

# Isı Tekerleği Performansının Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği ile Belirlenmesi

Adnan SÖZEN, Erdem ÇİFTÇİ\*

Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği, Ankara, TÜRKİYE

(Geliş / Received : 06.03.2016 ; Kabul / Accepted : 10.03.2016 )

## ÖZ

Isı tekerleği paralel ve karşı akışlı akım düzenine sahip, iş akışkanı olarak havanın kullanıldığı bir ısı değiştiricisidir. Bu ısı değiştiricisi ısı geri kazanımı ve/veya nem alma işlemleri için kullanılır. Sahip oldukları çok sayıda mikro kanal sayesinde çok hızlı ve kısa sürede gerçekleşen ısı transferine olanak sağlamaları, bu cihazlara üstün bir özellik sağlamaktadır. Bu çalışmada ısı tekerleğinin ısı geri kazanımı amacıyla kullanılması durumunda sağlayacağı performans, sayısal olarak belirlenmiştir. Sayısal analizde Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yaklaşımı kullanılarak ısı tekerleğinden elde edilen verimin zamana bağlı olarak değişimi belirlenmiştir. Hesaplamaların yapıldığı ANSYS Fluent yazılımı ile konuma göre değişen sıcaklık dağılımları grafiksel olarak gösterilmiştir. Elde edilen veriler literatürdeki benzer deneysel ve teorik çalışma sonuçları ile kıyaslanmış ve bu sonuçlarla uygunluk sağlandığı görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** Isı tekerleği, performans, hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD).

## Determination of Performance of the Heat Wheel via CFD

### ABSTRACT

Heat wheel is a heat exchanger in which the working fluid is air and also it has parallel and counter current flow layout. These type heat exchangers are used for enthalpy recovery and/or air dehumidification processes. By means of numerous micro channels they have, it is enable for heat wheels to transfer the heat so quickly and in a short span of time, which makes them superior. In this thesis, performance of the heat wheel used for enthalpy recovery was numerically determined. Utilizing Computational Fluid Dynamics (CFD) approach, the alteration of the wheel efficiency with time was investigated. With the help of ANSYS Fluent software in which calculations were made, the temperature distributions by location were presented graphically. The obtained results then compared to experimental and theoretical findings and it is seen that they were in good agreement with each other.

**Keywords:** Heat wheel, performance, computational fluid dynamics (CFD).

### 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Artan enerji ihtiyacına paralel olarak ortaya çıkan enerji ve çevre ile ilgili sorunlar bu alanında çalışma yapan bilim insanlarını yeni arayışlara yönlendirmiş; bunun sonucunda da yeni malzemelerin ve teçhizatların icat edilmesini beraberinde getirmiştir. Son yıllarda yayımlanmış olan bir rapora göre, dünya enerji tüketiminde 2035 yılına kadar % 47 oranında bir artış meydana geleceği öngörülmektedir. Enerji tüketimine ek olarak fosil yakıt kaynaklı karbon emisyonları da 1900'lü yıllardan beri artmaktadır [1]. Bu trendin önümüzdeki yıllarda da devam edeceği bilim insanları tahmin edilmektedir. Günümüzde bu problemlerin bir çözümü olarak yeni teknolojilerin geliştirilmesi kaçınılmaz olmuştur. Bu amaçla özellikle enerji verimliliği konusu daha fazla önem kazanmış, konvansiyonel cihazlar/ekipmanlar yerine enerjiyi daha verimli kullanan cihazlar geliştirilmiştir.

Bu çalışmada, özellikle ısı ve nem geri kazanımı başta olmak üzere hava temizleme, gaz ayırma gibi işlemlerde kullanılan ısı tekerleğinin performansı, hesaplamalı akışkanlar dinamiği yaklaşımı kullanılarak belirlenmiştir. Isı tekerleği, paralel ve karşıt akış düzenine sahip bir hava-hava ısı değiştiricisidir. Sahip olduğu mikro kanal geometrisinin bu tip ısı değiştiricilerine yüksek etkileşim alanı sağlaması, bu cihazların daha hızlı ve daha verimli birer ısı değiştirici olmasını sağlamaktadır. Bu ısı değiştiricisini emsallerinden ayıran en önemli fark, kullanımı esnasında birbirine paralel ve zıt yönlü olarak akmakta olan farklı sıcaklıklardaki iki akış hacmi arasında dönme hareketi yapması ve bu sayede ısı transferinin daha hızlı gerçekleşmesini sağlamasıdır. Ayrıca bu cihazların en temel parçası olan dolgu malzemeleri, sahip oldukları gözenekli yapı sayesinde ısı transferinde yüksek verimlilik sağlamakla birlikte kütle transferini de mümkün kılmaktadır. Literatürde ısı tekerleğinin verimliliğini belirlemek amacıyla birçok deneysel ve teorik çalışma mevcuttur. Bu çalışmaların bazıları şöyle özetlenebilir:

\*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)

e-posta: erdemciftci@gazi.edu.tr

Digital Object Identifier (DOI) : 10.2339/2016.19.4 547-554

Ge ve diğerleri (2007), nem alma işlemleri için kullanılan döner tekerlek tipi bir nem çekme ekipmanının (nem alma tekerleği) ve bulunduğu sistemin performans analizlerinde kullanmak üzere bir matematik model geliştirmişlerdir. Bu amaçla öncelikle nem alma tekerleğinin çalışma prensibi üzerine odaklanmış, baskın olan ısı ve kütle transfer mekanizmaları üzerinden bir matematik model oluşturmuşlardır. Korunum denklemleri, ideal şartlar ve bazı kabuller ışığında farklı sistemler için gaz tarafı direnci (GTD), gaz ve katı tarafı direnci (GKTD) gibi çözüm modelleri elde etmişlerdir. Elde ettikleri bu modelleri deneysel bir çalışmaya uygulayarak karşılaştırma yapmışlardır. Karşılaştırma sonucunda GTKD modelinin GTD modeline göre daha hassas ancak daha karmaşık yapıda olduğunu göstermişlerdir [2].

Zhang ve diğerleri (2010), eşit sıcaklık şartları altında hidrodinamik olarak tam gelişmiş, ısıl olarak gelişmekte olan sinüzoidal oluk biçimli kanallarda ısı geçişini ve basınç düşüşünü incelenmişlerdir. Yüksek hassasiyetli ve kapalı çözüm yönteminin kullanıldığı bir sayısal yöntem ile kütle ve enerji korunum denklemlerinin sonlu farklar metodu ile ayrıklaştırılmasını detaylı olarak yaptıkları bu çalışmada; Reynolds sayısı, bölgesel ve ortalama Nusselt sayıları gibi boyutsal sayıları hesaplamışlardır. Çalışma sonucunda elde edilen verilerin bal peteği tipi kanallara sahip rejeneratif ısı değiştiricilerinin performans analizlerinde kullanılmasında yararlı olabileceğini belirtmişlerdir [3].

Tu ve diğerleri (2013), ısı geri kazanımı ve nem alma işlemleri için kullanılan rejeneratif tekerlekler için matematiksel model oluşturmuşlar ve kurdukları deney düzeneği ile bu modeli doğrulamışlardır. Substrat (sentezlenen-ayrışan) madde, dönme hızı ve hava karışımının ısı /nem alma tekerleği performansı üzerine etkilerini deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışma neticesinde yüksek ısıl kapasiteye ve düşük ısıl iletkenliğe sahip substrat maddelerin ısı geri kazanımı işlemleri için, düşük ısıl kapasiteye ve düşük ısıl iletkenliğe sahip substrat maddelerin ise nem alma işlemleri için uygun olduklarını bulmuşlardır. Belirli şartlar altında hem nem alma hem de ısı geri kazanım tekerleğinden maksimum verim sağlayacak optimum bir dönme hızının olduğunu göstermişlerdir [4].

Wu ve diğerleri (2005), tekerlek geometrisini oluşturan matrisin ve kullanılan akışkanın ısıl performansını belirlemek için daha önceki çalışmalar sonucu elde edilen matematik modelleri kullanarak rejeneratif ısı tekerleğinin modele dayalı ısıl analizini yapmışlardır. Benzer çalışmalardan farklı olarak akış yönündeki ısı iletimini de hesaba katıp dönme hızının, ortalama akışkan sıcaklığının ve akış hızının performansına olan etkilerini teorik olarak incelemişlerdir. Çalışma sonucunda ısı tekerleğinin termal analizinde kullanılacak bir model ortaya koymuşlardır [5].

Sphaier ve Worek (2005), ısı ve nem alma tekerleklerinde eksenel difüzyonu incelemek için ısı ve kütle transferinin iki boyutta (eksenel ve radyal yönlerde)

gerçekleştiğini kabul ederek matematiksel bir model oluşturmuşlardır. Elde ettikleri denklemleri sayısal olarak çözmüşler ve bu verilerden Biot sayısı, dönme hızı, gözenekli yapıdaki substrat maddenin en-boy oranı gibi eksenel difüzyonu temsil eden parametrelerin değişimini incelemişlerdir. Ortaya koydukları sonuçların tasarım aşamasındaki bir nem alma tekerleği için işletme şartlarında eksenel difüzyonun oluşup oluşmadığı hakkında bilgi vermesi açısından önemli olduğunu vurgulamışlardır [6].

Nobrega ve Brum, döner tip ısı ve kütle değiştiricileri için basit bir matematiksel model kurmuşlardır. Kurdukları modeli ve  $\varepsilon - NTU$  yöntemini kullanarak ısı ve nem alma tekerlerinin performanslarını karşılaştırmışlardır. Atmosferik şartlara bağlı olmakla birlikte ısı tekerleğinin nem alma tekerleğine kıyasla daha verimli olduğunu sonucunu elde etmişlerdir [7].

Niu ve Zhang, katı malzemedeki direncin hem eksenel hem de kalınlık doğrultusunda olduğunu ifade eden iki-boyutlu birleşik ısı ve kütle transferi modelini kullanarak nem alma tekerleğindeki ısı ve kütle transferini simüle etmişlerdir. Sayısal analizlerle gizli ve duyulur ısı geri kazanımı, havanın nemini alma gibi işlemler için optimum dönme hızını belirlemişlerdir. Her iki uygulama için mikro kanallardaki duvar kalınlığının optimum dönme hızına olan etkilerini araştırmışlardır. Duvar kalınlığının artmasıyla optimum dönme hızının azaldığını, nem alma işleminin ısı geri kazanımına oranla duvar kalınlığından daha çok etkilendiğini bulmuşlardır [8].

Ruivo ve diğerleri, atmosferik basıncın nem alma tekerleğindeki ısı ve kütle transfer hızlarına olan etkilerini sayısal olarak araştırmışlardır. Higroskopik malzeme olarak silicagel kullandıkları çalışmalarında proses ve rejenerasyon hava hızlarını sabit almışlardır. Çalışma sonucunda atmosfer basıncının düşmesiyle orantılı olarak ısı ve kütle transfer hızlarında da bir düşüş yaşandığını gözlemlemişlerdir. Bu sonucun özellikle uzun olmayan mikro kanallarda ve hava debisinin çok düşük olduğu durumlarda daha belirgin olduğunu belirtmişlerdir [9].

Zhang ve diğerleri, bal peteği tipi adsorban yataklarda (nem alma tekerleği) farklı dolgu malzemesi kullanımının nem alma verimine olan etkisini karşılaştırmışlardır. Bu amaçla, yaygın olarak kullanılan 10 adet dolgu malzemesi seçmişler ve her bir malzeme için proses havası sıcaklığı, rejenerasyon havası sıcaklığı ve nem miktarının, sistemin performans parametreleri olan COP, SDP ve  $\varepsilon_d$  üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Seçilen bu malzemeler içerisinde aynı çalışma şartları altında ve düşük rejenerasyon havası sıcaklıklarında silicagel 3A ve silicagel RD'nin en iyi sonuçları verdiğini gözlemlemişlerdir [10].

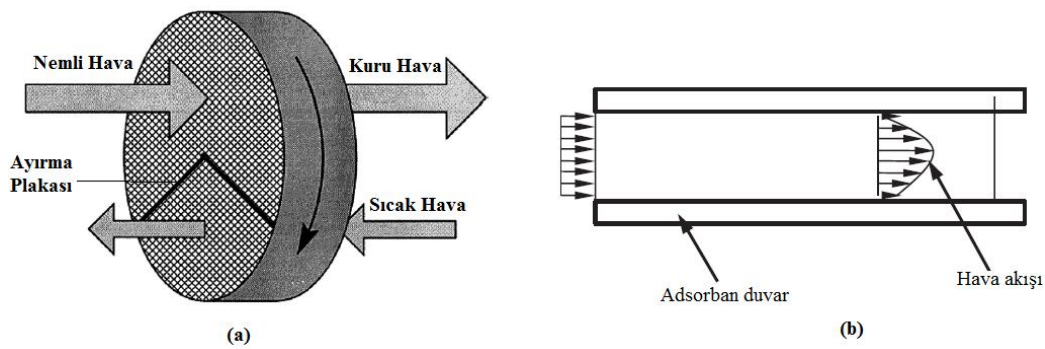
Zhang ve Niu, ısı ve nem alma tekerleklerinin çalışma şartlarının farklı olması nedeniyle her iki ekipmanın ısı ve kütle transferi karakteristiklerini incelemiş ve birbirleriyle kıyaslamışlardır. Çalışmalarında dolgu malzemesindeki ısı iletimini, hem eksenel hem de

kalınlık yönündeki yüzey ve gaz difüzyonunu hesaba katan çift yönlü difüzyon içeren iki-boyutlu zamana bağlı ısı ve kütle transferi modelini kullanmışlardır. Her bir durum için tekerleklerin dönme hızının, NTU değerinin ve ısı/kütle transfer alanının performans etkilerini araştırmışlardır. Isı geri kazanımı ve nem alma proseslerini psikometrik diyagram üzerinde göstererek bu iki uygulamanın farklı ısı ve kütle transfer mekanizmalarına sahip olduklarını belirtmişlerdir [11].

Literatürdeki bu çalışmalar incelendiğinde; ısı tekerleği performansının teorik olarak belirlenmiş olduğu hesaplamalarda bazı kabuller yapılarak çözüm elde edilebildiği anlaşılmaktadır. Bunun yanı sıra, dönme sayısının performans üzerine olan etkisinin sayısal olarak incelendiği çalışma sayısının da çok az olduğu görülmektedir. Yukarıda bahsedilen eksiklikleri gidermek amacıyla yapılan bu çalışmada, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği sayısal analiz yöntemi ile dönme sayısının ısı tekerleği performans parametreleri üzerine olan etkileri, zamana bağlı çalışma şartları altında araştırılmıştır. Deneysel bir çalışmada kullanılan başlangıç sınır şartları ile sayısal çözümün sınır şartları oluşturulmuş, elde edilen veriler deneysel ve teorik sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

## 2. ISI TEKERLEĞİ (HEAT WHEEL)

Isı tekerleği, havanın iş akışkanı olarak kullanıldığı, zıt yönlü ve paralel akım düzenine sahip bir ısı ve kütle değiştiricisidir (Şekil 1). Bu ısı ve kütle değiştiricileri; adsorban (yüzeyinde tutma özelliği olan, yüzeyinde tutan) yatak tipi ısı ve kütle değiştiricilerinin sürekli rejimde çalışmasına ihtiyaç duyulmasına istinaden ortaya çıkmıştır. Bu tip ısı ve kütle değiştiricilerine rejeneratif (kendini yenileyen) ısı ve kütle değiştiricileri de denilmektedir [12].



Şekil 1. Isı tekerleğinin genel bir görünümü (a) ve kanallardaki akış profili (b) (A general view of heat wheel (a) and velocity profile in channels ) [1]

Rejeneratif ısı değiştiricilerinde diğer eşanjörlerde de olduğu gibi ısı transferi dolaylı olarak gerçekleşir. Sıcak akışkan tarafından (genellikle hava) bir ortamda (adsorban malzeme yüzeyinde) tutulan ısı daha sonra

soğuk akışkana verilerek ısı transferi sağlanmış olur. Her cihaz gibi bu cihazlarında hem üstünlükleri hem de kısıtlamaları vardır. Rejeneratif ısı değiştiricilerinin sahip olduğu üstünlükler şu şekilde sıralanabilir:

- ✓ Kompakt ısı değiştiricileri sınıflandırması yapmak üzere belirlenmiş olan yüzey alanı yoğunluğunun<sup>1</sup> (kompaktlık- $\beta$ ) çok büyük değerlere çıkabilmesi (Rejeneratif ısı değiştiricileri için bu değer 1600-16000  $m^2/m^3$  arasında değişmektedir.) [12],
- ✓ İlk yatırım masrafının az olması,
- ✓ Sistemin kendi kendini temizleme özelliğinin bulunması,
- ✓ Yüksek etkenliğe ve buna karşın küçük basınç düşümüne ( $\Delta P$ ) sahip olması,

Bunların yanı sıra şu özellikler ise rejeneratif ısı değiştiricilerinin kullanımlarını kısıtlamaktadır:

- ✓ İş akışkanı olarak sadece gaz akışkanların kullanılabilmesi,
- ✓ Sıcak ve soğuk akışkanlar arasında her zaman bir miktar kaçak olması (Bu durum özellikle akışkanların karışmasının istenmediği durumlarda büyük bir engeldir),
- ✓ İş akışkanlarının birbirine etki ediyor olması,

## 3. HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ (COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS)

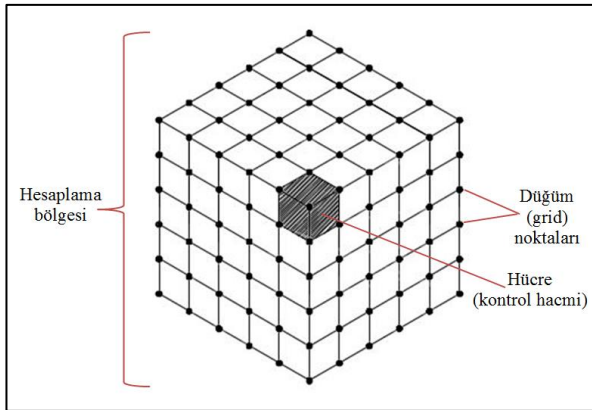
Hesaplamalı akışkanlar dinamiği (bundan sonra HAD olarak taksir edilecek); akış, ısı ve kütle transferi problemlerinin sayısal olarak çözümlendiği bir analiz yöntemidir. Akışkanın hareketini tanımlayan diferansiyel denklemlerin çözümlendiği bu yöntem, özellikle deneysel çalışmalarla elde edilemeyen kayma gerilme, hız, basınç ve sıcaklık dağılımları, akışa ait akım çizgileri gibi akış alanı hakkındaki ayrıntıları elde etmek için

kullanılmaktadır. Ayrıca, HAD analizleri sonucu elde edilen verilerin benzer deneysel ve teorik çalışmalarla karşılaştırılması ve doğrulanması bir sonraki süreçte

<sup>1</sup> Isı geçiş yüzey alanının ( $m^2$ ) ısı değiştirici hacmine ( $m^3$ ) oranı, yüzey alanı yoğunluğu ya da kompaktlık ( $\beta$ ) olarak adlandırılır.

gerekli deney sayısını düşürerek tasarım sürecinin kısalmasına da katkıda bulunurlar [13].

HAD analizlerinde, problemin temel denklemleri ile sınır şartlarının akış alanı içerisinde sonlu sayıda nokta için diferansiyel formdan cebirsel forma dönüştürüldüğü ifade edilmiştir. Bir hesaplama bölgesi seçilerek yukarıda bahsedilen bu çözüm noktalarını içeren akış alanının oluşturulması HAD analizlerinde ağ (örgü) yapısı oluşturma (meshing) olarak ifade edilmektedir. Ağ yapısı içerisindeki her bir sonlu noktaya ise düğüm noktası, grid noktası ya da çözüm noktası denilmektedir (Şekil 2). Oluşturulan ağ yapısının çok sayıda küçük elemanlara dönüştürülmesiyle hücre adı verilen birimler oluşturulur. Bu birimler 2-boyutlu analizlerde alanlar, 3-boyutlu analizlerde ise hacimlerdir [13].



Şekil 2. 3-boyutlu bir ağ yapısındaki elemanlar (The elements in a 3-D meshing)

HAD analizlerinden elde edilen sonuçların niteliği, büyük ölçüde oluşturulan ağ yapısının kalitesine bağlıdır. Ticari HAD yazılımlarında oluşturulan ağ yapısının kalitesini gösteren bazı parametreler vardır. Bu parametreler; çarpıklık oranı, diklik kalitesi ve eleman kalitesidir. Bu çalışmada oluşturulan ağ yapısının kalitesi Çizelge 1’de verilmiştir.

Çizelge 1. Ağ yapısının kalitesini gösteren parametreler ve değerleri (The mesh metrics and their values)

Parametre	En küçük değer	En büyük değer	Ortalama
Çarpıklık oranı (-)	1,3057	0,9388	0,2317
Diklik kalitesi (-)	0,1107	1	0,9172
Eleman kalitesi (-)	0,1020	0,9989	0,8213

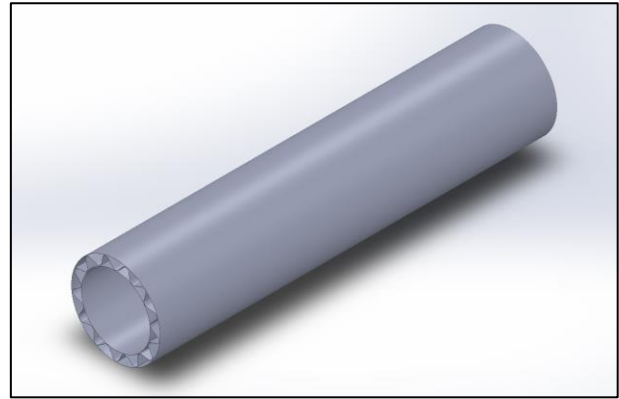
#### 4. YÖNTEM (METHOD)

##### 4.1. HAD Modelinin Oluşturulması (Constitution of CFD Model)

Bilgisayar yardımıyla sayısal analizi gerçekleştirilecek olan bir problemin analizine geçmeden önce yapılması gereken ilk işlem problemin geometrisini tam anlamıyla yansıtan bir modelinin oluşturulmasıdır. HAD analizi yapılacak olan ısı tekerleğinin modeli bir CAD programı vasıtasıyla gerçekleştirilmiştir. Modele ait bir görüntü Şekil 4’de verilmiştir.

Şekil 3’de görüldüğü gibi, ısı tekerleğini oluşturan her bir kanal çok küçük bir hacme sahiptir. Isı transferinin büyük ölçüde etkin ve hızlı gerçekleşmesini sağlayan bu geometrik yapının ticari bir HAD yazılımıyla analizi için çok güçlü bilgisayarlar gereklidir. Çünkü model üzerinde oluşturulacak olan ağ yapısı fazla sayıda (birkaç milyon üzerinde) düğüm noktası ve hücre içerecektir ki bu da analizlerin çok uzun (bazen haftalarca) sürmesine neden olacaktır. Bu sebeple çoğu HAD analizinde modelin tamamı için geçerli tüm fiziksel şartları yerine getiren daha basit bir model oluşturulup analiz işlemlerine geçilmektedir. Bu yaklaşım özellikle simetrik geometriye sahip problemlerde yaygın olarak kullanılmaktadır.

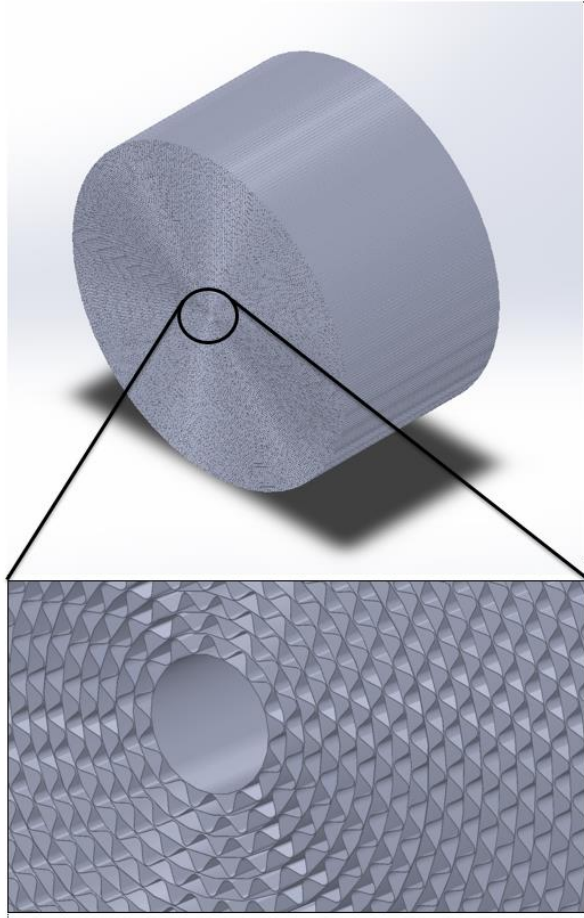
Yapılan çalışmada literatürdeki çalışmalardan farklı olarak tek bir kanal yerine kanal halkası (Şekil 3) olarak ifade edilen 3-boyutlu akışkan bölgesinde analizler yapılmıştır. Kanal halkası, ısı tekerleği üzerindeki bir daire halkasını oluşturan kanalların meydana getirdiği geometri olarak tanımlanabilir. Bu geometri, gerçek geometriyi tüm özellikleriyle yansıtan basitleştirilmiş modeldir. Gerçek ve basitleştirilmiş modelin geometrik özellikleri Çizelge 2’de verilmiştir.



Şekil 3. Analizi yapılan basitleştirilmiş modele (kanal halkası) ait bir görünüm (A general view of analyzed channel circle)

Çizelge 2. Gerçek ve basitleştirilmiş modelin geometrik özellikleri (The geometric properties of real and simplified model)

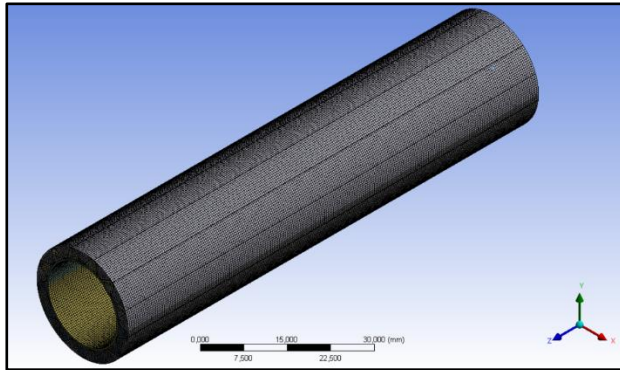
Özellik / Model Tipi	Gerçek model	Basitleştirilmiş model
Tekerlek çapı (mm)	300	17 / 22 (iç/dış)
Kanal geometrisi	Sinüzoidal	Sinüzoidal
Kanal genişliği (mm)	2,5	2,5
Kanal malzemesi kalınlığı (mm)	0,12	0,12
Cidar kalınlığı (mm)	1,9	1,9
Kanal uzunluğu (mm)	100	100



**Şekil 4.** Isı tekerleğini oluşturan mikro kanallar ve bu kanalların yakından görünümü (The micro channels geometry consisted of heat wheel and zoomed view of them)

#### 4.2. Ağ Yapısının Oluşturulması (Meshing)

Isı tekerleğinin sahip olduğu silindirik şekilden dolayı süpürme (sweep) yöntemi ile dörtgen şeklindeki hücrelerden oluşan bir ağ yapısı oluşturulmuştur. Sadece en-kesiti geometri boyunca değişmeyen modellere uygulanabilen bu yöntemde, sabit kesit alanında oluşturulan ağ yapısı tüm geometri boyunca bir uçtan diğer uca devam ettirilerek ağ yapısı oluşturulur. Şekil 5’de ağ yapısına ait bir görünüm verilmiştir.



**Şekil 5.** Basitleştirilmiş model üzerinde oluşturulan ağ yapısı (Created mesh at simplified model)

Oluşturulan ağ yapısı 551447 adet düğüm noktasından ve 386500 adet elemandan oluşmaktadır. Model eğrisel yapıda unsurlar içerdiğinden, eleman şekil ve boyutlarını bu unsurlara göre ayarlayan Curvature size function seçeneği aktif edilmiştir.

#### 4.3. Sayısal Analiz İşlemleri (Numerical Analysis Processes)

HAD analizlerinde, ağ yapısının oluşturulması ve kalitesinin irdelenmesinin ardından uygun bir ağ yapısına karar verildikten sonra sayısal analize geçilmektedir. Sayısal analiz işlemleri Ansys programının Fluent modülünde gerçekleştirilmiştir. Bu modülde yapılan işlemler şu şekilde sıralanabilir:

- ✓ İlk olarak Check Mesh (Ağ yapısını kontrol et) seçeneği ile oluşturulan ağ yapısının genel kontrolleri sağlanmıştır. Ağ yapısı oluşturma işlemi neticesinde hacim elemanlarının negatif değerde bir hacme sahip olmaması gerektiğine dikkat edilmelidir. Oluşturulan ağ yapısında böyle bir durumla karşılaşılmasıdır.
- ✓ Kontrol işlemi tamamlandıktan sonra çözücü ayarları yapılmıştır. Basınç tabanlı, zamana bağlı çözücü ve de doğal taşınımın da etkisini görmek amacıyla Gravity (yerçekimi, y ekseninde  $-9,81 \text{ m/s}^2$ ) etkin hale getirilmiştir.
- ✓ Isı transferini de hesaplamak için enerji denkleminin çözdürülmesini sağlayan Energy (enerji) seçeneği on (açık) olarak ayarlanmıştır.
- ✓ Materials (malzemeler) sekmesinden ısı tekerleği malzemesini oluşturan silicagelin termofiziksel özellikleri girilmiştir (Çizelge 4.3).
- ✓ Cell Zone Conditions (Hacim bölgeleri için sınır şartları) sekmesinden ısı tekerleğinin dönme devir sayısı (10 d/d) girilmiştir.
- ✓ Boundary Conditions (Sınır şartları) menüsünden akışkan bölgelerinin sahip olduğu sınır şartları girilmiştir. Bu sınır şartları soğuk ve sıcak hava akımları için sırasıyla 297,15 K sıcaklık, 3,8 m/s akışkan (hava) hızı ile 308,15 K sıcaklık, 3,8 m/s akışkan (hava) hızıdır. Yapılan sayısal çalışma sonuçlarını benzer çalışma sonuçlarıyla kıyaslama açısından bu sınır şartları seçilmiştir [1]. Akışkan hızları süreklilik denkleminde faydalanılarak hesaplanmıştır.
- ✓ Isı tekerleğinin çalışma esnasındaki dönme hareketini simüle etmek için, dönecek olan hacim ve bu hacim ile ortak bir ara yüzeye sahip başka bir sabit hacim arasında Mesh Interface (ağ yapıları arasında ara yüz tanımlama) işlemi yapılmıştır. Bu işlem sayesinde ısı tekerleğinin girilen dönme devir sayısına bağlı olarak açılacak dönme hareketi yapması sağlanmıştır. Fluent modülündeki bu işleme Sliding Mesh Method-SMM- (kayan ağ metodu) denilmektedir<sup>3</sup>.
- ✓ Solution Methods (Çözüm yöntemleri) menüsünden Coupled (Birleşmiş, Bağlaışık) düzeninde; Basınç için PRESTO!, enerji ve



momentum denklemlerinin çözümü için ise Second Order Upwind (İkinci derece Upwind) Metotları seçilmiştir. Zamana bağlı formülasyon için ise Second Order Implicit (İkinci Dereceden Kapalı) metot kullanılmıştır<sup>3</sup>.

- ✓ Solution Controls (Çözüm kontrolleri) sekmesinde Flow Courant Number (Akış Courant sayısı) 1 olarak ayarlanmıştır.

## 5. BULGULAR (FINDINGS)

Isı tekerleğinin dakikada 10 devir döndürülmesi ile oluşan sıcaklık dağılımlarını ve ısı transferini incelemek için yapılan sayısal çözümleme sonucu elde edilen sonuçlar Şekil 6'da verilmiştir. Sonuçların daha detaylı incelenebilmesi için 100 mm uzunluğa sahip ısı tekerleği üzerinde 20 mm aralıklarla 6 bölgede sonuçlar incelenmiştir ( $z=0 - 0.1$  m).

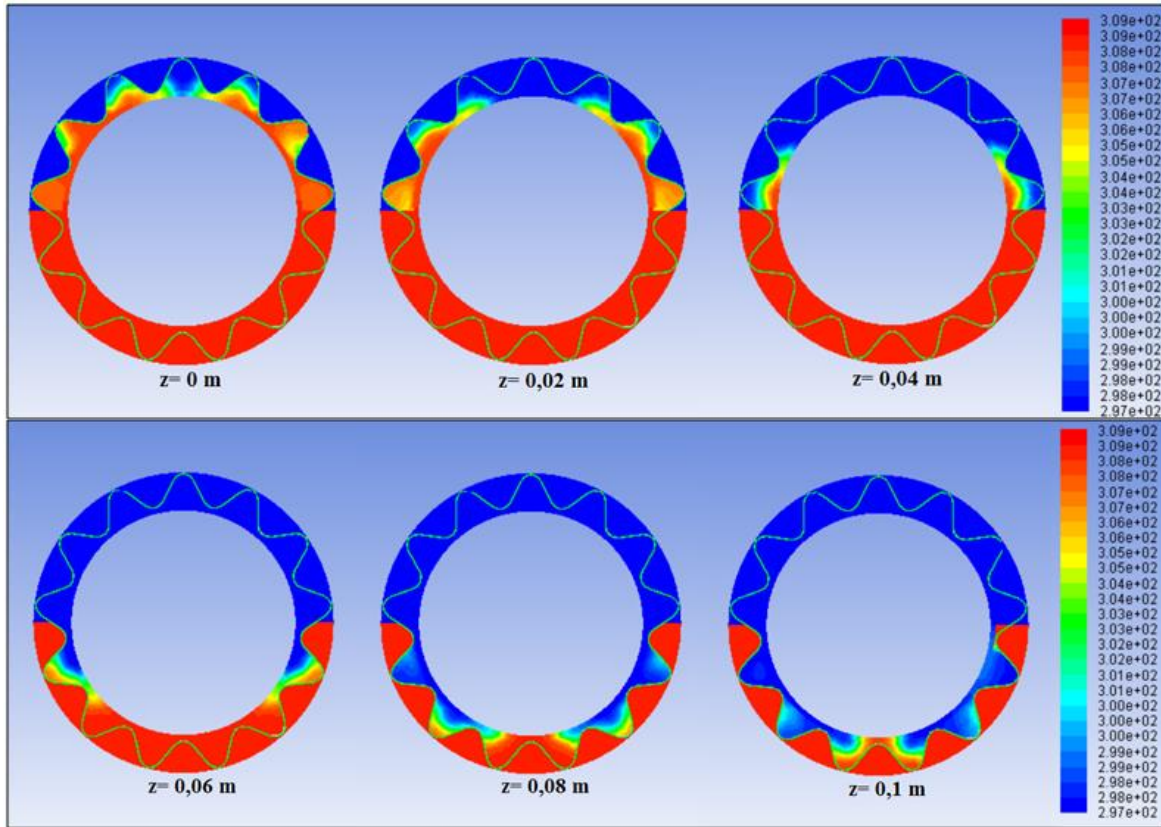
olduğunu belirtmiştir [1]. Zhang tarafından yapılan bu çalışma, aynı sınır şartları kullanılarak gerçekleştirilen sayısal analiz sonuçlarının değerlendirilmesinde referans olarak kullanılmıştır.

Isı değiştiricilerinin etkenliği "Eş.1" de verilen bağıntı ile hesaplanmaktadır.

$$\varepsilon = \frac{Q}{Q_{max}} \quad (1)$$

Bu bağıntıda ( $Q$ ) bir ısı değiştiricisinde gerçekleşen ısı transferini, ( $Q_{max}$ ) ise aynı şartlar altında bu ısı değiştiricisinde gerçekleşebilecek maksimum ısı transferidir. "Eş. 1" den yararlanarak 10 d/d dönme hızında ısı tekerleğinin etkenliği

$$\varepsilon_{10 \text{ d/d}} = \frac{Q_{gerçek}}{Q_{max}} = \frac{8,5415 \cdot (303,9 - 297,15)}{8,5415 \cdot (308,15 - 297,15)} = 0,6107 \quad (2)$$



Şekil 6.  $n=10$  d/d dönme sayısında elde edilen ölçüm noktalarındaki sıcaklık dağılımları (The temperature distribution on the measurement points for  $n=10$  rpm rotational speed)

Analiz sonuçlarında akışkanlar arasında gerçekleşen ısı transferi sonucu soğuk ve sıcak akışkanların ortalama çıkış sıcaklıkları sırasıyla 301,4 K ve 303,9 K bulunmuştur.

Zhang (2014), dakikada 0 ile 50 devir aralığında değişen dönme hızlarında ısı tekerleği performansını incelemiştir. Tek bir kanal kullanarak yaptığı sayısal ve hazırladığı düzenek ile yaptığı deneysel çalışma sonucunda, ısı tekerleğinin 10 d/d ile dönmesi halinde etkenliğinin maksimum değere ulaştığını ve bu devirdeki dönme hızının ısı geri kazanımı için optimum değer

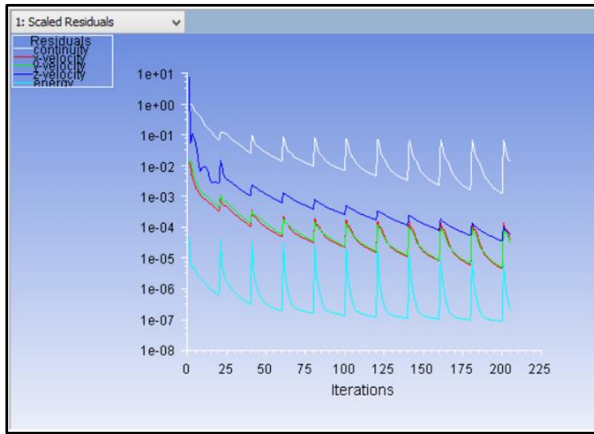
Bu denklemde 8,5415 olarak verilen değer ısı kapasite debisi ( $C$ ) olarak tanımlanmaktadır. Isıl kapasite debisi "Eş. 3"de verilen denklemde hesaplanmıştır.

$$C = \dot{m}c_p = 0,0085 \cdot 1005 = 8,5415 \text{ W/K} \quad (3)$$

"Eş. 2"de görüldüğü gibi 10 d/d dönme hızında ısı tekerleğinin etkenliği 0,6107 olmaktadır. Yapılan sayısal analiz sonucuna göre, ısı geri kazanım oranının % 61,1 olduğu söylenebilir.

HAD yaklaşımı kullanılarak yapılan sayısal analizlerde, korunum denklemlerindeki terimlerin denklemin tek bir

tarafında toplanamaması sonucu, çözüm bölgesindeki her bir hücre için artık (residual) olarak tanımlanan veriler oluşur. HAD analizlerinde bu verilerin toplamı hiçbir zaman sıfır olmasa da, toplamın sıfıra yakınlığı kullanılarak yapılan çözümün tam çözümden ne kadar saptığı hakkında fikir yürütülebilir. Bu işlem HAD analizlerinde yakınsama olarak tanımlanmaktadır. Yapılan bir HAD çözümlemesinde önceden belirtilen bir kriter gereği çözümün başlatılması ve bu değere yakınsaması gözlemlenir. Çok küçük değerdeki bir yakınsama kriteri için bu işlem ne kadar az iterasyonda gerçekleşirse; problemin tanımlanması, sınır şartlarının oluşturulması ve elde edilen çözüm sonuçlarının doğruluğu o oranda hassas olmaktadır. Bu çalışmada ısı tekerleğinin analizleri için yakınsama kriteri  $10^{-6}$  olarak ayarlanmıştır. Bu kriterde ortalama olarak 240 iterasyonda çözümlerin yakınsadığı gözlemlenmiştir (Şekil 7).



Şekil 7. 10 d/d dönme hızı için yakınsama grafiği (The convergence view for 10 rpm)

Ağ yapısından bağımsızlık, oluşturulan ağ yapısındaki hücrelerin sayısında, boyutunda veya geometrisinde bazı değişiklikler yapılmasına karşın elde edilen sonuçların kabul edilebilir hata oranları içerisinde olmasıdır. Bu çalışma için ağdan bağımsızlık işlemi, 3 farklı miktarda eleman sayısı oluşturularak yapılan analiz sonuçları ile gösterilmiştir. 10 d/d dönme hızında yapılan analizler sonucunda elde edilen soğuk akışkanın çıkış sıcaklıkları karşılaştırılarak sonuçların ağdan bağımsız olduğu tespit edilmiştir. Her bir eleman sayısında oluşturulan ağ ile ilgili kalite parametrelerinin ortalama değerleri ve soğuk akışkanın çıkış sıcaklıklarındaki değişimler Çizelge 3’de verilmiştir.

Çizelge 3. Oluşturulan ağ yapıları ve soğuk akışkan için elde edilen sıcaklık değerleri (Constituted meshes and obtained temperature values for cold fluid)

Ağ çeşitleri	Ağ Kalitesi Göstergeleri			Ağ özellikleri		Soğuk akışkan çıkış sıcaklığı (K)
	Çarpıklık Oranı	Diklik Kalitesi	Eleman Kalitesi	Eleman sayısı	Düğüm sayısı	
Ağ yapısı-I	0,2112	0,9321	0,8655	854478	1172006	301,75818
Ağ yapısı-II	0,2317	0,9172	0,8213	386500	551447	301,38965
Ağ yapısı-III	0,3240	0,8346	0,7175	144622	216384	301,05698

Çizelge 3’de görüleceği gibi farklı ağ yapılarında sayısal analizler gerçekleştirilmesine karşın soğuk akışkanın çıkış sıcaklığında çok küçük değişimler olmuştur (Hata payı % 0,2 civarındadır). Ağ yapılarının kaliteleri incelendiğinde, artan eleman sayısına paralel olarak ağ kalitesinin iyileştiği görülmektedir. Ancak yüksek eleman sayılarında çalışmak için çok güçlü bilgisayarlar gereklidir. Bu nedenle hem eleman sayısı hem de kalite parametreleri açısından en uygun olan II numaralı ağ yapısı tipi ile sayısal analizler gerçekleştirilmiştir.

## 6. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS & DISCUSSION)

İş akışkanı olarak farklı sıcaklıklara sahip iki gaz akışkanın (genellikle hava) kullanıldığı döner dolgu maddeli, paralel ve karşıt akışlı rejeneratif ısı değiştirici (ısı tekerleği) performansının hesaplamalı akışkanlar dinamiği yaklaşımı ile belirlendiği bu tez çalışmasında; sinüzoidal kanal geometrisine sahip, iş akışkanı hava olan ve adsorban malzeme olarak silicagel’in kullanıldığı bir ısı tekerleği modeli oluşturulmuştur. Analizi yapılan model 22 mm iç çapa ve 17 mm dış çapa sahiptir. Kullanımı esnasında sabit bir açılma hızla dönme hareketi yapan ve bu sayede sürekli rejimde çalışabilme olanağı sunan bu ısı değiştiricisinin 10 d/d devir sayısında dönmesi durumunda performansındaki değişimler sayısal olarak incelenmiştir. Bu çalışma sonucu elde edilen veriler ve ileride yapılabilecek çalışmalar genel hatlarıyla şu şekilde özetlenebilir:

- ✓ Isı tekerleğinden elde edilecek performansın büyük ölçüde dönme sayısına bağlı olduğu ve bu cihazlardan en iyi verimi alabilmek için bir optimal dönme sayısı olduğu yapılan çalışma ile bir kez daha kanıtlanmıştır. Bu çalışmadaki sınır şartlarında ısı tekerleği için optimum performans 10 d/d dönme hızında elde edilmiştir.
- ✓ 10 d/d dönme hızı için ısı tekerleğinin etkenliği %61,1 olarak hesaplanmıştır.
- ✓ Karmaşık geometriye sahip bir problemin çözümü için sayısal yöntem kullanmanın sağladığı fayda anlaşılmıştır.
- ✓ Bu çalışmada adsorban malzeme olarak silicagel (Type A) kullanılmıştır. İş akışkanlarının giriş hızları eşit kabul edilmiştir. Gelecek çalışmalarda farklı adsorban malzemeler ya da birbirinden farklı iş akışkanı hızları kullanılarak sayısal veya deneysel olarak ısı tekerleği performansı incelenebilir.

- ✓ Isı tekerleğinde kullanılan katı malzemenin (adsorban yatak) kimyasal özelliklerinin etkisiyle hızla gerçekleşen ısı transferinde katı malzeme bünyesindeki ısı iletimi çoğu çalışmada ihmal edilmektedir. Katı malzemedeki ısı iletiminin de hesaba katıldığı yeni çalışmalar yapılabilir.
- ✓ Isı tekerleğinin çalışması esnasında oluşan iş akışkanlarının birbirine karışması problemi için malzeme teknolojilerindeki gelişmelerden de faydalanarak yeni tür sızdırmazlık elemanları geliştirilebilir.
- ✓ Sadece gaz akışkanların kullanıldığı bu tür ısı değiştiricilerinde sıcak ve/veya soğuk akışkanların türü değiştirilerek ısı performansını iyileştirilmesi sağlanabilir.

#### SIMGE VE KISALTMALAR (NOMENCLATURE)

$c_p$	Özgül ısı [ $\text{kJkg}^{-1}\text{K}^{-1}$ ]
$\dot{m}$	Kütleli debi [ $\text{gs}^{-1}$ ]
N	Devir sayısı [d/d]
$\dot{Q}$	Isı transferi [W]
T	Sıcaklık [K]
$\Delta T$	Sıcaklık farkı [K]
$\varepsilon$	Etkenlik (-)
$\rho$	Yoğunluk [ $\text{kgm}^{-3}$ ]
$\beta$	Kompaktlık [ $\text{m}^{-2}\text{m}^{-3}$ ]
CAD	Computer Aided Design
CFD	Computational Fluid Dynamics
HAD	Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği

#### TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışmanın oluşturulması süresince 2210-C kodlu teşvik bursu ile verdiği destekten dolayı TÜBİTAK'a (Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu) teşekkür ederiz.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Zhang, L., "Conjugate Heat and Mass Transfer in Heat Mass Exchanger Ducts (First Edition)", USA: Elsevier Inc., 1-92, (2014).
2. Ge, T. S., Li, Y., Wang, R. Z. And Dai Y. J., "A review of the mathematical models for predicting rotary desiccant wheels", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12: 1485-1528, (2008).
3. Zhang, L. Z. and Niu, J. L., "A numerical study of laminar forced convection in sinusoidal ducts with arc lower boundaries under uniform wall temperature", *Numerical Heat Transfer: Part A: An International Journal of Computation and Methodology*, 40: 55-72, (2010).
4. Tu, R., Liu, X. H. and Jiang, Y., "Performance comparison between enthalpy recovery wheels and dehumidification wheels". *International Journal of Refrigeration*, 36: 2308-2322, (2013).
5. Wu, Z., Melnik, R. V. N. and Borup, F., "Model-based analysis and simulation of regenerative heat Wheel", *Energy and Buildings*, 38: 502-514, (2006).
6. Sphaier, L. A. and Worek, W. M. "The effect of axial diffusion in desiccant and enthalpy wheels", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 49: 1412-1419, (2006).
7. Nobrega, C. E. L. and Brum, N. C. L. "Modeling and simulation of heat and enthalpy recovery wheels", *Energy*, 34: 2063-2068, (2009).
8. Niu, J. L. and Zhang, L. Z. "Effects of wall thickness on the heat and moisture transfers in desiccant wheels for air dehumidification and enthalpy recovery", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 29(2): 255-268, (2002).
9. Ruivo, C. R., Costa, J. J. and Figueiredo, A. R. "Numerical study of the influence of the atmospheric pressure on the heat and mass transfer rates of desiccant wheels", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 54: 1331-1339, (2011).
10. Zhang, L. Z., Fu, H. X., Yang, Q. R. and Xu, J. C. "Performance comparisons of honeycomb-type adsorbent beds (wheels) for air dehumidification with various desiccant wall materials", *Energy*, 65: 430-440, (2013).
11. Zhang, L. Z. And Niu, J. L. "Performance comparisons of desiccant wheels for air dehumidification and enthalpy recovery", *Applied Thermal Engineering*, 22: 1347, 1367, (2002).
12. Genceli, O. F., "Isı Değiştiricileri (Birinci Baskı)", Birsen Yayınevi, İstanbul, 12- 61, (2010).
13. Çengel, Y. A., Cimbala, J. M. "Akışkanlar mekaniği temelleri ve uygulamaları (çev. T. Engin, H. R. Öz, H. Küçük ve Ş. Çeşmeci). İzmir: Güven Bilimsel Yayınevi, İzmir, 818-830, (2010).