

Nemli nesnelerin zorlanmış taşınım ile hava jeti çarpmalı kurutulmasının incelenmesi

Investigation of air jet impingement drying with forced convection of moist things

Koray KARABULUT^{1*} , Doğan Engin ALNAK² 

¹Elektrik ve Enerji Bölümü, Sivas Meslek Yüksek Okulu, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Sivas, Türkiye.
kkarabulut@cumhuriyet.edu.tr

²Otomotiv Mühendisliği Bölümü, Teknoloji Fakültesi, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Sivas, Türkiye.
dealnak@cumhuriyet.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 04.12.2017, Kabul Tarihi/Accepted: 08.11.2018

* Yazışılan yazar/Corresponding author

doi: 10.5505/pajes.2018.83479

Araştırma Makalesi/Research Article

Öz

Bu çalışmada, tam ve düz yarı dairesel olmak üzere iki farklı nemli nesne geometrisinin hava jeti ile kurutulmasının ısı transferi artışı ve nem miktarındaki azalışı üzerindeki etkisi sayısal olarak incelenmiştir. Jet kurutması, nemli nesneden sabit bir jet uzaklığında konumlandırılmış, laminer ve iki boyutludur. Tüm durumlarda, nemli nesnenin çapı, nemli nesneden olan jet uzaklığı ve jet giriş yüksekliği sabit alınmıştır. Farklı jet hızları için nesnelerin etrafındaki akım çizgileri ve eş sıcaklık eğrileri görselleştirilmiştir. Korunum denklemlerini çözmek için sonlu hacim yöntemi olan ANSYS Fluent 17.0 bilgisayar programı kullanılmıştır. Hesaplamalar, $Re=100, 200$ ve 300 olarak farklı Reynolds sayıları için gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın, literatürde var olan sayısal ve deneysel çalışmayla iyi bir uyum içinde olduğu bulunmuştur. Sonuçlar, tam dairesel nemli nesnenin düz yarı dairesel nemli nesneden daha iyi ısı ve nem transferi performansına sahip olduğunu göstermiştir. Ayrıca, Reynolds sayısının artışının ısı ve nem transferi üzerinde olumlu bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. Yerel olarak, jet kurutmanın nesnelerin ön taraflarındaki durma noktasına yakın daha etkili oldukları bulunmuştur.

Anahtar kelimeler: Zorlanmış taşınım, Nem transferi, Sayısal analiz

Abstract

In this work, the effect of drying with jet of air of two dissimilar moist thing geometries with whole and straight semi-circular on the enhancement of heat transfer and decrement of moisture amount was numerically examined. The drying jet had a laminar flow characteristic and two-dimensional jet situated at a fixed jet space from the moist thing. The moist thing diameter, jet space from the moist thing and height of jet initial were taken as stable in whole situations. Streamlines and isotherms were visualized around the things for dissimilar velocities of jet. A method of finite volume was used to figure out the conservation equations by employing software program of ANSYS Fluent 17.0. Computations were conducted for dissimilar Re , so, $Re = 100, 200$ and 300 . It was obtained well accord with scalar and empirical output found in the reference. The results illustrated that the whole circular moist thing had greater good heat and moisture transfer performance than that of the straight semi-circular moist thing. Furthermore, it was seen that an increase of Re number had an affirmative effect on heat and moisture transfer. As locality, drying of jet was appeared to be most powerful close to the stillness point on the front face of the things.

Keywords: Forced convection, Moist transfer, Numerical analysis

1 Giriş

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 nesnelerinin geometrisi çoğunlukla akış çizgili (düzgün) biçimlidir. Bununla ilgili olarak çeşitli problemleri değerlendirmek için deneysel ve sayısal yöntemler kullanılmıştır [1]. Sonlu hacim yöntemi kullanılarak sınırlandırılmış bir çarpan jette zamana bağlı iki boyutlu akışkan akışı ve ısı transferi için sayısal bir çözüm elde edilmiştir. Zamana bağlılığın büyük oranda akış ve sıcaklık alanlarından etkilendiği saptanmış ve sonuç olarak basınç katsayısı, yüzey sürtünme katsayısı ve Nusselt sayısının zamana göre farklı özellikler sergilediği belirlenmiştir [2].

Yan taraftan izotermal dairesel bir silindire çarpan hava jetinin eğiminin yerel ısı transferi üzerindeki etkisi deneysel olarak çalışılmıştır. Eksenel Nusselt sayısı ile birlikte çevresel ısı transferi dağılımı ölçülmüş ve yerel ısı transferi profili şeklinin jet eğiminden önemli miktarda etkilendiği belirlenmiştir [3]. Farklı Reynolds sayılarında ve silindir eğriliklerinde bir silindir üzerine hava jeti çarpmasıyla gerçekleşen ısı transferi başka bir

çalışmada incelenmiştir [4]. Analizi yapılan bir diğer çalışmada, hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD) kodunu kullanarak dairesel silindirler üzerine çoklu hava jeti çarpmasıyla gerçekleşen akış ve ısı transferinin sayısal bir çalışması yapılmıştır. Türbülans kayma modelinin kullanıldığı çalışmada, deliklerin sayısı ve jete göre dairesel silindirlerin göreceli yerleşimleri test edilmiştir [5]. Galerkin' in sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak sonlu kalınlıklı eğimli bir plaka üzerine dikey olarak bir püskürtücüden çarpan serbest bir jet akışının ısı transferi özellikleri çalışılmış ve püskürtücünün genişliğinin artmasıyla yerel ısı taşınım katsayısının azaldığı fakat yerel Nusselt sayısının arttığı belirlenmiştir [6]. Yapılan çalışmaların birinde, jetler arasındaki mesafeyi ve ayrıca hem her iki jetin hem de tek jetin gücünü değiştirerek çarpan dairesel iki jet akımının etkileşiminin ısı transfer katsayısı üzerindeki etkisi deneysel olarak araştırılmıştır [7]. Sonuç olarak, jetler arası mesafedeki artışın aynı Reynolds sayısında ortalama Nusselt sayısını artırdığı bulunmuştur. 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

araştırmaları yapılmıştır. Jetler, herhangi bir ek ısıl etkileşim üretmemek için birbirinden çok uzakta olduklarından ikili jet sisteminin ısıl performansının tek jetten daha iyi olmadığı belirlenmiştir [8]. Farklı çaplardaki dairesel silindirlerden olan ısı transferini içeren çarpan hava jeti McDaniel ve Webb [9] tarafından çalışılmıştır. Eğimli içbükey ve dışbükey yüzeyler üzerine jet çarpması için boyutsuz çevresel uzaklık ve jet Reynolds sayısının fonksiyonları olarak durma noktası ile yerel ve ortalama Nusselt sayıları ilişkilendirilmiştir [10]. Başka bir çalışmada, püskürtücü ve plaka arasında 1d' den 8d' ye değişen uzaklıklarda sabit ısı akılı düz bir plakadan türbülanslı ($Re_a=20000$) asimetric bir jete olan ısı transferini ölçmek için deneyler yapılmış ve en yüksek ısı transferi durma noktasında püskürtücü-plaka uzaklığı 6d civarında olduğu durumda bulunmuştur [11]. Yarı dairesel içbükey bir yüzey üzerine bir hava jeti çarpması durumunda yerel ısı transferi için farklı değişkenlerin etkilerinin belirlenmesi amacıyla deneyler yapılmış ve farklı noktalarda sıcaklıkların ölçülmesi için bir sıvı kristal ısıl görüntüleme sistemi kullanılmıştır [12]. Türbülanslı akış şartlarında farklı çaplı iki adet ısıtılmış silindir üzerine jet çarpmasının sayısal araştırması Varol ve diğ. [13] tarafından yapılmıştır. Delik jetin yüksekliği S araştırılan tüm durumlar için sabit kabul edilmiştir. Çalışma, ısı transferi ve akışkan akışı üzerinde etkin parametreleri incelemek amacıyla yapılmış olup Jet Reynolds sayısı $11,000 \leq Re \leq 20,000$, silindirlerin çap oranı $0.5 \leq D_1/D_2 \leq 1.5$ ve silindirler arası uzaklığın delik jet yüksekliğine oranı L/S olarak alınmıştır. Çalışmada, akım çizgileri, eş sıcaklık eğrileri, yerel ve ortalama Nusselt sayıları C_d katsayısı elde edilmiştir. Silindirlerin çap oranlarının ısı ve akışkan akışı için bir kontrol elemanı olabileceği belirlenmiştir. Gori ve diğ. [14] zorlanmış taşınım ile iki adet dairesel silindir yüzeylerine çarpan hava jetinin ısı transferini incelemişlerdir. Silindir çapı $D=10$ mm ve delik jet yüksekliği $S=5$ mm'dir. Deneyler, $4,000 \leq Re \leq 20,000$ olmak üzere çeşitli jet Reynolds aralığında gerçekleştirilmiş olup silindir ve jet çıkışı arasındaki mesafenin etkisi $2 \leq H/S \leq 10$ aralığında incelenmiştir. Sonuçlar, birinci silindirin ısı transferi düzenleyicisi olarak rol oynadığını göstermektedir. Bir diğer çalışmada, sıcak tel X ölçüm ucu anemometresini kullanarak iki farklı yarı dairesel içbükey yüzey üzerine bir hava jeti çarpmasının akış ve türbülanslı durumu çalışılmıştır [15]. Hem serbest yüzey hem de kapalı jet dizileri için ısıtılmış bir yüzeye çarpan sıvı jet dizilerinin ısı transferi ve basınç düşüşü özellikleri araştırılmış ve sonuç olarak en az pompalama gücü gereksinimiyle serbest jet akışlarıyla karşılaştırıldığında kapalı jet düzenlenmesinin küçük jet aralığında daha yüksek ısı transfer katsayısı gösterdiği bulunmuştur [16].

Bu çalışmanın bir diğer yönü de birçok araştırmacı tarafından incelenen taşınım kurutmasıyla da ilgili olmasıdır. Hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD) kullanılarak kurutma hakkında hem sanayi hem de laboratuvar ölçekli çalışmaların kapsamlı bir derlemesi Tarek ve Ray [17] tarafından yapılmıştır. Dikdörtgen nemli bir nesnenin kurutulması sırasında ısı ve kütle transferinin iki boyutlu analizi sonlu fark yöntemi kullanılarak, nemli nesnenin bütün yüzeylerinde taşınım sınır şartının uygulanmasıyla gerçekleştirilmiştir. Taşınım ısı transfer katsayısının $4.33 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ 'den $96.16 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ 'ye kadar değiştiği ve çeşitli en/boy oranlarında ise taşınım kütle transfer katsayısının ise 9.28×10^{-7} - $1.94 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ aralığında olduğu belirlenmiştir [18]. Alnak ve Karabulut [19] sayısal olarak düz ve ters iki yarı dairesel nesnenin jet akışı ile kurutulmasının ısı ve kütle transferi üzerindeki etkisini dört farklı Re sayısı için incelemişler ve Re sayısının artışıyla ısı ve kütle transferinde

artış elde etmişlerdir. Bir diğer çalışmada ise, nemli bir silindirin jet kurutması sayısal olarak araştırılmıştır. Farklı jet hızları ($Re=100, 200$ ve 300) ve nemli nesnenin üç farklı uzaklık ($D/H=0.22, 0.25$ ve 0.33) için nesnenin içindeki sıcaklık ve kütle dağılımları elde edilmiş ve ayrıca ısı ve kütle transferinin jet ve silindir arasındaki mesafenin azalmasıyla arttığı belirlenmiştir [20]. Kivi meyvesinin kurutulması sırasında ısı ve kütle transferinin incelenmesi için hem deneysel hem de sayısal çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Meyve içindeki ısı ve kütle transfer sürecini araştırmak amacıyla geliştirilen bir kod kullanılarak farklı durumlar için zamana bağlı sıcaklık ve nem dağılımları elde edilmiştir [21]. Sonlu fark yöntemiyle silindir şeklindeki bir nesnenin kurutulmasının iki boyutlu sayısal ısı ve kütle transferi Hussain ve Dinçer [22] tarafından incelenmiştir. Farklı meyvelerin kurutulması sırasındaki sayısal ısı ve kütle transferi, bir siklon kurutucudan elde edilen deneysel verilerle de karşılaştırılarak analiz edilmiştir [23]. Bir ahşabın mikrodalgada kurutulmasının özellikleri kurutma süreci sırasında gözenekli katı (ahşap) için Lambert' in üç boyutlu kanununu içeren Luikov modeli kullanılarak ve akış alanı için ise üç boyutlu Navier-Stokes denklemleri çözülerek araştırılmıştır. Sonuçlar; ışınlama zamanı, mikrodalga güç seviyesi ve numune kalınlığı değişimlerinin tüm kurutma sürecinde önemli rol oynadıklarını göstermiştir [24]. Benzer olarak bir diğer çalışmada, Femlab paket programı kullanılarak ahşap için üç boyutlu birleştirilmiş ısı ve kütle korunum denklemlerinin sayısal çözümlenmesi gerçekleştirilmiştir. Önerilen birleşik problemin benzeştirilmesinin ahşap içinde ısı ve kütle transferinin etkisinin değerlendirilmesine olanak sağladığı belirlenmiştir [25]. Yankee motor kapağının yapılandırılmasında kullanılan pelür kâğıdının üretimi için enerji performansının en uygun hale getirilmesine imkân sağlayan çarpan hava kurutma sistemlerinin kapsamlı ve özgün matematiksel modellemesi raporlandırılmış ve matematiksel modelin geçerliliği, var olan pelür kâğıdı milinden alınan gerçek verilerle karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Aynı zamanda, hava sisteminin iki farklı tasarımının enerji performansları karşılaştırılmıştır. Çalışmanın sonucunda, hava jeti sıcaklığı, hızı ve çıkan havanın nemlilik içeriği gibi kurutma işleminin etkin değişkenlerinin değiştirilmesiyle aynı kağıt üretiminde yaklaşık %4.5'lük enerji tasarrufu elde edilme olasılığının olduğu belirlenmiştir [26]. Başka bir çalışmada ise dondurarak kurutma (FD) ile kombine edilebilen hava jeti kurutması (AIJD), sıcak hava kurutması (HAD) ve mikrodalga kurutması (MWD)'ndan uygun kurutma tekniğinin seçilmesi amaçlanmıştır. 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 çalışabilmesi 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 edildenden daha az olduğu bulunmuştur [27].

Meyve ve sebzelerde muhafaza yöntemi olarak kurutma yapılmaktadır. Taze veya kuru meyve ve sebzelerin bozulması genellikle ve öncelikle mikrobiyolojik yolla mikroorganizmalar tarafından olmaktadır. Mikroorganizmaların yararlanabileceği miktarda ortamda suyun bulunması bir gıdanın bozulmasına yol açmaktadır. Kurutma işlemi sayesinde gıdalarda bulunan suyun büyük bir kısmı uzaklaştırılarak mikroorganizmaların

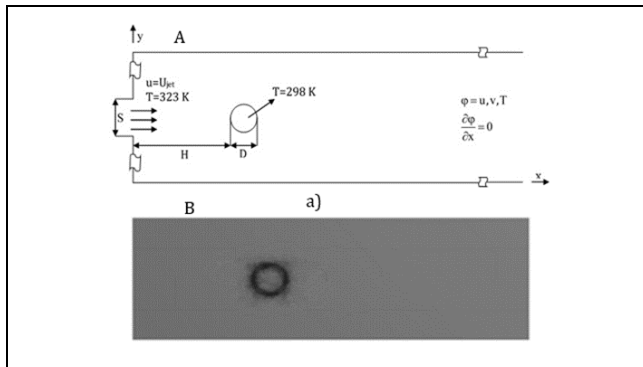
faaliyetleri için uygun olmayan ortam oluşturulabilmektedir [28]. Çünkü gıdaların su içeriği ile mikroorganizma faaliyetleri birbiriyle doğrudan ilişkilidir. Ülkemizde başlıca kurutma işlemine tabi tutulan meyveler, kayısı, elma, kiraz, şeftali, armut, erik vb. iken sebzeler ise patlıcan, biber, mantar, domates, havuç, kabak vb.'dir [29].

Literatürde de jet çarpmasıyla kurutma üzerine yapılan çalışmalar bulunmakla birlikte özellikle ülkemizde de yoğun olarak kurutulması yapılan meyve ve sebzelere benzerlik teşkil etmesi bakımından model olarak dairesel nemli nesnelere seçilmiş olup, çarpan jetin nesneye olan ısı transferi ve nesne içindeki nem dağılımına etkisini de inceleyebilmek amacıyla düz yarı dairesel nesneyle de karşılaştırılması yapılmıştır.

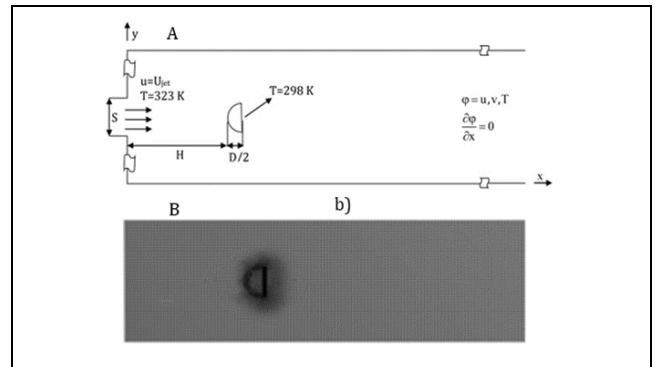
Bu çalışmada, tam ve düz yarı dairesel geometriye sahip iki farklı nemli nesnenin bir hava jeti çarpması nedeniyle oluşan akışkan akışı, ısı ve kütle transferi sayısal olarak incelenmiştir. Bununla birlikte, farklı geometrik nemli nesnelere serbest jet çarpmasının hem ısı hem de kütle transferinin araştırılması amaçlanmıştır. Bu kapsamda çalışmada, yerel Nusselt sayısı değişimi üzerinde Reynolds sayısının etkisi her iki dairesel nesne için araştırılmış ve ayrıca nemli nesnelere orta kısmındaki x eksenine boyunca sıcaklık ve derişiklik değişimleri elde edilmiştir. Ayrıca, farklı jet giriş hızları için nemli tam ve düz yarı dairesel nesnelere akım çizgileri ve eş sıcaklık eğrileri görselleştirilmiştir. Hesaplamalar, sonlu hacim yöntemi olan ANSYS Fluent 17.0 sayısal hesaplamalı bilgisayar programı kullanılarak yapılmıştır. Hesaplamalar, $Re=100, 200$ ve 300 olarak farklı Reynolds sayıları için gerçekleştirilmiştir. Sunulan çalışmanın doğruluğunu kanıtlamak için elde edilen sonuçlar, daha önce Varol ve diğ. [13] tarafından yapılan sayısal çalışma ve Gori ve diğ. [14] tarafından yapılan deneysel çalışmanın sonuçlarıyla karşılaştırılmış ve sonuçların birbiriyle iyi bir uyum içerisinde oldukları görülmüştür.

2 Fiziksel model

İncelenen fiziksel modellerin sınır şartlarıyla birlikte sistemlerin şematik görünüşleri Şekil 1a ve 1b'de



(a): Tam dairesel nesne.



(b): Düz yarı dairesel nesne.

Şekil 1: A-Fiziksel modellerin sınır şartları ve şematik görünüşleri, B- Ağ yapısı dağılımı.

Tablo 1: Ağ sayısı bağımsızlık testi.

Ağ Adı	Ağ Elemanı Sayısı	Ortalama Nusselt Sayısı (Nu)			
		Re=100	Re=200	Re=300	Re=400
G1	25 602	3.4515	5.7523	8.4825	10.9745
G2	42 304	3.5412	5.8426	8.5765	10.9925
G3	57 800	3.5501	5.8536	8.5877	11.0707
G4	98 712	3.5542	5.8524	8.5865	11.0699
G5	153 678	3.5541	5.5824	8.5865	11.0698

gösterilmektedir. Bir jet akışı, nemli tam dairesel ve düz 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 nesnenin uzağa yerleştirilmiştir.

3 Sayısal yöntem

Sayısal çalışma, iki boyutlu, zamandan bağımsız, laminer, sıkıştırılmaz akış ve nesnenin yüzeyinde iletim ve zorlanmış taşınım olmak üzere bileşik ısı transferi ve nemli nesnenin üzerinde ise zorlanmış taşınım kurutması yaklaşımıyla gerçekleştirilmiştir. Birleşik ısı ve kütle transferinin incelenmesi amacıyla sonlu hacimler yöntemi esasına dayanan FLUENT programından yararlanılmıştır.

Sonlu hacimler yöntemi, çözülecek geometriyi çözüm yapmak için parçalara bölme ve sonra her bir parça için elde edilen bu çözümleri bir araya getirerek probleme ait genel bir çözüm elde etme temellidir. Bu yöntemde, kontrol hacmi esaslı bir teknik kullanılarak korunum denklemleri sayısal olarak çözümlenebilen cebirsel denklemlerine dönüştürülür. Bu yöntem, her bir kontrol hacmi için korunum denklemlerinin integre edilmesiyle ulaşılan ve değişkenler için kontrol hacmine ait ayrık eşitliklerin bulunması tekniğidir. Ayrık eşitliklerin doğrusal denklemlerine dönüştürülmesinden sonra iterasyona bağlı çözümlerle istenen yakınsaklık ölçüsü sağlanıncaya kadar hız, basınç ve sıcaklık gibi değişkenler güncellenir. En kullanışlı ağ yapısı için hız, sıcaklık ve basınç değişkenliğinin önemli olduğu bölgelerde ağ yapısının sıklığı artırılmalıdır. Sonuçların ağ sayısından olan bağımsızlığını sağlamak için Tablo 1'de gösterildiği gibi farklı ağ sayılarında Re sayısının değişimine bağlı olarak ortalama Nu 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. Görüldüğü gibi dairesel nesnelere etrafında daha sık bir ağ yapısı uygulanmıştır. Süreklilik ve momentum denklemleri için hesapların yakınsaması, iki iterasyon arasındaki fark 10^{-6} 'dan daha az olduğunda durdurulurken, bu değer enerji denklemi için 10^{-7} 'dir.

Isı transferi ve akış için genel denklemler, zamandan bağımsız, iki boyutlu, laminer, sıkıştırılmaz 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 ışınım ihmal edilmiştir. Bu sonuçlar neticesinde denklemler aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir [30].

Süreklilik denklemi;

$$\frac{\partial(ru)}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial \theta} = 0 \quad (1)$$

Momentum denklemi r momentumu denklemi

$$u \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{v}{r} \frac{\partial u}{\partial \theta} - \frac{v^2}{r} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} + v \left(\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial(ru)}{\partial r} \right) - \frac{u}{r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 u}{\partial \theta^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial v}{\partial \theta} \right) \quad (2)$$

θ momentumu denklemi

$$u \frac{\partial v}{\partial r} + \frac{v}{r} \frac{\partial v}{\partial \theta} - \frac{uv}{r} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial \theta} + v \left(\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial(rv)}{\partial r} \right) - \frac{v}{r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v}{\partial \theta^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial u}{\partial \theta} \right) \quad (3)$$

Enerji denklemi

$$u \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{v}{r} \frac{\partial T}{\partial \theta} = \alpha \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} \right) \quad (4)$$

Yukarıdaki denklemlerde, u ve v hız bileşenleri (m/s), p basınç (Pa), ν kinematik viskozite (m^2/s), ρ akışkanın yoğunluğu (kg/m^3), T akışkanın sıcaklığı (K), α ısı yayılım katsayısıdır (m^2/s). Sınır şartları ise aşağıdaki gibi ifade edilmektedir:

Jet çıkışında, $u=U_{jet}$, $T=323$ K ve kanal çıkışında

$$\frac{\partial \varphi}{\partial x} = 0 \quad (5)$$

Burada, φ genel değişken ifadesi olup, u ve v hız bileşenleri, T ise sıcaklıktır.

Alt ve üst duvarlarda, $u=U_{\infty}$, $T=T_{\infty}$ ve daire üzerinde,

$$u=v=0, T=298 \text{ K} \quad (6)$$

Girişte Reynolds sayısı

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

Yüzeydeki ısı transfer sınır şartı

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_w = h(T_w - T_{\infty}) \quad (8)$$

Burada, T_w ve T_{∞} sırasıyla yüzey ve akışkan sıcaklıklarıdır. 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.

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

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

Yukarıdaki denklemler aşağıdaki giriş ve sınır şartlarının kullanılmasıyla FLUENT [30]'de kullanıcı tanımlı bir fonksiyon kodu (UDF) yazılarak çözülmüştür.

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

$r = 0$

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

$r = R = D/2$

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

$$-D \left(\frac{\partial M(R, \theta, t = t)}{\partial r} \right) = h_m(M - M_a)$$

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

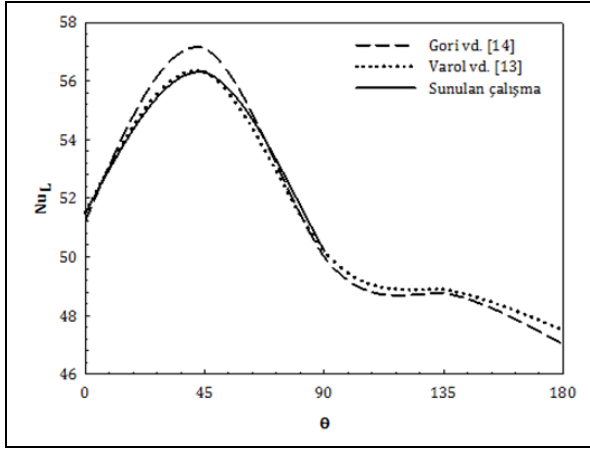
$$T(r, 0, t) = T(r, \pi, t) \text{ ve } \frac{\partial T(r, 0, t)}{\partial \theta} = \frac{\partial T(r, \pi, t)}{\partial \theta} \quad (16)$$

Burada D, nem yayılım katsayısı (m^2/s), h ve h_m ise sırasıyla ısı taşınım ($W/m^2 K$) ve kütle transfer katsayıları (m/s), M ise nem dağılımını (kg/kg) göstermektedir.

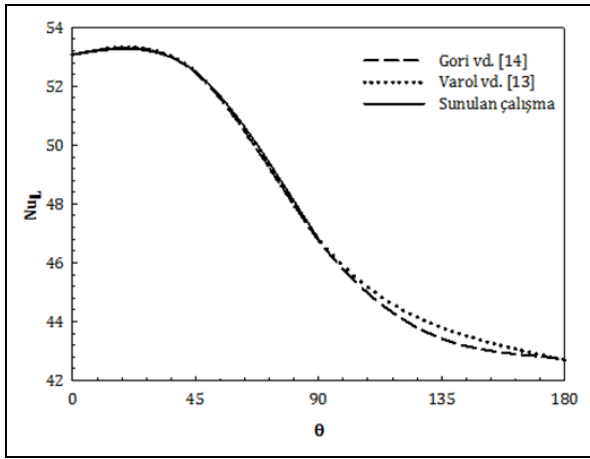
4 Modelin doğrulanması

Şekil 2'de gösterildiği gibi modelin doğruluğunu kanıtlamak amacıyla yarı dairesel nesne için sunulan çalışma ve tam dairesel nesne için daha önce Varol ve diğ. [13] tarafından yapılan sayısal çalışmaların sonuçları, Gori ve diğ. [14]'nin yaptığı deneysel çalışmanın sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmada, jetin vurduğu taraftan dairenin ortası başlangıç alınarak $\theta=180^\circ$ lik açıda grafikler çizilmiştir. Burada, delik jetin yüksekliği S sabit olup birinci ve ikinci dairelerin farklı uzaklıklarında (L/S) $Re=20.000$ değeri için yerel Nusselt sayıları karşılaştırılmaktadır (Şekil 2). Şekilde, $\theta=45^\circ$ ve $\theta=150^\circ$ civarında Gori ve diğ. [14] tarafından yayımlanan deneysel çalışmanın verilerinden bir miktar sapma görülebilmektedir. Bununla birlikte, daireler için $L/S=4$ 'te 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.



(a): $L/S=2$.



(b): $L/S=4$.

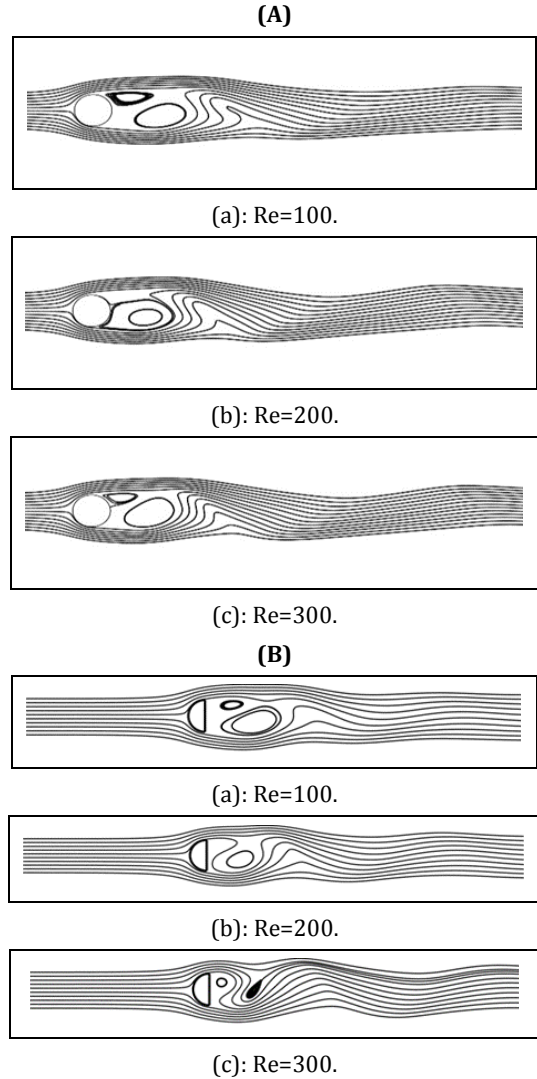
Şekil 2: Yerel Nu sayısının karşılaştırılması.

5 Bulgular ve tartışma

Çalışmada, akışkan akışı ve ısı ve kütle transferi için tam ve düz 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 0.71 olarak alınmıştır.

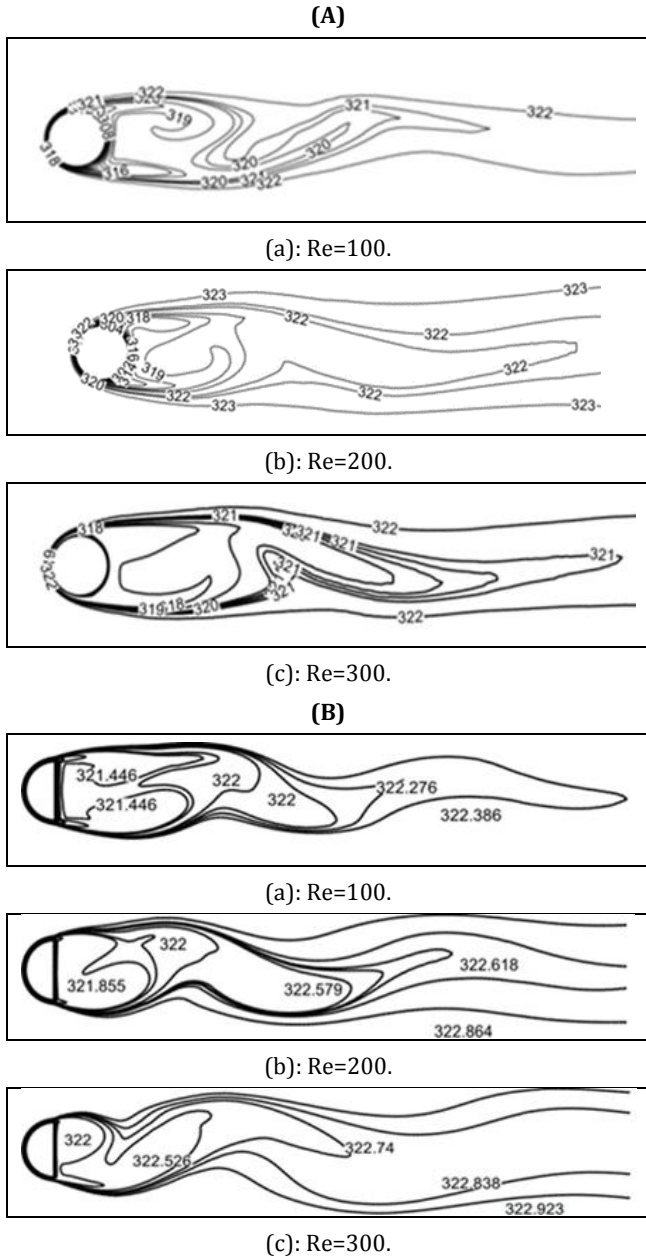
Farklı jet giriş hızları için tam ve düz yarı dairesel nemli nesnelere akım çizgileri sırasıyla Şekil 3A ve B'de gösterilmektedir. Tam ve düz yarı dairesel nesnelere önünde hava jeti çarpmasına dik olan yüzeyde durma noktası meydana gelmektedir. Durma noktasından itibaren akım çizgilerinde ayrılma meydana gelmektedir. Nemli tam dairesel nesne için $Re=100$ 'de elde edilen akım çizgileri Şekil 3A (a)'da gösterilmektedir. Dairesel nesnenin arkasında oluşan boyutları birbirine yakın iki adet girdap, Reynolds sayısının artışıyla birleşerek bir bütün halinde tek bir girdap haline dönüşmektedir (Şekil 3A (b)). Reynolds sayısı 300 değerine çıkarıldığında ise nesne arkasında oluşan girdaplar ayrılarak tekrar $Re=100$ 'deki haline benzer bir şekle dönmektedir (Şekil 3A (c)). Tam dairesel nesnenin aşağıya doğru oluşan salınımların sıklığı ise Re sayısının artışıyla artmaktadır. Şekil 3B (a)'da da görüldüğü gibi düz yarı

dairesel nesnenin arkasında iki tane girdap meydana gelmekte ve girdapların boyutları akış hızının artmasıyla küçülmektedir. Düz yarı dairesel nesnenin aşağıya doğru akışta salınım olmakta ve salınımların sıklığı Reynolds sayısındaki artışla artmaktadır. $Re=200$ 'de düz yarı dairesel nesnenin ardında büyük bir dönüş hücresi oluşmaktadır. Reynolds sayısı 300 değerine artırıldığı zaman ise hücrenin boyutu küçülmekte ve nesnenin ardında diğer bir dönüş hücresi meydana gelmektedir.



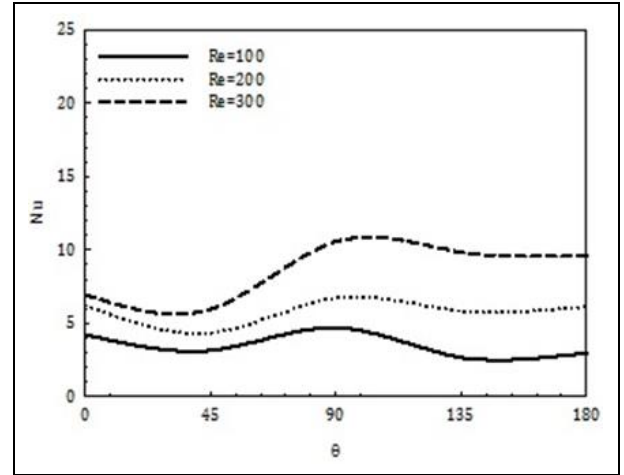
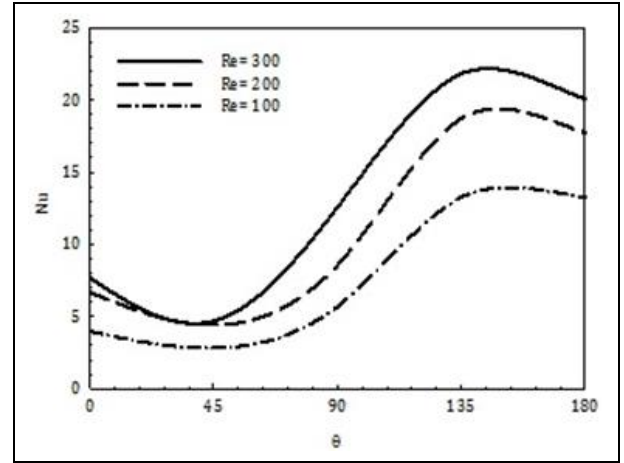
Şekil 3: Dairesel nemli nesnelere farklı Re sayıları için akım çizgileri. A-Tam, B-Düz yarı dairesel.

Şekil 4A ve B'de farklı Reynolds sayısı değerleri için sırasıyla nemli tam ve düz yarı dairesel nesnelere ait eş sıcaklık eğrileri verilmektedir. Şekil 4A ve 4B incelendiğinde, eş sıcaklık eğrilerinin genel bir gözlemi olarak Re sayısının her iki nesnenin aşağıya doğru sıcaklık dağılımı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu açıkça görülebilmektedir. Bununla birlikte, incelenen tüm Re sayısı değerleri için düz yarı dairesel nesnenin aşağıya doğru, tam dairesel nesneye göre daha yüksek hava sıcaklık değerleri elde edilmektedir. Elde edilen bu bulgu, çarpan hava jetinden tam dairesel nesneye olan ısı transferinin düz yarı dairesel nesneye göre daha iyi olduğunu göstermektedir.



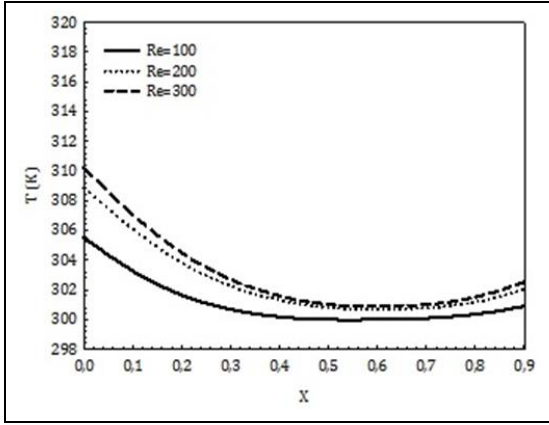
Şekil 4: Dairesel nemli nesnelerin farklı Re sayıları için eş sıcaklık eğrileri. A-Tam B-Düz yarı dairesel.

Şekil 5a ve b farklı Reynolds sayıları için sırasıyla tam ve düz yarı dairesel nesnelerin çevreleri boyunca yerel Nusselt sayısının değişimini göstermektedir. Şekil 5a ve b'de görülebildiği gibi her iki dairesel nesne için en düşük Nusselt sayısı değerleri $\theta=45^\circ$ civarında elde edilmektedir. Bununla birlikte, tam dairesel nesne için yerel Nusselt sayısının en yüksek değerlerine $\theta=135^\circ$ ve $\theta=155^\circ$ arasında ulaşılırken, değerler üzerindeki Reynolds sayısının kuvvetli etkisi Şekil 5a'dan açıkça görülebilmektedir. Düz yarı dairesel nesne için Nusselt sayısının en yüksek artışı $\theta=95^\circ$ ve $\theta=135^\circ$ arasındaki kısımda görülmektedir (Şekil 5b). Ayrıca, Reynolds sayısının artışıyla Nusselt sayısında belirgin bir artış elde edilmektedir.

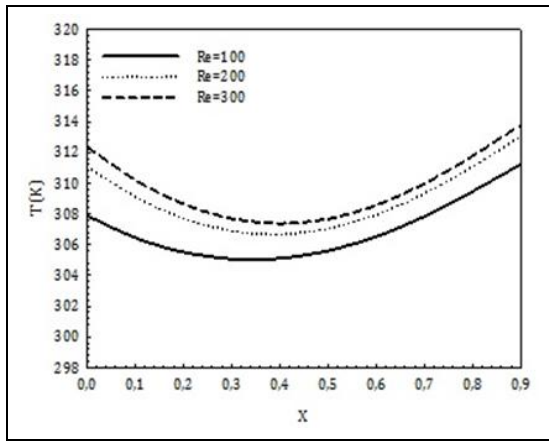


Şekil 5: Farklı Re sayıları için yerel Nu sayısının değişimi.

Tam ve düz yarı dairesel nesnelerin orta kısımlarında x eksenı boyunca sıcaklık değişimleri sırasıyla Şekil 6a ve b'de farklı Re sayıları için sunulmaktadır. Her iki nesne için sıcaklık değerleri Reynolds sayısının artmasıyla artmaktadır. Her iki nesnenin iç kısmına doğru hava jeti çarpmasına dik olan yüzeydeki durma noktasından uzaklaştıkça sıcaklık değerleri azalırken, aşağıakım bölgelerinde Şekil 3'teki akım çizgilerinden de görülebileceği gibi hava hareketine bağlı olarak düz yarı dairesel nesne için daha fazla olmak üzere sıcaklık değerleri tekrar artmaya başlamaktadır (Şekil 6a ve b). Bununla birlikte, incelenen tüm Re sayısı değerlerinde tam dairesel nesne için Nu sayısı grafiğine bakıldığında (Şekil 5a), ısı transferinin düz 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 olmamaktadır. Bu nedenle, düz yarı dairesel nesneye göre nesnenin iç kısmında tam dairesel nesnede daha düşük sıcaklık değerleri elde edilmektedir.



(a): Tam.



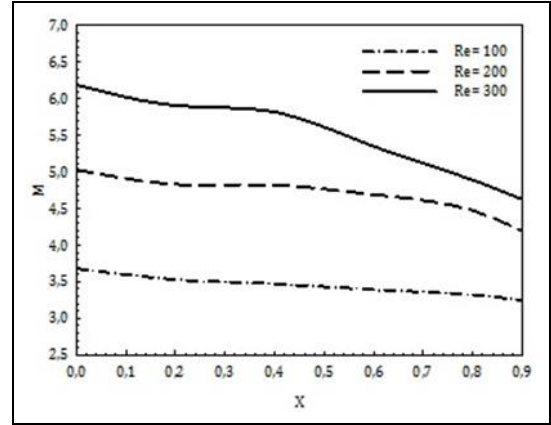
(b): Düz yarı dairesel nesne.

Şekil 6: Dairesel nesnelerin orta kısımlarında x eksenini boyunca sıcaklık değişimi.

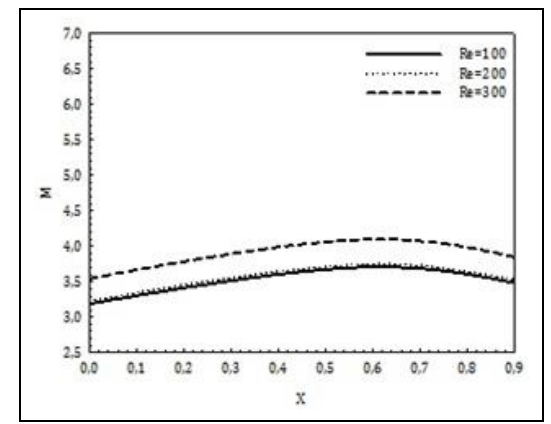
Şekil 7a ve b'de sırasıyla tam ve düz yarı dairesel nemli nesnelerin orta kısımlarındaki x eksenini boyunca derişiklik değışimleri farklı Re sayıları için gösterilmektedir. Şekil 7a ve b'de görülebildiği gibi derişiklik değeri durma noktasından nesnelerin iç kısmına doğru gidildikçe çok az bir miktar artış gösterdikten sonra aşağıya doğru bir miktar azalsa da hemen hemen doğrusal olarak değışmektedir. Analiz edilen tüm Reynolds sayısı değeri için en yüksek derişiklik değeri tam dairesel nesne için ulaşılmaktadır. Çünkü, ısı transferinin tam dairesel nesnede düz yarı dairesel nesneye göre daha fazla olması (Şekil 5a, b), nesnenin nem içeriğinin azalması derişiklik değeri artmasını sağlamaktadır. Ayrıca, Re sayısı artışının nesnenin derişiklik değişimine olan etkisi tam dairesel nesne için Şekil 7a'da daha belirgin bir şekilde görülebilmektedir.

6 Genel sonuçlar ve değerlendirme

Günümüzde dünya nüfusunun hızlı artması, üreticilerin tarımdan uzaklaşması, nüfus artışına paralel olarak da barınma ihtiyacının artmasıyla birlikte ekilebilir alanların bir kısmının yapılaşmaya açılması gıda kaynaklarının en verimli şekilde kullanılmasını zorunlu hale getirmiştir. Bu amaçla da gıdaların uzun sürede tüketilmesi için dayanıklılıklarının artırılması önem arz etmektedir.



(a): Tam.



(b): Düz yarı dairesel nesne.

Şekil 7: Nemli dairesel nesnelerin orta kısımlarında x eksenini boyunca derişiklik değışimi.

Bu çalışmada, tam ve düz yarı dairesel olmak üzere iki farklı nemli nesne geometrilerinin hava jeti ile kurutulmasının analizi sonlu hacim yöntemi olan ANSYS Fluent 17.0'nin kullanılmasıyla sayısal olarak incelenmiştir. Bununla birlikte, kurutma mikroorganizmaların yararlanabileceği miktarda ortamda suyun bulunmasını engellediğinden meyve ve sebzelerin uzun süre muhafaza edilmesinde kullanılan bir yöntemdir. Bu amaçla, ülkemizde de başta kayısı, çilek, elma, armut, şeftali, domates, havuç ve kabak olmak üzere çeşitli meyve ve sebzeler kurutma işlemine tabi tutulmaktadır. Literatürde de jet çarpmasıyla kurutma üzerine yapılan çalışmalar bulunmakla birlikte özellikle ülkemizde de yoğun olarak kurutulması yapılan meyve ve sebzelere benzerlik teşkil etmesi bakımından model olarak dairesel nemli nesnelere seçilmiş olup, çarpan jetin nesneye olan ısı transferi ve nesne içindeki nem dağılımına etkisini de inceleyebilmek amacıyla düz yarı dairesel nesneyle de karşılaştırılması yapılmıştır. Ayrıca, daha önce yapılan bir deneysel çalışmayla da karşılaştırma yapılmış ve çalışmayla çok iyi bir uyum sağlandığın kullanılan modellerin sayısal çalışmasının doğru olduğuna karar verilmiştir. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi verilebilir:

Hem Reynolds sayısı hem de nemli nesnelerin geometrileri, ısı ve kütle transferini etkileyen önemli değişkenlerdir. Nemli düz yarı dairesel nesneyle karşılaştırıldığında tam dairesel nesnede jet kurutmasının etkinliğinin daha iyi olduğu gözlemlenmiştir. Nesnelerin arkasında oluşan girdaplar (dönüş hücreleri)

Reynolds sayısıyla doğrudan bağlantılıdır. Yüksek Re sayılarında çoklu dönüş hücreleri meydana gelmektedir. Re sayısının artışıyla ısı transferi artmaktadır. Türbülanslı akış koşulları olması durumunda ısı taşınım katsayısının artışına bağlı olarak nesnelere olan ısı transferi daha da artacak olmakla birlikte nesnelere içerisindeki nem içeriğindeki azalma da artacaktır. Yüksek Re sayısı değerlerinde derişiklik değeri fazladır ve nesnelere içinde x eksenine boyunca aşağı akım bölgesinde hemen hemen doğrusal olarak değişmektedir. Ayrıca, tam dairesel nesne için incelenen Re sayılarında nesne içinde daha yüksek derişiklik 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 kullanılabilirliğinin uygun olabileceği düşünülmektedir.

7 Semboller

c_p	: Özgül ısı, [J/kg K],
D	: Dairesel nesne çapı [m],
H	: Püskürtücü ve nemli nesne arası mesafe [m],
h	: Isı taşınım katsayısı, [W/m ² K],
h_m	: Kütle transfer katsayısı, [m/s],
k	: Isıl iletkenlik, [W/m K],
M	: Nem dağılımı (derişiklik) [kg/kg],
Nu	: Nusselt sayısı (=hd/k) [-],
Pr	: Prandtl sayısı (=k/ ρc_p) [-],
Re	: Reynolds sayısı (=V _∞ d/v), [-],
S	: Jet çıkış yeri yüksekliği [m],
T	: Sıcaklık [K],
t	: Zaman [s],
u, v	: r ve θ yönlerindeki hızlar [m/s].

Yunan Sembolleri

μ	: Dinamik viskozite [kg/sm],
ν	: Kinematik viskozite [m ² /s],
ρ	: Yoğunluk [kg/m ³],
φ	: Bağımlı değişken.

İndis

w	: Duvar,
∞	: Çevre,
i	: Giriş.

8 Kaynaklar

- [1] Martin H. *Heat and Mass Transfer Between Impinging Gas Jets and Solid Surfaces*, Advances in Heat Transfer, New York, USA, Academic Press, 1977.
- [2] Lee HG, Yoon HS, Ha MY. "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, 2008.
- [3] Tawfek AA. "Heat transfer studies of the oblique impingement of round jets upon a curved surface". *Heat and Mass Transfer*, 38, 467-475, 2002.
- [4] Olsson EEM, Ahrne LM, Tragardh AC. "Flow and heat transfer from multiple slot air jets impinging on circular cylinders". *Journal of Food Engineering*, 67(3), 273-280, 2005.
- [5] Olsson EEM, Ahrne LM, Tragardh AC. "Heat transfer from a slot air jet impinging on a circular cylinder". *Journal of Food Engineering*, 63, 393-401, 2004.
- [6] Rahman MM, Hernandez CF, Lallave JC. "Free liquid jet impingement from a slot nozzle to a curved plate". *Numerical Heat Transfer Part A*, 57(11), 799-821, 2010.
- [7] Teamah MA, Khairat MM. "Heat transfer due to impinging double free circular jets". *Alexandria Engineering Journal*, 54(3), 281-293, 2015.
- [8] Hosain Md L, Fdhila RB, Daneryd A. "Heat transfer by liquid jets impinging on a hot flat surface". *Applied Energy*, 164, 934-943, 2016.
- [9] McDaniel CS, Webb BW. "Slot jet impingement heat transfer from circular cylinders". *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 43(11), 1975-1985, 2000.
- [10] Eren H, Yeşilata B, Celik N. "Nonlinear flow and heat transfer dynamics of impinging jets onto slightly-curved surfaces". *Applied Thermal Engineering*, 27(14-15), 2600-2608, 2007.
- [11] Frost SA, Jambunathan K, Whitney CF, Ball SJ. "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, 1997.
- [12] Chan TL, Leung CW, Jambunathan K, Frost SA, Zhou Y, Liu MH. "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, 2002.
- [13] Varol Y, Alnak DE, Oztop HF, Al-Salem K. "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, 2012.
- [14] Gori F, Petracci I, Tedesco V. "Cooling of two smooth cylinders in row by a slot jet of air with low turbulence". *Applied Thermal Engineering*, 27(14-15), 2415-2425, 2007.
- [15] Chan TL, Zhou Y, Liu M, Leung C. "Mean flow and turbulence measurements of the impingement wall jet on a semi-circular convex surface". *Experiments in Fluids*, 34(1), 140-149, 2003.
- [16] Robinson A, Schnitzler E. "An experimental investigation of free and submerged miniature liquid jet array impingement heat transfer". *Experimental Thermal Fluid Science*, 32(1), 1-13, 2007.
- [17] Tarek JJ, Ray MB. "Application of computational fluid dynamics for simulation of drying processes: a review". *Drying Technology*, 28(2), 120-154, 2010.
- [18] Kaya A, Aydın O, Dincer I. "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, 2006.
- [19] Alnak DE, Karabulut K. "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, 2018.
- [20] Alnak DE, Varol Y, Oztop HF, Al-Salem K. "Simulation of jet drying of a moist cylinder at low reynolds number". *Drying Technology*, 30, 631-640, 2012.
- [21] Kaya A, Aydın O, Dincer I. "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, 2008.
- [22] Hussain MM, Dincer I. "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, 2003.

- [23] Oztop HF, Akpınar EK. "Numerical and experimental analysis of moisture transfer for convective drying of some products". *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 35(2), 169-177, 2008.
- [24] Kadem S, Younsi R, Lachemet A. "Computational analysis of heat and mass transfer during microwave drying of timber". *Thermal Science*, 20(5), 1447-1455, 2016.
- [25] Younsi R, Souhila K, Azziz L, Duygu K. "Transient analysis of heat and mass transfer during heat treatment of wood including pressure equation". *Thermal Science*, 19(2), 693-702, 2015.
- [26] Di Marco P, Frigo S, Gabbrielli R, Pecchia S. "Mathematical modelling and energy performance assessment of air impingement drying system for the production of tissue paper". *Energy*, 114, 201-213, 2016.
- [27] Huang D, Li WF, Shao HJ, Gao AN, Yang XB. "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), 2129-2143, 2017.
- [28] Cemeroğlu B. *Meyve Sebze İşleme Teknolojisi 2*. 2. Baskı, Ankara, Türkiye, Bizim Grup Basımevi, 2004.
- [29] Seçkin UG, Taşeri L. "Yarı kurutulmuş meyve sebzeler". *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi (Pamukkale Gıda Sempozyumu III Özel Sayısı)*, 21(9), 414-420, 2015.
- [30] ANSYS Inc., *ANSYS FLUENT User's Guide*, Fluent, Netherland, Lebanon, ANSYS Press, 2003.