

KOMPOZIT VERSENYHAJÓ HAJÓCSAVAR PROTOTÍPUS TERVEZÉSÉNEK ELSŐ LÉPÉSEI

FIRST STEPS OF THE PROTOTYPE OF PROPELLER IN A COMPOSITE RACE BOAT

Lévai Emese Sarolta, hallgató, levai.emese@edu.bme.hu,
Dr. Ficzer Péter, egyetemi adjunktus, ficzere.peter@kjk.bme.hu

ABSTRACT. The task was to design a propeller for a composite racing boat. Propellers are also commercially available, but there are also custom products that help the boat move faster. In this case, however, the design spiral is much more complicated, as shown in the article below.

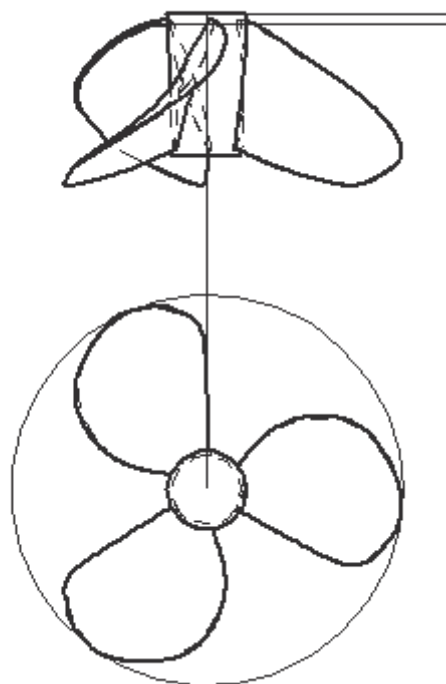
1. BEVEZETÉS

2020 nyarán került megrendezésre a Monaco Energy Boat Challenge. A nagymúltú verseny keretei között több versenycsapat hajóprototípusa vetélkedik minden évben. Ezek saját építésű alternatív üzemanyag által hajtott hajók, a verseny célja pedig az új technológiák felvonultatása a nemzetközi nagyközönség előtt. A Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem „BME Solar Boat Team” csapata egy elektromos hajóval indult a megmérettetésen, mely a nap energiáját hasznosítja napelemekkel és tárolja ezt akkumulátorokban. A konstrukció egyik fő eleme a hajócsavar, amit kifejezetten egy adott hajótest geometriájára kellett minél pontosabb kivitelben megtervezni. Ennek a hajócsavarnak a tervezési iterációs folyamata és annak gyakorlati lépései kerültek megfigyelésre a vizsgálatok során.

Globálisan is jelentőséggel bír a tervezési folyamat minél jobb kidolgozása, hiszen a hajócsavar és a hajótest hatékony összmunkája szintén közvetlen hatással van a kibocsátásra nem csak a viszonylag kis kibocsátással rendelkező kishajók esetén, hanem a világ áruforgalmát 90%-ban bonyolító tengeri áruszállító hajók és egyéb nagyhajók működésekor is.

2. MÓDSZER

2.1. Bemenő paraméterek és szükséges információk
Mivel a hajótest geometriája a sorozatgyártáshoz hasonlóan ennél a prototípusnál is adott, így ez a geometria maga is tekinthető egy paraméternek.



1. ábra A hajócsavar kezdeti geometriájának
2D-s ábrája

Említésre került már a bevezetésben, hogy a hajótest és a hajócsavar együttműködése kulcsfontosságú az optimális üzemhez való közelítésben. A hajótest is tudja rontani a nem megfelelően megválasztott hajócsavar hatásfokát és fordítva is lehetséges ugyanez: a nem következetesen tervezett hajócsavar nem képes arra a sebességre felgyorsítani a hajótestet, amennyire annak kialakítása és a rendelkezésre álló motorteljesítmény azt lehetővé tenné [2]. Nagyon fontos a hajó tömegének ismerete is teljes terhelés melletti indulásra kész állapotban, hiszen ekkor a vízbe került geometriának ellenállását kell indításkor leküzdenie a meghajtásnak [3]. Emellett a későbbi sikló üzemállapot és magasabb sebességek esetében is fontos szerepe van a vízbe

merült test nagyságának és alakjának. További bemenő paraméterek a motor adatai, mint a névleges teljesítmény és fordulatszám, a hatásfok (és ebből eredően az effektív teljesítmény a motor kihajtó tengelyén), illetve a nyomatékérték. Ugyancsak kezdeti értéknek kell feltételeznünk egy haladási sebességet. Ezt üzemtől, rendeltetéstől függően igen különbözőképpen lehetséges megválasztani. Tengeri hajóknál - melyek hosszan egy sebességen haladnak - érdemes az út leghosszabb tartományában tartott sebességet alapul venni. Gyorsjárású motoros hajóknál, mint például a BME Solar Boat Team hajója versenyeken a cél a sikló üzemállapot elérése, így az ehhez tartozó határsebesség kerül beszámításra, hiszen ezt a sebességet meghaladva a hajó már teljesen más ellenállással, csupán a szárnyak bemerülésével halad (1). Klasszikus értelemben még a hajótesthez tartozik a hajtóműház geometriája is, viszont ez gyártástechnológiailag és szerelésben elkülönül a testtől, így ennek tervezése is külön konstrukciós feladat. Így bemenő paraméterként azt is számba kell venni, hogy ez a ház mekkora és milyen mélyen nyúlik a hajótest alá. Túl alacsony ház esetén a csavar túl közel lesz a hajótesthez, ami kopáshoz és alacsony hatásfokú üzemhez vezet. Túlméretezett ház esetén a propulzió hatásfoka szintén lecsökken, mindemellett a hajtóműház, mint erőkar hosszán már jelentős forgatónyomaték is keletkezik, ami akár a tengelyrendszer deformálódásához is vezethet.

Végül a hajócsavar agyának tervezéséhez ismerni kell a kihajtó tengely geometriáját is.

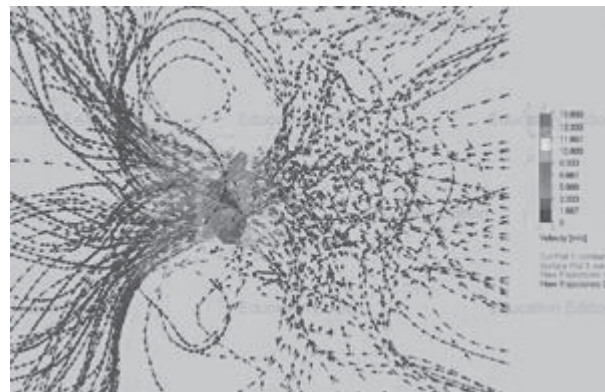
$$v_{\text{siklási}} = Fr * \sqrt{L * g} = 15,946 \frac{\text{km}}{\text{h}} \quad (1)$$

,ahol

- Fr: Froude -szám (0,5 siklás esetén)
- L: a hajó hossza (8 m)
- g: nehézségi gyorsulás

2.2. További számítandó mennyiségek és származtatásuk

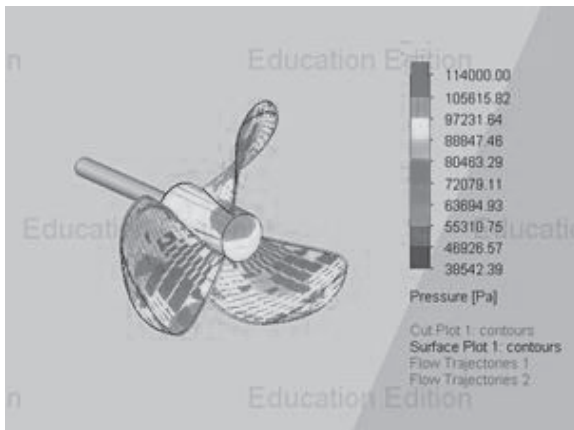
A hajótest geometriájából számítható egy tolóerőigény, ezután pedig szívási tényezőt, sodortényezőt, nyújtott felület arányt, átmérőt és emelkedési arányt kell megállapítani a tervezendő csavargeometriához. A propelleres hajó és a vontatott hajó ellenállásának különbségét, a valóságos propeller által okozott többletellenállást a szívási tényezővel jellemezzük.



2. ábra A hajócsavar által keltett áramlás képe és a közeg sebessége

A hajóra szerelt propeller a hajótest által is zavart közegen működik (ezt értjük azalatt is, amikor azt mondjuk, a hajótest „árnyékolja” a csavar előtti áramteret) emiatt a 'v' sebességgel haladó hajón kifejtett tolóerővel azonos tolóerőt azonos fordulatszámon a nyíltvízi állapotában a hajó sebességétől eltérő 'v_A' propeller haladási sebességnél fejt ki [1]. E két sebesség eltérését kifejező tényezőt nevezzük sodortényezőnek. A számításokat részleteiben terjedelmi okok miatt nem közöljük itt. Legfőbb nehézség a számítás folytatásánál, hogy a fordulatszám és a nyíltvízi haladási sebesség összetartozó értékeit csak kis mintakísérlettel lehet meghatározni. Emiatt nem választhatunk kiindulásnak csak olyan geometriát, amit már modellkísérlet intézetekben kismintakísérleteken teszteltek. Ilyen a Wageningen B típusú hajócsavar [4]. Ehhez a Netherlands Ship Model Basin holland hajókísérleti intézet 1936-ban adott ki először görbesereget a geometria módosulataira. Az első iterációs lépéshez, amikor a kezdő átmérőt a fent nem részletezett kézi számítások alapozzák meg, ezeket a görbét célszerű használni. Az emelkedési arány, a modellkísérleti intézetek által felírt k_T, k_Q tolóerőtényező és teljesítménytényező összességében a fenti adatokkal együtt elegendőek ahhoz, hogy a geometria szárnymetszeteit egy adott szárnyra vetített raszteren megállapítsuk. Ebből pedig átvezetett geometriaként előáll először az egyedül álló szárny (vagy toll), majd ennek másolásával és az emelkedés-arány figyelembe vételével elkészül a teljes hajócsavar geometriája (1. ábra).

A tervezési szakasz lezárultával a vizsgálati szakasz kétfelé ágazik. Egymással párhuzamosan is végezhető akár időben is, ezek a számítógépes és a fizikai vizsgálati módszerek.



3. ábra A hajócsavar szárnyaira és agyára ható nyomás

2.3. Számítógépes vizsgálati szakasz

Számítógépes vizsgálati szakaszban tulajdonképpen a lehető legpontosabban modellezzük azokat a körülményeket, amiket a kisminta kísérleteknél a modellkísérleti intézetek létrehozhatnak. A hajótesttel és annak minden tartozékával együtt egy fiktív áramtérbe helyezük, ahol egy domain téren belül meghatározzuk a belső térfogat egyik felén a vizet, másik felén a levegőt, mint közeget. Ebbe a teljes terhelés melletti tervezési merüléssel elhelyezzük a hajótestet, és először külön a hajótest haladását (propeller nélkül) imitáljuk a térben [5]. Ezután a hajócsavart passzívan forgatjuk a nyugvó folyadékkezeletben (2. ábra), anélkül, hogy a hajótest modellje szerepelne mellette. Ebből információt kapunk a szárnyakat terhelő erőkről, és meggyőződhetünk arról, hogy sehol nem következik-e be törés. A számítógépes vizsgálatoknak még egy fontos hozadéka, hogy itt van lehetőségünk elszakadni a rögzített, modellkísérleti intézetek által meghatározott geometria paramétereitől. Amikor ugyanis a hajótestet és a hajócsavart együttesen vizsgáljuk az áramló közegben, a geometria különböző pontjaiban megállapítható, mekkora a terhelés, és, hogy az ottani szárnymetszetbeli ponton mekkora felhajtóerő keletkezik (3. ábra). Ahol úgy találjuk, hogy a keletkező erő kicsi, ott anyagot redukálhatunk (az áramtérben forgó geometria ekkor szokványos szabályait figyelembe véve, pl. nem éles sarkokat generálva). Ahol ellenkező eset áll fenn, és egy felület a forgási ciklus valamely szakaszában nagyobb terhelésnek van kitéve, és ez a szárnyfelület belsejéből indulva kitart egészen a geometria széléig, ott megfontolandó az anyag hozzáadása.

Ehhez a szakaszhoz szervesen hozzátartozik a kavitációs vizsgálat. Bár a tervezési folyamatban

elméleti számításokkal elvileg igazolni tudtuk, hogy nem lép fel a csavaron ilyen hatás, a hajótest által zavart áramlás más eredményekkel is szolgálhat a felhasználónak.

3. EREDMÉNYEK

3.1. Prototípusgyártás

A fizikai méréshez természetesen szükség van egy kézzelfogható modellre is. Ha a geometria a tervezési szakasz után ölt testet és a számítógépes vizsgálatokkal párhuzamosan végezzük el a fékpadi tesztek, akkor, bár a geometria jellege egyezni fog a kereskedelemben kapható egyes termékekével, de nagyításban/kicsinyítésben kis valószínűséggel egyezik meg azokkal. Ha pedig már a számítógépes tesztek után kerül sor a kézzelfogható geometria vizsgálatára, akkor az egyezés a piaci termékekkel még valószínűtlenebb. Ezért célszerű additív gyártástechnológiákat alkalmazni a geometria létrehozásában. A kezdeti prototípusokat az anyag viszonylag alacsony ára miatt célszerű FDM nyomtatással elkészíteni. Mivel valószínűleg nem ez az alakelem lesz rögzítve véglegesen a hajón, így az időtállóság velem szemben nem követelmény, csupán annyi, hogy egyezzen a majdani végleges csavargeometriával és, hogy a tesztek törés nélkül teljesítse. A végleges alakelemet a tesztek elvégzése után hozzuk létre, amikor azok tanulságát levonva újra módosítottuk a vizsgált geometriát (természetesen minél többször ismétlődik ez az iterációs folyamat, a csavar annál jobban illeszkedik majd a hajótesthez, így a hajtáslánc összhatásfoka annál jobb). Az FDM nyomtatással készült termék felületét több szempontból is kezelni kell. A sorját le kell csiszolni, a támasztékot pedig úgy kell eltávolítani, hogy annak legkisebb maradványa se okozzon mérési pontatlanságot. Fontos a támaszanyag elhelyezése is: a hajócsavar szárnyainak kilépő éle ideális esetben nulla vastagságban végződik (a gyakorlatban ez természetesen csak igen vékonyra módosul), így ide semmiképpen nem praktikus támaszanyagot elhelyezni, mert annak eltávolításával a szárnygeometria javíthatatlanul sérül. A végső geometriát a fém alapanyag szilárdsága és kopásállósága miatt DMLS nyomtatással készítjük el.

3.2. Medencei mérés

A létrehozott geometriát felerősítve a hajtáslánc végére az elrendezést úgy állítjuk be, hogy a motor nyugvó helyzetben maradjon (lefékezve), a hajócsavar és a hajtóműház egy része pedig víz alá kerüljön. A kiemelkedési sebességhez tartozó fordulatszámot működtetve a fedélzeti elektronikával mérhető, mekkora a motorterhelés,

ebből pedig visszafejthető a hajócsavar által valóságosan előállított tolóerő. Amennyiben ez megfelel a tervezéskor megállapított tolóerőigénynek, vagy felülmúlja azt, a geometria megfelelő. Hosszabb mérés esetén olyan tapasztalatok is voltak, hogy a fellépő kavitáció (ami még a számítás ellenére is fellépett) fizikailag is nyomot hagyott a csavaron. Ez egy pozitív hozadéka az olcsóbb műanyag használatának a kopásállóbb acéllal vagy alumíniummal szemben. Ebben az esetben ugyanis sokkal kevesebb ideig kell jártni a motort ahhoz, hogy a kavitáció okozta deformációkat (pl.: berágódás) láthassuk a geometrián. Ez a folyamat egy fém alakelemmel lényegesen hosszabb ideig tartana. Ha egyértelműen kavitáció okozta deformitással találkozunk, azt tapasztalatként a második iterációs kör modellezési fázisában hasznosíthatjuk (azon a helyen el is vehetjük az anyagot).

4. TOVBBFEJLESZTÉS, A FELADAT FOLYTATÁSA

A feladat folytatásaként a fékpadi mérések következnek. Ebből a fenti elmélet szerint megállapítjuk a tolóerőt, ezután pedig a már részletezett iterációs folyamat újra kezdődik. Továbbfejlesztési lehetőség még más, modellkísérleti intézetek által mért geometria vizsgálata. Ekkor előfordulhat a számítógépi áramlási vizsgálatok során kiderül, hogy az új modell sokkal hatékonyabban működik együtt az új hajótesttel, így az utómunka is kevesebb lehet.

5. IRODALOM

- [1] J.Holtrop, G.G.J. Mennen: An Approximate Power Prediction Method, INTERNATIONAL SHIPBUILDING PROGRESS, Volume 68, ISSN 0020-868X, 1978.
- [2] Koronowicz, Krzemianowsk, Szantyr: A complete design of ship propellers using the new computer system, POLISH MARITIME RESEARCH 1(59) 2009 Vol 16; pp. 29-3410.2478/v10012-008-0007-7
- [3] F. Vesting: Marine Propeller Optimisation - Strategy and Algorithm Development, (THESIS FOR THE DEGREE OF DOCTOR OF PHILOSOPHY), 2015, ISBN 978-91-7597-263-3
- [4] Z.Benedek, A. Kovács: HAJÓK ELMÉLETE. Tankönyvkiadó, 1988, Budapest, ISBN: 9631804917
- [5] Lévai E., Ficzer P.: Vitorlás kishajóra ható ellenállás erő vizsgálata hajtáslánc csere okozta merülésváltozás esetén numerikus áramlástan szimulációk használatával, INTERNATIONAL