



---

**Makale / Research Paper**

---

## **Odun İçerisindeki Sıcaklık Dağılımına Etki Eden Parametrelerin Farklı Sonlu Elemanlar Yazılımları İle İncelenmesi**

**Ahmet Serhan CANBOLAT<sup>\*1</sup>, Burak TÜRKAN<sup>1</sup>, Ömer KAYNAKLI<sup>1</sup>, Akın Burak ETEMOĞLU<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Görükle, 16059 Bursa/TÜRKİYE  
[ascanbolat@uludag.edu.tr](mailto:ascanbolat@uludag.edu.tr), [burakt@uludag.edu.tr](mailto:burakt@uludag.edu.tr), [kaynakli@uludag.edu.tr](mailto:kaynakli@uludag.edu.tr), [aetem@uludag.edu.tr](mailto:aetem@uludag.edu.tr)

**Received/Geliş:** 07.11.2017

**Revised/Düzeltilme:** 06.12.2017

**Accepted/Kabul:** 12.12.2017

**Özet:** Bu çalışmada dikdörtgen kesitli odun malzemesinin zorlanmış taşınım ile ısıtılması işlemi incelenmiştir. Öncelikle akış alanı için korunum denklemleri (Navier Stokes) bir sonlu eleman programı yardımıyla çözülmüştür. Daha sonra yüzeydeki ortalama ısı taşınım katsayısı, türbülans modellerinden Standart k-ε türbülans modeli kullanılarak hesaplanmıştır. Isı transferi denklemi zamana bağlı, yüzey sınır şartları kullanılarak iki farklı sonlu eleman programı ile çözülmüştür. Malzeme içerisindeki sıcaklık değerleri 3 farklı hız ile (1 - 1,5 - 2 m/s) 200 saniye sonrası için elde edilmiştir. Aynı zamanda Ansys ve Comsol programlarında farklı hava sıcaklıkları (50°C -80°C -110°C -140°C) için de analizler yapılmıştır. Denklemler için matematiksel model, Fourier ısı iletim kanunu kullanılarak oluşturulmuştur. İki farklı program kullanılarak yapılan nümerik analizin sonuçları karşılaştırılmıştır. Ayrıca bu çalışmada elde edilen sonuç ile literatürde bulunan deneysel ve nümerik çalışmalardan elde edilen sonuçların karşılaştırılması yapılmış ve uyumlu olduğu görülmüştür.

**Anahtar kelimeler:** Sıcaklık Dağılımı, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği, Isı Transferi

---

## **Investigation of Parameters Affecting The Temperature Distribution in Wood with Different Finite Element Softwares**

**Abstract:** In this study, convective heating process of wood material with rectangular shape was examined. First of all, Navier Stokes equations were solved by using a finite element programme for the flow field. After that average heat transfer coefficient on surface was calculated by using Standart k-ε Turbulence Model. Heat transfer equation were solved with two different finite element programmes using boundary conditions at the surface dependent on time. Temperature distributions inside the solid were obtained for three different air velocity (1 - 1,5 - 2 m/s) for two hundred seconds. Furthermore, the analysis were made for different air temperatures (50°C -80°C -110°C -140°C) using Ansys and Comsol programmes. The mathematical model for equations was formed by using fourier heat conduction law. The results of the numerical analysis which obtain from the two different programs were compared. Moreover, the results obtained in this study were compared with the result obtained from a numerical and experimental studies in the literature and the results were found to be compatible.

**Keywords:** Temperature Distribution, Computational Fluid Dynamics, Heat Transfer

---

### **1. Giriş**

Ahşap günümüzde oldukça geniş bir kullanım alanına sahiptir. Ayrıca kolay işlenmesi, iyi ısı ve ses yalıtımı, düşük maliyeti ve yenilenebilir özellikte olması diğer ürünler arasında öne çıkmasını sağlamaktadır [1]. Bu özelliklerinden dolayı dış cephe kaplamada, ofis ve ev mobilyalarında, park

*Bu makaleye atıf yapmak için*

Canbolat, A.S., Türkan, B., Kaynaklı, Ö., Etemoğlu, A.B. "Odun İçerisindeki Sıcaklık Dağılımına Etki Eden Parametrelerin Farklı Sonlu Elemanlar Yazılımları İle İncelenmesi" El-Cezerî Fen ve Mühendislik Dergisi 2018, 5(1); 65-79.

*How to cite this article*

Canbolat, A.S., Türkan, B., Kaynaklı, Ö., Etemoğlu, A.B. "Investigation of Parameters Affecting The Temperature Distribution in Wood with Different Finite Element Softwares" El-Cezerî Journal of Science and Engineering, 2018, 5(1); 65-79.

ve bahçelerde ahşap yaygın olarak kullanılmaktadır. Ahşabın avantajlı olmasının yanında çürüme, nem tutma ve yapısında mekanik deformasyonlar oluşması gibi dezavantajlı kısımları da vardır. Bu durumları önlemek için ahşap modifikasyon yöntemleri kullanılmaktadır. Ahşap modifikasyon yöntemleri enzimatik, ısıl işlem, kimyasal ve fiziksel modifikasyon olarak gruplandırılabilir [2]. Burada kullanılan kimyasal yöntemler ile yapılan işlemler çevreye zararlı olmaktadır. Bu yüzden yüksek sıcaklıklarda ısıl işlem yapılması tavsiye edilmektedir [3]. Isıl işlem uygulamasının ahşap malzemesine kattığı avantajlar ise şu şekildedir;

- Çürümeye karşı artan dayanıklılık,
- Azalan nem miktarı,
- Homojen renk dağılımı,
- Azalan ısıl iletkenlik ,
- Çatlamaya karşı artan direnç olarak söylenebilir.

Isıl işlem yapılan ahşap malzemesi özellikle ülkemizde dış cephe kaplaması, dış cephe doğrama ve kapısı olarak kullanılmaktadır (Şekil 1). Özellikle akustik, ısı yalıtımı ve estetik görünümü açısından tercih edildiği söylenebilir [2].



Şekil 1. Isıl işlem gören ahşap malzemesinin farklı kullanım alanları [4]

Isıl işlem görmüş ahşap malzemesinde renk değişimi, çatlak oluşumu ve termo-plastik gibi mekanik özelliklerinde değişimlerde görülebilmektedir [5]. Isıl işlem yapılırken ürün içerisindeki sıcaklık değişimleri de göz önüne alınarak oluşabilecek olumsuz etkiler baştan en aza indirilmelidir. Malzemenin hangi sıcaklık değerlerinde mekanik deformasyona uğrayabileceği önceden tespit edilerek ısıl işlem için en uygun çalışma sıcaklıkları tespit edilmelidir. Optimum ısıl işlem sıcaklıklarının tespit edilmesi aynı zamanda enerji tasarrufu açısından da önemlidir. Isıtma ve soğutma işlemi için kullanılan enerjinin, malzemeyi istenen sıcaklığa getirecek miktarda verilmesi maliyet ve zaman açısından önemlidir. Bu çalışmada, deneysel olarak modellemenin pahalı ve zaman alıcı bir süreç olmasından dolayı ısıtma işlemi bilgisayar ortamında nümerik olarak analiz edilmiştir. Aynı zamanda yaygın olarak kullanılan sonlu eleman analizi programlarının karşılaştırılması yapılmıştır. Aynı zamanda sıcaklık dağılımının zamana göre nasıl değiştiği tespit edilmiştir. Bu sayede istenilen sıcaklığa ulaşması için malzemeye ne kadar süre enerji verilmesi

önceden bilinecektir. Böylece malzemeye gerekli sürenin üzerinde enerji vererek istenilen sıcaklığın üzerine çıkılmasının önüne geçilecek ve enerji israfı engellenmiş olacaktır. Çalışmanın güvenilirliği açısından, literatürde bulunan deneysel ve nümerik çalışmalardan elde edilen sonuçların karşılaştırılması yapılmıştır.

Ansys ve Comsol programları oldukça fazla kullanım alanlarına sahiptir. Ansys programı, akışkanlar mekaniği, mukavemet, titreşim, ısı transferi gibi temel bilimlerin birbiri ile olan ilişkisinin sayısal olarak hesaplanması için kullanılan genel amaçlı bir sonlu elemanlar yazılımıdır. Comsol programı ise, kısmi diferansiyel denklemlerin (matematiksel modellerin) çözümüne dayalı sonlu eleman (FEM) analizleri yapan bir programdır. Mühendislik ve bilimsel modellerin oluşturulması ve çözümünde kullanılır. Comsol programına PDE (Partial Differential Equation) tanımı yapılarak tüm model için istenen çözümler yapılabilir. Çözülecek problemin geometrisi, sınır şartları, materyal özellikleri ve değişkenleri yazılarak program aracılığı ile gerekli mesh işlemi yapılıp çözümler sonuçlar grafik şeklinde elde edilmektedir. Eğer mühendislik problemi için PDE denklemi elde edilmiş ise bunun programa girilerek değişkenlerinin tanımlanması ile çözüm yapılabilir.

- Elektrokimya
- Akustik
- Elektromanyetik
- Jeofizik
- Isı transferi
- Mikroelektromekanik
- Mikrodalga mühendisliği
- Optik
- Yapı mekaniği
- Kuantum mekaniği
- Akışkanlar mekaniği
- Kimyasal reaksiyonlar

gibi birçok alanda Comsol programı kullanılabilir [18].

Bu programlar prototip üretmeden test edebilme imkanı sunmaktadırlar. Ayrıca sanal ortamdaki 3 boyutlu simülasyonlar sayesinde çalışmada ortaya çıkabilecek sorunlar önceden fark edilip çözülebilmekte ve çalışma ömrü tahmin edilip iyileştirme yapılabilir.

Literatürde sonlu eleman programları ile yapılan birçok çalışma bulunmaktadır. Analizi yapılan ısı transferi ile ilgili Ansys ve Comsol programlarında yapılan çalışmalardan birkaçı aşağıda verilmiştir. Oumarou ve ark. çalışmalarında odun malzemesinin yüksek sıcaklıkta ısı davranışını nümerik olarak incelemişlerdir [6]. Akış alanı için süreklilik denklemleri ile odun için süreklilik ve enerji korunumu denklemleri çözülmüştür. Aynı zamanda çalışma deneysel olarak yapılarak sonuçların birbiri ile uyumlu olduğu görülmüştür. Kumar ve ark. çalışmalarında zorlanmış taşınım ile meyve kurutulması sırasında eş zamanlı ısı ve kütle transferinin matematik modelini geliştirmişlerdir [7]. Bu model kullanılarak kuruma sırasında meyvenin içerisindeki nem ve sıcaklık dağılımı tahmin edilmiştir. Nem difüzyonuna bağlı olarak sıcaklık ve büzülmenin nasıl değiştiğini gösteren iki model geliştirilerek sonuçlar karşılaştırılmıştır. Isı ve kütle transfer denklemleri Comsol Multiphysics 4.3 yazılımı kullanılarak çözülmüştür. Daha sonra elde edilen sonuçlar deneysel verilerle karşılaştırılmıştır.

Başka bir araştırmacı sonlu elemanlar analizi ile odun içerisinde nem dağılımını hesaplamıştır [8]. Kuruma sırasındaki nem difüzyonu ve ısı iletimini Fourier yasası ile tanımlamıştır. Modellemede Ansys 12 paket programı kullanılmıştır. Her bir odun türü için nem difüzyon katsayısı daha önce

yapılan çalışmalardan alınmıştır. Odunun nem içeriği %40 iken çevre havasının nem oranı %10 alınmıştır. Younsi ve ark. yüksek sıcaklıkta 3 boyutlu odun kurutulması işlemini hem CFD analizi ile hem de deneysel olarak incelemiştirler [9]. Yaptıkları çalışmada akış alanını türbülanslı kabul etmişlerdir. Ayrıca malzemedeki deformasyonlar ihmal edilmiş ve odun içinde ısı üretimi olmadığı kabulü yapılmıştır. Seçilen  $k-\epsilon$  türbülans modeli sayısal olarak ANSYS CFX10 paket programı ile çözülmüştür. Model doğrulaması deneysel olarak yapıp sonuçların birbiri ile uyumlu olduğu görülmüştür. Malzemede sıcaklık ve nem dağılımları incelenmiştir. Bonis ve Ruocco çalışmalarında ısı ve kütle transferini Comsol 3.4 programını kullanarak incelemiştirler [10]. Kurutma havası sıcaklığının kurutma üzerine etkisini araştırmışlardır. Modeli ortalama ısı ve kütle taşınım katsayılarını kullanmadan oluşturmuşlardır. Nem içeriğine bağlı olarak programda kurutmayı tanımlamışlardır. Oluşturulan model literatürden alınan deneysel veriler ile karşılaştırılıp doğrulanmıştır. Bu modelin aynı zamanda endüstriyel kurutucularda da kullanılabilirliği vurgulanmıştır. Ljung ve ark. çalışmalarında demir parçacığının kurutulması sırasında malzeme içerisindeki ısı ve kütle transferini CFD analizi ile incelemiştirler [11]. Gözenekli bir ortamda malzeme 2 boyutlu incelenip akışın sadece bir yönden olduğu kabulü yapılmıştır. Gözenekli malzemenin içerisindeki kılcal borulardan su ve havanın taşınımı iki akışkanlı sistem için Darcy yasalarından faydalanılarak çözülmüştür. Malzeme içerisindeki sıvı, katı ve gaz halleri için sıcaklık dağılımları hesaplanmıştır. İterasyon hataları ihmal edilmiştir. Yazarlar çalışmalarında daha hassas sonuçlar elde etmek için ısı taşınım katsayısının gerçek değerinin kullanılmasının öneminden de bahsetmişlerdir.

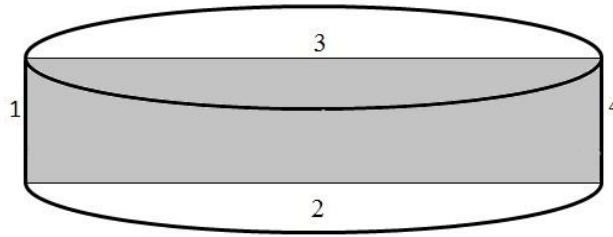
Hussain ve Dincer çalışmalarında nemli 2 boyutlu dikdörtgen kesitli bir ürünün zorlanmış taşınım ile kurutulması sırasında eş zamanlı olarak ısı ve nem transferini sayısal olarak modellemiştirler [12]. Dikdörtgen kesitli ürünün içerisindeki nem ve sıcaklık dağılımını temsil eden denklemler sonlu farklar metodu kullanılarak bilgisayar programı yardımı ile çözülmüştür. Elde edilen sonuçlar literatürden alınan veri ile karşılaştırılmış ve sonucun uygun olduğu görülmüştür.

Bu çalışmada öncelikle ürün ve akış alanı için matematik model oluşturulmuştur. Daha sonra doğrulama yapmak için literatürde bulunan bir çalışmanın sonuçları ile Comsol ve Ansys programlarından elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Modelin doğru oluşturulduğu anlaşıldıktan sonra farklı hızlar (1 - 1,5 - 2 m/s) için ürün içerisindeki sıcaklık dağılımı Comsol ve Ansys-Fluent programlarında zamana bağlı olarak elde edilmiştir. Her iki programda 200. saniye için elde edilen bu sonuçlar karşılaştırılmıştır. Son olarak farklı hava sıcaklıkları (50°C - 80°C - 110°C - 140°C) için de analizler yapılmış ve elde edilen tüm sonuçları yorumlanmıştır.

## 2. Materyal ve Metot

Bu çalışmada ele alınan problemin matematik modellenmesi için aşağıdaki kabuller yapılarak ısı transferi incelenmiştir.

- Isıtma süreci boyunca havanın hızı, sıcaklığı ve bağıl nemi ve ısı taşınım katsayısı sabit kabul edilmiştir.
- Kanal içindeki akış türbülanslı kabul edilmiştir.
- Ürün içerisinde deformasyon meydana gelmemektedir.
- Ürün 2 boyutlu modellenmiştir.
- Ürün içerisinde ısı üretimi yoktur.
- Ürünün termofiziksel özellikleri (özgül ısı, iletim katsayısı vs.) sabittir.
- Zorlanmış taşınım ile ısıtma işleminde ısı transferi öncelikle havadan yüzeye ısı taşınımı ile gerçekleştiği daha sonra yüzeyden ürün merkezine iletimle (Fourier Yasası) aktarıldığı düşünülmüştür.



Şekil 2. 2D Model

### 2.1. Akış Alanının Matematik Modellenmesi

Akışkanın hızı olduğundan momentum denklemlerinin, sıcaklık farkı olduğundan dolayı enerji denklemlerinin ve süreklilik denklemlerinin çözülmesi gerekir. Öncelikle akış alanından malzeme yüzeyine ısı transferi miktarının hesaplanması için korunum denklemlerinin çözülmesi gerekmektedir. Bu denklemler aşağıda verilmiştir.

#### - Süreklilik Denklemi

Diferansiyel bir kontrol hacmi için yazılan kütle korunumu denklemi, genellikle süreklilik denklemi olarak adlandırılır [13]. Bu denklem, sürekli rejimdeki bir kontrol hacmine giren ve çıkan kütle toplamının sıfır olması şeklinde ifade edilebilir.

$$m_{x+dx} = m_x + \frac{\partial m_x}{\partial x} dx \quad (1)$$

$$m_{y+dy} = m_y + \frac{\partial m_y}{\partial y} dy \quad (2)$$

Süreklilik denklemi kartezyen koordinatlarda, sürekli rejim için aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

#### - Momentumun Korunumu Denklemi

Momentum denklemleri Navier Stokes denklemleri olarak bilinir ve akış alanına Newton'un ikinci kanununun uygulanması ile elde edilir. Kontrol hacmine herhangi bir dış kuvvetin olmadığı ve akışın türbülanslı olmasından dolayı kartezyen koordinatlarda, sürekli rejim için denklemler aşağıdaki hale gelir.

$$\left( \frac{\partial(\rho uu)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vu)}{\partial y} \right) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left( (\mu + \mu_t) \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( (\mu + \mu_t) \frac{\partial u}{\partial y} \right) \quad (4)$$

$$\left( \frac{\partial(\rho uv)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vv)}{\partial y} \right) = -\frac{\partial P}{\partial y} + \rho \cdot g_y + \frac{\partial}{\partial x} \left( (\mu + \mu_t) \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( (\mu + \mu_t) \frac{\partial v}{\partial y} \right) \quad (5)$$

Burada  $\mu_t$  türbülanslı eddy viskozitesidir.

#### - Enerji Denklemi

Taşınım probleminde, taşınım katsayısının bulunabilmesi için sıcaklık dağılımının bulunması gerekir. Bunun için enerji denkleminin Termodinamiğin 1. Kanunu gereğince sınır şartları altında uygulanması gerekir. Gerekli işlemler yapılırsa;

$$\rho u \frac{\partial e}{\partial x} + \rho v \frac{\partial e}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial T}{\partial y} \right) - p \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \mu \phi + \dot{q} \quad (6)$$

Elde edilir, burada  $\mu \phi$  sürtünme kayıpları;

$$\mu \phi = \mu \left\{ \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + 2 \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right] - \frac{2}{3} \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right\} \quad (7)$$

şeklinde ifade edilir. Kontrol hacminde üretilen enerji olmadığı, sürtünme kayıplarının ihmal edildiği, türbülanslı akış kabulü ve son olarak süreklilik denklemi ifadesi de kullanılarak 6 numaralı denklem aşağıdaki gibi elde edilmektedir;

$$u \rho c_p \frac{\partial T}{\partial x} + v \rho c_p \frac{\partial T}{\partial y} = (k + k_t) \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (8)$$

Türbülanslı akışta enerji denkleminde  $k_t$  türbülanslı eddy iletkenliği ortaya çıkmaktadır. Daha önce momentum denkleminde de türbülanslı eddy viskozitesi ortaya çıkmıştı. Bu terimlerin hesaplanabilmesi için türbülans kinetik enerjisi ( $k$ ) ve onun yayılma hızı  $\varepsilon$ 'nin bilinmesi gerekmektedir. Bu iki ifade aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$k = \frac{1}{2} [(u')^2 + (v')^2] \quad (9)$$

$$\varepsilon = \frac{k^{3/2}}{l_m} \quad (10)$$

Burada  $l_m$  Prandtl'in karışım uzunluğudur. Jones ve Launder  $k$  ve  $\varepsilon$ 'nin çözümü için aşağıdaki transport denklemini kullanmışlardır.

$$u \rho \frac{\partial k}{\partial x} + v \rho \frac{\partial k}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\mu_t}{\sigma_k} \cdot \frac{\partial k}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\mu_t}{\sigma_k} \cdot \frac{\partial k}{\partial y} \right) + \mu_t G - \rho \varepsilon \quad (11)$$

$$u \rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} + v \rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \cdot \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \cdot \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \right) + C_1 \mu_t G \frac{\varepsilon}{k} - C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{2} \quad (12)$$

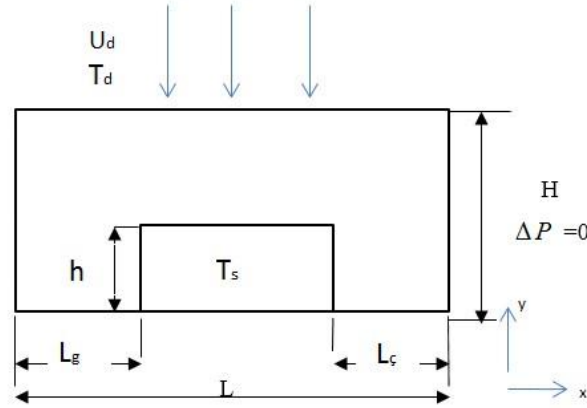
Burada  $G$  türbülans kinetik enerjisinin üretimini temsil eder ve aşağıdaki şekilde tanımlanır.

$$G = 2 \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right] + \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \quad (13)$$

Diğer  $k$ - $\varepsilon$  model sabitleri ise  $C_1=1.44$ ,  $C_2=1.92$ ,  $\sigma_\varepsilon=1.3$ 'dür.  $\mu_t$  ve  $k_t$  yukarıdaki denklemlerin çözülmesi ve  $\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon}$  ile  $k_t = \frac{\mu_t C_p}{\sigma_t}$  denklemlerinde yerine konulmasıyla elde edilir. Burada  $\sigma_t$  türbülanslı akış için Prandtl sayısıdır ve Reynolds analogisine göre  $\sigma_t=1$  ve  $C_\mu$  değeri ise 0.09'dür.

### 2.1.1. Başlangıç ve Sınır Şartları

Teorik çalışma iki boyutlu ele alınmıştır. Ürün etrafındaki akış için sınır şartları yazılmıştır. Sınır şartları ise;  $y=0$  ve  $0 \leq x \leq L_g$ ;  $x=L_g$  ve  $0 \leq y \leq h$ ;  $L_g \leq x \leq L-L_g$  ve  $y=h$ ;  $x=L-L_g$  ve  $0 \leq y \leq h$ ;  $x=L-L_g$  ve  $y=0$   $y=H$  ve  $0 \leq x \leq L$  için hız  $u=0$  olarak kaymama (cidar şartı) alınmıştır. Çıkış basıncı 0 alınarak kanal içi akış modellenmiştir. Ayrıca kanal adyabatik olarak kabul edilmiştir (Şekil 3).



Şekil 3. İki boyutlu kartezyen koordinatlarda ürün geometrisi

### 2.2. Malzeme İçin Isı Transfer Denklemleri

Tüm ısı transferi korunum yasalarının temeli Termodinamiğin 1. Kanununa (Enerjinin Korunumu İlkesi) dayanır. Katı içerisindeki enerji dengesi için Fourier Yasası kullanılmaktadır. Isı yayılım denkleminin kartezyen koordinatlardaki en genel aşağıdaki denkleme gösterilmiştir.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q = \rho c_p \left( \frac{\partial T}{\partial t} \right) \quad (14)$$

Yapılan kabuller ile ısı iletiminin en genel hali aşağıdaki gibi bulunmaktadır:

$$\frac{\rho c_p}{k} \left( \frac{\partial T}{\partial t} \right) = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \quad \alpha = \frac{k}{\rho c_p} \quad (15)$$

Gerekli düzenlemeler yapıldığında denklem son olarak aşağıdaki hale gelmektedir:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (16)$$

Isı transfer yüzeyi için sınır koşulları (Şekil 2);

$$t = 0 \quad T = T_0 \quad (17)$$

1, 3 ve 4 yüzeyi için;

$$-k \frac{\partial T}{\partial x} = h_T (T_\infty - T) \quad (18)$$

$$-k \frac{\partial T}{\partial y} = h_T (T_\infty - T) \quad (19)$$

Yukarıda verilen formüllerde;  $h_T$ : ısı transfer katsayısını ( $W/m^2K$ ),  $T_\infty$ : ısıtılan mahal sıcaklığını ( $^\circ C$ ) ve  $k$ : ısı iletim katsayısını ( $W/mK$ ) ifade etmektedir.

2 bölgesinde sıcak hava ile temas olmadığı için zamanla sıcaklık değişimi sıfır olarak alınır. 1,3 ve 4 bölgesi ise sıcak hava temas ederek malzemeye taşınım ile aktarılan ısı iletimle malzeme içerisine aktarılan ısıya eşittir.

### 3. Araştırma ve Bulgular

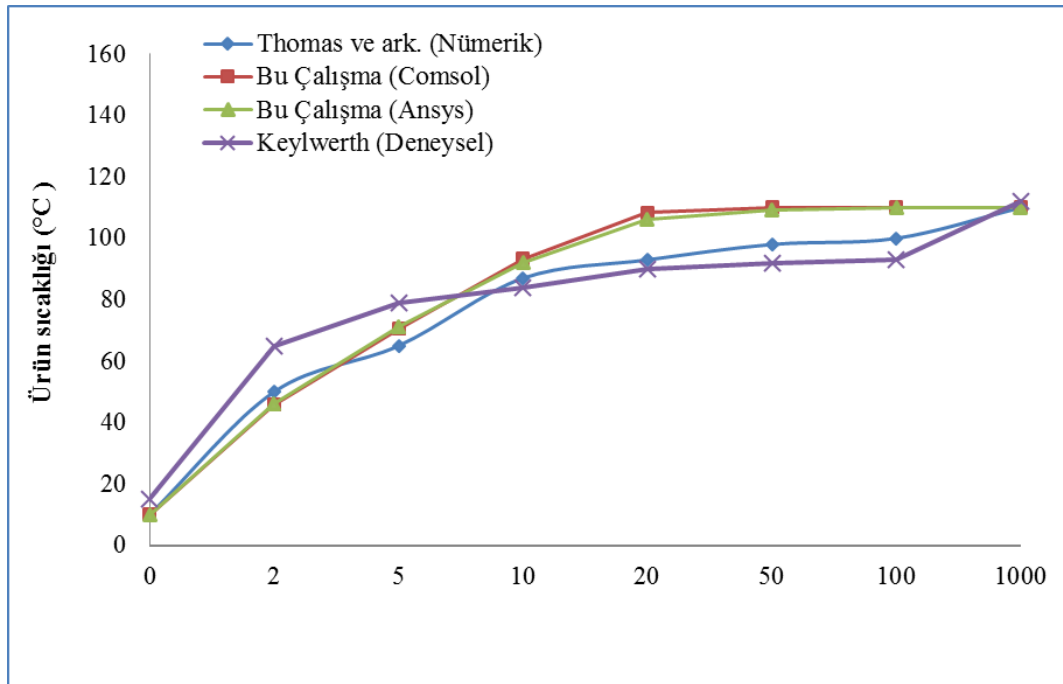
#### 3.1. Model Doğrulaması

Yapılan çalışmanın güvenilirliğini test etmek için Comsol ve Ansys programları ile elde edilen sonuçlar daha önceden yapılmış olan deneysel ve nümerik çalışmaların sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Doğrulama işlemi Thomas ve ark. yaptıkları nümerik çalışmanın ve Keylwerth'in yaptığı deneysel çalışmanın sonuçları ile kıyaslanmıştır (Şekil 4) [16,17]. Thomas ve ark.'nın yapmış oldukları çalışmada kullandıkları odun özellikleri referans alınarak, hava sıcaklığı  $110^\circ C$  ve ortamın ısı taşınım katsayısı  $22,5 W/m^2K$  alınarak, odun yüzeyindeki sıcaklık dağılımının zamana bağlı olarak değişimi elde edilmiştir.

Tablo 1.  $10^\circ C$  sıcaklığındaki odun malzemesinin termofiziksel özellikleri [16]

Parametre (Birimi)	Değeri
Odunun yoğunluğu ( $kg/m^3$ )	370
Isı iletim katsayısı ( $W/mK$ )	0.65
Özgül ısı ( $J/kgK$ )	2500

Kuruma süresi-Sıcaklık grafiğinde eğri eğilimlerinin birbirlerine yakın olduğu görülmektedir ki bu validasyon işleminin başarılı bir şekilde yapıldığını göstermektedir.



Şekil 4. Odun parçasının yüzey sıcaklığının zamana bağlı değişimi



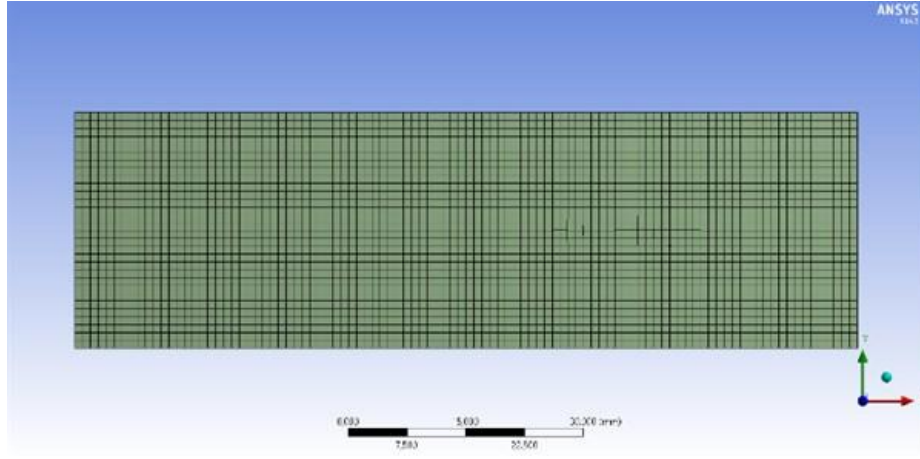
### 3.2. Farklı Hızların Nümerik Sonuçlara Etkisi

Odun malzemesinin 3 cm kalınlığında, 25°C başlangıç sıcaklığında, 40°C hava sıcaklığında ve 1m/s, 1,5m/s ve 2m/s hava hızındaki zorlanmış taşınım ile kurutmanın 200. saniyesindeki sıcaklık dağılımı, Comsol ve Ansys-Fluent programlarında karşılaştırılmıştır. Odun malzemesinin termofiziksel özellikleri için kullanılan değerler Tablo 2’de verilmiştir.

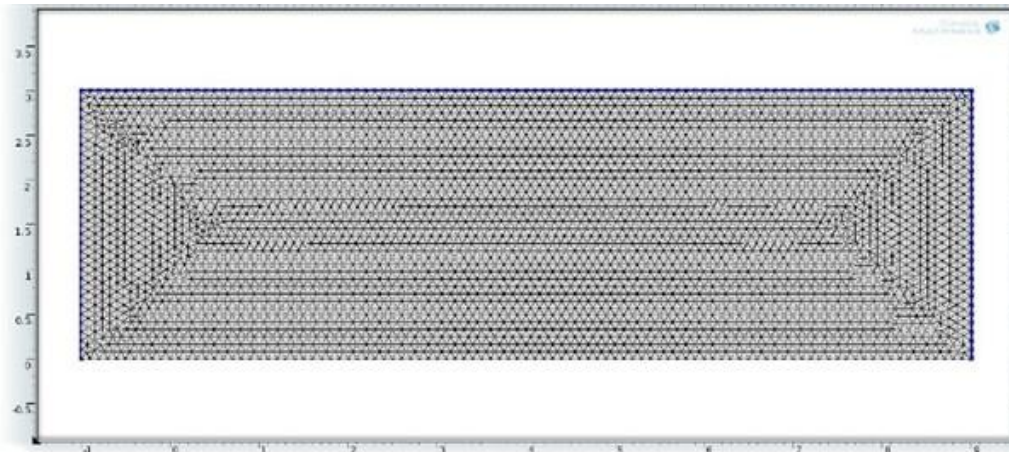
Tablo 2. 25°C sıcaklığındaki odun malzemesinin termofiziksel özellikleri [15]

Parametre (Birimi)	Değeri
Odunun yoğunluğu (kg/m <sup>3</sup> )	500
Isı iletim katsayısı (W/mK)	0.35
Özgül ısı (J/kgK)	1284

Odun malzemesi için oluşturulan modelin Fluent programında sonlu elemanlara ayrılmış hali Şekil 5.’de gösterilmiştir. Comsol programında sonlu elemanlara ayrılmış hali ise Şekil 6.’da gösterilmiştir.



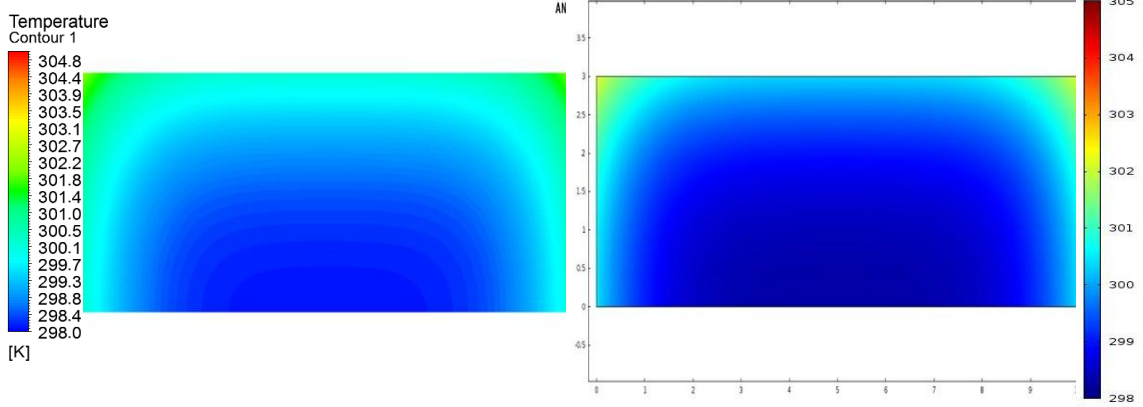
Şekil 5. Odun modelinin Fluent programında sonlu elemanlara ayrılmış hali



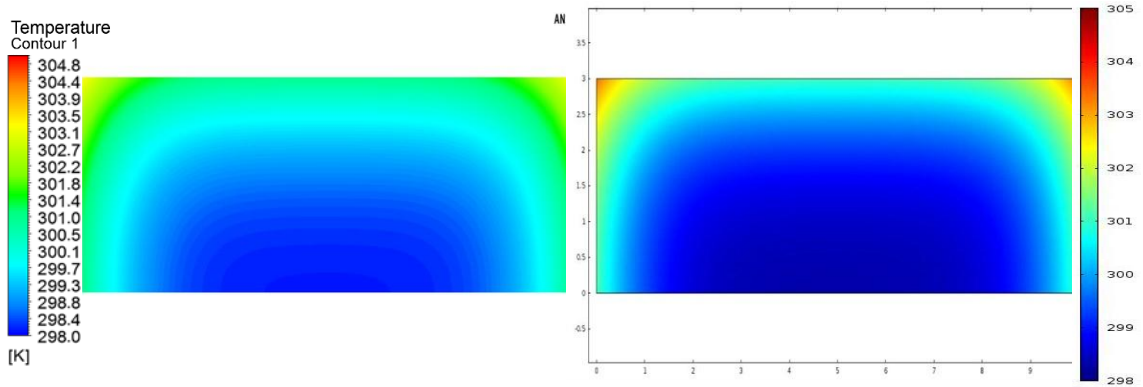
Şekil 6. Odun modelinin Comsol programında sonlu elemanlara ayrılmış hali

Her iki programda model sonlu elemanlara bölünmüş ve meshten bağımsızlık çalışması yapılmıştır. Her iki modelde yaklaşık 3000 elemana bölünmüş ve analizler yapılmıştır.

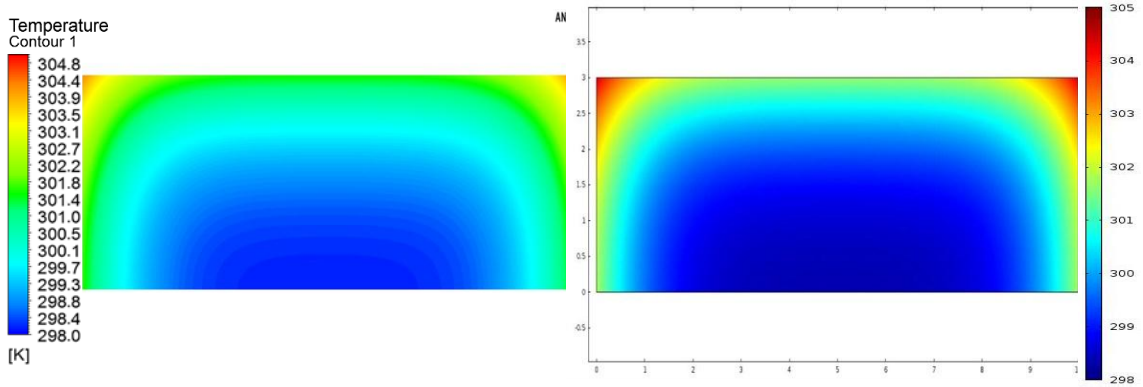
1m/s, 1,5m/s ve 2m/s hava hızları için 200. saniyede elde edilen sıcaklık dağılımları Şekil 7, Şekil 8 ve Şekil 9’de gösterilmiştir.



Şekil 7. Fluent ve Cmsol programında 1 m/s akışkan hızı için elde edilen 200. saniyedeki sıcaklık (K) dağılımı



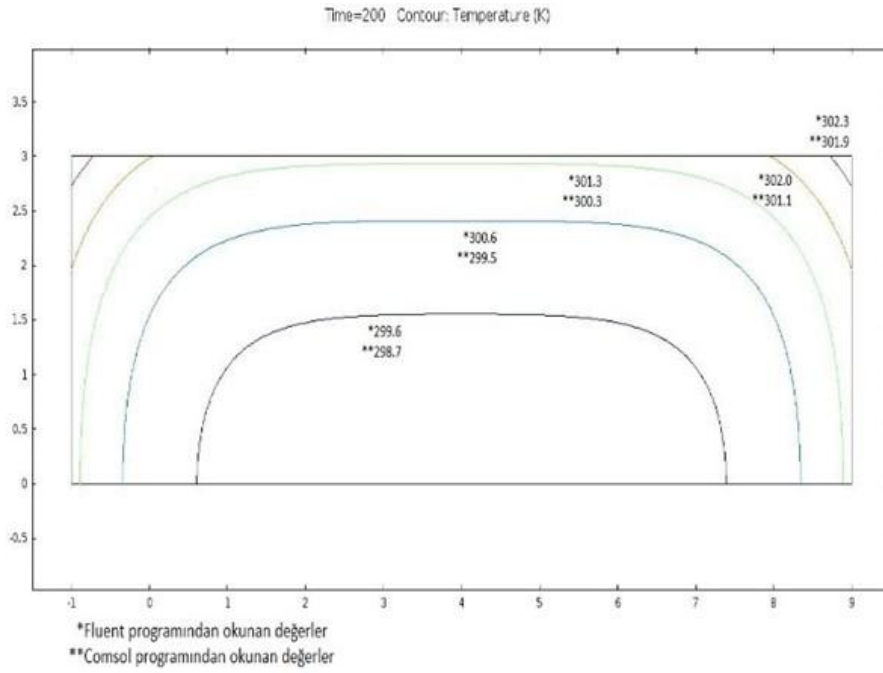
Şekil 8. Fluent ve Cmsol programında 1,5 m/s akışkan hızı için elde edilen 200. saniyedeki sıcaklık (K) dağılımı



Şekil 9. Fluent ve Cmsol programında 2 m/s akışkan hızı için elde edilen 200. saniyedeki sıcaklık (K) dağılımı

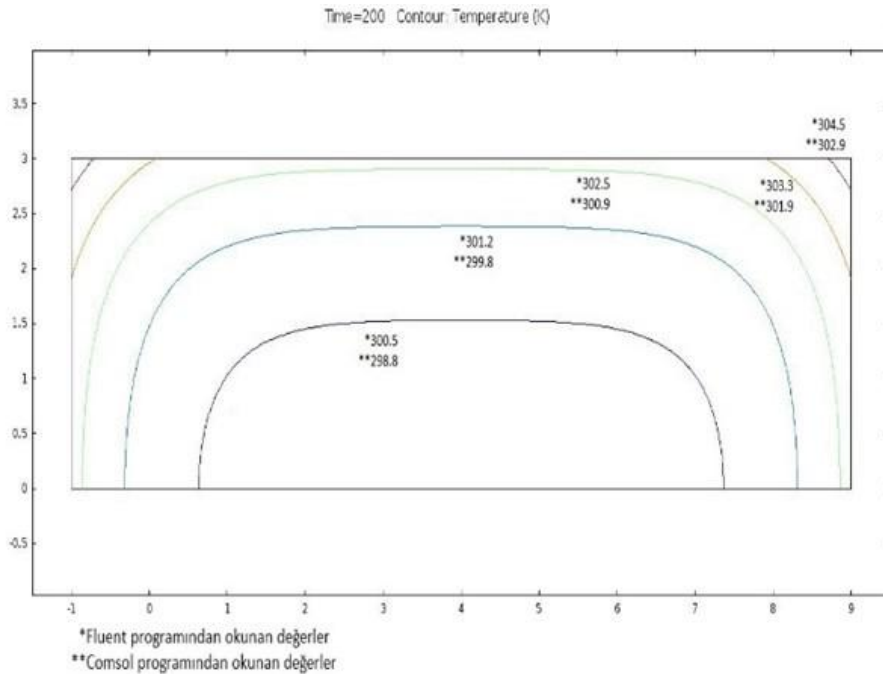
Şekil 7, Şekil 8 ve Şekil 9'da, hem Fluent hem de Cmsol programından elde edilen sıcaklık dağılımları eşit sıcaklık skalalarında gösterilmiştir. Süre arttıkça her iki programdan elde edilen sıcaklık dağılımlarından odun içindeki sıcaklığın arttığı anlaşılmaktadır. Her iki programın verdiği sonuçlar aşağıda daha detaylı olarak karşılaştırılmıştır.

Şekil 10, Şekil 11 ve Şekil 12'de, odun modeli üzerinden seçilen 5 farklı çizgiden okunan sıcaklık değerleri gösterilmiştir. Bu grafiklerde üç farklı hava hızı için Fluent programından elde edilen sıcaklık değerleri ve Cmsol programından elde edilen sıcaklık değerleri verilmiştir. Ayrıca Tablo 3.'de seçilen beş farklı çizgideki sıcaklığı değerleri, her iki program için karşılaştırmalı olarak verilmiştir.



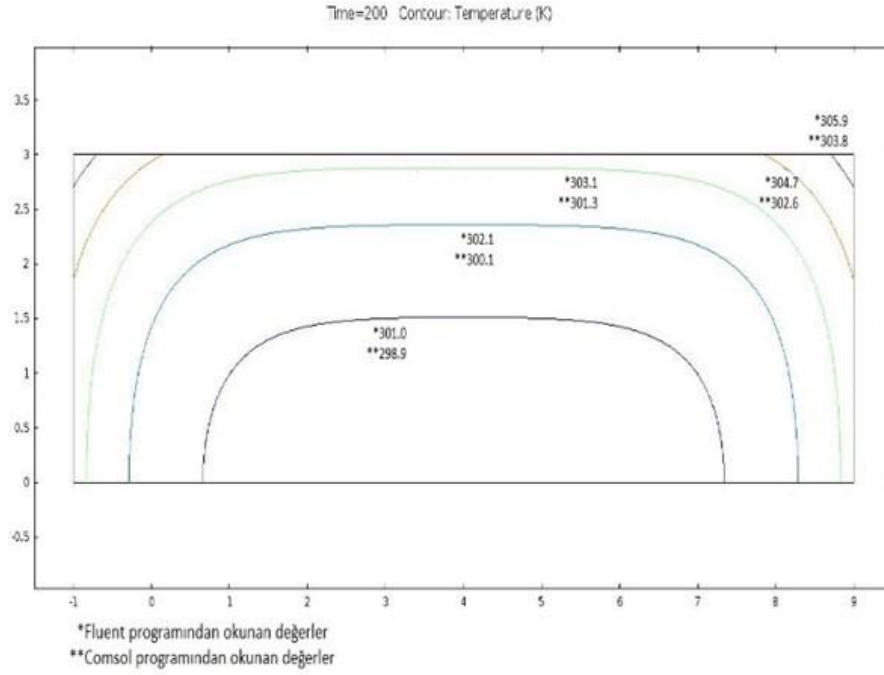
Şekil 10. 1m/s akışkan hızı için elde edilen 200. saniyedeki sıcaklık (°C) dağılımı

Şekil 10.'da görüldüğü gibi sıcaklık değerleri birbirine yakın olarak görülmektedir. Detaylı olarak bakıldığında ise Ansys-Fluent programından elde edilen sıcaklık dağılımındaki değerlerin, Comsol programı yardımıyla elde edilen sıcaklık dağılımındaki değerlerden ortalama 0,86 °C daha fazla olduğu hesaplanmıştır.



Şekil 11. 1,5 m/s akışkan hızı için elde edilen 200. saniyedeki sıcaklık (°C) dağılımı

Şekil 11.'de görüldüğü gibi sıcaklık değerleri yine birbirine yakın çıkmıştır. Her bir değer incelendiğinde Ansys-Fluent programından elde edilen sıcaklık dağılımındaki değerlerin, Comsol programı yardımıyla elde edilen sıcaklık dağılımındaki değerlerden ortalama olarak 1,54 °C daha fazla olduğu hesaplanmıştır.



Şekil 12. 2 m/s akışkan hızı için elde edilen 200. saniyedeki sıcaklık (°C) dağılımı

Şekil 12.'de de yine aynı şekilde değerlerin birbirine yakın olduğu görülmektedir. Ansys-Fluent programından elde edilen sıcaklık dağılımındaki değerlerin, Comsol programı yardımıyla elde edilen sıcaklık dağılımındaki değerlerden ortalama olarak 2,02 °C daha fazla olduğu hesaplanmıştır.

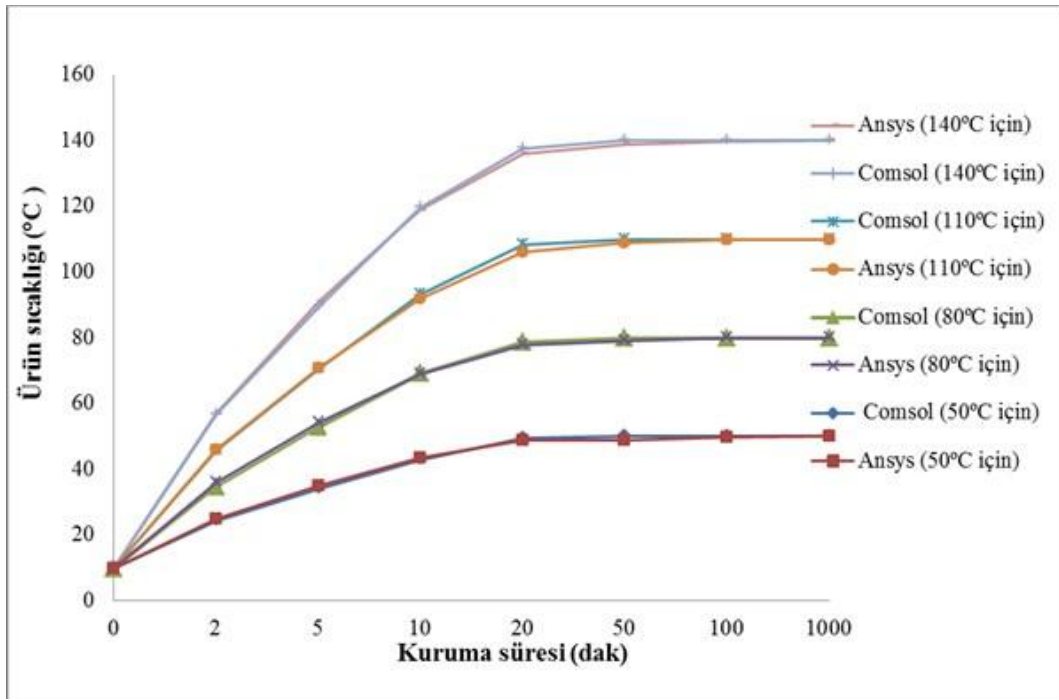
Tablo 3. Farklı hızlarda havaya maruz kalan odun parçasının seçilen çizgiler üzerindeki sıcaklıklarının karşılaştırılması

Çizgiler	Hava Hızı 1/ms			Hava Hızı 1,5/ms			Hava Hızı 2/ms		
	Cmsol (K)	Fluent (K)	Fark (%)	Cmsol (K)	Fluent (K)	Fark (%)	Cmsol (K)	Fluent (K)	Fark (%)
1	298,7	299,6	0,300	298,8	300,5	0,566	298,9	301	0,698
2	299,5	300,6	0,366	299,8	301,2	0,465	300,1	302,1	0,662
3	300,3	301,3	0,332	300,9	302,5	0,529	301,3	303,1	0,594
4	301,1	302	0,298	301,9	303,3	0,462	302,6	304,7	0,689
5	301,9	302,3	0,132	302,9	304,5	0,525	303,8	305,9	0,686
	Ortalama Fark → <u>0,286</u>			Ortalama Fark → <u>0,509</u>			Ortalama Fark → <u>0,666</u>		

Beş farklı çizgiden alınan sonuçlar karşılaştırıldığında Comsol ve Ansys-Fluent programlarından elde edilen sonuçların birbirleriyle tutarlı olduğu görülmektedir. Çizgiler merkezden yüzeye doğru olacak şekilde 1'den 5'e kadar numaralandırılmıştır. Tablo 3.'de her bir hava hızı değeri için hesaplanan ortalama sıcaklık farklarına bakıldığında ise hava hızı değeri arttıkça her iki programdan elde edilen sıcaklık değerlerinin bir miktar farklılaştığı görülmektedir.

### 3.3. Farklı Sıcaklıkların Nümerik Sonuçlara Etkisi

Farklı hava hızlarına ek olarak, Ansys ve Comsol programlarında farklı hava sıcaklıkları (50°C - 80°C -110°C -140°C) için analiz yapılmıştır. Elde edilen yüzey sıcaklıklarının zamana bağlı değişim grafiği Şekil 13'de verilmiştir. Ayrıca her bir hava sıcaklığı değeri için, farklı zamanlarda alınan ölçüm değerleri Tablo 4.'de detaylı olarak gösterilmiştir ve ortalama farklar hesaplanmıştır.



Şekil 13. Farklı hava sıcaklıklarının odun parçasının yüzey sıcaklığı üzerindeki etkisi

Tablo 4. Farklı sıcaklıkta havaya maruz kalan odun parçasının seçilen zaman aralıklarında yüzey sıcaklıklarının karşılaştırılması

Zaman (dk)	Hava Sıcaklığı 50°C			Hava Sıcaklığı 80°C			Hava Sıcaklığı 110°C			Hava Sıcaklığı 140°C		
	Comsol (K)	Fluent (K)	Fark (%)	Comsol (K)	Fluent (K)	Fark (%)	Comsol (K)	Fluent (K)	Fark (%)	Comsol (K)	Fluent (K)	Fark (%)
0	283	283	0,000	283	283	0,000	283	283	0,000	283	283	0,000
2	297,26	298,02	0,255	307,84	308,9	0,343	318,83	319	0,053	329,78	330	0,067
5	306,72	307,59	0,283	325,83	327,1	0,388	343,44	344	0,163	362,57	364	0,393
10	316,26	317,18	0,290	342,21	341,7	0,149	366,34	365	0,367	392,61	392	0,156
20	322,43	321,45	0,305	351,72	350,9	0,234	381,34	379,87	0,387	410,53	409,92	0,149
50	323	322	0,311	353	351,78	0,347	382,82	382	0,215	412,51	412	0,124
100	323	322,3	0,217	353	352,75	0,071	383	382,8	0,052	412,91	412,9	0,002
1000	323	323	0,000	353	353	0,000	383	383	0,000	413	413	0,000
	Ortalama Fark → 0,208			Ortalama Fark → 0,192			Ortalama Fark → 0,155			Ortalama Fark → 0,111		

Sonuçlar karşılaştırıldığında Ansys-Fluent ve Comsol programlarından elde edilen sıcaklık değişimlerinin birbirine oldukça yakın olduğu görülmüştür. Buna karşın hava sıcaklığı arttığında, ortalama farkların azaldığı dolayısıyla her iki programdan elde edilen sonuçların birbirine daha da yaklaştığı gözlemlenmektedir.

#### 4. Sonuç ve Tartışma

Bu çalışmada Ansys-Fluent programı ve Comsol programı ile 2 boyutlu olarak modellenen dikdörtgen kesitli odun parçası 3 farklı hava hızı için ürün içerisinde oluşan sıcaklık dağılımları elde edilmiştir. Ayrıca 4 farklı hava sıcaklığı için de odun yüzeyindeki sıcaklıklar elde edilip Ansys-Fluent ve Comsol programları karşılaştırılmıştır. Bu sonuçlara göre;

- Ansys-Fluent ve Comsol programlarının birbirlerine yakın sonuçlar verdiği görülmektedir.
- Hava hızı arttıkça malzeme içerisindeki sıcaklığın da arttığı görülmüştür.
- Ürün üzerine üflenen hava hızı arttıkça Ansys-Fluent programı ile Comsol programı arasında sıcaklık farkının arttığı görülmektedir.

- Farklı hava sıcaklıklarında da Ansys-Fluent ve Cmsol programı birbirine yakın sonuçlar vermiştir.
- Ürün üzerine üflenen hava sıcaklığı arttıkça, ortalama farkların azaldığı dolayısıyla her iki programdan elde edilen sonuçların birbirine daha da yaklaştığı gözlemlenmektedir.
- Literatürde daha önce yapılmış olan deneysel ve nümerik çalışmaların sonuçları ile hem Cmsol hem de Ansys-Fluent programından elde edilen sonuçlar birbirine çok yakın çıkmıştır ve çalışma uyumlu sonuçlar vermiştir. Bu nedenle hem Ansys-Fluent hem de Cmsol programının kurutma, ısıtma, soğutma, iklimlendirme vb. konularda çalışacak araştırmacılara güvenilir sonuçlar veren bir araç olabilecekleri anlaşılmıştır.

Günümüzde enerji maliyetlerinin artışından dolayı tasarruf daha önemli hale gelmiştir. Isıtma ve soğutma işlemleri için istenilen koşulların tam olarak sağlanması, enerji ve zaman israfı yapılmaması açısından önemlidir. Bundan dolayı deney yapma imkânının pahalı olması durumunda analiz programlarının kullanımının güvenilir olduğunun kanıtlanması gerekmektedir. Yapılan bu çalışma, endüstride yapılan ısıtma işlemleri için kullanılan malzemelerin istenen sıcaklıklara ne kadar sürede gelebileceğinin (uygulamaya geçmeden önce) test edilmesi açısından önemlidir. Bu sayede odun malzemesine yapılacak olan ısı işlem öncesi optimum çalışma şartları elde edilmiş olacaktır. Bunun sonucu olarak da mekanik deformasyonlar en aza indirilebilecektir.

## Kaynaklar

- [1] Bozkurt, Y., Erdin, N. Ağaç Teknolojisi Ders Kitabı, İ.Ü. Orman Fakültesi, Yayın no: 445, S: 1, 1997, İstanbul.
- [2] Akkılıç, H., Kaymakçı, A., Ünsal, Ö. Isıl İşlem Uygulanmış Ahşap Malzemenin Dış Cephe Kaplaması Olarak Değerlendirilme Potansiyeli ,7. Ulusal Çatı & Cephe Sempozyumu 3– 4 Nisan 2014 Yıldız Teknik Üniversitesi Beşiktaş – İstanbul.
- [3] Korkut, S., ve Kocaefe, D. Isıl işlemin odun özellikleri üzerine etkisi, Düzce Üniversitesi Ormancılık Dergisi, 5(2): 11-34, 2009.
- [4] URL-1 2017. Ahşap çeşitleri, <http://www.novaorman.com> (son erişim tarihi 23.10.2017)
- [5] Boonstra, M.J. A two-stage thermal modification of wood. Ph.D. dissertation in cosupervision Ghent University and Universite Henry Poincare - Nancy 1, 297 p. ISBN 978-90-5989-210-1, 2008.
- [6] Oumarou, N., Kocaefe, D., Kocaefe, Y. “3D-modelling of conjugate heat and mass transfers: Effects of storage conditions and species on wood high temperature treatment”. International Journal of Heat and Mass Transfer 79, 945–953, 2014.
- [7] Kumar, C., Karim, A., Koardder, H., Miller, G.J. “Modeling Heat and Mass Transfer Process During Convection Drying of Fruit”. 4th International Conference on Computational Methods (ICCM 2012), Australia, 2012.
- [8] Çolakoğlu, M.H. “Determination of Change in Moisture Ratios of Some Woods during Air-Drying by Finite Element Analysis”. Journal of Applied Sciences, 9(22), 4091-4094, 2009.
- [9] Younsi, R., Kocaefe, D., Poncsak, S., Kocaefe, Y., Gastonguay, L. “CFD Modeling and Experimental Validation of Heat and Mass Transfer in Wood Poles Subjected to High Temperatures:a Conjugate Approach”. Heat Mass Transfer, 44, 1497-1509, 2008.
- [10] Bonis, M.V., Ruocco, G.A. “Multiphysics Approach to Fundamental Conjugate Drying by Forced Convection”. Cmsol Conference, Hannover, Germany, 2008.
- [11] Ljung, A.L., Lundström, T.S., Tano, K. “Fluid Flow and Heat Transfer Within and Around a Porous Pellet Placed in Infinite Space”. 19th International Symposium on Transport Phenomena, Reykjavik, Island, 2008.
- [12] Hussain, M.M., Dincer, I. “Numerical Simulation of Two-Dimensional Heat and Moisture Transfer During Drying of a Rectangular Object”. Numerical Heat Transfer, Part A: Application: An International Journal of Computation and Methodology, 43:8, 867-878, 2003.

- [13] Çengel Y,A. Isı ve Kütle Transferi. 3. Baskı, İzmir, Türkiye Güven Bilimsel Yayıncılık, 2011.
- [14] Irudayaraj, J., Haghghi, K., Strohine, R.L. "Nonlinear Finite Element Analysis of Coupled Heat and Mass Transfer Problems with an Application to Timber Drying". Drying Technology, 8, 731-749, 1990.
- [15] Lamnatou, C., Papqanicolaou, E., Belessiotis, V., Kyriakis, N. "Conjugate Heat and Mass Transfer From a Drying Rectangular Cylinder in Confined Air Flow". Numerical Heat Transfer, Part A, Applications 56 (5),379-405, 2009.
- [16] Thomas, H.R., Lewis, R.W., Morgan, K. "An Application of The Finite Element Method to The Drying of Timber". Wood Fiber, 11(4),237-243, 1991.
- [17] Keylwerth, R. The variation of the temperature of wood during the drying of veneers and sawn wood. Holz Roh Werkst. 10(3):87-91, 1952.
- [18] Comsol Multiphysics 4.3a. Heat Transfer Model Library, "Heat Transfer Module User's Guide, Chemical Reaction Engineering Module User's Guide". 2012.