

DÜŞEY MİLLİ ÇOK KADEMELİ BİR POMPANIN PERFORMANS DEĞERLERİNİN HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ YARDIMI İLE BELİRLENMESİ VE DENEY SONUÇLARI İLE KARŞILAŞTIRILMASI

Onur KONURALP - Hakan ÖZKELEMCİ / Layne Bowler
Kahraman Albayrak / ODTÜ
Ahmet Açıkgöz / ANOVA Mühendislik

Özet:

Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD / CFD), pompa tasarımı ve pompa performansı analizinde yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Bilgisayarlarda işlem yeteneklerinin hızla artmasına paralel olarak çözüm sürelerinin kısalması, akışkanlarla ilgili temel denklemlerin sayısal yöntemlerle çözüldüğü HAD uygulamalarının yaygınlaşmasını da hızlandırmaktadır.

HAD, herhangi bir model (fiziksel prototip) üretilmesi gerekmeden, pompa performansının hızlı bir şekilde hesaplanmasını mümkün kılar. Pompa girişi, çark kanatları ve salyangoz/difüzör tasarımı sırasında ya da sonrasında, HAD kullanılması ile yapılabilen sayısal deneyler yardımı ile tasarım değerlerinin doğrulanması ve/veya iç akışın ya da emişteki akışın gözlenmesi ile tasarımın iyileştirilmesi, üretim yapmadan tasarım sonrası yine ofis çalışması ile sonuçların irdelenmesi sağlanabilir. Bu, yeni bir tasarımda prototipin üretim zamanını ve maliyetini azaltır. Tasarımın doğrulanma süresini kısaltır ve tasarımda yapılan revizyonların gözlenmesini hızlandırır.

Bu çalışmada düşey milli iki kademeli bir pompanın performansı Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yardımıyla belirlenmiştir. Pompa geometrisini temsil eden akış hacmi içinde, 3 boyutlu, sıkıştırılmaz Navier-Stokes denklemleri Sonlu Hacimler Yöntemi kullanılarak program tarafından çözülmüştür. Akış analizleri için "FLUENT" isimli HAD yazılımı kullanılmıştır. Pompa çarklarının dönüşü "Moving Reference Frame" yöntemi kullanılarak modellenmiştir.

HAD çözümlerleriyle elde edilen performans eğrisi, doğrulama deney sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. HAD çözümünün, en verimli nokta için, ISO 3555 (Sınıf B)'de verilen garanti noktası tolerans aralığı içinde olduğu görülmüştür[1]. Bu da tasarım ve üretim sonrası kabul testlerindeki olası sapmalara karşı güvenli bir aralık olarak kabul edilebilir.

Ayrıca farklı hız ve kademe sayıları için program çözümleri elde edilmiştir. Program çıktısı olan bu sonuçlar programın deneysel karşılaştırma yapılan çıktıları ile kendi aralarında benzeşim kurallarına göre karşılaştırılmıştır.

1. GİRİŞ

Günümüzde artan rekabet ve maliyetlerdeki artış nedeniyle ürün tasarımı ve geliştirmesinde verimlilik artışı önemini artırmaktadır. Pompa tasarımı ve ürün iyileştirmesinde bilgisayar destekli mühendislik araçlarının kullanılmasıyla tasarım süreci önemli ölçüde kısaltılabilir. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) uygulamalarıyla tasarım yapılan bir pompanın prototip üretimi yapılmaksızın performans değerleri elde edilebilir ve iç akışın gözlemlenmesiyle tasarımda gerekli değişiklikler yapılabilir. Şekil 1 ve Şekil 2 düşey milli pompa tasarım sürecini klasik yaklaşımla ve HAD programı kullanımı yaklaşımıyla göstermektedir. HAD programı kullanılarak yapılan tasarımda prototip üretiminden kaynaklanan maliyet ve zaman kaybı azaltılarak verimlilik artışı sağlanabilir. Sonuçlara göre eğer tasarımda revizyon gerekiyorsa bu süre de kısılır.

HAD uygulamalarıyla pompanın çalışması, çeşitli debi ve basma yüksekliği sınır koşullarında canlandırılarak pompa geometrisinin çeşitli yerlerindeki basınç dağılımı, hız vektörleri, kuvvet ve tork değerleri, çark kanatları üzerindeki mutlak ve bağıl hızlar, oluşan yükler (radyal-eksenel) gözlemlenebilir ve bunun sonucunda tasarımda iyileştirmeler yapılabilir.

Bir HAD çalışması genel olarak dört aşamadan oluşmaktadır:

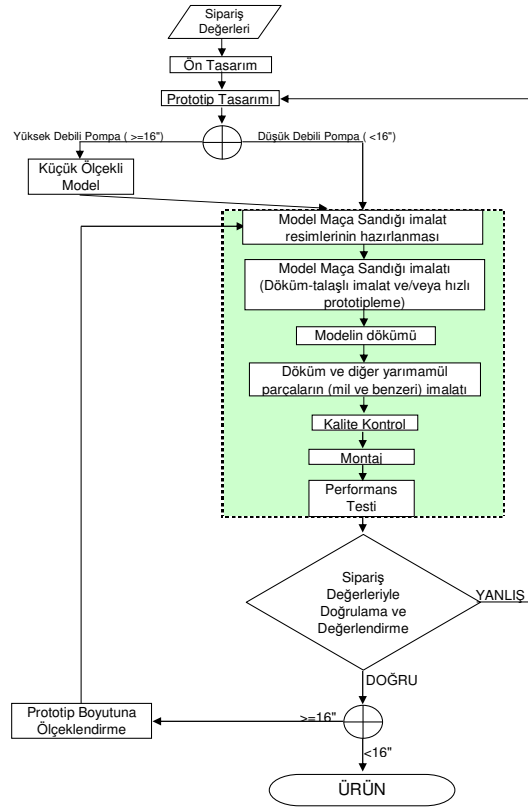
1. Katı model ve akış hacimlerinin oluşturulması
2. Akış hacimlerini küçük birimlere bölen sayısal ağ tabakasının oluşturulması
3. Sınır koşulları ve çözüm ayarlarının yapılması ve çözümlenme işlemi
4. Çözüm sonuçlarının değerlendirilmesi

HAD programlarında akış hacimleri, çok sayıda küçük birime ayrılarak her biri için Navier-Stokes denklemleri çözümler. Günümüzde HAD uygulamalarında en çok Sonlu Hacimler Yöntemi ve Sonlu Elemanlar Yöntemi kullanılmaktadır.

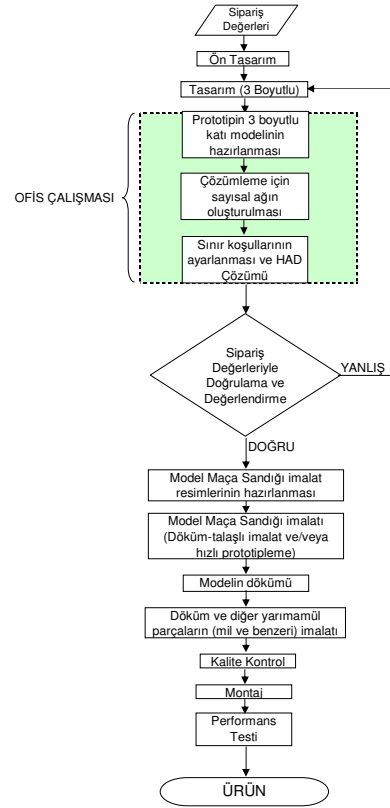
Bu çalışmada düşey milli iki kademeli bir pompa için çözümlenmeler Sonlu Hacimler Yöntemi kullanan HAD programıyla yapılmıştır. Tasarım sonrası pompanın katı modeli CAD programında hazırlanarak, HAD programına aktarılmıştır. Bu program içerisinde, katı modeldeki yüzeyler ve hacimler kullanılarak akış hacimleri oluşturulmuş ve sayısal ağ tabakası oluşturularak çözüme geçilmiştir. Programda yedi farklı çalışma noktası için çözümler yapılarak pompanın performans eğrisi çıkarılmıştır. Çalışmanın bu ilk bölümünde, elde edilen

performans eğrisi doğrulama deneylerinin sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Ayrıca pompa iç akışının sayısal görüntüleri incelenmiştir.

Çalışmanın diğer bölümlerinde pompa modeli, kademe sayısı değiştirilerek ve ilk çalışmadan farklı bir hızda çalıştırılarak HAD yazılımının teorik değerlerle karşılaştırılması yapılmıştır.



Şekil 1 : Düşey milli bir pompa için klasik tasarım süreci



Şekil 2 : HAD programı kullanılarak yapılan tasarım süreci

2. SONLU HACİMLER YÖNTEMİ

Bu yöntemde, akış hacmi küçük kontrol hacimlerine bölünür ve temel korunum yasaları bu kontrol hacimlerine uygulanır. Üç boyutlu akış hareketinde 5 temel kısmi diferansiyel denklem çözülür; maddenin korunumu, x, y ve z yönlerinde momentum denklemleri ve enerji denklemi [2]. Bu denklemlerin içinde yedi bilinmeyen bulunur:

- hızın x yönündeki bileşeni, u
- hızın y yönündeki bileşeni, v
- hızın z yönündeki bileşeni, w
- özkütle, ρ
- basınç, p
- sıcaklık, T
- iç enerji

Yukarıdaki herhangi bir Φ bilinmeyeni için korunum yasalarının genel şekli şöyledir:

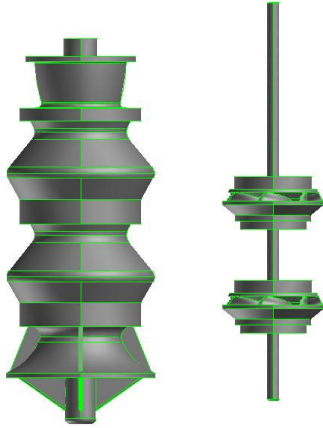
$$\begin{array}{ccccccc} \Phi \text{'nin kontrol hacmi} & & \text{konveksiyon} & & \text{difüzyon nedeniyle} & & \Phi \text{'nin kontrol hacmi} \\ \text{inde zamana bağlı} & = & \text{nedeniyle kontrol} & + & \text{kontrol hacmine} & + & \text{inde zamana bağlı} \\ \text{artışı} & & \text{hacmine } \Phi \text{ akısı} & & \Phi \text{ akısı} & & \text{oluşumu} \end{array}$$

Bu beş temel denkleme ek olarak ayrıca türbülans denklemleri de çözülebilir. Bu çalışmada yapılan çözümlerde türbülans modeli olarak Standard K-Epsilon modeli kullanılmıştır. Çözümde enerji denklemi kullanılmamıştır.

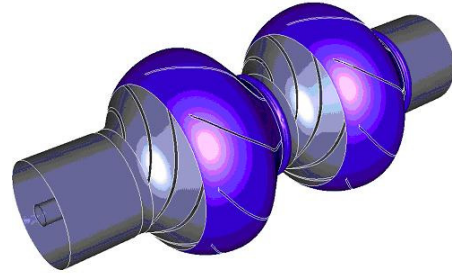
HAD yazılımı, bilinmeyenleri, her bir kontrol hacmi için, verilen başlangıç tahmininden başlayarak, iterasyonlar yaparak hesaplar. Doğru sonuçlar almak için yeterli sayıda iterasyon yapmak ve yakınsamış çözümler elde etmek gereklidir. Yakınsama kriterleri program içinde uygulamaya bağlı olarak belirlenebilir.

3. KATI MODEL VE AKIŞ HACİMLERİNİN OLUŞTURULMASI

Çalışmada CAD programı kullanılarak dikey milli karışık akışlı iki kademeli pompa tasarım sonrası modellenmiştir. Model iki ana parçadan oluşmaktadır. Bunlar, emiş, çıkış ve difüzörlerden oluşan dönmeyen kısım (stator) ile çarklar ve pompa milinden oluşan dönen kısım (rotor) olarak tanımlanabilir (Şekil 3). Model içinde, dönmeyen ve dönen parçalar arasında akış hacmi oluşturulmuştur (Şekil 4). Çalışmanın sonraki bölümlerinde akış hacminden bir pompa kademesi çıkarılarak tek kademeli pompa modeli oluşturulmuş ve uygun sınır koşullarıyla program çalıştırılmıştır. Ayrıca yine tek kademeli pompa farklı bir dönüş hızıyla çalıştırılarak sonuçlar incelenmiştir.



Şekil 3 : Katı Model - Dönmeyen ve Dönen Kısımlar

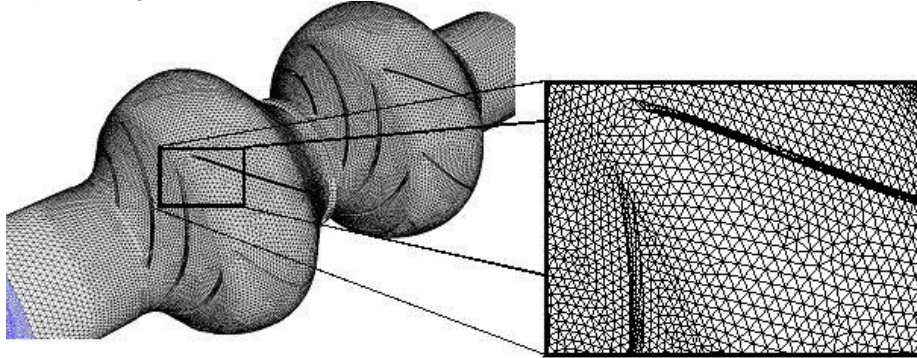


Şekil 4 : Akış Hacmi

4. SAYISAL AĞ TABAKASININ OLUŞTURULMASI

Oluşturulan akış hacmi sonlu birçok hacme bölünerek çözüm için hazır hale getirilir. Bu hacimlerin mümkün olduğunca küçük ve düzgün olması çözüm kalitesini artırır. Ancak hacim sayısı arttıkça çözüm süresi uzar ve kullanılan bilgisayar belleği alanı artar. Bu yüzden, kullanılan sonlu hacimlerin büyüklüğü belirlenirken, akışın fiziği göz önünde bulundurularak akış özelliği değişikliklerinin yüksek olduğu kesimlerde sık, diğer kısımlarda ise daha seyrek sonlu hacimler kullanmak çözüm hızını artırır. Örneğin, viskoz etki nedeniyle hız değişiminin yüksek olduğu duvar kenarı gibi yerlerde doğru hesaplamalar yapabilmek için yoğun bir sayısal ağ kullanmak faydalıdır. Bunlar yapılan çalışmaların artmasıyla uygulamaya göre elde edilebilecek pratik bilgilerdir.

Bu çalışmada kullanılan sayısal ağ tabakası yaklaşık 1.600.000 sonlu hacimden oluşmaktadır. Kullanılan sayısal ağ tabakası Şekil 5’te görülebilir.



Şekil 5 : Sayısal Ağ Tabakası

5. ÇÖZÜMLEME ÇALIŞMASI

Sayısal ağ tabakası oluşturulduktan sonra sınır şartları tanımlanarak çözümlene işlemine geçilmiştir. Burada giriş sınır koşulu olarak sıfır etkin basınç, yani atmosfer basıncı tanımlanmıştır. Çıkış sınır koşulu, çözümlenmenin yapıldığı çalışma noktasına göre belirlenmiştir. Çalışmanın ilk bölümü için bu değerler sırasıyla 0, 2, 6, 10, 12.4, 14, 16 mSS statik basınç olarak uygulanmıştır. Ayrıca dönen parça yüzeylerine 1450 d/d dönüş hızı tanımlanmıştır.

Çalışmanın ikinci bölümünde akış hacminde bulunan iki pompa kademesinden biri çıkartılarak elde edilen katı model için program dört farklı çıkış sınır koşulunda çalıştırılmış ve kademe sayısı farklılığının etkisi gözlemlenmiştir. Ardından aynı modelde, akış hacmi değiştirilmeden, dönen parça yüzeylerine 1000 d/d dönüş hızı uygulanarak program dört farklı çıkış sınır koşulu için çalıştırılmıştır.

Çalışmada çark dönüşünün benzeşimi için HAD programının *Moving Reference Frame* yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemde, çözümlene zamandan bağımsız olarak yapılır ve zaman ortalamalı değerler elde edilir [3]. Çark dönüşünün benzeşimi için bir başka yöntem de *Sliding Mesh* yöntemidir. Bu yöntem zamana bağlı çözümlenmeler gerektiğinde kullanılır. Ancak zamana bağlı çözümlenmede sonuca ulaşmak daha uzun sürmektedir. Bu yöntem pompanın ilk çalıştırılmasının (kalkış momentleri v.b.) ya da durdurulmasının (durma süresi, su koçu, v.b.) benzeşimi için kullanılabilir. Bu çalışmada, zaman ortalamalı değerler gerektiği için *Moving Reference Frame* yöntemi kullanılmıştır.

Her bir çalışma noktası için, iki kademede (yak. 1.6 milyon hacim) çözüm, yaklaşık 1600 iterasyon sonunda yakınsamış ve yaklaşık 12 saat sürmüştür. Tek kademe için (yak. 0.8 milyon hacim – 1000 iterasyon) bu süre yaklaşık 5.5 saat'e düşmüştür (kullanılan bilgisayar konfigürasyonu; Pentium 4, 3 GHz, 1.5 GB bellek).

6. ÇÖZÜMLEME SONUÇLARI

6.1 Performans Eğrisinin Doğrulama Deneyi Sonuçlarıyla Karşılaştırılması

Yapılan çözümlenmeler sonucunda 1450 d/d dönme hızı olan iki kademeli pompa için yedi farklı çalışma noktasında debi ve verim değerleri elde edilmiştir.

Hesaplanan performans değerleriyle doğrulama deneyi sonuçlarının karşılaştırması Şekil 6'da verilmiştir. HAD çözümünün, en verimli nokta (ENV) için, ISO 3555 (Sınıf B)'de verilen aşağıdaki garanti noktası formülüne göre tolerans aralığı içinde olduğu görülmüştür.

$$\left(\frac{H_N \cdot X_H}{\Delta H} \right)^2 + \left(\frac{Q_N \cdot X_Q}{\Delta Q} \right)^2 \geq 1, \quad \eta' \geq 0.972 \cdot \eta_N$$

Formüldeki değerler aşağıdaki gibidir:

ENV için $H = H_N$, $Q = Q_N$

ΔH ve ΔQ : garanti noktasından uzaklıklar

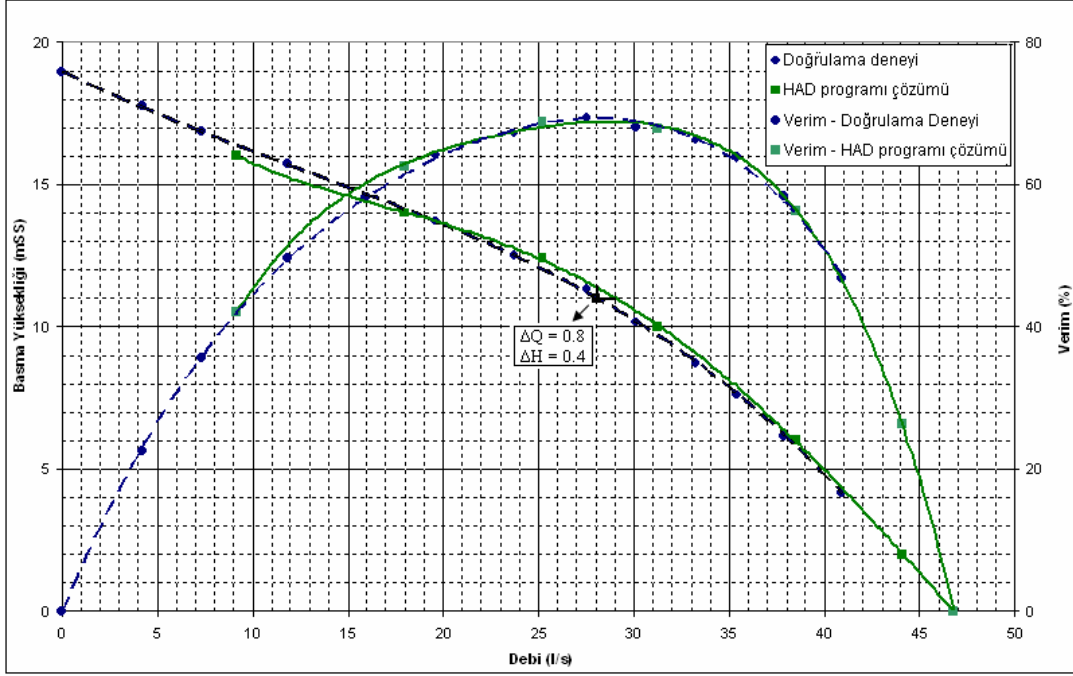
$X_H = 0.02$ ve $X_Q = 0.04$ (genel tolerans değerleri Sınıf B)

η_N : ENV için verim

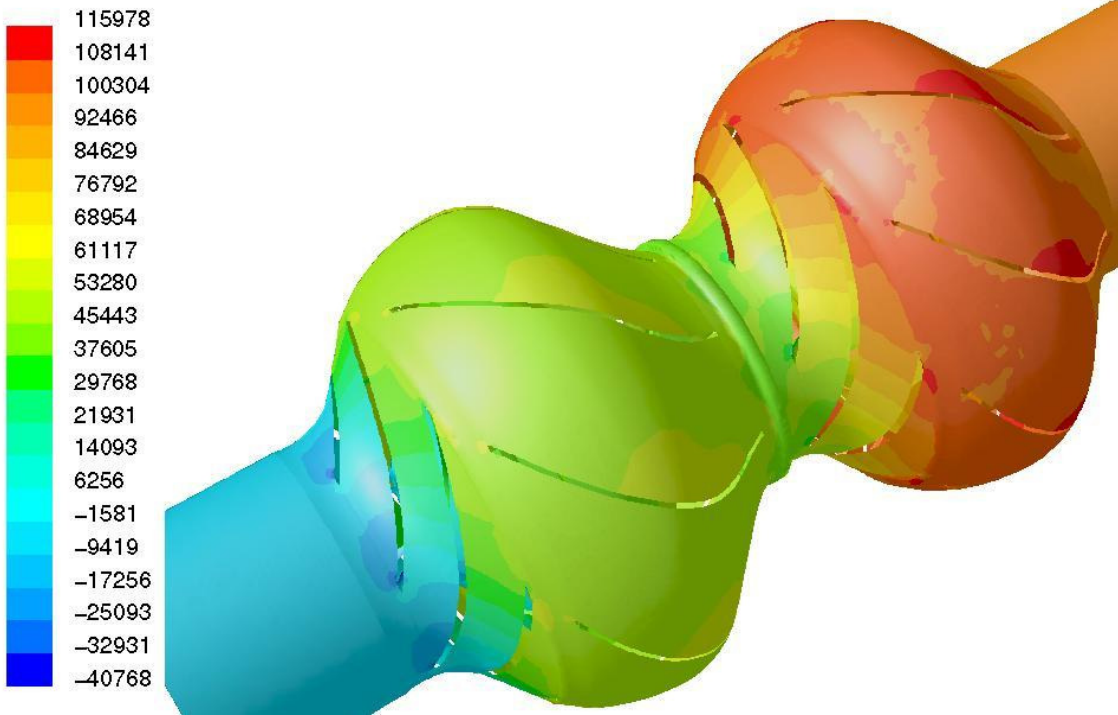
6.2 İç Akışın Sayısal Görüntüleri

Şekil 7 ve Şekil 8'de pompa dış yüzeyindeki ve çarklar üzerindeki basınç dağılımları gösterilmiştir.

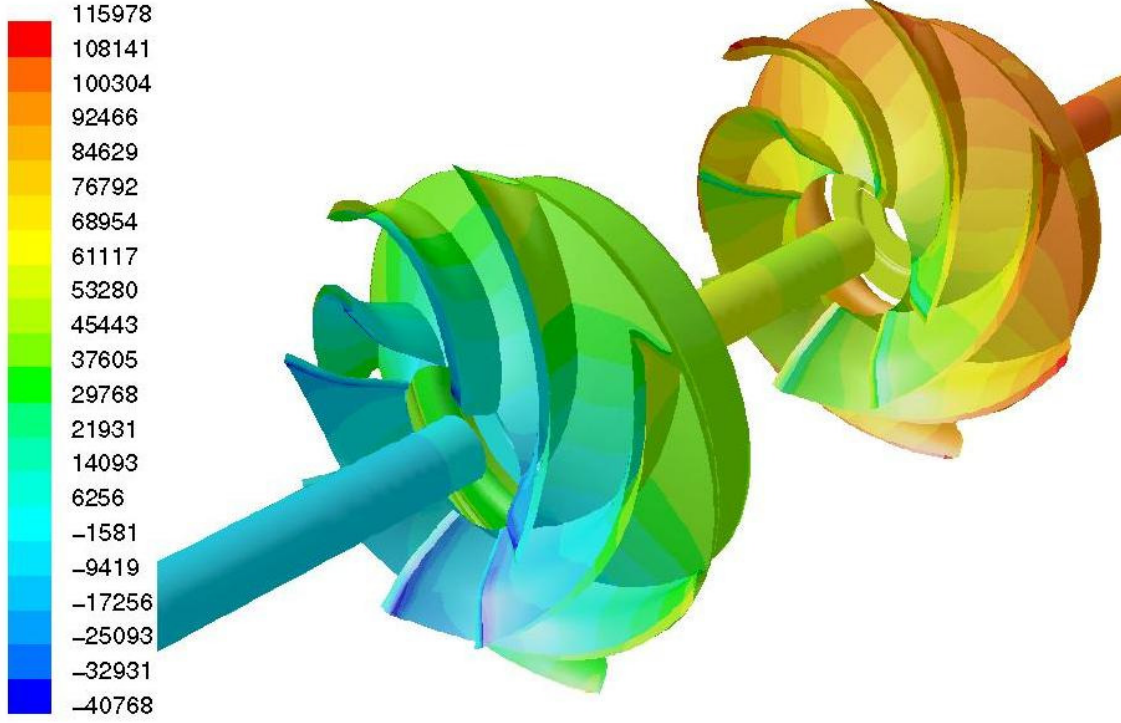
Şekil 9'da difüzör kanatları üzerindeki basınç dağılımı, Şekil 10'da çark kanatları arasındaki akım çizgileri ve Şekil 11'de çark kanatları arasındaki hız büyüklükleri gösterilmiştir.



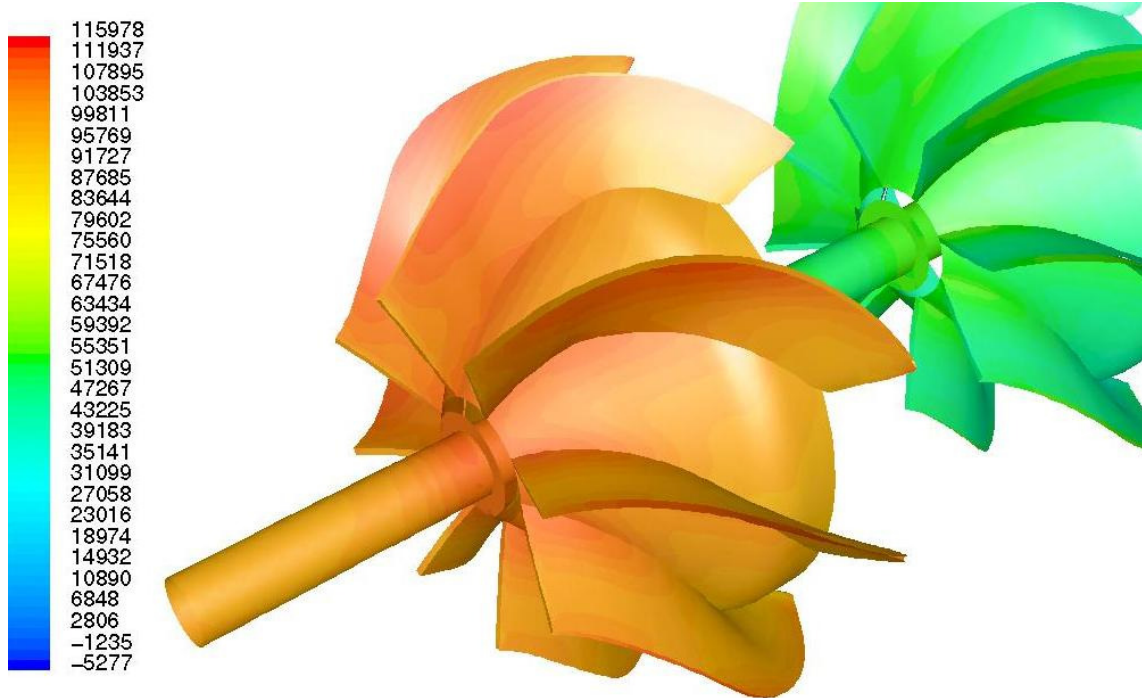
Şekil 6 : HAD programı sonuçlarıyla doğrulama deneyi sonuçlarının karşılaştırması



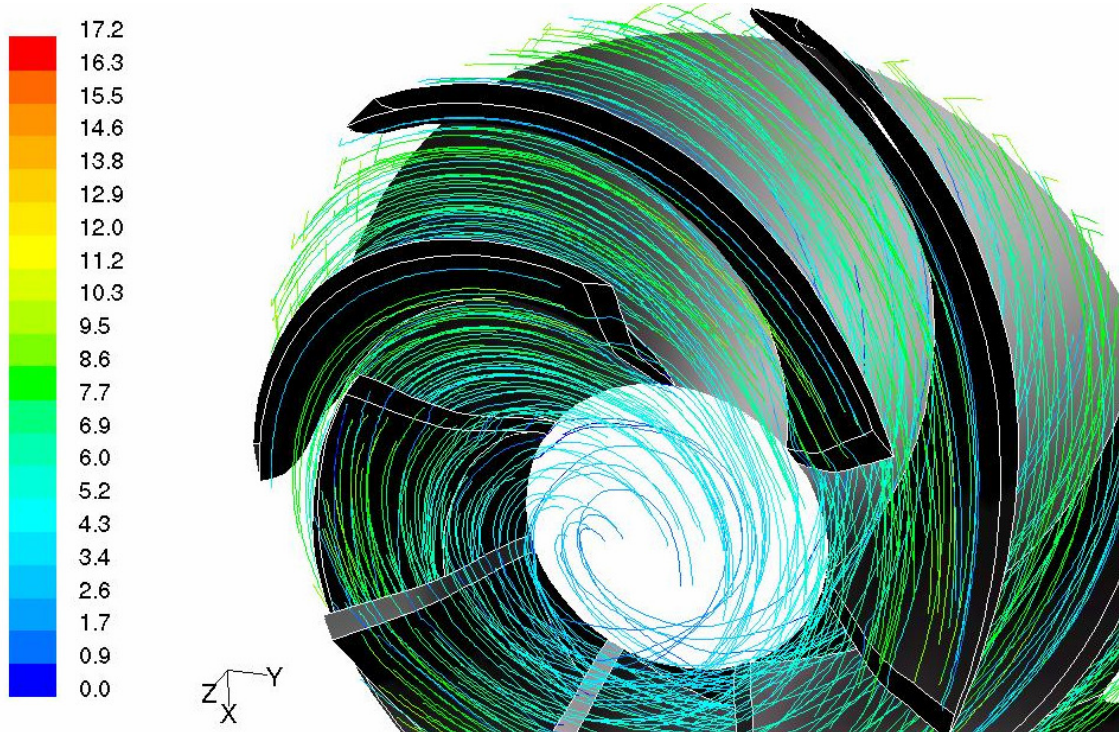
Şekil 7 : Pompa dış yüzeylerinde statik basınç dağılımı (Pa)



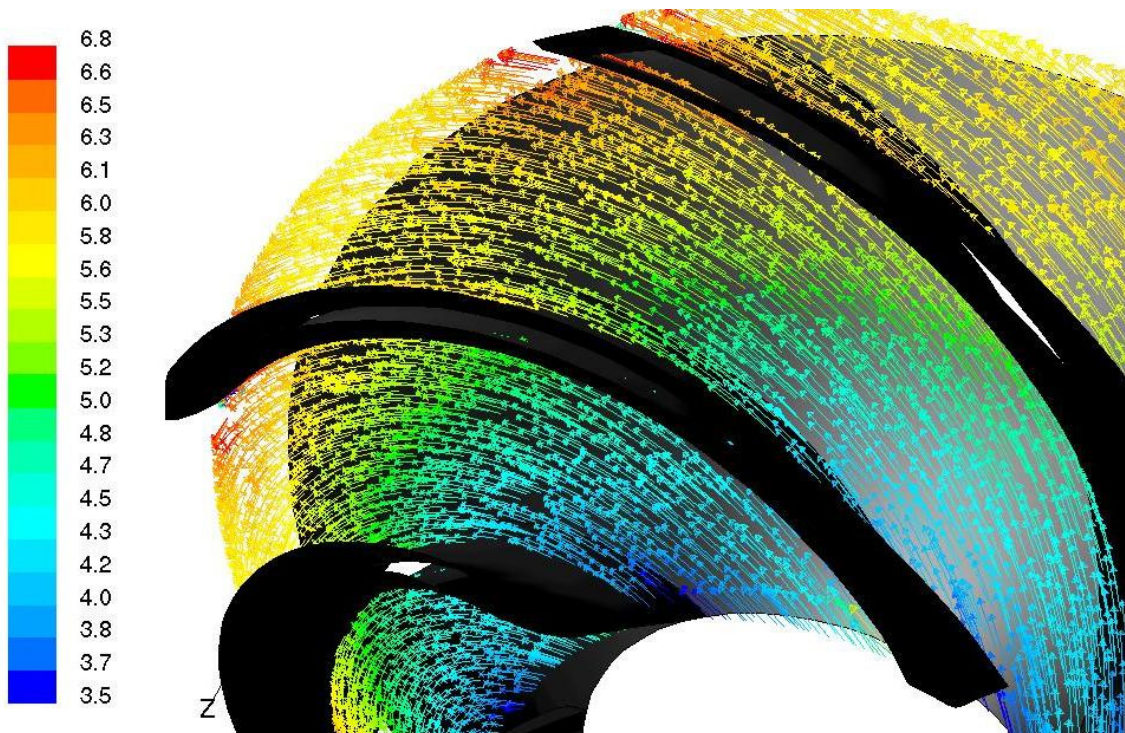
Şekil 8 : Çark yüzeylerinde statik basınç dağılımı (Pa)



Şekil 9 : Difüzör yüzeylerinde basınç dağılımı (Pa)



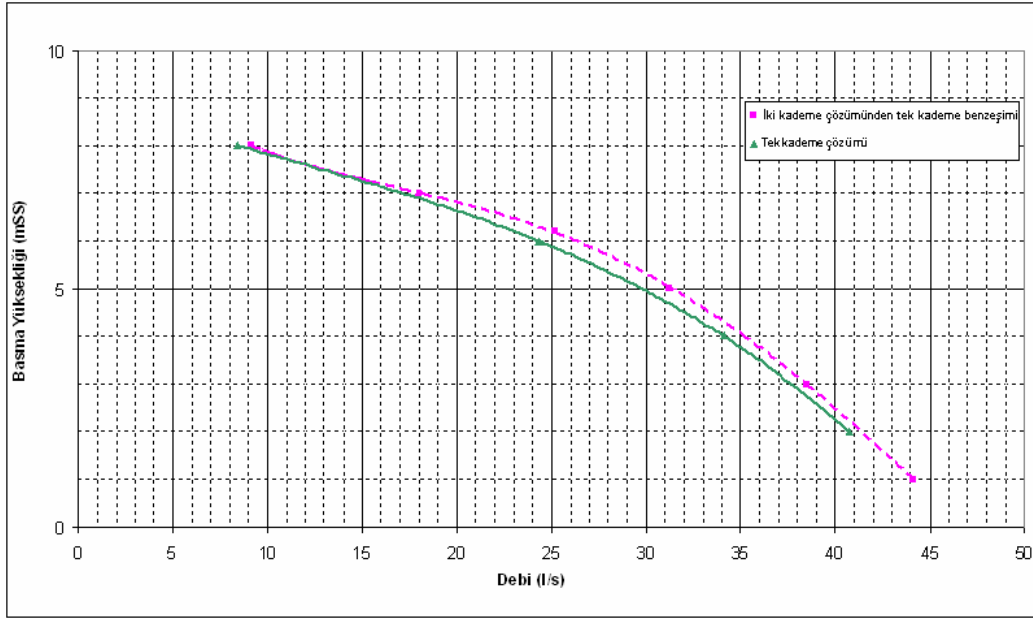
Şekil 10 : Çark kanatları arasındaki akım çizgileri (hız büyüklüğü - m/s)



Şekil 11 : Çark kanatları arasındaki hız büyüklükleri (m/s)

6.3 Kademe Sayısı Değişikliği

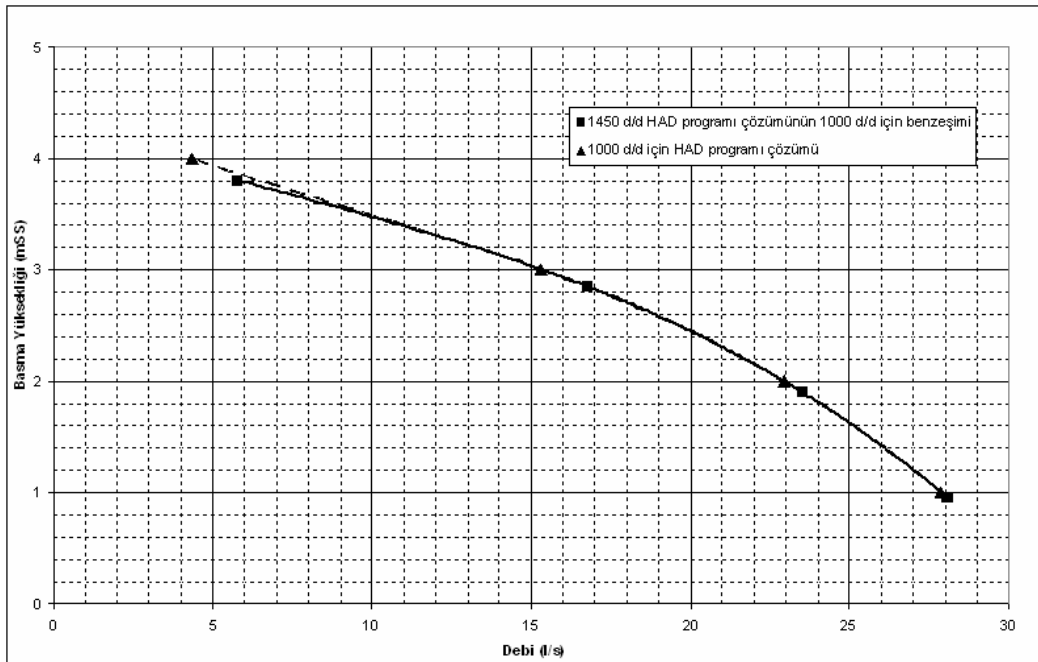
Tek kademeli pompa modelinin HAD programı çözümü ve iki kademeli pompa çözümünden benzeşim kurallarıyla elde edilmiş tek kademe sonuçları bir arada Şekil 12’de gösterilmiştir.



Şekil 12 : Tek kademeli pompa modelinin HAD programı çözümü ve iki kademeli pompa çözümünden benzeşim kurallarıyla elde edilmiş tek kademe sonuçları (1450 d/d)

6.4 Dönme Hızı Değişikliği

Tek kademeli pompa modelinin 1000 d/d dönüş hızıyla HAD programı çözümü ve 1450 d/d çözümünün benzeşim kurallarıyla 1000 d/d için elde edilmiş sonuçları Şekil 13’de gösterilmiştir.



Şekil 13 : Tek kademeli pompanın 1000 d/d dönüş hızıyla HAD programı çözümü ve 1450 d/d dönüş hızıyla çözümünün benzeşim kurallarıyla 1000 d/d için elde edilmiş sonuçları

7. SONUÇ

Bu çalışmada, öncelikle düşey milli, iki kademeli, karışık akışlı bir pompanın iç akışı, yedi farklı çalışma noktası için HAD yazılımı kullanılarak çözümlenmiş ve sonuçlar doğrulama deneyi sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. HAD programı çözümünün, en verimli nokta (ENV) için, ISO 3555 (Sınıf B)'de verilen garanti noktası tolerans aralığı içinde olduğu görülmüştür.

Katı modelde ve sayısal ağda bir değişiklik yapmadan tek kademe için aynı ve farklı dönüş hızında çözümlenmiş ve sonuçlar, programın deneysel sonuçlarla kabul edilebilir uyumu görülmüş olan iki kademe çözümleriyle karşılaştırılmış ve benzeşim kurallarına uyduğu görülmüştür. Böylece, bir katı model ve sayısal ağ çalışmasının ardından uygulamaya göre farklı hız ve farklı kademe sayıları için sayısal deneyler de yapılabileceği gözlemlenmiştir.

Sonuç olarak, HAD yazılımlarının uygun bir katı model ve sayısal ağ hazırlığı sonrasında tasarım ve üretim aşamalarında her yönden büyük kazanımlar getireceği görülmüştür. Fakat unutulmaması gereken nokta bu tür programların girdilerinin çıktı sonuçlarını doğrudan etkilediğidir. Hatalı girişler (yetersiz sayısal ağ, problemlerli katı modeller, yanlış sınır koşulları v.b.) kullanıcı için yanıltıcı sonuçlar verebilir. Çeşitli pompa tipleri için HAD programı içindeki seçenekler farklılaşabilir. Farklı tipler için elde edilen sonuçlar da doğrulama testlerinin ardından diğer tasarımlar için kullanılabilir.

KAYNAKLAR

1. "ISO 3555 Centrifugal, Mixed Flow and Axial Pumps Code for Acceptance Tests – Class B".
2. AKSEL, H. , "Computational Fluid Dynamics Using Finite Volume Method" 2002-2003 Ders Notları, ODTÜ Makina Müh. Bölümü
3. Fluent User's Guide

Summary:

Computational Fluid Dynamics (CFD) is a widely used method in pump design and analysis of pump performance. As a consequence of improvements on computer process capabilities, use of CFD applications, which compute the governing fluid dynamics equations numerically, is highly accelerated.

CFD allows computation of pump performance rapidly before manufacturing a physical prototype. During or after the design of pump entrance, impeller blades and volute/diffuser, by means of the numerical experiments, design values can be verified, and/or by observation of the inner flow of the pump or flow in suction, design can be improved by office work without any manufacturing. This reduces the cost and required time for design of a new pump, shortens the time for verification and speeds up the observation of the revisions in the design.

In this study performance of a two stage, mixed flow, vertical turbine pump is determined by help of Computational Fluid Dynamics. Within flow volume, which represents the pump geometry, 3D, incompressible Navier-Stokes equations are solved using Finite Volume Method. For the flow analysis the CFD program "FLUENT" is used. Rotation of the pump impellers are modelled by "Moving Reference Frame" method.

It is seen that, CFD analysis result for the best efficiency point is within the guarantee point tolerance range given in ISO 3555 (Class B). This can be accepted as a safe range against the possible deviations in the design and acceptance tests after the manufacturing.

Additionally, for different velocity and number of stages, program solutions are obtained. These results are compared with the outputs of the program, which are compared with experimental results, according to the similitude rules.