

Santrifüj Pompa Çarklarındaki Hidrolik Kuvvetler ve Yapılan Çalışmaların Değerlendirilmesi

Hydraulic Forces in Centrifugal Pump Impellers and Evaluation of the Studies

Mehmet Kurt^{1,*}, Kazım Çarman²

¹ Selçuk Üniversitesi, Cihanbeyli Meslek Yüksekokulu, Yönetim ve Organizasyon Bölümü, Konya, Türkiye.

² Selçuk Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarım Makineleri ve Teknolojileri Mühendisliği Bölümü, Konya, Türkiye.

* Corresponding author (Sorumlu Yazar): M. Kurt, e-mail (e-posta): mehmet.kurt@selcuk.edu.tr

Makale Bilgisi

Alınış tarihi : 19.08.2022
Düzeltilme tarihi : 23.11.2022
Kabul tarihi : 24.11.2022

Anahtar Kelimeler:

Pompa
Hidrolik Kuvvetler
Radyal Kuvvet
Eksenel Kuvvet

Atf için:

Kurt, M., Çarman, K., (2023). "Santrifüj Pompa Çarklarındaki Hidrolik Kuvvetler ve Yapılan Çalışmaların Değerlendirilmesi", *Tarım Makinaları Bilimi Dergisi*, 19(1): 53-74.

ÖZET

Santrifüj pompalar, içerisinde döner bir mil üzerine yataklandırılmış, üzerinde belli sayıda kanatların bulunduğu bir çark ve bu sayede suya hareket enerjisi kazandıran, mekanik enerjiyi hidrolik enerjiye çeviren makinelerdir. Çarkın bu hareketi sonucu istenen mesafeye istenen akışkanın transferi sağlanmaktadır. Akışkanın hareketi sonucunda akışın hızı, basıncı, gücü ve pompa tipi gibi bazı parametreler belirlenmektedir. Pompa tipini belirleyen en önemli unsur çarka suyun girişi ile çıkışı arasındaki açısal farklılıktır. Bu durumda pompalarda hidrolik akışın, akış biçimine göre hidrolik kuvvetlerin oluşmasına neden olmaktadır. Hidrolik kuvvet, pompalarda hidrolik akışkanın hareketinin zıt yönünde tepki kuvveti radyal ve eksenel kuvvetler olarak meydana gelmektedir. Radyal kuvvet, çark çevresindeki basınç dağılımını, eksenel kuvvet ise çark alt ve üst örtüsünün duvar boşluklarından geçen akış üzerindeki basınç dağılımları olarak pompa ve çark üzerinde oluşan kuvvetlerdir. Hidrolik kuvvetler, pompa mekanik ve hidrolik özelliklerini olumsuz yönde etkilemektedir. Pompa verimi düşerken, mekanik yapıda deformasyonlar meydana gelmektedir. Pompa enerji gereksiniminin artmasında etkili olan hidrolik kuvvetler titreşim ve gürültüye de neden olmaktadır. Bu derlemede pompalarda yaşanacak hidrolik kuvvetlerin olumsuz etkilerinin azaltılması yönünde yapılan çalışmalar incelenmiştir. Çalışmada, geleneksel derleme yöntemine bağlı kalınarak, santrifüj pompalarda meydana gelebilecek hidrolik kuvvetler ve kuvvetleri azaltmaya yönelik yapılan araştırmalar neticesindeki bulgular ortaya konulmuştur. Araştırma sonuçları incelendiğinde, genel olarak yapılacak uygulamaların pompa ve çarklarındaki yapısal değişiklik üzerine olacağı kanaatine varılmıştır. Yapısal değişikliklerin pompa hidrolik performans değerlerini değiştireceği bilinmektedir. Bu durumda pompalarda oluşacak hidrolik kuvvetlerin azaltılması için yapılacak çalışmalarda yapısal değişikliğin etkili olduğu ancak hidrolik performans değerlerini de etkileyeceği unutulmamalı ve değişiklik yaparken tasarım parametreleri de ihmal edilmemelidir.

Article Info

Received date : 19.08.2022
Revised date : 23.04.2022
Accepted date : 24.11.2022

Keywords:

Pump
Hydraulic Forces
Radial Force
Axial Force

How to Cite:

Kurt, M., Çarman, K., (2023). "Hydraulic Forces in Centrifugal Pump Impellers and Evaluation of the Studies", *Journal of Agricultural Machinery Science*, 19(1): 53-74.

ABSTRACT

Centrifugal pumps are machines that are mounted on a rotating shaft, have a certain number of blades on them, and thus provide motion energy to the water and convert mechanical energy into hydraulic energy. As a result of this movement of the impeller, the desired fluid is transferred to the desired distance. As a result of the movement of the fluid, some parameters such as speed, pressure, power and pump type can be determined. The most important factor determining the pump type is the angular difference between the inlet and outlet of the water in the impeller. In this case, hydraulic flow in pumps causes hydraulic forces occurring according to the flow form. The hydraulic force occurs in the pumps as the reaction force, radial and axial forces in the opposite direction of the movement of the hydraulic fluid. The radial force is the pressure distribution around the impeller, and the axial force is the forces that occur on the pump and the impeller as the pressure distributions on the flow passing through the wall spaces of the upper and lower cover of the impeller. As a result of hydraulic forces, it affects the mechanical and hydraulic properties of the pump negatively. While the efficiency of the pump decreases, deformations occur in the mechanical structure. Hydraulic forces, which are effective in increasing the pump energy requirement, also cause vibration and noise. In the compilation study, the studies carried out to reduce the negative effects of the hydraulic forces to be experienced in the pumps were examined. The study, adhering to the traditional compilation method, revealed the hydraulic forces that may occur in the pumps and the findings as a result of the researches made to reduce the forces. When the results of the research are examined, it is concluded that the applications to be made in general will be on the structural changes in the pumps and impellers. It is known that structural changes will change pump hydraulic performance values. In this case, it should not be forgotten that the structural changes are effective in the studies to be done to reduce the hydraulic forces that will occur in the pumps, but it will also affect the hydraulic performance values, and the design parameters should not be neglected while making changes.

1. GİRİŞ

Hareketli sistemlerde mekanizma içerisindeki statik ve dinamik parçaların bir bağlantıya sahip olması gerekmektedir. Bu bağlantı elemanları hareketi başka bir sisteme ya da başka bir cisme aktarmak için kullanılmaktadır. Pompalarda benzer biçimde bir hareket sistemi içerisinde çalışmaktadır. Pompalar içerisine aldıkları akışkanı farklı hız ve basınçta bir yerden başka bir yere aktaran makinelerdir (Yalçın, 1998). Başka bir deyişle mekanik enerjiyi içerisinde bulunan ve belirli bir hızla dönen çarklar ile hidrolik enerjiye çeviren makineler olarak da tanımlanabilir (Baysal, 1979). Pompalar, akışkanın transferini gerçekleştirirken oluşan hız ve basınca bağlı olarak pompa çark ve gövdesi arasında hidrolik kuvvetler oluşturmaktadır. Bu kuvvetler, fazla basınçla birlikte, pompa çark çıkışı ile çark üzerindeki yapılarda (kanat, alt ve üst kapak vb.) meydana gelmektedir.

Çarklardaki basınç artışı, hidrolik kuvvetleri de artırmaktadır. Dolayısıyla rotor (çark) üzerindeki hareket, hidrolik kuvvetleri oluşturacağından, akışkanda oluşabilecek çalkalanma ve farklı basınç koşullarını yenebilmek için yatakların uygun boyutlandırılması gerektiği belirtilmektedir. Gerekli boyutlandırmaların doğru yapılması pompanın ömrünü ve istenilen işletme koşulları içerisinde çalışmasını sağlayacaktır. Kuvvetlerin oluşmasındaki etken, akışkana dönü hareketi ile hız ve basınç kazandıran çarkın yapısal özelliğidir. Bu çarklar genellikle içerisindeki akışkanın yoğunluğu ya da akışkandan farklı katı malzemeler taşımaya göre seçilmektedir. Açık ya da yarı açık çarklar akışı kolaylaştırmak ve basınçtan çok yüksek debi veya sirkülasyon sağlanması için kullanılmaktadır. Kapalı tip çarklar, içerisinden geçen akışkana daha fazla basınç enerjisinin oluşmasına neden olacağından radyal ve eksenel kuvvetlerin etkisinde diğer çark tiplerine göre artacaktır (Özgür, 1964).

Pompa çarklarının yapısal özellikleri kadar, pompa gövde yapısının da hidrolik kuvvetlerin oluşumunda etkisi bulunmaktadır. Çarktan çıkan akışkanın gövdeye çarpması ya da gövde ile arasındaki boşluklarda, karşı basınç oluşturması, hidrolik kuvvetlere neden olacaktır. Pompalar için genellikle kullanılan yapılar hem basınç hem de hızın ortalama değerlerde bulunduğu rotodinamik pompalardır. Santrifüj ve derin kuyu pompaları olarak adlandırılan dalgıç ve düşey milli pompalar bunlara örnek verilebilir. Hidrolik kuvvetlerin oluşmasında etkili bu pompalar günümüzde de en çok faydalanılan pompalar olarak karşımıza çıkmaktadır (Gulich, 2020).

Radyal ve eksenel olarak pompalara etki eden hidrolik kuvvetlerin dengelenmesi için birçok yöntem bulunmaktadır. Ancak bu yöntemler içerisinde yapısal ve hidrolik dengelemeler olarak farklılıklar söz konusudur. Hidrolik kuvvetlerin neler olduğu ve bu kuvvetleri azaltmak için nelerin nasıl yapılması gerektiği konusu üzerindeki bilgilerin açık bir şekilde ifade edilmesi gerekmektedir. Bu derleme çalışmasında, radyal ve eksenel hidrolik kuvvetlerin dengelenmesi için öngörülen teorik uygulamalar ile, bu konu hakkında yapılan çalışmalar ve bu çalışmalarda dengeleme yöntemleri açıklanmaya çalışılmıştır.

2. HİDROLİK KUVVETLER

Pompalar, akışkanın transferini gerçekleştirirken hız ve basınç oluşturmaktadır. Pompa içerisindeki dönü hareketini gerçekleştiren çarktaki basınç artışı, hidrolik kuvvetler ve momentler üretmektedir. Genellikle santrifüj pompalarda oluşan bu hidrolik kuvvetler radyal ve eksenel kuvvetler olarak ikiye ayrılmıştır. Çark üzerinde hareket eden eksenel ve radyal yöndeki kuvvetler, shaft ve rulmanların uygun boyutlandırılması için önemlidir. Radyal kuvvet, çark akışkan çıkışının olduğu çevresel basınç dağılımı ile belirlenirken eksenel kuvvet, çark-gövde arasındaki boşluklardan geçen akışlar üzerinde ortaya çıkan basınç olarak ifade edilmektedir (Gulich, 2020).

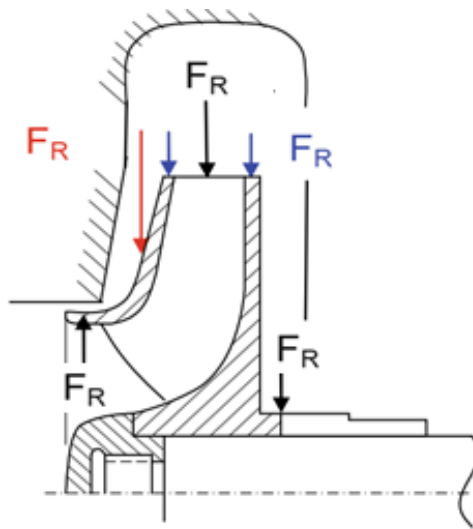
Hidrolik kuvvetlerin oluşumunu azaltmak, pompa performans değerlerinde bir artış sağlayacaktır. Mekanik aksam ve mil yataklamaları üzerinde oluşacak bu kuvvet dönü hareketinde yüklenmeler ile mekanik hasarı ve enerji tüketimini artırmaktadır. Basınç ile tepki kuvveti olarak oluşan hidrolik kuvvetlerin akışı etkileyeceği ve pompa içerisinde ters akışlarında meydana geleceği de bilinmektedir. Bu nedenle yapılan araştırma ve çalışmalar oluşacak hidrolik kuvvetlerin ortaya konulması ve azaltılmasına yönelik olduğu tespit edilmiştir.

Radyal ve aksenal olarak oluşacak kuvvetlerin oluşturacağı tepki kuvvetleri itme kuvveti olarak ifade edilmektedir. Bir pompadaki radyal ve aksenal itmeler, çarkın içindeki akış hareketi ile üretilir. Bu kuvvetler hidrolik olarak veya diğer uygun yöntemlerle dengelenmelidir. Aksi takdirde pompa mili istenmeyen kuvvetlere maruz kalacak, pompa yapısı ve çalışması kuvvetler ile olumsuz etkilenecektir (Nourbakhsh vd., 2008).

Pompalar tarafından akışın çark-gövde içerisinde oluşan hidrolik kuvvetlerinin oluşturduğu olumsuzluklar ve giderilmesi için yapılan çalışmalarda sonuçlar incelenmiştir. Hidrolik kuvvetlerin yol açacağı problemler ve çözümlerinin radyal ve aksenal kuvvetler için farklı olduğu bilinmektedir. Ancak bazı nedenlerin hem radyal hem de aksenal kuvvetlerin oluşmasını tetikleyebileceği ve çözümünde benzerlik gösterebileceği görülmüştür. Hidrolik kuvvetlerin tespiti ve uygulanacak dengeleme için kullanılan yöntemlerin hidrolik ve mekanik olarak giderilebileceği ya da azaltılacağı sonucu saptanmıştır (Nourbakhsh vd., 2008).

2.1. Radyal Kuvvetler

Bir çarka etki eden radyal kuvvet santrifüj pompa çark ve gövde arasındaki basıncın etki etmesi ile dönen çark ve mil yataklamaları, dengesiz bir dönme hareketine maruz kalacaktır. Bu nedenle kuvvetin etki ettiği hareketli sistemde akışkanın çarkın farklı yerlerinde oluşturacağı kuvvetleri tetikleyeceği bilinmektedir. Bu durumda hem akışkanın hem de mekanik sistemin (mil ve çark) dönü hareketinde zorlanmalar meydana gelecektir. Kuvvetin artması, enerji tüketiminde ya artış meydana getirecek ya da kullanılan enerjinin bir kısmı, mekanik sistemde kaybolacaktır. Bu durum ise pompa verimini düşürecektir (Şekil 1).



Şekil1. Pompalarda çark üzerine etki eden radyal kuvvetler (Gulich, 2020)

Tasarımı doğru şekilde yapılmayan bir pompa için radyal kuvvetler sonucu oluşacak sorunlar şu şekilde verilmiştir (Gulich, 2020).

- Mil yataklarında sehime bağlı olarak aşınmaların meydana gelmesi,
- Mekanik yorulma nedeniyle milin kırılması,
- Rulman aşırı yükü ve rulman hasarı,
- Aşırı yüklenme nedeniyle salmastralarda (özellikle mekanik salmastralarda) hasar oluşturacağı bilinmektedir.

Ayrıca mekanik sürtünmelerin artması sonucu, çark ve gövde arasında da mekanik olarak deformasyonlar oluşturacaktır.

Radyal kuvvetlerin meydana gelmesinde etkili parametrelerden birisi de pompa gövde yapısıdır. Pompalar genellikle (santrifüj) salyangoz ve difüzör gövdeler olarak ayrılmaktadır. Difüzörler yapısal özellikleri nedeniyle, tam yuvarlak bir yapıda olması ve etki eden radyal kuvvetin çark ve gövde içerisinde eşit bir dağılım göstermesi ile hidrolik bir dengeleme sağlanmaktadır. Fakat salyangoz gövdeli pompalar düzgün olmayan bir çark-gövde yapısına sahiptir. Bu pompa tipinde çark çevresi üzerindeki eşit olmayan basınç dağılımlarının oluşturacağı radyal kuvvetler, kısmi ve aşırı yüklenmelerde çarka doğrudan etki etmektedir (Sulzer, 1989).

Radyal kuvvetlerin giderilmesi için gerekli çalışmaların çark-gövde tasarımı ile giderilebileceği söylenmektedir. Tasarımı yapılması düşünülen pompa içinde radyal kuvvetler oluşabileceği ortaya konulmuştur. Fakat radyal kuvvetlerin giderilmesi ya da azaltılması için gövde de yapısal değişiklikler ile pompa hidrolik performans değerlerinin de önemli olduğu bilinmektedir.

Radyal kuvvetler aşağıdaki tasarım ve hidrolik önlemler ile azaltılabilir (Gulich, 2020).

- Farklı salyangoz gövde yapıları,
- Salyangoz gövde akış hacminin bölünmesi,
- Çark gövde arası radyal boşluk,
- Kanatlı salyangoz gövde kullanımı,
- Pompanın tasarım noktasında çalıştırılması.

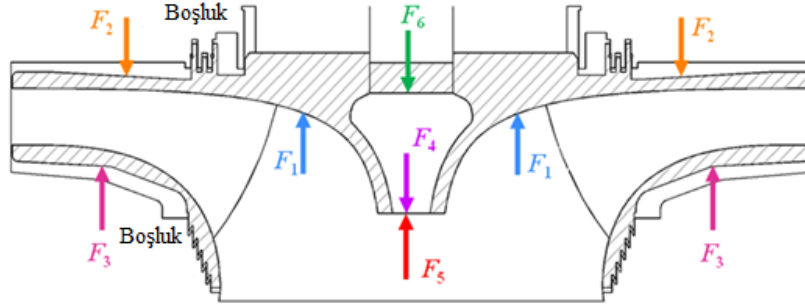
Radyal kuvvetler üzerine yukarıda belirtilen bazı radyal dengeleme yöntemleri çalışma konusu olarak tercih edilirken bazılarında ise fazla çalışmaya rastlanamamıştır.

2.2. Aksel Kuvvetler

Pompanın çalışması sırasında çark gibi rotor parçalarına etki eden büyük bir kuvvetin aksel bileşeni aksel kuvvet olarak tanımlanmaktadır (Guan, 2011). Pompa çarkının, ön ve arka kapakların akseline dik düzlemdeki izdüşüm alanları genellikle farklıdır ve akışkan basınç farkı tüm rotor parçalarının aksel kuvvet dengesizliğinin temel nedenleri olduğu bilinmektedir (Weigang vd., 2007). Aksel kuvvet, santrifüj pompanın çalışma kararlılığı üzerinde büyük etkiye sahiptir. Dengelenmemiş aksel kuvvet çarkın aksel hareketine neden olabilir. Çark, sabit yapısal parçalara kuvvetin etkisi ile sürtünmesi sonucu çark-gövde hasarlarına ya da sürtünme ile hareketin zorlanmasına bağlı olarak motorun yanmasına bile neden olabilecek çalışma durumu meydana gelebilmektedir.

Pompa içerisindeki çarkın gövde ile arasında pompa ya da çarkın yapısına göre bir boşluk olması gerekmektedir. Bu boşluk pompa genelinde aksel açıklık olarak adlandırılmaktadır (Çalışır, 1997). Çark çalışma durumunda bu boşluk sayesinde gövdeye temas etmesi engellenmektedir. Fakat akış sırasında boşluklardaki akışkan mil eksenini boyunca çark alt ve üst kapaklarına kuvvet uygulamaktadır. Pompa çarkı emiş kısmı ise bir mutlak basınç etkisi altında kalmaktadır. Şekil 2' deki gibi bu alt ve üst

kapak üzerindeki basınç kuvveti arasında kalan çark dengesiz olarak etki eden eksenel kuvvete maruz kalmaktadır. Çarkın giriş ve çıkışında oluşacak basınç farkından dolayı akışın hızına ve yönüne bağlı olarak bu iki konumdaki akış momentumu aynı olmayacaktır. Bu nedenle, çark üzerinde her zaman pompa mil eksenine yönünde hareket eden bir kuvvet oluşacaktır (Hou vd., 2021).



Şekil 2. Pompalarda çark üzerine etki eden eksenel kuvvetler (Hou vd. 2021)

Çarklarda, çark bir giriş basıncına maruz kalmaktadır. Bu basıncın etkisiyle direkt olarak çarkın mil göbeğindeki alan etkilenmektedir. Atmosfer basıncı giriş basıncından küçük ise; kuvvetin yönü çarkın arka kısmına, büyük ise çarkın emme ağzına doğru olmaktadır. Çarkın önü giriş basıncı ve çark yanakları da çıkış basıncı etkisi altında olduğundan dolayı çarka etkiyen ve dengelenmemiş kuvvetler bulunmaktadır (Baysal, 1979). Dengesiz bir eksenel kuvvet etkisiyle pompa içerisinde hidrolik ve mekanik etkiler görülmektedir. Bu durum belirli kayıplara yol açmaktadır. Hidrolik olarak pompa kaçak kayıplarının artması, mekanik olarak ise çark, gövde ve diğer parçaların bağlantı elemanlarında meydana gelecek aşınma ve deformasyonlar pompa ömrünü azaltacaktır.

Eksenel kuvvetlerin azaltılmasında da radyal kuvvetlerde olduğu gibi dengeleme yöntemleri mevcuttur. Dengeleme yöntemlerinin farklı olsa bile bazı durumlarda radyal ve eksenel kuvvetlerin dengelemelerde aynı yöntem kullanılmaktadır. Eksenel kuvvetler için dengeleme yöntemleri ise genel olarak aşağıda belirtilen maddeler ile ifade edilmektedir (Gülich, 2020; Nourbakhsh vd. 2008; Türkmen, 2020).

- Dengeleme deliği,
- Dengeleme diskisi,
- Dengeleme pistonu,
- Dengeleme kanatçıkları,
- Aşınma halkası,
- Eksenel açıklık (boşluk),
- Çift girişli ve karşı çark kullanımı.

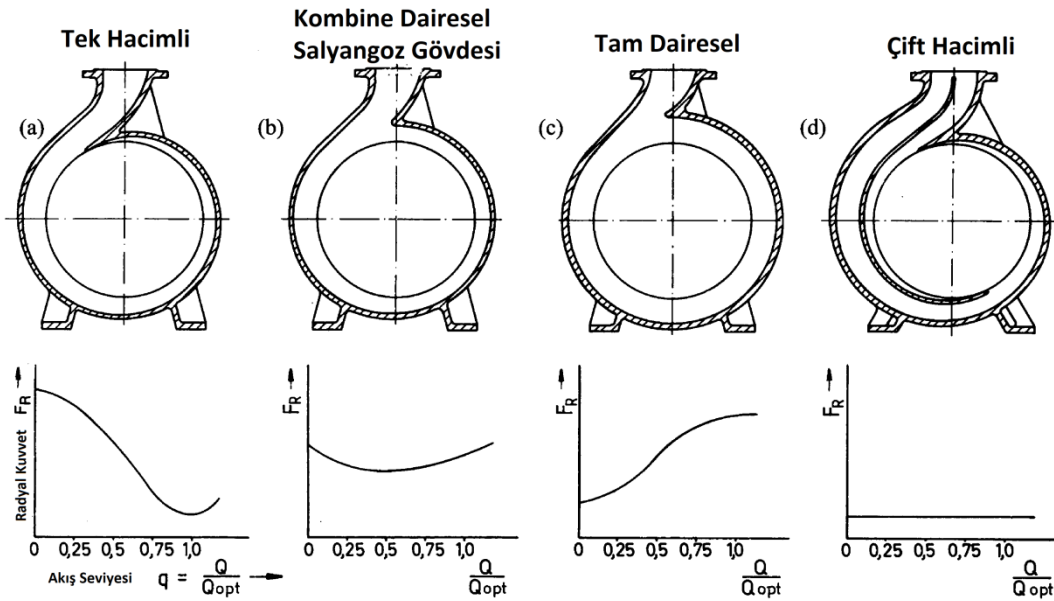
Eksenel kuvvetlerdeki büyüklükler genellikle pompanın yapısı ve hidrolik performans değerlerindeki büyüklük ile doğru orantılı olarak artmaktadır. Pompalardaki bu büyüklüklerin artışı ile pompa içerisinde oluşabilecek kayıplarında artabileceği beklenmektedir. Bu yüzden pompalarda eksenel kuvvetlerin dengelenmesi için kullanılacak yöntemlerinde pompa tasarımını etkileyebileceği ve kayıpları artırarak hidrolik performans değerlerinde azalmalar meydana getirebileceği gözardı edilmemelidir.

3. HİDROLİK KUVVETLERİN DENGELEME YÖNTEMLERİ VE YAPILAN ÇALIŞMALAR

3.1. Farklı Salyangoz Gövdeleri

Radyal kuvvetler genellikle tek gövdeli santrifüj pompalarda görülmektedir. Tek gövde ve santrifüj pompa çarkının radyal bir akışa sahip olması kuvvetin santrifüj pompalarda etkili olmasının temel nedenlerindedir. Santrifüj pompada çarka etki eden basınç dalgalanmaları ve radyal akışkan kuvvetleri, salyangozdaki basınçlar ve şaftın titreşiminin eş zamanlı olarak ölçülmesi ile aralarındaki ilişki incelenmiştir. Çeşitli difüzör kanatları, akış ve dönüş hızları için yapılan deneylerde tasarım dışı çalışma koşulları altında hem kanat basıncı dalgalanmalarının hem de kıvrımlı statik basınçların çevresel olarak düzgün olmadığı ve ikisinin güçlü bir ilişkisi olduğu belirlenmiştir (Guo ve Okamoto, 2003).

Santrifüj pompa salyangoz gövdesi çark tarafından oluşan radyal kuvvetleri azaltmak için gövdede yapısal değişiklikler yapılmıştır. Çarkın çıkış bölgesi ve etrafında dengesiz bir alan oluştuğunu bilinmektedir. Genellikle bu durumu azaltmak için hacimsel bir denge sağlama yoluna gidilmektedir. (Nourbakhsh vd., 2008). Farklı gövde ve çift gövdeli olarak imal edilen bazı pompaların çalışma şartlarında karşılaştıkları radyal kuvvetler Şekil 3' te verilmiştir.



Şekil 3. Salyangoz gövde yapılarındaki farklılıkların radyal kuvvete etkisi (Nourbakhsh vd., 2008)

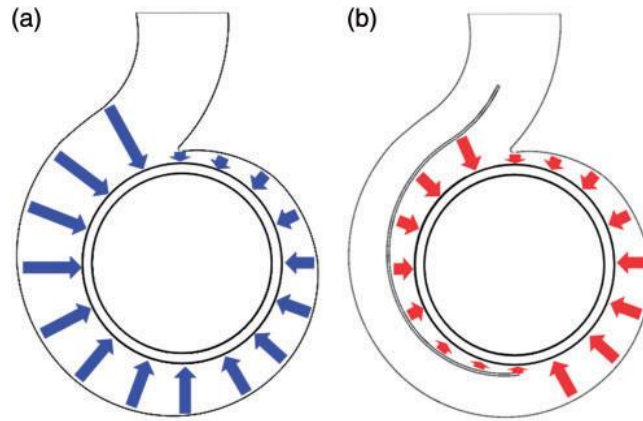
Gövde ile çark merkezlerinin aynı doğrultuda olmaması pompanın üzerindeki radyal kuvvet büyüklüklerini arttırmaktadır. Pompalara etki eden radyal kuvvetlerin genellikle bu durumda gerçekleştiği bilinmektedir. Gövde ve çarkın dairesel olması durumunda radyal kuvvetlerin azalması beklenmiştir (Agostinelli vd., 1960). Merkezkaç, yarı dairesel ve dairesel pompa gövdeleri incelenmiş, ölçülen ve hesaplanan radyal kuvvetler oranlanmıştır. Artan radyal kuvvet durumuna göre elde edilen sonuçlar ise dairesel pompa gövdesinde daha düşük, merkezkaç gövde de ise daha yüksek değerlere ulaştığı gözlenmiştir (Biheller, 1965). Gövde yapılarındaki değişikliklerin bir diğeri ise santrifüj gövdenin iki parçalı bir iç hacimden oluşmasıdır. Çift hacimli bu gövde yapısında oluşacak radyal kuvvetler diğer gövdelere göre oldukça düşük seviyede gerçekleşmektedir. Tek hacimli, dairesel ve çift hacimli gövdelerin farklı debilerin oluşturduğu radyal kuvvetlerin en düşük değerleri çift hacimli pompalarda

ölçülmüştür (Boehning vd. 2011). Başka bir çalışmada ise santrifüj, eş merkezli (dairesel) ve çift hacimli pompalar karşılaştırılmıştır. Buradaki sonuçlarda ise oluşan radyal kuvvet etkisinin santrifüj gövdede en yüksek, çift hacimli gövdede ise en düşük seviyelerde olduğu görülmüştür. Ayrıca pompaların istenilen çalışma noktasında etkiyen kuvvetlerin azaldığını vurgulanmıştır (Baun ve Flack, 2003).

3.2. Salyangoz Gövde Akış Hacminin Bölünmesi

Çark etrafındaki basınç dağılımlarını incelediğimizde homojen yapıda olduğu görülmektedir. Çark yüzeyine etki eden radyal kuvvetlerin ise büyüklüğünün basınç dağılımlarının farkı ile orantılı olarak arttığı gözlemlenmektedir. Çark etrafında homojen halde olmayan basınç, gövde içerisinde çalkantı oluşmasına neden olacaktır. Çalkantılar, kanat geçiş bölgelerinde yüksek basınç ile birlikte pompa yapısını etkileyecektir. Bu durum, titreşim ve gürültüye neden olmaktadır. Gövde ve çark arasında bulunan boşluk en düşük seviyede olduğunda, etkileşim en yüksek seviyede olmaktadır. Bu etkileşim çark kanat çıkışının şeklinden ve santrifüj pompa çıkışındaki dil yapısından dolayı da etkilenmektedir (Nourbakhsh vd., 2008).

Kuvvetlerin büyüklüğü ve hidrolik performans, pompa tasarımındaki geometrik detaylara bağlanmaktadır. Pompa geometrisi, özellikle tasarım dışında basıncın oluşturduğu problemler ile karşılaşmaktadır. Çift (bölünmüş) salyangoz tasarımı, büyük pompalar için yaygın olarak kullanılmaktadır. Hacimleri bölünmüş pompalarda çark ve shaft üzerindeki radyal kuvvetlerin tasarım dışı koşullar altında çalışmasında gerçekleşecek kuvvet büyüklüğü azaltılmış olacaktır (Şekil 4) (Khalifa vd., 2011; Shim vd., 2016).

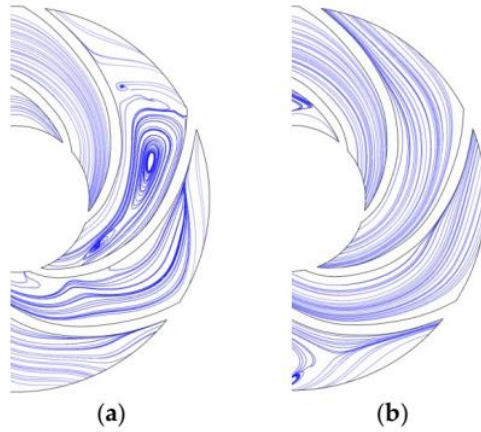


Şekil 4. Statik basınç dağılımının şematik diyagramı (a) tek hacimli; (b) çift hacimli (Shim vd., 2016)

Pompa çark ve gövde etkileşimini olumlu yönde etkileyen bir yapısal dengeleme olan çift hacmin hem çarkta hem de gövdede elde edilen radyal kuvvetlerin büyüklüğünde meydana gelecek kuvvetleri azalttığı belirlenmiştir. Yapılan çalışmada elde edilen radyal kuvvetlerin etkisinin tek ve çift hacimlerde çarka gelen kuvvetlerdeki değişimin optimum çalışma noktasında 500 N' luk bir değişime neden olduğunu tespit etmiştir. Aynı çalışmada salyangoz gövdedeki radyal kuvvetlerdeki değişimin ise çarka göre yüksek kuvvetler oluşturduğunu fakat çift hacimli gövdedeki kuvvetlerde bir azalma meydana geldiği belirtilmektedir (Zhou vd., 2022).

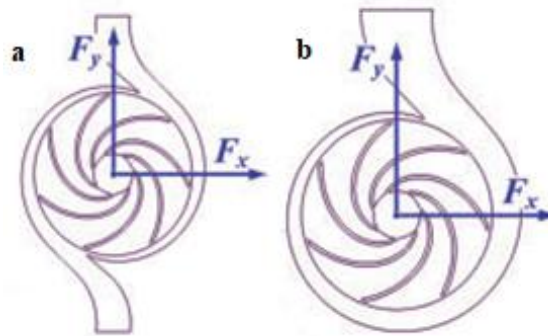
Çift gövdeli yapının radyal kuvvet dağılımını olumlu etkilediği görülmüştür. Salyangoz gövdenin çift hacim haline getirilerek pompa performansına ve kuvvetlerin dağılımı ile ilgili bulgular ortaya konmuştur. Pompa performans değerlerinin tek gövdeli salyangoz yapısında daha yüksek olduğu görülmektedir. Bunun temel nedeni ayrılan gövde içerisindeki akış alanındaki küçülmeden kaynaklandığı bilinmektedir. Fakat alanın daralmasıyla etkiyen kuvvetlerin daha düzgün olması nedeniyle hem çark hem de salyangoz gövdede oluşan radyal kuvvetlerde azalma görülmüştür (Yuan vd., 2019).

Şekil 5' de belirtildiği gibi pompalarda oluşan radyal kuvvetlerin azaltılmasının pompa çark içerisinde akış kararsızlığında azalttığını belirtmişlerdir (Yuan vd., 2019).



Şekil 5. Çark geçişlerindeki kararsız akışlar (a) tek hacimli salyangoz çarkı (b) çift hacimli salyangoz çarkı (Yuan vd. 2019).

Yaygın olarak kullanılan santrifüj pompalarda maruz kalınan radyal etkinin yapısal düzensizliği azaltmak için çift kıvrımlı salyangoz bir gövde yapısı kullanılmıştır (Şekil 6). İkiz kıvrımlar olarak adlandırılan bu gövde yapısında akış özellikleri ve gövde üzerine etki eden radyal hidrolik kuvvetler üzerinde durulmuştur. Aynı çarka sahip tek sarmallı bir salyangoz gövdeli santrifüj pompa ile çift sarmal yapıdaki salyangoz gövde tasarımı karşılaştırılmıştır (Kang ve Li, 2015).



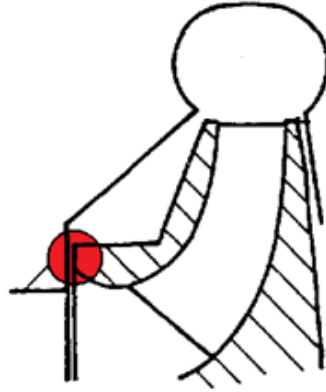
Şekil 6. Salyangoz gövdelerdeki farklı yapılar (a) ikiz kıvrımlı (b) tek kıvrımlı (Kang ve Li, 2015)

Pompanın çevresel düzgünlüğünü iyileştirmede ve büyük akış hızlarına uyum sağlamada ikiz kıvrımlı salyangoz gövde bir avantaj sağlamıştır. Her iki gövde içinde optimum çalışma noktasında elde edilen radyal kuvvetlerin ikiz kıvrımlı salyangoz gövde de daha dengeli olduğu görülmüştür. Pompalar

incelendiğinde optimum çalışma noktasında F_x ve F_y eksenlerinde ikiz kıvrımlı salyangoz gövdeli pompanın radyal kuvvet değeri eşit dağılımda ve maksimum 300 N luk bir kuvvet etkisi görülmüştür. Orjinal salyangoz gövde de ise F_y ekseninde 600 N, F_x ekseninde ise 0 N bir kuvvet ölçülmüştür (Kang ve Li, 2015).

3.3. Çark ve Gövde Arası Radyal Boşluk

Pompalarda çark ve gövde metal veya metal alaşım malzemelerden yapılmaktadır. Çarkın çalışma esnasında yüksek hızlarda dönmesi çark gövdenin arasında sürtünme oluşturabilmektedir. Sürtünmeyi engellemek için verilen bu boşluklar aynı zamanda hidrolik kuvvetlerin azaltılmasında da etkin rol oynamaktadır (Şekil 7). Fakat pompa performans parametreleri içerisinde verimi etkileyen önemli unsurlardan birisi olarak karşımıza çıkmaktadır (Guelich vd., 1987).



Radyal Boşluk

Şekil 7. Çark ve gövde arasındaki radyal boşluk (Guelich vd., 1987)

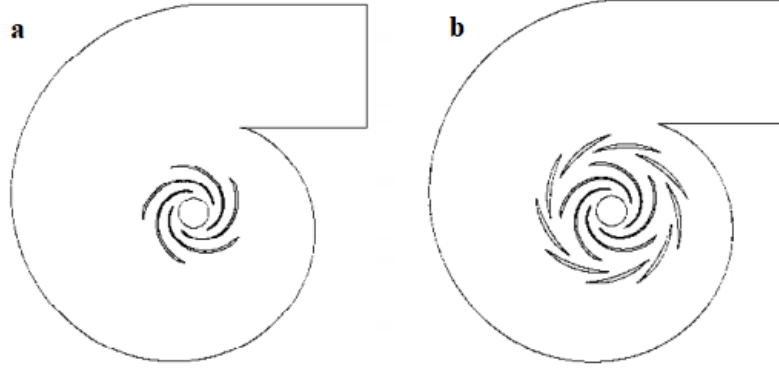
Radyal kuvvetlerin etkisi ile pompa mekanik parçalarında meydana gelecek aşınmaların önüne geçmek için çark ve gövde arasında boşluk bırakmak gerekmektedir. Ancak oluşan bu boşluklardan geçecek akışkan pompalarda kaçak debi oluşmasına neden olacaktır. Bu nedenle debideki azalmaya bağlı olarak pompa veriminde de azalma meydana gelecektir.

Pompa çark ve gövde arasındaki oluşturulacak boşluk verimi etkilese de hidrolik akışkanın boşluklara girmesi ile içerideki basınçta azalma olacaktır. 0, 1 ve 2 mm boşluk oranında deneyi yapılan bir pompanın radyal kuvvetler üzerindeki değişimi incelenmiştir. Bu değişimin artan boşluğa göre oluşan radyal kuvvetin azaldığı yönündedir. Boşlukların artması ile oluşacak kaçak debiler 0, 2.04 ve 4.42 kg s^{-1} olarak gerçekleşmiş ve bunlara karşılık gelen kuvvetler ise sırasıyla 2174.96, 1972.96 ve 1687.52 N olarak ölçülmüştür (Hao vd., 2017).

3.4. Kanatlı Salyangoz Gövde Kullanımı

Pompaların belirli yük koşullarında, çarkın gövde ile aynı merkez üzerinde olmaması farklı radyal kuvvetlerin etkisi altında kalacağını göstermektedir. Radyal kuvvetler, çark ve gövde arasındaki dengesizlikler ile pompa hareketli aksamlarda sürtünme etkisi ile yapısal deformasyonlara neden olacaktır. Bu dengesizliklerin giderilmesi için santrifüj gövdelerin çark merkezi ekseninde sabit kılavuz kanatlı bir yapı ile akışkanın radyal kuvvet etkisi azaltılmaktadır. Radyal kuvvetlerin büyüklüğü debideki yük koşullarına bağlıdır ve artan kuvvetlere göre artmaktadır. Çok küçük akışta bu kuvvetlerin durağan halde olmadığı fakat az miktarda etkiyi belirtmiştir (Hergt ve Krieger, 1969).

Şekil 8' de yapılan çalışmada kılavuz kanatlar sayesinde elde edilen değerlerin daha iyi bir hal aldığı bildirilmektedir. Çark etrafında basınç konturlarında kanatlı gövdelerdeki basıncın düzenli hale geldiği görülmüştür. Düzenli hale gelen basınç etki edecek radyal kuvvetleride azaltacağı söylenebilir (Güleren vd., 2004).

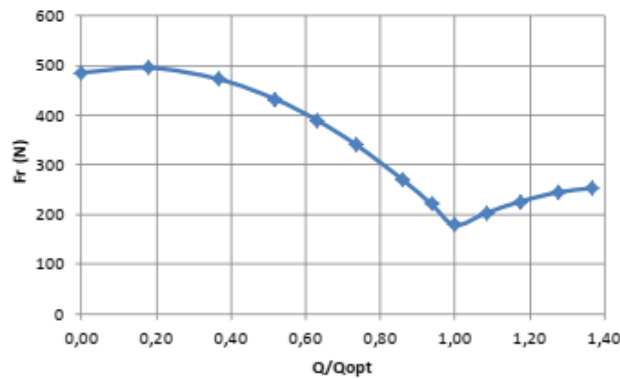


Şekil 8. Santrifüj pompalarda kanatsız (a) ve kanatlı (b) yapılar (Güleren vd., 2004).

Kanatların bazı tasarım özelliklerinden birisi de kanat çıkış açısının etkisidir. Çalışma farklı çıkış açılarında oluşacak radyal kuvvetlerin açıya bağlı olarak nasıl değişmekte olduğunu belirtmektedir. Çıkış açısının 28° ila 20° arasında değiştiğinde, pompa çarkı üzerindeki radyal kuvvetin ortalama değeri 299 N'den 156 N'ye düştüğü ve %47.8'e kadar önemli bir azalma ile sonuçlandığı görülmektedir. Radyal kuvvetin azalması akışın düzgünlüğü ile doğru orantılı olduğundan kanat çıkış açısının azalması ile radyal kuvvetlerde azalma meydana gelmiştir (Tan vd., 2015).

3.5. Pompaların Tasarım Noktasında Çalıştırılması

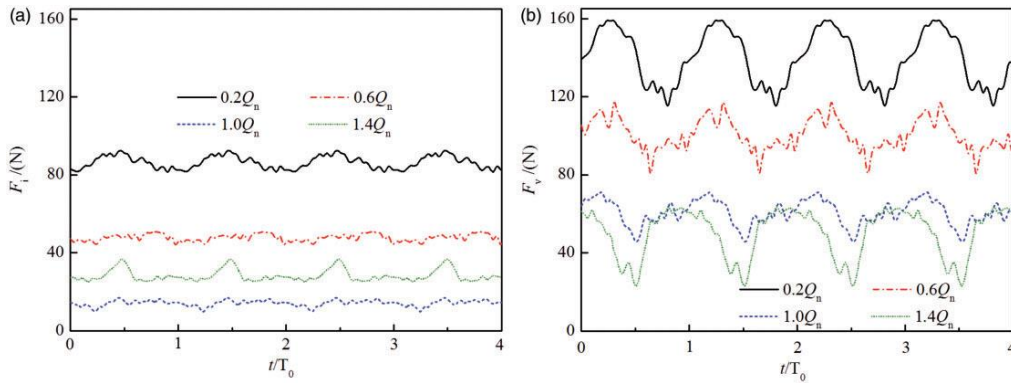
Radyal kuvvetler üzerinde debi etkin bir parametredir. Debinin değişimi, radyal kuvvetin artması ya da azalmasına neden olmaktadır (Şekil 9). Pompanın en verimli noktasındaki radyal kuvvetlerin en düşük seviyelerde olduğu gözükmemektedir. Kapalı vana konumuna yakın ya da düşük debilerde akışkan çark içerisinde kalacağından radyal kuvvet değerleri yüksek olmuştur. Fakat debinin verim noktasındaki debiyi aşması ile yine kuvvetin arttığı gözlemlenmektedir. Pompa verimi hidrolik performans ve gücün bir bileşeni olduğundan etken kuvvetlerin en az olduğu nokta (Q/Q_{opt}), maksimum verime karşılık gelmektedir (Çakır, 2013).



Şekil 9. Tek ve çift salyangoz yapısı (Çakır, 2013)

Pompalarda artan debiye bağlı olarak radyal kuvvetlerdeki değişim değerinin debinin optimum değerlerinde daha az gerçekleşirken düşük ve yüksek debili pompalarda daha fazla radyal kuvvetin etkili olacağı belirtmiştir. 0.5Q debi oranında elde edilen radyal kuvvet 2600 N iken, 1.2Q debide ise 800 N olarak bulunmuştur. Radyal kuvvetin ise minimum olduğu nokta 1.0Q tasarım debisi olarak belirlenmiştir (Chalghoum vd., 2018).

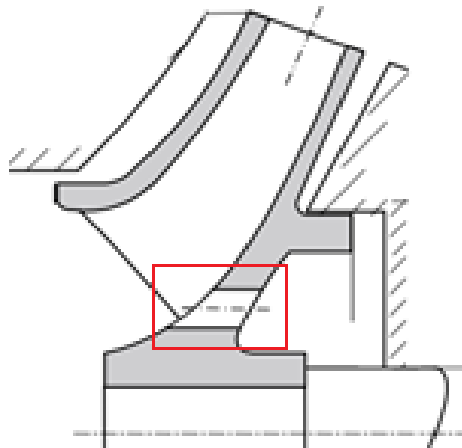
Jia ve arkadaşları (2018), çalışmalarında debinin bir parametresi olarak ortaya çıkan değişimin hem çark hem de gövdede oluşan radyal kuvvetlerin değişimini incelemiştir (Şekil 10). Tasarım debisi (optimum debi) dışında radyal kuvvetlerin artacağını saptamışlardır.



Şekil 10. Farklı akış hızında çark ve salyangoz üzerindeki radyal kuvvetlerin zamana göre değişimi
(a) çark, (b) salyangoz (Jia vd., 2018)

3.6. Dengeleme Deliği

Eksenel kuvvet için önemli bir dengeleme yönteminin dengeleme deliği olduğu bilinmektedir (Şekil 11). Pompa çark bölgesinin alt ve üst kapağında meydana gelebilecek yapısal dengesizlik ve farklı basınç noktalarının oluşması nedeniyle bu kuvvete maruz kalmaktadır. Kullanılan dengeleme deliklerinin sayısı, çapı ve konumunun önemli olduğu bilinmektedir (Gulich, 2020).



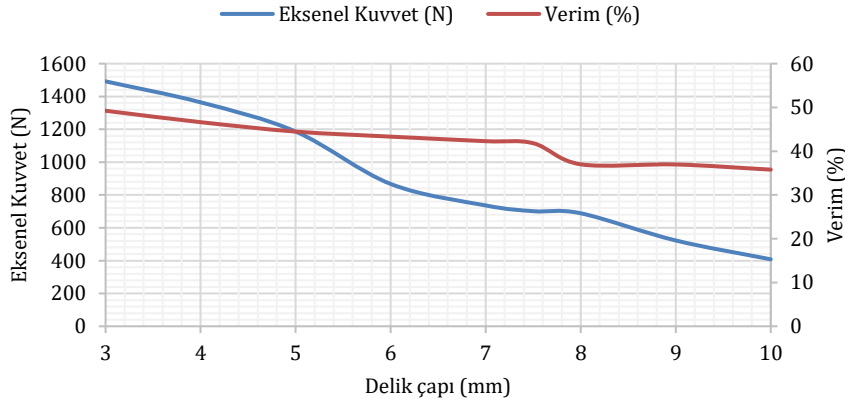
Şekil 11. Çarktaki dengeleme deliği (Gulich, 2020)

Dengeleme delikleri çark-gövde boşlukları arasında kaybolan akışın pompa çarkı içerisine açılmış delikler yardımıyla aksel dengeleme sağlamasını amaçlamaktadır. Dengeleme deliklerinin açılması ile

oluşacak aksenal kuvvetin büyüklüğünün azaltılabileceği belirtilmiştir. Ancak bu deliklerin çaplarındaki artışın ise pompa performans değerlerini düşürdüğü ve aksenal kuvveti diğer delik çaplarına göre arttırdığı gözlemlenmiştir (Cao vd., 2015).

Eksenal kuvvetlerin azaltılması için kullanılan bir dengeleme yöntemi olan dengeleme deliklerinin bazı parametreler ile uyumlu olması gerektiği bilinmektedir. Yapılan çalışmada delik çapı, delik sayısının yanı sıra deliğin çark üzerindeki konumunda etkili olduğu belirtilmektedir. Özellikle değişen delik sayısı ve çapının aksenal kuvvetin azaltılmasında büyük önem taşıdığı belirtilmiştir. Ayrıca azalan aksenal kuvvete karşılık pompa performans değerlerinde de azalmalar görülmüştür. Ancak, pompa performansındaki azalma, aksenal kuvvet kadar büyük oranda bir değişim göstermemiştir (Sefacı vd., 2022).

Şekil 12 incelendiğinde pompa çarkı üzerindeki dengeleme deliklerinin etkisi belirtilmiştir. Bu etkinin pompalardaki aksenal kuvvetleri azalttığı ancak pompa verim değerlerinde de bir düşüşe yol açtığı görülmektedir. Verimin düşmesinin nedeni açılan dengeleme deliği ile kaçak debinin artması olarak açıklanabilir (Turan, 2017).



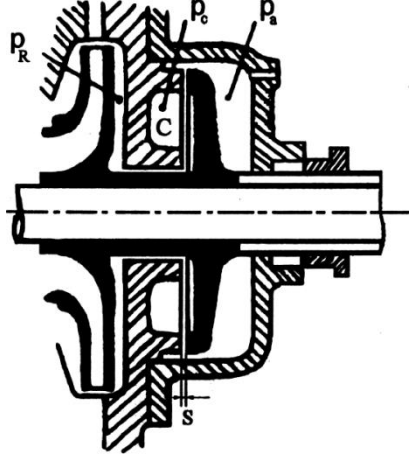
Şekil 12. Çarktaki dengeleme delik çapının aksenal kuvvet ve verime etkisi (Turan, 2017)

Dengeleme deliklerinin etkisini artırmak için dengeleme plakası ile birlikte yapılan bir çalışmada, pompalardaki aksenal kuvvetin azaltılmasına bağlı olarak pompa performanslarındaki düşüşün önlenmesi amaçlanmıştır. Dengeleme delikleri ve dengeleme plakası birlikte kullanılarak farklı bir tasarım durumunda balans deliği çapının, sızdırmazlık boşluk genişliğinin ve balans plakası boşluk genişliğinin aksenal kuvvet üzerindeki etkilerini araştırılmıştır. Çark kuvvetleri sayısal simülasyon ve deneylere dayalı olarak analiz edilerek optimize edilmiştir. Pompanın tasarım durumunda daha düşük aksenal kuvvete ve daha yüksek verimliliğe sahip olduğu ortaya konulmuştur (Zhu vd., 2020).

3.7. Dengeleme Diski

Pompalarda, aksenal kuvvete karşılık gelen itmeyi dengelemek için genellikle dengeleme diskleri kullanılmaktadır. Dengeleme diski, pompa çarkında üzerinde bulunduğu dönen mile sabitlenerek çark ve mil ile birlikte dönmektedir. Dengeleme diski başlığından veya gövdeye sabitlenmiş dengeleme kovanından küçük bir aksenal boşluk ile ayrılmaktadır. Bu boşluktan sızıntı, dengeleme odasına ve oradan da ya pompa emişine ya da pompanın emişine gelen akışkanın bulunduğu kısma akmaktadır. Dengeleme diskinin arkası, dengeleme odası geri basıncına maruz kalırken, disk yüzeyide kuvvetlerin etkisi ile belirli bir basınca maruz kalmaktadır (Karassik vd., 2001).

Denge diskinde dengelemeyi sağlamak için, dengeleme odasındaki geri basıncındaki değişiklik değerlerindeki farklılıkların büyük oranda meydana gelmesi istenmektedir. Şekil 13' deki dengeleme diski incelendiğinde, disk tamamen açıkken (S) normal disk konumunu eski haline getiren bir bileşke kuvveti vermesi için geri basıncın emme basıncından önemli ölçüde daha yüksek olması gerekmektedir. Bu diski geçen sızıntı (P_a), normalin üzerine çıktığında geri basıncı artıran kaçak dönüş hattına kısıtlayıcı bir orifis yerleştirilerek gerçekleştirilebilir. Bu düzenlemenin dezavantajı, conta odası üzerindeki basıncın değişken olmasıdır. Bu durum ise contanın ömrüne olumsuz etkileyecektir (Nourbakhsh vd., 2008).

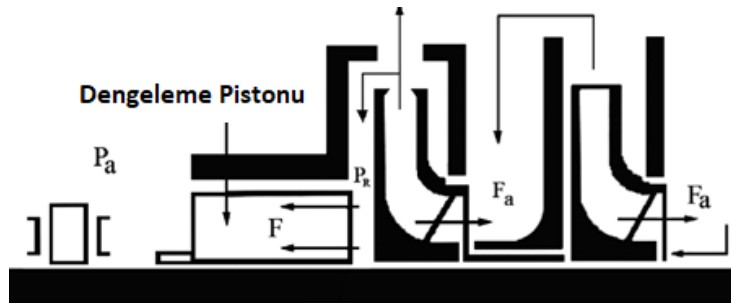


Şekil 13. Dengeleme diski (Nourbakhsh vd., 2008)

Dengeleme disklerinde sürtünmeye maruz kalabilecek parçalar arasında yer almaktadır. Bu durumda yaşanacak olumsuzlukları azaltmak için farklı disk yapıları ve iyileştirmeler yapılmaktadır. Dengeleme disklerinin yapıları, daha düşük hacimsel kayıplar ve daha uzun ömür ve dolayısıyla daha yüksek verimlilik ve dayanıklılık ile ilişkilendirilmektedir. Farklı rotodinamik sistemlerde kullanılacak olan dengeleme disklerinde de farklı uygulamalar yapılmalıdır. Bu değişiklikler üretimlerinde izin verilen toleransları da arttırmaktadır (Korczak vd., 2012).

3.8. Dengeleme Pistonu

Büyük debili pompa çarklarına etkili aksenal kuvvetlerin azaltılması için çarkların miline bağlanan dengeleme pistonu ile aksenal itmenin dengelenmesi sağlanmaktadır (Şekil 14). Dengeleme pistonu mile bağlı ve hazne içinde onunla birlikte dönmektedir. Silindirin yüzeyi ile sabit kısım arasındaki mesafe çok küçüktür. Pistonun bir tarafında son kademedeki çıkan akış P_R ' ye eşit bir basınçla hareket etmektedir. Silindirin diğer tarafında ise giriş basıncı (P_a) etki etmektedir (Nourbakhsh vd., 2008).



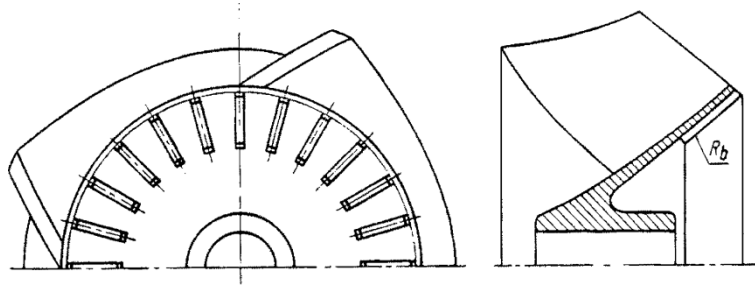
Şekil 14. Dengeleme Pistonu (Nourbakhsh vd., 2008)

Eksenel itmenin dengelemesini sağlamak için ana çarkın arka örtüsündeki kuvveti azaltmak amacıyla çark (rotor) tertibatının eksenel olarak hareket eden bir dengeleme pistonu kullanılmaktadır. Bu çalışmada, çarktaki sınır tabaka koşullarının ve açılma momentum değişiminin etkilerini dikkate alarak iç akış sistemini analiz etmek için bir hesaplama yöntemi geliştirilmiştir. Denge pistonu ile denge pistonu odasının gövde duvarındaki geçiş aralıklarının CFD ile analizi gerçekleştirilmiştir. Bu analiz değerlerinde kuvvet sonucu oluşan basınçlar gözlemlenmiştir. Dengeleme pistonu içerisinde oluşacak kuvvetlerin hesaplamalarında bu basınçlara göre hesaplamaların gerçekleştirebileceği ve iyileştirmelerin yapılabileceği belirtilmiştir (Shimura, 2012).

Dengeleme diski ve pistonu genellikle büyük debili ve kademeli pompalarda tercih edilmektedir. Kullanılan bu dengeleme sistemlerine ait çalışmalar deneyselden ziyade teorik bilgileri içerdiği görülmektedir.

3.9. Dengeleme Kanatçıkları

Dengeleme kanatçıkları, pompa çark yapısına bağlı olarak oluşturulan bir dengeleme yöntemidir. Genellikle yarı açık kanatlarda kullanılmaktadır. Yarı açık çarklarda emiş kısmındaki basıncın azaltılması eksenel dengesizliği artıracaktır. Bu nedenle istenilen dengeyi sağlamak için üst kapak üzerine (genellikle radyal) fanlar konularak dengeleme sağlanmaktadır. Kanatlar çark-gövde arasındaki basınç oluşturan akışkanın etki ettiği yüzeyleri sürekli hareketli kılarak basıncı azaltacaktır (Şekil 15) (Baysal, 1979; Nourbakhsh vd., 2008).



Şekil 15. Dengeleme kanatçıkları (Nourbakhsh vd., 2008).

Dengeleme kanatçıklarının eksenel kuvvet üzerindeki etkisi belirli bir sayı, yükseklik ve kanatçık yarıçapına göre değişmektedir. Dengeleme kanat yüksekliği ve sayısının belli bir noktadaki değere kadar eksenel kuvveti artırdığı belirlenmiştir. Ancak bu noktadan sonra kanat yüksekliği ve sayısının artışına bağlı olarak azalan bir eğilim göstermektedir. Dengeleme kanatlarının yarıçapının (R_b) değişimi ise, eksenel kuvvetleri arttırmaktadır (Godbole vd., 2012). Dengeleme kanatçıklarının gövde ile arasındaki mesafenin değişmesi eksenel kuvvetin etkisinde değiştirmektedir. Gövde ile kanat arasındaki mesafenin artması eksenel kuvveti arttırmaktadır (Wilk, 2009). Mesafedeki artışa (akışkanın geçiş alanındaki artış) bağlı olarak eksenel kuvvetteki artış kanatların etkisiz hale getirebilmektedir. Ayrıca çarka eklenecek kanat, akışkana etki edeceğinden pompa güç tüketiminde artışlara neden olacaktır.

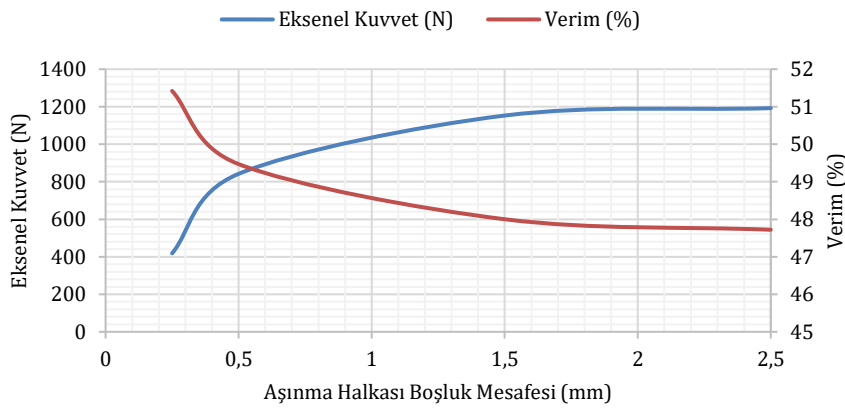
3.10. Aşınma Halkası

Pompalardaki akışkanların oluşturduğu korozif etki ve mekanik parçalarda sürtünmeye bağlı oluşacak deformasyonu azaltmak gerekmektedir. Hidrolik kuvvetler (radyal, eksenel) çark ile gövde arasındaki bölgelerde mekanik parçaların birbirlerine sürtünmesine neden olacaktır. Bunun önüne geçmek için aşınma halkalarından faydalanılmaktadır. Aşınma halkaları statik ya da dinamik mekanik

parçaların temas bölgelerinde bulunan, korozyona daha dayanıklı malzemeden üretilmiş parçalardır. Hidrolik kuvvetlerin sönümlenmesi ve deformasyonun en aza indirilmesinde aşınma halkalarının etkisinin çok fazla olduğu bilinmektedir.

Aşınma halkasının pompa verim noktasında yapılan çalışmalar, aşınma halkasının olduğu pompalarda verimi artırdığı belirtilmektedir (Gülmez, 2006). Aşınma halkasının kullanımı pompa çark-gövde arasındaki boşluk oranını düşüreceğinden kaçak debideki kayıpları azaltılarak performans değerlerinin artışı sağlanmaktadır.

Şekil 16' da pompanın belirlenen sabit bir debisinde aşınma halkasının aksel kuvvet ve verime etkisi incelenmiştir. Aşınma halkası ile çarkın arka bileziği arasındaki mesafe 0.25 mm ile 2.5 mm arasında incelenmiştir. Aralık genişledikçe akış daha fazla olmakta ve kaçak debi verimi olumsuz etkilemektedir. Sızdırma boşluğunun ise aksel yük üzerinde de etkisi önemlidir (Turan, 2017).

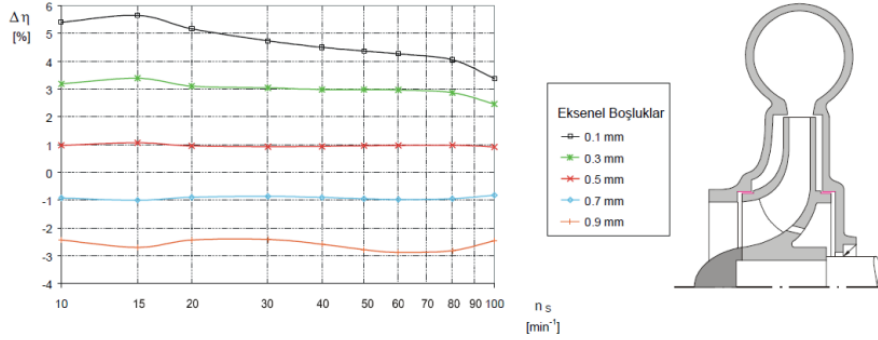


Şekil 16. Çarktaki aşınma halkasının aksel kuvvet ve verime etkisi (Turan, 2017).

3.11. Aksel Açıklık (Boşluk)

Pompa çarklarının yerleştirilmesi için mil ekseni boyunca çark-gövde arasında sınırlandırılmış bir boşluk yer almaktadır. Çark dönü hareketi yapmaya başladığında çarka mil ekseni boyunca etkiyen aksel kuvvetler neticesinde çark yukarı ve aşağı harekete maruz kalabilmektedir. Bunun sonucunda çark üst ve alt kapak gövde ile temas ederek mekanik bir sürtünme gerçekleşmektedir. Düşey doğrultudaki bu aksel boşluk belirli bir aralıkta tutularak, sürtünme riski azaltılır. Ancak bu açıklığın fazla olması ise kaçak debiyi artırarak verim kaybına neden olmaktadır (Çalışır, 1997; Jin vd. 2022).

Pompa çark-gövde arasındaki boşluk miktarının artması kuvvet etkisi nemli oranda azaltılırken verim değerlerinde de azalma görülecektir. Şekil 17 incelendiğinde aksel kuvvetleri azaltmak amacıyla yapılan aksel boşluklardaki artışın etkisi görülmektedir. Aksel boşluktaki artış verimin azalmasına neden olmuştur (Anonim, 2022).



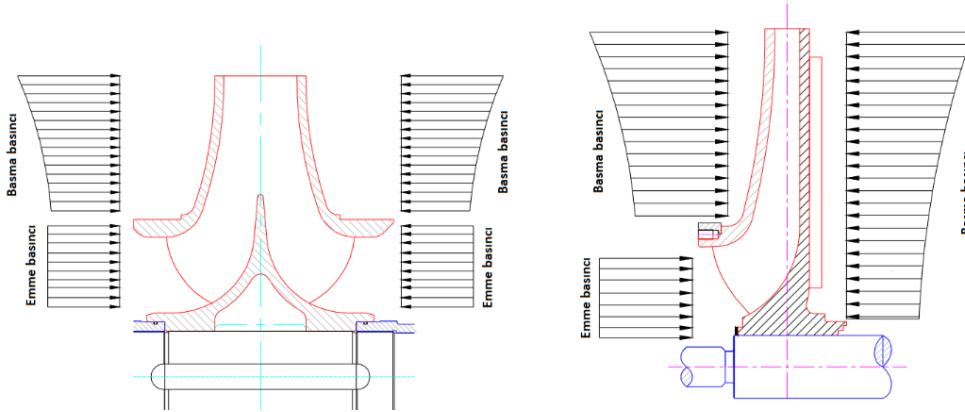
Şekil 17. Eksenel boşluğun verime etkisi (European Commision, 2001)

Eksenel açıklığın artan değerlerinde kademeli pompalarda toplam eksenel kuvvetlerin arttığı görülmüştür. 0, 0.25 ve 0.50 mm açıklık değerlerinde elde edilen kuvvetin ilk kademede oluşturduğu eksenel kuvvet değerlerinin ikinci kademe değerlerinden daha yüksek olduğu belirtilmiştir (Wang vd., 2013).

3.12. Çift Girişli ve Karşıt Çark Kullanımı

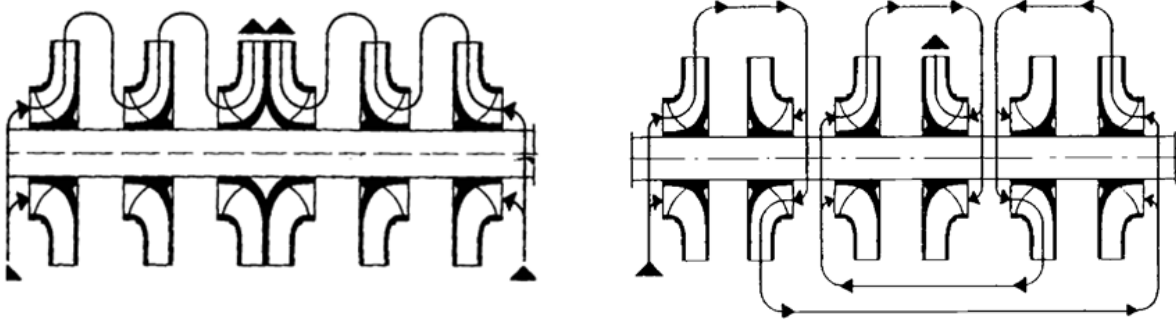
Pompa eksenel kuvvetlerini yenmek için belli bir dengeleme gereklidir. Bu dengelemeler yapısal ve hidrolik olarak farklı çeşitlerde bulunmaktadır. Teorik olarak çift girişli çarkların eksenel kuvvetinin uygun bir şekilde dengelenmesi gerekmektedir. Ancak pratikte sabit ve kararsız eksenel kuvvetler, aşağıdaki farklı durumlar sonucu dengesizlik oluşturabilir (Şekil 18) (Godbole vd., 2012; Gülich, 2020).

- (1) Çark ve salyangoz gövdedeki geometrik toleranslar;
- (2) Conta ve sızdırmazlık elemanlarındaki farklılıklar;
- (3) Her iki taraftaki dönüşe bağlı değişimler,



Şekil 18. Tek ve çift girişli uçtan emişli pompalar (Godbole vd., 2012)

Çok kademeli büyük pompa çarklarında ise eksenel düzenlemenin bir farklı dizaynı da ikişerli gruplara ayırmaktır. Her grupta çarklar, bir çarkın girişi diğerinin karşı tarafında olacak şekilde birbirinin önüne yerleştirilmiştir. Bu yöntem, ilk yönteme göre daha pahalıdır ve bazen daha karmaşık parçaların üretilmesinin zorluğu nedeniyle uygulanması daha zordur. Bununla birlikte, bu yöntem yüksek basınçlı çok kademeli pompalarda daha sık kullanılır (Şekil 19) (Nourbakhsh vd., 2008; Gulich, 2020).



Şekil 19. Çok kademeli pompalarda hidrolik düzenleme (Nourbakhsh vd., 2008)

Kapalı çarklarda aksel kuvvetler alt ve üst noktalarını etkilemektedir. Çark yüzeylerine etki eden aksel kuvvetin çarktaki üst kapak modifikasyonlarına bağlı azaldığı görülmüştür. Tam radyal bir çarkta üst kapağın çapının 57.5 mm' den 45.5 mm' ye kadar düşürülerek aradaki değerler ile pompa performans ve aksel kuvvet değerlerindeki değişim incelenmiştir. Tasarım noktalarındaki debilere göre pompa çapın azaltılmasına bağlı olarak manometrik yüksekliği, güç ve aksel kuvvetin azaldığı gözlemlenmiştir (Zhou vd., 2013).

4. SONUÇ

Bu derleme çalışmasında, pompalardaki hidrolik kuvvetler ve giderilmesi için kullanılması gereken hidrolik dengeleme yöntemlerinin nasıl olabileceği sorusunun cevabı aranmıştır. Ayrıca, bazı temel kitaplar haricinde bu kuvvetler ile ilgili derlenmiş bir bilginin bulunmamasından dolayı, çalışma ile bu konuya bir açıklık getirilmeye çalışılmıştır. Radyal ve aksel olarak incelenen hidrolik kuvvetlerin her ikisinin de pompa yapısal ve işletme özelliklerini olumsuz yönde etkilediği görülmektedir. Çalışmalarda verilerden yola çıkılarak hidrolik kuvvetlerin azaltılması için farklı dengeleme yöntemlerinin yapısal değişiklikler ve hidrolik dengelemelerin kullanıldığı saptanmıştır. Pompa hidrolik kuvvetlerinin dengelenmesi için dengeleme yöntemlerinin uygulanabilirliğinin tespiti önemlidir. Bu tespitin sağlanması kuvvetin hangi büyüklükte ve nerelerde meydana geldiğinin açıklanması ile mümkün olacaktır. Çalışmalarda görülen dengeleme yöntemlerinin bazılarında uygulamanın fazla olduğu, bazılarında ise yeterli teorik bilgilerin fazla fakat uygulamanın az olduğu tespit edilmiştir. Uygulamada genellikle yapısal ve hidrolik bir dengeleme yöntemlerinden; kanatlı salyangoz gövde, tasarım noktasında çalışma, dengeleme deliği, radyal-aksel açıklık ve aşınma halkasının kullanımının fazla olduğu görülmektedir. Bu yöntemlerin uygulamada daha çok kullanılmasının nedeni hem uygulanabilirlik kolaylığı hem de maliyetinin bahsedilen diğer dengeleme yöntemlerine göre az olması ile açıklanmaktadır. Ancak bu durumdan uygulamada çok tercih edilmeyen diğer yöntemlerin etkili olmadığı anlamı da çıkarılmamalıdır. Yüksek kuvvetlerde ya da büyük debi gerektiren yerlerde kullanılan pompalarda diğer yöntemlerin daha etkili olabileceğide unutulmamalıdır.

BİLGİLENDİRME

Bu makalenin özeti, 07-09 Eylül 2022 tarihleri arasında Bilecik' de gerçekleştirilmiş olan 34. Ulusal Tarımsal Mekanizasyon ve Enerji Kongresinin Özet ve Bildiri Kitabı'nda yayınlanmıştır.

KAYNAKLAR

Agostinelli, A., Nobles, D., ve Mockridge, C. R. (1960). An Experimental Investigation of Radial Thrust in Centrifugal Pumps. *J. Eng. Power*, 82(2): 120-125.

- European Commission, (2001). Study on improving the energy efficiency of pumps, 42-43.
- Baun, D. O., ve Flack, R. D. (2003). Effects of Volute Design and Number of Impeller Blades on Lateral Impeller Forces and Hydraulic Performance. *International Journal of Rotating Machinery*, 9(2), 145-152. <https://doi.org/10.1155/S1023621X03000137>
- Baysal, K. (1979). *Tam santrifüj pompalar: hesap, çizim ve konstrüksiyon özellikleri*. İstanbul Teknik Üniversitesi.
- Biheller, H. J. (1965). Radial force on the impeller of centrifugal pumps with volute, semivolute, and fully concentric casings.
- Boehning, F., Timms, D. L., Amaral, F., Oliveira, L., Graefe, R., Hsu, P. L., Schmitz-Rode, T., ve Steinseifer, U. (2011). Evaluation of hydraulic radial forces on the impeller by the volute in a centrifugal rotary blood pump. *Artificial Organs*, 35(8), 818-825. <https://doi.org/10.1111/j.1525-1594.2011.01312.x>
- Cao, W. D., Dai, X., ve Hu, Q. X. (2015). Effect of impeller reflux balance holes on pressure and axial force of centrifugal pump. *Journal of Central South University*, 22(5), 1695-1706. <https://doi.org/10.1007/s11771-015-2688-2>
- Chalghoum, I., Elaoud, S., Kanfoudi, H., ve Akrouf, M. (2018). The effects of the rotor-stator interaction on unsteady pressure pulsation and radial force in a centrifugal pump. *Journal of Hydrodynamics*, 30(4), 672-681. <https://doi.org/10.1007/s42241-018-0073-y>
- Çakır, E. (2013). *Santrifüj Pompa Performansının ve Hidrolik Kuvvetlerinin Belirlenmesi* (Yüksek Lisans tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Çalışır, S., ve Konak, M. (1997). Düşey milli derin kuyu pompasında eksenel açıklığın pompa karakteristiklerine etkisi. 17. *Ulusal Tarımsal Mekanizasyon Kongresi*, 779-789.
- Godbole, V., Patil, R., ve Gavade, S. S. (2012). Axial thrust in centrifugal pumps—experimental analysis. In *15th International Conference on Experimental Mechanics, Porto/Portugal* (pp. 22-27).
- Guan, X. (2011). Modern pumps theory and design. *China Astronaut. Beijing China*, 35, 265-266.
- Guelich, J., Jud, W., ve Hughes, S. F. (1987). Review of parameters influencing hydraulic forces on centrifugal impellers. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Power and Process Engineering*, 201(3), 163-174. <https://doi.org/10.1243/PIME PROC 1987 201 021 02>
- Guo, S., ve Okamoto, H. (2003). An experimental study on the fluid forces induced by rotor-stator interaction in a centrifugal pump. *International Journal of Rotating Machinery*, 9(2), 135-144. <https://doi.org/10.1155/S1023621X03000125>
- Güleren, K. M., Gürlek, C., ve Pınarbaşı, A. (2004). Santrifüj Pompanın Kanatlı Ve Kanatsız Difüzöründeki Akışın Sayısal İncelenmesi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 10(3), 389-394.
- Gulich, J. F. (2020). *Centrifugal pumps* (Vol. 4). Berlin: Springer.
- Gülmez, E. (2006). *Pompalarda yüzey pürüzlülüğünün ve kaçakların performans üzerindeki etkilerinin incelenmesi* (Yüksek Lisans Tezi, Bursa Uludağ Üniversitesi).
- Hao, Y., Tan, L., Liu, Y., Xu, Y., Zhang, J., ve Zhu, B. (2017). Energy Performance and Radial Force of A Mixed-Flow Pump With Symmetrical and Unsymmetrical Tip Clearances. *Energies*, 10(1), 57. <https://doi.org/10.3390/en10010057>

- Hergt, P., ve Krieger, P. (1969, September). Paper 10: radial forces in centrifugal pumps with guide vanes. In *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Conference Proceedings* (Vol. 184, No. 14, pp. 101-107). Sage UK: London, England: SAGE Publications. https://doi.org/10.1243/PIME_CONF_1969_184_428_02
- Hou, X., Cheng, Y., Yang, Z., Liu, K., Zhang, X., ve Liu, D. (2021). Influence of Clearance Flow on Dynamic Hydraulic Forces of Pump-Turbine During Runaway Transient Process. *Energies*, 14(10), 2830. <https://doi.org/10.3390/en14102830>
- Igor Karassik, J. (2001). *Pump Handbook*. 3th.
- Jia, X. Q., Zhu, Z. C., Yu, X. L., ve Zhang, Y. L. (2018). Internal unsteady flow characteristics of centrifugal pump based on entropy generation rate and vibration energy. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, 233(3), 456-473. <https://doi.org/10.1177/0954408918765289>
- Jin, F., Tao, R., ve Xiao, R. (2022). Study on Axial Clearance Size and Leakage of Canned Motor Pump under Axial Force Self-Balance State. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 2160, No. 1, p. 012082). IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2160/1/012082>
- Kang, C., ve Li, Y. (2015). The effect of twin volutes on the flow and radial hydraulic force production in a submersible centrifugal pump. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, 229(2), 221-237. <https://doi.org/10.1177/0957650914562920>
- Khalifa, A. E., Al-Qutub, A. M., ve Ben-Mansour, R. (2011). Study of Pressure Fluctuations and Induced Vibration at Blade-Passing Frequencies of A Double Volute Pump. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 36(7), 1333-1345. <https://doi.org/10.1007/s13369-011-0119-8>
- Korczak, A., Martsynkovskyy, V., Peczkis, G., ve Zahorulko, A. (2012). Diagnosis of The Phenomenon of Flow As An Inspiration to Inventions in The Domain of Constructing Hydraulic Machines. *Procedia Engineering*, 39, 286-302. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.07.035>
- Nourbakhsh, A., Jaumotte, A., Hirsch, C., ve Parizi, H. B. (2008). *Turbopumps and pumping systems*. Springer Science & Business Media.
- Özgür, C. (1964). *Su makinaları dersleri*. İstanbul Teknik Üniversitesi: Teknik Okulu Yayınları.
- Sefacı, S., Babayiğit, O., ve Koçak, S. (2022). Deneysel Tasarım Yöntemleri ile Bir Santrifüj Pompa Çarkında Dengeleme Deliği Tasarım Optimizasyonu. *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 11(2), 436-449. <https://doi.org/10.17798/bitlisfen.1017804>
- Shim, H. S., Afzal, A., Kim, K. Y., ve Jeong, H. S. (2016). Three-objective optimization of a centrifugal pump with double volute to minimize radial thrust at off-design conditions. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, 230(6), 598-615. <https://doi.org/10.1177/0957650916656544>
- Shimura, T., Kawasaki, S., Uchiumi, M., Kimura, T., ve Matsui, J. (2012). Internal Flow and Axial Thrust Balancing of A Rocket Pump. *Journal of fluids engineering*, 134(4). <https://doi.org/10.1115/1.4006470>
- Sulzer (1989). *Centrifugal Pump Handbook*, Elsevier Applied Science, London.

- Tan, M., Guo, B., Liu, H., Wu, X., ve Wang, K. (2015). Investigation of Radial Force and Hydraulic Performance in A Centrifugal Pump With Different Guide Vane Outlet Angle. *Journal of Vibroengineering*, 17(6), 3247-3260.
- Turan, M. (2017). *Uçtan emişli santrifüj pompada eksenel yükü etkileyen parametrelerin had yöntemi ile incelenmesi* (Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi).
- Türkmen, A. (2020). *Radyal pompalarda eksenel yükün belirlenmesi ve dengelenmesi* (Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi).
- Wang, C., Shi, W., ve Zhang, L. (2013). Calculation Formula Optimization and Effect of Ring Clearance on Axial Force of Multistage Pump. *Mathematical Problems in Engineering*, 2013. <https://doi.org/10.1155/2013/749375>
- Weigang, L., Jinfeng, Z., ve Shouqi, Y. (2007). Now method to axial thrust self-balance for centrifugal pump impeller. *China mechanical engineering*, 18(17), 2037-2040.
- Wilk, A. (2009). Laboratory investigations and theoretical analysis of axial thrust problem in high rotational speed pumps. *WSEAS Trans. Fluid Mech.*, 4(1), 1-13.
- Yalçın, K. (1998). *Hacimsel ve Santrifuj Pompalar*. Çağlayan Kitabevi, İstanbul.
- Yuan, Y., Yuan, S., ve Tang, L. (2019). Numerical investigation on the mechanism of double-volute balancing radial hydraulic force on the centrifugal pump. *Processes*, 7(10), 689. <https://doi.org/10.3390/pr7100689>
- Zhou, L., Shi, W., Li, W., ve Agarwal, R. (2013). Numerical and experimental study of axial force and hydraulic performance in a deep-well centrifugal pump with different impeller rear shroud radius. *Journal of Fluids Engineering*, 135(10). <https://doi.org/10.1115/1.4024894>
- Zhou, R., Yang, J., Liu, H. L., ve Dong, L. (2022). Effect of Volute Geometry on Radial Force Characteristics of Centrifugal Pump during Startup. *Journal of Applied Fluid Mechanics*, 15(1), 25-36. <https://doi.org/10.47176/jafm.15.01.32828>
- Zhu, D., Xiao, R., Yao, Z., Yang, W., ve Liu, W. (2020). Optimization design for reducing the axial force of a vaned mixed-flow pump. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 14(1), 882-896. <https://doi.org/10.1080/19942060.2020.1749933>

EXTENDED ABSTRACT

Introduction and Research Questions & Purpose

Pumps create speed and pressure while transferring the fluid. The pressure increase in the impeller that performs the rotation movement in the pump produces hydraulic forces and momentums. These hydraulic forces occurring in the pumps are divided into two as radial and axial forces. The axial and radial forces acting on the impeller are important for proper sizing of shafts and bearings. While the radial force is determined by the environmental pressure distribution where the impeller fluid exits, the axial force is expressed as the pressure arising on the flows passing through the gaps between the impeller and the body. In this study, a compilation study was conducted by investigating the theoretical and practical situations of what hydraulic forces are and what needs to be done for their balancing.

Methodology

It is a general compilation method used in the study. It has been determined what the balancing methods are required to eliminate the pump hydraulic forces. The theoretical information of these balancing methods has been given and the practical application studies have been examined.

Results and Conclusions

Hydraulic forces are undesirable for the pump. In this compilation study, the answer to the question of the hydraulic forces in the pumps and how the work to be done to eliminate them was sought. In addition, since there is no compiled information about these forces except for some fundamental books, this study has tried to clarify this issue. It is seen that both radial and axial hydraulic forces affect the structural and operating properties of the pump negatively. Based on the obtained studies and the data in these studies, it has been determined that different balancing methods are used to reduce the hydraulic forces. It has been seen that the necessary approaches to eliminate or reduce the hydraulic forces are made with structural and hydraulic balancing systems. It has been determined that there are many studies focused on some balancing methods, while some methods are not taken into account at all.. In this case, it is concluded that some balancing systems may be difficult to implement, while others can be easily applied in studies.

Yazarların Biyografisi



Mehmet KURT

Selçuk Üniversitesi, Cihanbeyli Meslek Yüksekokulu, Tarımsal İşletmecilik Programında öğretim görevlisidir. Bulunduğu birimde halen görevine devam etmektedir. Uzmanlık alanı tarım makineleri, sulama makinaları, hidrolik-pnömatik ve sulama sistemleridir.

İletişim
ORCID Adresi

mehmet.kurt@selcuk.edu.tr
<https://orcid.org/0000-0002-9566-6627>



Kazım ÇARMAN

Selçuk Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarım Makineleri ve Teknolojileri Mühendisliği Bölümü öğretim üyesidir. Bulunduğu birimde halen görevine devam etmektedir. Uzmanlık alanı tarım makinelerinin tasarımı, koruyucu toprak işleme uygulamaları, tarımda yapay zeka teknikleri.

İletişim
ORCID Adresi

kcarman@selcuk.edu.tr
<https://orcid.org/0000-0002-9860-7403>