
4.3 Hajók propulziója

4.3.1 Alapfogalmak

A *propulzió* kifejezés latin eredetű, nemzetközileg elfogadott fogalom, amely egy jármű (leginkább vízi- vagy légi-jármű) meghajtására vonatkozik. Jelentése *energiaátalakítás* a meghajtó gépelem (pl. hajócsavar, légszár, turbina, lapátkerék, stb.) és a jármű mozgatásának energiaellátására szolgáló energiaforrás között.

4.3.1.1 Propulziós energiaforrások

A hajók propulziós energiaforrásai két csoportba sorolhatóak.

Belső energiaforrások. Ezek a következők.

- a) *Felhajtóerő:* a vízben mozgó *propulziós eszközön* a meghajtás (forgatás) közben ébredő erőhatás, amelynek haladásirányú összetevője tolóerőt ad a jármű mozgatásához. Ilyen propulziós eszközök lehetnek:
 - szabadon forgó hajócsavar,
 - gyűrűben forgó hajócsavar,
 - Voith-Schneider propeller, stb.
- b) *Ellenállásérő:* a vízben mozgó propulziós eszköz mozgása közben keletkező erőhatás, amelynek haladásirányú összetevője tolóerőt ad a jármű mozgatásához. Ilyen propulziós eszközök:
 - oldalsó lapátkerék,
 - far-(lapát)kerék.
- c) *Reakcióerő:* a vízfelszín alatt vagy felett nagy sebességgel távozó anyagsugár (víz, gáz) reakcióereje, amelynek haladásirányú összetevője tolóerőt ad a jármű mozgatásához. Ilyen propulziós eszközök:
 - nagy teljesítményű szivattyúval előidézett vízszugár,
 - belsőégésű motor kipufogó gáza,
 - gőzturbinából kiáramló gőz, stb.
 - a járművön elhelyezett gépi hajtású légszár légsugara.
- d) *Kapaszkodóerő:* szilárd külső objektummal létesített folyamatos kapcsolat hozza létre, pl. zuhatagi szakaszon üzemelő láncos vontató vagy átkelő komp esetében.

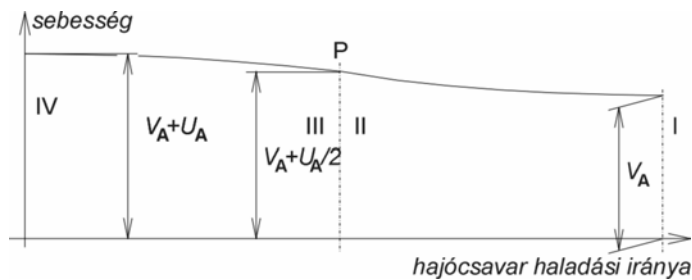
Külső energiaforrások. Ilyenek az alábbiak.

- a) *Vontató- vagy tolóerő:* a járművön kívül fellépő erőhatás, amelynek forrása lehet:
 - a parton közlekedő vontatóeszköz (állat, ember, jármű),
 - másik vízi-jármű, pl. vontatóhajó, tolóhajó, mellécsatolt géphajó,
 - külső fix pont.
- b) *Szélerő:* a vitorla felületén fellépő szélnyomás hozza létre.

4.3.1.2 Nyíltvízi állapot

BBBZ kódex

A propulziós eszköz (nevezzük a továbbiakban az egyszerűség kedvéért hajócsavarnak vagy csavarnak) vizsgálatánál tételezzük fel először azt, hogy a vízben egyedül, a hajótesttől függetlenül van elhelyezve és működése közben nem hat rá semmilyen külső tényező. A csavar működése közben a vízhez képest V_A sebességgel halad (vontatják, ahogy pl. modellkísérlet közben történik), a csavar előtt jelentős távolsággal, ahol a csavar hatása még nem érezhető, a víz sebessége a csavar síkjához képest V_A mértékű. A 4.3.1.2.1, 4.3.1.2.2 és 4.3.1.2.3 ábra rendre a hajócsavar síkjában illetve előtte és utána mérhető sebesség-, nyomás- és sugárkeresztmetszet értékeket ábrázolja.



4.3.1.2.1 ábra Axiális vízsebesség-értékek a hajócsavar tengelyvonalában

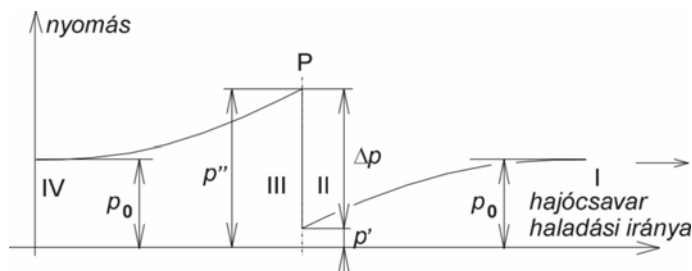
Az alkalmazott jelölések magyarázata:

V - a víz axiális sebessége a hajócsavar síkjához

képest [m/sec]

V_A - a csavar haladási sebessége (vontatási sebesség) [m/sec]

U_A - a vízszög axiális sebességének változása (a csavar síkja előtt és után mérhető értékek különbsége) [m/sec]



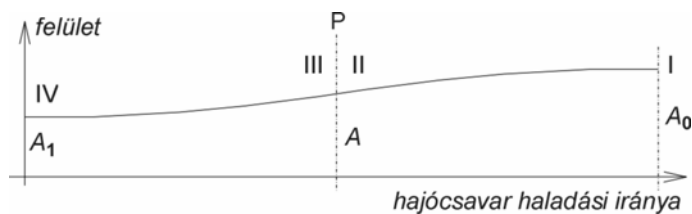
4.3.1.2.2 ábra Nyomás-értékek a hajócsavar tengelyvonalában

P - a hajócsavar síkja

I - a hajócsavar előtt olyan távolságra levő, a csavar tengelyére merőleges sík, ahol a hajócsavar hatása még nem

érezhető

II - a hajócsavar előtt közvetlenül elhelyezkedő, a csavar tengelyére merőleges sík (szívóoldal vagy *hátoldal*)



4.3.1.2.3 ábra A hajócsavaron átviramló vízszög keresztmetszete

III - a hajócsavar mögött közvetlenül

elhelyezkedő, a csavar tengelyére merőleges sík (*toló-oldal*)

IV - a hajócsavar mögött olyan távolságra levő, a csavar tengelyére merőleges sík, ahol a hajócsavar hatása már nem érezhető

p - nyomás [dN/m²]

4.3 Hajók propulziója

3. kiadás 2012.

4.3.1 Alapfogalmak

-
- p_0 - az I és IV síkban a hajócsavar tengelyén mérhető nyomásérték [dN/m²]
 - p' - a II síkban a hajócsavar tengelyén mérhető nyomásérték [dN/m²]
 - p'' - a III síkban a hajócsavar tengelyén mérhető nyomásérték [dN/m²]
 - Δp - a II és III síkban a hajócsavar tengelyén mérhető nyomásértékek különbsége (a hajócsavar által létrehozott fajlagos tolóerő) [dN/m²]
 - A - annak a vízszögnek a keresztmetszete, amely a hajócsavar síkjában a hajócsavar felületén áramlik át [m²]
 - A_0 - a vízszög keresztmetszete az I síkban [m²]
 - A_1 - a vízszög keresztmetszete a IV síkban [m²]

A nyomás- és sebességviszonyokra érvényes *Bernoulli egyenletek* a következők.

$$\begin{array}{ccc} \text{I} & \text{II} & \text{IV} & \text{III} \\ (\rho/2)V_A^2 + p_0 = (\rho/2)V^2 + p' & & (\rho/2)(V_A + U_A)^2 + p_0 = (\rho/2)V^2 + p'' & \end{array}$$

$$\Delta p = p'' - p' = (\rho/2)[(V_A + U_A)^2 - V_A^2] = (\rho/2)(2V_A U_A + U_A^2)$$

A ρ mennyiség a folyadék sűrűségét jelenti (édesvíz esetén 1.000 kg/m³). Az U_A mennyiséget kiemelve a nyomásnövekedés a következő módon fejezhető ki.

$$\Delta p = (\rho/2)U_A(2V_A + U_A)$$

A *hajócsavar tolóereje* a nyomáskülönbség és a felület szorzata.

$$T = \Delta p A \quad [\text{N}]$$

A tolóerő az impulzuserővel egyenlő: $T = \rho A V U_A$, amelyből az első három tényező szorzata a tömeget jelenti. A két egyenlőség felhasználásával a következő egyenletet nyerjük.

$$\rho V U_A = (\rho/2)U_A(2V_A + U_A)$$

Egyszerűsítés után:

$$V = \frac{1}{2}(2V_A + U_A) = V_A + \frac{1}{2}U_A$$

amelyet szóban úgy fogalmazhatunk meg, hogy a sebesség változása a hajócsavar előtt és után fele-fele arányban történik.

4.3.1.3 Propulziós főgépek

A hajó propulziós eszközének meghajtásához szükséges energiát a *főgép* szolgáltatja. A gyakorlatban egy főgép rendszerint egy propulziós eszközt hajt meg, de vannak

kivételek. Ilyenek a folyami gőzhajók, amelyek oldalsó lapátkerekeit közös tengelyre építették, a tengelyt egyetlen (1-, 2- vagy 3-hengeres) gőzgép hajtotta meg. A másik közismert kivétel a dízel-elektromos rendszerre alapozott két lapátkerekes folyami vontató volt, amelyet a 20. század első harmadában építettek a Ganz Hajógyárban ("Baross" és "Széchenyi"). Ezeknél három dízel-generátor fejlesztette az elektromos áramot, amely a lassú-járású propulziós elektromotort látta el energiával. Az elektromotor a lapátkerekek tengelyére volt építve, és azt közvetlenül hajtotta meg. Ez a rendszer szinte egyedülálló volt a folyami vontatókon, de elfogadott volt a két világháború között épült tengeralattjárók propulziós rendszerében.

Az óceánjáró személyszállító hajóknál alkalmazzák azt a megoldást, hogy több gőzturbina hajt meg közösen egy propulziós tengelyt. A hajóépítés gyakorlata azonban általában az egy főgép, egy propulziós eszköz elvet követi.

4.3.1.4 Energia-átalakulás

A *propulziós energia* a főgéptől a propulziós eszközön át a hajó haladásáig a következő átalakulásokon megy át:

erőgép → propulziós eszköz → közeg (édes- vagy tengervíz) → hajótest
mechanikai energia → mechanikai energia → folyadékenergia → tolóerő

Az átalakulás mindig valamilyen hatásfokon történik, jelen esetben a hatásfokot *ideális propulziós hatásfoknak* nevezzük, és a következő formulával fejezzük ki.

$$\eta_{0i} = T_{VA}/T_V = V_A/(V_A + (U_A/2))$$

A formulában szereplő mennyiségeket az előzőekből már ismerjük. Ami azonban újnak tűnhet, az, hogy a hajócsavar teljesítménye (a tolóerő, amelyet elvárunk, hogy létrehozza a hajó haladását) csak a propulzió hatásfokának kárára növelhető.

Amennyiben a csavar jelentős növekedést idéz elő a vízszög axiális sebességében (nagy az U_A értéke), a hatásfok értéke csökken, mivel az U_A a nevezőben van. Mikor lehetne az U_A kicsi? Akkor, ha nagy átmérőjű csavarral építjük a hajót, abban az esetben ugyanis kis nyomáskülönbség illetve sebességnövelés is jelentős tolóerőt hoz létre. Minél kisebb a csavar mérete, annál kisebb a sugár keresztmetszete, tehát annál nagyobb mértékben kell a vízszög sebességét növelni a kívánt tolóerő eléréséhez. Ekkor viszont csökken a hatásfok.

Példa

Egy dunai dízelmotoros önjáró hajó egyetlen hajócsavarja kb. 50.000 N tolóerőt hoz létre menetben. A hajó haladási sebessége kb. 2,5 m/s. A csavar átmérője 1,6 m, a csavarkör felülete így kb. 2 m². A közeg édesvíz, fajsúlya γ (gamma) = 1000 dN/m³.

$$T = 50.000 \text{ N} \cong 5.000 \text{ dN}$$

$$V_A \cong 2,5 \text{ m/s}$$

$$D = 1,6 \text{ m} \rightarrow A \cong 2,0 \text{ m}^2$$

$$\text{vízsűrűség } \rho = 1.000 \text{ dN/m}^3$$

A fenti egyenletekből az U_A értéke a következő közelítéssel fejezhető ki.

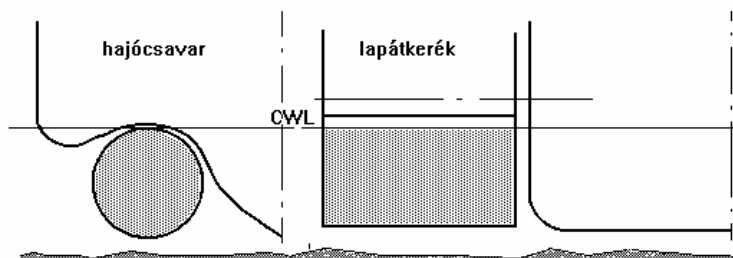
$$U_A \cong (2g(\Delta p/\gamma))^{1/2} = (2g(5.000/(2 \times 1.000)))^{1/2} \cong 7 \text{ m/s}$$

A propulzió hatásfoka:

$$\eta_{0i} = V_A/(V_A+(U_A/2)) = 2,5/(2,5+3,5) = 2,5/6 = 0,416$$

A formula azt a korábbi megállapítást igazolja, hogy a jó hatásfokhoz kis U_A és nagy A mennyiség szükséges.

Az alábbi ábra a kétcsavaros és a lapátkerékes dunai hajó esetében megvalósítható felületviszonyokat mutatja.



4.3.1.4.1 ábra Hajócsavar és lapátkerék felületének összehasonlítása

A propulziós hatásfok képletét átalakíthatjuk használhatóbb alakba, ha szorzással eltüntetjük a

nevező nevezőjéből a 2-t, helyette osztással a V_A mennyiség kerül a helyébe.

$$\eta_{0i} = 2/(2+(U_A/V_A))$$

A tolóerő mennyisége elvonatkozatható a konkrét méretektől, amennyiben megalkotjuk a C_T *tolóerő-tényezőt*, vagy más néven *terhelési tényezőt*.

$$C_{Ti} = T/((\rho/2)V_A^2 A) = 2(U_A/V_A) + (U_A/V_A)^2$$

A C_{Ti} növelése esetén a hatásfok csökken.

Az η_{0i} hatásfok függ a T tolóerő, az F csavarfelület és a V_A haladási (vontatási) sebesség nagyságától.

Egy kis további egyszerűsítéssel a propulziós hatásfok a következő képlet szerint alakul.

$$\eta_{0i} = 2/(1-(C_{Ti}+1)^{1/2})$$

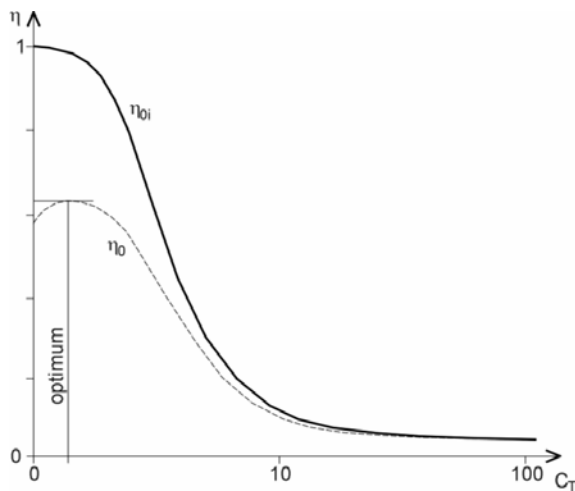
A teljes propulziós energialánc hatásfoka azonban ennél kisebb, és a következő képlettel írható fel.

$$\eta_0 = TV_A / (Q\omega)$$

ahol T a V_A sebességnél a hajócsavaron mérhető tolóerő, Q pedig a hajócsavar tengelyén a csavar hajtásához ω szögsebességnél szükséges nyomaték.

Az energiaátalakulás során η_B mutatja az átalakulás hatásfokát a TV_A hasznos teljesítmény és $Q\omega$ felvett teljesítmény között. A TV_A hasznos teljesítmény és a csavaron átáramló víz teljesítménye közötti viszonyt az η_0 jelzi.

Az alábbiakban tekintjük meg az említett két hatásfok és a terhelési tényező összefüggését ábrázoló diagramot.



4.3.1.4.2 ábra A propulziós hatásfok és a valóságos hatásfok változása a terhelési tényező függvényében

A propulziós hatásfok a terhelési tényező csökkenésével aszimptotikusan közelíti az ideális 1-es értéket. A C_{Ti} növelésével csak azt érhetjük el, hogy aszimptotikusan a 0 értékhez közelít.

A propulziós energiafolyam valóságos hatásfokának nincs felső ideális értéke, mivel a teljes folyamat egyrészt a propulziós energia-átalakulásból,

másrészt a propulziós eszköznek, mint szivattyúnak a működéséből tevődik össze. Az η_0 valóságos hatásfok tehát a propulziós hatásfoknak és a propulziós eszköz *szivattyú-hatásfokának* a szorzata. A szivattyú hatásfoka a szivattyú (hajócsavar) méretének optimális megválasztása esetén maximális értéket vehet fel, ettől azonban bármelyik irányban eltérve a szivattyú hatásfoka csökken, és ezzel a szorzat is csökken.

Találhatnánk tehát olyan C_{Ti} értéket, amelynél az η_0 maximális értékű (bár valóságos viszonyok között ez az üzemállapot ritkán érhető el). Ezt a kapcsolatot követhetjük nyomon a következő levezetéssel.

$$\eta_0 = \eta_{oi} \cdot \eta_{JP} \text{ ahol a második tényező a szivattyú-hatásfokot jelenti.}$$

A szivattyú-hatásfokot a következőképpen határozhatjuk meg.

$$\eta_{JP} = ((\rho/2)((V_A+U_A)-V_A^2))/(Q\omega) = ((\rho/2)(2V_A+U_A)U_A)/(Q\omega)$$

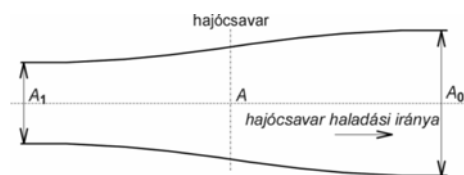
$$\eta_0 = (V_A/(V_A+U_A/2))(((\rho/2)(2V_A+U_A)U_A)/(Q\omega))$$

ahol az első tényező, $V_A/(V_A+U_A/2)$ az η_{0i} ideális propulziós hatásfok, a második $((\rho/2)(2V_A+U_A)U_A)/(Q\omega)$ pedig azt mutatja, hogy szivattyúként milyen (általában 90-95%) hatásfokkal működik a hajócsavar.

A hajócsavaron átáramló vízszög keresztmetszet-változásának szemléltetésére szolgál a *kontrakciós tényező*, jele κ (kappa). A vízszög változása és az azt leíró összefüggés a 4.3.1.5.1 ábrából látható.

4.3.1.5 A hajótest hatása a hajócsavar működésére

Az eddigiekben feltételeztük, hogy a hajócsavar minden külső zavaró hatástól mentesen a szabad vízben működik. Ez azonban ideális állapot, a valóságban a hajócsavar a hajótest alatt és mögött van elhelyezve, a lapátkerék pedig dunai viszonyok között a hajótest oldalánál merül a vízbe, ami azt jelenti, hogy az eddigi megállapításokat ki kell egészítenünk a hajótest hatásával. Ehhez nézzük meg a hajótest áramlási viszonyait, elsősorban a hajócsavar helyén, de most azt tételezzük fel, hogy nincs ott a hajócsavar. Ennek az az előnye, hogy figyelmen kívül hagyhatjuk a csavar működésének zavaró hatásait, tehát a kapott összefüggések viszonylag egyszerűbbek lehetnek. A hajótest és a hajócsavar kölcsönhatását később vizsgáljuk meg.



4.3.1.5.1 ábra A csavaron átáramló vízszög keresztmetszetének változása

A kontrakciós tényező számításának módja:

$$\kappa = A_1/A = (V_A+U_A/2)/(V_A+U_A) = (1+(C_{Ti}+1)^{1/2})/(2(C_{Ti}+1)^{1/2})$$

A nyíltvízi és a hajótest mögötti állapot jellemzőinek eltérése három alapvető hatásra vezethető vissza:

- sodor,
- tolóerő csökkenése,
- forgás.

Sodorhatás

Vegyünk egy szokásos hajótestet, amely mögött két hajócsavar van felszerelve, de a csavarok nem működnek (mivel jelen esetben csak a csavarok helyén uralkodó áramlási viszonyokkal foglalkozunk). A hajótest kialakítása (vonalarajza) és a hajó merülése határozza meg, hova és milyen hajócsavarok kerülhetnek. A hajót V_S sebességgel vontatjuk. A hajócsavarok helyén mérhető vízsebesség haladási irányú összetevője V_A . A hajócsavar helyén mérhető hosszirányú vízsebesség több ok miatt kisebb, mint a hajó haladási sebessége.

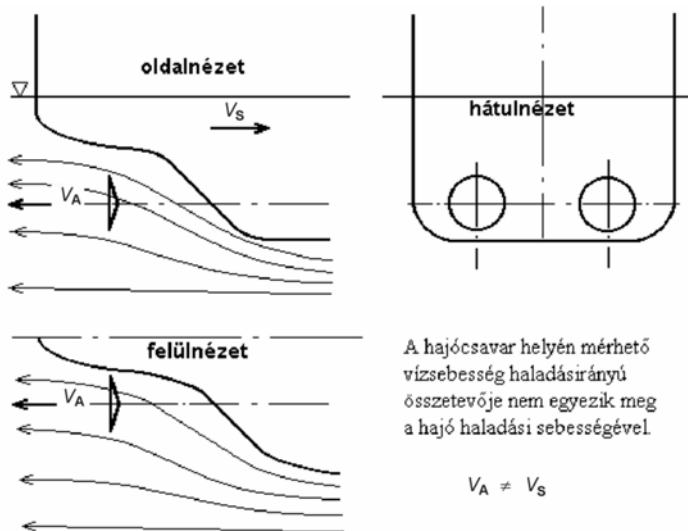
$$V_A < V_S$$

Ez a jelenség a sodorhatás, amellyel számszerűen az okok vizsgálata után foglalkozunk. A sodorhatás alapvetően három okra vezethető vissza.

1. Potenciális, vagyis helyzeti ok.

A hajócsavar a hajótest mögött olyan helyen van felszerelve, amelyet a hajótest körül kialakuló áramlás áramvonalai kikerülnek, és holt zóna keletkezik.

A következő ábra a hajótest körül a hajócsavarok helyének környezetében kialakuló áramlást mutatja áramvonalak segítségével.



4.3.1.5.2 ábra Vontatott hajótest körül a hajócsavar helyén kialakuló áramlás

Ebben a holt zónában a hajótest magával sodorja a közeget, ezért ezt a jelenséget hajósodornak is nevezzük. A sodor mértékét befolyásoló tényezők:

- hossz-szélesség viszony (L/B); minél nagyobb a hajótest szélessége azonos hossz mellett, annál*

nagyobb a sodor mértéke,

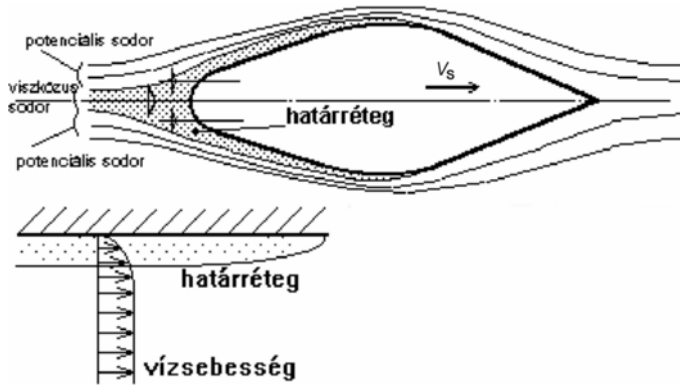
- hasábos teltség, $\nabla/(LxBxT)$; a nagyobb teltségű hajótest mögött erősebb sodor alakul ki,*
- szélesség-merülés viszony (B/T); a viszonszám nagyobb értéke esetén a sodor mértéke kisebb,*
- a hajócsavar beépítési pozíciója, mint*
 - kétszaváros konstrukció, a két csavart egymástól minél távolabb kell elhelyezni, ez azt jelenti, hogy a hajó szélétől kisebb távolságra mérhető sodorhatás kisebb, mint a hajó középvonalában,
 - egyszaváros hajónál a sodor általában magasabb, mint kétszavárosnál,
 - folyami hajóknál a teljesítmény és a korlátozott merülés két egymásnak ellentmondó kényszerítő körülmény, ezért a csavart a hajótestben kiképzett alagútban kell elhelyezni, nem ritkán a csavarkör felső része álló helyzetben a vízfelszín felett van; a csavar működése közben megtölti az alagutat vízzel, de ez a konstrukció erős sodorhatással kénytelen számolni.

A potenciális sebességcsökkentő hatás úgy foglalható össze, hogy minél nagyobb a hajótest hatása, vagyis minél jobban el van rejtve a hajócsavar a szabad vízáramlás elől, annál inkább érvényes, hogy

$$V_A < V_S$$

2. Folyadéksúrlódási (viszkózitási) ok

A hajótest mellett áramló közeg valóságos folyadék, amelynek *viszkózitása* van. Az áramlás felület mentén történik, tehát határréteg alakul ki, amelyet a következő ábra mutat.



4.3.1.5.3 ábra A hajótest mellett áramló víz sebessége határrétegen belül és kívül

A határréteg kialakulásának lehetősége csökken a vízkiszorítás-hossz viszony (D/L) növekedésével, vagyis nagyobb hajóknál ez a tényező kevésbé jelentős.

A folyadéksúrlódás hatása

azonban mindenképpen hozzájárul ahhoz, hogy

$$V_A < V_S$$

A viszkózus sodor jelensége a teljes sodorhatás 80-90%-át is kiteheti.

Kétszavaras hajóknál csak a potenciális sodor jelentős, így a folyadéksúrlódás hatása sokkal kisebb.

3. Hullámképzés (farhullám) hatása

A hajótest haladása közben a hajó hosszától, a haladás sebességétől és a vízi-út mederviszonyaitól (főleg folyami hajók esetében) függő hullámkép alakul ki, amelynek keltője maga a hajótest. A hullámot olyan körmozgás szemlélteti, ahol a hullámhegy a kör felső pontjának felel meg, itt a víz sebessége a hajó mozgásával megegyező irányú, a hullámvölgy a kör alsó pontja, a víz sebessége ellentétes. Ennek hajócsavarra gyakorolt hatása a sodor néhány százalékos növekedésében jelentkezik. Vagyis azt eredményezi, hogy

$$V_A < V_S$$

A fenti három hatás eredményeként kellett megalkotni a *sodortényező* (*w*, az angol *wake* szóból) fogalmát, amely a sodorsebesség és a hajósebesség viszonyát jelenti, és a következő képlettel fejezhető ki.

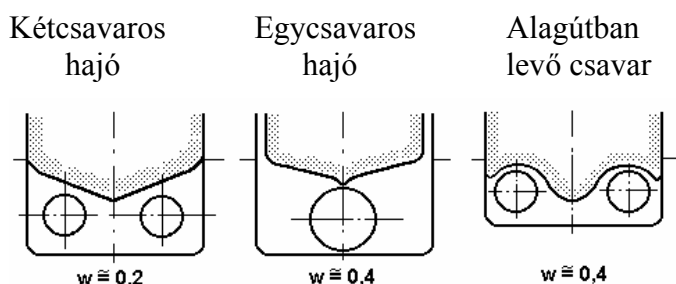
$$w = (V_S - V_A) / V_S = 1 - (V_A / V_S)$$

BBBZ kódex

A sodor fogalmának megértéséhez szükséges, hogy különbséget tegyünk a következő két mennyiség között:

- *névleges sodor*: a hajócsavar helyén mérhető adatokból számítjuk a hajócsavar álló helyzetében (vagy a hajócsavar nincs felszerelve),
- *valóságos sodor*: a hajócsavar helyén mérhető adatokból számítjuk a hajócsavar működő állapotában.

A hajócsavar tervezése során a sodortényezőt közelíteni kell tapasztalati értékek szerint, erre normál hajótestek esetén a következő értékek állnak rendelkezésre.



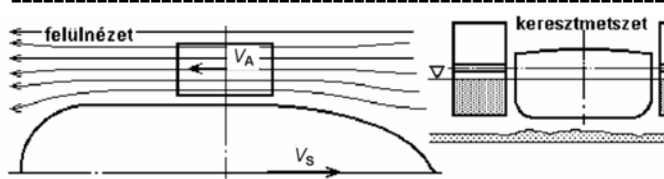
4.3.1.5.4 ábra Különböző hajótestek megközelítő sodortényező értékei

A sodortényező pontos értéke csak méréssel határozható meg.

Egyedi hajó gyártása előtt a hajó modelljével modellkísérletet lehet végezni, amelynek keretében mérik a hajótest ellenállását eltérő sebesség- és terhelési állapotokban, és mérik a hajócsavar kör felületén a vontatási sebességhez viszonyított axiális sebesség eloszlását. Sorozathajó esetén a helyzet kedvezőbb, mivel a természetes nagyságú hajó vontatása is elvégezhető, és a prototípus hajó propulziójának mért adatai alapján a többi hajó propulziója a körülmények szerinti optimális paraméterekre módosítható.

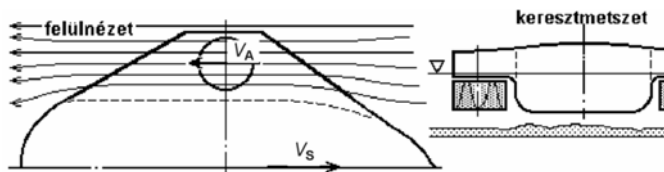
A csavarkör felületén mérhető sodoreloszlás (egy esetben a sodortényező azonos értékű pontjainak összekötésével kapott görbékkel, más méréseknél a sodortényező kiegészítő értékének értékeivel dolgoznak) fontos képet ad a csavar beépítésének környezetéről. A sodortényező átlagértéke a $0,7R$ sugáron mérhető értékekből adódik. A következő táblázat más oldalról elindulva részben tapasztalati képleteket, részben a modellkísérletek eredményeit felhasználva ad hasznos, és valamivel pontosabb kiindulási adatokat.

Számítási szempont	Kiválasztási kritérium	Sodortényező értéke
Taylor képlete	egyszaváros hajó	$0,5 \cdot C_B - 0,05$
Taylor képlete	kétszaváros hajó	$0,55 \cdot C_B - 0,20$
Normál teherhajó	hasábos teltség = 0,70	0,30
Nagy ömlesztett-áru szállító	hasábos teltség = 0,80÷0,85	0,40÷0,50
Konténerszállító hajó	hasábos teltség = 0,60÷0,65	0,25
Kétszaváros személyhajó/komp	hasábos teltség = 0,50	0,10÷0,15
Nagysebességű hadihajó	normál sebességnél	0,05
Nagysebességű hadihajó	teljes sebességnél	-0,05



4.3.1.5.5 ábra Lapátkerékes hajótest mellett kialakuló áramlás

Vannak olyan propulziós eszközök, amelyeknél az eddig ismertetett összefüggések nem érvényesek, vagy eltérően érvényesek. Ezek között van a legrégebben alkalmazott propulziós eszköz, a *lapátkerék*, de idetartozik az egyik legkorszerűbb eszköz is, a *Voith-Schneider propeller*. Ezeket az eszközöket később jobban megismerjük, de az általános elvekről a két ábra képet ad.



4.3.1.5.6 ábra Voith-Schneider propelleres hajótest mellett kialakuló áramlás

A hajófar mögött elhelyezett propulziós eszköznél megvizsgált három tényező, amely a sodor jelenségének kialakulásához vezet, illetve annak értékét növeli, az oldalt elhelyezett propulziós eszközök esetében a következőképpen alakul.

1. Potenciális, vagyis helyzeti ok.

A felülnézetben jól megfigyelhető áramvonal sűrűsödés azt jelzi, hogy a hajótest mellett, ahol a lapátkerék illetve Voith-Schneider propeller működik, a vízsebesség nagyobb, mint a hajó haladási sebessége, azaz

$$V_A > V_S$$

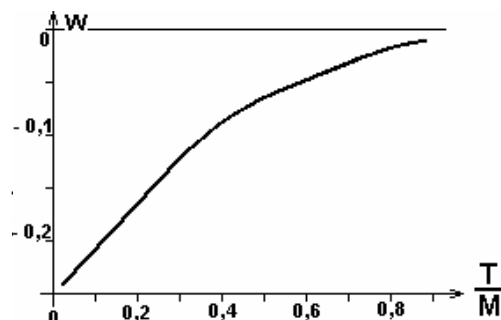
Ehhez hozzájárul még, hogy a hajótest kialakítása nem követeli meg a hajófenék alatti vízáramlást, mint a far alatt, esetleg alagútban elhelyezett hajócsavarnál, hanem a közeg a hajótest mellett képes elfolyni, aminek eredményeként sekély vízben még erősebb a víz felgyorsulása a hajótest oldalánál.

2. Folyadéksúrlódási ok

A hajótest mellett áramló vízben a sebesség megnövekedése miatt kisebb a határréteg hatása, ezért lapátkerék és más oldalt elhelyezett propulziós eszköz esetében ez a tényező elhanyagolható.

3. Hullámhatás

A hajótestek alakja oldalt elhelyezett propulziós eszköznél meglehetősen kevésbé



4.3.1.5.7 ábra Oldalsó propulziós eszköz sodortényezőjének változása

BBBZ kódex

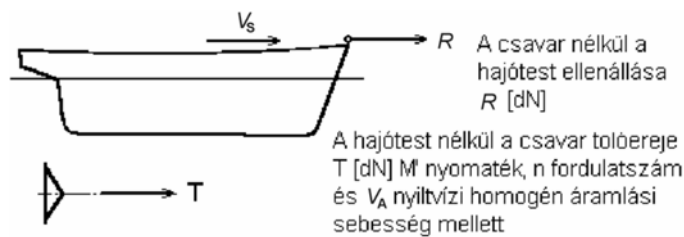
különbözik, ezért ebből a szempontból valamennyi azonosnak vehető.

A sodortényező értéke ezúttal negatív szám lesz, amely az alábbi képlettel számítható, és a merülés-vízmélység hányados (T/M) függvényében a 4.3.1.5.7 ábra szerint változik.

$$w = (V_S - V_A)/V_S$$

Tolóerő-csökkenés

A hajók propulziós eszközének feladata az, hogy a hajótestet a közegben az előírt sebességgel mozgásban tartsa, ami más szavakkal azt jelenti, hogy akkora tolóerőt kell létrehoznia a meghajtó propulziós erőgép (gőzgép, dízelmotor, gőzturbina) energiájának hasznosításával, amely a hajótest adott sebességnél fellépő ellenállásának felel meg dinamikus egyensúlyi állapotban.



4.3.1.5.8 ábra A hajótest ellenállása és a csavar tolóereje elméletben

A hajótest ellenállása és a propeller tolóereje az ábra szerinti kapcsolatban van.

Amennyiben a valóságos helyzetet tekintjük, mind a hajótest ellenállására, mind a csavar tolóerejére eltérő értékeket kapunk. A hajótest ellenállása a csavar működése közben R' , ahol

$R' > R$, és ennek okai a következők.

1. Súrlódási ok

A hajócsavar helyén a csavar nélkül mérhető V_A sebesség helyett a csavar működésének hatására nagyobb vízsebesség jön létre, amelynek eredménye az, hogy (a sodortényező által meghatározott mértékben) megnő a hajótest körüli vízáramlás sebessége is. A hajótest ellenállása ennek a sebességnövekedésnek a következtében nagyobb, mintha a haladást vontatással biztosítanánk.

2. Hullámhatás

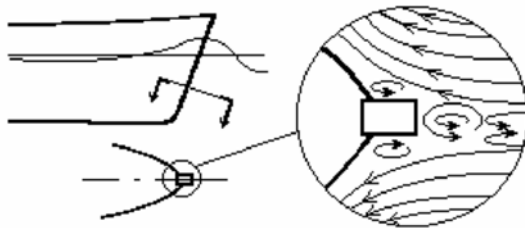
A hullámhatás egyrészt a hajótest befolyásának eredménye, amely az orrtőke előtti torló-hatásból, a hajótest teltségének hullámkeltő hatásából és a hajótest mellett kialakuló teljes hullámképből áll (az utóbbinak része az is, hogy a hajótest farhulláma és a hajócsavar által keltett hullám nincs fázisban), másrészt a propeller működésének köszönhető, ami a hajó mozgatásához szükséges energia növekedését eredményezi. Végeredményként tehát ismét

$$R' > R$$

A csavar tolóereje a hajótest mögött működés közben T' , ahol $T' < T$, és ennek oka az, hogy a hajócsavar a beépítési helyen nem kap homogén áramlást. A csavarkör területén a sodortényező helyi értéke bizonyos eloszlás szerint változik, az a sodortényező, amellyel a hajócsavar méretezését végezzük, átlagérték. A csavar szárnyai egy körülfordulás alatt a legkisebb és legnagyobb helyi értéket is érzékelik, emiatt az átlagos sodortényezőre kiszámított geometriai jellemzővel bíró propulziós eszköz az optimálisnál rosszabb viszonyok között dolgozik.

Lássuk mindezt a következő ábrán.

Az ortőke által létrehozott torlónyomás hatása (kis hullámhegy)



4.3.1.5.9 ábra A hajótest ellenállásának megnövekedését okozó hullámhatás

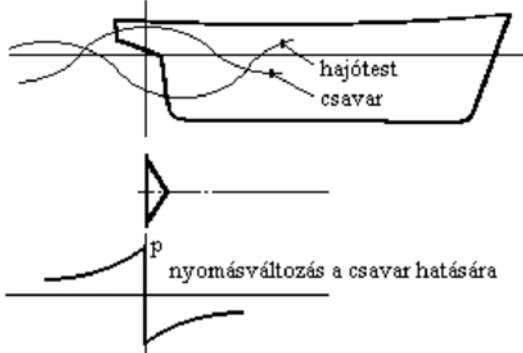
Az állandó V_s sebességgel haladó hajónál tehát az alábbi ellenállás és tolóerő értékeket értelmezhetjük.

A hajótest teltsége miatt létrejövő nagy hullám völgy (szívás)



R' a működő hajócsavarnál mérhető hajótest-ellenállás
 T' a hajótest mögött működő hajócsavar tolóereje
 R a hajócsavar nélküli hajótest ellenállása
 T a hajócsavar hajótest nélkül mérhető (nyíltvízi) tolóereje

A hajócsavar és a hajótest fara által keltett hullámok



Ezek között a következő összefüggés érvényes.

$$R < R' = T' < T \text{ azaz } R \ll T$$

A gyakorlatban nem használatos az R' és a T' mennyisége, helyett a

szívási (tolóerő csökkentési) tényezőt értelmezzük, amely

$$t = (T-R)/T = 1-R/T$$

A szívási tényező becsült értékei a leggyakoribb esetekben:

- egycsavaros tengeri hajónál vagy alagútban működő folyami hajóknál kb. $0,65w$,
- kétszavaros hajóknál a t szívási tényező értéke nagyjából megegyezik a w sodortényezőével,
- a hajótest mellett elhelyezett propulziós eszköznél a szívási tényező a merülés és a vízmélység függvénye.

Kicsit pontosabb kiindulást biztosít az alábbi táblázat használata.

Számítási szempont	Kiválasztási kritérium	Szívási tényező értéke
Taylor képlete	egycsavaros hajónál	$0,65w$
Taylor képlete	kétszavaros hajónál	w
Általában két csavarnál	külső tönkcső-védőnél	$0,25w + 0,14$
Általában két csavarnál	tengelybakok esetén	$0,7w + 0,06$
Modern egycsavaros hajónál		$0,3C_B$

Forgási tényező

A hajócsavar nyíltvízi és hajótest mögötti T tolóerejének eltérése végső soron azt eredményezi, hogy a hajócsavar hajtásához szükséges Q nyomaték és P teljesítmény azonos V_A sebesség és n fordulatszám mellett eltérő lesz.

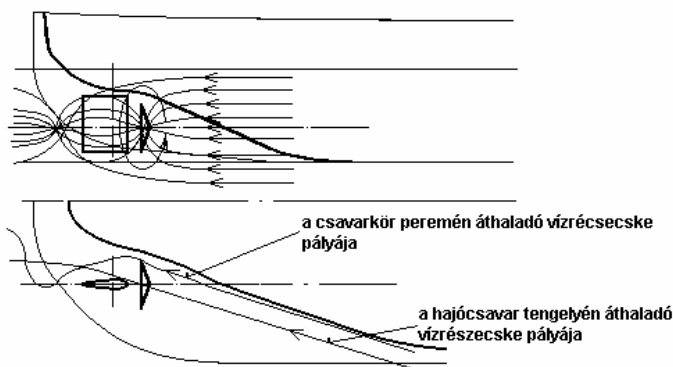
Hajócsavar nyíltvízi állapotban: $T \rightarrow Q' (n, V_A)$

hajótest mögött: $T \rightarrow Q (n, V_A)$

A két nyomaték nem egyenlő, $Q \neq Q'$. Ennek forrása az a jelenség, hogy

- a hajócsavar a rajta átáramló vízszögletet nem csupán felgyorsítja, hanem meg is forgatja, olyan energiát ad át neki, amelyre nincs szükség, ez pedig veszteséget okoz, amely kisebb nyíltvízi állapotban,
- a vízszöglet forgását a hajótest melletti áramlás is növeli, a forgás ellen ható tényező, ha a csavar mögött kormánylapát van elhelyezve.

A következő ábra ezt a jelenséget szemlélteti.



4.3.1.5.10 ábra A hajócsavar környezetében kialakuló áramlási kép

A különböző hajótestek esetében az áramlási képet meghatározó környezet (fartőke vagy tönkcső-kilépés, tengelybakok, kormánylapát) nagyon eltérő lehet a konstrukciós követelmények miatt.

A nyíltvízi és az üzemi

(valóságos) állapotban mérhető Q' és Q nyomaték kapcsolatát a *forgási tényező* vagy *forgási hatásfok* fejezi ki.

$$Q \neq Q'$$

$$\eta_R = Q'/Q$$

A forgási tényező értékét a hajócsavar méretezésénél tapasztalat alapján választjuk ki. Négy alapeset fordul elő:

- egycsavaros hajó hagyományos fartőkével, a hajócsavar mögött kormánylapát, $\eta_R = 1,03 \div 1,08$ (az érték a fartőke és a kormánylapát méretével nő),
- egy- vagy kétszavaros hajó fartőke nélkül, a hajócsavar mögött kormánylapát, $\eta_R = 0,99 \div 1,03$,
- kétszavaros hajó, a hajócsavar mögött nincs kormánylapát, $\eta_R = 0,96 \div 0,99$,
- egyéb propulziós eszköznél $\eta_R \cong 1$.

4.3.1.6 A propulziós hajtáslánc teljesítmény-értékei

A hajók propulziójának ismeretéhez szükséges alapfogalmak körét a főgéptől a propulziós eszközözig történő *energia-átalakulási folyamat* teszi teljessé.

A 4.3.1.6.1 ábra ezt a folyamatot szemlélteti.

Az ábrán szereplő mennyiségek definíciója:

R_T - a hajó mért ellenállása hajócsavar nélkül V_S sebességnél

V_S - a hajó sebessége

V_A - a víz tengelyirányú sebessége a hajócsavar helyén

T - a hajócsavar nyíltvízi tolóereje

Q, n - a hajócsavar hajtásához szükséges nyomaték és a hozzá tartozó fordulatszám

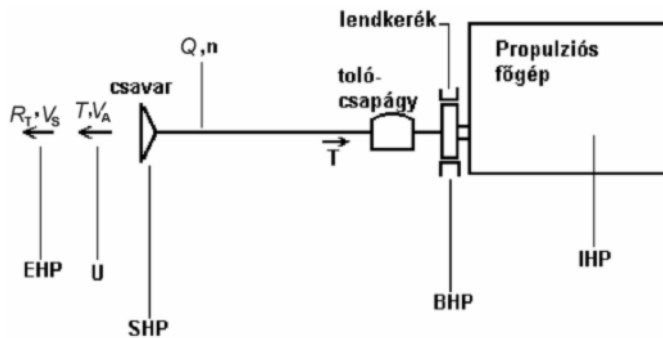
EHP - a hajó mozgatásához szükséges effektív teljesítmény (effective horse power)

U - a hajócsavar nyíltvízi teljesítménye

SHP - a hajócsavarra átadott alkalmazott teljesítmény (shaft horse power)

BHP - a propulziós főgép (motor) lendkerékén mérhető teljesítmény (brake horse power)

IHP - a propulziós főgép (motor) indikált teljesítménye



4.3.1.6.1 ábra A propulziós energia-átalakulás teljes folyamata

A teljesítmény különböző pontokon mérhető értékei között a következő összefüggések írhatók fel az egyes részfolyamatok hatásfokaként:

- a propulziós főgép

mechanikai hatásfoka

$$\eta_M = BHP/IHP$$

- a tengelyrendszer (toló-csapágy, tartócsapágyak, tönkcső) hatásfoka

$$\eta_M \cong 1 \quad BHP \cong SHP$$

- a propulzió teljes hatásfoka
 $\xi = EHP/SHP = R_T V_S / Q \omega$

Az összhatásfok fenti alakjának átalakításával, vagyis a képlet kibővítésével és átrendezésével, illetve annak figyelembe vételével, hogy

$$w = 1 - V_A/V_S, \text{ ebből } V_S/V_A = 1/(1-w), \text{ illetve}$$

$$t = 1 - R_T/T, \text{ ebből } R_T/T = 1 - t$$

az alábbi eredményre jutunk:

$$\begin{aligned} \xi &= (R_T V_S / Q \omega) (Q' / Q') (V_A / V_A) (T / T) = (T V_A / Q' \omega) (V_S / V_A) (R_T / T) (Q' / Q) = \\ &= (T V_A / Q' \omega) ((1-t) / (1-w)) (Q' / Q) = \eta_0 \eta_H \eta_R \end{aligned}$$

ahol a már ismert fogalmak

η_0 - a propulziós hatásfok,

η_H - a *testtényező*, amely szívási tényezőt és a sodortényezőt tartalmazza,

η_R - forgási tényező.

Az összhatásfokot kicsit eltérő formában is felírhatjuk az alábbi módon.

$$\xi = \eta_0 \eta_S \eta_H \eta_R$$

A szorzat első két tényezője az ideális propulziós hatásfokot és a tengelyrendszer hatásfokát jelenti, ezek szorzata a propeller nyílvízi hatásfoka.

Az összhatásfokot másképpen *propulziós tényezőnek* nevezzük.

Az ebben a fejezetben összefoglalt alapfogalmak ismerete rendkívül fontos ahhoz, hogy a hajócsavarok tervezését jól elvégezhessük.