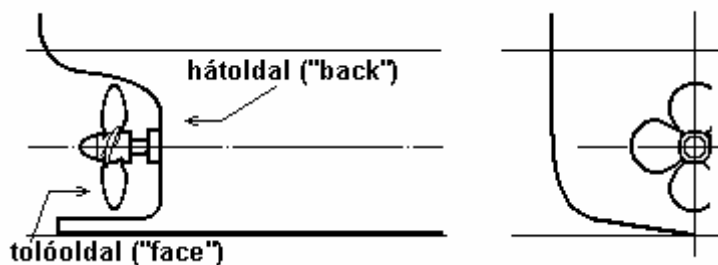


4.3.2.2 A hajócsavar geometriája

4.3.2.2.1 Alapelvek

A hajócsavar tervezésének végső fázisa a csavar rajzának elkészítése. A különböző hajócsavar-rajzok összehasonlíthatósága érdekében, valamint a hagyományok alapján a hajó oldalnézetben mindig balról jobbra halad, a hajócsavar tengelyirányú nézete pedig hátulnézetet jelent. Kétszaváros hajók hajócsavarjainak rajzán, mivel a két hajócsavar egymásnak tükörképe, csak az egyik hajócsavart ábrázolják, a rajzon megjelölik, hogy melyik oldali csavar látható a rajzon. A hajócsavar előremenetben a vizet a hajóorr felől szívja és hátrafelé gyorsítja fel. Emiatt a csavar mögött nyomás keletkezik, előtte szívás. A csavar hátsó oldalát *toló-oldalnak* hívják (angolul face), másik oldalát *hátoldalnak* (angolul back). A következő ábra az elmondottakat szemlélteti.



4.3.2.2.1.1 ábra A rajzon ábrázolt hajócsavar vetületeinek értelmezése

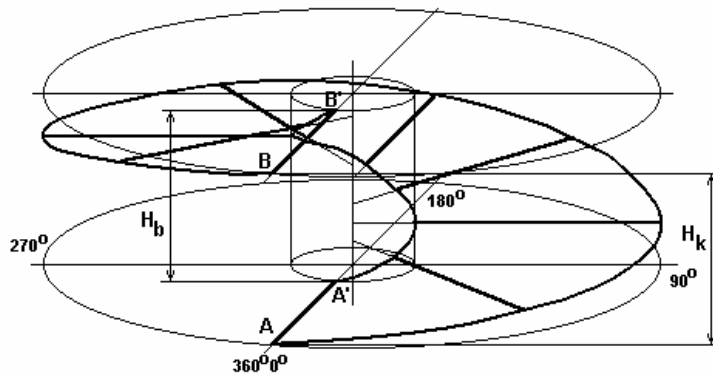
A hajócsavar egy szárnyának *elméleti felülete* úgy képezhető, hogy egy egyenes szakaszt,

amelynek hossza megegyezik a hajócsavar sugarával, egy olyan egyenes, mint forgástengely körül, amely a szakaszt egyik végpontjában metszi és arra merőleges, úgy mozgatunk teljesen körben, hogy a körmozgással egyidejűleg annak szögsebességéhez képest egy függvény által meghatározott (általában konstans) egyenes vonalú mozgást is végezzon az egyenes (forgástengely) mentén. Ennek a felületnek az adott sugarú, a forgástengellyel megegyező tengelyű hengerfelülettel létrehozott metszete képezi az adott sugárhoz tartozó *szárnyprofil* mértékadó alapvonalát (húr vagy toló-oldal). A tengelyvonal körül annyi, az előzőekben leírt és azzal egybevigó csavarfelület képezhető arányos szögeltolással, ahány szárnyú hajócsavarról beszélünk.

Az n számú csavarfelület mindegyikének a hajócsavar *agyátmérőjének* felénél kisebb sugarú tartományba eső, valamint a hajócsavar tervezésekor az adott r sugárhoz kiadódó szárnyprofil *be- és kilépő-élén* kívül eső része figyelmen kívül hagyható.

Az elmondottak szemléltetésére szolgálnak a következő ábrák. Az azokon használt jelölések magyarázata (zárójelben az ITTC által elfogadott jelölések):

- H_b - a csavarfelület *emelkedése* a hajócsavar-agyát jelképező henger palástja mentén (P_{Hub})
- H_k - a csavarfelület emelkedése a hajócsavar szárnyvégét érintő henger palástja mentén ($P_{1,0}$)
- A - a csavarfelületet leképező egyenes szakasz külső végpontja a leképezés előtt
- B - a csavarfelületet leképező egyenes szakasz külső végpontja a leképezés (egy teljes emelkedés megtétele) után



4.3.2.2.1.2 ábra A hajócsavar-szárny elméleti felületének leképezése

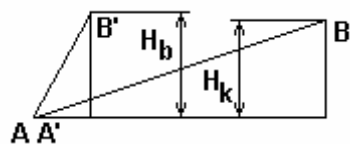
A' - a csavarfelületet leképező egyenes szakasz belső végpontja a leképezés előtt
 B' - a csavarfelületet leképező egyenes szakasz belső végpontja a

leképezés (egy teljes emelkedés megtétele) után

H - általában az emelkedés jelölésére használatos, index nélküli alakjában a hajócsavar *névleges*, vagyis *toló-oldali emelkedését* jelöli; angol megfelelője a P (pitch)

H_v - a profil húrján mért emelkedés; a *húr* irányával megegyező sebességvektorral áramló közeg nem ébreszt a profilon felhajtóerőt

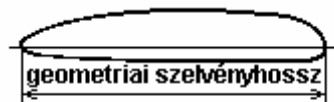
H_h - hátoldali emelkedés, ritkán használatos.



4.3.2.2.1.3 ábra A szárnytő és a szárnyvég által leírt csavarvonal kiterítése

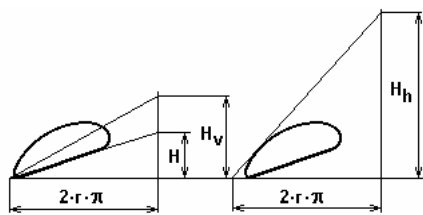
A hajócsavar kiválasztása során végzett elvi számítások során a csavarszárny geometriai szelvényhosszával

kalkulálunk.



4.3.2.2.1.4 ábra Az elvi számításnál figyelembe vett geometriai szelvényhossz

A későbbiekben mindig azt a definíciót kell elfogadni, amelyen intézet modellkísérleteinek alapján választjuk ki az adott hajótesthez és feladathoz legmegfelelőbb sorozatcsavart.



4.3.2.2.1.5 ábra A hajócsavar-szárny adott sugarú profiljának emelkedései

A *sorozatcsavaroknál* a $H(P)$ emelkedés használatos, ez a toló-oldal emelkedése, a toló-oldal ritka kivételtől eltekintve a *nyújtott felületben* egyenes, ettől eltér a szárnytő metszete,

amely szilárdsági követelmények miatt domború toló-oldallal rendelkezik, illetve előfordul a szárnyvég közelében a homorú toló-oldal is.

A hajócsavar-szárny elméleti felületével kapcsolatban az alábbi lehetőségek állnak fenn (ld. 4.3.2.2.1.3 ábra).

-
1. $H_k = H_b$ és AB csavarvonal kiterítése egyenes: állandó emelkedésű csavarfelület,
 2. $H_k \neq H_b$ és AB csavarvonal kiterítése egyenes: sugárirányban változó emelkedésű csavarfelület,
 3. $H_k = H_b$ vagy $H_k \neq H_b$ és AB csavarvonal kiterítése nem egyenes: kerület mentén változó emelkedésű csavarfelület.

4.3.2.2.2 Hajócsavar szerkesztés

A hajócsavarok szárnyának megrajzolása ma már bizonyos szabályok szerint történik, de korábban több tervező is saját rendszerét dolgozta ki. A legismertebb csavarszárny szerkesztő eljárások:

Bauer - Taylor

Holst

Rössing.

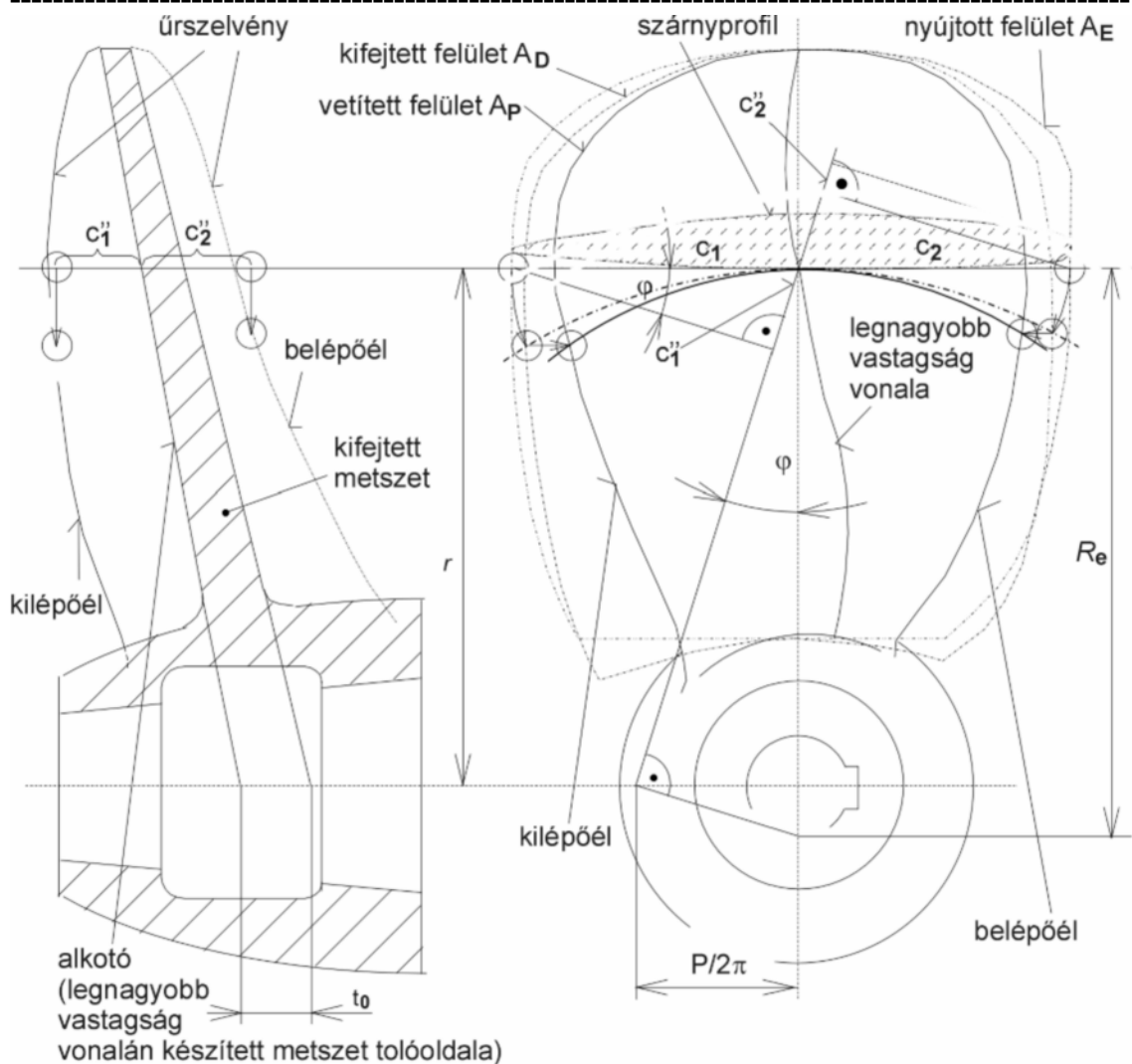
Ezek mindegyike alkalmaz bizonyos közelítéseket, a jelenleg legelterjedtebb a Holst eljárás, ezért a továbbiakban annak ismertetésére vállalkozunk.

A hajócsavar rajzán a hajócsavar tengely végére illeszkedő *csavaragy* is komoly szerepet kap. Ez természetes, hiszen súlyánál és méreteinél fogva egy ilyen gépelem felszerelése tekintélyes gépészeti feladat. A csavar a tengelyvégre *tusírozott kúpos illesztéssel* kerül, a nyomatókat a tengelyvégről a csavarra a kúpos kötés viszi át, ezt a *tengelyvég-anya* kellő nyomatókkal való meghúzása biztosítja. Biztonságot jelent, hogy az agyban reteszhorony, a tengelyvégen fészek van kiképezve, a retesz azonban itt csak kiegészítő kötőelem.

A csavaragy mérete határozza meg, milyen r sugár felett rajzoljuk meg a szárnyprofilokat. Ökölszabályként a $0,2R$ sugarú metszet a legbelső, a legkülső pedig a B-sorozatú csavaroknál a $0,9R$, K- és K.a-sorozatúaknál az R sugarú szelvény lesz. (Ha a K- vagy K.a csavarok forgatható – kormány – Kort-gyűrűben dolgoznak, az R sugarú szelvényből a be- és kilépő-élnél annyit le kell munkálni, hogy a gyűrű kiforgatott állapotában se legyen kevesebb a forgó hajócsavar és a gyűrű belső felülete közötti rés a szokásos 5-8 mm értékűnél.)

A hajócsavar rajzán a jobbra haladó hajónak megfelelő helyzetben van ábrázolva a csavar és a csavaragy hosszmetsete, illetve hátulnézetben a csavaragy és az egyik szárny. A szárnynak három különböző vetületét ábrázoljuk, a *vetített* (látható) *felületet*, a beforgatott (vagy *kifejtett*) *felületet* és a *nyújtott felületet*. A 4.3.2.2.2.1 ábrán egy hajócsavar rajz legfontosabb elemei és azok összefüggései láthatók.

A hajócsavar-rajz szerkesztésekor közelítéseket alkalmazunk, amelyek azonban nem befolyásolják a rajz pontosságát és használhatóságát. Az adott r sugarú szárnyprofil toló-oldalának középső szakasza általában egyenes. Ezt tekinthetjük az adott sugáron leképzett P emelkedésű csavarvonal érintőjének a profil maximális vastagságú helyén. A csavarvonal térbeli görbe, amelyet szerkesztésnél olyan ellipszissel közelítünk, amelynek érintője azonos a csavarvonal érintőjével az adott pontban, vagyis az r sugarú henger palástjából az a sík metszi ki, amely a csavarvonal tengelyére merőleges síkkal a csavarvonal φ *emelkedési szögével* megegyező szöget zárja be.

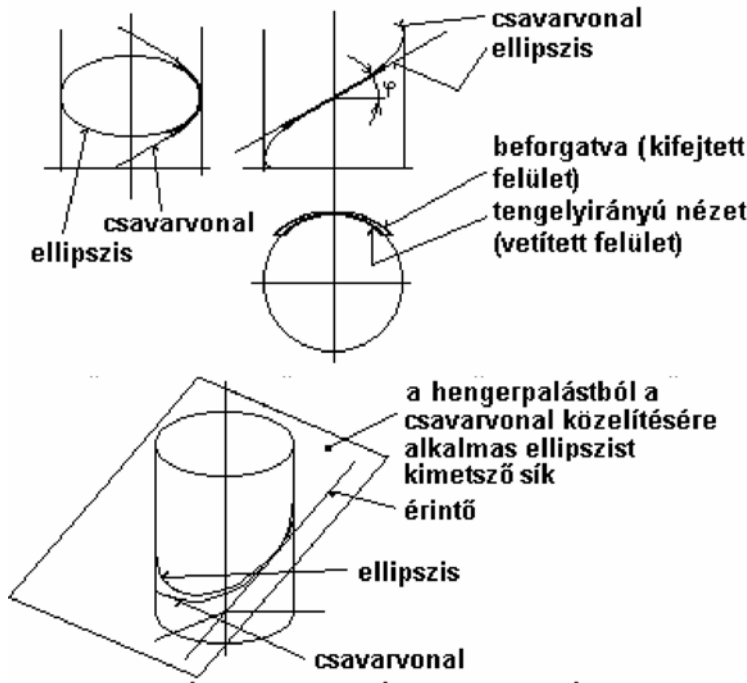


4.3.2.2.2.1 ábra A hajócsavar rajzának legfontosabb szerkesztési elemei (jobbemelkedésű csavar)

A rajzból látható, hogy a *szárny szelvényeinek maximális vastagságú helye* nem egyenes vonalon helyezkedik el a sugár függvényében, hanem olyan görbe mentén, amely a modellkísérleti intézetnek a vizsgált hajócsavarra vonatkozó mérettáblázatában megadott méretekből rajzolható meg. Ezzel nem szorul helyesbítésre az a feltételezésünk, hogy a csavarfelületet a tengelyre merőleges egyenes szakasszal képezzük le (4.3.2.2.1.2 ábra).

Az A_E nyújtott felületet alkotó szárnymetszetek (profilok, szelvények) megrajzolása a csavar hátulnézeti képén történik egyes kiválasztott r sugaraknál (általában $0,2R$ -tól $0,9R$ -ig ill. R -ig $0,1R$ lépésekkel). A szelvény elhelyezésekor először a szárny középvonalától a mérettáblázat alapján felmérjük a legnagyobb vastagságú hely abszcisszáját, majd onnan a megfelelő oldalra (balemelkedésű csavar esetében baloldalt) a *belépő-él* felé eső c_2 profilhosszat, az ellenkező oldalra pedig a *kilépő-él*

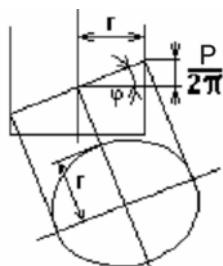
felé eső c_1 hosszát. A nyújtott felület be- és kilépő-éle ezeknek a végpontoknak az összekötéséből alakul ki. A nyújtott felület szerkesztése közbenső lépés, annak mérése nem lehetséges a csavaron.



4.3.2.2.2 ábra A csavarvonal közelítése ellipszissel

Az A_D kifejtett felület maga a csavarfelület, de a kifejtett felületnek csak egy adott r sugárhoz tartozó szelete látható helyes méretben egy nézőpontból (ahogy a Földnek a térképen ábrázolt vetületét sem láthatjuk soha a valóságban). A kifejtett felület a csavarfelület síkba-terítése. Az előzőekben említett közelítésre (csavarvonal-

ellipszis) itt van szükség. Ennek megértéséhez ad segítséget a 4.3.2.2.2.2 és 4.3.2.2.2.3 ábra.



4.3.2.2.2.3 ábra A csavarvonal közelítésére alkalmas ellipszis méretei

Az *ellipszis szerkesztésének* bonyolult eljárását takaríthatjuk meg általában a 4.3.2.2.2.4 ábrán szemléltetett *közelítő módszerrel*. Hajócsavar szerkesztésnél annál jobb a közelítés, minél kisebb a csavarszárny-szelvény emelkedési szöge (φ).

Az ellipszis tengelyei:

$$b = r$$

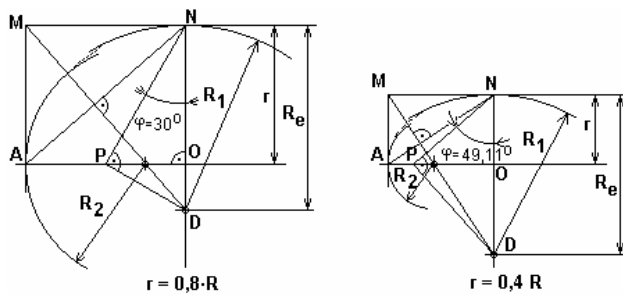
$$a = \sqrt{\left(\frac{P}{2\pi}\right)^2 + r^2}$$

A módszer alapjául az szolgál, hogy két-két háromszögről hasonlóság bizonyítható. A PON derékszögű háromszög egyik szöge közös a PND derékszögű háromszöggel, ezért megfelelő oldalaira aránypár írható fel:

$$R_e : PN = PN : r \text{ azaz } R_e = PN^2 / r$$

Az MND derékszögű háromszög megfelelő oldalai rendre merőlegesek az MNA háromszög megfelelő oldalaira, ezért igaz a következő aránypár:

$$R_e : a = a : r \text{ azaz } R_e = a^2 / r$$

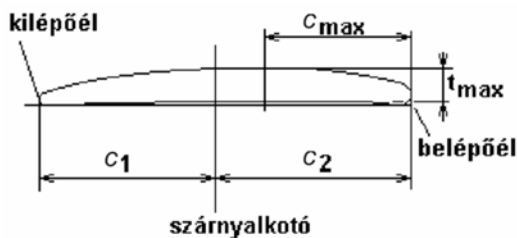


4.3.2.2.4 ábra Ellipszis közelítése két körívvel

A hajócsavar szárny szerkesztésének menete

1. A hajócsavar fő méreteinek ismeretében a geometriai adatokból felrajzoljuk a

rajzon ábrázolandó csavarszárny mérethálózatát. Ezután az egyes r sugaraknál megszerkesztjük a szárnyszelvényeket (nyújtott felület).



4.3.2.2.5 ábra A hajócsavar-szárny szelvényének fő méretei

2. Az összes szelvény megszerkesztése után a be- és kilépő-él pontjainak összekötésével megrajzoljuk a nyújtott felület határvonalát.

3. A metszethosszakat rágörbítjük a csavarvonalat helyettesítő ellipszisre, vagyis az ellipszis közelítésére használt R_e sugarú körívre (ld. 4.3.2.2.4 ábra). Ennek menete:
 1. a $P/2\pi$ értékét felmérjük a vízszintes tengelyvonalra az alkotótól kiindulva; végpontját összekötjük az alkotó r sugarú pontjával, majd erre merőlegest állítunk, amelyet metszésbe hozunk az alkotóval; ez a metszéspont az ellipszist közelítő kör középpontja (ld. 4.3.2.2.1 és 4.3.2.2.4 ábra);
 2. megrajzoljuk a körívnek akkora szakaszát, amelyre a szárnyszelvény elfér;
 3. szűrőkörző-léptetés segítségével az egyenes szelvényhosszat rámérjük a körívre (értelemszerűen az alkotótól a be- és kilépő-élig terjedő szakaszokat);
 4. a szelvények be- és kilépő-élének összekötésével megrajzoljuk a kifejtett felület határvonalát.
4. Beforgatjuk az ellipszissel helyettesített csavarvonalat, vagyis megszerkesztjük a vetített felületet:
 - a) meghúzzuk az r sugarú kört a csavar tengelyvonalából koncentrikusan,
 - b) bevetítjük az alkotóra merőlegesen az ellipszisre rágörbített szelvények végpontját a koncentrikus körívre,
 - c) a végpontok összekötésével megrajzoljuk a vetített felület határvonalát.

Ennél a műveletnél figyelembe kell venni, hogy a szelvénynek vastagsága van, ez különösen a kisebb r sugaraknál fontos, ahol a vastagság és az emelkedési szög egyaránt nagyobb, mint a szárny vége közelében.
5. A csavar oldalképének megszerkesztése során a gépszerkesztési szabályok szerint megrajzoljuk a hajócsavar-agyát. A csavaragy hosszát úgy határozzuk meg és a csavaragyon hosszirányban úgy osztjuk el a szárnyat, vagyis az alkotó helyét úgy tűzzük ki, hogy mind a be- mind a kilépő-él ráférjen (a legkisebb r sugárnál

érvényes emelkedési háromszög figyelembe-vételével). Az alkotó ferdesége a hajócsavar mérettáblázatában meg van adva. A szárny metszetének megrajzolása a következő lépésekből áll:

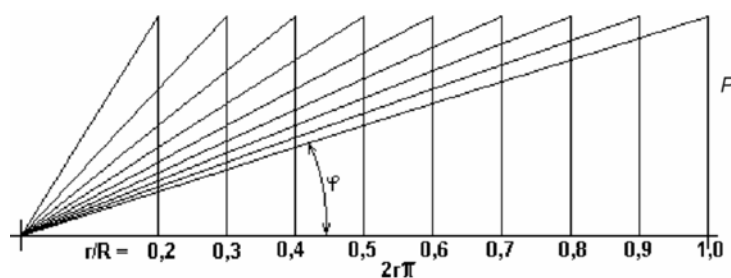
- minden r sugárnál felmérjük az alkotótól kiindulva tengelyirányban a maximális szelvényméretet; ezek összekötése adja ki a maximális vastagságú vonal metszetét,
- az alkotótól abban az irányban, amerre a kilépő-él esik (balra, vagyis a haladási iránnyal ellentétesen), felmérjük a c_1 ” értékét, amelynek nagysága $c_1 \sin \varphi$ (ld. 4.3.2.2.1 ábra), a másik irányban a c_2 ” értékét ($c_2 \sin \varphi$), majd a tengelyre merőleges irányban bevetítjük a két pontot arra tengellyel párhuzamos két egyenesre, amelyeket a hátulnézeti képen az adott pontok megfelelőinek a kifejtett illetve vetített felületen levő vetületei határoznak meg (az ellipszisen illetve a koncentrikus köríven fekvő szelvény-végpontok); ennél a műveletnél ismét figyelembe kell venni, hogy a szelvénynek vastagsága van, különösen a kisebb r sugaraknál;
- a kilépő-él pontjainak összekötésével megrajzoljuk a szárny kilépő-élének látszati (jobbemelkedésű csavar esetében) vonalát vagy a metsző sík előtti virtuális (balemelkedésű csavarnál) vonalát; a belépő-élre ugyanez érvényes fordított értelemben (balemelkedésű csavarnál valóságos látszati kép); a két körvonal együtt adja a szárny úrszelvényét.

A hajócsavar szerkesztésénél két lépcsőben alkalmazunk közelítéseket: a csavarvonal helyett ellipszissel dolgozunk, illetve az ellipszist körívvel helyettesítjük. Mindkét esetben elkövetünk valamilyen kis hibát, de ezek hatása eltérő.

- Csavarvonal \rightarrow ellipszis a hiba a szárnyalkotó mentén minden r sugáron azonos,
- ellipszis \rightarrow körív a hiba a szárnytő közelében kisebb r sugáron nagyobb.

A szerkesztés gondos elvégzése esetén azonban mindkét hiba a megengedhető határon belül marad.

4.3.2.2.3 A modellkísérleteknél alkalmazott sorozatcsavarok jellemzői



4.3.2.2.3.1 ábra Állandó emelkedésű csavar emelkedési szögének változása

A hajócsavar *emelkedése* és az *emelkedési szög* közötti összefüggés: $P =$

$2r\pi \tan \varphi$, ezt a fenti ábra szemlélteti.

A csavar egyik legfontosabb paramétere az *emelkedésviszony*, P/D , ahol P az emelkedés a fenti összefüggés szerint, D a hajócsavar átmérője. A P emelkedés index nélkül azt

BBBZ kódex

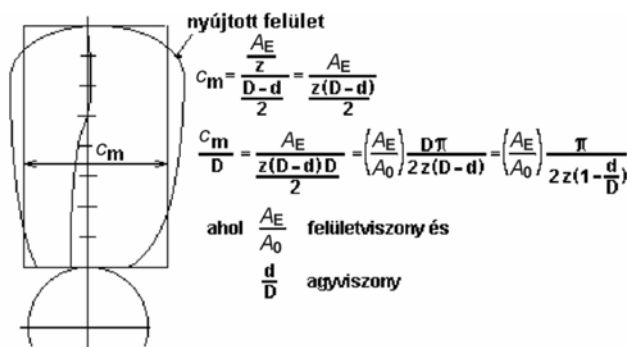
jelenti, hogy az emelkedés a szárnyalkotó mentén minden r sugárnál azonos értékű, vagyis a csavar *állandó emelkedésű*. Ha azonban pl. $P_{0,7}/D$ van megadva, az azt jelenti, hogy a hajócsavar működése szempontjából kulcsfontosságú $r = 0,7R$ sugárnál ekkora a csavar szárnyszelvényének emelkedése, ilyen esetben a P eloszlását táblázatosan közölni kell az r sugár függvényében.

A csavarszárny felületének mérete a másik alapvető paraméter. Ebben a vonatkozásban a nyújtott és a kifejtett felület gyakorlatilag azonos. A *felületviszonyt* a nyújtott felület és a csavarkör-felület viszonyára értelmezzük.

$$A_E/A_0 = \text{nyújtott felület}/(D^2\pi/4) \cong A_D/A_0 = \text{kifejtett felület}/(D^2\pi/4)$$

Az A_P vetített felületre is felírható a viszonyszám, de azt nem alkalmazzuk.

A csavarszárny méretére jellemző adat a *közepes szárny szélesség viszony*. Azonos felületviszony esetén ez függ a szárnyak számától.

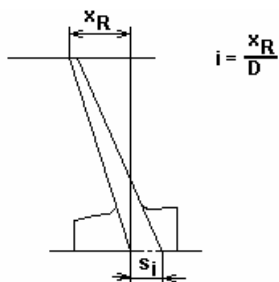


4.3.2.2.3.2 ábra A közepes szárny szélesség viszony meghatározása

Az *agyviszony* értéke normál hajócsavarok esetében 0,16 és 0,22 közé esik. Nagy szögsebességű (kisebb emelkedésviszonyú) csavaroknál kisebb, előfordul 0,1 érték is.

Az agy méreteinek növelésére ott van szükség, ahol nagy a szárny terhelése, illetve akkor, ha az agyban működtető szerkezetet kell elhelyezni, mint az állítható szárnyú hajócsavaroknál. Ez utóbbiaknál előfordul 0,4 agyviszony érték is.

A *szárny vastagsága* a tőnél nagyobb, a szárnyvégnél kisebb. A pontos vastagság-eloszlást a hajócsavar szilárdsági ellenőrzése során lehet meghatározni. A szárnyalkotó mentén a vastagság lineárisan változik, a tengelyvonalra bevetített érték általában $s_i = 0,04 \div 0,06$. (Másik szokásos jelölése t_0 , ld. 4.3.2.2.2.1 ábra.)



4.3.2.2.3.3 ábra A hajócsavarszárny hátrahajlása és vastagságeloszlása

A hajócsavar-*szárny hátrahajlására* azért van szükség, hogy

- minél messzebb kerüljön a hajótest zavaró hatásától, kisebb szívási és tolóerő tényező értékekkel kelljen számolnunk,
- az úrszelvény rendszerint aszimmetrikus, a belépő-él irányában nagyobb, ezt egyenlíti ki a hátrahajlás.

A *szárnyszelvények* alakja a hajócsavar története során sokat változott. Az első hajócsavaroknál véletlenszerűen alakult ki a szelvény profilja úgy, hogy a szárny

lehetőleg sima felületű legyen. Amikor már törekedni kezdtek a csavar szárnyszelvényeinek előzetes megtervezésére és a gyártás során a rajzok követésére, akkor a nagyobb hajóépítő nemzetek mindegyike saját elképzeléseit követte. Abban megegyezett valamennyi csavartervező, hogy egyenes toló-oldalt használtak és a szárnyalkotónál helyezték el a maximális szelvényvastagságot. A hátoldalt körívvel közelítették és a belépő-élnél nagyobb lekerekítési sugarat használtak, a kilépő-él gyakran élesre volt kialakítva.

A hajócsavar elméletének fejlődésére és a ma alkalmazott profilok elterjedésére az aerodinamika hatott vissza. Az Egyesült Államokban 1915-ben létrehozták a *NACA* bizottságot (National Advisory Committee for Aeronautics), amely a róla elnevezett légcsavar- és szárnyprofil-metszetek kifejlesztésén dolgozott a *Langley Aeronautical Research Center* kutatóintézet segítségével. Már ezt megelőzően kialakítottak egy nagyon jó szelvényt, amelyet *Clark Y*-nak neveztek el. Az intézet elképesztő mennyiségű szélcsatorna mérést végzett el, lassan uralkodóvá vált a *Reynolds-szám* befolyása.

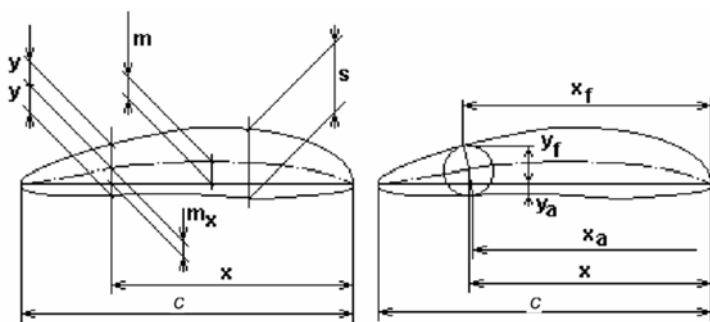
Ugyanebben az időben a német göttingeni intézet kifejlesztette saját optimális profilját, a *Göttingen 398*-at, amelynek a Langley-nél a Clark Y profillal elvégzett összehasonlítása azt mutatta, hogy a kettő nagyon közel van egymáshoz. A középvonal kiegyenesítése után a profil szimmetrikus vonalát egy függvénnyel próbálták leírni, amelyben a szelvényhossz mentén az x koordináta a független változó, és a szelvény y koordinátája a következő, a t maximális vastagságot konstans értéként tartalmazó ötöd-rendű polinommal számolható ki.

$$y = 5t(0,2969x^{0,5} - 0,1260x - 0,3516x^2 + 0,2843x^3 - 0,1015x^4)$$

A szelvény középvonalát magát a következő két parabolával közelítették meg. Az első a maximális íveltség helyétől a belépő-él felé, a második a kilépő-él felé eső ordinátákat adja meg, mindkettőben a szelvényhossz mentén mért x a független változó, az m maximális íveltség és az annak helyét meghatározó p érték állandóként van figyelembe véve.

$$y = mp^2(2px - x^2) \qquad y = m(1 - p)^2[(1 - 2p) + 2px - x^2]$$

A sorozatcsavaroknál ma már a *NACA számozást* követik a szárnyszelvények meghatározásánál. Az első számjegy a maximális íveltség mérőszáma a szelvényhossz százalékában, a második a legnagyobb íveltség helye a belépő-éltől mérve a szelvényhossz százalékának egytizedében. A harmadik és negyedik számjegy a maximális vastagságot adja meg a szelvényhossz százalékában. Például: *NACA 6612* azt jelenti, hogy a profil vonala a *NACA eloszlást* követi, a szelvény középvonalának maximális íveltsége 6%, a legnagyobb íveltség helye a belépő-éltől a szelvényhossz 60%-ánál van, és a szelvény legnagyobb vastagsága a szelvényhossz 12%-a. Az utóbbi évtizedek során a szelvény megjelölésénél csak két szám használatos, mivel a csavar méretezése során a vastagságot a szilárdsági számítás határozza meg. A szárnymetszetek mérettáblázatában a következő ábrán jelölt értékek vannak felsorolva.



4.3.2.2.3.4 ábra A sorozatsavarak szárnszelvényének jellemző méretei

A szelvény s illetve t maximális vastagsága, mint említettük, vagy a szelvény számából, vagy a

csavarszárny szilárdsági méretezéséből adódik ki.

A NACA profilok szerkesztésének szabályos módját a jobboldali ábra mutatja. Ennek megfelelően mind a felső, mind az alsó körvonalnak az x értékhez tartozó abszcissa értéke (x_f illetve x_a) eltér az x -től. A NACA 2312 szárnszelvény táblázata például a következő értékeket tartalmazza a szelvényhossz százalékában.

x	0,00	0,10	0,30	0,50	0,80	1,25	2,50	5,00	7,50	10,00	15,00	20,00	25,00	30,00
x_f	0,00	-0,06	0,03	0,16	0,39	0,76	1,92	4,43	7,05	9,71	15,00	20,13	30,13	30,13
y_f	0,00	0,56	1,00	1,32	1,71	2,19	3,21	4,66	5,67	6,37	7,18	7,50	7,60	7,55
x_a	0,00	0,26	0,57	0,84	1,21	1,74	3,08	5,57	7,95	10,29	15,00	19,87	24,87	29,87
y_a	0,00	-0,50	-0,82	-1,02	-1,24	-1,47	-1,88	-2,35	-2,68	-2,97	-3,51	-3,97	-4,28	-4,45

x	35,00	40,00	50,00	60,00	70,00	80,00	90,00	95,00	100,00
x_f	35,13	40,13	50,12	60,10	70,08	80,06	90,03	95,02	100,00
y_f	7,38	7,13	6,40	5,45	4,33	3,06	1,67	0,92	0,13
x_a	34,87	39,87	49,88	59,90	69,92	79,94	89,97	94,98	100,00
y_a	-4,51	-4,48	-4,19	-3,68	-3,00	-2,18	-1,23	-0,70	-0,13

A hajócsavar optimális örvényelosztás szerinti tervezésénél az egyes r sugarakhoz tartozó szárnszelvények méreteit a számítás eredményeiként kapjuk meg.

4.3.2.2.4 A hajócsavar üzeme, jelleggörbéi

A hajó V_S sebességgel halad, a sodortényező hatásaként a hajócsavar helyén a víz haladásiirányú sebessége (a csavarkör felületére átlagolva) V_A .

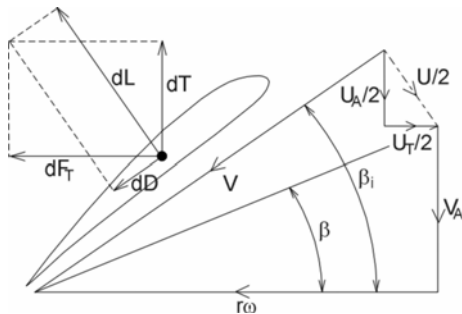
Az n fordulatszámmal forgó hajócsavar emelkedése P . Amennyiben a vízben a hajócsavar csavarorsóként mozog, nP utat tenne meg időegység alatt, amelynek meg kellene egyeznie a V_A sebesség értékével.

Mivel ez nem igaz, létezik egy szlip (megcsúszás, elmaradás) érték, amelyet a következőképpen fejezhetünk ki: $s = V_A/nP$.

(Amikor a hajócsavarral kapcsolatos ismeretek még nem voltak megalapozottak, a szlip létezésével hozták összefüggésbe a hatásfokot, vagyis azt állították, hogy $\eta = 1 - s$.)

A szlip értéke a hajó haladási sebességétől és a hajócsavar terhelésétől függően tág határok között változik, értéke 0,01 és 0,6 között lehet.

A hajócsavar szárnyán (amelyet egy r sugárnál érvényes szárnymetszettel szemléltetünk) forgás közben erők ébrednek, amelyek a szárnymetszet húrján (a húr irányában érkező áramlás nem kelt felhajtóerőt) fekvő támadáspontba felrajzolva a következő ábra szerint szemléltethetők.



4.3.2.2.4.1 ábra A hajócsavar szárnyprofil erő- és sebességviszonyai

A vízáramlás sebesség-összetevőit is ábrázoltuk, a nyilak a víz sebességének összetevőire vonatkoznak (ezért fordított a hajócsavar sebességének értelme a hajócsavar forgásirányához képest).

A hajócsavar forgása következtében a hajó V_S sebességgel halad, a hajócsavar helyén V_A haladásirányú vízsebesség alakul ki, a csavar működésének hatására a víz sebessége további U értékkel növekszik, ennek fele a hajócsavar síkja előtt alakul ki. Az U sebesség haladásirányú összetevője U_A . Az U sebesség forgásirányú komponense U_T , amely a forgási hatásfokban vehető figyelembe. A csavar *szárnyelemén ébredő erők*:

- dL - felhajtóerő elem
- dD - ellenálláserő elem (ideális)
- dR - a két erőelem eredője (az ábrán nincs jelölve)
- dT - tolóerő elem
- dF_T - kerületi erő elem (a csavar meghajtásához ezt kell legyőzni)

Az elemi toló- és kerületi erő: $dT = \rho dV U_A$ és $dF_T = \rho dV U_T$, ahol dV a mozgásba hozott elemi víztérfogat.

Ezzel az ideális hatásfok a következő képlettel fejezhető ki:

$$\eta_{0i} = dT V_A / (dF_T r \omega) = \rho dV U_A V_A / (\rho dV U_T r \omega) = U_A V_A / (U_T r \omega)$$

A β_1 szögre a következő két összefüggést írhatjuk fel:

$$U_A / U_T = \cotg \beta_1 = (r \omega - (U_T / 2)) / (V_A + (U_A / 2))$$

Ezzel az ideális hatásfok képlete az alábbiak szerint alakítható át:

$$\eta_{0i} = (U_A / U_T) (V_A / r \omega) = ((r \omega - U_T / 2) / r \omega) (V_A / (V_A + U_T / 2))$$

A szorzat első tényezője a víz forgásba hozásához szükséges energiaveszteség miatt érvényes 85-90%-os hatásfokot mutatja, a második tényező pedig a forgás nélkül érvényes ideális összetevő.





BBBZ kódex

A propeller helyén mérhető V_A sebesség, a hajócsavar n fordulatszáma és a csavar T tolóereje között a kapcsolatot a *hajócsavar nyíltvízi tolóerő-jelleggörbéje* ábrázolja, ahol a független változó a fordulatszám, a függő változó a tolóerő, a sebesség pedig az egyes görbék paramétere. Álló helyzetben ($V_A = 0$) a görbe megközelítően másodfokú parabola, amelynek az origóban vízszintes érintőjű inflexiós pontja van. A negatív fordulatszámértékekhez negatív tolóerő tartozik (hátramenet), a hajócsavar geometriájától függően az előre- és a hátrameneti szakasz eltérő paraméterekkel rendelkezik.

Ugyanígyen görbesereg rajzolható a Q nyomatékra is.

A jelleggörbék adatainak meghatározásánál a csavart egyetlen szárnymetszettel (általában $r = 0,7R$) helyettesítjük. A tolóerő- és nyomatékértékek a profil megfúvási szögétől függenek. Adott sebességnél a maximális tolóerő (legkedvezőbb hatásfokú üzemállapot) akkor jön létre, ha a *szárnymetszethez megrajzolható sebességi háromszög* (ld. 4.3.2.2.4.1 ábra) β_i szöge a szárnymetszet húrját jelöli ki ($\beta_i = \varphi$). A β szög a V_A sebesség és a szelvény kerületi sebessége közötti kapcsolatot jelzi.

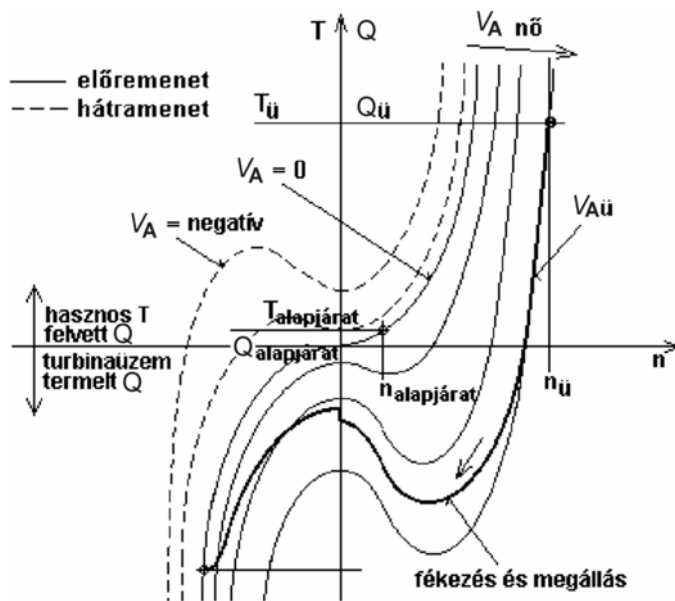
Álló helyzetben $V_A = 0$. A sebességi háromszögben ($r\omega$, V_A) a haladási irányú befogó hossza nulla, csak a kerületi sebesség marad meg. Minden olyan esetben, amikor a paraméter nem nulla ($V_A \neq 0$), a sebességi háromszögek a következő táblázat szerint alakulnak.

Üzemi ford.sz. $n_{\dot{u}}/x$	Sebességi háromszög	Üzemállapot (előremenet)
0		A hajócsavart teljes egészében a víz hajtja meg
$n_{\dot{u}}/8$		A hajócsavart nagyobb arányban a víz hajtja meg, de a motor is ad nyomatékot
$n_{\dot{u}}/4$		A hajócsavart a motor hajtja, de a víz is segít
$n_{\dot{u}}/2$		A hajócsavar hajtása szinte kizárólag a motornak köszönhető
$3n_{\dot{u}}/4$		A hajócsavart a motor hajtja, a β_i szög kisebb az optimális értéknél
$7n_{\dot{u}}/8$		A hajócsavart a motor hajtja, a β_i szög megközelíti az optimális értéket
$n_{\dot{u}}$		A hajócsavart a motor hajtja, a β_i szög értéke optimális



A felrajzolt háromszögekből látható, hogy a táblázat az előremeneti fordulatszám-tartományokra készült, és viszonylag kis haladási sebesség van figyelembe véve. Nagyobb hajósebességnél (pl. a motort leállítják és utána újraindítják) a fordulatszám tartomány nagy részében *turbina-üzemmód* áll fenn, vagyis a hajócsavart a víz hajtja meg mindaddig, amíg a megfúvási szög le nem csökken annyira, hogy a hajócsavar hajtása többletenergiát igényel a motortól.

Az előző táblázat kiegészíthető (a meglevő sorok felett) olyan fordulatszám-értékekkel, amikor a hajó előre menetben halad, de a mozgás lassítása érdekében a motor forgásiránya hátramenetnek felel meg. Abban az esetben a sebességi háromszögek a haladási sebességvektor jobboldalára kerülnek, és a hajócsavar szárnyszelvényének hátoldalából lesz a toló-oldal és megfordítva. A hatásfok romlása jelentős. A tolóerő értékek a tervezett üzemiállapothoz képest felére csökkennek. A *tolóerő- és nyomaték-jelleggörbe* a következő ábrán látható.



4.3.2.2.4.2 ábra A hajócsavar tolóerő- illetve nyomaték jelleggörbéi

A tolóerőre és a nyomatékra külön rajzoljuk meg a jelleggörbét, mivel azonban a két jelleggörbe görbeserege nagyon hasonló, ezért itt mind a tolóerőt, mind a nyomatékot feltűntettük a függő változó tengelyén. A tolóerő pozitív értéke azt jelzi, hogy a hajócsavar tolóerőt hoz létre, vagyis nyomatékot vesz fel. A negatív érték a hajócsavar turbinaüzemére utal, amikor a víz hajtja meg a csavart és

tengelyfék nélkül a főgépet is. Amikor a tolóerő a nulla értéket eléri, a nyomaték még nem egyenlő nullával, a csavar forgatásához még nyomaték szükséges.

A hajó elindulásakor a $V_A = 0$ görbén a főgép alapjárat fordulatszáma jelöli ki az üzemi pontot. Ebből a pontból kiindulva a hajó felgyorsulása során a csavar az üzemi sebesség paraméterű görbén éri el az üzemi fordulatszámhoz tartozó üzemi jellemzőket.

Megállásnál a fordulatszám csökkenése azt eredményezi, hogy a hajó lassul, ezért az $n = 0$ fordulatszám egy kisebb sebességnél áll be. A főgép újraindítása hátramenetben időbe telik, ezalatt is lassul a hajó, ezért a függőleges tengelyen mozdul el az állapotváltozás pontja. A csavar hátramenete a hajót a $V_A = 0$ görbére vezeti vissza, ahol az előremeneti üzemi tolóerőnél sokkal kisebb ellenkező értelmű tolóerő alakul ki, megközelítően a főgép üzemi fordulatszámánál.

A hajó és a hajócsavar együttes jelleggörbéi

A hajó és a hajócsavar kölcsönhatását az *együttes jelleggörbék* mutatják be. Ebben az esetben a hajó sebessége (illetve a propeller helyén mérhető haladási irányú sebesség) nem paraméterként van jelen, hanem független változóként. A hajócsavar valamennyi jellemzőjét a sebesség függvényében külön görbén ábrázoljuk.

Önjáró hajó. A hajó ellenállása a hajósebesség függvényében ábrázolva olyan hatványgörbe alakját veszi fel, amely kisebb sebességeknél kis meredekségű, egy

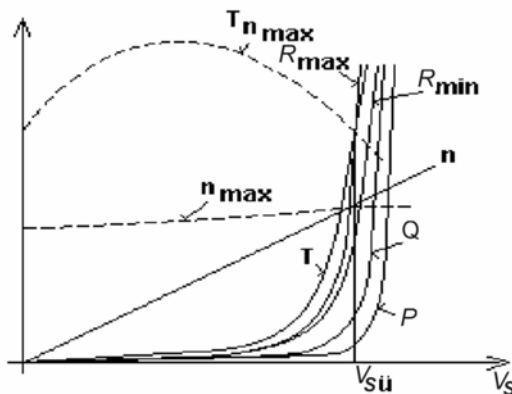
kritikus sebesség felett azonban hirtelen meredekké válik, és emiatt a sebesség további növelése gazdaságtalan. (A hajótest ellenállását a 2.2 fejezet tárgyalja.) A hajó ellenállása a hullámképző ellenállásból, a folyadéksúrlódásból és az örvényképző ellenállásból áll, alapvetően a hajótest teltségétől, főborda-metszetének alakjától és számos más tényezőtől, pl. a hajó terhelésétől függ. A hatványfüggvény kitevője 2 és 3 között van.

Önjáró hajó hajócsavarja a hajó üzemi sebességére van tervezve, hatásfoka és ezzel együtt tolóereje a nagyobb sebességtartományban érvényesül. A tolóerő-görbe és az érvényes ellenállásgörbe metszéspontja jelöli ki a hajó üzemi sebességét.

A hajócsavar fordulatszáma a hajó sebességével megközelítően egyenesen arányos (pl. a főgépet a névleges fordulatszám felével járattva az üzemi sebességnek kb. a felét lehet elérni), a folyamatos vonallal rajzolt T görbe és a R_{\min} , R_{\max} , Q és P görbe ennek megfelelően értelmezhető.

A tolóerő másod-harmadrendű, a motornyomaték harmadrendű, a teljesítmény negyedrendű függvényként jelenik meg.

A következő ábra mutatja az önjáró hajó jelleggörbéjét.



4.3.2.2.4.3 ábra Önjáró hajó és hajócsavar együttes jelleggörbéje

Az ábrán szaggatott vonallal van jelölve a propulziós főgép fordulatszáma (a főgép 100%-os töltésénél) a hajó elindulásától az üzemi hajósebesség eléréséig. A helyesen méretezett hajócsavar a főgépről az üzemi sebesség alatti tartományban akkora nyomatékot venne fel, hogy a főgép nem tud a névleges fordulatszámra felgyorsulni.

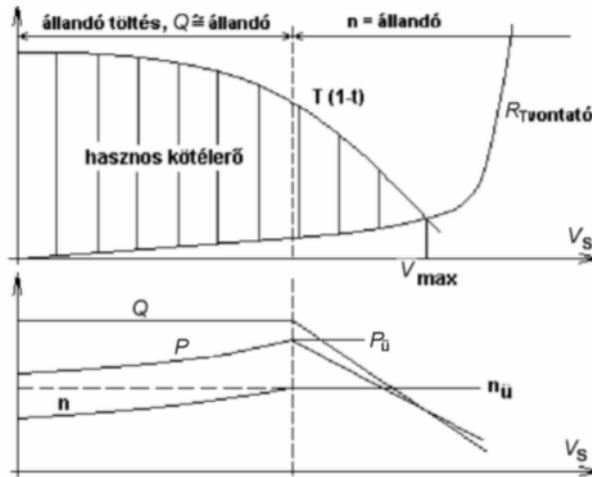
Ebben a tartományban azonban a tolóerő görbe a legkedvezőbb terhelési, stb. paraméterekhez tartozó R_{\min} illetve a legkedvezőtlenebb R_{\max} görbe felett halad, tehát a hajó képes növelni a sebességet. A sebesség növekedésével a csavar fordulatszáma nő, mivel a hajócsavar kevésbé terheli túl a főgépet. Az üzemi sebességnél a főgép eléri a névleges fordulatszámot. A szaggatott vonallal ábrázolt tolóerő-görbe ennek a fordulatszámoknak felel meg.

Vontató- illetve tolóhajó. A más vízi-járművek mozgatására szolgáló hajók propulziós berendezése sokkal nagyobb teljesítményre képes, mint amire a hajó mozgatásához szükség lenne. A vontatóhajók a géperővel nem rendelkező uszályokat vagy egyéb úszóműveket (úszódaruk, fűrotornyok, stb.) maguk után vontatják kötéllel, amelyet a vontatócsörlő segítségével lehet behúzni vagy kiengedni. A vontatókötélnek a hajócsavar legnagyobb tolóerejét (az állópróbai tolóerőt) is el kell viselnie.

A tolóhajók a hajócsavar tolóereje szempontjából nem különböznek a vontatóktól. A hajócsavar vagy hajócsavarok által létrehozott $T(1-t)$ hasznos tolóerő a vontatót önjáróként legfeljebb V_{\max} sebességgel képes hajtani. Ennél a sebességnél a vontató ellenállása megegyezik a hajócsavar hasznos tolóerejével. A tervezett vontatási

sebesség ennél kisebb, ahol még a vontató jelentős hasznos kötélterőt tud átadni a vontatott uszályoknak azok ellenállásának legyőzéséhez.

Vontatóhajó jelleggörbéje látható a következő ábrán.



4.3.2.2.4.4 ábra Vontatóhajó és hajócsavar együttes jelleggörbéje

A hajócsavart erre a sebességre tervezik, annak paramétereit biztosítják, hogy a főgép fel tudjon gyorsulni névleges fordulatszámára. A motor nyomatéka ennél kisebb sebességnél állandó (a beállított 100% töltés biztosítja), felette viszont csökken, mert a fordulatszám-szabályozó a fordulatszámot nem engedi a névleges érték fölé emelkedni. A főgép csak a

tervezett vontatási sebességnél működik névleges teljesítményen, mivel ebben a pontban a fordulatszám és a nyomaték egyaránt névleges értékű. A vontatási sebesség felett a főgép teljesítménye csökken.

A $V_s = 0$ értéken (állópróbai üzemiállapot) a motor fordulatszáma 15-20%-kal alacsonyabb lehet a névleges értéknél.

A folyami vontatóknak korlátozott vízmélységű hajózó úton is kell közlekedniük. A hajótest alakjának befolyása miatt a tolóerő görbe lapos, leszálló szakasza igen meredek. Ugyanakkor a vontatóhajó ellenállásgörbéje a kritikus sebesség felett nagy meredekséggel emelkedik. Ez a két tényező együtt azt eredményezi, hogy a legkedvezőbb vontatási sebesség és a legnagyobb önjárati sebesség közelebb kerül egymáshoz, és értékük alig változik.

A Kort-gyűrű a görbék meredekségét befolyásolja. Gyűrűben dolgozó hajócsavar jelleggörbéjénél a kisebb hajósebességek tartományában (állandó nyomatéknál) kisebb mértékű a fordulatszám és a teljesítmény változása. Emiatt a Kort-gyűrű kedvezően egyenlíti ki a folyami vontatóknál jelentkező tendenciákat.

Az jelleggörbék alakját meghatározó paraméterek optimális megválasztását *állítható szárnyú hajócsavarral* lehet megoldani. A tolóerő görbe állópróbai értéke megnő a merevszárnyú csavarokhoz képest, mert a csavarszárnyak emelkedésének csökkentésével elérhető, hogy a csavar állópróbai viszonyok között is névleges fordulatszámon tudjon üzemelni, ezzel a főgép teljes teljesítményét le tudja adni. A hajó önjáróként is optimális csavarral rendelkezhet, mindössze az emelkedést kell olyan értékre megnövelni, hogy a csavar hajtásához szükséges nyomaték az üzemi értéken legyen, azaz a főgép névleges fordulatszámát ne a fordulatszám-szabályozónak kelljen beállítania, hanem a motor a teljes teljesítményt le tudja adni.

Ez természetesen az ideális állapot lenne. Az állítható szárnyú hajócsavarnak azonban nemcsak az előállításuk költségesebb a merevszárnyú csavarénál, hanem két okból a propulziós hatásfok is alacsonyabb:

1. nagyobb átmérőjű csavaragra van szükség a szárnyak beállítását szabályozó mechanikus szerkezet elhelyezéséhez, ami a hasznos szárnyfelület csökkenését eredményezi;
2. a szárnyak elforgatásával lényegében a csavar emelkedése nem a csavar szárnymetszetein kialakuló áramlás szempontjából lesz optimális, hanem a csavar által felvett nyomaték oldaláról, vagyis a felvett nyomaték a főgép névleges nyomatékával fog megegyezni; így nem a teljes szárny minden egyes profilja kerül olyan optimális helyzetbe, hogy a megfűvási szög a legnagyobb felhajtóerőt és a legkisebb ellenállásért eredményezze az adott profinnál, hanem a szárnyalkotó mentén egyetlen profil lesz abszolút optimális szögbe beállítva, a többinél vagy kisebb, vagy nagyobb lesz a megfűvási szög, mint ami ott a legkedvezőbb értéket jelenti; a hajócsavar propulziós hatásfoka emiatt kisebb, mint az adott sebességre méretezett merevszárnyú csavarnál.

A hajócsavar nyíltvízi jelleggörbéi dimenzió nélküli mennyiségekkel

A hajócsavarokkal végzett modellkísérleteknél (4.3.2.3 fejezet) részletesebben foglalkozunk a hasonlósággal, itt mindössze a az egyes mennyiségekre vonatkozó *dimenzió nélküli tényezők* fogalmát szeretnénk bevezetni. Ezek a tényezők megkönnyítik a modellkísérleteknél használt sorozatcsavarok mérési eredményeinek felhasználását a hajón valóságos viszonyok között üzemelő hajócsavarok tervezésénél.

A dimenzió nélküli paraméterek megalkotásához a következő gondolatmenetet követjük. A T tolóerő és a Q nyomaték fizikai mennyiségek függvényeként írhatók fel:

$$T \approx f_1(\rho, D, V, g, n, p, \mu)$$
$$Q \approx f_2(\rho, D, V, g, n, p, \mu)$$

ahol	T	tolóerő	tömeg • hossz / idő ²
	Q	nyomaték	tömeg • hossz ² / idő ²
	D	átmérő	hossz
	V	sebesség	hossz / idő
	n	fordulatszám	1 / idő
	ρ	közeg sűrűsége	tömeg / hossz ³
	μ	közeg viszkozitása	tömeg / hossz • idő
	g	gravitációs gyorsulás	hossz / idő ²
	p	nyomás	tömeg / hossz • idő ²

A tolóerő függvényét a következőnek tételezzük fel:

$$T = f(\rho^a \cdot D^b \cdot V^c \cdot g^d \cdot n^e \cdot p^f \cdot \mu^g)$$

a megfelelő dimenziók (mértékegységek) behelyettesítésével:

$$\text{tömeg} \times \text{hossz/idő}^2 = (\text{tömeg/hossz}^3)^a \times \text{hossz}^b \times (\text{hossz/idő})^c \times (\text{hossz/idő}^2)^d \times (1/\text{idő})^e \times (\text{tömeg}/(\text{hossz} \times \text{idő}^2))^f \times (\text{tömeg}/(\text{hossz} \times \text{idő}))^g$$

A hatványkitevők meghatározásához a következő egyenletek állíthatók fel:

tömeg:	$1 = a + f + g$	azaz	$a = 1 - f - g$
hossz:	$1 = -3a + b + c + d - f - g$	azaz	$b = 1 + 3a - c - d + f + g$
idő:	$-2 = -c - 2d - e - 2f - g$	azaz	$c = 2 - 2d - e - 2f - g$

Az a és c behelyettesítésével b a következőképpen alakul:

$$b = 2 + d + e - g$$

További behelyettesítésekkel és átrendezéssel a tolóerő:

$$T = \rho D^2 V^2 \cdot f\{(gD/V^2)^d \cdot (nD/V)^e \cdot (p/\rho V^2)^f \cdot (v/VD)^g\}$$

ahol $v = \mu/\rho$ a közeg kinematikus viszkozitása.

A dimenzió nélküli tolóerő-tényező:

$$C_T = T/(0,5\rho D^2 V^2) = f\{gD/V^2, nD/V, p/\rho V^2, v/VD\}$$

Hasonló módon a nyomatóktényezőt is meg lehet határozni:

$$C_Q = Q/(0,5\rho D^3 V^2) = f\{gD/V^2, nD/V, p/\rho V^2, v/VD\}$$

A tolóerő- és nyomatóktényező érzékeny a V sebesség értékeire, ha a sebesség nagyon kicsi, mindkét tényező nagyon nagy értékű. Ennek elkerülése érdekében a V sebesség helyett a sebességértékű nD mennyiséget használjuk. Ezzel eljutottunk a nemzetközi modellkísérleti intézetek konferenciájának (ITTC) jelképei között szereplő tényezőkhöz:

$K_T = T/(\rho n^2 D^4)$	<i>tolóerő-tényező</i>
$K_Q = Q/\rho n^2 D^5$	<i>nyomatók-tényező</i>
$J = V/nD$	<i>sebesség-tényező</i>

A modellkísérleteknél használatos a hajócsavar *kavitációs száma* is:

$$\sigma = p/\rho V^2 \quad \text{ahol } p \text{ az adott kritikus ponton mérhető hidrosztatikus nyomás}$$

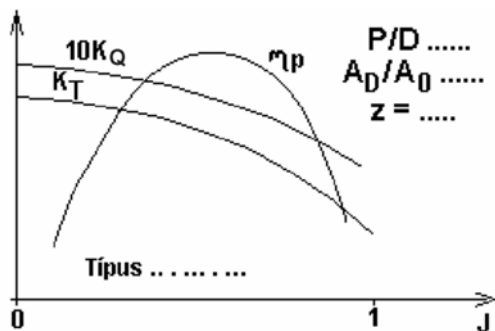
A *propulziós hatásfok* a korábban (4.3.1 fejezet) már meghatározott összefüggéssel:

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

A $Q\omega$ helyett a $2\pi nQ$ kifejezés használatával:

$$\begin{aligned} \eta_0 &= EHP/SHP = TV_A/(2\pi nQ) = K_T \rho n^2 D^4 V_A / (2\pi K_Q \rho n^2 D^5 n) = \\ &= K_T / (2\pi) (V_A / nD) (1/K_Q) = K_T J / 2\pi K_Q \end{aligned}$$

A hajócsavarra a J sebességtényező függvényében felrajzolt K_T tolóerő- és K_Q nyomaték-tényező, valamint az η_0 propulziós nyíltvízi hatásfok a következő ábra szerint alakul. A nyomaték-tényező a tolóerő-tényezőhöz képest egy nagyságrenddel kisebb, ezért a jelleggörbén a $10K_Q$ van ábrázolva.



4.3.2.2.4.5 ábra Adott felület- és emelkedésviszonyú ill. szárnyszámú csavar jelleggörbéje

A csavarsorozatokra elvégzett modellkísérleteknél számos paramétert választanak ki és párosítanak össze. Ezek mindegyikére elvégzik a kísérletet, és a kapott görbék ugyan hasonlóak, de

elhelyezkedésükben követhető különbségek vannak. A legkedvezőbb paraméterekkel bíró hajócsavar kiválasztása az összes paraméter-párosítás számbavétele alapján történhet optimum-kereséssel.

A diagram négy azonosítót és három görbét tartalmaz. Az azonosítók:

- típus, pl. B vagy K,
- emelkedésviszony P/D , pl. 0,80 vagyis 80%,
- nyújtott felületviszony A_D/A_0 , pl. 1,00 vagyis 100%,
- szárnyak száma z , pl. 3.

A görbékről már volt szó, ezek K_T , $10K_Q$ és η_0 . A propulziós hatásfok görbéje az origó és a J tengely 1,00 értéke mint végpontok felé mutat, de a végpontok környezetében nem lehetséges a kísérletek elvégzése.

A hajócsavar modellkísérletek és a hajócsavar-méretezés tárgyalásánál ezek a diagramok képezik a kiinduló pontot.