

**GÖZENEKLİ MALZEMELERDE
EŞ ZAMANLI ISI VE KÜTLE TRANSFERİNİN
MATEMATİK MODELLENMESİ**

BURAK TÜRKAN



T.C.
ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**GÖZENEKLİ MALZEMELERDE EŞ ZAMANLI ISI VE KÜTLE TRANSFERİNİN
MATEMATİK MODELLENMESİ**

Burak TÜRKAN

Prof. Dr. Akın Burak ETEMOĞLU
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2014
Her Hakkı Saklıdır

TEZ ONAYI

Burak TÜRKAN tarafından hazırlanan “GÖZENEKLİ MALZEMELERDE EŞ ZAMANLI ISI VE KÜTLE TRANSFERİNİN MATEMATİK MODELLENMESİ”adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Prof. Dr. Akın Burak ETEMOĞLU

Başkan: Prof. Dr. Akın Burak ETEMOĞLU U. Ü.
Müh. Fakültesi,
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı İmza

Üye: Prof. Dr. Muhiddin CAN İmza
U. Ü. Müh. Fakültesi,
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Üye: Prof.Dr.Yusuf ULCAY İmza
U. Ü. Müh. Fakültesi,
Tekstil Mühendisliği Anabilim Dalı

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Ali Osman DEMİR
Enstitü Müdürü
.. / .. / (Tarih)

U.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

/ /

Burak TÜRKAN

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

GÖZENEKLİ MALZEMELERDE EŞ ZAMANLI ISI VE KÜTLE TRANSFERİNİN MATEMATİK MODELLENMESİ

Burak TÜRKAN

Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Akın Burak ETEMOĞLU

Bu çalışmada dikdörtgen kesitli odun malzemesinin zorlanmış taşınım ile kurutulması işlemi incelenmiştir. Öncelikle akış alanı için korunum denklemleri (Navier Stokes), ANSYS Fluent 14.5 paket programı kullanılarak çözülmüştür. Daha sonra yüzeydeki ortalama ısı taşınım katsayısı, türbülans modellerinden Standart k-ε Modeli kullanılarak hesaplanmıştır. Isı ve kütle transferi arasındaki bağıntı kullanılarak kütle taşınım katsayısı bulunmuştur. Hava hızı, sıcaklığı, ürünün kalınlığı ve ürün nem oranı gibi değişkenlere göre eş zamanlı ısı ve kütle transfer denklemleri zamana bağlı, yüzey sınır şartları kullanılarak Comsol 4.3a programı ile çözülmüştür. Kurutma sırasındaki katı içerisindeki nem ve sıcaklık dağılımları zamana bağlı olarak (2 saat sonra) elde edilmiştir. Denklemler için matematiksel model Fourier ısı iletim ve Fick difüzyon yasaları kullanılarak oluşturulmuştur. Model doğrulaması literatürde yapılmış olan 6 farklı nümerik ve deneysel (Haiqing ve ark 1999, Younsi ve ark. 2006, Chang ve Petersen 1986, Liu ve Cheng 1991, ve Kocaefe ve ark.(nümerik ve deneysel 2007)) çalışma ile yapılmıştır. Sonuç grafiklerinin birbirine benzerlik gösterdiği görülmüştür. Ayrıca Comsol programından (200. saniye için) elde edilen sonuçlar ile Ansys Fluent paket programında 3 boyutlu yapılan modelin merkezindeki sıcaklık dağılımları karşılaştırılmıştır. Sonuçlarda benzerlik görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Isı ve kütle transferi, Ansys Fluent, Comsol, Kurutma, Fick ve Fourier denklemleri, doğrulama

2014, x + 108 sayfa

ABSTRACT

MSc Thesis

MATHEMATICAL MODELLING OF SIMULTANEOUS HEAT AND MASS TRANSFER IN POROUS MATERIALS

Burak TÜRKAN

Uludağ University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Prof. Dr.Akın Burak ETEMOĞLU

In this study, convective drying process of wood material with rectangular shape was examined. First of all, Navier Stokes equations were solved by using ANSYS Fluent 14.5 programme for the flow field. Later average heat transfer coefficient on surface was accounted by using Standart k- ϵ Model among Turbulence Models. It was found mass transfer coefficient with relationship between heat and mass transfer. Simultaneous heat and mass transfer equations were solved with Comsol 4.3a programme using boundary conditions at the surface dependent on time parameters like air speed, temperature, material thickness and material moisture proportion. The mathematical model for equations was based on Fourier heat model and Fick diffusion model. Moisture and temperature distributions inside the solid were predicted via time for two hours later. Model validation was compared with 6 different numerical and experimental studies found literature. (Haiqing et al. 1999, Younsi et al. 2006, Chang and Petersen 1986, Liu and Cheng 1991, Kocaefer et al. (numerical and experimental 2007)). The results were found to be in good agreement. Moreover (200 second later) temperature distributions found Comsol programme and Ansys Fluent programme for 3D model were compared. A considerably high agreement was found from results.

Key words: heat and mass transfer, Ansys Fluent, Comsol, drying, Fick and Fourier equations, validation

2014, x + 108 pages

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam boyunca destek ve yardımlarını hiç esirgemeyen ve her zaman yoğun iş temposuna rağmen yanımda olan çok değerli danışman hocam, aynı zamanda Mühendislik Fakültesi Dekan Yardımcısı olan sayın Prof. Dr. Akın Burak ETEMOĞLU'na çok teşekkür ederim.

Çalışmamın her aşamasında yanımda olan, maddi ve manevi olarak desteğini gördüğüm, ilminden ve değerli görüşlerinden istifade ettiğim çok değerli hocam sayın Prof. Dr. Muhiddin CAN'a çok teşekkür ederim.

Lisans eğitimim boyunca sıkıntılı zamanlarımda da destek ve moral vermiş olan ve bu süreçte de ayrıca yazdığım tez için nümerik çözüm konusunda desteğini aldığım değerli hocam sayın Yrd. Doç. Dr Erhan PULAT'a ve Comsol programını temin etmem konusunda bana yardımını esirgemeyen Elektronik Mühendisliği Bölümü hocası sayın Prof. Dr. Ali OKTAY'a teşekkür ederim.

Ayrıca Termodinamik ve Enerji Anabilim Dalındaki tüm hocalarımıza özellikle Rektör Yardımcısı sayın Prof. Dr. İrfan KARAGÖZ'e, Bölüm başkanımız sayın Prof. Dr. Recep YAMANKARADENİZ'e ve sayın Prof. Dr. Atakan AVCI'ya teşekkür ederim.

Yüksek lisans eğitimime başladığım ilk günden bu yana her zaman maddi ve manevi olarak yanımda olan yakınlığını hissettiren, güç ve destek veren, beni asla yalnız bırakmayan değerli hocam sayın Arş. Gör. Fuat TAN'a çok teşekkür ederim.

Özellikle manevi desteğini hiç esirgmeden veren ve tez çalışmam boyunca sabır ve anlayışını sürdüren değerli yol arkadaşım sayın Arş. Gör. Ahmet Serhan CANBOLAT'a, başta tez dönemi olmak üzere her zaman verdiği moral ve desteğinden dolayı sayın Arş. Gör. Celalettin YÜCE'ye ve sayın Arş. Gör. Çağlar KAHYA'ya çok teşekkür ederim.

Figes A.Ş. de çalışan Makine Mühendisi Ebubekir BEYAZOĞLU'na Fluent eğitiminden dolayı teşekkür ederim.

En zor zamanlarımda moral vererek desteğini hiç esirgemeyen ve her zaman yanımda olan Yenişehir İbrahim Orhan Meslek Yüksekokulu'nda Öğretim Görevlisi Yüksek Makine Mühendisi sayın Esra ÖZDEMİR'e teşekkür ederim.

Bütün hayatım boyunca olduğu gibi bu süreçte de her zaman desteklerini hiç esirgemeyen annem ve abime çok teşekkür ederim.

20/06/2014
Burak TÜRKAN

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	viii
1. GİRİŞ.....	1
2. KAYNAK ÖZETLERİ (GENEL BİLGİLER).....	3
2.1. Literatürde Yapılan Çalışmalar.....	3
2.2. Kurutma Hakkında Genel Bilgi.....	10
2.2.1. Difüzyon.....	13
2.2.2. Ağaç Malzemesinin Kurutma Yöntemleri.....	15
2.2.2.1. Teknik Kurutma.....	16
2.2.2.2. Sıcak ve Nemli Hava İle Kurutma.....	16
2.2.2.3. Yüksek Sıcaklıkta Kurutma.....	18
2.2.2.4. Kimyasal Kurutma.....	18
2.2.2.5. Ozonlu Kurutma.....	19
2.2.2.6. Elektrikle Kurutma.....	19
2.2.2.7. Organik Maddeler İle Kurutma.....	19
2.2.2.8. Vakumlu Kurutma.....	20
2.2.2.9. Doğal Kurutma.....	20
2.2.3. Kurutucuların Sınıflandırılması.....	20
2.2.3.1. Temel Kurutucu Tipleri.....	20
2.2.4. Odunun Kimyasal ve Fiziksel Özellikleri.....	21
2.2.5. Ağaç Malzemesi ve Kurutma.....	23
2.2.5.1. Ağacın Teknik Özellikleri.....	24
2.2.6. Kurutma Sürecini Etkileyen Faktörler.....	28
2.2.7. Ağaç Malzemesinde Meydana Gelen Kurutma Kusurları.....	30
2.2.8. Kurutma Teorileri.....	30
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	32
3.1. Materyal.....	32
3.1.1. Eş zamanlı Isı ve Kütle Transferinin Matematik Modellemesi.....	32
3.1.1.1. Malzeme Yüzeyindeki Isı Taşınım Katsayısının Hesaplanması.....	33
3.1.1.2. Isı ve Kütle Transferi arasındaki benzeşim.....	42
3.1.1.3. Isı Transfer Teorisi.....	46
3.1.1.4. Nemli Malzemedeki Difüzyon Teorisi.....	49
3.2. Yöntem ve Model Doğrulaması.....	54
4. BULGULAR ve TARTIŞMA.....	75
4.1. 3 cm Kalınlığındaki Malzeme İçin Yapılan İşlem Adımları ve Farklı Kalınlık	

İçin Analiz Sonuçları.....	75
4.1.1. Ansys 14.5 Fluent Programında Isı Taşınım Katsayısının Hesaplanması ..	75
4.1.2. Comsol Programında Nem ve Sıcaklık Dağılımının Hesaplanması Modelleri.....	80
4.2. 3 cm Kalınlığında 40 °C Kurutma Hava Sıcaklığında ve %40 Nem İçeriğine Sahip Malzemede Farklı Hızlar İçin Analiz Sonuçları	91
4.3. 3 cm Kalınlığında %40 Nem İçeriğine Sahip ve 2m/s Hava Hızı ile Malzemede Farklı Kurutma Hava Sıcaklıkları İçin Analiz Sonuçları.....	92
4.4. 3 cm Kalınlığında 2m/s Hava Hızı ve 40°C Hava Sıcaklığına Sahip Malzemede Farklı Nem Oranları İçin Analiz Sonuçları.....	94
4.5. Ansys Fluent programında oluşturulan modele ait sıcaklık dağılımı ile Comsol programından elde edilen sonuçların karşılaştırılması	96
5. SONUÇ	99
KAYNAKLAR.....	102
ÖZGEÇMİŞ	108

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
A	Yüzey alanı (m ²)
C	Molar konsantrasyon(mol/m ³)
C _m	Nem kapasitesi
c _v	Sabit hacimde özgül ısı(J/kg.K)
c _p	Sabit basınçta özgül ısı(J/kg.K)
D _{AB}	Difüzyon katsayısı(m ² /s)
E _{adv}	Yığın akışkan hareketi (W)
e	İç enerjisi(J)
F _s	Yüzey kuvveti(N)
G	Türbülans kinetik enerjisi üretimi
h	Isı taşınım katsayısı(W/m ² K)
h _m	Kütle taşınım katsayısı(m/s)
j	Yayılm akısı(kg/s.m ²)
j _A	Yayılm mol akısı(kmol/s.m ²)
k _m	Nem iletkenliği(kg/m.s)
k	Isı iletim katsayısı (W/m ² K)
k _t	Türbülanslı eddy iletkenliği
L	Uzunluk (m)
l _m	Prandtl karışım uzunluğu
Le	Lewis sayısı
M	Mol kütlesi(kg/kmol)
m _b	Buharlaşan kütle miktarı (kg/s)
m	Kütle miktarı (kg)
M _{H2O}	Su molekül ağırlığı(g/mol)
N _A	molekül sel mutlak mol akısı (kmol/s.m ²)
Nu	Nusselt sayısı
n	Birim hacimde kütle sel akı miktarı (kg/sm ³)
\dot{Q}	Isı transferi miktarı (W)
Pr	Prandtl sayısı
P	Havanın kısmi basıncı(Pa)
Re	Reynolds sayısı
R _b	Gaz sabiti(kj/kgK)
Sc	Schmidt sayısı
Sh	Sherwood sayısı
T	Sıcaklık (K)
u	x yönündeki hız miktarı(m/s)
v	y yönündeki hız miktarı(m/s)
W _{net}	Yapılan iş(W)
ρ	Yoğunluk(kg/m ³)
σ	Normal gerilme(N)
τ	Kayma gerilmesi(N)

μ_t	Türbülanslı eddy viskozitesi(Ns/m ²)
ϕ	Sürtünme kayıpları fonksiyonu(s ⁻²)
μ	Viskozite(kg/s.m)
ε	Yayıma hızı
γ	Kinematik viskozite(m ² /s)
α	Isıl yayılım katsayısı(m ² /s)
Φ	Bağıl nem
q	Birim hacimde üretilen ısı miktarı(W/m ³)
λ	Molar buharlaşma ısısı(J/mol)

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1. Eş zamanlı ısı ve kütle transferinin şematik gösterimi	10
Şekil 2.2. Ürün nem içeriğinin kurutma süresi ile değişimi.....	11
Şekil 2.3. Ürün kuruma hızının kurutma süresi ile değişimi.....	12
Şekil 2.4. Ürün kuruma hızının nem içeriği ile değişimi	12
Şekil 2.5. Hava ile kurutma.....	16
Şekil 2.6. Isı transfer mekanizmasına göre ısı değiştiricilerin sınıflandırılması	20
Şekil 2.7. Ağaç gövdesinde enine,radyal ve teğet kesit görünüşü	22
Şekil 2.8. Ağaç malzemesinin kurutulması ve taşınması.....	24
Şekil 2.9. Odun su ilişkisi	25
Şekil 2.10. Higroskopik bir malzemenin sorpsiyon davranışı	27
Şekil 3.1. Bir yüzey üzerindeki akış karakteristiği	42
Şekil 3.2. İki boyutlu kartezyen koordinatlarda ürün geometrisi	46
Şekil 3.3. 2D axisymmetric modelin 3D kesiti	48
Şekil 3.4. Ansys programı ara yüzü	55
Şekil 3.5. Ansys çözüm süreci	56
Şekil 3.6. Cmsol programının ara yüzü.....	57
Şekil 3.7. Çalışmada kullanılan parçanın geometrisi	58
Şekil 3.8. Cmsol programında yapılan çalışmadan kesit	59
Şekil 3.9. Cmsol programında kıyaslanması yapılan geometrinin gösterimi.....	60
Şekil 3.10.135°C hava sıcaklığında 850. saniyedeki sıcaklık dağılımı (°C).....	60
Şekil 3.11.135 °C hava sıcaklığında 850.saniyedeki nem dağılımı (%)	61
Şekil 3.12.Karşılaştırılması yapılan modelin Cmsol programında geometrisi ve elemanlara bölünmüş hali	62
Şekil 3.13. Cmsol programında modelin içerisindeki sıcaklığın zamana göre değişimi.....	63
Şekil 3.14. Cmsol programında modelin içerisindeki nem içeriğinin zamana göre değişimi	63
Şekil 3.15. Modelin merkezinin sıcaklık değişimi (K)	64
Şekil 3.16. Modelin merkezinin nem oranı değişimi (%).....	64
Şekil 3.17. Odun örneğinin şematik gösterimi.....	65
Şekil 3.18. Cmsol programında karşılaştırılması yapılan modelin gösterimi.....	66
Şekil 3.19 Odun parçasının yüzey sıcaklığının zamana bağlı değişimi	67
Şekil 3.20. Odun parçasının yüzey nem içeriğinin zamana bağlı değişimi	67
Şekil 3.21 Karşılaştırılması yapılan modelin merkezinin kesitinin görünüşü.....	69
Şekil 3.22. Analizi yapılan modelin merkezinin kesitinin nem dağılımı	69
Şekil 3.23. Analizi yapılan modelin merkezinin kesitinin sıcaklık dağılımı	70
Şekil 3.24. Odun parçasının sıcaklığının zamana bağlı değişimi.....	70
Şekil 3.25. Odun parçasının nem içeriğinin zamana bağlı değişimi	71
Şekil 4.1. Ansys programı arayüzü.....	73

Şekil 4.2. Ansys programında geometrinin oluşturulması.....	74
Şekil 4.3. Ansys programında meshlemenin gösterimi.....	74
Şekil 4.4. Ansys programında yüzeylere isim verilmesi.....	75
Şekil 4.5. Ansys Fluent ara yüzü.....	75
Şekil 4.6. Ansys Fluent programında analiz sayfası.....	76
Şekil 4.7. Ansys programında CFD post çözümü.....	77
Şekil 4.9. Seçilen fiziksel denklemlerin gösterimi.....	79
Şekil 4.10. Cmsol programında girilen materyal özelliklerinin gösterimi eklenmiş test modeli.....	80
Şekil 4.11. Cmsol programında oluşturulan geometrinin gösterimi.....	80
Şekil 4.12. Cmsol programına girilen değişkenlerin gösterimi.....	81
Şekil 4.13. Cmsol programında materyalin atanması.....	82
Şekil 4.14. Cmsol programında ısı transferi için 3 ve 4 nolu yüzeyin sınır şartlarının giriş ekranı.....	82
Şekil 4.15. Cmsol programında 3 nolu yüzeyin sınır şartının girilmesi.....	83
Şekil 4.16. Cmsol programında 4 nolu yüzeyin sınır şartının girilmesi.....	84
Şekil 4.17. Cmsol programında mesh sonucunun gösterimi.....	84
Şekil 4.18. Cmsol Programında analizin sonuçlarının 3D gösterimi.....	85
Şekil 4.19. Cmsol Programında sıcaklığın zamana bağlı grafiğinin oluşturulması	86
Şekil 4.20. Cmsol programında sıcaklığın renk dağılımı şeklinde gösterimi.....	87
Şekil 4.21. Cmsol programında sıcaklığın çizgiler (contour) ile gösterimi.....	87
Şekil 4.22. 2 m/s hava hızında 40 °C sıcaklığında a-d)3cm b-e)5cm c-f)7cm kalınlığındaki ürünün 2 saat sonraki sıcaklık (°C) ve nem (%) dağılımları.....	88
Şekil 4.23. 3 cm kalınlığında 40 °C kurutma havası sıcaklığında 1 m/s ,1.5 m/s ve 2 m/s hava hızındaki ürünün 2 saat sonraki sıcaklık (°C) ve nem (%) dağılımları.....	90
Şekil 4.24. 3 cm kalınlığında 2 m/s hava hızı ve 40°C, 60°C ve 80°C kurutma havası sıcaklığındaki ürünün 2 saat sonraki sıcaklık (°C) ve nem (%) dağılımları.....	91
Şekil 4.25. 2 m/s hava hızı 40 °C sıcaklık ve 3 cm kalınlığında %40, %60 ve %80 nem içeriğine sahip ürünün 2 saat sonraki sıcaklık (°C) ve nem (%) dağılımları.....	92
Şekil 4.26. 60 °C kurutma havası sıcaklığında odun malzemesinin nem içeriğinin zamana göre değişim grafiği.....	93
Şekil 4.27. 60 °C kurutma havası sıcaklığında odun malzemesinin sıcaklığının zamana göre değişim grafiği.....	94
Şekil 4.28. 1 m/s akışkan hızı için elde edilen 200. saniyedeki sıcaklık dağılımı...	95
Şekil 4.29. 1.5 m/s akışkan hızı için elde edilen 200. saniyedeki sıcaklık dağılımı	95
Şekil 4.30. 2 m/s akışkan hızı için elde edilen 200. saniyedeki sıcaklık dağılımı...	96

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 3.1. Farklı değişkenler (sıcaklık, hız, kalınlık ve ürün nemi) için hesaplanan ısı taşınım katsayıları.....	45
Çizelge 3.2. 22°C sıcaklığındaki tavuk parçasının termofiziksel özellikleri	59
Çizelge 3.3. 30°C sıcaklığındaki elma malzemesinin termofiziksel özellikleri ..	62
Çizelge 3.4. 10°C sıcaklığındaki odun malzemesinin termofiziksel özellikleri ..	65
Çizelge 3.5. 25°C sıcaklığındaki odun malzemesinin termofiziksel özellikleri kriteri	68
Çizelge 3.6. Comsol programı ile yapılan sıcaklık değişimi için regresyon analizi	70
Çizelge 3.7. Kocaefe ve ark. (2007) deneysel çalışmalarında yaptıkları sıcaklık değişimi için regresyon analizi	71
Çizelge 3.8. Kocaefe ve ark. (2007) nümerik çalışmalarında yaptıkları sıcaklık değişimi için regresyon analizi	71
Çizelge 3.9. Comsol programı ile yapılan nem değişimi için regresyon sonuçları	72
Çizelge 3.10. Kocefe ve ark. (2007) deneysel çalışmalarında yaptıkları nem değişimi için regresyon analizi.....	72
Çizelge 3.11. Kocaefe ve ark. (2007) nümerik çalışmalarında yaptıkları nem değişimi için regresyon analizi.....	72
Çizelge 3.12. Comsol programı ile karşılaştırılan çalışmaların regresyon ve korelasyon analizi sonuçları.....	72
Çizelge 3.13. 25°C sıcaklığındaki odun malzemesinin termofiziksel özellikleri..	74
Çizelge 4.1. Comsol programına girilen materyal özellikleri.....	81
Çizelge 4.2. Comsol programında girilen değişkenlerin listesi.....	83

1.GİRİŞ

Gelişen teknoloji ile birlikte bir çok hammadde kaynağı bulunmasına rağmen ağaç malzemesi sahip olduğu üstün özellikleri ve görüntüsü nedeniyle geçmişten günümüze popülerliğini yitirmemiş, endüstride kullanımı artarak devam etmiştir. Ağacın kullanım alanının geniş olması ile birlikte, kullanım alanlarında uzun süre muhafaza edilebilmesi için içerisindeki nem miktarını gidermek üzere kurutma terimi ortaya çıkmıştır. Bu sebepten dolayı ağaç kereste halinde ilken kullanılacak ortamın nem oranına kadar kurutulması enerji israfı, ekonomik sebepler, ürün kalitesi ve çevre açısından önemlidir.

Odun özgül kütlelerine göre direncin yüksek olması, kolay işlenmesi, iyi boya ve cila tutması, sesi absorbe etmesi, ısı yalıtımı ve dekoratif özelliğinden dolayı tercih edilir. Ancak ağaç malzemesi istenmeyen özelliklere de sahiptir. Organik madde olması nedeni ile çürümektedir. Kolayca yanmaktadır. Kuru ise bünyesine su alarak, yaş ise su kaybederek boyutlarını değiştirmektedir. Arzu edilmeyen bu özelliklerin önüne geçmek için kurutma, buharlama, emprenye ve yüzey işlemleri uygulanmaktadır. Bu çalışmada ise kurutma işlemi ele alınmıştır.

Tarihte ilk kurutma işleminin ağaç malzemeye uygulandığı bilinmektedir. Kurutma işlemi için ilk olarak istifleme yöntemi ile doğal kurutma kullanılmıştır. Daha sonraları bu işlem depolama sürelerini uzatmak için gıda ürünlerine uygulanmıştır. Günümüzde ise gıda, kimya, tekstil, deri ve orman sanayisi olmak üzere birçok alanda uygulanmaktadır. Kurutma işlemi için, önceleri doğal yolla kurutma gerçekleştirilirken günümüzde ise kurutma fırınları kullanılmaktadır.

Ağaç malzemesinin kurutulmasında kullanılacağı yere uygun olması için şekil ve boyut değişiminin en az olması istenmektedir. Mobilya sanayinde odunun kullanılması için mutlaka kurutulması gerekmektedir. Doğal kurutma yapılacak ise bu günlerce sürmektedir. Uzun süre açıkta bekletmekten dolayı değer kaybı yüksektir. Ayrıca doğal kurutmada piyasa taleplerine zamanında cevap verilmemektedir. Depo yerinin temin edilmesi, düzenlenmesi, etrafının çevrilmesi, bakım ve kontrolünden dolayı masraflı olmaktadır.

Kurutma işlemi başlıca tarımsal ürünlerin depolama sürelerinin artırılmasında, orman ürünlerinin kalitesinin artırılmasında, gıda maddelerinin uzun süre korunmasında ve kimyasal ürünlerin kurutulması için neme karşı korunmasında kullanılmaktadır.

Kurutmada sıcak hava akımı kurutucuda malzeme üzerine gönderilerek ısıнын taşınım yolu ile malzemeye geçmesini sağlarken, buharlaşan suyu da ortamdan uzaklaştırır. Bu işlem havanın bağıl nemine ve sıcaklığına bağılı olarak üründe denge nemi oluşuncaya kadar devam eder.

Kuruma süresi ve hızı malzemenin yapısına, yüzey alanına, kalınlığına, kurutma havası sıcaklığına, kurutma havası hızına ve nemine bağılıdır. Son yıllarda artan enerji maliyetleri kuruma hızına etki eden bu faktörlerin matematik modeller ile etkisi belirlenip malzemenin kalitesini bozmadan, minimum enerji ile en kısa sürede kurutulmasında büyük önem taşımaktadır.

Kurutma problemleri malzemenin nem içeriğine ve sıcaklığına bağılı olarak eş zamanlı ısı ve kütle transferi denklemleri yardımı ile ifade edilmektedir. Bu problemler ürünlerin termofiziksel özellikleri ve difüzyon katsayıları gibi birçok farklı katsayı içermektedir. Kuruma süreci termofiziksel özellikleri etkilediğinden dolayı kuruma şartlarının iyi bilinmesi gerekmektedir.

Bu tez çalışmasında 2 boyutlu dikdörtgen kesitli odun malzemesine ait eş zamanlı ısı ve kütle transferi denklemleri Comsol programı yardımı ile 2D axisymmetric model esas alınarak çözülmüştür. Kanal içerisindeki akış için süreklilik denklemleri Ansys Fluent 14.5 programı yardımı ile çözülmüştür. Kurutma sürecine etki eden faktörlerden ürün kalınlığı, kurutma havası hızı, kurutma havası sıcaklığı ve ürün nem oranı değişimi incelenmiştir. Her bir değişken için 3 farklı değer alınarak ürün içerisindeki kurumunun 2 saat sonraki nem ve sıcaklık dağılımlarının nasıl değiştiği elde edilmiştir.

2. KAYNAK ÖZETLERİ (GENEL BİLGİLER)

2.1. Literatürde Yapılan Çalışmalar

Bozkurt ve Kantayı (1992) ağaç malzemenin kurutulmasını genel hatları ile açıklamışlar. Kurutmanın tarifi yapılmış amaçları ve faydaları belirtilmiş. Kurutma süresini etkileyen faktörler incelenmiş. Uygulanan kurutma yöntemleri hakkında bilgiler verilip avantaj ve dezavantajlarını açıklamışlardır.

Gündüz (1994) çalışmasında gözenekli malzeme olan odunun kurutulması işleminde eş zamanlı ısı ve kütle transferini incelemiştir. Kurutma işlemi için ısı ve kütle transferinin matematik modeli oluşturmuş ve bu modeli ağaç malzeme için uygulamıştır. Elde edilen denklemler sonlu farklar metodu kullanarak çözmüştür. Elde edilen sıcaklık ve nem dağılımları literatürdeki deneysel verilerle karşılaştırıp sonuçların uygun olduğu görülmüştür.

Güneş (1994) çalışmasında gözenekli ortamda kurutma teorilerinden literatürde en çok kullanılanı seçilerek bu teoriye ait denklemlerin sonlu elemanlar yöntemiyle çözümünü yapan bir bilgisayar programı hazırlamıştır. Konu ile ilgili teorik bilgiler ve örnekler verilmiştir. Luikov ve Whitaker teorileri karşılaştırılıp sayısal çözümü daha uygun olan Luikov teorisi esas alınıp ısı ve kütle transfer denklemleri çözülmüştür. Çalışmada ayrıca sonlu farklar ve sonlu elemanlar yöntemleri açıklanmıştır. Hazırlanan programın özellikleri tanıtılıp çalışması hakkında bilgi verilerek örnek problemler üzerinde uygulanmıştır.

Oliveira ve Haghghi (1998) gözenekli malzeme olan odunun zorlanmış taşınım ile kurutulması probleminde bir metot önermişlerdir. Gözenekli malzemelerin kurutulması analizi katı malzemenin içinde eşzamanlı ısı ve kütle transferinin incelenmesine fırsat vermiştir. Aynı zamanda odun kurutma problemlerinde de uygulanabilen metodoloji ortaya konmuştur.

Chen ve ark. (1999) düzgün tavuk parçalarının zorlanmış taşınım ile pişirilmesinde ısı ve kütle transferini hem deneysel hem de analitik olarak incelemiştir. 2D axisymmetric modeli oluşturup sonlu elemanlar analizini kullanarak Matlab 4.2c.1

paket programında çözümleri gerçekleştirmişlerdir. Ürünün içerisindeki nem ve ısı dağılımlarını zamana göre oluşturarak, bu sonuçları deneysel veriler ile karşılaştırmışlardır. Sonuç olarak elde ettikleri verileri deneysel sonuçlar ile karşılaştırdıklarında %1.2 lik bir fark ortaya çıktığını tespit etmişlerdir.

Haghi (2001) çalışmasında zorlanmış taşınım ile kurutmada gözenekli malzemede meydana gelen ısı ve kütle transferinin matematiksel modelini oluşturup sonuçları deneysel veriler ile karşılaştırmıştır. Sonlu farklar metodunu kullanarak sıcaklık ve nem dağılımını göstermiştir. Kurutmayı etkileyen parametreler (sıcaklık, havanın nemi, ürünün başlangıç nemi, ısı ve kütle taşınım katsayısı) oluşturulan matematik model ile kontrol edilmiştir.

Hussain ve Dincer (2003) çalışmalarında nemli bir 2 boyutlu dikdörtgen kesitli ürünün zorlanmış taşınım ile kurutulması sırasında eş zamanlı olarak ısı ve nem transferini sayısal olarak modellemişlerdir. 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 verilerle karşılaştırılmış ve sonuçların uygun olduğu görülmüştür.

Etemoğlu (2003) hazırlamış olduğu çalışmasında konvektif ısı ve kütle geçişini ele alarak ince kalınlığa sahip gözenekli malzemelerdeki kurutma olayını tanımlayacak bir matematik model geliştirmiştir. Geliştirilen model kumaş, mürekkep film tabakaları ve kağıt üzerinde denenmiş sıcaklık ve nem dağılımları elde edilmiştir. Farklı kalınlıktaki kumaş parçaları için deney düzeneğini kurup deneylerini gerçekleştirmiştir. Teorik sonuçlar ile deneysel sonuçların uyumlu olduğu görülmüştür. Ayrıca çarpan hava jetlerinin kullanıldığı kurutucuların tasarımına katkıda bulunmak amacıyla optimizasyon, ekonomik analiz ve ekserji analizi gerçekleştirilmiştir.

Karim ve Hawlader (2005) yılında yaptıkları çalışmada tropik meyvelerin zorlanmış taşınım ile kurutulması sırasında ısı ve kütle transfer denklemlerini çözen bir matematik model geliştirmişlerdir. Malzeme içerisindeki büzülme, nem içeriği ve difüzyona bağlı deformasyon etkilerini de incelemişlerdir. Oluşturulan model sayesinde ürün içerisindeki nem ve sıcaklık dağılımları tahmin edilmektedir. Ayrıca kurutucunun herhangi bir yerindeki nem ve sıcaklık değerinin tahmin edileceği model

geliştirmişlerdir. Tahmin edilen sonuçlar muz parçalarının deneysel olarak kurutulması ile elde edilen veriler ile karşılaştırılmıştır. Deneysel sonuçlar geliştirilen modeli doğrulamıştır.

Gu ve Hunt (2005) eş zamanlı ısı ve kütle transferi sırasında odun malzemesinin özelliklerinin değişimini gösteren model oluşturmuşlardır. 2 boyutlu sonlu eleman modeli etkili gözeneklilik ve nem içeriğinin fonksiyonu olan ısı iletkenlik katsayısının tanımlanması için geliştirilmiştir. Literatürde diğer kurulan modeller ile ısı iletkenlik katsayısı karşılaştırılmıştır. Yaptıkları çalışmadaki modelin odun malzemesindeki ısı transfer etkisinin anlaşılmasında yararlı olduğu vurgulanmıştır.

Silsüpür (2005) çalışmasında çikolata üretiminde ısı ve kütle transferinin önemine değinmiş olup çikolatanın oluşum aşamasında soğutma zamanının önemi vurgulanmıştır. Çikolata kaplamasının soğutma modellenmesi yapıp en uygun şartlar incelenmiştir.

Grzegorz ve Jacek (2006) yaptıkları deneysel çalışmada elde ettikleri sonuçları literatürden elde ettikleri 3 farklı nümerik çözüm ile karşılaştırmışlardır. Deneysel olarak 3 farklı kuruma prosesini gerçekleştirmişlerdir. Buharlaşmadan dolayı kurutucudaki havanın nem oranı değiştiği için kurutmanın ilk ve ikinci periyotları düşünülmüştür. İlk periyot kuruma parametrelerinin tanımlanmasında kullanılmış daha sonra kalan iki periyot ile kurutma işleminin tanımlanması yapılmıştır. Elde edilen deneysel sonuçlar ile nümerik olarak elde edilen sonuçlar karşılaştırılmış ve sonuçların tatmin edici olduğu görülmüştür.

Akat (2007) çalışmasında keçi derilerinin kurutulmasını deneysel olarak farklı sıcaklık ve hava hızlarında incelemiş elde edilen kurutma eğrilerine göre de kurutma performansını değerlendirmiştir. Kurutma işlemi için ürünün kalitesi, işlemin ekonomik durumu ve işlemin süresi göz önüne alınarak deneyler kontrollü bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Daha sonra kuruma süreleri karşılaştırılmıştır.

Akyol (2007) çalışmasında iplik bobininin sıcak hava ile kurutulması işlemi teorik olarak incelenmiştir. Matematiksel model oluşturulmadan önce çözümün hassaslığının incelenmesi için ters (inverse) ısı transferi problemi çözülmüştür.

İzli (2007) çalışmasında mısırın kurutulmasında etkili olan parametreleri incelemiştir. Kurutma düzeneği imal edip denemeleri 1m/s çıkış hızında 45°C, 55°C, 65°C, 75°C ve atmosfer sıcaklıklarında olmak üzere 5 farklı sıcaklık değerinde %16.4 nemden mısır için güvenli depolama nemi olan %10 değerine ininceye kadar yapılmıştır çalışmada kurutma hızı, süresi, enerji tüketimi ve maliyeti de karşılaştırılmıştır. 75°C de en iyi sonuçlar elde edilmiştir.

Dikbasan (2007) çalışmasında tasarlanan tünel tipi bir kurutucuda küp şeklinde kesilmiş elma kullanılarak farklı sıcaklık (40.1-65.3°C), farklı hava hızı (1.1-1.4-1.9-2.3-2.5 m/s) ve farklı bağıl nem (%4.6-20.5) değerleri için deneyler yapılmıştır. Sıcaklık ve nem değerleri 1 dakika aralıklarla ölçülmüştür. Hava hızı tünel çıkışında ölçülmüştür. Elde edilen verilerle kurutma eğrileri çizilmiştir. Kurutmanın daha çok azalan kuruma hızı bölgesinde olduğu görülmüştür. Elde edilen deneysel verileri literatürden alınan 14 farklı kurutma modeline uygulanmıştır. Gerekli parametreler göz önüne alınarak en ideal kurutma koşulu 53.5-65.3°C sıcaklık aralığında 2.5 m/s hava hızında ve %20.5 bağıl nemde gerçekleştiği görülmüştür.

Ceylan (2007) hazırladığı çalışmasında deneysel olarak kerestelerin kurutulması işlemini analiz etmiştir. 40°C kuru termometre sıcaklığında, 0.8 m/s hava hızında başlangıç nem miktarı 1.28 kg su/kg kuru madde olan kavak keresteleri 0.15 kg su/kg kuru maddeye kadar 70 saatte, başlangıç nem miktarı 0.60 kg su/kg kuru madde olan çam keresteleri ise aynı nem miktarına kadar 50 saatte kurutulmuştur. Kurutma esnasında kurutma havası sıcaklığının, bağıl neminin ve kerestede ki ağırlığın anlık değişimleri bir yazılım ile incelenmiştir. Daha sonra tüm ölçüm sonuçları enerji, ekserji ve kurutma süresinin analizinde kullanılmıştır.

Bakır (2007) çalışmasında çam,kayın,kavak ve ceviz ağaçlarının laboratuvar ortamında sabit hız ve sıcaklıkta kurutulması işlemlerini gerçekleştirmiştir. Her bir ağaç türünden 5 numune için nem kaybı, kuruma hızı, ısı ve kütle taşınım katsayılarının zamanla değişimi incelenmiştir. Kurutma hızı, nem miktarı, ısı ve kütle taşınım katsayısının zamanla azaldığı gözlenmiştir. Kurutma işlemlerinde önceden belirlenmiş hava hızı ve sıcaklığı kullanılmıştır.

Kaya (2008) yapmış olduğu çalışmada dikdörtgen, silindir ve küre şekilli gıda ürünlerinin kurutulmasını karakterize eden ısı ve kütle transferi denklemlerini teorik olarak çözmüştür. Ürün etrafındaki hız ve sıcaklık dağılımları ise Fluent paket programı ile yapılmıştır. Daha sonra ürün yüzeyi boyunca yerel ısı ve kütle taşınım katsayılarının değışimi belirlenmiştir. Ayrıca deneysel olarak kivi nin kurutulmasında kurutma havası hızı, sıcaklığı ve bağıl neminin kuruma davranışı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Deneyde test bölgesi yatay ve düşey olmak üzere iki farklı konvektif kurutucu kullanılmıştır.

Ljung ve ark. (2008) çalışmalarında demir parçacığının kurutulması sırasında malzeme içerisindeki ısı ve kütle transferini CFD analizi ile incelemiştirlerdir. 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 için sıcaklık dağılımları hesaplanmıştır. İterasyon hataları ihmal edilmiştir. Sonuçların daha hassas olması için ısı taşınım katsayısının gerçek değerinin kullanılması önemlidir.

Curcio ve ark. (2008) çalışmalarında bir gıda ürününün sıcak hava ile türbülanslı koşullar altında kurutulması sırasında eş zamanlı ısı ve kütle transferini teorik olarak modellemiştirlerdir. Oluşturulan kısmi diferansiyel denklemler sonlu elemanlar metodu ile çözülmüştür. Yapılan çalışma literatürden elde edilen deneysel bir çalışma ile karşılaştırılıp sonuçların uygun olduğu görülmüştür.

Bonis ve Ruocco (2008) çalışmalarında ısı ve kütle transferini Comsol 3.4 programını kullanarak incelemiştirlerdir. Kurutma havası sıcaklığının kurutma üzerine etkisini araştırmışlardır. Modeli ortalama ısı ve kütle taşınım katsayılarını kullanmadan oluşturmuşlardır. Nem içeriğine bağılı olarak programda kurutmayı tanımlamışlardır. Oluşturulan model literatürden alınan deneysel veriler ile karşılaştırılıp doğrulanmıştır. Bu modelin aynı zamanda endüstriyel kurutucularda da kullanılabileceği vurgulanmıştır.

R.Younsi ve ark. (2008) yüksek sıcaklıkta 3 boyutlu odun kurutulması işlemini hem CFD analizi ile hem de deneysel olarak incelemişlerdir. Yaptıkları çalışmada akış alanını türbülanslı kabul etmişlerdir. Ayrıca malzemedeki deformasyonlar ihmal edilmiş ve odun içinde ısı üretimi olmadığı kabulü yapılmıştır. Seçilen k-ε 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.

Çolakoğlu (2009) sonlu elemanlar analizi ile odun içerisinde nem dağılımını hesaplamıştır. Kuruma sırasındaki nem difüzyonu ve ısı iletimini Fourier yasası ile tanımlamıştır. Ansys 12 paket programı modellemede kullanılmış. Her bir odun türü için nem difüzyon katsayısı daha önce yapılan çalışmalardan alınmıştır. Odun nem içeriği %40 iken çevre havası %10 alınmıştır.

Tamme ve ark. (2010) çalışmalarında zorlanmış taşınım ile bir boyutlu odunun kurutulması sırasında sıcaklık ve nem gibi değişkenleri deneysel olarak incelemişlerdir. Daha sonra elde ettikleri sonuçları TORKSİM ver 3.1 simülasyon programı ile karşılaştırmışlardır. Kuruma işleminde deneylerle doğrulanan nem ve sıcaklığa bağlı olarak odunun nem difüzyon katsayısını tanımlamak için Fick 1. ve 2. yasalarına başvurulmuştur. Laboratuvarda elde edilen deneysel sonuçlar ile simülasyon programından elde edilen sonuçların uygun olduğu görülmüştür.

Bayhan (2011) çalışmasında nane kurutulmasını deneysel olarak incelemiştir. 2 farklı kabin tipi deney seti için kurutma sürecini etkileyen parametreler araştırılmıştır. 1. deney setinde 40-60-70 °C sıcaklık ve 0.8-1.5 m/s hava hızlarında sıcak hava ızgara altından üflenmiş, 2. deney setinde ise 60°C sıcaklık ve 0.8-1.5 m/s hava hızlarında sıcak hava ızgara üzerinde üflenmiştir. 2. deney setinde kuruma hızı daha fazla olup daha kısa sürede kuruma gerçekleşmiştir. 60°C sıcaklık ve 0.8 m/s hava hızındaki sıcak hava ile gerçekleştirilen deney sonuçları literatürden elde edilen bağıntılar üzerinde de uygulanmış ve nane için uygun model bulunmuştur.

Kumar ve ark. (2012) çalışmalarında zorlanmış taşınım ile meyve kurutulması sırasında eş zamanlı ısı ve kütle transferinin matematik modelini geliştirmişlerdir. 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 sonuçları karşılaştırılmıştır. Isı ve kütle transfer denklemleri Comsol Multiphysics 4.3 yazılımı kullanılarak çözülmüştür. Daha sonra elde edilen sonuçlar deneysel verilerle karşılaştırılmıştır.

Conti ve ark. (2012) çalışmalarında kullandıkları odun malzemesinin kurutulmasını temsil eden matematiksel modelini oluşturduktan sonra bunu yaptıkları deneylerin sonuçları ile karşılaştırmışlardır. Matematiksel modelin oluşturulmasında Simpson Modelini ve chi-square istatistiksel metodunu kullanmışlardır. Simpson modeli ortalama nem içeriğine bağlı olarak kuruma oranını ifade eder. Yaptıkları deneyde 10 mm × 20 mm × 100 mm boyutlarında 108 adet odun parçası kullanmışlardır. Odundaki nem azalmasının hızlı olmasından dolayı oluşacak hataları azaltmak için sıcaklık aşamalı olarak artırılmıştır. Elde ettikleri bu model sayesinde farklı odun sıcaklıkları için kuruma sürelerinin tahmini kolaylaşmıştır.

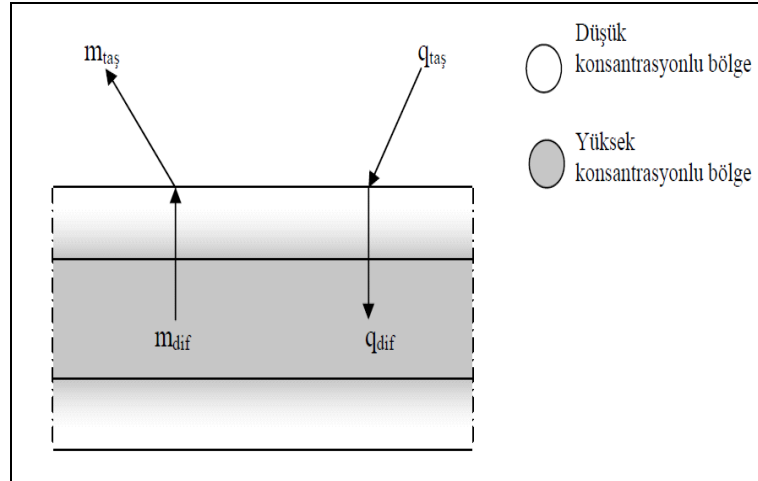
Lemus-Mondaca ve ark.(2013) 40°C den 80°C ye kadar farklı kurutma havası sıcaklıklarını kullanarak katı bir gıda ürününün kurutulmasını hem nümerik hem deneysel olarak incelemişlerdir. Ürün içerisindeki nem ve sıcaklık dağılımı 3 boyutlu ısı iletimi ve kütle difüzyonu matematik modelleri kullanılarak tahmin edilmiştir. Deneysel verilerden elde edilen nem ve sıcaklık dağılımları nümerik olarak elde edilen veriler ile karşılaştırılmıştır. Isı ve kütle taşınım katsayıları analitik model kullanılarak hesaplanmıştır. Deneysel sonuçlardan %6 ile %9 oranında belirsiz davranış ortaya koyduğu anlaşılmıştır. İstatistiksel verilere göre sonlu hacim metodunun çok iyi sonuçlar verdiği görülmüştür.

Udayraj ve ark.(2014) bir gıda ürününün nem içeriğinin tahmini için nümerik model geliştirdiler. Nem transferi nemli ürün üzerinden akan kuru havaya yüzeyden su buharlaşması sonucu iç tabakadan dış yüzeye nem difüzyonu olduğu düşünülerek modellenmiştir. Sonlu hacim metodunu kullanarak eş zamanlı ısı ve kütle transferi denklemlerinin çözümü Matlab programında A-3D kodu geliştirilerek çözülmüştür. Nemli malzeme üzerindeki akış alanı türbülanslı akış olarak kabul edilmiş olup SST k-w türbülans modeli CFD kodu kullanılarak ısı transfer katsayısının hesaplanmasında kullanılmıştır. Ürün dikdörtgen şeklinde kabul edilip kuruma davranışı üzerinde hız ve

sıcaklık etkileri incelenmiştir. Daha sonra nümerik metod deneysel verilerle karşılaştırılıp sonuçların mantıklı olduğu görülmüştür.

2.2. Kurutma Hakkında Genel Bilgi

Nemli bir malzemenin iç ve yüzey kısımlarındaki sıvının buharlaştırılarak sonuçta kuru ürün elde edilmesi işlemine **kurutma** denir. Kurutma işleminde hem ısı transferi hem de kütle transferi mekanizmaları eş zamanlı olarak gerçekleşir. Malzemedeki sıvının buharlaşması için verilen enerji neticesinde ısı transferi, malzemedeki nemin buharlaşarak kurutma havasına dahil edilmesi ile de kütle transferi meydana gelmektedir. Şekil 2.1'de görüldüğü gibi, kurutma havasından kurutma yüzeyine taşınım ile ($q_{taş}$) ısı transferi olurken, ürünün iç yüzeyine de difüzyonla (q_{dif}) ısı transferi gerçekleşir. Nem transferi ise ürünün içindeki nem difüzyonla ürünün yüzeyine (m_{dif}) buradan da kurutma havasına taşınım ile ($m_{taş}$) aktarılır. Nem, yüzeyden kılcal kuvvet ile veya difüzyon şeklinde ilerler. Kılcal kuvvetler gözenekli malzemelerde, sıvı difüzyonu ise gözenekli olmayan malzemelerde oluşur. Sıcak havanın, nemli üründeki hissedilir ve gizli ısıları alarak nemi buharlaştırması ve kendi içine dahil etmesi ile kurutma işlemi gerçekleşmiş olur. Kurutucu içerisine giren düşük nemli hava, kurutucudan nemi artmış olarak çıkar.

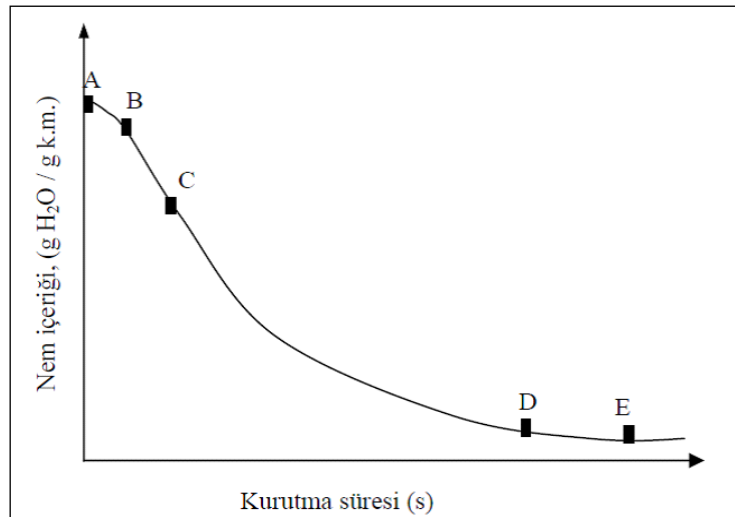


Şekil 2.1. Eş zamanlı ısı ve kütle transferinin şematik gösterimi (Kaya 2008)

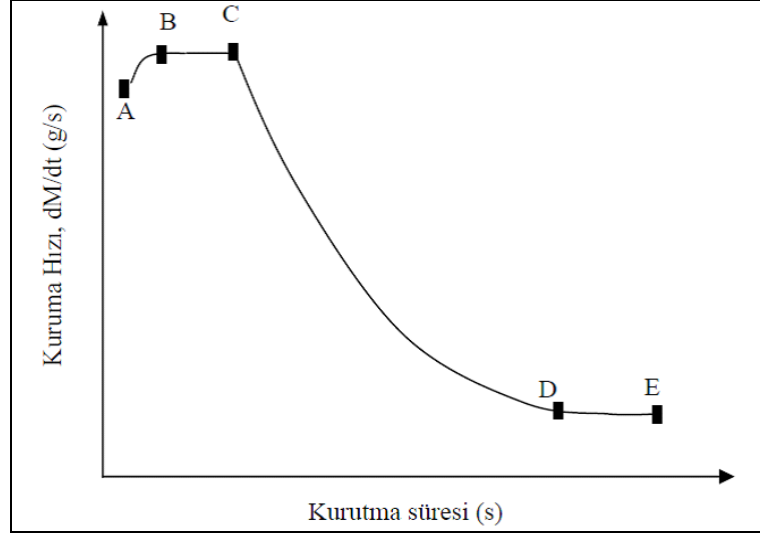
Kurutma sürecine etki eden faktörler iç ve dış olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır. İç faktörler; kurutulan ürünün termofiziksel özellikleri, parçacık boyutu, ürünün gözenekliliği, ürün yüzeyinin sertleşmesi, ürünün başlangıç nem içeriği, su aktivitesi ve

difüzyon katsayısını kapsamaktadır. Dış faktörler ise kurutma havasının sıcaklığı, hızı, basıncı ve bağıl nemi olarak söylenebilir (Dincer ve Hussain 2004).

Bu çalışmada hem dış hem de iç faktörler incelenmiştir. Kurutma havası, hızı, sıcaklığı ve ürünün kalınlığı ile gözenekliliğinin kurutma sürecine etkileri araştırılmıştır. Kurutma işleminde suyun kaynama sıcaklığının altındaki sıcaklıkta uzaklaşması gerçekleşmektedir. Buharlaşmada uzaklaştırılan su, saf su buharı iken kurutma işleminde suyun uzaklaştırılması, kurutulması istenen ürünün üzerinden geçirilen hava veya başka bir gaz karışımı ile yapıldığı için su buharı hava veya gaz karışımı ile birlikte bulunur. Nemli ürünlerin kurutulması işlemi sırasında ısı transferi ile beraber üründen ortama kütle transferi meydana gelmektedir. Malzemenin cinsine ve nem oranına bağlı olarak kütle transferi, ısı transferinden bağımsız olarak değişim göstermektedir. Birim alandan birim zamanda buharlaşma ile transfer olan su kütlesi kurutma hızını belirler. Yüzeyi su filmi ile kaplı nemli bir ürün kurutulmaya başladığında kuruma hızı su yüzeyinden buharlaşma hızına eşittir. Havanın hızı, sıcaklığı, nemi sabit kaldığı sürece kuruma hızı da değişmez. Yüzeydeki su filminin ortadan kalkmaya başladığı andaki nem Birinci Kritik Nem olarak adlandırılır. Sabit Hız Periyodu ise kritik neme düşüncüye kadar süren kurutma periyoduna denir. Malzeme içindeki mutlak nemin ve kuruma hızının zaman ile değişimi Şekil 2.2 ve Şekil 2.3'de verilmiştir.

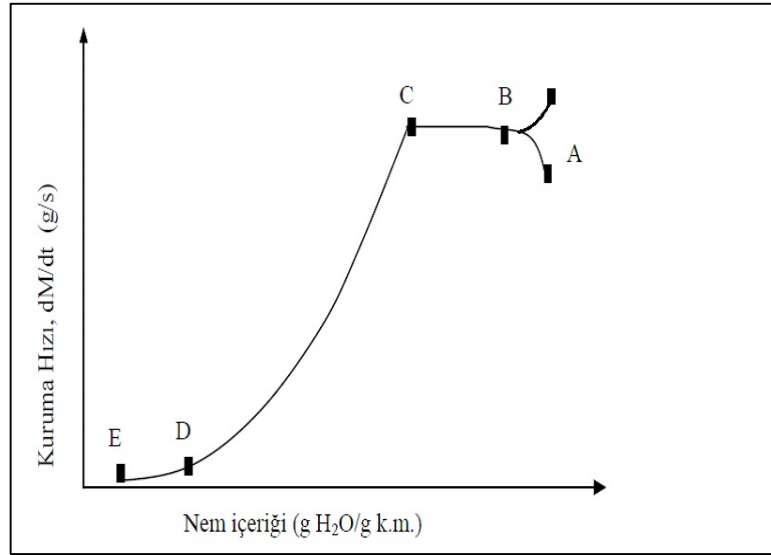


Şekil 2.2. Ürün nem içeriğinin kurutma süresi ile değişimi (Doymaz ve Demirtaş 1998)



Şekil 2.3. Ürün kuruma hızının kurutma süresi ile değişimi (Doymaz ve Demirtaş 1998)

Ürünün nem oranı zaman içinde farklı periyotlar halinde sürekli azalmaktadır. Yüzey sıcaklığı ise kurutma havasına bağlı olarak dış şartlar (hava hızı, nemi, sıcaklığı) sabit olduğu için BC aralığında sabittir. Bunun sebebi sıvının düzgün buharlaşmasıdır. BC bölgesinde ısı transferi kütle transferi ile dengelenmiş bulunmaktadır.



Şekil 2.4. Ürün kuruma hızının nem içeriği ile değişimi (Doymaz ve Demirtaş 1998)

AB: Denge noktasından önce nemli ürünün ısıtılması veya soğutulması süreci

BC: Sabit hız periyodunda sıvının kararlı buharlaşması

C : Nemli ürünün yüzeyinde kuru noktaların oluşmaya başladığı birinci kritik nokta

CD: Birinci azalan hız periyodu

D : Yüzeyin tamamen buharlaştığı kuru bölgelerin görüldüğü ikinci kritik nokta

DE: İkinci azalan hız periyodu

Bir katı madde A noktasından kurutulmaya başlandıktan kısa bir zaman sonra ‘SHP’ denilen sabit hız periyoduna girer. Bu devrede kuruma hızı sabittir ve havanın değişken olan hızı, nemi ve sıcaklığı kuruma hızını etkiler. Bu denge durumundaki katının yüzeyi bir nem tabakası ile tamamen kaplıdır ve yüzey sıcaklığı havanın yaş termometre sıcaklığına eşittir. Ancak malzemedeki nem miktarı azalmaya başlayınca kılcal boşluklardaki sürtünme direncinin artmasından dolayı iç bölgeden yüzeye sıvı transferi zorlaşmakta ve yüzey sürekli nemli kalmamaktadır. Katı ürün kurutulmaya devam edildikçe kuruma hızı sabit kalmaz ve C Birinci Kritik Nem noktasında su filmi kaybolmaya başlar. Bir süre sonra yüzeydeki su filmi tamamen kaybolur. Bu noktadan sonra kütle transferinde sürekli bir azalma gözlenmektedir. Bu periyoda Azalan Hız Periyodu denilir. D noktasına ise İkinci Kritik Nem denir. Kurutmaya devam edildikçe suyun madde içinden yüzeye olan hareket hızına bağlı olarak kuruma hızı azalmaya devam eder ve ürünün nemi kurutma havasının bağıl nemi ile dengede olduğu nem miktarına gelince hızı sıfır olur. Azalan hız periyodunda ürün yüzeyinde kurulukların oluşması ve yüzey sıcaklığının çok artması sonucu üründe yapı ve kalite bozuklukları görülmektedir. Kritik nem değerinin aşılması sonucu higroskopik nem kaybı meydana gelir. Tekstil ürünlerinde bu yüzden kritik nem değerinin aşılmadığı BC bölgesinde kurutma işleminin yapılması tercih edilmektedir.

Kritik nokta denmesinin sebebi, kurutma işleminde katı içindeki sıvının içeriden yüzeye karşı gösterdiği iç direnç ile kurutma miktarını sınırlandırmasıdır. Bu noktadan sonra yüzeyde buharlaşma meydana gelir ve kuruma miktarı azalır. İkinci kritik noktada ise yüzey tamamen buharlaşır. Azalan hız periyodunda yüzeye transfer edilen ısı sıvının buharlaşması için gereken enerjiyi aşar. Yüzey sıcaklığı kuru termometre sıcaklığına yaklaşır. Sonuç olarak kütle transferi azalır ve denge nemine ulaşılır.

2.2.1. Difüzyon

Difüzyon konsantrasyon farkından kaynaklanan moleküllerin çok yoğun ortamdan az yoğun ortama hareketidir. Katı ürünün kurutulması sırasında sıcak hava ile ürünün

yüzeyinde oluşan su buharının hava içerisine yayılması difüzyona bir örnek olarak verilebilir. Burada yüzeydeki konsantrasyon havanın konsantrasyonundan fazla olduğu için moleküllerin hareketi havaya doğru olmuştur.

Isı İletimi Denklemi:

$$\dot{Q}_{cond} = -kA \frac{T_1 - T_2}{L} \quad (2.1)$$

Kütle Difüzyonu Denklemi:

$$\dot{m}_{yayınım} = \rho D_{AB} A \frac{w_{A,1} - w_{A,2}}{L} = D_{AB} A \frac{\rho_{A,1} - \rho_{A,2}}{L} \quad (2.2)$$

Isı ve kütle transferi denklemleri yukarıda verildiği gibi birbirine benzerlik gösterir. Isı iletimi denkleminde sıcaklık gradyanı kullanılırken, kütle transferinde ise konsantrasyon kullanılır. Fourier Isı İletimi Kanununda iletim yüksek enerjili moleküllerden düşük enerjili moleküllere doğru olurken, Fick Yayınım Kanunu ile moleküller yüksek konsantrasyonlu bölgeden düşük konsantrasyonlu bölgeye doğru olur. Isı iletimi denkleminde k iletim katsayısının yerini kütle transferinde D_{AB} kütle yayınım katsayısı almıştır.

a) Sıvı Difüzyon Modeli: Katı içerisindeki sıvının yüksek konsantrasyonlu bölgeden düşük konsantrasyonlu bölgeye doğru hareketi sıvının difüzyonu ile gerçekleşir. Difüzyon denklemlerini ilk olarak Lewis (1921) ve Sherwood (1929) kurutma için modellemiştir. Sıvının difüzyonu higroskopik malzemelerde malzeme içinde gerçekleşir (Roberts 1999).

b) Buhar Difüzyon Modeli: Nemli gözenekli ürünün sıcaklıkla kurutulması sırasında ürün içerisindeki nemin buharlaşarak ürünün yüzeyinden kurutma havasına aktarılması işlemidir. Kütle transferini tanımlamada difüzyon denklemleri uygulanır (Roberts 1999).

c) Kapiler (Kılcal) Akış: Gözenekli malzemelerde katı ve sıvı molekülleri arasındaki etkileşim sonucu gözenekler içindeki sıvının yüzeye doğru hareketine kılcal akış denir. Kılcal akışta sıvı konsantrasyonun fazla olduğu yerden az olduğu yere doğru akar. Kılcal akışa örnek olarak kanın canlıda dolaşımı, ağaçtaki suyun yapraklara iletimi ve suyun yer altından yüzeye çıkması verilebilir (Roberts 1999).

2.2.2. Ağaç Malzemesinin Kurutma Yöntemleri

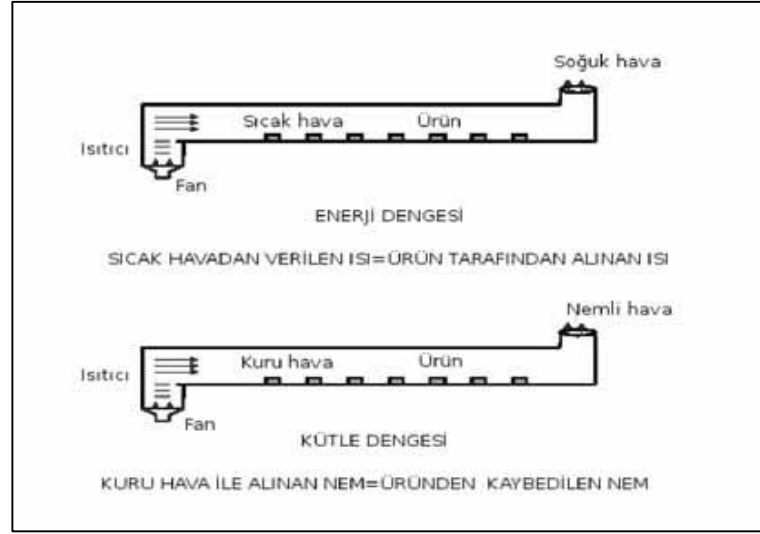
Doğal kurutmada ağaç malzeme açıkta veya istif edilerek doğal iklim şartları altında kurutulabilir. Kurutma şartlarının (sıcaklık, bağıl nem, hava hareketi) değiştirilmesi ile yapılan kurutma fırınlarındaki kurutma ise teknik kurutma olarak adlandırılır. Doğal kurutmada odun olumsuz çevre koşullarına uzun süre maruz kaldığı için hem maliyeti artırmaktadır hem de istenilen şartlarda ürün kısa zamanda elde edilememektedir. Teknik kurutmada ise kurutma havası kontrol altında tutulduğu için ürün istenilen nem oranında, kısa sürede az hasarla kurutulabilir.

2.2.2.1. Teknik Kurutma

Kurutma şartlarının denetlenerek kapalı bir ortam içinde kurutma fırınları ile yapılan kurutmadır. Kurutma yöntemleri: sıcak ve nemli hava ile kurutma, kızgın buhar yada nemli hava ile kurutma, kimyasal kurutma, ozonlu kurutma, elektrikli kurutma, yüksek frekanslı akım tekniği ile kurutma, enfraruj kurutma, organik maddeler ile kurutma ve vakumlu kurutmada oluşur.

2.2.2.2. Sıcak ve Nemli Hava İle Kurutma

Klasik kurutma fırınları kurutma odası ve kurutma tüneli olarak iki farklı çeşitten oluşmaktadır. Kontrol panelleri ile kurutma havasının hızı, sıcaklığı, bağıl nemi istenilen değerlere getirilebilir. Isıtma sıcak su, basınç buharı veya elektrikli ısıtılan bataryadan sağlanır. Su buharı ile nemlendirme sağlanır. Havalandırma doğal veya santrifüj vantilatörler ile sağlanır. Nemlilik ise giriş ve çıkıştaki hava bacaları ile sağlanır. Aşağıdaki şekilde hava ile ürün arasındaki ısı ve kütle transferi aynı anda görülmektedir. Ürün içindeki nemin buharlaştırılması için gerekli olan gizli ısı hava tarafından sağlanır ve buharlaşan nem üründen hava vasıtasıyla uzaklaştırılır.



Şekil 2.5. Hava ile kurutma (Bingöl ve Devres 2009)

Fırında ısıtma, kurutma, dengeleme ve soğutma olmak üzere 4 ayrı periyot vardır. İstenilen nem oranında ürünü elde etmek için kurutma programları kullanılır.

a) Isıtma Periyodu: Kurutma olmadan ısıtma periyodu derin ısıtma, yüzeysel ısıtma, ön ısıtma olmak üzere üç aşamadan oluşur. Derin ısıtmada sıcaklık kurutma periyodunun ilk basamağında uygulanan sıcaklıktan 9-10°C daha fazla ısıtılır. Yüzeysel ısıtmada sıcaklık 5°C lik kademeler ile artırılarak kurutma periyodunda uygulanacak ilk sıcaklığa yükseltilir. Ön ısıtmada buhar püskürtmeden ısıtılan ortamın sıcaklığı 30°C ye yükseltilir.

b) Kurutma Periyodu: Kurutulacak ağacın türüne ,kalınlığına ve kurutma kalitesine uygun olarak higroskopik denge eğirilerinden alınan denge nemine göre istenen sonuç neminin %1-3 kadar altındaki nem oranına kadar kurutulur.

c) Dengeleme Periyodu: Kurutma işlemi sonunda odadaki nem dağılımı homojen olmadığı için fırında odunun orta kısımlarının kurutulması ve yüzey kısımlarının bir miktar nem alması için sıcaklık sabit tutularak nem yükseltilmesi sürecidir.

d) Soğutma Periyodu: Kurutma işlemi biter bitmez ürün fırından hemen çıkartılmamalıdır. Eğer hemen çıkartılırsa özellikle üründe çatlama meydana gelebilir. Bu yüzden ısıtma sonlandırılarak hava kurutmadaki ilk sıcaklığına kadar vantilatörler çalıştırılır. Daha sonra ürün bekletmeye alınabilir.

Kurutma sırasında ürün ile ısıtma yapılan ortam arasındaki ısı transferi ve havanın termodinamik koşulları kuruma hızını etkiler. Bu iki parametreyi kısaca açıklamak gerekirse (Nonhebel ve Moss 1971);

Isı transferi;

- Kurutulan nemli ürünün ısı iletim katsayısı
- Kurutulan ürünün yüzeyi ile ortam arasında gerçekleşen ısı transferi
- Ürün içerisindeki sıvıya olan ısı transferi
- Ürün içerisindeki sıvının ısı iletim katsayısı ve gizli ısı kapasitesi

Havanın termodinamik koşulları;

- Ürün yüzeyindeki havanın bağıl hızı
- Havanın kuruma sırasındaki bileşimindeki değişimi
- Havanın basıncı
- Havanın sıcaklığı

2.2.2.3. Yüksek Sıcaklıkta Kurutma

100 °C ve üzeri sıcaklıklarda yapılan kurutma işleminde nemli hava ve kızgın buhar ile kurutma işlemi yapılır. Nemli hava kullanılan fırınlarda hava giriş ve hava çıkış bacaları olduğu halde kızgın buhar kullanılan fırınlarda baca yoktur. Kereste kalınlığına ve nemine göre kuruma süreleri 15-45 saat olarak belirlenir. Nemli hava kullanılırsa sistemde ısıtma, kurutma, dengeleme ve soğutma periyotları aynen uygulanır. Kızgın buhar odundaki suyu kısa zamanda buharlaştırarak absorbe eder.

2.2.2.4. Kimyasal Kurutma

Meşe, kayın, gürgen gibi kurutma sırasında yüzeyinde çatlak oluşan ağaç türlerinin yüzeyindeki nemi artırmak için kimyasal maddelerin kullanılarak sıcak ve nemli havada kurutulmasıdır. Odun yüzeyi tuz ile kaplandığında buhar basıncı ortamın buhar basıncının altına düşünceye kadar odun nemini ortama vermez. Odun içindeki suyun buhar basıncı yüzeydeki tuzlu suyun buhar basıncından fazla olduğu için difüzyonla su iç kısımlardan yüzeye doğru hareket eder. İç kısımlar kururken yüzey nemli kalır. Daha sonra yüzeydeki nem tuzlu suyun buharlaşma basıncına uygun düşen bağıl nem

değerine ulaşınca kadar buharlaşma devam eder. Düşük bağıl nemde yüksek nem içeren odun yüzeyinin kurutulması sırasında böylece hem çatlak oluşumu engellenmiş, hem de kuruma süresi kısaltılmış olur. Ortamın bağıl nemi kimyasal maddenin taşıdığı nem değerinde fazla ise madde ortamın nemini alırken, tam tersi durumda ise ortama nem verirler.

2.2.2.5. Ozonlu Kurutma

Sıcaklığı 30 °C olan 1 m³ hava için 5 dakikalık ara ile 0.2 gr ozon ile kurutma havasına gönderilmesidir. Ozon sıcak havada elektrik etkisi oluşturarak su buharını kabinde askı halinde yoğunlaştırdığından dolayı ürün yüzeyinde sertleşme kusuru oluşturmaz. Ozonlu kurutmanın uygulanması hem zor hem de odunun mekanik özelliklerini olumsuz etkiler.

2.2.2.6. Elektrikle Kurutma

a) Alternatif Akım ile Kurutma:İki metal levha arasına yerleştirilen keresteye akım verildiğinde (+) kutba bağlı kısımlar ısınırken (-) kutba bağlı kısımlar soğur. Dolayısı ile odunun nemi (-) kutup yüzeylerinde birikir. Bu yüzeylerden hızlı bir buharlaşma gerçekleşir. Elektrik akımı ile buharlaştırma işlemi kolaylaştırılmış olur.

b) Yüksek Frekanslı Akım İle Kurutma:Frekans ile odunun sıcaklığı dakikada 100 °C nin üstüne çıkar. Yüksek frekanslı kurutmada ısıtma süresi kereste kalınlığına bağlı değildir. Orta kısımların sıcaklığı yüzeylerden fazla olduğu için sıcaklık eğimi ,sıcak hava ile ısıtmanın aksine nem eğimi ile aynı yönlü oluşur. Yüksek frekanslı akım ile kurutmada kondansatörün levhaları arasında keresteler sabit tutuluyorsa statik metot ve kurutma kabininde hareket ettirildiği dinamik metot olmak üzere iki farklı uygulaması vardır.

c) Kızılötesi Işınım İle Kurutma:Kızılötesi ışınım kaynağı olarak neonlu, cıva buharlı, tungsten, kömür flamanlı lambalar ve kurutma amacı ile 1.3 – 1.6 µ dalga boylu ışınımlar kullanılır. Kızılötesi ışınımına maruz kalan malzemenin iç kısımlarındaki su moleküllerini kısa sürede ısıtılır ve yüzeye doğru sıcaklık artışı gözlenerek kuruma hızlandırılmış olur. Ağaç malzemenin nemi arttıkça daha fazla kızılötesi ışınımı absorbe eder. %10 nemde ağaç malzeme işlenen yerlerde genellikle kullanılır.

2.2.2.7. Organik Maddeler İle Kurutma

a) **Organik Madde Buharı İle Kurutma:**Kaynama noktası 100°C den fazla olan zararsız ve su ile karışmayan ksilen,tolüen gibi organik maddeler kurutulmak istenen malzemeye gönderilir. Sıcak buhar soğuk olan kereste yüzeylerinde yoğunlaşır ve açığa çıkan ısı odundaki suyu ısıtarak buharlaştırır. Daha sonra kondansatörde yoğunlaştırılan su ile odunun nemi kontrol edilir.

b) **Yağlı Organik Maddeler İçine Daldırma:**Telgraf, köprü gibi yerlerde kullanılan iğne yapraklı ağaç odunları yağlı organik madde bulunan kazan içerisine atılarak sıcaklık kaynama noktasına yükseltilir. Odundan buharlaşan su dışarı atılarak kondansatörde yoğunlaştırılır. Nem oranı %30 olunca işlem durdurulur.

c) **Organik Çözücüler İle Kurutma:**Kaynama noktası 100 °C nin üstünde veya altında olan organik çözücüler ile odunda bulunan reçine ve yağlı malzemelerin dışarı atılmasıdır.

2.2.2.8. Vakumlu Kurutma

Keresteden suyun buharlaşması vakum ortamında çok hızlı olduğundan ve buharlaşma düşük sıcaklıklarda gerçekleştiği için vakumlu kurutma yüksek sıcaklıklardaki kurutma işlemine eşdeğerdir.

2.2.2.9. Doğal Kurutma

Kerestenin açık havada denge nemine ulaşmaya kadar bırakılmasına doğal kurutma denir. Doğal kurutmada sıcaklık ve bağıl nem üzerinde değişiklik yapılamaz. Ancak kerestenin güneş ışınlarına direk olarak maruz kalması ile kereste istifleri arasındaki nemli havanın birikmesi önlenemez. Kereste etrafındaki hava enerjisini odundaki suyu buharlaştırmaya harcadığından dolayı soğur. Nemliliği artan hava hafiflediği için yükselme eğilimindedir. Ancak soğumanın ağırlaşmaya etkisi nemin artmasından oluşan hafifleşmenin etkisinden fazla olduğu için nemli ve soğuk hava istifin altında toplanır. Eğer istifin altı iyi havalandırılmazsa mantar oluşabilir. Doğal kurutmada kurutma yeri, seçimi kerestelerin düzenlenmesine dikkat edilmesi gerekir.

2.2.3. Kurutucuların Sınıflandırılması

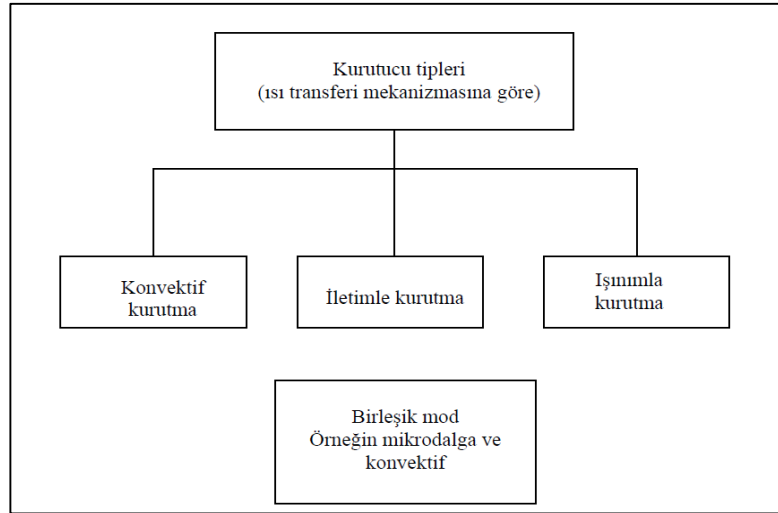
Kurutucu seçiminde dikkat edilmesi gerekenler aşağıda verilmiştir:

- Kurutulacak malzemenin fiziksel özellikleri
- Ürünün kuruma özellikleri
- Maddenin kurutucu içerisindeki akışı
- Ürünün kalitesi
- Geri kazanma durumu
- İşletme tesisi imkanları

2.2.3.1. Temel Kurutucu Tipleri

Gıda, ağaç ve tekstil gibi endüstride kurutma işlemleri çok önemli bir yer tutmaktadır. Yukarıda saydığımız özellikler kurutucu seçiminde enerji tasarrufu için göz önünde bulundurulmalıdır. Endüstride yaygın olarak 200'den fazla kurutucu kullanılmaktadır, bunlarda sadece 20 kadarı temel kurutuculardır (Baker 1997).

Isı transfer mekanizmasına göre temel kurutucu tipleri; konvektif kurutma, iletimle kurutma, ışınlı kurutma ve bunlardan birkaçının kullanıldığı birleşik kurutma olarak sınıflandırılabilir (Şekil 2.6).



Şekil 2.6. Isı transferi mekanizmasına göre temel kurutucuların sınıflandırılması (Baker 1997)

a) Konvektif Kurutma : Konvektif kurutmada ısı sıcak gaz (hava) tarafından katı ürün ile temas ettirilerek buharlaşma sağlanır. Isı sıcak gazdan ürüne verilmektedir. Kullanılabilirliğin kolay olmasından dolayı konvektif kurutma genellikle tercih edilir.

b) İletimle Kurutma: İletimle kurutmada ısıtma ,ürünün sıcak yüzeyleri ile temas ettirilerek iletim yolu ile içerisindeki nemin buharlaştırılması işlemidir.

c) Işınım ile Kurutma: Işınım ile kurutmada ihtiyaç duyulan enerji belli frekans ve dalga boyundaki ışınımın kurutulmak istenen yüzey üzerine gönderilmesi ile gerçekleşir.

Kurutma prosesinde işlem sırası kısaca şu şekilde özetlenebilir:

- Isıtılan hava kurutma yapılacak ürün üzerine gönderilir.
- Ürünle temas eden sıcak hava soğur ve bu sırada üründen buharlaşan nem havaya karışır
- Nemli ve soğuk hava sistemden dışarı atılır.

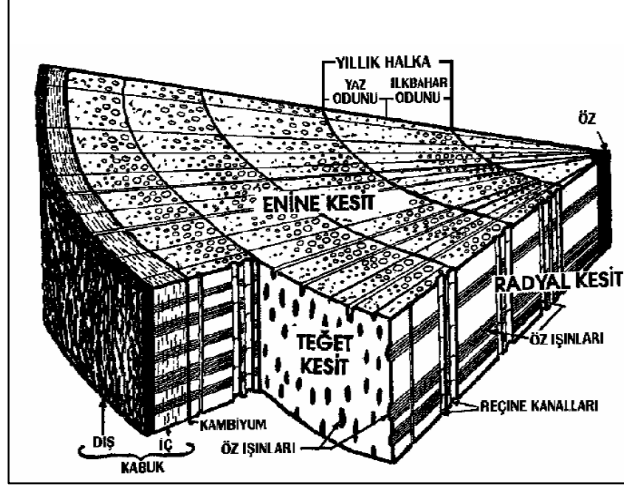
2.2.4. Odunun Kimyasal ve Fiziksel Özellikleri

Odun bileşimi esas itibari ile C, H ve O' den oluşmaktadır ve çok az miktarda da N, kül içermektedir. Ilıman kuşak ağaçlarında kül miktarı %1 kadar iken tropikal bölge ağaçlarında %2'den fazla olabilmektedir. Ilıman kuşak ağaçlarında kül miktarı %0.1-0.5 kadar iken tropikal bölge ağaçlarında %2 den fazla olabilmektedir. Kül miktarı genel olarak yapraklı ağaç odunlarında iğne yapraklı ağaç odunlarından daha fazladır. Odunun esas kimyasal bileşimleri selüloz, lignin, nişasta ve yağlar, sepi maddeleri, boyalı maddeler, eterik yağlar ve reçineden oluşmaktadır. Odun içerisinde doğal olarak bulunan veya sonradan oluşmuş bu maddeler kurutma sırasında sıcaklık ve su buharının etkisi ile bazı kimyasal değişmelere uğramaktadır.

İğne yapraklı ağaç kerestelerinin yüksek sıcaklıkta kurutulması sırasında yüzeylerinde ince sert bir tabaka kalarak işlenmesi zorlaşmakta ve yüzey işlemleri yapılamamaktadır. Bu sebepten dolayı sıcaklığın bu türlerde 70°C'nin üstüne çıkartılmaması gerekmektedir (Luikov 1966).

Odun düşük sıcaklıklarda ve düşük konsantrasyondaki kimyasal maddelere karşı dayanıklı olduğundan kimyasal madde depo ve tanklarının yapımında kullanılabilir.

Düşük konsantrasyondaki asitlere karşı dayanımı bazlara dayanımından daha yüksektir. Odunun direncine kimyasal madde çeşidi, konsantrasyon, sıcaklık, zaman ve ağaç türü etkiler.



Şekil 2.7. Ağaç gövdesinde enine,radyal ve teğet kesit görünüşü (Örs 2001)

Ağaç gövdesi fiziksel olarak enine, boyuna radyal ve boyuna teğet olmak üzere birbirinden farklı 3 kesitten oluşmaktadır. Bu kesitler Şekil 2.7’de gösterilmiştir.

Ağaç gövdesinin enine kesitinde 2 kısım göze çarpar. Bunlar kabuk ve odun kısımlarıdır. Odun kısmı kabuğun hemen altından başlar ve öze kadar devam eder. Bu kısımda yıllık halkalar, bir yıllık halka içerisindeki ilkbahar odunu ve yaz odunu, öz ışınları, diri odun, öz odun, olgun odun ve reçine makroskopik olarak incelenebilmektedir. Dış kısmında bulunan kabuk suyun buharlaşmasını engelleyerek kuruma hızını azaltmakta ve kuruma süresini uzatmaktadır.

Ağacın orta kısmında öz odun etrafında yıllık odun halkalarının ilkbaharda oluşan açık renkli kısımları ilkbahar odunu olarak isimlendirilir. İlkbahar odunundaki hücre boşlukları geniş ve çeperleri incedir. Yaz odunu ise şekilden de görüldüğü gibi yıllık halkaların dış kısmındaki rengi koyu olan kısımdır. Buradaki hücrelerin boşlukları az ve hücre çeperleri kalındır. Diri odun ise gövdenin dışında enine kesiti üzerinde bulunan açık renkli kısma verilen isimdir. Öz odun ise gövdenin iç kısmında bulunan ağaca destek veren koyu renkli kısım olarak isimlendirilmiştir.

Ağacın enine kesitine dikkat ettiğimiz zaman özden çevreye yayılan parlak ,ince veya kalın öz ışınlar görülmektedir. Bu kısım çatlamayı kolaylaştırıcı, radyal yönde hasara

neden olabilecek bir yapıya sahiptir. Öz ışınları radyal yönde suyun hareketini artırarak kuruma hızını teğet yöndeki kuruma hızından daha fazla artırmaktadır.

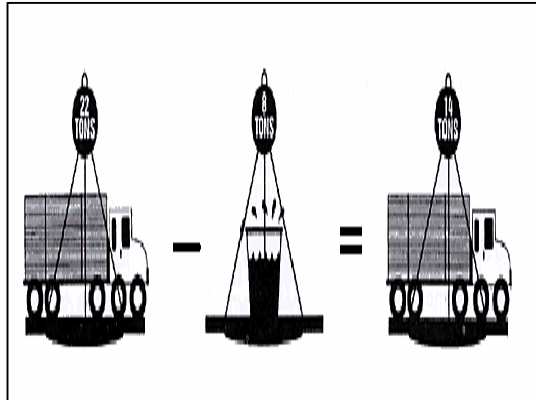
Hücre çeperi içerisinde bulunan boyalı maddeler ile odun rengini almaktadır. Odunun rengi dekoratif amaçlar için kullanıldığından önemlidir. Güneş ışını, su ,su buharı, kimyasal maddeler odunda renk değişmelerine sebep olmaktadır.

2.2.5. Ağaç Malzemesi ve Kurutma

Ağaç malzemesinin içerdiği nemin istenilen değerlere ulaştırılması işlemine ağaç malzemenin kurutulması denir. Suyun ağaç malzemesinden kalite düşmesini engellemek için en az hasarla uzaklaştırılması gerekmektedir. Burada amaç ağaç parçasının kullanılmak istenen ortamdaki uygun nem değerine kurutma işlemi ile getirilmesidir (Öz 1988).

Uygun bir kurutma işlemi ile;

- Dayanıklılık özelliği kazandırılır.
- Ürünün çevre havasından nem alıp vermesinden dolayı yapısında meydana gelen değişiklikler azaltılır.
- Kullanım yerinde renk değiştirmesi ve çürümesi engellenir. Kereste içerisindeki nem oranı %20'nin altına düştüğünde mantar oluşumu meydana gelmez.
- Ürünün yapışma ve tutkallama özelliği artar.
- Koruyucu maddelerle boyanırsa kabarma riski uygun nem oranında azaltılmış olur.
- Ürün ağırlığı azaltılır. Taşımacılıkta nakliye bedeli düşürülmüş olur.



Şekil 2.8. Ağaç malzemesinin kurutulması ve taşınması (Turner 2000)

2.2.5.1. Ağacın Teknik Özellikleri

a) Özgül Kütle: Ağaç malzemenin özgül kütlesi (ρ) ürünün kütlesinin (m) hacmine (V) bölünmesiyle bulunur. Özgül kütle ağaç malzemenin kurumasının zor veya kolay olup olmadığı hakkında bilgi verir. Çünkü ağaç malzemesinin işlenmesi, bükülmesi, sertliği aşınmaya karşı dayanımı gibi mekanik ve fiziksel özellikler yoğunluk ile ilişkilidir. Mekanik ve fiziksel özellikler ile özgül kütlede ağacın özelliklerinin belirlenmesinde önemlidir. Ağacın özgül kütlesi arttığında ürün içindeki suyun difüzyonu güçleştiğinden dolayı kuruması yavaşlar. Özgül kütlesi yüksek olan ağaç türlerinde kurutma kusurları daha fazla görülür.

b) Ağaç Malzemenin Nemi:Uzun süre suda bırakılan odun içindeki bütün boşluklar su ile dolar bu haldeki oduna tam yaş hal denir. Kurutma yapılan odunun ağırlığı değişmez hale gelinceye kadar suyun buharlaştırılmasıyla elde edilen hale tam kuru hal denir.

Kurutma işleminin sağlıklı bir şekilde yapılabilmesi için üründeki suyun miktarının bilinmesi gereklidir. Ağacın nemi (X) ağaç içindeki su miktarının kuru haldeki ağırlığına oranı olarak tarif edilir.

$$X = \frac{m_s}{m_k} \quad (2.3)$$

X : Malzemenin kuru baza göre nem oranı, kg nem /kg kuru madde

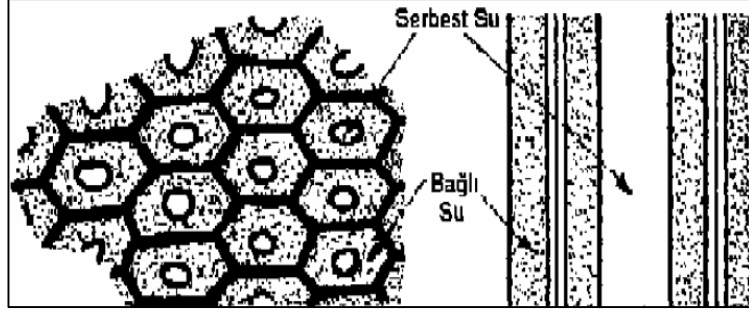
m_s : Malzemenin içerdiği nem miktarı, kg

m_k : Malzemenin kuru kütlesi, kg

Odun malzemenin neminin bulunmasında nem ölçerler kullanılır. Lif doygunluğunun altında nem ölçmek mümkündür. Lif doygunluğunun üstünde ise kaba bir ölçüm söz konusudur. Odun içerisindeki nem dağılımı ürünün içinde homojen dağılım göstermez. Ürünün başlangıç neminin doğru olarak bulunabilmesi için test edilen birkaç numunenin nemi bulunarak ortalamasının alınması gerekmektedir (Nyle 1999).

c) Lif Doygunluğu Rutubeti :Ağaç malzeme içerisinde su iki şekilde bulunmaktadır. Eğer su hücre boşluklarında bulunuyorsa serbest su ,hücre çeperleri içinde bulunuyorsa

higroskopik su olarak isimlendirilir. Lif doygunluğu rutubeti malzeme içerisinde serbest suyun bulunmadığı fakat higroskopik suyun en fazla bulunduğu haline denir. Serbest su üründen kolay uzaklaştırılırken higroskopik su güç ve yavaş uzaklaşmaktadır. Kurutma işlemi sırasında önce serbest su daha sonra higroskopik su buharlaşır (Şekil 2.9).



Şekil 2.9. Odun su ilişkisi (Bakır 2007)

Kurutulacak olan ağaç türünün lif doygunluğu rutubet değerinin bilinmesi aşağıdaki nedenlerden dolayı önemlidir.

- Ağaç malzemesinin boyutlarında meydana gelen değişimler lif doygunluğuna ulaştıktan sonra başlar.
- Kurutma sırasında lif doygunluğu üstündeki nem derecesindeki üründe suyun kolayca hareketi nedeniyle kuruma sabit ve hızlı seyrederek. Lif doygunluğunun altında ise hız düşer ve yavaşlar. Kurutma hızının düştüğü lif doygunluk noktasının altına düşüldüğünde kurutulmuş ağaç türü için en yüksek sıcaklık değerine çıkılması gerekir (Kantay 1993).

Lif doygunluğu rutubeti her ağaç türü için farklı olup ortalama %25-35 arasında değişmektedir. Pratikte bütün ağaçlar için %28 kabul edilmektedir (Öz 1988).

d) Ağaç Denge Rutubeti: Ağaç malzemesinin denge nemini açıklamak için öncelikle ağaç malzemesinin bünyesine su alıp almadığını incelememiz gerekir. Ürünler barındırdıkları nem özelliklerine göre higroskopik ve higroskopik olmayan maddeler olarak ikiye ayrılırlar. Higroskopik malzemeler ağaç, organik ürünler v.b. gibi bünyesine su alabilen maddelerdir. Ürünün çevresi ile higroskopik bir denge oluşturması havanın sıcaklığı ve nemine bağlı olarak değişmektedir. Ürünün nem oranı kurutma havasının nem oranı ile dengede olmadığı takdirde ürün bünyesine su almakta

veya vermektedir. Bu duruma sebep aynı zamanda malzemedeki suyun kısmi basıncının çevre havasının su buharı basıncından farklı olması olarak da söylenebilir. Bu malzemeler ancak denge nem içeriğine ulaşıncaya kadar kurutulabilirler.

Higroskopik olmayan maddeler ise kum, kil, cam v.b. gibi bünyelerinde su içermeyen maddelerdir. Malzeme içindeki suyun kısmi basıncı ile havadaki suyun buhar basıncı birbirine eşittir. Kurutma işlemi sırasında denge neminde kurutma yapılan hava sıcaklığı ve bağıl nemine bağlı olarak kuru ürün en az nem miktarına sahiptir. Higroskopik maddeler sadece denge nem içeriğine sahiptir (Roberts 1999).

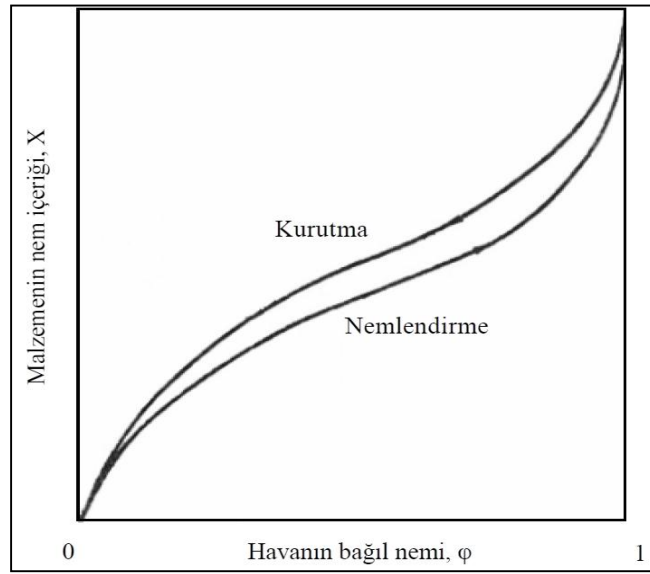
Malzemelerde bulunan boşluklardan dolayı yapıları gözenekli olarak isimlendirilmektedir. Bu boşluklar su veya hava ile dolu olabilir. Kapilerite kanunları odun gibi higroskopik gözenekli malzemelerde geçerlidir.

Gözenekli malzemelerde eğer gözenek çapı 10^{-7} m'den daha küçük ise malzemeye kapiler gözenekli malzeme ,bu ve bu değerden büyük olan malzemelere gözenekli malzemeler denir. (Mujumdar 1995)

Ağaç malzemesinin nemlendirilmesi yada kurutulması olayları sırasında ağacın boyutlarında genişleme ve daralma meydana gelmesine ağacın çalışması denir. Ağacın çalışması genellikle %0-%30 nem oranları arasında gerçekleşir. Ağacın çalışması sırasında meydana gelen çatlama, çarpılma gibi yapı bozukluklarını önlemek için ağaç malzemesinin kullanılacağı yerin nem ve sıcaklık değerleri ile dengede olabileceği nem değerine kadar kurutulması gerekir. Çevre havasının nemi ile ağacın nemi arasındaki oluşan dengeye higroskopik denge veya ağaç denge rutubeti denir (Kaya 2008).

Ürünün nem içeriği X ile havanın bağıl nemi ϕ arasındaki ilişki sorpsiyon eğrisi olarak bilinmektedir. Kuru ürünün çevreden sıvı almasına absorpsiyon (nemlendirme) , yaş malzemedeki sıvının çekilmesine desorpsiyon (kurutma) denir. Her ikisi beraber olarak sorpsiyon eğrisinde gösterilir. Buharlaştırma ve yoğunlaşma olayları malzemenin iç yapısında meydana geldiğinden dolayı desorpsiyon ve absorpsiyon eğrileri farklı olur. Absorpsiyon eğrisinde kuru odun belli bir bağıl nem ve sıcaklık içeren bir ortamda kurutulmaya bırakıldığında denge nemine ulaşması gözlemlenir. Desorpsiyon eğrisinde ise nemli odunun ortamın nemine bağlı olarak denge nemine ulaşması gözlemlenir. Her ağaç türünün cinsine göre belli hava koşullarında ulaşacağı denge nemi farklıdır.

Nemlendirme süreçlerini incelediğimizde ürün içindeki suyun kapiler etkisinden dolayı 3 bölgeden oluştuğunu görürüz. A öncesinde üründeki su çok sıkı bir şekilde bağlı olduğundan dolayı kimyasal reaksiyona giremeyecek kadar azdır. Bu yüzden iki eğri çakışıktır. AB arasında ise ürün içindeki su daha küçük gözeneklere hapsedilmiştir bu yüzden ürün içindeki suyun basıncı ortamın buhar basıncından farklıdır. B noktasından sonraki aşamada su artık daha büyük gözenekler içinde bulunacağından reaksiyonlar hızlanır. (Baker 1997)



Şekil 2.10. Higroskopik bir malzemenin sorpsiyon davranışı (Akyol 2007)

2.2.6. Kurutma Sürecini Etkileyen Faktörler

Kurutmayı etkileyen faktörler iç ve dış olmak üzere iki kısımda incelenir. İç faktörler; malzemenin nemi, kalınlığı, cinsi, gözenekliliği, buharlaşma yüzeyi genişliği, dış faktörler ise; kurutma havasının sıcaklığı, bağıl nemi, hızı ve kurutucu kapasitesi olarak söylenebilir.

a) Kurutma Havaının Sıcaklığı: Kurutma havası sıcaklığı arttığında ürün içerisindeki suyun viskozitesi yükselir ve daha hızlı buharlaşması ile kuruma hızı artar bunun sonucu olarak kuruma süresi kısalmır. Yüksek sıcaklıkta üründe meydana gelen değişimler istenmediğinden kurutma sıcaklığı seçiminde ağaç türü, yoğunluğu, nem ve

kalınlığı dikkate alınmak zorunludur. Yapılan kurutma işleminde kurutma süresi ve kalitesi göz önüne alınmalıdır. Aynı zamanda yüksek sıcaklıkta kurutma işlemi sisteme verilen enerji miktarını ve maliyeti artırmaktadır.

b) Kurutma Havası Hızı: Kurutma işlemi sırasında buharlaşma hızı ısı akışına, suya, ve nemli yüzey tabakasından yayılan buhar miktarına bağlı olarak değişir. Ürün üzerine gönderilen yüksek hava hızı yüzeydeki nemli tabakanın kalınlığını zamanla azaltarak ısı transferinin ve buharlaşma hızının artmasına neden olur. Kuruma hızı arttığı için kuruma süresi de kısalmaktadır (UETM 1997).

Hava hızı; ağacın iç yüzeylerindeki suyu ısıtarak yüzeye doğru olan hareketini hızlandırmaktadır. Kurutma yapılan ağacın yüzeyine çıkan nemi alarak daha sonra yeni nem alma kabiliyetine sahip olan havanın gelmesini sağlamaktadır.

Kurutma havası hızının fazla olması durumunda iç kısımlarda meydana gelen hızlı kurumadan dolayı dış yüzeye doğru su akışı bozulmaktadır. Bu nedenle malzemede çatlama gibi sorunlar ortaya çıkmaktadır. Kurutma havası hızı düşük olduğunda ise malzeme yüzeyindeki nem uzaklaştırılamamaktadır. Bu yüzden kuruma hızı belli aralıkta tutulmak zorundadır. Kurutma fırınlarında vantilatörler yardımı ile istenilen hava hızı elde edilmektedir.

Hava hareket hızı kereste kalınlığı ve nemine bağlı olarak değişmekte ve 2-4 m/sn arasında değişmektedir (Janik 1960, Fessel 1965).

c) Kurutma Havası Bağlı Nemi: Bağlı nem birim hacimde gerçekte mevcut olan su buharı miktarının (mutlak nem) aynı sıcaklıkta havanın içerisine alabileceği mümkün olan en yüksek su buharı miktarına oranına denir (Bozkurt ve Kantay 1992).

Nemli hava belli bir sıcaklığa kadar soğutulursa, doymuş hale ulaşabilmek için daha az su buharına ihtiyacı olacağı için yoğuşma başlar, bu haldeki sıcaklığa çığ noktası sıcaklığı denir.

Yetersiz veya daha az nem içeren ortamlarda yapılan kurutma işlemi sırasında malzeme yüzeyi çok hızlı bir şekilde kuruyacağı için yüzeyde istenmeyen kusurlar meydana gelebilir. Bu kusurlara engel olunması ve iç tabakalardan yüzeye nem akışının sürekli

sağlanabilmesi için kurutmanın her kademesinde kurutma havasının belli bir nem değerine sahip olması gerekmektedir. Eğer kurutucu havanın nem değeri fazla ise bu durum kurutma süresinin uzamasına ve enerji tüketiminin artmasına sebep olur (Biçer 2009).

Hava ısıtıldığında bağıl nemi azaldığından ağaç malzeme aynı bağıl nemdeki soğuk havada daha hızlı kurur. Çünkü havanın bağıl nemi azaldığında içerisine alacağı nem miktarı artmaktadır. Aynı zamanda yüzey ile hava arasındaki konsantrasyon farkının artmasında dolayı kuruma hızı artar. Havanın bağıl nemi arttıkça kuruma zamanının azaltmak için kuruma hızı artırılır. Kurutma fırınlarında bağıl nemin yükseltilmesi için buhar püskürtülebilir, sıcaklık düşürülebilir .

d) Malzemenin Cinsi ve Kalınlığı: Ağaç malzemenin cinsine göre yoğunluğu değiştiği için , yoğunluk arttıkça kuruma güçleşir ve kurutma süresi uzar. Malzemenin cinsi ve kalınlığına göre her bir odun türü için kuruma süreleri belirlenmektedir. Malzemenin kalınlığı arttıkça kuruma süresi uzar.

e) Malzemedeki Nem Miktarı: Kurutulan ağaç malzemesinin başlangıçtaki sahip olduğu nem oranı ne kadar fazla ve sonuç denge nemi ne kadar az ise kurutma süresi de bir o kadar uzun olmaktadır.

f) Gözeneklilik: Gözenekli ürünlerin kurutulması çok daha kısa sürede tamamlanmaktadır. Gözenekli malzemelerin içinde bulunan boşluklar suyun yüzeye daha kolay ulaşmasını sağlayarak kuruma sürecini hızlandırır.

g) Buharlaştırma Yüzeyi Genişliği: Malzemenin bütün halde değil de parça halinde kurutulması işlemi sırasında ürünün kurutma havasıyla temas eden yüzeyinin artması sonuç olarak buharlaştırma hızının artmasına neden olur ve kurutma süresi azalır.

2.2.7. Ağaç Malzemesinde Meydana Gelen Kurutma Kusurları

Ağaç malzemesinin kurutulması sırasında ürünün kalitesini etkileyen çatlaklar, renk değiştirmeleri gibi üründe meydana gelen değişimlere kurutma kusurları denir.

Ürünün çok hızlı kurutulması sonucunda yüzeyde küçük çatlaklar oluşur aynı zamanda içe doğru çökme, yarıлма da görülebilir. Ürünün çok yavaş kurutulması sırasında

yüzeyde küf oluşumu, çürüme, eğrilik meydana gelebilir. Üründe meydana gelen şekil değişiklikleri eğilme, çarpılma ve bükülme olarak isimlendirilir.

2.2.8. Kurutma Teorileri

a) Difüzyon Teorisi:Difüzyon teorisine göre katının iç kısımlarındaki suyun yüzeye hareketi katı içi difüzyon ile gerçekleşir. Bu kanuna uyan buhar veya sıvıların transferinde bu tip difüzyon kontrollü kütle transferinin olduğu düşünülür. 2. Fick kanununun tek yönlü difüzyonu için matematiksel ifadesi aşağıdaki gibi yazılabilir (Devahastin 2000).

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \left(\frac{\partial^2 C}{\partial L^2} \right) \quad (2.4)$$

Sıvı difüzyon teorisi günümüzde gıdaların kurutulmasında da kullanılmaktadır. Difüzyon katsayısı ya sabit tutulmakta yada sıcaklık veya nem konsantrasyonunun doğrusal bir fonksiyonu kabul edilmektedir.

b) Kapiler teori:Gözenekli katı içinde sıvının yüzeye hareketi difüzyon teorisinde olduğu gibi kütle transferi ile gerçekleşmeyip kapiler hareketle meydana gelir. Kapiler teoriye göre katı çeşitli büyüklüklerde gözenek ve kanallara sahiptir. Sıvı bu kanallardan hareket ederek yüzeye ulaşır (Güneş 1994).

c) Krischer teorisi:Krischer kurutmada ısı transferi etkisini ilk açıklayan bilim adamlarından birisidir. Gözenekli ortamlarda ısı ve kütle transferinin etkileri açıklayarak kurutma teorilerinin gelişmesine katkıda bulunmuştur.

Nemin yüzeye ulaşmasında buhar difüzyonu ve sıvının kılcal boru etkilerinin birlikte rol aldığını düşünmüştür ve her iki hareketin tek yönlü olduğunu belirtmiştir. Sıcaklık ve nem yoğunluğunun zamanın bir fonksiyonu olduğunu göstermiştir. Gözenekli bir malzemede kapiler etki ve difüzyonal direncin bilinerek kurutma zamanı doğru olarak hesaplanabilir. Krischer teorisinin en önemli dezavantajları katsayı fazlalığından dolayı hesaplamaların uzun ve karmaşık olması ve deneysel verilerin elde edilmesi söylenebilir.

d) Philip ve Devries Teorisi:Philip bu teorisinde Krischer teorisine benzer bir yol isteyerek gözenekli ortamlar için sıvı ve buhar etkisini sıcaklığın fonksiyonu olarak geliştirmiştir. Bu teori daha sonraları duyulur ve nemlendirme ısısının katılması ile birlikte nem içeriğinin sıvı ve buhar fazlarında değişimlerinin ayırt edilmesiyle DeVries tarafından geliştirilmiştir.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Materyal

3.1.1. Eş zamanlı Isı ve Kütle Transferinin Matematik Modellemesi

Kurutma işleminde kurutma süreci ve ekipmanların matematik modelinin oluşturulması uygun kurutma havası koşullarının elde edilmesi, kurutucu boyutu, kurutucu bölgesinin akışa göre konumlandırılması bakımından önemlidir. Modellemede asıl amaç hem kurutucudaki hem de ürün içerisindeki nem ve sıcaklık dağılımlarını gösteren ifadelerin doğru olarak oluşturulmasıdır (Hussain 2001).

Yapılan bu çalışmada farklı parametrelere bağlı olarak 2 boyutlu olarak zamana göre malzeme içerisindeki nem ve sıcaklık dağılımı incelenmiştir. Dairesel kesitli belli kalınlıktaki katı olan odun malzemesinin kurutulması işlemi, 2D axiymmetric olarak dikdörtgen kesitli oluşturulan model için öncelikle sürekli rejimde korunum denklemleri, Sonlu Hacim Metodu (FVM) kullanan ANSYS Fluent 14.5 paket programı kullanılarak çözülmüştür. Literatürde Sonlu Hacim Metodu diğerlerine göre daha yaygın olduğu için tercih edilmiştir (Chaw 1992, Tu ve ark. 2008).

Zorlanmış taşınım ile kurutma analizinde Reynolds sayısı 10000 değerini aştığı için kanal içi akışı türbülanslı olarak kabul edilmiştir. (Curcio ve ark. 2008; Abbasi ve ark. 2002; Chattopadhyay 2007; Uğurlubilek 2009) Yapılan bu çalışmada yüzeydeki ortalama ısı taşınım katsayısı, literatürde kanal içi kurutmada türbülans modellerinden sık kullanılan Standart k-ε Modeli ile hesaplanmıştır. Daha sonra COMSOL Multiphysics 4.3a sonlu elemanlar analizi kullanılmıştır. Burada ısı ve kütle transferi arasındaki bağıntı kullanılarak; hava hızı, sıcaklığı, ürünün kalınlığı ve ürün nem oranı gibi değişkenlere göre eş zamanlı ısı ve kütle transfer denklemleri zamana bağlı, sınır şartları kullanılarak çözülmüştür.

Matematik modelin oluşturulmasında yapılan kabuller;

- a) Kurutma süreci boyunca havanın hızı, sıcaklığı ve bağıl nemi sabittir.
- b) Kanal içi akış alanı türbülanslı kabul edildi. (Curcio ve ark. 2008, Çengel 2011).
- c) Ürün içerisinde deformasyon meydana gelmemektedir.
- d) Ürün 2 boyutlu düşünülmüştür.

- e) Ürün içerisinde ısı üretimi yoktur.
- f) Ürünün termofiziksel özellikleri (özellikler, iletim katsayısı vs.) sabittir.
- g) Zorlanmış taşınım ile kurutma işleminde ısı transferi öncelikle havadan yüzeye ısı taşınımı ile gerçekleştiği daha sonra yüzeyden ürün merkezine iletimle (Fourier Yasası) aktarıldığı düşünülmüştür.
- h) Kütle transferinin ürün içerisinden yüzeye nem difüzyonu (Fick Yasası) ile gerçekleştiği ve yüzeyden dış havaya buharlaştığı kabul edildi.

3.1.1.1. Malzeme Yüzeyindeki Isı Taşınım Katsayısının Hesaplanması

Nemli ürünün kurutulması sırasında sıcak hava ürün üzerine gönderilir. Bu arada taşınım ile ısı transferi meydana gelir. Akışkanın hızı olduğundan momentum denklemlerinin, sıcaklık farkı olduğundan dolayı enerji denklemlerinin ve sisteme kütle giriş çıkışı olduğu içinde süreklilik (kütlenin korunumu) denklemlerinin çözülmesi gerekir. Navier Stokes Denklemleri ve Standart k-ε Modeli başlangıç ve sınır şartları ile çözülerek ısı taşınım katsayısının istenen yüzeyler için ortalama değeri bulunur. Bu denklemlerin sayısal çözümü ANSYS 14.5 Fluent paket programı kullanılarak elde edilmiştir. Kaya (2008) tarafından yapılan çalışmaya göre; Şekil 3.2'de verilen dikdörtgen kesitli ürünün kurutulma şemasında üst ve sağ yan yüzeyinin taşınım katsayılarının değişiminin birbirine yakın olduğu görülmüştür. Şekil 3.3'de görülen 2D axisymmetric modelden dolayı Ansys Fluent programında da ısı ve kütle transferinin olduğu sadece bu iki (3 ve 4) yüzeyin ortalama taşınım katsayıları hesaplanmıştır.

Ansys programında sürekli rejim için kullanılan korunum denklemleri aşağıdaki gibidir.

Süreklilik Denklemi;

Süreklilik veya kütlenin korunumu denklemi olarak ifade edilen bu denklem kontrol hacmine giren ve çıkan toplam kütlenin toplamının sıfır olması şeklinde ifade edilebilir. x,y düzleminde ve z yönünde birim derinlikte olan kontrol hacmine giren ve çıkan kütle miktarları sırası ile m_x, m_y ve m_{x+dx}, m_{y+dy} olarak ifade edilmektedir. Çıkan kütle miktarları için Taylor açılımını kullanırsak;

$$m_{x+dx} = m_x + \frac{\partial m_x}{\partial x} dx \quad m_{y+dy} = m_y + \frac{\partial m_y}{\partial y} dy \quad (3.1)$$

Kontrol hacmine giren kütle miktarı x ve y yönü için aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

$$m_x = (\rho u) dy \quad (3.2)$$

$$m_y = (\rho v) dx \quad (3.3)$$

Giren kütle miktarı = çıkan kütle miktarı

$$(\rho u) dy + (\rho v) dx - \left[\rho u + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} dx \right] dy - \left[\rho v + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} dy \right] dx = 0 \quad (3.4)$$

Sadeleştirme yapıp eşitlik $dx dy$ ile bölünürse;

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} = 0 \quad (3.5)$$

Süreklilik denklemini elde edilir. Sıkıştırılamaz akış için yoğunluk sabit olduğu için denklem;

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (3.6)$$

şekline gelir.

Momentum Korunum Denklemi:

Newton'un ikinci hareket yasasına göre hız sınır tabakasındaki kontrol hacmini etkileyen kuvvetlerin toplamı kontrol hacmindeki momentum değişimine eşittir. Sınır tabaka içinde akışkanı yüzey kuvvetleri etkiler. Yerçekimi, manyetik alan ve elektrik alanlarda gövde kuvvetine etki edebilir. Birim hacim için x ve y bileşenleri X ve Y olarak gösterilir. Yüzey kuvvetleri F_s , akışkanın statik basıncı veya sürtünme gerilmelerinden kaynaklanır. Sürtünme gerilmesi normal gerilme σ ve kayma gerilmesi

τ olmak üzere iki bileşene ayrılmaktadır. Bileşenleri göstermek için iki alt indis kullanılır. Birincisi yüzeye dik yönü ikincisi ise kuvvet bileşeninin yönünü gösterir.

Gerilmeleri için Taylor seri açılımı kullanılırsa;

$$F_{s,x} = \left(\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} - \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} \right) dx dy \quad (3.7)$$

$$F_{s,y} = \left(\frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} - \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} \right) dx dy \quad (3.8)$$

Newton'un ikinci yasasını kullanabilmek için momentum akıları da hesaplanmalıdır.

Öncelikle x yönü için momentum net değişimi;

$$\frac{\partial [\rho u] u}{\partial x} dx(dy) + \frac{\partial [\rho v] u}{\partial y} dy(dx) \quad (3.9)$$

Şeklinde yazılır. X yönündeki kuvvetlerin toplamını akışkanın x yönündeki net momentum değişimine eşitleyerek aşağıdaki denklem elde edilir.

$$\frac{\partial [\rho u] u}{\partial x} + \frac{\partial [\rho v] u}{\partial y} = \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} - \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + X \quad (3.10)$$

Bu ifade süreklilik denklemleri kullanılarak sadeleştirilebilir.

$$\rho \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = \frac{\partial}{\partial x} (\sigma_{xx} - p) + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + X \quad (3.11)$$

Benzer işlemler y yönü için yapılırsa;

$$\rho \left(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) = \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} (\sigma_{yy} - p) + Y \quad (3.12)$$

Elde ettiğimiz denklemlerde gövde kuvveti, sürtünme ve basınç kuvveti gerilmeleri aşağıda toplu olarak verilmiştir.

$$\sigma_{xx} = 2\mu \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{2}{3} \mu \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) \quad (3.13)$$

$$\sigma_{yy} = 2\mu \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{2}{3} \mu \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) \quad (3.14)$$

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} = \mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \quad (3.15)$$

Elde edilen denklemler 3.11 ve 3.12 nolu denklemlerde yerine yazılırsa x ve y yönü için momentum denklemleri aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\begin{aligned} \rho \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = & -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \mu \left[2 \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{2}{3} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) \right] \right\} \\ & + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] + X \end{aligned} \quad (3.16)$$

$$\begin{aligned} \rho \left(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) = & -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \mu \left[2 \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{2}{3} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) \right] \right\} \\ & + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] + Y \end{aligned} \quad (3.17)$$

Kontrol hacmine herhangi bir dış kuvvetin olmadığı , akışkanın sıkıştırılmaz olduğu ve akışın türbülanslı olmasından dolayı ek kuvvette eklenerek yukarıdaki denklemler aşağıdaki hale gelir.

$$\rho \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + (\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (3.18)$$

$$\rho \left(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + (\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \quad (3.19)$$

Burada μ_t türbülanslı eddy viskozitesidir.

Enerji Denklemi:

Bir taşınım probleminde taşınım katsayısının bulunabilmesi için sıcaklık dağılımının bilinmesi gereklidir. Enerjinin korunumunu kontrol hacmine uygulamak için yığın akışkan hareketinin (adveksiyon, E_{adv}) tanımlanması gerekmektedir. Akışkanın birim kütlesi için enerjisi iç enerji e ve kinetik enerji $V^2/2$ kapsar. Burada $V^2 = u^2 + v^2$ olmaktadır. X yönü için kontrol hacmine giren net enerji;

$$\begin{aligned} E_{adv.x} - E_{adv.x+dx} \rho \equiv \\ \rho u \left(e + \frac{V^2}{2} \right) dy - \left\{ \rho u \left(e + \frac{V^2}{2} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left[\rho u \left(e + \frac{V^2}{2} \right) \right] dx \right\} dy = \\ -\frac{\partial}{\partial x} \left[\rho u \left(e + \frac{V^2}{2} \right) \right] dx dy \end{aligned} \quad (3.20)$$

Şeklinde ifade edilir. Ayrıca kontrol hacmine iletimle enerji geçişi aşağıdaki gibi de gösterilir.

$$\begin{aligned} E_{cond.x} - E_{cond.x+dx} = - \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) dy - \left[-k \frac{\partial T}{\partial x} - k \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) dx \right] dy \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) dx dy \end{aligned} \quad (3.21)$$

Enerji ayrıca gövde ve yüzey kuvvetleri ile iş etkileşimleri ile kontrol hacmi içindeki akışkandan veya akışkana geçebilir. X yönündeki kuvvetler tarafından akışkan üzerine yapılan net iş ;

$$W_{net.x} = (Xu)dxdy + \frac{\partial}{\partial x}[(\sigma_{xx} - p)u]dxdy + \frac{\partial}{\partial y}(\tau_{yx}u)dxdy \quad (3.22)$$

Şeklinde ifade edilir. Burada sağ taraftaki ilk terim gövde kuvvetleri tarafından yapılan net işi diğerleri ise basınç ve sürtünme kuvvetleri tarafından yapılan işi temsil eder. Elde edilen son 3 denklem aynen y yönü içinde elde edilir. Enerji korunumu denkleminde yazılarak aşağıdaki ifade bulunur.

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x} \left[\rho u \left(e + \frac{V^2}{2} \right) \right] - \frac{\partial}{\partial y} \left[\rho v \left(e + \frac{V^2}{2} \right) \right] \\ & + \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + (Xu + Yv) - \frac{\partial}{\partial x}(pu) - \frac{\partial}{\partial y}(pv) \\ & + \frac{\partial}{\partial x}(\sigma_{xx}u + \tau_{xy}v) + \frac{\partial}{\partial y}(\tau_{yx}u + \sigma_{yy}v) + \dot{q} = 0 \end{aligned} \quad (3.23)$$

Enerji korunumunun genel gösterimi bu şekilde olmaktadır. Bu denklem kinetik ve ısı iç enerji korunumunu gösterdiği için çok az kullanılır. Bunun yerine daha önce elde edilen (3.11) ve (3.12) denklemlerinin sırası ile u ve v ile çarpılıp denklem (3.23) nolu denklemden çıkarılmasıyla ısı enerji denklemi elde edilir.

$$\rho u \frac{\partial e}{\partial x} + \rho v \frac{\partial e}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) - p \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \mu \phi + \dot{q} \quad (3.24)$$

Burada $\mu\phi$ sürtünme kayıpları;

$$\mu\phi = \mu \left\{ \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + 2 \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right] - \frac{2}{3} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right\} \quad (3.25)$$

Şeklinde ifade edilir. Akışkan sıkıştırılmaz (ρ sabit) olduğundan $c_v = c_p$ ve $de = c_v dT = c_p dT$ olur. Kontrol hacminde üretilen enerji olmadığı, sürtünme kayıpları

ihmal edilerek türbülanslı akıştan dolayı ek kuvvette eklenerek ve son olarak süreklilik denklemi ifadesi de kullanılarak yukarıdaki ifade aşağıdaki gibi elde edilmektedir;

$$u\rho c_p \frac{\partial T}{\partial x} + v\rho c_p \frac{\partial T}{\partial y} = (k + k_t) \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (3.26)$$

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 ε 'nin bilinmesi gerekmektedir. Bu iki ifade aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$k = \frac{1}{2} \left[(u')^2 + (v')^2 \right] \quad (3.27)$$

$$\varepsilon = \frac{k^{3/2}}{l_m} \quad (3.28)$$

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

$$u\rho \frac{\partial k}{\partial y} + v\rho \frac{\partial k}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial y} \right) + \mu_t G - \rho \varepsilon \quad (3.29)$$

$$u\rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} + v\rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \right) + C_1 \mu_t \frac{\varepsilon}{k} G - C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{2} \quad (3.30)$$

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

$$G = 2 \left[\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right] + \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \quad (3.31)$$

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

Isı ve kütle transferinde kullanılan boyutsuz sayılar

Reynolds Sayısı: Akışın karakterinin belirlenmesinde önemli bir boyutsuz sayıdır. Akışın türbülanslı veya laminer olduğunu belirtir. Akışta atalet kuvvetlerinin viskoz (sürtünme) kuvvetlere oranını gösteren ve akışkanlar mekaniğinde son derece önemli olan bu sayı şu şekilde gösterilir;

$$Re = \frac{uL}{\nu} \quad (3.32)$$

Burada akışkanın hızı u , karakteristik uzunluk L ve kinematik viskozite ν ile gösterilmiştir.

Prandtl Sayısı: Isıl ve hız sınır tabaka içinde ısı ve momentum yayılımının bir ölçüsüdür ve şu şekilde ifade edilir.

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} \quad (3.33)$$

Burada α ısı yayılım katsayısıdır.

Schmidt Sayısı: Kütle transferinde Pr sayısı yerine kullanılır. Schmidt sayısı momentum difüzyonunun kütle difüzyonuna oranı olarak aşağıdaki gibi tarif edilir;

$$Sc = \frac{v}{D_{AB}} \quad (3.34)$$

Burada D_{AB} ikili kütle difüzyon katsayısıdır.

Lewis Sayısı: Kütle transferinde kullanılan bir diğer boyutsuz sayı ise Lewis sayısıdır. Burada ısı difüzyonunun kütle difüzyonuna oranı tarif edilir ve şu şekilde gösterilir;

$$Le = \frac{\alpha}{D_{AB}} = \frac{Sc}{Pr} \quad (3.35)$$

Nusselt sayısı: Taşınım ile ısı transferinde önemli bir boyutsuz sayıdır. Bu boyutsuz sayı yüzeyde taşınım ile ısı geçişinin bir ölçüsüdür. Taşınım ile ısı transferinin iletimle ısı transferine oranıdır.

$$Nu = \frac{hL}{k} \quad (3.36)$$

Burada ısı taşınım katsayısı h , Nusselt sayısı Nu , karakteristik uzunluk L , akışkanın ısı iletim katsayısı k olarak ifade edilir.

Sherwood sayısı: Kütle transferinde Nusselt yerine Sherwood sayısı kullanılır. Bu parametre yüzeydeki boyutsuz konsantrasyon basamağı olarak tarif edilir ve yüzeyde meydana gelen taşınım ile kütle transferinin miktarının belirlenmesi için çok önemli bir parametredir.

$$Sh = \frac{h_m L}{D_{AB}} \quad (3.37)$$

Burada kütle taşınım katsayısı h_m ile gösterilmiştir.

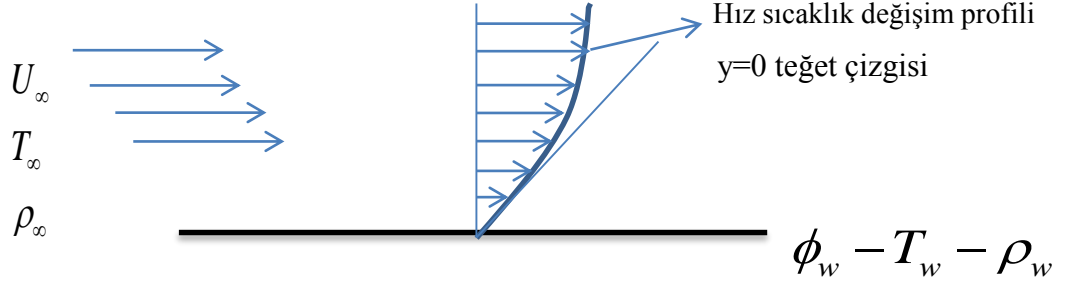
Ürün etrafındaki sıcaklık alanı belirlendikten sonra ısı taşınım katsayısı ;

$$Nu = \frac{hL}{k} = 0.023 Re^{0.8} Pr^n \quad (3.38)$$

bağıntısı kullanılarak elde edilmiştir. Burada akışkanın ısıtılmasında $n=0.4$ ve soğutulmasında $n=0.3$ alınır. (Çengel 2011)

3.1.1.2. Isı ve Kütle Transferi arasındaki benzeşim

Belli uzunluktaki bir plaka üzerinde akış göz önüne alınarak yüzeyde ısı ve kütle dengesi şartları yazılacak olursa;



Şekil.3.1. Bir yüzey üzerindeki akış karakteristiği (Çengel 2012)

$$q = -k \frac{\partial T}{\partial x} = h(T_{\infty} - T_w) \quad (3.39)$$

$$m_b = -D_{AB} \frac{\partial \rho}{\partial x} = h_m (\rho_w - \rho_{\infty}) \quad (3.40)$$

Burada Fourier ısı iletim kanunu ile Fick yayılım kanununun benzerlik gösterdiği görülmektedir. Burada h ısı taşınım katsayısı (W/m^2K), D_{AB} difüzyon katsayısı (m^2/s), h_m taşınım kütle transfer katsayısı (m/s), T_{∞} ve T_w çevre sıcaklığı ve yüzey sıcaklığı (K), ρ_w ve ρ_{∞} yüzey ve havadaki su buharının konsantrasyonu (kg/m^3). Aynı şekilde kütle taşınım hızı M_b (kg/s) aşağıda gösterildiği gibi Newton'unu soğuma kanununa benzer şekilde bulunur.

$$Q = hA(T_{\infty} - T_w) \quad (3.41)$$

$$M_b = h_m A (\rho_w - \rho_{\infty}) \quad (3.42)$$

Burada konsantrasyon farkını bulmak için mükemmel gaz denklemini yazılarak yoğunluk hem yüzey ve hava için aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\rho_w = \frac{P_{bw}}{R_b T_w} \quad (3.43)$$

$$\rho_\infty = \frac{P_{b\infty}}{R_b T_\infty} \quad (3.44)$$

Burada R_b gaz buhar sabiti (kJ/kgK), P_{bw} ve $P_{b\infty}$ yüzeydeki havanın ve ortamdaki havanın kısmi basıncı. Bu ifadeleri bulmak için sıcaklığa ($T_w - P_{dtw}; T_\infty - P_{dt\infty}$) karşılık gelen doyma basınçları tablodan okunarak bağıl nem ile aşağıdaki gibi çarpılır.

$$\phi_w = \frac{P_{bw}}{P_{dtw}} \quad (3.45)$$

$$\phi_\infty = \frac{P_{b\infty}}{P_{dt\infty}} \quad (3.46)$$

Elde edilen ifadeler 3.41 nolu ifadede yerine yazılırsa;

$$M_b = h_m A (\rho_w - \rho_\infty) = h_m A \left(\frac{P_{bw}}{R_b T_w} - \frac{P_{b\infty}}{R_b T_\infty} \right) \quad (3.47)$$

Elde edilir. Aynı zamanda konsantrasyon farkını molar olarak da ifade edebiliriz;

$$M = h_m A (C_w - C_\infty) \quad (3.48)$$

Burada M mol kütlesi (kg/kmol), C molar konsantrasyon (kmol/m³)

Eğer iki veya daha fazla fiziksel olgu aynı biçimdeki boyutsuz eşitliklerle gösterilebiliyorsa, bu olgular arasında benzeşim olduğu söylenebilir. Sınır tabaka fonksiyon denklemlerinde benzeşmeler olduğu için ısı ve kütle transferi analogisi her iki

taşıyım katsayısını ilişkilendirmek için kullanılır. Isı ve kütle transferi benzeşimi boyutsuz sayılar ile ifade edilir. Burada Nu ve Sh boyutsuz sayıları benzeşim göstermektedir. Boyutsuz ısı ve kütle transferi aşağıdaki gibi yazılmaktadır.

$$Sh = C Re^a Sc^b = \frac{h_m L}{D_{AB}} \quad (3.49)$$

$$Nu = C Re^a Pr^b = \frac{hL}{k} \quad (3.50)$$

Burada C, a ve b katsayıları uygulama alanına göre değişiklik gösteren sabit değerlerdir. Bu iki denklem ;

$$\frac{Sh}{Sc^b} = \frac{Nu}{Pr^b} \quad (3.51)$$

Şekildeki gibi yazılabilir. Daha önce elde edilen edilen Sh ve Nu ifadeleri yerine yazılırsa;

$$\frac{hL/k}{Pr^b} = \frac{h_m L/D_{AB}}{Sc^b} \quad (3.52)$$

Elde edilir. Daha önce ifade edilen denklem 3.34 bu ifadede yerine yazılırsa;

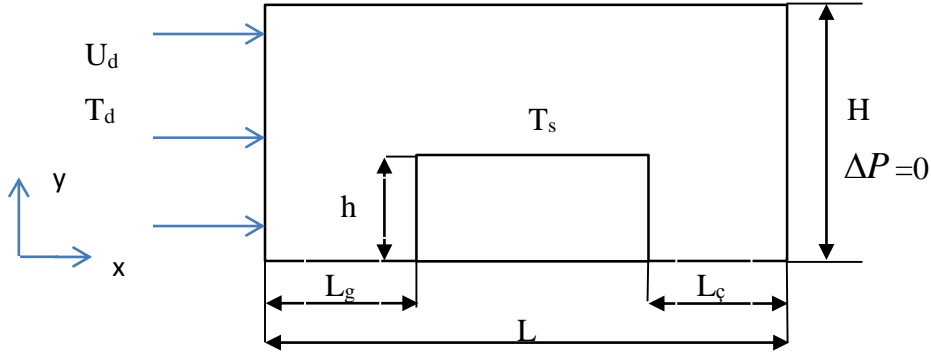
$$\frac{h}{h_m} = \frac{k}{D_{AB} Le^b} = \rho c_p Le^{1-b} \quad (3.53)$$

Elde edilir. Bu ifade ısı ve kütle transferi katsayıları arasındaki bağıntıyı vermektedir. Burada uygulamaların birçoğunda b=1/3 alınmaktadır. (Incropera 2010)

Çizelge 3.1. Farklı değişkenler (sıcaklık, hız, kalınlık ve ürün nemi) için hesaplanan ortalama ısı taşınım katsayıları (Denklem 4.1)

Değişken kalınlık	3cm	5cm	7cm
(sabit:40°C, 2m/s,%40) Isı taşınım katsayısı (W/m ² K)	9.13	9.10	9.06
Kütle taşınım katsayısı (m/s)	0.00811	0.00808	0.00805
Değişken hız	1m/s	1.5m/s	2m/s
(sabit:40°C,3cm,%40) Isı taşınım katsayısı (W/m ² K)	7.74	8.02	9.13
Kütle taşınım katsayısı (m/s)	0.00681	0.00712	0.00811
Değişken hava sıcaklığı	40°C	60°C	80°C
(sabit:3cm,2m/s,%40) Isı taşınım katsayısı (W/m ² K)	9.13	9.14	9.16
Kütle taşınım katsayısı (m/s)	0.00811	0.00862	0.00912
Değişken ürün nem içeriği	%40	%60	%80
(sabit:3cm,2m/s,40°C) Isı taşınım katsayısı (W/m ² K)	9.127	9.127	9.127
Kütle taşınım katsayısı (m/s)	0.00811	0.00811	0.00811

Başlangıç ve Sınır Şartları



Şekil 3.2. İki boyutlu kartezyen koordinatlarda ürün geometrisi

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 $0 \leq y \leq h$; $L_g \leq x \leq L-L_ç$ ve $y=h$; $x=L-L_ç$ ve $0 \leq y \leq h$; $x=L-L_ç$ 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. Kanal girişine hız ve sıcaklık ile ürün yüzeyine sıcaklık değerleri tanımlanmıştır. (Etemoğlu ve ark. 2004)

3.1.1.3. Isı Transfer Teorisi

Isı iletim probleminde amaç istenen ortamda sınır şartlarına bağlı olarak sıcaklığın nasıl değiştiğini gözlemlemektir. Sıcaklık dağılımı Fourier ısı iletimi yasasından bulunur. İçerisinde kütsel hareket olmayan $T(x,y,z)$ sıcaklık dağılımı kartezyen koordinatlarda ifade edilsin. Sonsuz küçük kontrol hacmi tanımlansın dx,dy,dz olarak. Ele alınan kontrol hacim elemanında yüzeylerin birbirine dik ısı iletimleri sırası ile $q_x, q_y,$ ve q_z olarak gösterilir. Karşı yüzeylerdeki ısı iletimi ise Taylor seri açılımı ile ;

$$q_{x+dx} = q_x + \frac{\partial q_x}{\partial x} dx \quad (3.54)$$

$$q_{y+dy} = q_y + \frac{\partial q_y}{\partial y} dy \quad (3.55)$$

$$q_{z+dz} = q_z + \frac{\partial q_z}{\partial z} dz \quad (3.56)$$

Kontrol hacminden çıkan ısı iletimi ifadesinde $x+d_x$ x deki değer ile dx kalınlığındaki değişimin toplamıdır.

Ortam içerisinde üretilen ısı enerjisi miktarı aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$E_g = \dot{q} dx dy dz \quad (3.57)$$

\dot{q} burada birim zamanda birim hacimde üretilen ısı miktarı (W/m^3) olarak yazılır. Kontrol hacminde depolanan ısı enerjisi ise ;

$$E_d = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} dx dy dz \quad (3.58)$$

olarak yazılabilir. Burada ρ yoğunluk (kg/m^3), c_p özgül ısı (kJ/kgK) olarak ifade edilmektedir.

Termodinamiğin 1.kanununa göre kontrol hacim elemanındaki enerji dengesi:

Giren ısı enerjisi+Üretilen ısı enerjisi=Çıkan ısı enerjisi+Depo edilen ısı enerjisi

$$q_x + q_y + q_z + \dot{q} dx dy dz = q_{x+dx} + q_{y+dy} + q_{z+dz} + \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} dx dy dz \quad (3.59)$$

olarak yazılır.

$$\dot{q} dx dy dz = \frac{\partial q_x}{\partial x} dx + \frac{\partial q_y}{\partial y} dy + \frac{\partial q_z}{\partial z} dz + \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} dx dy dz \quad (3.60)$$

Aşağıda verilen her bir ısı akısı bileşeni denklemde yerine konulup $dx dy dz$ kontrol hacmine bölünür.

$$q_x = -kdydz \frac{\partial T}{\partial x} \quad (3.61)$$

$$q_y = -kdx dz \frac{\partial T}{\partial y} \quad (3.62)$$

$$q_z = -kdx dy \frac{\partial T}{\partial z} \quad (3.63)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3.64)$$

Isı yayılım denkleminin kartezyen koordinatlardaki en genel hali bu şekildedir.

Çalışmamda yaptığım kabuller:

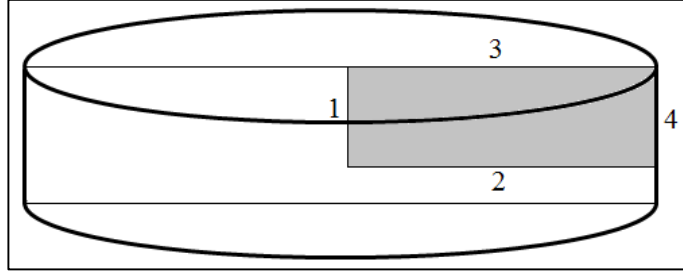
1. Isı iletimi zamana göre değişiyor.
2. Katı içinde ısı üretimi yok.
3. Isı İletimi 2 boyutlu
4. Termofiziksel özellikleri sabit

Yaptığım bu kabuller altında ısı iletimi en genel hali aşağıdaki şekli almaktadır.

$$\frac{\rho c_p}{k} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \quad \alpha = \frac{k}{\rho c_p} \quad (3.65)$$

Isıl yayılım katsayısının ifadesi bilindiğine göre denklem son olarak bu hale gelmektedir.(Hussain ve Dincer 2003)

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (3.66)$$



Şekil 3.3. 2D axisymmetric modelin 3D kesiti

Isı transfer yüzeyi için sınır koşulları;

$$t = 0 \quad T = T_0 \quad (3.67)$$

$$-k \frac{\partial T}{\partial x} = 0 \quad -k \frac{\partial T}{\partial y} = 0 \quad \text{yüzey 1 ve 2} \quad (3.68)$$

$$-k \frac{\partial T}{\partial x} = h_T (T_\infty - T) \quad -k \frac{\partial T}{\partial y} = h_T (T_\infty - T) \quad \text{yüzey 3 ve 4} \quad (3.69)$$

Materyal Özellikleri;

h_T : ısı transfer katsayısı (W/m²K)

T_∞ : ısıtılan mahal sıcaklığı (K)

T_0 : malzemenin ilk sıcaklığı (K)

k : ısı iletim katsayısı(W/mK)

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

3.1.1.4.Nemli Malzemedeki Difüzyon Teorisi

Kütle transferi denklemini elde etmek için ısı transferi denklemini bulmada kullanılan benzer yöntem kullanılacaktır. A ve B gibi ikili karışım halinde olan düzgün dağılımlı ,molekül sel ortalama hızı her yerde sıfır olup, kütle geçişinin sadece yayılımla olduğu

kabul edilmektedir. Bu denklem sayesinde ortamın herhangi bir yerindeki nem dağılımı bulunmaktadır. Burada ısı transferi denklemlerinden farklı olarak Fick yasası kullanılmaktadır.

x,y ve z koordinatları boyunca derişik gradyanlarının olduğu dx,dy ve dz kontrol hacmi ele alınsın. Derişiklik farkı nedeniyle A bileşenin yüzeylerinden yayılımla kütle geçişi olacaktır. Kontrol hacmine giren ve çıkan kütle akıları sırası ile, n''_{Ax} , n''_{Ay} , n''_{Az} ve n''_{A+dx} , n''_{A+dy} ve n''_{A+dz} olarak ifade edilmektedir. Burada Taylor seri açılımı aşağıdaki gibi kütle akılara uygulanmaktadır.

$$n''_{A,x+dx} dydz = n''_{A,x} dydz + \frac{\partial(n''_{A,x} dydz)}{\partial x} dx \quad (3.70)$$

$$n''_{A,y+dy} dxdz = n''_{A,y} dxdz + \frac{\partial(n''_{A,y} dxdz)}{\partial y} dy \quad (3.71)$$

$$n''_{A,z+dz} dxdy = n''_{A,z} dxdy + \frac{\partial(n''_{A,z} dxdy)}{\partial z} dz \quad (3.72)$$

Ortam içerisinde ayrıca kimyasal reaksiyon olduğu kabul edilip oluşan A bileşeni ise;

$$\dot{M}_{A,u} = \dot{n}_A dxdydz \quad (3.73)$$

Olarak yazılmaktadır. Burada \dot{n}_A (kg/sm³) karışımın birim hacminde birim zamanda A bileşenin kütlesindeki artıştır. Kontrol hacmi içerisinde depolanan A bileşenin kütlesi ise;

$$\dot{M}_{A,d} = \frac{\partial \rho_A}{\partial t} dxdydz \quad (3.74)$$

şeklinde yazılır.

Bir kontrol hacmine giren ve çıkan kütle akılarının farkı, kontrol hacmindeki bu bileşenin kütesinin zamana göre değişimine eşittir.

Kontrol hacmine giren kütle akısı+Kontrol hacminde oluşan kütle akısı- Kontrol hacminden çıkan kütle akıları=Kontrol hacmi içerisinde depolanan kütle akısı

$$\begin{aligned}
 & n''_{A,x} dydz + n''_{A,y} dxdz + n''_{A,z} dxdy + \dot{n}_A dxdydz \\
 & - n''_{A,x} dydz - \frac{\partial(n''_{A,x} dydz)}{\partial x} dx - n''_{A,y} dxdz - \frac{\partial(n''_{A,y} dxdz)}{\partial y} dy \\
 & - n''_{A,z} dxdy - \frac{\partial(n''_{A,z} dxdy)}{\partial z} dz = \frac{\partial \rho_A}{\partial t} dxdydz
 \end{aligned} \tag{3.75}$$

Elde edilen bu ifade kontrol hacmine bölünüp (dxdydz) sadeleştirilirse aşağıdaki ifade elde edilir.

$$-\frac{\partial n''_{A,x}}{\partial x} - \frac{\partial n''_{A,y}}{\partial y} - \frac{\partial n''_{A,z}}{\partial z} + \dot{n}_A = \frac{\partial \rho_A}{\partial t} \tag{3.76}$$

2 farklı ortamdaki karışımın ortalama hızına göre A bileşeninin hareketini kütesel olarak ifade etmek için;

$$n''_A = j_A + \rho_A v \tag{3.77}$$

eşitliği kullanılmaktadır. Burada n''_A A bileşeni dik birim alandan geçen mutlak kütle akısını gösterirken , j_A (kg/s.m²) bu bileşenin bağıl veya yayılım akısını göstermektedir. Moleküler olarak ifade etmek için ise aynı denklem aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$N_A = j_A^* + C_A v \tag{3.78}$$

Burada N_A (kmol/s.m²) molekülsel ortalama hızına göre mutlak mol akısıdır. j_A^* (kmol/s.m²) ise molekülsel ortalama hızına göre yayılım mol akısıdır. C_A (kmol/m³) ise molekülsel derişiklidir.

Durgun ortam için hız sıfır olduğundan $n_A = j_A$ ve $N_A = j_A^*$ olmaktadır. Fick yasası vektörel olarak her bir koordinat için;

$$j_{A,x} = -\rho D_{AB} \frac{\partial m_A}{\partial x} \quad (3.79)$$

$$j_{A,y} = -\rho D_{AB} \frac{\partial m_A}{\partial y} \quad (3.80)$$

$$j_{A,z} = -\rho D_{AB} \frac{\partial m_A}{\partial z} \quad (3.81)$$

Olarak yazılmaktadır. Burada karışımın yoğunluğu $\rho = \rho_A + \rho_B$ (kg/m³) , m_A bileşenin kütle oranı ρ_A / ρ gradyanı ile doğru orantılıdır. D_{AB} (m²/s) ikili karışımlarda kütle difüzyon veya yayılım katsayısı olarak ifade edilir. Fick yasası aynı zamanda aşağıdaki gibi molar olarak da ifade edilir.

$$j_{A,x}^* = -CD_{AB} \frac{\partial x_A}{\partial x} \quad (3.82)$$

$$j_{A,y}^* = -CD_{AB} \frac{\partial x_A}{\partial y} \quad (3.83)$$

$$j_{A,z}^* = -CD_{AB} \frac{\partial x_A}{\partial z} \quad (3.84)$$

Burada x_A molekül sel kütle oranı C_A/C gradyanı ile orantılıdır. Karışımın toplam molekül sel derişikliği ise $C=C_A+C_B$ (kmol/m^3) olarak yazılabilir.

3.78, 3.79 ve 3.80 nolu ifadeler 3.75 denkleminde yerine yazılırsa,

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\rho D_{AB} \frac{\partial m_A}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\rho D_{AB} \frac{\partial m_A}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(\rho D_{AB} \frac{\partial m_A}{\partial z} \right) + \dot{n}_A = \frac{\partial \rho_A}{\partial t} \quad (3.85)$$

Şekline gelir. 3.81,3.82 ve 3.83 nolu denklemler 3.75 nolu genel denklemde yerine yazılırsa molar olarak ;

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(C D_{AB} \frac{\partial x_A}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(C D_{AB} \frac{\partial x_A}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(C D_{AB} \frac{\partial x_A}{\partial z} \right) + \dot{N}_A = \frac{\partial C_A}{\partial t} \quad (3.86)$$

İfade elde edilir. 3.84 nolu denklemde D_{AB} yayılım katsayısı ve ρ yoğunluğu sabit ise denklem;

$$\frac{\partial^2 \rho_A}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \rho_A}{\partial y^2} - \frac{\partial^2 \rho_A}{\partial z^2} + \frac{\dot{n}_A}{D_{AB}} = \frac{1}{D_{AB}} \frac{\partial \rho_A}{\partial t} \quad (3.87)$$

Şeklinde yazılmaktadır. 3.85 nolu denklemde D_{AB} yayılım katsayısı ve C toplam derişikliği sabit ise,denklem;

$$\frac{\partial^2 C_A}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C_A}{\partial y^2} - \frac{\partial^2 C_A}{\partial z^2} + \frac{\dot{N}_A}{D_{AB}} = \frac{1}{D_{AB}} \frac{\partial C_A}{\partial t} \quad (3.88)$$

Çalışmamda yaptığım kabuller:

- 1.Kütle transferi zamana göre değişiyor.
- 2.Katı içinde kimyasal reaksiyon yok.
- 3.Kütle transferi 2 boyutlu
- 4.Termofiziksel özellikleri sabit

Yapılan bu kabuller altında elde edilen en genel kütle transfer denklemi aşağıdaki şeklini almaktadır.(Hussain ve Dincer,2003)

$$\frac{1}{D} \frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \quad (3.89)$$

Sınır şartları;

$$t = 0 \quad C = C_0 \quad (3.90)$$

$$-D \frac{\partial C}{\partial x} = 0 \quad -D \frac{\partial C}{\partial y} = 0 \quad \text{yüzey 1 ve 2} \quad (3.91)$$

$$-D \frac{\partial C}{\partial x} = h_t(C - C_b) \quad -D \frac{\partial C}{\partial y} = h_t(C - C_b) \quad \text{yüzey 3 ve 4} \quad (3.92)$$

D : malzemenin nem difüzyon katsayısı (m^2/s)

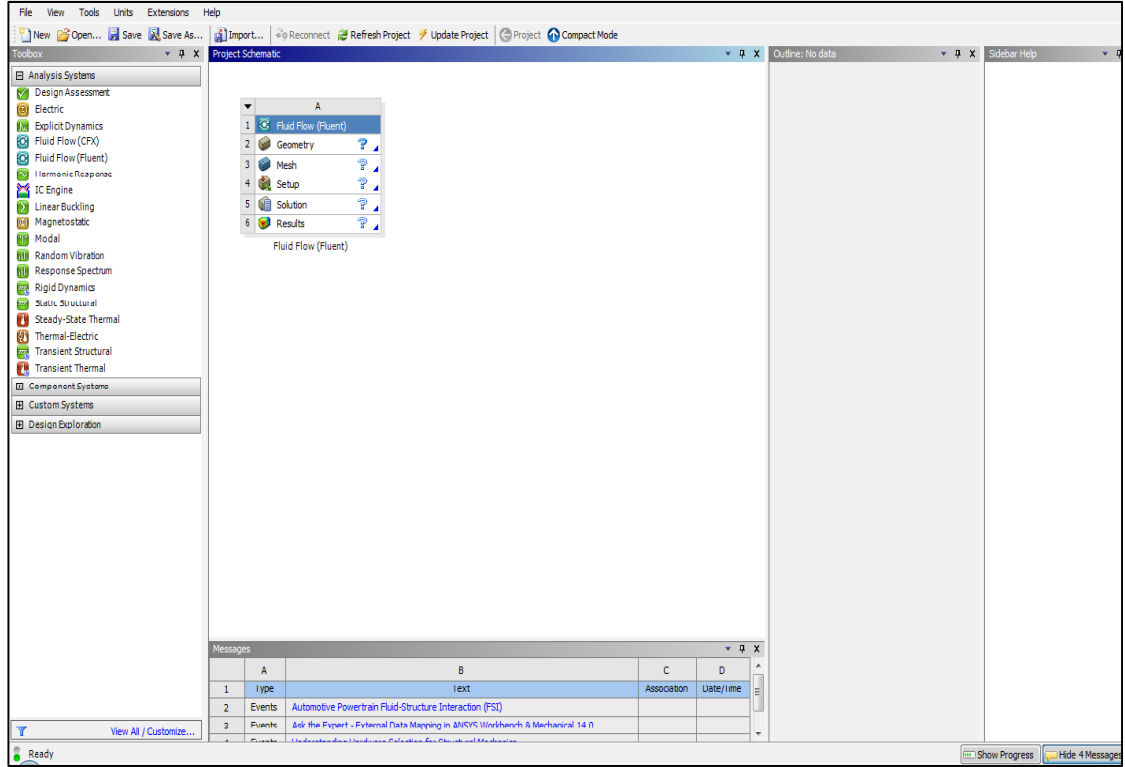
h_t : kütle taşınım katsayısı (m/sn)

C_b : dış havanın nem konsantrasyonu (mol/m^3)

C_0 : malzemenin başlangıç nem içeriği (mol/m^3)

3.2. Yöntem ve Model Doğrulaması

Ansys Programı, akışkanlar mekaniği, mukavemet, titreşim ve ısı transferi ile elektromanyetik alanların da fiziğin tüm disiplinlerinin birbiri ile olan ilişkisini simule etmekte kullanılabilen genel amaçlı bir sonlu elemanlar yazılımıdır. Bu sayede önceden çalışmanın simülasyonu yapılabilmekte ve prototip üretilmeden test edilebilmektedir. Ayrıca sanal ortamdaki 3 boyutlu simülasyonlar sayesinde çalışmada ortaya çıkabilecek sorunlar önceden fark edilip çözülebilmekte ve çalışma ömrü tahmin edilip iyileştirme yapılabilmektedir.



Şekil 3.4. Ansys programı ara yüzü

Ansys ara yüzünde ilk hangi analiz türü yapılacaksa soldaki menüden seçilir. Ekranda alttaki şekil açılır. Burada Ansys işlem sürecinin aşamaları görülür. Aşağıda örnek olarak 1 nolu kısımda yazan Fluid Flow analizi seçilmiştir. Ayrıca bu ara yüzden modelin çalışma boyutu seçilebilmektedir. Ansys işlem adımları (Şekil 3.4.) 5 aşamadan oluşmaktadır:

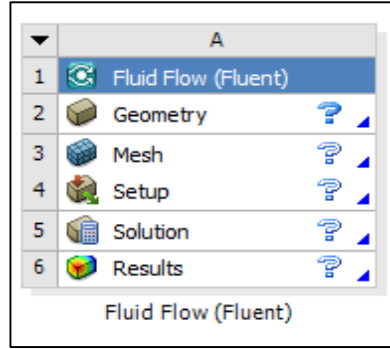
1. *Geometry*, burada açılan menüden çalışılacak katı model oluşturulur veya istenirse dışarıdan CAD datası (Catia, Pro/E, Solid Works vs.) şeklinde katı modeli Ansys işlemcisine okutulabilir.

2. *Mesh*, bu menüde eleman tipi seçilerek geometri ilgili seçenekler aracılığı ile otomatik olarak sonlu elemanlara bölünür.

3. *Set up*, açılan menüden önce analiz tipi seçilir. Daha sonra analizde hangi çözümlerin (ısı üretimi, akış türü vs..) sonuçları isteniyorsa onların seçimi yapılır. İlgili yüzeylere sınır şartları (sıcaklık, hız, basınç vs..) verilir.

4. *Solution*, çözüm kısmında oluşturulan matematik modelin çözüm algoritması oluşturularak her bir düğüm noktası için istenen değişkenin çözümü yapılmaktadır.

5. *Results*, bu bölüm sonuçların okunduğu, değerlendirildiği ve yorumlandığı kısımdır. Aynı zamanda sonuçlar grafik, tablo şeklinde kullanıcıya sunulmaktadır.



Şekil 3.5. Ansys çözüm süreci

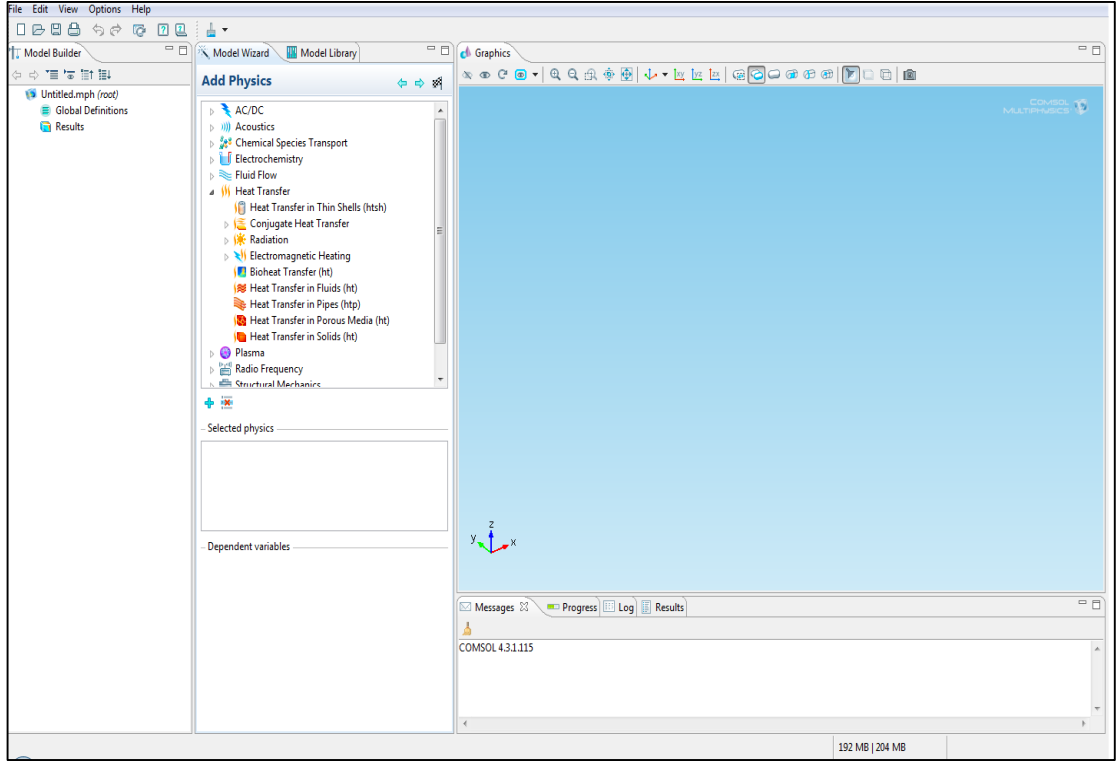
Comsol Programı, kısmi diferansiyel denklemlerin (matematiksel modellerin) çözümüne dayalı mühendislik ve bilimsel modellerin oluşturulması ve çözümünde kullanılan multiphysics ve sonlu eleman (FEM) analizidir. Comsol programına PDE (Partial Differential Equation) tanımı yapılarak tüm model için istenen çözümler yapılabilir. Çözülecek problemin geometrisi, sınır şartları, materyal özellikleri ve değişkenleri yazılarak program aracılığı ile gerekli meshleme yapıp çözülerek sonuçlar grafik şeklinde elde edilmektedir. Eğer mühendislik problemi için PDE denklemi elde edilmiş ise bunun programa girilerek değişkenlerinin tanımlanması ile çözüm yapılabilir.

Comsol Multiphysics uygulama alanları;

- Kimyasal reaksiyonlar
- Difüzyon
- Akışkanlar dinamiği
- Elektrokimya
- Akustik
- Elektromanyetik
- Jeofizik
- Isı transferi
- Mikroelektromekanik
- Mikrodalga mühendisliği
- Optik

- Yapı mekanikleri
- Kuantum mekaniği

gibi birçok alanda kullanımını mümkündür.



Şekil 3.6. Comsol programının ara yüzü

Comsol Multiphysics uygulama alanları, Comsol Programında bulunan 8 modül ile sağlanır.

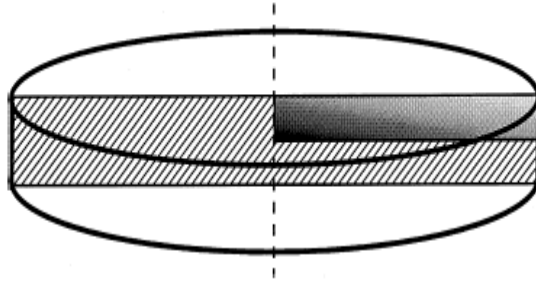
1. AC/DC Modülü
2. Akustik modülü
3. Kimyasal mühendislik modülü
4. Dünya (Earth) bilim modülü
5. MEMS modülü
6. RF Modülü
7. Yapı mekaniği modülü
8. Isı Transfer Modülü

Comsol da modelleme süreci 6 ana adımdan oluşmaktadır:

1. Model seçeneği modülünden uygulanmak istenen uygun model seçilir.

2. Model geometrisi çizim modülünden oluşturulur.
3. Fiziksel model için varsa PDE denklemi girilir yoksa hazır olan denklemler seçilerek sınır ve başlangıç şartları ile materyal özellikleri tanımlanır.
4. Mesh modülünden istenen meshleme yapılır.
5. Çözüm modülünden istenen şartlarda çözüm gerçekleştirilir.
6. Sonuç kısmında elde edilen grafik ve sonuçlar incelenir.

Comsol Programının doğru sonuçlar elde ettiğini test etmek amacıyla; literatürde yapılmış olan 6 farklı teorik ve deneysel (Haiqing ve ark 1999, Younsi ve ark. 2006, Chang ve Petersen (Deneysel) 1986, Liu ve Cheng 1991 ve Kocaeve ve ark.(Teorik ve Deneysel 2007) çalışmanın sonuçları, Comsol Programı ile nümerik analiz yapılarak karşılaştırılmıştır. Bunun için ilk olarak Haiqing ve ark.'nın 1999 yılında yapmış oldukları çalışma esas alınmıştır. Yapılan çalışmada Haiqing ve ark. (1999) 2D axisymmetric olarak modellenen tavuk parçalarının zorlanmış taşınım ile kurutulması sırasında ısı ve kütle transferini analitik ve deneysel olarak incelemişlerdir. Model içindeki nem ve sıcaklık dağılımları belirlenmiştir. Ayrıca 98 parça fırında pişirilerek kurulan modelin doğrulanmasını yapmışlardır. Deneysel model ile analitik çözüm arasında %1.2 lik bir farkın ortaya çıktığı görülmüştür.

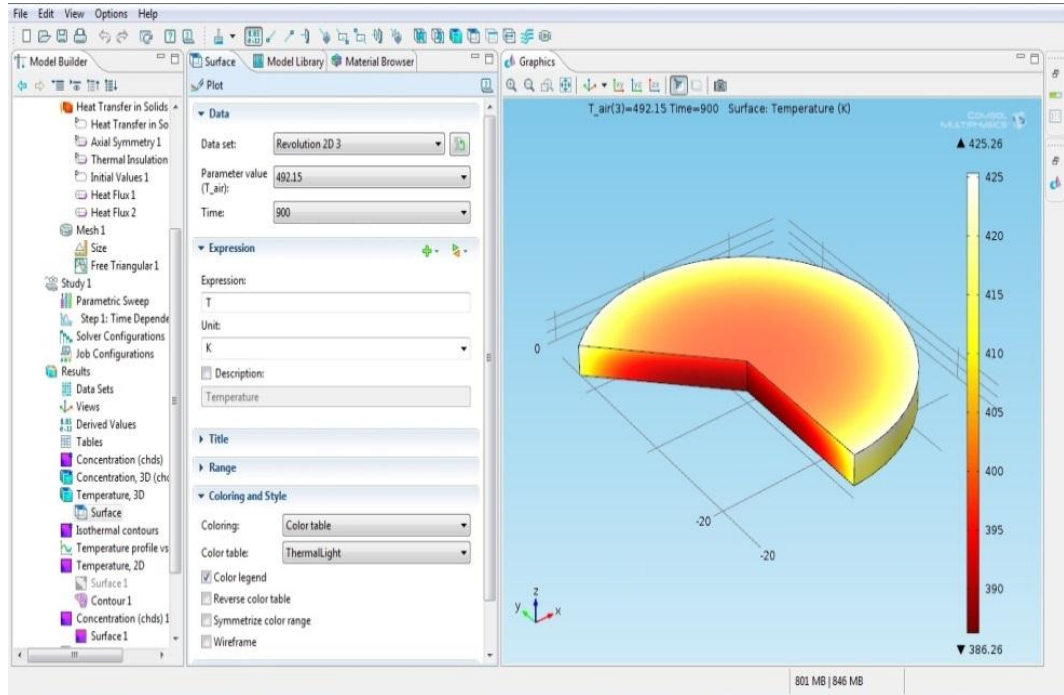


Şekil 3.7.Çalışmada kullanılan parçanın geometrisi (Chen ve ark. 1999)

Malzemedeki deformasyon etkileri ihmal edilmiş. 2D axisymmetric modelin ısı transferi ve nem transferi için denklemleri oluşturulmuş gerekli başlangıç şartları ve sınır şartları altında oluşturulan denklemlerin çözümünde sonlu elemanlar analizi kullanıp, çözümleri Matlab 4.2c.1 programı ile yapmışlardır.

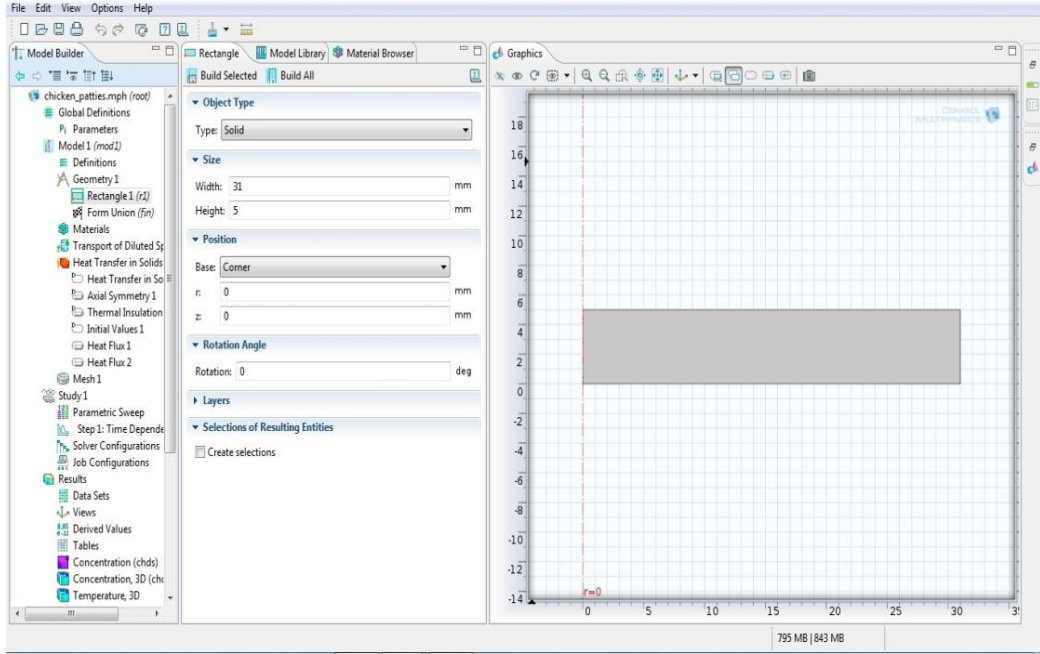
Çizelge 3.2. 22°C sıcaklığındaki tavuk malzemesinin termofiziksel özellikleri (Chen ve ark. 1999)

Parametre (Birimi)	Değeri
Malzemenin yoğunluğu (kg/m ³)	1100
Havanın sıcaklığı(°C)	135
Malzemenin nem içeriği(%)	78
Havanın nem içeriği(%)	2
Isı iletim katsayısı (W/mK)	0.194+0.436M M:Nem içeriği
Molar buharlaşma ısısı (J/kg)	0.23×10 ⁷
Özgül ısı (J/kgK)	3017.2+2.05T+0.24T ² +0.002T ³
Nem kapasitesi(kg/kg)	0.003
Nem iletkenliği(kg/ms)	1.29×10 ⁻⁹
Isı taşınım katsayısı(W/m ² K)	25
Kütle transfer katsayısı(kg/ms ²)	1.67×10 ⁻⁶
Su molekül ağırlığı(gr/mol)	18



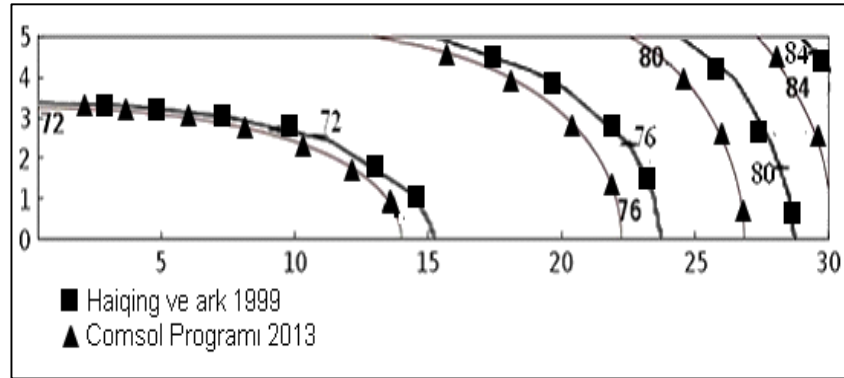
Şekil 3.8. Comsol programında yapılan çalışmadan kesit

Yapılan çalışmada gıda ürününün termofiziksel özellikleri Comsol programında girilerek aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir. İşlem adımları aşağıda bir başka örnek üzerinde gösterilmiştir.Yapılan çalışmada (Haiqing ve ark. 1999) 32 eleman meshlemede yapılmıştır Comsol programında ise en iyi meshleme modülü seçilerek yapılan çalışmanın uygunluğu görülmüştür.



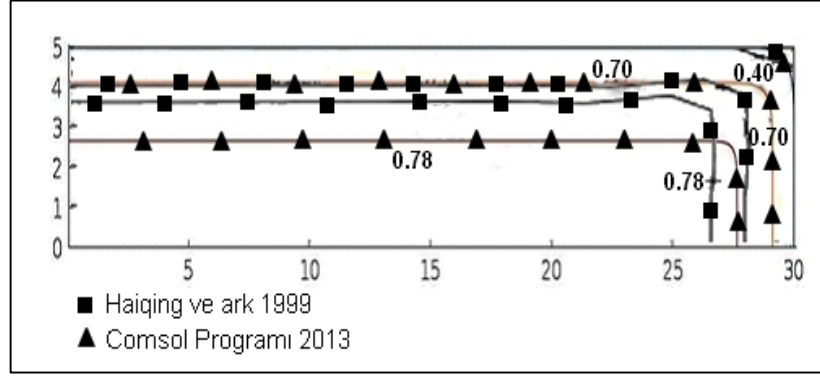
Şekil 3.9. Comsol programında kıyaslanması yapılan geometrinin gösterimi

Bu sonuçlara göre Haiqing ve ark. (1999)'nın yaptığı çalışma ile Comsol Programında yapılan çalışmanın sonuçlarının benzerlik gösterdiği görülmüştür.



Şekil 3.10. 135°C hava sıcaklığında 850. saniyedeki sıcaklık dağılımı °C (Haiqing ve ark. 1999, Comsol Programı 2013)

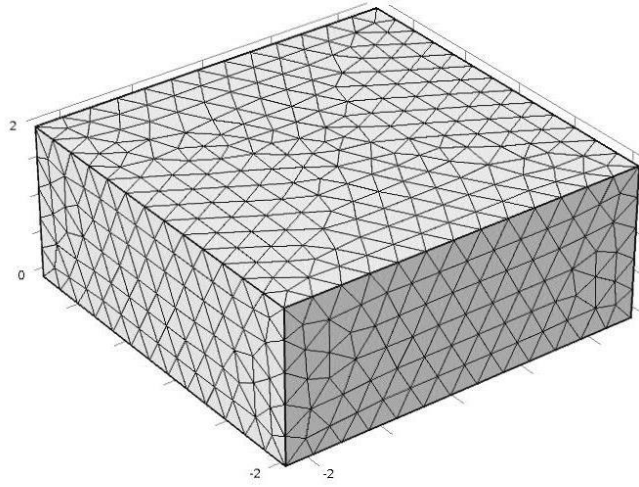
Şekil 3.10'da Haiqing ve ark (1999) 135°C kurutma havası sıcaklığında 2D axisymmetric olarak modelledikleri tavuk parçası için teorik olarak yaptıkları analizde ,kurutmanın 850. saniyesinde ürün içerisindeki sıcaklık dağılımı ile aynı çalışmanın Comsol programında yapılarak elde edilen sonuçları görülmektedir.



Şekil 3.11. 135 °C hava sıcaklığında 850.saniyedeki nem dağılımı (%) (Haiqing ve ark.1999,Comsol Programı 2013)

Şekil 3.11'de, Haiqing ve ark (1999) 135°C kurutma havası sıcaklığında 2D axisymmetric olarak modelledikleri tavuk parçası için teorik olarak yaptıkları analizde ,kurutmanın 850. saniyesinde ürün içerisindeki nem dağılımı ile aynı çalışmanın Comsol programında yapılarak elde edilen sonuçları görülmektedir.

Karşılaştırılması yapılan diğer çalışmada ise; Younsi ve ark.(2006) elma parçasının kurutulması sırasında Luikov denklemlerini kullanarak nümerik çözüm ile sonuca ulaşmışlardır. Çalışmalarında 3 boyutlu modelledikleri dikdörtgen kesitli ürünün merkezinin sıcaklığının ve nem oranının değişimini zamana göre incelemişlerdir. Nümerik çözüm için Femlab yazılımını kullanmışlardır. Aynı modeli daha önce Chang ve Petersen (1986) deneysel olarak incelemiştir.



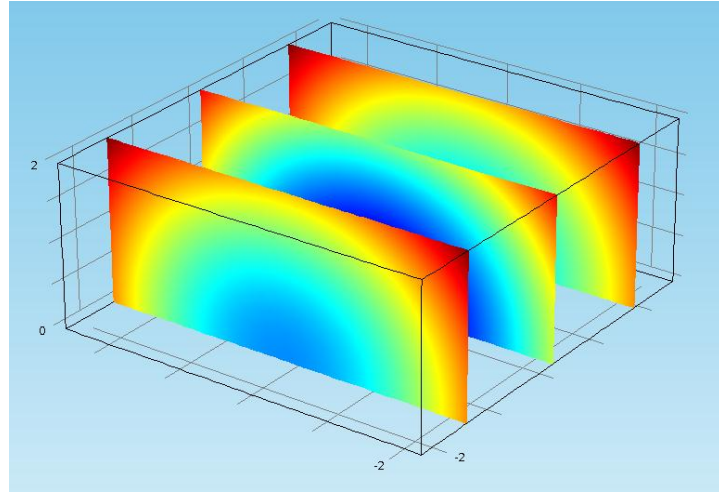
Şekil 3.12. Karşılaştırılması yapılan modelin Comsol programında geometrisi ve elemanlara bölünmüş hali

Çizelge 3.3. 30°C sıcaklığındaki elma malzemesinin termofiziksel özellikleri (Hussain ve Dincer 2003)

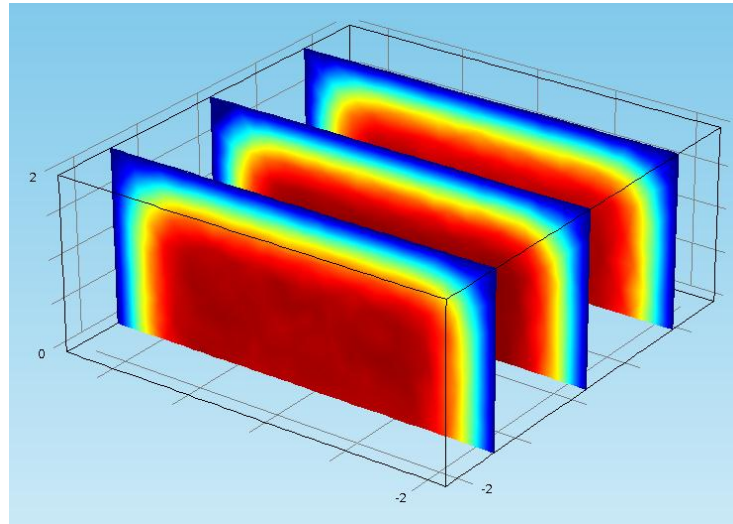
Parametre (Birimi)	Değeri
Malzemenin yoğunluğu (kg/m ³)	856
Havanın sıcaklığı(°C)	81
Malzemenin nem içeriği(%)	87
Havanın nem içeriği(%)	12
Isı iletim katsayısı (W/mK)	0.577
Molar buharlaşma ısısı (J/kg)	0.25×10 ⁷
Özgül ısı (J/kgK)	4201.4
Nem kapasitesi(kg/kg)	0.01
Nem iletkenliği(kg/ms)	2.2×10 ⁻⁸
Isı taşınım katsayısı(W/m ² K)	25
Kütle transfer katsayısı(kg/m ² s)	0.0001
Su molekül ağırlığı(gr/mol)	18

Yapılan çalışmada Chang ve Petersen 'nin (1986) deneysel olarak yapmış oldukları çalışmanın sonuçları ile Younsi ve ark.(2006) nümerik olarak 3 boyutlu yapmış oldukları çalışmanın sonuçları karşılaştırılmıştır. Malzemenin deneysel koşulları ve

termofiziksel özellikleri çalışmalardan alınarak Comsol programında 3 boyutlu dikdörtgen kesitli modelin (şekil 3.12) çözümü difüzyon teorisi ve sınır şartları kullanılarak merkezinin nem ve sıcaklık dağılımı şekil 3.13 ve şekil 3.14. de görüldüğü gibi bulunmuş ve diğer çalışmalar ile kuruma davranışı karşılaştırılmıştır. Sonuçların birbirine yakın olarak değiştiği görülmüştür.



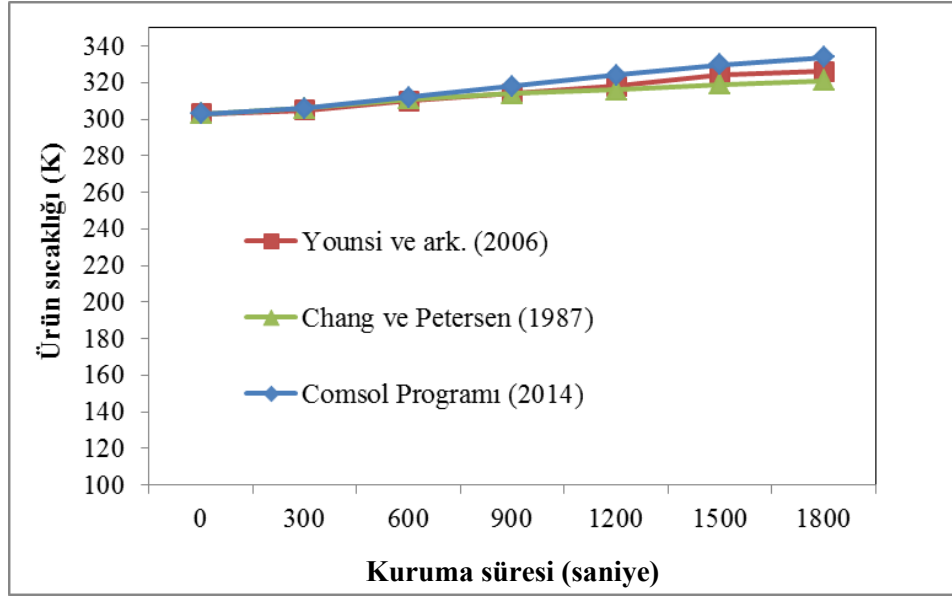
Şekil 3.13. Comsol programında modelin içerisindeki sıcaklığın zamana göre değişimi



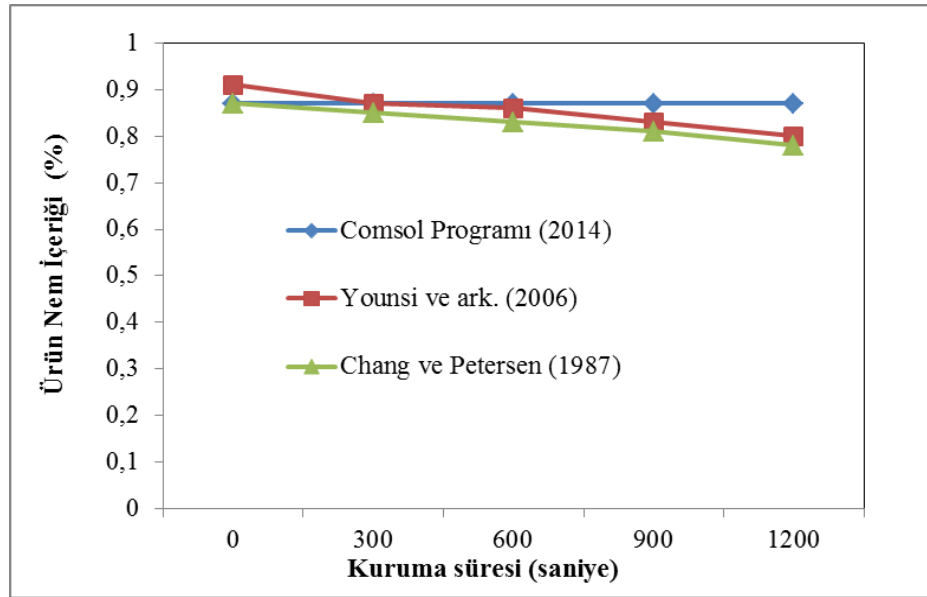
Şekil 3.14. Comsol programında modelin içerisindeki nem içeriğinin zamana göre değişimi

Şekil 3.15 ve 3.16'da nem sıcaklık değişiminin karşılaştırılması görülmektedir. Comsol ile yapılan sıcaklık değişimi Younsi ve ark. (2006) yapmış olduğu nümerik çalışmadan yaklaşık olarak %1.2, Chang ve Petersen (1986) yapmış olduğu deneysel çalışmadan ise

%1.6 farklı çıkmıştır. Comsol ile yapılan nem dağılımı ise Younsi ve ark. (2006) yapmış olduğu nümerik çalışmadan yaklaşık olarak %3.6 , Chang ve Petersen (1986) yapmış olduğu deneysel çalışmadan ise yaklaşık olarak %4.8 farklı çıkmıştır. Comsol programında nem içeriği başlangıçta sınır şartı olarak tanımlandığı için ürünün ilk nemi malzemenin tamamında %87 olarak alınmıştır.

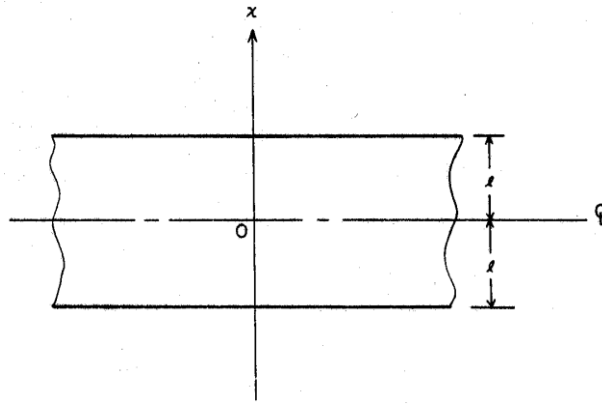


Şekil 3.15. Modelin merkezinin sıcaklık değişimi (K) (Younsi ve ark. 2006, Chang ve Petersen 1987 ve Comsol programı 2014)



Şekil 3.16. Modelin merkezinin nem oranı değişimi (%) (Younsi ve ark. 2006, Chang ve Petersen 1987 ve Comsol programı 2014)

Karşılaştırılması yapılan diğer bir çalışma ise; Liu ve Cheng'in (1991) gözenekli bir yapıya sahip olan odun parçasının kurutulmasını Şekil 3.17'de gösterildiği gibi tek boyutlu (1D) sadece x yönünde inceledikleri çalışmadır. Yaptıkları çalışmada gözenekli yapılar için ısı ve kütle transferi problemlerinin analizinde kullanılan Luikov denklemlerini, başlangıç ve sınır koşulları altında çözmüşlerdir. Odun levhasının kurutulmasında sıcaklık ve nem dağılımlarını zamana bağlı olarak elde etmişlerdir. Elde ettikleri sayısal sonuçları sonlu eleman çözümleri ve deneysel veriler ile karşılaştırmışlardır. Yaptıkları bu çalışma gözenekli yapılarda ısı ve kütle transferi problemleri için genel bir uygulamaya sahip olma özelliğini taşımaktadır.



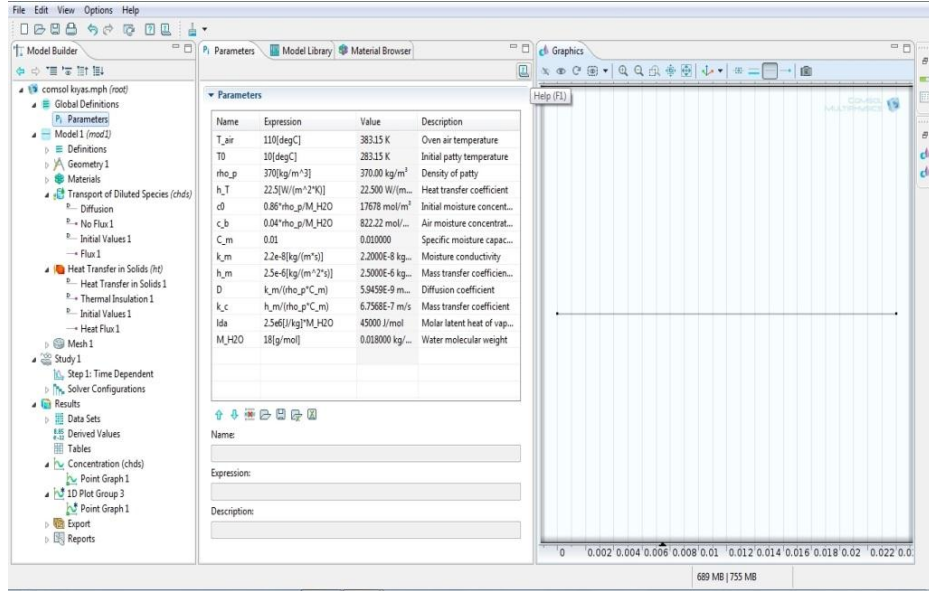
Şekil 3.17. Odun örneğinin şematik gösterimi (Liu ve Cheng 1991)

Çizelge 3.4. 10°C sıcaklığındaki odun malzemesinin termofiziksel özellikleri (Thomas ve ark. 1980)

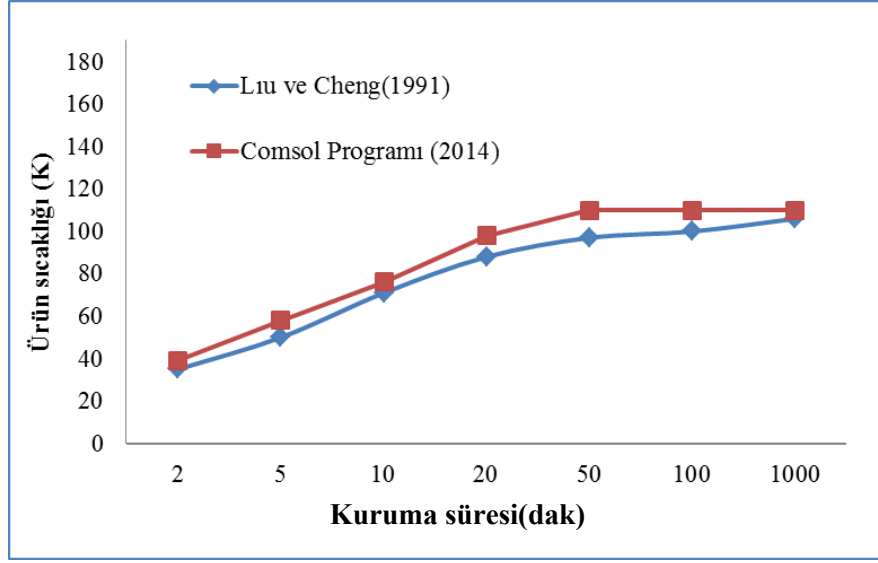
Parametre (Birimi)	Değeri
Malzemenin yoğunluğu (kg/m ³)	370
Havanın sıcaklığı(°C)	110
Malzemenin nem içeriği(%)	86
Havanın nem içeriği(%)	4
Isı iletim katsayısı (W/mK)	0.65
Molar buharlaşma ısısı (J/kg)	0.25×10 ⁷
Özgül ısı (J/kgK)	2500
Nem kapasitesi(kg/kg)	0.01
Nem iletkenliği(kg/ms)	2.2×10 ⁻⁸
Isı taşınım katsayısı(W/m ² K)	22.5

Kütle transfer katsayısı(kg/m ² s)	2.5×10 ⁻⁶
Su molekül ağırlığı(gr/mol)	18

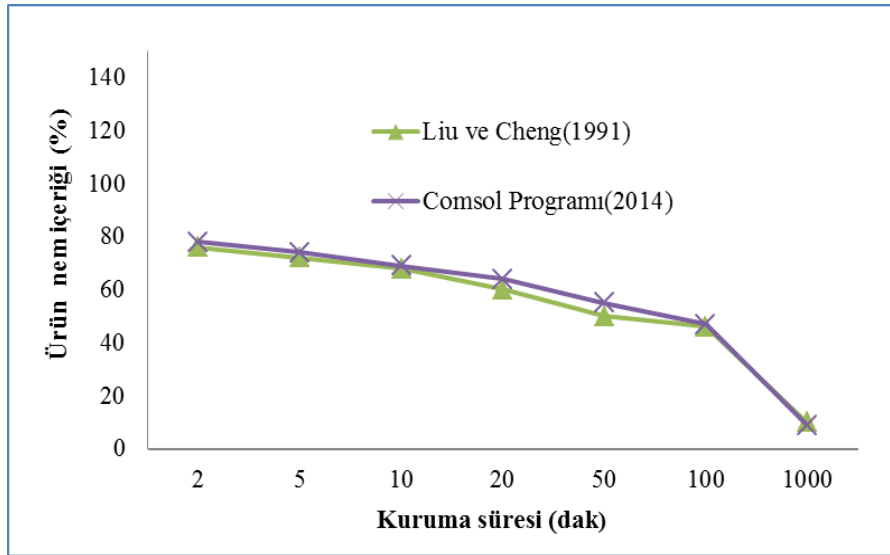
Yapılan çalışmada Liu ve Cheng (1991)'in yaptıkları çalışmanın sonuçlarının karşılaştırılması Comsol Programı (2014) kullanılarak yapılmıştır.(Şekil 3.9) Comsol programında farklı olarak Luikov yasalarının aksine genel ısı ve kütle transferi teorisi kullanılmıştır. Liu ve Cheng'in yapmış oldukları çalışmada kullandıkları odun özellikleri rehber alınarak yüzeyindeki sıcaklık ve nem dağılımının zamana bağlı olarak değişimi elde edilmiştir. Sıcaklık dağılım grafiğinde yapılan çalışmada yaklaşık %9 luk bir fark oluşmuş, nem dağılımı grafiğinin ise yaklaşık %5 oranında değiştiği görülmüştür.



Şekil 3.18. Comsol programında karşılaştırılması yapılan modelin gösterimi



Şekil 3.19. Odun parçasının yüzey sıcaklığının zamana bağlı değişimi(Liu ve Cheng 1991, Comsol Programı 2014)



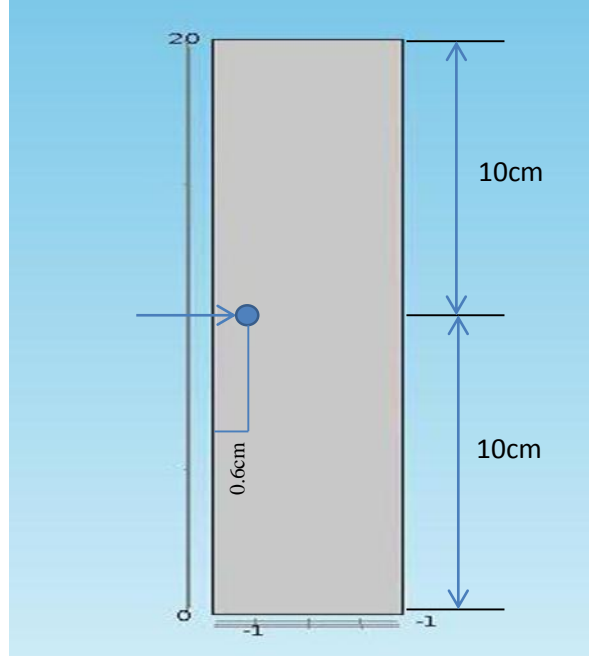
Şekil 3.20. Odun parçasının yüzey nem içeriğinin zamana bağlı değişimi(Liu ve Cheng 1991, Comsol Programı 2014)

Karşılaştırılması yapılan son çalışma ise; Kocaefe ve ark. (2007) yapmış oldukları çalışmada 3 boyutlu olarak modelledikleri odunun (3.5 cm×3.5cm×20cm) yapısına zarar vermeden yüksek sıcaklıkta kurutulması davranışını incelemişlerdir.

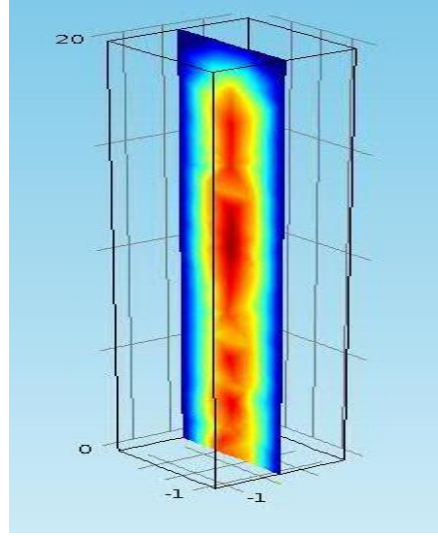
Çizelge 3.5. 25°C sıcaklığındaki odun malzemesinin termofiziksel özellikleri (Kocaefe ve ark. 2007)

Parametre (Birimi)	Değeri
Malzemenin yoğunluğu (kg/m ³)	660
Havanın sıcaklığı(°C)	20°C /saat
Malzemenin nem içeriği(%)	12.5
Havanın nem içeriği(%)	0.1
Isı iletim katsayısı (W/mK)	0.1
Molar buharlaşma ısısı (J/kg)	0.25×10 ⁷
Özgül ısı (J/kgK)	1884
Nem kapasitesi(kg/kg)	0.01
Nem iletkenliği(kg/ms)	2.2×10 ⁻⁸
Isı taşınım katsayısı(W/m ² K)	15
Kütle transfer katsayısı(m/s)	1.6×10 ⁻⁵
Su molekül ağırlığı(gr/mol)	18

Odunun içerisinde Şekil 3.21 de gösterilen merkez kesitindeki noktanın sıcaklığını ve nem içeriğini deneysel olarak ölçüp 3 farklı metodun (Luikov Modeli, Difüzyon Modeli ve Multiphase Modeli) sonuçları ile karşılaştırmışlardır. Sonuçların birbiri ile uyumlu olduğunu görmüşlerdir. Luikov denklemlerinin çözümü için Femlab sonlu eleman yazılımını kullanmışlardır. Difüzyon modeli için ise sonlu fark denklemlerinin çözümünde kullanılan Fortran bilgisayar programını kullanmışlardır. Multiphase Modelinde Darcy modeli kullanılıp çözümler için Femlab yazılımı kullanılmıştır. Sonuçları her saat kurutucu gazın sıcaklığını 20 °C artırıp son olarak 220°C ye çıkarmışlardır.

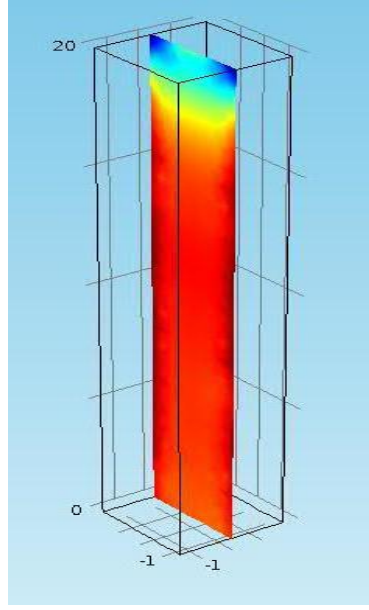


Şekil 3.21. Karşılaştırılması yapılan modelin merkezinin kesitinin görünüşü

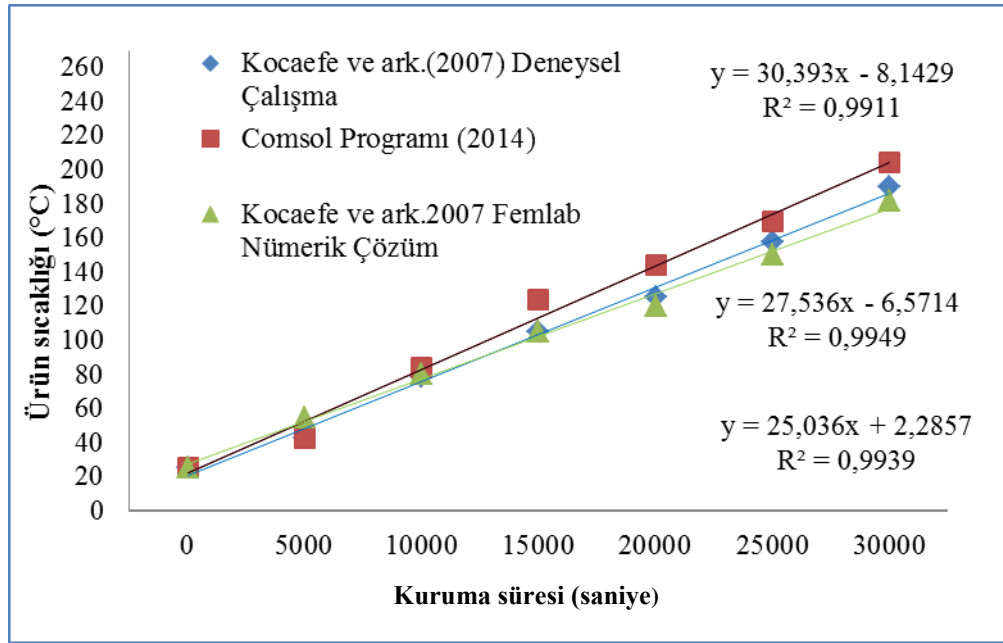


Şekil 3.22. Analizi yapılan modelin merkezinin kesitinin nem dağılımı

Yaptığım çalışmada odun malzemesini 3 boyutlu olarak Comsol programında modelleyip her saat havanın sıcaklığını 20°C arttırıp odunun Şekil 3.21’de gösterilen noktanın belli zamanlarda sıcaklık ve nem dağılımı elde edildi.(Şekil 3.22-3.23) Bu sonuçlar daha sonra Darcy modeli (Femlab çözümü) ve deneysel sonuçlardan elde edilen veriler ile karşılaştırıldı.



Şekil 3.23. Analizi yapılan modelin merkezinin kesitinin sıcaklık dağılımı



Şekil 3.24. Odun parçasının sıcaklığının zamana bağlı değişimi(Kocafe ve ark. 2007 Deneysel Çalışma, Kocafe ve ark. 2007 Femlab Nümerik Metod Darcy Modeli, Comsol Programı 2014)

Çizelge 3.6. Comsol programı ile yapılan sıcaklık değişimi için regresyon sonuçları

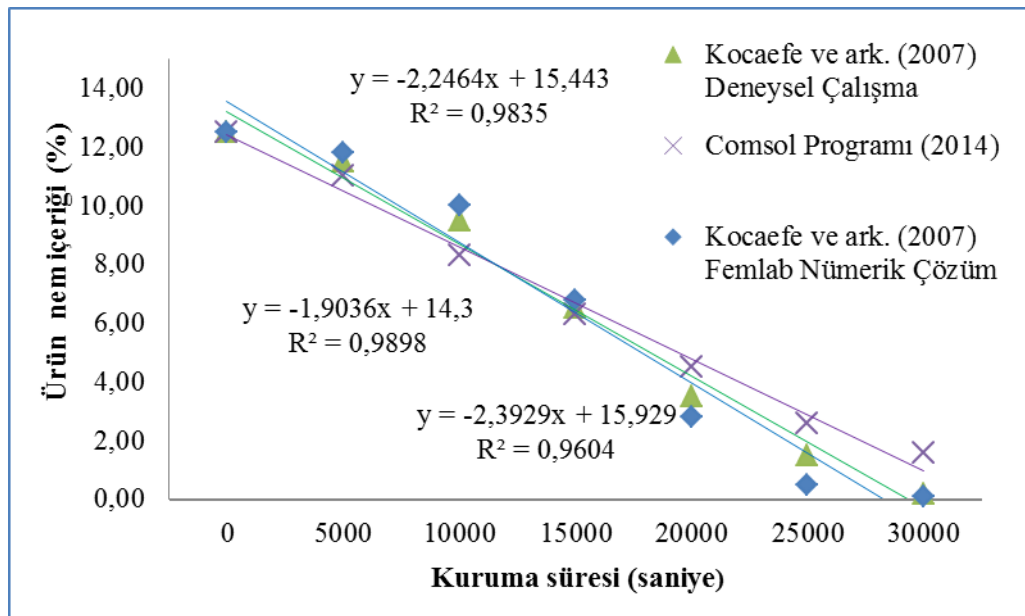
	df	SS	MS	F	Anlamlılık F
Regresyon	1	25864,32143	25864,32143	558,8833153	2,5218E-06
Fark	5	231,3928571	46,27857143		
Toplam	6	26095,71429			

Çizelge 3.7. Kocaeve ve ark. (2007) deneysel çalışmalarında yaptıkları sıcaklık değişimi için regresyon analizi

	df	SS	MS	F	Anlamlılık F
Regresyon	1	21230,03571	21230,03571	967,8296972	6,44185E-07
Fark	5	109,6785714	21,93571429		
Toplam	6	21339,71429			

Çizelge 3.8. Kocaeve ve ark. (2007) nümerik çalışmalarında yaptıkları sıcaklık değişimi için regresyon analizi

	df	SS	MS	F	Anlamlılık F
Regresyon	1	17550,03571	17550,03571	814,9270315	9,8813E-07
Fark	5	107,6785714	21,53571429		
Toplam	6	17657,71429			



Şekil 3.25. Odun parçasının nem içeriğinin zamana bağlı değişimi(Kocaeve ve ark. 2007 Deneysel Çalışma, Kocaeve ve ark, 2007 Femlab Nümerik Metod ,Darcy Modeli Comsol Programı 2014)

Çizelge 3.9. Comsol programı ile yapılan nem değişimi için regresyon sonuçları

	df	SS	MS	F	Anlamlılık F
Regresyon	1	101,4603571	101,4603571	483,967632	3,60327E-06
Fark	5	1,048214286	0,209642857		
Toplam	6	102,5085714			

Çizelge 3.10. Kocaeve ve ark. (2007) deneysel çalışmalarında yaptıkları nem değişimi için regresyon analizi

	df	SS	MS	F	Anlamlılık F
Regresyon	1	141,3003571	141,3003571	297,2509391	1,20218E-05
Fark	5	2,376785714	0,475357143		
Toplam	6	143,6771429			

Çizelge 3.11. Kocaeve ve ark. (2007) nümerik çalışmalarında yaptıkları nem değişimi için regresyon analizi

	df	SS	MS	F	Anlamlılık F
Regresyon	1	160,3214286	160,3214286	121,1671345	0,000107693
Fark	5	6,615714286	1,323142857		
Toplam	6	166,9371429			

Çizelge 3.12. Comsol programı ile karşılaştırılan çalışmaların regresyon ve korelasyon analizi sonuçları

	Karşılaştırılması yapılan çalışmalar	Standart hata	Belirlilik katsayısı (R ²)	Korelasyon katsayısı (r)
Sıcaklık değişimi	Comsol Programı(2014)	6.80	0.98	-0.99
	Kocaeve ve ark. (2007) nümerik çalışma	4.64	0.99	-0.96
	Kocaeve ve ark. (2007) deneysel çalışma	4.68	0.99	-0.98
Nem içeriği değişimi	Comsol Programı(2014)	0.45	0.98	-0.99
	Kocaeve ve ark. (2007) nümerik çalışma	1.15	0.95	-0.96
	Kocaeve ve ark. (2007) deneysel çalışma	0.68	0.98	-0.98

Şekil 3.24 ve 3.25’de görüldüğü gibi karşılaştırılan 3 yöntemin sonuçlarının grafik değişimleri için diğer kıyaslamalardan farklı olarak regresyon ve korelasyon analizi yapılmıştır. Burada basit doğrusal regresyon modeli kullanılmıştır. ($y = \beta_0 + \beta_1 x + \varepsilon$ β_0 ; regresyon kesim noktası, β_1 ; regresyon eğimi ve ε hata değeridir). Öncelikle sıcaklık ve nem değişimi için yukarıda verilen çizelgelerde 3 farklı çalışmanın regresyon analizleri yapılmıştır. Verilen ifadelerde df: serbestlik derecesi, SS: kareler toplam, MS: kareler ortalaması, F: istatistiksel katsayıdır. Burada bağımsız değişken zaman iken bağımlı değişken nem ve sıcaklıktır.

Çizelge 3.12’de elde edilen sonuçlara göre sıcaklık değişimi için Comsol programında yapılan çalışmanın belirlilik katsayısının 0.98, diğer çalışmaların ise 0.99 olduğu görülmektedir. Bu değer 1’e ne kadar yakınsa regresyon denkleminin o kadar iyi bir tahminleyici olduğu söylenebilir. Nem içeriğinin değişiminde ise belirlilik katsayısı Comsol programında 0.98 iken Kocaefe ve ark. nümerik çalışmasında 0.95 ve deneysel çalışmalarında 0.98 olduğu görülmektedir. Comsol programında yapılan çalışmada sıcaklık değişimi için standart hatanın 6.80 ve nem içeriğinin değişimi için ise 0.45 olduğu görülmüştür. Bu sonuçlara göre Comsol programında oluşturulan modelin zamana bağlı olarak nem ve sıcaklık değişimlerinin doğruluk derecesinin hassas olduğu söylenebilir.

Korelasyon katsayısı açısından değerlendirirsek Çizelge 3.12’den Comsol programında yapılan nem ve sıcaklık değişim eğrilerinin korelasyon katsayısının -0.99, Kocaefe ve ark. nümerik çalışmasında -0.96 ve deneysel çalışmalarında ise -0.98 olduğu görülmüştür. Korelasyon katsayısı iki değişken arasındaki ilişkiyi ve yönü belirlemeye yardımcı olmaktadır. Elde edilen sonuçlara göre Comsol programında korelasyon katsayısı -1’e yakın olarak mükemmel yakın çıkmıştır. Burada malzemenin sıcaklığı zaman ile artarken nem içeriğinin zamanla azalması arasındaki ilişkinin çok iyi olduğu görülmüştür.

Yukarıda daha önce yapılmış (deneysel, nümerik veya teorik) farklı çalışmaların Comsol programı ile karşılaştırılması yapılmış ve programın doğruluğu test edilmiştir. Bu sonuçlara göre Comsol programında yapılan çalışmada diğerlerinde elde edilen verilerden az bir fark olduğu görülmüştür. Bu sonuçlara göre Comsol programında

oluşturulan difüzyon modelinin diğer modellere yakın sonuçlardan dolayı uygun olduğu söylenebilir.

Ansys Fluent 14.5 ve Comsol 4.3a Programları kullanılarak yapılan bu çalışmada; üç farklı kalınlık, üç farklı hava hızı, üç farklı hava sıcaklığı ve üç farklı ürün nemi için hesaplamalar yapılmıştır. Ansys analizlerinde malzemenin kalınlığı (3cm, 5cm ve 7cm), kurutma havası hızı (1 m/s, 1.5 m/s ve 2 m/s), kurutma havası sıcaklığı (40°C, 60°C, 80°C) ve ürün nemi (%40, %60 ve %80) parametreleri değiştirilip diğer özellikler sabit tutularak malzemenin nem ve sıcaklık dağılımları zamana bağlı olarak gösterilmiştir. Hesaplamalarda havanın nem içeriği %10 odun malzemesinin nem içeriği %40 alınmıştır. Odun malzemesinin mobilya olarak kullanılacağı varsayılarak kullanım ortamına uygun olacak şekilde denge nem oranı seçilmiştir (Çolakoğlu 2009, Janik 1960, Fessel 1965).

Çizelge 3.13. 25°C sıcaklığındaki odun malzemesinin termofiziksel özellikleri (Irudayaraj ve ark. 1990, Kreith 1986, Lamnatou ve ark. 2009)

Parametre (Birimi)	Değeri
Odunun yoğunluğu (kg/m ³)	500
Isı iletim katsayısı (W/mK)	0.35
Molar buharlaşma ısısı (J/kg)	0.24×10 ⁷
Özgül ısı (J/kgK)	1284
Nem kapasitesi(kg/kg)	0.01
Nem iletkenliği(kg/ms)	1.8×10 ⁻⁸
Su molekül ağırlığı(gr/mol)	18

Öncelikle farklı kalınlıklar için zamana bağlı nem ve sıcaklık dağılımlarını hesaplanmıştır. Kurutma havası hızı 2m/s, kurutma havası sıcaklığı 40°C, havanın nemi %40, malzemenin nemi %10 ve malzemenin kalınlığı sırası ile 3cm, 5cm ve 7cm alınarak sonuçların nasıl değiştiği gözlemlenmiştir. Hesaplamaların bir örneği, bulgular kısmında kalınlığın 3 cm alındığı durum içim adım adım anlatılmıştır. Diğer sonuçlar ise toplu olarak verilmiştir.

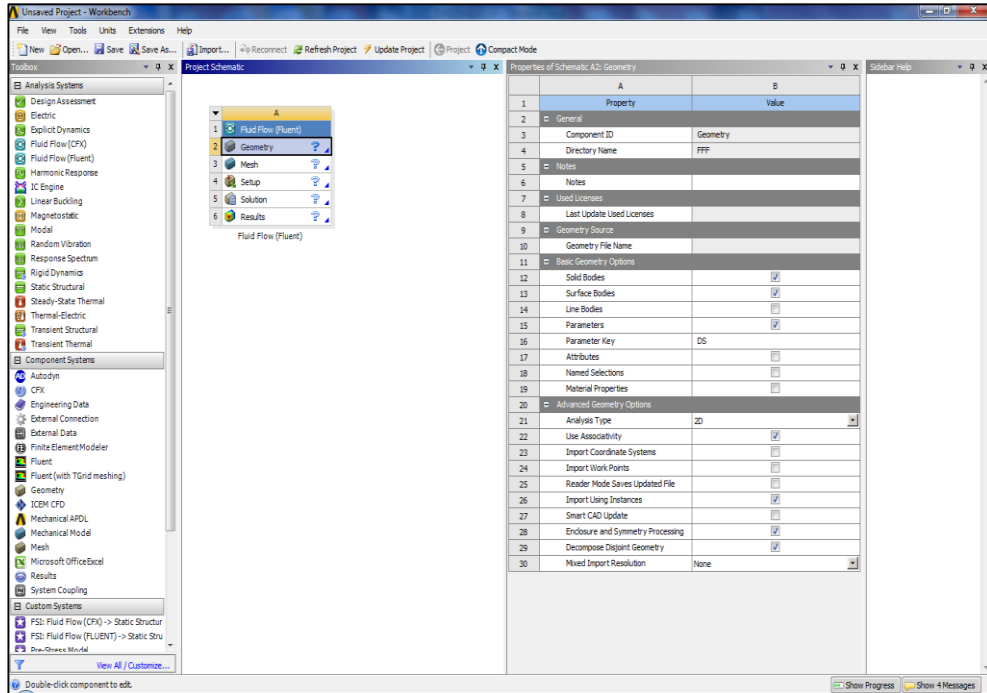
4. BULGULAR ve TARTIŞMA

4.1. 3 cm Kalınlığındaki Malzeme İçin Yapılan İşlem Adımları ve Farklı Kalınlık İçin Analiz Sonuçları

Ansys 14.5 Fluent paket programı ile öncelikle dikdörtgen kesitli malzemenin ortalama yüzeyinin ısı taşınım katsayısı hesaplanmıştır. Daha sonra ısı taşınım katsayısı ile kütle taşınım katsayısı arasındaki bağıntı kullanılarak kütle taşınım katsayısı bulunmuştur. Comsol paket programına gerekli veriler girilerek 2D axisymmetric olarak alınan ürünün nem ve sıcaklık dağılımları hesaplanmıştır.

4.1.1. Ansys 14.5 Fluent Programında Isı Taşınım Katsayısının Hesaplanması

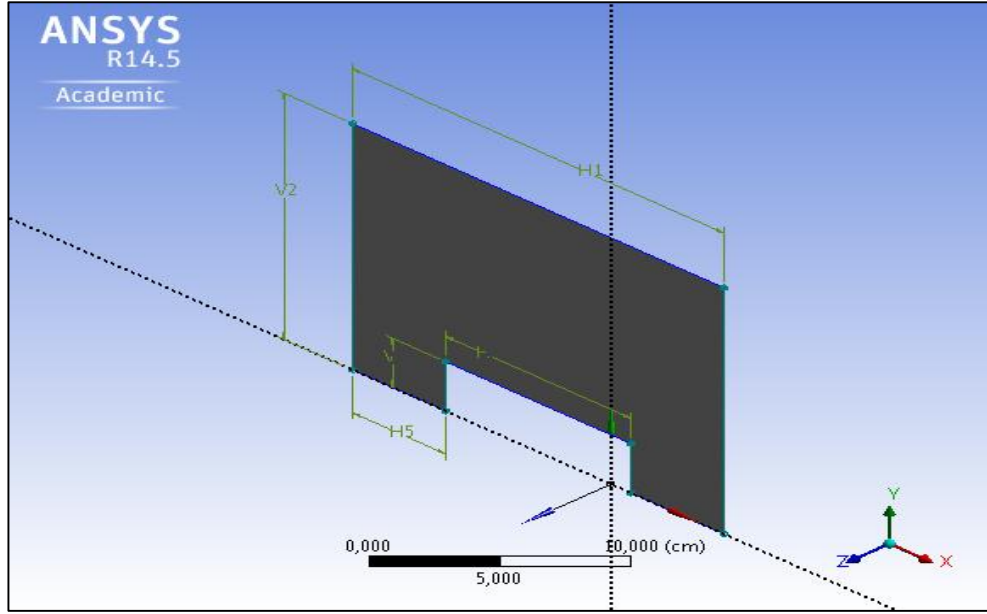
Isı taşınım katsayısının hesaplanması için ilk olarak Ansys 14.5 Workbench programı çalıştırıldı. Açılan sayfanın sol kısmındaki Fluid Flow (Fluent) analizi seçildi. Analiz tipi 2D seçildikten sonra geometri oluşturularak analize başlandı (Şekil 4.1).



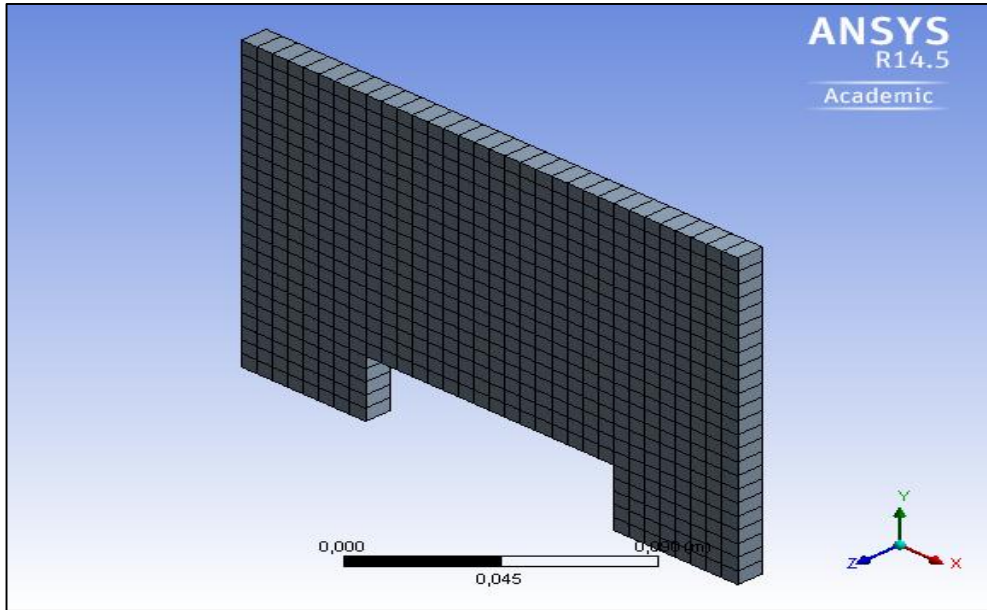
Şekil 4.1. Ansys programı arayüzü

Şekil 4.1'de görüldüğü gibi açılan Fluid Flow (Fluent) modülü altında Geometry kısmına geçiş yapılarak hesaplama birimi olarak cm seçildi. xy koordinatlarında analiz

edilecek malzeme modeli oluşturularak, ölçülendirilmesi yapıldı. Çalışmada, ürün boyutları 3cm×10cm ve kanal boyutları ise 15cm×20cm olarak çizildi (Şekil 4.2).



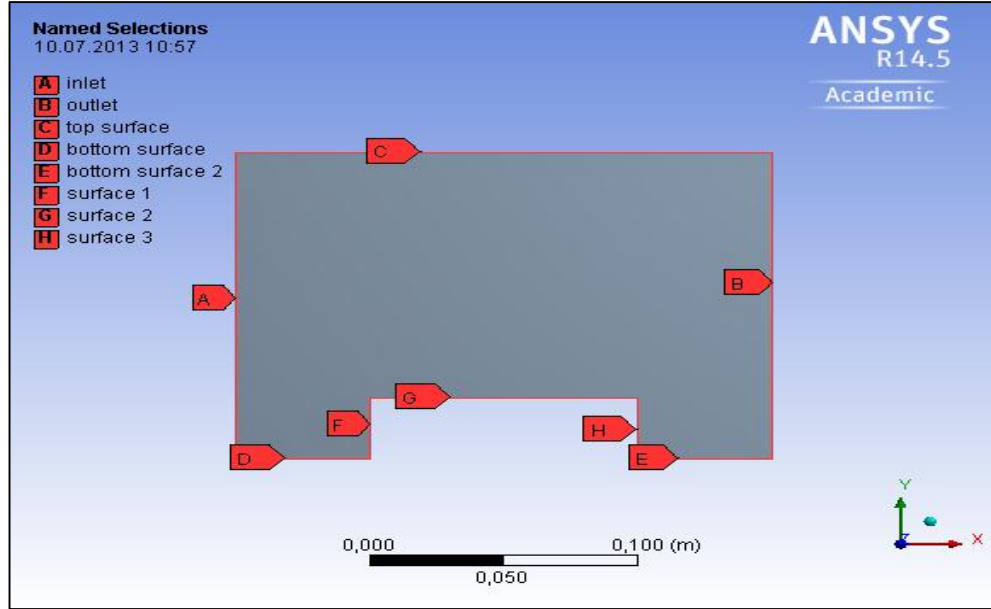
Şekil 4.2. Ansys programında geometrinin oluşturulması



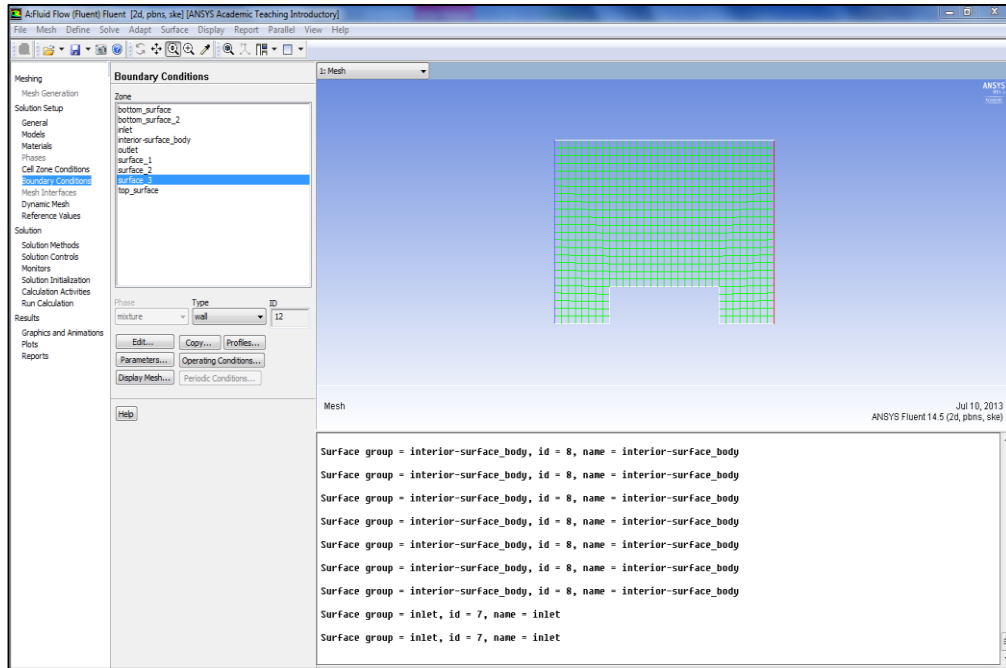
Şekil 4.3. Ansys programında meshlemenin gösterimi

Şekil 4.3'de görüldüğü üzere modelin mesh işleminin yapılabilmesi için proje şemasına gelinerek Mesh (ağ) modülü açıldı. Ürünün meshlemesi Mapped Face Meshing olarak isimlendirilen düzgün ağ yapısı seçilerek yapıldı. Quadrilaterals dörtgen ağ yöntemi

seçildi. Havanın akış alanı 688 elemana ve 750 noktaya bölündü. Sınır şartlarını belirlemek için yüzeylere isimler verildi (Şekil 4.4)



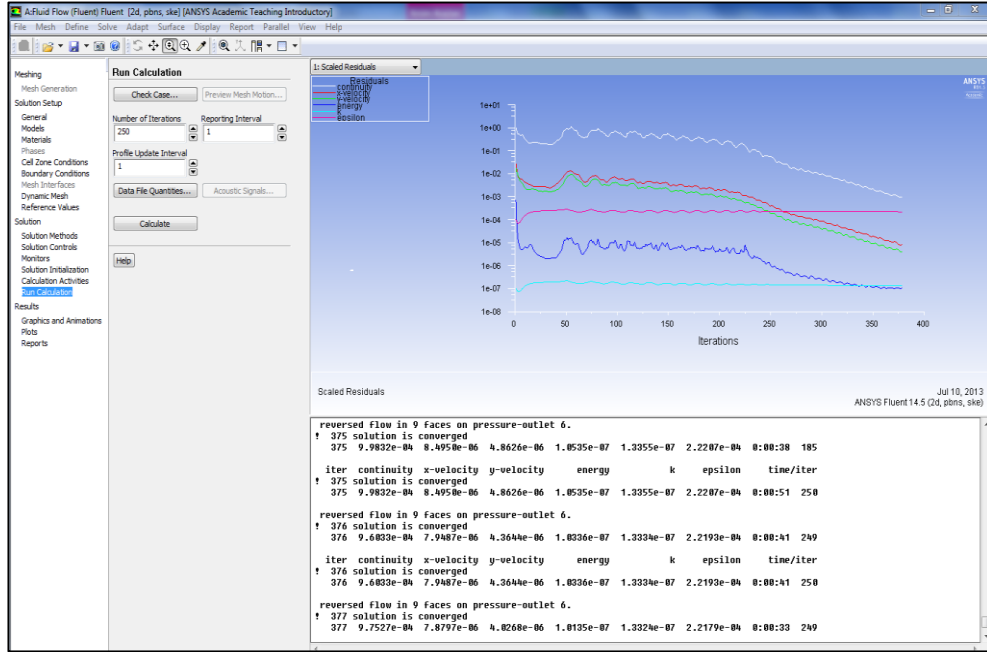
Şekil 4.4. Ansys programında yüzeylere isim verilmesi



Şekil 4.5. Ansys Fluent ara yüzü

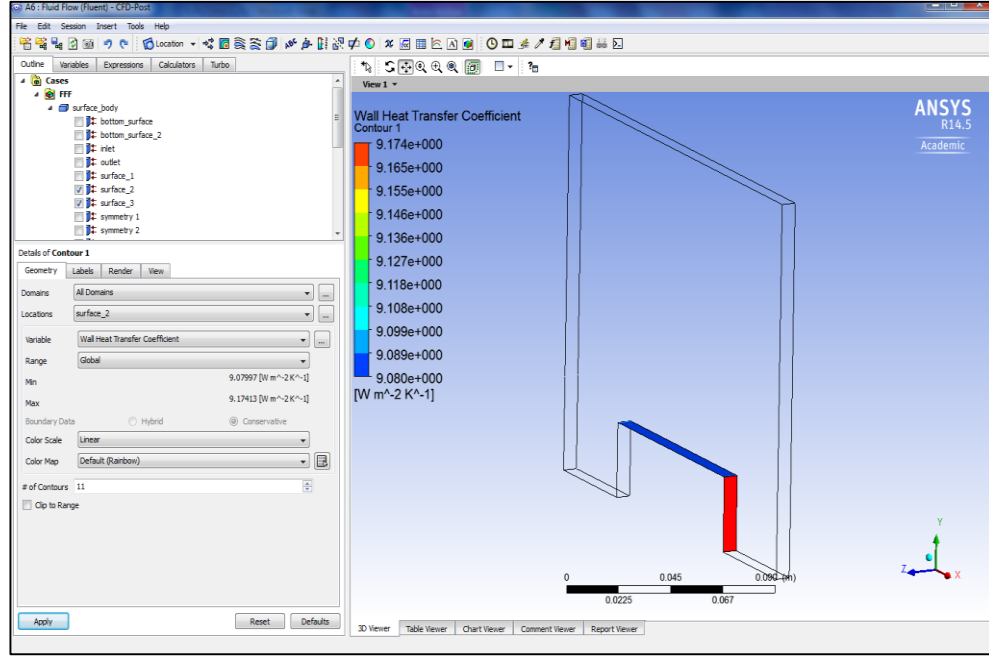
Daha sonra proje şemasından set up açıldı. Sol kısımda solution set up kısmında bulunan model seçeneği tıklanarak energy seçeneği on ve akış seçeneği standart k-e

modeli olarak değiştirildi. Material kısmından solid wood olarak değiştirilip özellikleri girildi. Daha sonra boundary conditions (sınır şartları) kısmı açılıp giriş için inlet sınır şartı olarak hızı 2 m/s ve giriş havası sıcaklığı 313 K olarak seçildi. Outlet (çıkış) için pressure outlet ($\Delta P=0$) sınır şartı uygulandı. Kanalın yüzeyleri için bottom surface 1-2 ve top surface ısı transferi olmadığı için adyabatik olarak seçildi. Malzemeye ait surface 1-2-3 ise 298 K sabit yüzey sıcaklığı olarak düzenlendi.



Şekil 4.6. Ansys Fluent programında analiz sayfası

Daha sonra solution kısmına gelindi. İteratif çözücü olarak Simple algoritması seçildi. Solution Control kısmından basınç denkleminin yakınsama kriteri 0.3, momentum denkleminin yakınsama kriteri 0.7, enerji denklemlerinin yakınsama kriteri 1, süreklilik yakınsama kriteri 0.001, enerji denklemlerinin yakınsama kriteri 0.000001 olarak alındı. Run calculation yapılarak 375. iterasyonda süreklilik, momentum ve enerji denklemlerinin yakınsama değerleri altına düştüğü anda işlem durduruldu sonuç elde edildi.



Şekil 4.7. Ansys programında CFD post çözümü

Workbench proje şemasından Results kısmı açılarak, üst kısımdaki araç çubuklarından Contour'a tıklandı. Location açılarak surface 1 ve surface 2 için variable kısmından Wall Heat Transfer Coefficient ayrı ayrı hesaplandı ve ortalaması alındı. Isı taşınım katsayısı $9.127 \text{ W/m}^2\text{K}$ olarak hesaplandı. Isı ve kütle transferi arasındaki benzeşim bağıntısı olan denklem (3.52) daha önce elde edilmişti.

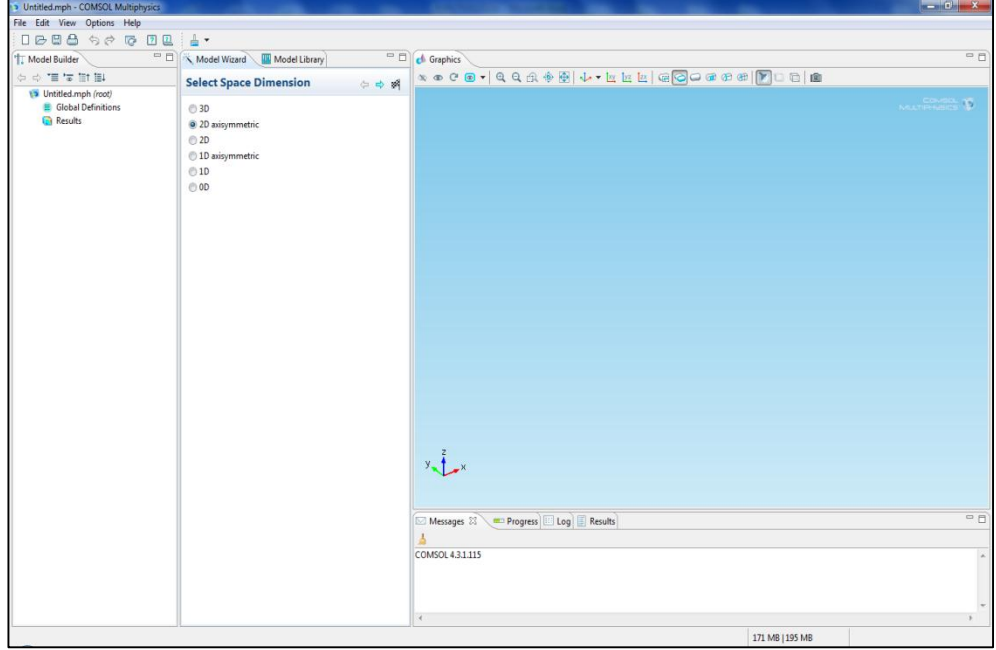
Burada Le sayısı, hava su buharı karışımları için bire yakın olması ve sıcaklık değişmelerinden etkilenmediğinden dolayı laminer ve türbülanslı akışlarda yaklaşık bir gibi alınabilir. Yukarıdaki bağıntı yeniden düzenlenirse aşağıdaki gibi yazılabilir. Burada ρ ve c_p havanın herhangi bir sıcaklıktaki özgül kütlesi ve özgül ısıdır (Çengel 2011).

$$h = \rho c_p h_m \quad (4.1)$$

3 cm kalınlığındaki malzeme için yapılan bu örnekte 40°C sıcaklığındaki hava için termal özellikler (özgül kütle ve özgül ısı) alınarak kütle taşınım katsayısı yukarıdaki bağıntıdan $8.11 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ olarak hesaplanmıştır.

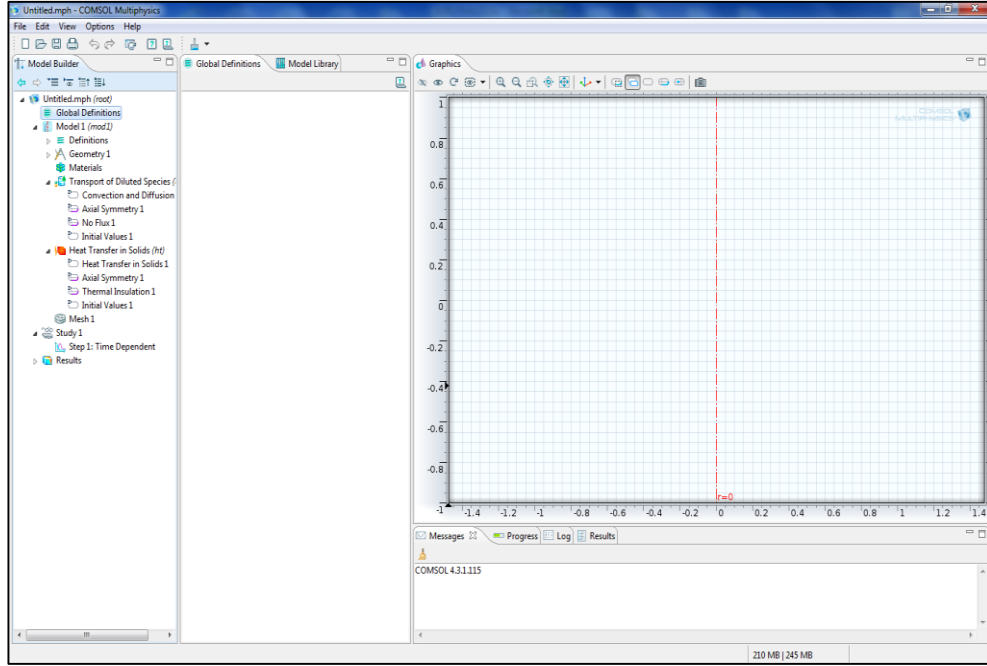
4.1.2. Cansol Programında Nem ve Sıcaklık Dağılımının Hesaplanması

Cansol 4.3a programı çalıştırıldığında açılan sayfadan önce sırası ile model 2D axisymmetric seçildi, daha sonra next diyerek kullanacağımız fiziksel denklemler seçildi (Şekil 4.8).



Şekil 4.8. Cansol Programının ilk açılan arayüzü

Chemical Species Transport adı altında bulunan Transport of Diluted Species (chds) eklendi sonra Heat Transfer ana başlığının altında bulunan Heat Transfer için Solids eklenerek next ile devam edildi. Sonra Studies başlığı altında bulunan Time Dependent seçildi ve Finish denildiğinde Şekil 4.9'da gösterildiği gibi ekrana kullanılacak modüller geldi. Burada öncelikle değişken özellikleri tanımlanıp denklemleri ona göre çözdürüldü.



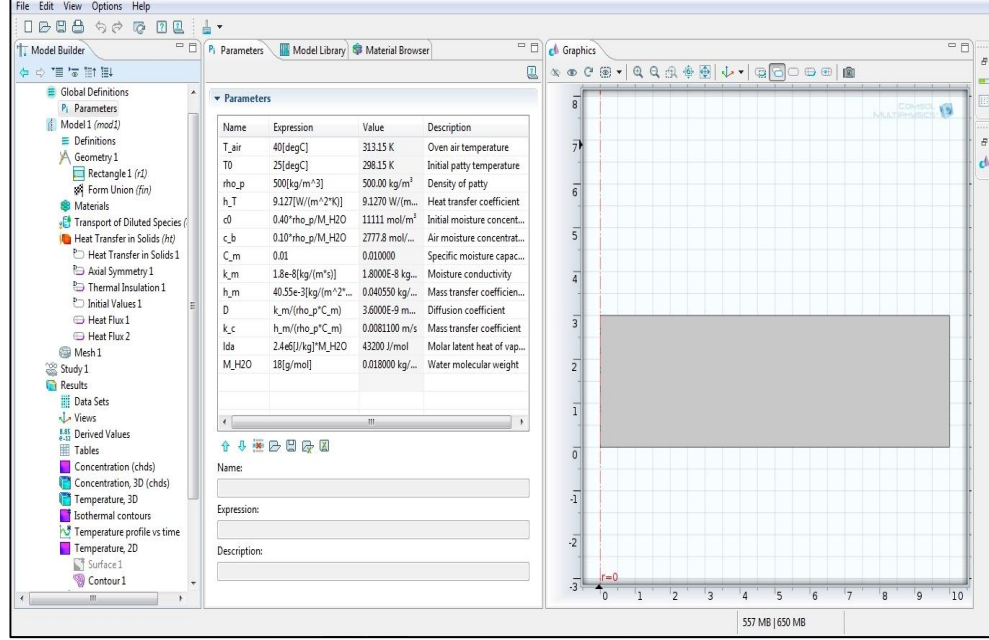
Şekil 4.9. Seçilen fiziksel denklemlerin gösterimi

Daha sonra açılan sayfadan Global Definitions kısmına sağ tıklayıp Parameters sayfası açılarak, bu kısma Çizelge 4.1'deki değerler yazıldı (Şekil 4.10).

Çizelge 4.1. Cmsol programına girilen materyal özellikleri

Name	Expression	Description
T_air	40[degC]	Fırın Hava Sıcaklığı
T0	25[degC]	Odunun başlangıç sıcaklığı
rho_p	500[kg/m^3]	Odunun yoğunluğu
h_T	9.127[W/(m^2*K)]	Isı taşınım katsayısı
c0	0.40*rho_p/M_H2O	Ürünün başlangıç nem içeriği
c_b	0.10*rho_p/M_H2O	Hava nem konsantrasyonu
c_m	0.01	Nem kapasitesi
k_m	1.8e-8[(kg/m*s)]	Nem iletkenliği
h_m	4.055e-4[kg/(m^2*s)]	Kütle taşınım hızı
D	$k_m/(\rho_p * C_m)$	Difüzyon katsayısı (Younsi ve ark. 2006)
k_c	$h_m/(\rho_p * C_m)$	Kütle taşınım katsayısı (Younsi ve ark. 2006)

Lda	$0.24e7[\text{J/kg}] * M_{\text{H}_2\text{O}}$	Molar buharlaşma ısısı
M_H2O	18[g/mol]	Su molekül ağırlığı



Şekil 4.10. Comsol programında girilen materyal özelliklerinin gösterimi

Bu işlemden sonra modeli oluşturmak için öncelikle geometri modülü açıldı. Ölçü birimi cm seçildi. Geometri 1 kısmına gelip sağ tıklayıp Rectangle seçildi. Açılan pencereden ürünün boyutları 3cm×10 cm olarak girildi.

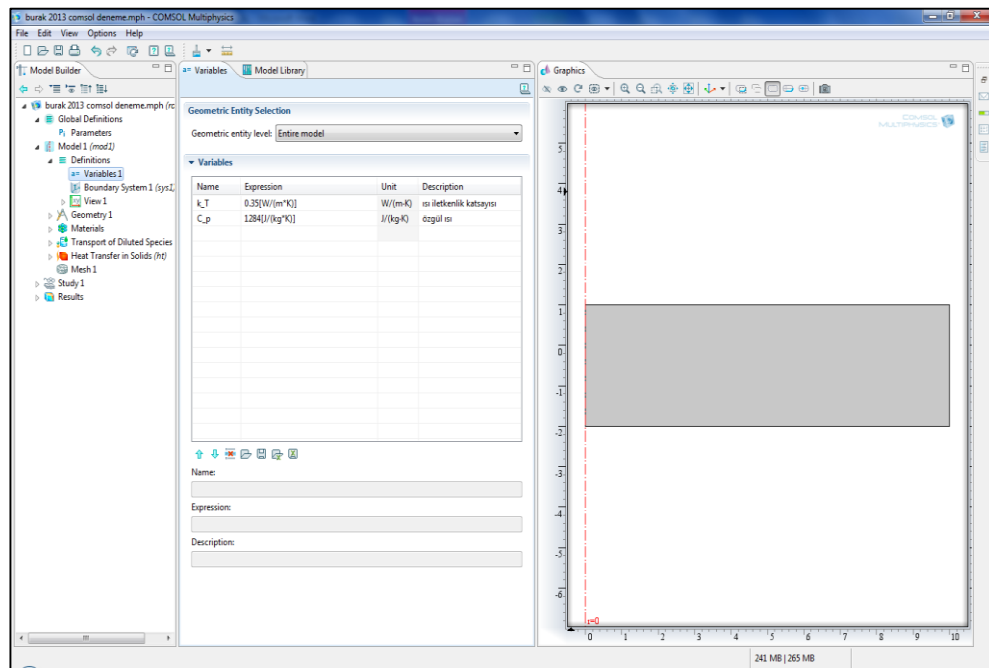


Şekil 4.11. Comsol programında oluşturulan geometrinin gösterimi

Solda model builder penceresinde bulunan Model 1'e sağ tıkladınarak, Definitions seçeneğini seçildi. Daha sonra açılan Variables penceresine Çizelge 4.2'de verilen malzemenin değerleri girildi (Şekil 4.12).

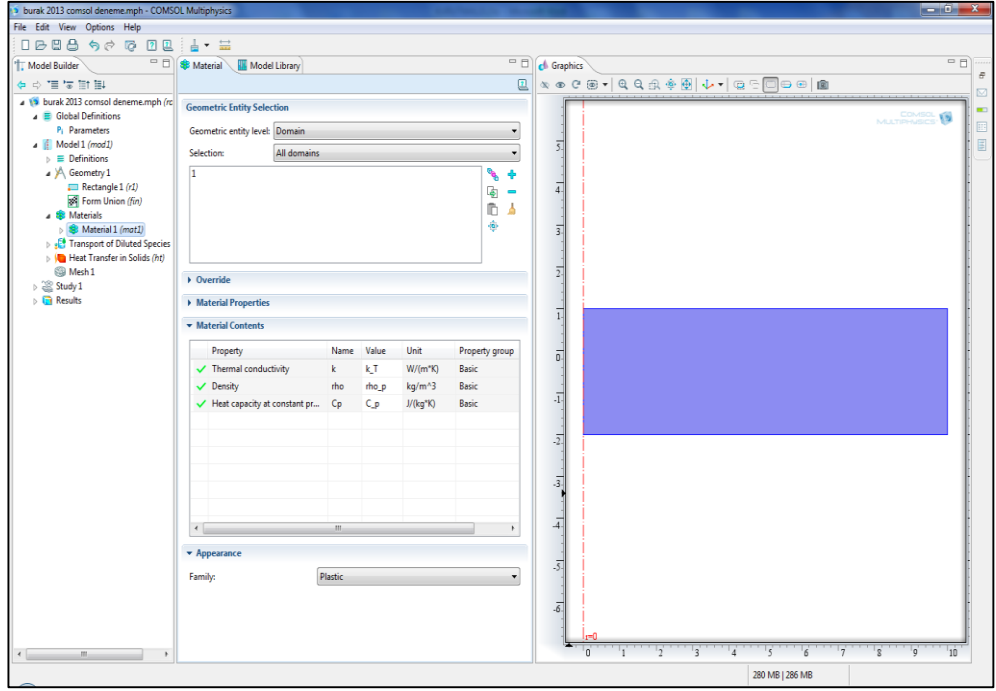
Çizelge 4.2. Comsol programında girilen değişkenlerin listesi

Name	Expression	Unit	Description
k_T	0.35[W/(m*K)]	[W/(m*K)]	Isıl iletkenlik
C_p	1284[J/(kg*K)]	[J/(kg*K)]	Özgül ısı

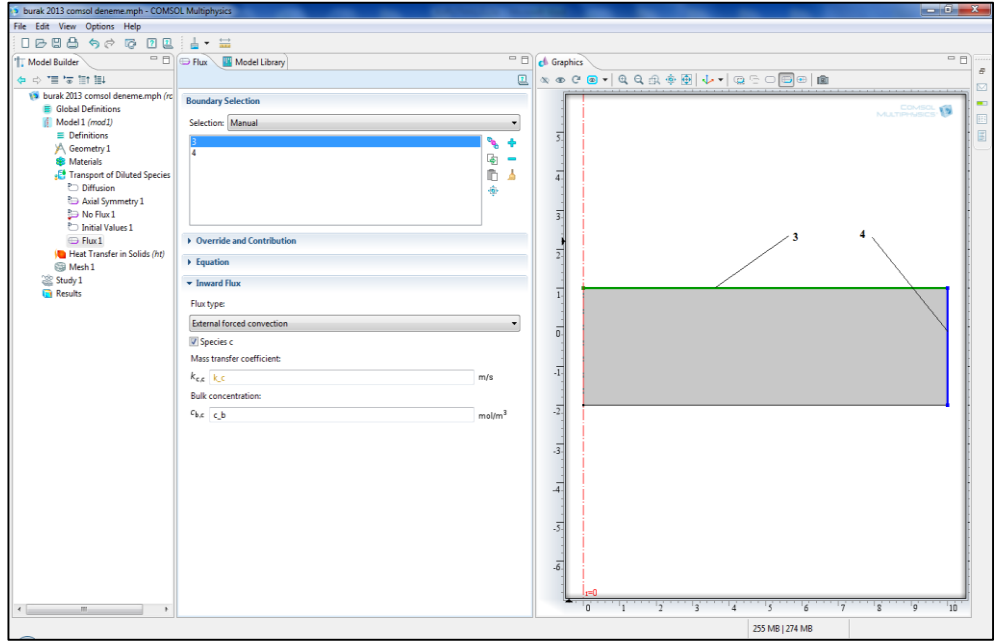


Şekil 4.12. Comsol programına girilen değişkenlerin gösterimi

Materyal içeriklerini tanımlamak için Model 1'in altındaki Material kısmına sağ tıklayıp Material seçildi. Açılan pencereden Material Contents kısmında aşağıdaki gibi düzeltme yapıldı. Değişken değerleri kısmına (Value) sırası ile k_T , rho_p , C_p yazıldı. Materyalin ismi wood olarak atandı (Şekil 4.13).



Şekil 4.13. Comsol programında materyalin atanması

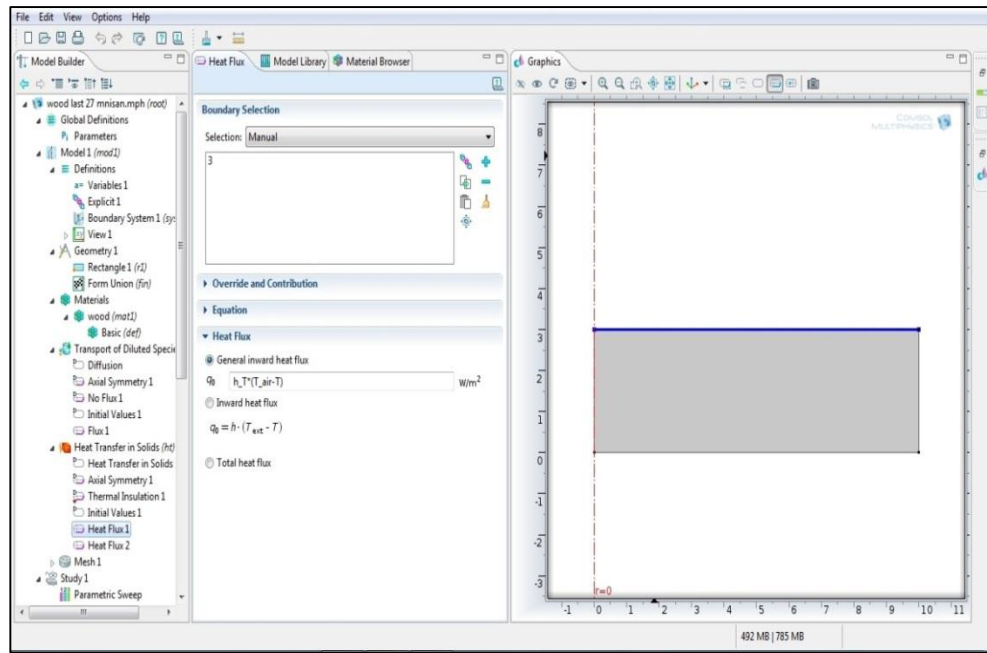


Şekil 4.14. Comsol programında ısı transferi için 3 ve 4 nolu yüzeyin sınır şartlarının giriş ekranı

Şekil 4.14'de gösterildiği gibi, modelde kullanılacak denklemlerin matematiksel modellerinde sınır şartlarının oluşturulması işlemi yapıldı. Öncelikle Difüzyon için Model 1'in altındaki Transport of Diluted Species penceresi açıldı. Transport

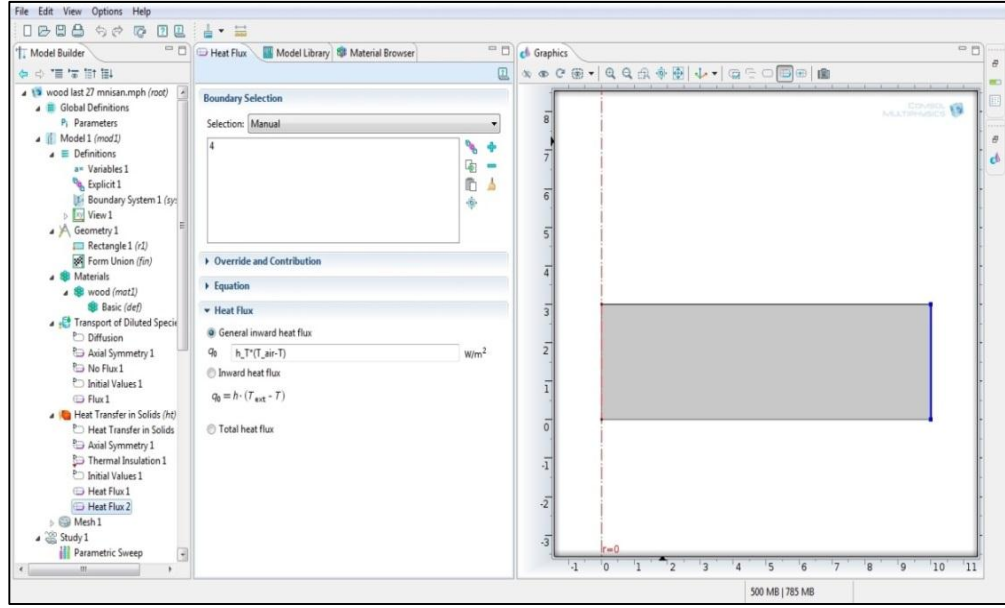
Mechanism kısmındaki Convection seçeneği kaldırıldı. Diffusion seçeneği açılarak D_c yazan kısmın altına D yazıldı. Aynı şekilde Initial Values 1 kısmına c_0 yazıldı. Transport of Diluted Species kısmına sağ tıklayıp Flux seçildi. Açılan sayfadan yalnızca 3 ve 4 seçildi. Species c seçeneği seçildi. Flux Type External forced convection seçildi. Hemen altında bulunan Mass transfer coefficient ve bulk concentration seçenekleri k_c ve c_b olarak tanımlandı. Sınır şartları tanımlanmış oldu.

Isı transferinin sınır şartlarını tanımlamak için ise Model Builder altında bulunan Heat Transfer in Solid kısmı açıldığında Initial Values seçeneğine T_0 yazıldı. Heat Transfer'in Solid kısmına gelinip sağ tıklanıp Heat Flux seçildi. 3 nolu yüzeyin sınır şartını girmek için Heat Flux seçeneği altında bulunan q_0 değerine $h \cdot T_{air} - T$ yazıldı (Şekil 4.15).

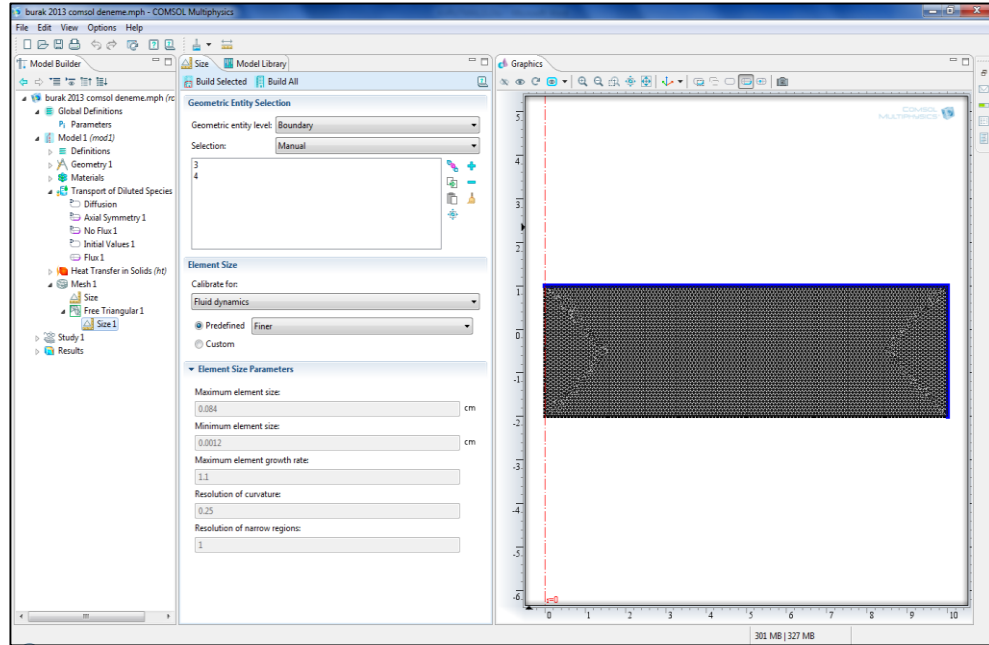


Şekil 4.15. Comsol programında 3 nolu yüzeyin sınır şartının girilmesi

4 nolu yüzeyin sınır şartlarını tanımlamak için yine aynı işlemler gerçekleştirildi. Bu sefer q_0 yazan kısma $h \cdot T_{air} - T$ yazıldı. (Şekil 4.16)



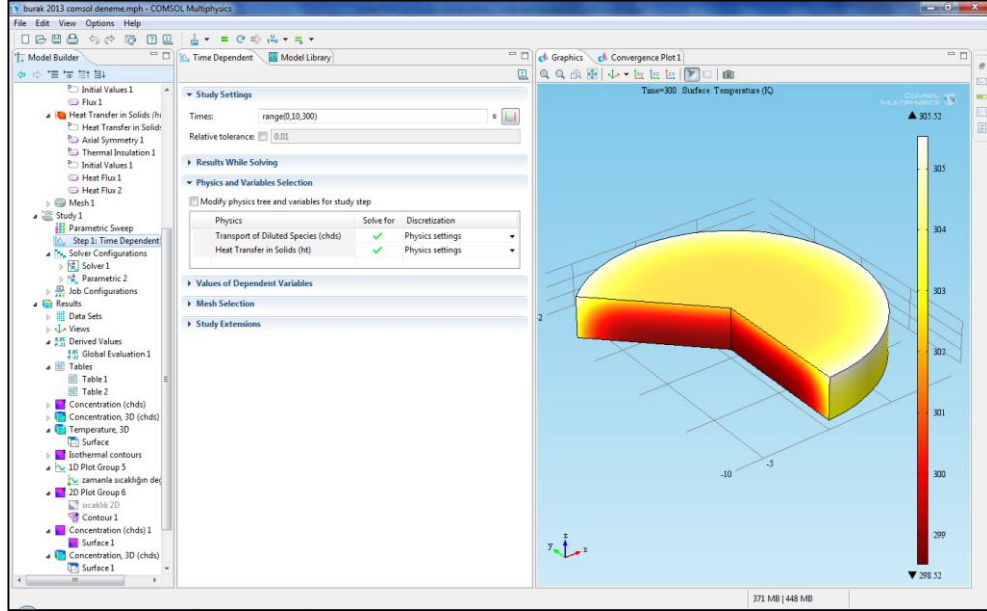
Şekil 4.16. Comsol programında 4 nolu yüzeyin sınır şartının girilmesi



Şekil 4.17. Comsol programında mesh sonucunun gösterimi

Şekil 4.17'de gösterildiği gibi, meshleme yapmak için Model 1 penceresinde Mesh 1 sağ tıklayıp Free Triangular 1 seçeneği seçildi. Bu seçeneğin üzerinde sağ tıklayıp Size 1 seçildi. Geometric entity level kısmından Boundary seçilerek yalnızca 3 ve 4 seçildi. Meshleme kalitesini seçmek için Mesh 1 altındaki Size kısmına gelinip Element Size Finer seçildi. Sonra üst kısımda bulunan Build All tıklanarak Meshleme oluşturuldu.

Analiz kısmına gelindiğinde Study 1 modülü seçilerek Step1 Time Dependent penceresi açıldı. 2 saat çözümü için Study Settings kısmına (0,10,7200) değerleri girildi. Daha sonra Study 1 kısmına gelinip sağ tıklayıp Compute seçeneği seçilerek çözüme başlandı (Şekil 4.18).

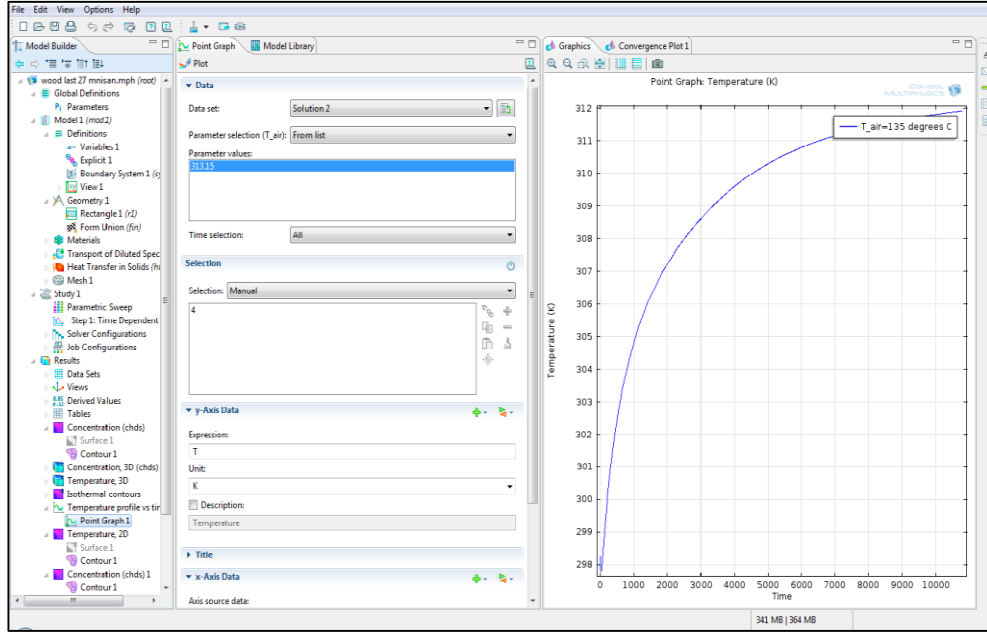


Şekil 4.18. Comsol Programında analizin sonuçlarının 3D gösterimi

Sonuç kısmında concentration tek boyut, 3D ve temperature 3D sonuç kısmında elde edildi.

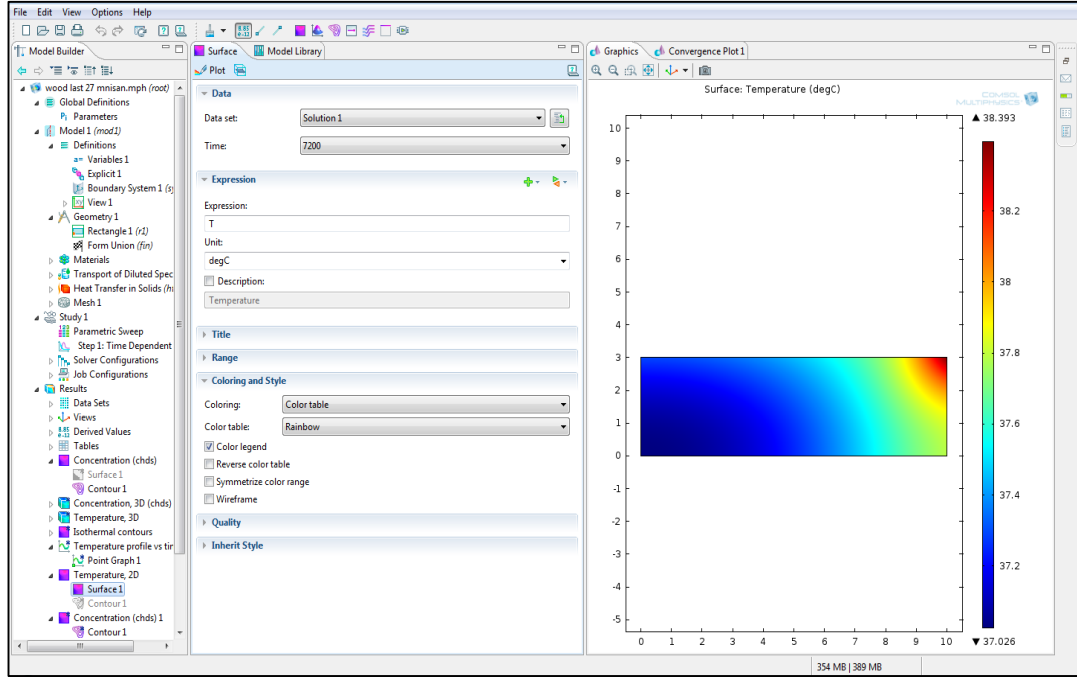
Ardından sıcaklığın zamana bağlı fonksiyonu ile tek boyutlu (2D) sıcaklık dağılımının bulunması için aşağıdaki işlemler yapıldı.

Model Builder penceresindeki Results kısmına gelinip sağ tıklanıp 1D Plot Group seçildi. Alt kısmında çıkan 1D Plot Group 5'e sağ tıklayıp Point Graph 1 seçildi. Açılan sayfadan sadece 1 yüzeyi seçildi. Y axis data yazan kısmın sağ üst kısmındaki Replace Expression kısmına tıklanarak sırası ile Heat Transfer'in Solids ve Temperature seçeneği seçildi. Y Axis Data kısmında bulunan sıcaklık birimi degC olarak değiştirildi. Üstteki plot kısmına tıklandı ve sıcaklığın zamana bağlı değişiminin grafiği elde edilmiş oldu (Şekil 4.19).



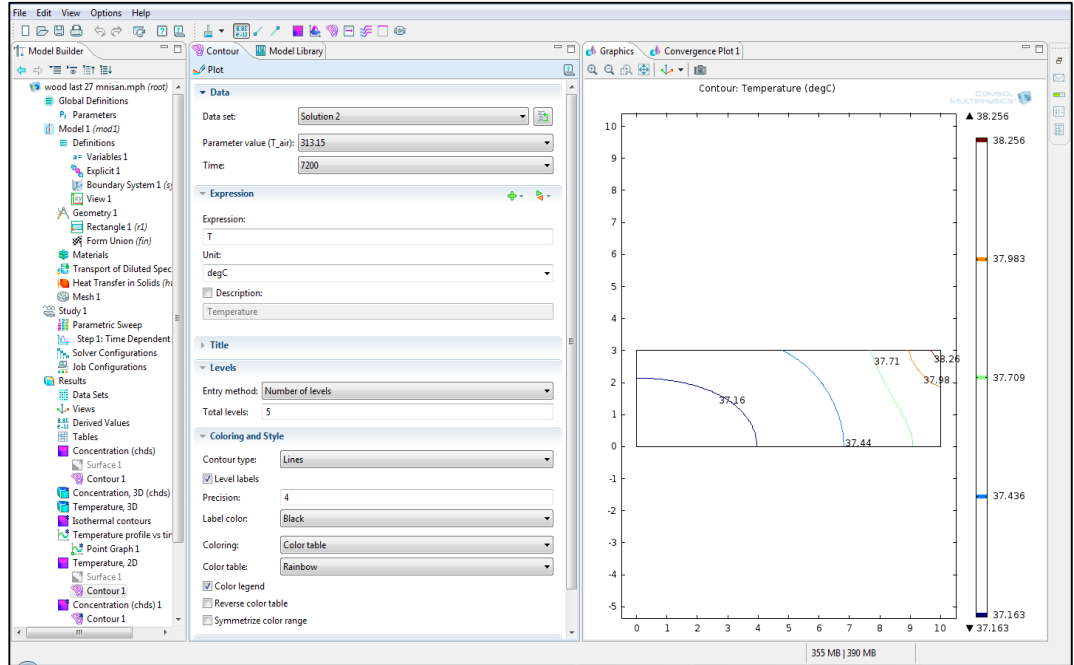
Şekil 4.19. Comsol Programında sıcaklığın zamana bağlı grafiğinin oluşturulması

Sıcaklık dağılımının bulunabilmesi için Results kısmına sağ tıklayıp 2D Plot Group seçildi. Alt kısımda çıkan 2D Plot Group üzerine sağ tıklanıp Surface seçildi. Açılan Surface Penceresinde bulunan Expression kısmının sağındaki Replace Expression'dan Heat Transfer in Solid ve Temperature seçenekleri seçildi. Sıcaklık birimi degC olarak değiştirildi. Plot kısmına basıldığında zamanla malzeme içindeki sıcaklık dağılımı elde edildi. Aynı zamanda time kısmından istenilen zamanda, ürün içindeki sıcaklık dağılımı gösterilmektedir (Şekil 4.20).

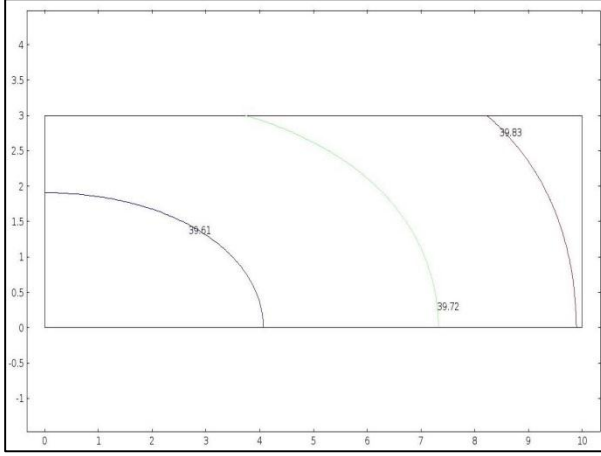


Şekil 4.20. Comsol programında sıcaklığın renk dağılımı şeklinde gösterimi

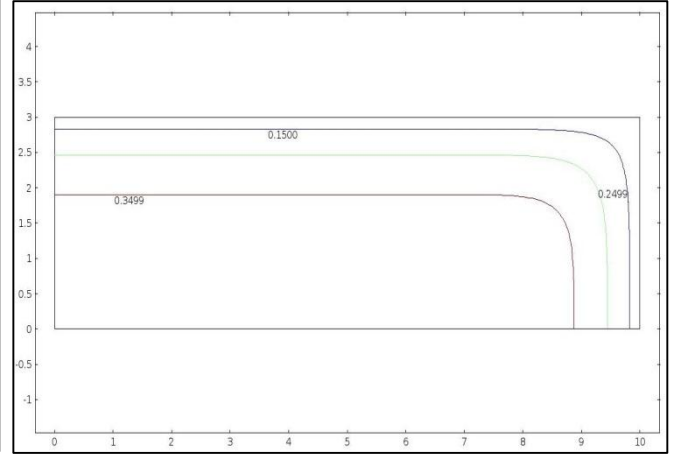
Şekil 4.21'de gösterildiği gibi sıcaklık dağılımı derece olarak ürün içerisinde de gösterilebilmektedir.



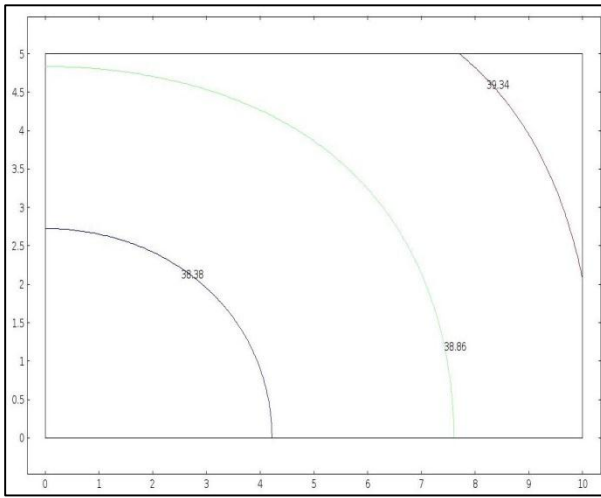
Şekil 4.21. Comsol programında sıcaklığın çizgiler (contour) ile gösterimi



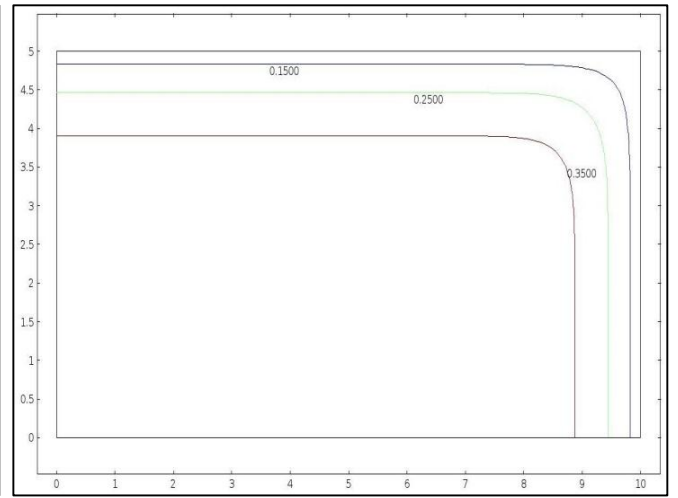
(a)



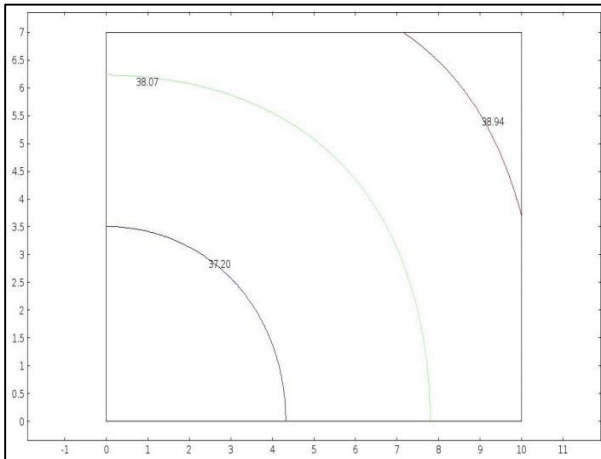
(d)



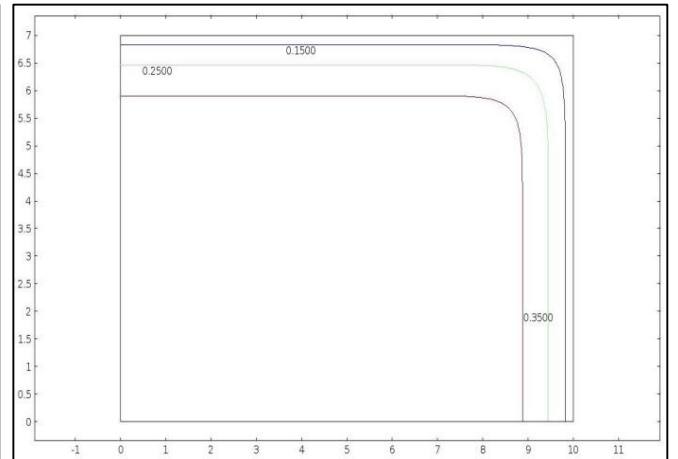
(b)



(e)



(c)



(f)

Şekil 4.22. 2 m/s hava hızında 40 °C sıcaklığında a-d)3cm b-e)5cm c-f)7cm kalınlığındaki ürünün 2 saat sonraki sıcaklık (°C) ve nem (%) dağılımları

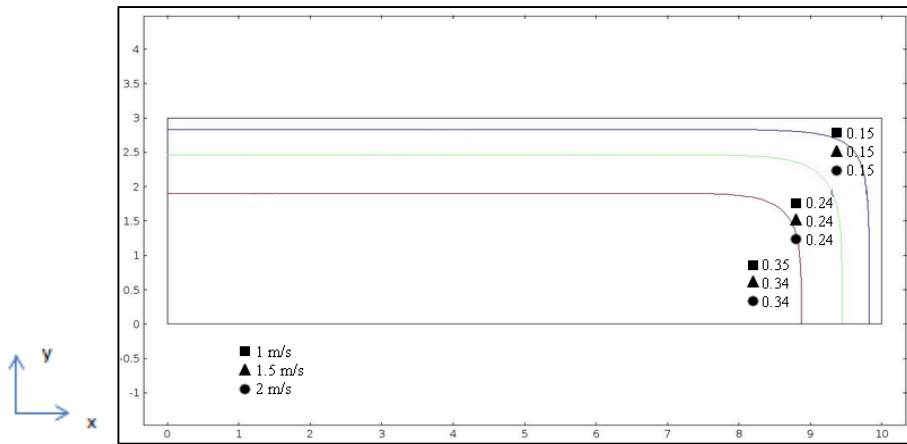


Kurutmanın 2 saat sonrasında Şekil 4.22 d) 3 cm kalınlığındaki malzeme için sol alt noktadaki nem içeriği %34 , e) 5 cm kalınlığındaki malzeme için %35 ve f) 7 cm kalınlığındaki malzeme için ise %35 olarak değiştiği görülmüştür. Bu sonuçlara göre kalınlık arttıkça nem içeriğinin (sol alt noktada) en son kuruyan bölgede çok az miktarda arttığı görülmüştür.

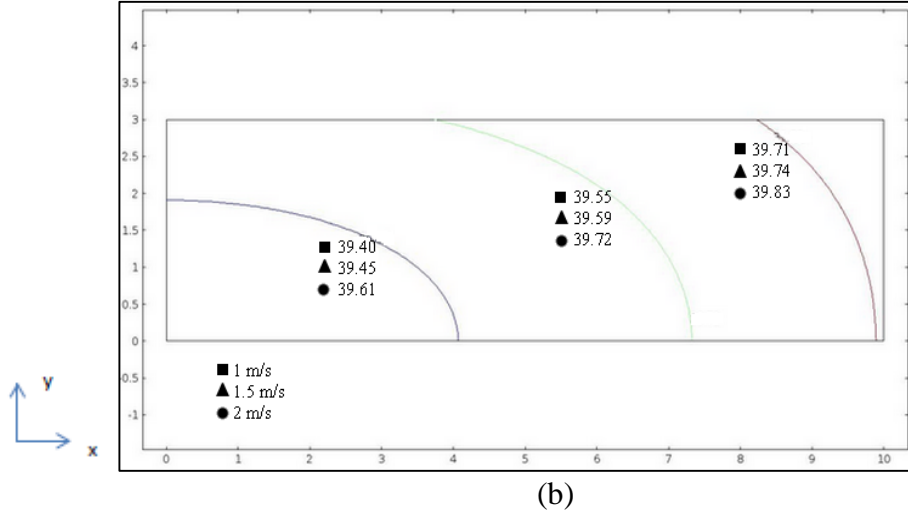
Kurutmanın 2 saat sonrasında Şekil 4.22 a) 3 cm kalınlığındaki malzeme için sol alt noktadaki sıcaklık 39.61°C , b) 5 cm kalınlığındaki malzeme için 38.38°C ve c) 7 cm kalınlığındaki malzeme için ise 37.20°C olarak değiştiği görülmektedir. Bu sonuçlara göre kalınlık arttıkça ürünün içindeki sıcaklığın azaldığı görülmüştür.

4.2. 3 cm Kalınlığında 40°C Kurutma Hava Sıcaklığında ve %40 Nem İçeriğine Sahip Malzemede Farklı Hızlar İçin Analiz Sonuçları

Kurutmanın 2 saat sonrasında Şekil 4.23-a) 1m/s kurutma havası hızı için sol alt noktadaki nem içeriği %35, 1.5 m/s kurutma havası hızı için %34 ve 2 m/s kurutma havası hızı için ise %34 olarak değiştiği görülmüştür. Bu sonuçlara göre kurutma havası hızı arttıkça nem içeriğinin (sol alt noktada) en son kuruyan bölgede azda olsa azaldığı görülmüştür.



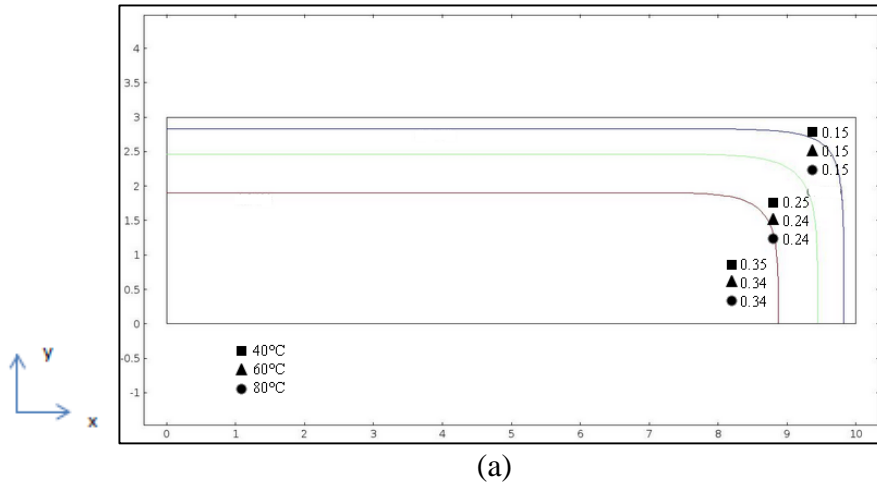
(a)

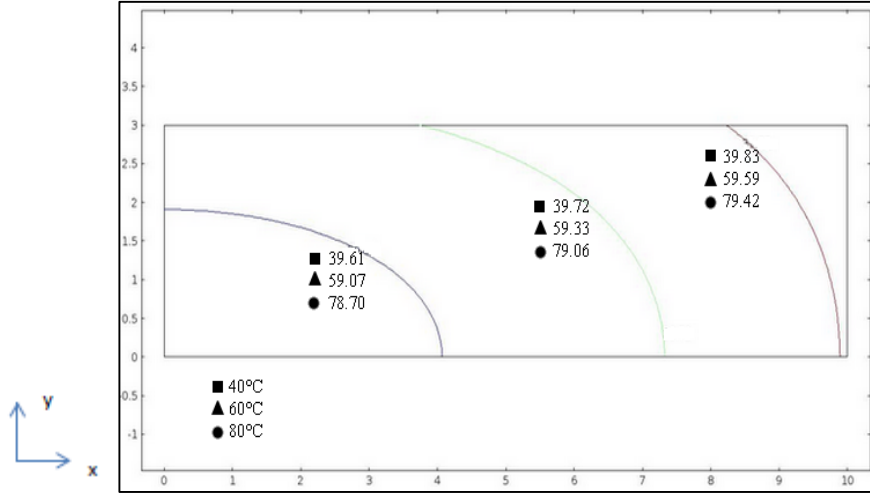


Şekil 4.23. 3 cm kalınlığında 40 °C kurutma havası sıcaklığında 1 m/s ,1.5 m/s ve 2 m/s hava hızındaki ürünün 2 saat sonraki sıcaklık (°C) ve nem (%) dağılımları

Kurutmanın 2 saat sonrasında Şekil 4.23-b) 1 m/s kurutma havası hızı için sol alt noktadaki sıcaklık 39.40°C, 1.5 m/s kurutma havası için 39.45°C ve 2 m/s kurutma havası için ise 39.61°C olarak değiştiği görülmüştür. Bu sonuçlara göre kurutma havası hızı arttıkça ürünün içindeki sıcaklığın çok az miktarda arttığı görülmüştür.

4.3. 3 cm Kalınlığında %40 Nem İçeriğine Sahip ve 2m/s Hava Hızı ile Malzemede Farklı Kurutma Havası Sıcaklıkları İçin Analiz Sonuçları





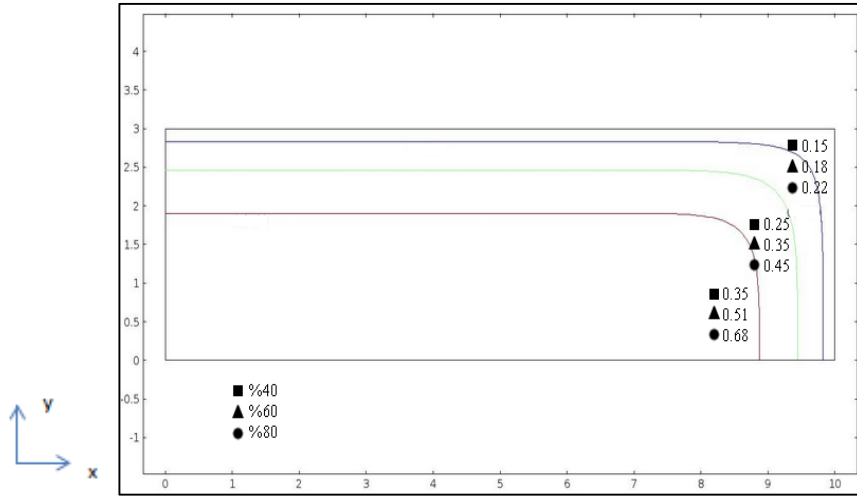
(b)

Şekil 4.24. 3 cm kalınlığında 2 m/s hava hızı ve 40°C, 60°C ve 80°C kurutma havası sıcaklığındaki ürünün 2 saat sonraki sıcaklık (°C) ve nem (%) dağılımları

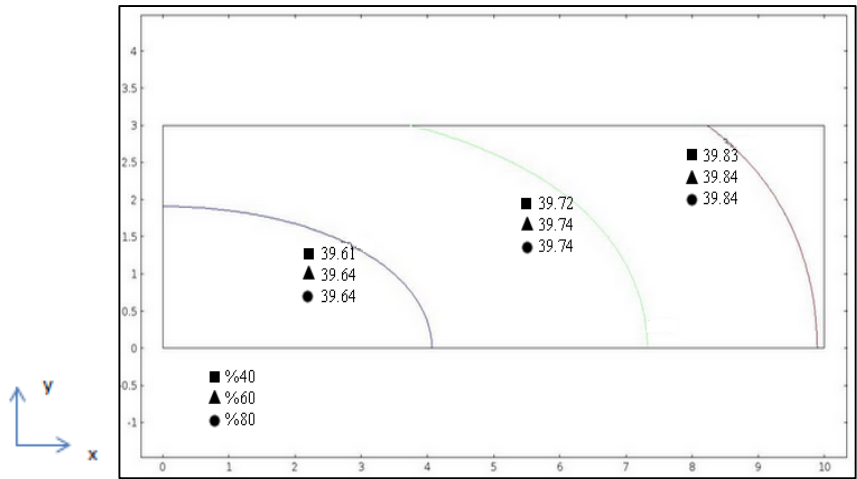
Kurutmanın 2 saat sonrasında Şekil 4.24 a) 40°C kurutma havası sıcaklığı için sol alt noktadaki nem içeriğinin %35 , 60°C sıcaklığındaki kurutma havası sıcaklığı için %34 ve 80°C sıcaklığındaki kurutma havası sıcaklığı için ise %34 olarak değiştiği görülmektedir. Bu sonuçlara göre kurutma havası sıcaklığı arttıkça nem içeriğinin (sol alt noktada) en son kuruyan bölgede birbirine çok yakın olarak azaldığı görülmüştür.

Kurutmanın 2 saat sonrasında Şekil 4.24 b) 40°C kurutma havası sıcaklığı için sol alt noktadaki sıcaklık 39.61°C, 60°C kurutma havası sıcaklığı için 59.07°C ve 80°C kurutma havası sıcaklığı için ise 78.70°C olarak değiştiği görülmüştür. Bu sonuçlara göre kurutma havası sıcaklığı arttıkça ürünün içindeki sıcaklığın azar azar arttığı görülmüştür.

4.4. 3 cm Kalınlığında 2m/s Hava Hızı ve 40°C Hava Sıcaklığına Sahip Malzemede Farklı Nem Oranları İçin Analiz Sonuçları



(a)



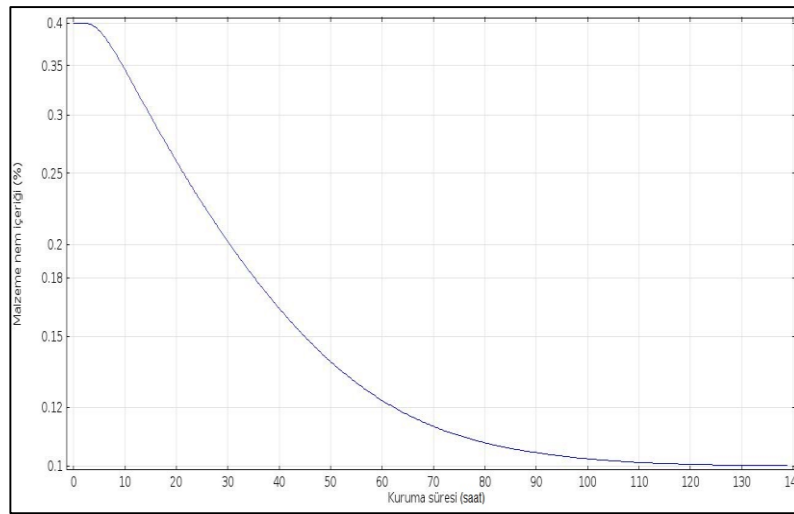
(b)

Şekil 4.25. 2 m/s hava hızı 40 °C sıcaklık ve 3 cm kalınlığında %40, %60 ve %80 nem içeriğine sahip ürünün 2 saat sonraki sıcaklık (°C) ve nem (%) dağılımları

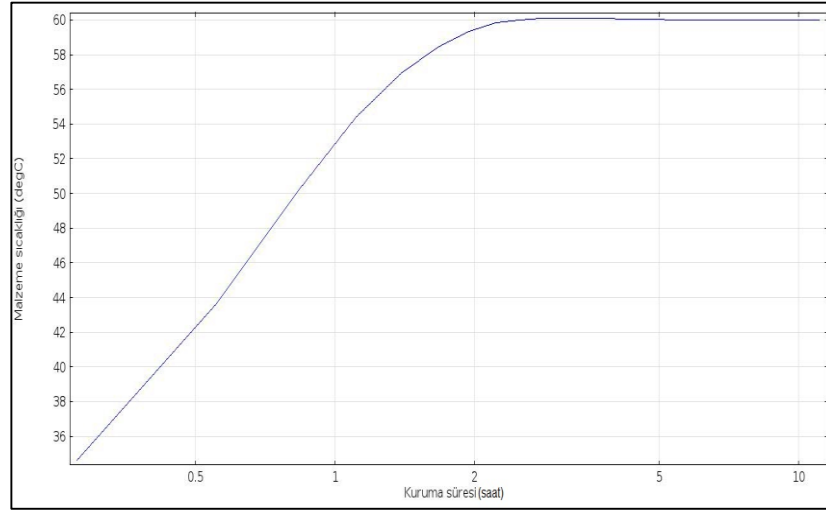
Kurutmanın 2 saat sonrasında Şekil 4.25 a) %40 ürün nem oranı için sol alt noktadaki nem içeriğinin %35, %60 ürün nem oranı için %51 ve %80 ürün nem oranı için ise %68 olarak değiştiği görülmüştür. Bu sonuçlara göre malzemenin nem oranı arttıkça nem içeriğinin (sol alt noktada) en son kuruyan bölgede belirgin olarak arttığı görülmüştür.

Kurutmanın 2 saat sonrasında Şekil 4.25 b) %40 ürün nem oranı için sol alt noktadaki sıcaklığın 39.61°C, %60 ürün nem oranı için 39.64°C ve %80 ürün nem oranı için ise 39.64°C olarak değiştiği görülmüştür. Bu sonuçlara göre malzemenin nem oranı arttıkça ürünün içindeki sıcaklığın neredeyse değişmediği görülmüştür.

Yukarıda elde edilen 3 farklı sıcaklık, hız, kalınlık ve ürün nemi gibi parametrelere göre analizler yapılmış ve kurutmanın 2 saat sonrasının kuruma davranışları incelenmiştir. Literatürdeki çalışmalarda da görüldüğü gibi hız, sıcaklık, kalınlık, nem oranı gibi değişkenlerin kurutma zamanlarındaki sonuç değerleri birbirine yakın çıkmıştır ve aynı zamanda kuruma davranışlarının literatürdeki bilgiler ile örtüştüğü görülmüştür. (Kaya 2008; Hussain ve Dinçer 2003; Chen ve ark. 1999; Karim ve Hawlader 2005; Curcio ve ark. 2008; Akpınar ve Dinçer 2005). Kurutma sürecinin 2 saat sonrası için hız ve sıcaklık parametrelerinin kuruma hızını çok fazla etkilemediği görülmektedir. Değişimin birbirine yakın olmasının nedeni malzeme içerisindeki nemin buharlaşarak az miktarda suyun kalması sonucu difüzyonun zorlaşmasıdır. Literatürde yapılan deneysel çalışmalarda hava hızının 1 m/s'nin üzerine çıkartılmasının kuruma süresinde fazla etkiye sahip olmadığı görülmüştür. Yapılan analizlerde hava hızı 2 m/s de sabit alındığı için kuruma hızı birbirine yakın olarak değişmiştir. Dış parametrelerin artırılması kuruma hızını bu sebepten çok fazla etkilememiştir. Bu sebepten enerji israfı yapmamak için ideal kurutma şartlarının tayin edilmesi önem arz etmektedir. (Darıcı ve Şen 2012)



Şekil 4.26. 60 °C kurutma havası sıcaklığında odun malzemesinin nem içeriğinin zamana göre değişim grafiği

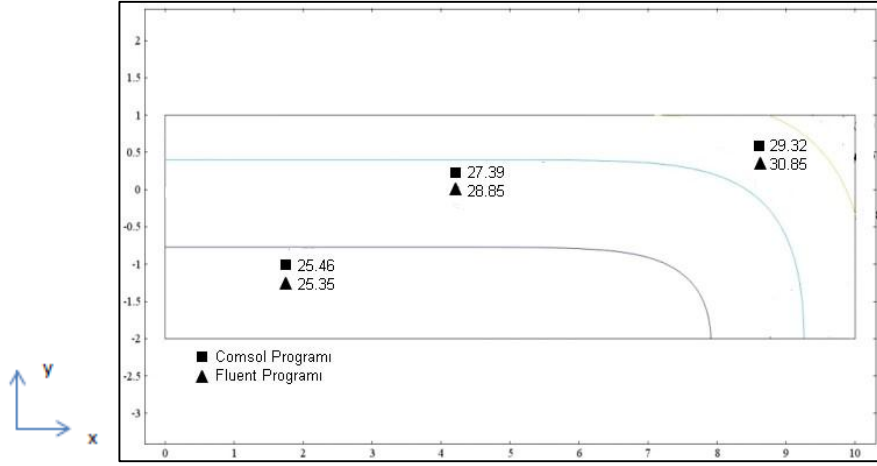


Şekil 4.27. 60 °C kurutma havası sıcaklığında odun malzemesinin sıcaklığının zamana göre değişim grafiği

Şekil 4.26 ve 4.27 de 60 °C kurutma havası sıcaklığında, 3 cm kalınlığında, 2 m/s hava hızı, %40 nem oranına sahip odun malzemesinin ortam nemi olan %10 a ulaşması için gerek zamanı ve sıcaklığın değişimini göstermektedir. Şekil 4.24.'de 2 saatlik zaman dilimi için nem e sıcaklık dağılımı verilmişti. Bu grafiklere göre malzemenin sol alt noktasının istenilen nem içeriğine ulaşması için en az 120 saat kurutulması gerekmektedir. Malzemenin sıcaklık değişiminde ise 3 saatlik süre sonunda 60°C e ulaştığı görülmüştür.

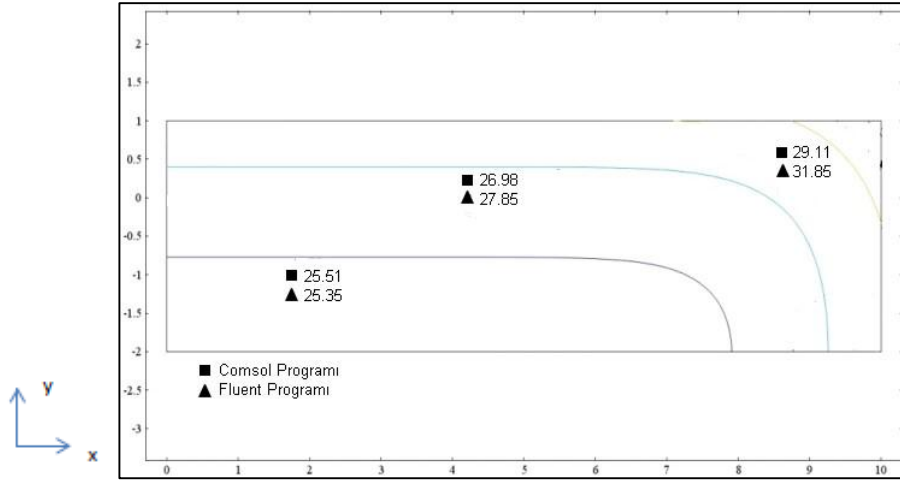
4.5. Ansys Fluent programında oluşturulan modele ait sıcaklık dağılımı ile Cmsol programından elde edilen sonuçların karşılaştırılması

Cmsol programında odun malzemesinin 3cm kalınlığında, 25°C başlangıç sıcaklığında, 40°C kurutma havası sıcaklığında ve 1m/s, 1.5m/s ve 2m/s kurutma havası hızında zorlanmış taşınım ile kurutmanın 200. saniyesindeki sıcaklık dağılımları ile Ansys Fluent 14.5 programında kanal içi akış kurutma 3 boyutlu modellenerek elde edilen sıcaklık dağılımı ile karşılaştırılmıştı



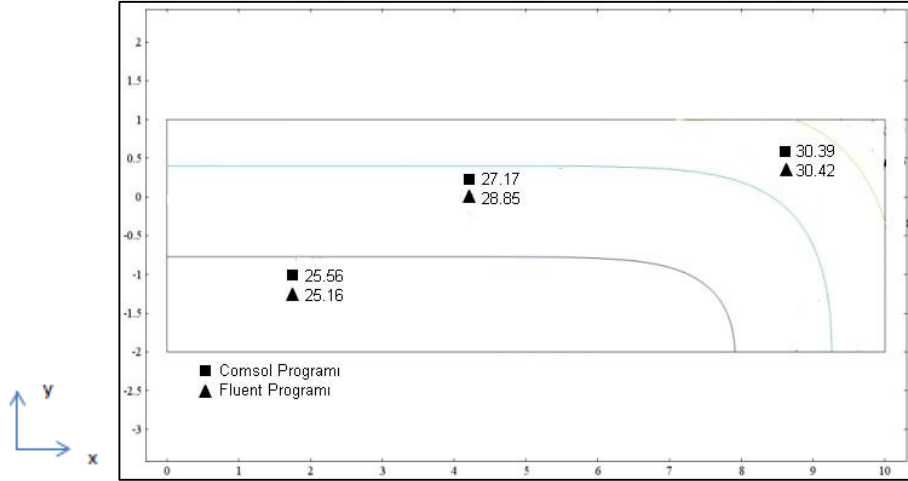
Şekil 4.28. 1m/s akışkan hızı için elde edilen 200. saniyedeki sıcaklık dağılımı (Ansys Fluent Programı ,Cmsol Programı)

Şekil 4.28’de görüldüğü gibi sıcaklık değerleri birbirine yakın olarak görülmektedir. Ansys Fluent programında yapılan 3 boyutlu modelin hava ile temasta olan üst yüzeylerinin sıcaklık dağılımının yaklaşık 1°C daha fazla olduğu görülmektedir.



Şekil 4.29. 1.5 m/s akışkan hızı için elde edilen 200. saniyedeki sıcaklık dağılımı (Ansys Fluent Programı ,Cmsol Programı)

Şekil 4.29’da görüldüğü gibi sıcaklık değerleri birbirine yakın olarak görülmektedir. Ansys Fluent programında yapılan 3 boyutlu modelin hava ile temasta olan üst yüzeylerinin sıcaklık dağılımının yaklaşık 1-2°C daha fazla olduğu görülmektedir.



Şekil 4.30. 2 m/s akışkan hızı için elde edilen 200. saniyedeki sıcaklık dağılımı (Ansys Fluent Programı ,Cansol Programı)

Şekil 4.30'da görüldüğü sıcaklık değerleri birbirine yakın olarak görülmektedir. Ansys Fluent programında yapılan 3 boyutlu modelin hava ile temasta olan üst yüzeylerinin sıcaklık dağılımının yaklaşık 1-2°C daha fazla olduğu görülmektedir.

Yukarıda Ansys Fluent programı ile 3 boyutlu, Cansol programı ile 2 boyutlu olarak modellenen kanal içerisinde bulunan dikdörtgen kesitli malzeme üzerinden 3 farklı akışkan hızı için sıcak hava üflenmesi sonucu ürün içerisinde oluşan sıcaklık dağılımları elde edilmiştir. Bu sonuçlara göre iki programın sıcaklık dağılımlarının birbirine yakın olarak değiştiği görülmektedir. Akışkan hızı arttıkça hava ile temas eden üst yüzeyde oluşan sıcaklık farkının Fluent programı ile 3 boyutlu yapılan analiz sonucunda 1-2 °C daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Bu sonuca göre gerçek modelin sıcaklığı biraz fazla çıkmıştır.

5. SONUÇ

Yapılan bu çalışmada, gözenekli silindirik şekildeki odun malzemesinin dikdörtgen kesitli çeyrek kısmı 2D axisymmetric olarak modellenip kurutulmasında kullanılan eş zamanlı ısı ve kütle transferi denklemleri Comsol 4.3a programları aracılığı ile çözülmüştür. Matematik model oluşturulup program aracılığı ile çözüm yapılmıştır. Öncelikle Fluent programı ile korunum denklemleri (Navier Stokes) çözümlenmiş, ısı ve kütle transferinin olduğu yüzeyin ortalama ısı taşınım katsayısı bulunmuştur. Daha sonra Comsol programı ile zamana bağlı (2 saat) olarak ısı ve kütle transferi denklemleri çözülmüştür. Elde edilen kuruma davranışlarının literatürdeki bilgiler ile paralel çıktığı görülmüştür. Ayrıca bir sonlu eleman yazılımı olan Comsol programının kullanım alanları ile birlikte genel bir tanıtımı yapıp Ansys Fluent programı ile birlikte programın kullanılması konusunda örnek üzerinde adım adım ayrıntılı olarak bilgi verilmiştir. Comsol programında kurutma işlemi için teorik ve deneysel olarak yapılan 6 farklı çalışma ile kıyaslanarak sonuçların birbirine yakın çıktığı görülmüştür. Son olarak Comsol programında 3 farklı hız (1 m/s -1.5 m/s -2 m/s) için 200 saniyede elde edilen sıcaklık dağılımı ile Ansys Fluent programı ile tasarlanan 3 boyutlu modelden elde edilen sıcaklık dağılımları karşılaştırılmış olup sonuçların birbiri ile uyumlu olduğu görülmüştür.

İlk olarak 3 farklı kalınlık (3cm, 5cm ve 7cm) için kurutmanın 2 saat sonraki nem ve sıcaklık dağılımları bulunmuştur. Bu sonuçlara göre kalınlık arttıkça kuruma süresinin uzadığı ve kurumanın yavaşladığı görülmüştür. Düşük kalınlıkta ısı ve kütle taşınım katsayısının daha büyük olduğu görülmüştür.

3 farklı kurutma havası hızı (1 m/s, 1.5 m/s ve 2 m/s) için kurutmanın 2 saat sonraki nem ve sıcaklık dağılımları bulunmuştur. Bu sonuçlara göre hava hızı arttıkça kuruma süresinin azalma eğilimi gösterdiği fakat çok fazla değişmediği görülmüştür. Aynı zamanda kurutma havasının hızı arttıkça ısı ve kütle taşınım katsayısının arttığı görülmüştür.

3 farklı kurutma havası sıcaklığı (40°C, 60°C ve 80°C) için kurutmanın 2 saat sonraki nem ve sıcaklık dağılımları bulunmuştur. Bu sonuçlara göre kurutma havası sıcaklığı arttıkça kurutma süresinin çok fazla değişmediği görülmüştür. Bunun sebebinin hız

değerinin 2 m/s de sabit alınarak analizin yapılmış olmasıdır. Aynı zamanda kurutma havası sıcaklığı arttıkça ısı ve kütle taşınım katsayısının arttığı görülmüştür.

3 farklı ürün nem içeriğine (%40,%60 ve %80) sahip ürün için kurutmanın 2 saat sonraki nem ve sıcaklık dağılımları bulunmuştur. Bu sonuçlara göre ürün nem oranı arttıkça kuruma süresinin uzadığı kurutmanın yavaşladığı görülmüştür.

Düşük kalınlıkta olan malzemedeki ısı ve kütle taşınım katsayısının daha büyük olduğu, kurutma havası hızı arttıkça ısı ve kütle taşınım katsayısının arttığı, kurutma havası sıcaklığının artması ile yine ısı ve kütle taşınım katsayısında bir artış meydana geldiği tespit edilmiştir. Bu sonuçlara göre kuruma süresinin kısılmasında ve kurutmanın hızlanmasında ısı ve kütle taşınım katsayısının artışının da etkili olduğu literatürdeki bilgilerde göz önüne alınarak doğrulanmıştır. Aynı zamanda hız değerinin 1m/s'nin üzerine çıkartılmasının kuruma süresine çok fazla etki etmediği görülmüştür. Farklı sıcaklıklarda kurutmada ise hız değerinin 2 m/s olarak alınması da kurutma süresini çok fazla etkilememiştir.

Daha hızlı kurutma yapmak için düşük hız, yüksek sıcaklık ve düşük kalınlıkta malzeme seçilmesi gerektiği yapılan analizlerin sonucu olarak söylenebilir.

Yapılan bu çalışma ışığında öneriler ise aşağıdaki gibidir:

- Eş zamanlı ısı ve kütle transferi modeli 3 boyutlu yapılabilir.
- Üründeki deformasyon etkisi incelenebilir.
- Deneysel olarak yapıp sonuçlar karşılaştırılabilir.
- Kurutma mikro düzeyde modellenebilir.
- Termofiziksel özellikler sıcaklığa ve nem oranına bağlı olarak alınarak gerçek kurutma Ansys Fluent veya Comsol'da modellenebilir.
- Farklı geometrik modeller kurutulabilir.
- Farklı gözenekli malzemeler (meyve, sebze, kağıt, kumaş vs.) kurutulabilir.
- Kurutucu tasarlanabilir. Enerji maliyet analizi, ekserji analizi yapılabilir.
- Güneş enerjisi ile çalışan kurutucu yapılabilir.
- Çarpan hava jetleri ve cyclone ile kurutma yapılabilir. Giriş ve çıkış konumu, sayısı değiştirilebilir. Farklı parametrelerin kurutmaya etkisi araştırılabilir.

- Hava yerine başka akışkan kurutmada kullanılabilir.
- Comsol ve Ansys fluent programı ile eş zamanlı ısı ve kütle transferi sonuçları nümerik olarak karşılaştırılabilir.
- Farklı türbülans modelleri denenebilir.
- Farklı bugüne kadar kurutulmamış malzemelerin kurutulması denebilir. Faydası araştırılabilir.

Bu çalışmanın geliştirilebilmesi adına ileride yapılması düşünülenler ise şöyledir:

- Ansys Fluent veya Comsol programı ile model 3 boyutlu yapılacak.
- Farklı geometriye sahip farklı ürünler hem deneysel hem nümerik analiz ile karşılaştırılacak.
- Gerçek zamanlı kurutma yapılacak.
- Malzemenin mikro modellemesi (sıvı, gaz faz difüzyonu vs.) yapılacak.
- Farklı kurutma parametrelerinin incelenmesi (ürünün yeri, konumu, gözenekliliği, ısı ve kütle taşınım katsayısı değişimi vs)
- Malzemenin deformasyon etkileri incelenecek.
- Gıda ürünleri için deneyler uygulanıp renk ve gıda analizi yapılacak.
- Piyasada farklı uygulama alanları düşünülecek.
- Enerji, ekserji, maliyet ve verimlilik analizi yapılacak.

KAYNAKLAR

Abbasi, H., Turki, S., ve Ben, N., S. 2002. Numerical Investigation of Forced Convection in a Horizontal Channel with a Built-in Triangular Prism, ASME J. Heat Transfer, Vol.124, pp. 571-573.

Akat, A., 2007. Keçi Derisi Kurutma Eğrilerinin Deney Yoluyla Elde Edilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Isparta.

Akyol, U., 2007. İplik Bobininin Kurutulmasının Teorik Olarak İncelenmesi, Doktora Tezi, Trakya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Edirne.

Baker, C.G.J., 1997. Industrial Drying of Foods, First edition, Blackie Academic and Professional, New York.

Bakır, F., 2007. Odunun Kurutulmasının Deneysel ve Matematiksel İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı, Elazığ.

Bayhan, H.A., 2011. Kabin Tipi Bir Kurutucuda Kurutma Sürecini Etkileyen Parametrelerin Deneysel Olarak İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Isparta.

Bingöl, G. ve Devres, O., 2009. Gıda İşletmede Kurutma Teknolojilerinin Temel İlkeleri 4, İstanbul Sanayi Odası İ.T.Ü. Destek Projesi Kısaltılmış Doktora Tezi, Yayın No:2010/4, İstanbul, 94 s.

Bonis, M.V., ve Ruocco, G. 2008. A Multiphysics Approach to Fundamental Conjugate Drying by Forced Convection, Comsol Conference 2008 Hannover.

Bozkurt, A.Y., ve Kantay, R. 1992. Ağaç Malzemenin Kurutulması, İ.Ü. Orman Fakültesi, Orman Endüstri Mühendisliği Bölümü, İstanbul.

Chattopadhyay, H. 2007. Augmentation of Heat Transfer in a Channel Using a Triangular Prism, International Journal of Thermal Sciences, Vol.46, No.5, pp.501-505.

Ceylan, İ., 2007. Programlanabilir(PLC) Isı Pompalı Kurutucunun Tasarımı, İmalatı ve Kereste Kurutma İşleminde Deneysel İncelenmesi, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Eğitimi, Ankara.

Chang, W.J., ve Weng, C.I. 2000. An Analytical Solution to Coupled Heat and Moisture Diffusion Transfer in Porous Materials, International Journal of Heat and Mass Transfer,43,3621-3632.

- Chiang, W.C., Petersen, J.N. 1987.** Experimental Measurement of Temperature and Moisture Profiles During Apple Drying, *Drying Technology* 5(1),25-49.
- Chen, H., Marks, B.P., Murphy, R.Y. 1999.** Modeling Coupled Heat and Mass Transfer for Convection Cooking of Chicken Patties, *Journal of Food Engineering*, 42, 139-146.
- Comsol Multiphysics 4.3a, 2012.** Heat Transfer Model Library, Heat Transfer Module User's Guide, Chemical Reaction Engineering Module User's Guide.
- Conti, C., Conti, A.C., Gava, M., ve Filho, H.J.S. 2012.** Mathematical Model of Drying Hevea Brasiliensis Wood, *IUFRO Wood Drying Conference, Para, Brazil.*
- Curcio, S., Aversa, M., Calabro, V., ve Lorio, G. 2008.** Simulation of Food Drying: FEM Analysis and Experimental Validation, *Journal of Food Engineering*, 87, 541-553.
- Çengel, Y.A. 2011.** Isı ve Kütle Transferi, 3. Baskıdan Çeviri, Güven Bilimsel Yayıncılık, İzmir, 879 s.
- Çolakoğlu, M.H. 2009.** Determination of Change in Moisture Ratios of Some Woods during Air-Drying by Finite Element Analysis, *Journal of Applied Sciences*, 9(22), 4091-4094.
- Darıcı, S., Şen, S. 2012.** Kivi Meyvesinin Kurutulmasında Kurutma Havası Hızının Kurumaya Etkisinin İncelenmesi, *Tesisat Mühendisliği*, 130.
- Demirtaş, C. 1998.** Fındık Kurutma Şartlarının Belirlenmesi, Doktora Tezi, K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü , Trabzon.
- Devahastin, S. 2000.** Mujumdar's Practical Guide to Industrial Drying, Exerges Corporation, Montreal.
- Dikbasan, T. 2007.** Determination of Effective Parameters for Drying of Apples, Master of Science in Energy Engineering, Engineering and Sciences of İzmir Institute of Technology, İzmir.
- Dincer, I. ve Hussain,M.M. 2004.** Development of A New Biot Number and Lag Factor Correlation for Drying Applications, *Int.J.Heat Mass Tran.*, 47, 653-658.
- Doymaz, İ. 1998.** Üzüm ve Kahramanmaraş Biberinin Kuruma Karakteristiklerinin İncelenmesi, Doktora Tezi, Y.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Etemoğlu, A.B. 2003.** Eşzamanlı Isı ve Kütle Transferinin Heterojen Malzemelerde Geçici Rejimde Matematik Modellenmesi, Uludağ Üniversitesi, Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Bursa.

Etemoğlu, A.B., Isman, M.K., Pulat, E., ve Can, M. 2004. Tek Yongalı Elektronik Cihazların Laminer ve Türbülanslı Akışta Soğutulmalarının Analizi, Mühendis ve Makine, Cilt:45,Sayı:535.

Etemoğlu, A.B., Isman, M.K., ve Can, M. 2010. Investigation into the effect of nozzle shape on the nozzle discharge coefficient and heat and mass transfer characteristics of impinging air jets, Heat and Mass Transfer,46:1395-1410.

Fessel, F., 1965. Trocknung in Dampf-Luft Gemischen, Holztrocknung, Holzwirtschaftliches Jahrbuch Nr, 15, 69-100

Grzegorz, M., ve Jacek, B. 2006. Non-linear Heat and Mass Transfer During Convective Drying of Kaolin Cylinder Under Non-steady Conditions, Transport in Porous Media, 66:121-134.

Gündüz, M. 1994. Ağaç ve Kağıt Kurutmasında Isı ve Kütle Transferinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Bursa.

Güneş, M. 1994. Bilgisayar Destekli Olarak Çeşitli Geometrik Şekillere Sahip Gözenekli Ortamlarda Kurutma Prosesinin İncelenmesi, Doktora Tezi, Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Balıkesir.

Güney, M.Ş. 2007. Akışkan Yatakta Fındık Kavurma İşleminin Deneysel ve Teorik İncelenmesi, Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği, Enerji Anabilim Dalı, Sakarya.

Haghi, A.K. 2001. Simultaneous Moisture and Heat Transfer in Porous Systems, Journal of Computational and Applied Mechanics, Vol.2,No.2,195-204.

Hunt, J.F., Gu, H. 2004. Finite Element Analyses of Two Dimensional, Anisotropic Heat Transfer in Wood, 2004 International ANSYS Conference, Pittsburg, PA, May 24-26.

Hussain, M. M. 2001. Investigation of Heat and Moisture Transfer During Solids Drying, Yüksek Lisans Tezi, King Fahd University of Petroleum and Minerals, Dhahran, Suudi Arabia.

Hussain, M.M., ve Dincer, I. 2003. 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.

Incropera, F.P., Dewitt, D.P. 2001. Isı ve Kütle Geçişinin Temelleri, Literatür Yayıncılık, İstanbul,880 s.

Irudayaraj, J., Haghighi, K., ve Stroshine, R. L., 1990. Nonlinear Finite Element Analysis of Coupled Heat and Mass Transfer Problems with an Application to Timber Drying, *Drying Technology*, 8, 731-749.

İşman, M.K. 2011. Tekli ve Çoklu Çarpan Hava Jetlerinde Zorlanmış Taşınım İle Isı ve Kütle Transferinin Deneysel ve Teorik Olarak İncelenmesi, Doktora Tezi, Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Bursa.

İzli, N. 2007. Mısırın Sıcak Hava Akımıyla Kurutulmasında Kurutma Parametrelerinin Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, U.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Tarım Makinaları Anabilim Dalı, Bursa.

Kantay, R. 1993. Kereste Kurutma ve Buharlama, Ormancılık Eğitim ve Kültür Vakfı, Yayın No:6, 14-155, İstanbul.

Karim, M.A., ve Hawlader., M.N.A. 2005. Mathematical Modelling and Experimental Investigation of Tropical Fruits Drying, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 48, 4914-4925.

Kaya, A. 2008. Kurutmada Isı ve Kütle Transferinin Teorik ve Deneysel Olarak İncelenmesi. Doktora Tezi, K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Trabzon.

Kocaefe, D., Younsi, R., Poncsak, S., Kocaefe, Y. 2007. Comparison of Different Models For The High Temperature Heat Treatment of Wood, *International Journal of Thermal Sciences*,46,707-716.

Kreith, F., ve Bohn, M. S. 1986. Principles of Heat Transfer, 4th edition, New York.

Kumar, C., Karim, A., Koardder, M.U.H., Miller, G.J. 2012. Modeling Heat and Mass Transfer Process During Convection Drying of Fruit, 4th International Conference on Computational Methods (ICCM 2012),Australia.

Lamnatou, C., Papqanicolaou, E., Belessiotis, V., ve Kyriakis, N. 2009. Conjugate Heat and Mass Transfer From a Drying Rectangular Cylinder in Confined Air Flow, *Numerical Heat Transfer,Part A, Applications* 56 (5),379-405.

Lewis, W. K. 1921. The Rate of Drying of Solid Materials, *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 13, 5, 427-432.

Liu J.Y., ve Cheng S. 1991. Solution of Luikov Equations of Heat and Mass Transfer in Capillary-Porous Bodies, *Heat and Mass Transfer*, 34, 1747-1754.

Ljung, A.L., Lundström, T.S., ve Tano, K. 2008. Fluid Flow and Heat Transfer Within and Around a Porous Pellet Placed in Infinite Space, In the proceedings of the 19th International Symposium on Transport Phenomena, August 17-21, Reykjavik, Island.

Luikov, A.V. 1966. Heat and Mass Transfer in Copillary, Porous Badies, Pergaman Press.

Nonhebel, M.A. ve Moss, A.H. 1971. Drying of Solids in the Chemical Industry, CRC Press,Ohio, USA.

Nyle, C. 1999. Basic facts On Drying Lumber, Note, 1-7, USA.

Oliveira, L.S., ve Haghghi, K. 1998. Conjugate Heat and Mass Transfer in Convective Drying of Porous Media, Numerical Heat Transfer, Part A:Application:An International Journal of Computation and Methodology, 34:2, 105-117

Örs, Y. ve Keskin, H. 2001. Ağaç Malzeme Bilgisi, İstanbul.

Öz, S. 1988. Güneş Enerjili Kondenzasyonlu Bir Kurutma Fırınında Kereste Kurutulması, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2-14, Ankara.

Roberts, J.S. 1999. Understanding The Heat and Mass Transfer of Hygroscopic Porous Materials, Doktora Tezi, The State Universty Of New Jersey, Food Science, New Brunswick, New Jersey.

Sherwood, T.K. 1929. The Drying of Solids-I, Ind. Eng. Chem., 21, 1,12-16.

Silsüpür, Y.A. 2005. Gofret ve Çikolata Üretiminde Isı ve Kütle Transferinin İncelenmesi,Uludağ Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Bursa.

Tamme, V., Muiste, P., Polyachenko, R., ve Tamme, H. 2010. Determination of Dynamics of Moisture Content, Temperature and Mechanical Stress of Pine Wood During Convective Drying, 11th International IUFRO Wood Drying Conference.

Thomas, H. R., Lewis, R. W., ve Morgan, K. 1980. An Application of The Finite Element Method to The Drying of Timber, Wood Fiber, 11(4),237-243.

Turner, T. 2000. Drying Methods, University Of Vermont Extension Manuscript, Review by Tery Turner Lecturer, The United States, 1-5.

Uğurlubilek, N. 2009. Yarı-Küresel Engel Konulan Bir Kanal İçerisinde Isı Geçişi Ve Akışın Sayısal İncelenmesi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 22, 3, 45-54.

Yilbas, B. S., Hussain, M. M., ve Dincer, I. 2003. Heat And Moisture Diffusion İn Slab Products Due To Convective Boundary Condition, Heat and Mass Transfer 39,471-476

Younsi, R., Kocafe, D., Poncsak, S.,Kocafe, Y., Gastonguay, L. 2008. 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.

Younsi, R., Kocafe, D., Kocafe, Y. 2006. Three dimensional Simulation of Heat and Moisture Transfer in Wood, Applied Thermal Engineering, 26, 1274-1285.

Welty, J.R., Wicks, C.E., ve Wilson, R.E. 1984. Fundamentals of Momentum, Heat and Mass Transfer, Third Edition, by John Wiley&Sons, Canada, United States of America.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı :Burak Türkan
Doğum Yeri ve Tarihi :Bursa/İnegöl-1988
Yabancı Dili :İngilizce
Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)
Lise :Çelebi Mehmet Lisesi-2005
Lisans :Uludağ Üniversitesi-2009
Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl :Bayburt Üniversitesi -2010-2011
Uludağ Üniversitesi-2011-
İletişim(e-posta) :burakt@uludag.edu.tr

Yayınları :

Türkan, B., Etemoğlu, A.B., Can, M., Canbolat, A.S., Tan, F. 2013. Eş Zamanlı Isı ve Kütle Transferinin Matematik Modellenmesi ve Analizi. Uludağ Üniversitesi 3. Bilgilendirme ve Ar-Ge Günleri, 12-14 Kasım 2013, Bursa.

Canbolat, A.S., Yamankaradeniz, R., Can, M., Avcı, A., Etemoğlu A.B., Türkan, B. 2013. Otomobil Radyatörlerinin Dizayn Parametrelerinin Değiştirilerek Isıl Performansına Etkisinin Gözlenmesi. Uludağ Üniversitesi 3. Bilgilendirme ve Ar-Ge Günleri, 12-14 Kasım 2013, Bursa.

Türkan, B., Etemoğlu, A.B., Can, M., Canbolat, A.S., Tan, F., Özdemir, E. 2013. Cansol Programında Farklı Eşanjör Uygulamalarının İncelenmesi. Uludağ Üniversitesi 3. Bilgilendirme ve Ar-Ge Günleri, 12-14 Kasım 2013, Bursa.

Türkan, B., Etemoğlu, A.B., Can, M., Özdemir, E., Canbolat, A.S., Tan, F. 2013. Cansol Programının Kullanımı ve Genel Tanıtımı. Uludağ Üniversitesi 3. Bilgilendirme ve Ar-Ge Günleri, 12-14 Kasım 2013, Bursa.

Türkan, B., Etemoğlu, A.B., Can, M., Canbolat, A.S., Tan, F., Doğan, O. 2013. Geçici Rejimde Malzeme İçerisindeki Sıcaklık Dağılımının Nümerik İncelenmesi. Uludağ Üniversitesi 3. Bilgilendirme ve Ar-Ge Günleri, 12-14 Kasım 2013, Bursa.

Canbolat, A.S., Türkan, B., Yamankaradeniz, R., Can, M., Etemoğlu, A.B. 2014. Otomobil Radyatörlerinde Boru Sayısının Isıl Performansa ve Etkenliğe Etkisinin İncelenmesi. 7. Otomotiv Teknolojileri Kongresi, 26-27 Mayıs 2014, Bursa.