

HAVA JETİ ÇARPMALI KURUTMA İÇİN FARKLI DAİRESEL NEMLİ NESNE GEOMETRİLERİNİN ISI VE KÜTLE TRANSFERİ ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

*Doğan Engin ALNAK**
*Koray KARABULUT***

Alınma: 01.12.2017; düzeltme: 05.12.2018; kabul: 04.02.2019

Öz: Kurutma, gıdadan suyun uzaklaştırılarak uzun süreli depolama için en çok kullanılan yöntemlerden biridir. Kurutma ile gıdadaki su miktarı ve mikrobiyal aktivitenin önemli ölçüde azalması nedeniyle depolama boyunca meydana gelen fiziksel ve kimyasal değişimler en az seviyede olmaktadır. Bu çalışmada, iki farklı yeni nemli nesne geometrisi olan tam ve ters yarı dairesel nesnenin hava jeti ile kurutulmasının ısı ve kütle transferi artışı üzerindeki etkisi sayısal olarak incelenmiştir. Jet kurutması, nemli nesneden sabit bir jet uzaklığında (H) konumlandırılmış olup laminer ve iki boyutludur. İncelenen tüm durumlar için nemli nesnenin çapı, nemli nesneden olan jet uzaklığı ve jet giriş yüksekliği sabit olarak alınmıştır. Nesnelerin etrafındaki akım çizgileri ve eş sıcaklık eğrileri farklı jet Reynolds sayıları için elde edilmiştir. Korunum denklemlerini çözmek için sonlu hacim yöntemi olan ANSYS Fluent 17,0 bilgisayar programı kullanılmıştır. Hesaplamalar, $Re = 100, 200, 300$ olarak farklı Reynolds sayıları için yapılmıştır. Çalışmanın, literatürde var olan deneysel ve sayısal çalışmayla iyi bir uyum içerisinde olduğu bulunmuştur. Sonuçlar, tam dairesel nemli nesne geometrisinin ters yarı dairesel nemli nesne geometrisinden daha iyi ısı ve kütle transfer performansına sahip olduğunu göstermiştir. Ayrıca, Reynolds sayısının artışının ısı ve kütle transferi üzerinde olumlu bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. Yerel olarak, jet kurutmanın nesnelerin ön taraflarındaki durma noktasına yakın daha etkili oldukları bulunmuştur.

Anahtar Kelimeler: Kurutma, Hava jeti çarpması, Kütle transferi, Nemli nesne, Sayısal analiz

Research of the Effect of Different Circular Moist Object Geometries for Air Jet Impingement Drying on Heat and Mass Transfer

Abstract: Drying is one of the most used methods for long-term storage by removing water from food. The physical and chemical changes occurring during storage are minimal due to the reduction of considerable amount of water and microbial activity of the food. In the present study, the effect of the two different new moist object geometries with whole and reverse semi-circular on the heat and mass transfer enhancement of drying with air jet was numerically examined. The drying jet was a laminar and 2D jet stationed at a constant jet distance (H) from the moist object. The diameter of the moist object, jet distance from the moist object and jet initial height were fixed for all cases. Streamlines and isotherms were acquired around the objects for different jet Reynolds numbers. A finite volume method was used to solve the governing equations by using ANSYS Fluent 17.0 software program. Calculations were carried out for different Reynolds numbers, namely, $Re=100, 200$ and 300 . It was found good agreement with experimental and numerical data available in the literature. The results showed that the geometry of whole circular moist object had better performance of heat and mass transfer than that of the reverse semi-circular moist object geometry. In addition, increasing Reynolds number showed a positive effect on heat and mass transfer. Locally, jet drying was found to be most effective near the stagnation point on the leading side of the objects.

Keywords: Drying, Air jet impingement, Mass transfer, Moist object, Numerical analysis

* Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Otomotiv Mühendisliği Bölümü, 58140, Sivas

** Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Sivas Meslek Yüksekokulu, Elektrik ve Enerji Bölümü, 58140, Sivas

İletişim Yazarı: Koray KARABULUT (kkarabulut@cumhuriyet.edu.tr, koray.karabulut@hotmail.com)

1. GİRİŞ

Jet akışı, besin işleme, tekstil, kağıt imalatı ve uçak motorları gibi farklı mühendislik ve sanayi uygulamalarında ısı ve kütle transferini artırmak için geniş çapta kullanılmaktadır. Çarpılan nesnelere geometrisi çoğunlukla akış çizgili (düzgün) biçimlidir. Martin (1977) tarafından özetlendiği gibi bu tür çeşitli problemleri değerlendirmek için deneysel ve sayısal yöntemler kullanılmıştır. Lee ve diğ. (2008) tarafından sonlu hacim yöntemi kullanılarak sınırlandırılmış bir çarpan jete zamana bağlı iki boyutlu akışkan akışı ve ısı transferi için sayısal bir çözüm elde edilmiştir. Çalışmalarında, zamana bağlılığın büyük oranda akış ve sıcaklık alanlarından etkilendiğini saptamışlar ve sonuç olarak zamana bağlı bölgede basınç katsayısı, yüzey sürtünme katsayısı ve Nusselt sayısının zamandan bağımsız bölgedekinden farklı özellikler sergilediğini belirlemişlerdir.

Tawfek (2002) deneysel olarak yandan izotermal dairesel bir silindire çarpan dairesel hava jetinin eğiminin noktasal ısı transferi üzerindeki etkisini çalışmıştır. Eksenel Nusselt sayısı ile birlikte çevresel ısı transferi dağılımını ölçmüş ve noktasal ısı transferi profillerinin şeklinin jet eğiminden önemli miktarda etkilendiğini belirlemiştir. Farklı Reynolds sayılarında ve silindir eğriliklerinde bir silindir üzerine hava jeti çarpmasıyla gerçekleşen ısı transferi Olsson ve diğ. (2005) tarafından çalışılmıştır. Diğer bir çalışmada, Olsson ve diğ. (2004) hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD) kodunu kullanarak dairesel silindirler üzerine çoklu hava jeti çarpmasıyla gerçekleşen akış ve ısı transferinin sayısal bir çalışmasını yapmışlardır. Türbülans kayma modeli kullandıkları çalışmalarında, deliklerin sayısını ve jete göre dairesel silindirlerin göreceli yerleşimlerini test etmişlerdir. Rahman ve diğ. (2010) Galerkin' in sonlu elemanlar yöntemini kullanarak sonlu kalınlıklı eğimli bir plaka üzerine dikey olarak bir püskürtücüden çarpan serbest bir jet akışının ısı transferi özelliklerini çalışmışlardır. Püskürtücünün genişliğinin artmasıyla noktasal ısı taşınım katsayısının azaldığını fakat noktasal Nusselt sayısının arttığını belirlemişlerdir. Teamah ve Khairat (2015) jetler arasındaki boşluğu ve ayrıca hem her iki jetin hem de tek jetin gücünü değiştirerek çarpan dairesel iki jet akımının etkileşiminin ısı transfer katsayısı üzerindeki etkisini deneysel olarak araştırmışlardır. Jetler arasındaki boşluktaki artışın aynı Reynolds sayısında ortalama Nusselt sayısını artırdığını bulmuşlardır. Bir diğer çalışmada, Hosain ve diğ. (2016) sıcak haddelemede en önemli işlemlerden biri olan ve herhangi bir sanayi sürecinde en fazla su tüketimlerinden birine sahip olan soğutma sürecinin taşınım ısı transferi olgusunu anlamak için kaynama noktasının altındaki sıcaklıklarda sıcak bir düz çelik plaka üzerine türbülanslı su jeti çarpmasıyla ısı transferinin sayısal araştırmasını yapmışlardır. Jetler, herhangi bir ek ısı etkileşim üretmek için birbirinden çok uzakta olduklarından ikili jet sisteminin ısı performansının tek jetten daha iyi olmadığını belirlemişlerdir. Farklı çaplardaki dairesel silindirlerden oluşan ısı transferini içeren çarpan hava jeti McDaniel ve Webb (2000) tarafından çalışılmıştır. Alnak ve Karabulut (2018) düz ve ters olmak üzere farklı şekillere sahip iki yarı dairesel nesnenin jet hava akışı ile kurutulmasında ısı ve kütle transferini sayısal olarak incelemişlerdir. Sayısal hesaplamalarında, momentum ve enerji denklemlerini çözmek için sonlu hacimler yöntemini kullanmışlardır. Ayrıca, hesaplamalarını dört farklı Re sayısında gerçekleştirmişler ve Re sayısı değerinin artışının ısı ve kütle transferini artırıcı etkiye sahip olduğunu belirlemişlerdir. Eren ve diğ. (2007) ise bir parça eğimli konveks ve konkav yüzeyler üzerinde jet çarpması için boyutsuz çevresel uzaklık ve jet Reynolds sayısının fonksiyonları olarak durma noktası ve noktasal ve ortalama Nusselt sayılarını ilişkilendirmişlerdir. Frost ve diğ. (1997) püskürtücü ve plaka arasında $1d'$ den $8d'$ ye değişen uzaklıklarda sabit ısı akılı düz bir plakadan türbülanslı ($Re_d=20.000$) asimetric bir jete olan ısı transferini ölçmek için deneyler yapmışlardır. En yüksek ısı transferini, durma noktasında püskürtücü-plaka uzaklığı $6d$ civarında olduğu durumda bulmuşlardır. Chan ve diğ. (2002) yarı dairesel konveks bir yüzey üzerine bir hava jeti çarpması durumunda noktasal ısı transferi için farklı değişkenlerin etkilerinin belirlenmesi amacıyla deneyler yapmışlardır. Farklı noktalarda sıcaklıkların ölçülmesi için bir sıvı kristal ısı görüntüleme sistemi kullanmışlardır. Bir diğer çalışmada, sıcak tel X ölçüm ucu anemometresini kullanarak iki farklı yarı dairesel

konveks yüzeyler üzerine bir hava jeti çarpmasının akış ve türbülanslı durumunu çalışmışlardır (Chan ve diğ., 2003). Robinson ve Schnitzler (2007) hem serbest yüzey hem de kapalı batmış jet diziler için ısıtılmış bir yüzeye çarpan sıvı jet dizilerinin ısı transferi ve basınç düşüşü özelliklerini çalışmışlardır. En az pompalama gücü gereksinimiyle serbest jet akışlarıyla karşılaştırıldığında, kapalı jet düzenlemesinin küçük jet aralığında daha yüksek ısı transfer katsayısı gösterdiğini bulmuşlardır.

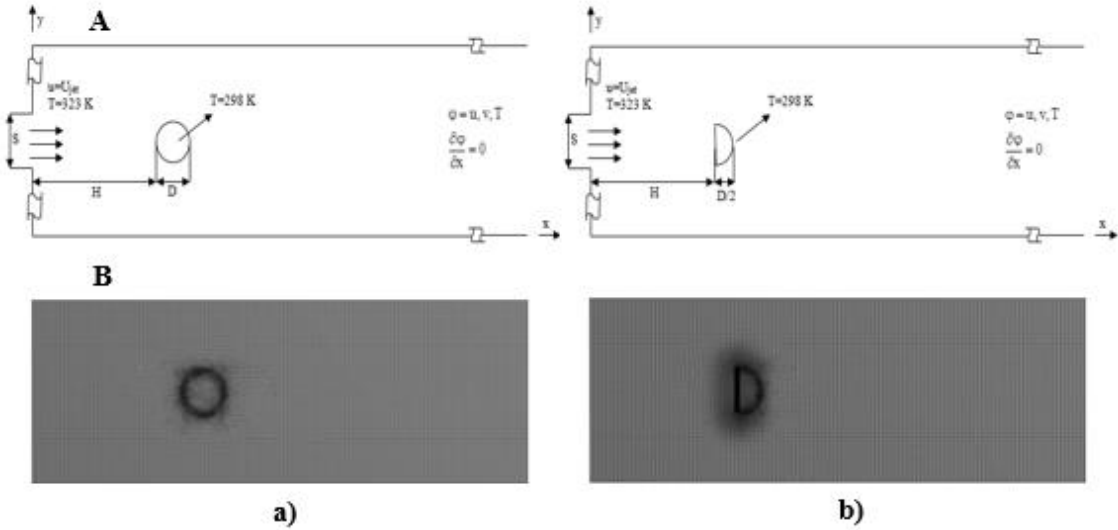
Bu çalışmanın bir diğer yönü de birçok araştırmacı tarafından incelenen taşınım kurutmasıyla da ilgili olmasıdır. Tarek ve Ray (2010) hesaplamalı akışkanlar dinamiğini (CFD) kullanarak kurutma hakkında hem sanayi hem de laboratuvar ölçekli çalışmaların kapsamlı bir derlemesini gerçekleştirmişlerdir. Dikdörtgenli nemli bir nesnenin kurutulması sırasında ısı ve kütle transferinin iki boyutlu analizi Kaya ve diğ. (2006) tarafından sonlu fark yöntemini kullanarak nemli nesnenin bütün yüzeylerinde taşınım sınır şartının uygulanmasıyla yapılmıştır. Taşınım ısı transfer katsayısının $4,33 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ ' den $96,16 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ ' ye kadar değiştiğini ve çeşitli en/boy oranlarında ise taşınım kütle transfer katsayısının ise $9,28 \times 10^{-7}$ - $1,94 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ aralığında olduğunu saptamışlardır. Alnak ve diğ. (2012) nemli bir silindirin jet kurutmasını sayısal olarak araştırmışlardır. Farklı jet hızları ($Re = 100, 200$ ve 300) ve nemli nesneden üç farklı uzaklık ($D/H = 0,22, 0,25$ ve $0,33$) için nesnenin içindeki sıcaklık ve kütle dağılımlarını elde etmişler ve ayrıca ısı ve kütle transferinin jet ve silindir arasındaki uzaklığın azalmasıyla arttığını belirlemişlerdir. Kaya ve diğ. (2008) yaptıkları bir diğer çalışmada, kivi meyvesinin kurutulması sırasında ısı ve kütle transferi üzerine hem deneysel hem de sayısal çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. Meyve içindeki ısı ve kütle transfer sürecini araştırmak amacıyla geliştirilen bir kodu kullanarak farklı durumlar için zamana bağlı sıcaklık ve nem dağılımlarını elde etmişlerdir. Sonlu fark yöntemini kullanarak silindirik bir nesnenin kurutulması sırasındaki iki boyutlu sayısal ısı ve nem transferi Hussain ve Dinçer (2003) tarafından incelenmiştir. Öztop ve Akpınar (2008) farklı meyvelerin kurutulmasının sayısal ısı ve kütle transferini bir siklon kurutucudan elde edilen deneysel verilerle de karşılaştırarak analiz etmişlerdir. Kadem ve diğ. (2016) bir ahşap mikrodalga kurutmasının özelliklerini kurutma süreci sırasında gözenekli katı (ahşap) için Lambert' in üç boyutlu kanununu içeren Luikov modelini kullanarak ve akış alanı için ise üç boyutlu Navier-Stokes denklemlerini çözerek araştırmışlardır. Sonuçlar; ışınlama zamanı, mikrodalga güç seviyesi ve numune kalınlığı değişimlerinin tüm kurutma sürecinde önemli rol oynadıklarını göstermiştir. Benzer olarak bir diğer çalışmada, Younsi ve diğ. (2015) Femlab ticari paket programını kullanarak ahşap için üç boyutlu birleştirilmiş ısı ve kütle korunum denklemlerinin sayısal çözümlemesini gerçekleştirmişlerdir. Önerilen birleşik problemin benzeştiriminin ahşap içinde ısı ve kütle transferinin etkisinin değerlendirilmesine olanak sağladığını belirlemişlerdir. Di Marco ve diğ. (2016) Yankee motor kapağının yapılandırılmasında kullanılan pelür kağıdının üretimi için enerji performansının en uygun hale getirilmesine imkan sağlayan çarpan hava kurutma sistemlerinin kapsamlı ve özgün matematiksel modellemesini raporlandırmışlardır. Matematiksel modelin geçerliliğini, varolan pelür kağıdı milinden alınan gerçek veriyle karşılaştırarak değerlendirmişlerdir. Hava sisteminin iki farklı tasarımının enerji performanslarını değerlendirmiş ve karşılaştırmışlardır. Çalışmanın sonucunda, hava jeti sıcaklığı ve hızı ve çıkan havanın nemlilik içeriği gibi kurutma işleminin etkin değişkenlerinin değiştirilmesiyle aynı kağıt üretiminde yaklaşık % 4,5' luk enerji tasarrufu elde edilme olasılığının olduğunu belirlemişlerdir. Huang ve diğ. (2017) çalışmalarında dondurarak kurutma (FD) ile kombine edilebilen hava jeti kurutması (AIJD), sıcak hava kurutması (HAD) ve mikrodalga kurutması (MWD)'n dan uygun kurutma tekniğini seçmeyi amaçlamışlardır. Sonuçlar, nispeten yüksek verimli, düşük enerji tüketimine ve iyi bir kurutma kalitesine sahip hava jeti kurutmasının (AIJD), dondurarak kurutma (FD) ile de birleştirilerek kombine şeklinde çalışılabilmesi için uygun olduğunu göstermiştir. Daha ileri bir inceleme olarak da kombine edilmiş dondurarak kurutma ve hava jeti kurutması sırasında kurutulmuş kivi meyvesinin kalitesi, enerji tüketimi ve kivi meyvesinin kurutma teknolojisi test edilmiştir.

AIJD+FD ve FD+AIJD kombine kurutmaları için elde edilen enerji tüketimlerinin yalnızca FD için elde edilenden daha az olduğu bulunmuştur.

Bu çalışmada, bir hava jeti çarpmasıyla zorlanmış taşınım kurutmasına maruz kalan nemli tam ve ters yarı dairesel geometrili iki farklı nesnenin akışkan akışı ve ısı ve kütle transferi sayısal olarak incelenmiştir. Bu kapsamda çalışmada, yerel Nusselt sayısı değişimi üzerinde Reynolds sayısının etkisi her iki nesne için araştırılmış ve ayrıca nemli nesnelerin orta kısmındaki x ekseninde sıcaklık ve konsantrasyon değişimleri elde edilmiştir. Ayrıca, nemli tam ve ters yarı dairesel nesnelerin akım çizgileri, eş sıcaklık eğrileri ve nesnelerin içindeki sıcaklık ve konsantrasyon dağılımları farklı jet giriş hızları için görselleştirilmiştir. Hesaplamalar, sonlu hacim yöntemi olan ANSYS Fluent 17.0 sayısal hesaplamalı bilgisayar programı kullanılarak yapılmıştır. Hesaplamalar, $Re=100$, 200 ve 300 olmak üzere farklı Reynolds sayıları için yapılmıştır. Sunulan çalışmanın doğruluğundan emin olabilmek için elde edilen sonuçlar, daha önce Varol ve diğ. (2012) tarafından yapılan sayısal çalışma ve Gori ve diğ. (2007) tarafından yapılan deneysel çalışmanın sonuçlarıyla karşılaştırılmış ve sonuçların birbiriyle iyi bir uyum içerisinde oldukları görülmüştür.

2. FİZİKSEL MODEL

Çözümlemesi yapılan fiziksel modellerin sınır şartlarıyla birlikte sistemlerin şematik görünüşleri Şekil 1A' da gösterilmektedir. İncelenen modellerde, bir jet akışı nemli tam dairesel ve ters yarı dairesel nesnelere çarpmaktadır. Nesnelere sabit bir çap ve x ekseninde sabit bir yerleşime sahiptir. Kullanılan iş akışkanı olan hava, jet püskürtücünden sabit bir sıcaklık ve hızla ayrılmaktadır. Nemli nesne olan daire çapı, D ve jetin çıkış yerinin yüksekliği, S eşit ölçülere sahip olup $0,4$ cm' dir. Modeldeki diğer sınırlar çözüme etki etmemek için nesneden uzağa yerleştirilmiştir.



Şekil 1:

A. Fiziksel modellerin sınır şartları ve şematik görünüşleri B. Ağ yapısı dağılımı
a) tam dairesel nesne b) ters yarı dairesel nesne

3. SAYISAL YÖNTEM

Sayısal çalışma, iki boyutlu, zamandan bağımsız, laminar, sıkıştırılamaz akış ve nesnenin yüzeyinde iletim ve zorlanmış taşınım olmak üzere bileşik ısı transferi ve nemli nesnenin içinde ise zorlanmış taşınım kurutması yaklaşımıyla gerçekleştirilmiştir. Birleşik ısı ve kütle transferi analizini çözmek için sonlu hacimler yöntemi (FLUENT programı) kullanılmıştır.

Sonlu hacimler yöntemi, çözülecek geometriyi parçalara bölerek bu parçaların her biri için çözüm yapma ve daha sonra bu çözümleri birleştirerek problemin genel çözümünü bulma

esasına dayanır. Sonlu hacimler yöntemi, korunum denklemlerini sayısal olarak çözümlenebilen cebirsel denklem sistemlerine dönüştürmek için kontrol hacmi esaslı bir teknik kullanır. Bu teknik her bir kontrol hacmi için korunum denklemlerinin integrasyonunun alınması sonucunda, değişkenler için kontrol hacmini sağlayan ayrık eşitliklerin elde edilmesini içerir. Ayrık eşitliklerin doğrusallaştırılması ile elde edilen doğrusal denklem sistemlerinin iterasyona bağlı çözümü ile hız, basınç ve sıcaklık gibi değişkenler verilen yakınsaklık ölçüsünü sağlayıncaya kadar güncellenir. Hazırlanabilecek en uygun ağ yapısı için hız, basınç ve sıcaklık değişiminin fazla olduğu bölgelerde daha sıkı ağ yapısı oluşturulmalıdır. Sonuçların ağ sayısından olan bağımsızlığını sağlamak için Tablo 1’ de gösterildiği gibi farklı ağ sayılarında Reynolds sayısının değişimine bağlı olarak ortalama Nusselt sayıları değerlendirilmiştir. Uygulanan ağ sayısından bağımsızlık testi sonucunda yarı dairesel nesne için 57800 adet elemanın yeterli olduğu saptanmıştır (98712 adet elemanla karşılaştırıldığında fark < % 0,1). Aynı test tam dairesel nesne için de yapılarak, aynı sayıda eleman ile çalışmanın uygun olduğu belirlenmiştir. Buna göre dairesel nesnelere için ağ yapısı dağılımı Şekil 1B’ de gösterilmektedir. Dairesel nesnelere etrafında daha sıkı bir ağ yapısı uygulanmıştır. Süreklilik ve momentum denklemleri için hesapların yakınsaması, yakınsaklık ölçüğü 10^{-6} ’dan daha az olduğunda durdurulurken bu değer enerji denklemi için 10^{-8} olmaktadır.

Tablo 1. Ağ sayısı bağımsızlık testi

Ağ adı	Ağ elemanı sayısı	Ortalama Nusselt sayısı			
		Re=100	Re=200	Re=300	Re=400
G1	25602	3,4515	5,7523	8,4825	10,9745
G2	42304	3,5412	5,8426	8,5765	10,9925
G3	57800	3,5501	5,8536	8,5877	11,0707
G4	98712	3,5542	5,8524	8,5865	11,0699
G5	153678	3,5541	5,5824	8,5865	11,0698

Isı transferi ve akış için genel denklemler, zamandan bağımsız, iki boyutlu, laminar, sıkıştırılamaz akış ve sabit akışkan özellikleri (hava) ve ayrıca nesnenin içinde şekil değişimi ve ısı üretiminin olmadığı düşünülerek basitleştirilmiştir. Akışkandaki düşük sıcaklık değişimleri nedeniyle gövde kuvvetleri, viskoz yayılım ve ısı ışıınım ihmal edilmiştir. Bu sonuçlar neticesinde denklemler aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir (Fluent, 2003).

Süreklilik denklemi

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

Momentum denklemi

x momentumu denklemi

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (2)$$

y momentumu denklemi

$$u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \quad (3)$$

Enerji denklemi

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (4)$$

Yukarıdaki denklemlerde, u ve v hız bileşenleri, p basınç, ν kinematik viskozite, ρ akışkanın yoğunluğu, T akışkanın sıcaklığı, α ısı yayılım katsayısıdır. Sınır şartları ise aşağıdaki gibi ifade edilmektedir:

$$\text{Jet çıkışında, } u=U_{jet}, T=323 \text{ K ve kanal çıkışında, } \frac{\partial \phi}{\partial x} = 0 \quad (5)$$

$$\text{Alt ve üst duvarlarda, } u=U_{\infty}, T=T_{\infty} \text{ ve daire üzerinde } u=v=0, T=298 \text{ K} \quad (6)$$

Girişte Reynolds sayısı

$$Re = \frac{uS}{\nu} \quad (7)$$

Sınır şartı için yerel ısı transfer katsayısı

$$-k \left. \frac{\partial T}{\partial n} \right|_s = h(T_s - T_{\infty}) \quad (8)$$

Yerel Nusselt sayısı ve Prandtl sayısı aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$Nu = \frac{hD}{k} \text{ ve } Pr = \frac{\mu c_p}{k} \quad (9)$$

Tüm durumlar için Prandtl sayısı 0,71 olarak alınmaktadır. İletim ısı transferi ve kütle transferinin iki boyutlu denklemleri aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \phi^2} \quad (10)$$

$$\frac{1}{D} \frac{\partial M}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial M}{\partial r} + \frac{\partial^2 M}{\partial r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 M}{\partial \phi^2} \quad (11)$$

Yukarıdaki denklemler aşağıdaki giriş ve sınır şartlarının kullanılmasıyla FLUENT programında kullanıcı tanımlı bir fonksiyon kodu (UDF) yazılarak çözülmüştür.

$$T(r, \theta, t=0) = T_i \text{ ve } M(r, \theta, t=0) = M_i \quad (12)$$

$$r=0, \quad \frac{\partial T(0, \theta, t=t)}{\partial r} = 0 \text{ ve } \frac{\partial M(0, \theta, t=t)}{\partial r} = 0 \quad (13)$$

$$r=R, \quad -k \left(\frac{\partial T(R, \theta, t=t)}{\partial r} \right) = h(T_w - T_{\infty}) \text{ ve } -D \left(\frac{\partial M(R, \theta, t=t)}{\partial r} \right) = h_m(M - M_a) \quad (14)$$

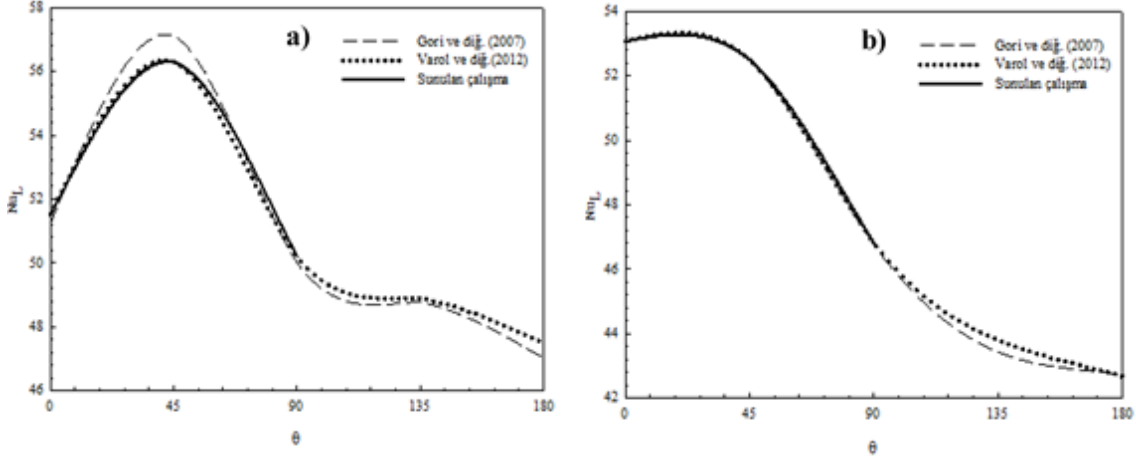
$$M(r, 0, t) = M(r, \pi, t) \text{ ve } \frac{\partial M(r, 0, t)}{\partial \theta} = \frac{\partial M(r, \pi, t)}{\partial \theta} \quad (15)$$

Burada D , nem yayılım katsayısı, h ve h_m ise sırasıyla taşınım ısı ve kütle transfer katsayılarıdır.

4. MODELİN DOĞRULANMASI

Modelin doğruluğunu kanıtlamak amacıyla yarı dairesel nesne için sunulan ve daha önce Varol ve diğ. (2012) tarafından yapılan sayısal çalışmaların sonuçlarının, Gori ve diğ. (2007)'nin yaptığı deneysel çalışmanın sonuçlarıyla karşılaştırılması Şekil 2' de gösterilmektedir. Burada, birinci ve ikinci dairelerin farklı uzaklıklarında (L/S) yerel Nusselt sayıları karşılaştırılmaktadır (Şekil 2). Şekilde, $\theta=45^\circ$ ve $\theta=150^\circ$ civarında Gori ve diğ. (2007) tarafından yayımlanan deneysel çalışmanın verilerinden bir miktar sapma görülebilmektedir.

Bununla birlikte, daireler için $L/S=4'$ de oldukça iyi bir uyum elde edilmiştir. Bu nedenle, yapılan bu karşılaştırmanın sonucunda incelenen problem için ağ dağılımının iyi hazırlanmış ve ayrıca sayısal çalışmanın doğru ve kabul edilebilir olduğu sonucuna varılmıştır.



Şekil 2:

Yerel Nusselt sayısının karşılaştırılması a) $L/S = 2$ ve b) $L/S = 4$

5. BULGULAR VE TARTIŞMA

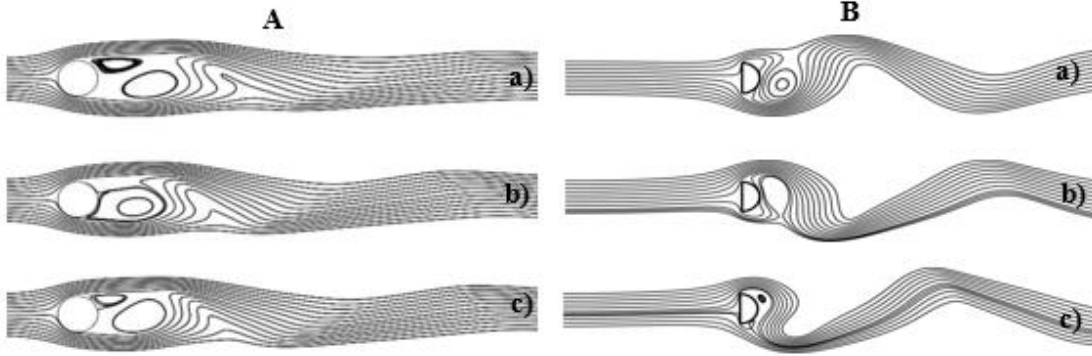
Çalışmada, akışkan akışı, ısı ve kütle transferi için tam ve ters yarı dairesel olmak üzere iki farklı nesne üzerine hava jeti çarpmasının sayısal sonuçları değerlendirilmiş ve sunulmuştur. Sonuçlar, farklı Reynolds sayıları ve nemli dairesel nesnelere için elde edilmiştir. Çalışılan tüm durumlar için Prandtl sayısı sabit ve 0,71 olarak alınmıştır.

Şekil 3A ve 3B' de sırasıyla farklı jet Reynolds sayıları için tam ve ters yarı dairesel nemli nesnelere akım çizgileri gösterilmektedir. Her iki nesne için nesnelere önünde hava jeti çarpmasına dik olan yüzeyde durma noktası meydana gelmektedir. Durma noktasından sonra akım çizgileri birbirinden ayrılmaktadır. $Re=100$ için nemli tam dairesel nesne etrafında oluşan akım çizgileri Şekil 3A (a)' da gösterilmektedir. Tam dairesel nesnenin arkasında oluşan boyutları birbirine yakın iki adet girdap, Reynolds sayısının artışıyla birleşerek tek bir girdap haline dönüşmektedir (Şekil 3A (b)). $Re=300$ değerinde ise nesne arkasında oluşan girdaplar ayrılarak tekrar $Re=100$ 'deki haline benzer bir şekilde dönmektedir (Şekil 3A (c)). Tam dairesel nesnenin aşağıakımında oluşan salınımların sıklığı ise Re sayısının artışıyla artmaktadır. Farklı Reynolds sayıları için ters yarı dairesel nemli nesnenin akım çizgileri dağılımı Şekil 3B' de verilmektedir. Şekil 3B (a)' da görülebildiği gibi ters yarı dairesel nesnenin arkasında bir girdap oluşmakta ve girdabın boyutu Reynolds sayısının artışıyla küçülmektedir. Bununla birlikte, Re sayısının artışıyla salınımların sıklığı artarken, ters yarı dairesel nesnenin arkasında oluşan girdabın boyutu ise Şekil 3B (b-c)' de görüldüğü gibi azalmaktadır.

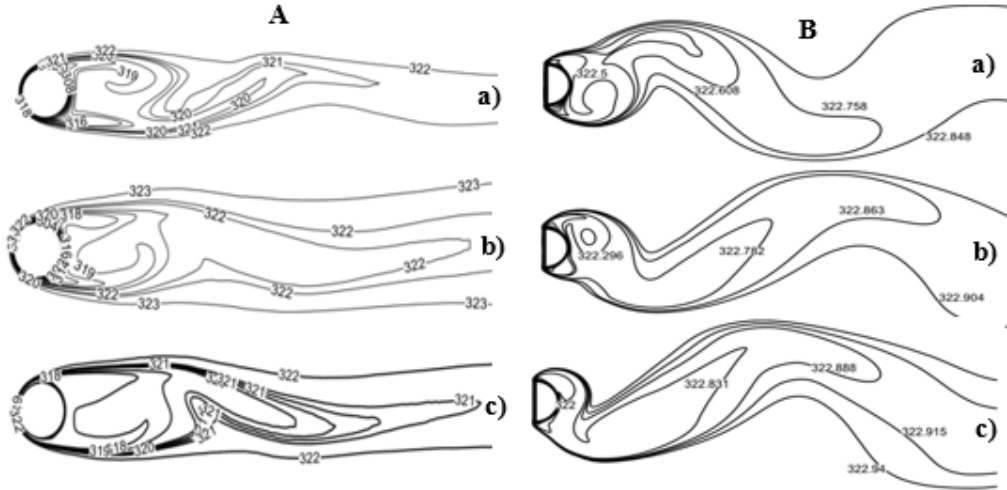
Farklı Reynolds sayısı değerleri için nemli tam ve ters yarı dairesel nesnelere ait eş sıcaklık eğrileri Şekil 4A ve 4B' de sırasıyla gösterilmektedir. Şekil 4A ve 4B incelendiğinde, eş sıcaklık eğrilerinin genel bir ifadesi olarak her iki nesnenin aşağıakım sıcaklık dağılımı üzerinde Re sayısının önemli bir etkiye sahip olduğu açıkça görülebilmektedir. Ayrıca, araştırılan tüm Re sayısı değerleri için tam dairesel nesnenin aşağıakımında, ters yarı dairesel nesneye göre daha düşük hava sıcaklık değerleri elde edilmiştir. Elde edilen bu sonuç, çarpan hava jetinden tam dairesel nesneye olan ısı transferinin ters yarı dairesel nesneye göre daha iyi olduğunu göstermektedir.

Şekil 5a ve b' de sırasıyla tam ve ters yarı dairesel nesnelere çevreleri boyunca farklı Reynolds sayıları için yerel Nusselt sayısının değişimi sunulmaktadır. Şekil 5a' da görülebildiği gibi tam dairesel nesne için yerel Nusselt sayısının en düşük değerleri $\theta=45^\circ$ civarında elde edilirken, en yüksek değerlerine $\theta=135^\circ$ ve $\theta=155^\circ$ arasında ulaşılmaktadır. Ayrıca, değerler

üzerinde Reynolds sayısının kuvvetli etkisi özellikle aşağı akım bölgesinde kendisini daha belirgin bir şekilde göstermektedir (Şekil 5a). Ters yarı dairesel nesne için $Re=100$ ' de Nusselt sayısının en düşük değerlerine $\theta=40^\circ$, 135° ve en yüksek değerine ise $\theta=90^\circ$ 'de ulaşılırken, $Re=200$ ve 300 değerleri için nesnenin çevresi boyunca Nusselt sayısının doğrusal bir değişime sahip olduğu Şekil 5b' den görülebilmektedir.



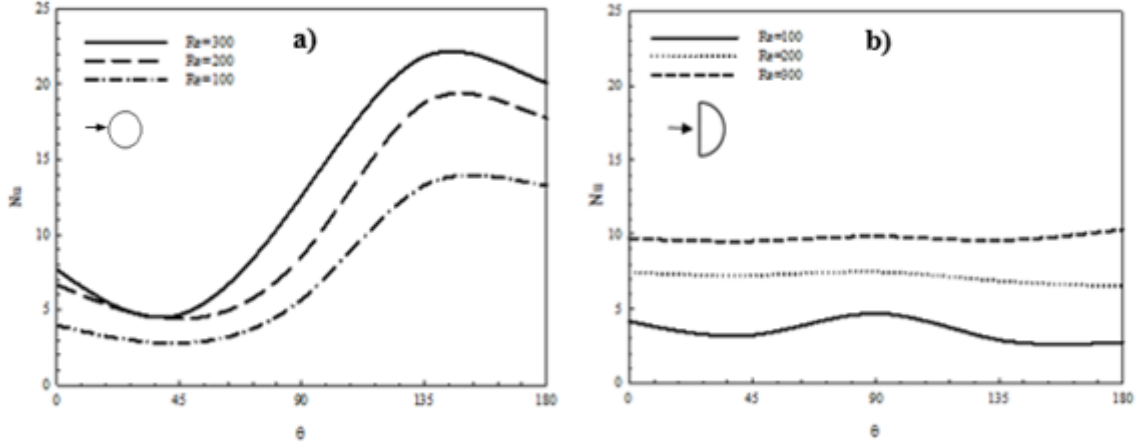
Şekil 3:
Dairesel nemli nesnelerin farklı Reynolds sayıları için akım çizgileri
A- tam B- ters yarı dairesel
a) $Re = 100$ b) $Re = 200$ c) $Re = 300$



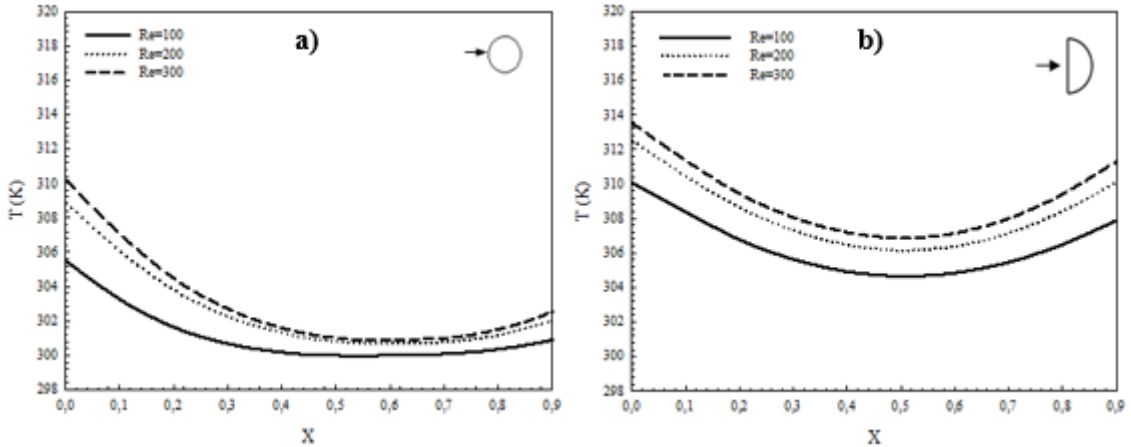
Şekil 4:
Dairesel nemli nesnelerin farklı Reynolds sayıları için eş sıcaklık eğrileri
A- tam B- ters yarı dairesel a) $Re = 100$ b) $Re = 200$ c) $Re = 300$

Farklı jet hızları (Reynolds sayıları) için sırasıyla tam ve ters yarı dairesel nesnelerin orta kısımlarında x eksenı boyunca sıcaklık değişimleri Şekil 6a ve b' de gösterilmektedir. Her iki nesne için Reynolds sayısının artışıyla sıcaklık değerleri artmaktadır. Her iki nesnenin iç kısmına doğru hava jeti çarpmasına dik olan yüzeyde bulunan durma noktasından uzaklaştıkça sıcaklık değerleri azalırken, aşağıakım bölgelerinde Şekil 3'deki akım çizgilerinden de görüleceği üzere hava hareketine bağlı olarak ters yarı dairesel nesnede daha çok olmak üzere sıcaklık değerleri tekrar artışa geçmektedir (Şekil 6a ve b). Bununla birlikte, incelenen tüm Re sayısı değerlerinde tam dairesel nesne için Nu sayısı grafiğine bakıldığında (Şekil 5a), ısı transferinin ters yarı dairesel nesneye göre daha iyi olmasına rağmen (özellikle aşağıakım bölgesine doğru) Şekil 6a' da görüldüğü gibi nesnenin iç kısmındaki sıcaklık değerleri daha düşüktür. Çünkü nemli nesneye olan ısı transferi, nesnenin içindeki nemin buharlaşmasını

sağladığından sıcaklık artışına katkısı olamamaktadır. Bu nedenle, ters yarı dairesel nesneye göre nesnenin iç kısmında tam dairesel nesnede daha düşük sıcaklık değerleri elde edilmektedir.



Şekil 5:
Farklı Reynolds sayıları için yerel Nusselt sayısının değişimi
a) tam b) ters yarı dairesel nesne



Şekil 6:
Dairesel nesnelerin orta kısımlarında x eksenı boyunca sıcaklık değişimi
a) tam b) ters yarı dairesel nesne

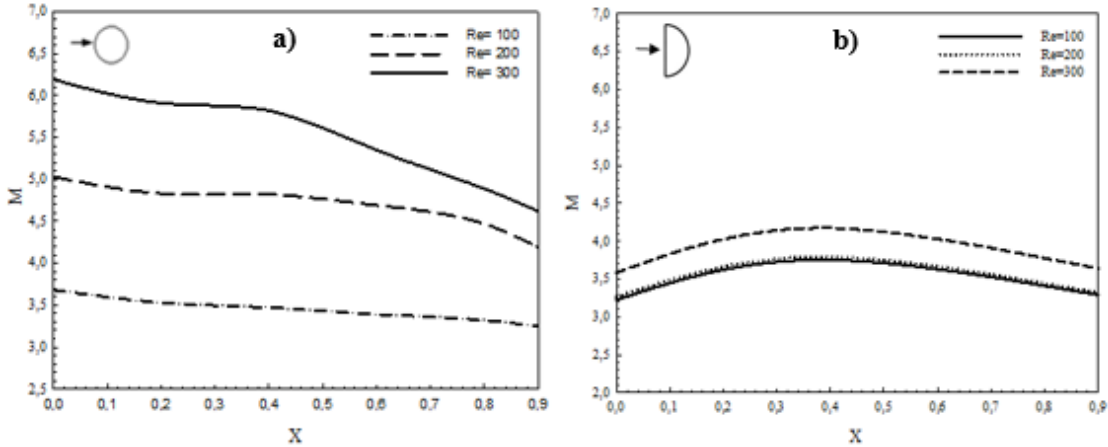
Tam ve ters yarı dairesel nemli nesnelerin orta kısımlarındaki x eksenı boyunca konsantrasyon değişimleri farklı Re sayıları için sırasıyla Şekil 7a ve b' de gösterilmektedir. Şekil 7a ve b' de görülebildiği gibi konsantrasyon değerleri durma noktasından nesnelerin iç kısmına doğru gidildikçe çok az bir miktar artış gösterdikten sonra aşağıdaki bölgeye doğru bir miktar azalsa da hemen hemen doğrusal olarak değişmektedir. İncelenen tüm Reynolds sayısı değerleri için en yüksek konsantrasyon değerlerine tam dairesel nesne için ulaşılmaktadır. Çünkü, ısı transferinin tam dairesel nesnede ters yarı dairesel nesneye göre daha fazla olması nedeniyle (Şekil 5a, b) nesnenin nem içeriği azalmakta ve buna bağlı olarak konsantrasyon değeri ise artmaktadır. Ayrıca, Re sayısı artışının nesnenin konsantrasyon değişimi üzerindeki etkisi tam dairesel nesne için Şekil 7a' da daha belirgin bir şekilde görülebilmektedir.

6. GENEL SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

Bu çalışmada, iki farklı yeni nemli nesne geometrisi olan tam ve ters yarı dairesel nesnenin hava jeti ile kurutulması sonlu hacim yöntemi olan ANSYS Fluent 17,0' nin kullanılmasıyla sayısal olarak incelenmiştir. Literatürde de jet çarpmayla kurutma hakkında yapılan çalışmalar

bulunmakla birlikte, ülkemizde de yoğun olarak kurutması yapılan meyve ve sebzelere benzerlik teşkil etmesi bakımından tam dairesel nesnenin, ters yarı dairesel nesne geometrisi ile karşılaştırılarak ısı ve kütle transferi performans özelliklerinin incelenmesi gerekli görülmüştür. Daha önce yapılan bir deneysel çalışmayla karşılaştırma yapılmış ve çalışmayla çok iyi bir uyum sağlandığından çalışmadaki modellerin sayısal çalışmasının doğru olduğuna karar verilmiştir. Bununla birlikte, bu çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi verilebilir:

- Reynolds sayısı ve nemli nesnelerin geometrileri, ısı ve kütle transferini etkileyen iki önemli değişkendir. Jet kurutma etkinliğinin nemli ters yarı dairesel nesneyle karşılaştırıldığında tam dairesel nesnede daha iyi olduğu belirlenmiştir.
- Nesnelerin arkasında oluşan girdaplar (dönüş hücreleri) Reynolds sayısı ile doğrudan ilişkilidir. Yüksek Re sayılarında çoklu dönüş hücreleri meydana gelmektedir. Bununla birlikte, Re sayısının artışıyla ısı transferi miktarı da artmaktadır.
- Ayrıca, yüksek Re sayısı değerlerinde konsantrasyon değeri fazladır ve nesnelerin içinde x eksenine boyunca aşağıdaki bölgede hemen hemen doğrusal olarak değişmektedir. Ayrıca, tam dairesel nesne için incelenen Re sayılarında nesne içinde daha yüksek konsantrasyon değerleri elde edilmiştir.
- Sayısal sonuçlarla deneysel sonuçların çok yakın bir şekilde uyumlu oldukları görülmüş ve bu nedenle bu çalışmanın sonuçlarının farklı nemli nesne geometrilerinin jet kurutma performanslarını değerlendirmek amacıyla karşılaştırma için kullanılabilirliğinin uygun olabileceği düşünülmektedir.



Şekil 7:

Nemli dairesel nesnelerin orta kısımlarında x eksenine boyunca konsantrasyon değişimi
a) tam b) ters yarı dairesel nesne

Semboller

c_p : özgül ısı, [$Jkg^{-1} K^{-1}$]	Pr : Prandtl sayısı ($=k/\rho c_p$), [-]
D : dairesel nesne çapı, [m]	Re : Reynolds sayısı ($=V_\infty d/\nu$), [-]
H : püskürtücü ve nemli nesne arası mesafe, [m]	S : jet çıkış yeri yüksekliği, [m]
h : ısı taşınım katsayısı, [$Wm^{-2} K^{-1}$]	T : sıcaklık [K]
h_m : kütle transfer katsayısı, [ms^{-1}]	t : zaman, [s]
k : ısı iletkenlik, [$Wm^{-1} K^{-1}$]	u, v : x ve y yönlerindeki hızlar, [ms^{-1}]
M : nem dağılımı (konsantrasyon) [$kgkg^{-1}$]	x, y : koordinatlar, [-]
Nu : Nusselt sayısı ($=hd/k$), [-]	

Yunan Sembolleri

μ : dinamik viskozite [$kg s^{-1} m^{-1}$]	ρ : yoğunluk [$kg m^{-3}$]
ν : kinematik viskozite [$m^2 s^{-1}$]	ϕ : bağımlı değişken

İndis

f: akışkan

w: duvar

∞: çevre

a: hava

i: giriş

KAYNAKLAR

1. Alnak, D.E., Varol, Y., Oztop, H.F., Al-Salem, K. (2012). Simulation of jet drying of a moist cylinder at low reynolds number, *Drying Technology*, 30, 631-640. doi.org/10.1080/07373937.2012.654875
2. Alnak, D.E., Karabulut, K. (2018). Analysis of heat and mass transfer of the different moist objects geometries with air slot jet impinging for forced convection drying, *Thermal Science*, 22(6B), 2943-2953. doi.org/10.2298/TSCI160721151A
3. Chan, T.L., Leung, C.W., Jambunathan, K., Frost, S.A., Zhou, Y., Liu, M.H. (2002). Heat transfer characteristics of a slot jet impinging on a semi-circular convex surface, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 45(5), 993-1006. doi.org/10.1016/S0017-9310(01)00217-4
4. Chan, T.L., Zhou, Y., Liu, M., Leung, C. (2003). Mean flow and turbulence measurements of the impingement wall jet on a semi-circular convex surface, *Experiments in Fluids*, 34(1), 140-149. doi.org/10.1007/s00348-002-0546-0
5. Di Marco, P., Frigo, S., Gabbrielli, R., Pecchia, S. (2016). Mathematical modelling and energy performance assessment of air impingement drying system for the production of tissue paper, *Energy*, 114, 201-213. doi.org/10.1016/j.energy.2016.08.011
6. Eren, H., Yeşilata, B., Celik, N. (2007). Nonlinear flow and heat transfer dynamics of impinging jets onto slightly-curved surfaces, *Applied Thermal Engineering*, 27(14-15), 2600-2608. doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2007.01.022
7. FLUENT User's Guide (2003) Fluent Inc., Lebanon, NH.
8. Frost, S.A., Jambunathan, K., Whitney, C.F., Ball, S.J. (1997). Heat transfer from a flat plate to a turbulent axisymmetric impinging jet, *Proceeding of the Institution of Mechanical Engineers, Part C*, 211(2), 167-172. doi.org/10.1243/0954406971521746
9. Gori, F., Tedesco, P.V. (2007). Cooling of two smooth cylinders in row by a slot jet of air with low turbulence, *Applied Thermal Engineering*, 27(14-15), 2415-2425. doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2007.03.006
10. Hosain, Md. L., Fdhila R.B., Daneryd A. (2016). Heat transfer by liquid jets impinging on a hot flat surface, *Applied Energy*, 164, 934-943. doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.08.038
11. Huang, D., Li, W.F., Shao, H.J., Gao, A.N., Yang, X.B. (2017). Colour, texture, microstructure and nutrient retention of kiwifruit slices subjected to combined air-impingement jet drying and freeze drying, *International Journal of Food Engineering*, 13(7). doi: 10.1515/ijfe-2016-0344. doi.org/10.1515/ijfe-2016-0344
12. Hussain, M.M., Dincer, I. (2003). Two-dimensional heat and moisture transfer analysis of a cylindrical moist object subjected to drying: a finite-difference approach, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 46(21), 4033-4039. doi.org/10.1016/S0017-9310(03)00229-1
13. Kadem, S., Younsi, R., Lachemet, A. (2016). Computational analysis of heat and mass transfer during microwave drying of timber, *Thermal Science*, 20(5), 1447-1455. doi.org/10.2298/TSCI140109055K

14. Kaya, A., Aydın, O., Dincer, I. (2006). Numerical modeling of heat and mass transfer during forced convection drying of rectangular moist objects, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 49(17-18), 3094-3103. doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2006.01.043
15. Kaya, A., Aydın, O., Dincer, I. (2008). Experimental and numerical investigation of heat and mass transfer during drying of hayward kiwi fruits (*actinidia deliciosa* planch), *Journal of Food Engineering*, 88(3), 323-330. doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2008.02.017
16. Lee, H.G., Yoon H.S., Ha, M.Y. (2008). A Numerical investigation on the fluid flow and heat transfer in the confined impinging slot jet in the low reynolds number region for different channel heights, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 51(15-16), 4055-4068. doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2008.01.015
17. Martin, H. (1977). *Heat and mass transfer between impinging gas jets and solid surfaces*, *Advances in Heat Transfer*, 13, 1-60. doi.org/10.1016/S0065-2717(08)70221-1
18. McDaniel, C.S., Webb, B.W. (2000). Slot jet impingement heat transfer from circular cylinders, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 43(11), 1975-1985. doi.org/10.1016/S0017-9310(99)00267-7
19. Olsson, E.E.M., Ahrne, L.M., Tragardh, A.C. (2004). Heat transfer from a slot air jet impinging on a circular cylinder, *Journal of Food Engineering*, 63, 393-401. doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2003.08.009
20. Olsson, E.E.M., Ahrne, L.M., Tragardh, A.C. (2005). Flow and heat transfer from multiple slot air jets impinging on circular cylinders, *Journal of Food Engineering*, 67(3), 273-280. doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2004.04.030
21. Oztop, H.F., Akpınar, E.K. (2008). Numerical and experimental analysis of moisture transfer for convective drying of some products, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 35(2), 169-177. doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2007.06.005
22. Robinson, A., Schnitzler, E. (2007). An experimental investigation of free and submerged miniature liquid jet array impingement heat transfer, *Experimental Thermal Fluid Science*, 32(1), 1-13. doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2006.12.006
23. Rahman, M.M., Hernandez, C.F., Lallave, J.C. (2010). Free liquid jet impingement from a slot nozzle to a curved plate, *Numerical Heat Transfer Part A*, 57(11), doi.org/799-821. 10.1080/10407781003800706
24. Tarek, J.J., Ray, M.B. (2010). Application of computational fluid dynamics for simulation of drying processes: a review, *Drying Technology*, 28(2), 120-154. doi.org/10.1080/07373930903517458
25. Teamah, M.A., Khairat, M.M. (2015). Heat transfer due to impinging double free circular jets, *Alexandria Engineering Journal*, 54(3), 281-293. doi.org/10.1016/j.aej.2015.05.010
26. Tawfek, A.A. (2002). Heat transfer studies of the oblique impingement of round jets upon a curved surface, *Heat and Mass Transfer*, 38, 467-475. doi.org/10.1007/s002310100221
27. Varol, Y., Alnak, D.E., Oztop, H.F., Al-Salem, K. (2012). Numerical analysis of heat transfer due to slot jets impingement onto two cylinders with different diameters, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 39(5), 726-735. doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2012.03.006
28. Younsi, R., Souhila, K., Azziz, L., Duygu, K. (2015). Transient analysis of heat and mass transfer during heat treatment of wood including pressure equation, *Thermal Science*, 19(2), 693-702. doi.org/10.2298/TSCI120309113Y