

# Pompa Tasarımının Geliştirilmesinde Hesaplmalı Akışkanlar Dinamiğinin Kullanılması

Yılmaz KARAMANOĞLU\*

Moghtada MOBEDİ\*\*

A. Özden ERTÖZ\*\*\*

## Özet

Bilgisayar teknolojisindeki hızlı gelişmeler ve sağladığı kolaylıklar, ürün tasarım ve geliştirilmesinde yönelik hazırlanan bilgisayar yazılımlarının kullanılmasını kaçınılmaz hale getirmiştir.

Hesaplmalı akışkanlar dinamiği (Computational Fluid Dynamics-CFD) yazılımları ise özellikle akışkan ve ısı transferi ile ilgili olan ürünlerin analizlerinin yapılmasına ve performansının sınanmasında kullanılmaktadır. Bu programlar kullanılarak, süreklilik, momentum ve enerji denklemleri bilgisayar ortamında sayısal olarak çözülmekte, sıcaklık ve akış ile ilgili verilere ulaşılmakta ve değişik parametrelerin dağılımlarının (örneğin hız, basınç, sıcaklık ve benzeri parametrelerin dağılımlarının) elde edilmesine olanak sağlanmaktadır.

Bu makalede, pompa tasarımı ve tasarlanan pompanın denetlenmesinde hesaplmalı akışkanlar dinamiğinin kullanılması ele alınmıştır. Pompa tasarımı safhasında, tasarımcıların en çok merak ettiği konu, tasarlanan pompadaki akışın formu ve akış ile ilgili veri (debi, basınç, tork, verim) değerleridir. Bu makalede, pompalardaki akış için geçerli olan süreklilik, momentum, türbülans denklemleri ve sınır koşulları ile ilgili özet bilgiler verilmekte, çözüm yöntemleri ve doğru çözümler elde edilebilmesi için dikkat edilmesi gereken hususlar üzerine durulmaktadır. Çözüm ağının oluşturulması, çözümün elde edilmesi safhasında karşılaşılan zorluklar ve edinilen tecrübeler aktarılmıştır.

**Anahtar Sözcükler:** CFD, hesaplmalı akışkanlar dinamiği, pompa deneyi, pompa kanadı, pompa, pompa çarkı, araçanak, difüzör.

## 1. GİRİŞ

Sanayideki rekabet, ürünlerin gelişmesine her zaman yardımcı olmuştur. Üreticiler pazar paylarını korumak ve arttırmak amacıyla mevcut ürünlerini geliştirir veya yeni ürünleri tasarlayıp pazara sunar. Her üretici rakiplerine göre teknolojik olarak daha üstün, güvenilir, işletme maliyeti düşük ve yüksek kaliteye sahip ürünler tasarlamak ve üretme çabasıdadır.

Rekabetçi bir ürün eldesi için, iyi bir tasarım ve üretim aşaması gerekir. Özellikle tasarım aşaması çok önemlidir; ürünün pazardaki yeri ve rakip ürünlerine göre sahip olacağı avantajlar, bu aşamada araştırılmakta ve yapısal özellikleri belirlenmektedir. Başarılı bir ürünü tasarlamak için pazar bilgisine ilave olarak araştırma-geliştirme çalışmalarına ihtiyaç duyulmaktadır. Araştırma geliştirme safhasında pazar ihtiyacı

\* Mak. Müh., Vansan Makina Sanayi.

\*\* İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Makina Mühendisliği Bölümü.

\*\*\* Ege Üniversitesi

tasarım oluşturmaktadır. Ürün tasarımında, üreticinin donanımsal ve ekonomik olanakları önemli rol oynamaktadır. Kâğıt üzerinde tasarlanan bir ürün, üretici firmanın ekonomik ve endüstriyel yapabilirlik sınırlarını aşmamalıdır. Bir teknik ürünün tasarımında, tasarımcının sahip olduğu teknik bilgi çok önemlidir. Bilgili ve tecrübeli bir tasarımcı, gerek prototip ve imalat gerekse kullanım safhasında ürünün karşılaştığı problemleri ürün tasarım sırasında kestirmekte ve tasarımın olası başarısızlığını önlemektedir. Genellikle, teorik tasarım safhasından sonra ilk örnek ürünü yapılmakta, üzerinde testler uygulanmakta ve sonuçlara bakılmaktadır. İstenilen koşulları yerine getiren tasarımın seri imalatı ve pazara sunulması için çalışmalara başlanmaktadır.

Prototip ürünün üretilmesi ve uygunluk testlerinin yapılması uzun ve maliyetli bir süreçtir. Çoğu zaman sanal ortamdaki tasarım pratikte istenilen koşulları yerine getirmemekte ve birden fazla prototip için deneylerin yapılmasına gerek duyulmaktadır. Rekabet gereği tasarım sürecinin uzun olmaması, tasarımcıların kısa sürede işlerini tamamlayıp, ürünün seri imalat için hazır hale getirmeleri gerekmektedir. Yapılan tasarımın ilk deneylerinde hedeflenenin yakalanması avantaj sağlar. Üretilen prototipi denemek, uygunluksuzlukları gidermek hem ürün geliştirme zamanını hem de maliyetini arttırır. Bunun için tasarımcının prototip safhasına geçilmeden önce yaptığı tasarımın başarısından emin olması gerekir. Son zamanlarda bilgisayar teknolojisinin gelişmesi ile prototip üretimine geçilmeden önce, sanal ortamda ürünün parçaları oluşturulmakta ve birbirlerine monte edilmektedir. Böylece pratikte ürünün üretilebilirliği kontrol edilmekte, ayrıca prototip ve seri imalat için gerekli teknik resimler oluşturulmaktadır. Bilgisayar teknolojisinin sunduğu bir diğer imkân ise uzun süreli ve yüksek maliyetli olan ön denemelerin bilgisayar ortamında yapılmasıdır. Hesaplamalı akışkanlar dinamiğine dayanarak yazılan programlar, ürünlerin akışkan ile ilişkili analizlerini yapmakta, akışın

elde edilen sonuçları sayısal veya görsel biçimde sunmaktadır. Bu programlar ürün tasarımında sağladıkları avantajlardan dolayı, araştırma geliştiren firmalar için vazgeçilmez bir araç haline gelmiş, bu da programlara olan talebi arttırmıştır. Bu artan talep, çeşitli yazılım firmalarını bu alana yönlendirmiş ve değişik programların piyasaya girmesine neden olmuştur.

Pompalar günümüzde vazgeçilmezler arasında dır. Endüstri, su şebekeleri, pis su şebekeleri, tarımsal sulamalar, taşkın önleme, yangın söndürme gibi birçok alanda hayati önem taşımaktadırlar. Uzun süre çalışan pompaların en önemli gideri enerji bedelleridir. Pompaların verimindeki ufak bir değişiklik, bu büyük sistemlerin işletme maliyetlerine önemli ölçüde yansır. Ortalama 20 sene çalışan bir pompanın satın alma maliyeti ömür boyu maliyetinin sadece %5'idir [1].

Pompa tasarımcısı için, pompanın ilk maliyetine ilave olarak, pompanın verimi önemli bir kriterdir. Yüksek verimli pompalar iyi bir araştırma geliştirme prosesini gerektirir. Hesaplamalı akışkanlar dinamiğine dayanarak yazılan bilgisayar programları araştırma geliştirme safhasında kullanılarak, uzun süreli ve yüksek maliyetli olan deney ve doğrulama safhasını minimuma indirmektedir. Bu makalede pompalara ait akış denklemlerine, bu denklemlerin sayısal çözümüne, hesaplamalı akışkanlar dinamiğinin tanımına ve pompa tasarımında sağladığı olanaklara değinilmekte, örnek bir pompa için elde edilen sonuçlar ve edilen tecrübeler aktarılmaktadır.

## 2. POMPA TASARIMINDA KULLANILAN KLASİK YÖNTEMLERİN ZORLUKLARI

Genel olarak bir pompanın tasarlanabilmesi için debi, basma yüksekliği ve devir sayısı verilmektedir. Bu parametrelere bağlı olarak hesaplanan özgül hıza göre pompa tipi seçilmektedir. Daha sonra ampirik metotlarla pompa parametreleri

(çark ve çanak genişlikleri, çapları, kanat açıları, kanat sayısı vb.) bulunur [2,3]. Her ne kadar ampirik metotlar, tasarımcıya pompa geometrisinin sınırları hakkında bilgi veriyorsa da, bir çok parametre tasarımcının bilgisine ve tecrübesine bağlıdır. Bu tecrübe ve bilgilerin doğruluğu ancak

vermektedir.

Şüphesiz deneysel yöntemlerin geliştirilmesi pompa içindeki akışın daha iyi analiz edilmesine yardımcı olmaktadır. Günümüzde, pompa içindeki akışın belirlenmesi ve analiz edilmesi için de

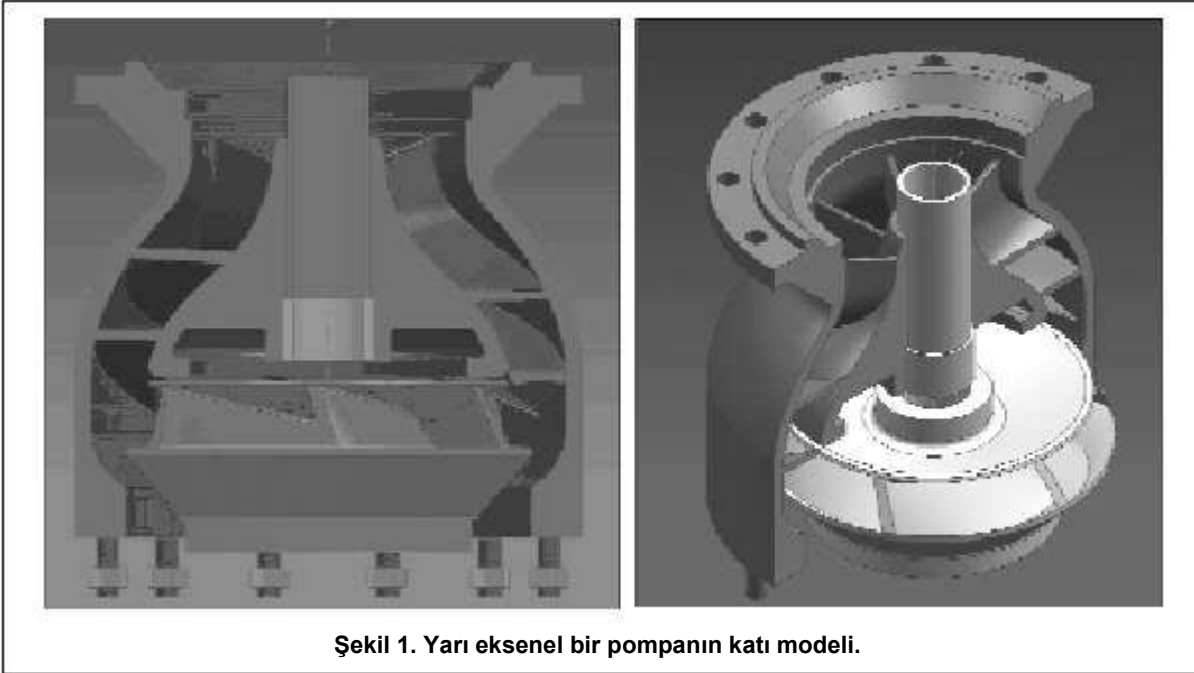
pompa deneyleri ile ispatlanmış olur.

Pompa tasarımında karşılaşılan en önemli zorluk, pompanın içindeki akışın bilinmemesidir. Akıştaki burulmalar, düzensizlikler, geri dönüşler bilinmemekte, kaçak kaybı miktarı kabul edilmekte, hız ve basınç dağılımları ise hesaplanmakta fakat doğrulanmamaktadır. Tasarımcı akışı göremediği için kabuller yapmakta ve buna göre tasarımını düzeltmektedir. Tecrübeli bir pompa tasarımcısı, uzun deneme ve yanılma sürecinden sonra ancak istenilen koşulları yerine getirecek verimli bir pompa tasarlayabilmektedir.

Üreticiler arasında yüksek rekabetin bulunduğu ve enerji tasarrufunun önem taşıdığı çağımızda, verimdeki ufak değişimler bile tüketiciler için önem taşımaktadır. Hesaplamalı akışkanlar dinamiği ile desteklenen pompa tasarımları, pompa içindeki akışın analizinin sonuçlarına bağlı olarak tasarımcıya verim artışı için önemli ipuçları

ğışık yöntemler geliştirilmiştir. Örneğin; ultra-violet ışığı geçiren malzemeden yapılan pompa kademesini, lazer ışını ile bir süre parlayan özel bir akışkan ile çalıştırmak ve lazer ile oluşturulan hattın veya noktaların yüksek hızlarda fotoğrafını çekerek, çıkan sonuçlardan akıştaki hızları hesaplamak ve buna bağlı olarak basınç dağılımını bulmak. Örnek olarak verilebilecek diğer bir yöntem ise pompa çıkışına belirli uzunlukta ipler bağlayarak, bu iplerin hareketinden akım iplikçiklerinin düzgünlüğünü kontrol etmektir. Fakat bu yöntemler anlatılandan daha zor yöntemlerdir. Bu yöntemler oldukça maliyetli ve zaman gerektiren yöntemler olup, genellikle akademik çalışmalar da kullanılmaktadır. Deneysel yöntemler pompa içindeki akışın analizinde yeterli olmamaktadır.

Son yıllarda oldukça yaygın olarak kullanılmaya başlayan hesaplamalı akışkanlar dinamiği pompa tasarımcıların karşılaştıkları bu zorluğu gidermektedir. Hesaplamalı akışkanlar dinamiği



Şekil 1. Yarı eksenel bir pompanın katı modeli.

kullanılarak pompa içindeki akış sanal ortamda inceleme olanağını sağlamaktadır.

### 3. HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİNİN TANIMI

Genel olarak hesaplamalı akışkanlar dinamiği, her türlü akışkan ve akışının değişik koşullardaki analizini yapmaya yarayan bir yöntemdir. Bu yöntemde temel olarak üç ana denklem (sürekli lik, momentum ve enerji denklemleri) esas alınır ve bu denklemler sayısal çözümlerle akış içindeki

lik, momentum (Navier Stokes denklemleri) ve enerji denklemlerinin, uygun başlangıç ve sınır koşulları ile beraber çözülmesi gerekir. Pompalarda genelde akışkan sıcaklığı sabit kabul edilmekte ve enerji denkleminin çözülmesine gerek kalmamaktadır [6].

Bilindiği gibi akışlar, laminar ve türbülanslı olmak üzere ikiye ayrılır. Akışın karakteristiği, boyutsuz olan Reynolds sayısının değerine bağlıdır. Reynoldde sayısının değeri ise akışkanın fiziksel

ve bu denklemleri sayısal çözümlerle akış ıhtıvacı basınç, hız ve sıcaklık dağılımları ve bu parametrelere bağılı olarak birçok veriye ulaşılır.

Günümüzde hesaplamalı akışkanlar dinamiği araştırma–geliştirme ve ürün tasarımında yaygın olarak kullanılmaktadır. Hesaplamalı akışkanlar dinamiği kullanılarak bir uçak kanadının üzerindeki basınçlar, bir yeraltı rezervuarının sıcaklık dağılımı, bir ortamdaki hava akımı dağılımı veya hareketli bir arabanın etrafındaki hava hızı gibi akış ile ilgili birçok parametre bulunabilir. Son yıllardaki hesaplamalı akışkanlar dinamiği teorisi ve bilgisayar yazılımlarındaki gelişmeler yüksek türbülanslı akışların ve dinamik sistemlerin nümerik olarak incelenmesine ve sanal ortamda simüle edilmesine olanak sağlamıştır. Ayrıca, tek fazlı akışların yanında çok fazlı akışlar da artık çözülebilir hale gelmiştir. Örneğin pompalarda kavitasyon gibi zararlı etkenlerin yapısı incelenmekte ve alınan sonuçlara göre önlemler alınmaktadır.

Hesaplamalı akışkanlar dinamiğinin hızlı gelişmesi ve başarılı analizlerin eldesi sonucunda, teknik alanda bu konu bir branş haline gelmiştir. Günümüzde profesyonel olarak bu alanda çalışan ve değişik akışların çözümünü elde eden uzmanlara ulaşmak zor değildir. Hesaplamalı akışkanlar dinamiği ile ilgili çeşitli kitaplar mevcut olup, konu ile ilgilenenlerin bu kitapların incelenmeleri tavsiye edilmektedir. [4, 5]

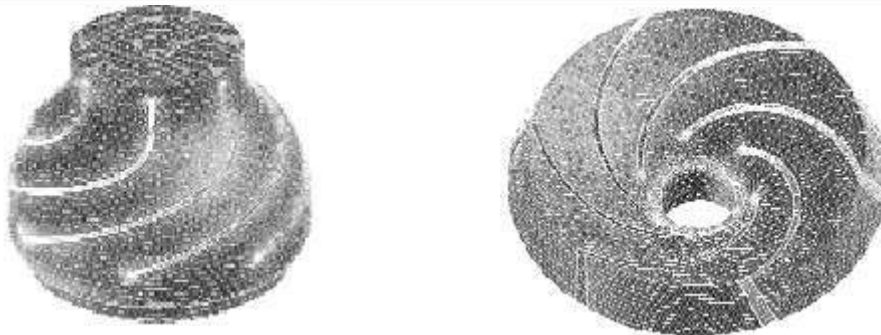
#### 4. POMPALARDA AKIŞ DENKLEMLERİ

Temel olarak bir akışın incelenmesi için sürekli

viskozite, akış hızı ve akış ortamını karakterize eden karakteristik uzunluğunun fonksiyonudur. Laminar akış çizgisel bir akış olup, akım iplikçığı boyunca akış tabakaları birbirinden tamamen ayrı ve karışmaksızın kaldıkları düzgün akımdır.

Türbülans akımda ise, akışkan yörüngeleri karışarak, akış çalkantılı bir şekilde oluşmaktadır. Pompalardaki akış, yüksek hızdan dolayı genellikle türbülanslıdır. Türbülanslı akışların incelenmesi laminar akışlara oranla oldukça zordur. Bu tip problemlerde türbülansın etkisini katmak için modeller geliştirilmiştir. Bu modellerde akışkanın fiziksel viskozitesine ilave olarak, akışın özelliklerine bağılı diğer bir viskozite terimi tanımlanmakta ve ona türbülans viskozitesi denilmektedir. Bu ek viskozite terimini hesaplamak için araştırmacılar tarafından değişik modeller sunulmuştur, bu modellerin arasında ise "standart k- $\epsilon$  modeli" yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu modelde "k" türbülansın kinetik enerjisini, " $\epsilon$ " ise türbülansın yayılımını belirtir. Bu nedenle türbülanslı akışlarda süreklilik ve momentum denklemlerine, türbülans kinetik enerji ve yayılım denklemleri de eklenmekte, çözülmesi gereken denklemlerin sayısı artmakta ve bu da denklem sisteminin çözümünü zorlaştırmaktadır. Literatürde pompalarda ki akışın incelenmesinde standart k- $\epsilon$  modelinin iyi sonuç verildiği belirtilmiş ve bu yöntemin kullanılması tavsiye edilmiştir.

Yukarıda belirtilen süreklilik ve momentum denklemlerinin çözülebilmesi için akış hacminin çev-



Şekil 2. Santrifüj bir pompa çanağının ve çarkının akış hacminin, sonlu hacimlere bölünmesi. Bu bölünmede çanak için 391350, çark için 507081 adet sonlu hacim kullanılmıştır.

resini oluşturan akışın sınır koşullarının da belirlenmesi gerekmektedir. Pompalarda akış hacmi; çark girişi, çanak çıkışı ve çanak iç yüzeyleri ve

mesisi mümkün değildir. Bu nedenle denklemlerin çözülmesi için çeşitli sayısal yöntemler geliştirilmiştir. Bunlar sonlu farklar, sonlu hacimler ve

çark girişi, çanak çıkışı ve çanak iç yüzeyleri ve çark yüzeyleri ile sınırlıdır. Çark ve çanak yüzeylerinin katı sınır koşulu olarak kabul edilirken, çözümlerin elde edilebilmesi için çark girişi ve çanak çıkışında su debisi veya basınç değerleri tanımlanmalıdır. Türbülans denklemlerinin çözülmesi için programa girdi olarak duvarlardaki pürüzlülük katsayısı ve türbülans yoğunluğu da verilmelidir. Bu değerler kullanıcı tarafından yapılan ölçümler ya da literatürdeki çalışmalara dayanarak belirlenir.

Pompalardaki akışın incelenmesinde, türbülans akışının yarattığı zorluğa ilave olarak sınır koşulu olarak kabul edilen çark yüzeylerinin hareketli oluşu, problemi daha da zorlaştırmaktadır. Pompalarda çark genellikle yüksek hızlarda ( $n=1450$  &  $2900$  d/d) dönmektedir. Çarkın dönmesi ile oluşan merkez kaç etkisi momentum denkleminde kaynak terim olarak eklenmektedir.

Değininilmesi gereken diğer bir husus ise piyasada bulunan çoğu hesaplamalı akışkanlar dinamiği programlarının, pompa içindeki akışı bir an ve bir çark pozisyonu için hesaplamasıdır. Ancak, akışın, zamana bağlı olarak değişik çark pozisyonları için analiz edilmesi de mümkündür.

## 5. SONLU HACİMLER YÖNTEMİ

Pompalardaki akışın karmaşıklığı, 3 boyutlu oluşu ve yüksek türbülansından dolayı denklemlerin, ilgili sınır koşulları ile analitik olarak çözül-

muştur. Bununla sonlu elemanlar, sonlu hacimleri ve sonlu elemanlar ile genellenebilir. Bu yöntemlerin üçü de akışkanlar mekaniği için uygulanabilir, ancak yapılan araştırmalar ve edinilen tecrübeler, sonlu hacimler yöntemi ile kolay ve hassas çözümlerin elde edilebileceğini göstermiştir. Sonlu hacimler yönteminin yaygınlaşmasındaki diğer bir etken ise, bu yöntemin kompleks ve eğrisel geometrilerde uygulanabilmesidir [6, 7].

Denklemler çözülmeden önce akış hacminin ve sınır koşullarının belirlenmiş olması gerekmektedir. Akış hacminin net olarak bilinmesi önemli olup, denklemlerin hangi hacim için çözüleceği net olarak bilinmelidir. Pompalardaki akış hacminin çevresini oluşturan yüzeyler, çark, çanak, çark girişi ve çanak çıkışıdır. Sonlu hacimler yönteminde akış hacmi küçük sonlu hacimlere bölünmekte (discretization) ve ilgili denklemler her bir sonlu hacim için ayrı ayrı çözülmektedir. Denklemlerin çözümü için sayısal yöntemlere ve gelişmiş bilgisayar programlarına ihtiyaç vardır. Her ne kadar akademik ortamlardaki araştırmalar için, sonlu hacimlere dayalı programlar araştırmacılar tarafından bizzat yazılıyorsa da sanayide hazır programların kullanılması daha ekonomik ve verimlidir.

Pompalarda 3 boyutlu olan akış hacminin düz elemanlara bölünebilecek şekilde hazırlanması gerekir. Akış hacmini oluştururken olabildi-

ğince etkisi küçük sivri yüzeylerden kaçınılmalıdır. Örneğin bir pompada, çark ile sızdırmazlık bileziği arasındaki boşluk hacimlere bölünemeyecek kadar küçüktür ve etkisi de çok az olduğundan modellenmesine gerek yoktur. Akış hacminin bölünmesi sırasında, basınç ve hız dağılımının hassas olarak istendiği bölgelerde daha küçük hacimler kullanılmalıdır.

Şekil-2'de santrifüj bir pompa çanağının ve çarkının akış hacimleri gösterilmektedir. Çanak akış hacminin yan yüzeyleri katı yüzeyler, alt ve üst yüzeyleri ise açık yüzeyler olup, akışın giriş ve çıkış yapmasını sağlamaktadır. Çark akış hacminde alt bölümler giriş, yan yüzeyler ise çıkış olup kalan yüzeyler ise katı yüzeylerdir. Akış hacimlerinin ortasında bulunan delik mili, ve yarıklar ise kanatları temsil etmektedir. Görüldüğü gibi akış hacmi üçgensel sonlu hacimlere bölünmüştür. Hız ve basınç değişiminin yüksek olduğu ca-

Bir akışının incelenmesinde, katı yüzeylerinde oluşan sınır tabakaya önem verilmelidir. Sınır tabakanın göz ardı edilmesi, hem yanlış hız dağılımının elde edilmesi hem de katı yüzeyindeki hız değişimine göre hesaplanan gerilmeler, sürtünme katsayısı ve tork değerinin yanlış bulunmasına neden olmaktadır. Daha önce de belirtildiği gibi hız değişiminin yüksek olduğu katı yüzeylerine yakın bölgelerde daha yoğun ve sınır tabakanın akışına uygun bölmeler yapılmalıdır.

## 6- DENKLEMLERİN ÇÖZÜMÜ

Akış hacmini sonlu hacimlere böldükten sonra elde edilen sayısal ağ, asıl çözücü programa aktarılır. Daha sonra sınır koşullarının değerleri girilir ve ara yüzeyler eşlenir. Sonlu hacimler yönteminde, denklemlerin çözülmesi için çeşitli yöntemler geliştirilmiştir (simple, simpler, simplec vb.) Kullanılan vazılıma bağlı olarak program

lar, hız ve basınç değişimini yarıdenarlıya yakın kanat yüzeylerinde sınır tabaka tanımlanmış, bu parametrelerdeki değişimi hesaplayabilmek için küçük sonlu hacimler kullanılmıştır.

Her ne kadar küçük sonlu hacimlerin kullanılması daha hassas çözümün elde edilmesini sağlasa da, akış hacminin gereğinden fazla sayıda sonlu hacimlere bölünmesi bilgisayar kapasitesini zorlamakta ve analiz zamanını uzatmaktadır. Uygun bölme sayısının bulunması için tavsiye edilen yöntem, bölme işlemine öncelikle büyük sonlu hacimler ile başlamak ve analiz sürecinin belirli bir evresinde sonlu hacimlerin küçük olması gereken yerleri tespit edip, sadece o bölgelerdeki hacimleri daha küçük sonlu hacimlere bölmektir.

Akış hacmi bölündükten sonra yüzeylerdeki sınır şartının tipi bilgi olarak programa verilmelidir. Akış hacminin hangi bölgelerinin akışkan, hangi bölgelerinin katı sınırlar ile çevrili olduğu bu aşamada tanımlanır. Hangi yüzeyden akış hacmine akışkan aktığı, hangi yüzeyden akışkanın çıkacağı, akış hacminin duvar yüzeyleri ve ara yüzeyler bilgi olarak programa bu aşamada verilmektedir.

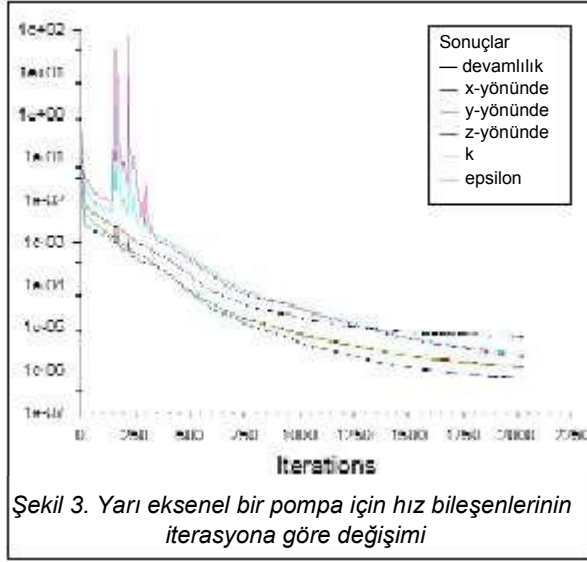
TESİSAT MÜHENDİSLİĞİ DERGİSİ, Sayı 91, 2006

nin değerindeki maksimum fark kullanıcı tarafından belirlenen değerden daha küçük olduğunda çözüm yakınsamış kabul edilir ve sonuçlar değerlendirilmeye alınır. Şekil -3'te yarı eksenel bir pompaya ait akış hızına bağlı parametrelerin (X,Y ve Z yönündeki hız vektörlerinin değerleri, süreklilik, türbülans kinetik enerjisi ve türbülans yayılımı), iterasyonlara göre değişimini göstermektedir. Görüldüğü gibi iterasyon arttıkça ardışık iterasyonlar arasında değişim azalmakta ve program yakınsamaktadır.

Hesaplama akışkanlar dinamiği için yazılmış programları kullanmak eğitim ve uzmanlık ister. Kullanıcının, programın çözdüğü denklemler ve akışkanlar dinamiği teorisi hakkında bilgi sahibi olması gerekir. Programın girdileri ne kadar doğru yapılırsa ve çözüm yöntemleri ne kadar doğru seçilirse sonuca o kadar yakınlaşılar. Hangi bölgelere küçük sonlu hacimler konulması gerektiğini belirlemek yine uzmanlık ve tecrübe gerektirir. Deneyimli bir kullanıcı çözüm sırasında çıkan problemleri başında tahmin edip gerekli önlemleri programı çalıştırmadan önce alır. Devamlı de

venin tanımlanması yazılmalıdır. Program, bir veya birden fazla çözüm yöntemi sunabilir. Çözümün elde edilebilmesi için, çözücü yöntem seçilir ve problem iklendirildikten sonra iterasyona başlanır [7].

Her iterasyonda bilgisayar programı, süreklilik momentum ve türbülans denklemlerini sayısal ağda bulunan bütün sonlu hacimler için çözer. Ardışık iterasyonlar arasında elde edilen basınç, hız veya debi gibi akışa bağlı olan bir parametre



Şekil 3. Yarı eksenel bir pompa için hız bileşenlerinin iterasyona göre değişimi

51

- Gereklili ise önce yüzeylerden başlayarak akış hacminin sonlu hacimlere bölünmesi,
- Oluşturulan sonlu hacimlerin kalitesinin kontrolünün yapılması
- Her bir yüzey için sınır tiplerinin tanımlanması,
- Oluşturulan akış hacimlerinin tiplerinin tanımlanması,
- Oluşturulan sayısal ağın asıl çözücüye aktarılması,
- Daha önce tipleri tanımlanan sınır koşullarının ve programın istediği diğer parametrelerin sayısal değerlerinin verilmesi,
- Çözüm yönteminin ve türbülans modelinin belirlenmesi,
- Yakınsama kriterinin belirlenmesi,
- Çözümün iklendirilmesi,
- İterasyona başlanması.

Daha önce de belirtildiği gibi, bilgisayara aktarılan girdiler, pompanın çalıştığı koşullara uygun ise ve akış hacmi düzgün bir şekilde sonlu hacimlere bölündüyse, program kullanıcı tarafından belirtilen yakınsama kriterini sağladığında durmaktadır. Ancak herhangi bir nedenle girdilerde yanlış

ğışık projeler yapan ve hesaplamalı akışkanlar yöntemlerini kullanan bir kullanıcının doğru sonuçta ulaşabilmesi için yaygın olarak kullanılan yöntemleri bilmesi gerekir.

Genel olarak pompalarda, sonlu hacimlerin kullanılmasında aşağıdaki aşamalar takip edilmelidir:

- Pompanın dizaynı yapılarak 3 boyutlu katı modelin oluşturulması,
- Bu katı modelden faydalanarak akış hacminin hazırlanması,
- Birden fazla akış hacminden oluşan durumlarda, akış hacimlerinin ayrı ayrı hazırlanması ve birbirine monte edilmesi,
- Hız değişimlerinin yüksek olduğu katı yüzeylerinde sınır tabaka fonksiyonunun tanımlanması,
- Akışın önemli bölgelerinde küçük sonlu hacimler, bu bölgelerden uzaklaştıkça büyümesini sağlayan boyut fonksiyonlarının tanımlanması,

lık varsa veya bölünme işlemi hatalı yapıldı ise program yakınsamaz veya yanlış sonuç verir. Bu durumda problemi ve girdilerin tekrar gözden geçirilip, hataların bulunması gerekir.

Hesaplamalı akışkanlar mekaniğinde elde edilen çözüm, sayısal ağa veya başka bir deyişle sonlu hacimlerin sayısına çok bağlıdır. Sonlu hacimlerin sayısı ve boyutu problemin fiziği ve sınır koşullarına bağlıdır. Hız ve basınç değişiminin büyük olduğu akış problemlerinde, doğru sonuç alabilmek için çok sayıda sonlu hacim kullanmak gerekir. Sonlu hacim sayısı deneme yanılma yöntemi ile bulunmaktadır. Genellikle bir problemde birden fazla sayısal ağ için sonuç elde edilmekte ve sonuç sayısal ağ ve sonlu hacimlerin sayısından bağımsız hale getirilmektedir.

Hesaplamalı akışkanlar dinamiğinin zorluklarından birisi ise bilgisayarın çalışma süresidir. Çalışma süresi kullanılan sonlu hacimlerin sayısına

bağlıdır. Sayı arttıkça çalışma süresi de artmaktadır. Örneğin karışık akışlı bir pompa kademesinin analizinde 881084 adet sonlu hacim için P4 3.0 MHz bir bilgisayarda bir iterasyonu 12.15 sn iken bu sayı eleman sayısı 1529325 olduğunda aynı bilgisayarda iterasyon zamanı 19.93 sn olmaktadır, yani 64% artmaktadır.

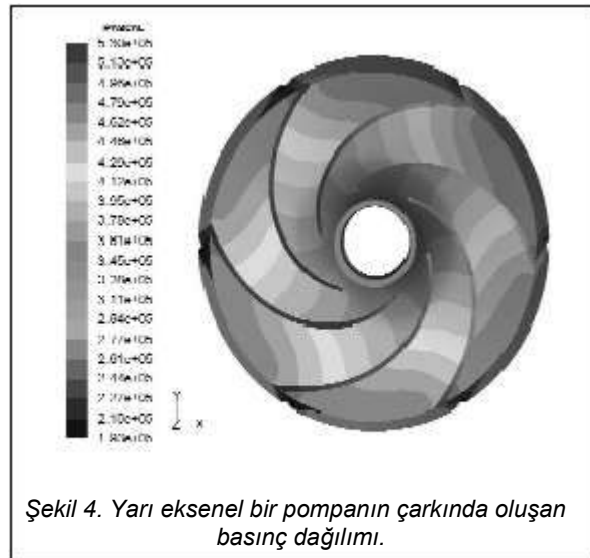
## 7. HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ VE POMPA TASARIMINA SAĞLADIĞI OLANAKLAR

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği kullanılarak, bir pompadaki akışın doğru olarak analiz edilmesi, aşağıdaki verileri tasarımcıya sağlamaktadır:

1. Pompa içindeki hız ve basınç dağılımları,
2. Çark ve difüzör yüzeylerindeki basınç dağılımı,
3. Kanat ve çark üzerine uygulanan yük dağılımı,
4. Akışkan ile katı yüzeyler arasındaki sürtünme enerji kaybı,
5. Akış içindeki eşbasınç ve eş hız eğrileri,
6. Akıştaki düzensizlikler ve ters akışlar,
7. Pompanın sağladığı debi, basma yüksekliği, gereken tork ve verim,
8. Pompa girişindeki kavitasyonun incelenmesi ve kavitasyon parametrelerinin saptanması,
9. Akım iplikçiklerinin yörüngesi ve akıştaki bulgular,

bilgisayar ortamında görülebilmekte, akış hakkında zorlanmadan yorum yapılmasını sağlamaktadır.

Pompalarda hız dağılımının bilinmesi ile çark ve kanat yüzeylerindeki akıştan dolayı oluşan gerilmeler hesaplanabilir. Yüzeyde oluşan gerilmeler ve uygulanan basınçtan faydalanarak çark ve kanat yüzeylerine uygulanan kuvvetler bulunabilir.



Şekil 4. Yarı eksenel bir pompanın çarkında oluşan basınç dağılımı.

nir. Bu bilgiler çark ve çanak malzemesinin seçiminin ve kalınlıkların hesaplanması için kullanılabilmektedir. Ayrıca çark yüzeyinde oluşan gerilmeler

Hesaplamalı akışkanlar dinamiğinin sağladığı en büyük avantaj pompayı imal etmeden testlerin sanal ortamda hızlı bir şekilde yapılmasıdır. Bu da hem maliyet hem de süre açısından büyük tasarruf sağlamaktadır. Bu yöntemin sağladığı diğer bir avantaj ise, elde edilen sonuçların görsel olarak bilgisayar ortamında sunulmasıdır. Pratikte deneysel yöntemler ile izlenemeyen akışlar, hesaplamalı akışkanlar yöntemi kullanılarak rahatlıkla görülebilir. Pompanın içindeki en uç noktalarda bile akışı izlemek ve incelemek mümkündür. Deneysel yöntemler ile elde edilmesi oldukça zor olan çark ve çanak yüzeylerindeki basınç dağılımları veya pompa içindeki akış düzensizlikleri hesaplamalı akışkanlar dinamiği sayesinde elde edilebilmekte ve net bir şekilde renkli olarak

yardımı ile tasarımcı için önem taşıyan tork değeri de hesaplanabilir. Şüphesiz tork değeri de kullanılarak seçilen mil malzemesi ve çapının kontrol edilmesinde yardımcı olacaktır.

Kanat formu pompanın veriminde önemli rol oynamaktadır. Bu form daha ziyade tasarımcının tecrübesine bağlı olup, ampirik yöntemler kullanılarak tasarlanmaktadır. Pompa imalatına geçilmeden önce hesaplamalı akışkanlar dinamiği analizi ile çark ve çanak kanatlarının etrafında oluşan akışlar gözlemlenebilir. Akışın yönü ve formu tasarımcının istediği şekilde değilse tasarım değişikliğine gidilebilir. Örneğin, kanadın iki yüzeyi arasındaki basınç farkı nedeniyle oluşan geri dönüşler gözlemlenebilir, tasarımcı akışı



Şekil 5. Yarı eksenel bir pompa kademesinde oluşan akım iplikçilikleri.

olmaması durumunda suyun istenilen yörüngenin (çarktan çıkıp çanağa girdiği yörünge) dışında dönüşler yaparak enerjiyi boşa harcamasına neden olmaktadır. Sayısal yöntemler kullanılarak çark ile çanak arasındaki akış incelenerek montaj mesafesi kontrolü yapılabilir.

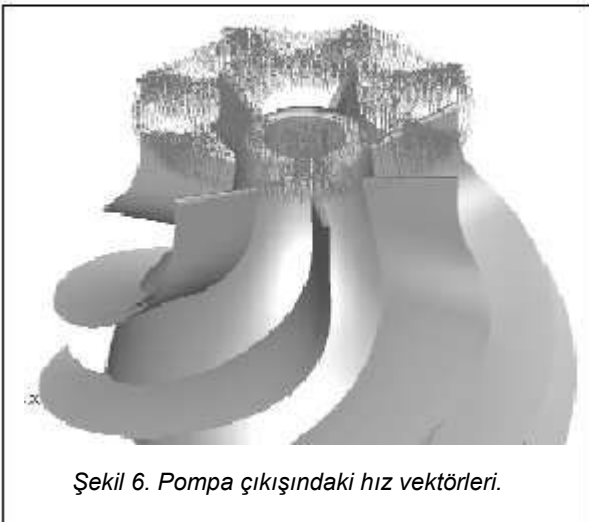
Şekil 5'te santrifüj bir pompanın çark ve çanağında oluşan akım iplikçikleri gösterilmektedir. Akış çoğunlukla kanat formuna paralel olup, boşta dönen ve burulmalı akışlar da mevcuttur.

Şekil 6'da ise yarı eksenel bir pompanın çıkışında hız vektörleri gösterilmiştir. Akış hacminin istenildiği bölgede hız vektörleri ve basınç dağılımları görülebilir. Ayrıca eş basınç, eş hız yüzeyleri veya istenilen değerlerin iki veya üç boyutlu konturları oluşturulabilir.

Çark ve çanağın yüzey pürüzlülüğü pompa verimini etkileyen diğer bir parametredir. Bilgisayar analizi yardımıyla yüzey pürüzlülüğünün verim üzerindeki etkisi incelenip optimize edilebilir.

## 8. SAYISAL ANALİZ SONUÇLARININ DOĞRULANMASI

Sayısal yöntemler ile elde edilen sonuçların doğruluğu birçok parametreye bağlıdır. Bilgisayar giridilerinin veya sınır şartlarının yanlış olması, oluşturulan sayısal ağın problemin fiziğine uygun olmaması, yakınsama kriterinin hatalı olması, kati modelin eksik olması ve benzeri parametreler, bunlardan bazılarıdır. Her ne kadar değişik çö



Şekil 6. Pompa çıkışındaki hız vektörleri.

inceledikten sonra kanadın formunda gerekli değişiklikleri yaparak istenilen koşulları sağlayacak



optimum çark formunu oluşturabilir. Şekil -4 yarı ekstenel bir pompa çarkında basınç dağılımı gösterilmiştir. Görüldüğü gibi kanat yüzeylerindeki basınç artışı kanat boyunca düzgün bir şekilde gerçekleşmiştir. Akım basınç değişimlerinin akış yönüne dik doğrultuda artış göstermesi, akışta dönmelerin, burulmaların olmadığını, difüzyonun istenilen seviyede düzgün olarak gerçekleştiğini gösterir

Çark ile çanak arasındaki mesafe ise genellikle tasarım safhasında düşünülen diğer bir husustur. Çark ile çanak arasındaki mesafenin uygun

zümmler veya çeşitli önlemler alınarak elde edilen sonucun doğruluğundan emin olunmaya çalışılırsa da, sayısal sonuçların pratikteki deneysel sonuçlar ile karşılaştırılması gerekmektedir. Sonuçlar belirli toleranslar dahilinde örtüşüyorsa elde edilen veriler ancak o zaman doğru kabul edilir. Sayısal sonuçların doğrulanması için her zaman deneysel sonuçlara ihtiyaç vardır. Sayısal sonuçlar ile deneysel sonuçların karşılaştırılması kullanıcı için büyük önem taşımaktadır. Karşılaştırılmalarının sonucu kullanıcının analizleri ne kaynak sağlayarak, sonraki analizlerin daha

doğru girdiler ve yöntemlerin uygulanmasını sağlamaktadır.

Burada değinilmesi gereken bir husus ise, sayısal sonuçlar ile deneysel sonuçları karşılaştırma dan önce deneysel sonuçların doğruluğundan emin olunmasıdır. Deneysel sonuçları etkileyen birçok parametre vardır. Deney ölçüm cihazlarının hassasiyeti, deney yöntemi ve benzeri parametreler deney sonucunu etkileyebilir.

## 9. SONUÇ

Pompalar elektrik motoru ile çalışan cihazların toplam harcadığı enerjinin 20%'sini oluştururlar. Bu denli büyük işletme maliyeti olan bu pompaların verimlerdeki ufak bir artış, zaman içinde çok büyük parasal değerlere ulaşır. Özellikle endüstri, içme suyu ve tarımsal sulama gibi şebekelerin işletme maliyetleri göz önüne alındığında, pompa verimi önem kazanmaktadır. Yüksek verimli bir pompanın tasarım yöntemlerinde devir sayısı, debi, basma yüksekliği için uygun kanat formu, kanat sayısı, çark çapı gibi parametreler hesaplanır. Tasarımcı birçok değer sınırlarını bilmesine rağmen, pompa içindeki akışı bilmediğinden literatürdeki çalışmalar ile akış hakkında bilgi sahibi olmaya mecbur kalmaktadır.

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği sayısal yöntemler ile süreklilik, momentum ve enerji denklemlerini çözerek değişik koşullardaki akışkan analizlerini yapmaya yarayan bir yöntemdir. Bu yöntem pompalarda kullanılarak, hız ve basınç dağılımları ve bunlara bağlı birçok verinin elde edilmesini sağlamaktadır. Klasik yöntemlerle belirlenemeyen bu parametreler deneysel ve görsel olarak tasarımcıya sunulmaktadır. Bilgisayarlar yazılımlarının gelişmesi ile oluşturulabilen bu

mayı kolaylaştırmaktadır. Hesaplamalı akışkanlar dinamiği sanal ortamda pompa deneyini yapmakta, prototip üretiminden önce tasarımcının tasarımcıdan emin olmasını sağlamaktadır. Tasarımcı bu sonuçlara dayanarak pompanın istenilen koşullarda çalışması ve veriminin artırılması için tasarımdaki gerekli değişiklikleri yapmaktadır. Bu da dizayn safhasında zaman ve maliyet açısından büyük tasarruf sağlamaktadır.

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği yönteminde elde edilen sonuçların doğruluğu girilen parametrelere ve kullanılan yöntemlere bağlıdır. Kullanıcının sayısal yöntemler ve akışkanlar mekaniği konusunda bilgi birikiminin olması gerekir. Bunlara ilave olarak bilgisayar donanım kapasitesinin yüksek olması analizlerin yüksek çözünürlükte ve hızda olmasını sağlar. Sayısal analizlerin güvenilirliği için elde edilen teorik sonuçlar ile deneysel sonuçlar karşılaştırılmalıdır.

## KAYNAKLAR

- [1] ERTÖZ A. Ö., "Pompalarda Enerji Verimliliği", Tesisat Dergisi, Kasım 2003
- [2] STEPANOFF, A.J., "Centrifugal and Axial Flow Pumps", John Wiley & Sons. Inc., 2nd Edition
- [3] DICMAS, J. L., "Vertical Turbine, Mixed Flow, and Propeller Pumps", McGraw-Hill Book Company,
- [4] FERZIGER J.H., PERIC M. "Computational Methods for Fluid Dynamics", Springer, 3rd Edition
- [5] WISLICENUS, G. F., "Fluid Mechanics of Turbomachinery", Dover Publications Inc, 1964
- [6] VERSTEEG H. K. MALALASEKERA W., "An Introduction to Computational Fluid Dynamics, The Finite Volume Method", Prentice Hall, 1995. "Fluent 6.2 User's Guide", Fluent Inc, Jan

grafiksel sunumlar, akış ile ilgili yorumlama yap - 2005.

TESİSAT MÜHENDİSLİĞİ DERGİSİ, Sayı 91, 2006

55