



SİLİNDİRİK BİR GÜNEŞ DAMITMA SİSTEMİNİN İÇ HAZNE YÜKSEKLİĞİNİN DAMITIM MİKTARINA ETKİSİNİN SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ

Özgür EKİCİ

Hacettepe Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü
06800 Beytepe, Ankara, ozgur.ekici@hacettepe.edu.tr

(Geliş Tarihi: 11.05.2017, Kabul Tarihi: 11.10.2017)

Özet: Bu çalışmada silindirik bir güneş damıtma sisteminde oluşan akış örgüsü ve elde edilen damıtım miktarı sayısal olarak incelenmiştir. Literatürde yer alan ve farklı koşullar altında deneysel olarak damıtım miktarları ölçülmüş bir sistemin geometrisi temel olarak seçilerek iki-boyutlu sayısal bir model oluşturulmuştur. Çalışmada akışkan olarak nemli hava kullanılmış; suyun kütle damıtım miktarı, yani suyun buharlaşması ve yoğuşmasından oluşan temel çalışma prensibi, su yüzeyindeki taşınım ile temsil edilmiştir. Sayısal model kullanılarak farklı sıcaklık sınır koşulları altında elde edilen kütle damıtım miktarları literatürde yer alan deneysel verilerle karşılaştırılmış ve %15 farklılık bandı içinde yer alan, iyi bir uyum içinde oldukları görülmüştür. Doğrulama çalışmasının ardından, elde edilen sayısal model sonuçları sistem içinde oluşan akış örgüsünü incelemek ve problem fiziğini daha iyi anlayabilmek için kullanılmıştır. Temel geometriye ek olarak iç hazne duvarı yüksekliği farklı iki geometri oluşturulmuş ve bu değişikliğin sonuçlar üzerindeki etkileri incelenmiştir. Temel geometri ile ulaşılan kütle damıtım miktarının incelenen tüm farklı sınır koşulları için, iç hazne duvarı yüksekliğindeki ilk azaltma ile (2. geometri) %5 dolayında arttığı, ikinci azaltma ile ise (3. geometri) %5-10 arası değişen değerlerde azaldığı gözlemlenmiş, monoton olarak değişmeyen bu sonuçlar akış örgüsü incelenerek açıklanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Güneş damıtma sistemi, HAD, akış örgüsü, sayısal model, doğal konveksiyon

COMPUTATIONAL INVESTIGATION OF THE EFFECT OF TROUGH HEIGHT IN A TUBULAR SOLAR STILL ON DISTILLATE PRODUCTIVITY

Abstract: In this study, the flow field and the amount of distillate produced in a tubular solar still is analyzed computationally. A two dimensional computational model is developed for a system geometry selected from the literature, which provides experimentally measured distillate productivity rates under different conditions. Humid air is used as a working fluid and distillate water mass productivity, i.e., the basic working principle consists of evaporation followed by condensation, is approximated by the convective transport at the water surface. Calculated distillate productivity values by the computational model under different temperature boundary conditions are compared against experimental values and a good agreement, where deviations are in the range of 15%, is found. Following the validation study, computational results are used to investigate the flow field generated in the system and to gain better insight to the physics. In addition to the base geometry, two additional geometries with a lower height troughs are created and effects of this change on the results are investigated. It is observed that the distillate productivity values obtained with the base geometry for all different boundary conditions increase around 5% with the first decrease in trough height (2. geometry), and decrease 5 to 10% with the second decrease in trough height (3. geometry), and this non-monotonic change in the results are explained by examining the flow field.

Keywords: Solar still, CFD, flow field, computational model, natural convection

SEMBOLLER

c_p	Özgül ısı [kJ/kg·K]	T_{sy}	Su yüzeyi sıcaklığı [°C]
D_{AB}	Difüzyon katsayısı [m ² /sn]	u	x-yönündeki hız [m/sn]
g	Yerçekimi ivmesi [m/sn ²]	v	y-yönündeki hız [m/sn]
h	Isı taşınım katsayısı [W/m ² ·K]	β	Isıl genleşme katsayısı [1/K]
k	Isı iletim katsayısı [W/m·K]	μ	Dinamik viskozite [N·sn/m ²]
L	Su yüzeyi genişliği [m]	ρ	Yoğunluk [kg/m ³]
\dot{m}_s	Birim alanda saatlik kütle damıtım miktarı [kg/m ² ·sa]	ρ_s	Su buharı yoğunluğu [kg/m ³]
T	Sıcaklık [K]	ω_s	Su buharı kütle kesri
T_{dy}	Dış yüzey sıcaklığı [°C]	ζ	Kütle genleşme katsayısı

GİRİŞ

Temiz ve 'kaliteli' suya erişim tüm canlılar için hayati önem taşımaktadır. Doğal su kaynaklarının artan ve sürdürülebilir olmayan endüstriyelleşme, buna paralel olarak biçimlenen doğa/insan ilişkisi ve değişen tüketim alışkanlıkları gibi kabaca özetlenebilecek nedenlerle yakın bir zamanda yetersiz kalacağı düşünülmektedir. Birleşmiş Milletler (BM) verilerine göre, 2013 yılında 700 milyon kişinin temel ihtiyaçlarını karşılayabilecek kalitedeki suya erişim konusunda sıkıntı yaşamakta olduğu bilinmekte ve bu sayının 2025 yılı itibarıyla 1.8 milyara yükselmesi beklenmektedir (BM raporları, 2014). Temiz suya erişim konusunda sürdürülebilir yeni yöntemler bulmak veya var olan yöntemleri geliştirmek mevcut ve devamı öngörülen temiz suya erişim probleminin –kalicı bir şekilde olmasa da- çözümüne yönelik atılabilecek adımlardandır.

Gerek hijyen gerekse desalinasyon için güneş enerjisi kullanılarak yapılan damıtma halihazırda kullanılan yöntemler arasındadır. Özellikle desalinasyon için, güneş enerjisi kullanılarak su damıtma yöntemi tarihinin 15. yy'daki Arap simyagerlere kadar uzandığı söylenmektedir (Al-Gobaisi, 2010). Ancak üretilmesi kolay ve maliyeti düşük bir yöntem olmasına rağmen güneş damıtma sistemlerinin kullanımı çok yaygın değildir. Bunun temel sebebi olarak sistemin sahip olduğu düşük verimliliğe işaret edilmektedir. Bu nedenle de sistem verimini arttırmaya yönelik yapılacak çalışmalar önem taşımaktadır. Elinizdeki çalışma bu çerçevede bir katkı sunmayı amaçlamaktadır.

Güneş damıtma sistemlerinin çalışma prensiplerini irdelemeye ve sistem verimini arttırmaya yönelik çalışmalar iki temel grupta incelenebilir: deneysel araştırmalar ve sayısal çalışmaları da içine alan teorik araştırmalar. Güncel literatürde yer alan bu çalışmalara geçmeden önce, Dunkle tarafından yürütülmüş 1961 tarihli çalışmaya (Dunkle, 1961) değinmek önemlidir. Çünkü söz konusu literatürde yer alan pek çok çalışma Dunkle'in çalışmasına referansla ilerlemektedir. Bu çalışmalarda elde edilen sonuçlar Dunkle tarafından önerilen model ile karşılaştırılmakta ve benzer yapıya sahip korelasyonlar önerilmektedir. Dunkle tarafından tek eğimli ve prizmatik çatı üzeri sistemleri için kütle damıtım miktarını hesaplamak üzere önerilen buharlaşmaya bağlı kütle transferi katsayısı aşağıda sunulan genel yapıya sahiptir:

$$h_{kt} = C(\Delta T')^n$$
$$\Delta T' = f(T_{dy}, T_s, P_{vdy}, P_{vs}) \quad (1)$$

ilk eşitlikte C ve n sabit katsayıları, ikinci eşitlikteyse sıcaklıklar sırasıyla sistem dış yüzey ve su sıcaklıklarını temsil etmektedir. İkinci eşitlikteki basınç değerleri ise sırasıyla dış yüzey ve su sıcaklıklarındaki kısmi su buharı basınçlarını göstermektedir.

Islam ve Fukuhara (2007) ise Dunkle'den farklı olarak silindirik bir güneş damıtma sistemi ile deneyler yürütmüş ve elde ettikleri sonuçları teorik bir yaklaşım

ile destekleyerek yeni bir ısı ve kütle transfer modeli önermiştir. Islam ve Fukuhara'nın yürütmüş olduğu bu çalışmada yer alan deneysel sonuçların sürekli rejim yaklaşımı kullanılarak çok kapsamlı bir şekilde sunulduğu ve elinizdeki çalışma da dâhil olmak üzere pek çok başka çalışmada referans olarak kullanıldığı vurgulanmalıdır. Aynı araştırma grubu benzer çalışmaları sürdürmüştür; Ahsan ve Fukuhara (2009) ve Ahsan vd. (2010) tarafından gerçekleştirilen çalışmaların ilkinde film tipi yoğunlaşma teorisi üzerinde durulurken ikincisinde daha kolay üretim, bakım ve daha ucuz maliyet hedeflenerek tasarlanmış bir damıtma sistemi deneysel olarak incelenmiştir. Bu çalışmalarda, grubun ilk çalışmalarından farklı olarak geçici rejim yaklaşımı uygulanmıştır.

Literatürde güneş damıtma sistemlerinin verimini etkileyen parametrelere yönelik, yalnızca deneysel yöntemler kullanılarak yapılmış çalışmalar da mevcuttur. Arunkumar vd. (2013) dış soğutmanın, Ahsan vd. (2014) ışınım yoğunluğu, dış hava sıcaklığı ve su derinliği parametrelerinin, Rahmani vd. (2015) sistem iç tasarımının değiştirilmesiyle oluşturulacak bir hava devridaiminin etkisini, Elango vd. (2015) ise farklı su yüksekliklerinin farklı tipteki damıtma sistemleri için etkisini deneysel olarak incelemiştir. El vd. tarafından (2015) yalnızca deneysel olarak yürütülmüş bir başka çalışmada fan yardımıyla dış yüzey üzerindeki hava hızı artırılmış ve bu dış soğutmanın kütle üretim miktarı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Temel güneş damıtma sistemleri ve varyasyonlarının performans karşılaştırmalarına yönelik bir çalışma Arunkumar vd. (2012) tarafından gerçekleştirilmiş ve yoğunlaştırıcı etkisi sağlayan piramit bir sistemle birleştirilmiş olan silindirik sistemin en yüksek kütle damıtım miktarını sağladığı gözlemlenmiştir.

Yukarıda sözü edildiği üzere, deneysel çalışmaların yanında güneş damıtma sistemlerini ağırlıklı olarak sayısal yöntemler kullanarak inceleyen çeşitli çalışmalar da literatürde yer almaktadır. Bu çalışmalar inceledikleri geometri ve de modelleme yaklaşımları temel alınarak gruplanabilir. İncelenen geometriler yarı-küresel (Panchal ve Shah, 2012), prizmatik (Panchal ve Shah, 2011; Setoodeh vd., 2011; Malaiyappan ve Elumalai, 2016) ve silindirik (Rahbar ve Esfahani, 2013; Rahbar vd., 2015) yapılara sahiptir. Modelleme yaklaşımlarıysa çok fazlı (Panchal ve Shah, 2011; Setoodeh vd., 2011; Malaiyappan ve Elumalai, 2016) ve tek fazlı (Rahbar ve Esfahani, 2013; Rahbar vd., 2015) olarak kategorize edilebilir. İncelenen örneklerde, çok fazlı yaklaşımlarda genellikle iki farklı akışkanın arayüzünü takip etmek için önerilen VOF (volume of fluid) yönteminin kullanıldığı görülmüştür. Güneş damıtma sistemlerinde gerçekleşen düşük sıcaklıkta buharlaşma ve bunun yanı sıra hareketli ve takip edilecek bir arayüz olmaması, VOF yönteminin bu sistemler için uygunluğunu tartışılır kılmaktadır. Rahbar ve Esfahani (2013) ve Rahbar vd. (2015) tarafından, sırasıyla prizmatik ve silindirik geometriler için yürütülmüş çalışmalarda akışkan olarak nemli hava kullanılmış ve kütle damıtım miktarı su yüzeyinde gerçekleşen taşınım ile temsil edilmiştir. Silindirik bir

güneş damıtma sisteminin incelendiği çalışmada Rahbar vd. (2015), Islam ve Fukuhara (2007) tarafından yürütülmüş çalışmadaki geometriye uygun bir geometri kullanmış, sayısal sonuçları deneysel olarak elde edilen veriler ile karşılaştırmış ve sonrasında aynı geometri için Dunkle (1961) tarafından önerilen eşitliği (1) temel alarak, benzer yapıda bir korelasyon önerisi sunmuştur.

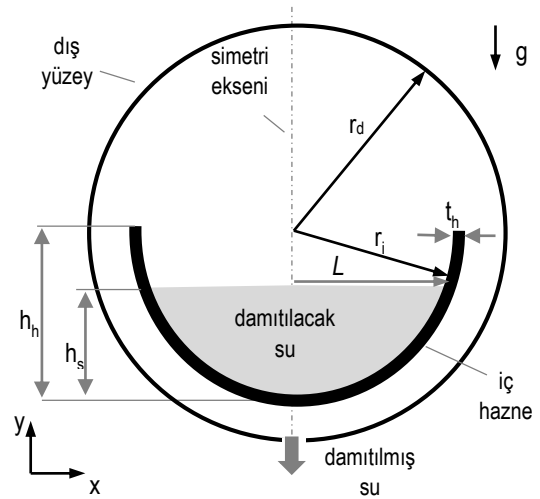
Bu çalışmada, temel sistemlerden biri olan silindirik bir güneş damıtma sistemi, genel olarak çalışma prensiplerinin daha iyi anlaşılması ve özellikle de damıtım miktarı ile ilişkili olan akış örgüsünün incelenmesi amacıyla sayısal olarak incelenmiştir. Literatürde değinilen son grup içinde yer alan örneklerle uyumlu olarak, oluşturulan modelde akışkan olarak nemli hava kullanılmış ve kütle damıtım miktarı bir sınır koşulu olarak tanımlanan su yüzeyindeki taşınım ile temsil edilmiştir. Sayısal ağ çalışması ve farklı sınır koşulları için gerçekleştirilecek model doğrulamasının ardından temel geometri değiştirilerek bunun elde edilen akış örgüsü ve sonuçlar üzerindeki etkisi tartışılacaktır. Yazarın bilgisi dâhilinde, iç hazne duvarı yüksekliğinin problem fiziği üzerindeki etkisi literatürde daha önce incelenmemiş bir parametredir. Literatürde, farklı sıcaklık sınır koşulları ve buna bağlı olarak nem miktarının ve su buharı kısmi basıncının sonuçlar üzerindeki etkisi incelenmiş ve bu parametreleri temel alan korelasyon önerileri getirilmiştir. Ancak elde edilen damıtım miktarının akış örgüsü ile doğrudan ilişkili olup olmadığının ve bu akış örgüsünün, etrafında çevrelendiği iç hazne duvarı ile olan ilişkisinin tartışılmamış olması literatürde yer alan bir eksiklik. Bu eksikliği gidermek amacıyla bu çalışmada, iç hazne duvarı yüksekliğinin elde edilen sonuçlar üzerindeki etkisi nicel ve nitel olarak incelenecektir.

PROBLEM TANIMI

Bu çalışmada silindirik yapıya sahip bir güneş damıtma sistemi incelenmektedir. Pratik uygulamalar için sistem bileşenleri şeffaf bir dış yüzey, damıtılacak suyun yer aldığı soğurma özelliği yüksek siyah bir iç hazne ve damıtılmış suyun tahliye ve toplanması için kullanılan çıkış kesitinden oluşmaktadır. Saha uygulamalarında güneş ışını, laboratuvar uygulamalarında ise ışınım prensibine dayanan farklı ısıtıcılar kullanılarak haznede yer alan suyun sıcaklığının artması, bunu takiben buharlaşması ve doğal taşınım yardımıyla yükselerek dış yüzeyin iç duvarlarında yoğunlaşması sistemin temel çalışma mekanizmasını oluşturmaktadır. Bu noktada, mevcut çalışmanın kapsamı dışında kalsa da, şeffaf yüzey üzerinde oluşacak kirlenme, kireçlenme ve tuzlanma gibi faktörlerin pratik uygulamalarda çalışma verimini düşüreceği not edilmelidir. İncelenen geometri kesiti ve ilgili boyutlar Şekil 1’de gösterilmiştir. İncelenecek temel geometrinin ölçüleri Tablo 1’de verilmiştir.

FİZİKSEL VE MATEMATİKSEL MODEL

Çalışmada iki boyutlu ve sürekli rejimde laminer bir akış modellenmiştir. Pratik uygulamalarında, gün boyu değişkenlik gösteren güneş ışınımı yoğunluğuna bağlı olarak, doğası gereği geçici rejimde çalışan sistem sürekli



Şekil 1. Problem şematifi

Tablo 1. Temel geometri ölçüleri (Islam ve Fukuhara, 2007)

Ölçü	Değer
r_d	64.5 mm
r_i	49 mm
h_h	50 mm
h_s	12 mm
t_h	1 mm

rejim ve sabit sıcaklık sınır şartlarıyla çalışacak şekilde modellenmiştir. Bu tercih ile hem çeşitli parametrelere göre değişen akış fiziğini daha detaylı inceleyebilmek hem de literatürde mevcut olan sistematik bir biçimde sunulmuş laboratuvar sonuçları (Islam ve Fukuhara, 2007) ile karşılaştırma yapabilmek amaçlanmıştır. Sistemde akışkan olarak termofiziksel özellikleri çalışma sıcaklıklarına bağlı olarak değişiklik gösteren nemli hava kullanılmıştır. Matematiksel model kütle, momentum ve enerjinin korunumu denklemlerine ek olarak su yüzeyinde gerçekleşen buharlaşmayı temsil etmek amacıyla su buharı korunumu denklemini içermektedir. Sıkıştırılamaz bir akış için, doğal taşınımın Boussinesq yaklaşımı kullanılarak modellenmesi sonucunda elde edilen ilgili korunum denklemleri iki boyutlu ve kartezyen koordinat sistemi için aşağıda verilmiştir:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (2)$$

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

$$u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + \vec{g} \beta (T - \bar{T}) + \vec{g} \zeta (\omega_s - \bar{\omega}_s) \quad (4)$$

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{k}{\rho c_p} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (5)$$

$$u \frac{\partial \rho_s}{\partial x} + v \frac{\partial \rho_s}{\partial y} = D_{AB} \left(\frac{\partial^2 \rho_s}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \rho_s}{\partial y^2} \right) \quad (6)$$

Denklemler sırasıyla, kütle korunumu, x ve y yönündeki momentum korunumu, enerji ve su buharı korunumu olarak gösterilmiştir. Eşitlik (4) içerisinde yer

alan kaldırma kuvvetleri Boussinesq yaklaşımı çerçevesinde tanımlanmıştır. Bu kuvvetler içinde yer alan katsayılar sırasıyla ısıl genleşme katsayısı β , ve kütle genleşme katsayısı ζ , olarak aşağıdaki şekilde tanımlanmıştır:

$$\beta = -(1/\rho)(\partial\rho/\partial T) \quad (7)$$

$$\zeta = -(1/\rho)(\partial\rho/\partial\omega_s) \quad (8)$$

Simetri ekseninden faydalanarak bir yarısı modellenmiş ve Şekil 1’de gösterilen geometrinin sınır koşulları Tablo 2’de sunulduğu şekilde tanımlanmıştır.

İncelenecek değişken parametreler arasında yer alan dış yüzey ve su yüzeyindeki sıcaklık sınır koşulları, doğrulama aşamasında kullanılacak deneysel çalışma (Islam ve Fukuhara, 2007) ile uyumlu olacak biçimde seçilmiş ve Tablo 3’te sunulmuştur.

Tablo 2. Sınır koşulları

dış yüzey	$u = 0, \quad v = 0, \quad T = T_{dy},$ $\rho_s = \rho_s _{T=T_{dy}, \phi=100\%}$
su yüzeyi	$u = 0, \quad v = 0, \quad T = T_{sy},$ $\rho_s = \rho_s _{T=T_{sy}, \phi=100\%}$
iç hazne	$u = 0, \quad v = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial n} = 0, \quad \frac{\partial \rho_s}{\partial n} = 0$
simetri eksenini	$u = 0, \quad \frac{\partial u}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial v}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial x} = 0,$ $0, \quad \frac{\partial \rho_s}{\partial x} = 0$

Çalışma kapsamında incelenecek ana parametrelerden olan saatlik ortalama kütle damıtım miktarı ve ortalama ısı taşınım katsayısı hesaplamaları için sırasıyla aşağıda sunulan eşitlikler kullanılmıştır:

$$\dot{m}_s = -\frac{3600 \times D_{AB}}{L} \int_0^L \frac{\partial \rho_s}{\partial y} \Big|_s dx \quad (9)$$

$$h = -\frac{k}{(T_{sy} - T_{dy})L} \int_0^L \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_s dx$$

Burada saatlik olarak verilmiş olan kütle damıtım miktarı, akış örgüsü sonucu oluşan yoğunluk farkına bağlı olarak su yüzeyinde ortaya çıkacak taşınım eşit olarak kabul edilmiştir.

Gerçekleştirilen sayısal benzetimlerde nemli havanın termofiziksel özellikleri ortalama sıcaklık değerinde, $(T_{sy} + T_{dy})/2$, Tsilingiris (2008) tarafından sunulan değerler referans alınarak kullanılmıştır. Kütle difüzyon katsayısı olaraksa, yine ortalama sıcaklık değerinde ve atmosferik basınçta olmak üzere aşağıda sunulan deneysel sonuçlara dayalı eşitlik (Mills, 1999) kullanılmıştır:

$$D_{AB} = 1.97 \times 10^{-5} \left(\frac{P_0}{P}\right) \left(\frac{T}{T_0}\right)^{1.685} \quad (10)$$

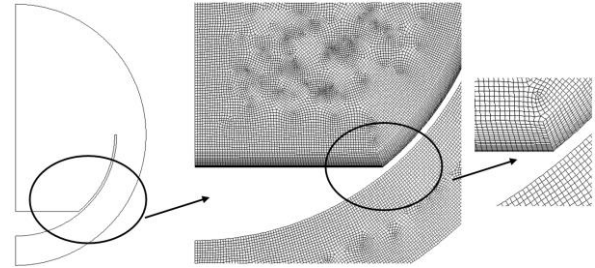
Eşitlik (10)’da sunulan denklemden yer alan referans basınç ve sıcaklık değerleri sırasıyla 1 atm ve 256 K değerlerindedir ve eşitlik 273 K – 373 K sıcaklık aralığı için önerilmektedir.

SAYISAL ÇÖZÜM DETAYLARI

Oluşturulan matematiksel modelin sayısal çözümü ticari bir hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) yazılımı olan ANSYS Fluent kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Çözümler laminar ve sıkıştırılmaz akış modeli kullanılarak elde edilmiş, tüm diferansiyel korunum denklemlerinin ayrıştırması 2. dereceden yöntem seçimi ile yapılmıştır. Basınç ve hız ilişkisi için SIMPLE algoritması kullanılmıştır. Yakınsama kriterleri kütle ve momentum korunumu denklemleri için 10^{-3} , enerji ve su buharı korunumu denklemleri için 10^{-6} olarak alınmıştır. Yakınsamış çözüme ulaşmak için gerekli iterasyon sayısı geometri ve sınır koşullarına göre değişiklik göstermekte, 300 ile 1000 arasında değişmektedir.

Sayısal çözüm, problem fiziğinde yer alan simetri eksenine dikkate alınarak, geometrinin yarısı için gerçekleştirilmiştir. Çözümlerin yapıldığı sayısal bölge ve detay ağ yapısı Şekil 2’de sunulmuştur. Burada görüldüğü üzere, sayısal ağ yapısı akışın kritik bölgeleri olarak nitelendirilebilecek su yüzeyi ve iç hazne üzerinde daha yoğun olacak biçimde oluşturulmuştur. Sayısal ağ yapısında dörtgen elemanlar kullanılmış, farklı yüzeylerden başlayan ağların kesişme noktalarındaki süreklilik nadiren üçgen elemanlar ile sağlanmıştır.



Şekil 2. Çalışmanın gerçekleştirildiği sayısal bölge ve detay sayısal ağ yapısı.

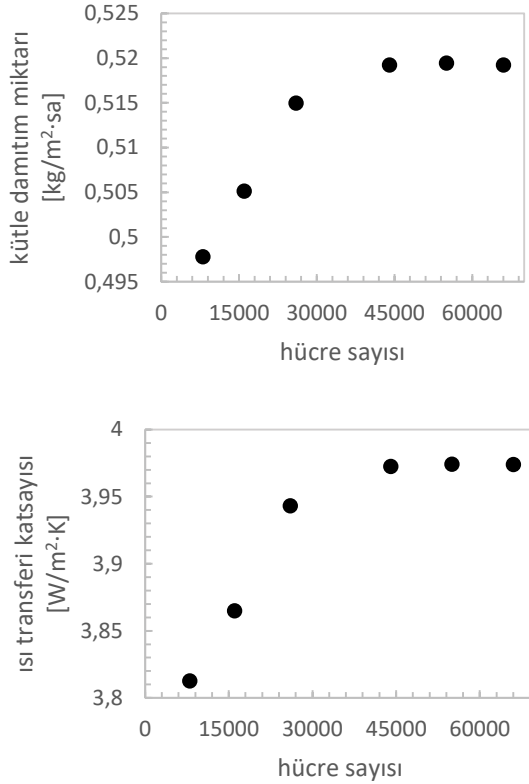
Sayısal ağ yapısının sonuçlar üzerindeki etkisini görmek ve kullanılacak ağ yapısının güvenilirliğini temin etmek amacıyla farklı hücre sayıları içeren ağlar kullanılarak bir inceleme yapılmıştır. Ağ bağımlılığı çalışmasının sonuçları Şekil 3’te görülebilir. İncelenen farklı ağ yapıları için hücre sayısı 8000 ile 70000 arasında farklı değerlerden seçilmiş, sonuçlar kütle damıtım miktarı ve ısı taşınım katsayısı değerlerine bakarak yorumlanmıştır. İncelenen her iki sonuçta da, özellikle düşük hücre sayısına sahip benzetimlerde, artan hücre sayısı ile elde edilen değerlerin önemli bir miktarda artış gösterdiği, bununla birlikte, hücre sayısının artmaya devam etmesiyle söz konusu artışın azaldığı gözlemlenmiştir. Bu değerlendirmenin ışığında çalışma için yaklaşık 44000 hücre sayısına sahip bir ağ yapısı seçilmiştir.

Tablo 3. Farklı durumlar için sıcaklık sınır koşulları

durum#	1	2	3	4	5	6	7	8	9
T_{sy} [°C]	66.1	61	55	59.6	56.7	48.4	52.1	45.1	42.1
T_{dy} [°C]	55.7	49.1	39.2	50.1	48.1	33.8	44.9	36.5	31.7

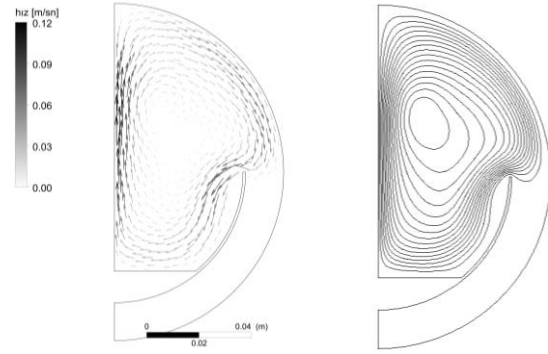
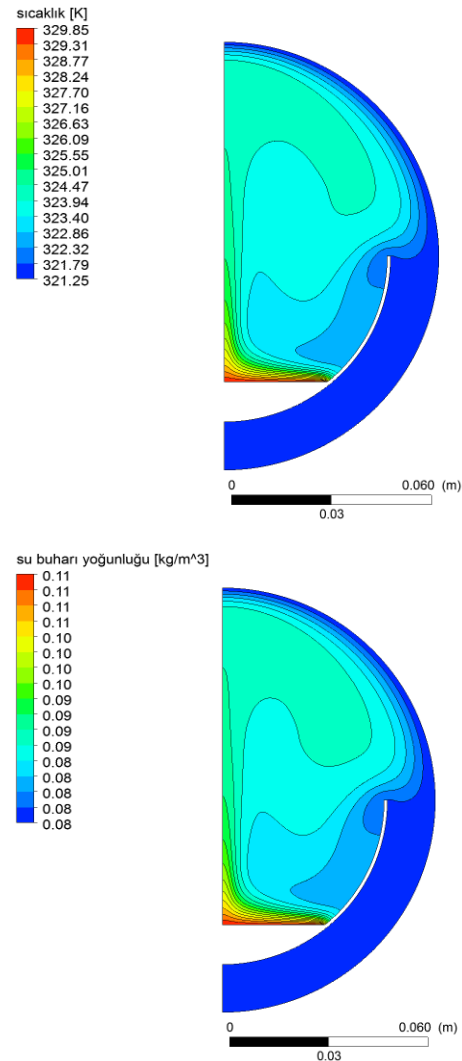
ÇÖZÜMLER, BULGULAR VE TARTIŞMALAR

Sistemden elde edilen kütle damıtım miktarının sistem içerisinde oluşan akış örgüsüne bağlı olarak değişiklik göstereceği açıktır. Bu sebeple, sayısal benzetim sonucunda silindirik su damıtma sistemi içerisinde oluşan akış örgüsünü incelemek ve daha iyi anlamak üzere çeşitli grafikler sunulmuştur. Dikkat edilmesi gereken bir not olarak şunu belirtmek gerekir: Farklı sıcaklık sınır koşulları için farklı nicel sonuçlar elde edilmekle birlikte ana akış örgüsü benzer nitelikler gösterdiği için takip eden 2 şekilde de (Şekil 4) temsili olarak durum# 5 sonuçları ele alınmıştır.

**Şekil 3.** Ağ bağımlılığı çalışması, durum# 5.

Şekil 4'te hız vektörü ve akış çizgileri için oluşturulmuş grafikler gösterilmiştir. Her iki grafikten de görülebileceği üzere yarısı modellenmiş olan sistem içerisinde ana akış örgüsü saat yönünde dönmekte olan bir vorteks etrafında biçimlenmektedir. Sıcaklık farkına bağlı olarak oluşan yoğunluk farkı sebebiyle simetri eksenine yakın bölgede, simetri eksenine paralel olarak yukarı yönde oluşan akış önce dış yüzey duvarını daha sonra iç hazne duvarını takip ederek aşağı yönde akmaktadır. En yüksek akış hızları simetri eksenini yakınında elde edilmekte, bunu iç hazneye giriş ve dış yüzeye yakın bölgelerde elde edilen hızlar takip etmektedir. Akışın iç hazne bölgesine girmesi ve bu bölgede, su yüzeyi üzerinde göstereceği davranış

yüzeyde oluşacak kütle ve ısı transferini doğrudan olarak etkileyeceği için ayrıca incelenmelidir. Bu sebeple oluşturulmuş iki farklı geometri ve ilgili sonuçlar ilerleyen kısımlarda karşılaştırılmalı olarak ele alınacaktır.

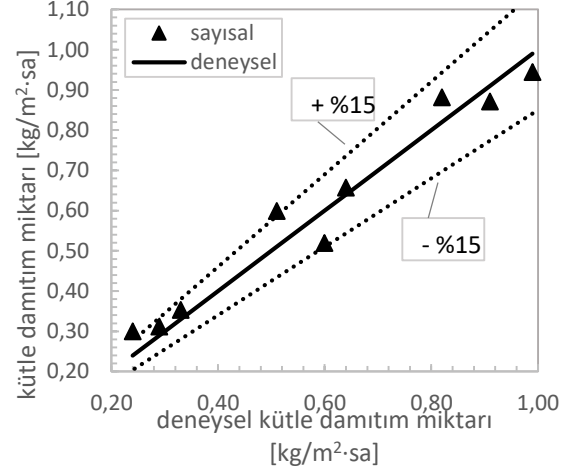
**Şekil 4.** Hız vektörü ve akış çizgileri grafikleri, durum# 5**Şekil 5.** Sıcaklık ve su buharı yoğunluğu kontur grafikleri, durum# 5.

Sistem içerisindeki sıcaklık ve su buharı yoğunluğu için elde edilmiş olan kontur grafikleri Şekil 5'te gösterilmiştir. Farklı sayısal değerlere ve difüzyon katsayılarına sahip olmaları dışında aynı matematiksel yapı ve sınır koşullarına sahip denklemler tarafından temsil edilebilen bu iki değişkenin dağılımı beklenildiği üzere yakın sonuçlar göstermektedir. Şekil 4'te tartışılan akış örgüsünün etkisi hem sıcaklık hem de su buharı yoğunluğu konturları üzerinde görülmektedir. Yüksek sıcaklığa sahip su yüzeyinde oluşan ısı transferi akışın etkisiyle sistemin simetri eksenine doğru taşınmakta, yükselmekte ve dış yüzey duvarı yakınında var olan akış ile uyumlu bir biçimde sistem içerisine dağılmaktadır. Benzer davranış biçimi su buharı yoğunluğu için de geçerlidir.

Farklı sıcaklık sınır koşullarına bağlı olarak elde edilen saatlik kütle damıtım miktarı sonuçları İslam ve Fukuhara (2007) tarafından aynı koşullar altında elde edilmiş deneysel sonuçlar ile birlikte Şekil 6'da sunulmuştur. Görüldüğü üzere sayısal sonuçlar deneysel sonuçlar ile benzer bir eğilim göstermekte ve büyük oranda, deneysel sonuçlar temel alınarak oluşturulmuş %15 bandı içerisinde yer almaktadır. Gerçek problemin modelleme açısından sahip olduğu karmaşık fizik, buna bağlı olarak modelleme aşamasında kullanılan yaklaşım ve basitleştirmeler ile birlikte deneysel ölçümlerdeki belirsizlikler dikkate alındığında, model sonuçları ile deney sonuçlarının uyum içinde oldukları şeklinde bir değerlendirme uygun görülmektedir.

Farklı sıcaklık sınır koşulları için hesaplanan kütle damıtım miktarı ve ısı taşınım katsayısı sonuçları Tablo 4'te sunulmuştur. Eşitlik (9)'da gösterildiği üzere hesaplamalarda, her iki değer için de, su yüzeyindeki normal gradyan ve ilgili diğer parametreler kullanılmıştır. Sunulan sonuçlarda, durum#1 ile durum#2 ve durum#7 ile durum#8 arasındaki iki geçiş dışında damıtım miktarı ile ısı taşınım katsayısının benzer değişim eğilimleri gösterdiği, yani kendinden önceki değer ile karşılaştırıldığında biri artarken diğerinin de arttığı, azaldığında ise azaldığı görülmüştür. Burada ısı taşınım

katsayıları yalnızca bilgi amaçlı verilmiş olup bir karşılaştırma yapılmamıştır. Bunun nedeni, doğrulama amacıyla kullanılan deneysel sonuçlarda (İslam ve Fukuhara, 2007) ısı taşınım katsayısının ölçülmüş bir parametre değil, doğrudan damıtım miktarına bağlı olarak hesaplanmış bir parametre olmasıdır.

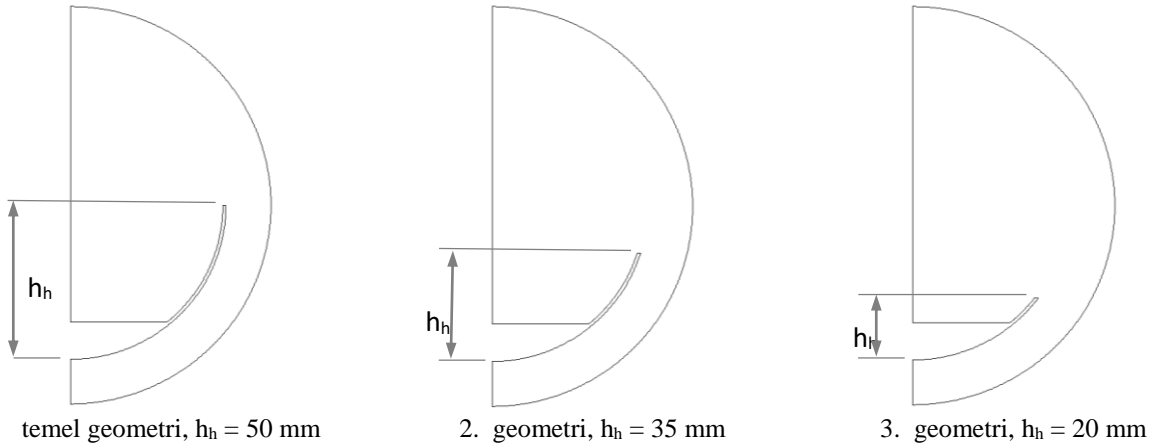


Şekil 6. Farklı sıcaklık sınır koşulları (durum# 1-9) için sayısal ve deneysel (İslam ve Fukuhara, 2007) kütle damıtım miktarı sonuçları.

Bu noktada, geometrinin elde edilen kütle damıtım miktarı üzerindeki etkisini incelemek üzere iç hazne duvarı yüksekliği değiştirilerek temel geometrinin 2 farklı varyasyonu oluşturulmuştur. İç hazne duvarı yüksekliğinin azaltılması ile birlikte, sıcaklık ve su buharı yoğunluğu farkı nedeniyle oluşan akış örgüsünün özellikle su yüzeyi ile olan ilişkisinde farklılıklar gözlemlenmesi beklenmektedir. Temel geometri ile birlikte, 2. ve 3. geometriler olarak adlandırılan iki yeni sayısal alan Şekil 7'de görülebilir. Temel geometride 50 mm olan iç hazne yüksekliği 2. geometride 35 mm, 3. geometride ise 20 mm olarak belirlenmiştir. Not olarak, yeni geometrilerin sayısal ağ yapısının karşılaştırma yapılacak temel geometri ile aynı şekilde oluşturulduğu belirtilmelidir.

Tablo 4. Kütle damıtım miktarı [$\text{kg/m}^2\cdot\text{sa}$] ve ısı taşınım katsayısı [$\text{W/m}^2\cdot\text{K}$]

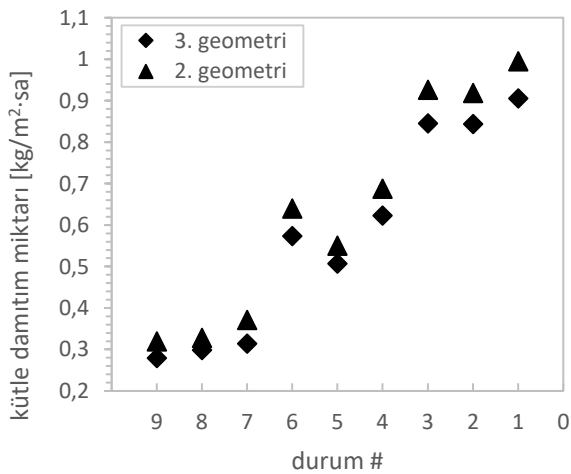
durum#	1	2	3	4	5	6	7	8	9
\dot{m}_s	0.95	0.87	0.88	0.66	0.52	0.60	0.35	0.31	0.30
h	4.30	4.34	4.56	4.14	3.97	4.31	3.83	3.90	3.68



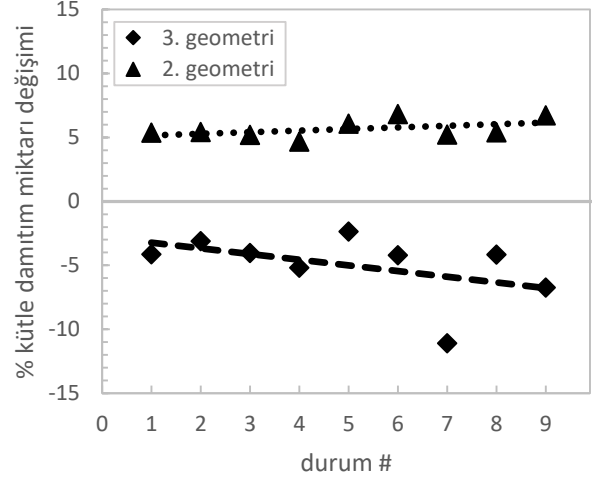
Şekil 7. İç hazne duvarı yüksekliği değiştirilerek oluşturulmuş farklı geometriler.

Oluşturulmuş model iç hazne yüksekliği dışında tüm değişkenler aynı tutularak incelenen tüm farklı sıcaklık sınır koşulları için çalıştırılmış ve 2. ve 3. geometriler için sonuçlar alınmıştır. Şekil 8'de her iki geometri için elde edilen kütle damıtım miktarı sonuçları sunulmuştur. Bilindiği üzere, her bir durum# Tablo 3'te sunulan farklı sıcaklık sınır koşullarını temsil etmektedir. Elde edilen sonuçların değişiminin Şekil 6'da sunulan temel geometri sonuçları ile benzerlik gösterdiği görülmektedir. Diğer yandan, 2. geometri kullanıldığında elde edilen kütle damıtım miktarının 3. geometri kullanıldığında elde edilene göre, değişen miktarlarda ama daima daha fazla olduğu gözlemlenmiştir.

Yeni geometriler ile elde edilen sonuçları nicel olarak değerlendirebilmek amacıyla temel geometri referans alınarak kütle damıtım miktarı değişimi hesaplanmış ve elde edilen sonuçlar Şekil 9'da doğrusal eğilim çizgileri ile birlikte sunulmuştur. Görüldüğü üzere 2. geometri kullanılarak elde edilen sonuçlar tüm farklı sıcaklık sınır koşulları için yaklaşık %5 oranında artış vermekte; buna rağmen 3. geometri kullanılarak elde edilen sonuçlarda %5 ile %10 arasında değişen bir azalma gözlemlenmektedir. Şekil 6'da sunulan deneysel çalışma ile model sonuçları arasındaki farkların $\pm\%15$ bandında kaldığı dikkate alındığında burada elde edilen artış ve azalma miktarları düşük gözükmeyle birlikte, bu miktarların tüm farklı sınır koşulları için -artış ya da azalma yönünde- sistematik bir biçimde değişmekte olduğu gözden kaçırılmamalıdır. Bu sonuçlar, verili koşullarda incelenen temel geometri için iç hazne duvarı yüksekliğinin azaltılmasının önce daha verimli bir damıtıma, daha sonra ise daha verimsiz bir damıtıma yol açabileceğini göstermektedir. Bu noktada, hazne duvarı yüksekliği ile monoton olmayan bir şekilde değişiklik gösteren damıtım miktarının nedenlerini anlamak için akış örgülerini incelemek yararlı olacaktır.



Şekil 8. Farklı iç hazne yüksekliklerine sahip iki yeni geometri için kütle damıtım miktarı sonuçları.



Şekil 9. Temel geometri referans alınarak hesaplanmış, farklı geometriler için elde edilen kütle damıtım miktarı değişimi sonuçları.

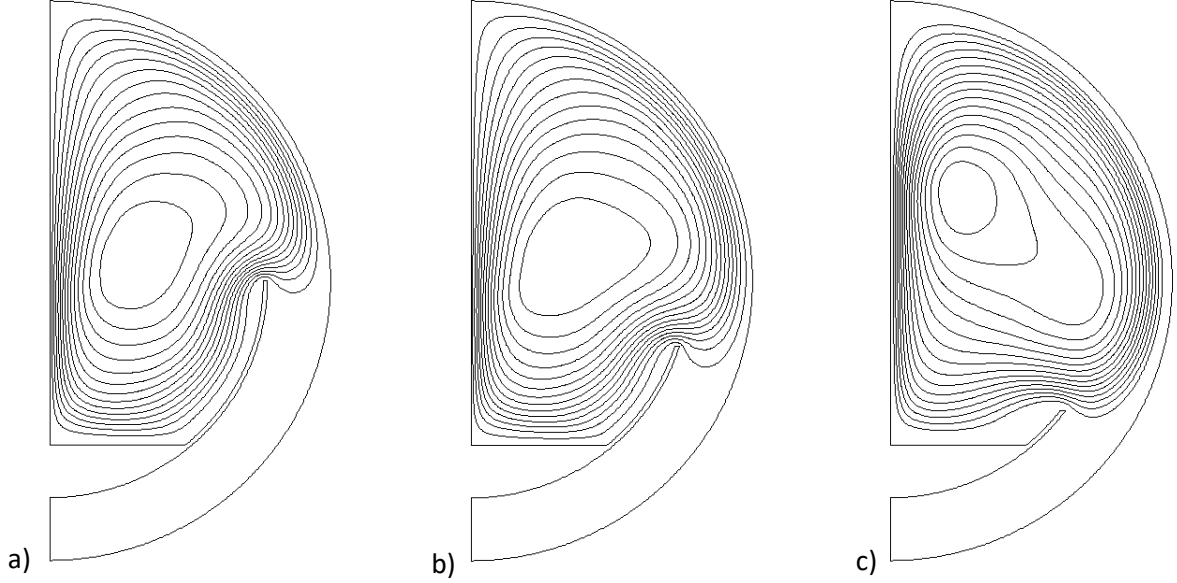
Temel geometri ve iç hazne duvarı yüksekliği değiştirilmiş iki ayrı geometri için elde edilmiş akış çizgileri Şekil 10'da sunulmuştur. Burada aktarılan sonuçlarda sıcaklık sınır koşulları için durum# 1 kullanılmış ve gösterilen akış çizgilerinin 3 farklı geometri için karşılaştırılabilir olmasını sağlamak amacıyla aynı sayıda akış çizgisi aynı değer aralıkları arasında verilmiştir. Şekil 10'da görülebileceği üzere ana akış örgüsü 3 farklı geometri için de saat yönünde dönmekte olan bir vorteks etrafında biçimlenmiştir. İncelenen 3 farklı geometri için kütle damıtım miktarlarında gözlemlenen farklılık, sunulan akış çizgilerinin su yüzeyine yakın bölgede göstermiş oldukları davranış dikkate alındığında fark edilecektir. İç hazne duvarı ucunda bükülen akış çizgileri su yüzeyi üzerinden simetri eksenine doğru bir hareket içindedir. Bu noktada en dışta yer alan akış çizgisinin su yüzeyine yakınlığı o bölgedeki taşınımın büyüklüğü ile doğrudan bir ilişki içerisinde. İç hazne duvarı uç noktasında bükülen akış çizgileri farklı duvar yüksekliklerinin bir sonucu olarak, duvar ve su yüzeyini en yakın olarak 2. geometri için geçmekte, bunu temel geometri ve 3. geometri takip etmektedir; yakınlık taşınım verimini belirlediği için bu sıralama kütle damıtım miktarları büyüklükleri için de aynı şekildedir. İncelenen geometriler arasında en az kütle damıtım miktarı elde edilen 3. geometride, iç hazne duvarı ucunda bükülen akış çizgileri simetri eksenine yönünde hareketlerine devam etmekte; ancak kısa duvar yüksekliğine bağlı olarak diğer iki geometrinin aksine bu hareket sırasında su yüzeyine yeterince yaklaşamamaktadır.

Akış çizgileri üzerinden yorumlanan ve kütle damıtım miktarlarındaki değişimi açıklamaya yönelik davranış biçimi Şekil 11'de sunulan hız vektörlerinde de aynı şekilde vuku bulmaktadır. Su yüzeyine yakın bölgedeki hız vektörleri incelendiğinde 2. geometri için en yüksek, 3. geometri içinse en düşük hızların elde edildiği görülmektedir. Son olarak, Şekil 12'de verilen su buharı yoğunluğu kontur grafikleri de kütle damıtım miktarlarındaki geometriye bağlı değişim için

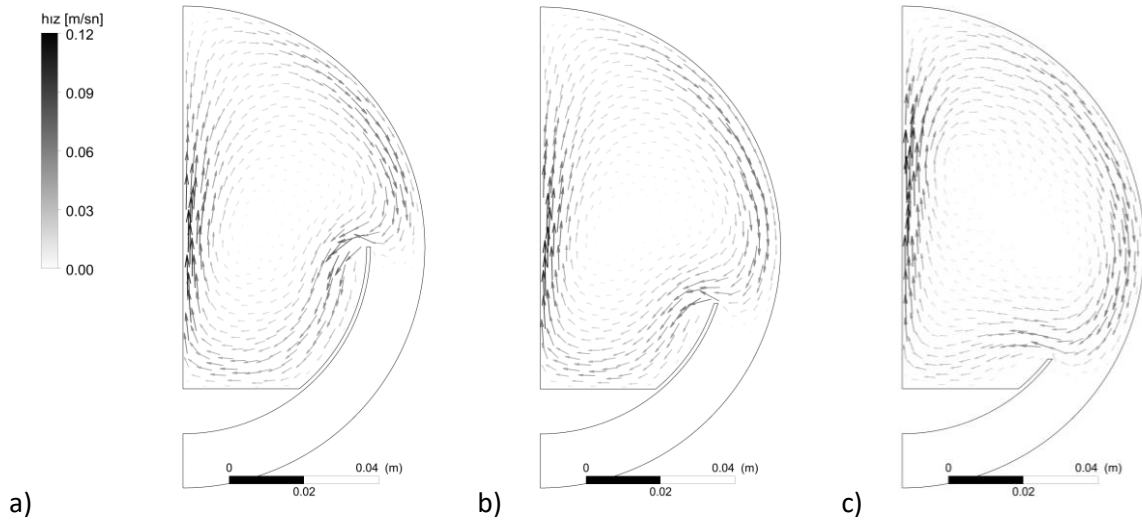
incelenebilir. Akış örgüsüne bağlı olarak su buharı yoğunluğundaki değişimin büyüklüğünün 3. geometri için en az, 2. geometri içinse en yüksek olduğu görülmektedir.

Diğer tüm parametreler sabit tutulup, iç duvar hazne yüksekliğinin değiştirilmesi ile elde edilmiş olan bu sonuçlar kütle damıtım miktarının bu parametre ile değişen akış örgüsüne bağlı olarak değişiklik gösterdiğini ortaya koymaktadır. Bu sebeple, su damıtım miktarını hesaplamaya yönelik korelasyon ve/veya eşitliklerde bu değer bir parametre olarak dikkate alınmalıdır. Literatürde yer alan, tek eğimli ve prizmatik sistemler

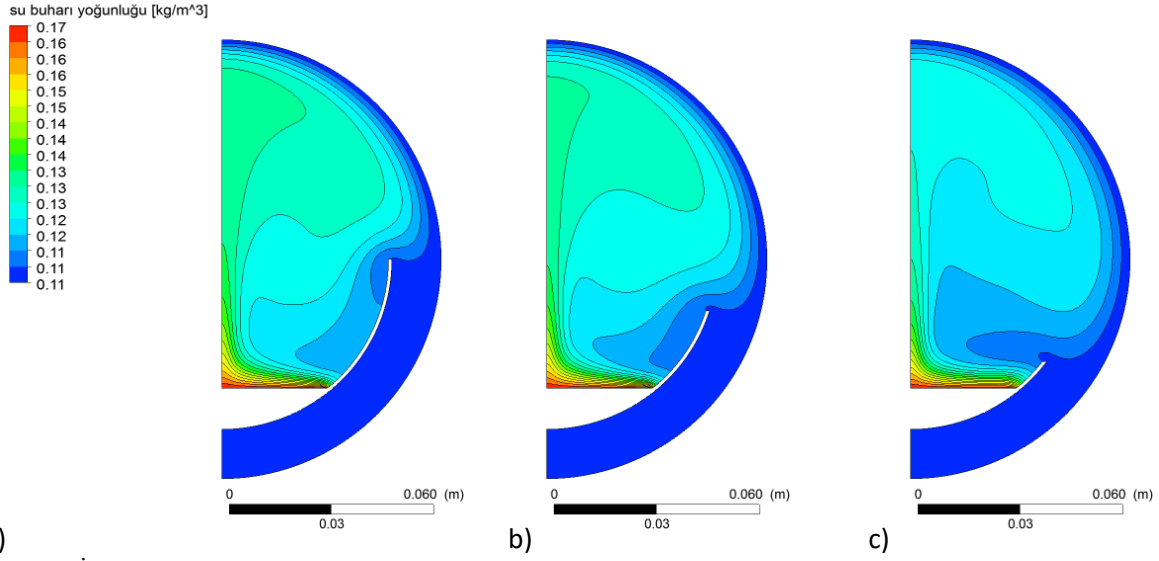
için oluşturulmuş ve bu konuda en yaygın kabul gören ve kullanılan denklemlerden biri olarak kabul edilen Dunkle (1961) tarafından üretilmiş denklem ya da aynı denklem yapısını koruyarak silindirik sistemler için oluşturulan eşitliklerin (Islam ve Fukuhara, 2007; Rahbar vd., 2015) hassasiyetleri, geometriyle ilişkili olan bu parametrenin yokluğunda sınırlı kalacaktır. Sunulan çalışmada iç hazne duvarı yüksekliği üzerinden yürütülmüş olan bu tartışmanın elbette ki su yüksekliği üzerinden de yürütülebileceği açıktır. Geçici rejimde çalışan pratik uygulamalarda su yüksekliği, sistemin bu kısmında ulaşılabilecek sıcaklık değerlerini etkilemektedir.



Şekil 10. İncelenen 3 farklı geometri için elde edilen akış çizgileri, durum# 1, a) temel geometri, b) 2. geometri, c) 3. geometri.



Şekil 11. İncelenen 3 farklı geometri için elde edilen hız vektörleri, durum# 1, a) temel geometri, b) 2. geometri, c) 3. geometri.



Şekil 12. İncelenen 3 farklı geometri için elde edilen su buharı yoğunluğu kontur grafikleri, durum# 1, a) temel geometri, b) 2. geometri, c) 3. geometri.

Artan yükseklik ile birlikte artan su hacmi daha geç ısınmakta, bu da Ahsan vd. (2014) tarafından gösterildiği üzere kütle damıtım miktarını olumsuz yönde etkilemektedir. Bu sebeple mevcut çalışmada, sistem dinamiklerini farklı şekillerde etkileyebilecek olan su yüksekliği sabit tutulmuş, iç hazne duvarı yüksekliği değiştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar ışığında, akış örgüsünün biçimlenmesi ve dolayısıyla su yüzeyi üzerinde elde edilecek taşınımın verimi dikkate alındığında, iç hazne duvarının uç noktası ile su yüzeyi arasındaki mesafe önemli bir parametre olarak değerlendirilmelidir. Ancak bu noktada aşılması gereken zorluk damıtım miktarı ile söz konusu parametre arasındaki ilişkinin monoton olmayan değişimidir. Bu bağlamda, çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar iç hazne duvar yüksekliği seçiminin akış örgüsü incelenerek yapılması gerektiği yönünde yorumlanmıştır.

SONUÇ

Silindirik bir güneş damıtım sisteminin sayısal benzetimi gerçekleştirilmiştir. Oluşturulan sayısal model literatürde bulunan deneysel verilerle karşılaştırarak doğrulanmış, model yardımı ile kütle damıtım miktarının tüm farklı sınır koşulları için %15 aralığında kalacak biçimde belirlenebildiği görülmüştür. Benzetim sonuçları, sistem içerisinde sıcaklık ve su buharı yoğunluk farklılıklarına bağlı olarak simetri eksenini yakınında yükselen ve dış duvarı takip ederek su yüzeyi üzerinden döngüsünü tamamlayan bir akış vorteksi olduğunu göstermiştir. Akış örgüsü ve kütle damıtım miktarı arasındaki ilişkiyi anlamak üzere iç hazne duvarı yüksekliği azaltılarak iki yeni geometri elde edilmiş ve benzetimleri yapılmıştır. Temel geometriye göre, ilk olarak 15 mm kısaltılan duvar yüksekliğine sahip 2. geometri tüm farklı sınır koşulları için kütle damıtım miktarında %5 civarında artış vermiş, 30 mm kısaltılan duvar yüksekliğine sahip olan 3. geometri ise kütle

damıtım miktarlarında %5 ile %10 arasında değişen miktarlarda düşüş göstermiştir. Monoton olmayan bu değişim literatürde daha önce incelenmemiş olan iç hazne duvarı yüksekliğinin problem fiziği üzerindeki etkisini göstermektedir.

KAYNAKLAR

Ahsan A. ve Fukuhara T., 2009, Condensation Mass Transfer in Unsaturated Humid Air Inside Tubular Solar Still, *Annual J. Hydraul. Eng.*, 53, 97-102.

Ahsan A., Imteaz M., Thomas U.A., Azmi M., Rahman A. ve Daud N.N., 2014, Parameters Affecting the Performance of a Low Cost Solar Still, *Applied Energy*, 114, 924-930.

Ahsan A., Islam K.M., Fukuhara T. ve Ghazali A.H., 2010, Experimental Study an Evaporation, Condensation and Production of a New Tubular Solar Still, *Desalination*, 260, 172-179.

Al-Gobaisi D., 2010, Desalination and Water Resources; History, Development and Management of Water Resources, *Overview of the desalination and water resources*, EOLSS, Paris, France.

Arunkumar T., Vinothkumar K., Ahsan A., Jayaprakash R. ve Kumar S., 2012, Experimental Study on Various Solar Still Designs, *ISRN Renewable Energy*, 2012.

Arunkumar T., Jayaprakash R., Ahsan A., Denkenberger D. ve Okundamiya M.S., 2013, Effect of Water and Air Flow on Concentric Tubular Solar Water Desalting System, *Applied Energy*, 103, 109-115.

Dunkle R.V., 1961, Solar Water Distillation: The Roof Type Still and a Multiple Effect Diffusion Still, *Int. Dev. in Heat Transfer*, 895-902.

El E., Arguhan Z., Çakmak G., Yücel H.L. ve Yıldız C., 2015, Effect of the Air Flow Rate of Blower on the Performance of the Solar Still, *Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi*, 35, 145-152.

Elango T. ve Murugavel K.K., 2015, The Effect of the Water Depth on the Productivity for Single and Double Basin Double Slope Glass Solar Stills, *Desalination*, 359, 82-91.

Islam K. M. S. ve Fukuhara T., 2007, Production Analysis of a Tubular Solar Still, *Doboku Gakkai Ronbunshuu B*, 63(2), 108-119.

Malaiyappan P. ve Elumalai N., 2016, Numerical Investigations: Basin Materials of a Single-Basin and Single-Slope Solar Still, *Desalination and Water Treatment*, 57, 21211-21233.

Mills A.F., 1999, *Basic Heat and Mass Transfer* (2nd Ed.), Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ.

Panchal N.H. ve Shah P.K., 2011, Modeling and Verification of Single Slope Solar Still Using ANSYS CFX, *Int. J. Energy and Environment*, 2, 985-998.

Panchal N.H. ve Shah P.K., 2013, Modeling and Verification of Hemispherical Solar Still Using ANSYS CFD, *Int. J. Energy and Environment*, 4, 427-440.

Rahbar N. ve Esfahani J.A., 2013, Productivity Estimation of a Single-Slope Solar Still: Theoretical and Numerical Analysis, *Energy*, 49, 289-297.

Rahbar N., Esfahani J.A. ve Fotouhi-Bafghi E., 2015, Estimation of Convective Heat Transfer Coefficient and Water-Productivity in a Tubular Solar Still-CFD Simulation and Theoretical Analysis, *Solar Energy*, 113, 313-323.

Rahmani A., Boutriaa A. ve Hedef A., 2015, An Experimental Approach To Improve the Basin Type Solar Still Using an Integrated Natural Circulation Loop, *Energy Conversion and Management*, 93, 298-308.

Setoodeh N., Rahimi R. ve Ameri A., 2011, Modeling and Determination of Heat Transfer Coefficient in a Basin Solar Still Using CFD, *Desalination*, 268, 103-110.

Tsilingiris P.T., 2008, Thermophysical and Transport Properties of Humid Air at Temperature Range Between 0 and 100°C, *Energy Conversion and Management*, 49, 1098-1110.

UN Water

www.un.org/waterforlifedecade/scarcity.shtml, son erişim Mayıs 2017.



Özgür EKİCİ

Lisans ve Yüksek Lisans eğitimini Orta Doğu Teknik Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümü'nde tamamladı. Doktora derecesini University of Texas at Austin, Makina Mühendisliği Bölümü'nden 2007 yılında aldıktan sonra yine aynı üniversitede bir sene boyunca doktora sonrası araştırmacı olarak bulundu. 2008-2011 yılları arasında makina mühendisi olarak özel sektörde çalışmasının ardından Hacettepe Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümü'nde göreve başladı ve halen aynı üniversitede öğretim üyesi olarak görevine devam etmektedir. Uzmanlık alanları ısı-akışkan sistemler, bu sistemlerin sayısal modellenmesi ve hesaplamalı akışkanlar dinamiği uygulamaları olarak sıralanabilir.