

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**RADYAL TİPTEKİ BİR ÇAMUR POMPASI
OPTİMİZASYONU VE ANALİZİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mak. Müh. Mehmet Salih CELLEK

Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ
Enstitü Bilim Dalı : ENERJİ
Tez Danışmanı : Doç. Dr. Tahsin ENGİN

Ocak 2013

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**RADYAL TİPTEKİ BİR ÇAMUR POMPASI
OPTİMİZASYONU VE ANALİZİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ


Mak. Müh. Mehmet Salih CELLEK

Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ

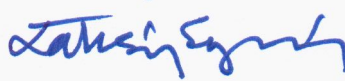
Enstitü Bilim Dalı : ENERJİ

Bu tez 10/01/2013 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.

Prof. Dr. K. Süleyman YİĞİT
Jüri Başkanı



Doç. Dr. Tahsin ENGİN
Üye



Yrd. Doç. Dr. Ünal UYSAL
Üye



TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tez konusunu bana öneren, bu konunun güncelliğinden bahsedip sanayideki önemini anlatarak beni motive eden, yüksek lisans çalışmam için tüm imkânlarını seferber edip tüm araç ve gereç ihtiyacımı karşılayan ve her zaman yanımda olduğunu hissettiren bilgi ve tecrübeleriyle bana yol gösteren değerli hocam Sn. Doç. Dr. Tahsin ENGİN 'e, tez çalışmamı değerlendirip, değerli bilgilerini benimle paylaşan ve tezin oluşumunda katkıları olan Sn. Prof. Dr. Kadri Süleyman YİĞİT ve Yrd. Doç. Dr. Ünal UYSAL hocalarıma, meşakkatli ve sabır isteyen bir o kadar da uzun süren analiz çalışmaları süresince beni cesaretlendirip daha azimli çalışmama vesile olan değerli hocalarım Sn. Yrd. Doç. Dr. İsmail ŞAHİN, Yrd. Doç. Dr. Sedat İRİÇ ve Yrd. Doç. Dr. Yaşar KAHRAMAN 'a, ayrıca tez çalışmamda analizini yaptığım ticari çamur pompasının CAD modelini benimle paylaşan, firmalarında konuk olduğum süre zarfında göstermiş oldukları ilgiden dolayı başta Bülent TÜFEKÇİOĞLU beye ve tüm Tüfekçioğlu Kauçuk Sanayi Şirketi personeline, ayrıca tez çalışmam boyunca bilgilerine başvurduğum çok değerli meslektaşlarım Sn. Yavuz Fatih ÖZTÜRK, İbrahim Halil KUTLAR ve Serdar MERT beylere, doğrudan veya dolaylı olarak bu çalışmaya desteğini veren tüm mesai arkadaşlarıma ve her zaman yanımda olduklarını hissettiğim benim için çok değerli olan aileme teşekkürlerimi sunmayı bir borç bilirim.

Not: Bu tez çalışması 3110368 numaralı ve “ Yüksek Performanslı Santrifüj Çamur Pompasının Tasarımı, Prototip üretimi ve Performans Testleri” konulu TUBİTAK TEYDEP destekli projesi kapsamında Sakarya Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü ile Tüfekçioğlu Kauçuk Sanayi firması arasındaki işbirliği çerçevesinde hazırlanmıştır.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	ii
İÇİNDEKİLER	iii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ	viii
TABLolar LİSTESİ.....	xi
ÖZET.....	xii
SUMMARY.....	xiii
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ.....	1
1.1. Amaç ve Yöntem.....	2
1.2. Tezin İçeriği.....	3
BÖLÜM 2.	
LİTERATÜR.....	4
BÖLÜM 3.	
ÇAMUR ve ÇAMUR POMPALARI	9
3.1. Çamur.....	9
3.1.1. Çamur akışı türleri.....	10
3.1.2. Çamurun iletilmesi.....	12
3.2. Çamur Pompaları.....	13
3.2.1. Santrifüj (radial) çamur pompaları.....	13
3.2.2. Radyal çamur pompası bileşenleri.....	15
3.2.2.1. Çark.....	17
3.2.2.2. Mil.....	18

3.2.2.3. Salmastra.....	19
3.2.2.4. Salyangoz.....	19
3.2.3. Hacimsel çamur pompaları.....	20
3.2.3.1. Pistonlu çamur pompaları.....	21
3.2.3.2. Diyaframlı çamur pompaları.....	21
3.2.3.3. Peristaltik çamur pompaları.....	22
3.2.3.4. Döner loblu çamur pompaları.....	23
BÖLÜM 4.	
POMPA PERFORMANS EĞRİLERİ	24
4.1. Pompa Performansı Eğrileri.....	24
4.1.1. Pompa performans değerlerinin hesaplanması.....	25
4.2. Çamur Pompası Performansına Etki Eden Faktörler.....	26
4.3. Çamur Pompasının Katı-Sıvı İletmesi Durumunda Pompa Performans Değerlerinin Belirlenmesi.....	27
BÖLÜM 5.	
ÇAMUR POMPASI MODELİ ve ÇARKLAR	29
5.1. Çamur Pompası CAD Modeli.....	29
5.2. Alternatif Çark Modelleri.....	30
BÖLÜM 6.	
HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ ANALİZİ	31
6.1. HAD Modeli.....	31
6.1.1. Katı model.....	32
6.1.1. Sonlu hacim ağı.....	32
6.1.3. $k - \varepsilon$ türbülans modeli.....	34
6.1.4. Sınır şartları ve kabuller.....	35
BÖLÜM 7.	
ANALİZ SONUÇLARI ve KARŞILAŞTIRMALAR	37
7.1. Giriş.....	37

7.2. Çark Optimizasyonu.....	37
7.2.1. Basınç dağılımları	38
7.2.2. Akım çizgileri	43
7.2.3. Hız vektörleri.	46
7.3. Salyangoz Optimizasyonu.....	49
7.4. Radyal Çamur Pompasının Su İletmesi Durumunda Pompa Performans Eğrileri.....	50
7.5. Radyal Çamur Pompasının Su ve Su-Kum İletmesi Durumunda Pompa Performans Eğrilerinin Karşılaştırılması.....	56
7.5.1. Kum-A'nın farklı konsantrasyonlarda iletilmesi durumunda pompa performans eğrileri.....	57
7.5.2. Kum-B'nin farklı konsantrasyonlarda iletilmesi durumunda pompa performans eğrileri	58
7.5.3. Kum-C'nin farklı konsantrasyonlarda iletilmesi durumunda pompa performans eğrileri.....	59
7.5.4. Kum-A ve kum-B'nin % 40 konsantrasyonda kısma ve verim eğrilerinin karşılaştırılması.....	60
BÖLÜM 8.	
SONUÇLAR ve ÖNERİLER.....	62
KAYNAKLAR.....	67
ÖZGEÇMİŞ.....	71

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

b_1	: Kanat giriş genişliği (mm)
b_2	: Kanat çıkış genişliği (mm)
$C_{1\varepsilon}$: $k - \varepsilon$ türbülans modelinde kullanılan sabit katsayı (1.44)
C_2	: $k - \varepsilon$ türbülans modelinde kullanılan sabit katsayı (1.9)
C_W	: Kütleli konsantrasyon (%)
C_μ	: $k - \varepsilon$ türbülans modelinde hıza bağlı bir fonksiyon
C	: Hacimsel konsantrasyon (%)
d_w	: Ağırlıklı ortalama tanecik çapı (mm)
d_i	: İki elek açıklıklarının ortalaması (mm)
d_1	: Kanat başlangıcı dairesel çap (mm)
d_2	: Çark dış dairesel çapı (mm)
d_{50}	: Kütle ortalama çapı (mm)
D_1	: Pompa girişi dairesel çap (mm)
D_2	: Salyangoz çıkışı dairesel çap (mm)
g	: Yerçekimi ivmesi, (m/s^2)
H	: Basma yüksekliği veya kayıp, m
k	: Türbülans kinetik enerjisi, (m^2/s^2)
k_1	: Sabit katsayı
K_H	: Performans düşüm faktörü
K_η	: Performans düşüm faktörü
\dot{m}	: Kütleli debi (kg/s)
n	: Pompa devir sayısı, d/d; Elek sayısı
n_q	: Özgül hız
P	: Basınç, N/m^2
z	: Kanat sayısı, Yükseklik farkı (m)
Q	: Hacimsel debi (m^3/s)

ω	: Açısal hız (rad/s)
ρ	: Yoğunluk (kg/m^3)
β_1	: Kanat giriş açısı ($^\circ$)
β_2	: Kanat çıkış açısı ($^\circ$)
ε	: Türbülans dağılım oranı, (m^2/s^3)
ΔP	: Basınç farkı (Pa)
η	: Genel verim
H_S	: Karışımın durumunda basma yüksekliği (m)
H_w	: Suyun basma yüksekliği (m)
η_S	: Karışım durumunda pompa verimi
η_w	: Su iletilmesi durumunda pompa verimi
μ_t	: Türbülans viskozite büyüklüğü

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 3.1.	Homojen ve pseudo homojen çamur akışı.....	11
Şekil 3.2.	Heterojen ve tabakalı çamur karışımı.....	11
Şekil 3.3.	Çamurun taşınması.....	12
Şekil 3.4.	Dikey ve yatay santrifüj çamur pompaları.....	14
Şekil 3.5.	Radyal bir çamur pompasının temel bileşenleri.....	16
Şekil 3.6.	Ticari bir çamur pompasına ait kesit resmi.....	17
Şekil 3.7.	Üç farklı pompa çarkı tasarımı.....	18
Şekil 3.8.	Metso çamur pompası üreticisi firmanın kullandığı iki farklı salmastra.....	19
Şekil 3.9.	Çamur pompası için kullanılan farklı salyangoz tasarımları.....	20
Şekil 3.10.	Pistonlu çamur pompası.....	21
Şekil 3.11.	Diyaframlı çamur pompası.....	22
Şekil 3.12.	Peristaltik çamur pompası.....	23
Şekil 3.13.	Döner loblu çamur pompası.....	23
Şekil 4.1.	Bir santrifüj pompanın debisine bağlı olarak sabit dönme sayısında elde edilen kısma, verim ve güç eğrileri.....	24
Şekil 5.1.	Çamur pompası salyangozunun CAD tasarımı.....	29
Şekil 5.2.	Model radyal çamur pompası çarkına ait CAD tasarımı.....	29
Şekil 5.3.	2 kanatlı olarak oluşturulmuş çarklar.....	30
Şekil 5.4.	3, 4 ve 5 kanatlı olarak oluşturulmuş çarklar.....	30
Şekil 6.1.	Üç ana bölümden oluşan çamur pompası.....	31
Şekil 6.2.	Çamur pompasına ait sonlu hacim ağı.....	33
Şekil 6.3.	Kanatları çıkarılmış çark hacmine ait sonu hacim ağı.....	33
Şekil 7.1.	Akışı görselleştirmek için üst disk görünmez kılınan model çamur pompası çarkı.....	38

Şekil 7.2.	2 Kanatlı (2K) çamur pompası ve çarkında oluşan basınç dağılımı.....	39
Şekil 7.3.	3 Kanatlı (3K) çamur pompası ve çarkında oluşan basınç dağılımı.....	40
Şekil 7.4.	4 Kanatlı (4K) çamur pompası ve çarkında oluşan basınç dağılımı.....	40
Şekil 7.5.	5 Kanatlı (5K) çamur pompası ve çarkında oluşan basınç dağılımı.....	41
Şekil 7.6.	Uzun kanatlı çark (2K) durumunda pompa ve çarkında oluşan basınç dağılımı.....	41
Şekil 7.7.	Uzun kanatlı çark (3K) durumunda pompa ve çarkında oluşan basınç dağılımı.....	42
Şekil 7.8.	Ara kanatçık ekli (2K) pompa ve çarkında oluşan basınç dağılımı	42
Şekil 7.9.	Ara kanatçık ekli (3K) pompa çarkında oluşan basınç dağılımı...	43
Şekil 7.10.	2 ve 3 kanatlı çamur pompalarında oluşan akım çizgileri.....	44
Şekil 7.11.	4 ve 5 kanatlı çamur pompalarında oluşan akım çizgileri.....	44
Şekil 7.12.	Uzun kanatlı (2K ve 3K) çamur pompalarında oluşan akım çizgileri.....	45
Şekil 7.13.	Ara kanatçık ekli (2K ve 3K) çamur pompalarında oluşan akım çizgileri.....	46
Şekil 7.14.	2 ve 3 kanatlı çarklarda oluşan hız vektörleri.....	47
Şekil 7.15.	3 ve 4 kanatlı çarklarda oluşan hız vektörleri.....	48
Şekil 7.16.	Uzun kanatlı 2K ve 3K çarklarda oluşan hız vektörleri.....	48
Şekil 7.17.	Ara kanatçık ekli 2K ve 3K çarklarda oluşan hız vektörleri.....	48
Şekil 7.18.	Dil bölgesinin yeniden tasarlanması durumunda pompa ve çarkında basınç dağılımı.....	49
Şekil 7.19.	Dil bölgesinin yeniden tasarlanması durumunda pompa ve çarkında oluşan akım çizgileri ve hız vektörleri.....	50
Şekil 7.20	978 d/d 'da HAD ile analizi yapılmış 3 kanatlı model pompanın kısma eğrisi ile firma mevcut eğrisinin karşılaştırılması	50

Şekil 7.21.	2 kanatlı çarkta farklı kanat profillerinde yük - debi eğrileri.....	51
Şekil 7.22.	2 kanatlı çarkta farklı kanat profillerinde mil gücü - debi eğrileri..	52
Şekil 7.23.	2 kanatlı çarkta farklı kanat profillerinde verim - debi eğrileri.....	53
Şekil 7.24.	2, 3, 4 ve 5 kanatlı radyal çamur pompalarının kısma eğrilerinin karşılaştırılması.....	54
Şekil 7.25.	2, 3, 4 ve 5 kanatlı çarklara ait mil gücü - debi eğrileri.....	54
Şekil 7.26.	2, 3, 4 ve 5 kanatlı çarklara ait verim - debi eğrileri.....	55
Şekil 7.27.	3 Kanatlı model pompanın kısma eğrisi ile K_1 korelasyonu yardımıyla hesaplanan Kum-A'nın farklı konsantrasyonlardaki kısma eğrilerinin karşılaştırılması.....	57
Şekil 7.28.	3 Kanatlı model pompanın verim eğrisi ile K_1 korelasyonu yardımıyla hesaplanan Kum-A'nın farklı konsantrasyonlardaki verim eğrilerinin karşılaştırılması.....	57
Şekil 7.29.	3 Kanatlı model pompanın kısma eğrisi ile K_1 korelasyonu yardımıyla hesaplanan Kum-B'nin farklı konsantrasyonlardaki kısma eğrilerinin karşılaştırılması.....	58
Şekil 7.30.	3 Kanatlı model pompanın verim eğrisi ile K_1 korelasyonu yardımıyla hesaplanan Kum-B'nin farklı konsantrasyonlardaki verim eğrilerinin karşılaştırılması.....	58
Şekil 7.31.	3 Kanatlı model pompanın kısma eğrisi ile K_1 korelasyonu yardımıyla hesaplanan Kum-C'nin farklı konsantrasyonlardaki kısma eğrilerinin karşılaştırılması.....	59
Şekil 7.32.	3 Kanatlı model pompanın verim eğrisi ile K_1 korelasyonu yardımıyla hesaplanan Kum-C'nin farklı konsantrasyonlardaki verim eğrilerinin karşılaştırılması.....	59
Şekil 7.33.	3 Kanatlı model pompanın kısma eğrisi ile K_1 korelasyonu yardımıyla hesaplanan Kum-A ve Kum-B'nin % 40 konsantrasyondaki kısma eğrilerinin karşılaştırılması.....	60
Şekil 7.34.	3 Kanatlı model pompanın verim eğrisi ile K_1 korelasyonu yardımıyla hesaplanan Kum-A, ve Kum-B'nin % 40 konsantrasyondaki verim eğrilerinin karşılaştırılması.....	61

TABLolar LİSTESİ

Tablo 5.1.	Tasarımı yapılan radyal çamur pompasının temel boyutları...	30
Tablo 6.1.	Farklı mesh (ağ) sayılarında performans değerlerinin değişimi.....	33
Tablo 7.1.	Kat-sıvı iletiminde kullanılan katı madde ve zellikleri.....	56

ÖZET

Anahtar kelimeler: Radyal çamur pompası, Hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD), Optimizasyon, Pompa performansı, Kapalı çark

Pompalarda akış üç boyutlu, oldukça karışık ve yüksek derecede türbülanslıdır. Klasik tasarım metodolojisi bir boyutlu akış yaklaşımı esasına dayanmaktadır. Bu nedenle Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği temel tasarımdan sonra çark optimizasyonu için çok önemli bir araçtır.

Bu tezde kapalı çarklı radyal ticari bir çamur pompasının HAD yardımıyla optimizasyonu yapılmıştır. Optimizasyon çalışması için kanat sayısı, kanat açısı, salyangoz dili ve ara kanatçık birer parametre olarak belirlenmiştir. Uzun süren analiz çalışmaları için HAD yazılımı olan Fluent 14 kullanılmıştır. Optimizasyon çalışması sonucu mevcut pompa performansı ilk duruma göre %10 artırılmıştır. Son olarak ticari çamur pompasının farklı çamurları iletmesi durumunda performansı literatürde bilinen Engin ve Gür korelasyonu ile tahmin edilmiştir.

OPTIMIZATION AND ANALYSIS OF A CENTRIFUGAL SLURRY PUMP

SUMMARY

Keywords: Centrifugal slurry pump, Computational fluid dynamics (CFD), Optimization, Pump performance, Closed type impeller

Three dimensional flows in the pumps are quite complicated due to high degree of turbulence. The classical design methodology is basically based on one-dimensional flow approximation. Therefore Computational Fluid Dynamics is a crucial tool to optimize an impeller after basic design.

In this thesis, a commercial centrifugal slurry pump with shrouded impeller has been optimized using CFD. The number of blades, blade angles, scroll tongue, and use of secondary blades have been considered as the parameters to be optimized. Fluent 14 has been employed as the CFD code for this long-run study. The optimization results showed that the existing pump efficiency could be improved at least 10%. Furthermore the performance of the commercial slurry pump has been predicted for different kinds of slurries using correlation proposed by Engin and Gur.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Pompalar akışkana enerji verip basıncını artırarak bir noktadan başka bir noktaya iletilmesini sağlayan makinalardır. Radyal (santrifüj) pompalar sıvı ve sıvı-katı iletiminde yaygın olarak kullanılan bir türbo makina elemanıdır. Radyal tipli çamur pompaları da iki fazlı akış transferinde yüksek debi, nispeten düşük maliyet, bakım ve onarımın kolay olması gibi avantajlarından dolayı katı-sıvı transferinde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bu pompaların imalatına geçmeden önce sıvıyla iletilecek katı maddenin özellikleri ve etkileri belirlenip imalat safhasında göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Aksi takdirde, aşınmayla birlikte sistem üzerinde uyumsuzlukların ortaya çıkması, pompa sistem veriminin düşmesi, maliyet ve bakım masraflarının artması söz konusu olabilir [1].

Önceleri su pompası kullanılarak katı-sıvı karışımı bir noktadan bir noktaya transfer ediliyorken, pompaların verimsiz ve hızlı bir şekilde aşınmaya maruz kalması ayrıca çalışma şartlarına bağlı olarak ihtiyaçların giderek şekillenmesi yeni arayışları ve yeni tasarımları beraberinde getirmiştir. Yeni tasarımlardan biri de çamur pompaları olmuştur. Kalın kanatları ve kendine özgü salyangoz tasarımı ile maden ocaklarında kömür ve minerallerin iletilmesinde, termik santrallerde kimyasal tasfiye, inşaat alanında biriken çamurlu suyun uzaklaştırılmasında, gıda sektöründe, nehir ve göl yataklarının temizlenmesinde, endüstriyel tesislerde uçucu külün uzaklaştırılmasında ve kâğıt hamurunun nakledilmesi gibi birçok alanda ihtiyaçlara karşılık vermektedir.

Uygulamada pompa seçimi ya geçmiş tecrübelerle dayanır ya da su ile yapılan deneyler sonucunda elde edilen pompa performans eğrileri yardımıyla yapılır [1]. Katı-sıvı transferi durumunda çamur pompalarının seçiminde ise taşınacak katı maddenin bir takım özelliklerine bağlı olarak deneysel çalışmalarla elde edilmiş korelasyonlar ve onun sayesinde oluşturulan performans eğrilerinden yararlanılır.

Çarklar su pompalarında olduğu gibi çamur pompalarında da pompa performansına etki eden en önemli pompa bileşenidir. Çamur pompalarda kullanılan çarklar, kanat üzerini örten disk yapısına göre isimlendirilir. Açık çark, yarı açık çark ve kapalı çark olarak isimlendirilen bu çarklar sıvı ve katı-sıvı iletimine bağlı olarak farklı şekillerde tasarlanabilmektedir. Kapalı çarklarda yoğun disk sürtünmelerinden kaynaklanan verim düşmesi, yarı açık çarkta ise aralık kayıplarından dolayı meydana gelmektedir. Çamur pompalarında kapalı çarklar yaygın bir şekilde kullanılmaktadır ve genellikle geriye eğimli kanatlarla birlikte tercih edilmektedir.

Son zamanlarda teknolojinin ilerlemesiyle bilgisayar destekli tasarım ve HAD uygulamaları sayesinde prototip üretimine gerek duyulmadan sonsuz sayıda deney imkanı doğmuştur. Böylece hem zaman hem de maliyet açısından tasarım süresi daha avantajlı bir hal almıştır [2].

1.1. Amaç ve Yöntem

Su pompalarının performansını artırmaya yönelik birçok çalışma olmasına rağmen çamur pompaları için aynı şeyi söylemek mümkün değildir. Çok kısıtlı sayıda bulunan çalışmalarda kullanılan pompaların da genelde su pompaları olduğu görülmüştür. Bu çalışmada ise katı-sıvı iletiminde kullanılan 3 kanatlı kapalı çarklı radyal ticari bir çamur pompasının Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yardımıyla akış analizi yapılmış ve elde edilen verilerle oluşturulan yük eğrisi firmaya ait model çamur pompasının mevcut yük eğrisiyle karşılaştırılıp aralarındaki benzerlik görülmüştür. Daha sonra pompa performansını belirleyen en önemli bileşen durumundaki pompa çarkını HAD yardımıyla optimize etmek için, çark üzerinde kanat sayısının, kanat uzunluğunun ve ara kanatçık kullanılmasıyla mevcut çarka alternatifler oluşturulmuştur. Ayrıca, mevcut salyangozun performans kaybına neden olan dil bölgesi yeniden tasarlanarak salyangoz verimi arttırılmıştır. Yapılan çalışmayla ilgili detaylar ilgili bölümlerde yer almaktadır. Son olarak model çamur pompasının farklı konsantrasyonlarda su-kum iletimi durumunda pompa performans eğrileri literatürde bilinen Engin ve Gür korelasyonu ile tahmin edilmiştir.

1.2. Tezin İçeriği

8 bölümünden oluşan bu tezin giriş bölümünde, bu çalışmanın amacı ve yönteminin yanında tez içeriğine kısaca yer verilmiştir. İkinci bölümde, bu çalışma için referans teşkil edebilecek literatür sunulmuştur. Üçüncü bölümde, çamur ve çamur türlerine kısaca değinilmiş çamur iletiminde kullanılan pompalar hakkında genel bilgiler verilmiştir. Dördüncü bölümde pompa performans eğrilerine değinilmiş ve bu eğrilerin oluşturulması için gerekli formüller gösterilmiştir. Beşinci bölümde model çamur pompasının CAD modeli ve alternatif çarklardan bahsedilmiştir. Altıncı bölümde çamur pompa analizi için kullanılan HAD yönteminden bahsedilmiştir. Yedinci bölümde, HAD analiz sonuçları verilmiş sonrasında ise tek ve çift faz akış durumlarında pompa performans eğrileri karşılaştırılmıştır. Son kısımda ise bu çalışmadan çıkan sonuç ile gelecekte bu alanda yapılacak benzer araştırmalara yönelik tavsiyelerde bulunulmuştur.

BÖLÜM 2. LİTERATÜR

Türbo makinalarda akışın üç boyutlu, yüksek derecede türbülanslı olması, yüksek mertebeden sürtünmelerin varlığı, akış kopmaları ve ikincil akışların ortaya çıkması, tasarımın birçok parametreye bağlı olması gibi durumlar turbo makinaların performansını tam olarak bilinmemesine neden olduğu gibi tasarım aşamasını zorlaştıran etkenlerdir. Bu durum araştırmacıların uzun yıllardır üzerinde çalıştığı bir alan olarak karşımıza çıkmaktadır. Son zamanlarda teknolojinin gelişimine paralel olarak turbo makinalardaki bu karmaşık akışı çeşitli tekniklerle inceleyebilme imkânı doğmuştur. Adkins ve Simith'in, Gallimore ve Cumpsty'nin ortaya koydukları iki boyutlu akış analiz yaklaşımı, Rai'nin ve Lakshminaraya'nın Reynolds-ortalama Navier-Stokes (RANS) tanımı gibi birçok model ve simülasyon tekniğinin ortaya çıkması özellikle 80'li yıllardan sonra ortaya çıkmıştır [3].

Santrifüj pompaların karakteristik eğrileri akışkanın sadece su olması veya çift fazlı olması yani suyun yanında katı partikül olması durumlarında birbirinden farklı davranış göstermektedir. Eğer sıvı akışkanla birlikte katı madde iletimi (çamur) söz konusu ise taşıyıcı akışkanla birlikte akışkan içerisindeki katı maddenin özellikleri ve etkileri bilinmesi gerekir. Bu dikkate alınmadığı takdirde pompa ile tesis arasında uyum sorunu ortaya çıkması muhtemeldir. Bu nedenle katı maddelerin iletilmesi durumunda bir pompanın basma yüksekliği ve verim hakkında doğru bir tahmin yürütülmesi çamur iletim sistemleri için çok önemlidir. Ancak çamur iletim sistemlerinin büyük bir kısmında pompa performansı su ile yapılan deneylere dayanır. Bu durum sistemin elverişsiz kullanılmasını ve de başarısız sonuçların alınmasına neden olmaktadır. Bu konu üzerinde birçok araştırma yapılmış ve bu araştırmalar devam etmektedir.

Stepanoff [4] geçmişte yapılan çalışmalardan hacimsel olarak % 32 konsantrasyona kadar, katı partikül konsantrasyonunu ve boyutunun çalışma noktasında verime olan

etkisini yorumlayarak derlemiştir. Bu çalışma sıvı-katı iletiminde çalışan radyal bir pompa performansı üzerinde yapılmış en kapsamlı çalışma olarak bilinmektedir.

Radyal çamur pompalarının performanslarını doğru tahmin etmek için bazı araştırmacılar çeşitli teorik ve ampirik korelasyonlar önermiştir.

Vocadlo ve arkadaşları [5], Cave [6], Burgess ve Reizes, [7], Sellgren[8], Gahlot ve arkadaşları [9], Engin ve Gür [10], Kazım ve arkadaşları [11] her biri ayrı ayrı farklı katı maddelerle, farklı boyut ve konsantrasyonlarda pompa performanslarını test etmişler. Bununla birlikte araştırmacıların her biri yaptıkları çalışma sonucunda pompa performansına etki eden katı madde değişkenlerine bağlı olarak korelasyonlar önermişlerdir.

Öte yandan akış analizini görselleştirmeyi amaçlayan yeni yöntem olan holografik PIV (particle image velocimetry) tekniği 80'li yıllardan itibaren kullanılmaya başlandı. Adrian bu tekniği kullanarak iki boyutlu hız alanını tanımlamayı başarırken, Barnhart ve arkadaşları ile Zhang ve arkadaşları da üç boyutlu hız alanını tanımlamayı başarmışlardı. PIV tekniği kullanımı esnasında hız ve Reynolds gerilme alanları belirlenip yine bu modelden alınmış sayısal veriler karşılaştırılıp ya yeni model tasarımı yapılır yada mevcut modelin iyileştirilmesi yoluna gidilir [3]. Kadambi ve arkadaşları [12], Charoennegam [13], Mehta[14], Mahiwan [15], çamur pompalarında akışı PIV tekniği ile görselleştirmeyi başarmışlardır. PIV tekniği ile farklı devirlerde katı partiküllerin akış hızı ve kinetik enerji dalgalanmasıyla değişimini gözlemlemek mümkün hale gelmektedir. Sonraki zamanlarda PIV tekniğinin geliştirilmiş yeni bir versiyonu olarak DPIV (digital particle image velocimetry) yöntemi uygulama alanı bulmaya başladı. Bu yöntemde akışa dahil edilen küçük partiküllerin (1-50 mikron büyüklüğünde) lazer ışık kaynağı ve kamera yardımıyla hızları fotoğraf kareleri yardımıyla tespit edilerek dolayısıyla akışkan hızı belirlenmektedir. Estevadeoral ve arkadaşları [16], düşük devirde çalışan bir aksiyal fan kanadının hücum ve kaçma kenarlarıyla emme ve basma taraflarındaki durumları kararlı ve zamana bağlı olan DPIV hız ölçümleri sayesinde viskoz etkileri gözlemlemeyi başarmışlardı.

Bilimsel çalışmalar ve mühendislik uygulamalarında akışkan akışında türbülansın meydana geldiğini gözlemlemekteyiz. Yüksek hızlarda bir gaz, sıvı, veya herhangi bir akışkan molekülünün davranışını türbülanslı olarak tanımlarız. Türbülans modelleri üzerinde birçok çalışma yapılmış ve sonuçlanmıştır. Bunlardan en önemlisi 1968 yılında Harlow ' un [17] önerdiği en geniş kapsamlı iki denklemlilik türbülans modelidir. Bu modeli popüler kılan onun geniş bir alanda kullanımıyla test edilmesi sonucu hem kabiliyetinin hem de kusurlarının literatürde iyi belgelenmesiyle çalışmalara ışık tutmuştur. Son yıllarda gelişen Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) tekniğiyle birlikte diğer tekniklerin de bu modeli kullanması bu modelin ne kadar tutarlı olduğunu göstermiştir.

Bilişim teknolojisindeki kayda değer ilerlemeyle birlikte türbo makinaların tasarımında HAD yaygın bir şekilde kullanılmaya başlanmıştır. Bunun nedeni HAD modeli, tasarım maliyetini önemli ölçüde düşürüp, örnek prototiplere ihtiyaç bırakmadan üzerinde sınırsız deney yapma imkânı sağlamakla birlikte kısa sürede sonuçları gözleme ve yorumlama olanağı sunmaktadır.

Sing ve Nataraj [18] Genetik Algoritma ve Taguchi yöntemlerini kullanarak bir pompanın çark giriş çapı, kanat çıkış açısı, kanat sayısı ve salyangoz alanını değişik değerlerde analiz ederek bir optimizasyon çalışması yapmıştır. Bu çalışmada kanat sayısının bu iki yöntemde birbirinin tam tersi bir yaklaşım sergilediğini ve çark giriş çapı sonuçlarının da birbirinden farklı çıktığını ifade etmişler. Bu nedenle bu iki parametrenin optimizasyon tekniğine bağlı olarak değişkenlik göstermesinden dolayı pompa performansına etkilerini göz ardı etmişlerdir. Ayrıca mevcut şartlarda çoklu değişkenlerde Taguchi Yönteminin daha iyi bir sonuç verdiği verim ve basma yüksekliği değerlerinden anlaşılmaktadır.

Zhou ve arkadaşları [19] üç farklı kanat profiline sahip santrifüj çarkları HAD ile analiz ettikten sonra sonuçları deneysel verilerle karşılaştırdıklarında eğimli kanatlara sahip çarkların düz kanat durumuna göre verimlerinin daha iyi olduğunu göstermişlerdir.

Shujia ve arkadaşları [20] çoklu koordinat sisteminde ve standart $k - \epsilon$ modelini kullanarak üç boyutta modelledikleri santrifüj pompanın HAD analizini gerçekleştirip sonuçlarını deneysel verilerle karşılaştırdıklarında özellikle normal debilerde sonuçların uyum içerisinde olduğunu göstermişlerdir.

Bachauraudis ve arkadaşları [21] hidrolik laboratuvar pompasının kanat çıkış açısının 20° - 30° - 50° 'de olduğu üç durum için pompayı HAD ile modelleyip kanat çıkış açısının etkisini Fluent® ticari HAD yazılımını kullanarak incelediler. Sonuçlar karşılaştırıldığında kanat çıkış açısının küçüldükçe pompa performansının daha iyi bir sonuç verdiğini dolayısıyla 20° 'de kanat çıkış açısının en iyi performansı sergilediğini ortaya koymuşlardır.

Jafarzadeh ve arkadaşları [22] HAD yardımıyla türbülans modellerinden $k - \epsilon$, RNG $k - \epsilon$, RSM $k - \epsilon$ modellerini bir santrifüj pompa için test ederek sonuçlarını deneysel veriyle karşılaştırdıklarında, sonuçların birbiri ile uyumlu olduğu görülürken, deneysel veriyle en yakın sonucu RNG $k - \epsilon$ modelinin verdiği gözlemlenmiştir.

Anagnostopoulos [23] ticari bir pompa ile iki boyutta çıkış açısı ve debi üzerindeki başarılı çalışmasından sonra pompa ve türbin gibi hidrodinamik tasarımların numerik optimizasyon için otomatik oluşturulmuş kartezyen ağlar sayesinde hızlıca çözüme giden yeni bir algoritma önermektedir. Bu yaklaşımla çark geometrisi üzerinde birçok parametrenin daha hızlı optimizasyonu yapılabileceğini ifade etmiştir.

Chakraborty and Pandey [24] HAD yardımıyla yüksek devirde çalışan santrifüj bir pompada kanat sayısının (4,5,6,7,8,9,10,12) pompa performansına etkisini incelemiştir. Analizler sonucunda kanat sayısının artmasıyla çıkıştaki statik ve toplam basıncın arttığı ancak verimin ise daha değişken bir davranış sergilediği gözlemlenmiştir. Çünkü artan kanat sayısı ile akışkan ve kanatlar arasında ara yüzün artmasından dolayı sürtünme kayıplarının meydana geldiği bunun da verime yansıdığı belirtilmiştir. En verimli durumun 10 kanatlı çarka sahip pompada gerçekleştiği görülmüştür.

Liu ve arkadaşları [25] Fluent® programını kullanarak bir FGD Pompa sisteminde partikül konsantrasyonu ve partikül çaplarının pompa performansına olan etkilerini araştırmışlardır. Sonuç olarak çalışma noktasında partikül çaplarının partikül konsantrasyona göre pompa performansı üzerinde daha etkili olduğu ve basma yüksekliğinin partiküllerin hacimsel konsantrasyonun artmasıyla düştüğü ifade edilmiştir.

Singh ve arkadaşları [26] farklı konsantrasyonlarda dip külünün santrifüj çamur pompası performansına etkisini incelemiştir. Yapılan inceleme sonucunda katı konsantrasyonun artmasıyla pompa basma yüksekliğinin düştüğünü gözlemlenmiş ve nümerik olarak elde edilen sonuçların mantıklı ve tatmin edici olduğu vurgulanmıştır.

Baoling ve arkadaşları [27] Navier Stokes denklemi ve Spalart-Allmaras türbülans modeli ışığında 3 boyutlu ve türbülans akışlı düşük devirde çalışan 4 farklı santrifüj çarkın HAD analizini yapmışlardır. Ara kanatçık olmayan 4 kanatlı, kanat sayısı kadar ara kanatçık ekli olan toplam 8 kanatlı, aynı şekilde 16 ve 32 kanatlı çarklarla yapılan çalışma sonucunda ara kanatçık kullanımı hız dağılımını iyileştirip çark içerisinde ters akışı azaltmaktadır. Ara kanatçık olmaması durumuna göre ara kanatçık kullanıldığı takdirde basma yüksekliği ve verimde bir artış söz konusudur. Ara kanatçık kullanılması durumunda düşük devirlerde çalışan pompalarda ara kanatçıklar düşük debiden kaynaklanan akış kararsızlıklarını etkili bir şekilde çözebileceği vurgulanmıştır.

Das ve arkadaşları [28] ticari bir çamur pompasının performansını belirlemek için iki boyutlu bir modelleme yapmışlardır. Su ile yapılan bu çalışma da farklı debi değerleri için model pompanın verimi tespit edilmiştir. Araştırmacılar çamur pompası seçiminde çarkın önem ifade ettiği bu nedenle kanat kalınlığı ve kanat sayısının önemli bir seçim olduğunu bu parametrelerin de araştırması gerektiğini ifade etmişlerdir.

BÖLÜM 3. ÇAMUR ve ÇAMUR POMPALARI

3.1. Çamur

Çamur, herhangi bir sıvı ile bir katının birleşmesiyle oluşan bir karışımdır. Katı maddenin cinsi, boyutu, dağılımı, şekli ve miktarı taşıyıcı sıvıyla birlikte çamurun akış özelliklerini ve karakteristiğini belirler. Taşıyıcı akışkan olarak genellikle su kullanılır. Tek fazlı sıvı akışında düşük hızlarda laminar akış ve yüksek hızlarda türbülanslı akışa erişmek mümkün iken çamur akışında ise akmakta olan akışkanın içerisinde bulunan katı maddelerin çökmesini engellemek için akışkan hızı kritik değerin üstünde olması gerekir. Aksi takdirde katı maddenin iletimi sürekliliğini kaybeder ve nihayetinde çökelti oluşturur [29].

Karışımın bileşimi, karışım içerisindeki katı madde miktarının karışımın ağırlıkça veya hacimce bir oranı şeklinde ifade edilir. Pompa performansından bahsederken, mil gücünün ve çıkış basıncının doğrudan karışımın yoğunluğu ile ilgili olmasından dolayı karışım yoğunluğu ya da özgül ağırlığı kullanmak gerekir. Uygulama da yoğunluğun boyutsuz biçimi olan bağıl yoğunluk (S) daha yaygındır ve mevcut madde yoğunluğu suyun $+4\text{ }^{\circ}\text{C}$ deki yoğunluğuna ($1000\text{ kg}/\text{m}^3$) bölünür.

$$S = \frac{\rho}{\rho_{w(4^{\circ}\text{C})}} = \frac{\rho}{1000} \quad (4.1)$$

Öte yandan pompa performansı ve kayıpları akışkan içerisinde bulunan katı madde miktarıyla yakından ilgilidir. Katı maddenin hacimsel bileşimine göre basma

yüksekliği ve verim değişir. Karışımdaki katı madde kütlesi m_s , karışımın kütlesi m_k 'ya olan oranı olan kütleli konsantrasyon C_w ile gösterilir ve aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$C_w = \frac{m_s}{m_k} = \frac{\rho_s V_s}{\rho_k V_k} = \frac{\rho_s}{\rho_k} C \quad (4.2)$$

Eşitlikte s ve k indisleri sırasıyla katı maddeyi ve karışımı ifade etmektedir. Burada $C = V_s/V_k$, karışımdaki katı hacminin karışım hacmine oranı olduğundan hacimsel konsantrasyon adını alır.

Hacimsel konsantrasyonu denklem 4.1 ve denklem 4.2 yardımıyla aşağıdaki gibi yazmak da mümkündür.

$\rho_s = \rho_w S_s$ ve $\rho_k = \rho_w S_k$ olduğundan,

$$C_w = \frac{S_s}{S_k} = \frac{V_s}{V_k} = \frac{S_s}{S_k} C \quad (4.3)$$

Pompa uygulamalarında S_k bağıl yoğunluğun bilinmesi gerekir. Katı maddenin kütleli konsantrasyonu bilindiği takdirde karışımın bağıl yoğunluğunu,

$$S_k = \frac{S_s S_w}{S_s + C_w (S_w - S_s)} \quad (4-4)$$

eşitliğiyle hesaplamak mümkündür. Akışkanın su olması durumunda $S_w=1.0$ olduğu görülür [1].

3.1.1. Çamur akışı türleri

Katı sıvı etkileşimine bağlı olarak çamur akışı iki gruba ayrılır.

- a) Homojen veya çökelmeyen çamur akışı

Homojen akışta, katı maddeler taşıyıcı sıvı boyunca üniform bir şekilde dağılır. Türbülanslı akış durumunda çamuru oluşturan küçük partiküller (60-100 μm 'den küçük) homojen davranış sergiler. Bu tür akışlarda akış alanı boyunca katı madde konsantrasyonu esasen yükseklikle değişmez ve her yerde aynı özellikte olduğu kabul edilir. Homojen akışa yakın başka bir akış ise pseudo-homojen akışıdır. Bu akışta yüksek iletim hızından veya küçük katı partiküllerinden dolayı katı maddeler taşıyıcı akışkan içerisinde askıda durmaktadır. Non-Newtonian karakteristik davranış sergilerler.



Şekil 3.1. Homojen ve pseudo homojen çamur akışı

b) Heterojen veya çöken çamur akışı

Heterojen akışta, sıvı içerisinde bulunan katı maddenin üniform olmayan bir dağılımı söz konusudur. Bu tür akışta ağır partiküller (100 μm 'den büyük) çökmeye meyilli iken daha hafif olanları akışkan içerisinde asılı halde bulunurlar. Heterojen çamur akışı madencilikte, fosfat kaya madenciliğinde ve birçok uygulamada karşımıza çıkmaktadır. Heterojen çamur akışının başka bir türü de katmanlı karışım akışıdır. Bu akışta katı partiküller yavaş hız nedeniyle veya ağırlıklarından dolayı tamamen dibе çökerler. Şekilde heterojen akış ve tabakalı karışım akışı gösterilmektedir.



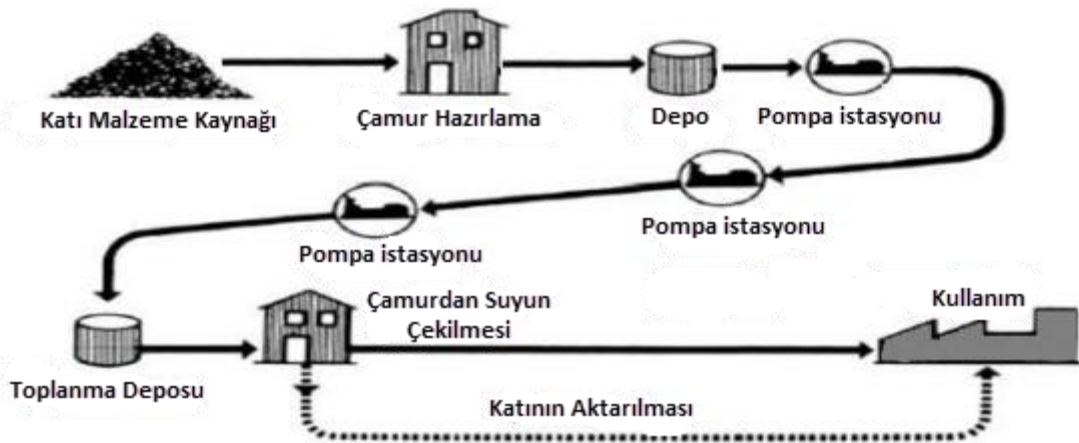
Şekil 3.2. Heterojen ve tabakalı çamur karışımı

Heterojen ve tabakalı çamur akışına ait resimler şekil 4.2 'de görülmektedir [30], [31].

3.1.2. Çamurun iletilmesi

Birçok sektörde, ham malzemenin kaynağından alınıp işlenmesi gereken alana sevk edilmesi gerekir. Sıvıyla birlikte katıların taşınmasının çok önemli olduğu madencilikte, gıda işleme proseslerinde, enerji santrallerinde talebin artması ve ihtiyaçların şekillenmesiyle maliyetlerin artması mevcut tekniklerde büyük değişikliklere neden olurken yeni arayışları da beraberinde getirmektedir. Çift fazlı akışın olduğu bu gibi durumlarda çamurların taşınması için birçok yöntem kullanılmaktadır.

Son yıllarda katı maddelerin boru hatlarıyla taşınmasının yaygınlaşması ve taşıma maliyetlerini düşürmesi nedeniyle çamur pompaları kullanımı artarak devam etmektedir. Taşıma maliyetini düşürmesi bu pompaların önemli avantajlarından yalnızca birini teşkil eder.



Şekil 3.3. Çamurun taşınması

Tipik bir çamur taşıma sistemi şekil 4.3'de gösterilmiştir [29].

3.2. Çamur Pompaları

Çamur pompaları, su pompalarının farklı bir versiyonudur. Çamur pompalarını genel anlamda temiz su ileten pompalardan ayrı düşünmek gerekmektedir. Bunun nedeni bu pompalar, sıvıyla birlikte sert ve aşındırıcı özellikteki katıları taşıma kapasitesine sahip olmakla birlikte daha ağır görevlerde kullanılırlar.

Çamur pompalanmasında 2 ana tip pompa kullanılır [32]. Bunlar:

- 1) Santrifüj çamur pompaları
- 2) Hacimsel çamur pompaları
 - a) Pistonlu çamur pompaları
 - b) Diyaframlı çamur pompaları
 - c) Peristaltik çamur pompaları
 - d) Döner loblu çamur pompaları

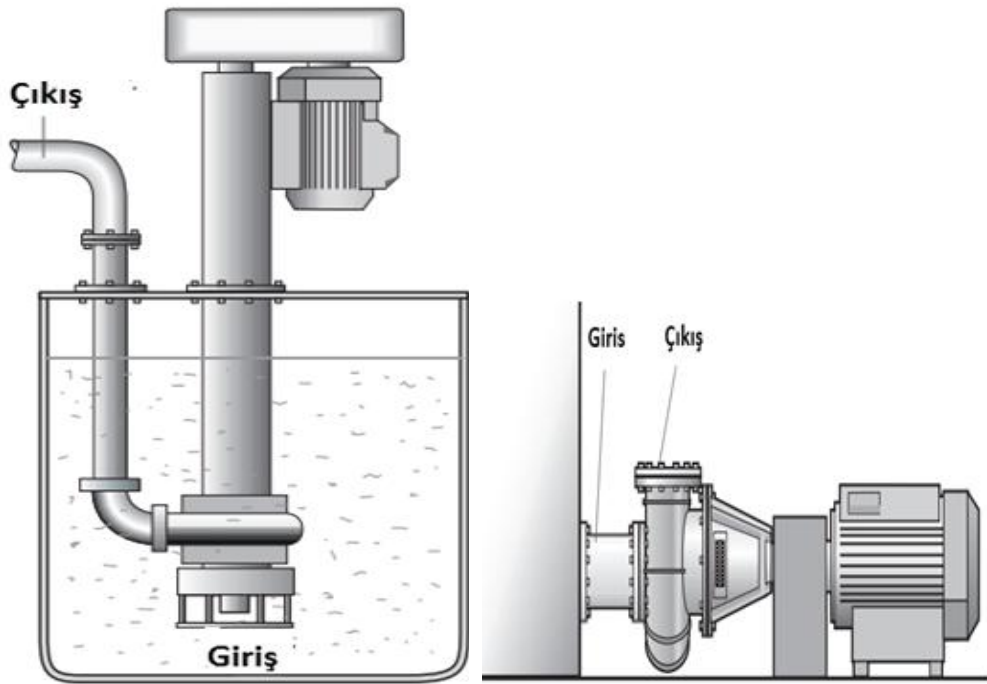
3.2.1. Santrifüj (radyal) çamur pompaları

Çamurların iletilmesi için farklı tip pompalar mevcut olmasına rağmen radyal çamur pompaları pek çok avantajları sayesinde çamur iletiminde yaygın bir şekilde kullanılır.

Bu avantajlar:

- Yüksek debiler elde edilebilir olması
- Geniş bir boyut aralığına katı partiküllerin iletilebilmesi
- Düşük maliyet
- Bakım ve onarımın kolay olması
- Taşıma sistemine kolay monte edilebilmesi ve iyi bir uyum içerisinde çalışması

Çamur pompaları ayrıca nehir ve göl yataklarının temizlenmesinde, endüstriyel tesislerde uçucu külün uzaklaştırılmasında, kağıt hamurunun nakledilmesinde, gıda sektöründe balık ve meyve taşınması gibi işlemlerde kullanılabilir. Çamur pompaları ayrıca termik güç santrallerinde kimyasal tasfiye, atıkların giderilmesi işlemlerinde uzun mesafeli kömür ve minerallerin iletilmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. [1], [32].



Şekil 3.4. Dikey ve yatay santrifüj çamur pompaları [31]

Yukarıdaki şekilde dikey ve yatay santrifüj çamur pompaları resimleri görülmektedir. Dikey santrifüj çamur pompaları derin kuyu çamur pompaları olarak da adlandırılır. Yarı kuru bir kurulumuna sahiptir. Bu pompalarda tahrik ünitesi ve destekleme yapıları çamurun dışında kalmaktadır. Pompanın kendisi ve emiş hattı çamurlu bölgededir. Bu pompalar tıpkı tank pompaları gibi su altında aşınan mil salmastraları yoktur. Fakat çarka kadar uzanan sarkıtılmış bir mili vardır. Pompa boyutlarına bağlı olarak kuyu içerisinde bir plaka üzerine monte edilirler veya tepeden kuyuya sarkıtılırlar. Bu pompaların bazı dezavantajları vardır. Bunlar:

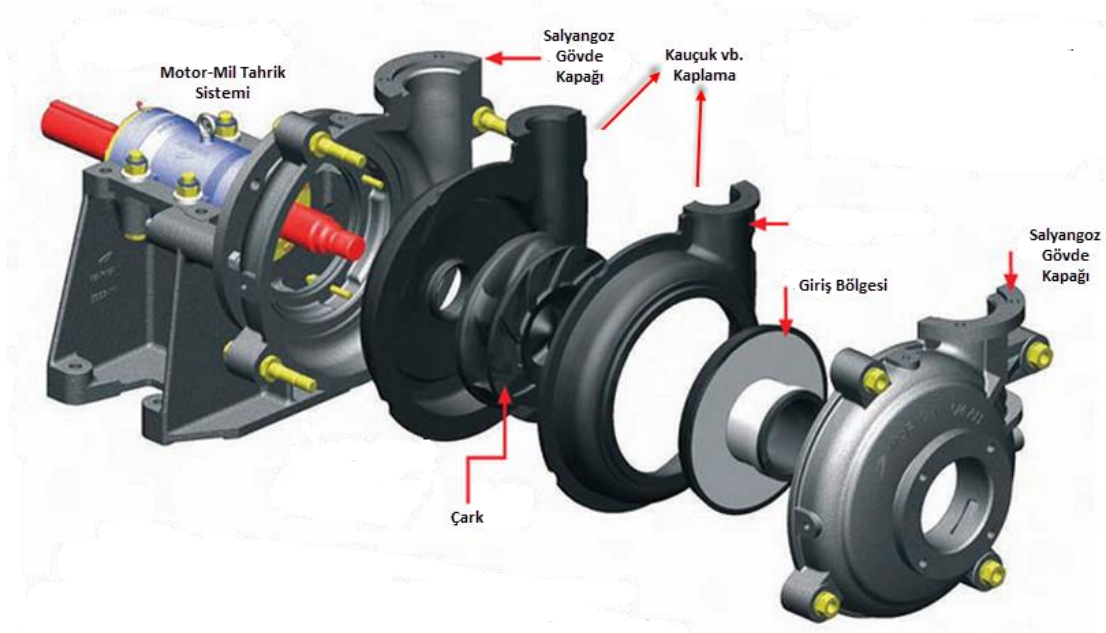
- Pompalar motor ve salyangoz arasında uzun mesafeden dolayı hantal yapıdadırlar.
- İki metreden daha derin kuyularda kullanıldığında tortu oluşabilmektedir.
- Su baskınları motora zarar verebilir.

Yatay çamur pompaları yüksek debi, düşük maliyet ve kolay bakım gibi avantajından dolayı dikey çamur pompalarına nazaran daha fazla uygulama alanı bulmaktadır. Bu pompalar geniş bir debi aralığında çalışma imkânı sunarlar. Taşıyıcı akışkan ile birlikte iletimi yapılacak katı maddenin özelliklerine göre pompa ve çark seçimi yapmak mümkündür. Çark seçiminde katı partiküllerin çapı, yoğunluğu, büyüklük dağılımı ve konsantrasyon önemli bir rol oynar. Katı malzemenin bu özellikleri dikkate alınarak kapalı çark veya yarı açık çarklar tercih edilebilmektedir.

3.2.2. Radyal çamur pompası bileşenleri

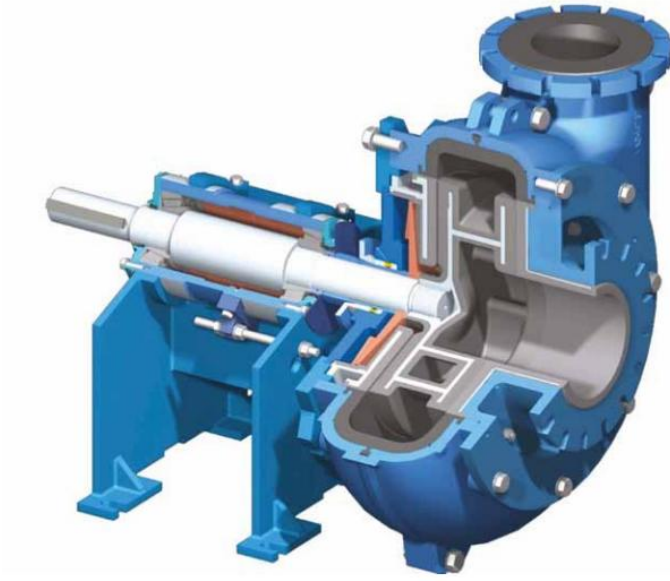
Radyal bir çamur pompasının birçok bileşeni vardır. Bunlar:

- a) Hareketli bileşenler
 - Çark
 - Mil
- b) Hareketsiz bileşenler
 - Motor
 - Mil yatağı
 - Salmastra
 - Salyangoz Gövde



Şekil 3.5. Radyal bir çamur pompasının temel bileşenleri [33]

Yukarıdaki şekilde yoğun ve yüksek aşındırma özelliği olan katıları içeren çamurların iletimi için tasarlanan ticari bir çamur pompasına ait temel bileşenler gösterilmektedir. Şekilde görüldüğü gibi pompa iç bölgesi kauçuk malzeme ile kaplanmaktadır. Çünkü katı-sıvı iletimi esnasında katı partiküllerin mevcudiyetinden dolayı yüksek hız ve basınçlarda pompa çark ve salyangozu hızlı bir şekilde aşınmaktadır. Bu durumun önüne geçmek için çelikten daha esnek ve aşınmaya karşı dirençli olan kauçuk kaplama ile pompa iç bölgesi ve çark tamamen kaplanır. Zamanla kauçuk malzemenin de aşınması durumunda kauçuk kaplama değiştirilir bu şekilde düşük bir maliyetle pompanın ömrü uzatılmış olur.



Şekil 3.6. Ticari bir çamur pompasına ait kesit resmi [34]

3.2.2.1. Çark

Pompa terminolojisinde, mil göbek, çark kanatları ve çark kapağından oluşan dönel gruba çark veya rotor denir. Çark motordan aldığı mekanik enerjiyi akışkana kinetik enerjisi olarak aktaran aynı zamanda pompa performansına etki eden en önemli elemandır. Akışkan, çarkın oyuk kısmından (göz) aksel olarak girer ve ardından dönel kanatlara ulaşır. Burada çark kanatları tarafından yapılan momentum transferiyle teğetsel ve radyal hız kazanan akışkan, aslında dairesel hareketi sürdürecektir yeterli merkezci kuvvetin bulunmaması durumunu ifade eden merkezkaç kuvvetleriyle ek radyal hız kazanır. Akış, salyangoz gövdenin içerisine doğru radyal olarak dışarı savrulurken, hem basınç hem de hız kazanarak çarkı terk eder. Çarklar üç farklı şekilde tasarlanabilir [35].

a) Kapalı çarklar

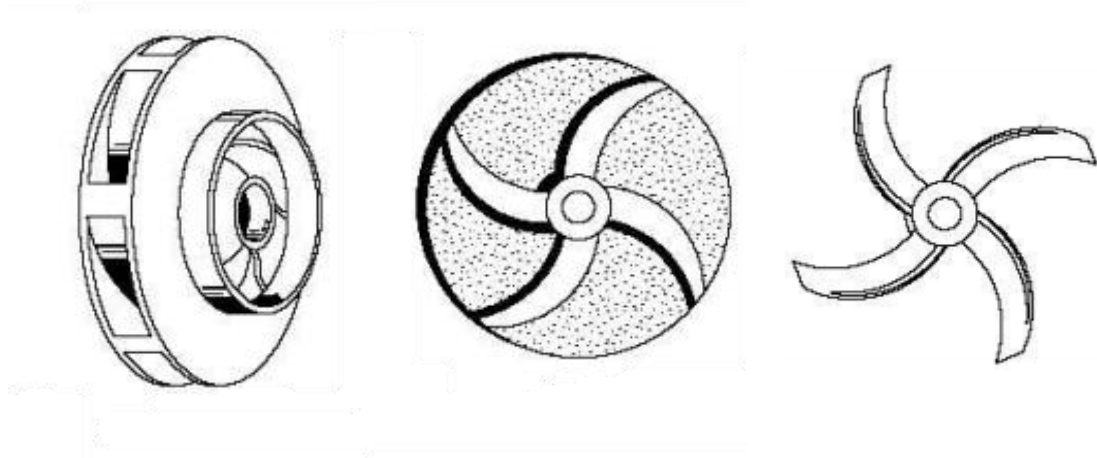
Kapalı çarklarda, kanadın her iki yanakları (diskleri) vardır. Bu çarklar yüksek viskoziteli sıvılar için kullanılır. Genellikle temiz sıvılarla birlikte, çark geometrisinin müsaade ettiği ölçüde katıların transferinde kullanılabilirler.

b) Yarı açık çarklar

Kanatların çevreleyen ön yanaklardan biri yoktur. Kapalı çarklara kıyasla daha düşük viskoz akışkanların iletilmesinde kullanılırlar. Bu tür çarklar kimya, gıda ve kağıt sanayii gibi alanlarda karışım ve bulamaçların pompalanmasında kapalı çarklarla birlikte kullanılmaktadır. Kolay imal edilebilmeleri ve sürtünme kayıplarının az olması dolayısıyla yaygın bir şekilde kullanılırlar. Aralık açıklığından dolayı meydana gelen aralık kayıplarından dolayı verimleri düşüktür [1].

c) Açık çarklar

Bu tür çarkların her iki yanağı da yoktur. Yüksek debi ve düşük viskoziteli akışkanların iletilmesi için kullanılır.



a) Kapalı çark

b) Yarı açık çark

c) Açık çark

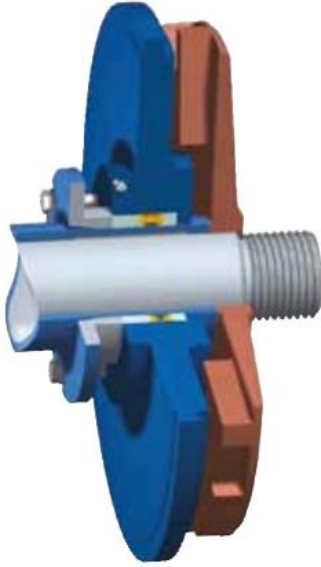
Şekil 3.7. Üç farklı pompa çarkı tasarımı [30].

3.2.2.2. Mil

Tahrik organı ile çark arasını bağlayan elemandır. Mil çarkı hem taşır hem de döndürür.

3.2.2.3. Salmastra

Mil ile gövde arasında akışkan sızdırmazlığını sağlamak için geliştirilmiş önemli bir düzenektir. Çark akışkanı salyangoz çıkışına yönlendirerek yüksek düşü üretir. Bunun yanında çarkla salyangoz arasında çarkın arka tarafına doğru bir sızıntı oluşur. Çarkın arka kanatları bu akışı tekrar salyangoz çıkışına yönlendirmektedir. Salmastra da bu sızıntının mil bağlantısı noktasında sızdırmazlığını sağlar. Sızdırmazlığın yanında aşınmaya karşı da dayanıklı olması salmastranın kalitesini belirleyen bir başka özelliktir. Gresle yağlanan salmastrada bulunan halkalar pompanın çalışmadığı durumlarda sızdırmazlık sağlar. Farklı salmastra çeşitleri mevcuttur.



a) Santrifüj salmastra



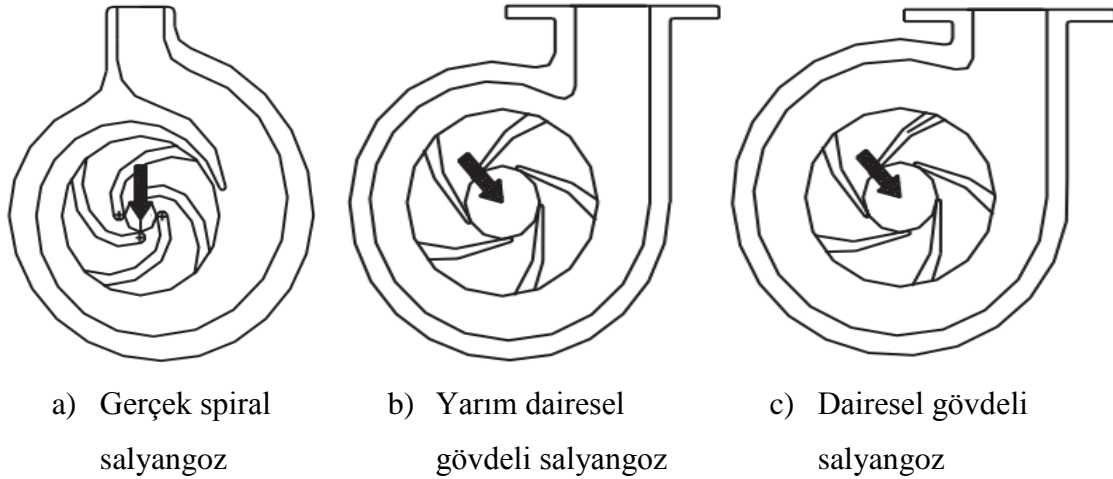
b) Mekanik salmastra

Şekil 3.8. Metso çamur pompası üreticisi firmanın kullandığı iki farklı salmastra [34]

3.2.2.4. Salyangoz

Salyangoz gövdenin amacı, çark kanatlarını hızlı bir şekilde terk eden akışkanı yavaşlatarak mevcut kinetik enerjiyi statik basınç enerjisine dönüştürerek akışkanı çıkışa yönlendirmektir. Çamur pompalarında salyangoz tasarımı su pompalarından biraz farklıdır. Bunun nedeni sıvı içerisinde bulunan katı partiküllerin yüksek

hızlarından dolayı salyangozun hızlı aşınma olasılığıdır. Bunu önlemenin bir yolu motor devir sayısını çok yükseklerle çıkarmamak. Diğer bir yolu da pompa çarkını ve gövdesini aşınmaya dayanıklı malzemeden imal etmektir.



Şekil 3.9. Çamur pompası için kullanılan farklı salyangoz tasarımları [32]

Şekil 4.7 (a)' da görülen gerçek spiral salyangozlar küçük katı partiküllerin iletilmesi durumunda kullanılırlar. Bu salyangoz türü düşük akış hızlarında tercih edilmektedir. Aksi takdirde uzatılmış dil bölgesi yüksek hızlardan dolayı çabuk aşınır. Şekil 4.7 (b) ve (c)'de görülen yarım dairesel gövdeli ve dairesel gövdeli salyangozlar ise daha yüksek akış hızlarında ve büyük katı partiküllerin iletilmesinde kullanılır.

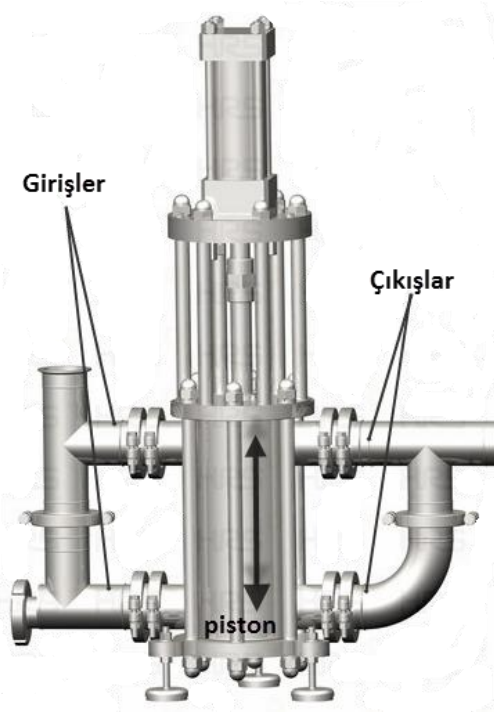
3.2.3. Hacimsel çamur pompaları

Pozitif deplasmanlı çamur pompaları olarak da bilinirler. Madencilik, metalürjik proses, güç üretimi, porselen, seramik ve kimyasal proses sektörlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu pompalar çok yönlü kullanım alanlarına sahip olup 17.3 MPa (2500 psi) kadar verimli bir şekilde kullanılabilir. Hacimsel çamur pompaları yüksek yatırım maliyetlerine rağmen, daha düşük elektrik sistem maliyetleri ek istasyonlara ihtiyaç duymaması ve yüksek hidrolik verimlerinden dolayı uzun mesafeli mineral taşıma boru uygulamalarında santrifüj pompalarına kıyasla daha çok kabul görmüşlerdir.

Peristaltik ve diyafram tipli çamur pompaları yüksek debilerde kullanılamaz iken ($100 \text{ m}^3/\text{s}$) yüksek hacimsel konsantrasyonlarda (%70) geniş uygulama aralıklarından dolayı santrifüj çamur pompalarından daha kullanışlıdır [32].

3.2.3.1. Pistonlu çamur pompaları

Pistonlu çamur pompaları kireç çamuru, ince kömür ve sondaj çamuru, meyve ve sebzeleri gibi düşük ve orta aşındırıcılığa sahip çamur veya katı partiküllerin iletilmesinde kullanılır. Çalışma prensibi hidrolik bir silindir tarafından tahrik edilen çift etkiye sahip bir pistonun hareketine dayanır. Sistem üzerinde çift veya üçlü piston bulunabilmektedir. Bu pompalar vakum altında çalışabilmektedir [32].

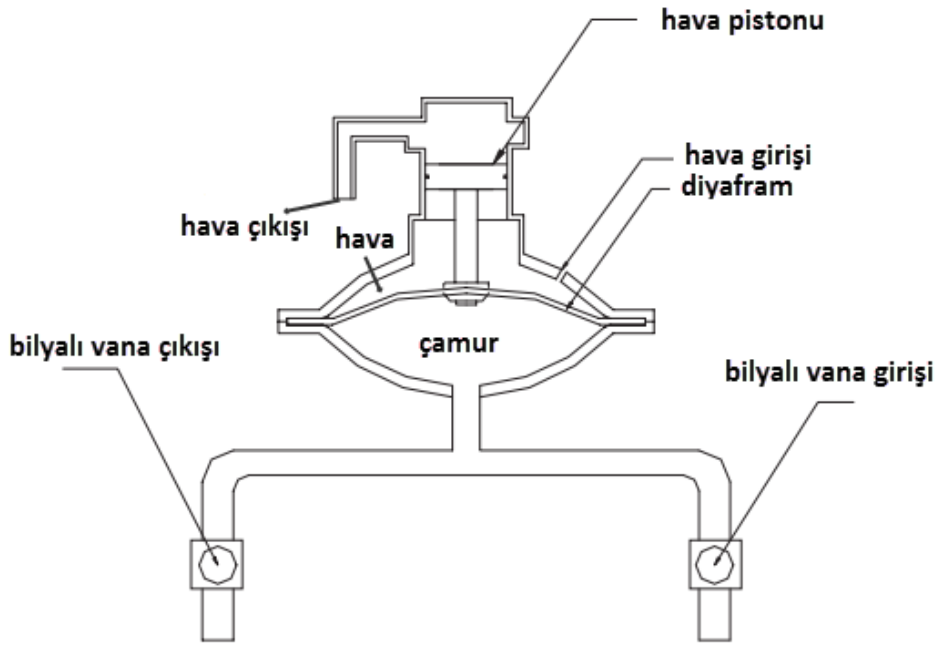


Şekil 3.10. Pistonlu çamur pompası [36]

3.2.3.2. Diyaframlı çamur pompaları

Pistonlu çamur pompalarının zorlandığı, aşındırıcı çamurların iletilmesinde diyaframlı çamur pompaları kullanılır. Çamur pompası üreticileri Geho pompaları (Hollanda), Wirth (Almanya) ve Gormon-Rupp (Amerika) çamur veya atıklarla

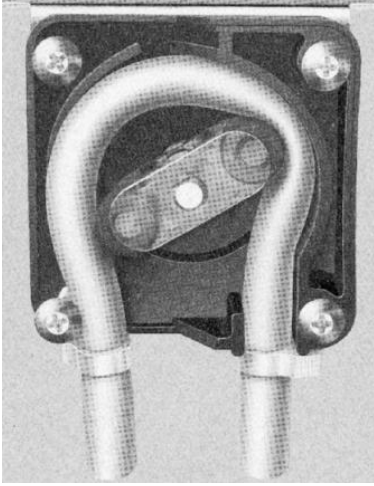
temas halinde olan diyafram veya esnek pistonları kullanmak için mevcut pompaları geliştirmişlerdir. Geho, Wirth ve Feluwa pompaları diyaframı hareket ettirmek için krank milini kullanırken, Gorman-Rupp pompa üretici ise diyaframa hareketi veren hava ile çalışan bir piston-silindirin mekanizması kullanmaktadırlar. Geho 200 °C 'ye dayanıklı sıcak çamurlar ile %70 katı konsantrasyona sahip çamurların iletilmesinde dayanıklı diyaframlı pompalar geliştirmişlerdir. Diyaframlı çamur pompaları maden sektöründe uzun mesafeli (300 km) mineral karışımlı çamurların iletiminde kullanılmaktadır. [32].



Şekil 3.11. Diyaframlı çamur pompası

3.2.3.3. Peristaltik çamur pompaları

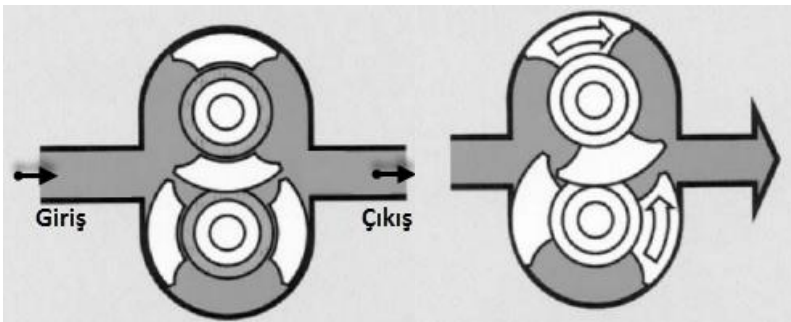
Peristaltik pompalar temelde eksantrik kam mekanizması tarafından sıkıştırılan bir hortumdan oluşmaktadır. Böylelikle basınç akışkana iletilmektedir. Akışkan mikrolitre/dakika debilerden 33 L/dk debi aralığına kadar 420 kPa basınçlara kadar pompalanabilmektedir. Kan hücrelerinde hasara sebebiyet vermemelerinden dolayı tıbbi uygulamalarda sıklıkla kullanılmaktadır [32].



Şekil 3.12. Peristaltik çamur pompası

3.2.3.4. Döner loblu çamur pompaları

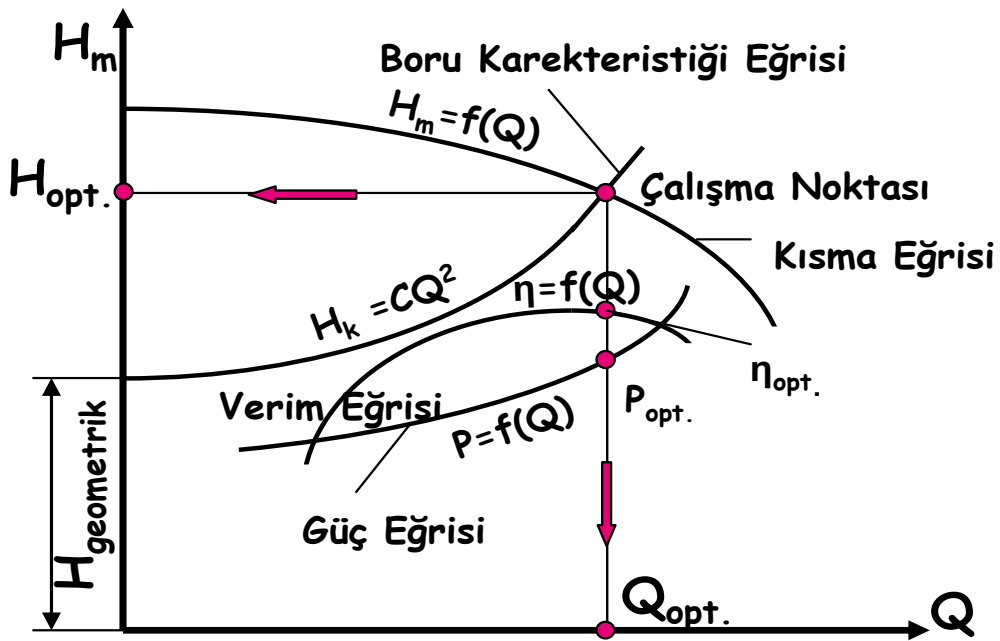
Döner loblu çamur pompaları hacimsel pompalarının özel bir formudur. Birbirine ters yönde dönen iki lobdan oluşmaktadır. Bu pompalarda 0-170 L/s debi aralığında 1.2 MPa basınca kadar akışkan pompalanabilmektedir. Döner loblu çamur pompaları belirli yumuşak çamurlar ile atık su, yağım suyu, askıda kalan hafif çamurlar, kireç çamuru gibi hafif aşındırıcı çamurların iletilmesinde kullanılır. Bu pompalar aynı zamanda kağıt hamuru, patates, patates püresi, süthane atıkları ve süt proseslerinde kullanılırlar. Plastik geri dönüşüm endüstrisinde plastik ve stroforların pompalanmasında, yapı endüstrisinde balçık çamuru ve kil çamurlarının iletilmesinde kullanılır [32].



Şekil 3.13. Döner loblu çamur pompası

BÖLÜM 4. POMPA PERFORMANS EĞRİLERİ

4.1. Pompa Performansı Eğrileri



Şekil 4.1. Bir santrifüj pompanın debisine bağlı olarak sabit dönme sayısında elde edilen kısma, verim ve güç eğrileri

Yukarıdaki şekilde belli bir devir hızında kendisinden daha aşağı bir seviyeden su çeken temsili bir pompanın performans eğrileri ve çalışma noktası gösterilmiştir. Şekilde de görüldüğü üzere boru karakteristik eğrisi ile pompa kısma eğrisinin kesiştiği nokta çalışma noktası olarak belirlenir. Bu noktadan verim eğrisine inildiğinde, pompanın çalışma noktasındaki verimi bulunmuş olur. Eksenlere dik birer çizgi çizildiğinde, çalışma noktasındaki basma yüksekliği ve debi değerleri bulunmuş olur [37].

4.1.1. Pompa performans değerlerinin hesaplanması

Bir pompanın performans analizini yapmak için bir takım parametrelerin bilinmesi gerekir. Pompadan geçen akışkanın kütleli debisi \dot{m} belli başlı bir pompa performans parametresidir. Sıkıştırılmaz akış için türbo makina endüstrisinde hacimsel debinin kullanımı kütleli debiden daha yaygındır.

Hacimsel debi:
$$Q = \frac{\dot{m}}{\rho} \quad (4.1)$$

Buna ilave olarak bir pompanın performansı, giriş ve çıkışı arasındaki Bernoulli yükünde meydana gelen değişim olarak tanımlanan pompa net yükü H ile karakterize edilir.

Net Yük:
$$H = \left(\frac{P}{\rho g} + \frac{V^2}{2g} + z \right)_{\text{çıkış}} - \left(\frac{P}{\rho g} + \frac{V^2}{2g} + z \right)_{\text{giriş}} \quad (4.2)$$

Net yük uzunluk boyutundadır ve pompanın bastığı su olmasa bile genellikle su sütununa eşdeğer olarak verilir.

Yükseklik değişiminin bulunmadığı bir pompadan geçen sıkıştırılmaz akış için net yük, giriş ve çıkış hızlarının önemsiz olduğu bir durumda aşağıdaki gibi hesaplanır:

Net yük:
$$H = \frac{\Delta P}{\rho g} \quad (4.3)$$

Net yük, gerçekte akışkana verilen faydalı güç ile orantılıdır. Basılan akışkan su olmasa bile bu güce hidrolik güç denmesi geleneksel bir durumdur.

Hidrolik güç:
$$P_{\text{hidrolik güç}} = \dot{m}gH = \rho gQH \quad (4.4)$$

Tüm pompalarda; sürtünme, iç kaçaklar, kanat yüzeyindeki akış ayrılmaları, türbülans yitimi ve benzeri nedenlerden kaynaklanan tersinmez kayıplar söz

konusudur. Dolayısıyla pompaya sağlanan mekanik enerjinin hidrolik güçten daha büyük olması gerekir. Pompa terminolojisinde pompaya verilen harici güç mil gücü olarak adlandırılır. Dönen bir mil tarafından iletilen güç;

$$\text{Mil gücü:} \quad P_{mil} = M_{mil} \times \omega \quad (4.5)$$

$$\text{Açısal hız:} \quad \omega = \frac{2\pi n}{60} \quad (4.6)$$

Buradaki ω motor milinin açısal hızı (rad/s) M_{mil} ise mile verilen Tork' tur. Genel pompa verimi η_{pompa} faydalı gücün verilen güce oranı olarak tanımlanır.

$$\text{Genel pompa verimi:} \quad \eta_{pompa} = \frac{P_{hidrolik\ güç}}{P_{mil}} = \frac{\rho g Q H}{M_{mil} \times \omega} \quad (4.7)$$

şeklinde hesaplanır [35].

4.2. Çamur Pompası Performansına Etki Eden Faktörler

Taşıyıcı akışkana katı maddenin ilavesi durumunda oluşan çift fazlı karışımın performansı tek fazlı durumuna göre oldukça farklı değerler alır. Çünkü çift faz durumda pompa performansı karışımın Newtonian veya Bingham akışkanı şeklinde davranışına bağlı olarak artabilir veya bozulabilir. Literatürde bu konuda birçok araştırma yapılmıştır. Yapılan araştırmalara göre sudan daha yoğun katı partiküllerin pompalanması durumunda, genellikle pompa mil giriş gücünün artmasına karşın basma yüksekliğinin ve verimin düştüğü görülmüştür. Bu düşümlerin üzerinde katı partiküllerin yoğunluğu, şekli, büyüklüğü ve büyüklük dağılımı ile konsantrasyonu önemli bir rol oynar. Dolayısıyla pompa seçiminin doğru yapılabilmesi için bu tür etkilerin önceden bilinmesi gerekmektedir. Diğer taraftan pompa seçiminde geçmiş tecrübenin yanında su ile yapılan analizlerde önemli bir fikir vermektedir [1].

4.3. Çamur Pompasının Katı-Sıvı İletmesi Durumunda Pompa Performans Değerlerinin Belirlenmesi

Akışkan içerisinde asılı duran katı partiküllerin iletilmesi uzun zamandan beri araştırmacıların ilgilendiği konulardan biri olmuştur. Stepanoff [4] santrifüj pompalarla ilgili mevcut çalışmalarını derleyerek pompa çalışma noktasıyla partikül boyutu ve konsantrasyonu arasındaki ilişkiyi ortaya koyan faydalı çalışması ile iki fazlı katı-sıvı karışımı ile ilgili ilk kapsamlı çalışmayı yapmıştır. Bu çalışmadan sonra için bazı araştırmacılar, çamur pompası performansını tahmin etmek için teorik ve ampirik birkaç korelasyon önermişlerdir. Bu korelasyonlardan bazıları aşağıdaki gibidir.

$$\text{Cave :} \quad K_H = 0.0385(S - 1) \frac{(S + 4)}{S} C_w \ln \left(\frac{d_{50}}{22.7} \right) \quad (4.8)$$

$$\text{Kazım ve arkadaşları :} \quad K_H = 0.13 C_w \sqrt{(S - 1)} \ln \left(\frac{d_w}{20} \right) \quad (4.9)$$

$$\text{Engin ve Gür :} \quad K_H = 0.11 C_w (S - 1)^{0.64} \ln \left(\frac{d_w}{22.7} \right) \quad (4.10)$$

ve

$$K_H = 1 - H_r = 1 - \frac{H_s}{H_w} = f \left(C_w \text{ veya } C_v, S, \frac{d_w}{D} \right) \quad (4.11)$$

$$K_\eta = 1 - \eta_r = 1 - \frac{\eta_s}{\eta_w} = f \left(C_w \text{ veya } C_v, S, \frac{d_w}{D} \right) \quad (4.12)$$

Burada S katı partikülün özgül ağırlığı, C_w katı konsantrasyonu, K_H ve K_η performans düşüm faktörleri, s çamuru (slurry) ve w suyu ifade etmektedir.

Katı taneciği ortalama çapının belirlenmesi için iki tür tanımlama mevcuttur, Gahlot [9] ve Kazım [11]. Bunlar d_w ve d_{50} ile gösterilir. d_w , ağırlıklı ortalama tanecik çapıdır ve,

$$d_w = \sum_{i=1}^n P_i d_i \quad (4.13)$$

eğitliği ile hesaplanır. Burada,

n toplam numunenin bölündüğü elek sayısı,

P_i i. boyut grubuna düşen ağırlıkça tanecik miktarı,

d_i ardışık iki elek açıklıklarının ortalaması olarak verilmiştir.

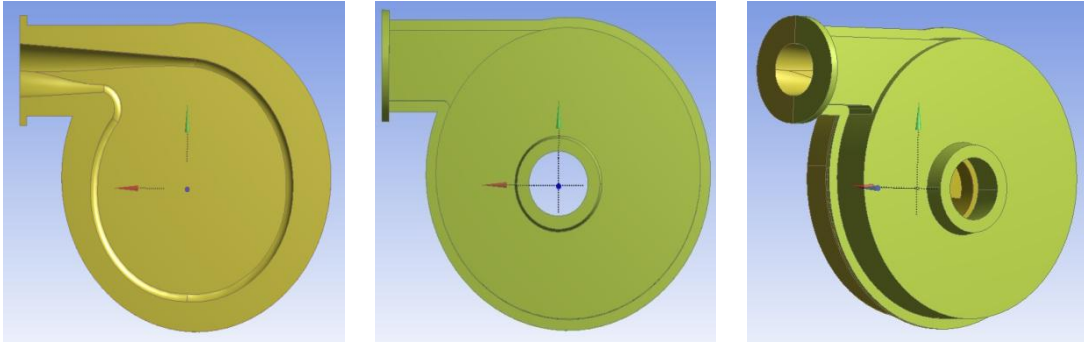
d_{50} ile ifade edilen kütle ortalama çapı olup numunenin ağırlıkça % 50 sinin geçebildiği elek açıklığıdır. Eğer tanecik boyut dağılımı dar bir aralıkta kalıyorsa bu iki boyut değer de ortalama çap olarak da alınabilir [1]. Bu çalışmada tanecik boyut dağılımının etkileri söz konusu olduğunda ağırlıklı ortalama çap değer (d_w) kullanılacaktır. Bu alışmada Engin ve Gr' n geliştirdiği korelasyon kullanılarak iki farklı katı malzemenin farklı konsantrasyonlar da su ile ileilmeleri durumunda pompa performans eğrilerindeki değerimler karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

BÖLÜM 5. ÇAMUR POMPASI MODELİ ve ÇARKLAR

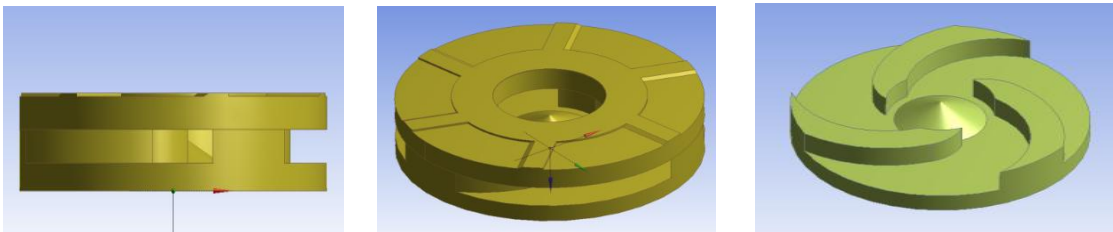
5.1. Çamur Pompası CAD Modeli

Çamur pompası salyangozları su pompalarına nazaran daha kaba olduğu CAD modelinden de görülmektedir. Bunun sebebi çift fazlı akış nedeniyle pompa çarkının yanında salyangozunda zamanla aşınmasıdır. Bunun önüne geçmiş için üreticiler aşınmaya karşı bir takım önlemler alırlar. Aşınmaya karşı dayanıklı malzemelerin yanında pompa içi kauçuk ile kaplandığı durumlar söz konusudur.

Bu çalışmada ele alınan kapalı çarklı radyal çamur pompası ticari bir firma tarafından sağlanmıştır [38]. Şekil 5.1’ den de görüleceği üzere model çamur pompası dairesel gövdeli salyangoza sahiptir. Çark ise şekil 5.2 ‘den de görüleceği üzere kapalı çarklı ve geriye eğimli üç kalın kanattan oluşmaktadır.



Şekil 5.1. Çamur pompası salyangozunun CAD modeli



Şekil 5.2. Model radyal çamur pompası çarkına ait CAD resimleri

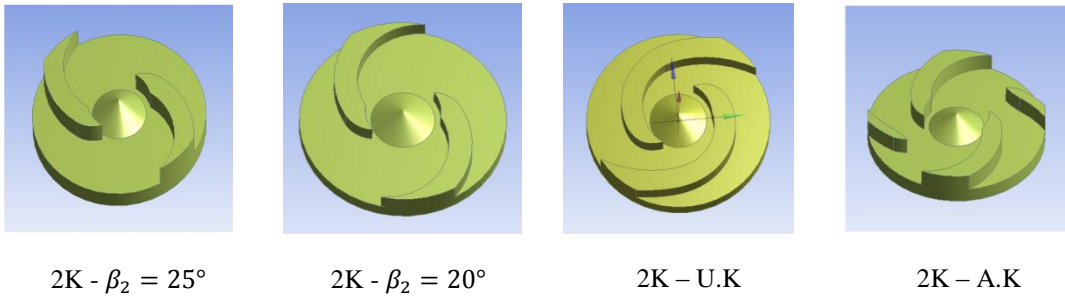
Model pompa ve çarkına ait sabit geometrik büyüklükler ve diğer detaylar Tablo 5.1 görülebilir. Model çarka ait kanat sayısı (z), kanat genişlikleri (b_1) ve (b_2), çark kanat giriş çapı ve çark dış çapı (d_1) ve (d_2), kanat giriş ve çıkış açısı (β_1) ve (β_2), pompa giriş çapı (D_1), salyangoz çıkış çapı (D_2) dir.

Tablo 5.1 Model radyal çamur pompası ve çarkının temel boyutları

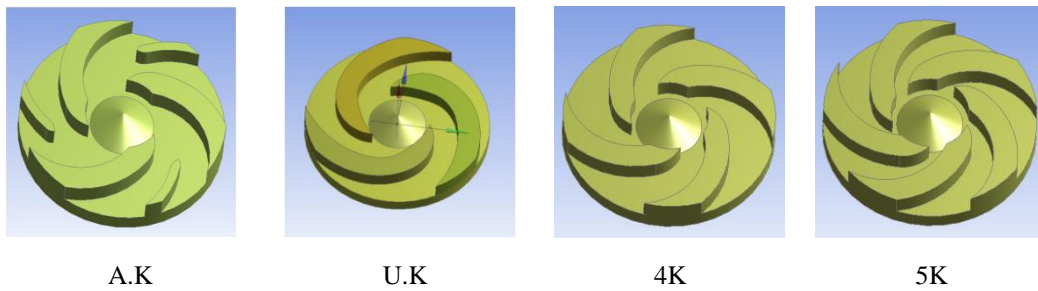
z	b_1 (mm)	b_2 (mm)	d_1 (mm)	d_2 (mm)	β_1 (°)	β_2 (°)	D_1 (mm)	D_2 (mm)
3	30	30	130	355	25	25	127	101.6

5.2. Alternatif Çark Modelleri

Firmadan temin edilen kanat giriş açısı (β_1) 25° ve kanat çıkış açısı (β_2) 25° olan model çamur pompası çarkına alternatif olarak çark çapı ve kanat yüksekliği sabit kalmak üzere 8 farklı çark oluşturulmuştur. Bu çarklar şekil 5.3 ve şekil 5.4' te verilmektedir.



Şekil 5.3. 2 kanatlı olarak oluşturulmuş çarklar



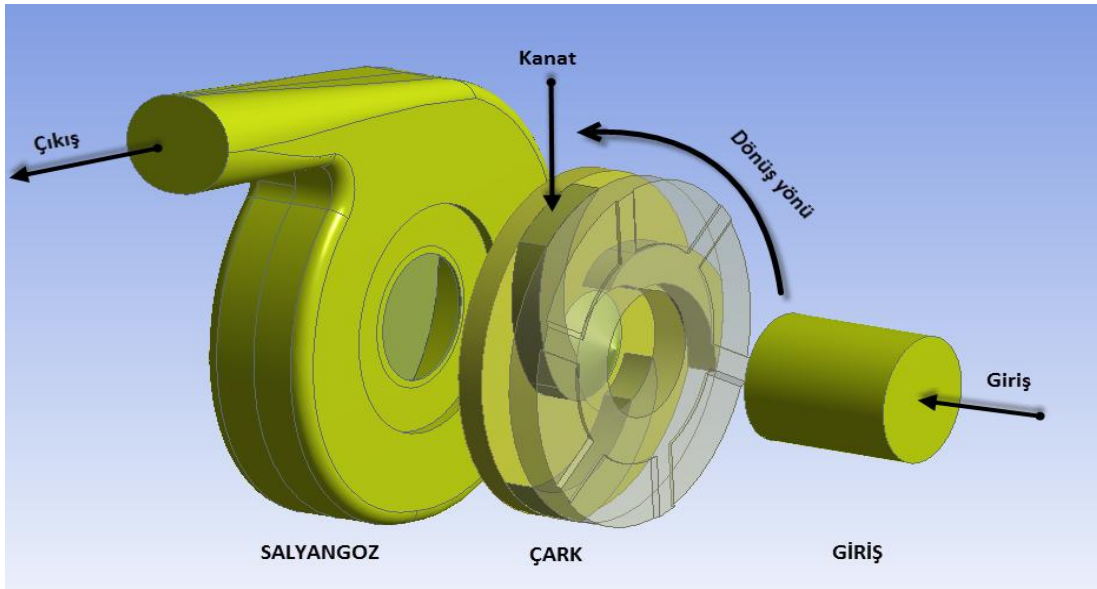
Şekil 5.4. 3, 4 ve 5 kanatlı olarak oluşturulmuş çarklar

BÖLÜM 6. HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ ANALİZİ

6.1. HAD Modeli

6.1.1. Katı model

Radyal pompalarda çark (rotor) belli bir hızla dönerken salyangoz (stator) hareketsiz kalmaktadır. Pompa emme girişinden giren akışkan, mekanik enerjiyi kinetik enerjiye dönüştüren çark yardımıyla salyangoz gövde boyunca statik basınç kazanarak çıkışa doğru iletilmektedir. Akışkanın bu hareketini doğru bir şekilde modelleyebilmek için pompa “frame motion” modeline uygun olarak üç ana bölüme ayrıldı.



Şekil 6.1. Üç bölümden ana bölümden oluşan çamur pompası

Model çamur pompası öncelikle CAD yazılımı ile oluşturulduktan sonra, sayısal katı modeli elde etmek için ANSYS 14.0 [39] programına aktarılmıştır. Pompa emiş ağzından salyangoz çıkışına kadar olan pompa iç hacmi, sayısal katı modeli oluşturmaktadır. Elde edilen akışkan hacminden sırasıyla çark ve giriş bölümlerini çıkarıp ayırarak üç ana akışkan bölümü oluşturulmuştur.

6.1.2. Sonlu hacim ağı

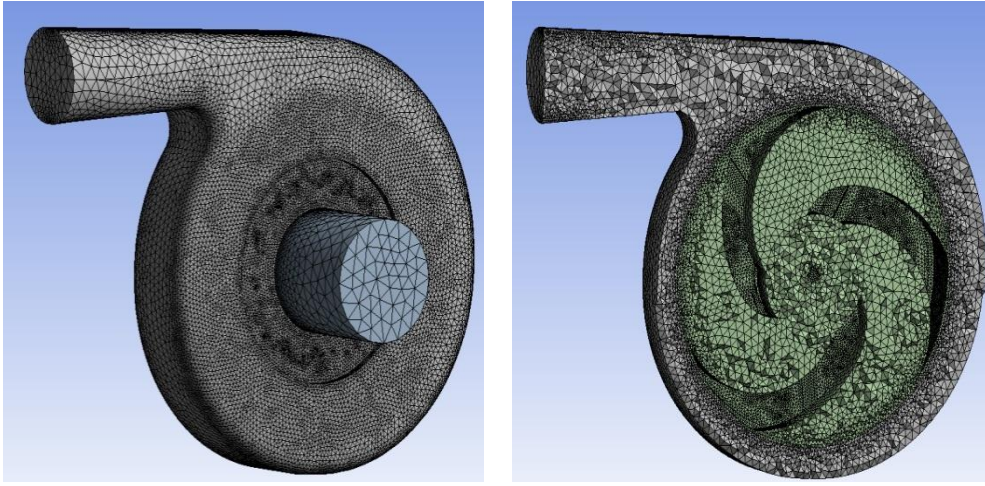
Üç ana bölüme ayrılmış olan sayısal katı model de en önemli kısmın çark olduğu bilinen bir gerçektir. Bu nedenle pompa da akışın daha detaylı bir biçimde gözlenebilmesi için diğer iki bölümle birlikte çark bölümünde yeterince sayısal ağ elemanına ihtiyaç duyulmaktadır.

Sayısal katı modelin her üç bölümü için tetrahedral (dört yüzlü) elemanlar kullanılmıştır. Bunun nedeni türbo makinalar gibi karmaşık geometrilere daha hızlı ve otomatik olarak uygulanabilme kabiliyetine sahip olan tetrahedral elementler aynı zamanda akışın sınır tabaka boyunca daha iyi modellenmesi için kullanılan sınır tabaka ağ (inflation) oluşumuna izin vermesidir [39]. Bu çalışma da hem yapılandırılmış sayısal ağ hem de yapılandırılmamış sayısal ağ yapıları denenmiştir. Sonuçlar karşılaştırıldığında arada bir fark olduğu görülür. Bunun nedeni yapılandırılmış sayısal ağ için realizable $k - \epsilon$ modelinde “Non-Equilibrium Wall function“ kullanılması, yapılandırılmamış sayısal ağ içinse “Enhanced Wall Function” seçeneklerinin kullanılması olarak düşünülmüştür. Bu iki yöntem duvara yakın bölgelerdeki akışı modellemek için geliştirilen metotlardır. Aşağıdaki tabloda iki farklı meshle yapılan ve farklı mesh sayılarında pompa performans değerlerinin değişimi görülmektedir.

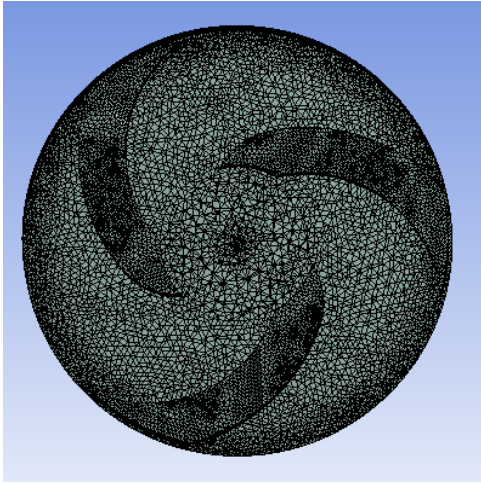
Tablo 1’den de görüleceği gibi her bir durum çalışmasında model çamur pompasını modellemek için yüksek mesh sayılarına ihtiyaç duyulmaktadır. Çözüm süresini uzun tutmamak için model çamur pompasında 1076125 elemanı sağlayan mesh büyüklükleri ve düzensiz mesh yapısı tercih edilmiştir.

Tablo 6.1. Farklı mesh (ağ) sayılarında performans değerlerinin değişimi

Durum		Toplam mesh sayısı	Yük (m)	Verim
1	Düzenli Mesh	3525644	15.9	0.645
2	Düzenli Mesh	2030645	15.82	0.646
3	Düzensiz Mesh	6212407	15.86	0.656
4	Düzensiz Mesh	1076125	15.83	0.652



Şekil 6.2. Çamur pompasına ait sonlu hacim ağı



Şekil 6.3. Kanatları çıkarılmış çark hacmine ait sonlu hacim ağı

6.1.3. $k - \varepsilon$ türbülans modeli

Yüksek hızlarda akışkanın türbülansa geçtiği bilinen bir durumdur. Dairesel bir boru içerisinde bu durum Re sayısının 4000 olduğu andan itibaren tamamen türbülanslı olduğu kabul edilmektedir. Pompa ve fanlar gibi türbo makinalarda da yüksek hızlardan dolayı türbülanslı bir akışın gerçekleştiği literatürde ispatlanmış bir gerçektir. Bu nedenle radyal çamur pompasında da bu gerçeğe dayanarak realizable $k - \varepsilon$ türbülans modeli tercih edilmiştir. Bu modelde k ve ε büyüklüklerine ait bağıntı,

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (6.1)$$

şeklinde verilir. Burada μ_t türbülans viskozite büyüklüğü, ε türbülans dağılım oranıdır. Realizable $k - \varepsilon$ modelinin standart ve RNG $k - \varepsilon$ modellerinden farkı artık burada C_μ sabit değildir. C_μ şu şekilde hesaplanır.

$$C_\mu = \frac{1}{A_0 + A_S \frac{kU}{\varepsilon}} \quad (6.1)$$

$$U = \sqrt{S_{ij}S_{ij} + \tilde{\Omega}_{ij}\tilde{\Omega}_{ij}}$$

S_{ij} ortalama şekil değiştirme hızı, $\tilde{\Omega}_{ij}$ dönel bir koordinat düzleminde içinde ω_k açısal hızıyla dönen dönme tensörünün ortalama oranıdır. Model sabitleri A_0 ve A_S şu şekilde verilir.

$$A_0 = 4.04, A_S = \sqrt{6} \cos \Phi$$

$$\Phi = \frac{1}{3} \cos^{-1}(\sqrt{6}W), \quad W = \frac{S_{ij}S_{jk}S_{ki}}{\tilde{S}}, \quad \tilde{S} = \sqrt{S_{ij}S_{ij}},$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right)$$

Burada bir türbülans alanında C_μ açısız hızıyla dönen bir sistemin ortalama şekil değişim ve dönme hızlarının bir fonksiyonudur. Hem türbülans kinetik enerji k hemde türbülans dağıtım oranı ε için transport denklemlerinin diferansiyel formu aşağıdaki gibidir.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u_j) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_m + S_k \quad (6.2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \varepsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S_\varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} G_b + S_\varepsilon \quad (6.3)$$

$$C_1 = \max \left[0.43 \frac{\eta}{\eta + 5} \right], \quad \eta = S \frac{k}{\varepsilon} \quad S = \sqrt{2 S_{ij} S_{ij}} \quad (6.4)$$

Burada G_k ortalama hız gradyanından kaynaklanan türbülans kinetik enerji üretimi, G_b kaldırma gücünden kaynaklanan türbülans kinetik enerji üretimi, Y_m sıkıştırılabilir türbülans genişleme değişimin genel kayıp oranına etkisi, σ_k ve σ_ε parametreleri sırasıyla k ve ε için akışa ait *Prandtl* sayılarıdır. C_2 ve $C_{1\varepsilon}$ sabitlerdir. S_k ve S_ε kullanıcı tanımlı kaynak terimleridir.

$C_{1\varepsilon}$, C_2 , σ_k ve σ_ε denklemlerde kullanılan ayarlanabilir sabitlerdir.

$C_{1\varepsilon} = 1.44$, $C_2 = 1.9$, $\sigma_k = 1.0$, $\sigma_\varepsilon = 1.2$ [40].

6.1.4. Sınır şartları ve kabuller

Mevcut pompa modelinin HAD ile çözümü için üç boyutlu, zamandan bağımsız, viskoz, sıkıştırılmaz akış alanı için geliştirilmiş standart $k - \varepsilon$ modeline alternatif bir yöntem olan realizable $k - \varepsilon$ modeli kullanılmıştır.

Dönel çark bölgesi hareketli olup diğer tüm kısımlar statik kabul edilmiştir. Pompa hareketli çarkı ile statik olan diğer kısımlar arasındaki etkileşimi sağlayabilmek için literatürde sıkça kullanılan “frame motion” modeli kullanılmıştır [40].

Analizler için çark 104.72rad/s (1000 d/d) açısal hızla döndürülmüştür. Pompa giriş sınır şartı olarak serbest kütle girişi “mass flow inlet”, çıkışta ise çıkış basıncı “pressure outlet” sınır şartı tanımlanmıştır. Diğer tüm yüzeylerde kaymama sınır şartı “no-slip” tanımlanmıştır. Her bir analizin yakınsama kriteri olarak son iki iterasyon arasındaki farkın 10^{-3} mertebesine inmesi beklenmiş ve yaklaşık olarak 1250 iterasyon civarında yakınsayan analizler, 3000 iterasyona kadar devam ettirilip sonlandırılmıştır [3,41].

Ele alınan çark sayısı adedince analiz yapılması gerektiği göz önüne alınarak 16 GB RAM ön bellek kapasitesine sahip bir adet HP xw 6400 Workstation kullanılmıştır.

BÖLÜM 7. ANALİZ SONUÇLARI ve KARŞILAŞTIRMALAR

7.1. Giriş

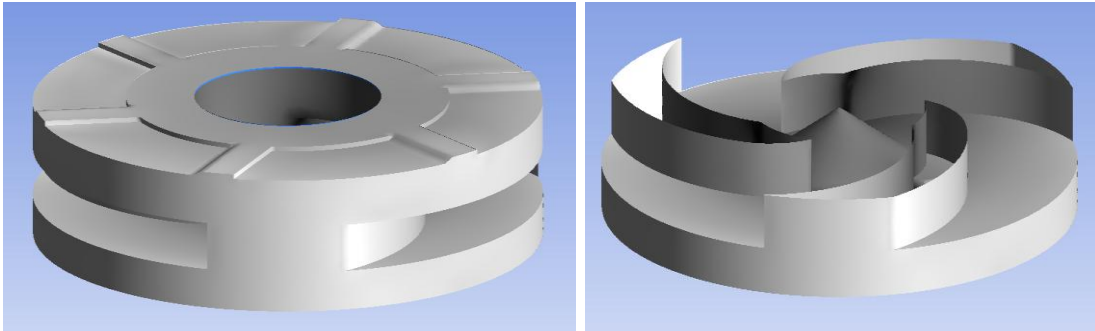
Bu bölümde bir önceki bölümde belirtilen modeller ve sınır şartları kullanılarak model çamur pompası çarkına alternatif olarak oluşturulmuş çarkların kullanılmasıyla çamur pompasının performansı test edilmiştir. Pompa içerisinde meydana gelen karmaşık akış, yüzeylerde oluşan statik basınç dağılımının yanı sıra hız vektörleri ve akım çizgileri sayesinde görselleştirilmiştir. Yapılan analizler sonrasında aşağıdaki karşılaştırmalar yapılmıştır.

- a) 2 kanatlı çarklara sahip pompaların performans eğrileri kendi aralarında karşılaştırılmıştır. Bu eğriler yardımıyla kanat açısının, uzun kanat ve ara kanatçık kullanılmasının pompa performansına etkisi incelenmiştir.
- b) Model çamur pompası çarkında aynı kanat profiline sahip 2, 3, 4 ve 5 kanatlı çarklarla model pompanın performans eğrileri karıştırılmıştır.
- c) 3 kanatlı model çarka alternatif oluşturulmuş 3 uzun kanatlı çark ve model çarka ara kanatçık eklenmiş durumlarında pompa performans değerleri çalışma noktası için verilmiştir.
- d) Pompa salyangozunun dil bölgesinin uzatılmasının pompa performansına olan etkisi çalışma noktası için belirtilmiştir.
- e) HAD analizleri sonucu model pompanın su iletmesi durumunda oluşturulan performans eğrileri ile bu pompanın farklı konsantrasyonlu kum-su iletmesi durumunda Engin ve Gür korelasyonu yardımıyla oluşturulmuş performans eğrileri karşılaştırılmıştır.

7.2. Çark Optimizasyonu

Çarkların pompa performansı üzerindeki öneminden dolayı yani çark üzerinde yapılabilecek herhangi bir iyileştirme pompa performansına doğrudan etki edeceği için bazı araştırmacılar [21], [23] sadece çark optimizasyonuna yoğunlaşmışlardır. Bu çalışmada da benzer şekilde ağırlıklı olarak çark optimizasyonu üzerinde durulmuştur. Bu amaçla model çarka alternatif olarak oluşturulmuş 8 farklı çarkla pompa performansı test edilmiştir.

Yapılan analizler sonrasında çark içerisinde oluşan basınç, hız dağılımları ve akım çizgilerinin her bir pompa çarkı içerisinde de görülebilmesi amacıyla çarkların üst disk bölümü çark tabanından $z = 59 \text{ mm}$ 'de bir düzlemlle kesilmiş ve görünmez kılınmıştır.



(a) Kapalı çark

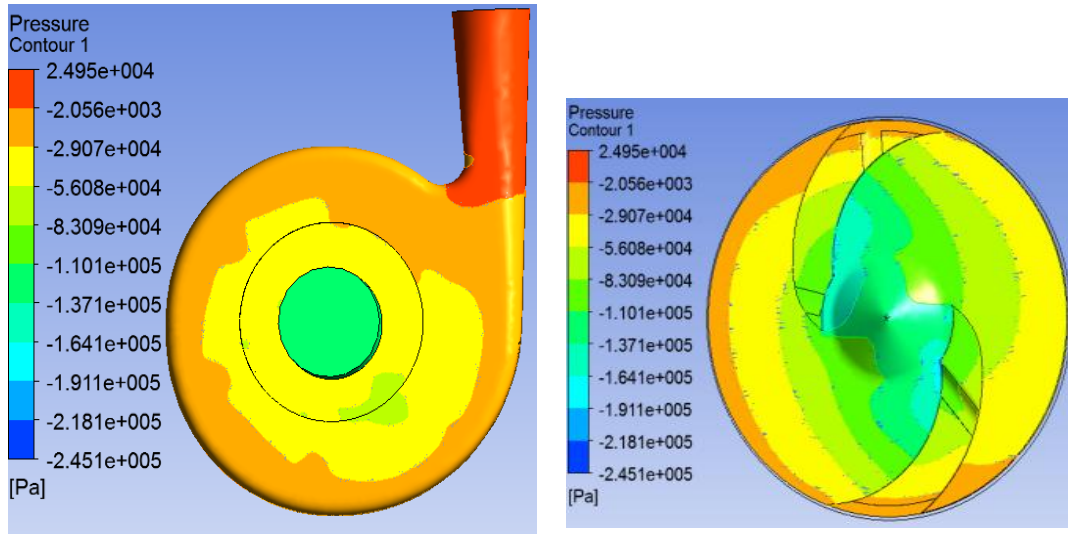
(b) Üst disk bölümü görünmez kılınan kapalı çark

Şekil 7.1. Akışı görselleştirmek için üst diski görünmez kılınan model çamur pompası çarkı

7.2.1. Basınç dağılımları

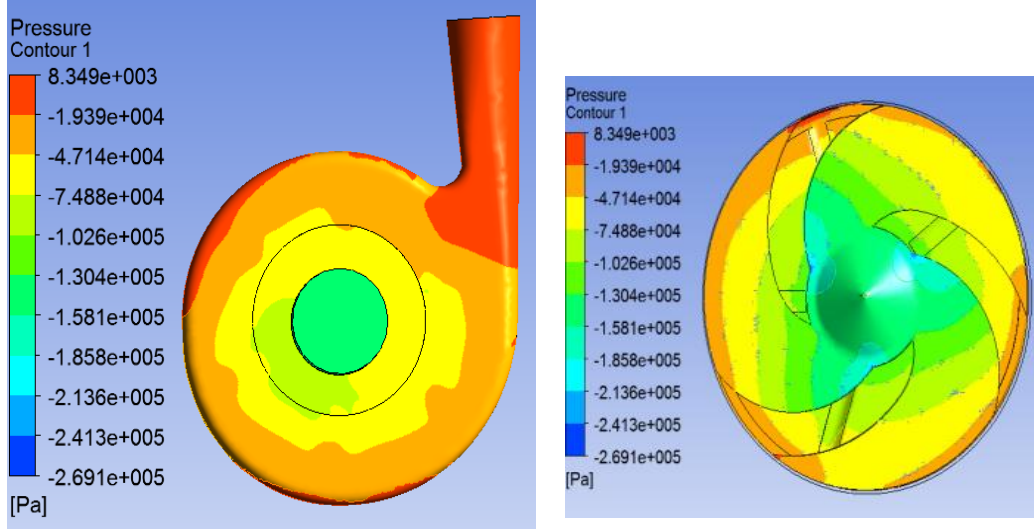
HAD analizi için pompa sınır şartları belirlenirken çıkış basıncı 0 (Pa) kabul edilip analizler yapılmıştı. Bu durum da pompa giriş basıncı sıfırın altında olması beklenen bir durumdur. Burada bilinmesi gereken önemli bir nokta ise pompa çarkının akışkana aktardığı kinetik enerjisinin pompa çıkışında basınç enerjisine dönüşmesi sonucunda pompa girişi ve çıkışı arasında basınç farkı oluşturmasıdır. Analizler sonucunda

oluşan basınç farkları debi ve çarklara bağlı olarak 0.2 – 2.22 bar arasında değişmektedir. Çalışma şartları dışında pompa yüksek debilerde basınç farkı oluşturamaz iken, düşük debilerde maksimum basınç farkı oluşturur. Pompa giriş ve çıkış renklerinin karşılık geldiği tahmini değerler skaladan okunmalı ve aradaki fark alınmalıdır. Bu bölümde verilmiş görsel veriler 125 m³/h debisinde yapılmış analiz sonuçları olduğu unutulmamalıdır.



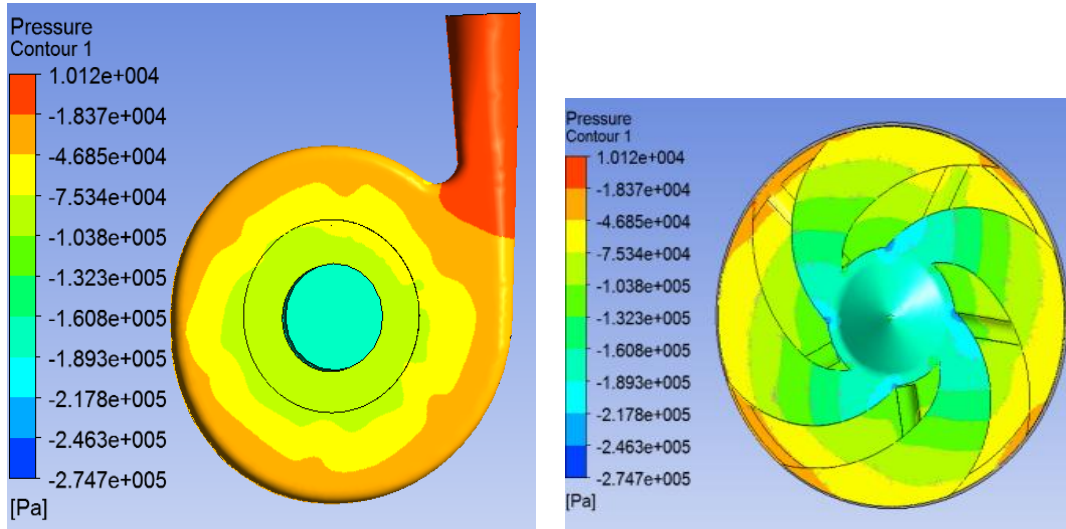
Şekil 7.2. 2 Kanatlı (2K) çamur pompası ve çarkında oluşan basınç dağılımı

Şekil 7.1 2 kanatlı pompada basınç dağılımını vermektedir. Beklenen en alçak basınç pompa çark emme bölgesinde iken en yüksek basıncın pompa çıkışında olduğu görülmektedir. Çark basma tarafında (pressure side) basıncın yüksek, emme tarafında (section side) daha düşük olduğu çark üzerinde kolay bir şekilde fark edilmektedir. Pompa kanat sayısının yetersiz olmasından dolayı çark girişinden çıkışına doğru üniform olmayan bir basınç artışı çark içerisinde açık bir şekilde görülmektedir. Çark çıkışı yüksek hızlı akışkan salyangoza çarpıp enerjisinin bir kısmını statik basınca dönüştürmektedir. Bu nedenle akışkanın izlediği yol boyunca salyangoz basıncının çark basıncına göre daha yüksek olduğu ayrıca görülmektedir.



Şekil 7.3. 3 Kanatlı (3K) çamur pompası ve çarkında oluşan basınç dağılımı

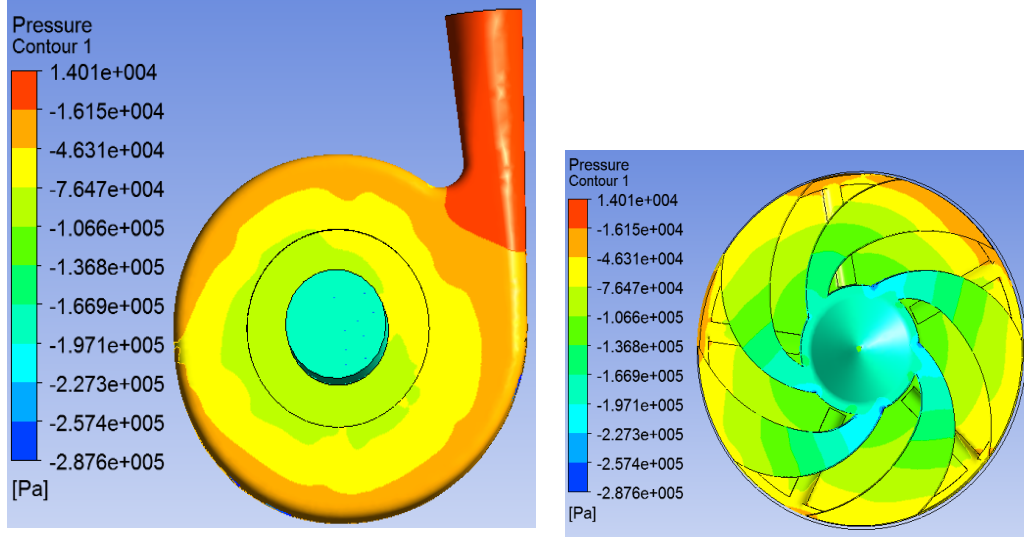
3K'lı çamur pompası ve çarkında meydana gelen basınç dağılımı şekil 7.2'de görülmektedir. Salyangoz çıkış bölgesinden de görüleceği üzere 3K'lı pompa 2K'lı pompaya göre akışkanın basıncını daha fazla artırmıştır. 2K'lı pompaya göre 3K'lı pompa da basınç dağılımı üniform bir şekildedir.



Şekil 7.4. 4 Kanatlı (4K) çamur pompası ve çarkında oluşan basınç dağılımı

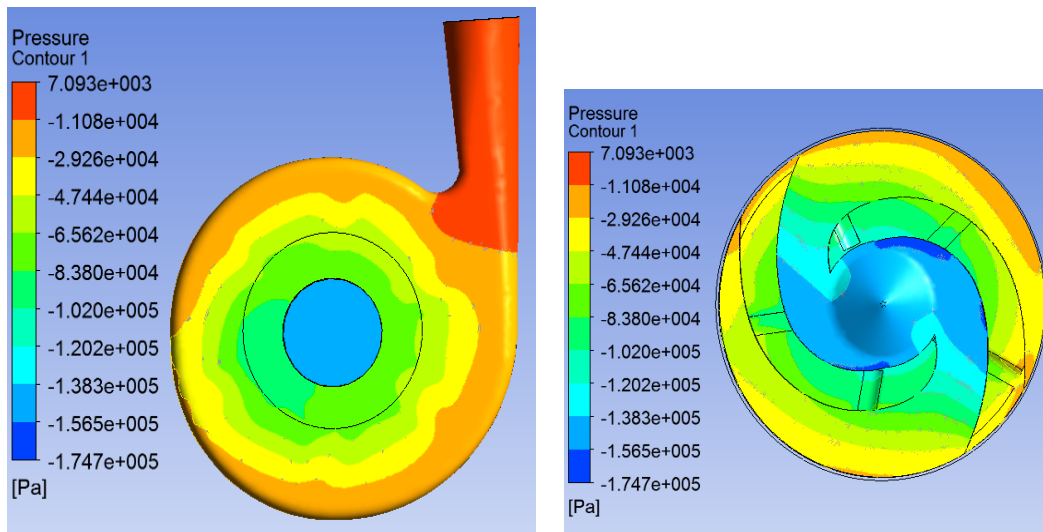
4 kanatlı radyal çamur pompasında basınç dağılımı şekil 7.3' de görülmektedir. 3K pompaya yakın bir basınç dağılımı söz konusudur. Çark emme bölgesinin 2K'lı ve 3K'lı pompalara göre daha büyük olduğu şekilden görülmektedir. Bunun nedeni diğer pompalara göre daha fazla sayıda kanat olmasından kaynaklanmaktadır. Çünkü

fazla kanat sayısı durumunda çark içerisinde yüksek hızlardan dolayı düşük basınç alanı oluştuğu düşünülmektedir.

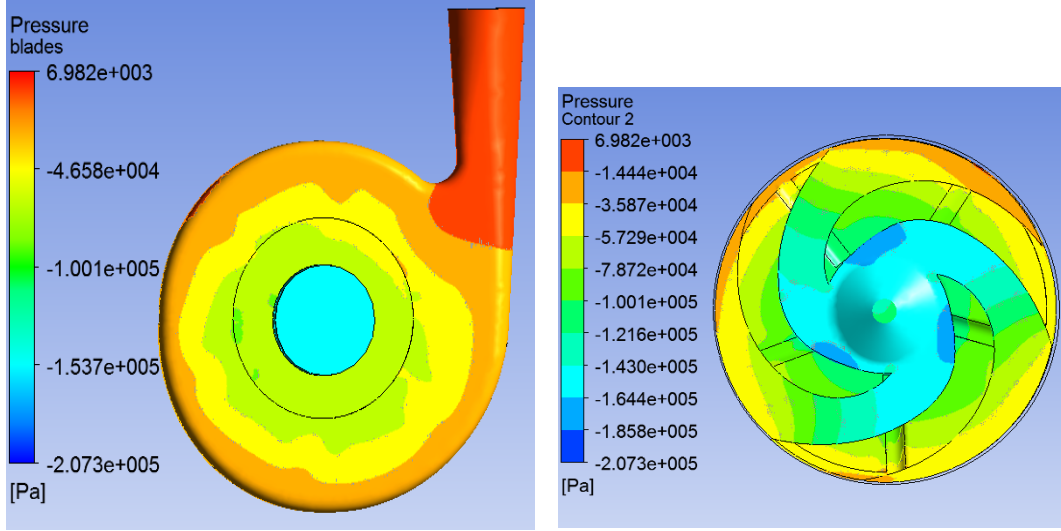


Şekil 7.5. 5 Kanatlı (5K) çamur pompası ve çarkında oluşan basınç dağılımı

5 kanatlı çamur pompası ve çarkında oluşan basınç dağılımı yukarıda görülmektedir. Diğer pompalara göre emme bölgesinin daha büyük alan kapladığı şekilde görülmektedir. En büyük basınç farkının 5 kanatlı pompada olması beklenen bir durumdur. Yüksek basınçlarda katı-sıvı iletilmesinde kullanılan çamur pompaların daha hızlı aşınacağı göz önünde bulundurulmalıdır.

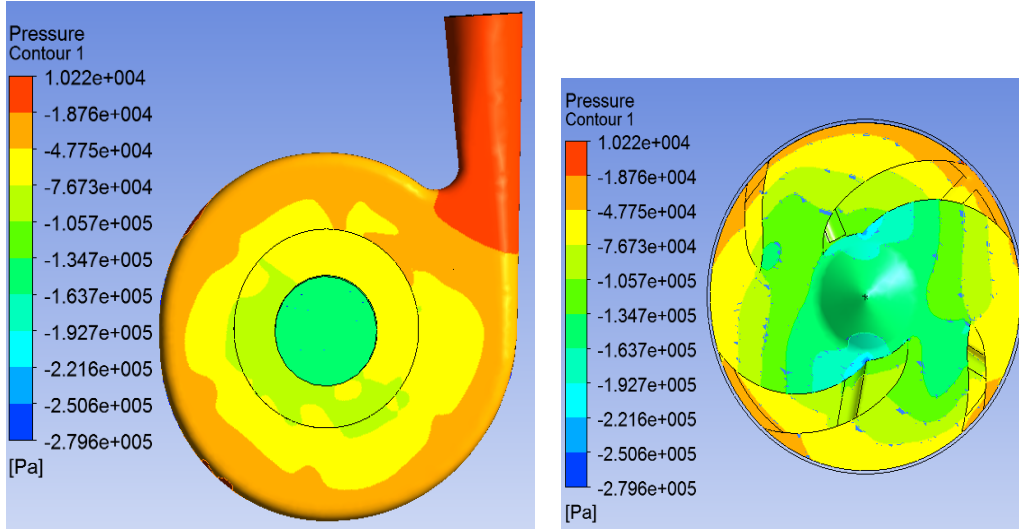


Şeki7.6. Uzun kanatlı çark (2K) durumunda pompa ve çarkında oluşan basınç dağılımı

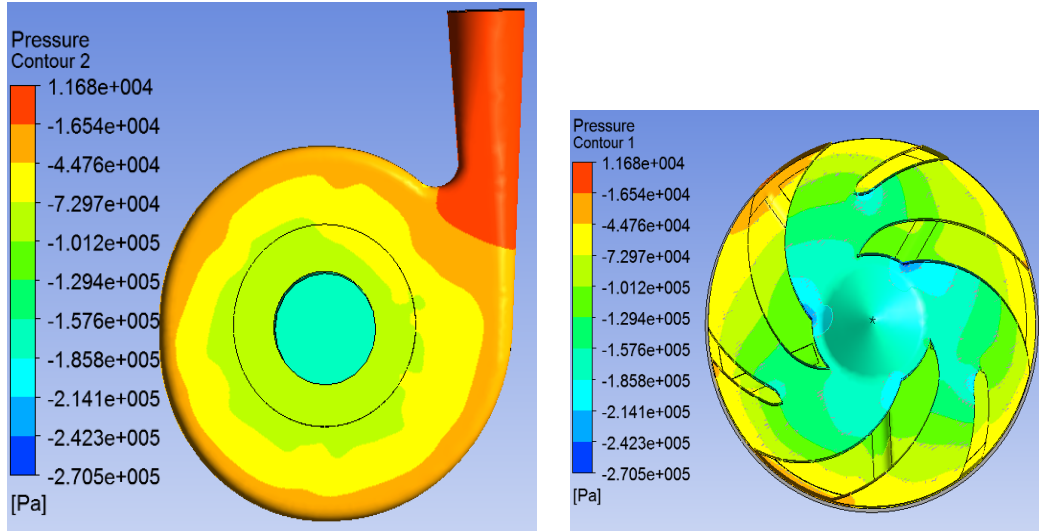


Şekil 7.7. Uzun kanatlı çark (3K) durumunda pompa ve çarkında oluşan basınç dağılımı

Şekil 7.5 ve şekil 7.6'da uzun kanatlı çark durumunda pompa ve çarkında oluşan basınç dağılımı görülmektedir. Pompa çarkında kanat basma tarafında yüksek basınç, emme tarafında düşük basınç belirgin olarak görülmektedir. Çark girişinden itibaren üniform bir artış görülmektedir.



Şekil 7.8. Ara kanatçık ekli (2K) pompa ve çarkında oluşan basınç dağılımı

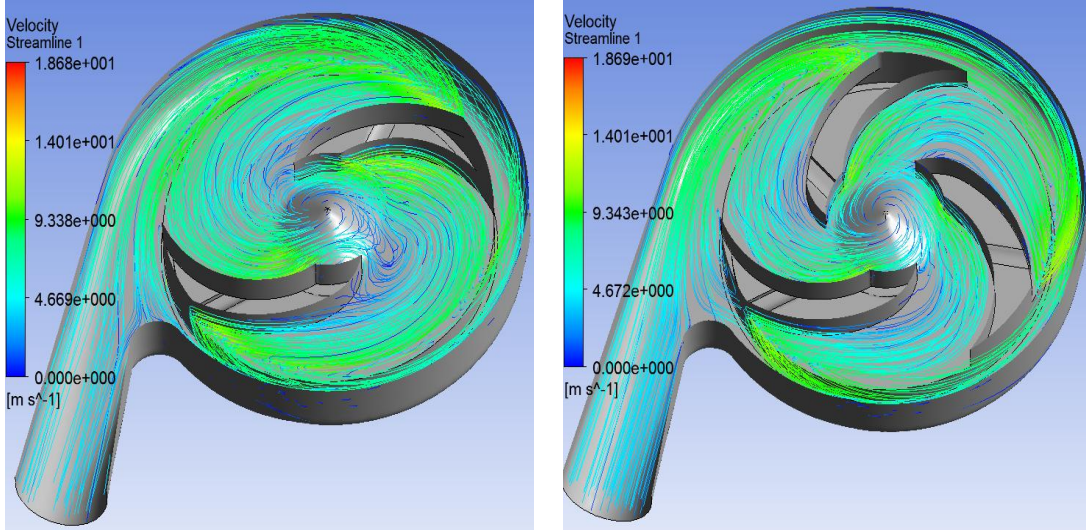


Şekil 7.9. Ara kanatçık ekli (3K) pompa çarkında oluşan basınç dağılımı

Ara kanatçık ekli durumda basınç dağılımını diğer pompalara yakın görülse de ara kanatçık dolayısıyla salyangoz çıkışında yüksek basınç okunur. Ayrıca diğer pompalarda olduğu gibi kanat uçlarında ve salyangoz çıkış bölgesinde yüksek basınçlar görülmektedir. Yüksek basınç ve hızlarda sıvı içerisinde bulunan katı partikülleri nedeniyle bu bölgelerin aşınmaya daha fazla maruz kalacağı bilinmelidir.

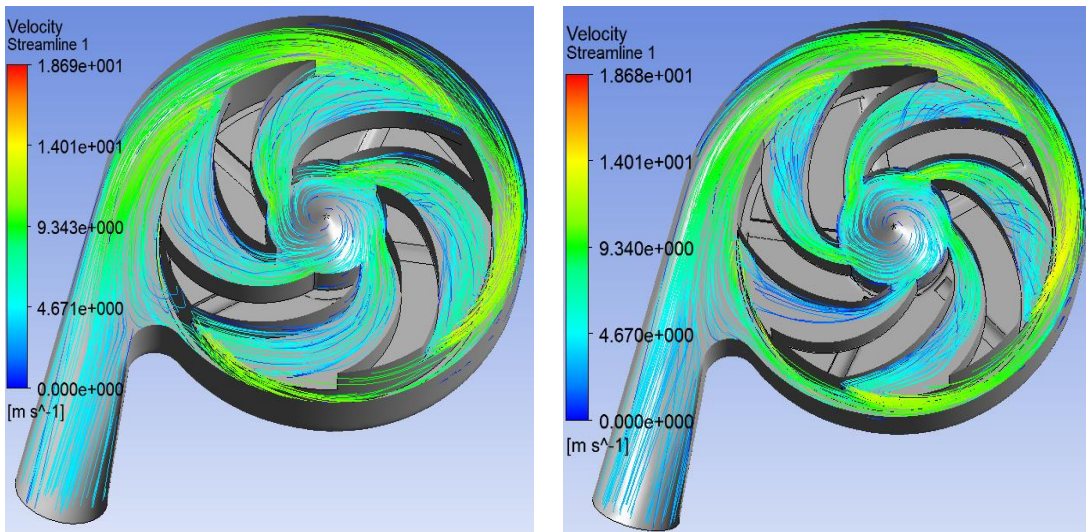
7.2.3. Akım çizgileri

Akım çizgileri, akış alanı boyunca akışkan hareketinin anlık yönlerini göstermeleri bakımından oldukça kullanışlıdır. Örneğin sürekli dolanımlı akış bölgeleri ve akışkanın katı bir çeperden ayrılması akım çizgileri deseni yardımıyla kolaylıkla saptanabilir. Akım çizgileri renksiz olabileceği gibi renkli olarak da görülebilmektedir. Akım çizgileri üzerinde basınç, hız veya sıcaklık dağılımını görmek mümkündür. Pompalarda hızın gösterilmesi tercih edilmiştir [40].



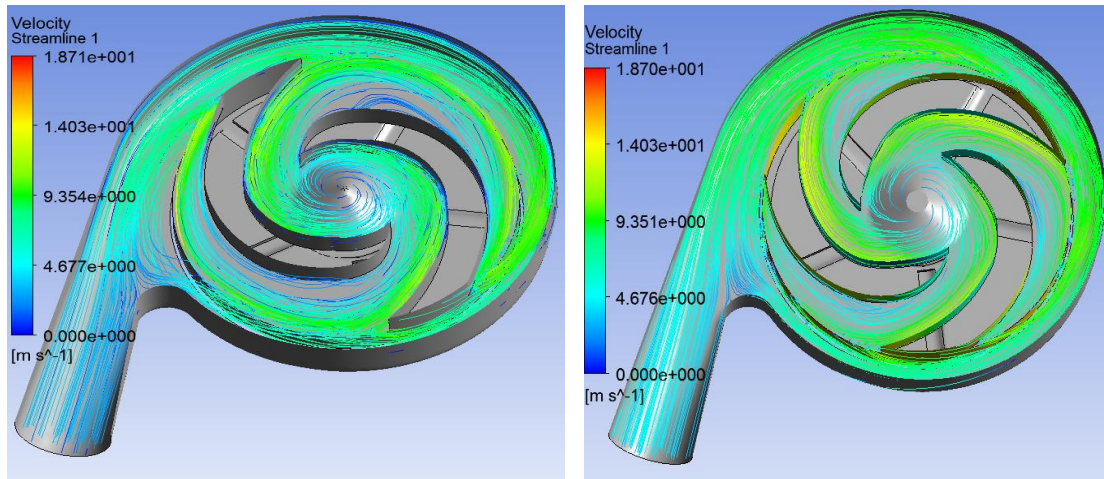
Şekil 7.10. 2 ve 3 kanatlı çamur pompalarında oluşan akım çizgileri

Şekilde 2 ve 3 kanatlı pompalarda oluşan akım çizgileri görülmektedir. Kapalı çark olması dolayısıyla akış daha düzenli ve düzgündür. Kanatların geriye doğru eğimli olması dolayısıyla akışın salyangozdan çıkışa yönelmesi beklenen bir durumdur. 3 kanatlı çarkta akım çizgileri 2 kanatlı çarkta bulunan akım çizgilerinden daha düzenli bir görüntü sunmaktadır. Çıkışa yönelen akım çizgilerinden bir kısmı 2 kanatlı çarkta tekrar salyangoz içerisine giriyor iken 3 kanatlı çarkta bu akım çizgileri sayısı daha azdır. Bu da pompa performansına doğrudan etki etmektedir. Hızın kanat çıkışında en yüksek değerlerde olması beklenen bir durumdur. Çıkışa doğru ise bu hızın biraz düştüğü görülmektedir. Çünkü kinetik enerji çıkışta basınç enerjisine dönüşmektedir.



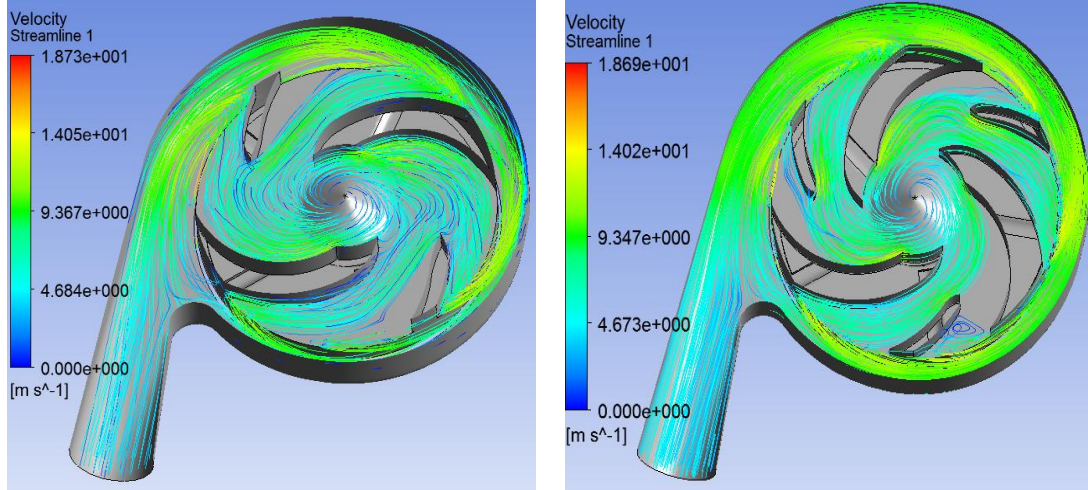
Şekil 7.11. 4 ve 5 kanatlı çamur pompalarında oluşan akım çizgileri

Akım çizgilerinden de görüleceği üzere 4 ve 5 kanatlı pompalar fazla kanat sayıları sayesinde 2 ve 3 kanatlı pompalardan daha fazla hız kazanırlar. Bunun bir nedeni yüksek kanat sayısında akışkan çarktan ayrılmadan önce yüksek kinetik enerji kazanır. İkinci bir nedeni yüksek kanat sayılarında akış koridorunun (geçit) dar olması dolayısıyla çark içerisine giren akışkanın bu geçitten geçerken hızlanıp sonrasında kanat tarafından savrulmasıyla hızının daha da artmasıdır. 5 kanatlı pompa çok yüksek hızlardan dolayı akışın daha fazla çalkantılı (türbülanslı) olması açık bir şekilde görülmektedir. Çıkışa doğru geçen akışkan hızının düştüğü de açık bir şekilde görülmektedir.



Şekil 7.12. Uzun kanatlı (2K ve 3K) çamur pompalarında oluşan akım çizgileri

Giriş ve çıkış kenarı yumuşatılmış uzun kanatlı 2K ve 3K 'lı çarklarda akışın kanat profili ile çok iyi bir uyum içerisinde olduğu görülmektedir. Model çarkın giriş kenarından kaynaklanan akış bozulması bu çarklarda en az seviyeye indirilmiştir.

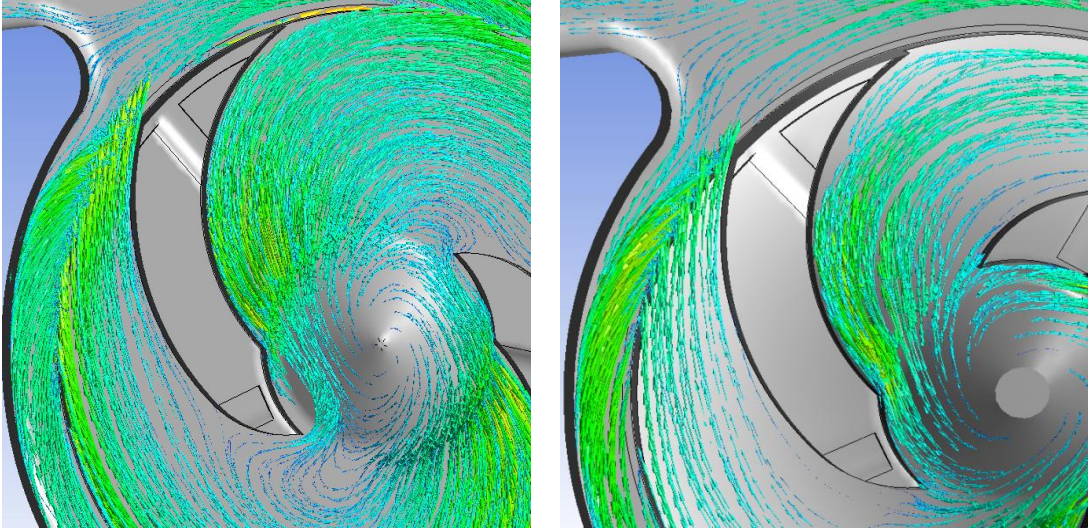


Şekil 7.13. Ara kanatçık ekli (2K ve 3K) çamur pompalarında oluşan akım çizgileri

Ara kanatçık ilaveli 2K ve 3K 'lı çarklarda ise akış hızının arttığı görülmektedir. Her ne kadar gösterge çizelgesin de pompa içerisindeki maksimum akış hızları farklılık gösterse de akım çizgileri renklerinden anlaşılacağı gibi akışkanın hangi pompa da yüksek hızlarda olduğu açıkça görülebilir.

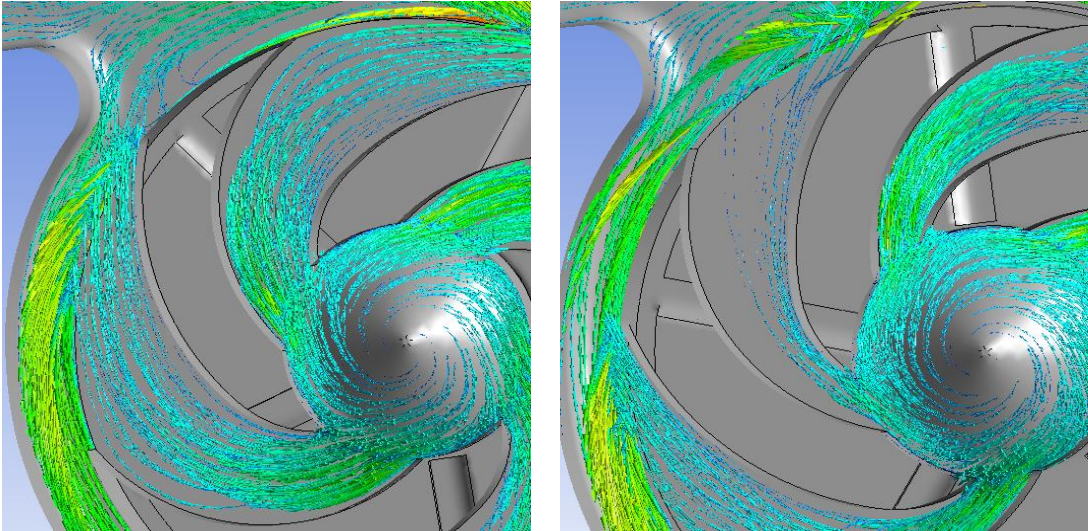
7.2.4. Hız vektörleri

Akım çizgileri anlık hız alanının yönünü gösterirken, hem deneysel hem de hesaplamalı akışlar için anlık vektörel bir özelliğin hem yönünü hem de şiddetini gösteren oklar dizisinden oluşan vektör çizimleri de kullanışlı bir akış desenidir. Hız vektörleri, akışın yönü ve şiddetinin yanında sıcaklık, basınç gibi diğer özellikleri de eş zamanlı olarak kolaylıkla görselleştirilebilmektedir [40].



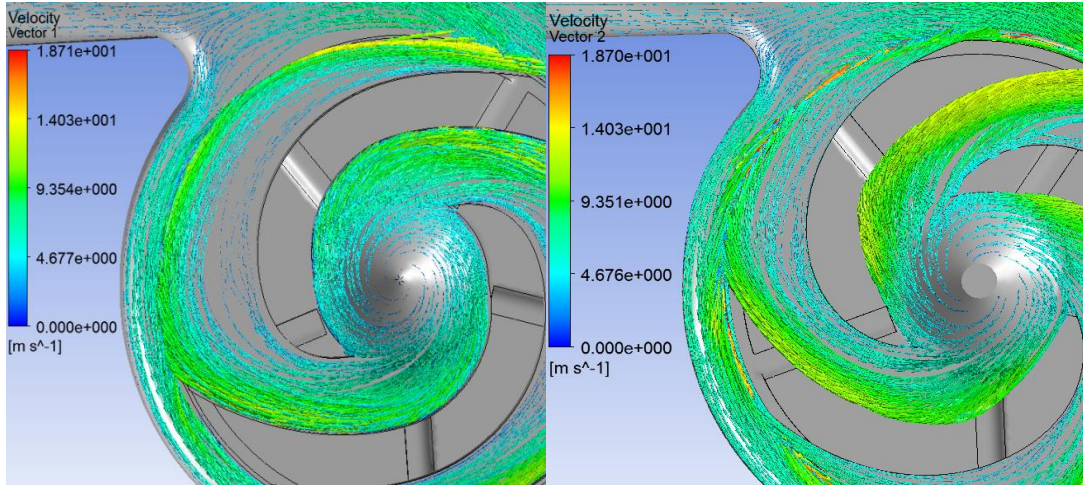
Şekil 7.14. 2 ve 3 kanatlı çarklarda oluşan hız vektörleri

2 ve 3 kanatlı çarklar içerisinde akışın hız vektörleri sayesinde görselleştirilmesi şeklindeki gibidir. Büyük hızların büyük oklarla, küçük hızların küçük oklarla gösterildiği bilinmektedir. Renk dağılımından da anlaşılacağı üzere çark kanat çıkış kenarında akış hızının maksimum olduğu belirgin bir şekilde görülmektedir.



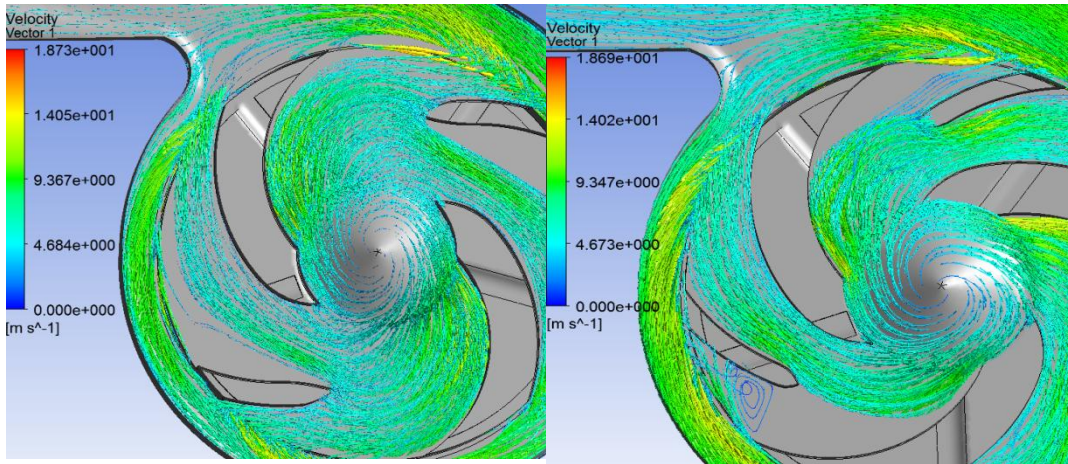
Şekil 7.15. 3 ve 4 kanatlı çarklarda oluşan hız vektörleri

4 ve 5 kanatlı çarklarda hız vektörleri şeklindeki gibidir. Her iki çarkta da salyangoz çıkış bölgesinde akışın tekrar çark içerisine girdiği hız vektörleri sayesinde belirgin bir şekilde görülmektedir.



Şekil 7.16. Uzun kanatlı 2K ve 3K çarklarda oluşan hız vektörleri

Uzun kanatlı çark içerisinde net bir şekilde görülüyor ki kanat iç bölgesinde akışkan hızı yüksek, dolayısıyla basınç düşüktür. Kanat dış kısmında ise akış ayrılmalarından dolayı akış miktarı ve hızı düşüktür. Bu da çark içerisinde kanat etrafında basınç farkı oluşmasına neden olmaktadır. Açık ve yarı açık çarklarda aralık kaybının nedenlerinden biri bu basınç farkıdır.

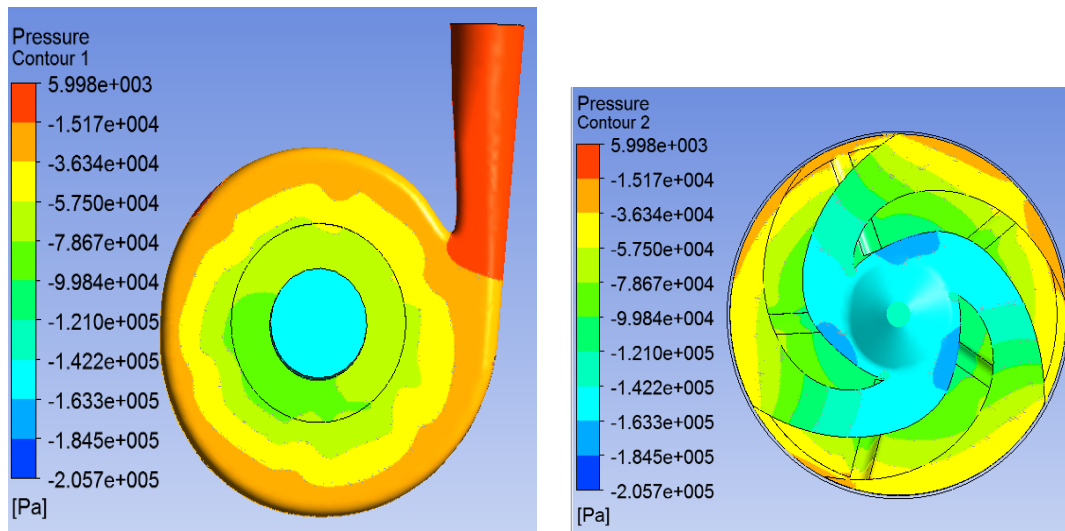


Şekil 7.17. Ara kanatçık ekli 2K ve 3K çarklarda oluşan hız vektörleri

Ara kanatçıkların akışkana fazladan hız kazandırdığı şekilden de görülmektedir. Salyangoz çıkışında bu hız basınca dönüşerek pompanın basma yüksekliğini artıracaktır.

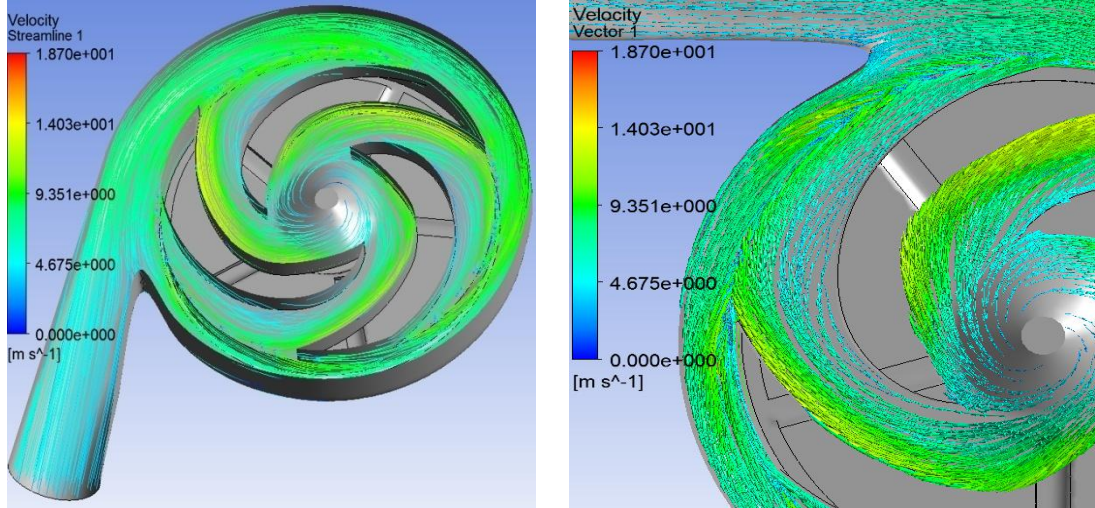
7.3. Salyangoz Optimizasyonu

HAD analizleri sayesinde pompa içerisinde karmaşık akışları görselleştirmek yapılan çalışmadan da görüleceği üzere mümkün olmaktadır. HAD analizleri mevcut çarklar kullanıldığı takdirde pompalarda nasıl bir akışın meydana geleceği hakkında bir fikir vermiştir. Pompayı bir bütün olarak düşündüğümüzde pompa performansına etki eden öğelerin çark üzerinde kanat şekli, sayısı, çıkış açısı, kalınlığı ve uzunluğunun olduğu tahmin edilebilir. Çark dışında pompa performansına etki eden bir diğer öğe de pompa salyangozudur. Yapılan analizlerde de görüldüğü gibi çark çıkışında akışkanın bir kısmı salyangoz çıkış bölgesinde salyangoz tasarımından dolayı tekrar çark içerisine dönmekte idi. Bu da pompa performansına olumsuz etki eden bir durumdur çünkü çarka fazladan yük bindirecek ve milden daha fazla güç çekecektir. Bu nedenle salyangoz dil bölgesini daha keskin hale getirip bu bölgenin pompa performansına etkisinin olup olmadığı incelenmiştir.



Şekil 7.18. Dil bölgesinin yeniden tasarlanması durumunda pompa ve çarkında basınç dağılımı

Dil bölgesi keskin hale getirilmiş uzun kanatlı pompa da basınç dağılımı şekildeki gibidir. Basınç dağılımından da anlaşılacağı üzere pompa dil bölgesinde salyangoz çıkış çeperlerine etkiyen basıncın daha az yer kapladığı görülmektedir. Bu da katı-sıvı taşınması durumunda dil bölgesinde salyangoz çeperinde meydana gelen aşınmayı yavaşlatacaktır.



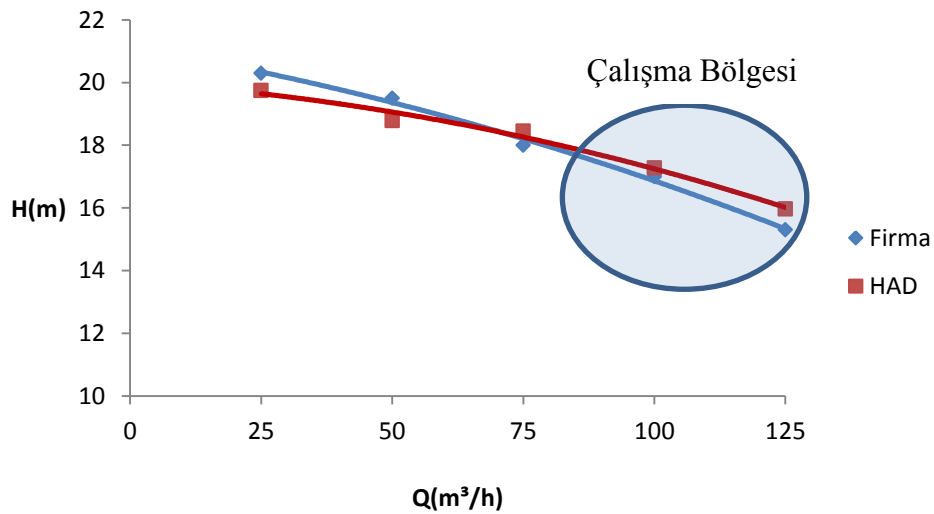
Şekil 7.19. Dil bölgesinin yeniden tasarlanması durumunda pompa ve çarkında oluşan akım çizgileri ve hız vektörleri

Dil bölgesini keskin hale getirdikten sonra pompada oluşan akım çizgileri ve hız vektörleri şekildeki gibi olmaktadır. Şekilden de anlaşılacağı üzere dil bölgesinde daha düzenli bir akışın meydana geldiği görülmektedir.

7.4. Radyal Çamur Pompasının Su İletmesi Durumunda Pompa Performans

Eğrileri

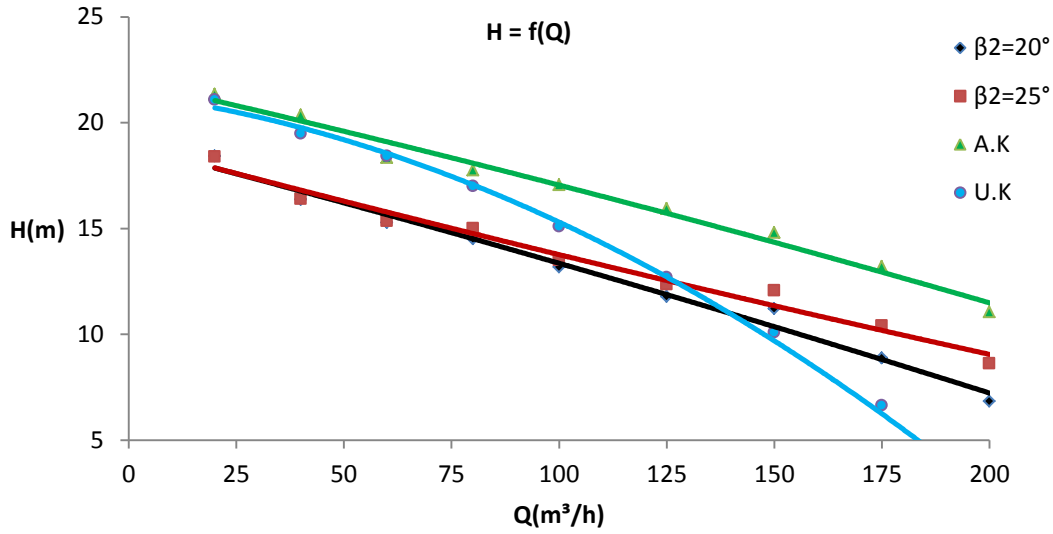
- a) Model çamur pompasının firma kısma eğrisi ile HAD kısma eğrisinin karşılaştırılması



Şekil 7.20. 978 d/d 'da HAD ile analizi yapılmış 3 kanatlı model pompanın kısma eğrisi ile firma mevcut eğrisinin karşılaştırılması

Radyal tipli kapalı çarklı model çamur pompası verileriyle yapılan HAD analizi sonucu oluşturulan pompa kısma eğrisi ile firmanın mevcut kısma eğrisi karşılaştırıldığında düşük debilerde, çalışma şartları dışında HAD analiz sonuçlarının daha düşük seviyelerde kaldığını görmekteyiz. Bunun sebebi düşük debilerde geniş akış koridorları dolayısıyla akışkanın yüksek sürkülasyon ve çalkantılara maruz kalması sonucu enerjisini kaybetmesinden kaynaklanmaktadır [31]. Çalışma noktası civarında iki eğrinin kesiştiği ve birbirine yakın değerler aldığı şekilden de görülmektedir. Bu sonuçla doğru bir modelleme ile HAD yöntemiyle pompa performans eğrilerinin elde edilebileceği ve pompa performansına etki eden parametrelerin optimizasyonunun yapılabileceği anlaşılmıştır.

b) 2 kanatlı farklı çark tasarımlarında pompa performans eğrilerinin karşılaştırılması

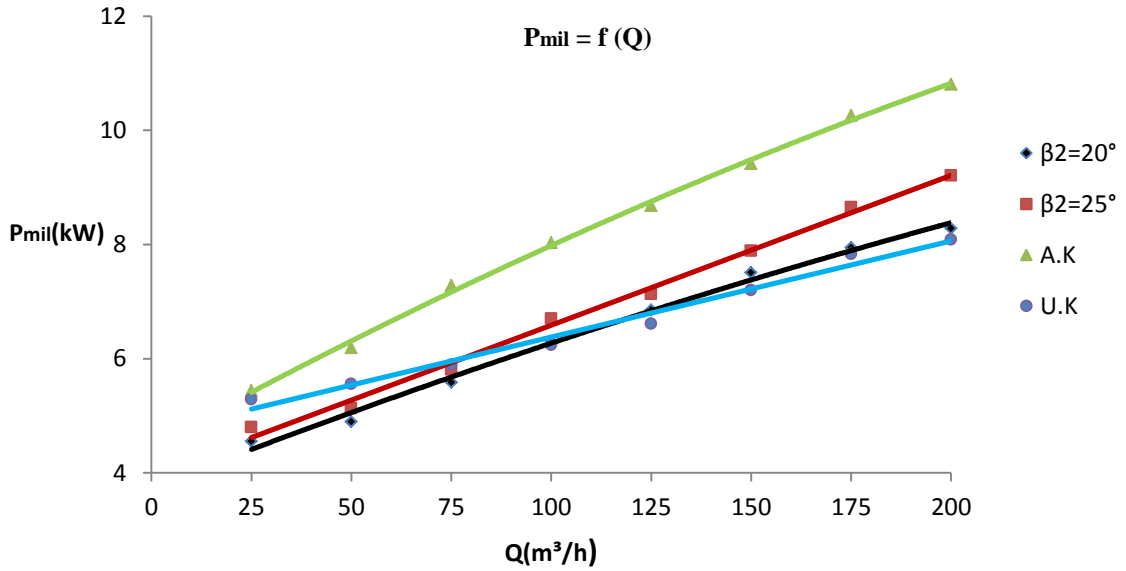


Şekil 21. 2 kanatlı çarkta farklı kanat profillerinde pompa debi- yük eğrileri

Analiz sonuçlarıyla oluşturulmuş debi-yük eğrilerinin karşılaştırılması yukarıdaki şekilde verilmektedir. Bu sonuçlara göre;

Kanat çıkış açısının pompa basma yüksekliğine de etkili olduğu görülmüştür. Büyük kanat açılı çarkın ($\beta_2 = 25^\circ$) akışkana daha fazla basınç enerjisi kazandırdığını söyleyebiliriz.

Uzun kanat ve ara kanatçık kullanılması durumlarında pompa basma yüksekliklerinin daha yüksek olduğu görülmektedir. Uzun kanatlı çarkta artan debiyle birlikte basma yüksekliğindeki düşük daha keskindir. Ara kanatçıkların pompa basma yüksekliğini belirgin bir şekilde artırdığı görülmektedir.

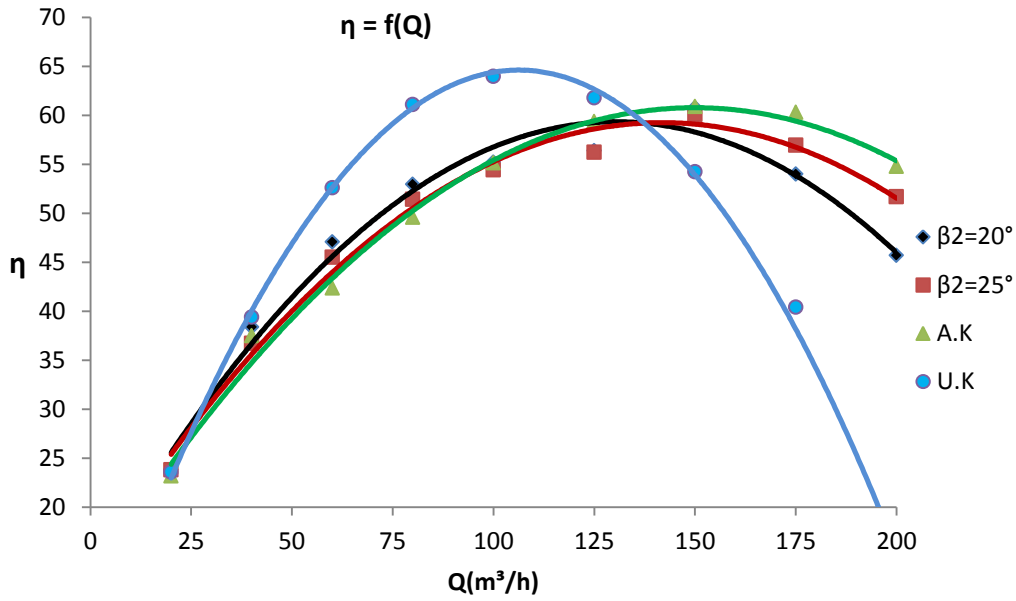


Şekil 22. 2 kanatlı çarkta farklı kanat profillerinde debi- mil gücü eğrileri

Analiz sonuçlarıyla oluşturulmuş debi-mil gücü eğrilerinin karşılaştırılması yukarıdaki şekilde verilmektedir. Bu sonuçlara göre;

$\beta_2 = 25^\circ$ 'li kanat açısına sahip çarkın daha fazla mil gücü tükettiği, dolayısıyla $\beta_2 = 20^\circ$ çıkış açısına sahip çarka göre daha düşük verime sahip olduğu şekilden de görülmektedir.

Ara kanatçık ekli çarkın en fazla mil gücü tüketen çark olduğu, çalışma noktası civarında ise uzun kanatlı çarkın düşük mil gücü tükettiği grafikten anlaşılmaktadır.



Şekil 23. 2 kanatlı çarkta farklı kanat profillerinde debi-verim eğrileri

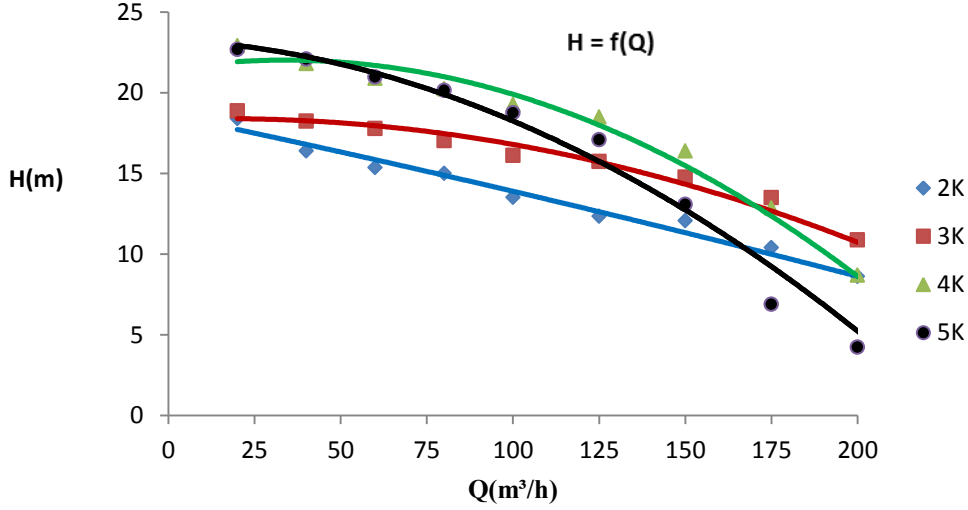
Çamur pompasının farklı çark tasarımlarıyla su ile yapılan analizleri sonucunda debi-verim eğrilerinin değişimi şekil 4.9' da görülmektedir. Bu sonuçlara göre çamur pompalarında kanat çıkış açısının pompa veriminde etkili olduğu değerlendirilmiştir.

Düşük debilerde küçük kanat açılı ($\beta_2 = 20^\circ$) çarkın daha verimli olduğu, yüksek debilerde ise büyük kanat açılı ($\beta_2 = 25^\circ$) çarkın daha verimli olduğu görülmektedir. Çalışma noktasında ise verimler birbirine yakın olmakla birlikte $\beta_2 = 20^\circ$ olduğu çarkta pompa verimi daha yüksektir. (% 56.4 - %56.2)

Uzun kanatlı çark kullanılması durumunda çamur pompasının çalışma debisi 100 m³/h olmaktadır. Bu debi değerinde pompa verimi yaklaşık olarak % 64 olmaktadır. İki kanatlı çark için bu performans gayet iyidir. Çalışma debisinden sonra artan debiyle birlikte pompa verimi düşmektedir.

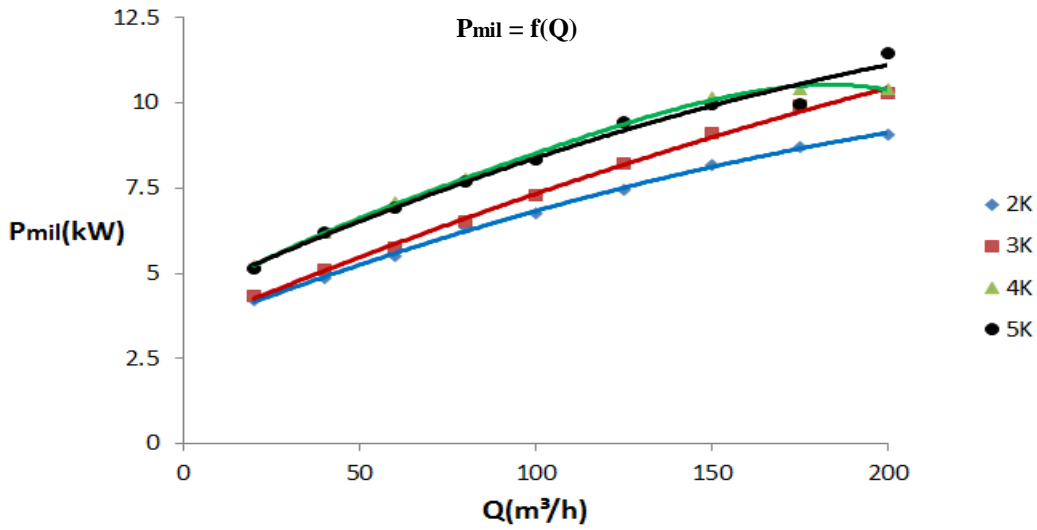
Ara kanatçık ekli çarkın çalışma noktası 150 m³/h olarak belirlenebilir. Çalışma noktasından daha düşük debilerde pompanın en düşük verime sahip olduğu görülmektedir. Fakat çalışma noktası debisinde ise en yüksek verime sahiptir. Bunun nedeni akışkanın daha çark üzerindeyken ara kanatçıklar tarafından hızlandırılıp salyangoza varmadan çıkışa yönlendirilmesi olarak düşünülmüştür.

c) 2, 3, 4 ve 5 kanatlı çarkların kullanılması durumunda radyal çamur pompası performans eğrilerinin karşılaştırılması



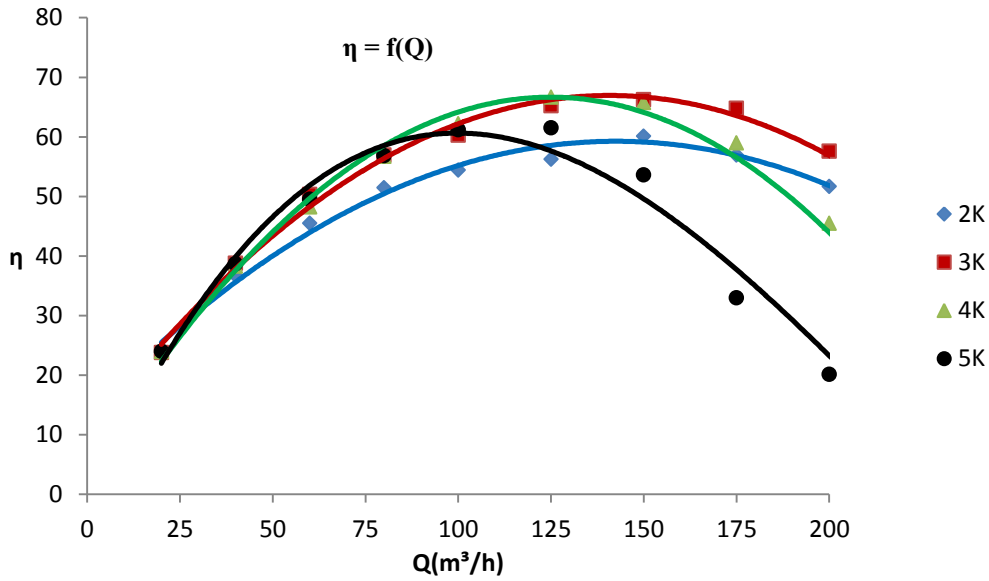
Şekil 7.24. 2, 3, 4 ve 5 kanatlı radyal çamur pompalarının kısımla eğrilerinin karşılaştırılması

Şekilden de görüleceği üzere belli bir debi aralığına kadar kanat sayısının artması basma yüksekliğinde artışa sebep olur ancak $125 m^3/h$ kritik debi değeri aşıldığında kanat sayısının artması (4,5) basma yüksekliğinde ani düşümlere neden olmaktadır. 2 ile 3 kanatlı çamur pompalarının debi-basma yüksekliği eğrisi 4 ile 5 kanatlı pompalardan daha dengelidir. Bu iki pompada debi artışıyla basma yüksekliğinde ani düşüşler görülmemektedir.



Şekil 7.25. 2, 3, 4 ve 5 kanatlı çarklara ait debi-mil gücü eğrileri

Şekil 7.16' da debi-mil gücü eğrilerinden de görüleceği üzere çalışma şartlarında artan debi ile pompa mil gücünün arttığı görülmektedir. En düşük mil gücünü 2 kanatlı pompa kullanırken, en yüksek mil gücünü 5 kanatlı pompa kullanmaktadır. 4 ve 5 kanatlı pompaların 150 m³/h debiye kadar çektiği güçler neredeyse aynı olduğu görülür. 3 kanatlı pompanın tükettiği mil gücü, 4 ve 5 kanatlı pompalara göre daha düşüktür. Çarkın tükettiği mil gücünün doğrudan verimle ilişkili olmasından dolayı verime önemli derece etki etmektedir.



Şekil 7.26. 2, 3, 4 ve 5 kanatlı çarklara ait debi-verim eğrileri

Şekil 7.24 ve 7.25' de elde edilmiş olan basma yükseklikleri-debi, mil gücü-debi eğrileri sayesinde pompa verimleri hakkında bir fikir sahibi olmak mümkündür.

Şekil 7.26 'de verilmiş olan verim eğrilerinden de anlaşılacağı üzere 150 m³/h değerinden sonra 5 kanatlı pompa veriminin düşüşe geçtiği görülür. Bu durumun nedeni yüksek debilerde kanatlar arası geçit bölgesinin darlığından kaynaklanan geçit kayıplarının artmasıdır. Yüksek kanat sürtünmelerinde kaynaklanan geçit kayıpları pompa verimini keskin bir şekilde düşürmektedir.

3 ve 4 kanatlı pompaların 150 m³/h debisine kadar verimleri çok yakındır fakat bu noktadan sonra 4 kanatlı pompanın veriminin düşüşü daha keskin olmuştur. Bunun nedeni yukarıda da ifade edildiği gibi yüksek debilerde geçit kayıplarının artmasıdır.

100 m³/h debiye kadar 3, 4 ve 5 kanatlı pompaların verimleri birbirine çok yakın olduğu gözlenir. Bu debilerde çalıştırılmak için seçilecek bir pompanın 3 kanatlı olması tercih edilmelidir. Çünkü 4 ve 5 kanatlı pompalarda yüksek hızlardan kaynaklanan aşınmaların varlığı söz konusudur.

7.5. Radyal Çamur Pompasının Su ve Su-Kum İletmesi Durumunda Pompa Performans Eğrilerinin Karşılaştırılması

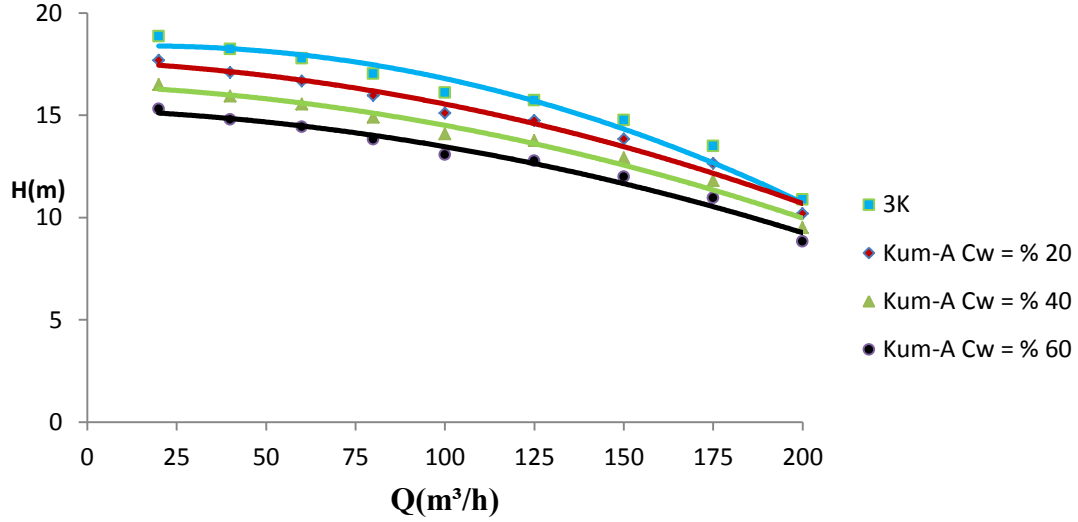
Radyal çamur pompasının sadece su iletimi durumundaki performansı ile kat-sıvı iletimi durumundaki performansı birbirinden farklı olmaktadır. Bu nedenle katı-sıvı iletiminde kullanılacak pompanın seçimi için öncelikle pompanın su ile yaptığı analizler referans alınarak pompa performansı belirlenir. Daha sonra karışımda kullanılacak olan katı maddenin özelliklerine göre geliştirilmiş korelasyonlar yardımıyla mevcut pompanın katı-sıvı iletimi durumundaki pompa performansı tespit edilir.

Bu çalışmada HAD analizi yardımıyla mevcut pompaların su iletimi durumunda pompa performansları belirlendi. Ayrıca analizi yapılan model pompanın kum-su iletimi durumunda basma yüksekliği ve verimindeki düşüş literatürde bilinen Engin ve Gür'ün geliştirdiği korelasyon yardımıyla (K_1) tahmin edilmiştir. Bu amaçla üç farklı katı madde Kum-A, Kum-B, ve Kum-C 'nin farklı konsantrasyonlarda su ile taşınması durumunda tahmini performans eğrileri aşağıda verilmiştir.

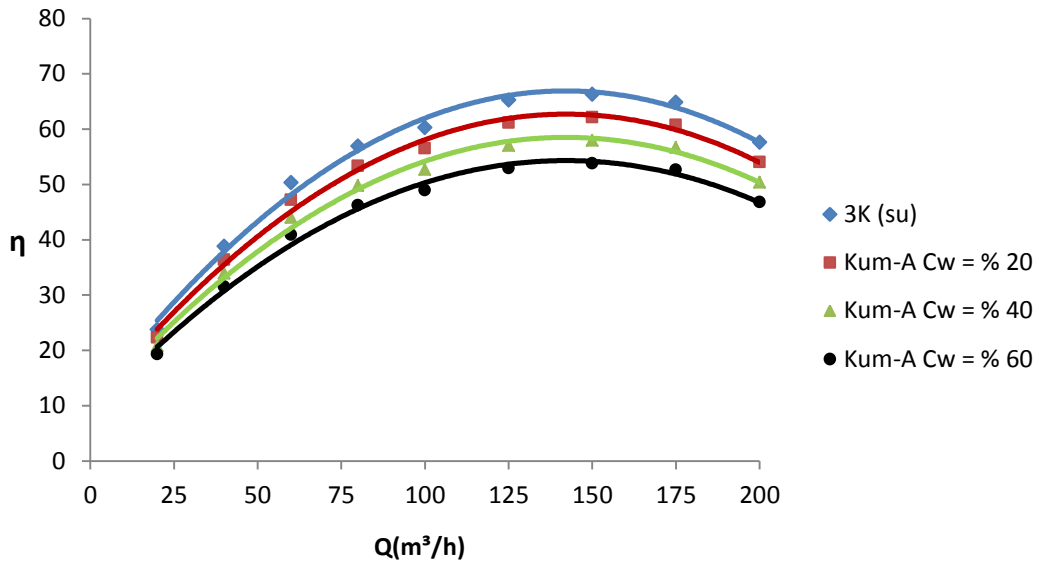
Tablo 7.1. Kat-sıvı iletiminde kullanılan katı madde ve özellikleri

Madde ismi	S	d_{50} (μm)	d_w (μm)	$c_{w(min)}$ (%)	$c_{w(max)}$ (%)
Kum-A	2.65	180	180	10	60
Kum-B	2.65	230	230	10	60
Kum-C	2.65	460	460	10	60

7.5.1. Kum-A'nın farklı konsantrasyonlarda iletilmesi durumunda pompa performans eğrileri



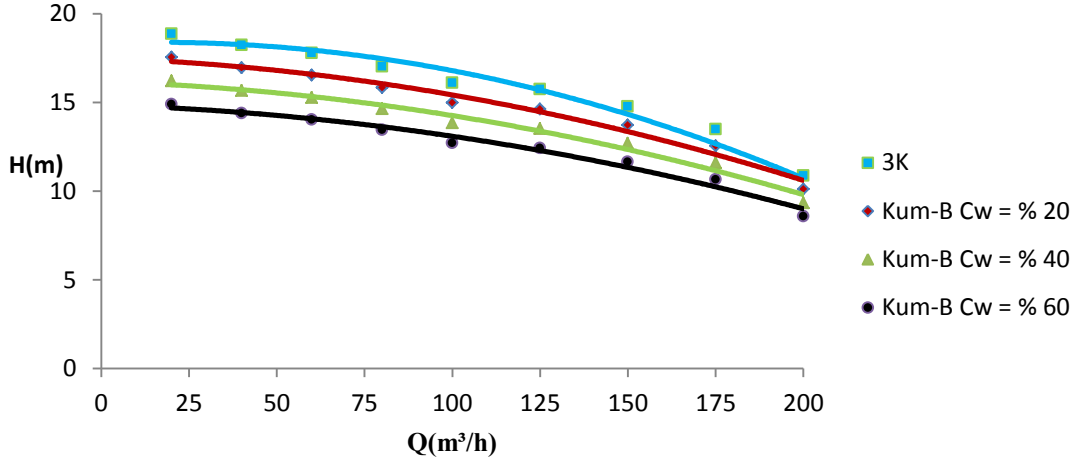
Şekil 7.27. 3 kanatlı model pompanın kısıma eğrisi ile K_1 korelasyonu yardımıyla hesaplanan Kum-A'nın farklı konsantrasyonlardaki kısıma eğrilerinin karşılaştırılması



Şekil 7.28. 3 kanatlı model pompanın verim eğrisi ile K_1 korelasyonu yardımıyla hesaplanan Kum-A'nın farklı konsantrasyonlardaki verim eğrilerinin karşılaştırılması

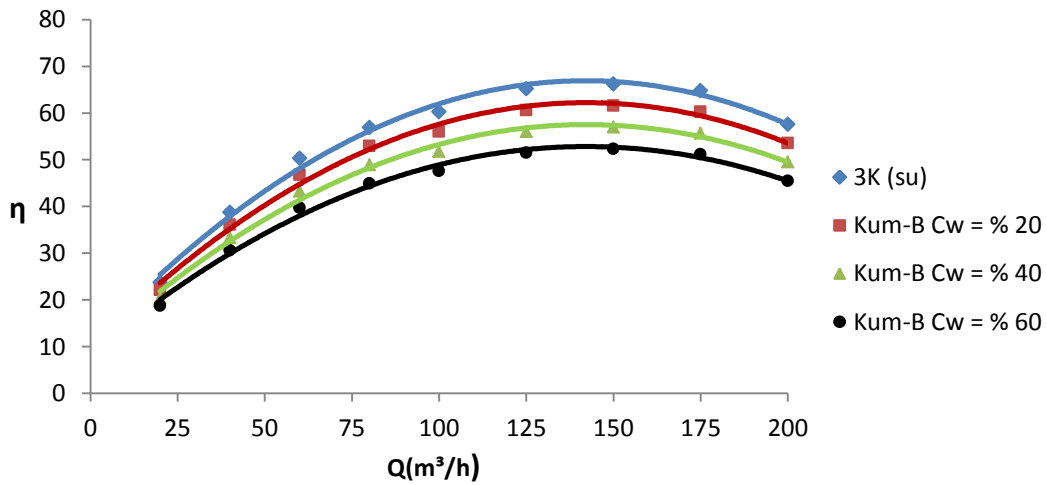
Çift faz durumunda artan konsantrasyonla pompa performans değerlerinin düşmesi (şekil 7.27) sonucu pompa verimi düşer. Şekil 7.28 görüldüğü gibi su iletilmesi durumunda pompa en yüksek verimde iken % 60 konsantrasyonlu karışım pompalanması durumunda ise verimin en düşük olduğu görülür.

7.5.2. Kum-B'nin farklı konsantrasyonlarda iletilmesi durumunda pompa performans eğrileri



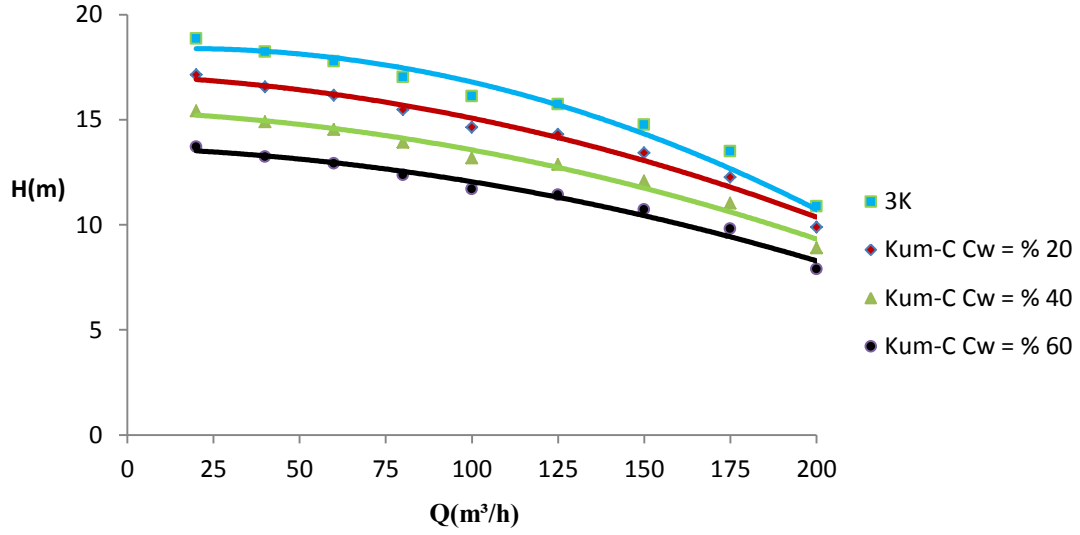
Şekil 7.29. 3 kanatlı model pompanın kısıma eğrisi ile K_1 korelasyonu yardımıyla hesaplanan Kum-B'nin farklı konsantrasyonlardaki kısıma eğrilerinin karşılaştırılması

Şekilde sadece su pompalanması ile K_1 korelasyonu göre su-kum-B'nin farklı konsantrasyonlardaki karışımı pompalanması durumunda kısıma eğrileri karşılaştırılmıştır. Şekilden de görüleceği üzere katı maddenin konsantrasyonu arttıkça basma yüksekliği düşmektedir. Kum-B'nin de kum-A' da olduğu gibi çift faz durumunda performans değerlerinin artan konsantrasyonla düştüğü görülür (şekil 7.29 ve şekil 7.30).



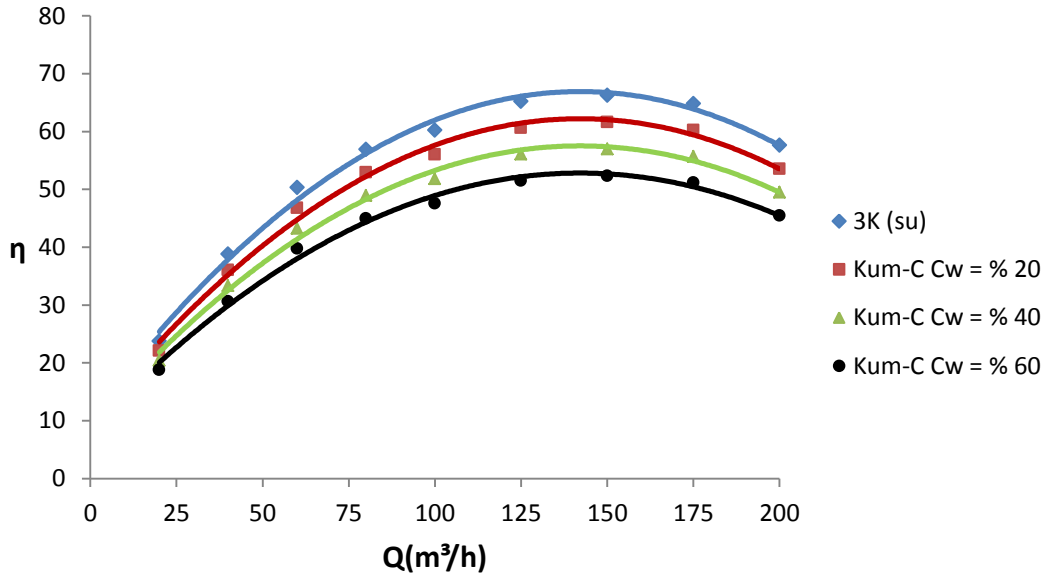
Şekil 7.30. 3 kanatlı model pompanın verim eğrisi ile K_1 korelasyonu yardımıyla hesaplanan Kum-B'nin farklı konsantrasyonlardaki verim eğrilerinin karşılaştırılması

7.5.3. Kum-C'nin farklı konsantrasyonlarda iletilmesi durumunda pompa performans eğrileri



Şekil 7.31. 3 kanatlı model pompanın kısıma eğrisi ile K_1 korelasyonu yardımıyla hesaplanan Kum-C'nin farklı konsantrasyonlardaki kısıma eğrilerinin karşılaştırılması

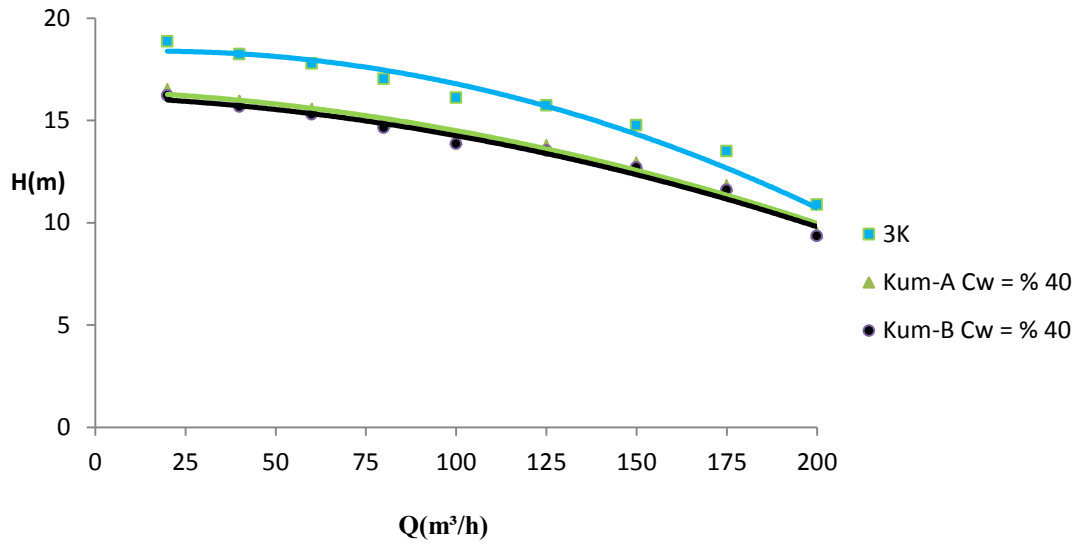
Şekil 7.31'de K_1 korelasyonu ile oluşturulan kum-C 'in farklı konsantrasyonlarındaki karışımının kısıma eğrisi kum-A ve kum-B'ye benzer olduğu görülmüştür.



Şekil 7.32. 3 kanatlı model pompanın verim eğrisi ile K_1 korelasyonu yardımıyla hesaplanan Kum-C'nin farklı konsantrasyonlardaki verim eğrilerinin karşılaştırılması

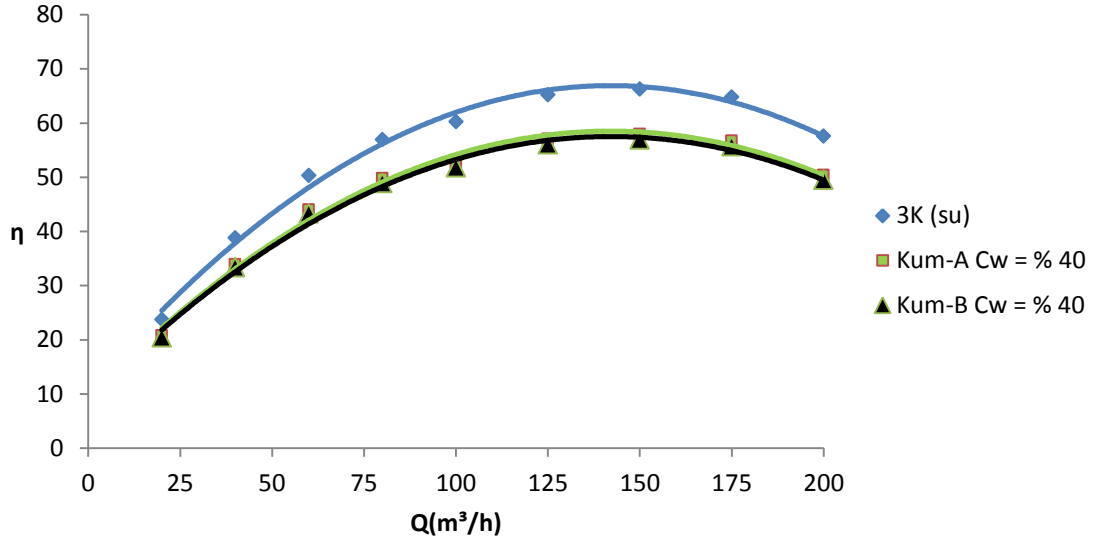
Kum-C 'nin farklı konsantrasyonlarda su ile iletimi şekil 7.32 gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü üzere yüksek konsantrasyonlu karışımın iletilmesi durumunda verimdeki düşüşün göz ardı edilemeyeceği anlaşılmaktadır.

7.5.4. Kum-A ve kum-B'nin % 40 konsantrasyonda kısma ve verim eğrilerinin karşılaştırılması



Şekil 7.33. 3 kanatlı model pompanın kısma eğrisi ile K_1 korelasyonu yardımıyla hesaplanan Kum-A ve Kum-B'nin % 40 konsantrasyondaki kısma eğrilerinin karşılaştırılması

Şekilden de görüleceği gibi katı taneciğinin ortalama çapının artmasıyla basma yüksekliği düşer. En büyük katı taneciği çapına sahip Kum-B 'nin en düşük basma yüksekliğine sahip olduğu açık bir şekilde görülmektedir.



Şekil 7.34. 3 kanatlı model pompanın verim eğrisi ile K_1 korelasyonu yardımıyla hesaplanan Kum-A ve Kum-B'nin % 40 konsantrasyondaki verim eğrilerinin karşılaştırılması

Şekil 7.30' da en büyük katı taneciği çapına sahip kum-B 'nin en düşük verimde olduğu bunla birlikte en küçük katı tanecik çapına sahip kum-A 'nın da tek fazlı akıştan sonra en iyi verime sahip olduğu görülmektedir. Böylece katı tanecik çapının pompa performansı üzerindeki etkisi açık bir şekilde görülmüş oldu.

Karışım durumunda pompa basma yüksekliğindeki düşüşle birlikte pompa mil gücünün artacağı dolayısıyla verimin düşeceği beklenmektedir. Bu durumda pompanın suyla yapılmış testlerinde elde edilen verim değerlerinin katı-sıvı iletimi durumunda ancak üst sınır olabileceği bilinmelidir.

BÖLÜM 8. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Çarklar, su pompalarında olduğu gibi çamur pompalarında da pompa performansına etki eden en önemli pompa bileşenidir. Bu nedenle çark üzerindeki küçük bir iyileştirme pompa verimine doğrudan olumlu yönde etki ettiği yapılan analizler sonucunda teyit edilmiştir.

Çamur pompası çarkı için düzenli bir akış şekli oluşturmalarından dolayı geriye eğimli kanatlar verimli bir şekilde kullanılabilir.

Genel itibarıyla model çamur pompası boyutları dikkate alındığında model pompanın analizi yapılan çarklarla çalışma bölgesindeki debisi 100-150 m³/h debi aralığında değişmektedir. Çark kanat sayısına göre debi bu aralık değerinde değişmektedir.

HAD analizleri sonucu yük-debi, mil gücü-debi, verim-debi pompa performans eğrilerinden anlaşılacağı üzere 2 kanatlı çarka sahip pompalar için çalışma debisi 150 m³/h 'dir. Bu debi değerinde 1000 (d/d)'da 2 kanatlı çarka sahip pompaların performans değerleri aşağıdaki gibidir.

- a) $\beta_2 = 20^\circ$ olduğu 2 kanatlı çark için pompanın basma yüksekliği 11.2 m olurken, tükettiği mil gücü 7.5 kW verimi de %61 olmuştur.
- b) $\beta_2 = 25^\circ$ olduğu 2 kanatlı çark için pompanın basma yüksekliği 12 m olurken, tükettiği mil gücü 7.9 kW verimi de %60 olmuştur.
- c) Ara kanatçık ekli 2 kanatlı çark için pompanın basma yüksekliği 14.8 m olurken, tükettiği mil gücü 9.4 kW verimi de %61 olmuştur.

- d) 2 uzun kanatlı pompa çarkı için $150 \text{ m}^3/\text{h}$ debide, pompa basma yüksekliği 10 m olurken, tükettiği mil gücü 7.2 kW verimi de %54 olmuştur. Fakat bu çarkın çalışma debisi $100 \text{ m}^3/\text{h}$ 'dir. Bu noktada pompanın basma yüksekliği 15 m olurken, tükettiği mil gücü 6.2 kW verimi de %64 olmuştur.

Analizler sonucunda kanat çıkış açısının pompa performansı üzerinde etkili olduğu teyit edilmiştir. 2 kanatlı çarkta düşük debilerde küçük kanat açılı ($\beta_2 = 20^\circ$) çarkın daha verimli olduğu, yüksek debilerde ise büyük kanat açılı ($\beta_2 = 25^\circ$) çarkın daha verimli olduğu anlaşılmıştır. Çalışma noktasında ise verimler birbirine yakın olduğu (%56.4 - %56.2) anlaşılmıştır. Büyük kanat açılı çarkın ($\beta_2 = 25^\circ$) akışkana daha fazla basınç enerjisi kazandırması sonucu yük değerleri daha yüksektir.

2 kanatlı ve ara kanatçık ekli çarkın çalışma noktası $150 \text{ m}^3/\text{h}$ olarak belirlenmiştir. Çalışma noktasından daha düşük debilerde bu çarkın en düşük verime sahip olduğu fakat çalışma noktası debisinde ise en yüksek verime sahip olduğu görülmüştür. Bunun nedeni akışkanın daha çark üzerindeyken ara kanatçıklar tarafından hızlandırılıp salyangozda fazla enerji kaybına uğramadan çıkışa yönlendirilmesi olarak düşünülmüştür. Ayrıca ara kanatçıkların pompa basma yüksekliğini belirgin bir şekilde artırdığı görülmüştür. Bununla birlikte mil gücü tüketimi artmaktadır.

2 uzun kanatlı çark kullanılması durumunda pompa performansı 3 kanatlı model pompaya yakın bir duruma gelmiştir. 3 kanatlı model çarka göre 2 uzun kanatlı çarkın kullanılması durumunda çark içerisinde nispeten düşük hızlardan dolayı çark ömrünün daha uzun olması beklenmektedir. Bu çark mevcut çarka birinci alternatif olmaktadır.

2 kanatlı çarklara nazaran 3, 4 ve 5 kanatlı çarkların kullanılması durumunda pompa çalışma noktası debisinin $125 \text{ m}^3/\text{h}$ olduğu anlaşılmaktadır. Çalışma noktasında 1000 (d/d)'da her bir pompanın performans değerleri aşağıdaki gibidir.

- a) 2 kanatlı çark için pompanın basma yüksekliği 12.35 m olurken, tükettiği mil gücü 7.71 kW verimi de %56.2 olmuştur.

- b) 3 kanatlı çark için pompanın basma yüksekliği 15.7 m olurken, tükettiği mil gücü 8.47 kW verimi de %65.2 olduğu görülmüştür.
- c) 4 kanatlı çark için pompanın basma yüksekliği 18.5 m olurken, tükettiği mil gücü 8.39 kW verimi de %66.6 olmuştur.
- d) 5 kanatlı çark için pompanın basma yüksekliği 18.76 m olurken, tükettiği mil gücü 8.64 kW verimi de %61.2 çıkmıştır.
- e) 3 uzun kanatlı pompa çarkı için pompa basma yüksekliği 16.33 m olurken, tükettiği mil gücü 8.35 kW verimi de %68.6 olmuştur.
- f) 3 kanatlı ve ara kanatçık ekli pompa çarkı için pompa basma yüksekliği 18.98 m olurken, tükettiği mil gücü 9.93 kW verimi de %67.1 olduğu görülmüştür.
- g) Son olarak 3 uzun kanatlı pompa çarkı ve yeni salyangoz tasarımı durumunda pompa basma yüksekliği 16.3 m olurken, tükettiği mil gücü 8.06 kW verimi de %71 olmuştur.

Su pompalarında olduğu gibi çamur pompalarında da çark üzerinde bulunan kanat sayısı önemli bir parametredir. HAD yazılımı olan Fluent programı kullanılarak su ile yapılan analizler sonucunda 2, 3, 4 ve 5 kanatlı çarklardan 3 ve 4 kanatlı çarkların en iyi performansı sergilediği görülmüştür.

2 kanatlı çarkın diğer çarklara göre hem basma yüksekliğinin düşük olması hem de veriminin düşük olmasından dolayı pompa performansı 3 ve 4 kanatlı pompaya göre düşüktür.

4 kanatlı çark, 3 kanatlı çarka göre % 2 daha verimli olmakla birlikte basma yüksekliği % 17 daha fazladır. Bu çark firmanın tasarlamayı düşündüğü 3 kanatlı model pompa çarkı için ikinci alternatif olmuştur.

5 kanatlı çarkın 4 kanatlı çarkla birlikte en yüksek basma yüksekliği sağlamasına rağmen 4 kanatlı çarkla karşılaştırıldığında hiçbir avantajının olmadığı görülmüştür. Bu nedenle tercih edilmesi önerilmemektedir.

Firmanın imal etmeyi düşündüğü 3 kanatlı model çarka üçüncü bir alternatif olarak geliştirilen ara kanatçık ekli çarkın, yapılan analiz sonucunda model çarktan daha

verimli olduğu görülmüştür. Ara kanatçıklar model çarkın basma yüksekliğini % 23 artırırken verimini de % 3 artırmıştır.

Firmanın imal etmeyi düşündüğü 3 kanatlı model çarka dördüncü bir alternatif olarak geliştirilen 3 uzun kanatlı çarkın yapılan analizler sonucu en iyi verime sahip olduğu dolayısıyla en iyi pompa performansı sağladığı görülmüştür. Bu çark model çarka göre basma yüksekliğini % 5.5 artırırken, verimi de % 7 artırmaktadır. Görüldüğü gibi verimdeki bu artış çamur pompalarında iyi sayılabilecek değerdir.

Performans kaybına neden olan salyangoz dil bölgesinin değiştirilmesiyle 3 uzun kanat kullanılması durumunda firmanın model pompasına göre beşinci alternatif olan bu yeni pompanın basma yüksekliğinde % 5.5 'lik bir artış, pompa veriminde ise ilk duruma göre % 10'luk bir iyileştirme sağlanmıştır. Toplamda yeni tasarlanan pompanın verimi % 71 gibi çamur pompaları için çok iyi denenecek bir seviyeye ulaşmıştır.

Çalışma noktasında 1000 (d/d)'da çift fazlı akış halinde 125 m³/h çalışma noktasında model çamur pompasının pompa performans değerleri aşağıda verilmiştir.

- 1) Kum- A' nın iletilmesi durumunda:
 - a) %20 konsantrasyonda model çamur pompasının basma yüksekliği 14.75 m olurken, verimi de %61 olmuştur.
 - b) %40 konsantrasyonda model çamur pompasının basma yüksekliği 13.76 m olurken, verimi de %57 olmuştur.
 - c) %60 konsantrasyonda model çamur pompasının basma yüksekliği 12.77 m olurken, verimi de %53 olmuştur.
- 2) Kum- B' nin iletilmesi durumunda:
 - a) %20 konsantrasyonda model çamur pompasının basma yüksekliği 14.63 m olurken, verimi de %60.6 olmuştur.
 - b) %40 konsantrasyonda model çamur pompasının basma yüksekliği 13.53 m olurken, verimi de %56 olmuştur.

- c) %60 konsantrasyonda model çamur pompasının basma yüksekliği 12.42 m olurken, verimi de %51.4 olmuştur.

3) Kum- C' nin iletilmesi durumunda:

- a) %20 konsantrasyonda model çamur pompasının basma yüksekliği 14 m olurken, verimi de %60 olmuştur.
- b) %40 konsantrasyonda model çamur pompasının basma yüksekliği 13 m olurken, verimi de %55.5 olmuştur.
- c) %60 konsantrasyonda model çamur pompasının basma yüksekliği 11.5 m olurken, verimi de %51 olmuştur.

Pompaların tek ve çift faz akış durumlarında performansları birbirinden oldukça farklıdır. Çamur pompasının kum su iletilmesi durumunda sudan daha yoğun olan kum-A, kum-B ve kum C'nin pompa çarkına fazladan yük bindirerek pompa mil gücünü artırdığı, basma yüksekliği ve verimi de düşürdüğü anlaşılmıştır. Bu durumda pompanın suyla yapılmış testlerinde elde edilen yük ve verim değerlerinin katı-sıvı iletimi durumunda ancak üst sınır olabileceği bilinmelidir.

Çamur pompası çarklarının kanat çıkış kenarında yüksek basınç ve hızlar oluşur. Bu nedenle katı-sıvı iletimi esnasında çarkın bu bölgeleri katı partikülleri dolayısıyla hızlı aşınacağı değerlendirilmektedir.

Çamur pompasında çift faz akış durumunda tanecik büyüklüğünün ve konsantrasyonunun pompa performansı üzerinde etkili olduğu görülmüştür. Bu değerlerin artmasıyla pompa performansında düşme söz konusu olmaktadır.

Yapılan karşılaştırma sonucunda düşük konsantrasyon ve küçük tanecik çaplarında pompa performansında çok belirgin bir farkın olmadığı görülmüştür.

Bu çalışmada yer alamayan ilerde çalışılması gereken bir diğer unsur kanat kalınlığının optimize edilmesi düşünülebilir.

KAYNAKLAR

- [1] ENGİN,T., Radyal Pompaların Katı-Sıvı Karışımı İletiminde Kullanılmasının Deneysel İncelenmesi. Doktora Tezi, SAÜ, 2000.
- [2] KAYA,M., Santrifüj Pompa Performansının Sayısal Analizi. Yüksek Lisans Tezi, İTÜ, 2009.
- [3] ATLI, Z., Yarı Açık Çarklı Merkezkaç Fanların Aralık Kayıplarının Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği İle Simülasyonu, Yüksek Lisans Tezi, SAÜ,2006.
- [4] STEPANOFF, A.J., Pumps and Blowers, Two Phase Flow and Pumping of Solids in Suspension and Fluid Mixtures, John Wileyand Sons, London. 1965
- [5] VOCADLO, J.J.,KOO, J.K and PRANG, A.J., Performance of Centrifugal Pumps in Slurry Services, Proc. Hydro Transport-3, Paper J2,BHRA Fluid Engineering, 1974.
- [6] CAVE, I., Effects of Suspended Solids on the Performance of Centrifugal Pumps, Proc. Hydro Transport-4, BHRA Fluid Engineering, 1976.
- [7] BURGESS, K.E.,REIZES, A., The effect of Sizin, Spesifik Grafit and Concentration on the Performance of Centrifugal Pumps Proc. Inst. Mech. Eng, 190-36/76, pp. 391-399, 1976.
- [8] SELLGREN,A., Performance of Centrifugal Pumps When Pumping Oresand Industrial Minerals, Proc. Hydro Transport-6, paper G1, BHRA Fluid Engineering, 1979.
- [9] GAHLOT, V.K., V. SESHADRI, V AND MALHOTRA, R.C., Effect of Density , Size Distribution, and Concentration of Solids on the Characteristics of Centrifugal Pumps, ASME J. Fluids Eng,114. pp. 386-389,1992.
- [10] ENGIN, T.,GUR, M.,Comparative Evaluation of Some Existing Correlations to Predict Head Degradation of Centrifugal Slurry Pumps, Journal of Fluids Engineering, Vol.125, January 2003.

- [11] KAZIM, K.A.,MAITI, B., AND CHAND, P., Effect of Particle Size, Particle Size Distribution, Specific Gravity and Solids Concentration on Centrifugal Pump Performance, Powder Handle. Process, 9(1), pp. 27-32, 1997.
- [12] KADAMBI , J.R., CHAROENNGAM, PATHOM., SUBRAMANIAN, AMIRTHAGANESH.,WERNET, MARK P., SANKOVIC, JOHN M.,ADDIE, GRAEME., COURTWRIGHT, ROBERT., Investigations of Particle Velocities in a SlurryPump Using PIV: Part 1, The Tongue and Adjacent Channel Flow, Journal of Energy Resources Technology, December 2004, Vol.126
- [13] CHAROENNEGAM,P., KADAMBI,J.R., SUBRAMANIAN,A., ADDIE,G., Investigation of Slurry Flow in a Centrifugal Pump Using PIV, 4th International Conference on Multiphase Flow (ICMF-2001), New Orleans, La, 2001.
- [14] MEHTA,M., Study of Particulate Flow in the Intra-Blade Channels of a Slurry Pump Using Particle Image Velocimetry, M.S Thesis, Case Western Reserve University, Cleveland, OH 2004.
- [15] MAHIWAN, K., Study of Flow in Centrifugal Slurry Pump Impeller Using PIV, M.S Thesis, Case Western Reserve University, Cleveland, OH 2000.
- [16] ESTEVADEORDAL,J.,GOGINENI,S.,COPENHAVER,W.,BLOCK,G., BRENDDEL,M., Flow Field In A Low Speed Axial Fan: a DPIV Investigation, Expenrimental and Thermal Fluid Science 23, 11-21,2000.
- [17] HARLOW, F.H., Fluid Dynamics In Group T-3 Los Alamos National Laboratory (LA-UR-03-3852), Journal of Computational Physics 195 2004, 414-433.
- [18] SINGH R, R., NATARAJ, M., Analysis and Optimisation of Pump Performans Variables Using Genetic Algorithm and Taguchi Quality Concept: A Case Study ,International Journal of Mechanical Engineering Applications Research-Vol 03, Issue 03; Aug-Sep 2012.
- [19] ZHOU, W., ZHAO,Z., LEE. T,S., WINOTO S.H., Investigation of Flow Through Centrifugal Pump Impellers Using Computational Fluid Dynamics , International Journal of Rotating Machinery, 2003, pp 49-61.
- [20] SHUJIA, Z.,BAOLIN, Z., QINGBO, H., XIANHUA, L., Virtual Performance Experiment of a Centrifugal Pump", Proceedings of the 16th International Conferance on Artificial Reality and Telexistence-Workshops (ICAT'06).

- [21] BACHAROUDIS, E.C., FILIOS A.E., MENTZOS, M.D., MARGARIS, D.P., Parametric study of a Centrifugal Pump Impeller by Varying the Outlet Blade Angle , The Open Mechanical Engineering Journal, 2008, pp. 75-83.
- [22] JAFARZADEH, B., HAJARI, A., ALISHAHI M.M., AKBARI M.H., TheFlow Simulations of a Low Specific-Speed High-Speed Centrifugal Pump, Applied Mathematical Modelling 35,2011, 242-249
- [23] ANAGNOSTOPOULOS, J.S.,CFD Analysis and Design Effects in Radial Pump Impeller ,Wseas Transactions On Fluid Mechanics, 2006, pp. 763-770.
- [24] CHAKRABORTY, S., PANDEY K,M., Numerical Studies on Effects of Blade Number Variations on Performance of Centrifugal Pumps at 4000 RPM, IACSIT International Journal of Engineering and Technology, Vol.3, No.4, August 2011.
- [25] LIU, J.,XU,Y., WANG, D., SU,Q., Analysis of Liquid-Solid Two Phase Turbulent Flow in FGD System Pump, 978-1-4244-5268-2, IEEE,2009.
- [26] SINGH, J.P.,KUMAR S., AND MOHAPATRA, S.K., Computational Investigation of Centrifugal Slurry Pump Handling Bottom Ash, International Journal of Fluids Engineering. ISSN 0974-3138 Volume 3, Number 2, 2011. pp 241-249.
- [27] BAOLING, C., ZUCHAO, Z.,ZHANG, J.,YING C., The Flow Simulation and Experimental Study of Low-Specific-Speed High-Speed Complex Centrifugal Impellers, Chinese J. ChemicalEng., 14(4) ,2006, pp 435-441
- [28] DAS, L.G.,RAWAT, M.K., KURI, N., Flow Analysis of a Centrifugal Slurry Pump While Handling Clear Water at Design and Off-Design Conditions, The 11 the Asian International Conference on Fluid Machinery and The 3rd Fluid Power Technology Exhibition, IIT Madras, Chennai, India, November, 2011, pp 21-23.
- [29] SINGH, J.P., Study of Performance Characteristics of Centrifugal Slurry Pump Handling Bottom Ash, Master Thesis, Mechanical Engineering Department Thapar University, 2010
- [30] SINGH, P.G., Numerical Study of Performance Characteristics of Centrifugal Slurry Pump, Master Thesis, 2009.
- [31] FLYGT ITT INDUSTRIES, Slurry handbook, [://www.flygt.com](http://www.flygt.com), Erişim tarihi 06.04.2012.
- [32] BAHA E. ABULNAGA P.E., Slurry Systems Handbook, Mazdak International, Inc. Pp 8.44
- [33] WARNER PUMPS, <http://warnerpump.com>, Erişim tarihi 25.10.2012.

- [34] METSO, Orion Serisi, Ağır hizmet ve maden tipi yatay çamur pompaları, <http://www.metso.com>, Erişim tarihi 10.09.2012.
- [35] CENGEL Y, A., CIMBALA J, M., Fluid Mechanics Fundamentals And Applications, Mc. Graw-Hill Higher Education, 2006.
- [36] HRS Spiratube, S.L, www.hrs-spiratube.es, Erişim tarihi 10.09.2012.
- [37] ÇALLI, İ., Santrifüj Pompa Hesabı ve Çizimi, SAÜ Yayın No:15, 1996.
- [38] Tüfekçioğlu Kaucuk Sanayi ve Ticaret Limited Şirketi, ANKARA.
- [39] ANSYS Inc, www.ansys.com, Erişim tarihi 25.10.2012.
- [40] FLUENT 6.2 User Guide Vol 2A.
- [41] ÖZTÜRK, A., A Study of Impeller-Diffuser Interaction in a Centrifugal Pump, PhD Thesis, Çukurova University Institute of Natural and Applied Sciences, Çukurova University, 2004.

ÖZGEÇMİŞ

Mehmet Salih Celtek 1986 yılında Siirt’ te doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini İstanbul’da tamamladıktan sonra 2006 yılında Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü’nde öğrenim görmeye hak kazandı. 2010 yılının Haziran ayında aynı bölümden mezun oldu. Aynı yıl Bingöl Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü’nde ÖYP Araştırma Görevlisi olarak akademik kariyerine başlamıştır. 2010 - 2011 tarihleri arasında ÖYP kapsamında İstanbul Teknik Üniversitesi’nde dil eğitimini tamamlayarak, 2011 Eylül döneminde Sakarya Üniversitesi’nde Yüksek Lisans eğitimine başlamıştır. 2012’ de Sakarya Üniversitesi’nde ÖYP Araştırma Görevlisi olarak görevlendirilmiş olup halen bu görevine devam etmektedir.