

Sayısal bir yöntem ile podlu pervane analizi

Şakir BAL^{1*}, Mesut GÜNER²

¹İTÜ Gemi İnşaatı ve Gemi Makinaları Mühendisliği Bölümü, 34469, Ayazağa, İstanbul

²YTÜ Gemi İnşaatı ve Gemi Makinaları Mühendisliği Bölümü, 34349, Beşiktaş, İstanbul

Özet

Bu çalışmada, podlu pervane birimlerinin (pervane + eksenel simetrik “pod” + “taşıyıcı eleman”) etrafındaki akımın sayısal analizi yapılmış ve podlu pervane performans karakteristikleri incelenmiştir. Temel amaç, podlu pervanelerin performans analizini yapan sayısal bir yöntem geliştirmektir. Ayrıca, pod ve taşıyıcı elemanların, hem beraber hem de ayrı ayrı pervane üzerindeki etkilerinin ve podlu pervane birimi üzerine gelen kuvvetlerin ve torkların sayısal olarak hesaplanması amaçlanmıştır. Bunun için, podlu pervane birimi etrafındaki akım üç bölgeye ayrılmıştır: 1) Eksenel simetrik pod bölgesi, 2) Taşıyıcı Eleman bölgesi ve 3) Pervane kanatları bölgesi. Pod ve taşıyıcı eleman bir panel yöntemiyle (BEM, Boundary Element Method) modellenirken pervane kanatları etrafındaki akım alanı ve kanatlara gelen kuvvetler bir girdap-ağ yöntemiyle (Vortex-Lattice Method) hesaplanmıştır. Panel yöntemi uygulanırken pod ve taşıyıcı eleman dörtgen (ve/veya üçgen) panelere bölünerek herbir panel üzerinde sabit şiddetli kaynak ve duble (dipol) dağılımı olduğu düşünülmüştür. Pervane kanatları girdap-ağ tekniği ile modellenirken de kanatlar üzerinde hem kaynak hem de girdap dağılımı yapılmıştır. Pod ve taşıyıcı elemanların pervane kanatları üzerindeki ya da pervane kanatlarının pod ve taşıyıcı eleman üzerindeki etkileri iteratif bir şekilde, bu iki yöntem kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu önerilen iteratif sayısal yöntemin doğruluk ve duyarlılığını test edebilmek için, literatürde verilen diğer sayısal ve deneysel çalışmalarla yöntem karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar, literatürde verilen diğer sayısal ve deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Yine, pod açısının sonuçlar üzerindeki etkileri de tartışılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Podlu pervane, girdap-ağ tekniği, iteratif sınır elemanları yöntemi.

*Yazışmaların yapılacağı yazar: Şakir BAL. sbal@itu.edu.tr; Tel: (212) 285 64 85.

Makale metni 03.06.2008 tarihinde dergiye ulaşılmış, 25.11.2008 tarihinde basım kararı alınmıştır. Makale ile ilgili tartışmalar 31.07.2009 tarihine kadar dergiye gönderilmelidir. Bu makale, İTÜ Bilimsel Araştırma Projeleri birimi tarafından kısmi olarak desteklenmiştir.

Analysis of podded propulsors by a numerical method

Extended abstract

In this study, the flow around the pod unit (propeller+axisymmetric pod+taşıyıcı eleman) are analysed and the performance characteristics of the propeller on the pod are investigated. The main objective of the present work is to establish a numerical method for the prediction of performance of podded propeller. The flow domain around the podded propeller is mainly divided into three parts; i) the axisymmetric pod part, ii) the strut part and iii) the propeller part. While the pod and strut parts are modelled by a low-order boundary element method (BEM), the propeller is represented by a vortex lattice method (VLM).

A vortex lattice (lifting surface) method is developed and used to calculate the propulsive performance and induced velocities due to propeller blades. This model is based on appropriate vortex and source-sink distribution. The singularities are distributed on the mean lines of the propeller blade sections. Those vortices are divided into two parts; bound and trailing vortices. The bound vortices, located in a radial direction, are to simulate the load distribution on the propeller blade. The trailing vortices are placed in the direction of the flow, obtained from the different intensities of adjacent bound vortex elements. A number of source elements are taken at adjacent bound vortex to simulate the thickness of the blade. The vortex strengths are calculated by solving a set of simultaneous equations which satisfy the flow tangency condition at the blade control points. Induced velocities due to vortex elements of the lifting surface are calculated using Biot-Savart Law. Once the bound vortex elements intensity is solved, then the velocity induced by the propeller in any point in space can be computed using five angular position of the propeller blade. Finally, the arithmetic average of these five values becomes induced velocity at the corresponding point. During the calculation of induced velocities, nine (9) span-wise and twelve (12) chord-wise elements are taken into account while high number of elementary vortex lines (450) are located on the blade surface to discrete the blade.

The BEM, which is based on Green's Third Identity, allows the separation of axisymmetric pod and the

strut problems. Those two (axisymmetric pod and strut) sub-problems are solved separately, with the effects of one on the other being accounted for in an iterative manner. The integral equations (both for axisymmetric pod and strut) which are obtained from Green's Third Identity are discretized using quadrilateral panels. In order to achieve this, the axisymmetric pod surface and the strut surface are modelled with constant strength dipole and constant strength source panels. The discretized integral equations that form the linear algebraic equation systems can be solved for unknown potential values.

Coupling of the BEM and the VLM is, on the other hand, carried out in an iterative manner to incorporate the effect of the pod unit on the propeller, and vice versa. Initially, the VLM is applied for the propeller in the absence of pod and strut and calculates the perturbation velocities on the control points of pod unit (including strut). Then, the BEM is applied to the axisymmetric pod problem, including the effect of propeller and later, the BEM is used for the strut problem with the effects of propeller and axisymmetric pod. The induced velocities due to pod unit (pod + strut) at the propeller disk plane are calculated by corresponding BEMs and the VLM is re-applied to the propeller problem with the modified right hand side. All those sub-problems (axisymmetric pod + strut + propeller) interact with each other in terms of induced velocities and induced potential values and the right hand sides of BEMs and VLM are modified according to those induced velocities and induced potential values. The iterative steps between BEMs and VLM are repeated until the results are converged.

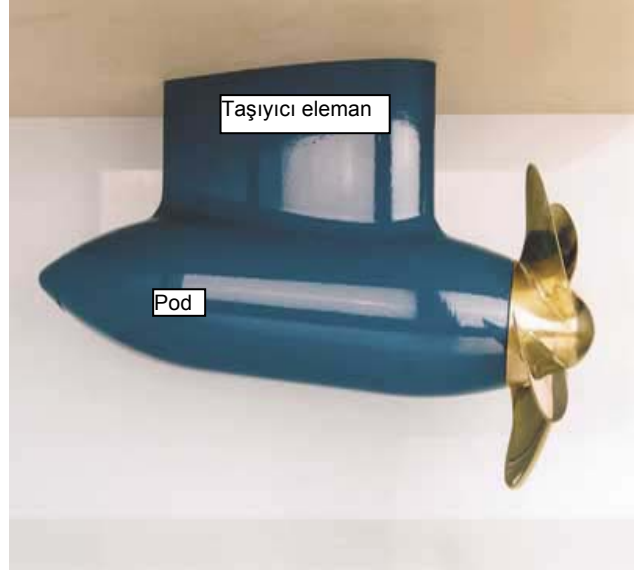
This iterative numerical method is applied to two different podded propellers to compare the results with those of experimental measurements and other numerical methods. It was found that the results by the present numerical method were in good agreement with those of experimental measurements and other numerical methods. The effect of pod unit on the propeller and vice versa are discussed for different type of podded propulsor with zero yaw angle and with a yaw angle. Some preliminary results on the effect of yaw angle on pressure distribution on pod and strut are shown in the paper as well.

Keywords: Podded propulsors, vortex-lattice technique, iterative boundary element method.

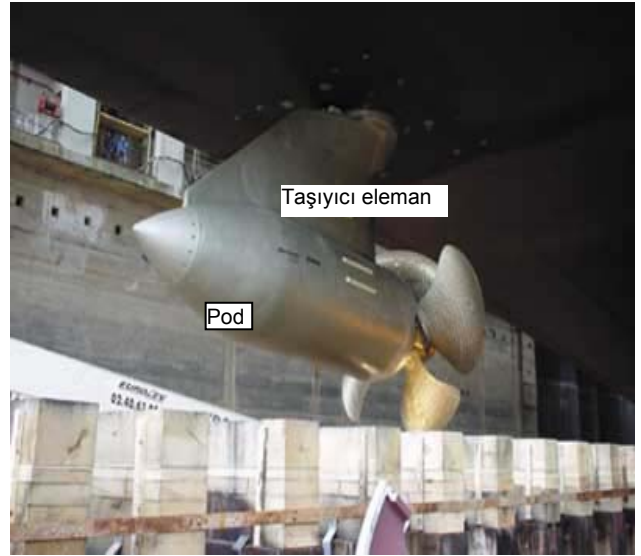
Giriş

Podlu pervane sevk sistemleri, geleneksel sevk sistemlerine alternatif olarak gelişmeye başlamıştır ve artan bir şekilde popüler olmaya devam etmektedir. Podlu pervane sevk sistemi, klasik olarak aksel simetrik bir “pod”, buna bağlı bir taşıyıcı eleman (strut) ve pervane kanatlarından oluşmaktadır. Şekil 1-3’de üç değişik podlu pervane resmi verilmiştir. Şekil 1’de önden çekişli (traktör tipi, pull type) bir model podlu pervanesi, Şekil 2’de geminin altına yerleştirilmiş yine önden çekişli, tam ölçekli (full scale) bir podlu pervane ve Şekil 3’de ise tam ölçekli, ikiz pervaneli ve yankanatçıklı (winglet) bir podlu pervane görülmektedir. Bu konudaki araştırmalar, çok büyük bir hızla ve değişik podlu pervane sevk sistemleri için hem deneysel hem de sayısal olarak artarak devam etmektedir. Çok yeni olarak, konuyla ilgili iki uluslararası konferans düzenlenmiştir ve bir üçüncüsünün düzenlenmesi gündemdedir (Atlas (ed.), 2004; Billard ve Atlas (ed.), 2006). Çok farklı podlu sevk sistemleri etrafındaki akımın karakteristiklerini inceleyen hem sayısal hem de deneysel yöntemler ve ilgili bazı sonuçlar, şu çok yeni çalışmalarda verilmiştir, (Mishra, 2005; Gupta, 2004; Kinnas (ed.), 2005; Bal, 2006; Bal, vd., 2006; Ghassemi ve Ghadimi, 2008). Yine, bir podlu pervane etrafındaki hız alanının LDV (Laser Doppler Anemometry) ile alınmış ölçüm sonuçları da (Atlas, vd., 2007)’de verilmiştir. Yalnız burada, pod açısı (yaw angle) sıfır derece olarak alınmıştır.

Podlu pervane model deneyleri esnasında gözönüne alınması gereken ölçek etkisi de Veikonheimo (2006)’da belirtilmiştir. Makalede, bu konudaki deneysel çalışmaların henüz tam olmadığı ve sürmesi gerektiği belirtilmekte ve ITTC (International Towing Tank Conference) organizasyonunun daha aktif olarak işin içine dahil olması gerektiği bildirilmektedir. Bu çalışmada ise, podlu pervane sevk sistemleri etrafındaki akım karakteristikleri (pod, taşıyıcı eleman (taşıyıcı eleman) ve kanatlar üzerindeki basınç dağılımı, itme, tork ve verim değerleri vs.) ve podlu biri min performansları iteratif sayısal bir yaklaşımla hesaplanmaktadır. Geçmişte, bir girdap-ağ yöntemi ile (vortex lattice



Şekil 1. Önden çekişli (Pull Type-Tractor Type) model podlu bir pervane



Şekil 2. Gemiye bağlanmış önden çekişli podlu bir pervane

method, VLM), düzgün olmayan bir gemi izi içerisinde çalışabilen gemi pervanesi etrafındaki daimi olmayan akım modellenebilmişti, (Kerwin ve Lee, 1978). Bu yöntem, daha sonra kavite karakteristikleri de hesaplara katılarak geniş-letilmişti, (Lee, 1979). Daha yakın bir zamanda ise, bu yöntem, hem kanat sırtında hem de kanat yüzünde kavite oluşumunun başlangıç noktasını çözümün bir parçası olarak hesaplayabilen bir yaklaşım eklenmiştir, (Kinnas vd., 1998). Özellikle, pervane kanat giriş ucu civarındaki



Şekil 3. Gemiye bağlanmış ikiz pervaneli ve yan kanatçıklı podlu bir pervane

viskoz etkiler ve yine, kavitasyon başlangıç noktalarının hesabı yarı ampirik bir yaklaşımla hesaplara dahil edilmişti, (Greeley ve Kerwin, 1982). Daha sonra, Szantyr, (Greely ve Kerwin, 1982)'deki yöntemle benzer bir model geliştirmiş ve buradaki kavitasyon tekniğini daha ileri bir düzeye taşımıştır, (Szantyr, 1994). Yakın zamanda, pervane performansı ve pervaneden dolayı indüklenmiş hızlar daha basit bir kaldırıcı hat yöntemi ile de hesaplanabilmektedir, (Çelik ve Güner, 2006). Mevcut çalışmada, pervane etrafındaki akımı modellemek ve indüklenmiş hızları hesaplayabilmek için Szantyr'ın yöntemine benzer bir girdap ağ yöntemi geliştirilmiş ve kullanılmıştır, (Szantyr, 1994).

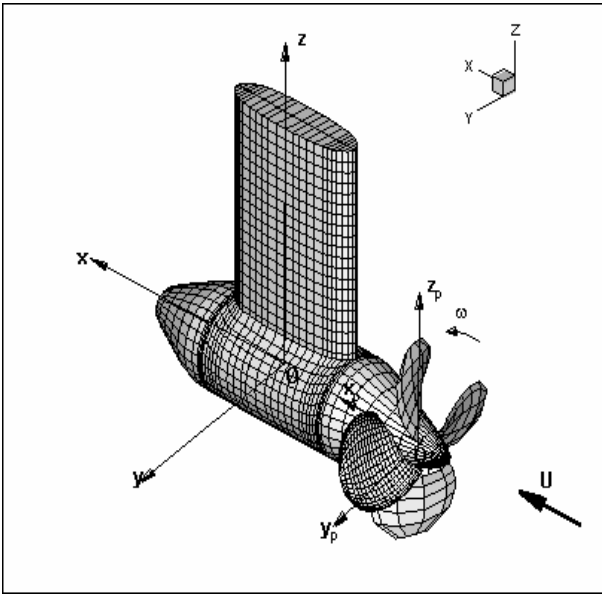
Diğer yandan, iteratif bir sınır elemanları yöntemi (boundary element method, BEM), pervaneli veya pervanesiz durumda eksenel simetrik pod ve taşıyıcı eleman etrafındaki akımı modelleyebilmek için kullanılmıştır. Green teoreminin kullanılması ile elde edilen temel integral denklemde pod ve taşıyıcı eleman problemleri ayrılabilir ve bu iki alt integral temel denklemler birbirleri üzerindeki etki iteratif olacak şekilde ayrı ayrı çözülebilir. Hem pod hem de taşıyıcı eleman için elde edilen integral denklemler pod ve taşıyıcı eleman üzerinde dörtgen paneller kullanılarak ayrıklaştırılabilir. Bunun için de, eksenel simetrik pod ve taşıyıcı eleman üzerinde

sabit şiddetli kaynak ve dipol dağılımlı panellerden faydalanılmıştır, (Kinnas ve Fine, 1993; Kinnas ve Hsin, 1992; Fine ve Kinnas, 1993). Bu ayrıklaştırılmış integral denklemleri, bilinmeyenler potansiyeller (dipole şiddetleri) olmak üzere lineer cebirsel bir denklem takımı oluştururlar ve bu cebirsel denklem takımı herhangi bir denklem çözücüyle çözülebilir.

Kullanılan VLM ile BEM arasındaki bağlantı ise iteratif olarak kurulmuştur. Öncelikle, VLM ile pod ve taşıyıcı eleman olmaksızın pervane etrafındaki akımın karakteristikleri çözülmüş ve pervane kanatlarından dolayı pod ve taşıyıcı eleman üzerinde indüklenen hız dağılımları bulunmuştur. Daha sonra, pod etrafındaki akım, pervane etkili olmak üzere, BEM ile çözülmüştür. Poddan dolayı pervane diski (düzlemi), izi (wake) üzerindeki hız dağılımı ve taşıyıcı eleman üzerindeki potansiyel dağılımı hesaplanmıştır. Daha sonra, taşıyıcı eleman etrafındaki akım, pervane ve pod etkili olarak BEM ile çözülmüş ve pervane diski üzerindeki hızlar ve pod üzerindeki potansiyel dağılımı elde edilmiştir. Pervane diski üzerinde pod ve taşıyıcı elemandan dolayı indüklenen hızlar toplanarak VLM ile pervane tekrar çözülmüştür. Benzer işlemler, pod ve taşıyıcı eleman için de tekrarlanarak yakınsamış çözüme bakılmıştır. Her bir iteratif adımda, denklemlerin yalnızca sağ tarafları değişmektedir. Katsayılar matrisi hem VLM hem de BEM'ler için aynı kalmaktadır. Bu iteratif sayısal yöntem iki farklı tipte podlu birime uygulanmış ve elde edilen sonuçlar deneysel sonuçlarla ve diğer sayısal sonuçlarla karşılaştırmalı olarak verilmiştir, (Szantyr, 2001; Islam, vd., 2004; Islam, vd., 2006). Özellikle pratik uygulamalar açısından, deneysel sonuçlarla ve diğer sayısal bir sonuçla, mevcut yöntemin sonuçlarının (itme katsayısı, tork katsayısı, verim ifadesi gibi) yeterli bir uyum içinde olduğu görülmüştür, (Bal vd., 2006). Pervane kanatlarının pod ve taşıyıcı eleman üzerindeki ve pod ve taşıyıcı elemanın pervane kanatları üzerindeki etkileri incelenmiştir. Yine, podun taşıyıcı eleman ve taşıyıcı elemanın pod üzerindeki etkileri de incelenmiştir. Ayrıca, pod açısı (yaw angle) hesaplara katılarak sonuçlar üzerindeki etkileri de tartışılmış ve bu konudaki bazı ilk sonuçlar verilmiştir.

Matematik formülasyon ve çözüm teknikleri

Öncelikle, podu bağı sabit bir koordinat sistemi ($Oxyz$) ve pervaneye bağı kanatlarla beraber dönen bağı koordinat sistemi ($Ox_p y_p z_p$) tanımlanmıştır. Şekil 4’de podlu pervane için tanımlanan bu koordinat sistemleri ve kullanılan notasyon gösterilmiştir. Buna göre, sabit koordinat sisteminde, x eksenine gelen akım doğrultusunda, z eksenine taşıyıcı elemana doğru, y eksenine de sağ el kuralını tamamlayacak şekilde tanımlanmıştır. Hareketli koordinat sistemi de buna uygun olarak tanımlanmıştır.



Şekil 4. Podlu pervane üzerindeki koordinat sistemlerinin tanımlanması

Podlu birim etrafındaki akım sıkıştırılmaz, viskoz olmayan ve döngüsüz (irrotational) bir akım ile modellenmiştir. Podlu birim üç kısma bölünmüştür: 1-) VLM ile modellenip çözülen pervane kanatları kısmı 2-) BEM ile modellenip çözülen pod kısmı ve 3-) yine BEM ile modellenip çözülen taşıyıcı eleman kısmı. Aşağıda, bu modelleme ve çözüm teknikleri sırasıyla açıklanmıştır.

VLM ile pervane kanatları etrafındaki akımın modellenmesi ve çözümü

Szantyr’ın yöntemine benzer olarak bir kaldırıcı yüzey yöntemi pervane kanatlarının performansını elde edebilmek ve pervaneden dolayı indük-

lenmiş hızları hesaplamak için kullanılmıştır, (Szantyr, 1994). Bu yöntem, pervane kanatları üzerinde uygun girdap ve kaynak-kuyu dağılımını esas alır. Tekillikler, pervane kanat kesitlerindeki ortalama sehim (camber) hattı boyunca dağıtılır. Girdaplar, bağı ve serbest izler kenar girdaplara olmak üzere ikiye ayrılırlar. Radyal yönde yerleştirilen bağı girdaplar kanat üzerindeki yüklem (sirkülasyon) dağılımını temsil ederler. Serbest izler kenar girdapları ise akım yönünde yerleştirilir ve şiddetleri komşu bağı girdapların şiddetlerinden hesaplanır. Dolayısıyla, serbest izler kenar girdapları yeni bilinmeyenler üretmez. Dağıtılan kaynak elemanları ise her kesitteki kanat kalınlığını temsil eder. Dağıtılan girdap ve kaynak şiddetleri cisim üzerindeki kinematik cisim şartının belirli kontrol noktalarında sağlanması ile hesaplanabilir. Girdap elemanlarından dolayı indüklenen hız dağılımı Biot-Savart kanunu ile aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$\vec{V}_\Gamma = \frac{\Gamma}{4\pi} \frac{\vec{L} \times \vec{R}}{R^3} \quad (1)$$

Burada, \vec{V}_Γ : indüklenmiş hız, Γ : sirkülasyon, \vec{L} : boyundaki girdap elemanı, \vec{R} : girdap elemanı ile hızın bulunmak istendiği nokta arasındaki mesafe’dir. Benzer olarak kaynak elemanlarının indükleyeceği hız dağılımı da bulunabilir, (Katz ve Plotkin, 2001). Elde edilen denklem takımı çözümlenip bilinmeyen bağı girdap ve kaynak elemanlarının şiddetleri hesaplanırsa, kanat üzerindeki ve dışındaki herhangi bir noktada hız dağılımı bulunabilir. Hesaplar sırasında radyal doğrultuda 9 adet ve kesit boyunca 12 adet olmak üzere toplam bir kanat için 108 eleman kullanılmıştır.

BEM ile pod ve taşıyıcı eleman etrafındaki akımın modellenmesi ve çözümü

Düzgün (uniform) akıma maruz aksel simetrik pod ve taşıyıcı eleman etrafındaki akım, pervanenin olmadığı durumda BEM ile çözülebilir. Pod ve taşıyıcı eleman etrafındaki akım için aşağıdaki yaklaşım yapılabilir:

$$\vec{V} = \vec{U}(x, y, z) + \nabla\phi(x, y, z) \quad (2)$$

Burada, \vec{V} akımdaki toplam hız, \vec{U} gelen düzgün akımın hızı ve $\nabla\phi$ pertürbasyon hızıdır. Pertürbasyon potansiyeli, akış alanı içerisinde Laplace denklemini sağlamalıdır:

$$\nabla^2\phi = 0 \quad (3)$$

Gelen akım aksenal simetrik olduğu için, mevcut yöntemde izin etkisinin hesaplara dahil edilmesine gerek yoktur. Dolayısıyla, Green teoreminin pod ve taşıyıcı eleman üzerinde uygulanması ile aşağıdaki denklem yazılabilir:

$$2\pi\phi_p = \int_{S_{\text{Pod}} + S_{\text{Str}}} \left[\phi_q \frac{\partial G(p; q)}{\partial n} - G(p; q) \frac{\partial \phi_q}{\partial n} \right] dS \quad (4)$$

Burada, p pod ve taşıyıcı eleman üzerindeki kontrol noktaları ve q ise tekilliklerin bulunduğu kontrol noktalarıdır. $G(p; q) = 1/R(p; q)$ ise Green fonksiyonudur. $R(p; q)$, p ve q noktaları arasındaki mesafe ve n ise cismin yüzeyinden akışkana doğru yönlendirilmiş birim normal vektördür. S_{Pod} ve S_{Str} , pod ve taşıyıcı eleman yüzeylerini göstermektedir. Yukarıdaki 4 numaralı integral denklem pod ve taşıyıcı eleman yüzeyleri üzerinde sabit şiddetli dipole ve kaynak dağılımları yapılarak ayrık hale getirilebilir. Yine, pod ve taşıyıcı eleman yüzeylerinde kinematik cisim şartı da sağlanmalıdır. Kinematik cisim şartının uygulanması ile kaynak şiddetleri, $\frac{\partial \phi_q}{\partial n}$, gelen akımın hızı cinsinden aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\frac{\partial \phi_q}{\partial n} = -\vec{U} \cdot \vec{n} \quad (5)$$

Burada, n yukarıda belirtildiği üzere cisimden akışkana yönlendirilmiş birim normal vektördür. Ayrıca, taşıyıcı eleman çıkış ucunda (izler kenarında) Kutta şartı sağlanmalıdır. Yani, hız burada sonlu olmalıdır:

$$\nabla\phi = \text{sonlu} \quad (\text{izler kenarda}) \quad (6)$$

Kutta şartı, Morino'nun uyguladığı koşula benzer olarak kullanılabilir, (Kinnas ve Hsin, 1992;

Morino ve Kuo, 1974). Ancak bu çalışmada, Kutta şartı, pod açısının (yaw angle) sıfır olduğu durumlarda kullanılmamıştır (gerek kalmamıştır). Ancak, Morino'nun Kutta şartı açılı durumda hesaplara dahil edilmiştir. Açılı durumda, aşağıda bazı ilk sonuçlar verilmiş ve pod açısının sonuçlar üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bu konuda Green fonksiyonunun ve ilgili sayısal yöntemin ayrıntılı yakınsaklık analizleri (Katz ve Plotkin, 2001; Kinnas and Hsin, 1992)'de verilmiştir. Burada tekrardan kaçınmak için ayrıntılara girilmemiştir.

BEM ve VLM arasında bağlantının kurulması

Pod ve taşıyıcı eleman yüzeyleri üzerinde uygulanan BEM ile pervane kanatlarında uygulanan VLM arasındaki bağlantı, indüklenmiş potansiyeller ve indüklenmiş hızlar aracılığı ile kurulmaktadır. Pod ve taşıyıcı eleman pervaneyi indüklenmiş hızlar aracılığı ile yine pervane, pod ve taşıyıcı elemanı indüklenmiş hızlar aracılığı ile etkilerken, pod ve taşıyıcı eleman aralarındaki indüklenmiş potansiyeller aracılığı ile bağlantı kurmaktadır. Dolayısıyla, problem iteratif olarak çözülmektedir. Bu iteratif çözüm tekniğinde, öncelikle, VLM pervane etrafındaki akımı modellemek ve çözmek için kullanılmıştır. Çözüm sonrasında kanatlar ve iz üzerindeki tekillik şiddetleri hesaplanmaktadır. Daha sonra, pod ve taşıyıcı eleman kontrol noktaları üzerindeki pervane dolayısıyla indüklenmiş hızlar bulunmaktadır. İkinci adım olarak pod problemi, BEM ile pervane kanat etkisi gözönüne alınarak çözülmekte ve hemen ardından pervane disk düzlemi üzerinde pod tarafından indüklenmiş hızlar ve taşıyıcı eleman üzerinde de pod tarafından indüklenmiş potansiyeller hesaplanmaktadır. Taşıyıcı eleman problemi, yine BEM ile bu etkiler altında çözülür ve ardından taşıyıcı eleman tarafından pervane diski üzerinde indüklenmiş hızlar ve pod kontrol noktalarında indüklenmiş potansiyeller bulunur. Pervane etrafındaki akım bu etkiler altında VLM ile tekrar, pod ve taşıyıcı eleman problemleri de benzer olarak BEM ile tekrar çözülürler. Bu işlemin sonuçları yakınsayınca kadar pervane-pod-taşıyıcı eleman arasındaki iteratif adımlar tekrar edilir. Yukarıdaki (4) numaralı denklem pervaneden dolayı indüklenmiş hızlar ve taşıyıcı elemandan

dolayı indüklenmiş potansiyellerden dolayı pod üzerinde şöyle yazılabilir:

$$2\pi\phi_p = \int_{S_{pod}} \left[\phi_q \frac{\partial G(\mathbf{p}; \mathbf{q})}{\partial n} + G(\mathbf{p}; \mathbf{q})(\bar{U} + \bar{u}_{pr}) \cdot \bar{n} \right] dS + 4\pi\phi_{str} \quad (7)$$

Benzer olarak, (4) numaralı denklem, taşıyıcı eleman için, pervane ve pod etkili durumda şu şekilde verilebilir:

$$2\pi\phi_p = \int_{S_{str}} \left[\phi_q \frac{\partial G(\mathbf{p}; \mathbf{q})}{\partial n} + G(\mathbf{p}; \mathbf{q})(\bar{U} + \bar{u}_{pr}) \cdot \bar{n} \right] dS + 4\pi\phi_{pod} \quad (8)$$

Burada, u_{pr} pod ve taşıyıcı eleman kontrol noktaları üzerinde pervanenin indüklediği hız değerleridir. ϕ_{str} ise pod üzerinde taşıyıcı eleman tarafından indüklenmiş, ϕ_{pod} ise, taşıyıcı eleman üzerinde pod tarafından indüklenmiş potansiyel değerleridir. Şimdiki adım, pod ve taşıyıcı eleman tarafından pervane disk düzlemi üzerinde indüklenmiş hızların hesaplanmasıdır. VLM, bu etkilerle tekrar çözülür ve pod ve taşıyıcı eleman üzerinde pervaneden dolayı indüklenmiş hızlar bulunur. Bu iterasyon süreci, sonuçlar yakınsayana kadar devam ettirilir. Bu iteratif yöntemin akış diyagramı (Bal ve Güner, 2009)'da verilmiştir.

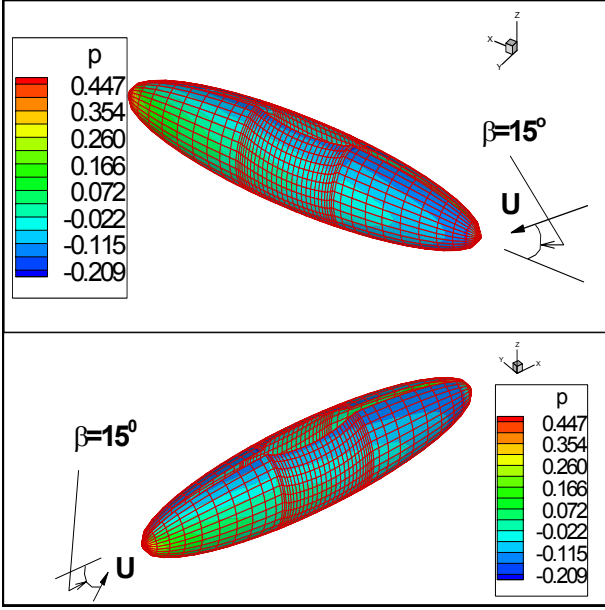
Sayısal sonuçlar

Mevcut iteratif yöntemin sonuçlarını, deneysel sonuçlarla ve bir diğer sayısal yöntemin sonuçları ile mukayese edebilmek için iki farklı önden çekişli podlu birim gözönüne alınmıştır. Önden çekişli (pull type) podlu pervanede (Şekil 1 ve Şekil 2'de gösterildiği gibi) pervane kanatları taşıyıcı eleman'ın önüne yerleştirilmektedir. Arkadan itişli (push type) bunun tam tersidir. İlk olarak yöntem, Szantyr'ın podlu pervanesine uygulanmıştır. Bu pervanenin geometrik karakteristikleri ve sayısal sonuçları (Mishra, 2005; Szantyr, 2001; Hsin vd., 2002) çalışmalarında ayrıntılarıyla verilmiştir. Mevcut yöntemin, bu yöntemlerle karşılaştırmalı sonuçları ise ayrıntılı

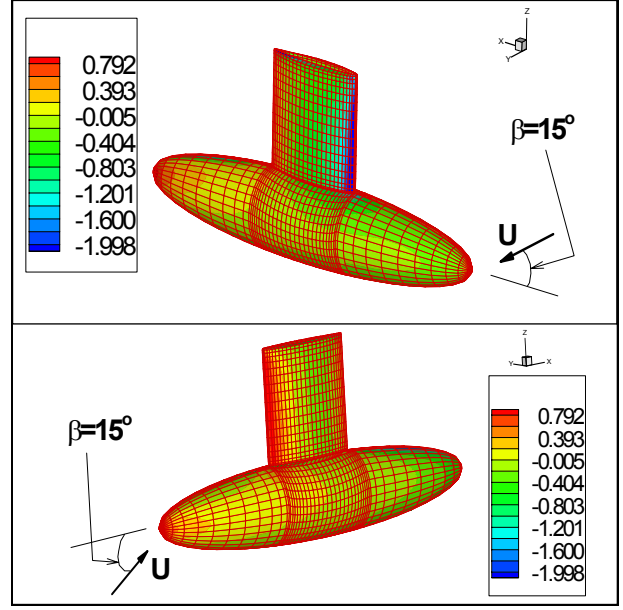
olarak (Bal vd., 2006)'da verilmiştir. Dolayısıyla burada tekrar edilmemiştir. Yalnızca, bu poda ait açılı durumda ($\beta=15^\circ$) bazı ilk sonuçlar bu çalışmaya eklenmiştir. Daha sonra farklı bir tip önden çekişli pod seçilerek sonuçlar ayrıntılı olarak karşılaştırılmıştır, (Islam vd., 2006; Islam vd., 2004). Bu pod için, pod açısı, karşılaştırma açısından ilk aşamada sıfır derece seçilmiştir. Aşağıda, bu sonuçlar da deneysel sonuçlarla karşılaştırmalı olarak tartışılmıştır.

Pod 1: Pod-Taşıyıcı eleman problemi

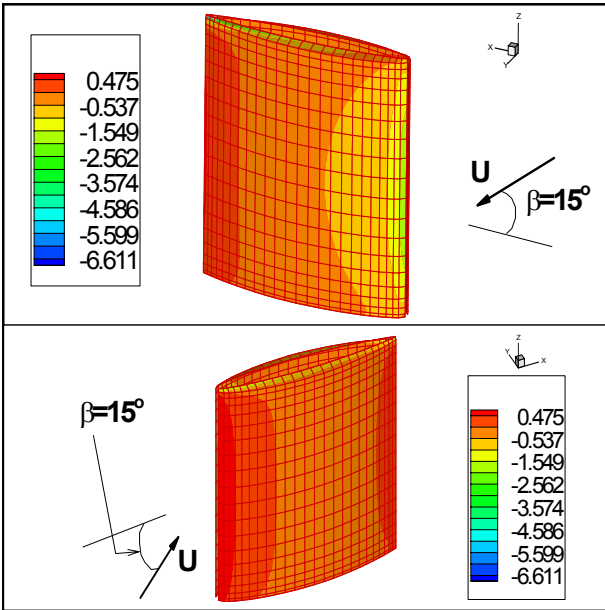
Bu kısımda, pervane kanatları olmaksızın, pod ve taşıyıcı eleman problemleri ayrı ayrı ve iteratif yöntemle çözülmüştür. Pod ve taşıyıcı eleman yüzeyleri, indükledikleri potansiyeller cinsinden birbirini etkilemektedir. Bütün hesaplarda pervane yarıçapı (R) birim alınarak pod ve taşıyıcı eleman geometrisi oluşturulmuştur. Podun giriş ucu ile taşıyıcı eleman'ın giriş ucu arasında x yönünde 12 adet panel, taşıyıcı eleman giriş boyunca (chord line) pod üzerinde 26, taşıyıcı eleman çıkış ucu ile pod çıkış ucu arasında 12 ve teğetsel yönde 30 adet olmak üzere toplam 1500 adet pod üzerinde panel kullanılmıştır. Taşıyıcı eleman için de giriş boyunca 26 ve açıklık (span) boyunca 40 adet olmak üzere toplam 1040 adet panel kullanılmıştır. Pod açısı $\beta=0^\circ$ için ayrıntılı karşılaştırmalı sonuçlar (Bal vd., 2006)'da verilmiştir. Burada, öncelikle, pod açısı $\beta=15^\circ$ yapılarak pod ve taşıyıcı eleman üzerindeki eş basınç eğrilerine bakılmıştır. Şekil 5'de podun üzerinde taşıyıcı eleman etkisiz (sonsuz akış ortamında) iki farklı taraftan bakışta hesaplanan boyutsuz eş basınç eğrileri ve Şekil 6'da taşıyıcı elemanın üzerinde pod etkisiz (sonsuz akış ortamında) yine iki farklı taraftan bakışta hesaplanan boyutsuz eş basınç eğrileri verilmiştir. Açının etkisi çok net biçimde görülmektedir. Ayrıca, Şekil 7 ise, açılı durumda ve pod ve taşıyıcı elemanın birbirleri üzerindeki etkileri de gözönüne alınarak, yine, iki farklı bakış açısından, pod ve taşıyıcı eleman üzerindeki boyutsuz eş basınç eğrileri verilmiştir. Taşıyıcı elemanın negatif basınç tarafında açıdan ve poddan dolayı akımın hızlandığı ve yine pod üzerinde de taşıyıcı elemana yakın bölgede (taşıyıcı eleman negatif basınç tarafında) akımın görece olarak hızlandığı görülebilir.



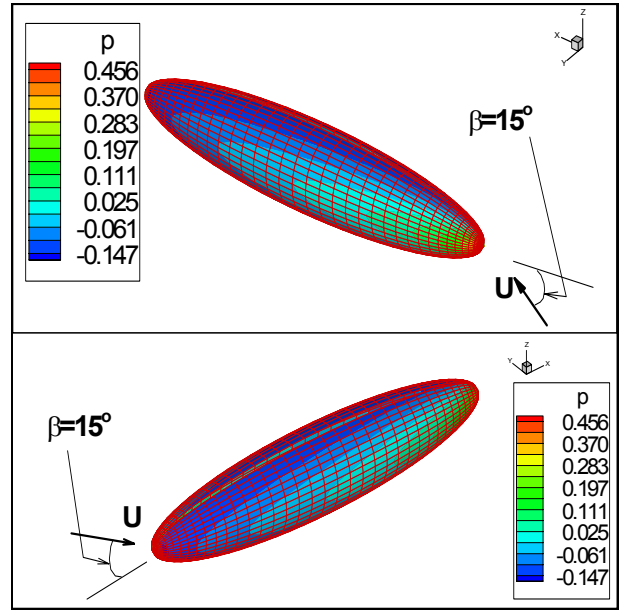
Şekil 5. Açılı durumda ($\beta=15^\circ$) taşıyıcı eleman etkisiz pod üzerinde eş basınç eğrileri



Şekil 7. Açılı durumda ($\beta=15^\circ$) pod ve taşıyıcı eleman üzerinde eş basınç eğrileri



Şekil 6. Açılı durumda ($\beta=15^\circ$) pod etkisiz taşıyıcı eleman üzerinde eş basınç eğrileri



Şekil 8. Açılı durumda ($\beta=15^\circ$) pervane etkisiz pod üzerinde boyutsuz eş basınç eğrileri

Pod 1: Pod-pervane problemi

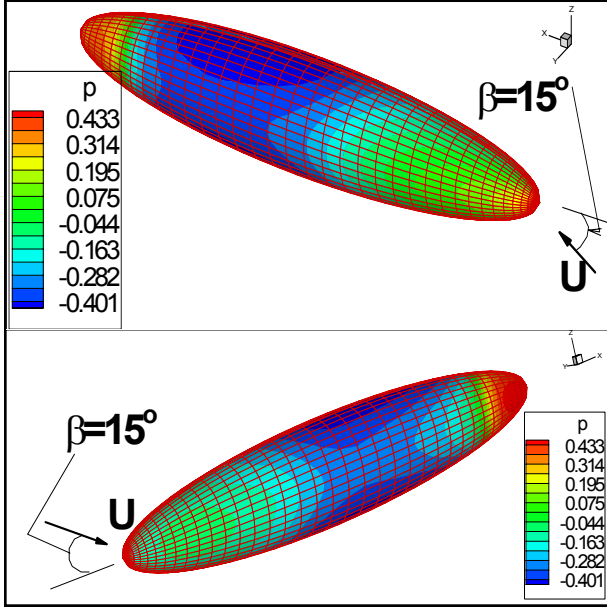
Yine, pod açısı $\beta=0^\circ$ için ayrıntılı karşılaştırmalı sonuçlar (Bal vd., 2006)'da verilmiştir. Bu sonuçlar burada tekrar edilmemiştir. Bu kısımda, poda açı verilerek, pervanesiz ve pervaneli ($J=0.5$) halde pod üzerindeki boyutsuz eş basınç eğrileri Şekil 8 ve Şekil 9'da gösterilmiştir. Bu şekillerden de anlaşılacağı üzere, podun hemen

önünde pervanenin emme ve arkasında ise basınç etkileri çok etkindir.

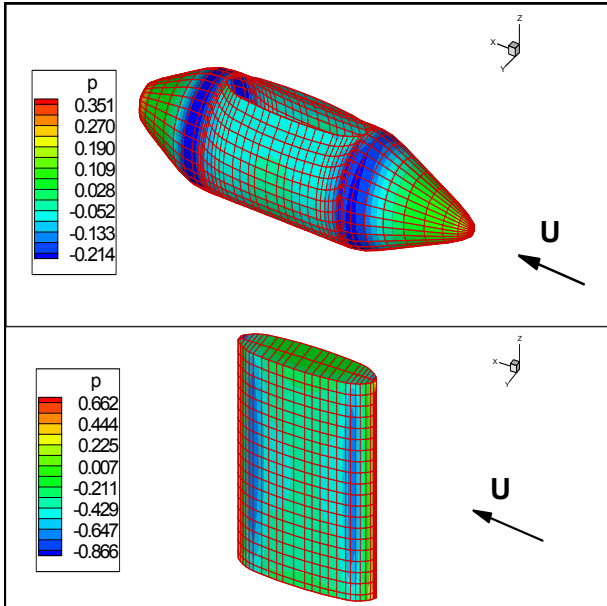
Pod 2: Pod-taşıyıcı eleman problemi

Daha önce, yukarıda belirtildiği gibi diğer bir podlu birim seçilmiş ve Pod 1'e uygulanan yöntem kullanılmıştır. Öncelikle, pod ve taşıyıcı eleman problemleri, pervane etkisi olmadan

BEM ile çözülmüşlerdir. Pod ve taşıyıcı eleman birbirlerini indükledikleri potansiyeller cinsinden etkilemektedir. Pod açısı 0° alınmıştır. Şekil 10'da pod ve taşıyıcı eleman arasında etkileşim olmadan (sonsuz akış ortamında) pod ve taşıyıcı eleman üzerindeki eş basınç eğrileri gösterilmiştir.

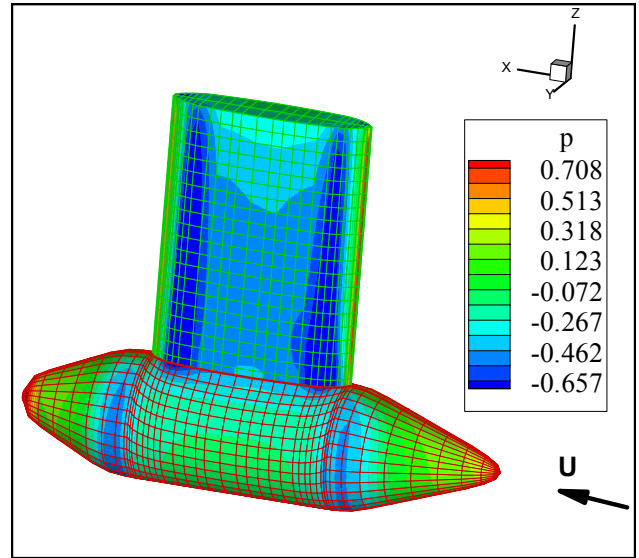


Şekil 9. Açılı durumda ($\beta=15^\circ$) pervane etkili ($J=0.5$) pod üzerindeki boyutsuz eş basınç eğrileri



Şekil 10. Pod üzerinde taşıyıcı eleman etkisiz (üst) ve taşıyıcı eleman üzerinde pod etkisiz (alt) eş basınç eğrileri ($\beta=0^\circ$)

Pervane yarıçapı birim alınmış, ve pod ve taşıyıcı eleman geometrileri yarıçapa göre boyutsuzlaştırılmıştır. Pod üzerinde x eksenini boyunca kullanılan panel sayısı 45, teğetsel yönde kullanılan panel sayısı 30 olmak üzere toplam 1350 panel kullanılmıştır. Taşıyıcı eleman üzerinde ise 25 adet giriş boyunca ve 42 adet açıklık boyunca olmak üzere 1050 adet panel alınmıştır. Daha sonra pod ve taşıyıcı eleman arasındaki etkileşim gözönüne alınmış ve Şekil 11'de, bu durumda, pod ve taşıyıcı eleman üzerindeki eş basınç eğrileri verilmiştir. Podun taşıyıcı eleman üzerinde, taşıyıcı elemanın da pod üzerindeki akımı özellikle pod-taşıyıcı eleman kesim hattı civarında hızlandırdığı rahatlıkla görülebilir. Pod giriş ucu ile taşıyıcı eleman giriş ucu arasında, pod üzerinde x boyunca 10 adet, taşıyıcı eleman girişi boyunca 25 adet ve taşıyıcı eleman çıkış ucu ile pod çıkış ucu arasında da 10 adet olmak üzere pod üzerinde $(45 \times 30) = 1350$ adet panel (30 adet teğetsel yönde olmak üzere) ve taşıyıcı eleman üzerinde de toplam $(25 \times 42) = 1050$ adet panel (25 adet giriş boyunca, 42 adet açıklık boyunca) kullanılmıştır.

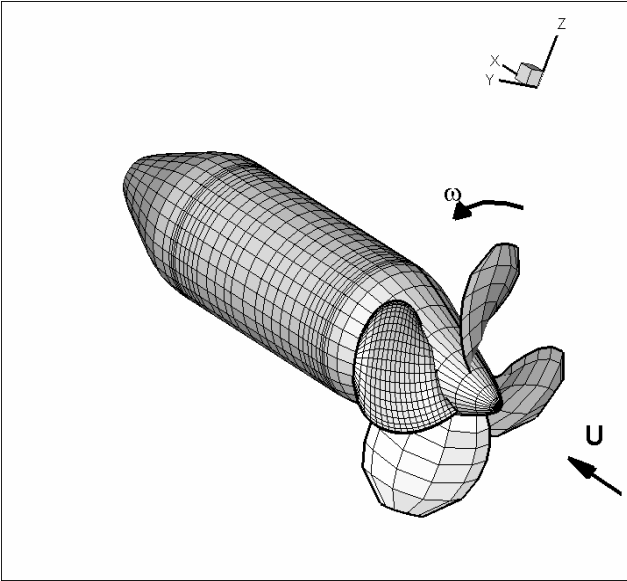


Şekil 11. Pervane etkisiz pod ve taşıyıcı eleman üzerindeki eş basınç eğrileri ($\beta=0^\circ$)

Pod 2: Pod-pervane problemi

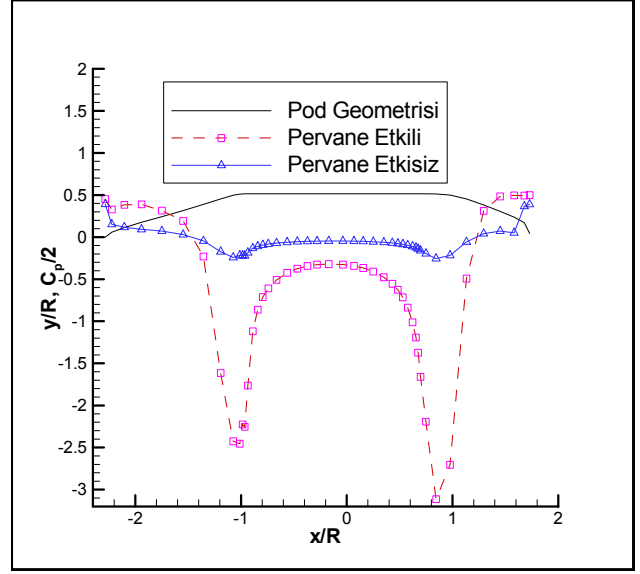
Bu kısımda, taşıyıcı eleman olmaksızın pervane ve pod arasındaki ilişki gözönüne alınmıştır. Şekil 12'da pod ve pervane kanatları üzerindeki örnek bir panelleme durumu gösterilmiştir.

Aşağıdaki hesaplarda, pod üzerinde x boyunca 45 adet ve teğetsel olarak 30 adet olmak üzere toplam 1350 adet panel kullanılmıştır. Yine, pervane kanatlarında kiriş boyunca 12 adet ve açıklık boyunca 9 adet olmak üzere toplam 108 adet eleman kullanılmıştır. Şekil 13'de, pod üzerinde herhangi bir dilim için (pod ve pervane etrafındaki akım aksenal simetrik olduğu için bütün dilimlerde değerler aynı olacaktır) pervane etkili ($J=0.5$) ve pervane etkisiz boyutsuz basınç dağılımı verilmiştir. Pervanenin podun hemen önündeki ve arkasındaki akımı çok büyük oranlarda hızlandırdığı açık olarak görülebilmektedir. Ayrıca, pod geometrisi de Şekil 13'e eklenmiştir. Benzer olarak, pervane etkili ve etkisiz boyutsuz eş basınç eğrileri de Şekil 14'de verilmiştir. Pod üzerinde, özellikle taşıyıcı elemanın giriş ve çıkış ucu civarında, akımın çok büyük oranda hızlandığı (bu da negatif basınç değerlerini arttırmaktadır) rahatlıkla görülebilir.

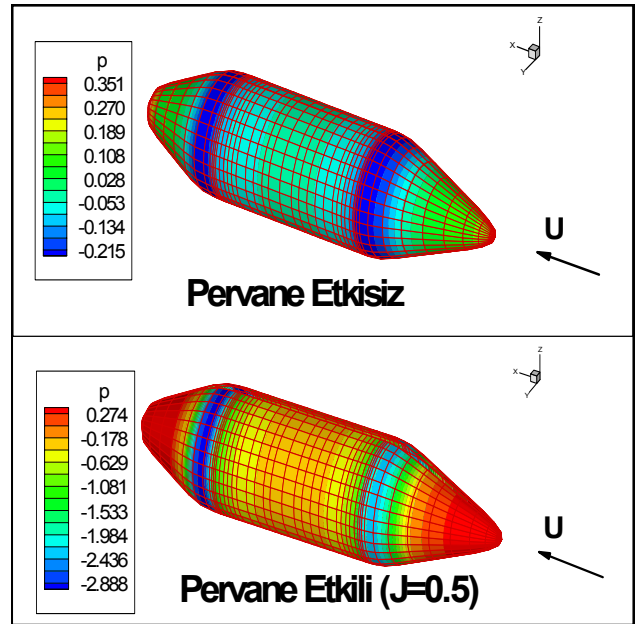


Şekil 12. Pod ve pervane kanatları üzerindeki paneller

Yine, pervane kanadında, Şekil 15'de $r/R=0.6$ kesitinde ve Şekil 16'da da $r/R=0.345$ kesitlerindeki boyutsuz basınç dağılımı pod etkili ve etkisiz olarak verilmiştir. Pod ve pervane etrafındaki akımın aksenal simetrik özelliğinden dolayı, bütün kanat açılarında aynı kesitte basınç dağılımı aynı olacaktır. Pervane ilerleme katsayısı $J=0.5$ olarak seçilmiştir.



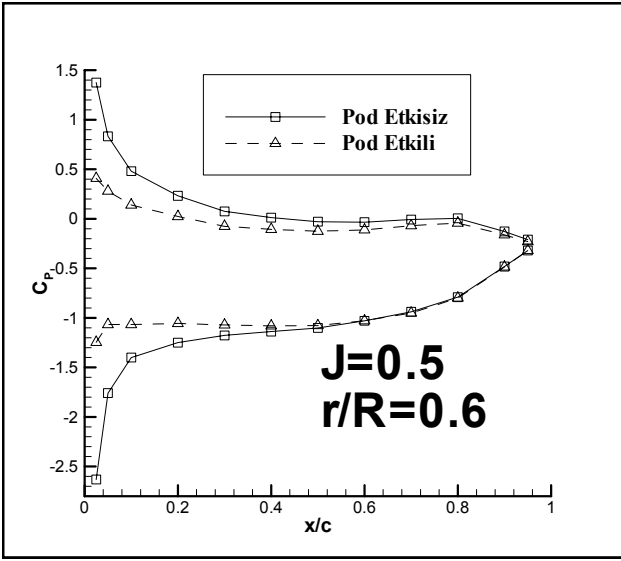
Şekil 13. Pod üzerinde herhangi bir dilim için pervane etkili ($J=0.5$) ve etkisiz boyutsuz basınç dağılımı ($\beta=0^\circ$)



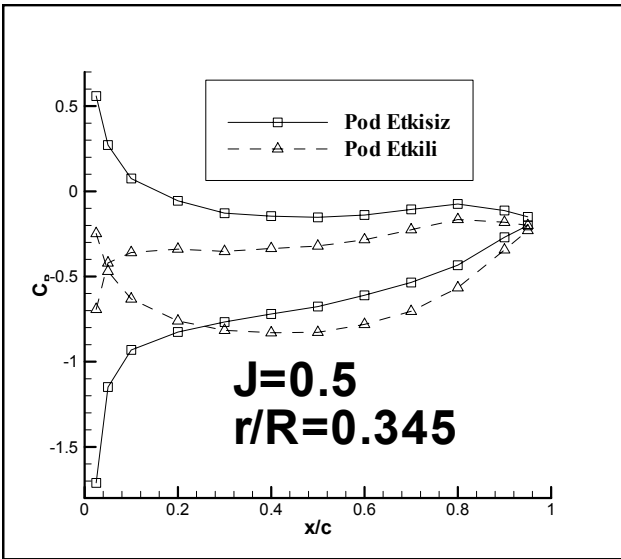
Şekil 14. Pod üzerinde pervane etkili ($J=0.5$) ve etkisiz eş basınç eğrileri ($\beta=0^\circ$)

Anlaşılabacağı üzere, bu durumda pod bu ilgili pervane kesitlerinde basınç farkını düşürmektedir. Bu da boyutsuz itme değerinin düşeceği anlamına gelir. Şekil 17'de podlu durumda pervanenin itme, tork ve verim ifadeleri (K_T , K_Q , η) deneysel sonuçlarla karşılaştırmalı olarak verilmiştir, (Islam vd., 2006). Dikkat edilirse, deneysel sonuçlarla mevcut yöntemin sonuçları ara-

sındaki uyumun pratik uygulamalar için yeterli olduğu söylenebilir. Şekil 18’de ise, mevcut yöntemle elde edilen boyutsuz itme ve tork katsayılarının, iterasyon adımları ile değişimi gösterilmiştir. Burada $J=0.5$ ’dir. İterasyon numarası 0 ise pervanenin açık su değerlerine karşı gelmektedir. Dolayısıyla, podun bu durumda pervane boyutsuz itme ve tork katsayılarını düşürdüğü söylenebilir. Bu da, Şekil 15 ve Şekil 16’daki durumla uyum içindedir. Ayrıca, Şekil 18’den yakınsaklığın 4. adımda sağlandığı da görülebilir.



Şekil 15. Pervane kanadı $r/R=0.6$ kesitinde pod etkili ve etkisiz basınç dağılımı ($J=0.5$)



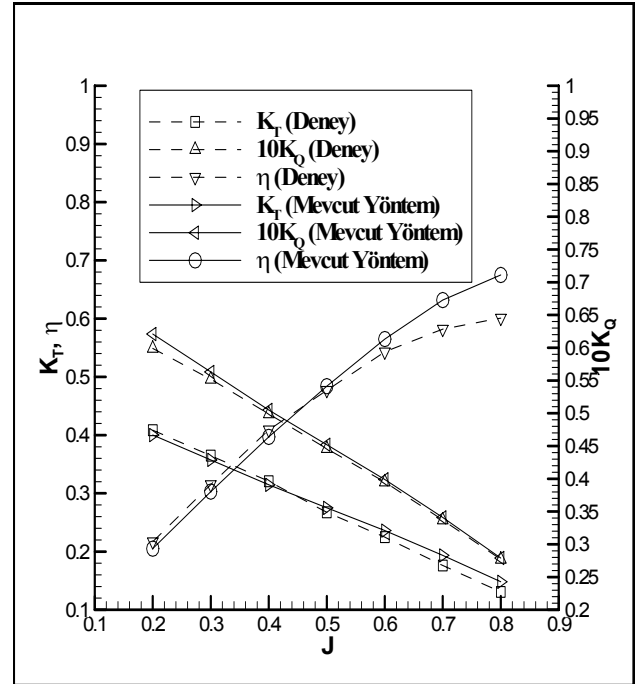
Şekil 16. Pervane kanadı $r/R=0.345$ kesitinde pod etkili ve etkisiz basınç dağılımı ($J=0.5$)

Pod 2

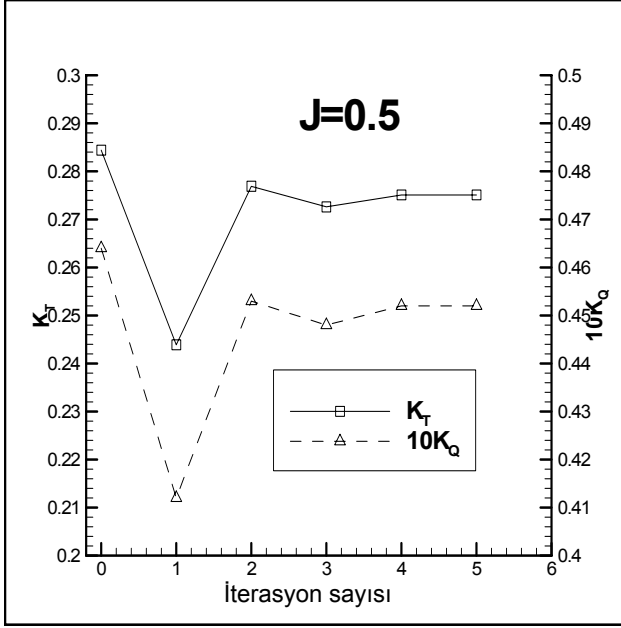
Pod-taşıyıcı eleman-pervane problemi

Bu kısımda, pod, taşıyıcı eleman ve pervane arasındaki ilişki gözönüne alınmıştır. Pod açısı (yaw angle, β) 0° olarak alınmıştır. Pod üzerinde, pod giriş ucu ile taşıyıcı eleman giriş ucu arasında, x boyunca 10 adet, taşıyıcı eleman girişi boyunca 25 adet ve taşıyıcı eleman çıkış ucu ile pod çıkış ucu arasında da 10 adet olmak üzere toplam $(45 \cdot 30)=1350$ adet panel (30 adet teğetsel yönde olmak üzere) ve taşıyıcı eleman üzerinde de toplam $(25 \cdot 42)=1050$ adet panel (25 adet giriş boyunca, 42 adet açıklık boyunca) kullanılmıştır. Pervane kanatlarında ise giriş boyunca 12 adet ve açıklık boyunca 9 adet olmak üzere toplam 108 adet eleman kullanılmıştır. Şekil 19’da $J=0.2$ için ve Şekil 20’de $J=0.5$ için pod ve taşıyıcı eleman üzerindeki boyutsuz eş basınç eğrileri verilmiştir. Şekil 19’da pervanenin, Şekil 20’deki duruma göre baskın etkisi (pod ve taşıyıcı eleman üzerinde hızları artırma oranı) çok açıktır. Yine, Şekil 21’de, deneysel sonuçlarla karşılaştırmalı olarak pervanenin boyutsuz itme, tork ve verim ifadeleri verilmiştir.

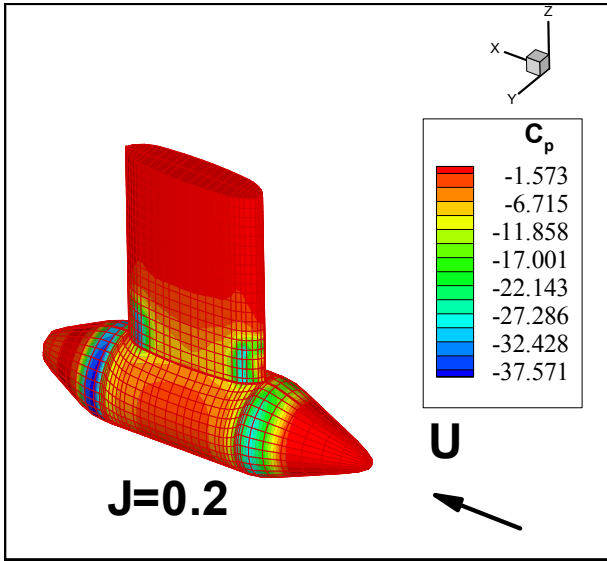
Sonuçların pratik uygulamalar açısından yeterli bir uyum içinde olduğu söylenebilir.



Şekil 17. Deneysel sonuçlarıyla karşılaştırmalı olarak pervanenin itme, tork ve verim değerleri



Şekil 18. İterasyon adımlarıyla pervane itme ve tork katsayılarının yakınsaklık analizi

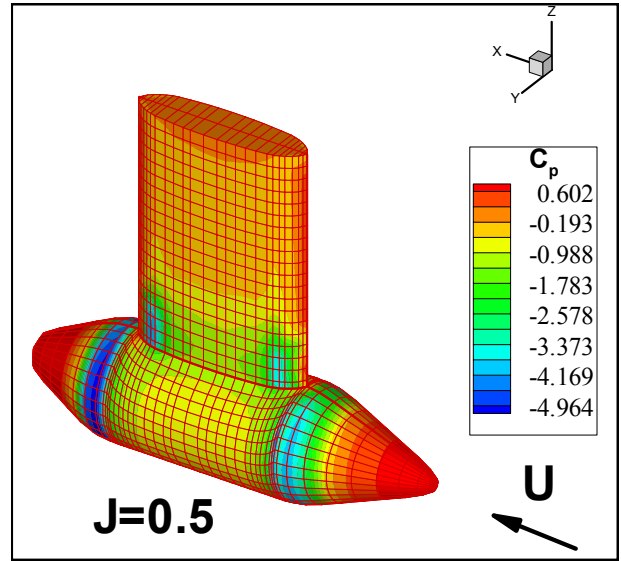


Şekil 19. Pervane etkili (J=0.2) pod ve taşıyıcı eleman üzerinde eş basınç eğrileri ($\beta=0^\circ$)

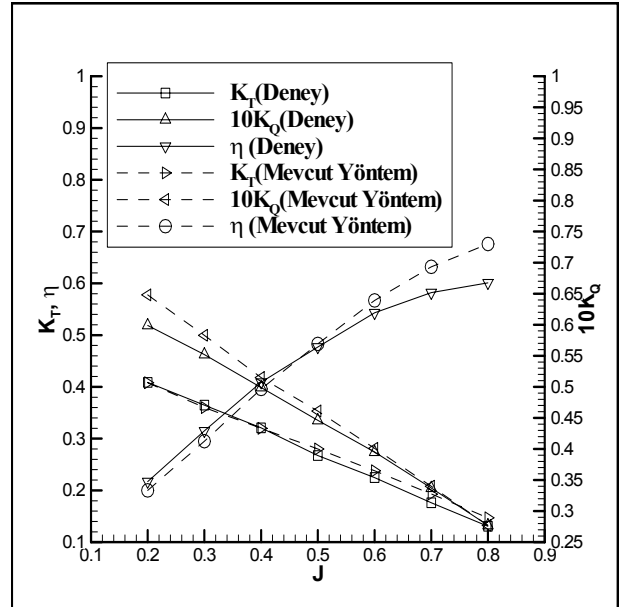
Sonuçlar ve değerlendirmeler

Bu çalışmada, podlu pervane sistemleri etrafındaki akımın karakteristiklerini incelemek ve sistemin performansını hesaplayabilmek için iteratif bir sayısal yöntem tanımlanmıştır. Elde edilen sonuçlar deneysel ve diğer sayısal sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Deneysel sonuçlarla ve diğer sayısal yöntemlerle pratik uygulamalar

açısından yeterli bir uyumun olduğu bulunmuştur. Elde edilen sonuçları şu şekilde özetlemek mümkündür:



Şekil 20. Pervane etkili (J=0.5) pod ve taşıyıcı eleman üzerinde eş basınç eğrileri ($\beta=0^\circ$)



Şekil 21. Deneyle karşılaştırmalı olarak pervanenin itme, tork ve verim değerleri, $\beta=0^\circ$

1-) Mevcut sayısal yöntem, pratik uygulamalar açısından podlu bir pervanenin itme, tork ve verim değerlerini yeterli bir hassasiyette (Şekil 17 ve Şekil 21'den hesaplanabileceği üzere) deneyle mevcut yöntemin sonuçları arasındaki maksimi-

mum hata %12'yi geçmemektedir) hesaplayabilir.

2-) Taşıyıcı elemanın pod üzerinde ve podun da taşıyıcı eleman üzerinde (özellikle birbirlerinin kesim hattı boyunca) akımı hızlandırdıkları bulunmuştur.

3-) Pervanenin negatif basınç (emme) etkisinin podun hemen önündeki, pozitif basınç (basma) etkisinin de podun arkasındaki ve taşıyıcı eleman üzerindeki akımı hızlandırdığı bulunmuştur.

4-) Pod ve taşıyıcı elemanın, pervane boyutsuz itme ve tork değerlerini, incelenen bu iki durum için azda olsa düşürdüğü hesaplanmıştır.

5-) Mevcut yöntemin 4. adımının yakınsamış değerleri verdiği görülmüştür.

6-) Mevcut yöntemin sonuçları, daha fazla sayıda podlu pervane deney sonuçlarıyla karşılaştırılarak doğruluk ve duyarlılığı denenmelidir. Özellikle açılı durum (yaw angle) ve değişik tipte podlu birimler gözönüne alınmalıdır.

7-) Mevcut yöntem arkadan itişli (push type), ikiz pervaneli, finli, yan kanatçıklı vs. türündeki değişik podlu pervane birimlerine de rahatlıkla uygulanabilir.

Kaynaklar

Atlas, M., (ed.) (2004). *First International Conference on Technological Advances in Podded Propulsion*, University of Newcastle, UK.

Atlas, M., Wang, D. ve Glover, E.J., (2007). Experimental investigation into the impact of slipstream wash of a podded propulsor on the marine environment, *Proceedings of IMech, J. Engineering for the Maritime Environment*, **221**, Part M, 1-13.

Bal, S., (2006). Podlu pervane analizi için sayısal bir yöntem, *Deniz Harp Okulu Bülteni*, **42**, Nisan, 43-59.

Bal, S., Akyildiz, H. ve Guner, M., (2006). Preliminary results of a numerical method for podded propulsors, *Proceedings, 2nd Int. Conf. on Podded Propulsion*, Brest, France.

Bal, S. ve Guner, M. (2009). Performance analysis of podded propulsors, *Ocean Engineering*, Basım için kabul edildi, doi:10.1016/j.oceaneng.2009.01.016.

Billard, J.Y. ve Atlas, M. (Eds.) (2006). *Second International Conference on Technological Advances in Podded Propulsion*, Institut de Recherche de l'Ecole Navale (IRENav), Brest, France.

Çelik, F. ve Güner, M., (2006). Improved lifting line method for marine propellers, *Marine Technology, SNAME*, **43**, 100-113.

Fine, N.E. ve Kinnas, S.A., (1993). A boundary element method for the analysis of the flow around 3-D cavitating hydrofoils, *Journal of Ship Research*, **37**, 213-224.

Ghassemi, H. ve Ghadimi, P., (2008). Computational hydrodynamic analysis of the propeller rudder and the AZIPOD systems, *Ocean Engineering*, **35**, 117-130.

Greeley, D.S. ve Kerwin, J.E., (1982). Numerical methods for propeller design and analysis in steady flow, *Trans. SNAME*, **90**, 415-453.

Gupta, A., (2004). Numerical prediction of flows around podded propulsors, *Ocean Engineering Group Report No: 04-6*, The University of Texas at Austin, USA.

Hsin, C-Y., Chou, S-K. ve Chen, W-C., (2002). A new propeller design method for the pod propulsion system, *Proceedings, 24th Symp. on Naval Hydrodynamics*, Fukuoka, Japan.

Islam, M.F., Molloy, S., He, M., Veitch, B., Bose, N. ve Liu, P., (2006). Hydrodynamic study of podded propulsors with systematically varied geometry, *Proceedings, 2nd Int. Conf. on Podded Propulsors*, Brest, France.

Islam, M.F., Taylor, R., Quinton, J., Veitch, B., Bose, N., Colbourne ve B., Liu, P., (2004). Numerical investigation of propulsive characteristics of podded propeller, *Proceedings, 1st Int. Conf. on Podded Propulsors*, University of Newcastle, UK.

Katz, J. ve Plotkin, A., (2001). *Low Speed Aerodynamics*, 2nd Edition, John Wiley and Sons Inc., USA.

Kerwin, J.E. ve Lee, C-S., (1978). Prediction of steady and unsteady marine propeller performance by numerical lifting-surface theory, *Trans. SNAME*, **86**.

Kinnas, S.A., (Ed.), (2005). University/navy/industry consortium on cavitation performance of high speed propulsors-presentations and progress reports, *23rd Steering Committee Meeting*, The University of Texas at Austin, USA.

- Kinnas, S.A. ve Fine, N.E., (1993). A numerical nonlinear analysis of the flow around two- and three-dimensional partially cavitating hydrofoils, *Journal of Fluid Mechanics*, **254**, 151-181.
- Kinnas, S.A., Griffin, P., Choi, J-K. ve Kosal, E., (1998). Automated design of propulsor blades for high-speed ocean vehicle applications, *Trans. SNAME*, **106**.
- Kinnas, S.A. ve Hsin, C-Y., (1992). A boundary element method for the analysis of the unsteady flow around extreme propeller geometries, *AIAA Journal*, **30**, 688-696.
- Lee, C-S., (1979). Prediction of steady and unsteady performance of marine propellers with or without cavitation by numerical lifting surface theory, *PhD thesis*, M.I.T., Department of Ocean Engineering.
- Mishra, B., (2005). Prediction of performance of podded propulsors via coupling of a vortex-lattice method with an Euler or a RANS solver, *Ocean Engineering Group Report No: 05-1*, The University of Texas at Austin, USA.
- Morino, L. ve Kuo, C-C., (1974). Subsonic potential aerodynamic for complex configurations: a general theory. *AIAA J*, **12**, 2, 191-197.
- Szantyr, J.A., (1994). A Method for analysis of cavitating marine propellers in non-uniform flow, *International Shipbuilding Progress*, **41**, 223-242.
- Szantyr, J.A., (2001). Hydrodynamic model experiments with pod propulsors, *Oceanic Engineering International*, **5**, 2, 95-103.
- Veikonheimo, T., (2006). Solving problems of propeller model scaling, *The Naval Architect, RINA*, July/August, 51-53.