

Numerical Investigation Cavitation Buckets for Hydrofoil Parametrically

Hidrofoillerin Kavitasyon Zarf Eğrilerinin Sayısal Olarak İncelenmesi

Türk Denizcilik ve Deniz Bilimleri Dergisi

Cilt: 1 Sayı: 2 (2015) 89-101

Mehmet Salih KARAALIOĞLU^{1,*}, Şakir BAL¹

¹Gemi İnşaatı ve Deniz Bilimleri Fakültesi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, TÜRKİYE

ABSTRACT

Cavitation is a general fluid mechanics phenomenon that is appeared in system such as pumps, turbines, marine propellers and hydrofoils which induces pressure and velocity fluctuation in the fluid (Brennen, 2013). Cavitation can be defined as the formation of vapour regions due to a decrease in local pressure. Undesirable consequences which can cause a fall in the performance of a system, structural failure, production of noise and vibration, material damage, are encountered due to cavitation (Uşar, 2015).

In this study, cavitation was analysed using a bucket diagram. Bucket diagram represents the cavitation behaviour of a wing, fin or propeller blade in a two dimensional sense. This diagram is plotted as a function of section (hydrofoil) angle of attack (α) versus section cavitation number (σ). Pressure distribution can be calculated on two dimensional geometry of hydrofoil by using BEM (Boundary

Element Method) and cavitation bucket diagram can be computed. The cavitation inception case and partial cavitation cases have been investigated and the results of the present BEM were successfully compared with those of given in literature in the past and each other. While a constant source-dipole panel method has been used to calculate the pressure distribution at cavitation inception case, PCPAN programme that solves the sheet type of cavity on the hydrofoil by potential based panel method, has been used to calculate pressure distribution for the cases of partial cavitation. Effects of maximum hydrofoil thickness, maximum camber and location of maximum camber on cavitation have been analyzed by means of cavitation bucket diagrams. All results are discussed in a detailed manner.

Keywords: Cavitation, cavitation bucket diagram, boundary element method, hydrofoil.

Article Info

Received: 17 August 2015

Revised: 17 October 2015

Accepted: 23 November 2015

* (corresponding author)

E-mail: karaalioglu@itu.edu.tr

ÖZET

Kavitasyon lokal basıncın, ortam sıcaklığındaki buhar basıncının altına düşmesi durumunda meydana gelen fiziksel bir olaydır. Sabit sıcaklıktaki bir akışkanın lokal basıncı (p) doymuş buhar basıncının (p_v) altına düşmesi durumunda akışkan yapısı parçalanmaya başlar. Bu olaya "kavitasyon" denir. Kavitasyon pervane, strut, dümen, stabilize için bulunan finler, pompa ve türbin kesitlerinde meydana gelebilir. Bu çalışmada sınır elemanları yöntemi ile (Boundary Element Method-BEM) iki boyutlu hidrofoiller üzerindeki basınç dağılımları hesaplanıp kavitasyon kova diyagramları (zarf eğrileri, kavitasyon bukleleri) elde edilmiştir. Her bir durum, kavitasyon başlangıç durumu ve kısmi kavitasyon durumu için ayrı ayrı incelenmiş elde edilen sonuçlar birbirleri ile karşılaştırılmıştır. Kısmi kavitasyon durumu incelenirken kısmi kavitasyon yapmaya müsaade eden bir panel yöntemi PCPAN kullanılmıştır. PCPAN programında kavitasyon boyu girdi olarak tanımlanır ve kavitasyon sayısı iteratif bir şekilde bulunur. Bu kısımda kavitasyon boyu $l/c = 0.5$ ve $l/c = 0.7$ için incelenmiştir. Kısmi kavitasyon için kavitasyon boyunun kord boyunun $\frac{3}{4}$ 'üne eşit olduğu durum fiziksel olarak özel bir anlam taşır. Kavitasyon sayısı küçüldükçe kavitasyon boyunun arttığı bilinmektedir. Kesit için kavitasyon sayısı küçüldükçe kavitasyon boyu artar. Fakat kavitasyon boyunun $\frac{3}{4}$ 'ye yaklaştığında kavitasyon sayısı küçülse dahi kavitasyon boyu artmamaktadır. Bu durum kavitasyon sayısının bir sınırı geçmesine kadar böyle devam eder. Bir değerden sonra yeniden kavitasyon sayısı küçülterek kavitasyon boyu artırılabilir. Fiziksel olarak stabil olmayan bu nokta için kavitasyon kova diyagramı elde edilerek bu özel durum incelenmesi amaçlanmıştır. Fakat PCPAN programı kavitasyon boyu $0,75c$ tanımlandığında doğru çalışmamaktadır. Bu durumda programın doğru çalıştığı $0,75c$ noktasına en yakın değer olan $0,7c$ için hesaplar yapılmıştır. Son olarak ise bir sualtı türbini kesitine ait olan S184 geometrisi kavitasyon başlangıç durumu için incelenmiştir.

Anahtar sözcükler: Kavitasyon, kavitasyon kova diyagramı, sınır eleman yöntemi, hidrofoil.

1. Giriş

Kavitasyon, bir akışkan içerisindeki lokal basıncın, ortam sıcaklığındaki buharlaşma basıncının altına düşmesi durumunda meydana gelen fiziksel bir olaydır. Sabit sıcaklıktaki bir akışkanın lokal basıncı (p), doymuş buharlaşma basıncının (p_v) altına düşerse, akışkan yapısı parçalanmaya başlar. Bu olaya "kavitasyon" denir. Kavitasyon denilen olgu suda çalışan pervane, dümen, fin, pompa ve türbin kesitlerinde çok sık olarak meydana gelebilir (Molland ve Turnock, 2011).

Kavitasyonun meydana geldiği bölgede basınç değeri ani bir şekilde değişir. Bu ani basınç değişimi sebebiyle sistem performansı olumsuz etkilenir (Kanat kesitinde kaldırma kuvveti düşer, direnç artar, pervane için itme azalır, vs.). Sisteme ek kuvvetler yüklenir. Gürültü ve titreşim oluşabilir ve bu durum özellikle sonar cihazların kullanıldığı gemi tipleri için çok büyük bir problem oluşturur. Ayrıca, akışkan ile katı yüzey arasındaki hız farkı çok yüksek değerlere ulaşırsa, erozyon (malzeme aşınması) meydana gelebilir (Franc, 2006). Bu nedenle

özellikle yüksek akım hızlarında çalışan sistemlerde kavitasyon göz önüne alınması gereken önemli bir olaydır. Literatürde sınır elemanları yöntemi kullanılarak kavitasyon yapan iki ve üç boyutlu hidrofoillerin incelendiği çok sayıda çalışma mevcuttur. Aşağı kısımda bu konuda yapılan belli başlı çalışmalar kısaca açıklanmıştır.

Kavitasyon yapan iki boyutlu hidrofoilleri incelemek için pertürbasyon tekniğine dayalı lineer metotlar geliştirilmiştir (Tulin, 1953; Geurst ve Timman, 1956). Bahsedilen bu çalışmalarda kullanılan lineer teoride genel kabul, kavite kalınlığının ve hidrofoil kalınlığının kiriş boyuna (chord) kıyasla küçük olmasıdır. İki boyutlu lineer problemlerin formülasyonu ayrıntılı olarak (Newman, 1977) numaralı kaynakta verilmiştir. Daha sonra, kısmi kavitasyon yapan hidrofoiller üç boyutlu durumda analiz edilmiştir (Uhlman Jr., 1987). Uygulanan yöntemle kısmi kavitasyon yapan hidrofoil diğer çalışmalardan farklı olarak lineer olmayan bir yöntemle incelemiştir. Lineer teoriye göre yapılan hesaplamalarda kalınlık oranı artıkça kavitasyon hacmi ve boyunun arttığı hesaplanmıştır. Fakat yapılan deneylerde, özellikle hidrofoil önder kenar yarıçapı artıkça kavitasyon hacminin azaldığı görülmüştür. Yapılan bir diğer çalışma ile lineer teorisinin bu eksikliği düzeltilmiştir (Kinnas, 1991).

Kaynak (Kinnas ve Fine, 1990)'da Kinnas&Fine kısmi ve süper kavitasyon yapan iki boyutlu hidrofoillerin non-lineer analizi potansiyel tabanlı sınır elemanı yöntemi ile yapılmıştır. Kavitasyon boyunun bilindiği, kavitasyon sayısının hesaplandığı çalışmada çözüm hız tabanlı sınır elemanlı yöntemle göre daha hızlı bir şekilde yakınsar. Kaynak (Kinnas ve Fine, 1990) yapılan çalışma geliştirilerek üç boyutlu hidrofoillerin incelenmesi sağlanmıştır (Kinnas ve Fine, 1993).

Kaynak (Bal, 1999)' da serbest su yüzeyi altında, kavitasyon oluşumu ihmal edilerek sabit bir hızda ilerleyen iki boyutlu hidrofoillerin hidrodinamik analizi panel yöntemi ile yapılmıştır.

Dang&Kuiper (Dang ve Kuiper, 1999) tarafından yapılan çalışmada kısmi kavitasyon yapan iki boyutlu hidrofoil panel yöntemi ile incelenmiştir.

Kaynak (Çelik ve ark., 2014) 'da iki ve üç boyutlu hidrofoil üzerinde oluşan kaviteyi tahmin eden potansiyel tabanlı sınır elemanı yöntemi geliştirilmiştir. Bulunan sonuçlar, daha önce geliştirilen sınır elemanı yöntemleri ve FLUENT programı ile elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.

Kavitasyon başlangıç tahmini için kesitin çalışabileceği hücum açlarına karşılık minimum basınç katsayılarının bilinmesi yeterlidir. Kesitin belirlenen hücum açları için üzerinde meydana gelen minimum basınç değerlerinin verildiği grafiklere "kavitasyon zarf eğrisi (cavitation bucket diagram)" denir. Elde edilen eğrinin iç kısmında çalışan kesit üzerinde kavitasyon görülmez. Başka bir deyişle eğrinin iç kısmı kavitasyon açısından güvenli bölgedir. Kavitasyon zarf eğrisi üç farklı bölgeden oluşmaktadır. Eğrinin üst kısmı, kesitin üst yüzeyinde giriş kenara yakın bölgedeki kavitasyon başlangıcını, eğrinin alt kısmı, alt yüzeydeki kavitasyon başlangıcını; eğrinin sol kısmı ise kesitin orta kısmındaki kavitasyon başlangıcını göstermektedir (Carlton, 2012).

Bu çalışmada hidrofoil üzerinde oluşan basınç dağılımı olası her bir hücum açısı için bulunup kavitasyon zarf eğrileri elde edilmiştir. Bu diyagramlar kullanılarak hangi şartlar için hidrofoil üzerinde kavitasyon oluşup oluşmadığı tayin edilmeye çalışılmıştır. Geometrilere için 4-basamaklı NACA serisi kullanılmıştır. Bu serilerin geometrisini tanımlarken kullanılan sayı dizisindeki her bir rakam

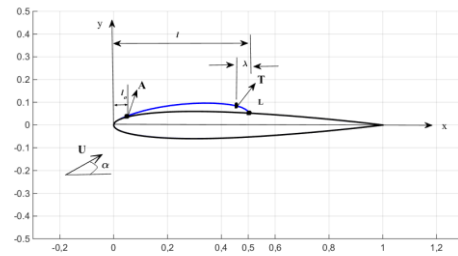
geometrik olarak bir parametreyi temsil etmektedir (Anderson, 2011). Bu parametreler kalınlık oranı, sehim oranı ve maksimum sehim yeri oranıdır. İncelenen geometrilerde bu parametreler değiştirilerek bu parametrelerin kaviteye olan etkileri incelenmiştir. Kaviteye iki ayrı durum için incelenmiştir. Bunlar, kaviteye başlangıç durumunun tayini ve kısmi kaviteye durumudur. Her iki durumda da zarf eğrilerini elde etmek için kesit üzerinde oluşan basınç dağılımının bulunması gerekmektedir. Basınç dağılımını elde etmek için sınır elemanları yöntemi (boundary element method) programları kullanılmıştır. Sınır elemanları yönteminde, akım alanının sınırlara uygun kaynak dipol, kuyu gibi tekil elemanları dağıtılır Neumann, Dirichlet veya bu sınır koşullarının her ikisi de ikisinde problemde tanımlanır. Böylece sınır koşulu probleminin çözümü ifade edilir (Seber ve ark., 2012; Ekinci, 2007). Bu çalışmada kaviteye başlangıç durumunun tayini için sabit şiddetli kaynak dipol yöntemini kullanan bir kod kullanılmıştır. Kaviteye başlangıç durumunda kesit üzerinde kavite oluşmaz. Kısmi kaviteye durumu için ise PCPAN (Partially Cavitating PANEL Method) programı kullanılmıştır. PCPAN, pervane veya kanat kesitleri üzerinde meydana gelen tabaka kaviteye oluşunu, potansiyel tabanlı panel yöntemi ile çözen bir koddur. Kısmi kaviteye durumu için kavite boyunun (l) giriş boyuna (c) oranının 0.5 ve 0.7 olduğu iki durum için incelenmiştir. Bu iki durum için kaviteye zarf eğrileri elde edilmiştir. Bilindiği üzere, hidrofoilde kaviteye sayısı küçüldükçe kaviteye boyu artar. Bu kaviteye boyunun $0.75c$ olduğu noktaya kadar devam eder. Bu noktada kaviteye sayısı küçüldüğünde beklenenin aksine kaviteye boyu azalır

ve kaviteye boyu için stabil olmayan bir bölge oluşur (partial cavity instability) (Kinnas, 1999). Kaviteye sayısı küçülmeye devam ederse, belli bir değerden sonra yeniden beklenildiği gibi kaviteye boyu artar. Fiziksel olarak görülen bu olay sayısal modelde de görülmektedir. Bu nedenle hesaplamalarda $0.7c$ durumu seçilmiştir (Karaaliolu, 2015).

Bu çalışma kapsamında ayrıca bir sualtı türbin kanat kesit geometrisi de kullanılmıştır. Sualtı akıntı türbinleri deniz ve gel-git akıntılarını kullanarak temiz ve yenilenebilir enerji üreten sistemlerdir. Sualtı türbin kanatlarının hepsinde görülmesi kaçınılmaz olan kaviteye oluşunun sistem performansını olumsuz yönde etkilediği bilinmektedir (Uşar ve Bal, 2015). Bu çalışmada bir sualtı türbin kesitine ait kaviteye zarf eğrisi oluşturulmuş ve analiz edilmiştir.

2. Sınır Elemanları Yöntemi

Sınırları S_B olan bir hidrofoil kesitinin sıkıştırılmaz, viskoz olmayan ve döngüsüz (irrotasyonel) olan akımın içinde çalıştığı düşünülün.



Şekil 1. İki boyutlu durum için kısmi kaviteye yapan NACA0012 kesit geometrisi ($\alpha=6$).

Süreklilik denklemi toplam potansiyele (Φ) göre yazılırsa;

$$\nabla^2 \Phi^* = 0 \quad (2-1)$$

eşitliği elde edilir.

Denklem 2-1'in çözümü Denklem 2-2'de gösterildiği gibi kaynak (σ) ve dipol (μ) dağılımlarının toplamı olarak yazılabilir.

$$\Phi^*(x, y, z) = -\frac{1}{4\pi} \int_{S_B} \left[\sigma \left(\frac{1}{r} - \mu n \cdot \nabla \left(\frac{1}{r} \right) \right) \right] dS + \Phi_\infty \quad (2-2)$$

Pertürbasyon potansiyeli (ϕ)'nin S_B üzerinde tüm noktalarda tanımlanması gerekir. Denklem 2-2 bu koşulu sağlamaktadır. Bu yüzeyin üzerine teklik elemanları dağıtılarak iç potansiyel Denklem 2-3'deki gibi elde edilebilir.

$$\Phi^*(x, y, z) = -\frac{1}{4\pi} \int_{gövde+iz} \mu \frac{\partial}{\partial n} \left(\frac{1}{r} \right) dS - \frac{1}{4\pi} \int_{gövde} \sigma \left(\frac{1}{r} \right) dS + \Phi_\infty \quad (2-3)$$

$r \rightarrow 0$ olduğu zaman bu integraller tekil olmaktadır. Ve bu (x, y, z) noktası civarında bu integrallere ait temel değerler hesaplanmalıdır. Yüzeye dik akım bileşeninin sıfır olduğu sınır koşulu $\Phi^* = sabit$ eşitliği tanımlanabilir. Bu yüzden, $\Delta(\Phi + \Phi_\infty) \cdot n = 0$ koşulu hız potansiyeli cinsinden yazılmak istenirse aşağıdaki eşitlik elde edilir.

$$\Phi^*(x, y, z) = -\frac{1}{4\pi} \int_{gövde+iz} \mu \frac{\partial}{\partial n} \left(\frac{1}{r} \right) dS - \frac{1}{4\pi} \int_{gövde} \sigma \left(\frac{1}{r} \right) dS + \Phi_\infty = sabit \quad (2-4)$$

Bu denklem, endirekt sınır koşullu problemler için esas teşkil eder. Çözüme ulaşmak için S_B yüzeyi ayrık elemanlara bölünüp, her bir eleman için Denklem 2-4 çözülür. Sonuç olarak bilinmeyen μ dağılımlarını içeren cebirsel eşitlikler elde edilir.

Geometri üzerine yerleştirilen her bir panel yerel kaynak ve dipol şiddetine sahiptir.

$$\sum_{j=1}^N B_j \sigma_j + \sum_{j=1}^N C_j \mu_j + \Phi_\infty = sabit \quad (2-5)$$

Kaynak ve dipol değerleri belirtilmelidir. İç potansiyel Φ_∞ olarak seçilmiştir. Bu durumda kaynak şiddeti aşağıdaki gibi verilmektedir.

$$\sigma_j = n_j \cdot Q_\infty \quad (2-6)$$

İç pertürbasyon potansiyelinin değerini sıfır yapmak için $((\Phi_i)^* = \Phi_\infty)$ Denklem 2-5 aşağıdaki forma dönüştürülür:

$$\sum_{j=1}^N B_j \sigma_j + \sum_{j=1}^N C_j \mu_j + \Phi_\infty = 0 \quad (2-7)$$

Denklem 2-7 (Sınır şartı), bu nokta için doğrusal cebirsel bir denklemi sağlamak koşuluyla yapı içerisindeki her kollokasyon noktasında belirtilmiştir. Böyle bir sayısal çözüm kurulabilmesi için izlenmesi gereken adımlar Kaynak (Katz ve Plotkin, 2001)'de ayrıntılı bir şekilde açıklanmıştır.

i. Kinematik Sınır Şartı

Akış hız vektörlerinin hidrofoil ve kavite yüzeyine teğet olması gerekmekte

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = -\vec{V} \cdot \vec{n} \quad (2-8)$$

\vec{n} kavite yüzeyi veya hidrofoil yüzeyi üzerindeki akışkana doğru yönlendirilmiş dik birim vektörü temsil etmektedir.

ii. Kavite Yüzeyi Üzerindeki Dinamik Sınır Koşulu

Kavitasyon yüzeyi üzerinde basınç sabit ve p' 'ye eşittir. Bernoulli denklemi kavitasyon sayısı için uygulandığında

kavite yüzeyi üzerindeki toplam hız aşağıdaki gibi bulunabilir:

$$q_c = (U^2)\sqrt{1+\sigma} \quad (2-9)$$

Kavitasyon oluşumunu kontrol etmek için burada boyutsuz kavitasyon sayısı (σ) türetilmiştir. İncelenen noktada kavitasyon olmaması için σ 'nın $-C_p$ den büyük olması gerekmektedir.

Dinamik sınır koşulu pertürbasyon potansiyeli cinsinden Denklem 2-10'da gösterildiği gibi yazılabilir.

$$\frac{\partial\Phi}{\partial S_c} = q_c - \frac{\partial\Phi_{in}}{\partial S_c} \quad (2-10)$$

ii. Kutta Şartı

Hidrofoilin çıkış ucunda hız sonludur.

$$\nabla\Phi = \text{sonlu} \quad (\text{Çıkış Ucunda}) \quad (2-11)$$

iii. Radyasyon Koşulu

$$\nabla\Phi \rightarrow 0 \quad (\text{Sonsuzda}) \quad (2-12)$$

iv. Kavite Kapanma Modeli

Kavitasyon, kendi yüzeyinin çıkış ucunda (takip kenarında) kapanmaktadır. Burada kavitasyon yüzeyinin takip kenarında meydana gelen karışık fiziksel olay ihmal edilmiştir. Bu bölge, bir kavitasyon kapanma (sonlandırma) modeli ile temsil edilmiştir. Kapanma modeli, kavitasyon geçiş bölgesi için uygulanır. PCPAN programında basınç kapanma modeli kullanılmıştır. Bu modelde kavite geçiş bölgesinde basınç değeri değişmektedir. Detaylar 19 numaralı kaynak içerisinde verilmiştir.

3. Sayısal Sonuçlar

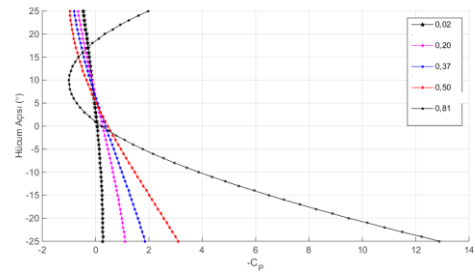
Bu bölümde 4-basamaklı NACA kesitlerinde maksimum sehim oranının,

maksimum sehim yerinin ve kalınlık oranının kavitasyonla ilişkisi, her bir durum için zarf eğrilerinin çizdirilmesi ile saptanmaya çalışılmıştır. İlk olarak kavitasyon başlangıç durumu için zarf eğrileri oluşturulmuştur. İkinci olarak aynı parametreler kısmi kavitasyon durumu için de incelenmiş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Son olarak bir sualtı akıntı türbin kesiti kavitasyon başlangıç durumu için incelenmiştir.

3.1. Kavitasyon Başlangıç Durumu İçin Analizler

Kavitasyon başlangıç durumuna ait zarf eğrileri için gerekli olan basınç dağılımı sabit kaynak-dipol panel yöntemi ile bulunmuştur.

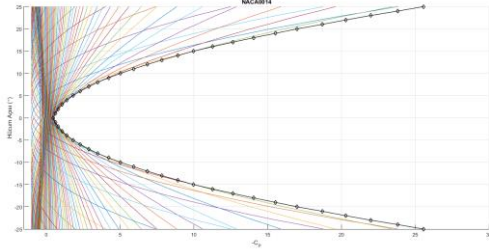
Herhangi bir kesite ait kavitasyon zarf eğrisi elde etmek için geometri farklı hücum açıları için çizdirilir ve her bir hücum açısı için basınç dağılımı bulunur. Kesit üzerinde seçilen noktalar üzerinde oluşan basınç değerleri farklı hücum açıları için çizdirildiğinde zarf eğrisi elde edilir. Örnek olarak NACA0014'ün üst yüzeyinde giriş uca göre yerleri verilen beş nokta için eğriler Şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 2. NACA0014 üzerindeki beş nokta için basınç değerleri

Her bir eğri bir noktayı temsil etmektedir. Nokta sayısı artırıldığında (101 nokta) Şekil 3'teki örümcek ağı desenine benzeyen grafik elde edilmiştir. Grafikteki

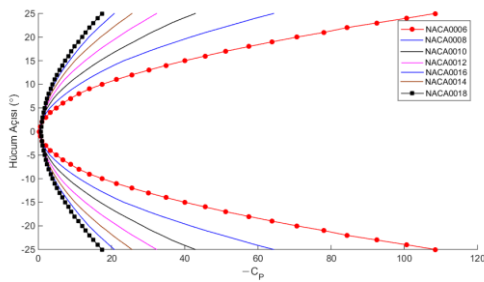
her bir hücum açısına denk gelen minimum basınç değeri belirlenip, bu noktalardan eğri geçirildiğinde zarf eğrisi elde edilmiş olur. Zarf eğrisi içinde kalan bölgede çalışan kesit üzerinde kavitasyon meydana gelmez.



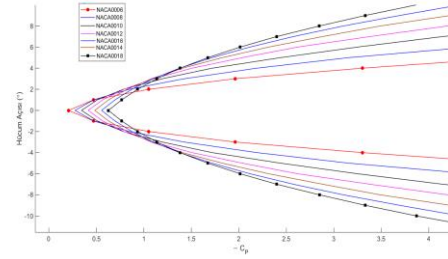
Şekil 3. NACA0014 kesitine ait kavitasyon kovası

3.1.1. Kalınlık Etkisi

Bu bölümde NACA0006, NACA0008, NACA0010, NACA0012, NACA0014, NACA0016 ve NACA0018 kesitlerine ait olan zarf eğrileri Şekil 4 ve Şekil 5'te 'de gösterilmiştir. Bu uygulamanın amacı, hidrofoil kesitine ait maksimum kalınlık oranı değişiminin kavitasyona olan etkisinin incelenmesidir.



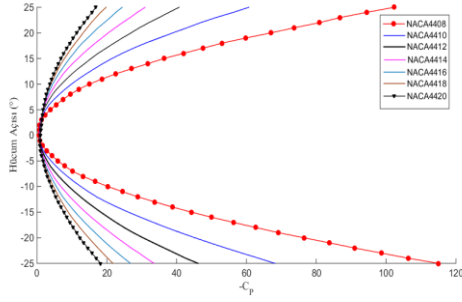
Şekil 4. Kaviteasyon başlangıç durumu için kalınlık oranı değişiminin simetrik kesitlerin zarf eğrilerine etkisi.



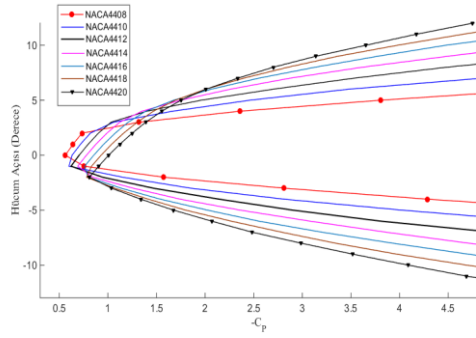
Şekil 5. Kaviteasyon başlangıç durumu için kalınlık oranı değişiminin simetrik kesitlerin zarf eğrilerine etkisi ($-C_p$ değeri 0 ile 4 arasında).

Şekil 4 ve Şekil 5 'ten görüleceği üzere, kalınlığın kavitasyona etkisi hidrofoilin çalışacağı σ değerine göre değişmektedir. İncelenen durum için σ değeri 1'den büyük olduğunda, kalınlık arttıkça zarf eğrisi genişlemekte ve kavitasyon riski azalmaktadır. σ 'nin değeri 1'den küçük olduğu durumda ise kalınlık arttıkça kavitasyon riski artmaktadır. Bundan dolayı düşük kavitasyon sayısında çalışan sistemlerde ince kesitlerin seçilmesi uygun olabilmektedir. Kesitin düşük kavitasyon sayısında çalışabilmesi, fiziksel olarak sistemin (geometrinin) yüksek hızlar için uygun olduğu anlamına gelir.

İkinci olarak simetrik olmayan aynı sehim oranı ve sehim yeri oranına sahip kesitlerin kalınlık oranı değiştirilerek elde edilen geometrilerin zarf eğrileri karşılaştırılmıştır. Bu uygulama için ise NACA4406, NACA4408, NACA4410, NACA4412, NACA4414, NNACA4416 ve NACA4418 geometrileri incelenmiştir. Şekil 6'da gösterilen grafiğin $-C_p$ değeri 0 ile 4.5 aralığında olan kısmı yeniden çizdirildiğinde, Şekil 7 elde edilmiştir.



Şekil 6. Kaviteasyon başlangıç durumu için kalınlık oranı değişiminin simetrik olmayan kesitlerin zarf eğrilerine etkisi.



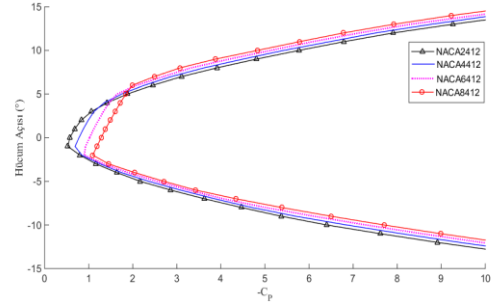
Şekil 7. Kaviteasyon başlangıç durumu için kalınlık oranı değişiminin simetrik olmayan kesitlerin zarf eğrilerine etkisi (- C_p değeri 0 ile 4.5 arasında).

Şekil 6 ve Şekil 7’den görüleceği üzere, simetrik olmayan kesitler için kaviteasyon üzerindeki kalınlık etkisi simetrik olan kesitler için elde edilen etkinin aynısıdır. Kalınlık oranının artması belirli bir σ değerinden sonra kaviteasyon riskini azaltmaktadır.

3.1.2. Sehım Oranının Etkisi

Maksimum sehım yeri ve kalınlık oranı sabit tutulup, sehım oranı değiştirilerek elde edilen NACA2412, NACA4412, NACA6412 ve NACA8412 kesitlerinin zarf eğrileri Şekil 8’de verilmiştir. Pozitif hücüm açılarında zarf eğrisi sırasıyla NACA2412, NACA4412, NACA6412, NACA8412 olarak genişlemektedir.

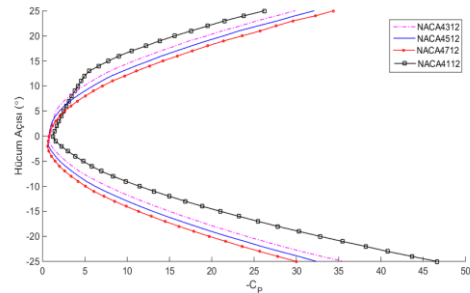
Pozitif hücüm açıları için, sehım oranının artması, kaviteasyon riskini azaltıcı bir etki yapmaktadır. Negatif hücüm açılarında ise sehım oranının artması kaviteasyon riskinin artması anlamına gelir.



Şekil 8. Kaviteasyon başlangıç durumu için sehım oranı değişiminin zarf eğrilerine etkisi.

3.1.3. Maksimum Sehım Yerinin Etkisi

Bu uygulamada, NACA4112, NACA4312, NACA4512 ve NACA4712 kesitleri incelenmiştir. Elde edilen zarf eğrileri Şekil 9’de gösterilmiştir.



Şekil 9: Kaviteasyon başlangıç durumu için maksimum sehım yeri oranı değişiminin zarf eğrilerine etkisi.

Şekil 9’dan görüleceği üzere, negatif hücüm açılarında çalışan sistemlerde (sualtı akıntı türbini gibi) ya da başka bir deyişle akımın pozitif basınç bölgesi (alt yüzeyi, “face”) ile karşılandığı durumlarda, maksimum sehımın çıkış kenarına yaklaşması kaviteasyon riskini

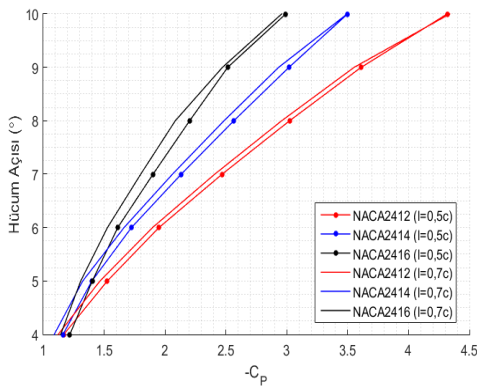
azaltmaktadır. Pozitif hücum açıları için ise (pervane gibi) maksimum sehimin giriş kenara yakın olması kavitasyon riskini azaltmaktadır.

3.2. Kısmi Kavitasyon Durumu İçin Analizler

Kavitasyon başlangıç durumu için yukarıda ele alınan tüm durumlar kısmi kavitasyon durumu için yeniden incelenmiştir. Kısmi kavitasyon durumundaki basınç dağılımı PCPAN programı ile hesaplanmış ve zarf eğrileri çizdirilmiştir. PCPAN sonuçları ile iki ve üç boyutlu hidrofoiller için yapılan deney sonuçları karşılaştırılmış ve birbirleri ile uyumlu olduğu görülmüştür. PCPAN ile deney sonuçlarının karşılaştırıldığı grafikler için (Kinnas ve Fine, 1993)'e başvurulabilir.

3.2.1. Kalınlık Etkisi

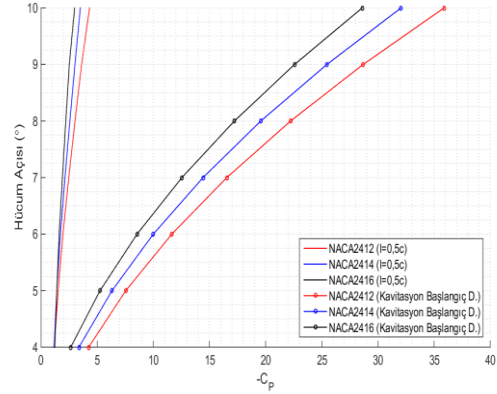
Çalışmanın bu bölümünde kısmi kavitasyon için kavite boyu, giriş boyunun 0.5 ve 0.7 katı olduğu iki durum hesaplanmış ($l=0.5c$ ve $0.7c$) ve birbirleri ile karşılaştırılmıştır (Şekil 10).



Şekil 10. Kısmi kavitasyon durumu için kalınlık oranı değişiminin zarf eğrilerine etkisi ($l=0.5c$ ve $l=0.7c$ için).

Kısmi kavitasyon durumu için kalınlık oranı etkisi incelendiğinde kavitasyon

başlangıç durumu ile aynı sonuç elde edilmiştir. Yani, kalınlık arttıkça kavitasyon oluşma riski azalmaktadır. Şekil 11'de kavitasyon başlangıç durumu ile kısmi kavitasyon durumu $l=0.5c$ için hazırlanan eğriler karşılaştırılmıştır.



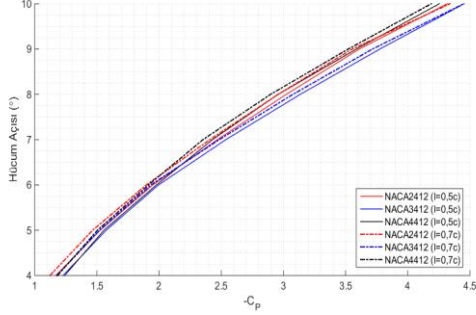
Şekil 11. Kısmi kavitasyon durumu için kalınlık oranı değişiminin zarf eğrilerine etkisi ($l=0.5c$ ve kavitasyon başlangıç durumu).

Kısmi kavitasyon durumunun incelendiği bölümde elde edilen eğrilerin iç kısmı belirtilen kavitasyon boyu için güvenli bölgedir. Örneğin $0.5c$ için elde edilen eğrinin iç kısmında, boyu $0.5c$ olan kavite oluşmayacağı söylenebilir. Diğer bir deyişle zarf eğrisinin iç kısmı $l=0.5c$ durumu için güvenli bölgedir. Fakat daha kısa boylu kavite oluşup oluşmayacağı hakkında kesin bir şey söylenemez. Bunun için kavite boyu arttıkça eğrilerin genişlemesi beklenir. Tüm durumlarda için $l=0.7c$ eğrilerinin $l=0.5c$ eğrilerinden daha geniş olacağı söylenebilir.

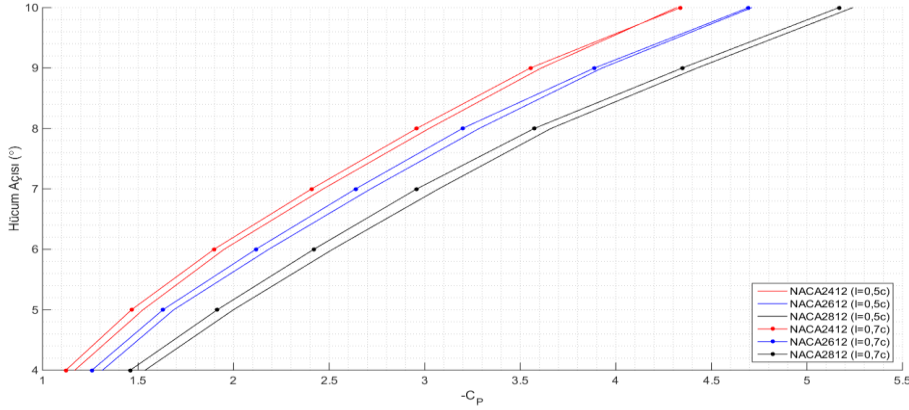
3.2.2. Sehım Oranının Etkisi

NACA2412, NACA3412 ve NACA4412 geometrileri kavitasyon boyu $0.5c$ ve $0.7c$

durumu için incelenmiş ve kaviteasyon zarf eğrileri Şekil 12’de verilmiştir.



Şekil 12. Kısmi kaviteasyon durumu için sehim oranı değişiminin zarf eğrilerine etkisi ($l=0.5c$ ve $l=0.7c$).



Şekil 13. Kısmi kaviteasyon durumu için maksimum sehim yeri oranı değişiminin zarf eğrilerine etkisi ($l=0.5c$ ve $l=0.7c$).

Zarf eğrileri sırasıyla NACA2812, NACA2612 ve NACA2412 için genişlemektedir. Yani pozitif hücüm açılarında maksimum sehimin çıkış kenarına yaklaşması kaviteasyon riskini azaltmaktadır.

3.3. Bir Sualtı Türbin Kesitinin İncelenmesi

Çalışmada ayrıca bir sualtı akıntı türbinine ait S184 kesiti kaviteasyon başlangıç durumu için incelenmiştir. S184 kesitine ait geometri (Uşar, 2015) numaralı kaynaktan alınmıştır. Bu geometri 20 nokta için oluşturulmuştur. Sonucun daha

Şekil 12’ye göre σ ’nin 2’den büyük olduğu durumda NACA4412 kesitinde kaviteasyon oluşma riski NACA3412’ye göre daha azdır.

3.2.3. Maksimum Sehim Yerinin Etkisi

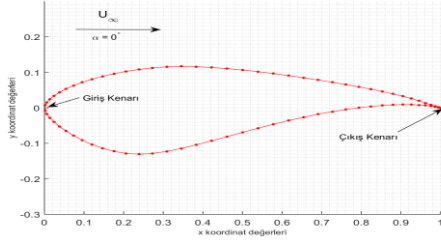
NACA2412, NACA2612 ve NACA2812 kesit geometrileri kaviteasyon boyu $0.5c$ ve $0.7c$ durumu için incelenmiş ve kaviteasyon zarf eğrileri Şekil 13’de verilmiştir.

hızlı yakınsaması için giriş kenarına ve çıkış kenarına yakın bölgelere daha sık panel atılması gerekmektedir. Bu panel yerleşimi kosinüs dağılımı ile sağlanmıştır. Kosinüs dağılımına ait formülasyon Denklem 3-1 ve Denklem 3-2’de verilmiştir (Katz ve Plotkin, 2001).

$$\nabla\beta = \pi / N \quad (3-1)$$

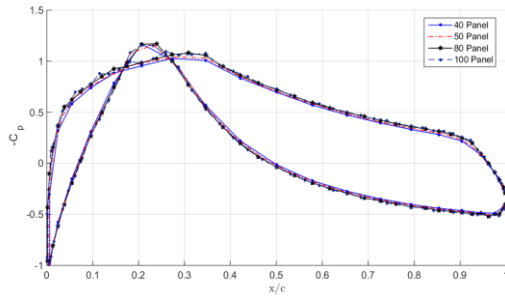
$$x = \frac{c}{2}(1 - \cos \beta) \quad (3-2)$$

Yukarıdaki denklemlerde; c giriş boyunu, N ise panel sayısını göstermektedir. Nokta sayısı interpolasyon ile artırılıp kosinüs dağılımı ile yeni noktaların koordinatları hesaplanmıştır. Hesaplanan yeni noktalar (81 nokta) ile çizilen S184 geometrisi Şekil 14’te verilmiştir.



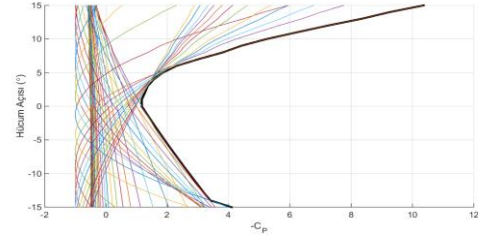
Şekil 14. Su altı türbin kesiti (S184)

S184 kesiti üzerinde oluşan basınç dağılımı sabit kaynak dipol yöntemi ile farklı panel sayıları için bulunup karşılaştırılmıştır (Şekil 15). 80 adet panel için yapılan çözüm yeterli olduğundan bundan sonra S184 kesiti için yapılacak tüm hesaplamalarda panel sayısı 80 olarak alınmıştır.



Şekil 15. S184 için farklı panel sayıları için basınç dağılımı ($\alpha=0^\circ$ için).

S184 geometrisi için +15 ve -15 hücum açısı aralığında basınç dağılımı bulunup zarf eğrisi elde edilmiştir (Şekil 16).



Şekil 16. Su altı türbin kesitine (S184) ait kavitasyon başlangıç durumu için zarf eğrisi.

Su altı türbinlerinin çalışma prensibi pervanelerden farklıdır. Pervanelerde akım kesitin negatif basınç tarafı ile karşılaşırken su altı türbinlerinde pozitif basınç tarafı ile karşılaşılır. Bu nedenle negatif hücum açılarındaki kavitasyon sayısı değerleri daha önemlidir. Şekil 16’daki grafikte negatif hücum açıları için kavitasyon zarf eğrisinde güvenli bölge alanı daha büyüktür. Dolayısıyla mevcut hidrofoil (kesiti) su altı türbini çalışma prensibine uygun düşmektedir.

4. Sonuçlar ve Değerlendirmeler

Hidrofoil dizaynında, pompa ve türbin kanatları tasarımında kavitasyon riskini belirlemek için kavitasyon zarf eğrileri kullanılabilir. Pervane kesitine ait en küçük boyutsuz basınç katsayısı her bir hücum açısı için eşleştirilerek elde edilen bu diyagramlar sayesinde hangi koşullar altında hangi bölgede kavitasyonun başlayacağı tahmin edilebilir. Bu çalışmada pervane dizaynında sıklıkla kullanılan NACA kesitlerine ait geometrik parametreler sistematik olarak değiştirilerek bu parametrelerin kavitasyona olan etkileri incelenmiştir. Kavitasyon başlangıç durumu ve kısmi kavitasyon durumları ayrı ayrı hesaplanmış ve birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Yapılan analizler sonucunda elde edilen bulgular sırasıyla aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Kavitasyon başlangıç durumu için simetrik ve simetrik olmayan kesitlerin kalınlık oranları değiştirilerek zarf eğrileri çıkarılmıştır. Hidrofoil maksimum kalınlık oranının kavitasyona etkisi çalışılan $-C_p$ değerine göre değişmektedir. İncelenen durum için $-C_p$ değeri 1'den büyük olduğu durumda kalınlık arttıkça zarf eğrisi genişlemekte yani kavitasyon riski azalmaktadır. $-C_p$ 'nin 1 değerinden küçük olduğu durumda ise kalınlık arttıkça kavitasyon riski artar.
- İnce kesitler düşük kavitasyon sayılarında çalışabilmektedir. Düşük kavitasyon sayılarında çalışabilmek, fiziksel olarak kesitin yüksek hızlarda çalışabileceği anlamına gelir. Ayrıca zarf eğrisi genişledikçe kesitin kavitasyon riski olmadan çalışabileceği hücum açısı aralığı da artmaktadır.
- Kısmi kavitasyon durumu için kalınlık oranı etkisi incelendiğinde kavitasyon başlangıç durumu ile benzer sonuçlar elde edilmiştir. Kalınlık etkisi çalışılan $-C_p$ değerine bağlı olarak değişmektedir.
- Kavitasyon başlangıç durumunda, pozitif hücum açısı bölgesinde, sehim oranı arttıkça zarf eğrisi genişlemektedir. Fakat negatif hücum açıları için sehim oranı arttıkça zarf eğrisi daralmaktadır. Pozitif açılarda çalışacak (akımı negatif basınç tarafı ile karşılayacak) kesitler için sehim oranının artması kavitasyon riskini azaltır. Fakat negatif hücum açılarındaki çalışacak kesitler için sehim oranının artması kavitasyon açısından istenmeyen bir durumdur.
- Kavitasyon başlangıç durumu için, pozitif açılarda çalışan veya akımın negatif basınç bölgesi (üst yüzey) ile karşılandığı durumlarda maksimum sehimin giriş kenarına yaklaşması kavitasyon riskini azaltan bir durumdur. Negatif hücum açılarındaki çalışan kesitler

için ise maksimum sehimin çıkış kenarına yakın olması istenmektedir.

- Kısmi kavitasyon durumu için ise pozitif hücum açılarındaki maksimum sehimin, kesitin giriş ucuna yaklaşması kavitasyon riskini azaltır.

• Kısmi kavitasyon durumu için farklı kavitasyon boyu için incelenmiştir. ($l/c=0.5$ ve $l/c=0.7$) Elde edilen sonuçlar iki durum için aynı özellikleri taşımaktadır. İncelenen tüm durumlarda $l/c=0.7$ eğrisi, $l/c=0.5$ eğrisinden daha geniştir. Kavitasyon boyu arttıkça oluşturulan eğri genişlemektedir.

- Kısmi kavitasyon durumunda elde edilen grafiklerin y eksenini $+4^\circ$ 'den başlamaktadır. Bunun nedeni $+4^\circ$ 'den küçük değerler için verilen özellikte kavite oluşmamasıdır.

Mevcut çalışma süper kavitasyon durumuna kolaylıkla genişletilebilir. Ayrıca bir regresyon analizi uygulanarak zarf eğrileri için ampirik formüller elde edilebilir. Yapılan bu çalışma yukarıda ifade edilen çalışmalar için bir temel oluşturmaktadır.

5. Kaynakça

- Brennen, C., E., (2013). *Cavitation and Bubble Dynamics*.
- Uşar, D., (2015). Sualtı Akıntı Türbinlerinin Hidrodinamik Analizi, Doktora Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Molland, A., F., Turnock, S., R., (2011). *Marine Rudders and Control Surfaces: Principles, Data, Design and Applications*.
- Franc, P., (2006). *Fundamentals of Cavitation*. (Michel, Eds.), Kluwer Academic Publishers.
- Tulin, M., 1953. Steady two-dimensional cavity flows about slender bodies. DTMB Technical Report N. 834.
- Geurst, J., Timman, R., 1956. Linearized theory of two-dimensional cavitation flow around a wing

- section, Proceeding of the IX International Congress of Applied Mechanics.
- Newman, J., N., (1977). *Marine Hydrodynamics*. MIT Press.
- Uhlman Jr, J., S., (1987). The Surface Singularity Method Applied to Partially Cavitating Hydrofoils, *J. Sh. Res.*, 31, 2:107-124.
- Kinnas, S., A., (1991). Leading-Edge Corrections to the Linear-Theory of Partially Cavitating Hydrofoils, *J. Sh. Res.*, 35, 1: 15–27.
- Kinnas, S., A., Fine, N., E., 1990. Non-linear Analysis of Flow Around Partially or Super-Cavitating Hydrofoils by a Potential Based Panel, Proceeding the IABEM-90 Symposium.
- Kinnas, S., A., Fine, N., E., (1993). A numerical nonlinear analysis of the flow around two- and three-dimensional partially cavitating hydrofoils, *Journal of Fluid Mechanics*, 254, 11:151.
- Bal, Ş., (1999). A Panel Method for the Potential Flow Around 2-D Hydrofoils, *Tr. J. Eng. Environ. Sci.*, (TÜBİTAK), 349–361.
- Dang, J., Kuiper, G., (1999). Re-entrant jet modeling of partial cavity flow on two-dimensional hydrofoils, *J. Fluids Eng.*.
- Celik, F., Arıkan Ozden, Y., Bal, S., (2014). Numerical simulation of flow around two- and three-dimensional partially cavitating hydrofoils, *Ocean Eng.*, 78: 22–34.
- Carlton, J., (2012). *Marine Propellers and Propulsion*. Butterworth-Heinemann.
- Anderson, J., D., (2011). *Fundamentals of Aerodynamics*. McGraw-Hill.
- Seber, S., Ekinci, S., Bal, Ş., (2012). Numerical Calculation of Cavitation Buckets For 2-D Hydrofoils, *Sigma Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, 30: 266-280.
- Ekinci, S., (2007). Gemi Pervane Yüzeyinde Tabaka Kavıtasyonunun Sayısal Olarak İncelenmesi, Doktora Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Kinnas, S., A., (1999). *Fundamentals of Cavity Flows*, Austin.
- Karaaliğlı, M., S., (2015). Hidrofoillerin Kavıtasyon Kovalarının Sayısal-Parametrik İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Uşar, D., Bal, Ş., (2015). Cavitation simulation on horizontal axis marine current turbines, *Renew. Energy*, 80: 15–25.
- Katz, J., Plotkin, A., (2001). *Low-Speed Aerodynamics*. Cambridge University Press.
- Kinnas, S., A., Fine, N., E., MIT-PCPAN and MIT-SPAN (Partially cavitating and super cavitating 2-D panel methods) User's Manual, Version 1.0.