízkiszorítás
 - o hosszirányú súlypontja (x_d) [m]
 - o magasság irányú súlypontja (z_d) [m]
- vízvonalterület (A_{wl}) [m²]
- a vízvonalterület keresztirányú súlyvonalának helyzete (x_{wl}) [m]
- a vízvonalterület keresztirányú súlyvonalára vett másodrendű nyomatéka (J_B) [m⁴]
- a vízvonalterület hosszirányú súlyvonalára vett másodrendű nyomatéka (J_L) [m⁴]
- a vízvonalterület keresztirányú metacentrikus sugara $R_B = \frac{J_B}{V}$ [m]
- a vízvonalterület hosszirányú metacentrikus sugara $R_L = \frac{J_L}{V}$ [m]

A felsoroltakon kívül még számos más hidrosztatikai jellemző is létezik, amelyek meghatározását ugyanaz a vonaltermi mérettáblázat teszi lehetővé. Ilyenek például a hasábos teltség (c_B), hengeres teltség (c_P), vízvonál teltség (c_{wl}), a hajótest nedvesített felülete (S), stb.

E jegyzet szűkös terjedelme miatt az alábbiakban csupán elvileg mutatjuk be a hidrosztatikai számítások kivitelezésének módját.

A vonaltermi mérettáblázat alapján bármelyik borda, vagy vízvonál alakja megrajzolható. A 8.14. ábra például egy vízvonál részletét mutatja.



8.14. ábra

A vázolt síkgörbe analitikus alakban nem állítható elő, így például a görbe alatti terület – jelen esetben a vízvonal terület – nagysága csak numerikus integrálási módszerekkel (trapéz szabály, Simpson-szabály) határozható meg. Páros számú Δx osztásköz esetén Simpson-szabály alkalmazásával, az adott merülésnél az i -edik bordához tartozó vízvonal felszélességét pedig y_i -vel jelölve:

$$A_w = 2 \cdot \int_0^L y(x) dx \cong 2 \cdot \frac{2}{3} \Delta x \sum_{i=0}^n \alpha_i \cdot y_i$$

ahol α_i az ún. Simpson szorzó ($\alpha_i = 0.5, 2, 1, 2, 1, \dots, 1, 2, 0.5$)

A vízvonalterület keresztirányú súlyvonalának helye:

$$x_{wl} = \frac{M_w}{A_w} = \frac{2 \cdot \int_0^L x \cdot y(x) dx}{2 \cdot \int_0^L y(x) dx} \cong \Delta x \cdot \frac{\sum_{i=0}^n \alpha_i \cdot \beta_i \cdot y_i}{\sum_{i=0}^n \alpha_i \cdot y_i}$$

A képletben a már ismert jelöléseken túl β_i a bordák helyzetét megadó súlyzó tényező ($\beta = 0, 1, 2, 3, \dots, i, \dots, n-1, n$)

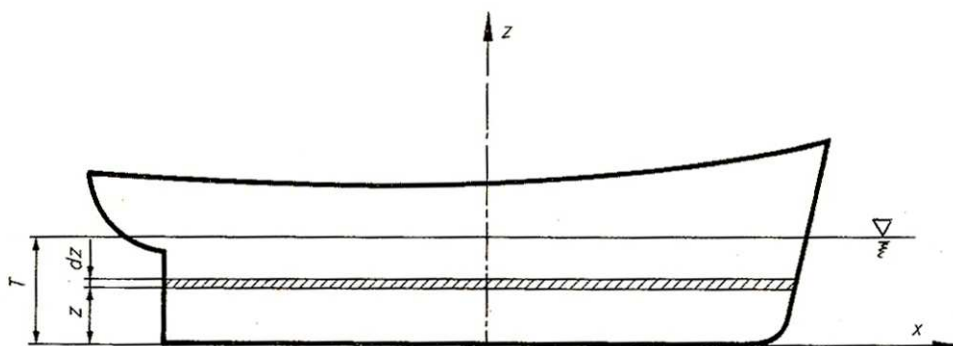
A vízvonalterület keresztirányú súlyvonalára vett másodrendű nyomatéka:

$$J_B = 2 \cdot \int_0^L y(x) \cdot x^2 dx \cong 2 \cdot \frac{2}{3} \cdot \Delta x \cdot \sum_{i=0}^n \alpha_i \cdot y_i \cdot x_i^2 = \frac{4}{3} \Delta x^3 \cdot \sum_{i=0}^n \alpha_i \cdot \beta_i^2 \cdot y_i$$

A vízvonalterület hosszirányú súlyvonalára vett másodrendű nyomatéka:

$$J_L = \frac{2}{3} \cdot \int_0^L y^3(x) dx \cong \frac{2}{3} \cdot \Delta x \cdot \sum_{i=0}^n \alpha_i \cdot \frac{2}{3} \cdot y_i^3 = \frac{4}{9} \Delta x \cdot \sum_{i=0}^n \alpha_i \cdot y_i^3$$

A hajó adott T merüléshez tartozó vízkiszorítása:



8.15. ábra

Ha ismerjük az „m” páros számú, egymástól Δz távolságban lévő osztásközhöz (merüléshez) tartozó A_{WLj} vízvonalterület nagyságát, a kérdéses T merüléshez tartozó vízkiszorítás térfogat a 8.15. ábrán látható magyarázat alapján az alábbi formula segítségével határozható meg:

$$V = \int_0^T A_{WL}(z) \cdot dz \cong \frac{2}{3} \cdot \Delta z \cdot \sum_{j=0}^m \alpha_i \cdot A_{WLj}$$

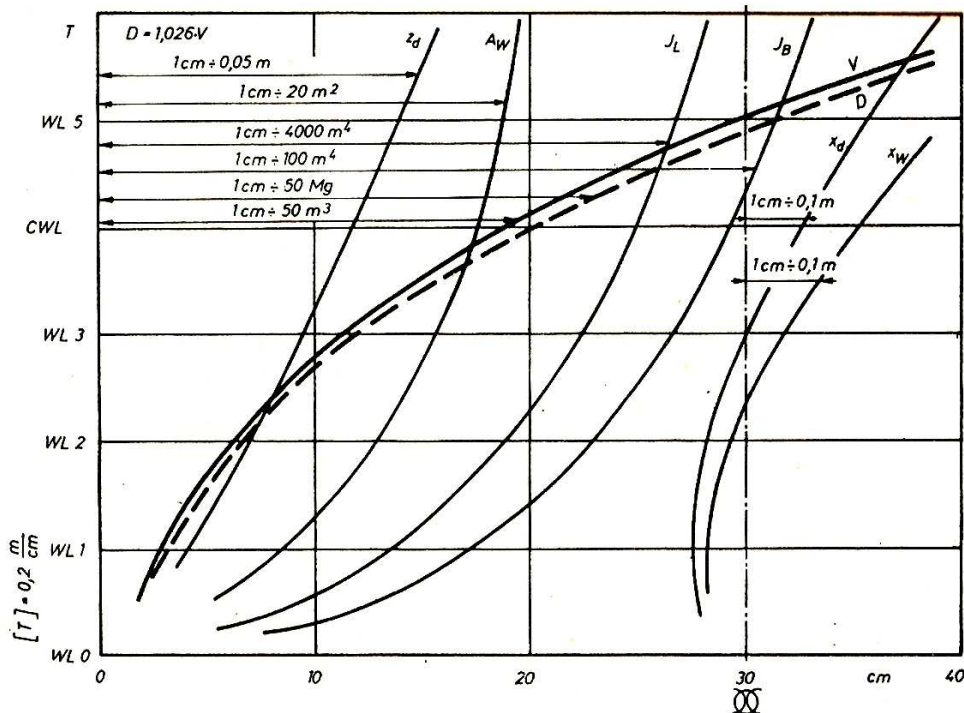
A vízkiszorítás hosszirányú súlypontja:

$$x_d = \frac{\int_0^T x_{WL}(z) \cdot A_{WL}(z) dz}{\int_0^T A_{WL}(z) dz} \cong \Delta z \cdot \frac{\sum_{j=0}^m \alpha_j \cdot x_{WLj} \cdot A_{WLj}}{\sum_{j=0}^m \alpha_i \cdot A_{WLj}}$$

A vízkiszorítás magasság irányú súlypontja:

$$x_d = \frac{\int_0^T z \cdot A_{WL}(z) dz}{\int_0^T A_{WL}(z) dz} \cong \Delta z \cdot \frac{\sum_{j=0}^m \alpha_j \cdot \beta_j \cdot A_{WLj}}{\sum_{j=0}^m \alpha_i \cdot A_{WLj}}$$

Több különböző merülésre a fenti számításokat elvégezve, majd a kapott eredményeket a merülés függvényében közös lapon ábrázolva adódnak a hajó jellemző görbéi. Egy konkrét hajó esetében például a 8.16. ábrán látható görbesereg.



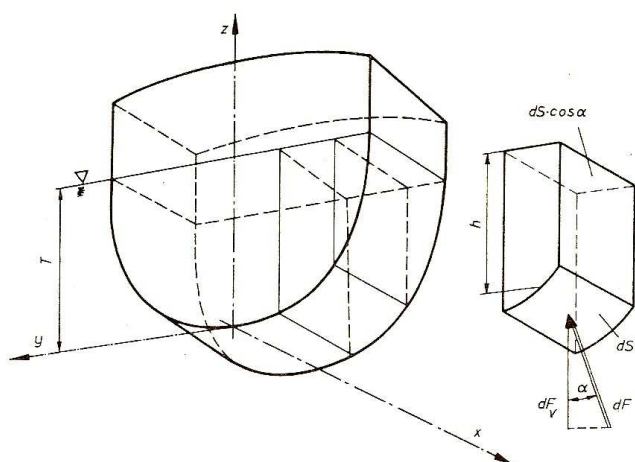
8.16. ábra

Jellemző görbék

A jellemző görbékből a hajó vízkiszorítás térfogatának megfelelő közepes merülésnél húzott vízszintes vonalnak a különféle görbékkel alkotott metszéspontjainál cm-ben leolvasott értékeket a lapon feltüntetett megfelelő léptéktényezővel megszorozva kapjuk az adott közepes merüléshez tartozó különféle hidrosztatikai jellemzők számszerű értékét.

8.4. A hajó hidrosztatikai egyensúlya

8.4.1. Statikus felhajtóerő



8.17. ábra – A hajótestre ható felhajtóerő

Statikus esetben a hajó súlyát a hajótest vízzel érintkező felületére ható hidrosztatikai nyomóerők függőleges eredője tartja.

A 8.17. ábrán a hajótest egy szelete látható. Az ábra jobb oldalán külön kirajzoltunk ennek a szeletnek a víz alatt lévő részéből egy kis hasábot. A hasáb vízzel érintkező felülete dS . Erre a felületre merőlegesen ható hidrosztatikai nyomóerő:

$$dF = p \cdot dS = \rho \cdot g \cdot h \cdot dS$$

, mert a felületre ható hidrosztatikai nyomás:

$$p = \rho \cdot g \cdot h$$

A felületelemre ható nyomóerő függőleges komponense:

$$dF_z = dF \cdot \cos \alpha = \rho \cdot g \cdot h \cdot dS \cdot \cos \alpha .$$

, ahol α a vízzel érintkező felületelem normálisának a függőlegessel bezárt szöge.

Ugyanakkor látható, hogy a $dS \cdot \cos \alpha$ szorzat a kiválasztott hasáb vízszintes metszetének felülete, amelynek h -val való szorzata - $h \cdot dS \cdot \cos \alpha$ - a kiválasztott elemi hasáb térfogatát, dV -t – adja. Így

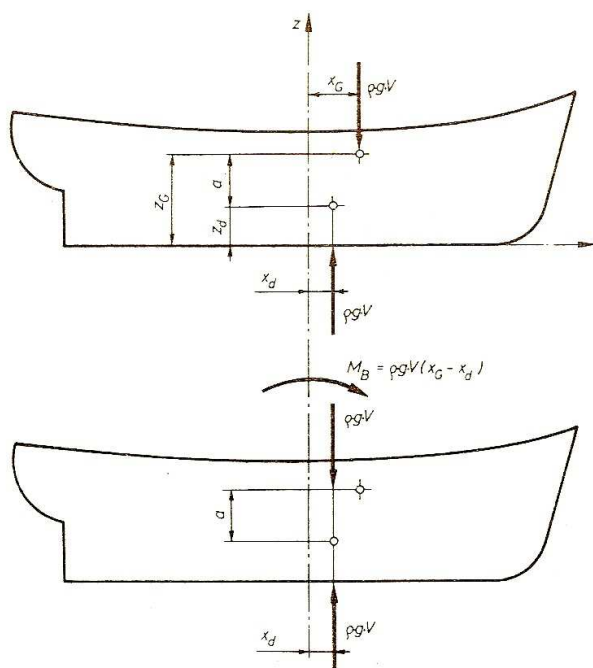
$$dF_z = \rho \cdot g \cdot dV$$

A fenti megfontolást az egész hajóra kiterjesztve kapjuk a hajóra ható statikus felhajtóerőt:

$$F_z = \rho \cdot g \cdot V$$

, ahol V a hajótest víz alatti részeinek térfogata, azaz a hajó vízkiszorítása.

8.4.2. A hajó úszáshelyzete



8.18. ábra – A hajóra ható erők

A 8.18. ábra felső része a hajóra ható erőket mutatja. A G súlyú hajó súlypontja a főborda előtt x_G távolságban, az alapvonal fölött pedig z_G magasságban található. A 8.4.1. pont – súlyerő és a felhajtóerő azonossága – alapján

$$G = \rho \cdot g \cdot V$$

Az így meghatározható vízki-szorítás térfogathoz tartozóan a jellemző görbékől kivehetjük a vízki-szorítás súlypontjának hossz- és magasság irányú koordinátáit (x_d ; z_d).

Az ábráról látható, hogy a statikai egyensúly feltételeit meghatározó $\sum F = 0$ és $\sum M = 0$ egyenletrendszerből csupán az erőkre vonatkozó egyensúlyi feltétel teljesül, a nyomatékokra vonatkozó nem, mert a hajó súlypontja és a felhajtóerő támadáspontja nem esik egy függőlegesbe.

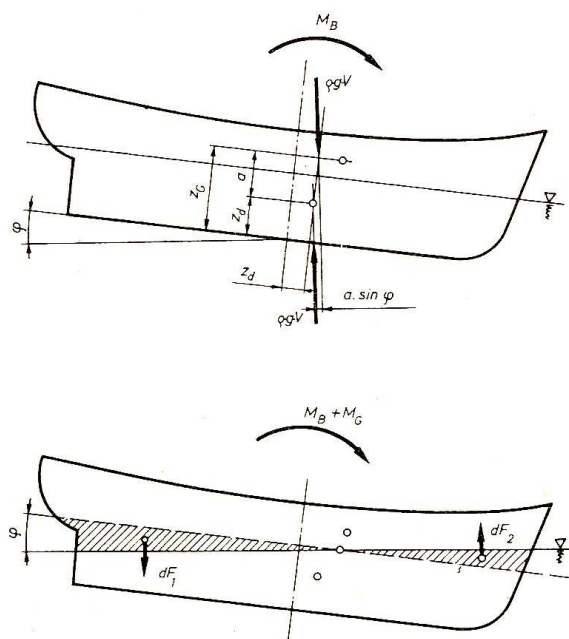
Ha a súlyerő hatásvonalát gondolatban a felhajtóerő hatásvonalára fölé képzeljük, a végrehajtott redukció eredményeképpen egy $M_B = \rho \cdot g \cdot V \cdot (x_G - x_d)$ billentő nyomatékot kapunk, amely a hajó úszáshelyzetének megváltozását – jelen esetben a hajó orrmerülésének növekedését és farmerülésének csökkenését, azaz a hajó orr-trimjét – okozza.

A súlypontok közti magasságkülönbség: $a = z_G - z_d$. A hajó φ szöggel törtérő elbillenése következtében a redukált helyzetű súlyerő vektor hatásvonalára ismét kitér a felhajtóerő hatásvonalából. Emiatt a már korábban meghatározott billentő nyomatékhoz egy további

$$M_G = \rho \cdot g \cdot V \cdot a \cdot \sin \varphi \cong \rho \cdot g \cdot V \cdot a \cdot \varphi$$

billentő nyomatékot is hozzá kell számolnunk. A képletben a $\sin \varphi \cong \varphi$ közelítés, φ ki szög lévén, megengedhető.

A statikus egyensúlyi helyzet – a vízszinteshez képest φ szöggel orra billent új úszáshelyzet – úgy áll elő, hogy a hajó orra billenése következtében a hajótest mellső részén az eredeti vízszintes, illetve



8.19. ábra – A hajó elbillenése

a φ szöggel megdőlt helyzetű úszásvonalak által határolt éktest alakú térfogatrészek belépnek a vízkiszorításba, a hajótest hátsó részén pedig ugyanezen úszásvonalak közé eső térfogatrészek kilépnek a vízkiszorításból (8.19. ábra). A vízkiszorításba újonnan belépő térfogatrészekre ható felhajtóerő dF_2 , míg a vízkiszorításból kieső felhajtóerő dF_1 .

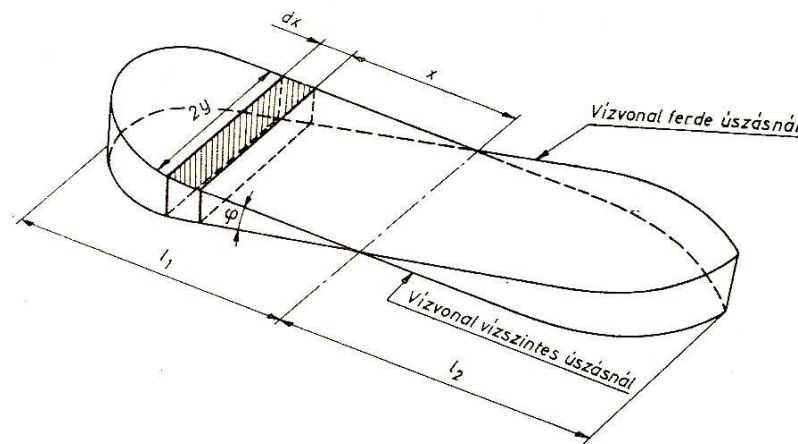
E két erő, mint ahogy az a 8.19. ábrán is látható egy erőpárt alkot. A hajó elbillenése addig a φ szögig folytatódik, míg ennek az erőpárnak a nyomatéka nem képes kompenzálni a súlyerő redukciójával a fentiek szerint kapott billentő nyomatékot.

Mint ahogy a hajó tömege az elbillenés során nem változik, szükségszerű, hogy

$$dF_2 = dF_1, \text{ azaz } \rho \cdot g \cdot V_2 = \rho \cdot g \cdot V_1$$

, ahol V_2 a vízkiszorításba be-, V_1 pedig a vízkiszorításból kilépő éktestek térfogata.

Az elbillenés szögének meghatározásához tekintsük a 8.20. ábrát.



8.20. ábra – A vízkiszorításba be- és onnan kilépő éktestek egyensú-

A 8.20. ábrán vonalkázással jelölt fedőlapú elemi hasáb térfogata, ha a kérdéses x helyen a vízvonal félszélessége y :

$$dV = 2 \cdot y \cdot x \cdot \varphi \cdot dx$$

Ezen térfogatrészre jutó felhajtóerőnek az elbillenés tengelyére vett statikai nyomatéka

$$dM_V = \rho \cdot g \cdot (2 \cdot y \cdot x \cdot \varphi \cdot dx) \cdot x$$

Mint ahogy a vízkiszorításba be-, illetve abból kilépő éktestek térfogata azonos, azaz

$$\int_{l_1} 2 \cdot y \cdot x \cdot \varphi \cdot dx = \int_{l_2} 2 \cdot y \cdot x \cdot \varphi \cdot dx \quad \rightarrow \quad \int_{l_1+l_2} x \cdot (2 \cdot y) \cdot dx = \int_L x \cdot (2 \cdot y) \cdot dx = 0$$

, vagyis a hajó elbillenése a vízvonalfelület keresztirányú súlyvonalára (x_{wl}) körül történik, mert erre a tengelyre zérus a vízvonalfelület statikai nyomatéka.

A vízkiszorításba be-, illetve onnan kilépő elemi felhajtó erők nyomatékait külön az l_1 és külön az l_2 hosszak mentén összesítve (integrálva), majd azokat előjelhelyesen összeadva kapjuk:

$$M_V = \int_{l_1+l_2} (\rho \cdot g \cdot 2 \cdot y \cdot x^2 \cdot \varphi) dx$$

A fenti egyenletből az állandókat kiemelve:

$$M_V = \rho \cdot g \cdot \varphi \cdot \int_L 2 \cdot y \cdot x^2 \cdot dx = \rho \cdot g \cdot \varphi \cdot J_L$$

Az integráljel mögötti kifejezés nem más, mint a hajó vízvonal felületének a keresztirányú súlyvonalai tengelyre vett másodrendű nyomatéka, J_L .

A korábbi magyarázatok alapján a nyomaték egyensúlyt a következő egyenlet írja le:

$$M_B + M_G = M_V.$$

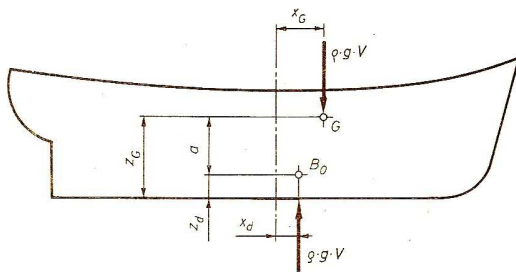
A behelyettesítéseket elvégezve kapjuk:

$$\rho \cdot g \cdot V \cdot (x_G - x_d) + \rho \cdot g \cdot V \cdot a \cdot \varphi = \rho \cdot g \cdot \varphi \cdot J_L$$

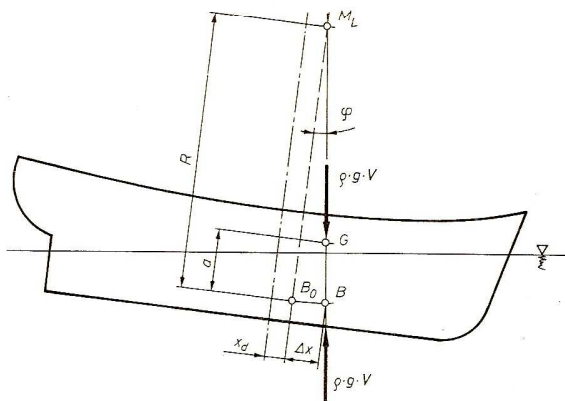
Az egyszerűsítéseket végrehajtva, majd az egyenletet φ -re rendezve

$$\varphi = \frac{x_G - x_d}{\frac{J_L}{V} - a} = \frac{x_G - x_d}{R_L - a}$$

adódik az adott súlyponthelyzetű hajó úszáshelyzetének meghatározását lehetővé tevő képlet. A képletben $\frac{J_L}{V} = R_L$ a vízvonalterület hosszirányú metacentrikus sugara, ún. származtatott hidrosztatikai jellemző.



8.21. ábra

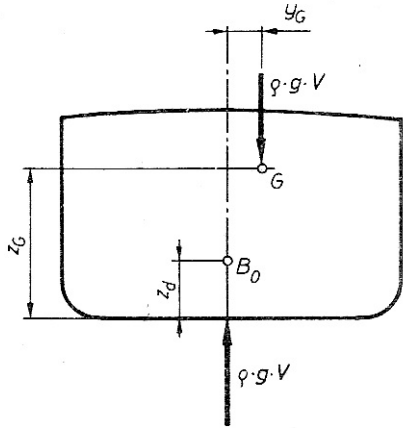


A 8.21. ábra az előző levezetésben megismerthez képest kicsit másképp magyarázza egy adott súlyponthelyzetű hajó φ dőlésszögű úszáshelyzetének kialakulását. Minthogy a hajó súlypontja és a vízkiszorítás hosszirányú súlyponthelyzete nincs egy vonalban, a hajó az így kialakuló nyomaték hatására orra billen. Az elbillenés addig történik, amíg a felhajtó erő hatásvonalja pontosan a súlyerő hatásvonalával egy vonalba – a felhajtóerő támadáspontja a B_0 pontból a B pontba - nem kerül. Az ábra jelöléseivel például a B_0 -ra felírva az erők nyomatékát, majd az egyenletet φ -re rendezve a már megismert formulát kapjuk:

$$\varphi = \frac{x_G - x_d}{R_L - a}$$

Gondolatban az M_L pontba – a vízszintes és φ szöggel megdőlt úszáshelyzet-

hez tartozó felhajtó erő vektorok hatásvonalának metszéspontjába –, az ún. metacentrumba besúrva körzőnket, majd körzőnyílásba véve az $M_L B_0 = R_L$ távolságot, egy φ középponti szögű körívvel közelítőleg helyettesítve lerajzolhatjuk a felhajtó súlypontjának elvándorlását leíró görbét. R-re innen származik a metacentrikus sugár elnevezés.



Az ismertetett eljárást a hajó keresztirányú megdőlésére is kiterjeszthetjük. Azzal a különbséggel, hogy a számlálóba a keresztirányú megdőlést okozó billentő nyomatékot, a nevezőbe pedig – minthogy a hajó megdőlése a vízvonalterület hosszirányú szimmetria tengelye körül történik – a vízvonalterületnek erre a tengelyre vett másodrendű nyomatékát, illetve a keresztirányú metacentrikus sugár

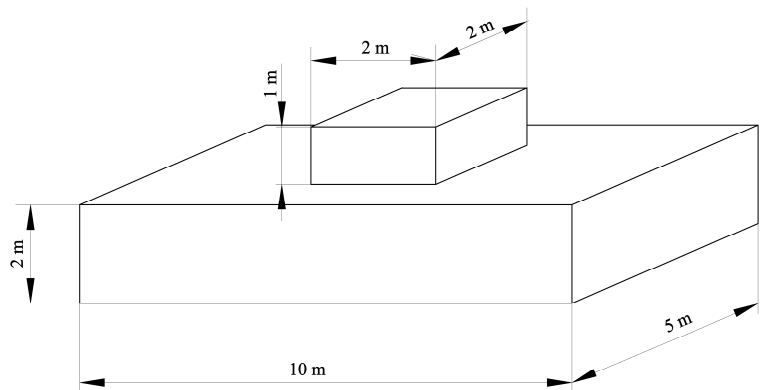
at - $R_B = \frac{J_B}{V}$ - t - kell beírni.

$$\varphi = \frac{M_B}{\rho \cdot g \cdot V \cdot \left(\frac{J_B}{V} - a\right)} = \frac{\rho \cdot g \cdot V \cdot (y_G - y_d)}{\rho \cdot g \cdot V \cdot (R_B - a)} = \frac{y_G}{R_B - a}$$

8.4.3. Példák hajó úszáshelyzetének meghatározására

1. Példa:

Határozzuk meg a 8.23. ábrán látható 10 m hosszú, 5 m széles és 2 m oldalmagasságú 50 tonna (50000 kg) tömegű derékszögű hasáb alakú ponton közepes merülését és hidrosztatikai jellemzőit arra az esetre, amikor a ponton fedélzetén pontosan középen egy 2 m hosszú, 2 m széles és 1 m magas 1000 kg tömegű láda fekszik. A ponton $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ sűrűségű édesvízben úszik.



8.23. ábra

A ponton súlypontja:

$$x_{G \text{ ponton}} = 5.00 \text{ m (a hátsó függélytől)}$$

$$z_{G \text{ ponton}} = 1.00 \text{ m (az alapvonalától mérve)}$$

A láda súlypontja

$$x_{G \text{ ponton}} = 1.00 \text{ m (a láda hátsó falától)}$$

$$z_{G \text{ ponton}} = 0.50 \text{ m (a láda fenekétől)}$$

A ponton és a láda együttes tömege: $50000 + 1000 = 51000 \text{ kg}$

A ponton és a láda együttes súlypontja:

$$x_{G \text{ ponton+láda}} = 5.00 \text{ m (a ponton hátsó függélyétől)}$$

– a láda a ponton közepén helyezkedik el.

$$z_{G_{\text{ponton+láda}}} = \frac{50000 \cdot 1.00 + 1000 \cdot (2.00 + 0.5)}{51000} = 1.03 \text{ m}$$

Az 51000 kg együttes tömegű úszótest vízkiszorítás térfogata

$$V = \frac{m_{\text{ponton+láda}}}{\rho} = \frac{51000}{1000} = 51.0 \text{ m}^3$$

$$\text{A ponton közepes merülése } T_k = \frac{V}{L_{\text{ponton}} \cdot B_{\text{ponton}}} = \frac{51.0}{10 \cdot 5} = 1.02 \text{ m}$$

$V = 51.0 \text{ m}^3$ –hez ($T_k = 1.02 \text{ m}$ -hez) tartozó hidrosztatikai jellemzők:

A pontontest egyszerű geometriai alakjából következően a hidrosztatikai jellemzők elemi módszerekkel is meghatározhatók.

$$- x_d = \frac{L_{\text{ponton}}}{2} = 5.00 \text{ m}$$

$$- z_d = \frac{T_k}{2} = 0.61 \text{ m}$$

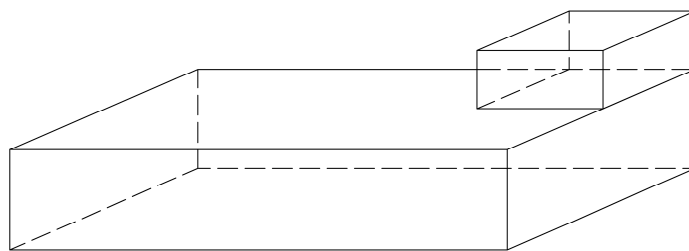
$$- y_d = 0.00 \text{ m}$$

$$- x_{wl} = \frac{L_{\text{ponton}}}{2} = 5.00 \text{ m}$$

$$- A_{wl} = L_{\text{ponton}} \cdot B_{\text{ponton}} = 10 \cdot 5 = 50.00 \text{ m}^2$$

$$- J_L = \frac{L_{\text{ponton}}^3 \cdot B_{\text{ponton}}}{12} = \frac{10^3 \cdot 5}{12} = 416.67 \text{ m}^4 \quad \rightarrow R_L = \frac{J_L}{V} = \frac{416.67}{51.0} = 8.17 \text{ m}$$

$$- J_B = \frac{L_{\text{ponton}} \cdot B_{\text{ponton}}^3}{12} = \frac{10 \cdot 5^3}{12} = 104.17 \text{ m}^4 \quad \rightarrow R_B = \frac{J_B}{V} = \frac{104.17}{51.0} = 2.04 \text{ m}$$



8.24. ábra

2. Példa:

Hogyan változik meg az előző példa szerinti ponton úszáshelyzete, ha a fedélzeten található ládát a ponton bal mellső sarkába eltoljuk? (8.24. ábra)

A láda elmozdításával a ponton vízkiszorítása és közepes merülése nem, csak az úszómű súlyponthelyzete változik meg. Ez a súlypont változás okozza a ponton elbillenését és oldalirányú megdőlését. Az alább következő számításokhoz a hidrosztatikai jellemzőket tehát az előző példa eredményeiből vehetjük.

A ponton és az eltolt helyzetű láda új közös súlypontja az alábbiak szerint határozható meg:

$$x_{G_{\text{ponton+láda}}} = \frac{m_{\text{ponton}} \cdot x_{G_{\text{ponton}}} + m_{\text{láda}} \cdot x_{G_{\text{láda}}}}{m_{\text{ponton}} + m_{\text{láda}}} = \frac{50000 \cdot 5.00 + 1000 \cdot (5.00 + 4.00)}{51000} = 5.08 \text{ m}$$

$$y_{G_{\text{ponton+láda}}} = \frac{m_{\text{ponton}} \cdot y_{G_{\text{ponton}}} + m_{\text{láda}} \cdot y_{G_{\text{láda}}}}{m_{\text{ponton}} + m_{\text{láda}}} = \frac{50000 \cdot 0.00 + 1000 \cdot 4.00}{51000} = 0.08 \text{ m}$$

$$z_{G_{\text{ponton+láda}}} = 1.03 \text{ m (lásd 1. példa)}$$

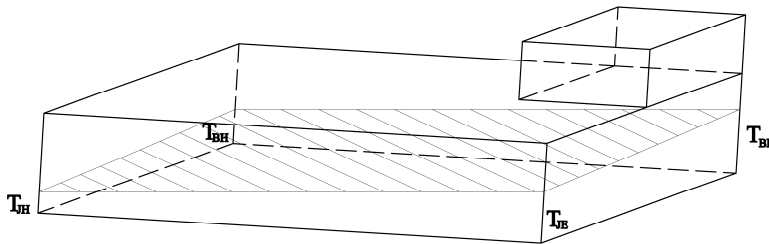
$$a = z_{G_{\text{ponton+láda}}} - z_d = 1.03 - 0.61 = 0.42 \text{ m}$$

A ponton hosszirányú elbillenésének szöge:

$$\varphi_L = \frac{x_{G_{\text{ponton+láda}}} - x_d}{R_L - a} = \frac{5.08 - 5.00}{8.17 - 0.42} = 0.0103 \text{ rad} = 0.59^\circ$$

A ponton keresztirányú elbillenésének szöge:

$$\varphi_B = \frac{y_{G_{\text{ponton+láda}}} - y_d}{R_B - a} = \frac{0.08 - 0.00}{2.04 - 0.42} = 0.0494 \text{ rad} = 2.83^\circ$$



8.25. ábra

A ponton sarkainak bemerülése a megdőlések szuperpozíciójával a 8.25. ábra jelöléseit alkalmazva:

- baloldalt elől:

$$T_{BE} = T_k + \frac{L_{\text{ponton}}}{2} \cdot \text{tg} \varphi_L + \frac{B_{\text{ponton}}}{2} \cdot \text{tg} \varphi_B = 1.02 + \frac{10}{2} \cdot \text{tg} 0.59^\circ + \frac{5}{2} \cdot \text{tg} 2.83^\circ = 1.20 \text{ m}$$

- jobboldalt elől:

$$T_{JE} = T_k + \frac{L_{\text{ponton}}}{2} \cdot \text{tg} \varphi_L - \frac{B_{\text{ponton}}}{2} \cdot \text{tg} \varphi_B = 1.02 + \frac{10}{2} \cdot \text{tg} 0.59^\circ - \frac{5}{2} \cdot \text{tg} 2.83^\circ = 0.95 \text{ m}$$

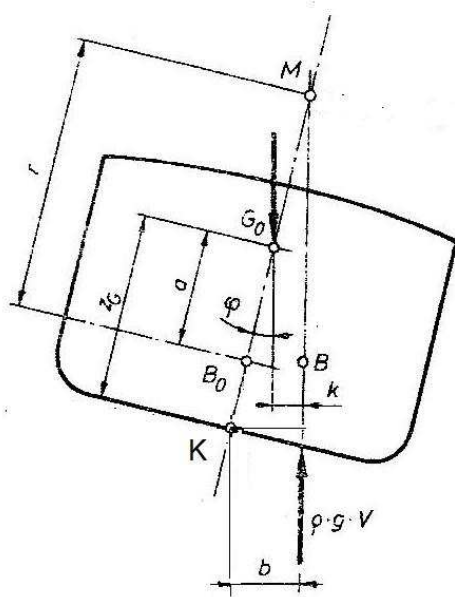
- baloldalt hátul:

$$T_{BH} = T_k - \frac{L_{\text{ponton}}}{2} \cdot \text{tg} \varphi_L + \frac{B_{\text{ponton}}}{2} \cdot \text{tg} \varphi_B = 1.02 - \frac{10}{2} \cdot \text{tg} 0.59^\circ + \frac{5}{2} \cdot \text{tg} 2.83^\circ = 1.09 \text{ m}$$

- jobboldalt hátul:

$$T_{JH} = T_k - \frac{L_{\text{ponton}}}{2} \cdot \text{tg} \varphi_L - \frac{B_{\text{ponton}}}{2} \cdot \text{tg} \varphi_B = 1.02 - \frac{10}{2} \cdot \text{tg} 0.59^\circ - \frac{5}{2} \cdot \text{tg} 2.83^\circ = 0.84 \text{ m}$$

8.4.4. Stabilizáló nyomaték. Stabilitás.



8.26. ábra - A stabilizáló nyomaték értelmezése

Stabilitás alatt általánosságban a hajónak azt a tulajdonságát értjük, hogy az rá ható bármilyen irányú billentő nyomaték megszűnte után képes eredeti úszáshelyzetébe visszatérni. A gyakorlatban a hajó stabilitását azonban csak a keresztirányú megdőlésekre értelmezzük.

A 8.26. ábrán egy φ szöggel megdőlöt helyzetben magára hagyott hajót látunk. A hajó ebben az állapotában nincs egyensúlyban, mert a G_0 súlyponton áthaladó súlyerő és a vízkiszorítás B jelű súlypontján áthaladó felhajtóerő hatásvonalai nem esik egybe.

Ez a két azonos nagyságú és párhuzamos hatásvonalú erő egy erőpárt alkot, amely a hajót eredeti függőleges helyzetébe igyekszik visszabilenteni. Ez a visszabilentő nyomaték a stabilizáló nyomaték:

$$M_{st} = \rho \cdot g \cdot V \cdot k$$

A képletben „ k ” a stabilizáló nyomaték karja.

A stabilizáló nyomaték karjának meghatározása a 8.26. ábra jelöléseivel például az alábbi formula szerint történhet:

$$k = (r - a) \cdot \sin \varphi$$

A stabilizáló nyomaték karját a 8.26. ábra jelöléseit használva azonban másképp is felírhatjuk:

$$k = b - z_G \cdot \sin \varphi = b(\varphi; T) - z_G \cdot \sin \varphi$$

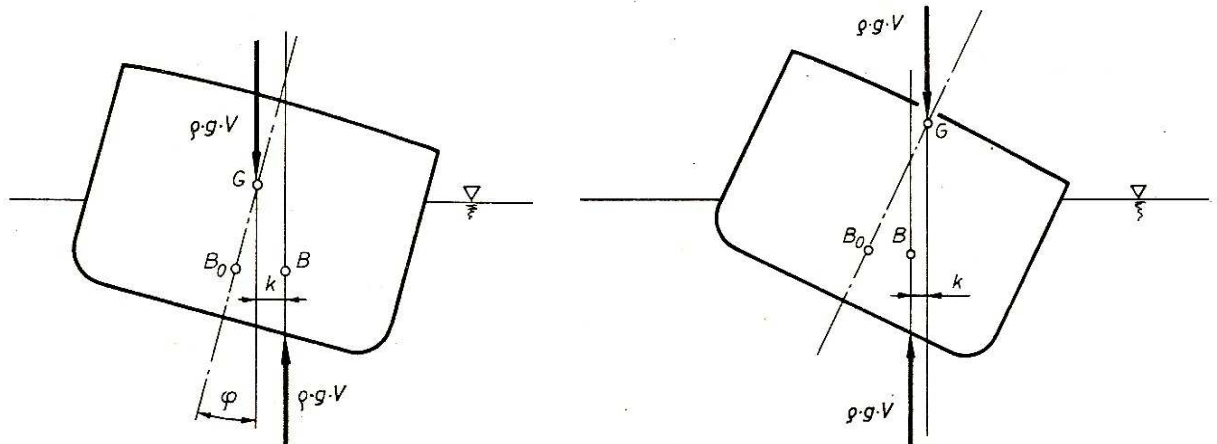
A fenti képletben „ b ” a K pont és a felhajtóerő hatásvonalai közti merőleges távolság. A K pont a hajó közép- és az alapvonalának metszéspontja. Látható, hogy „ b ” értéke egy adott merülés esetén csak a megdőlés mértékétől, azaz csupán a hajótest alakjától függ. Tehát „ b ” – amelynek neve pantokaréna – hidrosztatikai jellemző. A pantokaréna elnevezés ezen hidrosztatikai jellemzőnek a számítógépek kora előtti meghatározási módjára, pantográf segítségével történő területmérési eljárásra utal.

A képlet negatív előjelű második tagja a megdőlés mértékén kívül csupán a hajó súlypontmagasságától függ. Azaz a fentiek szerint külön lehet választani a hajó alak és súly stabilitását.

A stabilizáló nyomaték meghatározására szolgáló képlet elemzése arra is rávilágít, semmilyen „jó” forma sem képes biztosítani a hajó stabilitását, ha a hajó súlypontja túlságosan magas van.

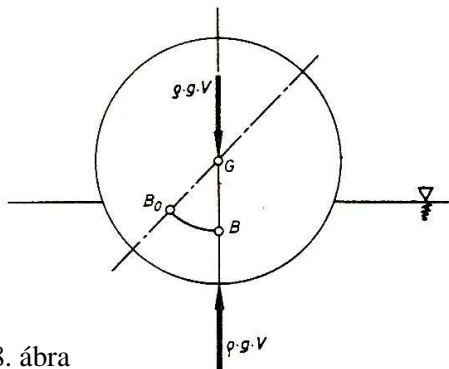
A) – Stabil

B) - Labilis



8.27. ábra – Egyensúlyi helyzetek

Az előbbieken elmondottakat szemlélteti a 8.27. ábra A), illetve B) képe. Az A) kép szerinti súlyponthelyzet esetén a hajó stabil, a B) esetben pedig labilis egyensúlyi helyzetben van, azaz a stabilizáló nyomaték értéke negatív.



8.28. ábra

A 8.28. ábra szerinti esetben a súly- és a felhajtóerő vektorok hatásvonala mindig azonos. Így az úszóttest bármilyen helyzetben nyugalomban marad. Ez a közömbös egyensúlyi helyzet.

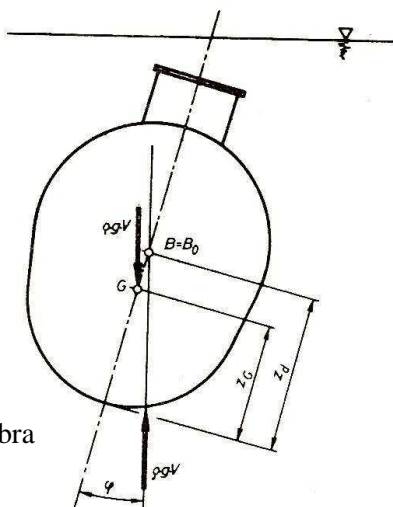
A teljesen víz alá merült úszóttesteknek, mint amilyenek például a tengeralattjárók, nincs úszásvonaluk. Ebben az esetben a stabilizáló nyomaték képlete (8.29. ábra):

$$M_{st} = \rho \cdot g \cdot V \cdot (-a) \cdot \sin \varphi$$

A stabilizáló nyomaték csak akkor lehet pozitív, ha

$$a = z_G - z_d < 0,$$

azaz, ha a tengeralattjáró súlypontja a vízkiszorítás súlypontja alatt van. Ez azt jelenti, hogy a tengeralattjáróknak csak súllystabilitásuk van.



8.29. ábra

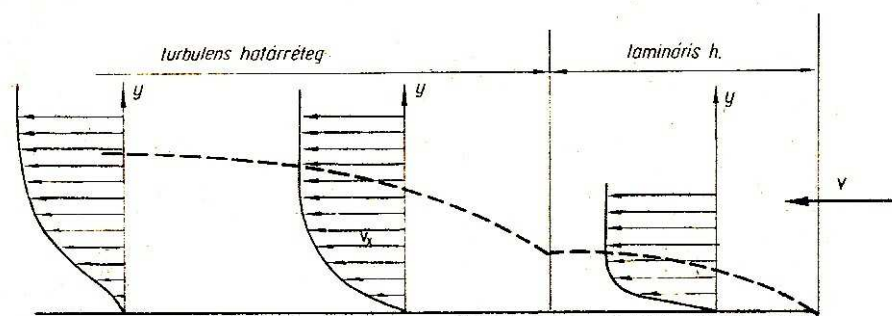
8.5. Hajók hajtása

8.5.1. Hajók ellenállása

Valóságos (viszkózus) közegben „ v ” sebességgel haladó hajó ellenállása két összetevőből áll: a súrlódó erőkből és a hajótest körül kialakuló változó statikai nyomású tér következtében fellépő hidrodinamikai erőkből.

Súrlódó erők:

A súrlódó erők tanulmányozásához a Kármán-féle határreteg elméletet használjuk. Egy sík lap mentén valóságos közeg áramlása esetében kialakuló határreteget a 8.30. ábra szemlélteti.



8.30. ábra

Ha a belépő éltől bizonyos helyeken és a faltól adott távolságokban megmérjük a helyi áramlási sebességeket, azt tapasztaljuk, hogy szondánk a falhoz közel a névleges „ v ” áramlási sebességénél lényegesen kisebb értékeket mutat. A névleges áramlási sebességet pedig, minél messzebb vagyunk mérési keresztmetszetünkkel a belépő éltől, a műszer a faltól annál nagyobb távolságban jelzi. Azaz a fal mentén kialakul egy, a belépő éltől hátrafelé haladva egyre vastagodó változó sebességű zóna, a határreteg.

A határretegen belül a belépő élhez közel a folyadékreszek közti áramlási sebességkülönbség még kicsi. A belépő éltől távolabb ugyanolyan magasságban az egymás fölött haladó folyadék részek sebességkülönbsége már lényegesen nagyobb. Ez a nagy sebességkülönbség az egymás fölött haladó folyadékreszeket a viszkózus tapadás következtében forgó mozgásra kényszeríti. Azaz a határretegnek ebben a zónájában már egymással ütköző folyadékreszeket találunk. Ezt a szondánk úgy jelzi, hogy a határreteg ezen, turbulensnek nevezett, zónájában mért helyi áramlási sebesség értékek pulzálnak, azaz a helyi sebesség csupán térbeli és időbeli átlagként értelmezhető.

Azonban bármilyen messze is vagyunk a belépő éltől a fal mentén mindig található egy vékony, közel nulla sebességű réteg, az ún. „fali réteg”. Ha a fal felületi egyenetlenségei nem nyúlnak túl e fali réteg külső határán, akkor a szilárd test és a folyadék közti súrlódásos energiaveszteségi folyamatok gyakorlatilag csak a határreteg turbulens zónájára korlátozódnak.

A fenti elméleti vizsgálatot a „ v ” sebességgel haladó hajó külháj felületére kiterjesztve megállapíthatjuk, hogy a hajótest mentén a külháj lemezek körül kialakul egy változó, de a hajó névleges haladási sebességénél kisebb átlagsebességű zóna, a határreteg, amelyet a hajó mintegy magával vonszol, és amelyen belül lejátszódó – legnagyobb részt ütközéses energiaveszteségi - folyamatok jelentik a hajótest és az őt körülvevő közeg közti súrlódási ellenállást.

Kísérleti eredmények szerint egy hidraulikailag simának tekinthető síkfal esetén a súrlódási ellenállási tényezőt a következő formula alapján határozhatjuk meg.

$$c_F = \frac{0.075}{(\lg \text{Re} - 2)^2}$$

A képletben $\text{Re} = \frac{v \cdot L}{\nu}$, ahol

v – a hajó haladási sebessége [m/s]

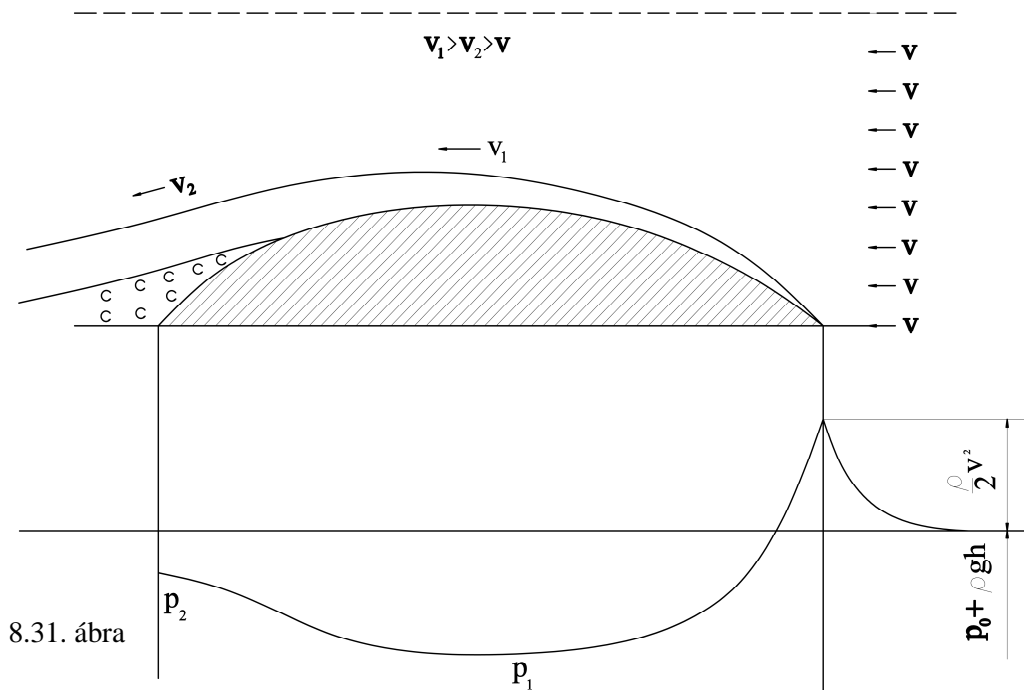
$L = L_{wl}$ – a hajó vízvonalhossza [m]

ν – a közeg kinematikai viszkozitása [m²/s]

A hajó súrlódási ellenállását az $R_F = c_F \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v^2 \cdot S$ [N]

képlet segítségével számíthatjuk ki. A képletben a már ismert tényezőkön kívül „S” a hajó nedvesített felülete [m²].

A hajótest menti nyomásváltozások okozta hidrodinamikai ellenállás



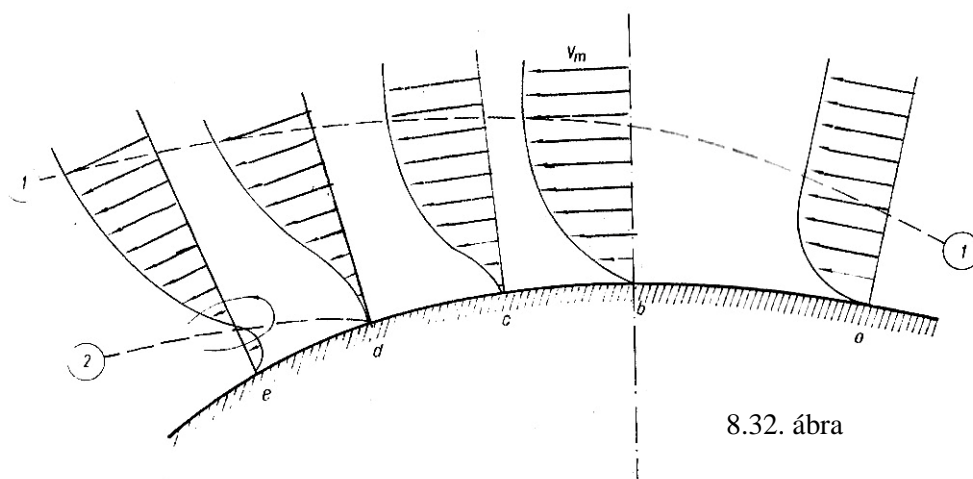
8.31. ábra

A 8.31. ábra a hajóhoz rögzített koordináta rendszerben mutatja a hajónak egy, a vízfelszín alatt „h” mélységben található vízvonala mellett kialakuló áramlást. A hajó haladási sebessége „v”. A rajzon a belépő éltől hátrafelé haladva a hajótest oldalától egyre távolabb húzódó vonal az előzőekben megismert a belépő éltől hátrafelé fokozatosan vastagodó határréteg külső felületét jelöli. Áramlástani szempontból a határrétegnek ezt a külső felületét tekinthetjük a hajó tényleges külső határvonalának. Az ábra azt is mutatja, hogy a hajó fara környezetében a határréteg nem képes a kis görbületi sugarú vízvonalak alakját követni, azaz a határréteg leválik a felületről.

Az ábrát egy, a vízvonaltól kellő távolságban felvett ellenőrző felülettel határok közé foglalva láthatjuk, hogy a belépő éltől a far felé haladva a hajó vízvonala mellett létrejö-

vő áramlás kezdetben gyorsuló, majd a hajó közepétől, illetve a legszélesebb részétől kezdve hátrafelé folyamatosan lassuló jellegű. A hajótestnek a határréteggel módosított külső felülete által meghatározott áramcsőben leggyorsabban a legszűkebb keresztmetszetben áramlik a víz (v_1). A far környékén a határréteg jelenléte miatt az áramcső keresztmetszet még mindig szűkebb, mint a belépő keresztmetszet. Így a hajó fara környezetében a határrétegen kívüli áramlás sebessége (v_2) még mindig nagyobb, mint a hajó névleges haladási sebessége: Tehát: $v_1 > v_2 > v$.

A Kármán-féle határréteg elmélet egyik fontos tétele, hogy a határrétegen belül a statikus nyomás az adott helyhez tartozó külső zavartalan áramlás által meghatározott statikus nyomással azonos, vagyis a határrétegen belül is a 8.31. ábra szerinti nyomáeloszlás uralkodik. A hajó orr-részén elhelyezkedő lemezekre tehát nagyobb, a far részeken pedig kisebb nyomás hat. A felületre ható hidrodinamikai nyomóerőket ezen helyi nyomások és az adott lemezfelületek normálisának szorzata adja. A hajó alakellenállása pedig az így kapott hidrodinamikai erők eredőjének a hajó hossz tengelyével párhuzamos komponense. Ez az erő a hajó haladási sebességével ellentétes irányú. Nyilvánvalóan minél kisebb a hajó orr- és far része közti nyomáskülönbség, azaz minél karcsúbbak a hajótest vízvonalai, annál kisebb lesz a hajó alakellenállása.



8.32. ábra

A határréteg leválásának folyamatát ugyancsak a Kármán-féle nyomás elv alapján magyarázhatjuk. A határréteg vastagodásának oka, hogy a zónán belül a folyadék részecskék ütközései következtében az egymás mögött elhelyezkedő ellenőrző keresztmetszetekben az átlagsebesség egyre kisebb lesz. Így a zónán belül a fal közvetlen közelében amúgy is lassú áramlás még tovább lassul, miközben az a hajó fara felé egyre nagyobb nyomású hely felé mozog. Egy ponton elérkezünk oda, hogy a fal közelében áramló folyadék részecskék már nem képesek a nagy nyomás ellenében tovább haladni, megállnak, majd a nagyobb nyomás ellenkező irányú áramlásra kényszeríti őket. Azaz örvénylésbe kezdenek, és a határréteg levál a felületről.

A fent leírtak eddig csak az [xy] síkban vizsgálták a haladó hajó mellett kialakuló hidrodinamikai viszonyokat. A vázolt nyomáeloszlásnak azonban van hatása az [xz] síkban is, mert a környezeti nyomástól eltérő nyomású pontok mindegyike egy-egy adott sebességű elemi hullám kiinduló pontja is. Azaz a haladó hajótest mellett ezen elemi hullámok eredőjeként látható hullám alakul ki. A hullámban mozgó vízcsepp energiáját a hajó hajtására fordított energia egy része fedezi.

Az alakellenállás: $R_{vp} = c_{vp} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v^2 \cdot S$ [N]

A hullámmellenállás $R_w = c_w \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v^2 \cdot S$ [N]

A képletekben a már ismert jelöléseken kívül
 c_{vp} az alakellenállási,
 c_w a hullámmellenállási tényező

Az alak- és a hullámmellenállás egymástól szétválaszthatatlanul jelentkezik. Különböző történő meghatározásukra ugyan ma már léteznek bonyolult közelítő numerikus eljárások, de a mérnöki gyakorlat még mindig a kísérleti úton együttes, ún. maradék ellenállásként (R_R) történő meghatározásukat részesíti előnyben.

A hajótest teljes ellenállása

A hajótest teljes ellenállását a súrlódási ellenállás, valamint az alak és hullámmellenállás eredőjeként értelmezték, ún. maradék ellenállás összegeként határozhatjuk meg.

$$R_T = R_F + R_R = R_F + (R_{vp} + R_w)$$

$$R_T = c_T \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v^2 \cdot S = (c_F + c_R) \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v^2 \cdot S \text{ [N]}$$

8.5.2. Hajók hajtása. Hajócsavar.

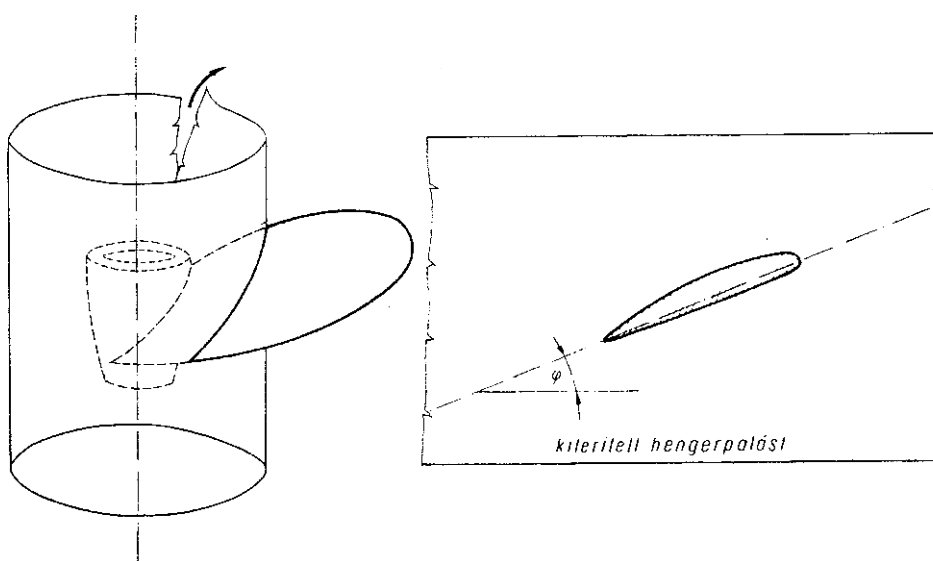
Napjainkban a hajók hajtására legáltalánosabban használt eszköz a hajócsavar. A mai értelemben vett hajócsavar többévszázados kísérletezés után a 19. század közepére alakult ki. A lapátoskerék és a hajócsavar azonban még ezután is sokáig párhuzamosan fejlődött. A két propeller - a hajók hajtására szolgáló tolóerőt létrehozó berendezéseket általánosságban propellernek nevezik – közti versengésben sokáig a lapátoskerék tűnt jobb megoldásnak, nem is elsősorban a lapátoskerék jobb hatásfoka miatt, hanem a lapátoskeréknek az akkori idők megfelelő teljesítményt leadni gépes egyetlen erőgéphez, a gőzgéphez való könnyebb illeszthetősége indokolta. A lapátoskeréknek, mint propellernek a viszonylag jó hatásfoka mellett azonban számos, gépészeti és hajó üzemi szempontból egyaránt kellemetlen tulajdonsága is volt. A lapátoskerék lassú fordulatszámja miatt hatalmas méretű hajtógépeket kellett beépíteni a hajókba, a lassú fordulatszám és a nagy gépteljesítmények következtében a hajtás nagy nyomaterhelése miatt gyakoriak voltak a tengelytörések, tengeri hajókon viharos időben pedig a dülöngélő mozgást végző hajó jobb- és baloldalán a lapátoskerék vízfedése és így nyomaterhelése egyenetlenné vált, amelyet az akkori idők gépészeti színvonalának szabályozástechnikai eszközeivel nem lehetett megfelelően kiküszöbölni.

A hajóból vízmentes tönkcsövön keresztül hátrafelé kivezetett tengelyvezeték végére szerelt hajócsavar(ok) hajtására kezdetben gőzturbinák szolgálták erőgépként. Később, a belsőégésű motorok megjelenésével, illetve azok konstrukciójának mind megbízhatóbbá válásával, valamint azok egységnyi leadott teljesítményre vonatkoztatott geometriai méreteinek csökkenésével a belsőégésű motorok lettek a hajócsavaros hajtás jellegzetes erőgépei. A nagyon nagy hajtási teljesítményigényű hajókhoz azonban manapság is gőz-, illetve gázturbinákat alkalmaznak erőgépként.



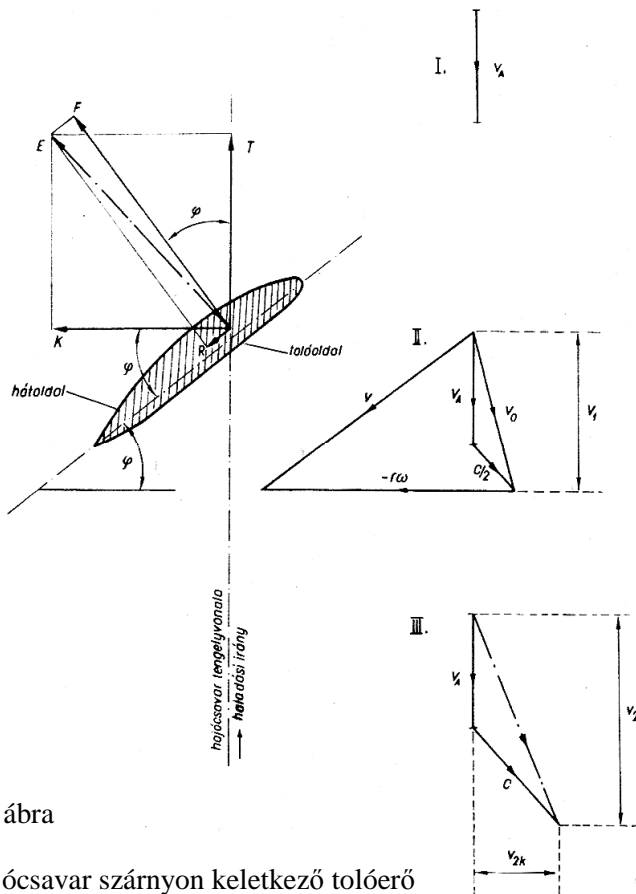
8.33. ábra – Hajócsavar

A hajócsavar a szárnyszámával megegyező bekezdésű kb. egyharmad, egynegyed menethosszúságú csavarfelület (8.33. ábra). Ha a hajócsavar szárnyait egy, a csavar tengelyével tetszőleges „ r ” sugarú koaxiális hengerrel elmetsszük, majd a henger palástját síkba terítjük, kapjuk a csavar adott sugárhoz tartozó profilját (8.34. ábra).



8.34. ábra – A hajócsavar szárnymetszete

Áramlástanai szempontból a forgó hajócsavar szárnyai a hajótest felől a hajócsavarra a csavar tengelyével párhuzamosan v_a sebességgel érkező áramlásba helyezett, a v_a sebességre merőleges $r \cdot \omega$ (a szárprofil kerületi sebességével azonos) sebességgel haladó szárnyrácsként fogható fel. A haladó mozgást végző szárnyrács megváltoztatja a szárnyrács elemei közé belépő folyadék mozgásmennyiségét. Felgyorsítja és eredeti haladási irányának megváltoztatására kényszeríti a vizet. A tolóerő ezen impulzusváltozásnak a csavar tengelye irányába eső komponense. Ezt szemlélteti a 8.35. ábra.



8.34. ábra

A hajócsavar szárnyon keletkező tolóerő

csavar forgatásához szükséges nyomatékot adja $M = K \cdot r \cdot \omega$.

A hajócsavaron keletkező tolóerő győzi le és biztosítja a hajó kívánt sebességű mozgását. A hajó adott v sebességgel történő hajtásához szükséges tolóerő azonban mindig valamivel nagyobb, mint a hajó adott sebességhez tartozó ellenállása. Ennek oka az, hogy a propeller működése megváltoztatja a hajó körüli áramlást. A víz felgyorsításával megnöveli a hajótest súrlódási ellenállását, a működő propeller környékén az áramlási sebességek és a helyi nyomás értékek megváltozása pedig befolyásolja az alak és hullámellenállást is.

A hajó effektív (hasznos) hajtási teljesítménye:

$$P_{\text{eff.}} = R_T \cdot v \text{ [kW]}$$

A hajó hajtás propulziós hatásfoka:

$$\eta_{\text{prop.}} = \frac{P_{\text{eff.}}}{P_B}$$

, ahol P_B a beépített gépteljesítmény [kW]

A jól megtervezett hajóhajtás propulziós hatásfoka kb. 50 – 55%.

A hajók fékezésére ugyancsak a propeller szolgál. A hajó lefékezése hátraveretéssel, azaz a propeller forgásirányának megfordításával történik.

A v_a sebesség nem azonos a hajó haladási sebességével. Az a hajócsavarra érkező víz sebessége, amely azonban a hajótest alakjától, illetve a propellernek a hajótest mögötti elhelyezkedésétől függő korrelációban van a hajó haladási sebességével.

A hajócsavarhoz rögzített koordináta-rendszerből nézve a szárnyrác elemei között a víz a profil húrjával párhuzamos v sebességgel áramlik, amelynek axiális irányú komponense $v_1 > v_a$.

A szállító sebesség $-r \cdot \omega$

A szárnyprofilon a húrjával párhuzamos v sebességű áramlás hatására a húrra merőleges felhajtó erő és a húrral párhuzamos ellenállás erő keletkezik. Ezek eredője a 8.35. ábrán E-vel jelölt erő. Az E erőnek a csavar tengelyének irányába eső komponense a T tolóerő. A tengelyre merőleges erőkomponens és az $r \cdot \omega$ területi sebesség szorzata a

8.5.3. Példa hajó effektív hajtási teljesítményének és fajlagos szállítási teljesítményének meghatározására

Határozzuk meg egy 100 m hosszú, 15 m széles, 6 m merülésű 6500 tonna vízkiszorítású, 4500 tonna hasznos tömeget szállítani képes, 22,5 km/ó sebességgel tengervízben haladó hajó effektív hajtási teljesítményigényét.

$$\begin{aligned} \text{A hajó nedvesített felülete:} & \quad S = 2050 \text{ m}^2 \\ \text{A hajó teljes ellenállási tényezője:} & \quad c_T = 0.003. \\ \text{A tengervíz sűrűsége:} & \quad \rho = 1025 \text{ kg/m}^3 \end{aligned}$$

A példában a hajó vízkiszorítása és főméretei csupán tájékoztatásul szolgálnak.

$$v = 22,5 \text{ km/ó} = 6.25 \text{ m/s}$$

A hajótest ellenállása:

$$R_T = c_T \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v^2 \cdot S = 0.003 \cdot \frac{1025}{2} \cdot 6.25^2 \cdot 2050 = 123.12 \text{ kN}$$

A hajóhajtás effektív teljesítménye

$$P_{eff} = R_T \cdot v = 123.12 \cdot 6.25 = 769.5 \text{ kW}$$

Hajó 22,5 km/ó (6.25 m/s) haladási sebessége eléréséhez $\eta_{prop.} = 0.55$ propulziós hatásfok feltételezésével szükséges beépített gépteljesítmény:

$$P_B = \frac{P_{eff.}}{\eta_{prop.}} = \frac{769.5}{0.55} \cong 1400 \text{ kW}$$

A fenti sebességgel és gépteljesítménnyel a hajó 24 óra alatt $s = v \cdot t = 22.5 \cdot 24 = 540 \text{ km}$ utat tesz meg, és közben 0.2 kg/kWó fajlagos üzemanyag fogyasztással számolva $B = 0.2 \cdot 1400 \cdot 24 = 6720 \text{ kg}$ gázolajat fogyaszt.

Figyelembe véve a hajó 4500 tonnányi hasznos hordképességét a hajó fajlagos szállítási teljesítménye:

$$\begin{aligned} \text{fajlagos szállítási teljesítmény} &= \frac{\text{üzemanyag fogyasztás}}{\text{szállítási távolság} \cdot \text{szállítottárumennyiség}} = \\ &= \frac{6720}{540 \cdot 4500} = 1.24 \cdot 10^{-3} \frac{\text{kg}_{\text{üa.}}}{\text{km} \cdot \text{tonna}} \end{aligned}$$

Azaz a fenti paraméterekkel rendelkező hajóval 1 tonna rakomány 1 km-re történő elszállításához alig több, mint 1 gramm üzemanyag elegendő.