

NUMERICAL CALCULATION OF CAVITATION BUCKETS FOR 2-D HYDROFOILS

Serdar SEBER¹, Serkan EKİNCİ^{*2}, Şakir BAL³

¹Endaze Mühendislik, Pendik-İSTANBUL

²Yıldız Teknik Üniversitesi, Gemi İnşaatı ve Denizcilik Fakültesi, Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Bölümü, Yıldız-İSTANBUL

³İstanbul Teknik Üniversitesi, Gemi İnşaatı ve Deniz Bilimleri Fakültesi, Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Bölümü, Maslak-İSTANBUL

Received/Geliş: 27.07.2011 Revised/Düzeltilme: 07.12.2011 Accepted/Kabul: 12.12.2011

ABSTRACT

In this study, the cavitation buckets for the two-dimensional hydrofoils are computed by using the boundary element methods. Dirichlet type potential based boundary element methods (panel methods) used in the calculation and verification of cavitation buckets. With the help of a computer program (CDSM=Combined Doublet and Source Method) the hydrodynamic performance of sections was calculated in a systematic manner by changing the parameters affecting the cavitation. Design booklets and diagrams have been created based on these results. The diagrams of different variables are compared with each other. Angle of attack - Minimum pressure coefficient ($\alpha-C_p$), Angle of attack - Lift coefficient ($\alpha-C_l$) using parameters have been presented in tables and diagrams. All data was collected in the booklets. By using this booklet it can be said where the cavitation is/isn't effective on the hydrofoil sections and which ranges on the booklets should be worked according to the analysis solutions. All results are discussed in a detailed manner.

Keywords: Cavitation, angle of attack, pressure coefficient, hydrofoil sections, boundary element method.

İKİ BOYUTLU HİDROFOİLLERE AİT KAVİTASYON KOVALARININ SAYISAL HESABI

ÖZET

Bu çalışmada sınır elemanları yöntemi kullanılarak iki boyutlu hidrofoil kesitlerine ait kaviteasyon kovalarının sayısal hesabı yapılmıştır. Dirichlet tipi potansiyel temelli sınır elemanları yöntemleri (panel yöntemleri) hem kaviteasyon kovalarının hesaplanmasında hem de kaviteasyon kovalarının doğrulanmasında kullanılmıştır. Bir bilgisayar programı yardımıyla (CDSM=Combined Doublet and Source Method) kaviteasyonu etkileyen parametreler sistematik bir biçimde değiştirilerek sayısal sonuçlar elde edilmiştir. Bu sonuçlara bağlı olarak diyagramlar ve dizayn bukletleri hazırlanmıştır. Hücum açısı - Minimum basınç katsayısı ($\alpha-C_p$), Hücum açısı - Kaldırma kuvveti katsayısı ($\alpha-C_l$) grafikleri kullanılarak diyagram ve tablolar oluşturulmuştur. Bütün veriler toplanarak kaviteasyon kova diyagramları (bukletleri) oluşturulmuştur. Bu bukletler sayesinde hidrofoil kesitleri üzerinde kaviteasyonun olup olmadığı ve söz konusu kesitlerin analiz sonuçlarına göre hangi aralıklarda çalışılması gerektiği ortaya konulmuştur. Sonuçlar tartışılıp değerlendirilmiştir.

Anahtar Sözcükler: Kaviteasyon, hücum açısı, basınç katsayısı, hidrofoil kesitleri, sınır elemanları yöntemi.

* Corresponding Author/Sorumlu Yazar: e-mail/e-ileti: ekinci@yildiz.edu.tr, tel: (212) 383 28 50

1. GİRİŞ

Kavitasyon, hidrofoiller üzerinde sıkça karşılaşılan fiziksel bir olgudur. Bernoulli prensibine göre, akışkan içerisinde hız artışı ile birlikte basınç azalması meydana gelir. Başka bir deyişle, basınçtaki azalma suyun kaynama noktasını ortam sıcaklığına kadar düşürebilir. Bunun sonucunda içinde su buharı ve erimiş gazlar bulunan, hava kabarcıkları içeren bir tür soğuk kaynama meydana gelir. Bu olay “kavitasyon” olarak tanımlanır. İki boyutlu hidrofoiller üzerindeki kavitasyon oluşumunu belirlemek için kavitasyon kova diyagramları kullanılır. Bu diyagramlar hidrofoil üzerindeki basınç katsayıları ile kesitin çalıştığı hücum açıları göz önüne alınarak oluşturulur. Hidrofoilin hangi bölgesinde hangi koşullar altında kavitasyonun başlayacağı bu diyagramlar yardımıyla değerlendirilebilir. Kavitasyon hesaplamalarında deneysel yöntemlere alternatif olarak, özellikle bilgisayar teknolojisinin gelişimine bağlı olarak hesaplamalı analiz yöntemleri geliştirilmiştir. Bu yöntemlerden elde edilen sonuçların, deneysel yöntemlerden elde edilen sonuçların yerine geçebilecek, zaman ve maliyet açısından tasarruf sağlayacak düzeyde olduğu yapılan çalışmalar ile gösterilmiştir. Bu çalışmada iki boyutlu hidrofoillerin kavitasyon kovaları sayısal panel yöntemleri ile incelenmiştir. Konuyla ilgili geçmişte çok yönlü çalışmalar yapılmıştır.

Kaynak [1]'de, iki boyutlu hidrofoil kesitler üzerinde kısmi kavitasyonlu akışı tahmin edebilmek için potansiyel temelli bir panel metot geliştirilmiştir. Kavitasyon yüzeyi üzerinde Dirichlet tipi dinamik sınır koşulu ve kavitasyon gösteren kesit üzerinde de Neumann tipi kinematik sınır koşulu uygulanmıştır. Hesaplamalı birkaç teorik metodun doğruluğunun kanıtlanması için, MIT (Massachusetts Institute of Technology)'de değişken basınçlı su tüneline kısmi kavitasyonlu bir hidrofoil üzerinde deneyler yapılmıştır [2]. Akış hızları, kavitasyon yüzeyine yakın olmasının yanı sıra, sınır tabaka bölgesi içinde hidrofoil çevresinde dikdörtgen şeklindeki bir kontrol yüzeyi boyunca alınmaktadır. Kavitasyon ayrılma ve yeniden bağlanma noktaları, kavitasyon sayısının birkaç değeri için ölçülmüştür [2]. Serbest yüzey altında sabit hızla hareket eden iki veya üç boyutlu kavitasyonlu hidrofoil modelleri için bir metot tanımlaması da kaynak [3]'de yapılmıştır. Bu çalışmada akış alanının tüm yüzeylerinde Green teoremi kullanılarak bir integral denklem elde edilmiştir. Bu integral denklem, kavitasyonlu hidrofoil problemi ve serbest yüzey problemi olmak üzere iki kısma ayrılmış ve problem iteratif olarak çözülmüştür. İki boyutlu kısmi kavitasyonlu bir hidrofoil üzerindeki kavitasyon sonundaki akış, re-entrant jet modeli ile modellenerek panel metoda dayalı bir analiz çalışması yapılmıştır [4]. Kaynak [5]'te, pervane kanatlarında meydana gelen daimi olmayan tabaka kavitasyonu ile gelişmiş uç girdap kavitasyon modeli için bir sınır eleman metodu geliştirilmiştir. Kavitasyonun büyüklüğü ve boyutları, kavitasyon yüzeyi üzerinde dinamik ve kinematik sınır şartlarını sağlayarak tanımlanmıştır [5]. Hidrofoiller üzerindeki kavitasyonlu akış BEM (Boundary Element Method)'e dayalı potansiyel bir yöntem ile [6] numaralı kaynakta incelenmiştir. Bu sayısal yöntemde kavitasyon şekli, kavitasyon yüzeyi üzerinde kinematik ve dinamik sınır şartları tam olarak sağlanıncaya kadar iteratif bir şekilde hesaplanmıştır. Kaynak [7]'de, kaldırıcı yüzey metodu kullanılarak SCP (Supercavitating Propeller) veya TCP (Trans Cavitating Propeller)'nin dizaynında kullanılan sayısal bir metot ile iki boyutlu süperkavitasyonlu bir hidrofoilin performansı incelenmiştir. İki boyutlu süper kavitasyonlu hidrofoilin performansı, “doğrusal girdap panel yöntemi” ile elde edilmiştir. Ön dizayn aşamasında Lerbs'in induksiyon faktörleri yöntemi kullanılmıştır [7]. Pervane kanatlarının etkisindeki girdap akışı sıkıştırılamaz ortam kabulü ile Navier-Stokes denklemlerinin bir RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes) çözücüsü kullanılarak incelenmesi ise [8] numaralı kaynakta sağlanmıştır. Ele alınan sayısal uygulamalarda sayısal hataların ve laminar/türbülans geçiş modellemesinin etkisi göz önüne alınmıştır [8]. Kaynak [9]'da ise, serbest su yüzeyinin altında, kavitasyon özelliği göz önüne alınmaksızın, sabit bir hızla ilerleyen iki boyutlu hidrofoillerin hidrodinamik analizi için potansiyel temelli bir panel yöntemi sunulmuştur. Green teoremi kullanılarak ve dahili (iç) potansiyeli gelen düzgün akımın

potansiyeline eşitleyerek, potansiyel akım teorisine bağlı koşullar altında toplam potansiyel için bir integral denklem oluşturulmuştur [9].

Kaynak [10]'da, tabaka ve uç girdap kavitasyonunun sayısal olarak modellenmesinde FLUENT programından faydalanılmıştır. Uygulama olarak iki boyutlu NACA0015 ve üç boyutlu NACA662-415 hidrofoilleri ele alınmıştır. Kaynak [11]'deki çalışmada ise, uniform ve viskoz akış ortamında, serbest yüzeyden sonlu bir derinlikte bulunan iki boyutlu kısmi kavitasyonlu hidrofoilin karakteristikleri incelenmiştir. Buharlaşmanın, yoğunlaşmayan gazların ve sıkıştırılabilirliğin etkilerini içeren tam kavitasyon modeli, kavitasyonlu akışın hesaplanmasında kullanılmıştır. Ayrıca kaynak [12]'de, serbest bir sınıra yakın veya bir kanal içindeki hidrofoile gelen akımı ve herhangi bir hidrofoil veya hidrofoil sistemlerine gelen kavitasyonlu akımın sayısal olarak incelenmesini sağlayan bir metod sunulmuştur. Bu metod, Green eşitliğini kullanan iteratif bir prosedür olarak geliştirilmiştir. Bu çalışmada esas olarak, eğrisel bir yüzeyden kavitasyon sınırının düzgün olarak ayrılmasını sağlayan sayısal analiz çalışması vurgulanmaktadır. Laminer iki boyutlu Navier Stokes akış çözücüsü ile kavitasyonun simülasyonu üzerine sayısal bir çalışma kaynak [13]'de yapılmıştır. Özellikle, NACA0015 hidrofoilin etrafındaki kavitasyonlu akış için farklı hücum açılarındaki sonuçlar rapor edilmiştir. Sıvı-buhar faz değişimi göz önünde tutularak barotropik ilişki uygulanmıştır [13]. Kaynak [14]'te ise, kavitasyonlu akışın tahmini için son zamanlarda kullanılan sayısal teknikler, lineer ve lineer olmayan teorilere dayalı olarak iki ve üç boyutlu süper kavitasyonlu hidrofoiller ve pervanelerde uygulanmıştır. Lineer olmayan optimizasyon algoritması ile birleştirilmiş bu tekniklerden bazılarının, verimli bir süper kavitasyonlu hidrofoil veya pervane dizaynında kullanılabileceği vurgulanmıştır [14].

Kaynak [15]'teki çalışmada ise, farklı kalınlık oranlarına sahip üç adet hidrofoil kesiti, kavitasyon başlangıcını geciktirmek ve yüksek kaldırma/sürüklenme oranı elde etmek için teorik olarak dizayn edilmiştir. Kavitasyonlu ve kavitasyonsuz hidrofoil teorileri yardımı ile hidrofoillere ait kavitasyonlu ve kavitasyonsuz şartlar altındaki performanslar incelenmiştir [15]. Kaynak [16]'daki çalışmada ise, sıfır kavitasyon sayısında lineerleştirilmiş potansiyel teori temel alınarak klasik süper kavitasyonlu hidrofoiller için performans öngörülleri sunulmuştur. Süperkavitasyonlu hidrofoillerin performansı için daha gerçekçi öngörüller lineer olmayan sınır elemanı formülasyonu kullanılarak değerlendirilmiştir [16]. Güçlü termodinamik etkiler altında kalan bir hidrofoil üzerindeki kavitasyon [17] numaralı çalışmada incelenmiştir. Bu çalışmada uygulama olarak NACA0015 hidrofoili ele alınmıştır. Bu hidrofoil değişik hücum açıları ve akım hızlarında test edilmiştir. Kaynak [18]'de ise, potansiyel teori üzerine kurulmuş farklı geleneksel yaklaşımlar RANS eşitlikleri kullanılarak hidrofoil kesitlerinin kavitasyon başlangıcı karakteristikleri incelenmiştir. Yüksek Reynolds sayılarında viskoz etkiler, $k-\varepsilon$ türbülans modeli kullanılarak hesaplanmıştır. Bu yaklaşım, kaldırma ve sürüklenme kuvvetlerinin elde edilmesinde kullanılmış olup doğrudan potansiyel teoriden elde edilmemiştir. Kaynak [19]'da, geniş bir spektrumda basit potansiyel akım yöntemlerinden faydalanılarak kavitasyon modellenmiştir. Bu çalışmada sıvı / buhar hacim kırılması için taşınım eşitliği, yüksek çözünürlüklü ve tam zamanlı çözüm stratejisi verilerek ILES (Implicit Large Eddy Simulation) eşitliklerine entegre edilmiştir. Kaynak [20]'de ise daha önceden dalmış kavitasyonlu hidrofoiller için geliştirilmiş iteratif sınır eleman metodu, dalga modelini, serbest yüzey üzerinde sabit bir hızla ilerleyen yüzey yarıcı hidrofoillerin sürüklenme ve kaldırma değerlerini tahmin etmek için genişletilmiş ve modifiye edilmiştir. Green teoremine dayalı iteratif sayısal yöntem, yüzey yarıcı kavitasyonlu hidrofoil probleminin ayrılmasına ve serbest yüzey problemine izin vermektedir. Hidrofoilin ıslak yüzeyi ve serbest yüzey, sabit şiddetli dipol ve sabit şiddetli kaynak panelleri ile modellenmiştir.

Bu çalışmada ise iki boyutlu hidrofoillerin kavitasyon kovaları, sınır elemanları yöntemleri ile hesaplanmış ve gerekli incelemeler yapılmıştır. Konu ile ilgili değişik yöntemler kullanmak mümkündür. Burada bir sınır elemanı yöntemi kullanılarak sonuçların doğruluğu teyit edilmiştir. Çok değişik kalınlık değerlerine sahip değişik hidrofoiller gözönüne alınmıştır. Ayrıca balık kuyruklu bir hidrofoilin kavitasyon kovası da hesaplanmış ve gerekli karşılaştırmalar

yapılmıştır. Mevcut çalışma [9] numaralı kaynakta verilen çalışmadan farklı olarak kavitasyon olgusunu hesaplara dahil etmektedir. Hesaplanan bütün sonuçlar karşılaştırmalı olarak irdelenmiştir.

2. SINIR ELEMANLARI METODU (PANEL METODU)

Lineer olmayan etkileri içeren kavitasyonlu akışların analizi için, bilgisayar teknolojisinin de gelişimine paralel olarak birtakım sayısal yöntemler ortaya çıkarılmıştır. Bu sayısal yöntemlerin temeli, potensiyel akış teorisi içinde yer alan teoremlere dayanmaktadır. Bu teoremler, akış alanının sınırları üzerine dağılmış olan uygun kaynak, dipol, girdap veya bunların kombinasyonları olarak açıklanabilen, Neumann, Dirichlet veya bunların her ikisinin bulunduğu sınır koşulu problemlerinin çözümünü ifade etmektedir. Bu nedenle kullanılan bu tekniklere “yüzey tekillik metotları (surface singularity methods)”, “sınır eleman metotları (boundary element methods=BEMs)” veya en genel olarak “panel metotları (panel methods)” adı da verilmektedir [21].

Bu metotlarda, iki boyutlu akış problemlerinde analiz edilecek cismin yüzeylerine genelde düz doğru (straight-line) şeklinde paneller kullanılırken üç boyutlu akış problemlerinde örneğin pervane kanatlarının ve göbeğinin yüzeyleri veya bir hidrofoil yüzeyinde bunların yerine tamamen düz dörtgensel paneller kullanılmaktadır. Takip eden girdap (trailing vortex) tabakası da aynı zamanda benzer dörtgensel paneller ile temsil edilmektedir. Söz konusu metotların “Panel metot” adı ile anılmasının nedeni yüzeylere dağıtılan bu şekillerin özelliklerinden kaynaklanmaktadır.

Metot ilk olarak uçak endüstrisinde [22] çalışması ile ortaya çıkmıştır. Kullanılan bu yaklaşımda, yüzeylerde düz doğru paneller kullanılmış, her panel üzerinde kaynak şiddetinin sabit ancak her panel için farklı bir değere sahip olduğu, girdap şiddetlerinin ise sabit ve her panel üzerinde aynı değere sahip olduğu kabul edilmiştir. [23] numaralı çalışmada ise, [22] numaralı çalışmaya dayalı olarak pervaneler etrafındaki düzenli akışın hesabı için bir metot öne sürülmüştür. Bu çalışmanın sonrasında ise, yine aynı amaç için bir yüzey panel metodu formülasyonu ve uygulamaları gösterilmiştir [24].

Panel metotlarında kullanılan tekilliklerin şiddetleri, her bir panelin orta noktasına yerleştirilen kontrol noktalarında sınır değer problemlerinin çözümü ile belirlenmektedir [25]. İki boyutlu hidrofoiller ile karşılaştırıldıklarında üç boyutlu geometrilere (gemi pervaneleri) panel sayıları çok büyük oranda arttığı için panel metotları hesaplama zamanına bağlı olarak çok zahmetli olabilmekte idi [26]. Ancak bu problem günümüzde gelişen bilgisayar ve yazılım teknolojisi ile artık yenilmiştir. Bu metotların özellikle tabaka kavitasyonu analizinde verimli olduğu belirtilmektedir [27].

Bu çalışmada, [28] numaralı kaynaktaki çalışmaya benzer, kavitasyonlu hidrofoillerin analizi için geliştirilen sınır elemanları yöntemine dayalı bir yaklaşım sunulmaktadır.

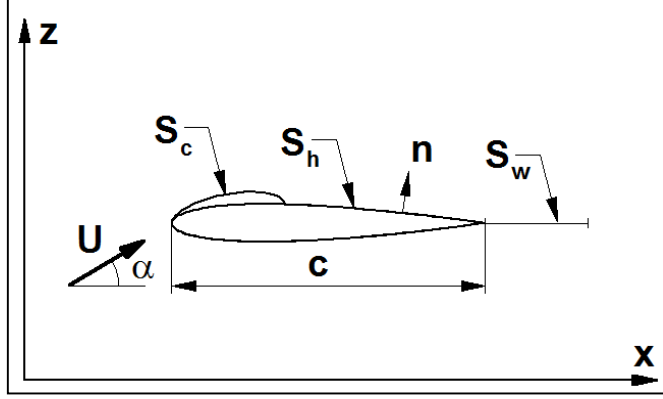
Kesit kavitasyon modeli için, Şekil 1’de gösterildiği gibi uniform akıma maruz kalan iki boyutlu kavitasyonlu bir hidrofoil yüzeyi göz önüne alınsın. x eksenini uniform akım yönünde, z eksenini ise yukarı yönde pozitif kabul edilsin. S_c , S_h ve S_w sırası ile kavitasyon, hidrofoil ve iz yüzeyleridir. Akışkan ideal, sıkıştırılmaz ve çevrimsiz olarak kabul edildiğinde, akım alanı, toplam hız potansiyeli Φ veya pertürbasyon potansiyeli ϕ terimlerine bağlı olarak aşağıdaki gibi ifade edilebilir [3]:

$$\Phi(x, z) = \phi(x, z) + Vx \quad (2.1)$$

Burada; V, gelen akım hızıdır. Pertürbasyon potansiyeli ϕ ve toplam potansiyel Φ , akışkan bölgesinde Laplace eşitliğini sağlamalıdır:

$$\nabla^2 \Phi = \nabla^2 \phi = 0 \quad (2.2)$$

Ayrıca, aşağıda verilen sınır koşulları ϕ pertürbasyon potansiyeli tarafından sağlanmalıdır.



Şekil 1. İki boyutlu kavitasyon yapan bir hidrofoil etrafındaki potansiyel akım

i. Kinematik sınır koşulu: Akım hidrofoil ve kavitasyon tabakasının yüzeyine teğet olmalıdır.

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = -\vec{V} \cdot \vec{n} \quad (2.3)$$

Burada; \vec{n} , akım alanına doğru yönlendirilen hidrofoil veya kavitasyon yüzeyine dik birim vektördür.

ii. Kavitasyon yüzeyi üzerinde dinamik sınır koşulu: Kavitasyon yüzeyi üzerinde basınç sabittir ve p_v 'ye eşittir (p_v : buhar basıncı). Bernoulli eşitliği uygulanarak kavitasyon yüzeyi üzerindeki toplam hız (q_c), aşağıdaki gibi verilebilir: [3, 30]

$$\vec{q}_c = \left| \vec{V} \right| \sqrt{1 + \sigma} \quad (2.4)$$

Denklem (2.4)'te verilen σ değeri kavitasyon sayısı olup değeri aşağıdaki gibidir:

$$\sigma = \frac{p_\infty - p_v}{\frac{1}{2} \rho V^2} \quad (2.5)$$

iii. Kutta koşulu: Hidrofoilin takip kenarındaki hız sonludur:

$$\nabla \phi = \text{sonlu} \quad (2.6)$$

iv. Kavitasyon kapanma koşulu: Kavitasyon, kendi yüzeyinin takip kenarında kapanmaktadır. Kavitasyon yüzeyinin takip kenarda meydana gelen karışık fiziksel olay ihmal edilmiş olup bu bölge bir kavitasyon kapanma (sonlandırma) modeli ile temsil edilmiştir. Bu kapanma modelinin detayları için kaynak [30]'a başvurulabilir. Kavitasyon ayrılma noktasının bulunduğu varsayılmaktadır. Bu çalışmada hidrofoilin önder kenarı, kavitasyon ayrılma noktası olarak seçilmiştir. Akışkan bölgesinde (2.2) denklemine, Green'in üçüncü eşitliği uygulanarak hidrofoil ve kavitasyon yüzeyi üzerindeki pertürbasyon potansiyeli için aşağıdaki integral denklem yazılabilir:

$$\pi\phi = \int_{SH} \left(\phi \frac{\partial \ln r}{\partial n} - \frac{\partial \phi}{\partial n} \ln r \right) dS + \int_{SW} \Delta \phi_W \frac{\partial \ln r}{\partial n^+} dS \quad (2.7)$$

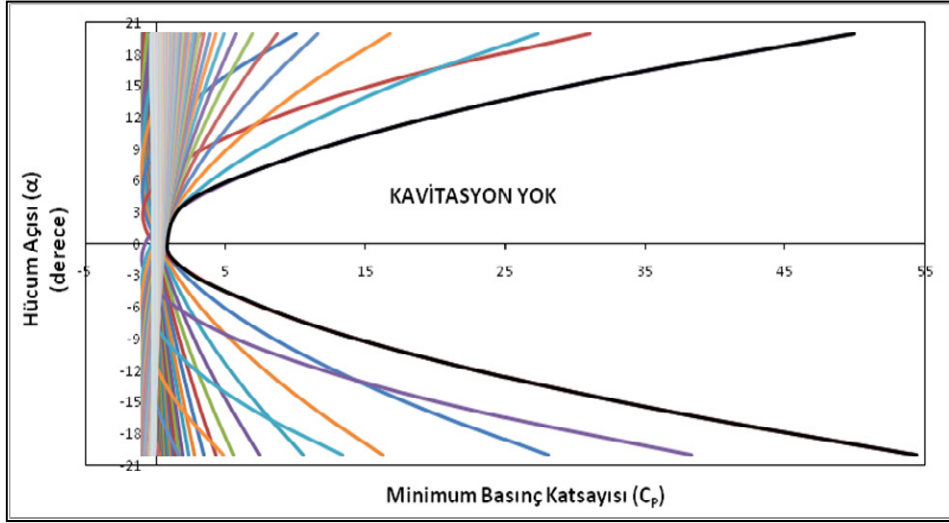
Burada; S_H ve S_W sırası ile hidrofoil (kavitasyon yüzeyini de içeren) ve iz yüzeyi sınırlarıdır. r , kaynak noktası ile alan noktası arasındaki mesafedir. $\Delta \phi_W$, iz yüzeyi boyunca potansiyel sıçramadır ve n^+ iz yüzeyine dik, yukarı yönde birim vektördür. Kinematik sınır koşulu (denklem (2.3)), denklem (2.7)'ye uygulandıktan sonra, kavitasyon yüzeyi S_c değerini de içeren eşitliğin hidrofoil kısmı aşağıdaki integral denklem ile yazılabilir:

$$\pi\phi = \int_{SH} \left(\phi \frac{\partial \ln r}{\partial n} + (\vec{V} \cdot \vec{n}) \ln r \right) dS + \int_{SW} \Delta \phi_W \frac{\partial \ln r}{\partial n^+} dS \quad (2.8)$$

Burada hidrofoil ve kavitasyon sınırları, düz paneller ile parça parça sabit kaynak ve dipol dağılımlarıyla ayrıştırılmıştır. Ayrıştırılmış integral eşitliği, bilinmeyen potansiyel değerlerini içeren bir matrisi sağlar ve herhangi bir matris çözücüsü tarafından çözülebilir. Bu yöntem, kavitasyonlu hidrofoiller için sınır elemanları yöntemi (panel yöntemi) olarak adlandırılır. Bu çalışmada anlatılan panel yöntemi hem kavitasyonlu (PCPAN) hem de kavitasyonsuz (CDSM) durumda geçerlidir. Aşağıda verilen uygulamalarda her iki durumda gözönüne alınmıştır. Yöntemin ayrıntıları [3] ve [31] numaralı kaynaklarda verilmiştir.

4. SAYISAL BULGULAR VE YORUMLAR

Bu bölümde, farklı NACA kesitleri ve mevcut NACA kesitinden türetilen bir “Balık kuyruklu kesit”, sayısal olarak analiz edilmiştir. Uygulama için altı değişik hidrofoil durumu gözönüne alınmış ve kavitasyon kovaları oluşturulmuştur. Uygulama için NACA4406, NACA4408, NACA4410, NACA4412, NACA4416, NACA63A012, NACA66-012 ve Balık kuyruklu kesitler ele alınmıştır. Öncelikle bütün kesitlerin (NACA4406, NACA4408, NACA4410, NACA4412, NACA4416, NACA63A012, NACA66-012 ve Balık kuyruklu) dataları elde edilmiştir [32]. Daha sonra bu kesitlerin -20 ile +20 derece arasındaki hücum açılarında C_p değerleri hesaplanmıştır. Elde edilen bu basınç değerleri ile hücum açıları (C_p - α) bir grafikte karşılaştırılmıştır ve bu grafiklerden elde edilen eğriler ile hidrofoillere ait “kavitasyon kova diyagramları” oluşturulmuştur.



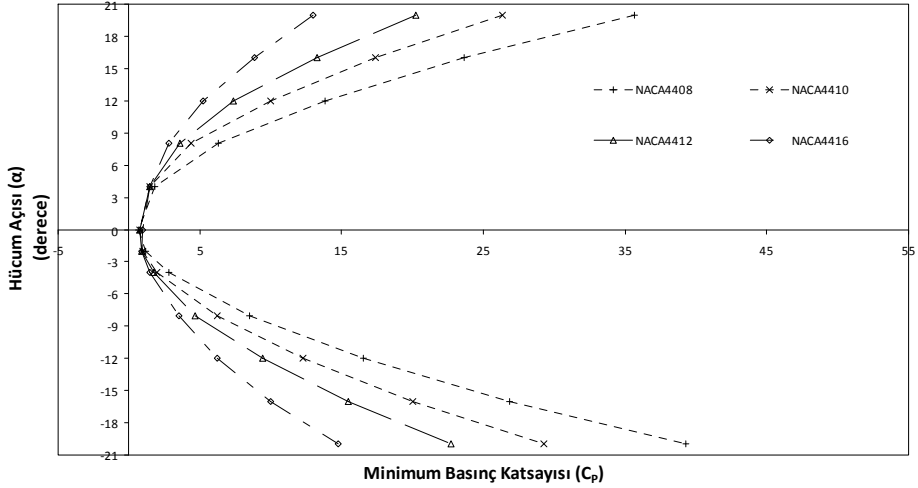
Şekil 2. NACA4406 kesitine ait kavitasyon kova diyagramı

Şekil 2’de NACA4406 kesitine ait kavitasyon kova diyagramı verilmiştir. Burada, farklı hücum açılarında kesite ait C_p değerleri karşılaştırmalı olarak çizdirilmiştir. Bunun için CDSM programından faydalanılmıştır. PCPAN (Partially Cavitating PANel Method) programı ile hesaplanan kovanın doğrulanması gerçekleştirilmiştir [31]. Ele alınan hidrofoil kesitlerine ait boyutsuz geometrik değerler Çizelge 1’de verilmektedir.

Çizelge 1. Hidrofoillerin boyutsuzlaştırılmış geometrik değerleri

NACA4416		NACA4412		NACA4410		NACA4408		NACA4406		BALIK KUYRUKLU		NACA63A012		NACA66-012	
x	Y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y
1.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00
0.99	0.00	0.99	0.00	0.99	0.00	0.99	0.00	0.99	0.00	1.00	0.03	0.85	0.02	0.85	0.02
0.97	0.01	0.97	0.01	0.97	0.01	0.97	0.01	0.97	0.01	0.98	0.03	0.75	0.03	0.75	0.04
0.94	0.02	0.94	0.02	0.94	0.01	0.94	0.01	0.94	0.01	0.93	0.03	0.65	0.04	0.65	0.05
0.91	0.03	0.91	0.02	0.91	0.02	0.90	0.02	0.90	0.02	0.88	0.02	0.55	0.05	0.55	0.06
0.86	0.04	0.86	0.03	0.86	0.03	0.86	0.03	0.86	0.03	0.85	0.01	0.45	0.06	0.45	0.06
0.81	0.05	0.81	0.05	0.81	0.04	0.81	0.04	0.81	0.03	0.81	0.02	0.35	0.06	0.35	0.06
0.75	0.07	0.75	0.06	0.75	0.05	0.75	0.05	0.75	0.04	0.75	0.03	0.25	0.06	0.25	0.05
0.69	0.08	0.69	0.07	0.69	0.06	0.69	0.06	0.69	0.05	0.69	0.04	0.15	0.05	0.15	0.04
0.62	0.09	0.62	0.08	0.62	0.07	0.62	0.06	0.62	0.06	0.62	0.04	0.08	0.04	0.08	0.03
0.55	0.10	0.55	0.09	0.55	0.08	0.55	0.07	0.55	0.06	0.55	0.05	0.03	0.02	0.03	0.02
0.48	0.11	0.48	0.09	0.48	0.08	0.48	0.08	0.48	0.07	0.48	0.05	0.01	0.01	0.01	0.01
0.41	0.12	0.41	0.10	0.41	0.09	0.41	0.08	0.41	0.07	0.41	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00
0.34	0.12	0.34	0.10	0.34	0.09	0.34	0.08	0.34	0.07	0.35	0.06	0.01	-0.01	0.01	-0.01
0.28	0.12	0.28	0.10	0.28	0.09	0.28	0.08	0.28	0.07	0.28	0.06	0.03	-0.02	0.03	-0.02
0.21	0.11	0.22	0.09	0.22	0.08	0.22	0.07	0.22	0.06	0.22	0.06	0.08	-0.04	0.08	-0.03
0.16	0.10	0.16	0.08	0.16	0.07	0.16	0.06	0.16	0.05	0.17	0.05	0.15	-0.05	0.15	-0.04
0.11	0.09	0.11	0.07	0.11	0.06	0.11	0.05	0.11	0.04	0.12	0.05	0.25	-0.06	0.25	-0.05
0.07	0.07	0.07	0.06	0.07	0.05	0.07	0.04	0.07	0.03	0.08	0.04	0.35	-0.06	0.35	-0.06
0.04	0.05	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.03	0.04	0.02	0.04	0.03	0.45	-0.06	0.45	-0.06
0.01	0.03	0.02	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.55	-0.05	0.55	-0.06
0.00	0.02	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01	0.65	-0.04	0.65	-0.05
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.75	-0.03	0.75	-0.04
0.01	-0.01	0.01	-0.01	0.01	-0.01	0.01	-0.01	0.01	0.00	0.00	-0.01	0.85	-0.02	0.85	-0.02
0.02	-0.02	0.01	-0.02	0.01	-0.01	0.01	-0.01	0.01	-0.01	0.01	-0.02	0.90	-0.01	0.90	-0.01
0.03	-0.03	0.02	-0.02	0.02	-0.02	0.02	-0.01	0.02	-0.01	0.02	-0.02	0.95	-0.01	0.95	0.00
0.04	-0.03	0.04	-0.02	0.03	-0.02	0.03	-0.01	0.03	-0.01	0.03	-0.03	1.00	0.00	1.00	0.00
0.05	-0.04	0.05	-0.02	0.05	-0.02	0.05	-0.01	0.05	-0.01	0.04	-0.03				
0.07	-0.04	0.06	-0.03	0.06	-0.02	0.06	-0.01	0.06	-0.01	0.06	-0.04				
0.10	-0.04	0.10	-0.03	0.10	-0.02	0.10	-0.01	0.10	-0.01	0.10	-0.05				
0.15	-0.05	0.15	-0.03	0.15	-0.02	0.14	-0.01	0.14	0.00	0.14	-0.05				
0.20	-0.05	0.20	-0.03	0.20	-0.02	0.20	-0.01	0.20	0.00	0.19	-0.06				
0.26	-0.04	0.25	-0.02	0.25	-0.01	0.25	-0.01	0.25	0.00	0.25	-0.06				
0.32	-0.04	0.32	-0.02	0.31	-0.01	0.31	0.00	0.31	0.01	0.31	-0.06				
0.38	-0.04	0.38	-0.02	0.38	-0.01	0.38	0.00	0.38	0.01	0.38	-0.06				
0.45	-0.03	0.45	-0.02	0.45	-0.01	0.45	0.00	0.45	0.01	0.45	-0.06				
0.52	-0.03	0.52	-0.01	0.52	0.00	0.52	0.00	0.52	0.01	0.52	-0.05				
0.59	-0.03	0.59	-0.01	0.59	0.00	0.59	0.01	0.59	0.01	0.59	-0.05				
0.65	-0.02	0.65	-0.01	0.65	0.00	0.65	0.01	0.65	0.01	0.65	-0.04				
0.72	-0.02	0.72	-0.01	0.72	0.00	0.72	0.01	0.72	0.01	0.72	-0.03				
0.78	-0.01	0.78	0.00	0.78	0.00	0.78	0.01	0.78	0.01	0.78	-0.03				
0.83	-0.01	0.83	0.00	0.83	0.00	0.83	0.00	0.83	0.01	0.83	-0.02				
0.88	-0.01	0.88	0.00	0.88	0.00	0.88	0.00	0.88	0.01	0.85	-0.01				
0.92	0.00	0.92	0.00	0.92	0.00	0.92	0.00	0.92	0.00	0.90	-0.02				
0.96	0.00	0.96	0.00	0.96	0.00	0.96	0.00	0.96	0.00	0.95	-0.03				
0.98	0.00	0.98	0.00	0.98	0.00	0.98	0.00	0.98	0.00	1.00	-0.04				
1.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00				

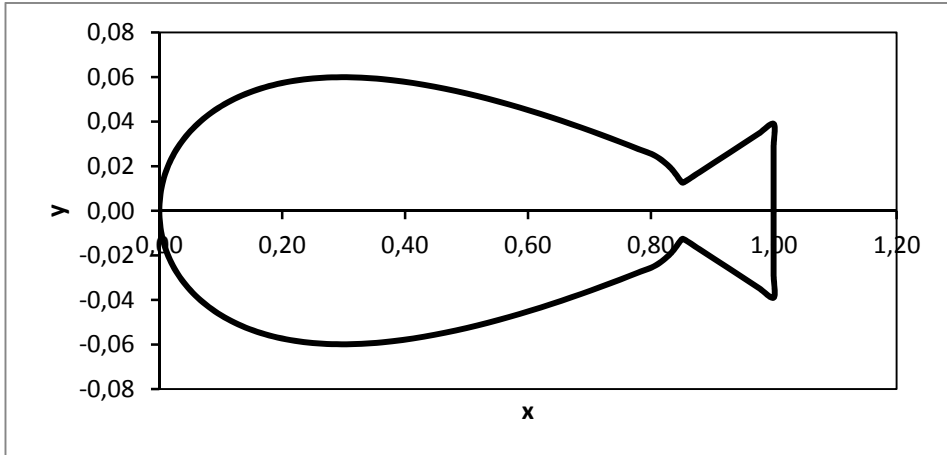
Elde edilen grafikte iç bölgede “kova”yı andıran bir şekil ortaya çıkmıştır. İç bölgede oluşturulan bu eğri kesitin kaviteasyon davranışı ile ilgili bilgi vermektedir. NACA4406, simetik bir kesit olmadığından kova eğrisinin hatları sifıra yaklaşıldıkça dikleşmeye başlamaktadır. Kaviteasyon kovalarının genel özelliği olarak, kesitlerin çalıştığı hücum açılarında eğer basınç katsayısı kovanın içinde kalır ise kesitin kaviteasyon göstermediği, dışında kalır ise kesitin kaviteasyon gösterdiği bilinmektedir.



Şekil 3. NACA44 serisi kesitlerin kavitasyon kovalarının karşılaştırmalı grafiği

Şekil 3'te NACA4408, 4410, 4412 ve 4416 kesitlerine ait kavitasyon kova diyagramları verilmiştir. Eğrilere bakıldığında “kova”larda kalınlık arttıkça genişlemeler görülmektedir. Diğer bir deyişle hidrofoil kalınlığı arttıkça aynı hücüm açısında kavitasyon oluşumu azalmakta veya ortadan kalkmaktadır.

Balık Kuyruklu Hidrofoil: Farklı bir kesit üretmek için NACA0012 kesitinin modifiye edilmesi ile oluşturulan “Balık kuyruklu kesit” ele alınmıştır. Bu kesit, NACA0012 kesitinin çıkış ucundan itibaren giriş boyunun yaklaşık %15'lik kısmında geometride değişiklik yapılarak oluşturulmuştur. Bu kesite ait geometri Şekil 4'te, koordinatları ise Çizelge 2'de verilmiştir.

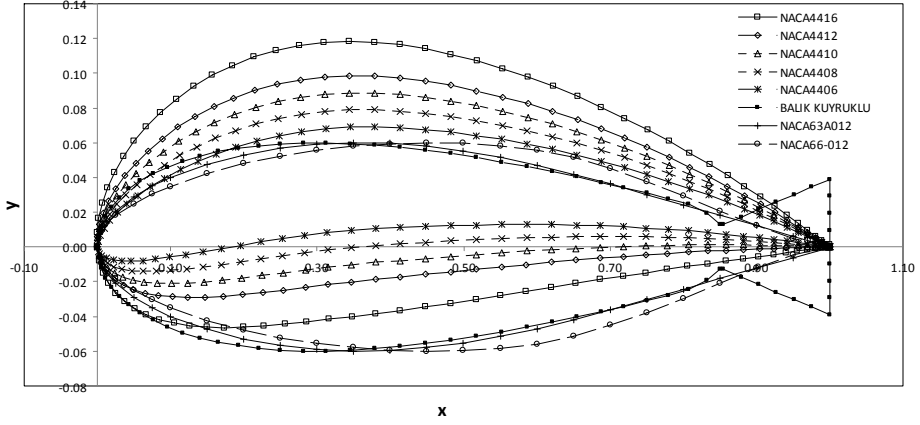


Şekil 4. Balık kuyruklu kesit

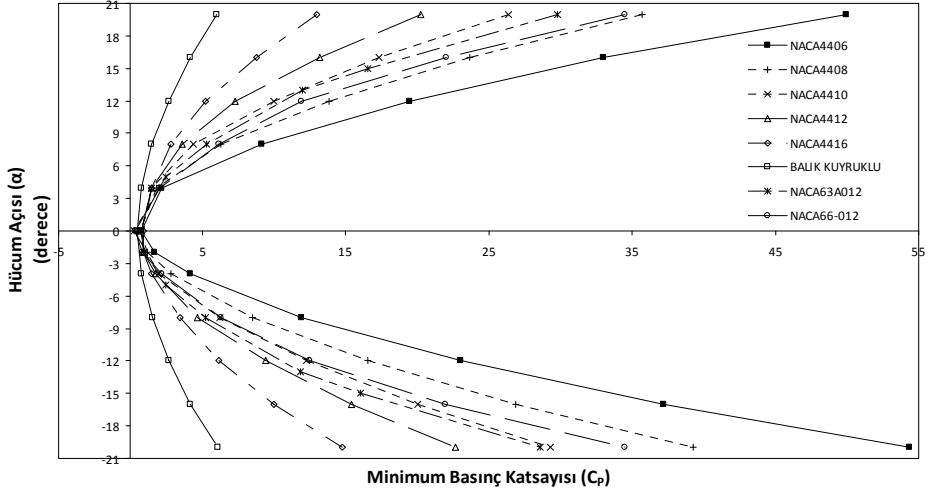
Çizelge 2. Balık kuyruklu kesite ait boyutsuzlaştırılmış geometrik değerler

BALIK KUYRUKLU							
X	y	x	y	x	y	x	y
1.00	0.00	0.48	0.05	0.00	-0.01	0.55	-0.05
1.00	0.01	0.45	0.06	0.00	-0.01	0.59	-0.05
1.00	0.02	0.41	0.06	0.01	-0.02	0.62	-0.04
1.00	0.03	0.38	0.06	0.02	-0.02	0.65	-0.04
1.00	0.04	0.35	0.06	0.03	-0.03	0.69	-0.04
0.98	0.03	0.31	0.06	0.04	-0.03	0.72	-0.03
0.95	0.03	0.28	0.06	0.06	-0.04	0.75	-0.03
0.93	0.03	0.25	0.06	0.08	-0.04	0.78	-0.03
0.90	0.02	0.22	0.06	0.10	-0.05	0.81	-0.02
0.88	0.02	0.19	0.06	0.12	-0.05	0.83	-0.02
0.85	0.01	0.17	0.05	0.14	-0.05	0.85	-0.01
0.85	0.01	0.14	0.05	0.17	-0.05	0.85	-0.01
0.83	0.02	0.12	0.05	0.19	-0.06	0.88	-0.02
0.81	0.02	0.10	0.05	0.22	-0.06	0.90	-0.02
0.78	0.03	0.08	0.04	0.25	-0.06	0.93	-0.03
0.75	0.03	0.06	0.04	0.28	-0.06	0.95	-0.03
0.72	0.03	0.04	0.03	0.31	-0.06	0.98	-0.03
0.69	0.04	0.03	0.03	0.35	-0.06	1.00	-0.04
0.65	0.04	0.02	0.02	0.38	-0.06	1.00	-0.03
0.62	0.04	0.01	0.02	0.41	-0.06	1.00	-0.02
0.59	0.05	0.00	0.01	0.45	-0.06	1.00	-0.01
0.55	0.05	0.00	0.01	0.48	-0.05	1.00	0.00
0.52	0.05	0.00	0.00	0.52	-0.05		

Analizleri yapılan tüm kesitlere ait (NACA4406, NACA4408, NACA4410, NACA4412, NACA4416, NACA63A012, NACA66-012 ve Balık kuyruklu) geometriler karşılaştırmalı olarak Şekil 5'te, kavitasyon kova diyagramları ise Şekil 6'da verilmiştir.

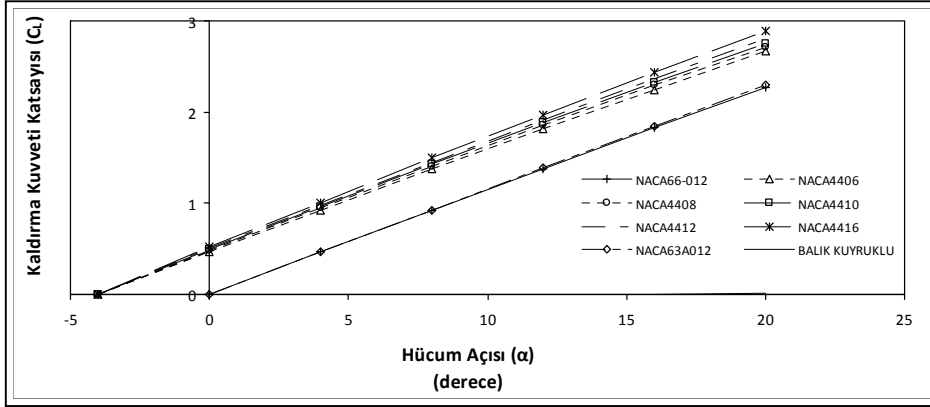


Şekil 5. Bütün hidrofoil geometrilerinin karşılaştırmalı grafiği



Şekil 6. Bütün kesitlere ait kaviteyon kovalarının karşılaştırmalı grafiği

Buradan görüleceği üzere kalınlık arttıkça kaviteyonda iyileşmeler görülmektedir. NACA4406 kesiti en ince kesit olup, en dar kaviteyon kovalarına sahip kesittir. NACA4408 ve diğer NACA kesitleri daha kalın olduğundan kovalarda genişlemeler ve kaviteyonda azalmalar görülmektedir. Kesitler simetrik olmadığından dolayı sıfıra yaklaşıldıkça dikleşmeler görülmektedir. NACA63A012 ve NACA66-012 simetrik kesitlerdir. Aynı kalınlık oranlarına sahip olmasına rağmen NACA63A012 kesitinin kovaları NACA66-012 kesitinin kovalarına göre daha geniştir. Dolayısıyla NACA63A012 kesiti kaviteyon performansı daha iyidir. Onun için gemi pervane kesitlerinde NACA63A kesitleri sıkça kullanılmaktadır (Kovalardaki genişlemeler kaviteyonun azaldığını göstermektedir). Balık kuyruklu kesit ise kova değerleri en iyi olan kesittir. Diğer beş kesitin kaviteyon gösterdiği bölgelerde balık kuyruklu kesitte kaviteyon oluşmamaktadır. NACA0012 kesitinin kık bölgesinde yapılan küçük bir değişim ile elde edilen bu kesit ile kaviteyon kova değerlerinde önemli iyileşmeler sağlanmıştır.



Şekil 7. Kaldırma kuvveti katsayılarının karşılaştırmalı grafiği

Şekil 7'de kesitlere ait kaldırma kuvveti katsayısı değerleri görülmektedir. Balık kuyruklu kesite ait kaldırma kuvveti katsayısı değerleri, kaviteasyon kovası iyi olmasına rağmen düşük çıkmıştır. Diğer kesitlerin değerlerine bakıldığında kalınlık arttıkça kaldırma kuvveti katsayısı değerleri de artmaktadır. Simetrik olmayan kesitlerin kaldırma kuvveti katsayısı değerleri simetrik kesitlere göre daha iyidir.

5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada, NACA kesitlerinin kaviteasyon kovaları ve kaldırma kuvveti katsayıları sayısal olarak elde edilerek, pervane kesitleri de dahil hidrofoillere ait fiziksel özellikler hakkında öngörü yapabileme imkanı sunulmuştur. Elde edilen değerler bir araya getirilerek kesitlere ait kaviteasyon bukletlerinin oluşturulması sağlanmıştır. Bu bukletler, kaviteasyon açısından hangi kesit ile hangi aralıklarda çalışılması gerektiğini belirtmektedir. Elde edilen sonuçlar şu şekilde özetlenebilir:

- 1-) NACA4406 kesitinin kaviteasyon kovası dar bir eğridir.
- 2-) NACA4408, 4410, 4412, 4416 kesitlerinde kalınlık oranı arttıkça kaviteasyon kovalarında iyileşmeler görülmektedir. Diğer bir deyişle hidrofoil kalınlığı arttıkça kaviteasyonun azaldığı görülmüştür. Bu durumun, [18] ve [26] çalışmaları ile uyumlu olduğu sonucuna varılmıştır.
- 3-) NACA63A012 ve NACA66-012 kesitleri simetrik kesitlerdir ve diğer simetrik olmayan kesitlere göre daha geniş kaviteasyon kovalarına sahiptirler. NACA4406 ve 4408 kesitlerinden daha iyi bir kovaya sahiptirler. Dolayısı ile pervane kanat kesitlerinde tercih edilmektedirler.
- 4-) Balık kuyruklu kesit ise en iyi kova eğrisine sahip kesittir. Çok az bir bölgede kaviteasyon göstermektedir. Kuyruk bölgesi üzerinde çalışılarak daha iyi bir performans elde edilebilir.
- 5-) En iyi kaldırma kuvveti NACA4416 kesiti için elde edilmiştir. Kalınlık azaldıkça kaldırma kuvvetinde de azalmalar meydana gelmiştir. Balık kuyruklu kesitin kaldırma kuvveti katsayısı değerleri düşük çıkmıştır.

Çalışmanın devamı olarak, NACA kesitleri üzerinde yapılabilecek geometrik değişimler ile kaldırma kuvveti daha büyük ve kaviteasyon göstermeyen kesitlerin elde edilebilmesi, bunun yanı sıra kaviteasyon kova diyagramlarının yerini alabilecek ampirik formüllerin geliştirilmesi de amaçlanmaktadır. Devam niteliğindeki bu çalışmanın tamamlanması ile sayısal sonuçların endüstriye uygulanabilirliği daha somut bir hale gelecektir.

Acknowledgments / Teşekkür

Bu çalışmanın hazırlanmasına imkan sağlayan Endaze Mühendislik'e teşekkürlerimi sunarım (S.Seber).

REFERENCES / KAYNAKLAR

- [1] Dang, J. ve Kuiper, G., (1998). "Re-entrant jet Modelling of Partial Cavity Flow on Two Dimensional Hydrofoils", Proceedings: Third International Symposium on Cavitation, April 7-10, Grenoble, France.
- [2] Brewer, W. ve Kinnas, S.A., (1997). "Experiment and Viscous Flow Analysis on a Partially Cavitating Hydrofoil", Journal of Ship Research, September, Vol.41, pp.161-171.
- [3] Bal,Ş., Kinnas, S.A. ve Lee, H., (2001). "Numerical Analysis of 2D and 3D Cavitating Hydrofoils Under a Free Surface", Journal of Ship Research, Vol.45, No.1, pp.34-49.
- [4] Krishnaswamy, P., (2000). Flow Modelling for Partially Cavitating Hydrofoils, PhD Thesis, Technical University of Denmark, Department of Naval Architecture and Offshore Engineering, October.
- [5] Lee, H. ve Kinnas, S.A., (2002). "Application of BEM in Unsteady Blade Sheet and Developed Tip Vortex Cavitation Prediction on Marine Propellers", IABEM2002 Symposium of the International Association for Boundary Element Methods, May 28-30, Austin, TX.
- [6] Kinnas, S.A., Sun, H. ve Lee, H., (2003). "Numerical Analysis of Flow Around the Cavitating CAV2003 Hydrofoil", 1-4 November, Osaka, Japan, pp.1-4.
- [7] Wang, G.Q. ve Yang, C.J., (2001). "Design of Cavitating Propellers by Lifting Surface Theory", PRADS 2001, Shanghai, China.
- [8] Dacles-Mariani, Rogers, S.E., Kwak, D., Zilliac, G. ve Chow, J., (1993). "A Computational Study of Wingtip Vortex Flow Field", AIAA paper 93-3010.
- [9] Bal, Ş., (1999). "A Panel Method for the Potential Flow Around 2-D Hydrofoils", Tr. J. of Engineering and Environmental Science, TÜBİTAK, Vol.23, pp. 349-361.
- [10] Berntsen, G.S., Kjeldsen, M. ve Arndt, R.E.A., (2001). "Numerical Modeling of Sheet and Tip Vortex Cavitation with FLUENT 5", CAV2001, Session B5.006.
- [11] Chen, J.H. ve Wu, P.C., (2009). "A Computational Study of Two-Dimensional Viscous Cavitating Hydrofoil Flow Near a Free", Flucome 2009, 10th International Conference on Fluid Control, Measurements, and Visualization, August 17-21, Moscow, Russia.
- [12] Pavlova, N.A. ve Terent'ev, A.G., (2010). "Computer Simulation of Flow past Arbitrary Hydrofoils with Partial Cavitation", Fluid Dynamics, Vol.45, No.3, pp.369-377.
- [13] Pascarella, C. ve Salvatore, V., (2001). "Numerical Study of Unsteady Cavitation on a Hydrofoil Section Using Barotropic Model", CAV2001, Session B2.005.
- [14] Kinnas, S.A., (2001). "Supercavitating 2-D Hydrofoils: Prediction of Performance and Design", Supercavitating Flows-RTO AVT Lecture Series, 12-16 February, Brussels, Belgium.
- [15] Yamaguchi, H., Kato, H., Maeda, M. ve Toyoda, M., (1999). "High Performance Foil Sections With Delayed Cavitation Inception", 3rd ASME/JSME Joint Fluids Engineering Conference, July 18-22, San Francisco, California.
- [16] Pearce, B.W. ve Brandner, P.A., (2007). "Limitations on 2D Super-cavitating Hydrofoil Performance", 16th Australasian Fluid Mechanics Conference Crown Plaza, 2-7 December, Gold Coast, Australia.
- [17] Gustavsson, J.P.R., Denning, K.C. ve Segal, C., (2008). "Hydrofoil Cavitation Under Strong Thermodynamic Effect", Journal of Fluids Engineering, September, Vol. 130 / 091303-1.

- [18] Chau, S.W., Hsu, K.L., Kouh, J.S. ve Chen, Y.J., (2004). "Investigation of cavitation inception characteristics of hydrofoil sections via a viscous approach", Journal of Marine Science and Technology, SNAJ 2004.
- [19] Cure, A., Huuva, T., Bark, G. ve Nilsson, H., (2007). "Computations of Unsteady Cavitating Flow on Wing Profiles Using a Volume Fraction Method and Mass Transfer Models", 2nd IAHR International Meeting of the Workgroup on Cavitation and Dynamic Problems in Hydraulic Machinery and Systems, October 24-26, Timisoara, Romania.
- [20] Bal, Ş., (2007). "A numerical method for the prediction of wave pattern of surface piercing cavitating hydrofoils", Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, Vol:221.
- [21] Ekinci, S., (2007). Gemi Pervane Yüzeyinde Tabaka Kavitasyonunun Sayısal Olarak İncelenmesi, Doktora Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [22] Hess, J.L. ve Smith, M.O., (1966). "Calculation of Potential Flow about Arbitrary Bodies", Progress in Aeronautical Science, Vol.8, pp.1-138.
- [23] Hess, J.L. ve Valarezo, W.O., (1985). "Calculation of Steady Flow about Propellers by Means of a Surface Panel Method. AIAA, No.85.
- [24] Hoshino, T., (1989). "Hydrodynamic Analysis of Propellers in Steady Flow Using a Surface Panel Method", Trans.Soc.Arch of Japan.
- [25] Carlton, J.S., (1994). Marine Propellers & Propulsion, Butterworth-Heinemann Ltd., Oxford, UK.
- [26] Kinnas, S.A., (1990). "Fundamentals of Cavity Flows", Supplement to the Notes on the Theory of Hydrofoils and Propellers, Department of Ocean Engineering, Massachusetts Institute of Technology, MIT Course 13.04, USA.
- [27] Szantyr, J.A.,(1994). "A Method for Analysis of Cavitating Marine Propellers in Non-Uniform Flow", International Shipbuilding Progress, Vol.41, No.427, pp.223-242.
- [28] Kinnas, S.A. ve Fine, N., (1990). "Non-Linear Analysis of Flow Around Partially or Super-Cavitating Hydrofoils by a Potential Based Panel Method", Proceeding the IABEM-90 Symposium, University of Rome, October 15-19, Italy.
- [29] Katz, J. ve Plotkin, A., (1991). Low-Speed Aerodynamics (From Wing Theory to Panel Methods), McGraw-Hill, Singapore.
- [30] Kinnas, S.A. ve Fine, N.E., (1993). "A Numerical Nonlinear Analysis of the Flow Around 2-D and 3-D Partially Cavitating Hydrofoils", Journal of Fluid Mechanics, Vol. 254, pp. 151-181.
- [31] Seber, S., (2011). Gemi Pervane Kesitlerine Ait Kavitasyon Kovalarının Sayısal Hesabı, Yüksek Lisans Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [32] Abbott, I.H., ve Doenhoff, A.E.V., (1959). Theory of Wing Sections, Dover Publications Inc., New York.

SEMBOL LİSTESİ

S_c	Kavitasyon yüzeyi
S_h	Hidrofoil yüzeyi
S_w	İz yüzeyi
Φ	Toplam hız potansiyeli
ϕ	Pertürbasyon potansiyeli
V	Gelen akım hızı
$\rightarrow n, n^+$	Birim vektör

p_v	Buhar basıncı
q_c	Toplam hız
σ	Kavitasyon sayısı
r	Kaynak noktası ile alan noktası arasındaki mesafe
$\Delta\phi_w$	Potansiyel sıçrama
α	Hücum açısı
C_P	Minimum basınç katsayısı
C_L	Kaldırma kuvveti katsayısı