



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



Döngüsel kompresörlerde teknolojik gelişmeler

Technological developments in rotary compressors

Yazar(lar) (Author(s)): Duygu GÜRKAN KOCATAŞ¹, Melih OKUR², İhsan KORKUT³

ORCID¹: 0000-0002-2917-3330

ORCID²: 0000-0002-6017-1050

ORCID³: 0000-0002-5001-4449

To cite to this article: Kocataş Gürkan D., Okur M. ve Korkut İ., “Döngüsel kompresörlerde teknolojik gelişmeler”, *Journal of Polytechnic*, 26(1): 425-436, (2023).

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz: Kocataş Gürkan D., Okur M. ve Korkut İ., “Döngüsel kompresörlerde teknolojik gelişmeler”, *Politeknik Dergisi*, 26(1): 425-436, (2023).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.1003699

Döngüsel Kompresörlerde Teknolojik Gelişmeler

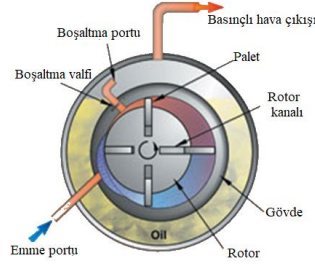
Technological Developments in Rotary Compressors

Önemli noktalar (Highlights)

- ❖ Soğutma/Refrigeration
- ❖ Döngüsel kompresörler/Rotary compressors
- ❖ Derleme/Review

Grafik Özet (Graphical Abstract)

Bu çalışmada, döngüsel kompresörler üzerine yapılan iyileştirme ve geliştirme çalışmaları derlenmiştir.



Şekil. Döngüsel kompresör /Figure. Rotary compressor

Amaç (Aim)

Bu çalışmada, döngüsel kompresörlerin kullanım alanlarına göre teknolojik gelişmelerini, avantaj ve dezavantajlarını incelemek ve değerlendirmek hedeflenmiştir. / In this study, it was aimed to examine and evaluate the technological developments, advantages and disadvantages of rotary compressors according to their usage areas.

Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

Bu çalışmada, döngüsel kompresörler üzerine yapılan çalışmalar, alanlarına göre sınıflandırılmış; avantaj ve dezavantajları belirlenmiştir. / In this study, studies on rotary compressors are classified according to their fields; advantages and disadvantages were determined.

Özgünlük (Originality)

Literatür incelendiğinde diğer kompresör türlerinde derleme çalışmaları olmasına rağmen döner kompresörler için daha önce böyle bir çalışmanın yapılmadığı gözlemlenmiştir. / When the literature is examined, it has been observed that although there are compilation studies on other compressor types, such a study has not been done for rotary compressors before.

Bulgular (Findings)

Döngüsel kompresörler üzerine yapılan çalışmaların daha çok yağlama, enjeksiyon şekli, sürtünme ve kaçak kaybı üzerine odaklandığı; akış analizi ve termal analiz üzerine daha az çalışmanın yapıldığı belirlenmiştir. / Studies on rotary compressors mostly focus on lubrication, injection type, friction and leakage loss; It has been determined that less work has been done on flow analysis and thermal analysis.

Sonuç (Conclusion)

Döngüsel kompresörlerde yeterli düzeyde yağlamanın sağlanması, sürtünme ve kaçak kayıplarının azaltılması, soğutucu enjeksiyonunun uygun bir şekilde yapılması ile kompresör performansında önemli ölçüde artış sağlanacağı belirlenmiştir. / It has been determined that a significant increase in compressor performance will be achieved by providing sufficient lubrication, reducing friction and leakage losses, and proper refrigerant injection in rotary compressors.

Etik Standartların Beyanı (Declaration of Ethical Standards)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler. / The author(s) of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

Döngüsel Kompresörlerde Teknolojik Gelişmeler

Derleme Makalesi / Review Article

Duygu GÜRKAN KOCATAŞ^{1*}, Melih OKUR², İhsan KORKUT¹

¹ Teknoloji Fakültesi İmalat Mühendisliği Bölümü, Gazi Üniversitesi, Türkiye

² Teknoloji Fakültesi Otomotiv Mühendisliği Bölümü, Gazi Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 01.10.2021 ; Kabul/Accepted : 09.01.2022 ; Erken Görünüm/Early View : 28.01.2022)

ÖZ

Enerjinin verimli bir şekilde kullanılması, su ve gıda sorunlarından sonra çözümlenmesi gereken en önemli konulardan birisidir. 2020 yılında Türkiye’de yaklaşık 290 milyar kilowatt saat elektrik tüketimi gerçekleşmiştir. Endüstride elektrik tüketiminin yaklaşık olarak %10’u sıkıştırılmış havanın üretimi için kullanılmaktadır. Bu sebeple sıkıştırılmış hava eldesinde kullanılan kompresörlerin performansının artırılması endüstri ve ülkemiz açısından büyük önem taşımaktadır. Bu çalışmada, son zamanlarda buzdolabı ve klimalarda yaygın olarak kullanılan döngüsel kompresörlerin verimini arttırmaya yönelik çalışmalar konu başlıkları altında derlenmiş ve incelenmiştir. Ayrıca döngüsel kompresörlerin avantaj, dezavantaj ve teknolojik olarak gelişimleri de değerlendirilmiş olup, literatüre katkı sağlanması amaçlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Soğutma, döngüsel kompresörler, derleme.

Technological Developments in Rotary Compressors

ABSTRACT

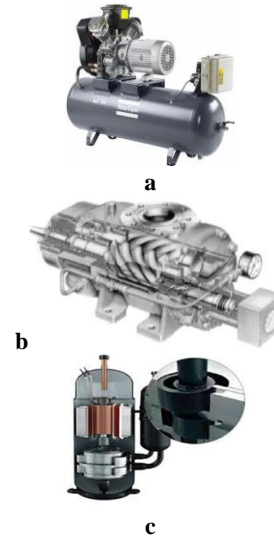
The efficient use of energy is one of the most important issues to be solved after water and food problems. In 2020, approximately 290 billion kilowatt-hours of electricity was consumed in Turkey. About 10% of the electricity consumption in industry is used for the production of compressed air. Therefore, increasing the performance of compressors used in the production of compressed air is of great importance for the industry and our country. In this study, studies aimed at increasing the efficiency of rotary compressors, which are widely used in refrigerators and air conditioners, have been compiled and examined under the titles. In addition, advantages, disadvantages and technological developments of rotary compressors were evaluated and it was aimed to contribute to the literature.

Keywords: Refrigeration, rotary compressors, review.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Dünya nüfusunun artışı ve teknolojinin gelişmesi ile birlikte özellikle gelişmekte olan ülkelerde enerjiye duyulan ihtiyaç ve enerji tüketimi her geçen gün dramatik bir şekilde artmaktadır [1-4]. Birçok endüstriyel tesiste basınçlı hava sistemleri, elektrik enerji tüketiminde 3. sırada yer almaktadır. Çin’de basınçlı hava talebi endüstriyel elektrik enerjisi tüketiminin % 9,4’ünü; Amerika ve Avrupa’da ise % 10’unu oluşturmaktadır [5-6]. Endüstriler geliştikçe enerji kıtlığı ve küresel çevre sorunları, araştırmacıları enerji tasarrufu için yeni teknolojiler geliştirmeye yönlendirmektedir. Isıtma, havalandırma ve iklimlendirme gibi sistemlerde daha yüksek kapasite ihtiyaçları, termal verimlilik ve azaltılmış güç kullanımı açısından sürekli iyileştirme gerektirmektedir [7]. Basınçlı hava sistemlerinin en önemli bileşeni olan kompresörlerde, pazarın 2026 yılına kadar 104,3 Milyar dolara ulaşması beklenmektedir [8].

Endüstride pistonlu, vidalı ve döngüsel kompresör tipleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Şekil 1’de endüstride en çok kullanılan kompresörler görülmektedir [9-11].



Şekil 1. Endüstride yaygın olarak kullanılan kompresörler a. Pistonlu kompresör b. Vidalı kompresör c. Döngüsel kompresörler (Compressors widely used in industry a. Reciprocating compressor b.Screw compressor c. Rotary compressor) [9-11]

Bu kompresörlerin birbirine göre birçok avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır. Çizelge 1’de endüstride yaygın olarak kullanılan kompresörlerin avantajları görülmektedir

*Sorumlu Yazar Duygu GÜRKAN KOCATAŞ
e-posta : duyugurkan@gazi.edu.tr

Çizelge 1. Kompresör çeşitlerinin birbirine göre üstünlükleri (Advantages of compressor types over each other)

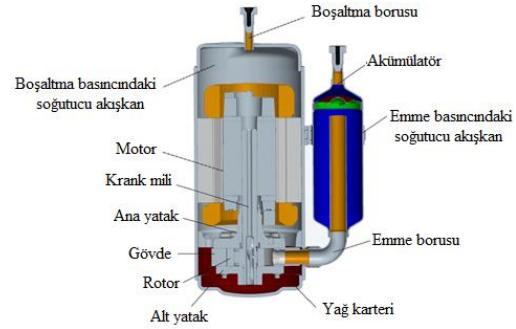
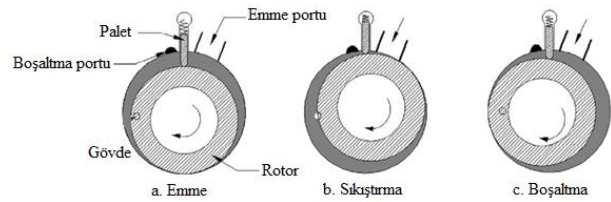
	Pistonlu Kompresörler	Vidalı Kompresörler	Döngüsel Kompresörler
Yüksek Emme Basma Kabiliyeti	■	■	■
İmalat ve bakım kolaylığı			■
Düşük maliyet	■		■
Düşük titreşim ve gürültü		■	■
Az parça sayısı			■
Yüksek basınç eldesi	■	■	

Çizelge 1 incelendiğinde, pistonlu kompresörlerin parça sayısının fazlalığı nedeni ile titreşim ve gürültüye sebebiyet verdiği, ayrıca imalat ve bakımının zor olduğu görülmektedir. Vidalı kompresörlerde ise imalat ve bakım zorluğunun yanı sıra maliyetinin de fazla oluşu da göze çarpmaktadır. Düşük maliyet ve hafiflik avantajı, yüksek performansla birlikte değerlendirildiğinde, döngüsel kompresörlerin kullanımı, düşük kapasite gerektiren soğutma sistemlerinde pistonlu ve vidalı kompresörlere göre giderek daha yaygın hale gelmektedir [12-14]. Bu avantajları ile birlikte endüstri daha çok döngüsel kompresörlere yönelmiş ve 2014 yılında Çin'de 100 milyondan fazla döngüsel kompresör üretilmiştir [15]. Ancak bahsedilen avantajlarının yanında döngüsel kompresörlerin sızdırmazlık, kaçak, atalet, düşük kompresyon basıncı gibi dezavantajları bulunmakta ve döngüsel kompresörleri geliştirmek için çalışmalar devam etmektedir. Literatürde kompresörler üzerine yapılan çalışmalar incelendiğinde genellikle sızdırmazlık, sürtünmeler ve verimliliklerinin artırılması gibi belli konularda araştırma ve geliştirme üzerine odaklandığı, ancak genel anlamda kompresörler hakkında literatür araştırma makalelerinin çok yapılmadığı gözlemlenmiştir.

Bu çalışmada bir derleme makalesi olarak, özellikle döngüsel kompresörler alanında yapılan çalışmalar konularına göre sınıflandırılmış, döngüsel kompresörlerin kullanım alanına göre avantaj ve dezavantajları tartışılmıştır.

2. DÖNGÜSEL KOMPRESÖRLERİN ÇALIŞMA PRENSİBİ (WORKING PRINCIPLE OF ROTARY COMPRESSORS)

Döngüsel kompresörler temel olarak gövde, rotor, palet ve eksantrik milinden oluşmaktadır. Paletin bir ucu rotora yaylı olarak temas etmektedir veya menteşeli olarak direkt bağlanmıştır. Paletin ters tarafı ise gövde içerisine yerleştirilmiş palet boşluğunda hareket etmektedir. Rotorun ya da eksantrik milin dönme hareketi ile; süpürme hacimleri değişmekte ve çalışma akışkanı emme, basma ve boşaltma işlemlerini yapmaktadır [16,17]. Şekil 2'de soğutma sistemlerinde kullanılan döngüsel kompresörün parçaları, Şekil 3'te ise döngüsel kompresörün genel çalışma prensibi görülmektedir [18].

**Şekil 2.** Döngüsel kompresörün parçaları (Parts of rotary compressor) [18]**Şekil 3.** Döngüsel kompresörün genel çalışma prensibi (General working principle of rotary compressor) [19]

Şekil 2 incelendiğinde döngüsel kompresörlerin diğer kompresörlere göre (Şekil 1) daha az parça sayısına sahip olduğu görülmektedir. Döngüsel kompresörlerin çalışma hacmi genel olarak gövde rotor ve palet arasında sınırlandırılmıştır. Şekil 3'te görüldüğü gibi kompresör, bir taraftan emme işlemi yaparken, döngüsel olarak diğer taraftan da basma işlemini gerçekleştirmektedir.

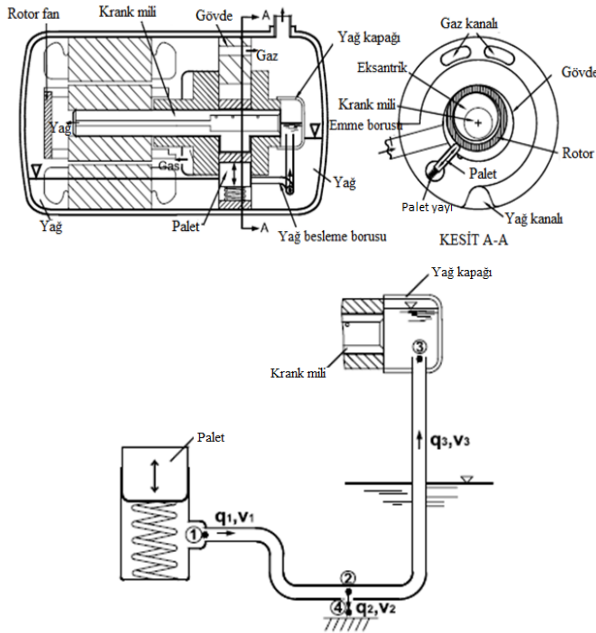
3. DÖNGÜSEL KOMPRESÖRLER ÜZERİNE YAPILAN ÇALIŞMALAR (STUDIES ON ROTARY COMPRESSORS)

Döngüsel kompresörler; düşük gürültü seviyesi, az titreşim, düşük maliyet ve parça sayılarının az olması gibi avantajlara sahiptir. Ancak bunun yanında düşük sıkıştırma basıncı, palet yüzeyinde oluşan sürtünme ve kayıplar, atalet gibi problemleri de bulunmaktadır. Bu problemlerin üstesinden gelebilmek amacıyla birçok çalışma yapılmıştır. Çalışmalar genellikle, sürtünme kayıpları ve kaçaklar ile soğutucu akışkan enjeksiyon tekniği üzerine yoğunlaşmıştır. Bu bölümde yapılan çalışmalar, konularına göre ayrı ayrı başlıklar halinde toplanmış ve değerlendirilmiştir.

3.1. Döngüsel Kompresörlerde Yağlama İle İlgili Çalışmalar (Studies on Lubrication in Rotary Compressors)

Döngüsel kompresörlerin yağ besleme sisteminin rasyonel olarak tasarlanması sadece kompresör güvenliğini arttırmakla kalmamakta, aynı zamanda enerji tasarrufu da sağlamaktadır. Uygun yağlama yağı, yataklar üzerinde yağ filmi oluşmasını sağlamakta, sürtünme kayıplarını ve yatak aşınmasını azaltmaktadır. Yetersiz yağlama, yağlama sıcaklığının artmasına, viskozitesinin düşmesine yatak ve şaft aşınmalarına sebep olarak kompresör performansını düşürmektedir. Aşırı yağlama ise, yağ boşaltma oranını büyük ölçüde arttırmakta bu da klima sistemindeki kondenser ve evaporatörün verimini düşürmektedir. Verimli bir yağlamanın enerji tüketiminde %7'ye varan bir azalma sağlayacağı belirlenmiştir [20]. Döngüsel kompresörün yağ besleme sistemi, birçok tasarım parametresi içerdiğinden oldukça karmaşıktır [21]. Bu nedenle yağın ilerleme hızını ve süresini ölçmek [22-23], yağ besleme sistemini basitleştirmek ve kompresör verimliliğini arttırmak [24-28] üzerine çalışmalar yapılmıştır.

Yeni bir yağ pompalama mekanizması modeli için teorik ve deneysel sonuçlar karşılaştırılmış; yağ pompalama oranı için %0,5-%1 hata oranları ile iyi bir uyum elde edilmiştir. Şekil 4'te yağ pompa sistemi ile birlikte döngüsel kompresör gösterilmiştir [29-30].



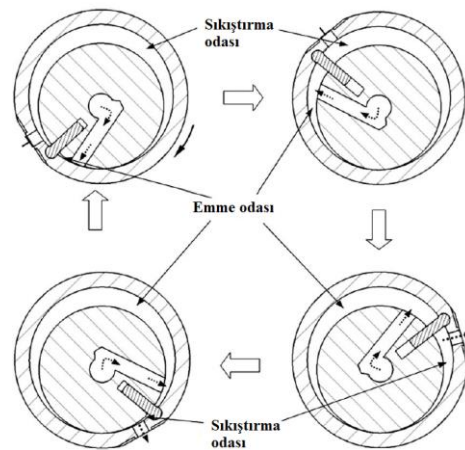
Şekil 4. Yatay döngüsel kompresör ve ilgili yağ pompa sistemi (Horizontal rotary compressor and associated oil pump system) [29-30]

Döngüsel kompresörler için, çeşitli yağlama elemanlarına yağ beslemesi analitik olarak incelendiğinde ana yatağa, alt mıyılı yataklarına ve eksantrik yatağa sırasıyla % 39,5, % 49,9 ve % 12,5 yağ beslemesi olduğu gözlemlenmiştir [31]. Yağ besleme hızının, yağ seviyesi yüksekliği, yağ viskozitesi ve dönme hızındaki artışla arttığı belirtilmiştir. Ayrıca, bir

yağ karıştırıcı yardımı ile yağ besleme hızının %80 artırılabilirliği saptanmıştır [32-33]. Döngüsel kompresörlerde uygun şekilde yapılan yağlamanın kompresör performansına olumlu etki sağladığı açıktır.

3.2. Döngüsel Kompresörlerde Sürtünme (Triboloji) İle İlgili Çalışmalar (Studies on Friction in Rotary Compressors)

Döngüsel kompresörlerde sürtünme en çok palet ve palet yuvası arasında meydana gelmekte ve oluşan sürtünmeler, mekanik verimin düşmesine sebep olmaktadır. Kompresöre verilen enerjinin %10-15'i mekanik sürtünme olarak kaybolmaktadır [34]. Bianchi ve arkadaşları, kayar paletli döngüsel kompresörlerde sürtünme gücünün azaltılmasıyla % 6'ya kadar enerji tasarrufu elde edilebileceğini belirlemişlerdir [35]. Bu nedenle, sürtünmenin en fazla meydana geldiği parça olan paletin tribolojik özelliklerini, palet-palet yuvası arasındaki sürtünmeyi incelemek için birçok çalışma yapılmıştır [36-41]. Sürtünmeyi azaltmak için palet üzerine farklı kaplamaların yapıldığı bir çalışmada, WCrC kaplamanın iyi tribolojik özellikler sağladığı ve sürtünmeyi azalttığı, TiN kaplamanın ise %50'ye yakın daha iyi aşınma direnci sağladığı gözlemlenmiştir [36-37]. Önerilen yeni bir döngüsel kompresör prototipinde kayar paletteki sürtünme gücü kaybı yaklaşık % 53,8 oranında azaltılmıştır [42]. Geleneksel döngüsel kompresörlerde, gövde sabit tutularak rotor döndürülmektedir. Rotor yerine paletle gövdenin döndürüldüğü döngüsel kompresör modellerinde sürtünmenin %18-%41 aralığında azaldığı görülmüştür. Ayrıca döngüsel paletli kompresörde döngüsel rotorlu kompresörde görülen uç yüzey sürtünmesinin oluşmadığı gövde rotor arası yüzey sürtünme kaybının, döner rotor döngüsel kompresöre göre % 95 daha düşük olduğunu belirlenmiştir [43-45]. Şekil 5'te döngüsel paletli kompresörün çalışma prensibi görülmektedir [44].



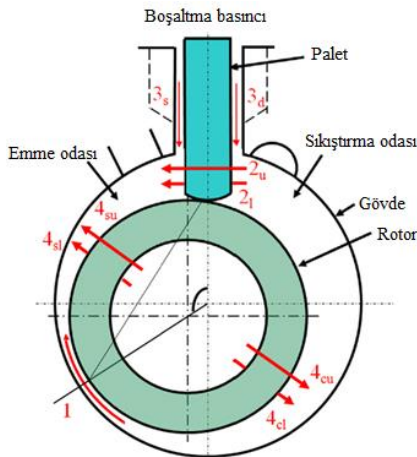
Şekil 5. Döngüsel paletli kompresörün çalışma prensibi (Working principle of rotary compressors) [44]

Dönen bir gövdeye sahip yeni bir kayar paletli döngüsel kompresör ile geleneksel kompresör karşılaştırıldığında, kayar palet uçlarındaki ve rotor ile gövde arasındaki

sürtünme kaybının sırasıyla % 0,25 ve % 10,23'e düşürülebileceği gözlemlenmiştir [46]. Bazı araştırmacılar sürtünmeyi parça boyut ve şekil değişimi ile ilişkilendirmişlerdir. Yeu ve Ooi salınlı kompresörde gövde boyutunu küçültmek amacıyla yeni bir U palet tipi döngüsel kompresörün matematiksel modellemesini ve prototipini yapmışlardır. Simülasyon sonucu en büyük sürtünme kaybı olan palet kenar sürtünmesinin, toplam sürtünme kaybının %35'ini oluşturduğunu göstermiştir [47]. Başka bir çalışmada, palet kalınlığındaki 2,5 kat azalma ile sürtünmenin %6; 5 kat azalma ile %10 azaldığı belirlenmiştir [48]. Ayrıca, döngüsel kompresörlerde aşınma oranını tahmin etmek için geliştirilen bir yöntem ile aşınma oranı geleneksel ömür testlerinden yaklaşık 65 kat daha hızlı öğrenilebilmektedir [49].

3.3. Döngüsel Kompresörlerde Kaçak Kaybı İle İlgili Çalışmalar (Studies on Leakage Loss in Rotary Compressors)

Döngüsel kompresörlerde dahili sızıntılar, toplam soğutucu akışkan kütlesinin önemli bir yüzdesini oluşturmaktadır. Meydana gelen sızıntı ve kaçak kayıpları kompresörün hacimsel verimini ve sıkıştırma performansını olumsuz yönde etkilemektedir [50-51]. Örneğin sızıntı parametresi 0,6 olan bir kompresör, mekanik verimde yaklaşık % 20 azalmaya sebep olmaktadır [52]. İç sızıntıların, çalışma odasını oluşturan parçalar arası boşlukları azaltarak en az düzeye indirilebileceği düşünülmektedir [53]. Bu nedenle, özellikle yağlayıcı içermeyen kompresörlerde dahili sızıntıları ölçme ve modelleme araştırmacıların ilgi odağı olmuştur [54-58]. Şekil 6'da döngüsel kompresördeki kaçak meydana gelebilecek olan bölümler kırmızı ile gösterilmiştir [18].



Şekil 6. Döngüsel kompresörde kaçak kaybı oluşan bölümler (Sections with leakage loss in rotary compressor) [18]

Geleneksel döngüsel kompresörde, rotorun radyal açıklığında(1), kanatçıktaki (2u, 2l) aksel boşluklarda, kanat emiş tarafındaki (3s) boşluklarda ve rotor ve emme odası arası aksel boşluklarda (4su, 4sl) sızıntı olabileceği gözlemlenmiştir. Kaçak kütle akış oranını azaltmak için yapılan yeni bir tasarım ile sızıntı

kayıplarının hacimsel verimlilik üzerindeki etkisi yaklaşık % 2-9 azaltılmıştır [18]. Döngüsel makara tipi kompresörün sızıntı modellemesinin yapıldığı bir çalışmada, kompresörün hacimsel verimi, deşarj sıcaklığı ve shaft gücü sırasıyla % 3,13 ortalama mutlak hata, 16,5 K ve 13,2 W ortalama sapma aralığında tahmin edilmiştir [59]. Döngüsel paletli tip kompresörde (RV) rotor ve gövde arasındaki kaçak kaybının döngüsel rotorlu kompresöre kıyasla % 40 daha az olduğu saptanmıştır [60]. Döngüsel kompresörlerde kullanılan akışkanın da kaçak kaybı üzerinde etkili olduğu belirlenmiştir. R410A'nın R22'den %43; R290'dan %19 daha fazla kaçığa neden olduğu gözlemlenmiştir [61].

3.4. Döngüsel Kompresörlerin Termodinamik Olarak Açıklanması ve Bileşenler Arası Isı Transferinin İncelenmesi (Thermodynamic Explanation of Rotary Compressors and Investigation of Heat Transfer Between Components)

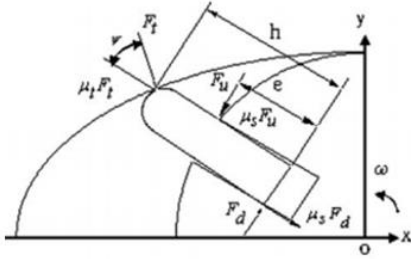
Güç tüketimi için katı enerji düzenlemelerinin uygulanması, kompresör üreticilerini yeni tasarımlar yapmaya zorlamaktadır. Yeni tasarımlar için anahtar, sistemdeki çeşitli geometrinin, bileşenler arası boşlukların, malzeme özelliklerinin ve sıcaklığın etkisini analiz etmektir. Bileşenler arasındaki ısı transferlerinin doğru anlaşılması, tasarımcının güvenilir ve enerji seviyesi yüksek bir kompresör geliştirmesini sağlayacaktır [62]. Kompresörlerde sıcaklık dağılımı ve ısı transferi hakkında bilgi sahibi olmak, boyut ve ağırlığı azaltma, verimi artırma, malzeme seçiminde sağlanacak optimizasyon ve üretimde maliyet gibi avantajları da beraberinde getirmektedir. Bu sebeple, döngüsel kompresörlerde akışkan sıcaklığı, termal analiz ve ısı transferi üzerine çalışmalar yapılmıştır [63-65]. Döngüsel kompresörler için adyabatik sıkıştırma üzerine oluşturulan yeni teoriler ile kompresörlerin, yapı olarak daha basit, boyut olarak daha küçük ve daha sorunsuz çalışacak şekilde tasarlanabileceği belirlenmiştir [66-67]. Klasik "pV gösterimi" yerine daha ayrıntılı bir denklem elde edilen çalışmada, izentropik verimlilik açısından, yeni denklem kullanılarak hesaplanan değerler ile deneysel sonuçlar arasında %12,5 fark bulunmuştur [68]. Döner paletli tip döngüsel kompresör tasarımı için ısı transferi üzerine yapılan teorik bir çalışmada, tahmin edilen ve ölçülen basınç-açılı ilişkileri arasında % 2'den daha az bir fark elde edilmiştir. Diğer çalışmalardaki maksimum farklar % 5,2'den % 1,8'e düşürülmüştür. Ölçülen ve teorik sonuçlar sıkıştırma işleminin adyabatik olmadığını açıkça göstermiştir [69]. Yeni bir üç gövdeli iki aşamalı döngüsel kompresörde değişken hacim oranından faydalanılmış ve performans katsayısı (COP) değerinin tek aşamalı ve iki aşamalı sistemlerden sırasıyla % 18,4 ±% 22,3 ve % 6,6-7,3 daha yüksek olduğu görülmüştür [70].

Sıkıştırma mekanizması dışındaki yüksek sıcaklık koşullarından sıkıştırma haznesine olan ısı transfer sırasında oluşan ısı kaybı sıkıştırma verimliliği üzerinde çok etkilidir. Yapılan çalışma, döngüsel rotor tipi döngüsel kompresörlerin sıkıştırma verimliliğinin % 93,1'e ulaşabileceğini göstermiştir [71]. Lin ve

arkadaşları, sıvı yavaşlatma koşulları sırasında gövdedeki ani basınç artışı tahmin etmek için yeni bir model önermiş, iki fazlı sıkıştırma özelliklerini incelemişlerdir. Simülasyon ve deneysel sonuçlardaki basınç değişimi, düşük devirde birebir aynı iken, yüksek devirde (3960 rpm) %1,6 fark olduğu görülmüştür [72].

3.5. Döngüsel Kompresörlerde Kapasite ve Mekanik Güç İle İlgili Çalışmalar (Studies on Capacity and Mechanical Power in Rotary Compressors)

Kullanımı gün geçtikçe yaygınlaşan döngüsel kompresörlerde mekanik verim artışı güç tüketiminde büyük oranda azalma sağlayacaktır. Döngüsel bir kompresörde emme hacmi, rotor çapı ve gövde iç çapı gibi ana boyutlara göre belirlenir. Emme hacmi ve kapasitenin artırılması için bu ana parçaların optimum boyutlarını belirlemek gerekmektedir [73]. Yapılan kompresör tasarım parametreleri optimizasyonlarının, kompresör verimliliğinde %2-%28 artış sağlayabileceği gözlemlenmiştir [74-75]. Şekil 7’de mekanik verimlilik optimizasyonu için paletle etkileyen kuvvetler ve çözüm denklemleri gösterilmiştir [75].



Şekil 7. Paletle etkileyen temas kuvvetleri (Contact forces acting on the vane) [75]

Şekil 7 ve Eşitlik 1-4’te yer alan denklemler incelendiğinde mekanik verim optimizasyonunun sıkıştırma için harcanan güç (W_c) ile palet ve palet yuvası arasındaki sürtünmeden kaynaklı olarak kaybolan güce (W_f) bağlı olduğu görülmektedir [75]. Döngüsel kompresörün ampirik modellerinin oluşturulduğu çalışmalarda, mekanik güç verilerinin % 95’ten fazlası ± 5 hata aralığı ile; soğutma kapasitesi %5,5 hata payı ile tahmin edilmiştir [76-77]. Park, simülasyon modelini geliştirdiği döngüsel kompresörün hacimsel verimliliğinin çalışma frekansı ile doğru orantılı olarak arttığını, mekanik verimin ise, krank milinin açılma hızı ile ters orantılı olduğunu göstermiştir. Soğutma kapasitesi açısından simülasyon ve deneysel çalışma arasında %25, güç girişi açısından %5 hata bulunmaktadır [78].

$$P_c = P_i \left(\frac{V_i}{V_c} \right)^n \quad (1)$$

$$W_f = \int \mu_s (F_d + F_u) ds_s + \int \mu_t F_t ds_t \quad (2)$$

$$W_c = \int_{V_i}^{V_o} P_c dV = \frac{P_i V_i}{n-1} \left[\left(\frac{P_o}{P_i} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right] + \frac{n P_o V_o}{n-1} \left[1 - \left(\frac{P_o}{P_i} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right] \quad (3)$$

$$\eta = \frac{W_c}{W_c + W_f} \quad (4)$$

Çalışma hacmi olarak gövdenin iç alanının kullanıldığı yeni bir döner rotor tipi döngüsel kompresörün, geleneksel döngüsel kompresöre kıyasla % 31-38 oranında daha fazla soğutma kapasitesi sağladığı saptanmıştır [79].

Döngüsel kompresör çeşitlerinin mekanik verimliliği kendi içinde de farklılık göstermektedir. Artan tahliye basıncı ile salınım tipi döngüsel kompresörün mekanik verimliliğinin döner rotor tipi döngüsel kompresörden %1’lik daha az bir düşüş sergilediği gözlemlenmiştir [80]. Döner palet tipi döngüsel kompresör için yapılan teorik modellemelerde mekanik tork ve güç %10’un altında hata payı ile elde edilmiştir. Ayrıca dönen bir tahliye valfinin geleneksel valfe kıyasla kompresör performansını da artırılabilir olduğu gözlemlenmiştir [81-83].

Yazarlar, mekanik verimde kademe sayısının da önemli olduğunu belirtmişlerdir. İki kademeli sıkıştırma sisteminin tek kademeli sisteme göre soğutma kapasitesi, COP değeri [84] ve mekanik verimlilik için sırasıyla % 5 -% 15, % 10 -% 15 ve %4 [85-86] iyileşme sağladığı gözlemlenmiştir.

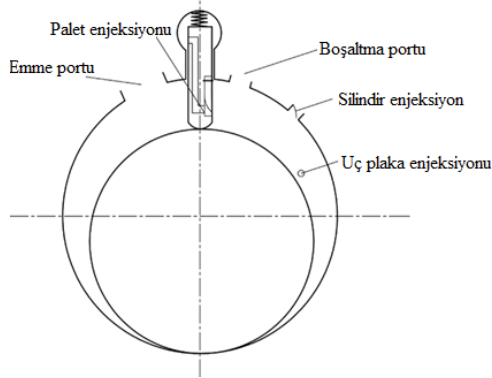
3.6. Döngüsel Kompresörlerde Balans ve Dinamik Analiz ile İlgili Çalışmalar (Studies on Balance and Dynamic Analysis in Rotary Compressors)

Döngüsel kompresörlerde, rotora büyük dinamik yükler etki eder. Eksantrik dönme parçalarından kaynaklanan dengesiz kuvvetler, emme ve sıkıştırma gazları arasındaki basınç farkından kaynaklanan gaz kuvvetleridir [87]. Kompresör, eksantrik mil ve yataklar üzerine etkileyen dinamik yükler, bir süre sonra sistem elemanlarında yorulmaya ve sistemin ömrünü tahmin edilenden daha önce tamamlamasına sebep olacaktır. Büyük dinamik yüklerin etkisi altında kalan yatak yağı filmlerinde yatak sertliği ve sönümlenme katsayılarındaki değişimleri inceleyen bir çalışmada, dinamik yüklerin ve yağ tabakasının doğrusal olmamasının rotor hareketini ciddi şekilde etkilediği gözlemlenmiştir [88]. Sistem üzerine etkileyen yüklerin doğru analizi, malzeme ve boyut seçimini de etkileyecektir. Bu nedenle sistemin ve sistem elemanlarının dinamik davranışının doğru şekilde analiz edilmesi gerekmektedir ve bu konuda çalışmalar devam etmektedir [89-93]. Zhang ve arkadaşları, eksantrik milinin tek ve çift gövdeli döngüsel kompresörlerdeki dengesiz kütleleri ve kompresörün dinamik davranışını analiz etmek için sayısal bir yöntem oluşturmuş, krank mili üzerine etkileyen kuvvetleri ve muylu yataklarının aşınmasını azaltmak için optimum tasarım koşulunun, dinamik dengenin % 80 oranında sağlanması olduğunu belirlemişlerdir [94].

Döngüsel kompresörün balans problemi ile ilgili yapılan bir çalışmada, gövde basıncının balans için önemsiz bir rol oynadığını belirtmiş, ancak yüksek basınçlarda yataklanmanın dikkate alınması gerektiğini ortaya koymuşlardır. 210°'lik açı değişimi ile basıncın %6 oranında arttığını gözlemlemişlerdir [95].

3.7. Döngüsel Kompresörlerde Soğutucu Akışkan Enjeksiyon Şekli İle İlgili Çalışmalar (Studies on Refrigerant Injection in Rotary Compressors)

Döngüsel kompresörlerde soğutucu akışkan enjeksiyonunun şekli, enjeksiyon portunun boyutu ve enjeksiyonda yaşanan problemler kompresör performansını belirlemede önemli rol oynamaktadır [96-97]. Soğutucu akışkan enjeksiyon türleri, enjekte edilen soğutucunun faz durumuna göre buhar enjeksiyonu, sıvı enjeksiyonu ve iki fazlı enjeksiyon olmak üzere üçe ayrılmaktadır [98-100]. Buhar enjeksiyonlu ısı pompası ve optimum enjeksiyon kalitesine sahip iki fazlı enjeksiyonlu ısı pompası, sıvı enjeksiyonlu ve enjeksiyonsuz ısı pompalarına kıyasla daha yüksek ısıtma kapasitesi ve performans sağlamaktadır [101-102]. Döngüsel rotorlu kompresörlerde buhar enjeksiyonu; silindir enjeksiyonu (cylinder injection), bıçak enjeksiyonu (blade injection) ve uç plaka enjeksiyonu (end-plate injection) olmak üzere üç kategoriye ayrılmaktadır [103]. Şekil 8'de buhar enjeksiyon türleri görülmektedir.

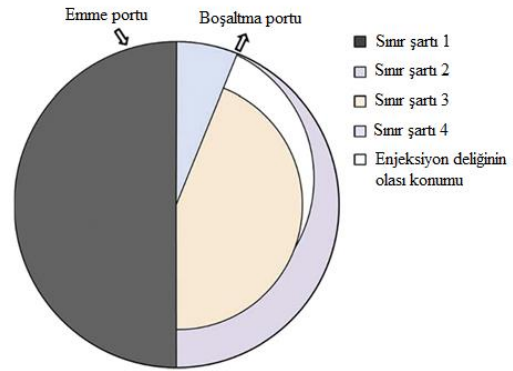


Şekil 8. Buhar enjeksiyon türleri (Steam injection types) [99]

Wang ve arkadaşları, buhar enjeksiyonlu döngüsel kompresörün performansını deneysel olarak test etmiş ve buhar enjeksiyonu olmayan normal kompresöre kıyasla ısıtma kapasitesinin ve performans katsayısının sırasıyla %16,2–31,6 ve %5,1–12,0 arttığını belirlemişlerdir. Ayrıca yeni tasarım kompresörün hava kaynaklı bir ısı pompasının ısıtma kapasitesini ve performans katsayısını (COP) sırasıyla %23,1–28,2 ve %4,5–8,1 arttırabileceğini öngörmüşlerdir [105-105]. Başka bir çalışmada, silindir enjeksiyonlu tek gövdeli, silindir enjeksiyonlu çift gövdeli ve palet enjeksiyonlu döngüsel kompresörlerin performansını karşılaştırmışlardır. Silindir enjeksiyonlu klimayla karşılaştırıldığında, palet enjeksiyon yapısının, klimanın ısıtma kapasitesini % 12,5–15,7 ve COP'yi % 1,5–4,1 arttıracığını

belirlemişlerdir. Ancak, palet enjeksiyonlu döngüsel kompresörün sistem ısıtma kapasitesinin, tüm çalışma koşullarında iki gövdeli döngüsel kompresöründen %4,7 daha az olduğu görülmüştür [106]. Ayrıca, kompresördeki eksantrikliğin doğru ölçüde değiştirilmesi ile enjeksiyon alanında %40-%70 aralığında artış sağlanabileceğini gözlemlemişlerdir [102].

Enjeksiyon portunun kompresör performansı üzerine etkisinin araştırıldığı bir çalışmada, kullanılan bir enjeksiyon portunun performans katsayısını % 12, ikinci bir portun ise başlangıç durumuna göre % 16 arttıracağı öngörülmüştür [103]. Jeon ve arkadaşları, kompresör enjeksiyon alanının boyutunun kompresör performansına etkisini araştırmışlardır. Şekil 9'da döngüsel kompresöre ait optimize edilmiş enjeksiyon alanı gösterilmiştir [107].



Şekil 9. Enjeksiyon alanının yeri ve boyutu (Location and size of the injection area) [107]

Optimize edilmiş kompresörün soğutma kapasitesi, geleneksel kompresöre göre % 10,5 arttırılmıştır [107]. Enjeksiyon işleminde geri akışı önlemek amacıyla etkili enjeksiyon alanlarını bir analitik geometri yöntemine dayanarak geliştiren uç plaka enjeksiyonlu bir çalışmada, sonuçlar, yeni modelin kompresör performansını %12,1-28,3 ve performans katsayısını %1,6-3,6 aralığında arttırdığını göstermektedir [99]. Yine geri akış dezavantajının üstesinden gelmek amacıyla enjekte edilen soğutucu gazın yaklaşık % 23,3-29,3'ünün emme borusuna geri akmasını önleyen bıçak enjeksiyonlu başka bir tasarım yapılmıştır. Geleneksel enjeksiyon yapısı ile kıyaslandığında yeni yapının, hacimsel verimliliği % 1.8-2.7, kütle akış oranını % 26.6-% 57.2 ısıtma kapasitesini % 23.1-48.9 ve COP'yi % 3.2-8 arttıracağı öngörülmüştür [108].

Ko ve arkadaşları, geleneksel bir ısı pompasında performans düşüşünü önlemenin bir yolu olarak, inverter tahrikli iki aşamalı bir döngüsel kompresör ve buhar enjeksiyonu döngüsüne sahip bir ısı pompası araştırmışlardır. Yeni sistemin ısıtma kapasitesini % 48 ve COP'yi % 36 arttırdığını gözlemlemişlerdir [109].

3.8. Döngüsel Kompresörlerde Başlatma Sıcaklığı İle İlgili Çalışmalar (Studies on Starting Temperature in Rotary Compressors)

Bir kompresörün başlatılması, kompresörün soğutucu kütlesinin, torkunun ve dönme hızının değiştiği karmaşık bir geçiş sürecidir. Bu nedenle, bir kompresörün başlangıç süreci, sistemin güvenilirliği ve verimliliği üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Lin ve arkadaşları, R290 ısı pompasına ait döngüsel kompresörün soğuk ve sıcak başlatma özelliklerini, düşük ortam sıcaklığı ısıtma koşulu altında deneysel olarak araştırmışlardır. Sonuçlar, soğuk bir başlatma sırasındaki minimum emme gösterge basıncının (-48 kPa), sıcak başlatma sırasındakinden (155 kPa) %70 daha düşük olduğunu belirtmiştir [110]. Ayrıca ölçümler, başlama süresinin R410A ve R22 sistemlerinden çok daha uzun olduğunu göstermiştir [111]. Başka bir çalışmada ise uyarı başlangıcı sırasındaki minimum emme basıncının, soğuk çalıştırmanınkinden %63 daha yüksek olduğunu belirlemiştir. Sıcak başlatmada asgari gövde ve emme borusu sıcaklıkları (22.9 C ve 8.2 C), soğuk çalıştırmanınkinden sırası ile %26, %76 daha yüksek olmaktadır. Sıcak başlatma sırasında gövdede daha az sıvı bulunduğundan maksimum basınç değeri (1,7 MPa) soğuk çalıştırma sürecinden (2,21 MPa) %23 daha düşük olarak elde edilmektedir [112].

3.9. Döngüsel Kompresörlerde Akış Analizi İle İlgili Çalışmalar (Studies on Flow Analysis in Rotary Compressors)

Literatür incelendiğinde döngüsel kompresörlerde akış üzerine çok fazla çalışma yapılmadığı gözlemlenmiştir. Bu alanda Lee ve arkadaşları, döngüsel kompresörün akümülatörü içindeki akış yapısını deneysel olarak incelemiş, kompresörün fazına göre değişen periyodik titreşimli akış özelliklerini doğrulamışlardır [113]. Döngüsel kompresörler için geliştirilen ve Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD) hesaplamalarına izin veren bir algoritmanın test edilmesi için, döngüsel paletli kompresörün Ansys Fluent ve Ansys CFX ile simülasyonları yapılmıştır. Fluent ve CFX ile elde edilen hesaplamalar, oluşturulan algoritmanın, iyi bir kalite ve topolojiye sahip olduğunu doğrulamıştır [114-115].

4. ÇALIŞMALARIN DEĞERLENDİRİLMESİ VE SONUÇLAR (EVALUATION THE STUDIES AND RESULTS)

Döngüsel kompresörler; az parça sayısına sahip olması, ekonomik açıdan uygunluğu, imalat ve bakım kolaylığı gibi avantajlarıyla son zamanlarda klima ve buzdolaplarında yaygın olarak tercih edilmektedir. Ancak bu avantajlarının yanında döngüsel kompresörlerin parçalar arası sürtünme, kaçak kaybı gibi dezavantajları da bulunmaktadır. Döngüsel kompresörlerde bu tür problemlerin üstesinden gelmek amacıyla birçok çalışma yapılmıştır. Çalışmalar incelendiğinde yeni tasarımlarla özellikle sürtünme ve aşınma probleminin büyük oranda çözüldüğü görülmektedir. Bu derleme çalışması ile genel olarak gözlemlenen diğer sonuçlar aşağıdaki gibidir.

1. Döngüsel kompresörlerde yetersiz yağlama parçalar arası sürtünme ve aşınmaya, aşırı yağlama ise sistem

veriminin düşmesine sebep olmaktadır. İdeal şartlarda yağlama ile birlikte %7 daha fazla enerji tasarrufu sağlanacağı belirtilmiştir. Yağ besleme hızının, yağ seviyesi yüksekliği, yağ viskozitesi ve dönme hızındaki artışla veya bir yağ karıştırıcı yardımı ile artırılacağı gözlemlenmiştir.

2. Kompresöre verilen enerjinin %10-15'inin mekanik sürtünme olarak kaybolduğu, sürtünme gücünün azaltılmasıyla elde edilebilecek enerji tasarrufu potansiyelinin, % 6'ya kadar ulaştığı belirlenmiştir. Palet kenarında meydana gelen sürtünmenin, toplam sürtünme kaybının %35'ini oluşturduğu saptanmıştır. Paletin rotor veya gövdede sabitlenmesi ile sürtünme kayplarının sırası ile %18 ve %41 azaldığı rapor edilmiştir. Ayrıca bu kompresör tipinin kullanımının %95 daha az sürtünme kaybı sağlayacağı ifade edilmiştir.

3. Meydana gelen sızıntı ve kaçak kayıpları, kompresörün hacimsel verimini ve sıkıştırma performansını olumsuz yönde etkilemektedir. Yapılan farklı tasarım ve modellemeler ile kompresörde meydana gelen sızıntı ve kaçakların %40 oranında azaltılabileceği öngörülmüştür. Radyal açıklık arttıkça kaçığın arttığı ve hacimsel verimin düştüğü, R410A akışkanı kullanılan kompresördeki hacimsel verim düşüşünün, R32'den %2,4 daha fazla olduğunu gözlemlenmiştir. Ayrıca kullanılan akışkanın da kaçak kaybı üzerinde etkili olduğu belirlenmiştir. R410A'nın R22'den %43; R290'dan %19 daha fazla kaçığa neden olduğu saptanmıştır.

4. Döngüsel kompresörlerde bileşenler arasındaki ısı transferlerinin doğru anlaşılması, tasarımcının enerji tasarrufu yüksek bir kompresör geliştirmesini sağlayacaktır. Yazarlar [63-65], döngüsel kompresörlerde meydana gelen sıkıştırma ve genişleme işlemlerinin klasik "pV gösterimi" yerine daha ayrıntılı denklemlerle ifade edilmesi gerektiğini savunmuşlardır. Oluşturulan yeni denklemlerin, kompresörde meydana gelen ısı transferini yaklaşık olarak %2-%7 hata aralığında açıkladığı belirlenmiştir. Yapılan bir teorik çalışma, döner rotor tipi döngüsel kompresörlerin sıkıştırma verimliliğinin % 93.1'e ulaşabileceğini göstermektedir.

5. Kompresörün mekanik verimi üzerine yapılan modellemelerin %5 hata payı ile başarıya ulaştığı gözlemlenmiştir. Yapılan kompresör tasarım optimizasyonlarının, kompresör verimliliğinde %2-%38 aralığında artış sağlayabileceği belirlenmiştir.

6. Döngüsel kompresörlerde sistem üzerine etkileyen yüklerin doğru analizinin, malzeme ve boyut seçimini de etkileyeceği, dengesiz ve yüksek dinamik yüklerin parçalarda yorulmaya sebep olacağı, özellikle yüksek basınçlarda yataklamaya dikkat edilmesi gerektiği rapor edilmiştir.

7. Soğutucu enjeksiyon şekli ile ilgili yapılan iyileştirmeler ile sistem COP değerinin %1,6-%36; sistem ısıtma kapasitesini % 5-49 kompresör performansının %12,1-28,3 hacimsel verimliliğinin % 1,8-2,7 aralığında artırılacağı gözlemlenmiştir.

8. Bir kompresörün başlangıç sürecinin, sistemin güvenilirliği ve verimliliği için önemli olduğu belirtilmiş, sıcak ve soğuk başlatma süreci arasındaki farklar yazarlar tarafından tartışılmıştır. Soğuk başlatma sırasındaki minimum emme göstergesi basıncının, sıcak başlatma sırasındakinden %70; uyarı başlangıcı sırasındakinden %63 daha düşük olduğunu belirlemiştir.

9. Literatür incelendiğinde akış alanında çok fazla çalışmanın yapılmadığı gözlemlenmiştir. Akış ve dinamik yükler üzerine daha fazla çalışma yapılması döngüsel kompresör yapısını daha iyi anlamak ve dezavantajlarını elimine etmek için önerilmektedir.

SİMGELER (NOMENCLATURE)

F_d : Palet soldan etki eden kuvvet
 F_t : Palet ve gövde arası sürtünme kuvveti
 F_u : Palet sağdan etki eden kuvvet
 n : Politropik katsayı
 P_c : Sıkıştırma basıncı
 P_e : Kompresör limit basıncı
 P_i : Ortam basıncı
 P_o : Sıkıştırma sonu basıncı
 μ_s : Palet ve rotor arasındaki sürtünme katsayısı
 μ_t : Palet ve gövde arasındaki sürtünme katsayısı
 η : Mekanik verim
 V_c : Sıkıştırma hacmi
 V_i : Ortam hacmi
 W_c : Sıkıştırma gücü
 W_f : Sıkıştırma sırasında palet ve palet yuvası arasında harcanan güç

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

Duygu GÜRKAN KOCATAŞ: Literatür taraması yapmış ve makalenin yazımını gerçekleştirmiştir.

Melih OKUR: Literatürdeki makaleleri derlemiş ve değerlendirmiştir.

İhsan KORKUT: Literatürdeki makaleleri derlemiş ve değerlendirmiştir.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Cai, D., Qiu, C., Pan, J., Yang, X., He, G., Tetsuhide, Y., ..., Li, H. "Leakage characteristics and an updated volumetric efficiency prediction model of rolling piston type rotary compressor for small capacity air-conditioner and heat pump applications", *Applied Thermal Engineering*, 121, (2017).
- [2] Gu, H., Chen, Y., Wu, J., Jiang, Y., & Sundén, B. "Impact of discharge port configurations on the performance of sliding vane rotary compressors with a rotating cylinder", *Applied Thermal Engineering*, 186, (2021).
- [3] Jadhav, T. S., & Lele, M. M., "Theoretical energy saving analysis of air conditioning system using heat pipe heat exchanger for Indian climatic zones" *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 18(4):669-673, (2015).
- [4] Gürel, A. E., Ağbulut, Ü., Ergün, A., & Ceylan, I. "Environmental and economic assessment of a low energy consumption household refrigerator", *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 23(2):365-372, (2020).
- [5] Abdhussain, M. A., "CFD pretending of vapor and liquid refrigerant mixing in variable speed scroll compressor" *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 22(1):168-176, (2019).
- [6] Vittorini, D., Bianchi, G., & Cipollone, R. "Energy saving potential in existing volumetric rotary compressors", *Energy Procedia*, 81:1121-1130, (2015).
- [7] Saidur, R., Rahim, N. A., and Hasanuzzaman, M., "A review on compressed-air energy use and energy savings", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(4):1135-1153 (2010).
- [8] The Global Air Compressor Market, 2021 URL: <https://www.businesswire.com/news/home/20210909006010/en/Global-Air-Compressor-Market-2021-2026---Stationary-Air-Compressors-to-Boost-the-100-Bn-Market---ResearchAndMarkets.com>
- [9] Sivakumar, V., "Design of Piston Compressor Coolers." (2019).
- [10] Vimmr, J., "Mathematical modelling of compressible inviscid fluid flow through a sealing gap in the screw compressor", *Mathematics and computers in Simulation*, 61.3-6:187-197, (2003).
- [11] Toshiba compressor catalog <http://toshibacompressor.com/index.php>
- [12] Qu, Z.C., Lin, X.W., Feng, J.M., Zhou, H., "Theory of synchronal rotary compressor" *West Lafayette, Purdue University*, Indiana, USA, (2004).
- [13] Molinaroli, L., Joppolo, C. M., and De Antonellis, S., "A semi-empirical model for hermetic rolling piston compressors", *International Journal of Refrigeration*, 79:226-237, (2017).
- [14] Ooi, K.T., Shakya, P., "A new compact rotary compressor: coupled vane compressor", *Purdue University*, (2018).
- [15] Wang, B., Liu, X., Shi, W., & Ding, Y. "An enhanced rotary compressor with gas injection through a novel end-plate injection structure", *Applied Thermal Engineering*, 131:180-191, (2018).

- [16] Okur, M., Akmandor, I. S., "Experimental investigation of hinged and spring loaded rolling piston compressors pertaining to a turbo rotary engine", *Applied Thermal Engineering*, 31(6-7):1031-1038, (2011).
- [17] Tan, K. M., and Ooi, K. T.. "Journal bearings design for a novel revolving vane compressor", *International Journal of Refrigeration*, 34(1):94-104, (2011).
- [18] Wu, J., & Chen, A., "A new structure and theoretical analysis on leakage and performance of an oil-free R290 rolling piston compressor", *International Journal of Refrigeration*, 49:110-118, (2015).
- [19] Yan, G., Jia, Q., & Bai, T., "Experimental investigation on vapor injection heat pump with a newly designed twin rotary variable speed compressor for cold regions", *International Journal of Refrigeration*, 62:232-241, (2016).
- [20] Bianchi, G., Cipollone, R., Murgia, S., & Contaldi, G.. "Development of an internal air cooling sprayed oil injection technique for the energy saving in sliding vane rotary compressors through theoretical and experimental methodologies", *International Journal of Refrigeration*, 52:11-20, (2015).
- [21] Wu, J., & Wang, G., "Numerical study on oil supply system of a rotary compressor", *Applied thermal engineering*, 61(2):425-432, (2013).
- [22] Zhu, Y., He, G., Sun, W., Shimoji, M., & Chen, X., "Experimental investigation on startup process for oil supply system of a variable speed rotary compressor", *International Journal of Refrigeration*, 113:58-69, (2020).
- [23] Zhu, Y., He, G., Sun, W., Shimoji, M., Chen, X., "Investigation on the characteristics of oil supply system for a hermetic variable speed rotary compressor", *International Journal of Refrigeration*, 118:150-160, (2020).
- [24] Fukuta M, Yanagisawa T, Shimizu T. "Analysis of oil film at vane side in vane compressors", *Int Comp Eng Conf.*, 395-400 (1996).
- [25] Kitsunai, Y., Matsui, M., Oyagi, S., "High Efficiency Development of a Rotary Compressor by Clarification of its Shaft Dynamic Motion", *Proceedings of the International Compressor Engineering Conference*, 1276, (2010).
- [26] Hirayama, T., Miura, K., Hattori, H., Ito, Y., "Numerical Analysis for Mixed Lubrication in Journal Bearings of Rotary Compressors" *Int. Compress. Eng. Conf.* 1-8, (2006).
- [27] Bianchi, G., Cipollone, R., Murgia, S., Contaldi, G., "Performance enhancement in sliding vane rotary compressors through a sprayed oil injection technology" *22th International Compressor Engineering Conference*, Purdue University, (2014).
- [28] Ma, R., Wu, Y. T., Du, C. X., Chen, X., Zhang, D. L., & Ma, C. F., "The performance test of a modified miniature rotary compressor in upright and inverted modes subjected to microgravity", *Applied Thermal Engineering*, 92:81-92, (2016).
- [29] Fukuda T., Hayano, M., "HFC/POE lubricity evaluation on the rotary compressor in system operation", *Proceedings of the 1996 International Compressor Engineering Conference at Purdue*, (1996).
- [30] Kim, H. J., "Lubrication oil pumping by utilizing vane motion in a horizontal rotary compressor" *International journal of refrigeration*, 28(4):498-505, (2005).
- [31] Kim, H. J., & Lancey, T. W., Numerical study on the lubrication oil distribution in a refrigeration rotary compressor. *International journal of refrigeration*, 26(7):800-808, (2003).
- [32] Zhu, Y., He, G., Sun, W., Shimoji, M., & Chen, X., "Effect of inlet structures on the performance of oil supply system of a variable speed rotary compressor" *Journal of Fluids Engineering*, 141(8), (2019).
- [33] Zhu, Y., He, G., Sun, W., Shimoji, M., & Chen, X.. "Effect of oil stirrer on the performance of oil supply system for a variable speed rotary compressor" *International Journal of Refrigeration*, 101:1-10, (2019).
- [34] Ooi, K. T., & Wong, T. N., "A computer simulation of a rotary compressor for household refrigerators", *Applied Thermal Engineering*, 17(1):65-78, (1997).
- [35] Bianchi, G., & Cipollone, R. "Friction power modeling and measurements in sliding vane rotary compressors" *Applied Thermal Engineering*, 84:276-285, (2015).
- [36] Sung, H. C., "Tribological characteristics of various surface coatings for rotary compressor vane" *Wear*, 221(2):77-85, (1998).
- [37] Lee, Y. Z., & Oh, S. D., "Friction and wear of the rotary compressor vane-roller surfaces for several sliding conditions", *Wear*, 255(7-12):1168-1173, (2003).
- [38] Chen, Z., Wu, J., & Li, G.. "Experimental study on the tribological characteristic of vane-roller interface of HC290 rotary compressor with mineral oil", *International Journal of Refrigeration*, 94:205-213, (2018).
- [39] Geng, K., Geng, A., Wang, X., Zheng, X., Wei, W., Zhao, T., ... & He, Y.. "Frictional characteristics of the vane-chute pair in a rolling piston compressor based on the second-order motion" *Tribology International*, 133:111-125, (2019).
- [40] Yanagisawa T., Shimizu T., "Friction losses in rolling piston type rotary compressors. III", *Int. J. Refrig.* 8:159-165, (1985).
- [41] Okur, M., Arabaci, E., "Experimental study of a novel hinged vane rotary turbine-part I: The effect of different vane thickness and vane weight on turbine performance", *International Journal of Refrigeration*, 51:70-76, (2015).
- [42] Hua, Y., Zongchang, Q., Hui, Z., Bingfeng, Y., "Friction characteristics of sliding vane for synchronal rotary compressor" *J. Xi'an Jiaotong Univ.*, 42(7):843-847, (2008).
- [43] Tan, K. M., & Ooi, K. T., "A novel revolving vane compressor with a fixed-vane", *International Journal of Refrigeration*, 34(8):1980-1988, (2011).
- [44] Teh, Y. L., & Ooi, K. T. "Theoretical study of a novel refrigeration compressor-Part I: Design of the revolving vane (RV) compressor and its frictional losses", *International Journal of Refrigeration*, 32(5):1092-1102, (2009).
- [45] Subiantoro, A., & Ooi, K. T., "Analytical study of the endface friction of the revolving vane mechanism", *International Journal of Refrigeration*, 34(5):1276-1285, (2011).

- [46] Gu, H., Zhou, X., Chen, Y., Wu, J., Wu, Z., Jiang, Y., & Sundén, B., "Analysis, modeling and simulations of an innovative sliding vane rotary compressor with a rotating cylinder", *Energy Conversion and Management*, 230:113822, (2021).
- [47] De Lim, Y., & Ooi, K. T., "Performance analysis of a U-Vane compressor" *Applied Thermal Engineering*, 178, 115570, (2020).
- [48] Costa C.M.N.F., Ferreira R.T.S., Prata A.T., "Considerations about the leakage through the minimal clearance in a rolling piston compressor", *Purdue University*, (1990).
- [49] Takebayashi, M., Hata, H., Iizuka, T., et al., "A study on wear characteristics of a rolling-piston-type rotary compressor", *Proceedings of the International Compressor Engineering Conference at Purdue*, 145–152, (2000).
- [50] Osama A.H., "Theoretical modeling of sliding vane compressor with leakage", *Int J Refrig.*, 32(7):1555–62, (2009).
- [51] Gasche, J.L., Andreotti, T., Maia, C.R.M., "A model to predict R134a refrigerant leakage through the radial clearance of rolling piston compressors", *International Journal of Refrigeration*, 35:2223–2232, (2012).
- [52] Yanagisawa, T., Shimizu, T., "Leakage losses with a rolling piston type rotary compressor I. Radial clearance on the rolling piston", *Int. J. Refrig.*, 8:75–84, (1985).
- [53] Reed, W.A., Hamilton, J.F., "Internal leakage effects in sliding vane, rotary compressors", *International Conference on Compressors and Their Systems*, West Lafayette, Indiana, USA, (1980).
- [54] Yanagisawa T., Shimizu T., "Leakage losses with a rolling piston type rotary compressor. II. Leakage losses through clearances on rolling piston faces", *International Journal of Refrigeration*, 8:152–158, (1985).
- [55] Hugenroth, J., "Oil-less Swing Compressor Development", *International Compressor Engineering Conference*, 1–10, (2014).
- [56] Bradshaw, C.R., Groll, E.A., "A comprehensive model of a novel rotating spool compressor", *International Journal of Refrigeration*, 36:974–1981.1, (2013).
- [57] Cai, D., He, G., Yokoyama, T., Tian, Q., Yang, X., & Pan, J., "Simulation and comparison of leakage characteristics of R290 in rolling piston type rotary compressor", *International Journal of Refrigeration*, 53:42-54, (2015).
- [58] Aw, K. T., Ooi, K. T., "Leakage study of a lubricant-free revolving vane compressor", *International Journal of Refrigeration*, 124:122-133, (2021).
- [59] Yang, H., Qu, Z., Zhou, H., & Yu, B., "Study on leakage via the radial clearance in a novel synchronal rotary refrigeration compressor", *International journal of Refrigeration*, 34(1):84-93, (2011).
- [60] Teh, Y. L., & Ooi, K. T., "Theoretical study of a novel refrigeration compressor-Part III: Leakage loss of the revolving vane (RV) compressor and a comparison with that of the rolling piston type", *International Journal of Refrigeration*, 32(5):945-952, (2009).
- [61] He, G., Sun, W., Zhu, Y., Yang, X., & Cai, D., "Experimental performance evaluation on leakage characteristics of R32 in rolling piston type rotary compressor", *International Journal of Refrigeration*, 91:177-188 (2018).
- [62] L Adornato, V., Padhy, S. K., Herzog, R. R., "Theoretical Modeling of Lubrication System of a Rotary Compressor", *Proc. of the International Appliance Technical Conference*, Purdue University, (1992).
- [63] Wu, J., Hu, J., Chen, A., Mei, P., Zhou, X., & Chen, Z., "Numerical analysis of temperature distribution of motor-refrigerant in a R32 rotary compressor", *Applied Thermal Engineering*, 95:365-373, (2016).
- [64] Shi H., Wu, J., "Thermal analysis of oil sump and compression unit in a rotary compressor" *Applied Thermal Engineering*, 164:114465, (2020).
- [65] Sanaye, S., Dehghandokht, M., Mohammadbeigi, H., & Bahrami, S., "Modeling of rotary vane compressor applying artificial neural network", *International Journal of Refrigeration*, 34(3):764-772, (2011).
- [66] Huang, P. X., "Under-compression (over-expansion)–an isochoric or adiabatic process?" *International Compressor Engineering Conference*, Purdue University, (2012).
- [67] Takeshita, S., "Simulation and Modeling of an A/C Rotary Vane Compressor". *SAE transactions*, 166-176, (1997).
- [68] Abagnale, C., Cardone, M., Gargiulo, B., Marialto, R., "Ideal specific work of rotary compressors: A new approach" *Energy Procedia*, 101:710-717, (2016).
- [69] Tan, K. M., Ooi, K. T., "Heat transfer in compression chamber of a revolving vane (RV) compressor" *Applied Thermal Engineering*, 31(8-9):1519-1526, (2011).
- [70] Biao, X., Tongyi, H., Lin, H., Yan, Y., Yuying, S., Wei, W., "Experimental study of an improved air-source heat pump system with a novel three-cylinder two-stage variable volume ratio rotary compressor", *International Journal of Refrigeration*, 100:343-353, (2019).
- [71] Ishii, N., Morita, N., Kurimoto, M., Shuichi, K.S.A.K., Amamoto, Y., "Calculations for compression efficiency caused by heat transfer in compact rotary compressors", *International Compressor Engineering Conference*, Purdue University, West Lafayette, IN, USA, 1423, (2000).
- [72] Lin, J., Lian, Y., Wu, J., "Numerical investigation on vapor-liquid two-phase compression in the cylinder of rotary compressors" *Applied Thermal Engineering*, 170:115022, (2020).
- [73] Ishii, N., Fukushima, M., Yamamura, M., Fujiwara, S. & Kakita, S., Optimum Combination of Dimensions for High Mechanical Efficiency of a Rolling-Piston Rotary Compressor, *Proc. International Compressor Engineering Conference at Purdue*, 418-424, (1990).
- [74] Bianchi, G., Cipollone, R., "Theoretical modeling and experimental investigations for the improvement of the mechanical efficiency in sliding vane rotary compressors", *Applied Energy*, 142:95-107, (2015).
- [75] Huang Y.M., Tsay S.N., "Mechanical efficiency optimization of a sliding vane rotary compressor", *J Pressure Vessel Technology*, 131(6):061601, (2009).
- [76] Molinaroli, L., Joppolo, C. M., De Antonellis, S., A semi-empirical model for hermetic rolling piston compressors. *International Journal of Refrigeration*, 79:226-237 (2017).

- [77] Ba, D. C., Deng, W. J., Che, S. G., Li, Y., Guo, H. X., Li, N., Yue, X. J., "Gas dynamics analysis of a rotary compressor based on CFD", *Applied Thermal Engineering*, 99:1263-1269 (2016).
- [78] Park, Y. C., "Transient analysis of a variable speed rotary compressor", *Energy Conversion and Management*, 51(2):277-287, (2010).
- [79] Shin, M., Na, S., Lee, J., Min, B., Choi, G., Model analysis of a novel compressor with a dual chamber for high-efficiency systems. *Applied Thermal Engineering*, 158:113717, (2019).
- [80] He, Z., Yang, X., Li, D., Wu, W., "Dynamic characteristics of a swing compressor for an air conditioning system at different discharge pressures", *International Journal of Refrigeration*, 112:125-135 (2020).
- [81] Teh, Y. L., Ooi, K. T., "Experimental study of the revolving vane (RV) compressor", *Applied Thermal Engineering*, 29(14-15):3235-3245, (2009).
- [82] Tan, K. M., & Ooi, K. T., "Experimental study of fixed-vane revolving vane compressor", *Applied Thermal Engineering*, 62(1):207-214, (2014).
- [83] Teh, Y. L., Ooi, K. T., & Djamari, D. W., "Theoretical study of a novel refrigeration compressor-Part II: Performance of a rotating discharge valve in the revolving vane (RV) compressor", *International Journal of Refrigeration*, 32(5):1103-1111, (2009).
- [84] Shuxue, X., Guoyuan, M., "Experimental study on two-stage compression refrigeration/heat pump system with dual-cylinder rolling piston compressor", *Applied Thermal Engineering*, 62(2):803-808, (2014).
- [85] Yang, X., Dong, C., Qu, Z., "Design and dynamic analysis of a novel double swing vane compressor for electric vehicle air conditioning systems", *International Journal of Refrigeration*, 76:52-62, (2017).
- [86] Cipollone, R., Di Battista, D., "Sliding vane rotary pump in engine cooling system for automotive sector", *Applied Thermal Engineering*, 76:157-166, (2015).
- [87] Hattori, H., Kawashima, N., "Dynamic analysis of a rotor-journal bearing system for twin rotary compressors", *Proceedings of the International Compressor Engineering Conference School*, 768, (1990).
- [88] Huang, Y. M., Liaw, Y. S., "The impact of sliding blades in a rotary compressor", *J. Mech. Des.*, 123(4):583-589, (2001).
- [89] Zhou H, Qu ZC, Yang H, Yu BF. "Dynamic model and numerical simulation for synchronal rotary compressor", *Journal of Fluids Engineering*, 31(4):041102, (2009).
- [90] Ahn, H. J., Han, D. C., Hwang, I. S., "A built-in bearing sensor to measure the shaft motion of a small rotary compressor for air conditioning" *Tribology International*, 36(8):561-572, (2003).
- [91] Yu, X., Tan, Q., Ren, Y., Jia, X., & Jin, L., "Numerical study of the reed valve impact in the rotary compressor by FSI model" *Energy Procedia*, 105:4890-4897, (2017).
- [92] Wang, Z., Yu, X., Liu, F., Feng, Q., Tan, Q., "Dynamic analyses for the rotor-journal bearing system of a variable speed rotary compressor" *International Journal of Refrigeration*, 36(7):1938-1950, (2013).
- [93] Ito, Y., Miura, K., Hatayama, M., "Dynamic analysis of a rotor journal bearing system with large dynamic loads for rotary compressors", *Proceedings of the 9th Asian Conference on Refrigeration and Air-Conditioning*, 142070, (2018).
- [94] Zhang, H., Wu, J., Xie, F., Chen, A., Li, Y., "Dynamic behaviors of the crankshafts in single-cylinder and twin-cylinder rotary compressors", *International Journal of Refrigeration*, 47:36-45, (2014).
- [95] Ferraris, G., Andrianoely, M. A., Berlioz, A., Dufour, R., "Influence of cylinder pressure on the balancing of a rotary compressor", *Journal of Sound and Vibration*, 292(3-5):899-910, (2006).
- [96] Heo, J., Yun, R., & Kim, Y., Simulations on the performance of a vapor-injection heat pump for different cylinder volume ratios of a twin rotary compressor, *International Journal of Refrigeration*, 36(3):730-744, (2013).
- [97] Baek, C., Heo, J., Jung, J., Cho, H., & Kim, Y., "Effects of the cylinder volume ratio of a twin rotary compressor on the heating performance of a vapor injection CO2 cycle" *Applied Thermal Engineering*, 67(1-2):89-96, (2014).
- [98] Sun, W., He, G., Ning, Q., Song, H., Pang, Q., "Performance investigation and optimization analysis for vapor injection rotary compressor oriented to circular end-plate injection port without check valve" *Applied Thermal Engineering*, 183:116196, (2021).
- [99] Xu, X., Hwang, Y., Radermacher, R.J.I.J.o.R., "Refrigerant injection for heat pumping/air conditioning systems: literature review and challenges discussions", *International Journal of Refrigeration*, 34:402-415, (2011).
- [100] Kim, D., Jeon, Y., Jang, D. S., Kim, Y., Performance comparison among two-phase, liquid, and vapor injection heat pumps with a scroll compressor using R410A. *Applied Thermal Engineering*, 137:193-202, (2018).
- [101] Yang, M., Wang, B., Li, X., Shi, W., Zhang L.J.I.J.o.R., "Evaluation of two-phase suction, liquid injection and two-phase injection for decreasing the discharge temperature of the R32 scroll compressor", *International Journal of Refrigeration*, 59:269-280, (2015).
- [102] Wang, B., Liu, X., Ding, Y., Shi, W., "An enhanced rotary compressor with gas injection through a novel end-plate injection structure end-plate gas injection with check valve", *International Journal of Refrigeration*, 88:516-522, (2018).
- [103] Mathison, M.M., Braun, J.E., Groll, E.A.J.I.J.o.R., "Modeling of a novel spool compressor with multiple vapor refrigerant injection ports", *International Journal of Refrigeration*, 36:1982-1997, (2013).
- [104] Wang, B., Ding, Y., & Shi, W., "Experimental research on vapor-injected rotary compressor through end-plate injection structure with check valve", *International Journal of Refrigeration*, 96:131-138, (2018).
- [105] Wang, B., Liu, X., Shi, W., "Performance improvement of air source heat pump using gas-injected rotary compressor through port on blade" *International Journal of Refrigeration*, 73:91-98, (2017).
- [106] Wang, B., Liu, X., & Shi, W., "Comparative research on air conditioner with gas-injected rotary compressor

- through injection port on blade”, *Applied Thermal Engineering*, 106:67-75, (2016).
- [107] Jeon, Y., Lee, S. H., Kim, W., Jung, J., Kim, Y., “Numerical study on the optimal design of injection-hole geometries of a twin rotary compressor in a liquid injection heat pump”, *Applied Thermal Engineering*, 113:1178-1188, (2017).
- [108] Liu, X., Wang, B., Shi, W., Zhang, P., “A novel vapor injection structure on the blade of a rotary compressor”, *Applied Thermal Engineering*, 100:219-1228, (2016).
- [109] Ko, Y., Park, S., Jin, S., Kim, B., & Jeong, J. H., “The selection of volume ratio of two-stage rotary compressor and its effects on air-to-water heat pump with flash tank cycle” *Applied Energy*, 104:187-196, (2013).
- [110] Lin, J., Wu, J., Zhang, Z., Chen, Z., Xie, J., & Lu, J., “Experimental investigation of startup characteristics of R290 rotary compressor under low ambient temperature heating condition” *International Journal of Refrigeration*, 77:128-135, (2017).
- [111] Wu, J., Lin, J., Zhang, Z., Chen, Z., Xie, J., & Lu, J., “Experimental investigation on cold startup characteristics of a rotary compressor in the R290 air-conditioning system under cooling condition”, *International Journal of Refrigeration*, 65:209-217, (2016).
- [112] Wu, J., Lin, J., Zhang, Z., Chen, Z., Xie, J., & Lu, J., “Experimental investigation of dynamic characteristics of a rotary compressor and its air conditioner using R290 during warm startup” *Applied Thermal Engineering*, 125:1469-1477, (2017).
- [113] Lee, S. J., Kim, H. B., Huh, J. K., Lee, S. J., Ahn, B. H., “Quantitative analysis of flow inside the accumulator of a rotary compressor” *International Journal of Refrigeration*, 26(3):321-327, (2003).
- [114] Vande, VJ, Vierendeels, J., Dick E., “A grid generator for flow calculations in rotary volumetric compressors”, *Vienna, Austria: Fourth European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering*, (2004).
- [115] Bianchi, G., Rane, S., Kovacevic, A., Cipollone R., “Deforming grid generation for numerical simulations of fluid dynamics in sliding vane rotary machines”, *Advances in Engineering Software*, 112:180-91, (2017).