

**T.C.
ONDOKUZ MAYIS ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**



HİDROFOBİK YÜZEYLERİN SANTRİFÜJ TİP BİR POMPANIN KAVİTASYON PERFORMANSINA ETKİLERİNİN DENEYSEL İNCELENMESİ

Yüksek Lisans Tezi

Sabri MURZİOĞLU

Danışman
Doç. Dr. Mustafa ÖZBEY

SAMSUN
2023

TEZ KABUL ONAYI

Sabri MURZİOĞLU tarafından, Doç. Dr. Mustafa ÖZBEY danışmanlığında hazırlanan “HİDROFOBİK YÜZEYLERİN SANTRİFÜJ TİP BİR POMPANIN KAVİTASYON PERFORMANSINA ETKİLERİNİN DENEYSEL İNCELENMESİ” başlıklı bu çalışma, jürimiz tarafından 13/01/2023 tarihinde yapılan sınav sonucunda oy birliği ile başarılı bulunarak Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

	Unvanı Adı Soyadı Üniversitesi Ana Bilim/Ana Sanat Dalı	Sonuç	
Başkan	Prof. Dr. Hakan ÖZCAN	☒	Kabul
	Ondokuz Mayıs Üniversitesi Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı	☐	Ret
Üye	Doç Dr. Mustafa ÖZBEY	☒	Kabul
	Ondokuz Mayıs Üniversitesi Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı	☐	Ret
Üye	Dr. Öğr. Üyesi Bilal SUNGUR	☒	Kabul
	Samsun Üniversitesi Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı	☐	Ret

Bu tez, Enstitü Yönetim Kurulunca belirlenen ve yukarıda adları yazılı jüri üyeleri tarafından uygun görülmüştür.

Prof. Dr. Ahmet TABAK
Enstitü Müdürü

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK BEYANI

Hazırladığım yüksek lisans tezinin bütün aşamalarında bilimsel etiğe ve akademik kurallara riayet ettiğimi, çalışmada doğrudan veya dolaylı olarak kullandığım her alıntıya kaynak gösterdiğimi ve yararlandığım eserlerin Kaynaklar'da gösterilenlerden oluştuğunu, her unsurun enstitü yazım kılavuzuna uygun yazıldığını ve TÜBİTAK Araştırma ve Yayın Etiği Kurulu Yönetmeliği'nin 3.bölüm 9. maddesinde belirtilen durumlara aykırı davranılmadığını taahhüt ve beyan ederim.

Etik Kurul Gerekli mi?

Evet ☐ (Gerekli ise ekler kısmına ekleyiniz)

Hayır ☒

07/12/2022
Sabri MURZİOĞLU

TEZ ÇALIŞMASI ÖZGÜNLÜK RAPORU BEYANI

Tez Başlığı: HİDROFOBİK YÜZEYLERİN SANTRİFÜJ TİP BİR POMPANIN KAVİTASYON PERFORMANSINA ETKİLERİNİN DENEYSEL İNCELENMESİ

Yukarıda başlığı belirtilen tez çalışması için şahsım tarafından 07/12/2022 tarihinde intihal tespit programından alınmış olan özgünlük raporu sonucunda;

Benzerlik oranı :% 6

Tek kaynak oranı :% 4 çıkmıştır.

07/12/2022
Doç. Dr. Mustafa ÖZBEY

ÖZET

HİDROFOBİK YÜZEYLERİN SANTRİFÜJ TİP BİR POMPANIN KAVİTASYON PERFORMANSINA ETKİLERİNİN DENEYSEL İNCELENMESİ

Sabri MURZİOĞLU

Ondokuz Mayıs Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Yüksek Lisans, Ocak/2023

Danışman: Doç. Dr. Mustafa ÖZBEY

Santrifüj pompalar, endüstride en yaygın kullanılan hidrolik makinelerdir. Santrifüj pompalarda meydana gelen kavitasyon, pompanın çalışma ömrünü önemli derecede azaltması yanı sıra kapasite, performans ve verimin düşmesine, ayrıca gürültü ve titreşime sebep olur. Dolayısıyla kavitasyon kaçınılması gereken bir durumdur ve kavitasyon performansı üzerine çalışma şartları ile tasarımın da etkisi vardır. Bu çalışmada, santrifüj tip bir pompanın tasarımı değişmeksizin kavitasyonu önlemek için çarkın ıslak yüzeyleri kompozit bir solüsyon ile kaplanarak hidrofobik özellik kazandırılmıştır. Florlanmış etilen propilen (FEP) kaplama malzemesine kütlece %3 oranla grafit (FEP-C), grafen (FEP-G) ve hegzagonal bor-nitrür (FEP-HB) takviye ederek üç farklı kompozit yüzey kaplama solüsyonu hazırlanmış olup temas açıları sırasıyla 120°, 124°, 133° olarak ölçülerek hidrofobiklikleri belirlenmiştir. Çarklar kaplanmadan ve kaplandıktan sonra kavitasyon performansı, ENPY ve Thoma kavitasyon parametreleri üzerinden deneysel olarak test edilmiştir. FEP-C, FEP-G ve FEP-HB kaplı pompa çarkının ENPY değerlerinin kaplamasız çarka kıyasla %6.15, %6.96, %10.72, Thoma kavitasyon parametrelerinin ise kaplamasız çarka kıyasla sırasıyla %10.16, %12.9, %18.09 kadar arttığı belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Santrifüj Pompa, Kavitasyon, Hidrofobik Yüzey

ABSTRACT

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF HYDROPHOBIC SURFACES ON CAVITATION PERFORMANCE OF A CENTRIFUGAL PUMPS

Sabri MURZİOĞLU

Ondokuz Mayıs University

Institute of Graduate Studies

Department of Mechanical Engineering

Master, January/2023

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Mustafa ÖZBEY

Centrifugal pumps are the most common used hydraulic machines in the industry. Cavitation in centrifugal pumps causes a significant reduction in the working life of the pump, as well as a decrease in capacity, performance in addition to causing noise and vibration. Thus, cavitation should be avoided and operating conditions and design also have an impact on cavitation performance. In this study, the wet surfaces of the impeller were coated with a composite solution to gain hydrophobic properties in order to prevent cavitation without changing the design of a centrifugal type pump. Three different composite surface coating solutions were prepared by reinforcing the fluorinated ethylene propylene (FEP) coating material with 3% by mass of graphite (FEP-C), graphene (FEP-G) and hexagonal boron-nitride (FEP-HB) and their hydrophobicity was determined by measuring with contact angles of 120° , 124° , 133° respectively. The cavitation performance has been experimentally tested on NPSH and Thoma cavitation parameters before and after the impellers are coated. It was determined that the NPSH values of the FEP-C, FEP-G and FEP-HB coated pump impeller increased by %6.15, %6.96, %10.72 (respectively) compared to the uncoated impeller. And the Thoma cavitation parameters increased by %10.16, %12.9, %18.09 (respectively) compared to the uncoated impeller.

Keywords: Centrifugal Pump, Cavitation, Hydrophobic Surface

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Eğitim ve sosyal hayatımda bana destek ve yardımcı olan bütün dostlarıma, beni bugünlere getiren anneme ve babama;

Mühendislik konusunda her zaman ufkumu açan, eksiklerimi kapatan Mustafa Enes MURZİOĞLU ve Emir MURZİOĞLU'na;

Samsun, Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği İl Müdürlüğü'ndeki bütün mesai arkadaşlarıma;

Çalışmamda benden yardımını, emeğini ve zamanını hiç esirgemeyen başta danışmanım Doç. Dr. Mustafa ÖZBEY olmak üzere bütün hocalarıma ve DOMAK Pompa ve Makine Sanayi A.Ş. yönetim ve teknik personeline;

Teşekkürü borç bilirim.

Sabri MURZİOĞLU

İÇİNDEKİLER

TEZ KABUL ONAYI.....	i
BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK BEYANI	ii
ÖZET	iii
ABSTRACT	iv
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR.....	v
İÇİNDEKİLER	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
TABLolar DİZİNİ	x
1. GİRİŞ	1
1.2. Tezin Amacı	1
1.3. Literatür Araştırması.....	2
2. GENEL BİLGİLER.....	4
2.1. Santrifüj Pompalar.....	4
2.1.1. Santrifüj Pompa Ana Elemanları.....	5
2.1.1.1 Mil (Şaft).....	5
2.1.1.2. Çark.....	5
2.1.1.3. Salyangoz.....	6
2.1.1.4. Sızdırmazlık Elemanları.....	7
2.1.2. Santrifüj Pompa Performans Parametreleri	7
2.1.2.1. Debi.....	7
2.1.2.2. Basınç ve Basma Yüksekliği.....	8
2.1.2.3. Güç.....	9
2.1.2.4. Verim	10
2.1.2.5. Özgül Hız	10
2.1.3. Kavitasyon.....	11
2.1.3.1. ENPY (Emme Net Pozitif Yükü).....	15
2.1.4. Santrifüj Pompa Performans Karakteristik Eğrileri	17
2.1.4.1. H-Q Performans Eğrisi	17
2.1.4.2. η -Q Performans Eğrisi	19
2.1.4.3. P_{mek} -Q Performans Eğrileri	19
2.1.4.4. Kavitasyon Performans Eğrisi	19
2.1.4.5. Kavitasyondan Kaçınmak İçin Yapılabilecekler.....	22
2.2. HİDROFOBİKLİK	23
3. MATERYAL METOD	27
3.1. Yüzey Malzemesi Seçimi ve Oluşturma.....	27
3.2. Yüzey Kaplama Yöntemi Seçimi ve Kaplama	30
3.3. Pompa Performans Testleri	30
3.4. Kavitasyon Performans (ENPY) Testleri	32
4. BULGULAR ve TARTIŞMA.....	33
4.1. Yüzey Temas Açılırları	33
4.2. Pompa H_p -Q ve η -Q performans test sonuçları	33
4.3. Pompa Emme Basınç Ölçümleri.....	35
4.4. ENPY ve Thoma Kavitasyon Parametreleri	38
5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER	44
KAYNAKÇA	46
ÖZ GEÇMİŞ.....	49

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simge	Açıklama
Q	: Debi, m^3/s
A	: Alan, m^2
V	: Hız, m/s^2
$\dot{m}$	: Kütleli debi, kg/s
ρ	: Yoğunluk, kg/m^3
H	: Basınç yüksekliği, m
H_m	: Manometrik basma yüksekliği, m
g	: Yerçekimi ivmesi, m/s^2
z	: Yükseklik, m
P_{hid}	: Hidrolik güç, W
P_{mek}	: Mekanik güç, W
T	: Tork, $N.m$
ω	: Açısal hız, ω
N	: Devir sayısı, dev/dak
η	: Verim
N_s	: Özgül hız, dev/dak
P_v	: Buharlaşma basıncı, Pa
H_k	: Basınç kayıpları, m
H_v	: Buharlaşma basınç yüksekliği, m
H_{smax}	: Maksimum basma yüksekliği, m
σ	: Thoma kavitasyon parametresi
H_p	: Pompa basıncı, m
S_q	: Emme özgül hızı
θ	: Temas açısı, $^\circ$
γ_{KH}	: Katı-hava yüzey gerilimi, J/m^2
γ_{KS}	: Katı-sıvı yüzey gerilimi, J/m^2
γ_{SH}	: Sıvı-hava yüzey gerilimi, J/m^2
r	: Pürüzlülük faktörü
$A_{gör}$	: İzdüşüm alan, m^2
A_{ger}	: Gerçek alan, m^2

KISALTMALAR

ENPY	: Emme Net Pozitif Yükü
ENPY _G	: Emmedeki Net Gerekli Pozitif Yük
ENPY _M	: Emmedeki Net Mevcut Pozitif Yük
FEP	: Florlu etilen propilen
FEP-C	: Grafit takviyeli florlu etilen propilen
FEP-G	: Grafen takviyeli florlu etilen propilen
FEP-HB	: Bor-nitrür takviyeli florlu etilen propilen

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Santrifüj pompa kesit görüntüsü	4
Şekil 2.2. Santrifüj pompa mili	5
Şekil 2.3. Santrifüj pompa çarkı kesit görüntüsü	6
Şekil 2.4. Santrifüj pompa salyangozu	6
Şekil 2.5. Santrifüj pompa manometrik yüksekliği şematik gösterimi	9
Şekil 2.6. Rotodinamik tip pompaların özgül hız sınıflandırılması	11
Şekil 2.7. Suyun basınç-sıcaklık faz diyagramı	11
Şekil 2.8. Kavitasyon oluşumu	12
Şekil 2.9. Baloncuk oluşumu ve patlaması	12
Şekil 2.10. Çark içinde kavitasyon görünümü	13
Şekil 2.11. Pompa çark girişi kesit görünümü	15
Şekil 2.12. ENPY _M 'nin debiye göre değişim tablosu	17
Şekil 2.13. 3 farklı boyuttaki pompanın H-Q değerleri	18
Şekil 2.14. Kararlı ve kararsız pompa basıncı karakteristik eğrisi.....	18
Şekil 2.15. 3 farklı boyuttaki pompanın η -Q değerleri	19
Şekil 2.16. 3 farklı boyuttaki pompanın P-Q değerleri	19
Şekil 2.17. 3 farklı boyuttaki pompanın ENPY-Q değerleri.....	20
Şekil 2.18. ENPY-Q grafiğinde kavitasyonlu-kavitasyonsuz çalışma grafiği	20
Şekil 2.19. Sıvılarda yüzey gerilimi.....	23
Şekil 2.20. Yüzey gerilimi ve yüzey enerjisi ilişkisi.....	24
Şekil 2.21. Su damlasına etki eden yüzey gerilim kuvvet dengesi	24
Şekil 2.22. Wenzel su damlası modeli	25
Şekil 2.23. Pürüzlülük faktörü-temas açısı grafiği	25
Şekil 3.1. Grafitin atom yapısı	28
Şekil 3.2. Grafenin atom yapısı	28
Şekil 3.3. Bor-nitrürün atom yapısı	29
Şekil 3.4. Radwag AS220.R2 tip hassas terazi	30
Şekil 3.5. Santrifüj pompa çarkının kaplamasız ve kaplamalı görüntüsü	30
Şekil 3.6. Pompa performans test deney düzeneğinin şematik gösterimi	31
Şekil 3.7. Pompa çarkı kesit görüntüsü.....	31
Şekil 3.8. Test düzeneğinin şematik görüntüsü.....	32
Şekil 4.1. %3 konsantrasyonlu FEP-C, FEP-G, FEP-HB yüzey temas açıları	33
Şekil 4.2. FEP-C, FEP-G ve FEP-HB kaplı çarkların H _p -Q grafiği.....	34
Şekil 4.3. FEP-C, FEP-G ve FEP-HB kaplı çarkların η -Q grafiği.....	35
Şekil 4.4. Kaplamalı çarkların emme basınç kaybı düşüşü tablosu	37
Şekil 4.5. Kaplamasız ve FEP-C kaplı çarkların ENPY-Q grafiği	39

Şekil 4.6. Kaplamasız ve FEP-G kaplı çarkların ENPY-Q grafiği	39
Şekil 4.7. Kaplamasız ve FEP-HB kaplı çarkların ENPY-Q grafiği.....	40
Şekil 4.8. FEP-C, FEP-G, FEP-HB kaplı ve kaplamasız çarkların ENPY-Q grafiği.....	41
Şekil 4.9. FEP-C kaplamalı çarkın Thoma kavitasyon parametre grafiği.....	42
Şekil 4.10. FEP-G kaplamalı çarkın Thoma kavitasyon parametre grafiği	42
Şekil 4.11. FEP-HB kaplamalı çarkın Thoma kavitasyon parametre grafiği.....	43
Şekil 4.12. FEP-C, FEP-G, FEP-HB kaplı çarkların Thoma kavitasyon parametre grafiği ..	43



TABLÖLER DİZİNİ

Tablo 2.1. Santrifüj pompa elemanları.....	5
Tablo 2.2. Malzemelerin kavitasyon erozyon dirençleri	13
Tablo 4.1. Kaplanan numunelerin yüzey temas açısı ölçümleri	33
Tablo 4.2. FEP-C kaplanmadan önce ve sonra oluşan basınç kayıpları	36
Tablo 4.3. FEP-G kaplanmadan önce ve sonra oluşan basınç kayıpları	36
Tablo 4.4. FEP-HB kaplanmadan önce ve sonra oluşan basınç kayıpları.....	37



1. GİRİŞ

Akışkanlar mekaniğinin bilinen en eski uygulamalarından biri akışkan makinelerdir. Akışkan makineler arasında en yaygın kullanılan ve en geniş kullanım alanına sahip olanları ise pompalardır. Pompa akışkana hidrolik bir enerji kazandırır. Milattan önce bulunmuş bazı pompalar günümüzde bile kullanılmakla birlikte şu anda kullanılan birçok pompa 17.yüzyılın sonlarında kullanılmaya başlandı. Pompalar en genel tanımla bakacak olursak, mekanik enerjiyi hidrolik enerjiye dönüştürüp akışkana basınç kazandırıp belli bir debide iletilmesini sağlayan makinelerdir. Genel olarak rotodinamik ve pozitif yer değiştirmeli (deplasmanlı) olarak iki ana kategoride sınıflandırılırlar. Pozitif yer değiştirmeli pompalarda akışkanın transferi, belirli bir hacimde yaratılan hacim değişimi sayesinde emilip itilmesine dayanır. Akışkan önce bir genişleme hacmine emilir ve sonra hacim daralırken akışkan dışarı itilir. Bu tip pompalar sistem basıncından bağımsız akışkana sabit bir debi kazandırır. Volümetrik pompalar, hacim değişimine neden olan elemana göre sınıflandırılırlar. Pistonlu, esnek diyaframlı, dişli, paletli, vidalı, loplu pompalar volümetrik pompalardır. Rotodinamik pompalarda ise volümetrik pompaların aksine kapalı hacim söz konusu değildir. Rotodinamik pompalar, akışkana hızlı hareket eden çark, kanatlar veya özel tasarlanmış belirli düzenekler aracılığıyla momentum kazandırıp transferini sağlar. Rotodinamik pompalar genel olarak radyal akışlı (santrifüj), karışık akışlı ve eksenel pompalar olarak 3 tipte sınıflandırılırlar.

Günümüzde santrifüj tip pompalar neredeyse bütün endüstriyel sektörlerde en yaygın kullanılan makinelerdir. Dolayısıyla, enerji tüketiminde büyük bir payı vardır. Yapılan araştırmalara göre gelişmiş ülkelerde tüketilen enerjinin neredeyse %20'sinin pompalar tarafından gerçekleştiği öne sürülmektedir.

1.2. Tezin Amacı

Bu çalışmada, santrifüj tip bir pompa çarkının su ile temas eden ıslak yüzeyleri kaplanarak elde edilen hidrofobik çark yüzeyinin debi-basınç kapasitesi yanı sıra kavitasyon performansı Emme Net Pozitif Yükü (ENPY) ve boyutsuz Thoma kavitasyon parametresi üzerinden deneysel olarak incelenmiştir.

1.3. Literatür Araştırması

Mevcut literatür incelendiğinde hidrofobik yüzeylerin sürtünme kaynaklı basınç kayıplarının azaltılmasına yönelik araştırmalar zengin olup kavitasyon üzerine etkileri ile ilgili çalışmalar oldukça sınırlıdır.

Volkov vd. (2015), santrifüj pompalarda akış yüzeylerine hidrofobiklik uygulamasının pompa performansına etkisini çalışmıştır. 3 farklı norm faktörüne sahip pompaların çark ve işlevsel yüzeylerini hidrofobikleştirmiş, sürtünme faktörünü %23 oranında azaltmıştır ve bu azaltma pompaların veriminde %2-%6 oranında artış sağlamıştır (Volkov vd., 2015).

Kocaaslan (2015), Santrifüj pompada yüzey pürüzlük yüksekliğinin hidrolik verimine etkisini HAD (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği ile sayısal olarak incelemiştir. 100 m³/h çalışma noktasında 0,0.1,0.2,0.3,0.5,0.7 mm pürüzlülük yüksekliklerinde sayısal inceleme yapmıştır ve bu çalışma sonucunda yüzey pürüzlülüğünün arttıkça hidrolik verimin de %68'den %53'e kadar düştüğünü gözlemlemiştir. Kocaaslan aynı çalışmasında aşınma ve kavitasyon nedeniyle pompadaki deformasyonları azaltmak için akışkanın pompa içinde temas ettiği çark ve salyangoz yüzeylerini poliüretan malzeme ile kaplamış ve oluşan değişimleri analiz etmiştir. Poliüretan kaplamalı pompanın, kaplamasız pompaya oranla mil gücünde %10 artış, hidrolik veriminde ise %25 artış gözlemlemiştir (Kocaaslan, 2015).

Keleş (2016), tasarladığı sökölüp takılabilen radyal kanatlı santrifüj pompada yüzey kaplama metodu olarak en uygun sürtünme karıştırma prosesini belirlemiş ve nikel alüminyum bronz malzemedan üretilen pompa çarkının kanatlarını yüzey işlemine tabi tutmuştur. Pompayı kavitasyonlu bölgede çalıştırarak sergilediği davranışı incelemiştir ve bunun sonucunda kavitasyon direncini yaklaşık 10 kat iyileştirdiğini belirlemiştir (Keleş, 2016).

Moaven vd. (2013), çalışmasında Süperhidrofobik nano kaplamanın akışkanın sürtünme ve sürtünme kuvveti üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Sol-jel yöntemi kullanarak kapladığı alüminyum bir diskte 160° temas açısı elde etmiştir. 10⁵ ile 2x10⁶ arasında değişen Reynolds sayılarında %30-%15 arasında drag kuvvetlerinin düştüğünü belirlemiştir (Moaven vd., 2013).

Pochylý vd. (2010), çalışmasında Adezyon katsayısının düşük olduğu, yapışkanlığın azaldığı durumda boru içindeki akışın kavitasyon ve hidrolik

performansını incelemek amacıyla hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) kullanmıştır. İslanabilirliğin düşük olduğu durumlarda Fluent programında akışı simüle ederek sürtünme kaybının azaldığını, verimin %5 oranında yükseldiğini ve kavitasyon olduğu durumda borunun içinde kavitasyon alanının arttığını gözlemlemiştir (Pochylý vd., 2010).

Henoch vd. (2006), çalışmasında akışkanların süperhidrofobik yüzeylerin üzerinde kayması sonucu viskoz kuvvetlerin azalmasından yola çıkarak bu kaymanın türbülanslı ve yüksek Reynold sayılarında sürtünme direncinin azalması amacıyla süperhidrofobik test yüzeyleri oluşturulmuş, 1.4 m/s'ye kadar olan hızlarda hem laminar hem de geçiş rejimlerinde sürtünmeyi ölçmüştür. Laminar akışlarda %50'ye yakın sürtünme kuvvetlerinde azalma, akış türbülansa geçtikten sonra sürtünme kuvvetlerindeki azalmanın giderek düştüğünü gözlemlemiştir (Henoch vd., 2006).

Rakibuzzaman vd. (2017), çalışmasında santrifüj pompalarda kavitasyon olayını incelemek için hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) yazılımı kullanmıştır. Pompayı farklı kapasitelerde çalıştırarak deneysel ve nümerik olarak ENPY değerleri belirlemiştir ve birbiriyle eşleşen sonuçlar elde etmiştir. ENPY değerinin azalmasıyla pompa çarkı içindeki kavitasyon olayının gözle görünür bir biçimde arttığını tespit etmiştir (Rakibuzzaman vd. 2017).

Kavitasyon, santrifüj pompalarda hem kapasite ve performans, hem de çalışma ömrü açısından çok önemli bir olay olmasına karşın mevcut literatürde hidrofobik çark yüzeyi ile kavitasyon performansının iyileştirilmesine yönelik çalışmalar yok denecek kadar azdır. Bu sebepten, bu konuda yapılan deneysel çalışma büyük önem arz etmektedir.

2. GENEL BİLGİLER

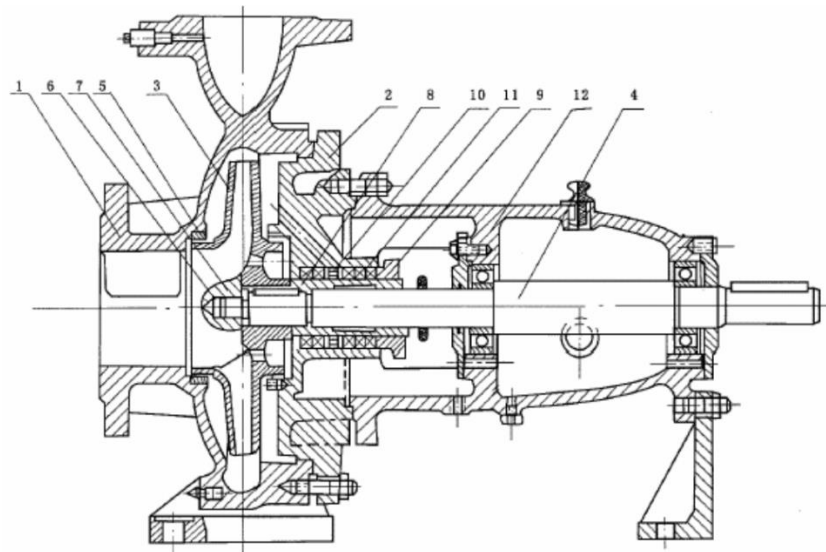
2.1. Santrifüj Pompalar

Santrifüj pompalar sıvı transferi için en yaygın kullanılan pompa türleridir. Madencilik, kimya ve makine endüstrilerinde kapsamlı uygulamaları mevcuttur. Tasarım basitliği, yüksek verimle çalışmaları, farklı kapasitelere uygun olmaları, işletme bakım ve tamiratının kolay olması nedenleri santrifüj pompaların en sık kullanılma sebepleri arasında sayılabilir (Statharas, 2019).

Pompalar tarihte 17.yy sonlarında kullanılmaya başlanmıştır. Santrifüj pompa ise 1689'da Fransız fizikçi Denis Papin tarafından santrifüj pompa çarkının bulunmasıyla kullanılmıştır (Girdhar & Moniz, 2005).

Santrifüj pompalar akışkana hidrolik enerji vermek için merkezkaç kuvvetlerden yararlanırlar. Genel olarak bir çark ve gövdeden oluşur. Merkezkaç kuvvet yaratmak için gerekli olan dönme enerjisini yani torku, genellikle bir elektrik motorundan alır. Elektrik motoru pompaya bir mil ile bağlıdır ve elektrik motorundan gelen dönme enerjisini pompa çarkına aktarır. Mil üstünde taşıdığı çarkı yüksek devirde döndürerek pompaya gelen belli debideki akışkanı içine emer. İçine emdiği akışkana çark, merkezkaç kuvvetler etkisiyle bir hareket enerjisi kazandırır. Çark kanatlarından çıkan akışkan salyangozdan geçerek tesisata basılır.

Santrifüj pompanın ana elemanları mil (şaft), çark, salyangozdur. Bunun yanı sıra sızdırmazlık elemanları ve yataklar da önemli elemanlarıdır.



Şekil 2.1. Santrifüj pompa kesit görüntüsü (Emse Sızdırmazlık)

Tablo 2.1. Santrifüj pompa elemanları

1	Gövde	7	Tutma Ağızı
2	Arka Kapak	8	Kama
3	Çark	9	Salmastra Baskısı
4	Mil	10	Dağıtım Burcu
5	Burç	11	Salmastra
6	Fan Somunu	12	Yatak

2.1.1. Santrifüj Pompa Ana Elemanları

2.1.1.1 Mil (Şaft)

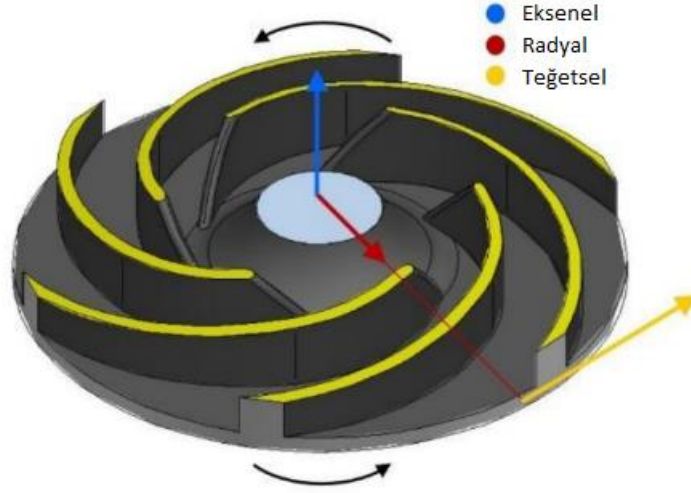
Santrifüj pompalarda akışkana enerji kazandıran çarka, hareketini veren elemandır. Motordan aldığı dönme hareketini kaplin vasıtasıyla çarka aktarır. Mil aynı zamanda kaplin, çark, salmastra, rulman gibi elemanları da taşır. Üzerine bağlı elemanları taşıdığından dolayı hareketi aldıkları motor milleri ile aynı ekseninde olmaları gerekir (Sarıgül, 2010).



Şekil 2.2. Santrifüj pompa mili

2.1.1.2. Çark

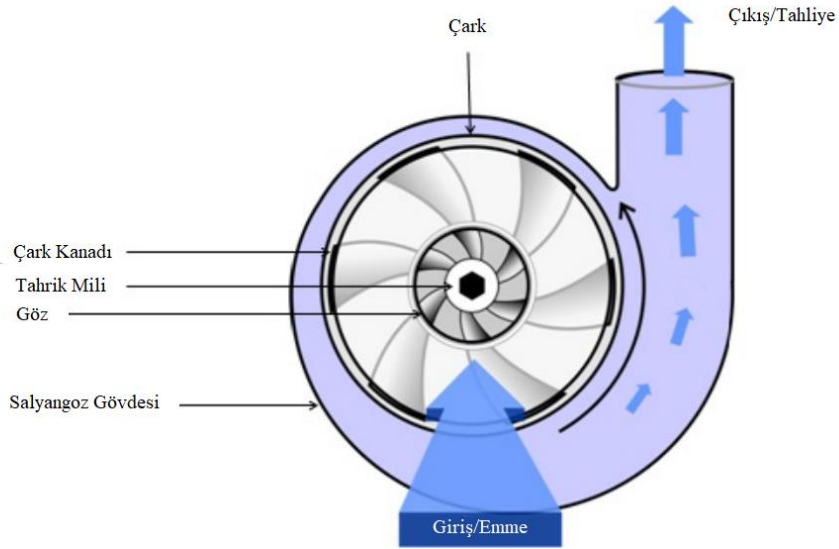
Çarklar kullanım alanına göre çoğunlukla dökme demirden veya bronz ve farklı metallerden üretilir. Milin üzerinde olan çark, mil vasıtasıyla motordan aldığı dönme hareketiyle akışkana hidrolik enerji kazandırır. Döner çarkın merkezinde çark kanatlarının tasarımına bağlı olarak bir vorteks oluşur ve akışkan göz kısmından pompaya girer. Çarkın milden aldığı dönme hareketiyle sıvı akışkanın momentum transferi gerçekleşir ve sıvı, hidrolik enerji kazanarak çarkı terk eder ve sisteme belli bir debide basılmış olur.



Şekil 2.3. Santrifüj pompa çarkı kesit görüntüsü (Mercan, 2018)

2.1.1.3. Salyangoz

Pompa çarkını içinde bulundurur ve genelde dökme demirden yapılır. Pompa gövdesini oluşturmasına karşın şekli salyangoza benzediği için salyangoz olarak adlandırılır. Çarkın bastığı dinamik basıncı yüksek sıvıyı toplayarak çıkış kesitine yönlendirir. Bu şekilde toparlayıcı ve yönlendirici görevi görürken aynı zamanda difüzör görevi de görür. Çıkış kesitine doğru kesit alanı artan bir tasarıma sahip olup bu sayede sıvının dinamik basıncı düşerken statik basıncı artar. Bu sebepten difüzör görevi de gören salyangozun, basınç kayıplarını ve oluşacak girdap ile türbülansları en aza indirgeyecek geometride olması gerekir (Okullu, 2016).



Şekil 2.4. Santrifüj pompa salyangozu (BTÜ)

Şekil 2.4’de görüldüğü gibi salyangoz çıkışına doğru kesit alanı artacak şekilde tasarlanır. Kesit alanı artarken sıvının hızı düşeceğinden sahip olduğu dinamik basınç Bernoulli prensibine göre düşerken statik basıncı artar. Bu yüzden verimli bir salyangoz tasarımı için akım hızındaki değişimler ve basınç kaybındaki optimizasyon oldukça önemlidir.

2.1.1.4. Sızdırmazlık Elemanları

Pompalarda hareketli ve hareketsiz parçaların arasında sızdırmazlığı sağlamak için salmastra kullanılır. Salmastra ve yardımcı elemanlar bir kutu içerisinde sızdırmazlığı sağlar. Bu kutuya salmastra kutusu denir. Mekanik salmastra ve yumuşak salmastra olarak iki çeşidi vardır ve bunlar kullanım yeri ve amacına göre farklılık gösterirler.

Yumuşak salmastralar pompada örgülü bir yapıya sahip ve görüntüsü halatı andıran bir sızdırmazlık elemanıdır. Döner mil ile sabit gövde arasında milin etrafına sarılır. Mil ile gövde arasındaki sızıntıyı engellemek için kullanılır. Fakat sızıntının tamamen kesilmesi söz konusu değildir ve istenmeyen bir durumdur. Pek çok pompada yumuşak salmastralardan çok az miktarda kaçak olması istenir. Bunun amacı, mil ile salmastranın yağlanması ve temas yüzeyinin soğumasını sağlamaktır (Mutlu, 2013).

Mekanik salmastralar iki parçadan oluşur. Biri pompa gövdesine sabit, diğeri mil ile birlikte hareket eder. Bu iki kısım birbirine kuvvet uygulayarak sızdırmazlığı sağlar. Sürtünmeden dolayı oluşan ısı ve aşınmayı engellemek için bazı uygulamalarda soğutma ve yağlamayı sağlaması için mekanik salmastraya ek sıvı gönderilebilir. Yüksek basınçla çalışan santrifüj pompalarda tercih edilir. Sürekli bakıma ihtiyaç duymazlar ve sızıntı yok denilecek kadar azdır. Mil ve mil burcunda aşınma olmaz. Fakat ekonomik olarak maliyetleri yüksektir.

2.1.2. Santrifüj Pompa Performans Parametreleri

2.1.2.1. Debi

Sabit bir kesitten birim zamanda geçen akışkan miktarıdır. Pompalar için debi, basma flanşından geçen sıvıdır. Hacimsel veya kütleli olarak gösterilir. Birimi hacimsel gösterim için m³/h veya m³/s, kütleli gösterim için kg/h veya kg/s’dir.

$$Q = A \cdot V \quad (2.1)$$

Hacimsel debi ve kütleli debi arasındaki ilişki ise Denklem 2.2'deki gibi açıklanabilir.

$$\dot{m} = \rho Q \quad (2.2)$$

2.1.2.2. Basınç ve Basma Yüksekliği

Basınç, birim alana etki eden kuvvettir, aynı zamanda akışkanın birim hacminin enerjisidir. Standart birimi Pascal (Pa: N/m²)'dır.

$$P = \rho g H \quad (2.3)$$

Manometrik basma yüksekliği pompanın net yüküdür. “H_p” ile gösterilir. Pompadan geçen birim akışkanın kazandığı hidrolik enerjidir. Birimi sıvı yüksekliğidir (mSS).

Pompanın giriş ve çıkış noktaları arasında Bernoulli Denklemi uygulandığında pompanın manometrik basma yüksekliği aşağıdaki gibidir:

$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{V_1}{2g} + z_1 + H_p = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{V_2}{2g} + z_2 \quad (2.4)$$

H_p, yani pompa net yükü, giren akışkanın çıkana kadar kazandığı enerji olduğundan denklemde giriş bölümüne yazılır. H_p için denklem düzenlenirse;

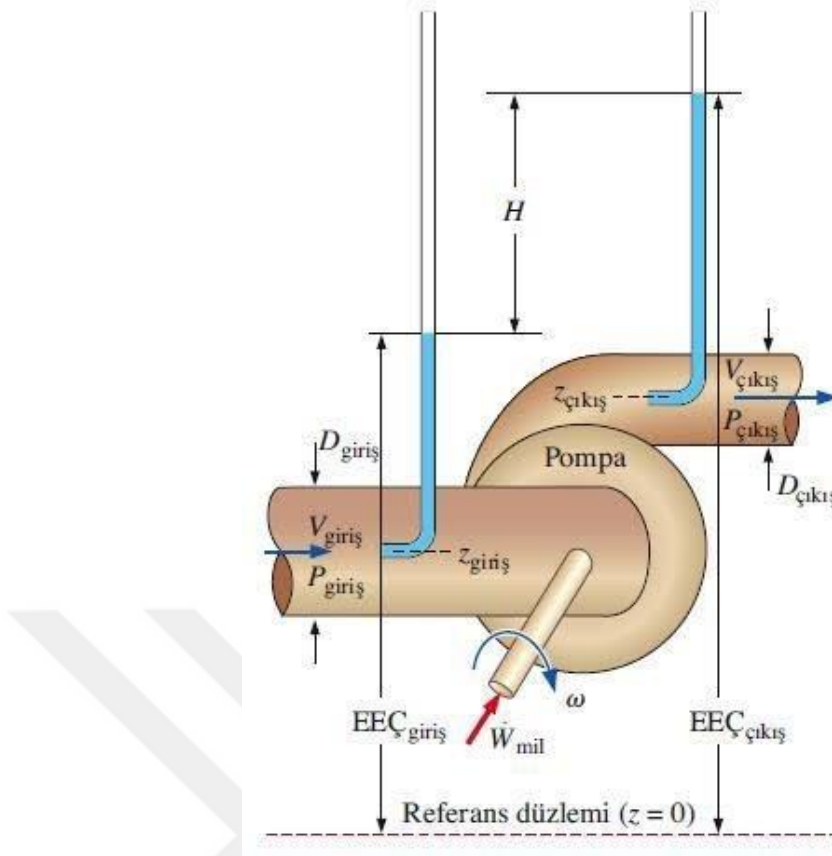
$$H_p = \left(\frac{P_2}{\rho g} + \frac{V_2}{2g} + z_2 \right) - \left(\frac{P_1}{\rho g} + \frac{V_1}{2g} + z_1 \right) \quad (2.5)$$

elde edilir.

Giriş ve çıkış alanı aynı olan ve aynı düzlemde olan bir tesisat için V₁=V₂ ve z₁=z₂ olduğundan manometrik basma yüksekliği

$$H_p = \frac{P_2 - P_1}{\rho g} \quad (2.6)$$

şekline indirgenir.



Şekil 2.5. Santrifüj pompa manometrik yüksekliği şematik gösterimi (Çengel & Cimbala, 2008)

2.1.2.3. Güç

Güç, birim zamanda yapılan iş enerjisidir. Pompa, tahrik motorundan şaft vasıtasıyla aldığı mekanik gücü çark yardımıyla sıvı akışkana hidrolik enerji olarak kazandırdığından mekanik güç ve hidrolik güç olarak 2 farklı şekilde tanımlıdır.

Hidrolik güç, pompanın akışkana aktardığı güçtür.

$$P_{hid} = P \times Q \quad (2.7)$$

Basınç, manometrik yükseklik, yani m SS olarak alınırsa aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$P_{hid} = \rho g Q H \quad (2.8)$$

Mekanik güç ise mile, dolayısıyla mile bağlı olan ve dönme gücünü milden alan çarka etki eden tahrik gücüdür. Mile etki eden tork gücü ile açısal hızın çarpımı ile elde edilir.

$$P_{mek} = T \omega = T \frac{2\pi N}{60} \quad (2.9)$$

2.1.2.4. Verim

Pompalarda mil elektrik motorundan aldığı mekanik gücü akışkana hidrolik güç olarak kayıplardan dolayı tam olarak aktaramaz. Bu yüzden verim kavramı ortaya çıkmıştır. Bir bakıma verim pompanın kazandığı faydalı güç başına pompaya ne kadar güç girdisinin olduğunu gösteren karakteristik bir pompa performans parametresidir. Pompa verimi hidrolik gücün, mekanik güce oranıdır (Demirel, 2021).

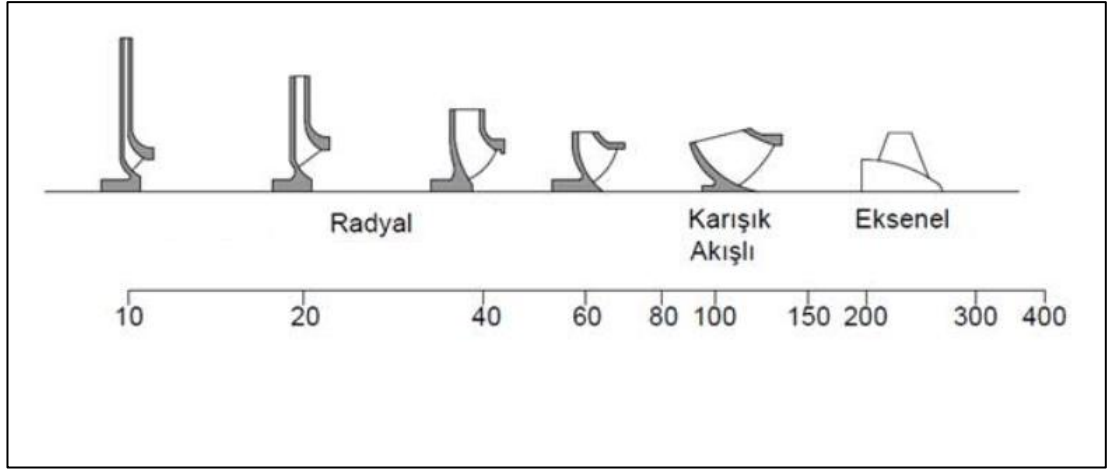
$$\eta = \frac{P_{hid}}{P_{mek}} = \frac{\rho g Q H}{T \omega} \quad (2.10)$$

2.1.2.5. Özgül Hız

Özgül hız, santrifüj pompa uygulamalarında önemli bir performans parametresidir. Özgül hız pompanın çark geometrisini tanımlayan karakteristik bir referans katsayısı olmasına karşın makine boyutu ile ilgili bir parametre içermemektedir. Sadece çark geometrisi ile ilgili boyutsuz bir performans parametresidir. Boyutsuz bir parametre olmasından dolayı özgül hız üzerinden benzer, fakat farklı kapasitelerdeki pompalar arasında benzerlik ilişkisi kurulabilir. Özgül hız fiziksel olarak akışkana birim hacimde, birim kütleye kazandırdığı potansiyel enerji olarak da tanımlanabilir. Boyutsuz bir parametre olmasından ötürü hesaplama yapılırken birimlere çok dikkat edilmelidir. Dikkat edilmediği takdirde özgül hız değeri yanlış sonuçlar verecektir. Bir pompanın özgül hızı en iyi çalışma noktasında, yani en yüksek verime sahip olduğu debi ve basınç değerleri esas alınarak verilir.

$$N_s = N \frac{\sqrt{Q}}{H^{3/4}} = rpm \frac{\sqrt{m^3/s}}{m^{3/4}} \quad (2.11)$$

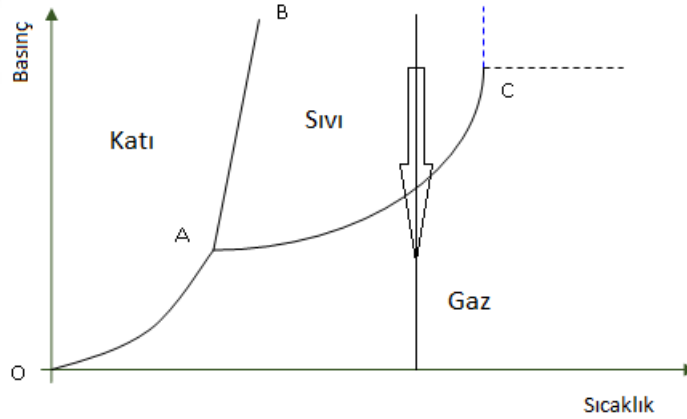
Özgül hız, aynı zamanda kapasite ve performans açısından pompa sınıflandırılmasında da büyük önem taşımaktadır. Özgül hız hidrolik makinenin geometrik ölçülerinden bağımsız olup hidrolik makinenin tasarımsal performansı ile ilgili boyutsuz performans parametresidir. Bu özelliği sayesinde pompa seçimi yapılırken hangi pompa, fan veya türbin seçilmesinde özgül hız dikkate alınır. Rotodinamik tip pompaların özgül hız sınıflandırılması Şekil 2.6’da verilmiştir. Buna göre santrifüj (radyal akışlı) pompaların özgül hız aralığı 10 - 80’dir.



Şekil 2.6. Rotodinamik tip pompaların özgül hız sınıflandırılması

2.1.3. Kaviteasyon

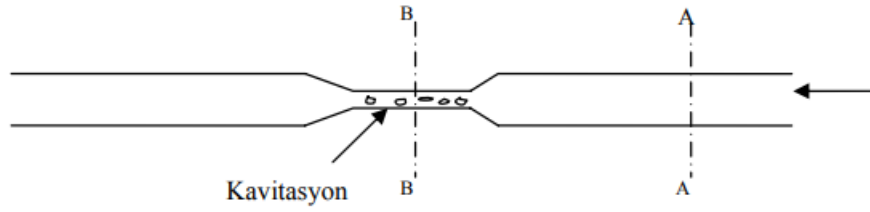
Kaviteasyon, akışkanın sabit sıcaklıktaki statik basıncının buharlaşma basıncının altına düşerek faz değişimine uğrayıp buharlaşarak buhar dolu zerreciklerin oluşması, basıncın tekrardan buharlaşma basıncının üstüne çıktığı durumda buhar zerreciklerinin yoğunlaşması olayıdır.



Şekil 2.7. Suyun basınç-sıcaklık faz diyagramı

Eğer sıvı Şekil 2.7'deki faz diyagramında görüldüğü gibi sabit sıcaklıkta ok yönünde bir basınç düşüşü yaşarsa soğuk kaynama olarak adlandırılan buharlaşma gerçekleşir (Gögebakan, 2019).

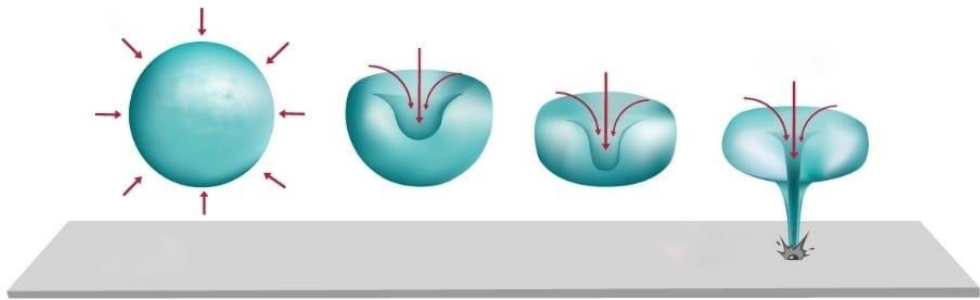
Bernoulli prensibine göre akışkanın hızı ve basıncı ters orantılıdır. Hız arttığında basınç düşüşü yaşandığından ötürü hareketli akışkan daralan bir kesitten geçerken hızı artar, buna karşılık basıncı düşer. Basıncın buharlaşma basıncının altına düştüğü konumda kaviteasyon oluşumu gözlenir.



Şekil 2.8. Kaviteasyon oluşumu (Ekinci, 2007)

Santrifüj pompalarda bu daralma emme hattında özellikle akışkanın çarkın içine girdiği oyuk kısmında görülür. Sabit debide kütle korunumu yasasına göre kesit alanı azaldığında hız artar ve basınç düşer. Akışkan basıncı, buharlaşma basıncına veya daha da altına düştüğünde akışkan fazı buhar-sıvı karışımına dönüşür. Bu yüzden çark içinde buhar dolu zerrecikler oluşur. Bu buhar zerrecikleri çarktan dinamik bir enerji ile dönen çarkı terk ederken kesit alanı genişleyeceğinden hızı düşer ve basıncı tekrar buharlaşma basıncının üstüne çıkar ve yoğunlaşarak sönmülenir. Bu olay pompalarda kaviteasyon olarak karşımıza çıkar (Keleş, 2016).

Sıvıdan buhar fazına daha sonra buhar fazından sıvı faza geçerken büyük enerji çalkantıları oluşur. Buhar zerreciklerinin sıvıya geçişinde boşalan buhar hacimlerinin yerine sıvı dolarken zerreciklerin temas ettikleri yüzeyde büyük basınçlar meydana gelir. Öyle ki bu basınçlar 1.5 GPa seviyesine ulaşabilir ve bu çevrim defalarca kez gerçekleşebilir. Basıncın uygulandığı yüzeyde erozyon gerçekleşir ve bu erozyon uzun sürede malzeme kaybına sebep olur.



Şekil 2.9. Baloncuk oluşumu ve patlaması (Tural, 2011)

Erozyon derinliği veya erozyon sonucu malzeme kaybının kütlesi ölçüt olarak kabul edilirse kaviteasyon erozyonu pratikte dört farklı değişkene bağlıdır. Bunlar süre, kaviteasyon yoğunluğu, akışkan özellikleri ve çark malzemesinin kaviteasyon erozyonuna karşı direnci olarak ele alınabilir. Kaviteasyonlu çalışma süresi arttıkça

erozyon sonucu malzeme kayıp miktarı doğru orantılı olarak artar. Fakat bu artış düzgün bir artış olarak devam etmez. Malzeme kaybı arttıkça sürenin artmasıyla oluşan malzeme kaybı daha hızlı olur.

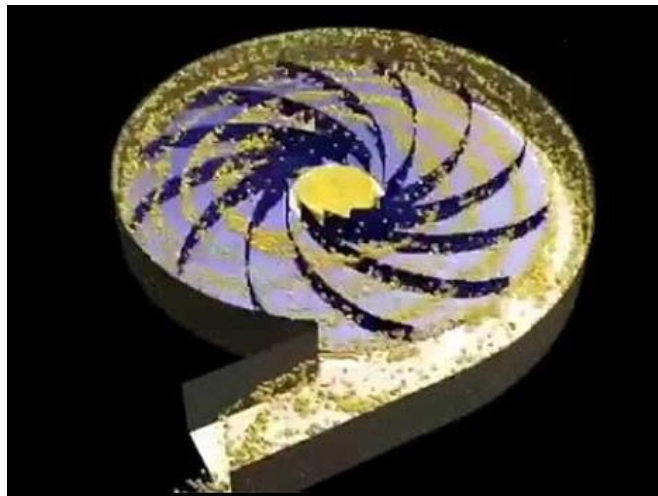
Genelde çarkta, özellikle çark kanatlarında oluşur ve çark geometrisine büyük zararlar verir (Gögebakan, 2019; Demirel, 2021).

Çark malzemesinin kavitasyon erozyonuna karşı direnci de yapılan çalışmalar sonucunda değişiklik göstermektedir. Tablo 2.2’de iki saat kavitasyonlu çalışma sonucunda farklı malzemelerde meydana gelen malzeme kaybı kütleli olarak verilmiştir.

Tablo 2.2. Malzemelerin kavitasyon erozyon dirençleri (Karassik, vd., 2001)

Malzeme Türü	Malzeme Kaybı, mg
Haddelenmiş stellit	0.6
Alüminyum bronz	3.2
Temperli haddelenmiş çelik (12 Cr)	9.0
Paslanmaz çelik (18 Cr-8 Ni)	13.0
Paslanmaz Çelik (12 Cr)	20.0
Mangan-Bronz	80.0
Çelik Levha	98.0
Dökme Çelik	105.0
Alüminyum	124.0
Pirinç	156.0
Dökme Demir	224.0

Kavitasyon, ayrıca ses-gürültü, sarsıntı-titreşim, yanı sıra pompa performansını da önemli ölçüde olumsuz etkiler, özellikle de debi ve basıncını, yani kapasitesini önemli ölçüde düşürerek verimin de dikkate değer ölçüde azalmasına sebep olur.



Şekil 2.10. Çark içinde kavitasyon görünümü

Kavitasyon oluşumuna ve kavitasyon hızına etki eden birden fazla faktör vardır. Bunlar genellikle basınç kaybı yaratan, akım çizgilerini bozan, buharlaşma basıncını düşürecek veya buharlaşmayı kolaylaştıracak etmenlerdir.

Suyun sıcaklığı: Pompanın içinden geçen suyun sıcaklığı yüksek olursa buharlaşma basıncı da yüksek olur. Buharlaşma basıncının yüksek olması, pompadaki su basıncının buharlaşma basıncının altına düşmesini, haliyle de pompada kavitasyon başlangıcını kolaylaştırmış olur. Tablo 2.3'te sıcaklık-buharlaşma (doyma) basıncı değerleri verilmiştir.

Tablo 2.3. Doymuş suyun sıcaklık ve buharlaşma basıncı tablosu (Çengel & Cimbala, 2008)

Sıcaklık, T, C°	P _d (kPa)	Sıcaklık, T, C°	P _d (kPa)
0,01	0,61	60	49,94
5	0,72	65	25,03
10	1,23	70	31,19
15	1,71	75	38,58
20	2,34	80	47,39
25	3,17	85	57,83
30	4,25	90	70,14
35	5,63	95	84,55
40	7,38	100	101,33
45	9,59	110	143,27
50	12,35	120	198,53
55	15,76	130	270,10

Suyun içinde erimiş hava ve gazların bulunması kavitasyonu hızlandıran bir etmendir. Benzer şekilde, suyun içinde malzemeyi korozyona uğratabilecek kimyasal maddelerin bulunması kavitasyonu hızlandırır. Çünkü korozyona uğrayan malzemenin yüzeyi bozulduğundan akışta kararsızlık ve düzensizliklere yol açacaktır.

Su içinde bulunabilecek katı yabancı madde (kum, toz, çamur, taş vb.) miktarı da kavitasyon oluşumunu etkiler. Su içinde bulunabilecek bütün yabancı maddeler akım çizgilerini bozarak akımda düşük basınçlı türbülansların oluşumuna sebep olur. Bu yüzden su içinde katı yabancı madde bulunması kavitasyon riski oluşturur (Sav, 2010).

Pompa çarkının emme girişi (göz) çapı ne kadar küçülürse sıvının çarkın içine girdiğindeki hızı o kadar yüksek olacaktır. Sabit debide hız yükseldikçe basınç düşüşü yaşanacağından dolayı kavitasyon riski, emme çapı küçüldükçe artar.

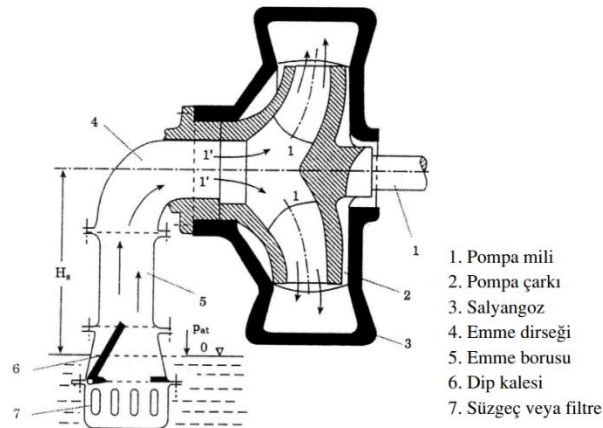
Pompanın kullanıldığı tesisattaki emme yüksekliği, emme hattı uzunluğu ve tesisatın yerel kayıpları arttıkça basınç düşüşü yaşanır. Mümkün olduğu kadar emme yüksekliği ve emme hattı uzunluğunun düşük tutulması ve yerel kayıplar oluşturan tesisat elemanlarının sayısını azaltmak veya nispeten daha düşük basınç kaybına sebep olanların kullanılması kavitasyondan kaçınmak için büyük önem arz etmektedir. Kaviteasyon oluşmaması için tesisatın basınç kayıplarının hesaplanması ve uygun pompa seçimi oldukça önemlidir.

Tesisatın kurulduğu yerin rakımı yükseldikçe atmosfer basıncı düşer. Atmosfer basıncının düşmesiyle sıvının buharlaşması kolaylaşır ve dolayısıyla kaviteasyon riski artar.

Pompanın özgül hızı arttıkça kaviteasyon riski artar. Aynı debi ve basma yüksekliğine sahip işletme özellikleri benzer iki farklı pompadan özgül hızı düşük olan pompa kaviteasyonsuz çalışabiliyorken yüksek devirde, dolayısıyla yüksek özgül hızda çalışan pompada kaviteasyon oluşumu görülebilir (Ayder & Kalmanoğlu, 2011). Ayrıca, emme vanasının kısık olma durumu yerel basınç kaybını artırması yanı sıra akım hızını da artıracığı için statik basıncın düşmesine sebep olması ile kaviteasyon riskini artırır.

2.1.3.1. ENPY (Emme Net Pozitif Yükü)

Pompalarda kaviteasyon oluşumunda en önemli parametre Emme Net Pozitif Yükü (ENPY) olarak adlandırılır. İngilizce karşılığı Net Positive Suction Head (NPSH) olarak da kullanımı yaygındır. ENPY, pompada emme girişindeki akışkanın toplam basınç yükü ile akışkanın buharlaşma basıncı arasındaki fark olarak tanımlanır.



Şekil 2.11. Pompa çark girişi kesit görünümü (Atılğan, 2002)

Pompanın emme hattına, yani emme yaptığı serbest yüzey ile pompa giriş kesiti arasında (0-1 noktaları arasında) Bernoulli denklemi uygulanırsa, Şekil 2.11’de gösterildiği gibi,

$$\frac{P_0}{\rho g} + \frac{V_0^2}{2g} + z_0 = \frac{P_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} + z_1 + H_k \quad (2.12)$$

Pompanın emme girişindeki toplam basınç yükünü bulmak için denklemi düzenlersek;

$$\left(\frac{P_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} \right) = \frac{P_0}{\rho g} - z_1 - H_k \quad (2.13)$$

ENPY, pompanın emme girişindeki akışkanın toplam basıncı ile buharlaşma basıncı arasındaki fark olarak tanımlı olduğundan dolayı

$$ENPY = \left(\frac{P_e}{\rho g} + \frac{V_e^2}{2g} \right) - \frac{P_v}{\rho g} \quad (2.14)$$

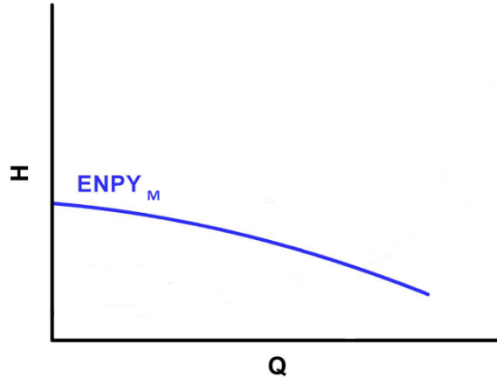
$$ENPY = \frac{P_0}{\rho g} - z_1 - H_k - \frac{P_v}{\rho g} \quad (2.15)$$

halini alır. Denklem 2.15’deki değerler basınç yükü olarak alınırsa ve şekildeki gibi emme yapılan yüzey atmosfer basıncına maruz ise

$$ENPY = H_{atm} - H_v - z_1 - H_k \quad (2.16)$$

Bu belirlenen ENPY, pompanın kullandığı sistem dikkate alınarak belirlendiğinde pompanın emme hattı tesisatı, yani sitem ENPY’si olarak tanımlanır ve ENPY_M(mevcut) olarak adlandırılır. Bu denklemdeki z_1 , pompanın emme yaptığı serbest sıvı seviyesi pompa ekseninden yukarıda ise pozitif olarak dikkate alınmalıdır. Ayrıca pompanın emme hattı kapalı ve basınçlandırılmış ise H_{atm} basıncı serbest sıvı seviyesinin maruz kaldığı mutlak basınç olarak ele alınmalıdır. Basınçlar mutlak ölçekte ele alındığından dolayı ENPY daima pozitifdir.

Sistemin ENPY_M’sini belirlemek için emme hattındaki basınç kayıpları akışkanın hızının karesi ile doğru orantılı olarak arttığından dolayı debi ile de doğru orantılıdır. Bu sebeple ENPY_M, debi arttıkça Şekil 2.12’de görüldüğü üzere parabolik olarak azalır.



Şekil 2.12. $ENPY_M$ 'nin debiye göre değişim tablosu (Sevgi, 2011)

Kavitasyonun oluşmadığı maksimum emme yüksekliği (H_{smax}) hesabı da Denklem 2.16. düzenlenerek bulunur.

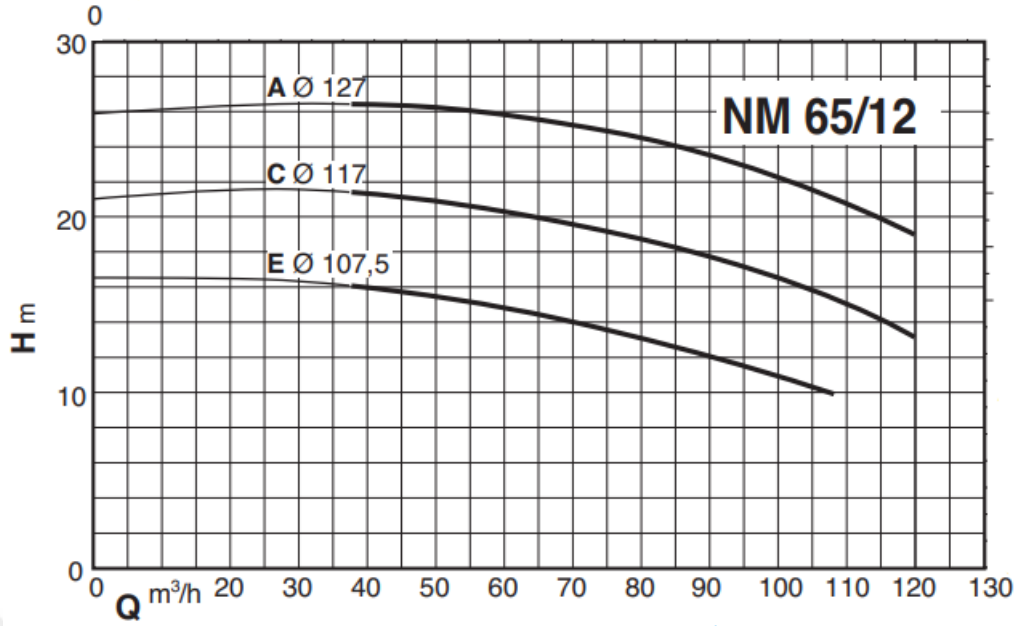
$$ENPY = H_{atm} - H_v - z_1 - H_k \quad (2.17)$$

2.1.4. Santrifüj Pompa Performans Karakteristik Eğrileri

Bir santrifüj pompanın performansı devir hızı, debi, basınç, mekanik güç, verim ve gerekli emme net pozitif yükü ile verilir. Pompaların devir hızı arttıkça kapasitesi ve dolayısıyla performansı artar. Ancak, performans ilişkileri verilirken sabit bir devir hızındaki basınç, verim, mekanik güç ve gerekli emme net pozitif yükünün debiye göre değişimleri grafik halinde verilir. Bu eğriler karakteristik performans eğrileri olarak adlandırılır ve sabit bir devir hızında basma yüksekliği - debi (H_p-Q), pompa mekanik gücü - debi (P_m-Q), pompa verimi ($\eta - Q$), ve gerekli emme net pozitif yükü - debi ($ENPY_G - Q$) eğrileridir.

2.1.4.1. H-Q Performans Eğrisi

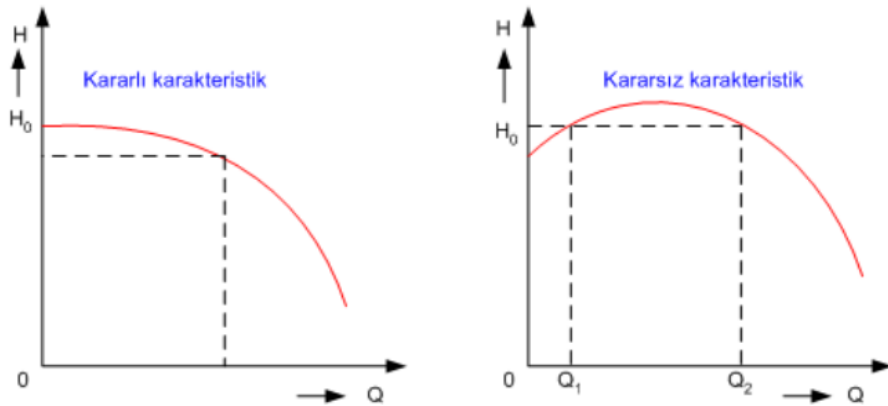
Bir santrifüj pompanın debisi değiştikçe statik basıncı da değişim gösterir. Yani farklı debilerde farklı basınca sahiptir. Bernoulli prensibine göre bir akışkanın toplam basınç yükü sabittir. Kesit alanı değişmediğinde kütle korunumu yasasına bağlı olarak akışkanın debisi arttıkça akışkan hızı artar. Basınç yükü toplamı sabit olduğundan dinamik basınç artarken statik basıncı düşer. Pompa tam kapalı durumda (shut-off) ($Q=0$) iken pompanın basıncı en yüksek olur. Bunun sebebi hızın sıfır olduğu durumda statik basıncın maksimum olmasıdır. Şekil 2.13'te aynı özelliklere sahip üç farklı boyuttaki santrifüj pompanın H-Q performans eğrileri verilmiştir.



Şekil 2.13. 3 farklı boyuttaki pompanın H-Q değerleri (Calpeda, 2019)

Şekil 2.13'te görüldüğü gibi debinin artmasıyla pompa basıncı parabolik olarak azalır. Teoride serbest debi, yani debinin maksimum olduğu konumda statik basıncın sıfır olması gerekir fakat pratikte oluşmaz. Bunun sebebi sistem direncinin sıfır olamamasıdır. Bu yüzden hidrolik güç ve hidrolik verim hiçbir zaman sıfır olmaz.

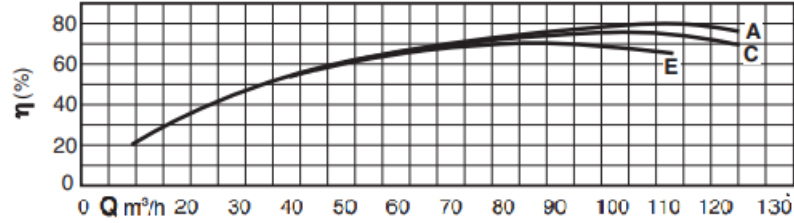
Santrifüj pompalarda debinin artmasıyla basınç düşüşünün görülmesi kararlı veya dengeli olarak adlandırılır. Fakat bazı pompalarda tasarımdan kaynaklanan kararsız bir bölge oluşur. Pompa basıncı debi artışıyla birlikte artar ve daha sonra parabolik olarak düşer. Aynı basınca iki ayrı debide ulaşılabilir fakat pompayı bu kararsız bölgede çalıştırmak oldukça zararlıdır. Şekil 2.14'te kararlı ve kararsız karakteristik eğrilerinin bir örneği verilmiştir (Demirel, 2021).



Şekil 2.14. Kararlı ve kararsız pompa basıncı karakteristik eğrisi

2.1.4.2. η -Q Performans Eğrisi

Santrifüj pompalarda verim debinin artmasıyla parabolik olarak artar, maksimum seviyesine geldikten sonra yine parabolik olarak nispeten daha hızlı bir şekilde azalır. Bu maksimum noktaya En Verimli Nokta (EVN) veya Best Efficiency Point (BEP) diye adlandırılır. Şekil 2.15’de, Şekil 2.13’e benzer üç farklı boyuttaki pompanın verim eğrileri verilmiştir.

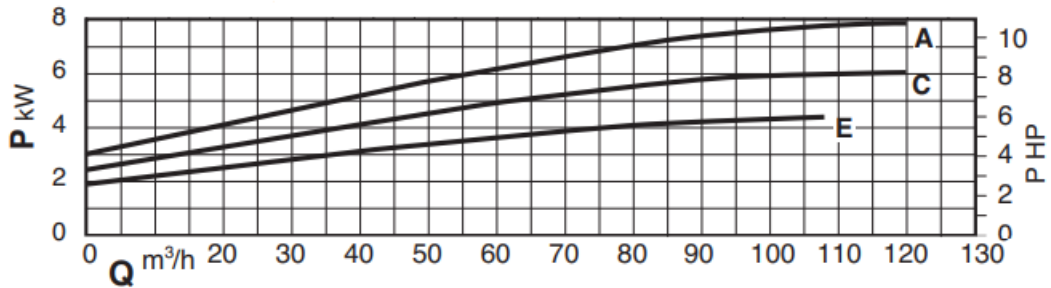


Şekil 2.15. 3 farklı boyuttaki pompanın η -Q değerleri (Calpeda, 2019)

2.1.4.3. P_{mek} -Q Performans Eğrileri

Bir santrifüj pompanın iki farklı güç-debi eğrisi vardır. Bunların biri hidrolik güç, diğeri mekanik gücün debiye göre değişim eğrisidir. P_{hid} -Q eğrisi formülasyonundan da anlaşılacağı üzere debinin sıfır olduğu konumda sıfırdır ve debi artışıyla parabolik olarak artar. Fakat debi artışında pompa yüksekliği düşeceğinden belli bir noktada en yüksek değerine ulaşır ve parabolik olarak azalır.

Diğer güç debi eğrisi P_{mek} -Q genelde yaygın olarak pompa seçiminde ve pompa kataloglarında kullanılan performans eğrisidir. Debi sıfırken belli bir değerden başlar ve debi ile birlikte artış gösterir. Şekil 2.16’da, Şekil 2.13. ve Şekil 2.15’de basınç ve verim eğrileri verilen pompaların güç eğrisi verilmiştir.

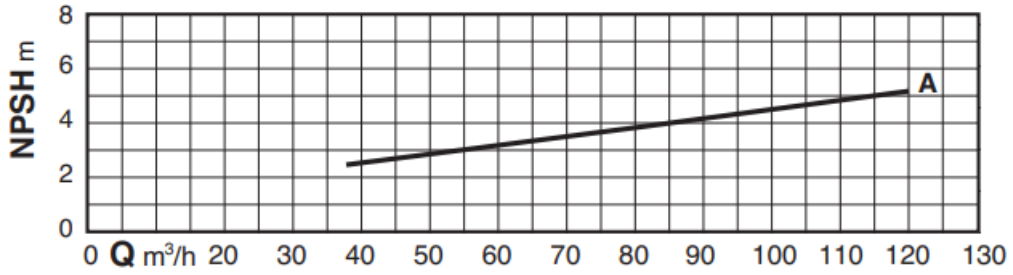


Şekil 2.16. 3 farklı boyuttaki pompanın P-Q değerleri (Calpeda, 2019)

2.1.4.4. Kaviteasyon Performans Eğrisi

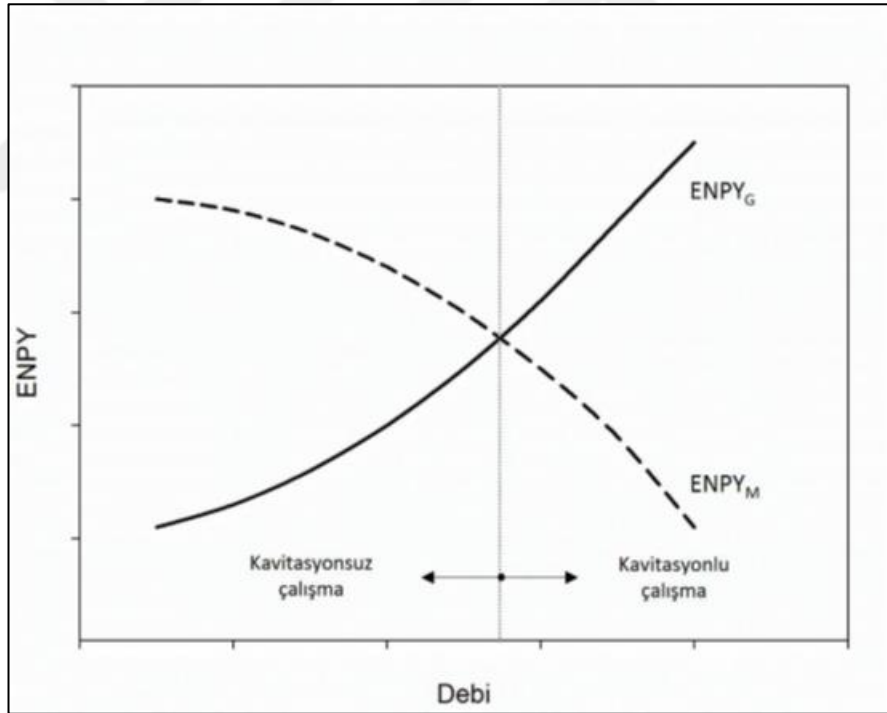
$ENPY_G$, pompanın tasarımına, performansına ve sıvı özelliklerine bağlıdır. Kullanılacağı tesisattan bağımsız olup pompanın karakteristik bir basınç

büyükliktir. Dolayısıyla, pompanın kavitasyon performansını gösterir. Kavitasyon performans eğrisi veya $ENPY_G - Q$ eğrisi olarak adlandırılabilir.



Şekil 2.17. 3 farklı boyuttaki pompanın ENPY-Q değerleri (Calpeda, 2019)

Sistemde kavitasyon oluşmaması için tesisat için belirlenen $ENPY_M$ değerinin pompanın gerekli $ENPY_G$ değerinden büyük olması gerekir. Çünkü $ENPY_G$ değeri bize kavitasyon oluşmaması için pompa giriş ağzında olması gereken gerekli basınç büyüklüğünü verir.



Şekil 2.18. ENPY-Q grafiğinde kavitasyonlu-kavitasyonsuz çalışma grafiği (Dönmez, 2018)

Sistemin $ENPY_M$ değeri $ENPY_G$ değerinden ne kadar fazla olursa kavitasyon oluşma riski o ölçüde düşük olur. Şekil 2.18’de görüldüğü gibi debinin artmasıyla $ENPY_M$ değeri azalır $ENPY_G$ değeri artmaktadır. Bu yüzden debi arttıkça pompanın kavitasyonsuz çalışma alanı gittikçe daralmaktadır, yani debinin artması kavitasyon riskini artırmaktadır. Pompanın çalışma şartları göz önüne alındığında $ENPY_M$ ’de

olabilecek değişimlere karşılık genellikle $ENPY_G$ değerinde %10 kadar bir emniyet payı eklenir.

$$ENPY_M > ENPY_G * 1,1 \quad (2.18)$$

Pompaların kavitasyon performans eęrиси ($ENPY_{G-Q}$) pompa imalatçıları tarafından deneysel olarak diğer performans parametreleri ile birlikte belirlenip ürün kataloğunda verilir.

Pompa karakteristiği bilinmeyen bir pompada kavitasyon oluşup oluşmayacağını tayin etmemiz için deneysel çalışmalar sonucu belirlenen boyutsuz bir Thoma kavitasyon parametresi tanımlanır.

$$\sigma = \frac{ENPY_G}{H_p} \quad (2.19)$$

Burada H_p pompa basma yüksekliğidir. Her iki değerde basınç yükü olduğundan Thoma kavitasyon parametresi boyutsuz bir parametre olarak karşımıza çıkar.

Thoma kavitasyon parametresi ile özgül hız arasında korelatif bir ilişki olup deneysel olarak elde edilen bu ilişki Denklem 2.20'deki gibidir.

$$\sigma = 12,2 * 10^{(-4)} * N_{SQ}^{4/3} \quad (2.20)$$

Sonuç olarak, kavitasyon karakteristiği bilinmeyen fakat özgül hızı bilinen bir santrifüj tip pompanın kavitasyona maruz kalıp kalmayacağı Denklem 2.20'de verilen bağıntıdan Thoma kavitasyon parametresi belirlenerek pompanın $ENPY_G$ değeri hesaplanıp, $ENPY_M$ değeri ile kıyaslanarak kavitasyona maruz kalıp kalınmayacağı belirlenir.

Pompanın kavitasyon performansı ile ilgili ayrıca bir farklı boyutsuz parametre daha tanımlıdır. Bu boyutsuz kavitasyon performans parametresi ise emme özgül hızıdır.

$$N_{SS} = N * \frac{\sqrt{Q}}{(ENPY)^{3/4}} \quad (2.21)$$

Bu özgül hız tanımı Denklem 2.11. ile benzerlik göstermekte olup, benzer şekilde pompa basıncı yerine pompanın emme girişindeki basınç yükü, yani emme net pozitif yükü ($ENPY$) esas alınarak belirlenen bir boyutsuz kavitasyon performans parametredir.

2.1.4.5. Kavitasyondan Kaçınmak İçin Yapılabilecekler

Kavitasyondan kaçınmak için kavitasyon riskini arttıran faktörleri olabildiğince ortadan kaldırmak gerekir. Pompanın emme ağzındaki basıncı düşüren faktörleri ortadan kaldırmak kavitasyondan kaçınmak için yapılabilir.

$ENPY_M$ değeri mümkün olduğunca $ENPY_G$ değerinden büyük olacak şekilde pompa seçilmelidir.

Akım hızının ve dolayısıyla debinin yüksek olması basınç kaybına yol açacağından, pompanın kullanılacak olduğu tesisatın optimum debisi belirlenmeli ve yüksek debilerde olabildiğince çalıştırılmamalıdır.

Pompanın emiş yaptığı sıvı seviyesi mümkün oldukça düşük tutulmalıdır. Hatta mümkünse pozitif bir basınç oluşturmak için sıvı seviyesi pompanın giriş kesitinden yukarıda olmalıdır.

Pompa tesisatının kurulacağı yerin rakımı atmosfer basıncını etkileyeceğinden hesaplama yapılırken gözden kaçırılmaması gerekmektedir.

Emme hattındaki basınç kayıpları en aza indirilmelidir. Emme hattı kısa tutulmalı ve basınç kaybı yaşanmaması için gereksiz dirsek ve vana kullanılmamalıdır.

Pompa çıkış ve emiş kesitleri arasında by-pass yaparak pompanın girişteki basıncı arttırılmalıdır.

Buharlaştırma basıncı sıvının sıcaklığıyla doğru orantılı olduğundan mümkünse sıvının sıcaklığı düşürülmelidir.

Sıvı içinde ergimiş gaz ve hava parçacıkları varsa vakum pompası ile tahliye etmek.

Pompanın özgül hızı arttıkça kavitasyon riski artacağından daha düşük hızlı pompa seçilebilir (Atılgan, 2002).

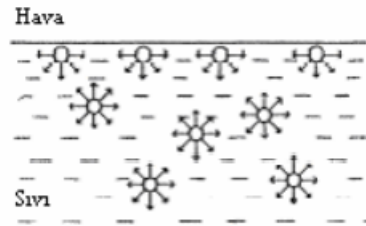
2.2. HİDROFOBİKLİK

Hidrofobi suyu sevmeyen anlamına gelir, dolayısıyla hidrofobiklik yüzeyin ıslanabilirliğinin düşük olduğunu ifade etmek için kullanılan teknik bir terimdir. Hidrofobiklik yüzey gerilimine bağlıdır ve temas açısı ile ölçülür. Hidrofobik özelliğe sahip katı yüzey, sıvıya gaza uyguladığından daha fazla bir yüzey gerilim kuvveti uygular ve sıvı damlasının yüzeye temas ettiği alan azalır.

Temas açısı, yüzeyin pürüzlülüğüne, yüzey hazırlama şekline veya yüzeyin temizliği gibi çeşitli faktörlere bağlıdır. Temas açısı $\theta^\circ < 90^\circ$ ise sıvı yüzeyi ıslatır, anlaşılacağı üzere yüzey hidrofilik, yani suyu severdir. Eğer temas açısı $90^\circ \leq \theta^\circ \leq 150^\circ$ ise sıvı, yüzeyi ıslatmıyor, yani yüzey hidrofobiktir. Bunun yanı sıra temas açısı $150^\circ < \theta^\circ$ ise yüzey, süperhidrofobiktir (Nosonovsky & Bhushan Bharat, 2007).

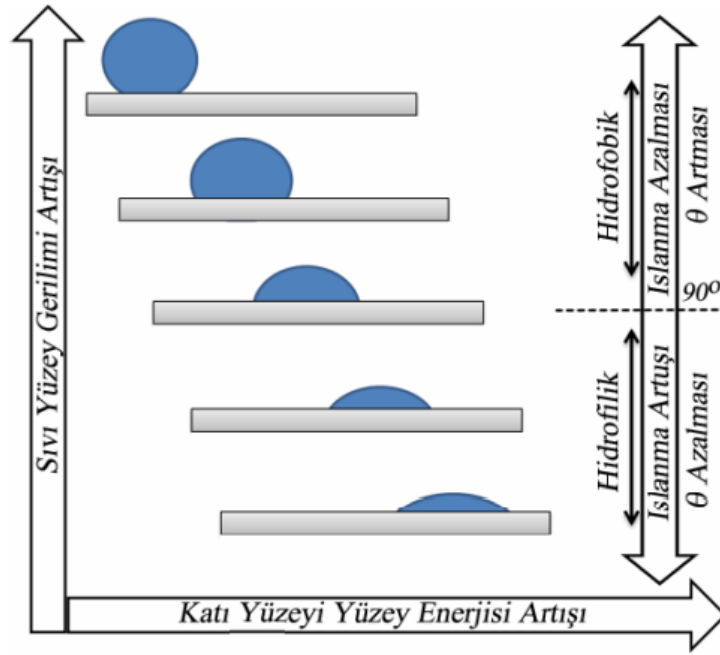
Bir sıvının yüzey alanını, sabit sıcaklık ve basınçta arttırmak için gerekli olan enerji yüzey enerjisi olarak tanımlanır ve “ γ ” simgesi ile ifade edilir.

Sıvılarda, benzer sıvı moleküllerini birbirine çeken ve şiddeti sıvının türüne göre değişen kohezyon kuvvetleri bulunmaktadır. Sıvı içindeki bütün moleküller birbirine eşit derecede çekme kuvveti uygular. Fakat sıvı yüzeyindeki moleküllerin uğradığı çekme kuvveti sıvı içindeki moleküllerin uğradığı kuvvetten daha azdır. Çünkü yüzeydeki moleküller sadece yüzeyin altındaki moleküller tarafından çekilir. Bu yüzden bir yüzey gerilimi oluşur (Bağçeci, 2010).



Şekil 2.19. Sıvılarda yüzey gerilimi (Düzyol, 2009)

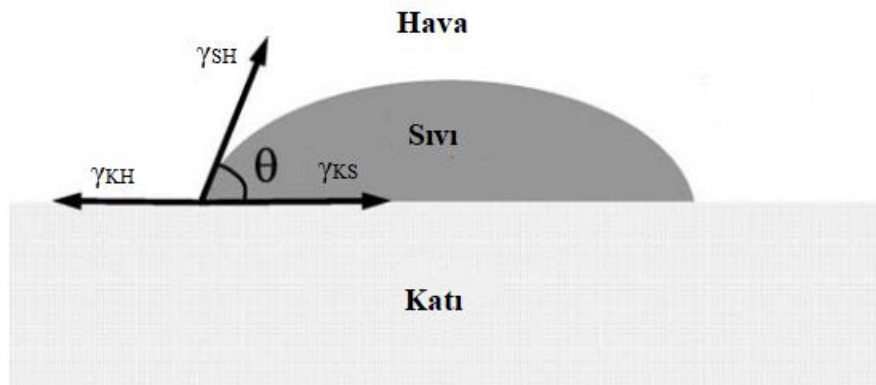
Hidrofobik yüzeylerde sıvı yüzey gerilim enerjisi katı yüzey gerilim enerjisinden fazladır. Katı yüzey sıvıdan fazla gaz fazını tercih ediyorsa hidrofobiktir ve su damlası yüzey üzerinde kubbeleşir ve sıvının, katı yüzeyle teması azalır, yani katı yüzeyi ıslatmaz. Fakat hidrofilik yüzeylerde su damlasının yüzeyle teması daha fazladır ve yüzeyi ıslatır.



Şekil 2.20. Yüzey gerilimi ve yüzey enerjisi ilişkisi (Çağlar, 2016)

Bir sıvının yüzeyle yaptığı temas açısı yüzey gerilim kuvvetleri ile açıklanır. Katı yüzeydeki bir su damlası, üç farklı yüzey gerilim kuvveti etkisi altında dengeye sahiptir. Bunlar sıvı-hava yüzey gerilimi (γ_{SH}), sıvı-katı yüzey gerilimi (γ_{KS}), katı-hava yüzey gerilimidir (γ_{KH}). Bu denge ilişkisi Young Denklemi olarak bilinir (Tavana vd., 2004).

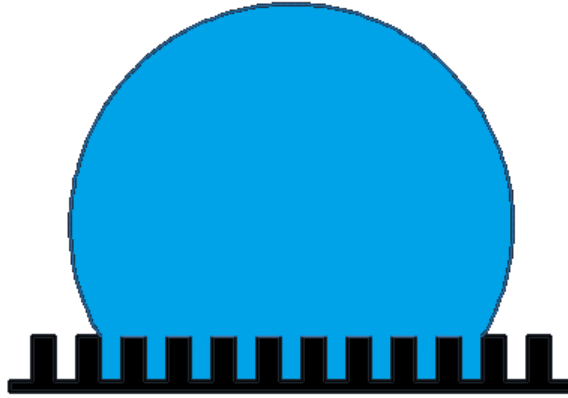
$$\gamma_{SH} \cos \theta = \gamma_{KH} - \gamma_{KS} \quad (2.22)$$



Şekil 2.21. Su damlasına etki eden yüzey gerilim kuvvet dengesi (Tavana, vd., 2004)

Young eşitliği sadece ideal pürüzsüz yüzeyler için kullanılan bir hesaplamaadır.

Wenzel eşitliği yüzey pürüzlülüğünden oluşacak boşluklara sıvı taneciklerinin sığdığı, yani boşlukların dolduğu yüzeylerde geçerlidir.



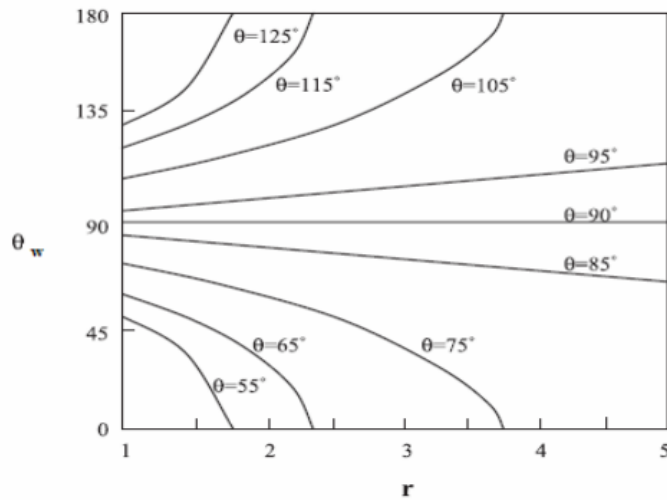
Şekil 2.22. Wenzel su damlası modeli

$$\cos \theta_w = r \cos \theta_Y \quad (2.23)$$

Eşitlikte θ_w Wenzel temas açısını, θ_Y Young temas açısını göstermektedir. “r” ise pürüzlülük faktörüdür. Pürüzlülük faktörü temas eden gerçek yüzey alanının görünür yüzey alanına oranı olarak tanımlanır.

$$r = \frac{A_{ger}}{A_{gör}} \quad (2.24)$$

Wenzel modelinde pürüzlülük gerçek temas alanını esas aldığından dolayı yüzey enerjisini artırmaktadır. Bu yüzden pürüzlülüğün artması hidrofobik yüzeyi daha hidrofobik yaparken, hidrofilik yüzeyin de hidrofillik oranını arttırmaktadır.



Şekil 2.23. Pürüzlülük faktörü-temas açısı grafiği (Bağçeci, 2010)

Şekil 2.23'te görüleceği üzere örneğin yüzey temas açısı 105° , yani hidrofobik bir yüzey olan eğriye baktığımızda pürüzlülük faktörü arttıkça yüzey ile yaptığı temas açısı artarak hidrofobikliği artmakta, ya da temas açısı 65° olan hidrofilik yüzey eğrisini incelediğimizde pürüzlülük faktörü arttıkça temas açısı azalarak hidrofilikliği artmaktadır.



3. MATERYAL METOD

Hidrofobik yüzeylerin santrifüj tip bir pompada kavitasyon üzerine etkileri, diğer bir ifadeyle kavitasyon performansı pompanın ENPY ve Thoma Kavitasyon parametresi üzerinden incelenmiştir. Deneysel çalışma bu kapsamda 3 aşamadan oluşmaktadır. İlk 2 aşama hidrofobik kaplama solüsyonunun sentezlenmesi ve pompa çarkının ıslak yüzeylerinin kaplanmasından oluşmaktadır. Son aşama olarak da kaplamasız ve kaplamalı pompaların performans testleridir.

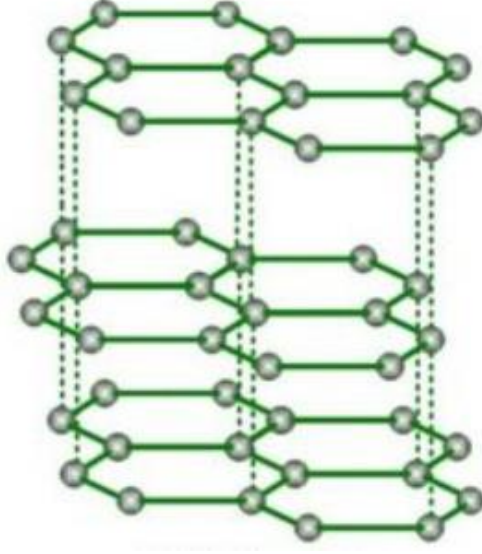
3.1. Yüzey Malzemesi Seçimi ve Oluşturma

Üç özdeş santrifüj pompa çarkı için üç farklı hidrofobik solüsyon sentezlenmiştir. Fakat öncelikle ana yüzey malzemesi ve kullanılacak takviye ile takviyenin miktarı seçilmiştir. Temel solüsyon malzemesi olarak FEP (florlanmış etilen propilen) kullanılmış olup buna kütsel olarak %3 oranında grafit, grafen ve hegzagonal bor-nitrür takviye edilmiştir. Hazırlanan solüsyonlar ile önce numune levhalar kaplanarak hidrofobikliğini belirlemek amacıyla yüzey temas açıları ölçülmüştür.

Ana yüzey kaplama malzemesi FEP bir floropolimer türüdür. Floropolimerler günlük yaşamımızda sıklıkla karşılaştığımız bir malzemedir. Örneğin, mutfakta adını sıkça duyduğumuz teflon, bir floropolimer bazlı malzemedir.

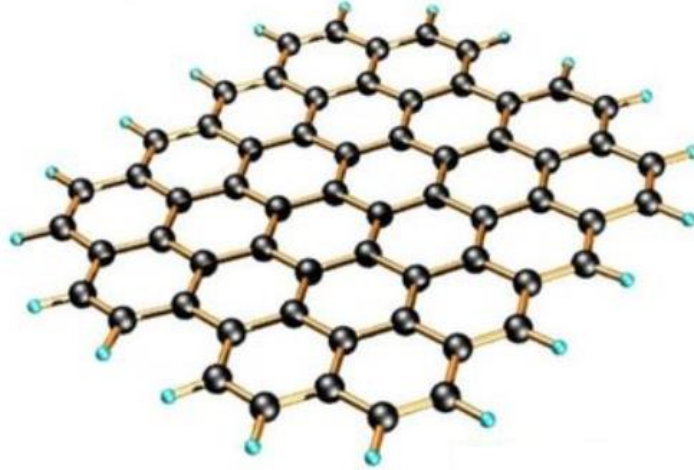
Floropolimerlerin genel özellikleri arasında düşük sürtünme katsayısı, düşük yüzey gerilimi, yapışmazlık gibi özellikleri nedeniyle kaplama uygulamalarında sıklıkla kullanılmaktadır. Düşük sürtünme katsayısı ve yapışmazlık sayesinde kapladığı yüzeyi hidrofobikleştirmektedir. Bunların yanı sıra bir diğer özelliği kaplama yüzeyinde ıslanılabilirliği azaltarak kaplandığı yüzeye yanmazlık, iyi yalıtım, gaz bariyer ve yüksek korozyon direnci sağlamaktadır. Floropolimerler arasında işleme kolaylığı ve fire eksikliği sağlaması nedeniyle FEP, en iyi ve en ekonomik seçenektir (Düzenli, 2021).

Grafit, yumuşak, esnek ve oldukça hafif bir karbon allotropudur ve yarı metal kabul edilir. Grafit, Şekil 3.1’de gösterildiği gibi grafen levhalardan oluşan bir kafes yapısına sahiptir. Kimyasal reaksiyona girmeyen kararlı bir maddedir. Bu yüzden kimyasal bozunmalara dayanıklılık gösterir. Mükemmel ısı ve elektrik iletkenliğine sahiptir. Isıya karşı dayanıklıdır. Yumuşak ve yağlı (kaygan) yapıya sahiptir. Bu yüzden endüstride yağlayıcı olarak kullanılmaktadır (Çakır, 2018).



Şekil 3.1. Grafitin atom yapısı (Akbudak, 2017)

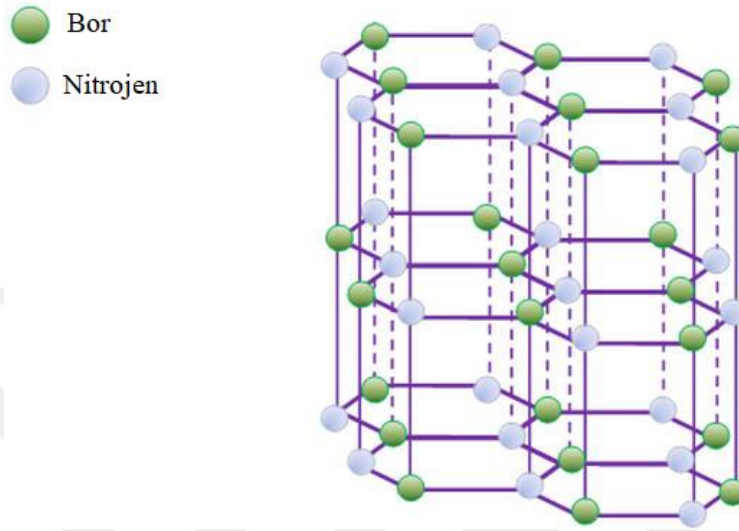
Grafen, çok ince yapısına rağmen hafif, sağlam, esnek bir karbon allotropudur. Şekil 3.2’de gösterildiği gibi grafen, grafiti oluşturan levhalardan birinin kopmasıyla oluşmaktadır. Dünyanın en güçlü malzemesi olarak bilinir. Buna karşılık elastisite modülü çelikten yüz kat daha yüksektir. Kolay kaplanabilir ve yüzey direncinin yüksek olması sebebiyle otomotiv, havacılık, tıp, elektrik-elektronik, güneş enerjisi ve enerji depolama gibi çok geniş bir kullanım alanına sahiptir (Şenel vd., 2015).



Şekil 3.2. Grafenin atom yapısı (Akbudak, 2017)

Hegzagonal bor-nitrür (H-BN), çeliklerin yüzey sertliğini ve aşınmaya karşı direncini artırır. Bor-nitrür, Şekil 3.3’te görüldüğü gibi bor ve nitrojen atomlarından oluşan aynı grafit allotropuna benzeyen bir tabakalı yapıya sahiptir, fakat renginin beyaz olmasından dolayı H-BN beyaz grafit veya beyaz karbon olarak da adlandırılır.

H-BN yüksek ısı iletkenliğe ve buna karşın elektriksel yalıtkanlığa sahiptir. Zehirsiz, yumuşak ve kaygan bir yapıya sahiptir. Yüksek sıcaklıklarda dahi kimyasal tepkimeye girmez. Düşük sürtünme katsayısına sahiptir ve kaplandığı malzeme üzerinde mükemmel bir yağlayıcılık sağlar. Elektrik-elektronik, seramik, kompozit kimya ürünlerinde sıklıkla kullanılmaktadır (Şengönül, 2016).



Şekil 3.3. Bor-nitrürün atom yapısı (Jedrzejczak-Silicka vd., 2020)

Kütlece %0.15, %0.3, %0.6, %1 ve %3 oranlarında grafit ve grafen, FEP malzemesine eklenerek beş farklı konsantrasyonda grafit ve grafen takviyeli, sırasıyla FEP-C ve FEP-G olarak sembolize edilen kompozit solüsyonlar sentezlenmiştir. Sentezlemede kütle ölçümleri için Şekil 3.4’te gösterilen Radwag AS220.R2 tipi 0.1 mg duyarlılığa sahip hassas terazi kullanılmıştır. Karışımlar daha iyi bir homojenlik sağlanması amacıyla 5 ila 10 dakika süreyle manyetik karıştırıcıda karıştırılmıştır.

Hazırlanan kompozit solüsyonlarla levha numunelerin yüzeyi kaplanarak hidrofobikliğini belirlemek için üzerlerine enjektör yardımıyla su damlatılıp su damlasının yüzey ile yaptığı temas açısı ölçülmüştür. Yapılan ölçümlerde takviye konsantrasyonlarının artmasıyla temas açının arttığı belirlenerek en yüksek olarak %3 konsantrasyon seçilmiştir. Sonrasında, %3 oranında hegzagonal bor-nitrür takviyeli FEP (FEP-HB) kompozit malzeme için de aynı şekilde kaplama yapılarak temas açıları ölçülmüştür.



Şekil 3.4. Radwag AS220.R2 tip hassas terazi

3.2. Yüzey Kaplama Yöntemi Seçimi ve Kaplama

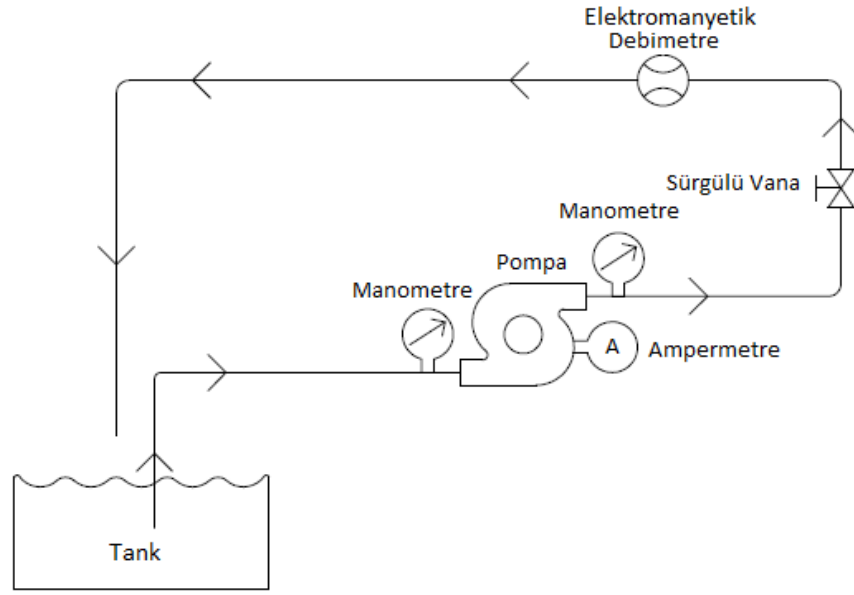
Üç özdeş santrifüj tip pompa çarkının ıslak yüzeyleri hazırlanan kompozit takviyeli FEP-C, FEP-G ve FEP-HB solüsyonlar ile kaplanmıştır. Kaplama işlemi, el tabancası ile püskürtme yöntemi kullanılarak yapılmıştır. Düzgün olmayan cisimlerin kaplamasının kolay olması, kolay malzeme değiştirilebilmesi ve düşük maliyetli basit bir uygulama olması sebebiyle bu yöntem seçilmiştir. Kaplama malzemesinin çarkların yüzeyine daha iyi yapışmasını sağlamak amacıyla 400°C sıcaklıkta on dakika fırınlanarak ısıtıl işlem uygulanmıştır.



Şekil 3.5. Santrifüj pompa çarkının kaplamasız ve kaplamalı görüntüsü

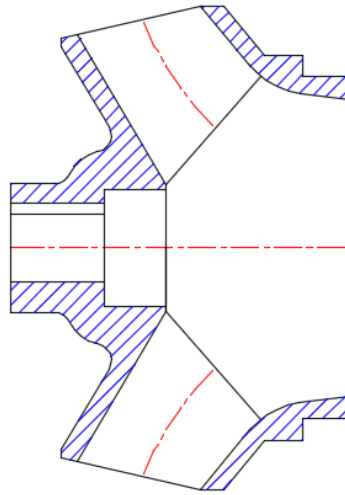
3.3. Pompa Performans Testleri

Kaplanarak hidrofobiklik kazandırılan çarkların pompa kapasite ve performansına etkisi deneysel olarak test edilmiştir. Bu testlerde DOMAK Pompa ve Makine Sanayi A.Ş.'nin tasarım ve imalatı olan SLG4'' 3HP santrifüj tip pompalar kullanılmıştır ve performans testleri de yine DOMAK Pompa ve Makine Sanayi A.Ş.'ye ait test düzeneğinde yapılmıştır. Test düzeneği Şekil 3.6'da görüldüğü üzere başlıca pompa, ampermetre, emme tankı, basınç algılayıcı manometreler, sürgülü vana ve debimetreden oluşmaktadır. Ölçülen veriler veri toplama ünitesi aracılığıyla bilgisayara aktarılmıştır.



Şekil 3.6. Pompa performans test deney düzeneğinin şematik gösterimi

Şekil 3.7’de kesit görüntüsü verilen üç adet aynı tip ve boyuttaki pompa çarkı hazırlanmış olan kompozit takviyeli hidrofobik yüzey solüsyonu ile kaplandıktan sonra teste tabi tutulmuştur.

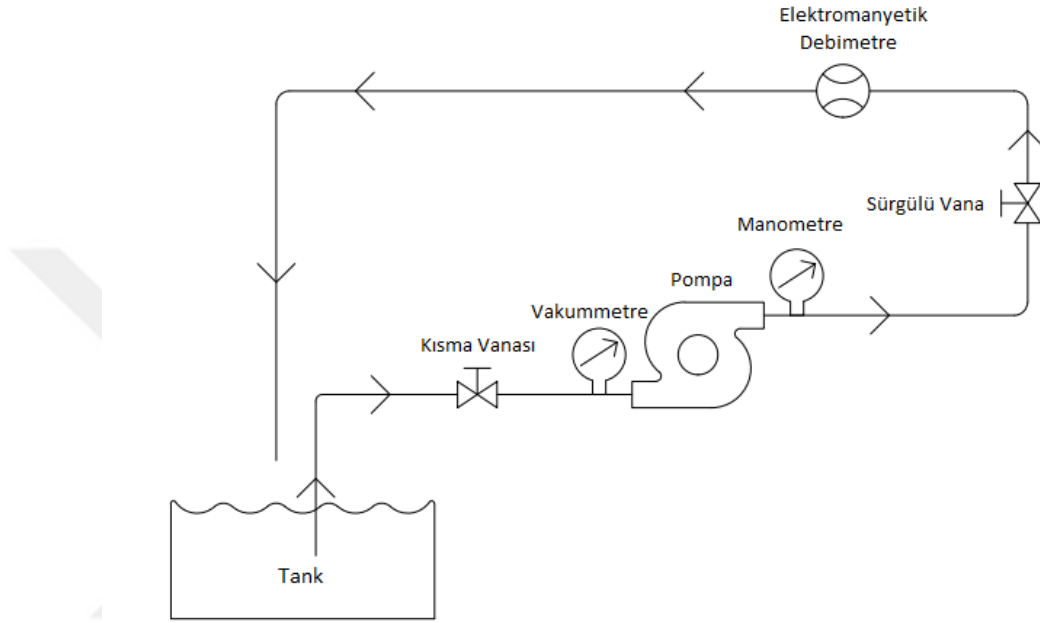


Şekil 3.7. Pompa çarkı kesit görüntüsü

Performans testleri 2840 dev/dak sabit hızda ve 5 amper sabit akımda debi sürgülü vana ile kademeli olarak düşürülerek farklı debilerde pompa basıncı ve mekanik güç ölçülerek yapılmıştır. Pompa basıncı, pompa giriş ve çıkışında basınç algılayıcılar tarafından ölçülen statik basınçların farkı alınarak belirlenmiştir.

3.4. Kaviteasyon Performans (ENPY) Testleri

Deney düzeneği Şekil 3.8’de görüldüğü üzere pompa, kısma vanası, basınç algılayıcı manometreler, sürgülü vana ve debimetreden oluşmaktadır. Pompa performans testlerinin yapıldığı test düzeneğinden başlıca farkı emme hattında mevcut olan kısma vanasıdır. Benzer şekilde, ölçülen veriler veri toplama ünitesi aracılığıyla bilgisayara aktarılmıştır.



Şekil 3.8. Test düzeneğinin şematik görüntüsü

ENPY testleri, 2840 dev/dak sabit devir hızında ve basma yüksekliği sabit tutularak pompanın debisi ve giriş (emme) basınçları ölçülerek yapılmıştır. Pompa girişinde kısma vanası kullanılarak basma yüksekliği 3 metre olarak sabit tutulmuştur. Debi değişimi için pompa çıkışında sürgülü vana kullanılmıştır. Pompa giriş ağzında basınç algılayıcı manometre (vakummetre) kullanılarak pompa girişindeki basınç ölçülmüştür. Pompa çıkışında bulunan manometre ile pompanın basma basıncı ölçülmüştür. Bu işlem debi kademeli olarak düşürülerek 12 farklı debi değeri için tekrarlanarak her bir çarkın kaplanmamış ve kaplandıktan sonraki ölçümleri yapıp ENPY hesaplamaları yapılmıştır. ENPY belirlenirken ölçülen basınçlar mutlak ölçekte dikkate alınmıştır.

4. BULGULAR ve TARTIŞMA

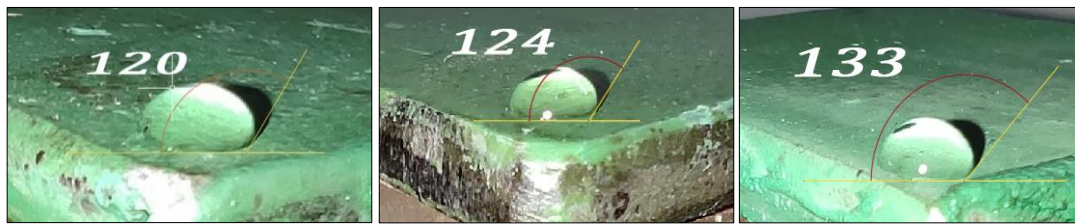
4.1. Yüzey Temas Açıları

Ana yüzey kaplama malzemesi FEP'e %0.15, %0.3, %0.6, %1 ve %3 olmak üzere beşer farklı oranda grafen ve grafit, ayrıca %3 oranında hegzagonal bor-nitrür takviye malzemesi eklenerek kompozit hidrofobik solüsyon hazırlanarak temas açıları Tablo 4.1'de verildiği gibi ölçülmüştür.

Tablo 4.1. Kaplanan numunelerin yüzey temas açısı ölçümleri

	FEP-C	FEP-G	FEP-HB
%0.15	92°	100°	-
%0.3	94°	100°	-
%0.6	96°	107°	-
%1	102°	108°	-
%3	120°	124°	133°

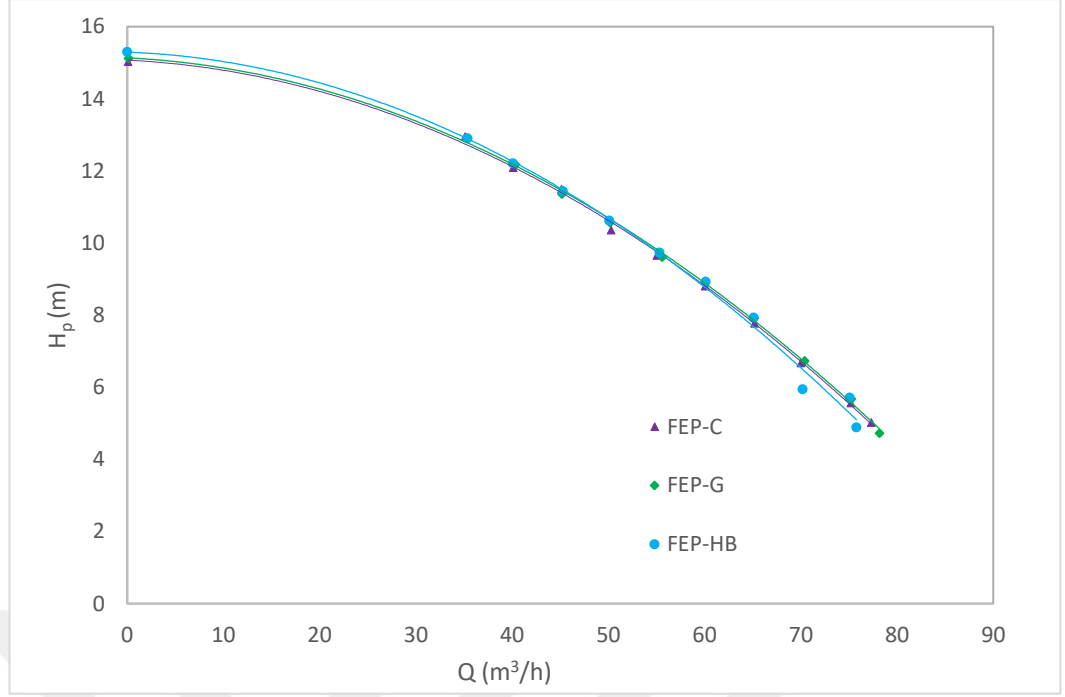
FEP-C ve FEP-G için genel olarak konsantrasyon arttıkça temas açının arttığı görülmektedir. Dolayısıyla, en yüksek temas açısı FEP-C ve FEP-G için %3 konsantrasyonda sırasıyla 120° ve 124° olarak ölçülmüştür. Bu sonuç elde edildikten sonra FEP-HB için sadece %3 konsantrasyonda temas açısı ölçümü yapılmış olup 133° olarak belirlenmiştir. Bir sıralama yapılacak olursa aynı konsantrasyonda en yüksek temas açısına FEP-HB, en düşük temas açısına ise FEP-C kaplı yüzeyin sahip olduğu görülmektedir. Sadece %3 konsantrasyondaki kompozit solüsyonlarla pompa çarkı kaplanarak pompa performans testleri yapılmıştır.



Şekil 4.1. %3 konsantrasyonlu FEP-C, FEP-G, FEP-HB yüzey temas açıları

4.2. Pompa H_p -Q ve η -Q performans test sonuçları

Sentezlenen üç ayrı solüsyonla kaplanmış pompa çarkları 11 farklı debi değeri için performans testine tabi tutulmuştur. Pompa girişinde ve çıkışında bulunan manometreler ile pompanın basıncı, pompa basma hattındaki debimetre ile pompanın bastığı akışkanın debisi ölçülmüştür. Şekil 4.2'de FEP-C, FEP-G ve FEP-HB kaplamalı çarklar için pompanın H_p -Q karakteristik performans eğrileri verilmiştir.



Şekil 4.2. FEP-C, FEP-G ve FEP-HB kaplı çarkların H_p -Q grafiği

Pompa basınçları debi arttıkça azalır, bu durum Bernoulli ilkesine göre de bu şekildedir, viskoz kuvvetlerin etkisiyle bu azalış parabolik olarak gerçekleşmektedir. Test edilen 3 farklı hidrofobik kaplı çarkın sergilediği H_p -Q performansının dikkate değer ölçüde farklılık arz etmediği görülmektedir.

Verim, pompanın genel verimi olup elektrik motoru ile tahrik edilen çarkın mekanik gücünün akışkana aktarılan hidrolik güce oranıdır. Denklem 4.1. ile hesaplanmıştır.

$$Verim(\%) = \frac{P_{hid}}{P_{mek}} * 100 \quad (4.1)$$

Pompa hidrolik gücü, Denklem 4.2. ile hesaplanmıştır. Deneyde m³/saat olarak ölçülen debi, m³/saniye olarak hesaba alınmıştır.

$$P_{hid} = Q \cdot \rho \cdot g \cdot H_p \quad (4.2)$$

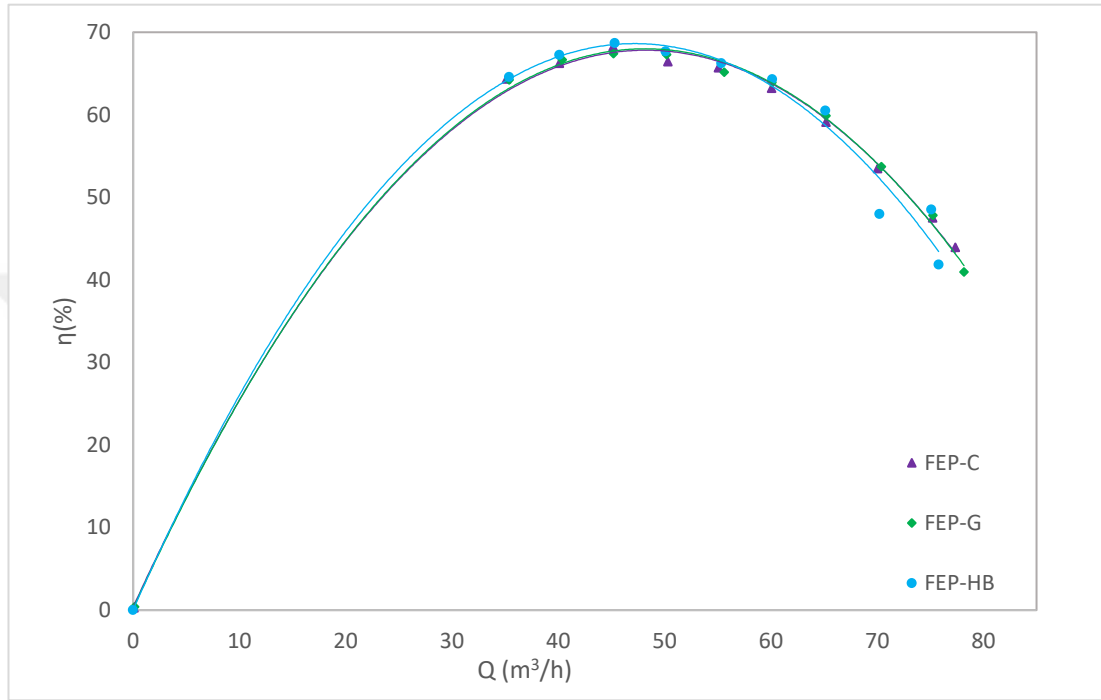
Elektrik motorunda trifaze bağlantı kullanılmıştır. Bu yüzden gerilim 380V olarak alınmıştır. Elektrik motorunun gücü, pompanın faz açısı $\cos \varphi$ 0,89 ve ampermetre ile ölçülen akım esas alınarak Denklem 4.3'e göre hesaplanmıştır.

$$P_{elk} = V \cdot I \cdot \cos \varphi \cdot \sqrt{3} \quad (4.3)$$

Elektrik motorundan çarka aktarılan mekanik güç, elektrik motorunun verimi 0,832 kullanılarak Denklem 4.4'te verildiği gibi belirlenmiştir.

$$P_{mek} = P_{elk} \cdot \eta \quad (4.4)$$

FEP-C, FEP-G ve FEP-HB kaplamalı çarkların yapılan deneylerle elde edilen η -Q performans eğrileri Şekil 4.3'te verilmiştir.



Şekil 4.3. FEP-C, FEP-G ve FEP-HB kaplı çarkların η -Q grafiği

Şekil 4.3'te gösterilen η -Q grafiğinde 11 farklı debi değeri için verim değerleri hesaplanmıştır. Verim, debinin artmasıyla parabolik olarak artarken en yüksek değerine ulaştıktan sonra parabolik olarak azalmaktadır. Şekil 4.3'te gösterildiği gibi FEP-C için en yüksek verim 45,15 m³/h debide %68,3, FEP-G için en yüksek verim 45,19 m³/h debi değerinde %67,4, FEP-HB için en yüksek verim 45,30 m³/h debide %68,7 olarak belirlenmiştir.

4.3. Pompa Emme Basınç Ölçümleri

Aynı pompa ve aynı düzenekte ıslak yüzeyleri FEP-C, FEP-G, FEP-HB hidrofobik malzemeler ile kaplanan üç özdeş çarkın santrifüj pompa performans testlerinde kademeli olarak düşürülerek 12 farklı debide basma yükseklikleri kısma vanası yardımıyla sabit tutulurken, emme basınçları altı ayrı test yapılarak ölçülmüştür. Santrifüj pompalarda debi azaldıkça, viskoz kuvvetlerin yarattığı sürtünme kayıpları azalacağından dolayı basınç kayıpları da azalır. Fakat bu testler

yapılırken emiş hattına başlı kısma vanası ile basma yüksekliği sabit tutulmuştur. Pompanın emiş yaptığı fazla basıncı kısma vanası engellemektedir. Pompa girişine bağlanan vakummetre, kısma vanasının engellediği basıncı da basınç kaybı olarak ölçmesinden dolayı yaptığımız testte debi azaldıkça basınç kayıpları yükselmiştir. Ölçülen emme basınçları, her bir debi için kaplamasız ve FEP-C, FEP-G ve FEP-HB kaplı çarklar için sırasıyla Tablo 4.2., Tablo 4.3. ve Tablo 4.4'te verilmiştir.

Tablo 4.2. FEP-C kaplanmadan önce ve sonra oluşan basınç kayıpları

Debi, Q, (m ³ /h)	H _e (Kaplamasız), m	H _e (FEB-C), m
77.3	2.74	2.52
75.7	3.04	2.85
73.9	3.51	3.32
71.7	4.07	3.79
68.4	4.51	4.19
66.0	5.01	4.75
63.6	5.53	5.19
60.1	6.03	5.76
57.4	6.53	6.21
53.6	7.03	6.62
48.6	7.51	7.11
42.0	8.04	7.75

FEP-C için basınç kayıplarındaki en büyük düşüş 53,62 m³/h debide 0.41 m olarak, en küçük düşüş 73,90 m³/h debide 0.18 m olarak ölçülmüştür. 12 farklı debi değerinde oluşan basınç kayıplarının ortalaması 0.29 m olarak hesaplanmıştır.

Tablo 4.3. FEP-G kaplanmadan önce ve sonra oluşan basınç kayıpları

Debi, Q (m ³ /h)	H _e (Kaplamasız), m	H _e (FEB-C), m
78.0	2.72	2.46
76.7	3.02	2.69
74.1	3.51	3.36
71.7	4.04	3.89
69.9	4.51	4.29
66.9	5.02	4.77
64.2	5.52	5.28
61.4	6.01	5.72
58.2	6.59	6.16
54.5	7.06	6.62
49.3	7.51	7.11
45.1	8.03	7.49

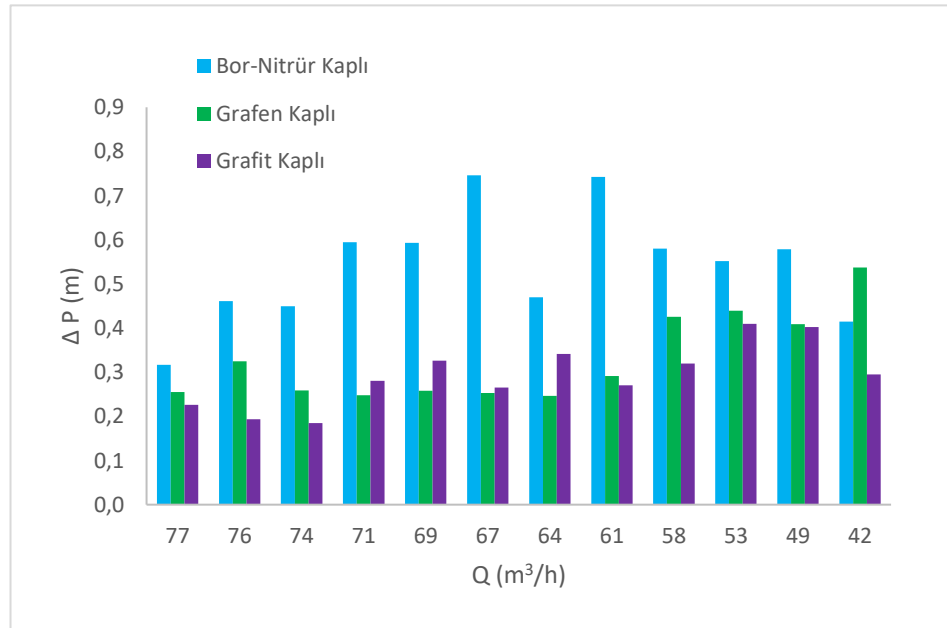
FEP-G için basınç kayıplarındaki en büyük düşüş 45,19 m³/h debide 0.54 m olarak, en küçük düşüş 71,24 m³/h debide 0.15 m olarak ölçülmüştür. Ölçülen tüm debi aralığında oluşan basınç kayıplarının ortalaması 0.31 m olarak hesaplanmıştır.

Tablo 4.4. FEP-HB kaplanmadan önce ve sonra oluşan basınç kayıpları

Debi, Q (m ³ /h)	H _e (Kaplamaşız), m	H _e (FEB-C), m
77.4	2.72	2.41
75.9	3.05	2.59
74.2	3.51	3.06
71.4	4.08	3.49
69.38	4.54	3.95
67.3	5.03	4.29
63.6	5.52	5.05
61.0	6.03	5.29
55	6.52	5.95
53.4	7.04	6.49
49.0	7.51	6.93
42.1	8.04	7.63

FEP-HB kaplamalı çark için ise basınç kayıplarındaki en büyük düşüş 61,03 m³/h debide 0.74 m olarak, en küçük düşüş 77,30 m³/h debide 0.30 m olarak ölçülmüştür. Ölçülen tüm debi aralığında oluşan basınç kayıplarının ortalaması 0.54 m olarak belirlenmiştir.

Hidrofobik kaplı ve kaplamasız çarklar için ölçülen emme basınçlarının farkı emme basınç kaybı düşüşü olarak farklı debilerde Şekil 4.4'te verilmiştir.



Şekil 4.4. Kaplamalı çarkların emme basınç kaybı düşüşü tablosu

Şekil 4.4'te FEP-C, FEP-G, FEP-HB kaplı çarkların farklı debilerdeki basınç kayıpları farkları gösterilmektedir. En fazla basınç kaybı FEP-HB kaplamalı çarkta ölçülmüştür. 12 farklı debinin sadece 4 değerinde FEP-G, FEP-C kaplı çarktan daha fazla basınç kaybı sergilemiştir. Literatürdeki çalışmalara bakıldığında grafenin, grafitten daha az hidrolik sürtünme katsayısı içerdiği görülmektedir, ancak çalışmada kullanılan çarklar birebir aynı olmadığından (imalattaki milimetrik farklılıklar vb.) ve test düzeneğindeki sapmalar göz önünde bulundurulduğunda elde edilen sonuçlar ölçüm belirsizliği dahilinde olağandır. Bu doğrultuda, Şekil 4.4. genel olarak değerlendirildiğinde basınç kaybını düşürme olarak FEP-HB>FEP-G>FEP-C şeklinde sıralanmaktadır.

4.4. ENPY ve Thoma Kaviteasyon Parametreleri

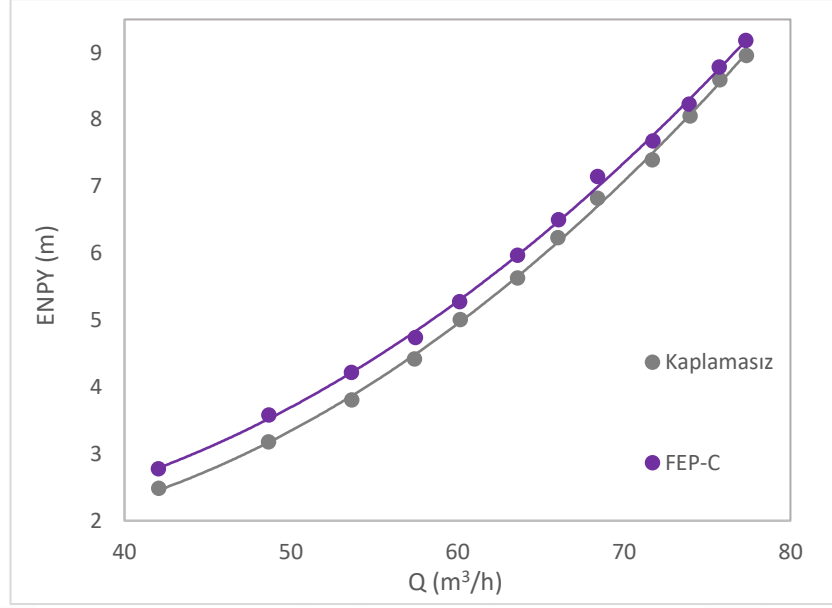
Üç özdeş pompa çarkı, ayrı ayrı 12 farklı debide basma yüksekliği sabit tutularak emme basınçları ve basma basınçları ölçülmüş olup toplamda altı test yapılmıştır. Her bir çarkın, kaplanmadan önceki haliyle kıyaslanmak üzere ENPY değerleri hesaplanmış olup grafiklere dökülmüştür. ENPY, pompadan geçen akışkanın emme ağzındaki basınç yükleri toplamı ile akışkanın o sıcaklıktaki buharlaşma basıncının farkıdır. ENPY hesaplaması için Denklem 4.5'deki ENPY formülü kullanılmıştır, ancak buradaki basınçlar mutlak ölçekte dikkate alınmıştır.

$$ENPY = H_{atm} - H_e + H_d - H_v \quad (4.5)$$

Hesaplamalardaki H_{atm} sıvının emiş yaptığı yüzey açık hacim olduğundan deneylerin yapıldığı yerleşkedeki atmosfer basıncı alınmıştır. Samsun ili, Samsun Organize Sanayi bölgesi için atmosfer basıncı 10.2 m'dir. H_e pompa basınç kayıpları, H_v ise pompanın çalışma akışkanı olan suyun buharlaşma basıncıdır. Test sırasında suyun sıcaklığı 15°C olduğundan doymuş suyun buharlaşma basınç tablosundan değeri 0.17 m olarak alınmıştır. H_d pompa girişindeki akışkanın dinamik basıncıdır. Sabit debide $Q = AxV$ denklemi kullanılarak akışkanın hızı bulunmuştur. Dinamik basınç hesaplaması için de Denklem 4.6. kullanılmıştır.

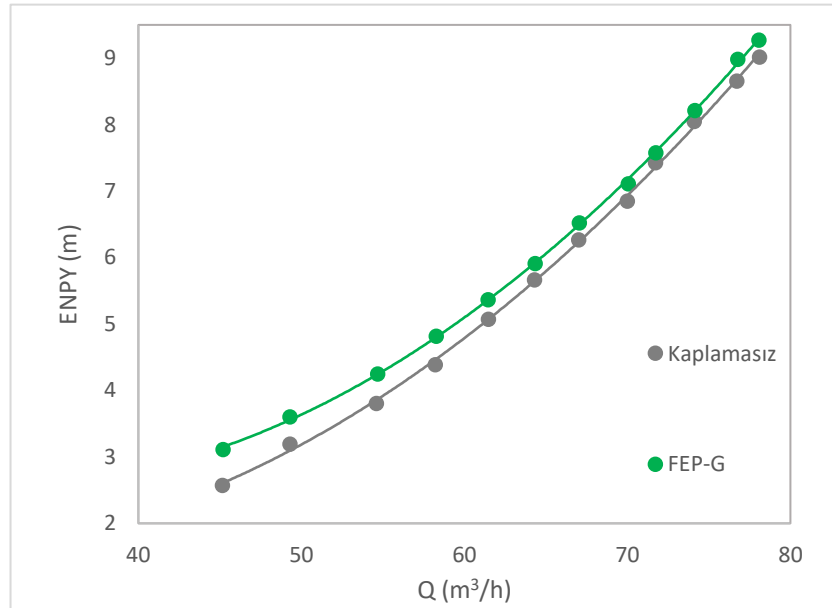
$$H_d = \frac{V^2}{2g} \quad (4.6)$$

Hesaplamalar yapıldıktan sonra çarkların kaplamasız ve kaplamalı hallerinin kıyaslaması için ENPY-Q grafikleri çizilmiş olup Şekil 4.5., Şekil 4.6. ve Şekil 4.7'de verilmiştir.



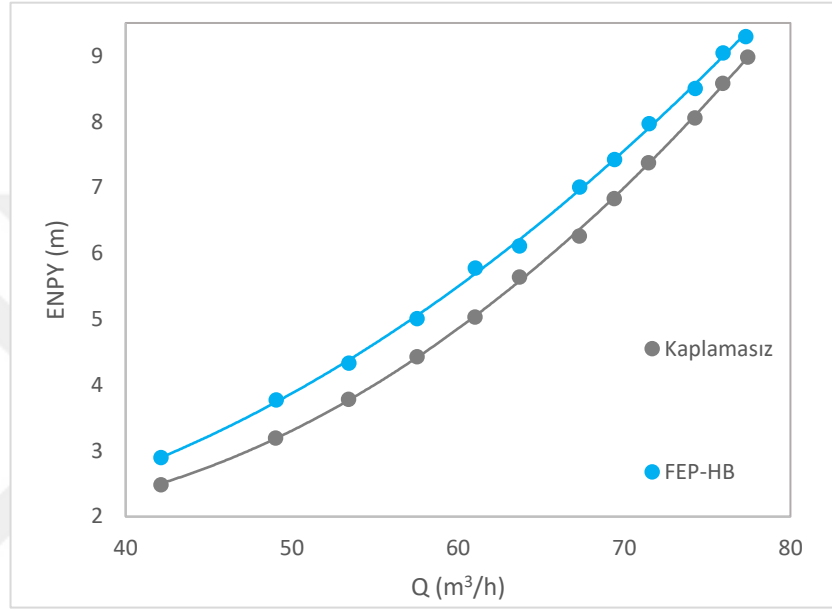
Şekil 4.5. Kaplamasız ve FEP-C kaplı çarkların ENPY-Q grafiği

FEP-C kaplı ve kaplamasız çarkların ENPY değerleri debi ile parabolik olarak artmaktadır. Ancak, kaplamalı çarkın ENPY değerleri, tüm debi aralığı için kaplamasız çarkından yüksektir. En yüksek ENPY iyileşmesi 54.5 m³/h debide 0.44 m, pompanın en iyi çalışma noktası, yani en yüksek verimin elde edildiği debi değerinde ise %12, ortalama olarak %6,15 oranında ENPY değerinde iyileştirme sağlanmıştır. Buna ilaveten, ENPY değerlerindeki artışın düşük debilerde daha yüksek olduğu, debi arttıkça bu artışın azaldığı şeklinde genel bir değerlendirme yapılabilir.



Şekil 4.6. Kaplamasız ve FEP-G kaplı çarkların ENPY-Q grafiği

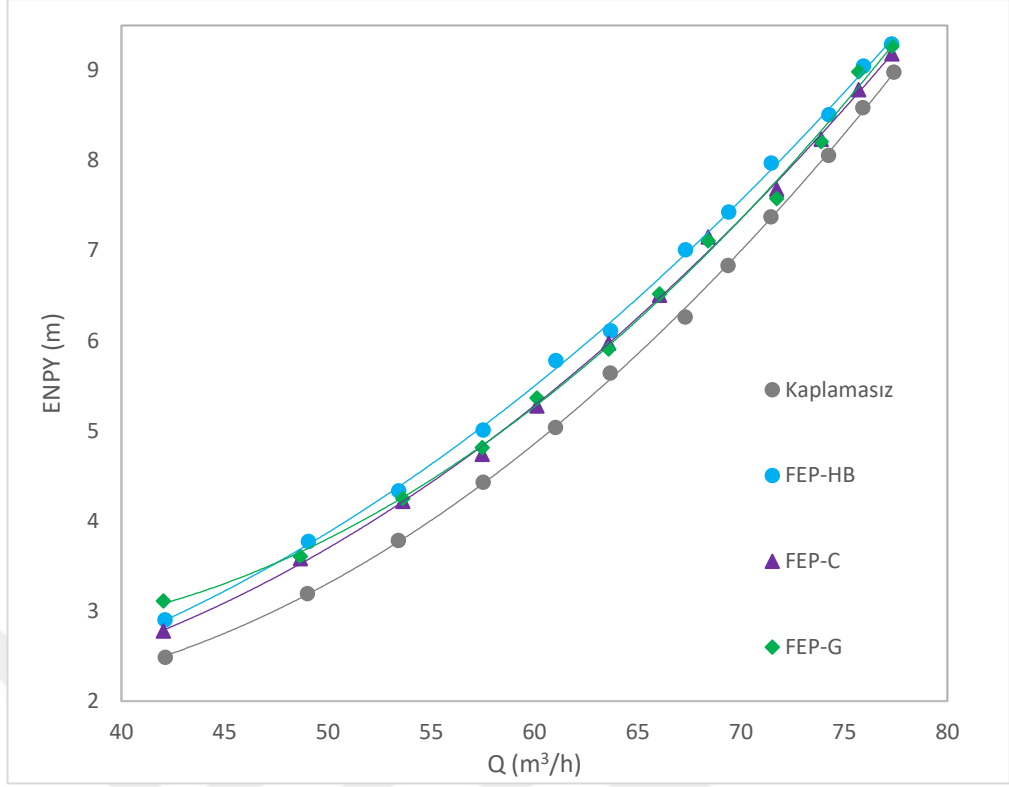
FEP-G kaplı ve kaplamasız çarkların ENPY değerleri debi ile parabolik olarak artmaktadır. Ancak, kaplamalı çarkın ENPY değerleri, tüm debi aralığı için kaplamasız çarkından yüksektir. En yüksek ENPY iyileşmesi 53.63 m³/h debide 0.41m, maksimum verim noktasında %20, ortalama olarak %6.96 oranında ENPY değerinde iyileştirme sağlanmıştır. Buna ilaveten, ENPY değerlerindeki artışın düşük debilerde daha yüksek olduğu, debi arttıkça bu artışın azaldığı şeklinde genel bir değerlendirme yapılabilir.



Şekil 4.7. Kaplamasız ve FEP-HB kaplı çarkların ENPY-Q grafiği

FEP-HB kaplı ve kaplamasız çarkların ENPY değerleri debi ile parabolik olarak artmaktadır. Ancak, kaplamalı çarkın ENPY değerleri, tüm debi aralığı için kaplamasız çarkından yüksektir. En yüksek ENPY iyileşmesi 67.30 m³/h debide 0.75m, en iyi çalışma noktasında %17, ortalama olarak %10.72 oranında ENPY değerinde iyileştirme sağlanmıştır. Fakat, diğerlerinden farklı olarak ENPY değerlerindeki artışın tüm debi aralığı boyunca hemen hemen aynı düzeyde olduğu görülmektedir.

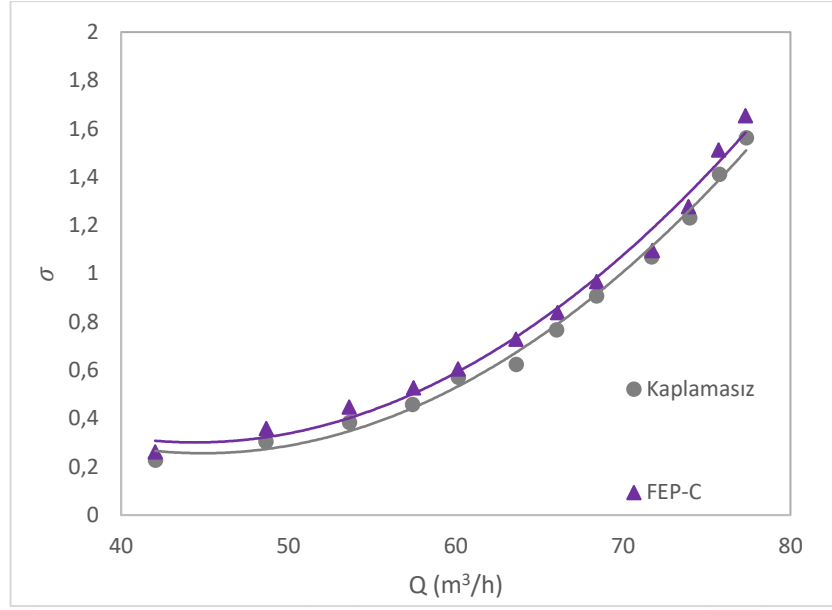
Kaplamasız ve FEP-C, FEP-G, FEP-HB kaplı çarkların sergilediği ENPY-Q performansını kıyaslamak için karakteristik eğrileri tek bir grafik üzerinde Şekil 4.8'de verilmiştir.



Şekil 4.8. FEP-C, FEP-G, FEP-HB kaplı ve kaplamasız çarkların ENPY-Q grafiği

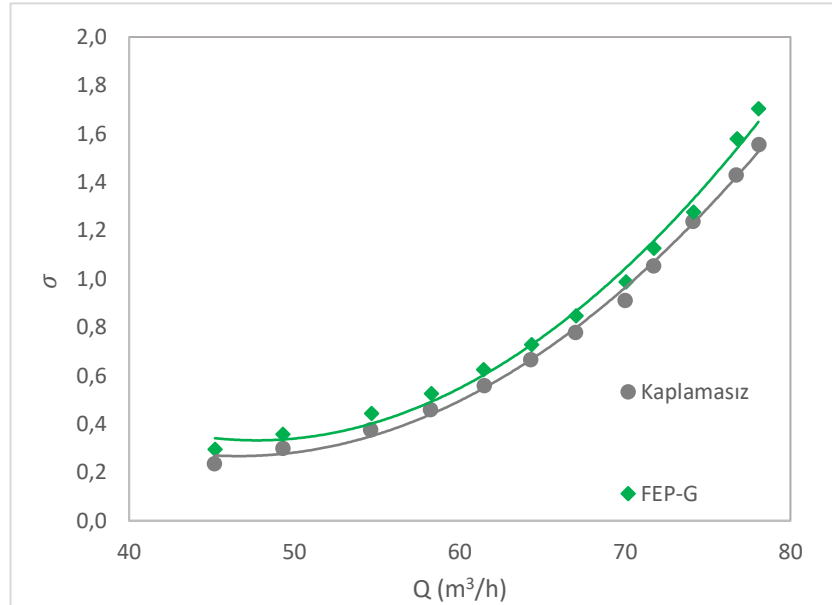
Kaplamalı üç çarkın da tüm debi aralığı boyunca kaplamasız çarktan yüksek ENPY değerleri sergilediği görülmektedir. Ayrıca en yüksek ENPY değerlerinin FEP-HB kaplı çarka ait olduğu, FEP-C ve FEP-G kaplı çarklar aralarında kıyaslandığında FEP-G'nin FEP-C'den daha iyi bir ENPY değeri sergilediği sonucuna ulaşılmıştır.

Şekil 4.9'de kaplamasız ve FEP-C kaplı çarkın Thoma kavitasyon parametrelerinin grafiği verilmiştir. Debi arttıkça Thoma kavitasyon parametresinin yüksek parabolikle tüm debi aralığı boyunca arttığı görülmektedir. Ayrıca, FEP-C kaplı çarkın Thoma kavitasyon parametreleri kaplamasız çarkınkinden tüm debi aralığı boyunca hemen hemen aynı düzeyde ve ortalama olarak %10.16 oranında yüksek olduğu belirlenmiştir.



Şekil 4.9. FEP-C kaplı çarkın Thoma kavitasyon parametre grafiği

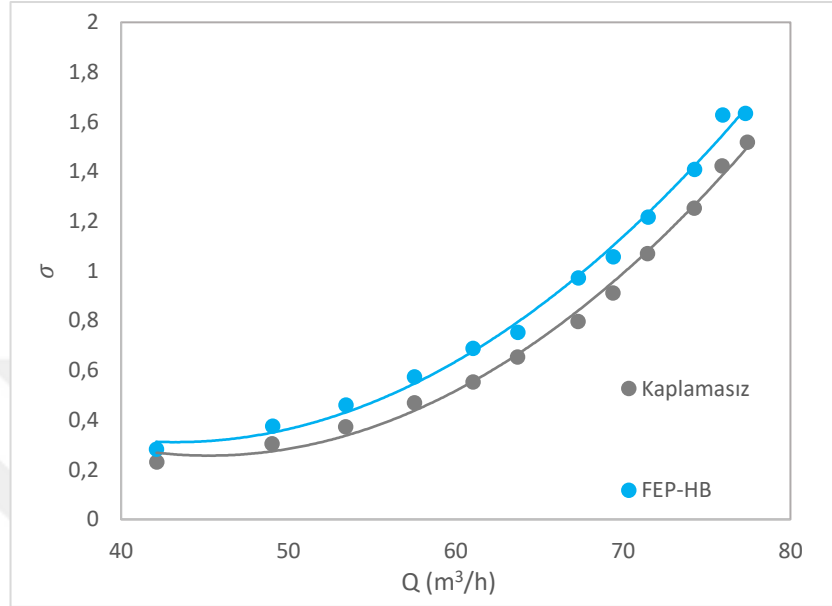
Şekil 4.10'da kaplamasız ve FEP-G kaplı çarkın Thoma kavitasyon parametrelerinin grafiği verilmiştir. Debi arttıkça Thoma kavitasyon parametresinin yüksek parabolikle tüm debi aralığı boyunca arttığı görülmektedir. Ayrıca, FEP-G kaplı çarkın Thoma kavitasyon parametreleri kaplamasız çarkınkinden tüm debi aralığı boyunca hemen hemen aynı düzeyde ve ortalama olarak %12.1 oranında yüksek olduğu belirlenmiştir.



Şekil 4.10. FEP-G kaplı çarkın Thoma kavitasyon parametre grafiği

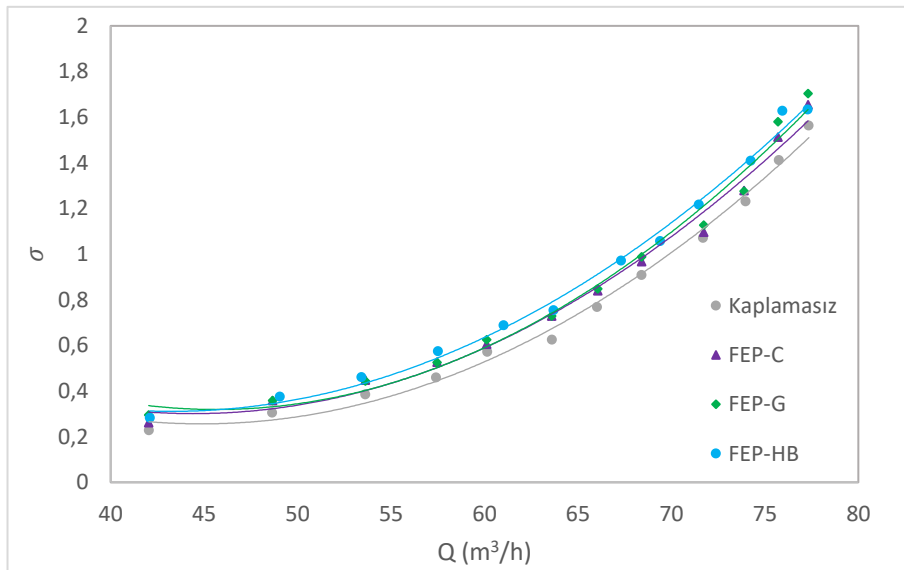
Şekil 4.11'de verilen kaplamasız ve FEP-HB kaplı çarkın Thoma kavitasyon parametrelerinin grafiğinden diğer FEP-C ve FEP-G kaplı çarkların Thoma kavitasyon

parametrelerine benzer eğilim sergilediği görülmekle beraber FEP-HB kaplı çarkın Thoma kavitasyon parametrelerinin kaplamasız çarkinkinden tüm debi aralığı boyunca hemen hemen aynı düzeyde ve ortalama olarak %18.09 oranında yüksek olduğu belirlenmiştir.



Şekil 4.11. FEP-HB kaplı çarkın Thoma kavitasyon parametre grafiği

Şekil 4.12’de kaplamalı üç çarkın da tüm debi aralığı boyunca kaplamasız çarktan yüksek Thoma kavitasyon parametre değerleri sergilediği görülmektedir. Ayrıca en yüksek Thoma kavitasyon parametre değerlerinin ENPY değerlerinde olduğu gibi FEP-HB kaplı çarka ait olduğu görülmektedir.



Şekil 4.12. FEP-C, FEP-G, FEP-HB kaplamalı çarkların Thoma kavitasyon parametre grafiği

5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Bu çalışmada santrifüj tip bir pompa çarkının ıslak yüzeyleri kompozit takviyeli yüzey malzemesi ile kaplanarak hidrofobik özellik kazandırılarak kavitasyon performansı deneysel olarak incelenmiştir. Pompaların kavitasyon performansı için ENPY ve boyutsuz Thoma kavitasyon parametresi üzerinden inceleme ve değerlendirme yapılmıştır. Yüzey kaplama malzemesi olarak FEP, takviye malzemesi olarak grafit, grafen ve hegzagonal bor nitrür kütlece %3 oranda eklenerek sentezlenen FEP-C, FEP-G ve FEP-HB solüsyonlar kullanılmıştır. Elde edilen hidrofobik solüsyonlarla kaplanan yüzeylerin temas açıları ölçülerek hidrofobiklikleri belirlenmiştir. Santrifüj pompaların kaplamasız ve hidrofobik kaplı çarklarla yapılan kavitasyon performans testleri 2840 dev/dak sabit devir hızında, basma yüksekliği sabit tutularak 12 farklı debide pompa emme basınçları ölçülmüş ve ENPY ve Thoma kavitasyon parametre değerleri belirlenerek karşılaştırılmıştır.

Test edilen 3 hidrofobik yüzey arasında en yüksek hidrofobikliği, en yüksek temas açısını sergileyen kütlece %3 oranında hegzagonal bor nitrür takviyeli FEP-HB ile kaplanan yüzeyin sergilediği belirlenmiştir. Ayrıca, FEP-C ve FEP-G için grafen ve grafit konsantrasyonları arttıkça temas açıları, dolayısıyla hidrofobiklikleri artış göstermiştir.

Hidrofobikliğin artmasıyla emme basıncı, dolayısıyla emme hattındaki basınç kayıplarındaki azalma etkisiyle ENPY değerleri yükselmiş olup kavitasyon riski o ölçüde azalmıştır. Dolayısıyla, hidrofobikliğin santrifüj pompanın kavitasyon performansını iyileştirdiği ortaya konmuştur. Bu çalışmada 120°-132° aralığında temas açılarına sahip hidrofobiklik kazandırılan çarkın pompa kavitasyon performansını ENPY değeri olarak kaplamasız çarka kıyasla %6-%10, Thoma kavitasyon parametresi olarak %10-%18 aralığında iyileştirdiği sonucuna ulaşılmıştır.

İlerde yapılacak çalışmalara yönelik bu çalışma temel olarak kabul edilerek sonuçların zenginleştirilmesi için öneriler şu şekildedir:

- Bu çalışmada sadece pompa çarkının ıslak yüzeyleri kaplanarak hidrofobiklik kazandırılmış ve kavitasyon performansı incelenmiştir. Pompanın en temel elemanı çark olmakla birlikte salyangoz olarak da tabir edilen volüte gövdesinin ıslak yüzeylerine de hidrofobiklik

kazandırılarak pompanın bir bütün olarak kavitasyon performansının incelenmesine de ihtiyaç duyulabilir.

- Bu çalışmada belli bir temas açısına sahip hidrofobik yüzeylerin kavitasyon performansı incelenmiştir. Süperhidrofobik yüzeylerin kavitasyon performansına etkilerinin incelenmesi büyük önem arz etmektedir.
- Hidrofobik ve süperhidrofobik yüzeylerin pompanın kavitasyona maruz kaldığında ortaya çıkan özellikle katı yüzeylerin maruz kaldığı deformasyona gösterdiği direncin araştırılması mevcut literatürdeki önemli bir boşluğu dolduracaktır. Bu çalışmada kullanılan solüsyonlar yüzey aşınma ve korozyon dirençleri yüksek kompozit malzemelerden sentezlenmiştir. Kavitasyonun en büyük zararlarından olan yüzey deformasyonuna bağlı malzeme kaybı yönünden incelenmesi uygulamaya yönelik önemli bir araştırma konusudur.
- Hidrofobik ve süperhidrofobik yüzeylerin kavitasyon performansı hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) yöntemleri kullanılarak analiz edilmesi de mevcut literatüre sağlayacağı katkı yönünden önem arz etmektedir.

KAYNAKÇA

- Akbudak, S. (2017). *Grafenin Yapısal, Elektronik, Optik Özellikleri ve Teknolojik Uygulama Alanları*. Bilim ve Sanat Seminerleri, Adıyaman Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi, Adıyaman.
- Atılğan, İ. (2002, Temmuz-Ağustos). Santrifüj Pompalarda Kaviteasyon Oluşumu. *TTMD Dergisi*(20), s. 26-28.
- Ayder, E., & Kalmanoğlu, U. (2011). *Pompa El Kitabı*. Türbosan Pompa ve Pompa Sistemleri.
- Bağçeci, B. İ. (2010). *Nano Partikül Yüzey Kaplama*. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Kimya Mühendisliği, 124, Ankara.
- BTÜ. (tarih yok). *Pompa Deney Föyü*. Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü, Bursa.
- Calpeda. (2019). *Calpeda Pump Catalogue*.
- Choi, C.-H., Ulmanella, U., Kim, J., Ho, C.-M., & Kim, C.-J. (2006). Effective slip and friction reduction in nanograted superhydrophobic microchannels. *Physics of Fluids*, 087105(18), s. 1-9.
- Çağlar, A. (2016). *Elektrokromik Yüzey Malzemelerinde Hidrofobik Özellikler*. Yüksek Lisans Tezi, Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Biyomühendislik ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, 106, Çanakkale.
- Çakır, M. (2018). Çift Kür Olabilen Hidrofob Kaplamaların Mekanik, Yüzey ve Termal Özelliklerinin İncelenmesi. *Marmara Fen Bilimleri Dergisi*, s. 260-268.
- Çengel, Y. A., & Cimbala, J. M. (2008). *Akışkanlar Mekaniği Temelleri ve Uygulamaları*. İstanbul: Güven Yayınları.
- Demirel, E. (2021). *Santrifüj Pompaların Verim ve Kaviteasyon Açısından Çok Amaçlı Optimizasyonu*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Makine Lisansüstü Eğitimi Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, 99, İstanbul.
- Dönmez, A. H. (2018). *Santrifüj Pompalarda Kaviteasyonun Modellenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, 158, İstanbul.
- Düzenli, E. D. (2021). *PTFE, FEP, PFA Gibi Florlu Polimerlerin Metalik Yüzeylere Kaplanması; Yapışmazlık, Aşınma, Korozyon ve Çizilme Özelliklerinin İncelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, 84, Sakarya.
- Düzyol, S. (2009). *Cevher Hazırlamada İslanabilirliğe Dayanan İşlemlerde Hidrofobisite ve Yüzey Gerilimlerinin Etkisi*. Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Maden Mühendisliği Anabilim Dalı, 177, Konya.
- Ekinci, S. (2007). *Gemi Pervane Yüzeyinde Tabaka Kaviteasyonunun Sayısal Olarak İncelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Anabilim Dalı, 117, İstanbul.
- Emse Sızdırmazlık. (tarih yok). *ENP Serisi Santrifüj Pompalar*. Pompa Kataloğu.
- Girdhar, P., & Moniz, O. (2005). *Santrifüj Pompalar Hakkında Pratik Bilgiler*. (A. Kes, Çev.) Elsevier.
- Gögebakan, M. E. (2019). *Hidrolik Türbinlerin Kanat Yüzeylerinde Kaviteasyon Olayının İncelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Harran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, 93, Şanlıurfa.

- Henoch, C., Krupenkin, T., Kolodner, P., & Taylor, J. (2006). Turbulent Drag Reduction Using Superhydrophobic Surfaces. *3rd AIAA Flow Control Conference*. American Institute of Aeronautics and Astronautics, California.
- Jedrzejczak-Silicka, M., Trukawka, M., Piotrowska, K., & Mijowska, E. (2020). *Few-Layered Hexagonal Boron Nitride: Functionalization, Nanocomposites, and Physicochemical and Biological Properties*, Chapter: 9. Biochemical Toxicology - Heavy Metals and Nanomaterials , Chapter 9.
- Karassik, İ. J., Messina, J. P., Cooper, P., & Heald, C. C. (2001). *Pump Handbook*. McGraw Hill.
- Keleş, H. (2016). *Pompa Çarkı Malzemesi Nikel Alüminyum Bronza Uygulanan Sürtünme Karıştırma Prosesinin Malzemenin Kaviteasyon Direncine Etkisi*. Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, 154, Trabzon.
- Kocaaslan, O. (2015). *Verim İyileştirmesi İçin Optimize Edilen ve Poliüretan Kaplama Yapılan Pompa Çarkının Sayısal ve Deneysel Analizi*. Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, 127, Konya.
- Lobanoff, V. S., & Ross, R. R. (1985). *Centrifugal Pumps Design & Application*. Gulf Publishing Company.
- Mercan, O. (2018). *Centrifugal Pump Design and Performance Optimization Using Loss Correlations*. Master Thesis, Marmara University Institute For Graduate Studies In Pure Applied Sciences Department of Mechanical Engineering, 93, İstanbul.
- Moaven, K., Rad, M., & Taeibi-Rahni, M. (2013). Experimental investigation of viscous drag reduction of superhydrophobic nano-coating in laminar and turbulent flows. *Experimental Thermal and Fluid Science*(51), s. 239-243.
- Mutlu, E. (2013). *Vidalı Tip Temassız Sızdırmazlık Elemanlarının Performans Karakteristiğinin Deneysel Analizi*,. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, 139, İstanbul.
- Nosonovsky, M., & Bhushan Bharat. (2007). Hierarchical Roughness Optimization For Biomimetic Superhydrophobic Surfaces. *Ultramicroscopy*(107), s. 969-979.
- Okullu, U. (2016). *Inline Tip Santrifüj Pompalarda Verim Analizi ve Kaviteasyon İncelemesi*. Yüksek Lisans Tezi, Düzce Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, 139, Düzce.
- OMÜ. (tarih yok). *Yüzey Geriliminin Belirlenmesi*. Kimya Mühendisliği Laboratuvarı Deney Föyü, Ondokuz Mayıs Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Kimya Mühendisliği Bölümü, Samsun.
- Pochylý, F., Fialová, S., Kozubková, M., & Zavadil, L. (2010). Study of the Adhesive Coefficient Effect on the Hydraulic Losses and Cavitation. *International Journal of Fluid Machinery and Systems*, 3(4), s. 386-395.
- Rakibuzzaman, M., Kim, K., & Suh, S.-H. (2017). Numerical and experimental investigation of cavitation flows in multistage centrifugal pump. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 32(3), s. 1071-1078.
- Sarıgül, A. (2010). *Santrifüj Pompalarda Enerji Verimliliği*, Yüksek Lisans Tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği, İstanbul.
- Sav, M. (2010). *Francis Tipi Hidrolik Türbinlerde Kaviteasyonun Etkisi*. Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, 83, Elazığ.

- Sevgi, Y. (2011). *Merkezkaç Pompalarda Önçark Uygulamasının Kaviteasyona Etkisinin Sayısal ve Deneyisel İncelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, 105, İstanbul.
- Statharas, J. C. (2019, Haziran). Strategies for Predicting Centrifugal Pump Performance Characteristics by Validating Blade Shape Configurations. Introducing the Trojan Horse Method. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, 8(6), s. 361-363.
- Şen, M. (2006). *Santrifüj Pompalar ve Pompa Tesisatları*. MAS Pompa Sanayii A.Ş.
- Şenel, M. C., Gürbüz, M., & Koç, E. (2015). Grafen Takviyeli Alüminyum Matrisli Yeni Nesil Kompozitler. *Mühendis ve Makina*, 56(669), s. 36-46.
- Şengönül, M. (2016). Bor Nitrür Kaplamanın, Kaynak Çapaklarının Metal Aparat Yüzeylerine Yapışma Davranışlarına Etkisi. *Makina Tasarım ve İmalat Dergisi*, s. 23-30.
- Tavana, H., Lam, C., Grundke, K., & Friedel, P. (2004). Contact Angle Measurements With Liquids Consisting Of Bulky Molecules. *Journal of Colloid and Interface Science*(279), s. 493-502.
- Tural, H. N. (2011). Pompalarda Malzeme Kaynaklı Hasarlar ve Malzeme Seçimi. 7. *Pompa ve Vana Kongresi*.
- Volkov, V. A., Parygin, A. G., Lukin, M. V., Ryzhenkov, A. V., Khovanov, P. G., Nauomanov, A. V., & Soukal, J. (2015). Analysis of the Effect of Hydrophobic Properties of Surfaces in the Flow Part of Centrifugal Pumps on Their Operational Performance. *Thermal Engineering*, 62(11), s. 817-824.

ÖZ GEÇMİŞ

Sabri Murzioğlu, Samsun Tülay Başaran Anadolu Lisesi'ni bitirdikten sonra Ondokuz Mayıs Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliğini 2019 yılında bitirdi. Yine 2019'da OMÜ LEE Makine Mühendisliği Yüksek Lisans programına girdi. Samsun Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği İl Müdürlüğü'nde çalışmaktadır. Orta seviyede İngilizce bilmektedir.

İletişim bilgileri:

ORCID ID : 0000-0002-7633-3499

Yayınlar:

1. Sabri MURZİOĞLU, Mustafa ÖZBEY, Hidrofobik Yüzeylerin Santrifüj Pompalarda Kaviteasyon Üzerine Etkilerinin İncelenmesi, 3th Global Research on Mutidisciplinary Sciences, İstanbul/Türkiye, 4-7 Temmuz 2022