



**T.C.
RECEP TAYYİP ERDOĞAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**SÜRDÜRÜLEBİLİR BİNALAR İÇİN ÇARK TİPİ NEM ALMA
SİSTEMİNİN DENEYSEL VE SAYISAL PERFORMANS
ANALİZİ**

(Yüksek Lisans Tezi)

Yusuf Nadir YILMAZ

**Danışman
Doç. Dr. Erdem CÜCE**

**RİZE
2025**

KABUL VE ONAY

Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalında, Doç. Dr. Erdem CÜCE danışmanlığında, Yusuf Nadir YILMAZ tarafından hazırlanan *Sürdürülebilir Binalar için Çark Tipi Nem Alma Sisteminin Deneysel ve Sayısal Performans Analizi* adlı bu tez çalışması, 28/07/2025 tarihinde yapılan savunma sınavı sonucunda oy birliğiyle/~~oy çokluğuyla~~ başarılı bulunarak jürimiz tarafından **Yüksek Lisans Tezi** olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri	Ünvanı, Adı SOYADI	İmza
Başkan	: Prof. Dr. Haydar KÜÇÜK	
Üye	: Doç. Dr. Ayşe Pınar MERT CÜCE	
Üye	: Doç. Dr. Erdem CÜCE	

ETİK BEYAN

Makine Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programından mezun olmak üzere teslim ettiğim “Sürdürülebilir Binalar için Çark Tipi Nem Alma Sisteminin Deneysel ve Sayısal Performans Analizi” adlı tezim, bilim ve araştırma etiği prensiplerine riayet edilerek tarafımdan yazılmıştır.

Tez çalışmamda, başka kaynaklardan aktarılan bütün bilgi ve alıntılar, Enstitünüz Tez Yazım Kılavuzuna uygun olarak açıkça gösterilmiştir. Kaynağı gösterilenler dışında kalan bütün bilgiler uygun araştırma yöntemi kullanılarak tarafımdan edinilmiş ve esere bu şekilde yansıtılmıştır. Şahsıma ait olmayan hiçbir bilgi, kasıt veya kusurlar, şahsıma aitmiş gibi gösterilmemiştir. İnternet kaynakları dâhil, sahibine/kaynağına atıf yapılmaksızın hiçbir bilgi kullanılmamıştır. Aksinin ortaya çıkması halinde doğacak bütün hukuki, idari, akademik ve etik sorumluluk tarafıma ait olacaktır. Eserin tesliminden sonra herhangi bir zamanda, bilim etiğine aykırılık tespit edilmesi ve / veya eserimle ilgili intihal veya intihal şeklinde anlaşılabilecek bir durumun ortaya çıkması halinde; Üniversiteniz ve eğitim kadronuzun hiçbir şekilde sorumlu tutulmayacağını hür irademle kabul, beyan ve taahhüt ederim.

15/08/2024

Yusuf Nadir YILMAZ

ÖN SÖZ

Sürdürülebilir Binalar için Çark Tipi Nem Alma Sisteminin Deneysel ve Sayısal Performans Analizi başlıklı tez çalışması, Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Düşük/Sıfır Karbon Enerji Teknolojileri (Low/Zero Carbon Energy Technologies) Laboratuvarının sağlamış olduğu fiziki imkânlar kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Tüm dünyada ve ülkemizde artan emisyon gazları ve enerji ihtiyacı, sürdürülebilir ve yenilikçi iklimlendirme sistemlerine olan ilgiyi her geçen gün artırmaktadır. Bu bağlamda, düşük maliyetli ve geri dönüştürülebilir malzemelerle geliştirilen Çark Tipi Nem Alma sistemleri, alternatif bir çözüm olarak öne çıkmaktadır. Döner kurutucu çarklar, havadaki nemin uzaklaştırılması yoluyla enerji verimliliği yüksek, çevre dostu bir iklimlendirme süreci sunmakta ve özellikle düşük/sıfır karbonlu bina uygulamalarında yaygınlaştırılabilecek potansiyele sahiptir. Bu tez çalışması kapsamında, söz konusu sistemin farklı rejenerasyon sıcaklıkları ve hava hızları altındaki performans parametreleri incelenmiştir. Nem alma verimini artırmaya yönelik olarak sistemde yalıtım sağlanmış, fan hızı ve sıcaklık değerleri optimize edilerek verimli bir işletim hedeflenmiştir. Elde edilen sonuçlar, sistemin hem akademik hem de uygulamalı alanda gelecek çalışmalara yol gösterici nitelikte olduğunu ortaya koymaktadır.

Çalışmanın başlangıcında çalışma konusunu önererek başlayan ve bütün süreç boyunca her adımda bilgi, beceri ve tavsiyeleriyle yanımda olan tez danışmanım değerli hocam Doç. Dr. Erdem CÜCE'ye, yine çalışmam boyunca desteklerini sürekli hissettiğim ikinci danışmanım olarak nitelendirebileceğim değerli hocam Doç. Dr. Ayşe Pınar MERT CÜCE'ye teşekkürü borç bilirim.

İlk günümünden bugüne kadar sevgi, merhamet ve her türlü desteklerini benden eksik etmeyen sevgili babam Celaleddin YILMAZ, sevgili annem Neriman YILMAZ, sevgili abim Abdulkadir YILMAZ, dedem Yusuf YILMAZ ve bana destek olan herkese sonsuz şükran ve hürmetlerimi sunuyorum.

Yusuf Nadir YILMAZ
RİZE/2025

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY	I
ETİK BEYAN	II
ÖN SÖZ	III
İÇİNDEKİLER	IV
ÖZET	VI
ABSTRACT.....	VII
KISALTMALAR	VIII
TABLolar LİSTESİ	IX
ŞEKİLLER LİSTESİ	X
GİRİŞ	1
1. GENEL BİLGİLER.....	3
1.1. Çark Tipi Nem Alma Sistemleri.....	3
1.1.1. Tek Kademeli Çark Tipi Nem Alma Sistemleri.....	3
1.1.2. Çift Kademeli Çark Tipi Nem Alma Sistemleri	4
1.1.3. Kurutucu Tekerlek Malzeme Türleri ve Yatak Tipi.....	6
1.2. Literatür Özeti	8
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR	16
2.1. Deney Düzeneginin Tanımı.....	16
2.2. Deney Düzeneginin Bileşenleri.....	21
2.2.1. Ana Gövde	21
2.2.2 Blender Motoru	22
2.2.3. Veri Kaydedici	23
2.2.4. Sıcaklık ve Nem Sensörleri	24
2.2.5. Santrifüj Fan	25
2.2.6. Şartlandırma Odaları	26
2.2.7. Döner Kurutucu Çark	26
2.3. Deneysel Çalışma Prosedürü	27
3. BULGULAR.....	29
3.1. Ölçüm Sonuçları.....	29
4. TARTIŞMA, SONUÇ VE ÖNERİLER	41

KAYNAKÇA.....	44
EKLER.....	47



Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Anabilim Dalı : Makine Mühendisliği
Tez Türü : Yüksek Lisans Tezi
Danışman : Doç. Dr. Erdem CÜCE
Hazırlayan : Yusuf Nadir YILMAZ
Yıl : 2025
Sayfa Sayısı : 47

ÖZET

SÜRDÜRÜLEBİLİR BİNALAR İÇİN ÇARK TİPİ NEM ALMA SİSTEMİNİN DENEYSEL VE SAYISAL PERFORMANS ANALİZİ

Bu çalışmada, yaklaşık 100 Amerikan doları maliyetle imal edilen ve 20 mm kalınlığında silika jel esaslı bir adsorban malzeme içeren çark tipi nem alma sisteminin termodinamik performansı deneysel olarak detaylı bir şekilde değerlendirilmiştir. Geliştirilen sistem, üç farklı rejenerasyon hava sıcaklığı (40 °C, 50 °C ve 60 °C) ile iki farklı hava hızı (2 m/s ve 4 m/s) kombinasyonlarında test edilmiştir. Deneysel veriler ışığında, nem alma performansının en yüksek seviyeye 50 °C rejenerasyon sıcaklığı ve 2 m/s hava hızı koşullarında ulaştığı gözlemlenmiştir; bu durumda nem alma katsayısı (DCOP) 0,312 olarak hesaplanmıştır. En düşük DCOP değeri ise 40 °C sıcaklık ve 4 m/s hava hızında 0,1 olarak tespit edilmiştir. Nem alma ve bırakma oranları da deneysel testler boyunca detaylı şekilde analiz edilmiştir. Özellikle dikkat çeken nem alma değerleri olarak 60 °C rejenerasyon sıcaklığında, 2 m/s hızda 4,55/1,16 g/kg(kuru hava) ve 4 m/s hızda 3,97/0,42 g/kg(kuru hava) değerleri ölçülmüştür. Benzer şekilde 50 °C’de 3,48/0,654 ve 2,77/0,28; 40 °C’de ise 1,53/0,09 ve 0,59/0,05 g/kg(kuru hava) sonuçları elde edilmiştir. Bu bulgular, sistemin özellikle 50 °C - 2 m/s koşulunda optimum verimle çalıştığını ve düşük emisyon hedefli iklimlendirme uygulamaları açısından önemli bir potansiyel sunduğunu ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler: Çark tipi nem alma sistemi, Nem alma teknolojileri, Silika jel nem alıcı

Recep Tayyip Erdogan University Institute of Graduate Studies

Department : Department of Mechanical Engineering

Thesis Type : Master Thesis

Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Erdem CÜCE

Author : Yusuf Nadir YILMAZ

Year : 2025

Pages : 47

ABSTRACT

EXPERIMENTAL AND NUMERICAL ANALYSIS OF THE WHEEL TYPE DEHUMIDIFICATION SYSTEM FOR SUSTAINABLE BUILDINGS

In this study, the thermodynamic performance of a rotary desiccant wheel system, manufactured at an approximate cost of 100 US dollars and incorporating a 20 mm thick silica gel-based adsorbent material, was thoroughly evaluated through experimental investigation. The developed system was tested under six different combinations comprising three regeneration air temperatures (40 °C, 50 °C, and 60 °C) and two air velocities (2 m/s and 4 m/s). According to the experimental data, the highest dehumidification performance was achieved at a regeneration temperature of 50 °C and an air velocity of 2 m/s, where the desiccant coefficient of performance (DCOP) was calculated as 0.312. Conversely, the lowest DCOP was determined to be 0.1 under the conditions of 40 °C and 4 m/s. Moisture adsorption and desorption rates were also meticulously analysed throughout the experimental tests. Notably, at a regeneration temperature of 60 °C, the system exhibited adsorption/desorption rates of 4.55/1.16 g/kg (dry air) at 2 m/s and 3.97/0.42 g/kg at 4 m/s. Similarly, for 50 °C, values of 3.48/0.654 g/kg and 2.77/0.28 g/kg were recorded; while at 40 °C, results of 1.53/0.09 g/kg and 0.59/0.05 g/kg (dry air) were observed for 2 m/s and 4 m/s, respectively. These findings demonstrate that the system operates most efficiently under the condition of 50 °C - 2 m/s, highlighting its significant potential for use in low-emission HVAC applications.

Keywords: Rotary desiccant wheel system, Dehumidification technologies, Silica gel dehumidifier

KISALTMALAR

RDW	:	Çark Tipi Nem Alma
HVAC	:	Isıtma, Havalandırma ve İklimlendirme
DCOP	:	Nem Alma Performans Katsayısı
COP	:	Performans Katsayısı
D	:	Nem Alma Kapasitesi
ω	:	Özgül Nem, g/kg kuru hava
ϕ	:	Bağıl Nem, %
T	:	Sıcaklık, °C
$\dot{m}$	:	Kütleli Debi, kg/s
$\dot{V}$	:	Hacimsel Debi, m ³ /h veya m ³ /s
$\dot{q}$	:	Isı Transferi Hızı, W
$\dot{Q}_{giriş}$	:	Giriş Termal Enerjisi, W
$M_{n.a.}$	:	Nem Alma Miktarı, g/s
M_{rej}	:	Rejenerasyonla Atılan Nem, g/s
h	:	Entalpi, kJ/kg
h_v	:	Buharlaştırma Gizli Isısı, kJ/kg
c_p	:	Sabit Basıncıta Özgül Isı Kapasitesi, kJ/kg×K
ΔT	:	Sıcaklık Farkı, °C
$\Delta \omega$	:	Özgül Nem Farkı, g/kg
Rph	:	Saatlik Devir Sayısı
η	:	Verimlilik, %
n.a.	:	Nem Alma Süreci
rej	:	Rejenerasyon Süreci
çev	:	Çevre
k.h.	:	Kuru Hava
g/kg (k.h.)	:	Kuru Hava Başına Gram Nem
m/s	:	Hız
m ³ /h	:	Saatlik Hacimsel Debi
kJ/kg	:	Kütle Başına Enerji
°C	:	Santigrat Derece

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 1. Farklı yapılardan oluşan tekerleklerin sistem parametrelerine etkisi.....	7
Tablo 2. Her rejenerasyon sıcaklığı ve fan hızı için sonuçların DCOP değerleri.....	37
Tablo 3. Deneysel çalışmaların sayısal özeti.....	38
Tablo 4. Cihazların belirsizlikleri.....	47



ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1. Döner kurutucu tekerleğinin hava işleme ünitesi olarak şematik görünümü .	4
Şekil 2. (a) İki aşamalı çark tipi nem alma soğutma sisteminin şematik şekli ve (b) psikrometrik grafikte gösterilen tipik işlem.....	5
Şekil 3. Mevcut nem gidericilerin şematik gösterimi.....	6
Şekil 4. (a) Önerilen sistemin şeması, (b) Deneysel kurulumun görünümü	7
Şekil 5. Çark tipi nem alma sisteminin genel görünümü.....	17
Şekil 6. a) Kurutma tekerleği b) ve Ayrılmış parçalarının şematik gösterimi.....	18
Şekil 7. Tez çalışması kapsamında tasarımı yapılarak prototip üretimi gerçekleştirilen döner kurutucu çark esaslı ilk nem alma sistemi	19
Şekil 8. Soğutucu destekli çark tipi nem alma sisteminin şematik gösterimi.....	20
Şekil 9. Sistem ana gövdesi	22
Şekil 10. Blender motor.....	23
Şekil 11. Veri kaydedici	24
Şekil 12. RHT-WM ve RHT-DM model sensörler	25
Şekil 13. Santrifüj fan.....	25
Şekil 14. Şartlandırma odası.....	26
Şekil 15. Döner kurutucu çark.....	27
Şekil 16. 2 m/s fan hızı ve 40°C rejenerasyon sıcaklığında a) nem alma ve b) rejenerasyon. 4 m/s fan hızı ve 40°C rejenerasyon sıcaklığında c) nem alma ve d) rejenerasyon.	31
Şekil 17. 2 m/s fan hızı ve 50°C rejenerasyon sıcaklığında a) nem alma ve b) rejenerasyon. 4 m/s fan hızı ve 50°C rejenerasyon sıcaklığında c) nem alma ve d) rejenerasyon.	33
Şekil 18. 2 m/s fan hızı ve 60°C rejenerasyon sıcaklığında nem a) alma ve b) rejenerasyon. 4 m/s fan hızı ve 60°C rejenerasyon sıcaklığında c) nem alma ve d) rejenerasyon.	35
Şekil 19. Kurutma tekerleği tarafından özgül nem giderme miktarına karşılık gelen DCOP değerleri.....	39
Şekil 20. DCOP değerleri için kurutucu tekerlek verimliliği.	40

GİRİŞ

Bina sektörü, günümüzde küresel enerji kaynaklarının en büyük tüketicilerinden biri olarak öne çıkmakta olup, bu enerji tüketiminin önemli bir kısmını konut binaları oluşturmaktadır. Konut sektörü içinde ise, enerji tüketiminin büyük bölümü, iç mekan termal konforunu sağlamak adına kullanılan İklimlendirme (HVAC) sistemlerine ayrılmaktadır (Alvur vd., 2024). Avrupa Birliği özelinde bakıldığında, konut binalarında toplam enerji tüketiminin büyük bir kısmı, mekan ısıtması, sıcak su ihtiyacı ve elektrik talebine ayrılmıştır (Cuce vd., 2023; Cuce vd., 2016).

Bu sektördeki artan enerji talebinin önümüzdeki yıllarda da artması beklenmektedir. Bu artışın başlıca nedenleri arasında, binaların hizmet ömrünün uzaması, kullanıcı konfor beklentilerinin artması ve nüfus artışı gösterilmektedir (Akram vd., 2023). Enerji yoğun iklimlendirme çözümlerine yönelik artan talep, karbon salınımı ve küresel ısınmaya etkileri bağlamında çevresel kaygıları da beraberinde getirmektedir. Bu zorluklara yanıt olarak, bina teknolojileri ve enerji verimliliği uygulamalarının daha sürdürülebilir hale getirilmesine yönelik önemli teknolojik gelişmeler ve bilimsel çalışmalar yürütülmektedir (Cuce & Riffat, 2024a).

Enerji verimliliği, hem bireyler hem karar vericiler hem de mühendislik uzmanları tarafından HVAC sistemleri bağlamında öncelikli konu haline gelmiştir. Geleneksel iklimlendirme sistemleri, yüksek küresel ısınmaya potansiyeline (GWP) sahip soğutuculara bağımlıdır ve bina kaynaklı sera gazı emisyonlarının %30'undan fazlasından sorumludur (Cuce & Riffat, 2016). Bu nedenle, düşük GWP'ye sahip soğutma çözümlerinin benimsenmesi, enerji verimliliği ve iç hava kalitesini artıracak şekilde, acil bir gereklilik haline gelmiştir (Abdullah vd., 2023).

Bu bağlamda, çark tipi nem alma sistemleri, nem alma verimliliğini artırma potansiyelleri nedeniyle dikkat çekmektedir (Kumar vd., 2023). Bu sistemlerde, nem tutucu madde kaplı bir tekerlek, nemli proses havasından su buharını emerek işlemekte; tekerleğin dönmesiyle rejenerasyon ve nem alma süreçleri eşzamanlı olarak gerçekleştirilmektedir (Abd-Elhady vd., 2022). Geleneksel soğutma sistemlerinin aksine, RDW sistemleri çalışma akışkanı olarak havayı kullanmakta ve bu yönüyle çevre dostu bir alternatif sunmaktadır (Fajar & Tokimatsu, 2024).

Ayrıca, bu sistemlerin güneş enerjisi gibi yenilenebilir kaynaklarla entegre edilebilir olması, sürdürülebilirliğini ve yaygınlaşabilirliğini artırmaktadır (Zhang vd., 2024). RDW sistemlerinin performansı, desikant malzeme tipi (Liu vd., 2023), tekerlek dönme hızı (Ma vd., 2023), hava debisi ve rejenerasyon sıcaklığı gibi parametrelerden etkilenmektedir. Hanifah vd. (2021) tarafından yapılan deneysel çalışma, petek yapısı olmayan yeni nesil bir RDW sisteminin nem oranını 0.0205 kg/kg seviyesinden 0.0182 kg/kg'a düşürebildiğini ortaya koymuştur. Benzer şekilde, Ge vd. (2009) tarafından geliştirilen iki aşamalı RDW sistemi, tek aşamalı sistemlere kıyasla daha yüksek verimlilik göstermiştir.

Hava hızının (fan hızının) RDW performansı üzerindeki etkisi de önemlidir. 2–4 m/s aralığındaki hava hızları, nem alma verimi ve basınç kaybı açısından optimum değerler olarak kabul edilmektedir (Singh & Das, 2023). Düşük hava hızları, desikant ile temas süreci uzatarak nem alma verimliliğini artırsa da hava değişim hızını sınırlar; yüksek hızlar ise bu temasta azalmaya sebep olur. Bu nedenle, değişken fan hızı kontrolü ile çevresel şartlara bağlı dinamik çalışma stratejileri geliştirilmelidir.

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Çark Tipi Nem Alma Sistemleri

Çark tipi nem alma sistemleri, özellikle sıcak ve nemli iklimlerde iç mekân konforunu artırmak amacıyla geliştirilen yenilikçi HVAC çözümleri arasında yer almaktadır. Bu sistemler, iç ortama giren havanın nemini alarak daha düşük bağıl nem değerleriyle daha sağlıklı ve konforlu yaşam alanları sunmaktadır. RDW sistemleri, enerji verimliliği yüksek yapısı sayesinde geleneksel klima sistemlerine kıyasla %50'ye varan oranlarda daha az enerji tüketimi sağlayabilmektedir (Kabeel, 2007).

Çark tipi nem alma sistemleri, özellikle sıcak ve nemli iklimlerde iç mekân hava kalitesini iyileştirmek ve termal konforu sağlamak amacıyla geliştirilmiş, enerji verimliliği yüksek HVAC sistemleridir. Bu sistemler, geleneksel soğutma sistemlerinin yüksek elektrik tüketimine alternatif olarak, çevre dostu çalışma prensipleriyle öne çıkmaktadır (Cuce vd., 2025). RDW sistemlerinin temel çalışma mantığı, dışarıdan alınan sıcak ve nemli havanın bir desikant tekerleğinden geçirilerek neminin uzaklaştırılması ve sonrasında soğutularak iç ortama verilmesi esasına dayanmaktadır.

Sistem, dört temel işlemi sırasıyla gerçekleştirir: (1) hava alımı, (2) nem giderme, (3) soğutma, (4) rejenerasyon (yeniden kurutma). Nem alıcı görevindeki döner tekerlek, genellikle silika jel ya da zeolit gibi katı higroskopik maddelerle kaplı petek yapıda olur (Cuce vd., 2025). Desikant tekerlek nemle doyduğunda, ısıtılmış rejenerasyon havasıyla kurutularak tekrar kullanılabilir hale getirilir. Bu döngüsel süreç, sistemi sürekli çalışabilir ve verimli kılar (Ge vd., 2022).

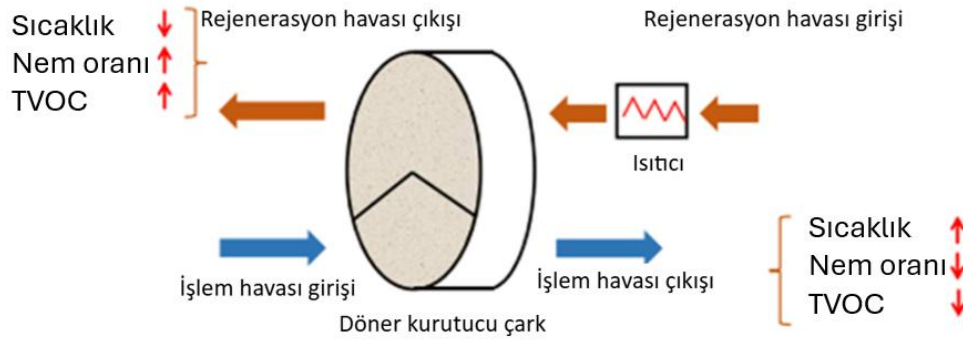
RDW sistemleri, düşük kaliteli enerji kaynaklarıyla (atık ısı, güneş enerjisi vb.) çalışabilmesi ve sürekli taze hava sağlayabilmesiyle çevreci uygulamalar arasında öne çıkmaktadır (Kabeel, 2014). Ayrıca geleneksel klima sistemlerine göre %50'ye varan elektrik tasarrufu sağlayabildiği bildirilmektedir (Su vd., 2021).

1.1.1. Tek Kademeli Çark Tipi Nem Alma Sistemleri

Tek kademeli sistemler yalnızca bir adet döner desikant tekerlek içerir. Bu sistemde dış hava tekerlekten geçerek nemini kaybeder ve soğutularak ortama verilir. Genellikle daha basit uygulamalar için uygundur. Rejenerasyon ve proses hava oranı

çoğunlukla 3:1 veya 2:1:1 (rejenerasyon: kapalı boş: nem alma) şeklindedir (Cuce vd., 2025).

Ge vd. (2018) silika jel esaslı çark tipi nem alma sisteminin hem nem hem de uçucu organik bileşik (TVOC) giderim performansını deneysel olarak değerlendirmiştir. Elde edilen bulgulara göre, TVOC ve nem giderimi için gerekli rejenerasyon sıcaklık aralığı birbiriyle uyumlu olup, özellikle 100 °C üzerindeki sıcaklıklar her iki süreçte yüksek verimlilik sağlamaktadır. Düşük TVOC konsantrasyonlarında sistemin nem giderim kapasitesi sabit kalırken, yüksek bağıl nem seviyeleri hem TVOC hem de nem adsorpsiyonunu olumsuz yönde etkilemektedir. Bu durum, adsorban yüzeyindeki gözeneklerin su buharı tarafından işgal edilmesiyle açıklanabilir. Deneysel koşullar altında, sistem performansı TVOC konsantrasyonu, hava debisi, bağıl nem oranı ve rejenerasyon sıcaklığına bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Dolayısıyla, pratik uygulamalarda desikant sistem tasarımı yapılırken, nem kontrolü açısından ortam bağıl nemi, hava kalitesi kontrolü açısından ise hem bağıl nem hem de kirletici yükü dikkate alınmalıdır. Çalışmada kullanılan sistemin temel prensibi ve hava akış yönleri ise Şekil 1'de şematik olarak sunulmuştur.

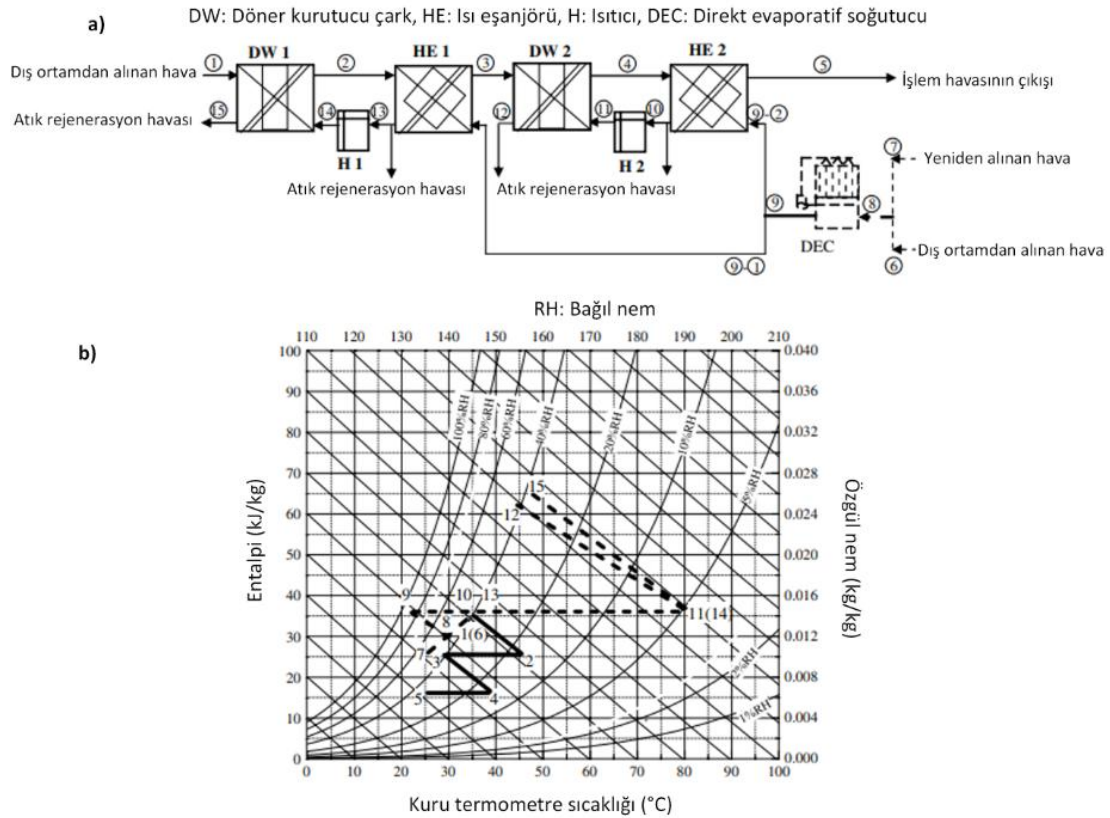


Şekil 1. Döner kurutucu tekerleğinin hava işleme ünitesi olarak şematik görünümü

1.1.2. Çift Kademeli Çark Tipi Nem Alma Sistemleri

Bu sistemlerde iki adet desikant tekerlek ardışık olarak konumlandırılır. Hava ilk tekerlekten geçtikten sonra ikinci tekerleğe aktarılır ve daha etkili nem alma sağlanır. Yüksek nemli veya hassas ortamlar (hastane, eczacılık vb.) için uygundur. İki kademeli sistemlerin nem alma verimliliği daha yüksek olmakla birlikte, enerji tüketimi ve fiziksel büyüklüğü de artmaktadır (Ge vd., 2022).

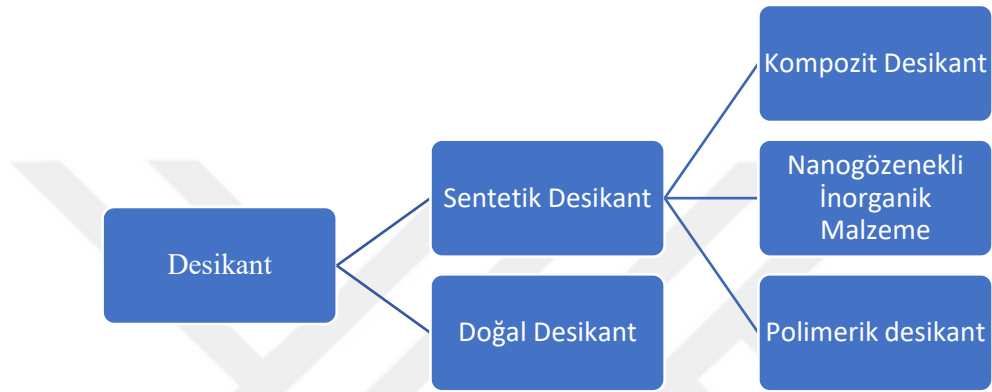
Ge vd. (2009) silika jel-haloid bileşik esaslı iki kademeli döner kurutucu soğutma sisteminin (TSRDC) deneysel olarak performansını değerlendirmiştir. Testler, hem ARI yaz koşulları hem de Şanghay gibi aşırı nemli ve sıcak iklimlerde yürütülmüş ve sistemin düşük rejenerasyon sıcaklıklarında yüksek nem giderimi sağladığı görülmüştür. Tek kademeli sistemlere kıyasla TSRDC sistemi, 65-90 °C aralığında çalışarak benzer nem giderim kapasitesine daha düşük enerji girdisiyle ulaşmakta ve bu sayede düşük kaliteli ısı kaynakları (ör. güneş enerjisi, atık ısı) etkin şekilde değerlendirilebilmektedir. Yüksek termal performans katsayısı değerlerine özellikle 70-80 °C rejenerasyon sıcaklıklarında ulaşılmıştır. Giriş havası nem oranının artırılması, sistemin nem giderim kapasitesi ve termal performansını önemli ölçüde iyileştirirken; rejenerasyon havasının düşük sıcaklık ve nem içeriği de verimliliği artırmaktadır. Sistemin temel prensip akış şeması ve termodinamik süreci Şekil 2’de gösterildiği gibidir.



Şekil 2. (a) İki aşamalı çark tipi nem alma soğutma sisteminin şematik şekli ve (b) psikrometrik grafikte gösterilen tipik işlem

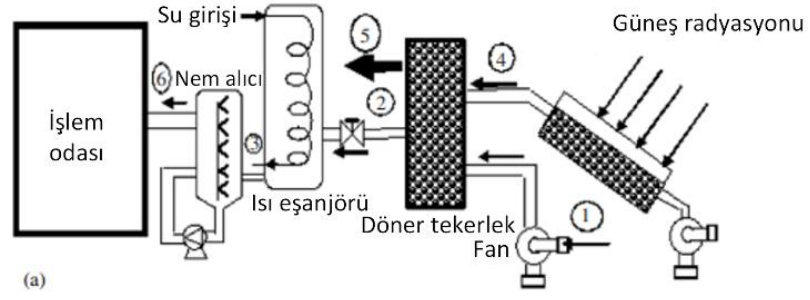
1.1.3. Kurutucu Tekerlek Malzeme Türleri ve Yatak Tipi

RDW sistemleri, geleneksel soğutma sistemleriyle entegre çalışarak hibrit yapılar oluşturabilir. Desikant tekerlek havanın gizli nem yükünü alırken, klasik klima sistemi hissedilen sıcaklığı kontrol eder. Bu sayede soğutma yükü azalır ve COP artar. Bu sistemlerde silika jel, kalsiyum klorür (CaCl_2), lityum klorür (LiCl) ve moleküler elek (MS) gibi çeşitli desikant kombinasyonları kullanılmaktadır (Cuce vd., 2025). Mevcut kurutucuların sınıflandırılması Şekil 3'de sunulmaktadır.



Şekil 3. Mevcut nem gidericilerin şematik gösterimi

Kabeel (2006) silika jel dolgu malzemeli döner desiccant tekerleğin çeşitli rejenerasyon sıcaklıklarında (60-120 °C), farklı bağıl nem koşullarında (35-75%) ve değişen işlem havası debilerinde (400-600 m³/h) gösterdiği nem giderim performansını deneysel olarak incelemiştir. En yüksek nem giderim kapasitesi, %75 bağıl neme ve 120 °C rejenerasyon sıcaklığına ulaşıldığında 9.13 g/kg olarak ölçülmüş; sistemin COP değeri ise bu koşullarda 1.03 olarak belirlenmiştir. COP, rejenerasyon sıcaklığı azaldıkça artış göstermiş; örneğin 60 °C’de COP 1.34 değerine kadar çıkmıştır. Ayrıca, rejenerasyon havasının bağıl nem oranı %30’a düşürüldüğünde, nem alma kapasitesi %19 oranında iyileşmiştir. İşlem havası debisinin artırılması ise nem giderim miktarını artırsa da COP üzerinde sınırlı etki göstermiştir. Genel olarak, 80-100 °C aralığında hem yüksek nem giderimi hem de COP bakımından optimum performans elde edilmiştir. Tekerlek yapısı ve hava akış yönleri ise sistem konfigürasyonu açısından Şekil 4’te verilmiştir.



Şekil 4. (a) Önerilen sistemin şeması, (b) Deneysel kurulumun görünümü

Tablo 1. Farklı yapılardan oluşan tekerleklerin sistem parametrelerine etkisi

Nem Alıcı	Nem Alma Yatak Tipi	Giren Sıcaklık (°C)	Giren Bağıl Nem (%)	Rejenerasyon Sıcaklığı (°C)	DCOP	Nem Alma (g/kg)
Silika jel	Petek Tekerlek	28	40	100	1.8	4.0
Silika jel + Lityum klorür	Petek Tekerlek	28	40	100	3.3	6.1
Silika jel + Lityum klorür	Petek Tekerlek	28	42	100	1.7	3.2
Silika jel + Polinivil alkol	Petek Tekerlek	28	72	100	2.1	1.9

Tablo 1 (Devam). Farklı yapılardan oluşan tekerleklerin sistem parametrelerine etkisi

Silika jel + Polinivil alkol	Petek Tekerlek	28	72	100	2.1	1.9
Aktif alüminyum	Doldurma Formunda	30	70	40	25 0.9	1.1 2.1
Poliakrilik asit + Aktif alüminyum	Doldurma Formunda	16-33	65-78	25-40	3.21	-
Poliakrilik asit	Doldurma Formunda	30	70	50	-	1.31
sodyum tuzu	Doldurma Formunda	25-30	75	60	0.45-0.5	1.2
Silika jel + Sodyum poliakrilat	Doldurma Formunda	16	45	40-50	-	7.0
Silika jel + Sodyum poliakrilat	Doldurma Formunda	30	70	50	-	2.2

1.2. Literatür Özeti

Ge vd. (2012) tarafından geliştirilen tek rotor iki kademeli döner desikant soğutma sistemi (OTSDC), geleneksel çift tekerlekli sistemlere kıyasla benzer performansı yaklaşık yarı hacimde sağlayabilen yenilikçi bir tasarımıdır. Deneysel çalışmalar, yalnızca bir desikant tekerleğiyle iki aşamalı nem alma işleminin başarılı bir şekilde gerçekleştirilebildiğini göstermektedir. Farklı tekerlek kalınlıkları (40, 70, 100 mm) ve dönme hızları (2–20 r/h) altında yapılan testlerde, 100 mm kalınlığındaki tekerlek en yüksek nem alma kapasitesine ($D \approx 9.52$ g/kg, $T_{rej} = 60$ °C) ve termal performans katsayısına (≈ 1.17) ulaşmıştır. Optimal dönme hızı 100 mm kalınlık için 4–8 r/h arasında belirlenmiş ve daha ince tekerleklerde bu değer artmıştır. Rejenerasyon sıcaklığı arttıkça nem alma kapasitesi yükselmekte, ancak termal performans katsayısı düşmektedir. Sistem, tek kademeli döner desikant sistemlerle karşılaştırıldığında daha düşük rejenerasyon sıcaklığında daha yüksek termal performans katsayısı sunmakta ve bu yönüyle düşük kaliteli ısı kaynaklarıyla çalışma imkânı sağlamaktadır. Elde edilen sonuçlar, OTSDC sisteminin düşük/sıfır karbonlu bina uygulamaları için yüksek enerji verimliliği ve kompakt tasarımıyla oldukça uygun olduğunu ortaya koymaktadır.

Angrisani vd. (2012) tarafından yapılan deneysel çalışmada, silika jel esaslı döner desikant çarkın nem alma ve termal performansı, çeşitli dış hava koşulları ve

rejenerasyon parametreleri altında analiz edilmiştir. Rejenerasyon için yaklaşık 65 °C sıcaklığında mikrokojeneratör destekli düşük kaliteli ısıl enerji kullanılmıştır. Testlerde dış hava debisi sabit tutulmuş ve rejenerasyon hava debisi ile sıcaklığı değiştirilerek nem alma kapasitesi, nem alma etkinliği, nem alma performans katsayısı ve duyulur ısı oranı parametreleri değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, 62.7 °C sabit rejenerasyon sıcaklığında, rejenerasyon/proses hava debisi oranı 0.5'ten 1.0'a çıkarıldığında nem alma kapasitesi 2.5 kg/s'ten 3.7 kg/s'e yükselmiştir. Ancak rejenerasyon termal gücü sabit tutulduğunda bu oran arttıkça nem alma kapasitesi ve etkinliği azalmış, bu da rejenerasyon sıcaklığının, rejenerasyon hava debisine kıyasla nem alma performansı üzerinde daha belirleyici olduğunu göstermiştir. Nem alma performans katsayısı, rejenerasyon sıcaklığı 47 °C'den 65 °C'ye çıkarıldığında 0.2'den 0.6'ya kadar yükselmiş, ancak yüksek rejenerasyon debileri bu oranı tekrar düşürmüştür. Dış hava bağıl nem oranının artmasıyla nem alma kapasitesi ve etkinliği artarken, duyulur ısı oranı düşmüştür. Deneysel veriler ile üretici katalog verileri arasındaki farkların yüzde 10'un altında kaldığı ve ortalama kare hata değerlerinin düşük olduğu görülmüştür. Sonuç olarak, düşük sıcaklıkta çalışan döner desikant sistemlerinin, özellikle kojenerasyon ya da güneş enerjisi gibi serbest ısıl kaynaklarla entegre edildiğinde, enerji verimliliği açısından son derece uygun çözümler sunduğu ortaya konmuştur.

Desikant bazlı nem alma sistemleri, düşük sıcaklıklı ısı kaynaklarıyla çalışabilme özellikleri sayesinde geleneksel buhar sıkıştırırmalı sistemlere çevreci bir alternatif sunmaktadır. Enteria vd. (2010) gerçekleştirdiği deneysel çalışmada, 300 mm çapında ve 100 mm kalınlığındaki silika jel kaplı döner desikant çark, 100 m³/h ve 200 m³/h hava debilerinde, 60 °C, 70 °C ve 80 °C rejenerasyon sıcaklıkları altında test edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre nem alma kapasitesi ve rejenerasyon kapasitesi 0.3–1.0 kg/h arasında değişmiş; 200 m³/h debide ve 80 °C rejenerasyon sıcaklığında 50 rph çark hızı ile maksimum verim elde edilmiştir. Nem kütle dengesi %95–105 ve toplam enerji dengesi %90–110 arasında seyrederek sistemin deneysel doğruluğunu kanıtlamıştır. Performans göstergeleri olarak hesaplanan COP_{gizli} , $COP_{duyulur}$ ve COP_{toplam} değerleri sırasıyla yaklaşık 0.2, 0.5 ve 0.3 olarak bulunmuş, sisteme ısı çarkının eklenmesiyle bu değerler neredeyse iki katına çıkarak enerji geri kazanımının sistem verimliliğini belirgin şekilde artırdığı gözlemlenmiştir. Isı çarkı

etkinliği ise düşük hava debilerinde %70–80 seviyelerine ulaşmış, bu da özellikle düşük debili uygulamalarda ısı geri kazanımının performans üzerindeki olumlu etkisini ortaya koymuştur. Elde edilen sayısal veriler, desikant sistemlerin performans karakteristiklerinin değeriendirilmesinde ve diğer çalışmalara karşılaştırmalı referans oluşturulmasında değeri bir kaynak teşkil etmektedir.

Nem alma sistemleri, özellikle ilaç üretim tesisleri, batarya imalat alanları, buz pistleri ve elektronik üretim tesisleri gibi derin nem alma gerektiren ortamlarda, iç hava kalitesinin ve proses güvenliğinin sağlanmasında kritik rol oynamaktadır. Geleneksel buharlı soğutma sistemlerinin çığ noktası 0 °C altına inememesi, bu tür uygulamalar için döner desikant çark sistemlerini öne çıkarmaktadır. Ma vd. (2023) yürüttüğü deneysel çalışmalarda, RDW sisteminin düşük nemli hava koşullarında yüksek bağıl nem alma kapasitesi (%77.4'e kadar) gösterdiği belirlenmiştir. Özellikle 6 °C sıcaklık ve 4 g/kg mutlak nemdeki proses havası, 75-105 °C aralığında 4 g/kg yenileme havası ile beslendiğinde çıkış havası nemi 0.60 g/kg seviyelerine kadar düşebilmiştir. Bu durum, sistemin yüksek adsorpsiyon itkisi oluşturabildiğini ve özellikle düşük giriş neminde daha etkin çalıştığını göstermektedir. Bununla birlikte, düşük nem koşullarında izentalpik sapma %26.4'e, sıcaklık fazlası sapması ise %35.2'ye ulaşmış, bu da sistemdeki geri döndürülemez ısı kayıplarının önemli seviyelere çıktığını ortaya koymuştur. Desikant çarkının nem alma performansı, yenileme havası sıcaklığı ve nem oranıyla doğrusal ilişkili olup; örneğin 75 °C yenileme sıcaklığında 4 g/kg nemle %77.4 RDC elde edilirken, 105 °C'ye çıkıldığında bu oran %85.2'ye ulaşmıştır. Bununla birlikte, enerji verimliliğini tanımlayan nem alma performans katsayısı (DCOP), artan sıcaklıkla azalarak 0.45'ten 0.33'e düşmüştür. Bu sonuç, yüksek sıcaklıkların nem alma derinliğini artırırken enerji verimliliğini olumsuz etkileyebileceğini göstermektedir. Ayrıca, sistemin dönüş hızı artırıldıkça izentalpik sapmanın belirgin biçimde arttığını (örneğin 10 r/h hızda η_n : %9.9 iken, 30 r/h'de η_n : %26.7) ve optimum hızın 20 r/h olduğu belirlenmiştir. Sonuç olarak, RDW sistemleri düşük nemli hava koşullarında başarılı bir derin nem alma sağlamakla birlikte, enerji verimliliği ve termodinamik sapmalar göz önünde bulundurularak dikkatle tasarlanmalıdır.

Nem alma, özellikle sıcak ve nemli iklimlerde insan sağlığı ve konforu açısından giderek önem kazanmaktadır; bu kapsamda döner desikant çarkları,

geleneksel buhar sıkıştırırmalı soğutma sistemlerine alternatif olarak öne çıkmaktadır. Yamaguchi ve Saito (2013), silika jel esaslı döner desikant çarklarının hem sayısal hem de deneysel performans analizlerini geniş bir çalışma aralığında gerçekleştirmiştir. Çalışmada, rejenerasyon havası sıcaklığı 50-80 °C, hava yüzey hızı 1-4 m/s, çark kalınlığı 20-400 mm ve dönme hızı 3-200 rph arasında değişen parametrelerle sistem test edilmiştir. Modelleme aşamasında, gözenekli katı yapı içindeki kütle ve ısı difüzyonu ayrı ayrı ele alınmış, giriş bölgesi etkisi CFD analizleri ile detaylı şekilde değerlendirilmiştir. Deneysel sonuçlara göre, en yüksek nem alma performansı 80 °C rejenerasyon sıcaklığı ve yaklaşık 80 rph dönme hızında elde edilmiştir; bu koşullarda giriş-çıkış nem farkı 10 g/kg(k.h.) seviyesine ulaşmıştır. Ortalama bağıl hata, nem oranı farkı için %3.3 ve sıcaklık farkı için %10.8 olarak hesaplanmıştır. Ayrıca, hava yüzey hızı azaldıkça nem alma etkinliği artarken, çıkış sıcaklığı yükselmiştir. Çark kalınlığı arttıkça, daha fazla desikant materyali sayesinde nem alma kapasitesi yükselmiş ancak basınç düşümü de artmıştır. Modelin doğruluğu, çeşitli ölçüm noktalarında yapılan sıcaklık ve nem dağılımı karşılaştırmalarıyla kanıtlanmış, özellikle yüzey difüzyonunun gözenek difüzyonuna kıyasla daha baskın olduğu belirlenmiştir. Tüm bulgular, RDW sistemlerinin enerji verimliliği yüksek, sürdürülebilir nem alma çözümleri sunduğunu ortaya koymaktadır.

Su vd. (2021), yüksek sıcaklık ve nem koşullarının hâkim olduğu kapalı ortamlarda geleneksel soğutmalı nem alma sistemlerinin yüksek enerji tüketimine yol açtığını vurgulayarak, ön soğutmalı ve rejeneratif döner desikant çarkı ile entegre edilmiş gelişmiş bir nem alma sistemi geliştirmiştir. Çalışmada, proses havasının sıcaklığı ve bağıl nemi, $T_{öns}$, T_{rej} ve hava debisi oranı gibi parametrelerin sistem performansına etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, sistemin toplam nem alma kapasitesi, geleneksel soğuk su soğutmalı sistemlere kıyasla en fazla %29.7 oranında artış göstermiştir. En uygun nem alma oranı, rejenerasyon/proses hava debisi oranının %8-20 arasında olduğu durumlarda elde edilmiştir. DCOP değeri 0.36 ile 4.32 arasında değişirken, en yüksek değerler düşük γ ve düşük T_{reg} , yüksek T_{prec} koşullarında gözlemlenmiştir. Termal performans katsayısı, 0.33 ila 1.17 aralığında ölçülmüş ve T_{rej} azaldıkça, $T_{n.a.}$ ve $\phi_{n.a.}$ arttıkça anlamlı şekilde yükselmiştir. Örneğin, T_{proc} 30 °C'den 40 °C'ye çıktığında termal performans katsayısı yaklaşık 0.23 artarken; ϕ_{proc} %60'tan %90'a çıkarıldığında

COP_{th} yaklaşık 0.41 artmıştır. Nem alma farkı en yüksek %29.7 ile 30 °C ve %60 ϕ koşullarında ölçülürken, bu değer 40 °C ve %90 ϕ 'de %14.7'ye düşmüştür. Deneylerde 260 mm çapında, 200 mm derinliğinde ve 300 m³/h debi kapasitesine sahip metal silikat esaslı bal peteği yapıda bir RDW kullanılmış; çark dönüş hızı yaklaşık 0.22 civarındadır. Elde edilen bulgular, sistemin özellikle sıcak ve nemli ortamlarda yüksek verimle çalıştığını ve soğutma yükünü azaltarak enerji verimliliğini önemli ölçüde artırabileceğini göstermektedir.

Abdelgaied vd. (2023) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, geleneksel çark tipi nem alma sistemleri ile çok kademeli silika jel pedleri ve ara soğutmalı yeni nesil bir nem alma sistemi karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Deneyler, yaz mevsiminde Tanta, Mısır ikliminde, 100 °C rejenarasyon hava sıcaklığı ve 240 m³/h proses hava debisi altında gerçekleştirilmiştir. Yenilikçi sistemin çıkış hava sıcaklığı, geleneksel sisteme kıyasla 17.8 ile 23.8 °C arasında daha düşük ölçülmüş; çıkış hava bağıl nemi ise 2.8 ile 5.6 g/kg kuru hava arasında azalma göstermiştir. Geleneksel sistemde ortalama nem alma kapasitesi 5.57 g/kg iken, yenilikçi sistemde bu değer 9.82 g/kg'a ulaşmış ve yaklaşık %70.2 oranında bir artış sağlanmıştır. Benzer şekilde, nem alma performans katsayısı geleneksel sistemde 0.268 iken, yenilikçi sistemde 1.012 olarak hesaplanmış ve %277.6'lık bir iyileşme elde edilmiştir. Elektriksel performans katsayısı geleneksel sistem için 0.343-1.04 aralığında değişirken, yenilikçi sistemde bu değerler 0.956-2.29 aralığına yükselmiş ve maksimum %278.9'luk artış sağlanmıştır. Enerji verimliliği ise geleneksel sistemde %10.58'e kadar çıkabilirken, yenilikçi sistemde %59.83 seviyelerine ulaşmıştır. Tüm bu bulgular, enerji verimliliği açısından yeni sistemin geleneksel döner desikant sistemlere göre önemli üstünlükler taşıdığını göstermektedir.

Yang vd. (2025) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, gemi atık ısısı ile rejenarasyon havası ısıtılan ve deniz suyu ile soğutulan çift kademeli döner çarklı bir nem alma sistemi deneysel olarak incelenmiştir. Deneyler kapsamında, döner çark hızı 6, 8, 10, 12 ve 14 r/h; rejenarasyon sıcaklığı ise 80, 90, 100, 110 ve 120 °C olacak şekilde değiştirilmiş ve bu parametrelerin sistem performansı üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. En yüksek nem alma kapasitesi, 10 r/h çark hızında $\Delta n.a. = 15.43$ g/kg olarak ölçülmüş ve bu noktada nem alma verimi $\eta = 0.66$ 'ye ulaşmıştır. Rejenarasyon sıcaklığı 80 °C'den 120 °C'ye çıkarıldığında $\Delta n.a.$ değeri %34.12

artarak 10.99 g/kg'dan 14.74 g/kg'a yükselmiştir. En yüksek η değeri 110 °C'de 0.65 olarak kaydedilmiş, bu sıcaklığın üzerindeki artışlar sistem veriminde anlamlı bir artış sağlamamıştır. Termodinamik performans katsayısı termal performans katsayısı, çark hızı 10 r/h'de maksimum 0.52 olarak ölçülürken; rejenerasyon sıcaklığının artmasıyla termal performans katsayısı değeri 0.72'den 0.48'e düşmüştür. Bu düşüş, artan enerji ihtiyacını işaret etse de enerji kaynağı olarak gemi atık ısısının kullanılması nedeniyle sistemin toplam enerji verimliliği korunmuştur. Ayrıca geleneksel soğutma sistemleri ile karşılaştırıldığında, iki kademeli nem alma sistemi 35.5 °C sıcaklık ve %59.7 bağıl nemdeki dış hava koşullarında 20000 m³/h hava debisi için yalnızca 141.39 kW soğutma yüküne ihtiyaç duymuş; bu da 249.31 kW gerektiren klasik kompresörlü sistemle karşılaştırıldığında %43.3 oranında enerji tasarrufu anlamına gelmiştir. Elde edilen bulgular, sistemin optimum çark hızı ve rejenerasyon sıcaklığı değerlerinin sırasıyla 10 r/h ve 110 °C olduğunu göstermekte olup, yüksek nemli deniz ortamlarında enerji verimliliğini artırmak amacıyla bu koşulların tercih edilmesi gerektiği sonucuna varılmıştır.

Mehare vd. (2025) tarafından gerçekleştirilen bu deneysel çalışmada, moleküler elek esaslı çark tipi nem alma sistemi, kondenser çıkışından elde edilen atık ısı ve elektrikli rezistans desteğiyle oluşturulan çiftli rejenerasyon modunda test edilmiştir. 0.0170-0.0194 kg/kg aralığında özgül nem değerine ve 28-34 °C sıcaklık aralığına sahip işlem havası ile gerçekleştirilen testlerde, nem alma etkinliği, rejenerasyon etkinliği, nem alma kapasitesi ve rejenerasyon oranı gibi performans parametreleri incelenmiştir. Adsorpsiyon segmentinde işlem havası sıcaklığı arttıkça nem alma miktarında azalma gözlenmiş, örneğin giriş sıcaklığının artışıyla birlikte nem alma kapasitesinde yaklaşık %20'ye varan düşüşler kaydedilmiştir. Buna karşın, işlem havasının giriş bağıl nemi ve özgül nemi arttıkça, hem nem alma miktarı hem de sistemin nem alma verimi artış göstermiştir. Rejenerasyon segmentinde ise hava giriş sıcaklığı 55-62 °C aralığında değiştirilmiş ve sıcaklığın artmasıyla rejenerasyon etkinliğinin ve RR değerlerinin yükseldiği belirlenmiştir. Özellikle 62 °C'lik rejenerasyon sıcaklığında nemin daha etkin şekilde uzaklaştırıldığı ve moleküler elek yüzeyinin daha kısa sürede rejenere edildiği vurgulanmıştır. Ayrıca, rejenerasyon havasının özgül neminin düşük olduğu koşullarda, çark yüzeyinde biriken nemin daha kolay desorbe olduğu ve bu durumun çarkın yeniden nem alma kapasitesini maksimize

ettiği tespit edilmiştir. Çalışma sonuçları, moleküler elek malzemesinin düşük sıcaklıkta yüksek nem adsorpsiyon kabiliyetine sahip olduğunu ve bu sayede %7.56'ya varan belirsizlik oranları dahilinde dahi verimli nem alma sağladığını ortaya koymuştur. Sonuç olarak, çiftli rejenerasyon moduna sahip döner kurutucu sistemlerin, nem kontrolü ve enerji verimliliği açısından geleneksel sistemlere kıyasla önemli avantajlar sunduğu vurgulanmıştır.

Lin vd. (2025), subtropikal iklim koşullarına sahip Guangzhou kentinde, güneş enerjisiyle çalışan döner desikant çarklı (RDW) bir iklimlendirme sisteminin sayısal performans analizini gerçekleştirmiştir. TRNSYS simülasyon yazılımı kullanılarak yürütülen bu çalışmada, sıcaklık ve nemin bağımsız kontrolüne olanak tanıyan sistemin bir ofis binasında Mayıs–Ekim ayları arasındaki soğutma sezonundaki enerji verimliliği değerlendirilmiştir. Sonuçlar, sistemin ortalama elektriksel performans katsayısının (COPE) 3.8 olduğunu ve geleneksel sistemlere kıyasla yaklaşık %24.7 oranında enerji tasarrufu sağladığını göstermektedir. Ayrıca sistemin yıllık karbon salımını 744 kg azaltabildiği, güneş enerjisiyle tam kapasite çalışabildiği gün oranının %72'ye ulaştığı ve ortalama güneş enerjisi toplama veriminin %45 olduğu belirlenmiştir. Bu bulgular, güneş enerjisiyle çalışan RDW sistemlerinin yüksek sıcaklık ve nem içeren iklim koşullarında enerji verimliliği ve çevresel sürdürülebilirlik açısından önemli bir alternatif sunduğunu ortaya koymaktadır.

Yüksek nemli bölgelerde iç mekân konforunun artırılması ve iklimlendirme sistemlerinin enerji verimliliğinin iyileştirilmesi amacıyla nem alma sistemlerinin önemi giderek artmaktadır. Bu bağlamda Verma ve Yadav (2025) tarafından gerçekleştirilen deneysel çalışmada, orta düzeyde güneş ışıınımına sahip bölgelerde çalışacak şekilde tasarlanmış, döner desikant çarklı ve güneş enerjisi destekli bir nem alma sistemi test edilmiştir. Sistem, 550-650 W/m² aralığında güneş ışıınımı altında 57.9 °C ile 70.3 °C arasında değişen rejenerasyon hava sıcaklıkları elde edebilecek şekilde geliştirilmiştir. Silika jel kaplı döner çark, 1:1 oranında proses ve rejenerasyon bölgesi ayrımı ile konumlandırılmış ve 20 rph çark dönme hızı ile optimum performans sağlanmıştır. Bu koşullar altında nem uzaklaştırma miktarı 0.050 kg/dakikaya, DCOP değeri 0.61'e ve ekserji verimi %11.35'e ulaşmıştır. Deneysel bulgular, çark dönme hızının artırılması ile başlangıçta nem alma kapasitesinin ve DCOP'un yükseldiğini, ancak 20 rph sonrası sabitlenme eğilimi gösterdiğini ortaya koymuştur. Rejenerasyon

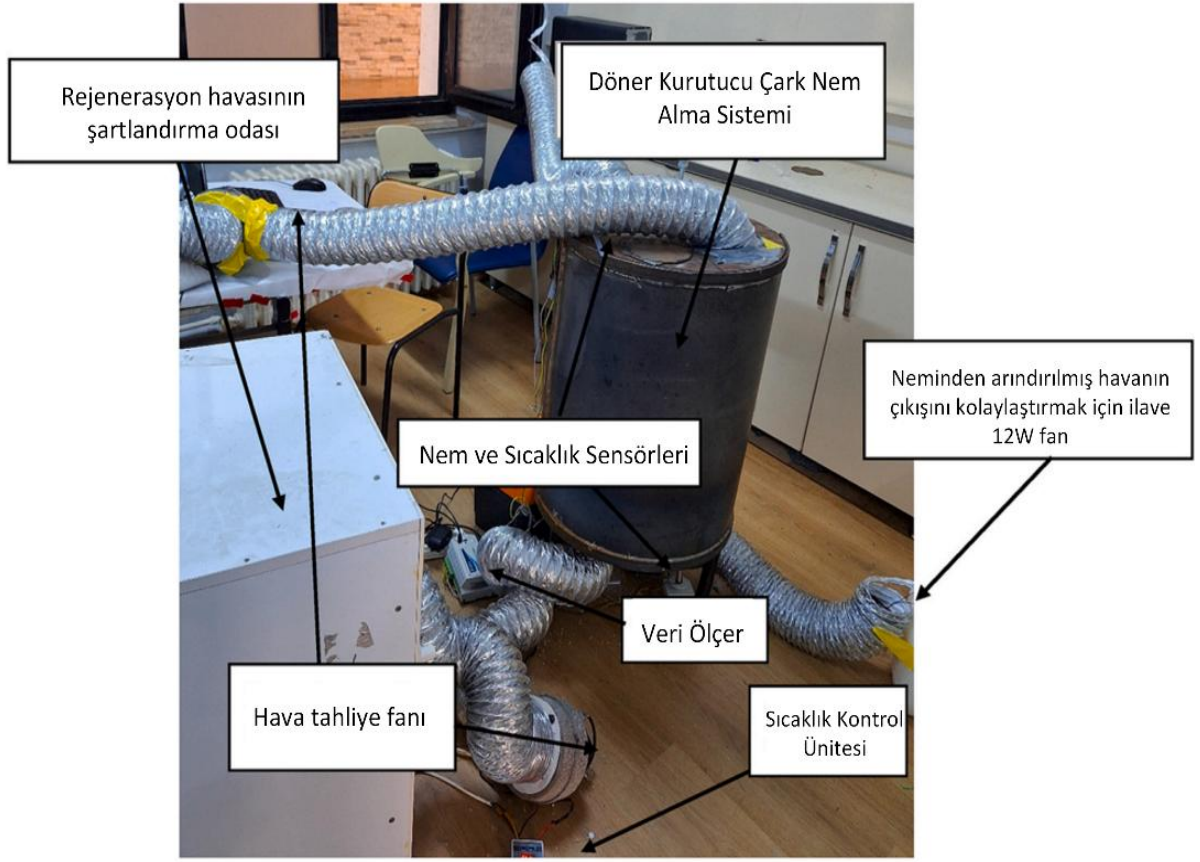
sıcaklığının artırılması ise nem alma kapasitesinde ve ekserji veriminde artış sağlarken, DCOP değerinde azalma eğilimine neden olmuştur; bu durum 330 K sıcaklıkta maksimum 0.6 DCOP değeri ile doğrulanmıştır. Yeniden üretim havası debisi artırıldıkça nem alma miktarı önce artmış, ancak 8 kg/dakika'nın üzerinde temas süresinin azalmasıyla bu artış sınırlı kalmıştır; bu nedenle optimum rejenerasyon hava debisi 8 kg/dakika olarak belirlenmiştir. Benzer şekilde, proses hava debisindeki artış 9 kg/dakikaya kadar DCOP ve nem alma oranında iyileşme sağlarken, daha yüksek debilerde verim düşmüştür. Elde edilen veriler, döner desikant sistemlerinin düşük sıcaklıklı güneş kaynakları ile başarılı şekilde çalışabileceğini ve nem alma kapasitesi ile enerji verimliliğinin rejenerasyon sıcaklığı, hava debileri ve çark hızına bağlı olarak optimize edilebileceğini göstermiştir. Bu bağlamda, çalışmada geliştirilen parabolik oluklu güneş kollektörleri ve vakumlu tüplü güneş kollektörleri entegreli sistemin, orta şiddette güneş ışıınımına sahip bölgelerde enerji verimli nem alma uygulamaları için uygun olduğu sonucuna varılmıştır.

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

Bu tez çalışmasında, çevresel sürdürülebilirliği ve ekonomik uygulanabilirliği ön planda tutmak amacıyla geri dönüştürülmüş ve düşük maliyetli malzemeler kullanılarak özel olarak tasarlanmış bir çark tipi nem alma sisteminin termodinamik performans parametreleri detaylı bir şekilde deneysel yöntemlerle araştırılmıştır. Gerçekleştirilen deneysel testler sonucunda elde edilen veriler doğrultusunda sistemin nem alma kapasitesi, çıkış havası sıcaklığı, rejenerasyon verimi ve genel enerji performansı gibi temel büyüklükler değerlendirilmiş; farklı işletme koşulları altında elde edilen sonuçlar karşılaştırmalı olarak analiz edilerek sistemin etkinliği ve uygulanabilirliği hakkında kapsamlı yorumlamalarda bulunulmuştur.

2.1. Deney Düzenekinin Tanımı

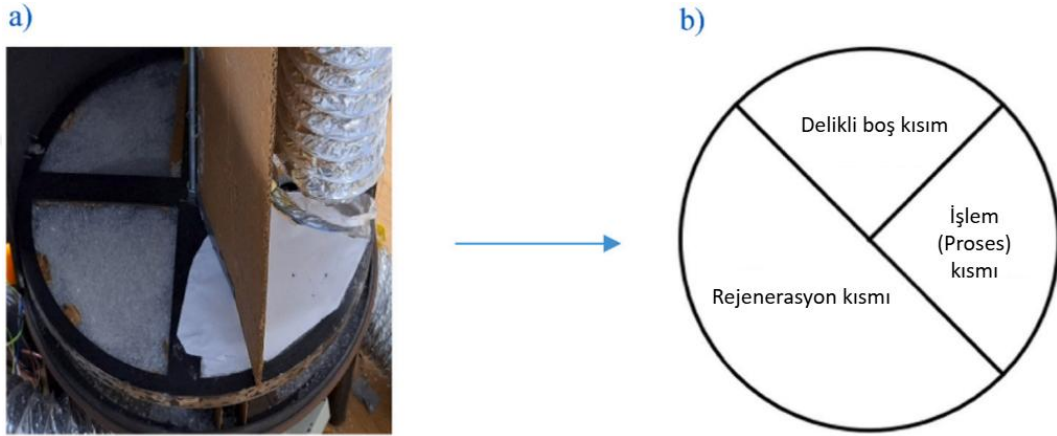
Bu çalışmada, geri dönüştürmede kullanılan materyaller kullanılarak bir çark tipi nem alma sistemi tasarlanmış ve prototipi imal edilerek deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Deneysel düzenek, Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Düşük/Sıfır Karbon Enerji Teknolojileri Laboratuvarı'nda kurulmuştur. Deneysel testler 15 Temmuz 2024 – 20 Ekim 2024 tarihleri arasında aynı laboratuvar ortamında gerçekleştirilmiştir. Her bir deney sürecinde mevcut ilgili koşullar kayıt altına alınmış ve ilgili ölçümler sistematik olarak yapılmıştır.



Şekil 5. Çark tipi nem alma sisteminin genel görünümü

Şekil 5’te deney düzeneğinin genel yerleşimi ayrıntılı olarak sunulmuştur. Bu görselde, çark tipi nem alma sistemine ait tüm temel bileşenlerin konumlandırılması açıkça görülmektedir; özellikle hava tahliye fanları, hava giriş ve çıkış noktaları ile sıcaklık, bağıl nem ve hava debisi gibi parametreleri ölçmek üzere yerleştirilmiş ölçüm cihazlarının düzeni sistemin anlaşılabilirliğini artırmaktadır. Deney düzeneğinin yapısal bütünlüğü, 1 mm et kalınlığına sahip galvanizli sac malzeme kullanılarak sağlanmış olup, bu malzeme hem mekanik dayanıklılık hem de termal yalıtım açısından uygunluk arz etmektedir. Sistemde oluşabilecek hava kaçaklarını en aza indirmek amacıyla, birleşim noktalarında ve panel aralıklarında uygun izolasyon uygulamaları gerçekleştirilmiştir. Şekil 6’da ise, döner çark bölgesi çevresel yönde dört eşit parçaya ayrılmış şekilde gösterilmiştir; bu bölümler 2:1:1 oranında sırasıyla rejenerasyon alanı, işlem (proses) alanı ve iki adet delikli geçiş boşluğu olarak yapılandırılmıştır. Rejenerasyon bölgesi, higroskopik malzemenin önceki çevrimde tuttuğu nemi yüksek sıcaklıktaki hava aracılığıyla bırakmasını sağlarken; proses

bölgesi, dış ortamdan alınan nemli havanın desikant yapı aracılığıyla kurutulmasını sağlayan aktif nem alma bölgesidir. Bu iki bölge arasında yer alan hafif delikli boşluk alanları ise, sistemdeki hava akışının yönlendirilmesi ve dış ortam etkilerinin izole edilmesi amacıyla tasarlanmıştır. Söz konusu bölmeler, deneysel ölçümler sırasında yalnızca aktif desikant alanlarının performansını değerlendirmeye olanak tanımakta, böylece elde edilen grafiksel ve sayısal analizlerin daha doğru ve tutarlı şekilde yorumlanmasına katkı sunmaktadır.



Şekil 6. a) Kurutma tekerleği b) ve Ayrılmış parçalarının şematik gösterimi

Sistemin döndürülmesi, 12 W gücünde bir blender motorunun kurutucu tekerlek yüzeyine kontrollü sürtünme yoluyla temas ettirilmesiyle sağlanmaktadır.

Şekil 7’de, bu tez çalışmasının ilk aşamasında geliştirilen sistem tasarımına ait şematik gösterim sunulmaktadır. Başlangıçta teorik olarak yeterli görülen bu tasarım, deneysel uygulamalar sırasında ortaya çıkan performans düşüklüğü nedeniyle revize edilmiştir. Özellikle iç hacme alınan hava miktarının yüksek olması, döner kurutucu çarkın nemi yeterli düzeyde uzaklaştıramamasına yol açmıştır. Yapılan teknik değerlendirmeler sonucunda, bu performans kaybının temel nedenlerinden birinin çarkın et kalınlığı ile ilişkili olduğu tespit edilmiştir. Et kalınlığı sınırlı olan çark, yüksek debili hava akışında nemi yeterince adsorbe edememiş, bu da çıkış havasında istenen bağıl nem seviyelerinin sağlanamamasına neden olmuştur. Bu durum üzerine sistem tasarımı yeniden ele alınarak, Şekil 5’te gösterilen nihai hâline dönüştürülmüştür. Yeni tasarımda, içeri alınan hava hacmi azaltılmış ve böylece nemli havanın çarkla temas süresi artırılarak nem alma etkinliği geliştirilmiştir. Ayrıca,

sistemdeki enerji ve hava kaçaklarını minimize etmek amacıyla, ilk tasarımda yer alan dikdörtgen gövde formundan vazgeçilmiş ve döner çarkın geometrik yapısına uyumlu dairesel form benimsenmiştir. Bu yapısal değişiklikler sonucunda, sistem performansında anlamlı bir iyileşme sağlanmış ve nem alma verimliliği artırılmıştır.

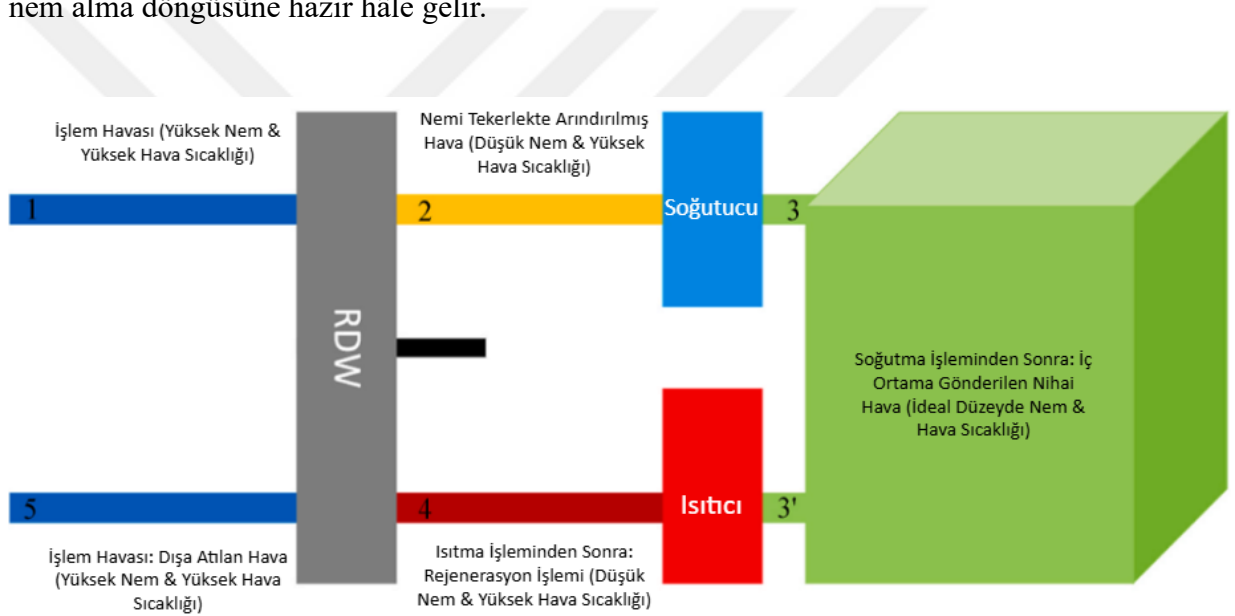


Şekil 7. Tez çalışması kapsamında tasarımı yapılarak prototip üretimi gerçekleştirilen döner kurutucu çark esaslı ilk nem alma sistemi

Şekil 8’de, soğutmalı nem alma prosesine ait sistemin şematik gösterimi sunulmaktadır. Bu sistemin klasik soğutma çevrimlerinden temel farkı, hava içerisindeki nemin uzaklaştırılmasını sağlayan döner kurutucu çarkın entegre edilmesiyle hem nem alma hem de soğutma işlemlerinin eşzamanlı olarak gerçekleştirilebilmesidir. Sistemde yer alan döner kurutucu çark, higroskopik özellik gösteren bir desikant malzeme ile kaplı olup, ortamdaki nemli havanın çark üzerinden geçirilmesiyle havadaki bağıl nem oranı etkin bir şekilde düşürülmektedir. Böylece, özellikle iklimlendirme uygulamalarında istenilen konfor şartlarına ulaşılmasına katkı sağlanmakta, aynı zamanda enerji tüketiminin de azaltılması hedeflenmektedir. Geleneksel buhar sıkıştırmalı sistemlerde yalnızca sıcaklık kontrolü ön planda iken, bu hibrit yapı sayesinde hem sıcaklık hem de nem parametreleri kontrol altına alınabilmektedir. Ancak bu çalışma kapsamında yalnızca çark tipi nem alma

sisteminin nem alma performansı incelenmiş, soğutma kapasitesi ve buhar sıkıştırılmalı sistemle olan enerji etkileşimi analiz kapsamı dışında bırakılmıştır. Bu tercih, odak noktasının sistemin nem alma etkinliğine yönlendirilmesi ve deneysel ölçüm sonuçlarının bu bağlamda değerlendirilmesi amacını taşımaktadır.

Sistem şu şekilde çalışmaktadır: 1 numaralı noktadan dış ortam havası sisteme alınır; 2 numaralı bölgede döner kurutucu çark vasıtasıyla havanın nemi uzaklaştırılır ve kurutulmuş hava iç ortama iletilir. 3 numaralı kısımda ise iç ortamdan çekilen hava, bir ısıtıcı yardımıyla rejenerasyon için gerekli sıcaklığa yükseltilir. 4 numaralı aşamada, ısıtılmış hava çarkın nem yükünü fiziksel olarak koparabilecek seviyeye ulaşır. Son olarak, 5 numaralı noktada rejenerasyon işlemi tamamlanır ve çark yeniden nem alma döngüsüne hazır hâle gelir.



Şekil 8. Soğutucu destekli çark tipi nem alma sisteminin şematik gösterimi

Bu çalışma kapsamında, sistemin 2 ve 5 numaralı ölçüm noktalarındaki sıcaklık ve bağıl nem değerleri düzenli aralıklarla kaydedilmiştir. Ölçümlerde sıcaklık ve nem sensörü olarak RHT-WM ve RHT-DM modelleri tercih edilmiştir. Hava sirkülasyonunun sağlanabilmesi amacıyla, 84 W gücünde ve belirli debi kapasitesine sahip (275 m³/h) iki adet santrifüjlü üfleme cihazı kullanılmıştır. Elde edilen veriler ışığında, sistemin performans parametreleri termodinamik analiz yöntemleri ile değerlendirilmiş; böylece nem alma ve rejenerasyon süreçlerine ilişkin verimlilik değerleri nicel olarak ortaya konmuştur.

Havadan nem giderme potansiyelini ve tekerlekten nem giderme kapasitesini temsil eden bu denklemler sırasıyla Denklem 1 ve Denklem 2 olarak ifade edilir.

$$W_{n.a.} = \omega_1 - \omega_2 \quad (1)$$

$$W_{rej} = \omega_5 - \omega_4 \quad (2)$$

Nem giderme ve rejenerasyon verimlilikleri sırasıyla Denklem 3 ve Denklem 4'da sunulmaktadır.

$$\varphi_{n.a.} = \frac{\omega_1 - \omega_2}{\omega_1 - \omega_{2,ideal}}, \omega_{2,ideal} \rightarrow 0 \quad (3)$$

$$\varphi_{rej} = \frac{\omega_5 - \omega_4}{\omega_4} \quad (4)$$

Döner Kurutma Tekerlek Nem Alma Sistemlerinde, Performans Katsayısının belirlenmesi, Denklem 5 olarak sunulan denklemin kullanılmasıyla gerçekleştirilir.

$$DCOP = \frac{\rho_a \times \dot{m}_{n.a.} \times h_v \times \Delta\omega_{n.a.}}{1000 \times q_{giriş}}, h_v \rightarrow 2250 \text{ kJ/kg} \quad (5)$$

DCOP hesaplaması için gereken termal enerji tüketimi, Denklem 6'de sunulan denklem kullanılarak belirlenir.

$$\dot{q}_{giriş} = \rho_{hava} \times c_{n.a.,hava} \times \dot{m}_{n.a.} \times (T_{rej,giriş} - T_{rej,çev}) \quad (6)$$

2.2. Deney Düzenekinin Bileşenleri

Deney düzeneği, ana gövde, blender motoru, veri kaydedici birim, sıcaklık ve nem sensörleri, iki adet santrifüj fan, şartlandırma odaları ve döner kurutucu çark olmak üzere yedi temel bileşenden oluşmaktadır. Aşağıda ilgili alt başlıklar altında, bu bileşenlerin teknik özelliklerine ve sistem içindeki işlevlerine ilişkin detaylı bilgiler sunulmuştur.

2.2.1. Ana Gövde

Tasarlanan sistemin ana gövdesi, 1 mm et kalınlığına sahip sac malzeme kullanılarak oluşturulmuştur. Gövde, 1000 mm yüksekliğe ve 500 mm çapa sahip silindirik (yuvarlak) bir dış kabuk formunda tasarlanmıştır. Dış kabuk, yapısal bütünlüğü sağlamak ve dış ortam ile sistem içi arasındaki hava sızıntılarını önlemek amacıyla kaynak yöntemiyle birleştirilmiş, böylece sistemde hava sızdırmazlığı temin edilmiştir. Silindirik gövdenin tam orta eksenine yerleştirilen boylamasına metal bir çubuk aracılığıyla, döner kurutucu çarkın mekanik olarak sisteme entegre edilmesi sağlanmıştır. Bu çubuk hem çarkın dengeli biçimde desteklenmesini hem de motorla

temas hâlinde döndürülmesini mümkün kılmaktadır. Gövdenin üst ve alt yüzeylerine, proses ve rejenerasyon hatlarının giriş-çıkışlarını sağlamak üzere toplam dört adet (ikisi proses, ikisi rejenerasyon) 100 mm çapında bağlantı açıklıkları oluşturulmuştur. Bu açıklıklar, aralarında 100 mm mesafe bırakılacak şekilde konumlandırılmıştır. Her bir bağlantı noktası, hava tahliyesinin güvenli şekilde sağlanabilmesi amacıyla 100 mm çapında aspiratör borularının montajına uygun olacak biçimde tasarlanmıştır. Bu yapı sayesinde sistemde proses ve rejenerasyon hava akışları birbirinden bağımsız olarak yönlendirilebilmektedir. Şekil 9'da, deneysel düzeneğe ait üretilmiş ana gövdenin son durumu görsel olarak sunulmaktadır.



Şekil 9. Sistem ana gövdesi

2.2.2 Blender Motoru

Sistemin çalışmasında döner kurutucu çarkın sürekli ve düşük devirli bir şekilde döndürülmesini sağlamak üzere, 12 ila 24 Volt doğru akım (DC) gerilim

aralığında çalışabilen kompakt yapılı bir DC motor tercih edilmiştir. Bu motor, kurutucu çarkla doğrudan temaslı şekilde konumlandırılmış olup, herhangi bir kayış-palet veya zincir mekanizmasına gerek duyulmaksızın, doğrudan mekanik sürtünme prensibiyle tahrik kuvvetini çarka iletmiştir. Bu sayede sistem, hem yapısal olarak sadeleştirilmiş hem de bakım ihtiyacı azaltılmış bir düzene kavuşmuştur. Seçilen motorun yüksek tork kapasitesine sahip olması, sistemde ilave bir redüktör (dişli küçültme mekanizması) kullanımını gereksiz kılmış, böylece güç aktarımında kayıplar en aza indirgenmiştir. Aynı zamanda bu doğrudan tahrik mekanizması, döner çarkın istenilen sabit dönüş hızında, titreşimsiz ve kararlı biçimde çalışmasını mümkün kılmıştır. Bu durum, özellikle nem alma performansının sürekliliği ve deneysel verilerin güvenilirliği açısından önemli bir avantaj sağlamaktadır. Sistemde kullanılan bu motorun genel görünümü, Şekil 10'da görsel olarak sunulmuştur.

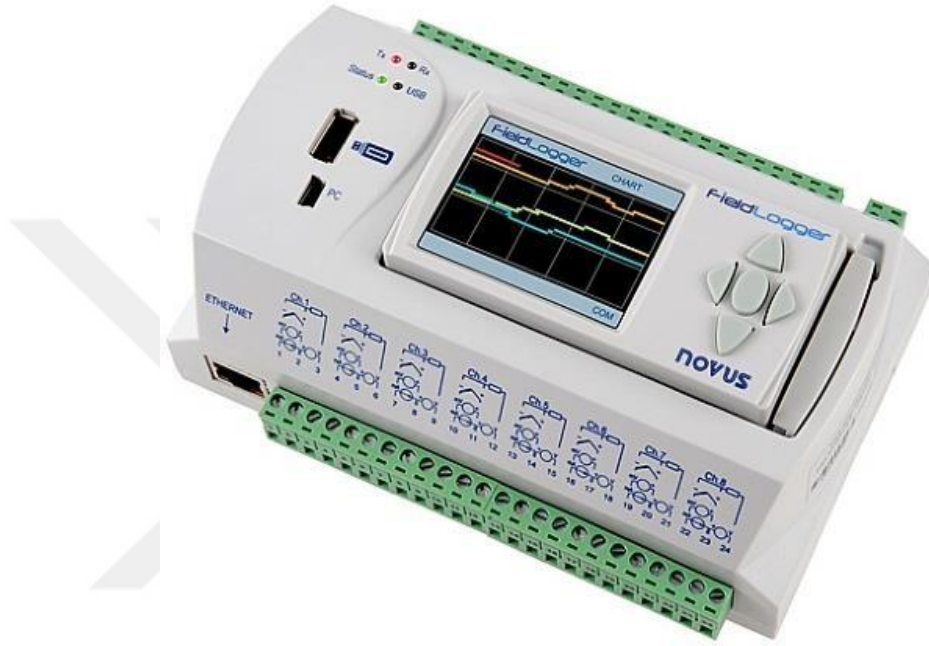


Şekil 10. Blender motor

2.2.3. Veri Kaydedici

Deneysel çalışmalar süresince sistem performansına ilişkin ölçüm verilerinin güvenilir biçimde elde edilmesi ve zamanla değişen parametrelerin takip edilebilmesi amacıyla, çok kanallı veri kaydı yapabilen gelişmiş bir ölçüm cihazı kullanılmıştır. Bu kapsamda, toplamda 8 bağımsız giriş kanalına sahip olan bir veri kaydedici tercih edilmiştir. Söz konusu cihaz, sıcaklık, nem, hava hızı ve benzeri çevresel parametrelerin anlık olarak izlenmesini mümkün kılmakta ve sistemin dinamik davranışını eş zamanlı olarak gözlemlene imkânı sunmaktadır. Deneyler sırasında elde edilen veriler, veri kaydedici aracılığıyla gerçek zamanlı olarak bilgisayara aktarılmış ve dijital ortamda kaydedilerek, hem analiz sürecinin doğruluğu artırılmış hem de veri kaybı riski en aza indirgenmiştir. Böylece, sistemin deneysel koşullar

altındaki performans parametreleri, sürekli izlenebilir hâle gelmiş ve doğrulama süreçlerine uygun nitelikte veri setleri elde edilmiştir. Deney düzeneklerinde kullanılan söz konusu veri kaydediciye ait görsel, Şekil 11’de ayrıntılı biçimde sunulmuştur.



Şekil 11. Veri kaydedici

2.2.4. Sıcaklık ve Nem Sensörleri

Deneyler sırasında RHT-WM ve RHT-DM model sensörler kullanmıştır, $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ile $+120\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklık ve %0–100 bağıl nem aralığında $\pm 0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve $\pm 2\%$ ϕ hassasiyetle çalışmakta olup, yaklaşık 0.3 W güç tüketimine sahiptir. Şekil 12’te nem ve sıcaklık sensörleri gösterilmiştir.



Şekil 12. RHT-WM ve RHT-DM model sensörler

2.2.5. Santrifüj Fan

Sistemde hava sirkülasyonunu sağlamak amacıyla iki adet santrifüj fan kullanılmıştır. Her bir fan 84 W güç tüketimine sahip olup yaklaşık 250 m³/h hava debisiyle çalışmaktadır. Bu fanlar, proses ve rejenerasyon hatlarında sürekli hava akışı sağlamak için karşılıklı olarak konumlandırılmıştır. Şekil 13’de fanların görseli sunulmuştur.



Şekil 13. Santrifüj fan

2.2.6. Şartlandırma Odaları

Deneyisel düzeneğin rejenerasyon ve proses giriş hava koşullarını kontrol altına alabilmek amacıyla iki adet şartlandırma odası tasarlanmıştır. Her bir oda 1000 mm × 600 mm × 500 mm boyutlarında olup, proses hattı için yüksek nemli, rejenerasyon hattı için ise yüksek sıcaklıklı bir ortam oluşturmak üzere yalıtımlı malzemelerle inşa edilmiştir. Söz konusu odalar, sistemin giriş ve çıkış noktalarına esnek alüminyum hava kanalları aracılığıyla bağlanarak deneyisel akış sürekliliği sağlanmıştır. Şekil 14'te şartlandırma odalarından birinin genel görünümü verilmektedir.



Şekil 14. Şartlandırma odası

2.2.7. Döner Kurutucu Çark

Sistemin nem alma işlevini gerçekleştiren ana bileşen, çapı 600 mm ve kalınlığı 20 mm olan döner kurutucu çarktır. Çark, dört eşit parçaya ayrılmış olup; bu

bölümlerden ikisi rejenerasyon ve proses hattı için ayrılmış, bir bölümü delikli geçiş alanı olarak bırakılmış, diğeri ise yalıtım amaçlı kapatılmıştır. Bu bölümlendirme sayesinde hava akış yönleri fiziksel olarak ayrılarak çarkın görevsel verimliliği artırılmıştır. Kurutucu yüzey, nem alıcı malzeme olarak tercih edilen silika jel ile kaplanmıştır. Silika jel, uygun fiyat-performans oranı ve yüksek nem tutma kapasitesi nedeniyle tercih edilmiştir. Çark, sistem içerisinde yatay düzlemde dönecek şekilde tasarlanmış ve 12–24 V DC motor ile sürtünmeli temas aracılığıyla düşük devirli çevrimsel hareketi sağlamaktadır. Şekil 15’te döner kurutucu çarkın genel görünümü verilmektedir.



Şekil 15. Döner kurutucu çark

2.3. Deneysel Çalışma Prosedürü

Deneysel çalışmalara başlamadan önce, tasarlanıp üretilen çark tipi nem alma sisteminin kararlı bir şekilde çalışıp çalışmadığını değerlendirmek amacıyla kararlı durum testleri gerçekleştirilmiştir. Bu süreçte, sistemde kullanılan sıcaklık ve nem

sensörlerinin kalibrasyonları yapılmış, hava akış hattındaki kaçaklar kontrol edilmiş ve sistemin sızdırmazlığı test edilmiştir. Rejenerasyon ve proses hatlarının ayrı ayrı stabil çalıştığı doğrulandıktan sonra esas deneysel uygulamalara geçilmiştir. Testler süresince, sistem girişlerine farklı sıcaklık ve nem koşullarına sahip hava verilerek döner çarkın nem alma ve rejenerasyon performansı gözlemlenmiştir. Proses hattında yüksek nemli hava, rejenerasyon hattında ise sıcak hava şartları sağlanarak, çarkın çevrimsel çalışma prensibine uygun koşullar oluşturulmuştur. Tekerleğin dönmesiyle birlikte hava akışının çark yüzeyinden geçmesi sağlanmış ve sistemin nem alma verimliliği sürekli olarak izlenmiştir. Sistem performansı, dış ortam koşullarının etkisini değerlendirmek amacıyla farklı günlerde ve değişken çevresel şartlarda test edilmiştir. Ölçümler sırasında proses çıkışı (2 numaralı nokta) ve rejenerasyon çıkışı (5 numaralı nokta) olmak üzere iki kritik noktada sıcaklık ve bağıl nem değerleri kaydedilmiştir. Elde edilen veriler, sistemin termodinamik analizinin yapılması ve nem alma ile rejenerasyon verimliliklerinin belirlenmesi amacıyla kullanılmıştır.

3. BULGULAR

Geri dönüştürülmüş malzemeler kullanılarak geliştirilen, ekonomik ve çevresel açıdan sürdürülebilir niteliklere sahip bir çark tipi nem alma sistemi, 10 metre uzunluğa, 20 metre genişliğe ve 3 metre yüksekliğe sahip toplam 600 metreküp hacmindeki kontrollü bir oda ortamında deneysel olarak test edilmiştir. Sistemin nem alma performansını değerlendirmek amacıyla yürütülen deneyler, üç farklı rejenerasyon sıcaklığı koşulu altında gerçekleştirilmiştir. Bu sıcaklık değerleri sırasıyla 40 °C, 50 °C ve 60 °C olarak belirlenmiş ve her bir sıcaklık düzeyi için fan hızları 2 m/s ve 4 m/s olacak şekilde iki farklı hızda test edilmiştir. Döner çarkın dönüş hızı ise sabit tutulmuş ve saatte 60 devir (60 rph) olacak şekilde ayarlanmıştır. Deneysel prosedürler kapsamında sistemin dinamik davranışları değil, kararlı duruma ulaşarak istikrarlı bir şekilde çalıştığı durumlar esas alınmış olup, performans parametrelerinin değerlendirilmesi bu denge koşullarında yapılmıştır. Literatürde Ma vd. (2023) tarafından yapılan çalışmalarda, test sürelerinin sistemin dengeye ulaşarak kararlı bir çalışma göstermesi için 20 ile 40 dakika arasında değiştiği ifade edilmiştir. Bu çalışma kapsamında ise, testlerin başlangıcından itibaren sistemin kararlı rejime ulaşması ve ölçüm verilerinin stabil hâle gelmesi için gereken süre dikkate alınarak, deneysel gözlemler 25 ile 55 dakika arasında değişen zaman aralıklarında gerçekleştirilmiştir.

3.1. Ölçüm Sonuçları

Şekil 16a), b), c) ve d) üzerinde gerçekleştirilen ayrıntılı analizler, deneysel çalışmada kullanılan fan hızının döner kurutucu çark sisteminin nem alma sürecindeki değişimlere etkisini açık bir biçimde ortaya koymaktadır. Deneylerde fan hızları 2 m/s ve 4 m/s olarak belirlenmiş; rejenerasyon sıcaklığı ise her iki durumda da 40 °C değerinde sabit tutulmuştur. Böylece farklı fan hızlarının proses ve rejenerasyon havası parametreleri üzerindeki etkileri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

İlk olarak 2 m/s fan hızı altında elde edilen sonuçlar incelendiğinde, proses havasının özgül neminde belirgin bir azalma gözlenmiştir. Çarka girişte 15.662 g/kg (kuru hava) olan özgül nem, çıkışta 14.1324 g/kg (kuru hava) seviyesine gerilemiştir. Bu azalma, çark yüzeyinde gerçekleşen adsorpsiyon mekanizmasının etkin bir şekilde

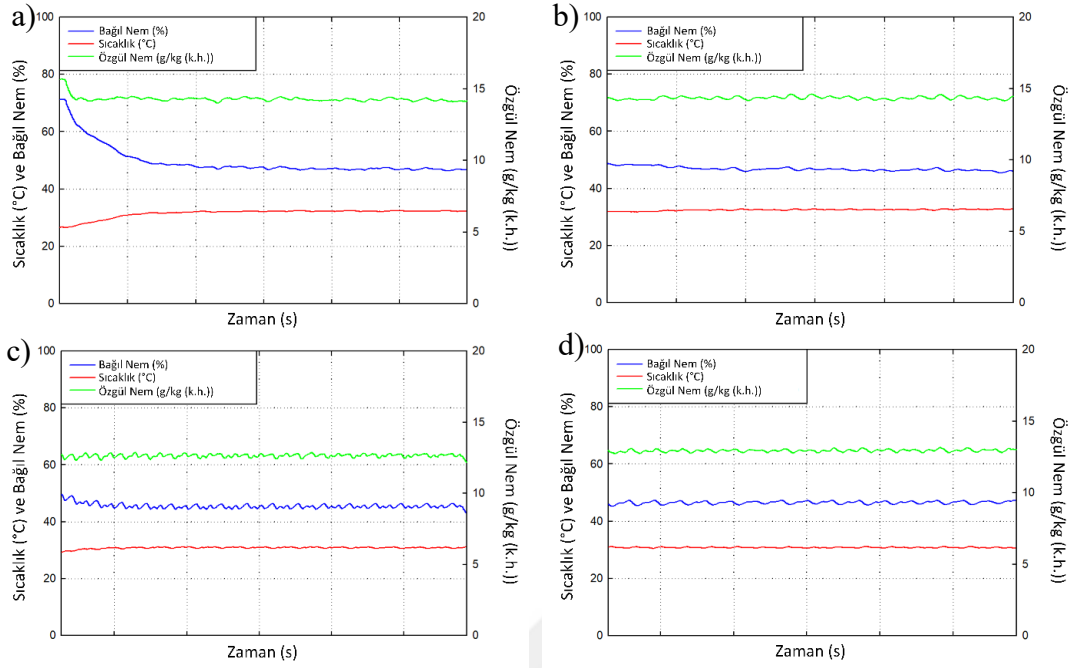
çalıştığını göstermektedir. Aynı koşullarda proses havasının sıcaklığı 26.63 °C'den 32.202 °C'ye yükselmiş, bağıl nem ise %71.339'dan %46.807'ye düşmüştür. Bu durum, sistemin hem nem alma hem de duyulur ısı transferi açısından etkili olduğunu ortaya koymaktadır.

Aynı koşullarda rejenerasyon havası tarafında ise özgül nemde hafif bir artış tespit edilmiştir. Girişte 14.3565 g/kg (kuru hava) olan özgül nem, çıkışta 14.4469 g/kg (kuru hava) seviyesine yükselmiştir. Bu artış, çarkta tutulan nemin rejenerasyon havasına aktarılmasıyla açıklanabilir. Sıcaklık 31.7750 °C'den 32.8950 °C'ye yükselmiş, bağıl nem ise %48.6940'tan %45.9960'a gerilemiştir.

Fan hızı 4 m/s'ye çıkarıldığında ve rejenerasyon sıcaklığı yine 40 °C'de sabit tutulduğunda, proses havasının özgül nemindeki azalma daha sınırlı kalmıştır. Bu durumda girişte 12.7432 g/kg (kuru hava) olan özgül nem, çıkışta 12.1518 g/kg (kuru hava) seviyesine gerilemiştir. Sıcaklık 29.37 °C'den 31.1460 °C'ye yükselmiş, bağıl nem ise %49.7120'den %42.8620'ye düşmüştür. Bu değerler, daha yüksek fan hızında temas süresinin kısalması nedeniyle nem alma miktarının azaldığını düşündürmektedir.

Aynı fan hızı ve sıcaklıkta rejenerasyon sürecinde ise özgül nem 12.9475 g/kg (kuru hava) seviyesinden 13.0013 g/kg (kuru hava) seviyesine yükselmiştir. Sıcaklık 30.9790 °C'den 30.6050 °C'ye düşerken, bağıl nem %46.0470'ten %47.2310'a yükselmiştir.

Elde edilen bulgular, fan hızı değişiminin proses ve rejenerasyon havasının nem, sıcaklık ve bağıl nem parametreleri üzerinde doğrudan etkili olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte, aynı rejenerasyon sıcaklığı (40 °C) altında yapılan deneylerde, 2 m/s fan hızında hesaplanan DCOP değeri 0.23, 4 m/s fan hızında ise 0.10 olarak belirlenmiştir. Bu değerler, her iki koşulda da sistemin enerji kullanımı ile sağladığı nem alma miktarı arasındaki oranın farklılık gösterdiğini ortaya koymaktadır.



Şekil 16. 2 m/s fan hızı ve 40°C rejenerasyon sıcaklığında **a)** nem alma ve **b)** rejenerasyon. 4 m/s fan hızı ve 40°C rejenerasyon sıcaklığında **c)** nem alma ve **d)** rejenerasyon.

50 °C rejenerasyon sıcaklığı altında farklı fan hızlarının nem alma performansı üzerindeki etkiler, Şekil 17’de ayrıntılı olarak sunulmaktadır. Deneylerde fan hızları 2 m/s ve 4 m/s olarak seçilmiş; her iki durumda da rejenerasyon sıcaklığı sabit tutularak, farklı hızların proses ve rejenerasyon havası parametreleri üzerindeki etkileri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

İlk olarak 2 m/s fan hızı altında elde edilen sonuçlar incelendiğinde, Şekil 17a’da görüldüğü üzere, proses havasının özgül neminde belirgin bir azalma tespit edilmiştir. Çarka girişte 18.412 g/kg (kuru hava) seviyesinde ölçülen özgül nem, çıkışta 14.93083 g/kg (kuru hava) değerine gerilemiştir. Bu yaklaşık 3.48 g/kg (kuru hava) oranındaki düşüş, çark yüzeyindeki higroskopik malzemenin nem tutma kapasitesinin bu sıcaklıkta oldukça yüksek olduğunu ve fan hızının sağladığı hava debisinin nem alma mekanizmasını etkin bir şekilde desteklediğini göstermektedir. Proses havasının sıcaklığı ise 26.997 °C’den 31.678 °C’ye yükselmiş, bu durum nem tutma sırasında gerçekleşen ısıl etkileşimler sonucu duyulur ısı artışının bir göstergesi olmuştur. Bağıl nemde ise %81.772’den %50.875’e düşüş gözlenmiş; bu değişim, mutlak nemin azalması ile birlikte sıcaklık artışının bağıl nemi düşürmedeki birleşik

etkisini ortaya koymaktadır.

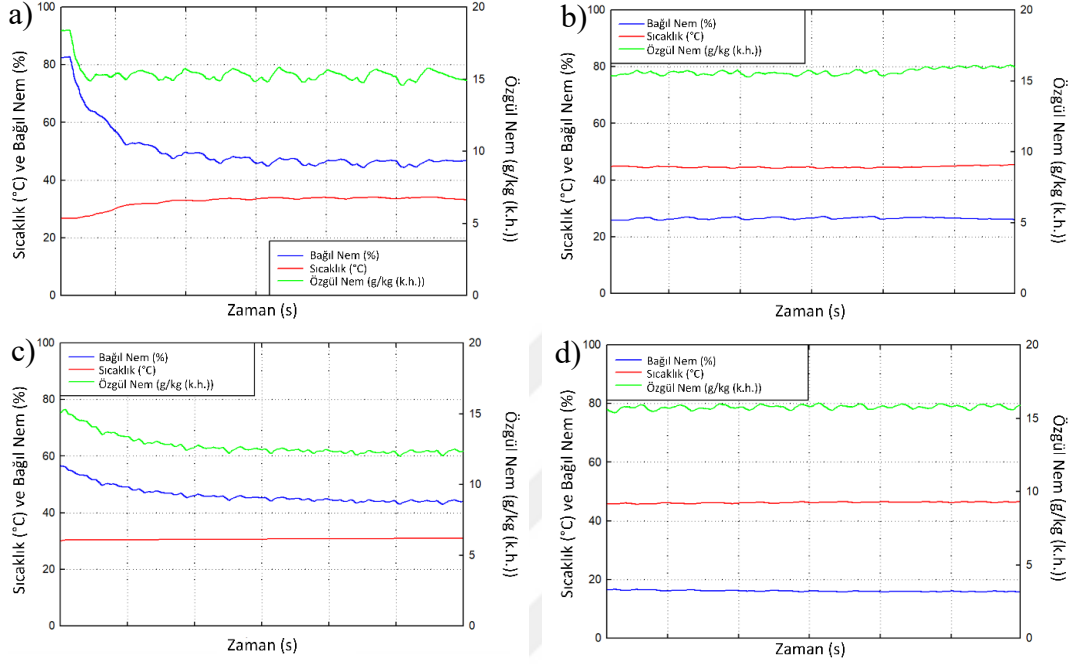
Aynı fan hızı (2 m/s) ile gerçekleştirilen rejenerasyon evresinde ise, Şekil 17b’de gösterildiği gibi, çarktan geçen havanın özgül neminde bir artış tespit edilmiştir. Girişte 15.368 g/kg (kuru hava) olan özgül nem, çıkışta 16.022 g/kg (kuru hava) seviyesine yükselmiştir. Bu artış, rejenerasyon sürecinde çarkta tutulan nemin ısı enerjisi yardımıyla serbest bırakılarak havaya geçmesi ile açıklanmaktadır. Sıcaklık, 44.7650 °C’den 45.3530 °C’ye çıkarken, bağıl nem %25.6757’den %25.9459’a yükselmiştir. Bu küçük oranlı bağıl nem artışı, yüksek sıcaklıktaki hava akımına su buharı yüklenmesinden kaynaklanmaktadır.

Fan hızı 4 m/s’ye yükseltildiğinde, yine 50 °C rejenerasyon sıcaklığı altında elde edilen veriler, proses havasındaki özgül nem azalmasının daha sınırlı kaldığını göstermektedir. Şekil 17c’de görüldüğü üzere, özgül nem 15.1185 g/kg (kuru hava) değerinden 12.3453 g/kg (kuru hava) seviyesine düşmüştür. Bu yaklaşık 2.77 g/kg (kuru hava) oranındaki azalma, 2 m/s durumuna kıyasla daha düşüktür. Bu fark, daha yüksek fan hızında hava ile higroskopik yüzey arasındaki temas süresinin kısalması nedeniyle nemin tam olarak adsorbe edilememesi ile ilişkilendirilebilir. Sıcaklık ise 29.9810 °C’den 30.9674 °C’ye yükselmiş, bağıl nem ise %56.730’dan %43.9760’a düşmüştür. Burada sıcaklık artışı sınırlı kalmış olsa da bağıl nemdeki düşüş, özgül nem azalması ile birlikte havanın kuruluk oranının arttığını göstermektedir.

4 m/s fan hızı ve aynı sıcaklık altında gerçekleştirilen rejenerasyon evresinde, Şekil 17d’de görüldüğü üzere, havanın özgül nemi girişte 15.5245 g/kg (kuru hava) seviyesinden çıkışta 15.8042 g/kg (kuru hava) seviyesine yükselmiştir. Bu artış oranı, 2 m/s durumundaki rejenerasyon süreci ile benzer büyüklükte olmakla birlikte, temas süresinin kısalması nedeniyle nemin havaya aktarım verimliliğinde küçük farklılıklar oluşmuştur. Sıcaklık 45.4961 °C’den 45.9716 °C’ye çıkmış, bağıl nem ise %24.976’dan %24.804’a çok küçük bir azalma göstermiştir. Bu düşük değişim oranı, yüksek sıcaklıkta bağıl nemin zaten düşük seviyede olmasından kaynaklanmaktadır.

DeneySEL çalışmada ayrıca 50 °C rejenerasyon sıcaklığı altında hesaplanan Döngüsel Sistem Performans Katsayısı (DCOP) değerleri de belirlenmiştir. Buna göre 2 m/s fan hızında DCOP değeri 0.32, 4 m/s fan hızında ise 0.25 olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlar, 40 °C rejenerasyon sıcaklığında elde edilen DCOP farkına kıyasla daha düşük bir fark olduğunu ortaya koymaktadır. Dolayısıyla, daha yüksek rejenerasyon

sıcaklıklarında fan hızının sistem performansı üzerindeki etkisi görece olarak daha sınırlı kalmakta; bu durum da rejenerasyon sıcaklığının, nem alma verimliliğini belirlemede fan hızına kıyasla daha baskın bir parametre olabileceğini düşündürmektedir.



Şekil 17. 2 m/s fan hızı ve 50°C rejenerasyon sıcaklığında **a)** nem alma ve **b)** rejenerasyon. 4 m/s fan hızı ve 50°C rejenerasyon sıcaklığında **c)** nem alma ve **d)** rejenerasyon

60 °C rejenerasyon sıcaklığında farklı fan hızlarının nem alma performansına etkileri, Şekil 18’de detaylı olarak sunulmaktadır. Bu sıcaklık değeri, önceki deneylerde kullanılan 40 °C ve 50 °C rejenerasyon sıcaklıklarına kıyasla daha yüksek olup, higroskopik çark malzemesinin bünyesinde tutulan nemin daha etkin bir şekilde uzaklaştırılmasına imkân tanımaktadır. Çalışmada fan hızı iki farklı seviyede (2 m/s ve 4 m/s) seçilmiş; her iki durumda da rejenerasyon sıcaklığı sabit tutulmuştur. Böylece yalnızca fan hızındaki değişimin sistem performansı üzerindeki etkisi, sabit sıcaklık koşullarında ayrı ayrı gözlemlenmiştir.

2 m/s fan hızıyla gerçekleştirilen deneysel koşullarda, Şekil 18a’da gösterildiği üzere, proses havasının özgül neminde belirgin bir azalma meydana gelmiştir. Çark

girişinde 12.2193 g/kg (kuru hava) seviyesinde ölçülen özgül nem, çıkışta 7.6655 g/kg (kuru hava) değerine gerilemiştir. Bu yaklaşık 4.55 g/kg (kuru hava) oranındaki azalma, yüksek rejenerasyon sıcaklığı sayesinde çarkın önceki çevrimlerde biriken nemden daha etkin arındırıldığını ve nem tutma kapasitesinin maksimuma yakın bir seviyede kullanıldığını göstermektedir. Dikkat çekici şekilde, proses havası sıcaklığında hafif bir azalma gözlenmiş; sıcaklık 32.6350 °C'den 31.8170 °C'ye gerilemiştir. Bu durum, çarkın yüzeyinde gerçekleşen nem adsorpsiyon sürecinde, su buharının yoğunlaşma eğilimindeki faz değişim etkileri ve ısı transfer mekanizmalarının bir sonucu olarak açıklanabilir. Bağıl nem değerleri incelendiğinde ise, %49.4859'dan %25.0313'e düşüş kaydedilmiştir. Bu önemli düşüş, mutlak nem miktarındaki azalmaya ek olarak sıcaklık değişiminin de etkisiyle havanın daha kuru bir yapıya kavuştuğunu ortaya koymaktadır.

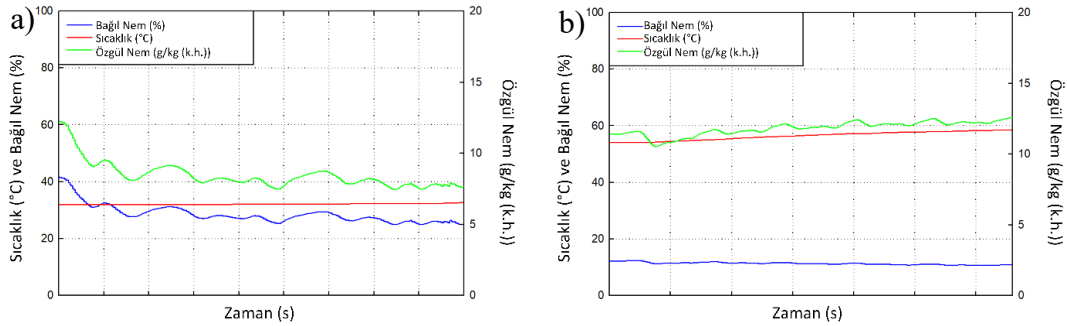
Aynı fan hızıyla (2 m/s) yürütülen rejenerasyon aşamasında ise, Şekil 18b'de görüldüğü gibi, çarktan geçen havanın özgül nemi hafifçe artmıştır. Girişte 11.4024 g/kg (kuru hava) olarak ölçülen değer, çıkışta 12.5626 g/kg (kuru hava) seviyesine yükselmiştir. Bu artış, rejenerasyon havasının çarktan geçerken bünyedeki nemi alıp taşıması ile doğrudan ilişkilidir. Sıcaklıkta ise belirgin bir artış gözlenmiş; 54 °C'den 58.3650 °C'ye yükselmiştir. Yüksek sıcaklıkta gerçekleşen bu nem aktarım süreci sonucunda bağıl nemde hafif bir düşüş olmuş; %12.1557'den %10.8609'a gerilemiştir. Bu düşüş, yüksek sıcaklıkta havanın nem taşıma kapasitesinin artması ve buhar basıncı farklarının nem aktarımını kolaylaştırmasıyla açıklanabilir.

Fan hızının 4 m/s'ye çıkarıldığı koşullarda, rejenerasyon sıcaklığı sabit tutulduğunda (60 °C), proses aşamasında elde edilen özgül nem azalması daha sınırlı kalmıştır. Şekil 18c'de sunulan veriler, özgül nemin çark girişinde 11.1440 g/kg (kuru hava) iken çıkışta 7.1749 g/kg (kuru hava) seviyesine gerilediğini göstermektedir. Bu yaklaşık 3.97 g/kg (kuru hava) oranındaki azalma, 2 m/s durumuna kıyasla daha düşüktür. Bunun başlıca sebebi, artan fan hızının hava ile çark yüzeyi arasındaki temas süresini kısaltması ve böylece nem adsorpsiyon sürecinin tam olarak gerçekleşememesidir. Sıcaklık ise 25.6120 °C'den 32.300 °C'ye yükselmiş; bu artış, yüksek debili hava akımının nem tutma sırasında açığa çıkan ısıyı daha hızlı taşımasından kaynaklanmaktadır. Bağıl nemde ise %54.2900'dan %23.8940'a keskin bir düşüş yaşanmıştır. Bu düşüş, hem mutlak nem miktarındaki azalma hem de sıcaklık

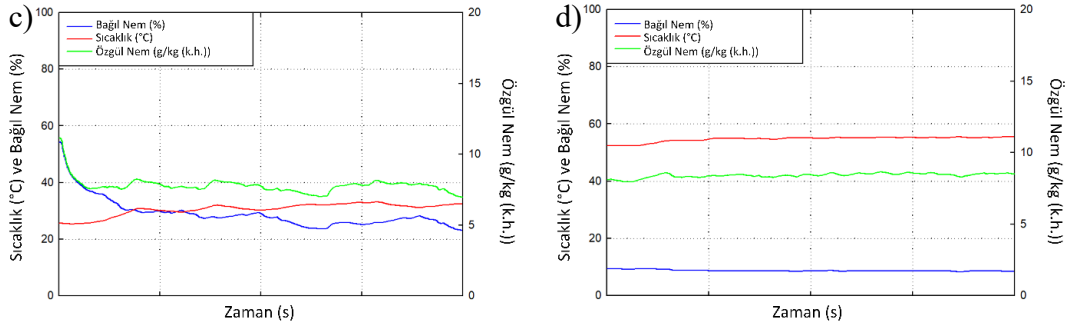
artışının bağıl nem üzerindeki ters yönlü etkilerinin bir bileşkesidir.

4 m/s fan hızıyla gerçekleştirilen rejenerasyon sürecinde (Şekil 18d), özgül nem girişte 8.0913 g/kg (kuru hava) seviyesinden çıkışta 8.5136 g/kg (kuru hava) seviyesine hafif bir artış göstermiştir. Bu artış, rejenerasyon havasının çark yüzeyinden nem toplaması ile açıklanmakla birlikte, 2 m/s durumuna kıyasla daha düşük oranda gerçekleşmiştir. Bunun nedeni, yüksek fan hızının temas süresini kısaltarak nem transfer verimliliğini sınırlamasıdır. Sıcaklık ise 52.430 °C'den 55.5330 °C'ye yükselmiştir. Bağıl nemde çok küçük bir düşüş gözlenmiş; değer %9.3581'den %8.4703'e gerilemiştir. Bu düşük değişim, yüksek sıcaklıklarda havanın doygunluk noktası ile mevcut nem miktarı arasındaki farkın zaten oldukça büyük olmasından kaynaklanmaktadır.

Genel olarak değerlendirildiğinde, 60 °C rejenerasyon sıcaklığında her iki fan hızı için de nem alma performansının yüksek olduğu, ancak düşük fan hızında (2 m/s) özgül nem azalmasının daha belirgin olduğu tespit edilmiştir. Yüksek fan hızında ise, proses aşamasındaki nem alma miktarı azalmış; bu durum adsorpsiyon verimliliğinde temas süresinin kritik rol oynadığını ortaya koymuştur. Rejenerasyon aşamasında ise her iki fan hızında da özgül nem artışı gözlenmiş; ancak 2 m/s fan hızında bu artış daha yüksek oranda gerçekleşmiştir. Bu bulgular, sistem tasarımında fan hızı ve rejenerasyon sıcaklığının birlikte optimize edilmesinin gerekliliğini vurgulamaktadır.



Şekil 18. 2 m/s fan hızı ve 60°C rejenerasyon sıcaklığında nem a) alma ve b) rejenerasyon. 4 m/s fan hızı ve 60°C rejenerasyon sıcaklığında c) nem alma ve d) rejenerasyon



Şekil 18- (Devam). 2 m/s fan hızı ve 60 °C rejenerasyon sıcaklığında nem **a)** alma ve **b)** rejenerasyon. 4 m/s fan hızı ve 60 °C rejenerasyon sıcaklığında **c)** nem alma ve **d)** rejenerasyon (Devamı)

60 °C rejenerasyon sıcaklığı koşullarında gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda, farklı fan hızları için hesaplanan Döngüsel Sistem Performans Katsayısı (DCOP) değerleri, sistemin enerji verimliliği açısından önemli bilgiler sunmaktadır. Elde edilen bulgulara göre, fan hızı 2 m/s olarak ayarlandığında DCOP değeri 0.290 olarak hesaplanmıştır. Aynı rejenerasyon sıcaklığı altında, fan hızı 4 m/s'ye çıkarıldığında ise DCOP değeri 0.254'e gerilemiştir. Burada gözlenen azalma, fan hızındaki artışın bazı operasyonel avantajlar sağlamasına rağmen, genel sistem verimliliğini olumsuz yönde etkileyebileceğini göstermektedir. Özellikle, artan fan hızı hava debisini yükselterek nem transfer hızını artırsa da, çarktan geçen havanın temas süresini kısaltmakta ve böylece adsorpsiyon kapasitesinden tam olarak yararlanılamamaktadır. Bu durum, özellikle yüksek rejenerasyon sıcaklıklarında, sistemin enerji kullanım etkinliği üzerinde sınırlayıcı bir etkiye sahiptir.

Elde edilen sonuçlar, 60 °C rejenerasyon sıcaklığında farklı fan hızları arasındaki DCOP farkının, daha düşük rejenerasyon sıcaklıklarında (40 °C ve 50 °C) gözlenen farklardan daha düşük seviyede olduğunu ortaya koymaktadır. Başka bir ifadeyle, 60 °C gibi yüksek sıcaklık koşullarında fan hızındaki değişim, sistem performans katsayısı üzerinde daha sınırlı bir etki yaratmaktadır. Bunun başlıca nedeni, yüksek sıcaklıkta rejenerasyon havasının çark üzerindeki nemi uzaklaştırma kapasitesinin çok daha yüksek olmasıdır. Bu koşullarda, çark yüzeyi daha etkin şekilde yenilenmekte ve dolayısıyla proses havası ile çark arasındaki nem transferi, fan hızı değişiminden daha az etkilenmektedir.

Bu bulgu, sistem tasarımı ve işletme stratejileri açısından önemli bir çıkarıma işaret etmektedir: Her rejenerasyon sıcaklığı seviyesi için, sistemin enerji verimliliğini maksimize edecek ve DCOP değerini en yüksek seviyede tutacak optimum bir fan hızı değeri bulunmaktadır. Daha düşük rejenerasyon sıcaklıklarında, fan hızı değişimlerinin etkisi daha belirgin olduğundan, doğru fan hızı seçimi kritik hale gelmektedir. Buna karşılık, yüksek rejenerasyon sıcaklıklarında, fan hızı ayarının sistem performansı üzerindeki etkisi daha azdır; ancak enerji tüketimi ve fanın kendi elektriksel yükü dikkate alındığında, gereğinden yüksek hızların yine de toplam sistem verimliliğini düşürebileceği unutulmamalıdır.

Sonuç olarak, 60 °C rejenerasyon sıcaklığında elde edilen 0.290 ve 0.254'lük DCOP değerleri, yüksek sıcaklık koşullarında fan hızının etkisinin sınırlı olduğunu, ancak yine de optimizasyon gerektirdiğini ortaya koymaktadır. Bu durum, rejenerasyon sıcaklığı ve fan hızının birlikte değerlendirilerek sistemin hem termodinamik hem de enerji verimliliği açısından en uygun şekilde çalıştırılması gerektiğini açıkça göstermektedir.

Tablo 2. Her rejenerasyon sıcaklığı ve fan hızı için sonuçların DCOP değerleri

Rejenerasyon Sıcaklığı (°C)	40		50		60	
V (m/s)	2	4	2	4	2	4
DCOP (-)	0.23	0.1	0.312	0.25	0.29	0.254

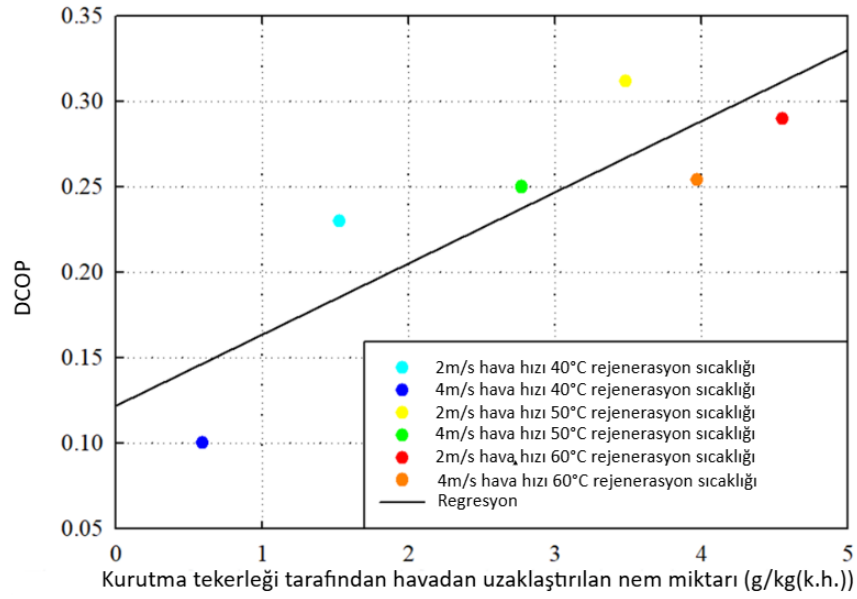
Tablo 2’de, farklı rejenerasyon sıcaklıklarında her fan hızı için DCOP değerlerinin karşılaştırmalı analizi sunulmuştur. Tablo 3 ise, geri dönüştürülmüş malzemeler kullanılarak tasarlanan düşük maliyetli yeni çark tipi nem alma sistemine ait deneysel test sonuçlarını içermektedir.

Tablo 3. Deneysel çalışmaların sayısal özeti

$T_{\text{rejenerasyon}}=40\text{ }^{\circ}\text{C}$		Fan hızı (m/s)			
		2		4	
		VoP		VoP	
Nem Alma	Bağıl nem (%)	71.339	46.807	49.712	42.862
	Sıcaklık ($^{\circ}\text{C}$)	26.63	32.202	29.37	31.146
	Özgül nem (g/kg (k.h.))	15.662	14.132	12.7432	12.1518
Rejenerasyon	Bağıl nem (%)	48.6940	45.9960	46.0470	47.231
	Sıcaklık ($^{\circ}\text{C}$)	31.7750	32.8950	30.979	30.605
	Özgül nem (g/kg k.h.))	14.3565	14.4469	12.9475	13.0013
$T_{\text{rejenerasyon}}=50\text{ }^{\circ}\text{C}$		Fan hızı (m/s)			
		2		4	
		VoP		VoP	
Nem Alma	Bağıl nem (%)	81.772	50.875	56.73	43.976
	Sıcaklık ($^{\circ}\text{C}$)	26.997	31.678	29.981	30.9674
	Özgül nem (g/kg (k.h.))	18.412	14.9308	15.1185	12.3453
Rejenerasyon	Bağıl nem (%)	25.6757	25.9459	24.976	24.804
	Sıcaklık ($^{\circ}\text{C}$)	44.765	45.353	45.4961	45.9716
	Özgül nem (g/kg (k.h.))	15.368	16.022	15.5245	15.8042
$T_{\text{rejenerasyon}}=60\text{ }^{\circ}\text{C}$		Fan hızı (m/s)			
		2		4	
		VoP		VoP	
Nem Alma	Bağıl nem (%)	49.4859	25.0313	54.29	23.894
	Sıcaklık ($^{\circ}\text{C}$)	32.635	31.817	25.612	32.3
	Özgül nem (g/kg (k.h.))	12.2193	7.6655	11.144	7.1749
Rejenerasyon	Bağıl nem (%)	12.1557	10.8609	9.3581	8.4703
	Sıcaklık ($^{\circ}\text{C}$)	54	58.365	52.43	55.533
	Özgül nem (g/kg (k.h.))	11.4024	12.5626	8.0913	8.5136

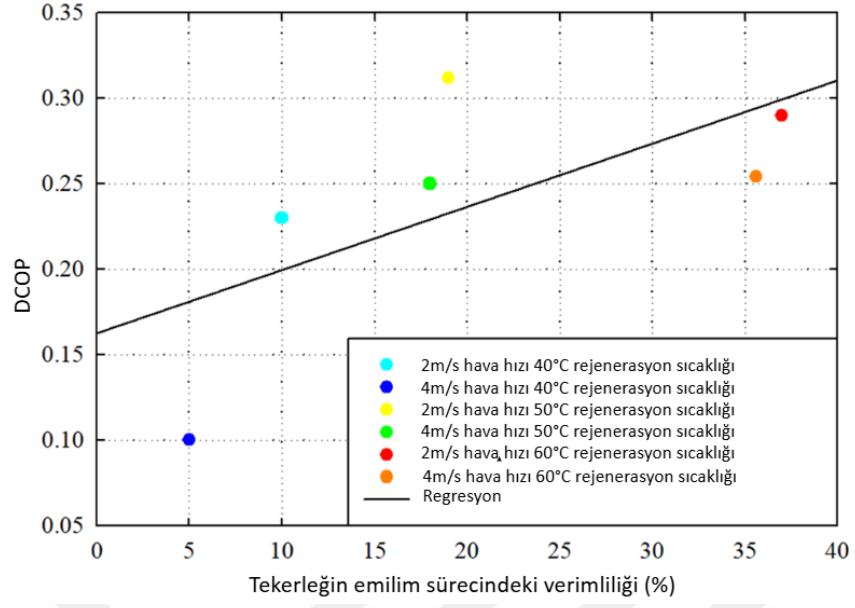
VoP: Parametrenin değişimi

Şekil 19 ve Şekil 20’de, desikant çark sisteminin nem alma performansına ilişkin iki farklı ilişki incelenmiştir. Şekil 19’da, farklı rejenerasyon sıcaklıkları ($40\text{ }^{\circ}\text{C}$, $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve $60\text{ }^{\circ}\text{C}$) ve hava hızları (2 m/s ve 4 m/s) altında desikant çarkı tarafından havadan uzaklaştırılan nem miktarı (g/kg kuru hava) ile DCOP arasındaki ilişki gösterilmiştir. Buna göre, genel olarak nem uzaklaştırma kapasitesi arttıkça DCOP değerinin de lineer olarak arttığı gözlemlenmiştir.



Şekil 19. Kurutma tekerleği tarafından özgül nem giderme miktarına karşılık gelen DCOP değerleri

Şekil 20’de ise aynı parametreler için emme verimliliği (%) ile DCOP arasındaki ilişki değerlendirilmiştir. Veriler, rejenerasyon sıcaklığı ve hava hızının hem nem alma miktarını hem de sistem verimliliğini doğrudan etkilediğini göstermekte olup; 60 °C rejenerasyon sıcaklığında ve 2 m/s hava hızında DCOP değeri 0.29’a ulaşırken, 4 m/s hızda bu değer 0.254 olarak ölçülmüştür. Her iki grafik için doğrusal regresyon eğrileri, nem alma kapasitesi ve emme verimliliğinin DCOP üzerinde belirleyici bir rol oynadığını doğrulamaktadır.



Şekil 20. DCOP değerleri için kurutucu tekerlek verimliliği

4. TARTIŞMA, SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, geri dönüştürülmüş malzemeler kullanılarak düşük maliyetli olarak tasarlanan çark tipi nem alma sisteminin nem alma performansı, farklı rejenerasyon sıcaklıkları ve hava hızları altında deneysel olarak değerlendirilmiştir. Sistem, 20 mm kalınlığında silika jel esaslı petek yapıları bir desikant yüzey içermekte olup, 40 °C, 50 °C ve 60 °C rejenerasyon sıcaklıklarında ve 2 m/s ile 4 m/s hava hızlarında test edilmiştir. Elde edilen bulgular, sistemin hem enerji verimliliği hem de nem alma kapasitesi bakımından oldukça işlevsel bir çözüm sunduğunu göstermektedir. Düşük sıcaklıkta elde edilen verim değerleri, sistemin düşük kaliteli ısı kaynaklarıyla çalışma kabiliyetine işaret etmekte, bu da onu sürdürülebilir ve çevre dostu HVAC uygulamaları için uygun bir alternatif hâline getirmektedir.

Çalışma boyunca yapılan ölçümler, hava hızı ve rejenerasyon sıcaklığının nem alma performansı üzerindeki belirgin etkilerini ortaya koymuştur. Rejenerasyon sıcaklığı arttıkça nem alma miktarı da artmakta, ancak belirli bir noktadan sonra bu artış enerji tüketimi sebebiyle sistem verimliliğini olumsuz etkilemektedir. Örneğin, 50 °C rejenerasyon sıcaklığında ve 2 m/s hava hızında en yüksek sistem verimi olan 0.312 DCOP değeri elde edilmiştir. Bu durum, desikant çarkın hem yeterli nem tutma süresine sahip olduğu hem de sistemin aşırı enerji tüketmeden optimum çalışma koşuluna ulaştığı anlamına gelmektedir. Ancak rejenerasyon sıcaklığının 60 °C'ye çıkarılması ve hava hızının 4 m/s'ye yükseltilmesiyle, nem alma miktarı artmasına rağmen DCOP değeri 0.254'e gerilemiş, bu da enerji girdisinin artmasına karşın alınan faydanın düşmeye başladığını göstermiştir. Dolayısıyla, sistemin performansı sadece nem alma miktarına değil; aynı zamanda termodinamik dengeye, enerji verimliliğine ve hava-desikant etkileşiminin süresine bağlı olarak şekillenmektedir.

Deneysel sonuçlar, düşük hava hızlarında daha uzun temas süresi sağlandığı için nem alma kapasitesinin yüksek olduğunu ortaya koymuştur. 2 m/s hava hızında nem giderimi daha fazla gerçekleşirken, 4 m/s hızda hava hızlıca sistemden geçmekte ve desikant yüzeyle yeterince etkileşmeden sistemden çıkmaktadır. Bu durum, hava hızının sistem verimliliği üzerindeki kritik etkisini açıkça ortaya koymaktadır. Aynı zamanda yüksek sıcaklık ve düşük hava hızı kombinasyonunun, proses havasında özgül nemin maksimum oranda uzaklaştırılmasını sağladığı görülmektedir. Ancak

rejenerasyon havasının yüksek sıcaklıklarda çalıştırılması sistemin enerji ihtiyacını artırmakta, dolayısıyla sürdürülebilirlik hedefleriyle tam anlamıyla örtüşmeyebilmektedir.

Tüm bu bulgular, çark tipi nem alma sisteminin belirli sınırlar içerisinde oldukça verimli çalışabildiğini, ancak rejenerasyon enerjisi ve hava hızlarının sistemin performansı üzerinde çift yönlü etkilere sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Yani yüksek sıcaklıklar nem alma performansını artırsa da enerji verimliliği düşmekte; düşük hava hızları verimliliği yükseltse de hava akış kapasitesini sınırlamaktadır. Bu nedenle, sistem performansının optimizasyonu çok değişkenli bir analiz gerektirmekte ve uygulama koşullarına göre uygun parametrelerin belirlenmesi önem arz etmektedir. Neticede, bu çalışma hem teorik hem pratik anlamda, geri dönüştürülmüş malzeme kullanımıyla oluşturulmuş düşük maliyetli RDWS sistemlerinin uygulanabilirliğini ve enerji verimli tasarım ilkeleri çerçevesinde nasıl geliştirilebileceğini ortaya koymuştur.

Yapılan deneysel çalışmalar neticesinde elde edilen bulgular doğrultusunda, RDWS sistemlerinin hem laboratuvar hem de gerçek bina uygulamalarında daha etkili biçimde kullanılabilmesi için bazı iyileştirme önerileri geliştirilmiştir. Öncelikle, sistemin maksimum performans gösterdiği 50 °C rejenerasyon sıcaklığı ve 2 m/s hava hızı koşulları, hem nem alma miktarının hem de DCOP değerinin en dengeli olduğu aralık olarak tespit edilmiştir. Bu nedenle, sistem tasarımı yapılırken bu değerlerin referans alınması önerilmektedir. Bunun yanı sıra, rejenerasyon havasının nem içeriğinin düşük tutulması sistemin emme verimliliğini artırmakta, bu nedenle ön kurutma veya ısı geri kazanım sistemleriyle desteklenmiş rejenerasyon hattı kullanılması faydalı olacaktır.

Desikant çarkın malzeme kalınlığı, porozitesi ve kaplama yoğunluğu da sistem performansını doğrudan etkilemektedir. Bu bağlamda, gelecekteki çalışmalar için nano-yapılı ve yüksek yüzey alanına sahip kompozit malzemelerin denenmesi önerilmektedir. Ayrıca, sistemin rejenerasyon enerjisini sağlamak için güneş kollektörleri gibi yenilenebilir enerji kaynaklarıyla entegre edilmesi, enerji verimliliğini artıracak ve karbon ayak izini azaltacaktır. Mevcut çalışma düşük maliyetli bir tasarım temelinde yapılsa da, uzun vadeli dayanım, bakım maliyetleri ve desikant ömrü gibi parametrelerin de gelecekteki uygulamalar için detaylı biçimde analiz edilmesi gerekmektedir.

Hava hızının sistem üzerindeki etkisi dikkate alındığında, çevresel koşullara bağlı olarak değişken fan hızlarını otomatik kontrol edebilecek adaptif bir kontrol sistemi önerilmektedir. Bu amaçla, PID kontrollü ya da yapay zekâ tabanlı algoritmalarla desteklenmiş fan yönetim sistemleri geliştirilebilir. Ayrıca, deneysel verilerle kalibre edilmiş sayısal modellerin geliştirilmesi, sistem davranışlarının daha önceden öngörülmesine ve saha uygulamalarında simülasyon destekli optimizasyon yapılmasına olanak tanıyacaktır. Son olarak, benzer sistemlerin farklı iklim koşullarında, özellikle sıcak ve nemli bölgelerde test edilerek karşılaştırmalı saha verileri toplanması, RDWS teknolojisinin daha geniş uygulama alanlarında kullanılmasına zemin hazırlayacaktır.



KAYNAKÇA

- Abd-Elhady, M.M., Salem, M.S., Hamed, A.M., El-Sharkawy, I.I. (2022). Solid desiccant-based dehumidification systems: A critical review on configurations, techniques, and current trends. *International Journal of Refrigeration*, 133, 337-352.
- Abdelgaied, M., Saber, M.A., Bassuoni, M.M., Khaira, A.M. (2023). Comparative analysis of a new desiccant dehumidifier design with a traditional rotary desiccant wheel for air conditioning purpose. *Applied Thermal Engineering*, 222, 119945.
- Abdullah, S., Zubir, M.N.B.M., Muhamad, M.R.B., Newaz, K.M.S., Oztop, H.F., Alam, M.S., Shaikh, K. (2023). Technological development of evaporative cooling systems and its integration with air dehumidification processes: A review. *Energy and Buildings*, 283, 112805.
- Akram, M.W., Hasanuzzaman, M., Cuce, E., Cuce, P.M. (2023). Global technological advancement and challenges of glazed window, facade system and vertical greenery-based energy savings in buildings: A comprehensive review. *Energy and Built Environment*, 4(2), 206-226.
- Alvur, E., Anac, M., Cuce, P.M., Cuce, E. (2024). The potential and challenges of BIM in enhancing energy efficiency in existing buildings: A comprehensive review. *Sustainable and Clean Buildings*, 1(1), 42-65.
- Angrisani, G., Minichiello, F., Roselli, C., Sasso, M. (2012). Experimental analysis on the dehumidification and thermal performance of a desiccant wheel. *Applied Energy*, 92, 563-572.
- Cuce, E., Cuce, P.M., Alvur, E., Yilmaz, Y.N., Saboor, S., Ustabas, I., Linul, E., Asif, M. (2023). Experimental performance assessment of a novel insulation plaster as an energy-efficient retrofit solution for external walls. *Case Studies in Thermal Engineering*, 49, 103350.
- Cuce, P. M., Cuce, E. (2017). Toward cost-effective and energy-efficient heat recovery systems in buildings: Thermal performance monitoring. *Energy*, 137, 487-494.
- Cuce, P. M., Cuce, E., Alqahtani, A. A., Alshahrani, S., Soudagar, M. E. M., Cao, J., Bouabidi, A., Attia, M.E.H., Yilmaz, Y. N. (2025). Thermal performance analysis of a low-cost and eco-friendly rotary desiccant wheel dehumidification system with recycled materials. *Case Studies in Thermal Engineering*, 70, 105973.
- Cuce, P. M., Cuce, E., Riffat, S. (2016). A novel roof type heat recovery panel for low-carbon buildings: An experimental investigation. *Energy and Buildings*, 113, 133-138.

- Cuce, P. M., Riffat, S. (2015). A comprehensive review of heat recovery systems for building applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 47, 665-682.
- Cuce, P.M., Riffat, S. (2016). A state-of-the-art review of evaporative cooling systems for building applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 54, 1240-1249.
- Cuce, P.M., Riffat, S. (2024a). A novel moist airflow heating system for low/zero carbon buildings: A numerical study. *Sustainable and Clean Buildings*, 1(1), 23-41.
- Cuce, P.M., Yilmaz, Y.N., Cuce, E. (2025). A comprehensive review on rotary desiccant wheel systems: the future of smart building climate control. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*.
- Du, Z., Lin, X. (2020). Research Progress of Rotary Desiccant Wheel Optimization Technology. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 512(1), 012181.
- Enteria, N., Yoshino, H., Satake, A., Mochida, A., Takaki, R., Yoshie, R., Baba, S. (2010). Experimental heat and mass transfer of the separated and coupled rotating desiccant wheel and heat wheel. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 34(5), 603-615.
- Fajar, A.A., Tokimatsu, K. (2024). Building performance simulation of near zero energy building design in Indonesia. *Sustainable and Clean Buildings*, 1(1), 79-97.
- Ge, T., Dai, Y.J., Wang, R.Z., Li, Y., Xu, Z. (2022). Experimental study on novel multi-stage desiccant wheels. *Renewable Energy*.
- Ge, T., Li, Y., Wang, R.Z., Dai, Y.J. (2009). Experimental study on a two-stage rotary desiccant cooling system. *International Journal of Refrigeration*, 32(3), 498-508.
- Hanifah, U., Karim, M.A., Haryanto, A., Alfiyah, R., Taufan, A. (2021). Experimental performance of a rotary desiccant wheel without honeycomb matrix structure: A preliminary study. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1096(1), 012043.
- Jia, C.X., Dai, Y.J., Wu, J.Y., Wang, R.Z. (2007). Use of compound desiccant to develop high performance desiccant cooling system. *International Journal of Refrigeration*, 30(2), 345-353.
- Kabeel, A.E. (2007). Solar powered air conditioning system using rotary honeycomb desiccant wheel. *Renewable Energy*, 32(11), 1842-1857.
- Kabeel, A.E. (2014). Performance of solar-powered rotary desiccant wheel systems. *Energy*.

- Kumar, U.H., Hussain, S.I., Kalaiselvam, S. (2023). Energy-efficient low-temperature activated desiccant wheels with nano-desiccant-coated fiber matrix. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 148(21), 11511-11533.
- Lin, S., Zeng, T., Deng, L., Huang, H. (2025). Performance analysis of a solar-driven rotating desiccant wheel air-conditioning system in Guangzhou. *Thermal Science and Engineering Progress*, 61, 103518.
- Liu, H., Sundarrajan, S., Kumar, G.V., Ramakrishna, S. (2023). Review on polymer materials for solid desiccant cooling system. *Macromolecular Materials and Engineering*, 308(12), 2300176.
- Ma, Z., Liu, X., Zhang, T. (2023). Experimental investigation and effectiveness analysis of a desiccant wheel dehumidification system with low air humidity. *Applied Thermal Engineering*, 226, 120279.
- Mehare, H. B., Hussain, T., Zia, M. A., & Saleem, S. (2025). Performance evaluation of a rotary dehumidifier with molecular sieve desiccant using coupled regeneration mode: Experimental investigation. *Energy and Built Environment*, 6(2), 219-229.
- Singh, G., Das, R. (2023). Performance analysis of evaporation and heat wheel-based building air conditioning systems. *Journal of Energy Resources Technology*, 145(3), 032101.
- Su, M., Han, X., Chong, D., Wang, J., Liu, J., Yan, J. (2021). Experimental study on the performance of an improved dehumidification system integrated with precooling and recirculated regenerative rotary desiccant wheel. *Applied Thermal Engineering*, 199, 117608.
- Verma, A. K., Yadav, L. (2025). Experimental study of desiccant wheel regeneration using a series parabolic trough collector having a concentric copper tube in evacuated tube solar air heater for medium solar intensity. *Journal of Building Engineering*, 113154.
- Yamaguchi, S., Saito, K. (2013). Numerical and experimental performance analysis of rotary desiccant wheels. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 60, 51-60.
- Zhang, Y., Wang, W., Zheng, X., Cai, J. (2024). Recent progress on composite desiccants for adsorption-based dehumidification. *Energy*, 302, 131824

EKLER

Ek-1. Belirsizlik Analizi

Deney düzeneği ile ilgili belirsizlikleri Tablo 4’de özetlenmiştir.

Tablo 4. Cihazların belirsizlikleri.

Cihaz	Hassasiyet	Aralık
Thermocouple (K-type)	± 0.05 °C	0-400 °C
Humidity Sensor	± 1 %	0-100 %