

**T.C.  
SÜLEYMAN DEMİREL ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**FARKLI SICAKLIKLARDA ÇALIŞAN VAKUMLU BİR  
KERESTE KURUTUCU TASARIMI VE KURUTMA  
PARAMETRELERİNİN ARAŞTIRILMASI**

**Serkan GÖK**

**Danışman: Doç. Dr. Arzu ŞENCAN ŞAHİN**

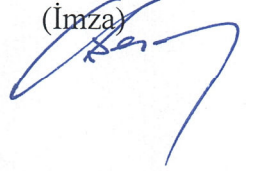
**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
MAKİNE EĞİTİMİ ANABİLİM DALI  
ISPARTA – 2011**

## TEZ ONAYI

Serkan GÖK tarafından hazırlanan “Farklı Sıcaklıklarda Çalışan Vakumlu Bir Kereste Kurutucu Tasarımı ve Kurutma Parametrelerinin Araştırılması” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Süleyman Demirel Üniversitesi Makine Eğitimi Anabilim Dalı’nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

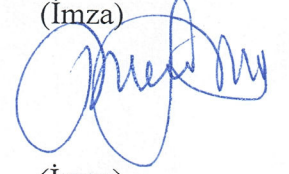
Danışman : Doç. Dr. Arzu ŞENCAN ŞAHİN  
Süleyman Demirel Üniversitesi Makina Eğitimi Anabilim Dalı

(İmza)



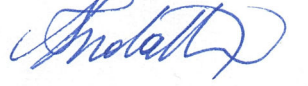
Jüri Üyeleri :  
Prof. Dr. Ali Kemal YAKUT  
Süleyman Demirel Üniversitesi Makina Eğitimi Anabilim Dalı

(İmza)



Doç. Dr. Ali BOLATTÜRK  
Süleyman Demirel Üniversitesi Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

(İmza)



**Prof. Dr. Mustafa KUŞCU**  
**Enstitü Müdürü**

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaktan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak gösterilmeden kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

## İÇİNDEKİLER

	<b>Sayfa</b>
İÇİNDEKİLER.....	i
ÖZET .....	iii
ABSTRACT .....	iv
TEŞEKKÜR .....	v
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	viii
SİMGELER DİZİNİ .....	ix
1. GİRİŞ .....	1
1.1. Kurutma İşlemi .....	2
1.2. Kurutmanın Aşamaları .....	3
1.3. Kurutucuların Sınıflandırılması .....	5
1.4. Kurutucu Tipleri.....	6
1.4.1. Direkt kurutucular .....	6
1.4.2. İnfrared (kızılötesi) radyant ısıli kurutucular .....	7
1.4.3. Dielektrik ısıtıcılı kurutucular.....	8
1.4.4. İndirekt kurutucular.....	8
1.5. Kurutma Sistemlerinde Otomasyon.....	11
1.6. Ağaç Malzemenin Özellikleri.....	11
1.6.1. Ağaç malzemenin yapısı.....	12
1.6.1.1. Yıllık halkalar .....	12
1.6.1.2. Öz ışınları.....	13
1.6.1.3. Diri ve öz odun.....	13
1.6.2. Özgül ağırlık .....	14
1.6.3. Ağaç malzemenin rutubeti.....	15
1.6.4. Higroskopik özellikler .....	17
1.6.5. Ağacın çalışması .....	18
1.6.6. Rutubet meyli.....	19
1.6.7. Kurutma meyli .....	19
1.7. Ağaç Malzemesini Kurutma Metotları.....	19

1.7.1. Doğal kurutma .....	19
1.7.2. Klasik kurutma.....	20
1.7.3. Kondenzasyonlu kurutma .....	21
1.7.4. Vakum kurutma.....	22
1.7.5. Diğer kurutma yöntemleri .....	23
1.8. Kurutmada Ağaç Malzemede Ortaya Çıkan Problemler.....	23
2. KAYNAK ÖZETLERİ .....	24
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	31
3.1. Materyal.....	31
3.1.1. Kurutma fırınının yapısı .....	31
3.1.2. Deney numunelerin hazırlanması.....	39
3.1.3. Deneylerin yapılışı .....	40
3.2. Yöntem .....	41
3.2.1. Ağaç malzemesinin neminin bulunması:.....	41
3.2.2. Termodinamik analiz.....	44
3.2.2.1. Kütle analizi .....	44
3.2.2.2. Enerji analizi .....	46
3.2.3. Hata analizi .....	48
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA.....	52
4.1. Farklı Kurutma Sıcaklığında ve Basıncında Yapılan Deneyler.....	52
4.2. Deney Sisteminin Enerji Analizi .....	62
4.3. Belirsizlik Analizi .....	64
5. SONUÇ .....	66
6. KAYNAKLAR.....	68
ÖZGEÇMİŞ.....	72

## ÖZET

**Yüksek Lisans Tezi**

### **FARKLI SICAKLIKLARDA ÇALIŞAN VAKUMLU BİR KERESTE KURUTUCU TASARIMI VE KURUTMA PARAMETRELERİNİN ARAŞTIRILMASI**

**Serkan GÖK**

**Süleyman Demirel Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Makina Eğitimi Anabilim Dalı**

**Danışman: Doç. Dr. Arzu ŞENCAN ŞAHİN**

Kurutma işleminde, kurutma süresinin ve maliyetinin önemi büyüktür. Günümüz teknolojisinin her geçen gün gelişmesi ile kurutma sistemlerinin tasarımı ve çalışma yöntemleri de geliştirilmeye devam etmektedir.

Bu çalışmada; farklı gözenek yapılarına ve farklı kullanım alanlarına sahip kavak, çam ve meşe ağaçlarının keresteleri PLC (Programmable Logic Controller) otomasyon sistemine sahip vakumlu bir kurutucuda kurutulmuştur. Deneyleerde kerestelerin kuruma sürelerinin 12 – 17 saat arasında değiştiği görülmüştür. Her deney sonunda kerestelerden 1.2 – 1.5 kg arasında ağırlık azalması olmuştur. Vakumlu kurutma yöntemi ile tüm ağaç kerestelerinin kurutulmasında en ideal çalışma şartlarının, 50°C sıcaklık ve 0.9 bar ön vakumlama basıncı olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca vakumlu kurutma sistemiyle kurutulması en uygun ağaç türünün meşe olduğu tespit edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Vakumlu kurutma, kereste, enerji, otomasyon, kavak, çam, meşe.

**2011, 72 sayfa**

## **ABSTRACT**

**M.Sc. Thesis**

### **INVESTIGATION OF DRYING PARAMETERS AND DESIGN OF A VACUUM TIMBER DRYER OPERATING AT DIFFERENT TEMPERATURE**

**Serkan GÖK**

**Süleyman Demirel University  
Graduate School of Applied and Natural Sciences  
Department of Mechanical Education**

**Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Arzu ŞENCAN ŞAHİN**

Drying time and cost in the drying process is very important. The design and working methods of drying systems have been developed along with the development of today's technology.

In this study; the timbers of poplar, pine and oak trees having different pore structures and different usage fields have been dried in a vacuumed dryer having a PLC (Programmable Logic Controller) automation system. In the experiments, it has been observed that the time of drying process of the timbers varies in time between 12 and 17 hours. The timbers have lost weight between 1.2-1.5 kg at the end of each experiment. It has been determined that the most ideal working conditions in drying the timbers of all trees, with vacuumed drying method are 50 °C temperature and 0.9 bar pre-vacuumsing pressure. Also the oak has been determined to be the most suitable type of tree to dry with vacuumed drying system.

**Key Words:** Vacuumed drying, timber, energy, automation, poplar, pine, oak.

**2011, 72 pages**

## TEŞEKKÜR

Bu araştırma için beni yönlendiren, karşılaştığım zorlukları bilgi ve tecrübesi ile aşmamda yardımcı olan değerli Danışman Hocam Doç. Dr. Arzu ŞENCAN ŞAHİN'e teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca literatür araştırmalarımnda yardımcı olan değerli hocam Arş. Gör. Erkan DİKMEN'e, deneysel çalışmamda yardımlarını esirgemeyen Makina Eğitimi Laboratuvarında görevli Makine Teknikeri Cengiz KAZMACI ve Makine Teknisyeni Mümin ULUSOY'a, teşekkür ederim.

Araştırmanın yürütülmesinde maddi ve manevi yardımlarını gördüğüm Ziraat Mühendisi Mehmet TUĞRUL'a, İngilizce öğretmeni İdil ŞENER'e, ARTEM Otomasyon'da Elektronik Mühendisi olan Eşref BÜYÜKÇİLİNGİR'e ve ARTEM Otomasyon'un diğer çalışanlarına da teşekkür ederim.

1971-YL-09 No'lu, "Farklı Sıcaklıklarda ve Basınlarda Çalışan Bir Kurutucu Tasarımı ve Kurutma Parametrelerinin Araştırılması" projesi ile tezimi maddi olarak destekleyen Süleyman Demirel Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Yönetim Birimi Başkanlığı'na teşekkür ederim.

Tezimin bütün aşamalarında gösterdikleri fedakârlık ve destekleri ile beni yalnız bırakmayan aileme sonsuz sevgi ve saygılarımı sunarım.

Serkan GÖK  
ISPARTA, 2011

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Kuruma eğrisi.....	3
Şekil 1.2. Ağacın enine kesiti.....	12
Şekil 1.3. Enine kesitten alınma konumuna göre daralma miktarı.....	18
Şekil 1.4. Kurutma fırını kesiti.....	21
Şekil 1.5. Orta ölçekli vakumlu kurutma fırını.....	22
Şekil 2.1. Kerestelerin günlük ortalama nem değişimi.....	25
Şekil 2.2. Kurutma esnasında (a) kerestenin merkez sıcaklığının değişimi, (b) kerestenin ortalama nem değişimi.....	27
Şekil 2.3. Kurutma fırınında zamana bağlı sıcaklık ve nem değişimleri.....	29
Şekil 2.4. Kerestelerin kurutulması süresince kurutma fırınının ekserji veriminin değişimi.....	30
Şekil 3.1. Kurutma fırınının şekli.....	31
Şekil 3.2. Kurutma fırınının imalat aşamasındaki tank dışı ve kapak görüntüsü.....	32
Şekil 3.3. PLC destekli kurutma fırını.....	32
Şekil 3.4. Hava serpantinli ısıtıcı.....	32
Şekil 3.5. Salyangoz tipi vakum pompası.....	33
Şekil 3.6. Sulu tip vakum pompası.....	33
Şekil 3.7. PLC yazılımının iş akış şeması.....	34
Şekil 3.8. Otomasyonun kurutma sisteminde yerleşimi.....	35
Şekil 3.9. Veri kaydetme sisteminin kurutma sistemine bağlantısı.....	37
Şekil 3.10. Numune kerestelerin boyutları.....	39
Şekil 3.11. Kereste istifleri.....	39
Şekil 3.12. Numunelerin teraziye bağlantılı hali.....	40
Şekil 3.13. Kereste numunelerinin etüv fırınında kurutulması.....	42
Şekil 3.14. Kurutma fırınının sistematik gösterimi.....	45
Şekil 4.1. Kavak keresteleri ile yapılan deneylerinin farklı çalışma sıcaklıklarının zamana göre değişimi.....	54
Şekil 4.2. 50°C sıcaklıkta yapılan deneyde basıncın zamana göre değişimi.....	54
Şekil 4.3. Çam keresteleri için sıcaklığa ve basınca bağlı deneylerde fırın içi bağlı nem değerleri.....	55

Şekil 4.4. Kavak kerestesinin farklı sıcaklık ve basınçlardaki ağırlık değişimi.....	56
Şekil 4.5. Çam kerestesinin farklı sıcaklık ve basınçlardaki ağırlık değişimi.....	56
Şekil 4.6. Meşe kerestesinin farklı sıcaklık ve basınçlardaki ağırlık değişimi .....	57
Şekil 4.7. Kavak kerestesinin farklı sıcaklık ve basınçlardaki kurutma hızının zamanla değişimi.....	58
Şekil 4.8. Çam kerestesinin farklı sıcaklık ve basınçlardaki kurutma hızının zamanla değişimi .....	58
Şekil 4.9. Meşe kerestesinin farklı sıcaklık ve basınçlardaki kurutma hızının zamanla değişimi .....	59
Şekil 4.10. Kavak kerestesi ile yapılan kurutma deneylerinde tüketilen enerjiler .....	60
Şekil 4.11. Çam kerestesi ile yapılan kurutma deneylerinde tüketilen enerjiler .....	61
Şekil 4.12. Meşe kerestesi ile yapılan kurutma deneylerinde tüketilen enerjiler .....	61
Şekil 4.13. 50°C sıcaklıkta 0.9 bar ön vakumlama basıncında yapılan kavak, çam ve meşe kurutma deneylerine ait enerji analizi .....	63
Şekil 4.14. Kurutma fırınının enerji verimi.....	64

## ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1.1. Çeşitli malzemelerin atmosferik koşullarda kuru bazdaki denge nemleri.....	5
Çizelge 1.2. Direkt kurutucu tipleri.....	7
Çizelge 1.3. İndirekt kurutucu tipleri.....	8
Çizelge 1.4. Çeşitli kurutucuların kurutma etkinlikleri ve buharlaşma hızları.....	9
Çizelge 1.5. Çeşitli kurutucularda kurutulabilecek maddelerden bazı örnekler.....	10
Çizelge 1.6. Bazı ağaç türlerinin kurutma bakımından özellikleri.....	15
Çizelge 1.7. Çeşitli ağaç türlerinin taze haldeki diri ve öz odunlarında bulunan rutubet miktarı (İğne yapraklı ağaçlar).....	16
Çizelge 1.8. Çeşitli ağaç türlerinin taze haldeki diri ve öz odunlarında bulunan rutubet miktarı (Yapraklı ağaçlar).....	17
Çizelge 1.9. Ağaç Malzemesi Kurutma Yöntemleri.....	20
Çizelge 2.1. Serbes (2003)'in yaptığı çalışmanın sonucu.....	28
Çizelge 3.1. Kurutma sisteminin otomasyonunda cihazlar ve sensörler.....	36
Çizelge 3.2. Kurutma sisteminin veri kaydetme cihazı ve sensörler.....	38
Çizelge 3.3. Keresteler için deneyler yapılırken kullanılan değerler.....	41
Çizelge 3.4. Meşe kereste numunelerinin özgül kütle test sonuçları.....	43
Çizelge 3.5. Kavak kereste numunelerinin özgül kütle test sonuçları.....	43
Çizelge 3.6. Çam kereste numunelerinin özgül kütle test sonuçları.....	44
Çizelge 4.1. Kavak kerestesi ile farklı çalışma şartlarında yapılan deneylerde elde edilen sonuçlar.....	52
Çizelge 4.2. Çam kerestesi ile farklı çalışma şartlarında yapılan deneylerde elde edilen sonuçlar.....	53
Çizelge 4.3. Meşe kerestesi ile farklı çalışma şartlarında yapılan deneylerde elde edilen sonuçlar.....	53
Çizelge 4.4. Deneyler esnasında kullanılan cihazların hata oranları.....	64
Çizelge 4.5. Farklı ağaç türleri ile yapılan deneylerdeki hata analizi sonuçları.....	65

## SİMGELER DİZİNİ

$(C_p)_h$	Havanın özgül ısısı [kJ/kg ·K]
$(C_p)_k$	Kerestenin özgül ısısı [kJ/kg ·K]
$(C_p)_{sb}$	Su buharının özgül ısısı [kJ/kg ·K]
$E_{çıkan}$	Ekserji çıkışı [kJ]
$E_{giren}$	Ekserji girişi [kJ]
$\Delta E_{sistem}$	Sistemde enerji değişimi [kJ]
$F$	Yüzey alanı [m <sup>2</sup> ]
$h_ç$	Çıkan nemli havanın entalpisi [kJ/kg]
$h_d$	Doymuş buhar entalpisi [kJ/kg]
$h_{ds}$	Doymuş sıvı entalpisi [kJ/kg]
$h_g$	Giren nemli havanın entalpisi [kJ/kg]
$I_t$	Isıtıcıların çektiği akım [A]
$K$	Isı iletim katsayısı
$m_ç$	Çıkan nemli havanın ağırlığı [kg]
$m_{çkh}$	Çıkan kuru havanın ağırlığı [kg]
$m_{çsb}$	Çıkan kuru hava içindeki su buharının ağırlığı [kg]
$m_g$	Giren nemli havanın ağırlığı [kg]
$m_{gkh}$	Giren kuru havanın ağırlığı [kg]
$m_{gsb}$	Giren kuru hava içindeki su buharının ağırlığı [kg]
$m_k$	Kurutulacak kerestenin ağırlığı [kg]
$m_{kk}$	Kurutulacak kerestenin tam kuru ağırlığı [kg]
$m_{ks}$	Kurutulacak kerestenin içindeki suyun ağırlığı [kg]
$m_n$	Kurutma süresince nemlendirme amaçlı buharlaşan suyun ağırlığı [kg]

$\Delta m_{KH}$	Kontrol hacminde değişim
$P_{fç}$	Fırının çalışma basıncı (Ön vakumlama) [bar]
$P_{fv}$	Vakumlama basıncı [bar]
$P_o$	Çevre basıncı [bar]
$Q_{çıkan}$	Sistemin kaybettiği toplam ısı [kJ]
$Q_{FI}$	Fırının iç havasının ısıtılması için gerekli enerji [kJ]
$Q_{IK}$	Toplam ısı kaybı [kJ]
$Q_K$	Toplam kerestenin kullandığı ısı enerjisi [kJ]
$R_h$	Havanın gaz sabiti [kJ/kg ·K]
$s_{ds}$	Doymuş sıvı entropisi [kJ/kg]
$\Delta t$	Zaman
$T_ç$	Havanın fırından çıkış sıcaklığı [K]
$T_g$	Havanın fırına giriş sıcaklığı [K]
$T_{ç*}$	Havanın fırından çıkış sıcaklığı [°C]
$T_{g*}$	Havanın fırına giriş sıcaklığı [°C]
$T_{fys}$	Fırının dış yüzeyinin ortalama sıcaklığı [K]
$T_{ks}$	Fırının çalışma sıcaklığı [K]
$T_o$	Çevre sıcaklığı [K]
$V_I$	Isıtıcıların çektiği gerilim [V]
$V_f$	Fırının iç hacmi [m <sup>3</sup> ]
$W_{Fg}$	Fanın gerçek kullandığı enerji [kJ]
$W_{Ft}$	Fanın teorik kullandığı enerji [kJ]
$W_{giren}$	Sisteme verilen iş [kJ]
$W_{Ig}$	Isıtıcıların gerçek kullandığı enerji [kJ]

$W_{It}$	Isıtıcıların teorik kullandığı enerji [kJ]
$W_{VPg}$	Vakum pompası gerçek kullandığı enerji [kJ]
$W_{VPt}$	Vakum pompası teorik kullandığı enerji [kJ]
$W_R$	Hata oranı
$\eta_F$	Fanın çalışma verimi
$\omega_{fç}$	Havanın fırından çıktığı andaki özgül nemi [ $kg_{su} / kg_{kuru\ hava}$ ]
$\omega_{fg}$	Havanın fırına girdiği andaki özgül nemi [ $kg_{su} / kg_{kuru\ hava}$ ]
$\eta_m$	Motor verimi
$\eta_{Fm}$	Fan-motor verimi
$\rho_h$	Havanın yoğunluğu [ $kg/m^3$ ]
$\eta_I$	Isıtıcının çalışma verimi
$\eta_{VP}$	Vakum pompası çalışma verimi
$\eta_{VPm}$	Vakum pompası-motor verimi

## 1. GİRİŞ

Kurutma, genel olarak, bir cismin içindeki sıvının azaltılması ya da giderilmesidir. Diğer bir tanımla kurutma, katı maddelerden ısı yöntemleri kullanılarak su veya uçucu diğer maddelerin uzaklaştırılması olayıdır. (Yılmaz, ve Ceylan, 2002; Yılmaz, ve Yavuz, 2006).

Kurutma işleminin geçmişi eski çağlara dayanmaktadır. İnsanoğlu sürekli bir şeyleri kurutma çalışmış, bunu yaparken de en çok güneşten yararlanmıştır. Eskiden günümüze kadar süregelen toprak ve seramikten yapılmış malzemeler, kullanılan hammaddenin işlendikten sonra kurutulması ve pişirilmesiyle elde edilmektedir. Bu da, geçmişten beri kurutma işleminin insanlar tarafından üretim faaliyetlerinde kullanıldığını göstermektedir. Kurutma işlemi çok eski çağlara dayanmasına rağmen, 20. yüzyıllarda teknolojinin de gelişmesi ile birlikte endüstriyel anlamda ortaya çıkmış bir süreçtir. Kurutmanın yaygın olarak kullanıldığı endüstriler gıda, kimya, tekstil, ziraat, toprak-seramik ve ilaç endüstrisi sayılabilir. (Yüzgeç, 2005).

Kurutma, günümüzde enerjinin yoğun olarak kullanıldığı bir işlemdir. Enerji üretim maliyetinin yüksek olması ve çevreye verdiği olumsuzluklar nedeniyle enerji tüketimine de dikkat edilmelidir. Endüstriyel kuruluşlar bu yüzden, optimum enerji tüketimine yönelik yatırımlar yapmaktadır. Enerji tüketimini en az seviyeye indirmek için, kurutma olayını gerçekleştirmede kullanılacak makinelerin günümüz teknolojisi kullanılarak tasarlanması ve çalıştırılması gerekmektedir. Bu sebeple bu tez çalışmasında, vakumlu kurutma işleminde otomasyonu en iyi şekilde kullanarak zamandan ve enerjiden tasarruf edilmesi amacıyla bir kurutma fırını tasarlanmıştır.

Kurutma işlemi çeşitli amaçlar için uygulanmaktadır. Bunları dört başlık altında toplamak mümkündür (Güngör, ve Özbalta, 1997).

- a) İstenilen Özelliklerde Ürün Elde Etmek: Kurutmak istenilen hammaddede nem içeriğinin ayarlanması, en önemli amaçlarından biridir. Gıda ve ağaç ürünlerinin kurutulması konuya örnek gösterilebilir.

- b) Hacim veya Ağırlık Düşürmek: Hammaddede bulunan su içeriğinin mümkün olduğu kadar düşürülmesi, o ürünün depolama ve kullanılma işlemlerini daha kolay ve uzak mesafelere taşınmasını ekonomik hale getirmektedir. Örneğin su oranı yüksek kömürler, gemiye yüklenmeden önce belirli oranda kurutmaya tabi tutulmaktadır.
- c) Ürünleri Sterilize Etmek ve Korumak: Özellikle gıda endüstrisinde ürünlerin nem içeriği ayarlanarak, nemin sebep olduğu küflenme, çürüme ve bozulmaları önlemek mümkündür.
- d) Çözelti ve Sulu Atık Çözeltilerden Yan Ürün Elde Etmek: Bazı endüstriyel uygulamalarda kurutma, çözelti halinde olan ara ürünlerden son ürünlere geçmek için uygulanmaktadır. Örneğin toz deterjan sıvı olarak üretilip kurutma işlemi uygulanılarak toz haline getirilmektedir.

### **1.1. Kurutma İşlemi**

Kurutma temel olarak, ısı ve kütle transferi olaylarına dayanmaktadır. Isı ve kütle transferi, kurutulacak ürünün içindeki suyun buharlaşması için malzemeye iletilmesi gereken ısı ve buharlaşan suyun hava akımı yardımı ile ortamdan uzaklaştırılması olarak açıklanabilir. Kurutma işlemi sırasında bu iki olay birlikte gerçekleşmektedir. Fakat kurutma aşamasına bağlı olarak biri diğerinden daha baskın olabilmektedir. Bu durum kuruma hızını kontrol etmektedir. Hangi olayın kurumayı kontrol ettiği, kurutulan maddenin özelliklerine, kurumanın koşullarına ve kurumanın geçtiği aşamaya bağlı olarak değişmektedir (Yılmaz, ve Ceylan, 2002; Dinçer, and Şahin, 2004).

Kurutma işlemi; kondüksiyon, radyasyon, konveksiyon mekanizmalarının ikisi veya üçünün oluşmasıyla gerçekleşmektedir. Isı iletiminin en iyi şekilde gerçekleşmesi için kurutucu gazın, kurutulan maddeye çok iyi temas ettirilmesi ve iki madde arasında yeterli bir sıcaklık ve nem farkının olması gerekmektedir. Bu koşulları

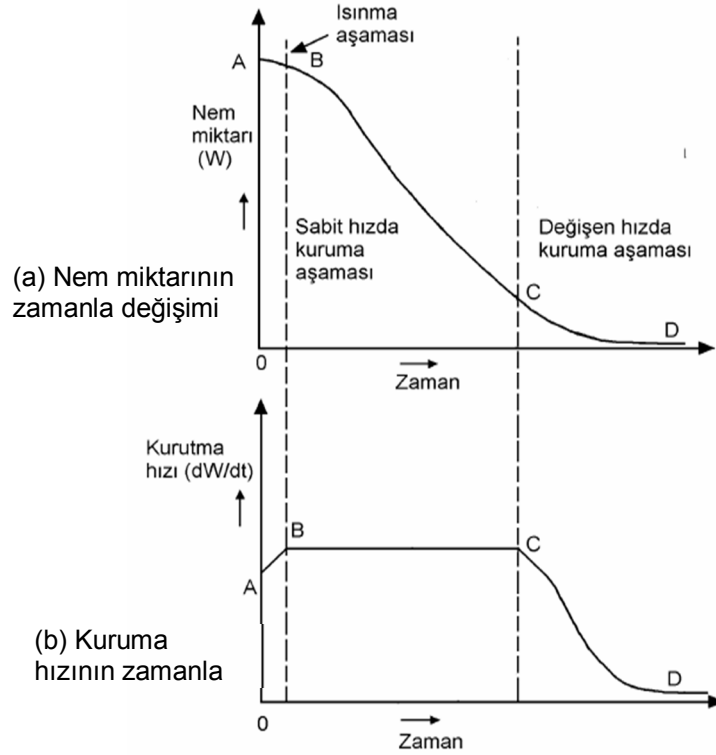
sağlamak için çeşitli kurutucular geliştirilmiş ve geliştirilmeye devam edilmektedir (Dikmen, 2010).

## 1.2. Kurutmanın Aşamaları

Kurutma genelde nem içeren maddenin üç aşamadan geçmesiyle gerçekleşmektedir (Molnar, 1995).

1. Isınma aşaması.
2. Sabit hızda kuruma aşaması.
3. Değişen hızda kuruma aşaması.

Şekil 1.1'de kuruma sürecinde, malzemenin kuruma hızı ve neminin zamanla değişimi eğrileri ile gösterilmektedir. (a) da görüldüğü gibi, nem başlangıçta hızlı bir şekilde uzaklaştırılmakta, ancak zamanla kuruma yavaşlamaktadır. (b) de ise bu kuruma aşamalarındaki kuruma hızlarının değişimi görülmektedir (Molnar, 1995).



Şekil 1.1. Kuruma eğrisi (Molnar, 1995).

1. Isınma Aşaması, [A-B]: Kuruma işleminin başlangıcını gösteren bu aşamada, malzeme ısınmaktadır. Önemli bir buharlaşma söz konusu değildir. Isınma süresi, kurutucunun çalışma koşulları ve kurutulacak malzemenin fiziksel özelliklerine bağlı olarak değişebilmektedir.
2. Sabit Hızda Kuruma, [B-C]: Serbest yüzey nemi taşıyan ürünlerin kurutulmasında, ilk olarak yüzeydeki nem buharlaşmaya başlar ve buharlaşma hızı sabittir. Malzemenin yüzey sıcaklığı ve sıvı filmi hemen hemen aynıdır. Aynı zamanda yüzey sıcaklığı ve gazın yaş termometre sıcaklığı birbirine yakın veya yüksek olabilmektedir. Aralarındaki farkın yüksek olması kuruma hızını artırır. Kuruma hızı, kurutucunun ısı ve kütle transferi özellikleri, malzeme yüzeyinin gazla teması, malzeme ile gazın nem oranları ve sıcaklık farkları gibi koşullara bağlı olarak değişkenlik gösterir. Şekil 1.1’de C noktasından sonra yüzeydeki sıvı filmi çok incelmış ve yer yer kuru-sıcak noktalar oluşmaya başlamıştır.
3. Değişen Hızda Kuruma, [C-D]: Malzemenin serbest nem değerinin altına düştükten sonra kuruma hızı aşamalı olarak düşmeye başlamaktadır. Malzemenin yüzeyindeki serbest nem buharlaşırken, bünyesindeki nem yüzeydeki serbest nem bölgesine taşınmaktadır. Kuruma sırasında, ilk aşamada malzeme yüzeyine yakın yerler kurduğundan daha derinlerdeki suyun uzaklaştırılması aşamasında kuruma hızı gittikçe azalmakta, kuruma süresi uzamaktadır. Kuruma süresi malzemenin kalınlığına bağlı olarak artmaktadır. Bu yüzden nemin çok düşük değerlere indirgenmesi gerektiğinde kurutulacak malzemenin mümkün olduğu kadar küçük boyutlarda hazırlanması, enerji tüketiminin azaltılmasını sağlayacaktır.
4. Denge Nemi: Maddenin içerdiği nem, belli bir değerde buhar basıncı oluşturmaktadır. Bu durum, kurutulacak maddenin özelliğine ve sıcaklığına bağlı olarak değişkenlik gösterir. Kurutma sonucunda maddenin nem alış-verişinin dengeye oturup buhar basıncının dengelendiği zamanda maddenin

sahip olduğu nem miktarına denge nemi denir. Atmosfere açık bir şekilde değerlendirilecek malzemelerin nemini, denge neminin altına düşecek şekilde kurutma gereksizdir. Böyle bir işlem kurutucunun veriminin düşmesine ve fazla enerji tüketmesine yol açar. Çeşitli malzemelerin denge nemleri Çizelge 1.1’de görünmektedir (Molnar, 1995).

Çizelge 1.1. Çeşitli malzemelerin atmosferik koşullarda kuru bazdaki denge nemleri (Molnar, 1995).

Malzeme	% Denge Nemi (Kuru temel)	Malzeme	% Denge Nemi (Kuru temel)
Beyaz ekmek	6.2	Odun (ortalama)	9.2
Deri	16.0	Pamuk (Nem çek.)	18.5
Kağıt (Gazete)	5.3	Pamuklu Giysiler	6.0
Kauçuk	0.6	Sabun	10.0
Keten Giyecekler	5.1	Un	8.0
Naylon	3.1	Yün	12.8
Orlon	1.4		
<b>Not:</b> Atmosferik koşullar: 25 °C sıcaklık ve %55 bağıl nem			

### 1.3. Kurutucuların Sınıflandırılması

Endüstride değişik özelliklere sahip çok sayıda madde için kurutma yapıldığından, çok sayıda kurutucu geliştirilip piyasaya sürülmüştür. Bu kurutucular kurutulmak istenilen maddenin yapısı, boyutu ve şekli, miktarı, besleme ve ısıtma şekli, çalışma şekli (kesikli veya sürekli), kuruma süresi gibi etkenler göz önüne alınarak geliştirilmiştir. Bundan dolayı bir sınıflandırma yapmak zordur. Fakat bazı etkenlere göre çeşitli gruplara ayrılmıştır. Kröll (1978) tarafından en ayrıntılı sınıflandırmalardan biri yapılmıştır. Bu sınıflandırmada, katı madde ve operasyon türü temel alınmıştır. Keey (1972) tarafından yapılan sınıflandırmada ise kurutucular 39 ana ve 70 alt grupta toplanmıştır. Porter vd. (1985) tarafından kurutulacak katı

maddenin fiziksel özellikleri, ısıtılma şekli ile taşıma ve depolama özelliklerine göre kurutucular sınıflandırılmıştır. Keey (1972) ise kurutulacak maddenin ısıtılma şeklini, çalışma sıcaklığını ve maddenin kurutucu içinde gördüğü işlemlere göre sınıflandırma yapmıştır (Menon ve Mujmundar, 1987).

Temelde kurutma sistemleri konveksiyon ve kondüksiyon tipi olmak üzere ikiye ayrılırlar.

Konveksiyon kurutucular; doğrudan temaslı (direkt) kurutucular olarak da tanımlanabilir. Bu kurutucularda kurutulacak madde ile kurutma gazı/havası doğrudan temas ettirilmektedir. Bu nedenle, kuruma daha hızlı bir şekilde gerçekleşir. Kullanılan kurutma gazının, kurutulacak maddeyi kirletmesi söz konusu olmadığı uygulamalarda bu tip kurutucular kullanılmaktadır (Menon ve Mujmundar, 1987).

Kondüksiyon kurutucular; dolaylı temaslı (indirek) kurutucular olarak da tanımlanabilir. Bu kurutucularda kurutulacak madde ile kurutma gazı/havası bir ısı değiştirici yüzey yardımı ile temas ettirilmektedir. Bu tip kurutucular, kullanılan kurutma gazının, kurutulacak maddeyi kirletmesi söz konusu olduğu uygulamalarda bu tip kurutucular kullanılmaktadır (Menon ve Mujmundar, 1987).

Bu iki tip kurutucu dışında herhangi bir gaz kullanmayan kurutucularda bulunmaktadır. Bu kurutucuların çalışması, elektromanyetik ve infrared ışınları vasıtasıyla kurutma prensibine dayanır. En çok bilinenleri, mikrodalga ve infrared tipi kurutuculardır. Genelde bu kurutucular tekstil, film ve bazı boya maddelerinin kurutulması amacıyla kullanılmaktadırlar (Menon ve Mujmundar, 1987).

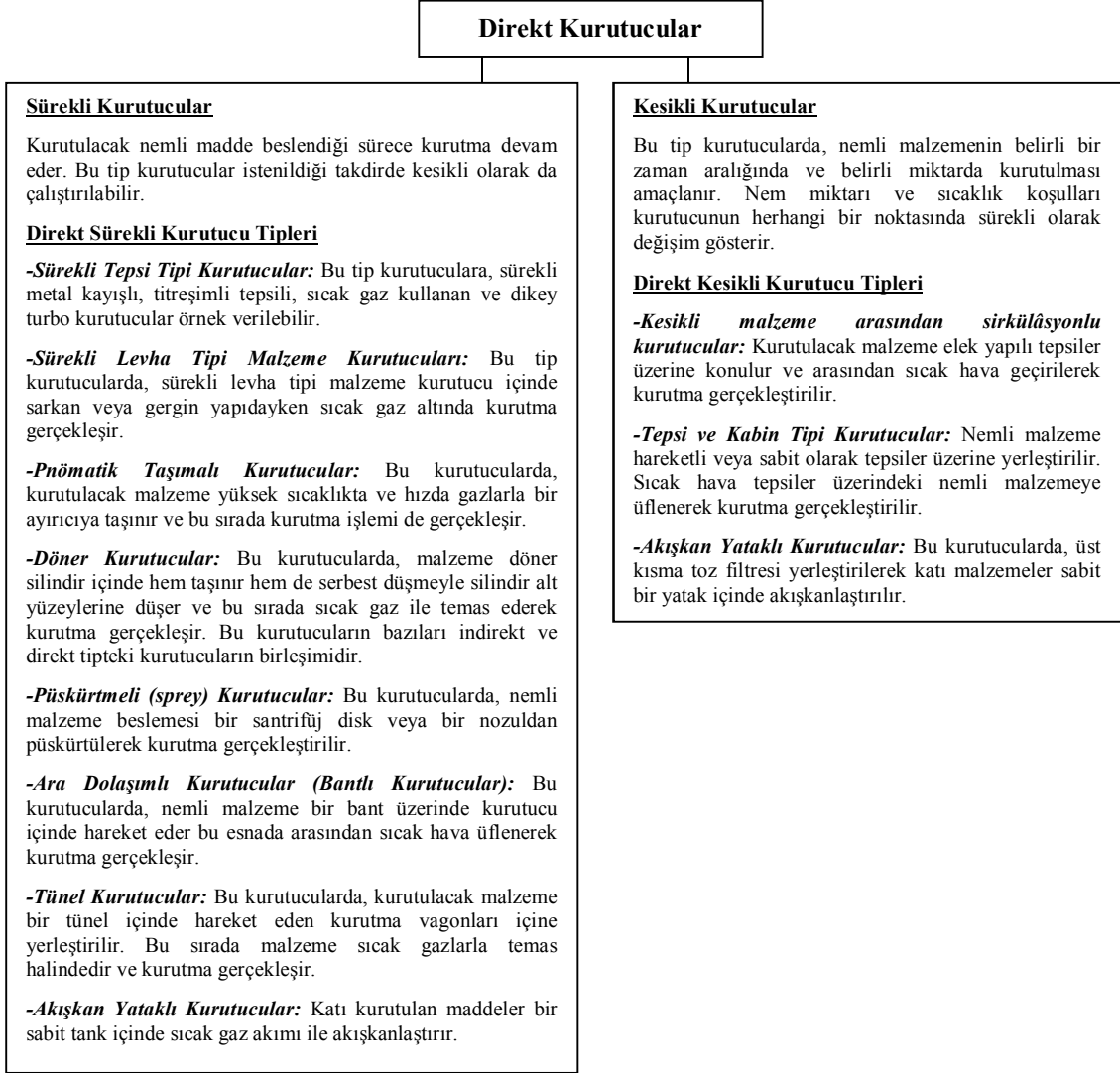
## **1.4. Kurutucu Tipleri**

### **1.4.1. Direkt kurutucular**

Bu kurutucularda kurutma için gerekli ısının transferi ıslak ürün ile sıcak gazlar arasında direkt temas yoluyla gerçekleşir. Ayrıca taşınım kurutucuları olarak da

adlandırılır. Çizelge 1.2’de direkt kurutucu tipleri verilmiştir (Güngör, ve Özbalta, 1997).

Çizelge 1.2. Direkt kurutucu tipleri (Güngör, ve Özbalta, 1997).



#### 1.4.2. İnfrared (kızılötesi) radyant ısıli kurutucular

Bu kurutucuların çalışması, infrared ışınların üretimi, geçişi ve absorplanmasına bağlıdır (Güngör, ve Özbalta, 1997).

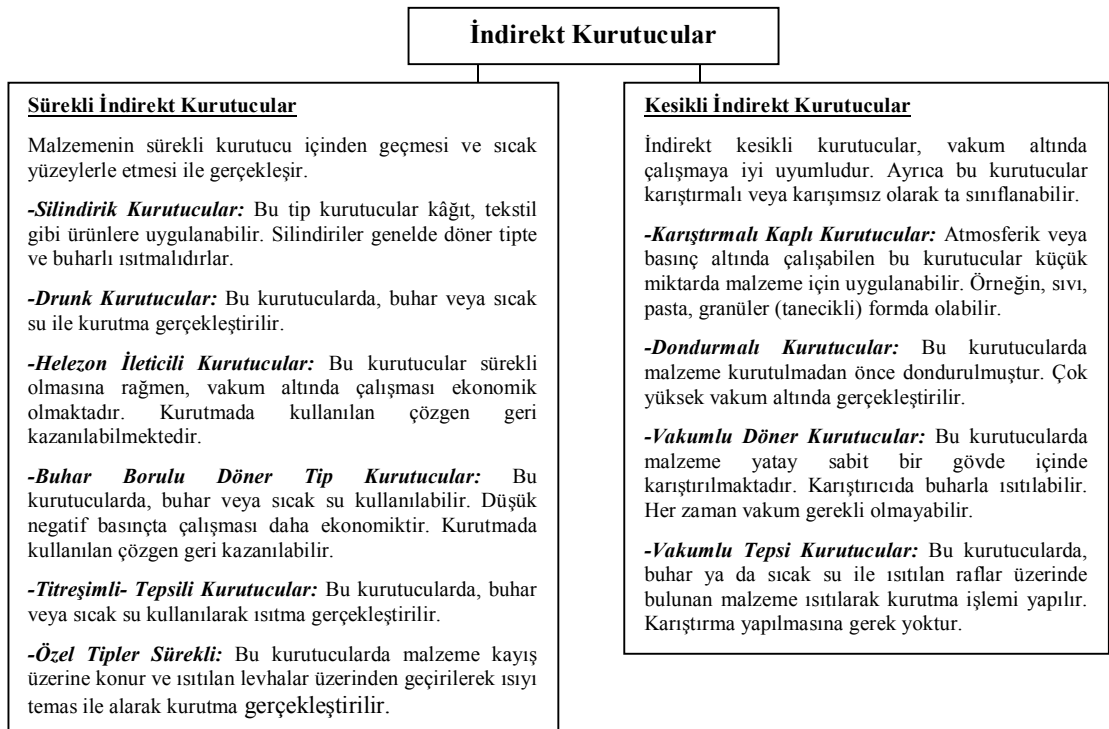
### 1.4.3. Dielektrik ısıtıcı kurutucular

Bu kurutucular, yüksek frekanslı elektriksel alana yerleştirilen katı malzeme içinde ısı üretimi prensibiyle çalışır (Güngör, ve Özbalta, 1997).

### 1.4.4. İndirekt kurutucular

Bu kurutucular iletim (kondüksiyon) kurutucuları veya temaslı kurutucular olarak da adlandırılır. Bu kurutucularda ısı bir ara duvardan geçerek nemli malzemeye ulaşır. Buharlaşan sıvı ise ısıtma ortamından bağımsız bir şekilde kurutucudan uzaklaştırılır. Kuruma hızı, kurutulan nemli malzemenin sıcak yüzeyler ile temasına bağlıdır. İndirekt kurutucu tipleri Çizelge 1.3'te verilmiştir (Güngör, ve Özbalta, 1997).

Çizelge 1.3. İndirekt kurutucu tipleri (Güngör, ve Özbalta, 1997).



Çizelge 1.4'te bazı kurutucuların buharlaştırma hızları verilmiştir. Çizelge 1.5'te ise kurutulacak nemli madde için en uygun kurutucu örnekleri verilmiştir.

Çizelge 1.4. Çeşitli kurutucuların kurutma etkinlikleri ve buharlaşma hızları (Walas, 1990; Strumilla vd., 1995).

Kurutucu Tipi	Buharlaşma Hızı		Buharlaşma Hızı (%)
	kg su/hm <sup>2</sup>	kg su/hm <sup>3</sup>	
Doğrudan - Sürekli			
-Akışkan yatak		800 - 2500	20 - 80
-Bant			40 - 60
-Döner	30 - 80		40 - 70
-Hava sürüklemeli		4 - 100	50 - 75
-Sprey	2 - 50		20 - 50
-Tünel			35 - 40
Doğrudan Kesikli			
-Raflı			95
Dolaylı - Sürekli			
-Tank(Drum)			85
-Döner			75 - 90
Dolaylı - Kesikli			
Karıştırmalı tava			90
Vakumlu döner			<70
Vakumlu raf			-
İnfrared			30 - 60
Dielektrik			60
Kurutma Etkinliği = (Buharlaşma için harcanan enerji / Kurutucuya verilen toplam enerji) x 100			

Çizelge 1.5. Çeşitli kurutucularda kurutulabilecek maddelerden bazı örnekler (Walas, 1990).

<b>Kurutucu Tipi</b>	<b>Kurutulan Maddeler</b>
Sprey Kurutucu	Lastik kimyasalları, sülfonatlar, anorganik fosfatlar, seramikler, killer, kahve, deterjan, farmosetik ürünler, pigmentler, mürekkep, anorganik sülfonatlar, lignosülfat esaslı ağaç artıkları, melamin ve üre aldehit, reçineler, polivinil klorürü, süt, yumurta, nişasta, maya, silika jel, üre, tuzlar
Tank (Drum) Kurutucu	Patates, kahvaltılık tahıl ve meyve karışımları, tereyağı, kaymağı alınmış süt, dekstrin, maya, poliaktriloamid, sodyum benzoat, aseatalar, fosfatlar, şelatlar, alüminyum oksit, m - disülfürik asit, baryum sülfat, kalsiyum asetat, - karbonatlı - fosfatlar, kostik soda, ferrosülfat, yapıştırıcılar, kurşun asetat, sodyum benzensulfonat, sodyum klorür.
Vakum Tank (Drum) Kurutucular	Şuruplar, kaymağı alınmış süt, maltlanmış süt, kahve, malt ekstratları ve yapıştırıcı.
Vakumlu Döner Kurutucular	Plastikler, organik polimerler, naylon çipler, her türlü kimyasallar, plastik lifli maddeler, organik kıvamlaştırıcılar, selüloz asetat, nişasta ve sülfür pulcukları.
Bant Kurutucular	Maya, kömür briketleri, yapay lastik, katalizörler, sabun, yapıştırıcılar, silika jel, titanyum dioksit, üre formaladehit, killer, beyaz kurşun, krom sarısı ve metalik stearatlar
Döner Çok Rafli Kurutucular	Pulvarize kömür, pektin, penisilin, çinko sülfat, atık çamur, pirofosforik çinko tozları, çinko oksit peletleri, kalsiyum karbonat, borik asit, kırılğan kahvaltılık tahıl ve meyve karışımları, kalsiyum klorit pulcukları, kafein, anorganik floridler, 40°C civarında eriyebilen kristaller, elektronik saflıkta fosforlar ve solvent - ıslak organik katti maddeler.
Akışkan Yataklı Kurutucular	Laktoz esaslı tanecik malzemeler, farmosetik kristaller, kömür, kum, kireçtaşı, demir cevheri, polivinil klorür, asfalt, tanecik halindeki nem çekiciler (desiccant), aşındırıcı maddeler ve tuzlar.
Hava –Süpürmeli (Pnömatik) Kurutucular	Maya filtre kekleri, nişasta, kanalizasyon çamuru, jips, meyve bulpları, bakır sülfat, kil, krom sarısı, yapay kazein ve potasyum sülfat.
Dondurucu Kurutucular	Et, deniz ürünleri, sebzeler, meyveler, kahve, derişik maya ürünleri (beverages), farmosetikler, veteriner ilaçları ve kan plazması.
Dielektrik Kurutucular	Pişmiş maddeler, kahvaltılık tahıl ve meyve karışımları, mobilya kerestesi, kaplamalar (veneers), kontra plak, yapay tahta, su - esaslı köpük plastik plakalar ve bazı tekstil ürünleri.
Infrared Kurutucular	Tekstil, kâğıt ve film, boya ve mine yüzey parlaticıları, gözenekli olmayan bulk maddeler.

### **1.5. Kurutma Sistemlerinde Otomasyon**

Genel olarak, bir işin makine ve insan arasında paylaşılarak yapılmasına otomasyon denmektedir. İnsan gücünün yoğun olarak kullanıldığı otomasyon sistemlerine yarı otomasyon, makine gücünün yoğun olarak kullanıldığı otomasyon sistemlerine ise tam otomasyon adı verilmektedir. Günümüz rekabet koşullarında üretim hızı, standart, güvenli ve verimli kılmak bir zorunluluk haline gelmiştir. Bu zorunluluğun karşılığı endüstride şüphesiz olarak otomasyondur (Kurtulan, 2008).

Endüstride, tüm firmalar en iyi kalitede ürünü, az enerji ve çok iş felsefesi ile yakalamaya çalışmaktadır. Bundan dolayı ürün üretiminde enerji tasarrufunun önemi çok büyüktür. Enerji tasarrufu ile ürün elde etmenin yolu, iyi bir otomatik kontrolden geçmesinin yanı sıra kaliteli malzeme ve kaliteli işçilikten de geçmektedir (Yılmaz ve Yavuz, 2006).

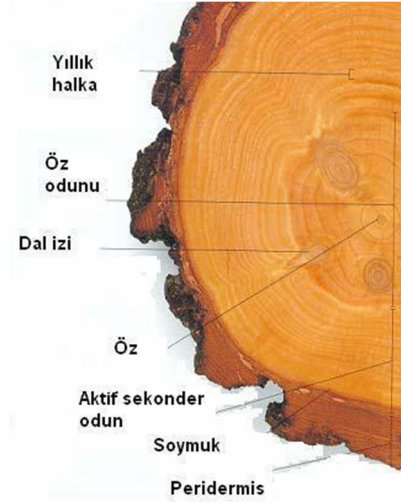
Kurutucu seçimi ve kurutma işleminde, en az enerji tüketerek en yüksek kuruma hızına ulaşmak istenilen niteliklerde ürünün elde edilmesi için dikkate alınması gereken temel etkenlerdir. Kurutma işlemlerinde, ısı ve kütle transferi uygulamaları iç içedir. Ayrıca kurutulacak ürünlerin özellikleri de kurutma işlemlerini karmaşık hale getirmektedir. Yapılan araştırmalar, bu karmaşık yapıların gelişen teknoloji ile birlikte sadeleştirilmesi ve enerji tüketimlerinin azaltılarak verimlerinin yükseltilmesini teşkil etmektedir. Buda uygun otomasyon sistemlerinin seçimi ile mümkündür (Yılmaz ve Yavuz, 2006).

### **1.6. Ağaç Malzemenin Özellikleri**

Kurutma işlemi sırasında ağaç malzemede meydana gelen fiziksel, kimyasal ve mekanik olayları anlamak için ağaç malzemenin önemli özelliklerinin bilinmesi gerekmektedir (Aytekin, 1997).

### 1.6.1. Ağaç malzemenin yapısı

Ağaç kök, gövde ve dallardan ibaret bir bitkidir. Bir ağaç gövdesinden bir tekerlek kesit alınıp incelenecek olursa Şekil 1.2’de görüldüğü gibi farklı yapıda 2 kısım görülür. Bunlardan iç kısım odun, dış kısım kabuk (peridermis) olarak isimlendirilir. Kabuk ile odun arasında soymuk adı verilen bir tabaka bulunur. Odun kısmı incelendiğinde iç içe geçmiş halkalardan oluştuğu görülmektedir. Bu halkalara yıllık büyüme halkası adı verilir. Ağaç kesit resminde koyu renkli iç kısma öz odun, açık renkli dış kısma diri odun özden çevreye kadar uzayan çizgilere özışını denir. Halkalar kışın, büyüme durduğundan dolayı daha belirgin haldedir. Tropik bölgelerde büyüme sürekli olduğundan halkalar belirgin halde olmamaktadır (Bozkurt ve Erdin, 1987).



Şekil 1.2. Ağacın enine kesiti (Bozkurt ve Erdin, 1987).

Literatürde ağaç için odun, kereste, tahta gibi genel ifadeler kullanılmakla birlikte çalışmamızda “ağaç malzeme ve kereste” terimleri tercih edilmiştir.

#### 1.6.1.1. Yıllık halkalar

Ağaç gövdesine her yıl eklenen yeni odun kısmına yıllık halka ya da ağaç halkası denmektedir (Akkemik, 2009).

Sürekli büyümenin olmadığı iklim bölgelerinde yetişen ağaç türlerinde yıllık halkalar bulunmakta, sürekli büyümenin olduğu tropik bölgelerde yetişen ağaç türlerinde ise yıllık halkalar bulunmamaktadır. Bir senelik bir halka, renk ve yapı olarak birbirinden farklı iki tabakadan oluşmaktadır. Açık renkli ve gevşek yapılı iç tabakaya ilkbahar odunu, kuyu renkli ve sık yapılı tabakaya ise yaz odunu denmektedir. İlkbahar odunu su iletim görevini yaparken, yaz odunu ise destekleme görevi görmektedir. Bundan dolayı yaz odunu fazla olan bir ağaç malzemenin özgül ağırlığı yüksek, kuruması ise zordur (Aytekin, 1997).

Genel olarak yıllık halkaların genişlemesinden dolayı, iğne yapraklı ağaç odunlarında özgül ağırlık azalmakta ve kuruma kolaylaşmakta, büyük yapraklı odunlarda özgül ağırlık artmakta ve kuruma zorlaşmaktadır. Yıllık halkaların genişlemelerindeki düzensizlikler kuruma sırasında dar ve geniş ağaç halkaların farklı çalışması sonucu birleşme yerlerinde gerilmeler oluşturarak halka çatlakları meydana getirir (Aytekin, 1997).

#### **1.6.1.2. Öz ışınları**

Öz ışınları özden kabuğa doğru uzanan katlar halinde görülürler. Hem ibreli hem de yapraklı ağaçların yapısında bulunurlar. Meşe, kayın, çınar gibi ağaçların yapısında geniş ve çok belirgindirler. Ağacın kabuğa doğru gıda alışverişini sağlarlar ve depo görevi görürler. Teknik açıdan öz ışınları, direnci azaltır, radyal yönde yarılmayı kolaylaştırır ve kuruma sırasında çatlamayı kolaylaştırırlar. Özellikle diri odunlarda, radyal yöndeki kuruma hızı, teğet yöndeki kuruma hızına göre daha fazladır (Aytekin, 1997; Gorgoda, 2010).

#### **1.6.1.3. Diri ve öz odun**

Diri odun, su iletimi ve depo görevini gören açık renkli kısım, öz odun ise, su iletimi ve depo görevini bırakan öze yakın koyu renkli mekanik destek görevi gören kısımdır (Eğitimcilerin Paylaşım Mekanı, 2006).

Genel olarak diri odun istisnalar dışında öz odundan daha fazla içinde su bulundurmaktadır. Su miktarındaki bu fark, iğne yapraklı iğne yapraklı ağaçlarda yapraklı ağaçlara göre daha fazladır. Bundan dolayı, kurutma yapılacak olan ağaç malzemenin başlangıç rutubetini, kurutmanın gidişini ve süresini etkilemektedir. Ayrıca öz odunun, diri oduna göre daha fazla su içermesi, kuruma süresini arttırmaktadır (Aytekin, 1997).

### 1.6.2. Özgül ağırlık

Kurutma bakımından önemli bir faktör olup, ağaç malzemesinin yoğunluğu demektir. Kerestenin, tam kuru haldeki ağırlığının ( $m_0$ ) hacmine ( $V_0$ ) oranı, tam kuru haldeyken özgül ağırlığını ( $\delta_0$ ) verir.

$$\delta_0 = m_0 / V_0 \text{ [gr/cm}^3 \text{ veya kg/m}^3\text{]} \quad (2.1)$$

Ağaç malzemenin, uzun süre su içerisinde bırakılarak gözeneklerinin dolmasına yaş hal denir. Kurutma fırınında  $103 \pm 2^\circ\text{C}$  de ağaç malzemenin gözeneklerindeki suyun tamamen buharlaştırılarak ağırlığının değişmez hale gelmesi sonucunda ile kuru hal elde edilir (Örs ve Keskin, 2001).

Kurutma alanında yapılan çalışmalar, tam kuru haldeki ağaç malzemenin özgül ağırlığının, kuruma süresi hakkında en doğru bilgiyi verdiğini göstermektedir. Ağaç malzemedeki özgül ağırlık artışı, ağaç malzemedeki bulunun suyun yayılma hızını yavaşlatmakta ve kurumayı güçleştirmektedir (Ceylan, 2007).

Çizelge 1.6. Bazı ağaç türlerinin kurutma bakımından özellikleri (Gündüz, 1994).

Ağacın cinsi	ÖZELLİKLER					
	Özgül ağırlık (gr/cm <sup>3</sup> )		Lif doygunluğu rutubet derecesi (%)	Taze hal rutubet miktarı (%)		Hacimsel yoğunluk değeri (gr/cm <sup>3</sup> )
	Tam kuru	Hava kurusu		Diri odun	Öz odun	
Toros Karaçamı (Dursunbey)	0.520	0.56	30	150	50	0.464
Uludağ Göknarı	0.400	0.43	34	135-190	45-80	0.359
Toros Sediri	0.487	0.52	21	116.6	39.3	0.437
Çoruh Meşesi (Belgrad)	0.806	0.86	26	109.1	92.8	0.666
Doğu Kayını	0.630	0.66	29.1	82.2	50.6	0.531

### 1.6.3. Ağaç malzemenin rutubeti

Ağaç malzemenin hücre boşluğundaki suya serbest su, hücre çeperindeki suya bağlı su ya da higroskopik su denir. Kurutma işleminde serbest su kolay ve hızlı olarak, higroskopik su ise zor ve yavaş olarak odundan uzaklaşır (Aytekin, 1997).

Ağaç malzemesindeki serbest suyun dışındaki liflere bağlanmış su miktarına lif doygunluk rutubeti (LDR) denir. Lif doygunluk rutubeti, %20 ila %40 arasında değişiklik göstermekte ve genelde ortalama olarak %28 kabul edilmektedir. Kurutma fırınlarının çalışma periyotlarının belirlenmesinde dikkate alınması gereken bir özelliktir (Örs ve Keskin, 2001).

Ağaç malzemenin, doğal olarak kurutulması sonucu ulaşılan kuruluk derecesine hava kuru rutubeti denmektedir. Hava kuru rutubeti çeşitli faktörlere bağlı olarak %10 ila %20 arasında değişiklik göstermekte ve bilimsel çalışmalarda %12 olarak alınmaktadır (Aytekin, 1997).

Ağaç malzemenin, kuru halindeki ağırlığına göre içeriğindeki su kütlesi miktarına Ağaç malzemesi nemi (r) adı verilir. Ağaç malzemenin nemi (r), kerestede su

miktarının ( $m_s$ ) kerestenin tam kuru haldeki kütlesine ( $m_0$ ) oranıdır (Örs ve Keskin, 2001).

$$r = m_s / m_0 \quad (2.2)$$

Çizelge 1.7 ve Çizelge 1.8’de çeşitli iğne yapraklı ve çeşitli yapraklı ağaç türlerinin diri ve öz odununda bulunan rutubet miktarları verilmiştir.

Çizelge 1.7. Çeşitli ağaç türlerinin taze haldeki diri ve öz odunlarında bulunan rutubet miktarı (İğne yapraklı ağaçlar) (Aytekin, 1997).

<b>İğne Yapraklı Ağaçlar</b>		
<b>Ağaç Türü</b>	<b>Öz Odun (%)</b>	<b>Diri Odun (%)</b>
Sarıçam	30-50	120-150
Toros karaçamı	50	150
Kızılcıam	-	79-26
Veymut çamı	90	200
Şeker çamı	98	219
Avrupa ladini	30-42	30-160
Sitka ladini	41	142
Uludağ göknarı	45-80	135-190
Avrupa göknarı	40-50	140-180
Toros sediri	39	117
Kıyı sekoyası	86	210
Boylu mazı	58	249
Adi duglas	37	115

Taze ağaç malzemedeki rutubet dağılımı, ağaç türlerine, aynı ağaç türüne, aynı ağacın farklı kısımlarına göre Tablo 2 ve Tablo 3’te de görüldüğü gibi farklılıklar göstermektedir. Bu rutubet farklılıkları kurutma işleminde önemli problemler ortaya çıkarabilmektedir (Aytekin, 1997).

Çizelge 1.8. Çeşitli ağaç türlerinin taze haldeki diri ve öz odunlarında bulunan rutubet miktarı (Yapraklı ağaçlar) (Aytekin, 1997).

Yapraklı Ağaçlar		
Ağaç Türü	Öz Odun (%)	Diri Odun (%)
Çoruh menekşesi	84-112	100-118
Macar menekşesi	80-109	98-113
Saçlı meşe	85-118	77-116
Doğu kayını	47-58	64-102
Batı kayını	50-80	70-100
Kestane	68-115	76-142
Beyaz çiçekli yalancı akasya	21-54	41-76
Sivri meyveli dişbudak	51	-
Gürgen	60-67	57-60
Titrek kavak	65-114	57-73
Ova akçaağacı	52-54	51-54
Gümüşi ıhlamur	81-95	78-83
Adi kızılağaç	108	123

Genel olarak lif doygunluk rutubetine ulaşılrken, ağaç malzemenin iç ve dış tabakaları arasında rutubet farkları oluşmakta ve bu farklar kontrol altına alınmazsa çatlamlar ve sertleşme hali ortaya çıkmaktadır (Aytekin, 1997).

#### 1.6.4. Higroskopik özellikler

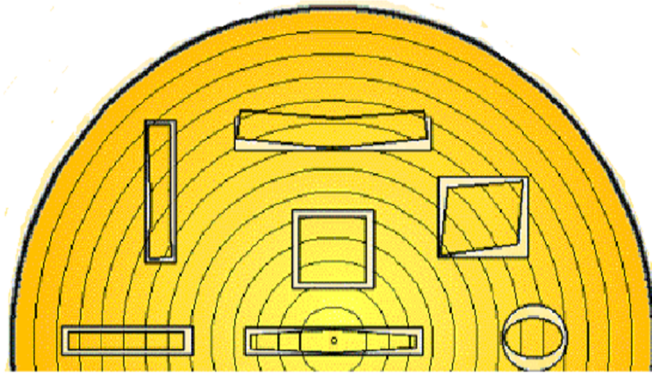
Ağaç malzemesinin nemi, çevre hava sıcaklığına ve bağıl nemine bağıl higroskopik dengeye geldiği değıerdir (Ceylan, 2007).

- **Denge Nemi:** Hava kurusu nemi olarak da adlandırılmaktadır. Ağaç malzemenin normal sıcaklıktaki kapalı mekânlarda denge nemi %7 ila %15 arasındadır. Ağaç malzemesi bulunduğu ortamdan su alıp verebildiği için fazla kurutulup fırından çıkarıldığı takdirde nem alır. Tam tersi kurutma olayının gerçekleşmediği dış mekânlarda da çevreye nem verir. Böylelikle gerekli denge nemini sağlamış olur (Ceylan, 2007).

- **Sorpsiyon:** Genel olarak ağaç malzemesi ile hava arasında olan nem alış verişi olayına sorpsiyon adı verilir. Ağaç malzemesinin havadan su alması olayına adsorpsiyon, su vermesi olayına da desorpsiyon denmektedir (Aytekin, 1997).
- **Difüzyon:** Genel olarak ağaç malzemesi içersindeki suyun, yoğun olduğu ortamdaki düşük olduğu ortama geçmesi olayıdır. Ağaç malzemesi içersinde bulunan bağılı suyun hareketi difüzyon ile gerçekleşir. Öz ışınlarının su geçirgenliğinin fazla olmasından dolayı, difüzyon liflere paralel yönde hızlı gerçekleşir. Difüzyonun en yavaş olduğu yön, yıllık halkalara teğet yöndür (Aytekin, 1997).

#### 1.6.5. Ağacın çalışması

Ağaç malzeme ortamdaki su alabilen ve ortama su verebilen gözenekli bir yapıya sahiptir. Bundan dolayı bulunduğu ortamın sıcaklık ve nem şartlarına göre ortamdaki nem alarak nemlenme ya da ortama nemini vererek kuruma yapabilmektedir. Ağaç malzemenin nemlenme yapması boyutlarını genişletirken, kuruma yapması boyutlarında daralmaya neden olur. Bu duruma ağacın çalışması denir. Ağacın çalışması lif doygunluk rutubeti içersinde gerçekleşir. Ağaç malzemenin çalışması, Şekil 1.3’de görüldüğü gibi radyal yönde en az, yıllık halkalara teğet yönde en fazladır. Bu nedenle iç gerilmeler meydana gelerek çatlama, çarpılma, eğilme ve çekme gibi kusurlar meydana gelmektedir (Örs ve Keskin, 2001).



Şekil 1.3. Enine kesitten alınma konumuna göre daralma miktarı (Simpson, 1991).

### **1.6.6. Rutubet meyli**

Kurutma sırasında ağaç malzemenin iç ve dış tabaka arasındaki rutubet farkına denir. Yeni kesilmiş ağaçlarda öz ve diri odun yaklaşık aynı nem miktarına sahiptir. Ağaç malzemenin gözenekli bir yapıya sahip olmasından dolayı, kuruma işlemi sırasında öncelikle dış kısımları kurumaya başlar. Bu sebeple iç ve dış tabakalarda nem farkı oluşur. Kurutma işleminde rutubet meyli, kurutmanın hızı ve kalitesi hakkında bilgi verir (Erden, 1977).

### **1.6.7. Kurutma meyli**

Ağaç malzemenin kurutulması işleminin herhangi bir aşamasında ortalama nemin, o anda kurutma fırını içerisindeki sıcaklık ve bağıl nemine bağlı olarak oluşan denge nemine oranıdır. Kurutma meylinin azalması, kurutma kusurlarının ortaya çıkma riskini azaltır, ancak kurutma süresini arttırır (Erden, 1977).

## **1.7. Ağaç Malzemesini Kurutma Metotları**

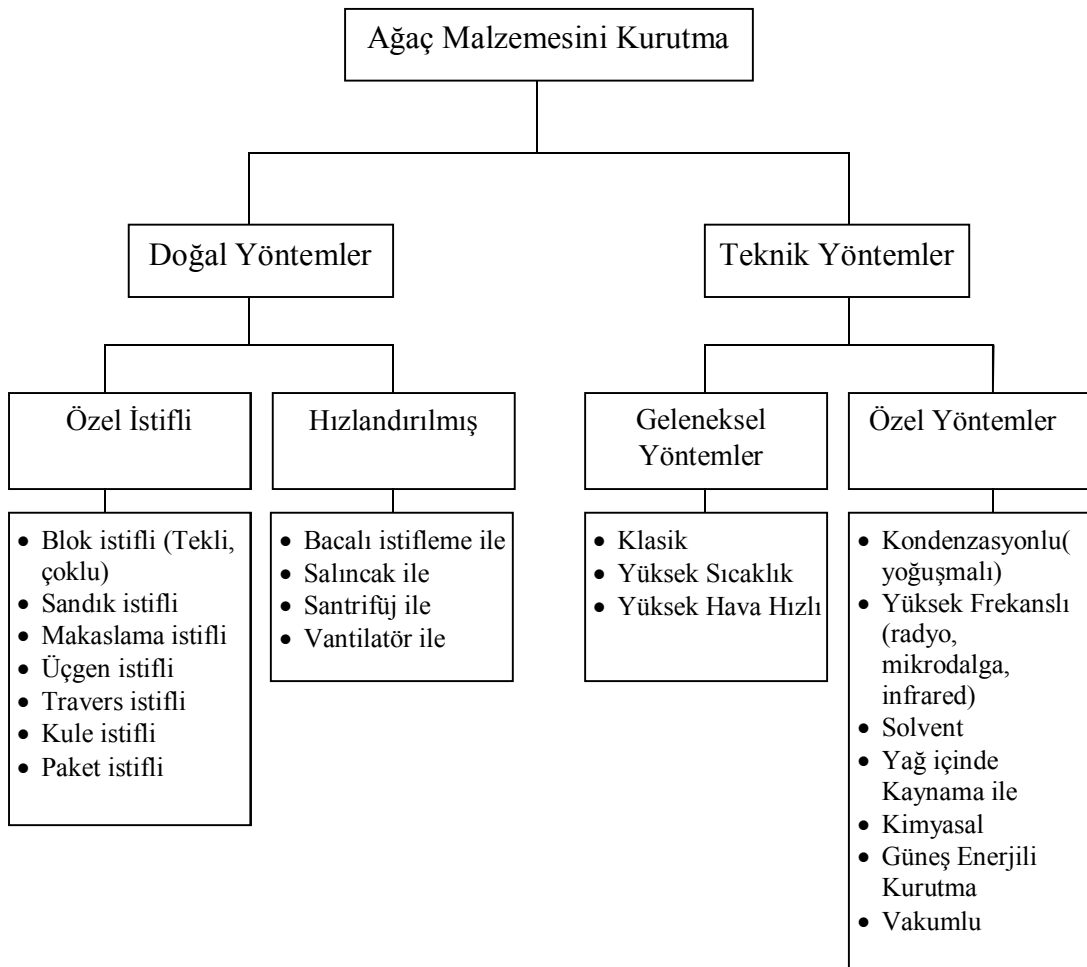
Ağaç malzemesinin kurutulmasında doğal ve teknik yöntemler kullanılmaktadır. Teknolojinin ilerlemesiyle bu iki yöntemin alt basamaklarında pek çok metotlar ortaya çıkmıştır. Günümüzde kullanılan metotlar Çizelge 1.9'de sınıflandırılmıştır. Endüstride maliyetlerinin düşük olmasından dolayı daha çok doğal kurutma yöntemleri tercih edilmektedir. Teknolojinin gelişmesi, enerjinin verimli kullanılabilmesi ve özel ağaç ürünlerinin elde edilebilmesi için vakumlu ve kondenzasyonlu kurutma yöntemleri ile çalışan kurutma sistemleri yaygınlaşmaktadır (Erden, 1977).

### **1.7.1. Doğal kurutma**

Ağaç malzemenin doğal kurutulması, kerestenin açık hava şartlarında denge rutubetine ulaşmaya kadar bekletilmesi işlemidir. Ağaç malzeme bu yöntemde, uygun bir yere tekniğine uygun olarak istiflenerek, açıkta veya sundurmalar altında sadece havanın sıcaklığı, bağıl nemi ve hareketi ile teknik müdahale olmadan kurutulmaktadır. Güneş ışınları yardımı ile doğrudan ya da dolaylı olarak ağaç

malzeme ısınmakta ve sıcaklığında etkisiyle havanın nem alma oranı artmaktadır. Doğal kurutmada ağaç malzemenin nemi en fazla %12 ila %15'e kadar düşürülebilmektedir. Kullanım yerine göre bu değerlerin %8'e kadar düşürülmesi gerekmektedir. Doğal kurutma işleminde malzeme neminin daha da düşürülmesi ve kurumunun hızlandırılması için bazı yöntemler geliştirilmiştir. Bunlar; bacalı istifleme, salıncaklı kurutma, buharlama, elektrik devresinde tutma ve vantilatör yardımıyla kurutma olarak sıralanabilir (Örs ve Keskin, 2001).

Çizelge 1.9. Ağaç Malzemesi Kurutma Yöntemleri (Yılmaz ve Doğan, 2001).

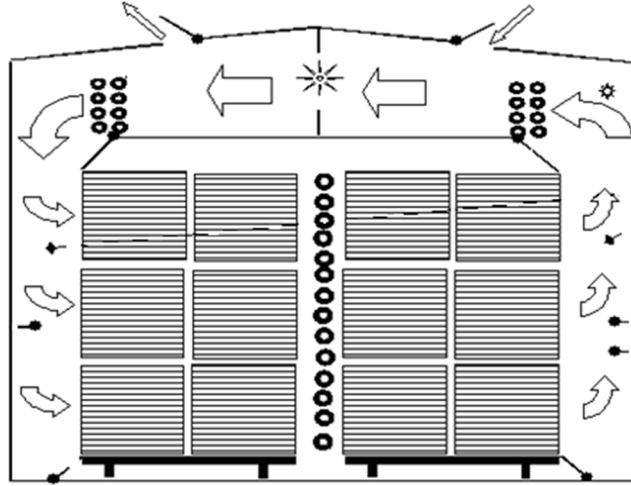


### 1.7.2. Klasik kurutma

En yaygın kullanılan ağaç kurutma yöntemidir. Sıcaklığı 100 °C'nin altında olan fırın içersindeki ağaç malzemeyi nemli hava yardımı ile kurutma olayıdır. Bu kurutma yönteminde, düşük sıcaklıktaki taze hava fırın dışından, fırın içersine alınmaktadır.

Fırın dışından alınan taze hava, fırın içersindeki havadan daha kuru olduğundan ağaç malzemeden nem alır. Sıcaklığa bağlı olarak ağaç malzemeden nem alan hava daha sonra aspiratörler yardımı ile fırın dışına atılır. Atılan hava miktarı kadar taze hava vantilatörler yardımı ile fırın içersine alınır. Bu işlem ağaç malzeme kuruyana kadar devam eder. (Serbes, 2003).

Fırın içersine alınan taze ve nemli havanın, ağaç malzeme kuruyana kadar değişmesinden dolayı enerji sarfiyatı olmaktadır. Bundan dolayı tedbir alınmadığı takdirde enerji maliyetleri yüksek olmaktadır. Bu kurutma zararını önlemek amacı ile kurutma şartlarının uygulanması da kurutmanın süresini arttırmaktadır. Şekil 1.4'te kurutma fırını kesiti verilmiştir (Aytekin, 1997; Dikmen, 2010).



Şekil 1.4. Kurutma fırını kesiti (Milli Eğitim B., 2006).

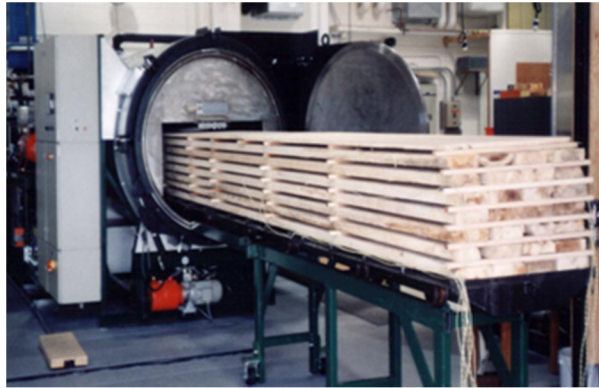
### 1.7.3. Kondenzasyonlu kurutma

Bu kurutma metodunda, fırın içersindeki havada bulunan nemin yoğuşturulup fırın dışına atılması ile ağaç malzemenin kurutulması sağlanır. Fırın içersinde ısıtılan hava, ağaç malzemeden nemi alır ve yoğuşturma bölümünde soğutularak nemi bırakması sağlanır. Soğutularak nemini bırakan hava tekrar ısıtılarak ağaç malzemeye yönlendirilir. Sistem içersinde dolaşan havadan çok az miktarı dışarı atılmakta ve çok az miktarda hava dışarıdan alınmaktadır. Genelde 40°C ila 50°C arasında çalışan bu fırınlarda uzun olmasına karşın günümüz şartlarında klasik kurutma fırınlarının kurutma süreleri ile aynı sürede kurutma yapabilecek şekilde

dizayn edilmektedirler. Isı pompası takviyesi yapıldığı takdirde de, klasik kurutma fırınlarından daha az enerji kullanmaktadırlar (Erden, 1997).

#### 1.7.4. Vakum kurutma

Ağaç malzemesinde bulunan suyun ortam basıncı düşürülerek yüzeye doğru hareket etmesini ve yüzeyden buharlaşmasını sağlayan kurutma yöntemidir. Bu kurutma yönteminde ağaç malzemesinin ısıtılmasının önemlidir. Vakumlu kurutma yapan sistemlerde iki yöntemle ağaç kurutma işlemi yapılmaktadır. Vakumlu kurutmanın yapıldığı yöntemlerden bir tanesi, tam vakumda kurutma yapılacağı takdirde az hava ile ağaç malzemeler levhalar arasına yerleştirilerek ısıtma iletim (kondüksiyon) ile gerçekleştirilir. Şekil 1.5'te levhalar ile yapılan vakumlu kurutma yöntemi görülmektedir. Diğer vakumlu kurutma yönteminde ise, kurutma fırını içerisinde periyodik vakumlama işlemi yapılır ve hava ile ısıtılan ağaç malzemesi içerisindeki suyun yüzeye çıkması ve buharlaşması sağlanır. Bu vakumlu kurutma yönteminde, ilk olarak hava ile ağaç malzemeler ısıtılır. Daha sonra fırın içinde vakumlama yapılarak basınç düşürülür. Bir süre ağaç malzemesi içerisindeki suyun yüzeye çıkması ve fırın içerisindeki sıcak nemli havanın dışarı atılması için bekletilir. Dışarıya atılan sıcak nemli hava yerine taze nemli hava fırın içersine alınır. Bu işlemler periyodik olarak devam eder. Vakumlu kurutma yöntemlerinde kurutma süresi klasik kurutmaya göre daha kısadır. Enerji maliyeti bakımından vakum pompasının harcadığı fazla enerji vardır (Ceylan, 2007).



Şekil 1.5. Orta ölçekli vakumlu kurutma fırını (Garrahan, and Kidlark, 2001).

### 1.7.5. Diğer kurutma yöntemleri

- Kızgın Yağlar İçinde Kurutma
- Organik Çözücüler İle Kurutma
- Organik Madde Buharı İle Kurutma
- Kimyasal Maddeler ile Kurutma
- Yüksek Sıcaklıkta Kurutma
- Yüksek Frekansta Kurutma
- Radyo Dalgaları İle Kurutma
- Ultraviyole Işımlar İle Kurutma

### 1.8. Kurutmada Ağaç Malzemedeki Ortaya Çıkan Problemler

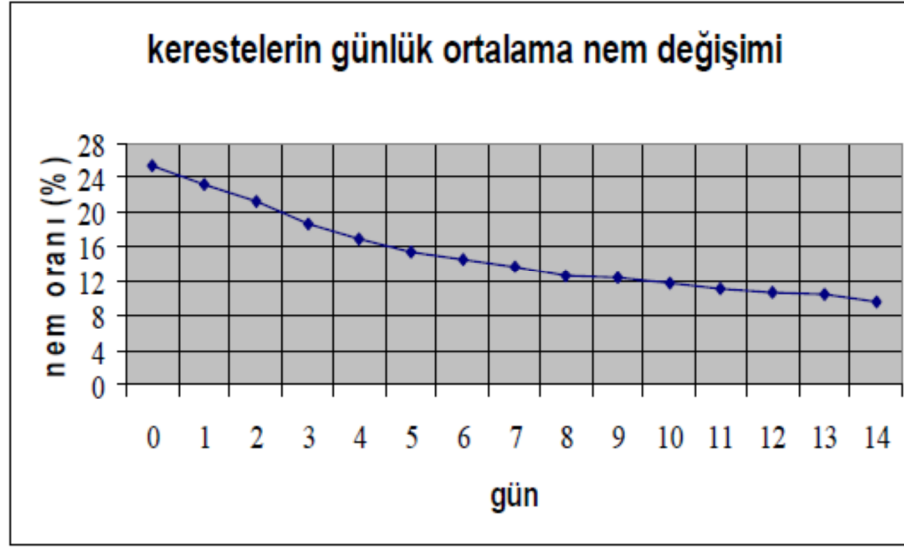
Ağaç malzemedeki kurutma esnasında bazı kusurlar oluşabilmektedir. Bir kurutma fırınının tasarımında ve çalıştırılmasında, ağaç malzemedeki kalitesinin düşmemesi için oluşabilecek kusurlara dikkat edilmesi gerekmektedir. Genelde karşılaşılan kurutma kusurları ve nedenleri aşağıda verilmiştir (Örs, ve Keskin, 2001).

- **Çok hızlı kurutma:** Ağaç malzemenin dış yüzeyinde bal peteği şeklinde görünüm ve buruşma meydana gelir. Ayrıca nemlendirme problemi yaşanacağından ağaç malzemedeki çatlama meydana gelir.
- **Çok yavaş kurutma:** Kereste yüzeyinde lekelenme, küf oluşumu, çürüme, eğrilik ve çarpıklıklar meydana gelir.
- **Yanlış istifleme:** Düzensiz kuruma, çarpılma ve özellikle eğilme meydana gelebilir.
- **İşletme hataları:** Ağaç malzemenin fazla kurutulması veya tam kurutulmamış olmasıdır. Ayrıca ağacın cinsine göre uygulanan kurutma yöntemi de yanlış seçilmiş olabilir. Bu durumda ağaç malzemedeki çatlama, küf oluşumları ve çarpılmalar meydana gelebilir.

## 2. KAYNAK ÖZETLERİ

Dikmen (2010), yapmış olduğu doktora tez çalışmasında, farklı sıcaklıklarda ve basınçlarda çalışan bir kurutma fırını tasarlamış ve değişken kurutma parametrelerini araştırmıştır. Tasarlamış olduğu kurutma fırını keresteleri vakumlu kurutma yöntemi ile kurutabilmektedir. Bu kurutma fırınının ideal şartlarda çalışabilmesini ise otomasyon sistemi yardımı ile kereste kurutma yazılımı geliştirerek sağlamıştır. Deneysel çalışmada ise çam ağacı keresteleri ile kurutma sıcaklıklarına, çalışma basınçlarına ve vakumda bekleme sürelerine göre toplam dokuz deney yapmıştır. Yapmış olduğu deneyler ortalama 50 ila 60 saat arasında sürmüş ve başlangıçta %45 olan kerestelerin bağıl nemleri %8'e düşene kadar kurutmayı gerçekleştirmiştir. Kurutma süresince verileri, otomatik kontrol sistemi ve veri kaydetme ünitesi yardımı ile kaydetmiştir. Elde ettiği veriler ile kurutma sisteminin çalışma verimleri ile ekserjilerini hesaplamıştır. Yapmış olduğu deneysel çalışmanın sonucunda ise vakumlu kurutma yöntemi ile çam kerestesinin ideal kurutulma şartını 50°C kurutma sıcaklığı, 0.80 bar çalışma basıncı ve 10 dakika vakumda bekleme süresi olarak tespit etmiştir.

Çinar (2009) yapmış olduğu çalışmada, Muğla iklim koşullarında havalı güneş toplayıcı ısı pompalı kereste kurutma tesisinde kurutma ekonomisini araştırmıştır. Yaptığı deneysel çalışma için, 300 m<sup>3</sup>/yıl kapasiteli, 60 m<sup>3</sup> hacme sahip ve 40 m<sup>2</sup> havalı güneş toplayıcı alanı olan bir sistemden yararlanmıştır. Yapmış olduğu deneylerde 50 x 11 x 4 cm ebatlarında ve nemleri yaklaşık %30 civarında olan 12 adet kızılçam kerestesi kullanmıştır. Deneysel çalışmasında 14. gün yaklaşık %10 nem değerine ulaşarak deneylerini sonlandırmıştır. Bu çalışma sonucunda deneylerden elde etmiş olduğu sonuçlardan bir tanesi Şekil 2.1'de verilmiştir. Güneş enerjili kereste kurutma fırınının 228 günde, katı yakıtlı kereste kurutma fırınının 345 günde ve LNG yakıtlı kereste kurutma fırınının 333 günde sistemlerini kara geçirdiklerini ortaya koymuştur. Kullanmış olduğu sistemin eksiklerinin giderilip, otomatik kontrollü bir sistem haline getirilmesinin daha çok verimli olacağını vurgulamıştır.



şekil 2.1. Kerestelerin günlük ortalama nem değişimi (Çinar, 2009).

Aytekin (1997) kereste kurutma fırınları için kurutma programlarının bilgisayarla hazırlanması üzerine bir çalışma yapmıştır. Yaptığı çalışmada, kurutma süresi ile ilgili karşılaştırma yapmak için deneysel ve teorik olmak üzere iki yöntem kullanmıştır. Teorik yöntemde, benzetim modelleri ile hesaplanmış katsayılar ve bunların oluşturduğu formüllerden yararlanarak, deneysel yöntemde ise uygulama sonuçlarını esas alarak karşılaştırma yapılmıştır. Aynı özelliklere sahip bir ağaç türünü deneysel ve teorik yöntem ile karşılaştırması sonucunda, kurutma süresini deneysel yöntemde 50 saat, teorik yöntemde ise 76 saat olarak bulmuştur. Teknik kurutmanın başarılı olabilmesinin kurutma fırınına uygulanacak kurutma programına bağlı olduğunu ancak aynı ağaç türlerine, yetişme şartları, rutubet farkları gibi birçok sebepten kurutma programlarının her defasında küçük değişikliklere uğraması gerektiğini vurgulamıştır. Sonuç olarak, kurutma programları ile hesaplanan kurutma sürelerinin, gerçek kurutma sürelerini yansıtmadığı ancak kurutma işlemini gerçekleştirecek kişiye kurutma süresi ve işlem akışı hakkında bilgi verebileceğini ortaya koymuştur.

Burdurlu (1988) yapmış olduğu yüksek lisans çalışmasında, ahşap malzemeyi klasik kurutma, yoğuşmalı (kondenzasyonlu) ve mikrodalga kurutma teknikleriyle kurutulması üzerine araştırmalar yapmıştır. Yapmış olduğu çalışmada, öncelikle

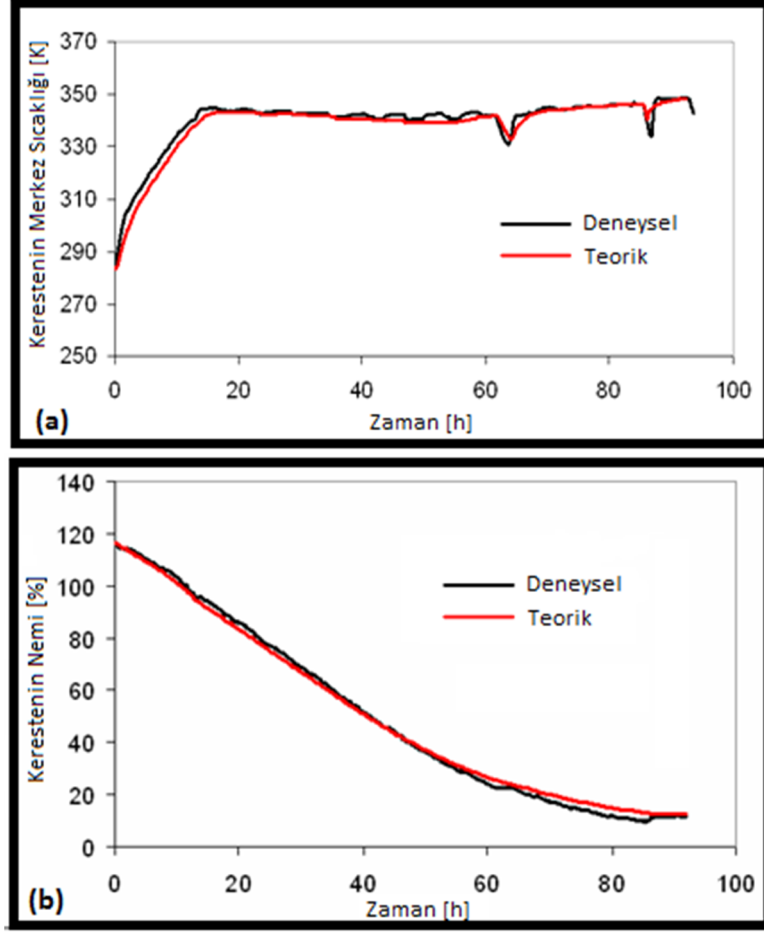
klasik kurutma, yoğuşmalı (kondenzasyonlu) ve mikrodalga kurutma yöntemleri üzerine yaptığı araştırma bulgularını ortaya koymuştur. Klasik kurutma ile kurutma süresinin kısa olduğunu ve mikrodalga kurutmada da istifleme yapmadan kurutma süresinin kısa olmasına rağmen kuruluş maliyetinin yüksek olduğunu tespit etmiştir. Ahşap malzemenin, kondenzasyonlu kurutma yöntemi ile kuruma süresinin uzun olduğunu fakat malzemedede daha az yapısal değişikliğe neden olmasından dolayı tercih edilebilir olduğunu ortaya koymuştur.

Zırzakıran (1990) doğal kurutma ve kondenzasyonlu kurutma yöntemlerini kullanarak, gürgen ve çam ağacı kerestelerini kurutarak sonuçlarını sunmuştur. Temmuz ayı içerisinde yaptığı deneylerde, gürgen ağacı kerestelerin doğal kurutma yöntemi ile % 15 nem oranına 12 günde, kondenzasyonlu kurutma yöntemiyle % 11,5 nem oranına 8 günde indiğini tespit etmiştir. Çam ağacı kerestesi için yine Temmuz ayı içerisinde yaptığı deneylerde % 8 nem oranına, doğal kurutma yöntemi ile 10 günde, kondenzasyonlu kurutma yöntemi ile 8 günde indiğini tespit etmiştir. Yaptığı deneysel çalışmanın sonucunda doğal kurutmanın ekonomik olmasına rağmen kurutma süresinin çok uzun olması, kullanılan ağaç malzemenin dış şartlardan etkilenmesi ve kontrol edilememesinden dolayı, kondenzasyonlu kurutma yönteminin doğal kurutma yöntemine göre daha tercih edilebilir olduğunu ortaya koymuştur.

Awadalla vd. (2004) yapmış olduğu teorik çalışmada, sonlu elemanlar metodu ile zamana bağlı ısı ve kütle transferi denklemlerini kullanarak, ağaç malzeme için TRNSYS simülasyon programı yardımıyla modelleme yapmışlardır. Yapmış oldukları çalışma, klasik kurutma tüneli ve güneş enerjili kurutma tüneli olmak üzere 2 farklı grup üzerine olmuştur. Deneyler ve TRNSYS simülasyon programı ile elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında en fazla  $\pm \%10$ 'luk sapma görülmüştür.

Berberovic (2007) yaptığı yüksek lisans çalışmasında, klasik kurutma fırınları için kütle ve ısı transferi denklemleri ile matematiksel model oluşturmuştur. Deneysel olarak yapmış olduğu çalışmada, klasik kurutma fırınında 500 adet kısa boylu keresteyi atmosfer basıncında kurutmuştur. Yapmış olduğu deneysel ve teorik

çalışmaların sonuçlarını karşılaştırmış ve birbirine yakın olduğu tespit edilmiştir. Şekil 2.2’de elde ettiği deneysel ve teorik sonuçlardan bir tanesi görülmektedir.



Şekil 2.2. Kurutma esnasında (a) kerestenin merkez sıcaklığının değişimi, (b) kerestenin ortalama nem değişimi (Berberoviç, 2007).

Coşkun (2000) yapmış olduğu doktora tez çalışmasında, ısı pompası destekli çapraz akımlı sürekli kurutucuyu matematiksel modelleyip, turbo pascal programlama dili yardımı ile bir simülasyon programı oluşturmuştur. Yapmış olduğu çalışmada kullandığı ısı pompası destekli çapraz akımlı sürekli kurutucu, basit nem alıcı ısı pompalı kurutucu ve açık hava çevrimli ısı pompalı kurutucu olarak iki şekilde tasarlanmıştır. Bu modellerin birbiri ile karşılaştırmasını yapmıştır.

Serbes (2003) yaptığı çalışmada, klasik kurutma metodu ve periyodik vakumlu kurutma metodu ile çalışan kurutma fırınlarını incelemiş ve karşılaştırma yapmıştır.

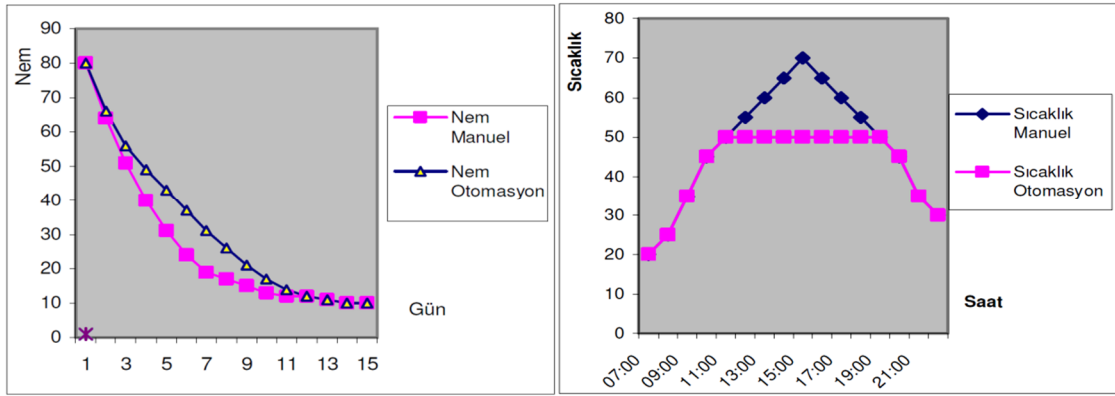
Alüminyumdan yapılmış klasik kurutma fırınında, çam ağacı ve kayın ağacı kerestelerini kurutarak eğim mukavemeti ile özgül kütle değişimini incelemiştir. Çam ve kayın ağacı kerestelerinin kurutulması sonunda elde edilen değerler Çizelge 2.1’de verilmiştir. Vakumlama yapılarak kurutulan ağacın daha kısa sürede kuruduğu ve eğilime karşı mukavemetinin arttığı tespit edilmiştir.

Çizelge 2.1. Serbes (2003)’in yaptığı çalışmanın sonucu

Ağaç Türü		Doğu Kayını	Sarı Çam
Başlangıç değerleri	Kurutmaya başlamadan önce ağacın nemi (%)	40	40
	Kurutma sonunda ağaç nemi (%)	9	9
Klasik Kurutma	Kurutma Sıcaklığı (°C)	60–45	60–50
	%9 Nemde Özgül Ağırlığı (gr/cm <sup>3</sup> )	0.68	0.50
	Eğilme Dirençleri (N/mm <sup>2</sup> )	12.789	9.287
	Kuruma Süresi (gün)	18	10
Vakumla kurutma	Kurutma Sıcaklığı (°C)	50	40
	Vakum Basıncı (mmBar)	550	450
	%9 Nemde Özgül Ağırlığı (gr/cm <sup>3</sup> )	0.78	0.55
	Eğilme Dirençleri (N/mm <sup>2</sup> )	16.222	13.587
	Kuruma Süresi (gün)	7	4

Yan et al.. (2001) yapmış oldukları deneysel çalışmada, klasik kurutma fırınları ile kısa sürede kaliteli ağaç malzeme kurutmak amacı ile PID (proportional-integral-derivative) ve FLC (fuzzy logic control) otomasyon sistemleri ile kurutma yapmışlardır. PID kontrolü ile yapılan deneysel çalışmada % 3 ila % 5 arasında hata ile sistemin çalıştığı, FLC kontrolü ile yapılan deneysel çalışmada ise % 1 ila % 3 arasında hata ile sistemin çalıştığı tespit edilmiştir.

Aker (2006), yapmış olduğu çalışmada, güneş enerjili ve ısı pompalı kurutma fırınının SCADA sistemi ile otomasyonunu yapmıştır. SCADA otomasyonunun denetim sürecinde, merkezi yönetim, denetleme ve bilgi toplama sistemi kurmuştur. Bu sistem otomasyonun yanında simülasyonda yapabildiğinden, simülasyon yardımı ile sistem elemanları incelenerek ideal çalışma şartları oluşturulmuştur. PLC yardımı ile çalıştırılan sistemin otomasyonlu ve otomasyonsuz çalışma şartları Şekil 2.3'de görülmektedir. Grafikten, otomasyonlu kurutmanın otomasyonsuz kurutmaya göre daha kaliteli kurutma gerçekleştiği görülmektedir. Sonuç olarak, bu tip sistemlerin klasik kurutmalara göre maliyet analizi yapılmış ve bu tip sistemlerin yapmış olduğu enerji tasarrufu ile 1 yıl içerisinde maliyetlerini karşıladığı ortaya konmuştur.

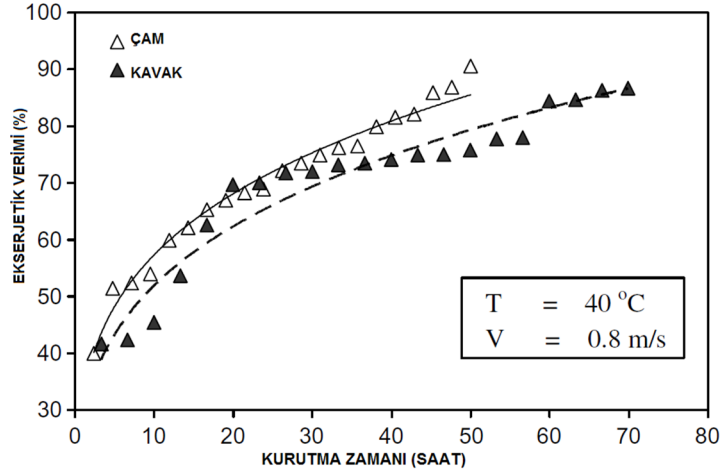


Şekil 2.3. Kurutma fırınında zamana bağlı sıcaklık ve nem değişimleri (Aker, 2006).

Dinçer and Şahin (2004), kurutma işleminin ekserji analizini yapmıştır. Kurutulacak malzeme, kurutma havası ve dışarı atılacak nemli havanın ekserji analizlerini yapan örnek bir model oluşturmuşlardır. Yapmış oldukları ekserji analizinde, sistemin ekserji veriminin kurutulacak malzeme miktarına göre değil, kurutma havası ve kurutulacak malzemenin nemine bağlı olduğu görülmüştür. Sonuç olarak, kurutma sistemi donanımlarının en uygun şekilde seçimi ve en iyi çalışma şartlarının sağlanması için örnek bir model ortaya konmuştur.

Ceylan vd. (2007) yapmış oldukları çalışmada, ısı pompası destekli kereste kurutucusunun enerji ve ekserji analizlerini yapmışlardır. Deneysel çalışmalarında, çam ve kavak ağaç malzemelerini, ısı pompası destekli kurutma fırınında kurutmuşlardır. Kurutma işleminde elde ettikleri sonuçlar ile sistemin ekserji

analizini yapmışlardır. Yapmış oldukları deneysel çalışma sonucu elde ettikleri ekserji verimleri Şekil 2.5’de görülmektedir. Sistem ilk çalışmaya başladığında ağaç malzemenin hemen nem bırakmaması nedeniyle ekserji verimi düşüktür. Fakat zamanla ağaç malzeme nem bırakmaya başlayınca ekserji verimi artmaktadır.



Şekil 2.4. Kerestelerin kurutulması süresince kurutma fırınının ekserji veriminin değişimi (Ceylan, vd., 2007).

(Yılmaz ve Yavuz, 2006) yapmış oldukları deneysel çalışmada, kondensasyonlu bir kurutma fırını prototip olarak tasarlamış ve imal etmişlerdir. İmal ettikleri sistemde kurutma süresi, sıcaklık, nem ve ağırlık gibi kurutma parametrelerini kaydederek, kurutma işleminin otomatik kontrolünün yapılabilirliğini deneysel olarak incelemişlerdir. Sonuç olarak, ısı pompalı destekli kondensasyonlu kurutma sistemlerinin her kurutma periyodu için otomatik olarak çalıştırılabileceğini ortaya koymuşlardır.

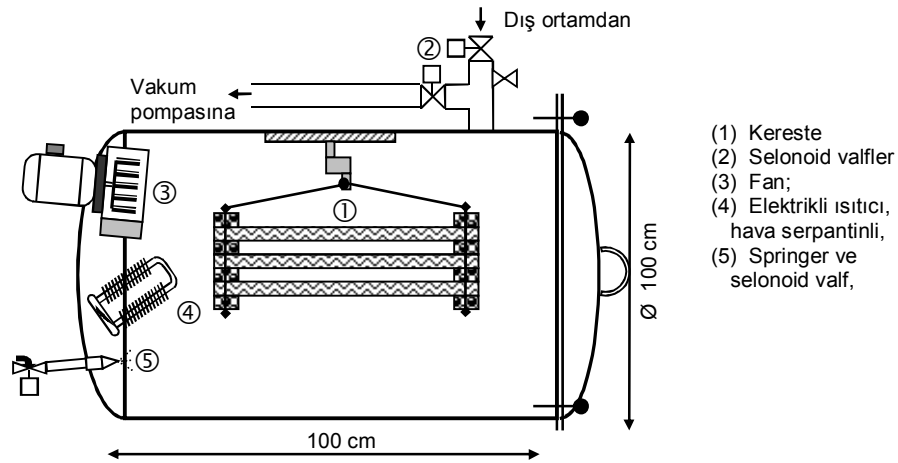
### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

#### 3.1. Materyal

Bu çalışmada; otomasyon sistemiyle desteklenmiş bir kurutma fırınının iyileştirilmesi yapılarak meşe, çam ve kavak cinsi ağaç kerestelerin farklı çalışma şartları altında kurutulması amaçlanmıştır. Deneylelerden elde edilen veriler otomasyon sistemi (PLC) ve veri toplama ünitesi yardımı ile kayıt altına alınmıştır.

##### 3.1.1. Kurutma fırının yapısı

Deneylelerde kullanılan kurutma fırını 1 m çapında 1 m uzunluğunda olup yaklaşık 0.80 m<sup>3</sup> 'lük hacme sahiptir (Şekil 3.1).



Şekil 3.1. Kurutma fırınının şekli

Kurutma fırınının kurutma yapılan bölümlerinde nemden etkilenmemesi amacıyla paslanmaz krom-nikel sac kullanılmıştır. Şekil 3.2'de görüldüğü gibi tank dışında mukavemeti arttırtmak için lama kemerler bulunmaktadır. Fırın kapakları ise bombeli imal edilmiş ve kuvvetlendirilmiştir. Önceki imal edilen kurutma tankının 10 cm olan cam yünü izolasyonuna ilave olarak 10 cm kalınlığında daha kauçuk-köpük ile kaplanarak izolasyonu arttırılmıştır. Ayrıca kurutma fırınının kapaklarına ise 5 cm daha kauçuk-köpük kaplanarak toplam izolasyon kalınlığı 10 cm'ye çıkarılmıştır. Deneylelerin yapıldığı otomasyon sistemi (PLC) destekli kurutma fırını Şekil 3.3'de görülmektedir.



Şekil 3.2. Kurutma fırınının imalat aşamasındaki tank dışı ve kapak görüntüsü



Şekil 3.3. PLC destekli kurutma fırını

Kurutma fırını, elektrikli rezistanslar ile ısıtılmaktadır. Rezistanslar fırın içerisinde, fanın çıkış ağzının önüne bulunmaktadır. Şekil 3.4'te 1.5 kW'lık güce sahip olan hava serpantinli rezistans görülmektedir.



Şekil 3.4. Hava serpantinli ısıtıcı

Kurutma fırını içerisinde hava sirkülasyonunu sağlamak için, Şekil 3.5'te görülen 2000 m<sup>3</sup>/h hava debili radyal salyangoz tipi fan bulunmaktadır. Fanların motor gövdeleri fırın dışındadır. Kataloguna göre çalışma verimi 0.85'dir.



Şekil 3.5. Salyangoz tipi vakum pompası

Sistemde 10 m<sup>3</sup>/h debili sulu tip vakum pompası bulunmaktadır (Şekil 3.6). Vakum pompasının elektrik motorunun verimi 0.85'dir.

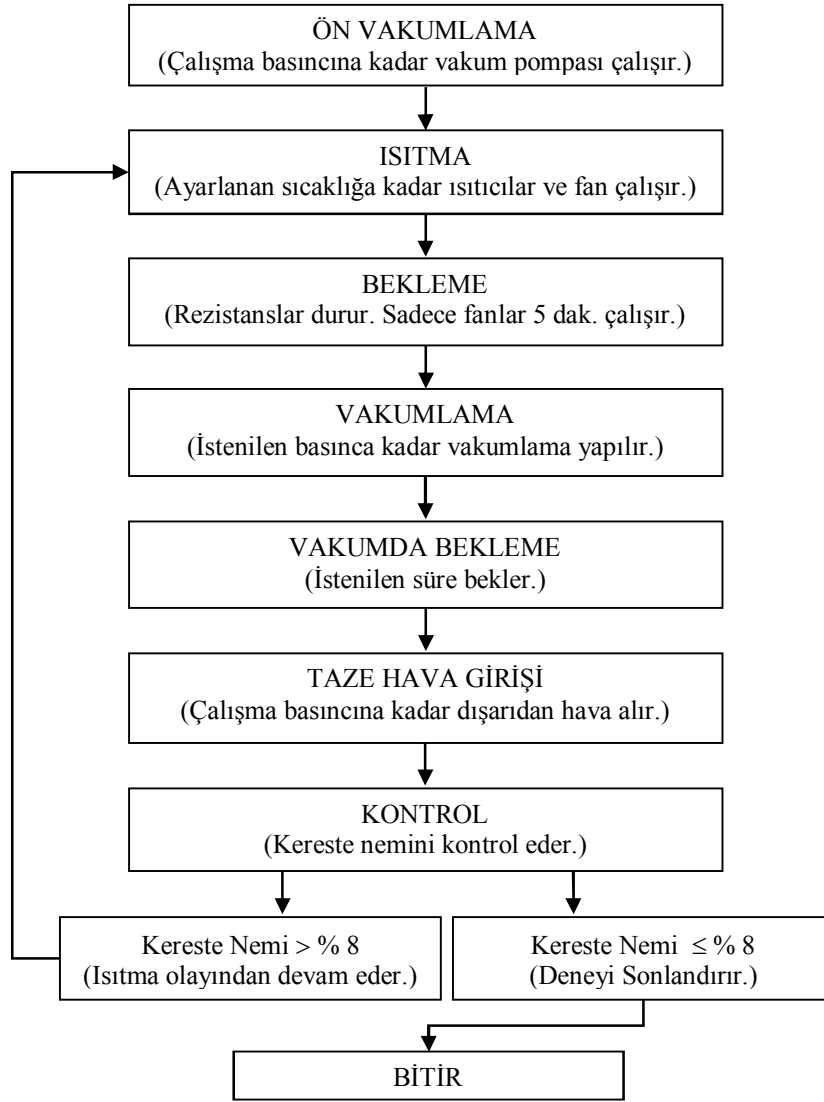


Şekil 3.6. Sulu tip vakum pompası

Sistemin hava girişinde ve çıkışında 1" çapında 220 Volt kontrollü selenoid valf, su girişinde ise 1/2" çapında 1 adet selenoid valf bulunmaktadır.

Otomasyon sistemi; ölçüm ekipmanları (sensörler), programlanabilir lojik kontrol (PLC= Programmable Logic Controller) denetimi ve dokunmatik özellikli kontrol ekranı birimlerinden oluşmaktadır.

Deneyisel sistemde 1 adet ağırlık, 3 adet sıcaklık, 1 adet hava nemi, 1 adet basınç, 3 adet ağaç nemi sensörlerinden gelen sinyaller PLC'nin veri toplama (analog) ünitesi tarafından toplanmaktadır. Sistemin çalışması için yapılan yazılımın iş akış şeması Şekil 3.7'de sunulmuştur. PLC yazılımı da bu iş akış şemasına göre çalışmaktadır.



Şekil 3.7. PLC yazılımının iş akış şeması

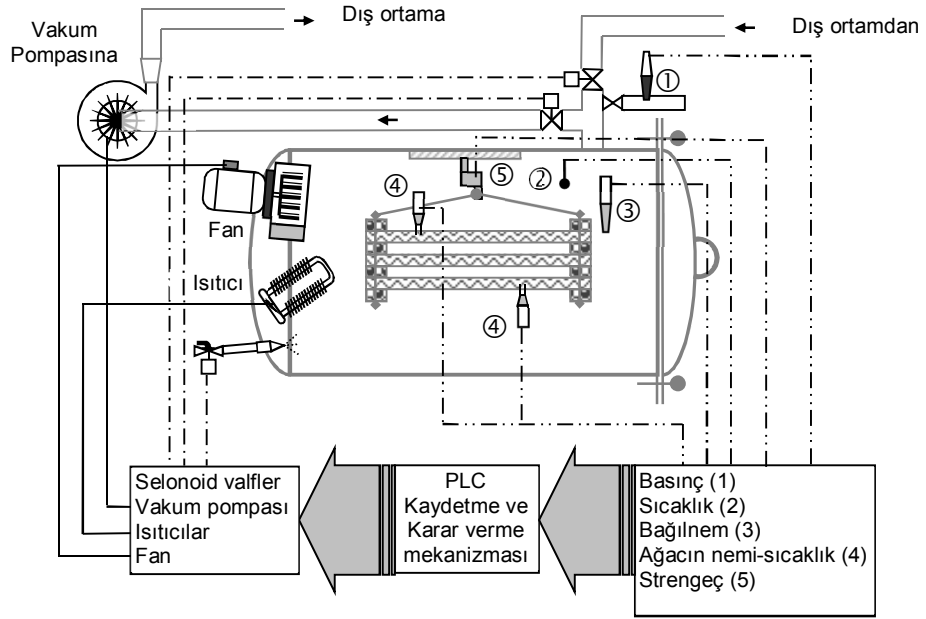
Deneysel için istenilen kurutma şartları, PLC'nin kumanda-kontrol panelinden ayarlanmıştır. Çalışma ayarlarına bağlı olarak PLC'nin kumanda-kontrol paneli yardımıyla;

- Kerestenin istenen sıcaklığa getirilmesi,
- Vakumlama ile sıcak nemli kurutma havasının ortamdaki uzaklaştırılması,
- Vakumda bekletilmesi,
- Kerestenin istenilen miktarda ağırlığının düşmesi ile sistemin durdurulması,
- Dışarıdan çalışma basıncına kadar taze hava girişi sağlanması,

işlemleri yapılmaktadır.

PLC sistemi, kurutma fırını çalışırken istenilen periyotlarda kendisine bağlı sensörlerden gelen bilgiyi kaydetmektedir. Ayrıca sistem durduğunda ise sistemin çalışma süresini, vakum pompasının, fanın ve ısıtıcıların tükettiği enerjiyi kaydetmektedir.

Şekil 3.8’de görüldüğü üzere otomasyon sistemi, 1 adet PLC, 1 adet analog modül, 3 adet adaptör, 9 adet 220-380 Voltluk kontaktör, fan hız ayarlayıcı, 1 adet termik, 3 adet güç sayacı, 11 adet sigorta ve gerekli bağlantı elemanlarından oluşmaktadır. Ayrıca şebeke elektriğinin kesilmesi olasılığına karşı PLC sisteminin girişinde 1 adet güç kaynağı bulunmaktadır. Otomatik kontrol panosunda kullanılan cihazların markaları ve özellikleri Çizelge 3.1’de verilmiştir.

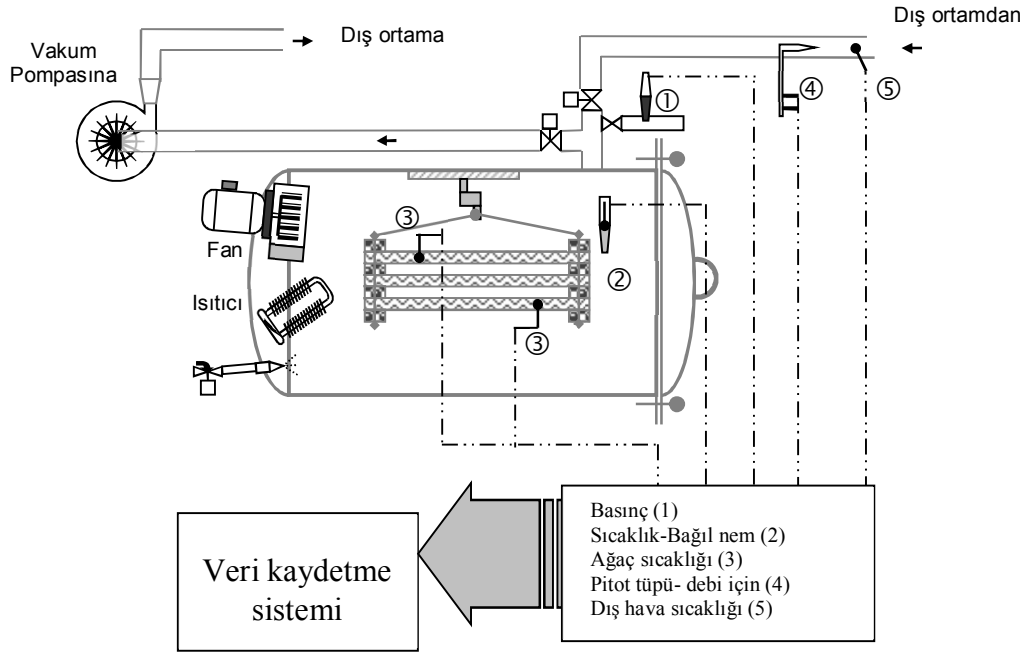


Şekil 3.8. Otomasyonun kurutma sisteminde yerleşimi

Çizelge 3.1. Kurutma sisteminin otomasyonunda cihazlar ve sensörler

<b>CİHAZ (Marka)</b>	<b>ÖZELLİK</b>
<b>PLC</b> (Unitronics vision350)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 3,5 inç ekran 256 renk</li> <li>• Dokunmatik ekran</li> <li>• 4,5 MB hafıza</li> <li>• 20 dijital giriş</li> <li>• 2 analog giriş</li> <li>• 12 röle çıkışı</li> <li>• RS232 bağlantı</li> </ul>
<b>Analog modül</b> (Unitronics expansion modül)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Analog sinyal üreten sıcaklık, nem, basınç gibi tüm sensörler bağlanabilir</li> </ul>
<b>Güç sayacı</b> (Entes ES32-L)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 220 volt mono faz</li> <li>• <math>\pm 4</math> W</li> </ul>
<b>Nem sensörü</b> (Dwyer 657C-1)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Polimer film nem sensörü</li> <li>• 0-100 % bağıl nem</li> <li>• <math>\pm 2</math> % hassasiyet</li> <li>• 4-20 mA çıkış sinyali</li> <li>• 24 volt</li> </ul>
<b>Basınç sensörü</b> (Dwyer 683)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 0-16 bar basınç transmitter</li> <li>• <math>\pm 0,25</math> % hassasiyet</li> <li>• 4-20 mA çıkış sinyali</li> <li>• 24 volt</li> </ul>
<b>Ağırlık sensörü</b> (Tension and Compression Sensor)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>\pm 4</math> waat</li> <li>• Ölçüm aralığı 2kN,</li> <li>• Yük limiti maksimum %150.</li> <li>• Dinamik yük maks: %70.</li> <li>• 23oC referans ısısı.</li> <li>• <math>&lt; \pm 0,2\%</math> gerilim hassasiyeti</li> <li>• <math>&lt; 0,15</math>mm normal ölçme yolu</li> <li>• <math>-10</math> to <math>+70^{\circ}\text{C}</math> etkin aralık.</li> <li>• <math>&lt; 0,07\%</math> 30 dak. sürüklenme hatası ve statik yük</li> </ul>
<b>Sıcaklık sensörü</b> (Tetcis portatif tip)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• K tipi termokupl</li> <li>• -200 ila <math>+200^{\circ}\text{C}</math></li> <li>• <math>\pm 0,2</math> % hassasiyet</li> <li>• 0,1 o ölçüm çözünürlüğü</li> </ul>
<b>Güç Kaynağı</b> (Ecolite 600 VA)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 220VAC</li> <li>• 50 veya 60 Hz</li> <li>• Yüksek kapasiteli tam bakımsız kurşun asit UPS aküsü</li> <li>• 0 - <math>40^{\circ}\text{C}</math> çalışma sıcaklığı</li> <li>• Topraklı priz X 2</li> <li>• Boyut 82,5 X 228 X 207</li> </ul>

Deneysel kurutma fırınının çalışması sırasında elde edilen veriler, sertifikalı Ahlborn veri kaydedicisi ve sensörleri ile kaydedilmiştir. Şekil 3.9'da görüldüğü gibi fırının basıncı, ağacın sıcaklığı, fırın içi nem-sıcaklık, giren havanın miktarı, giren havanın sıcaklığı ve çıkan havanın sıcaklığı Ahlborn veri kaydetme sistemi ile izlenmiştir. Ağaç nem sensörü ile kurutulan ağaçların nem değerleri de Ahlborn ile ölçülmüştür. Kullanılan veri kaydetme sistemi (data-logger) ve sensörler hakkındaki bilgiler Çizelge 3.2'de sunulmuştur.



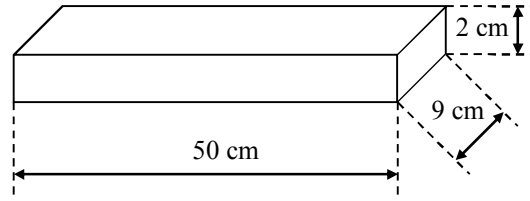
Şekil 3.9. Veri kaydetme sisteminin kurutma sistemine bağlantısı

Çizelge 3.2. Kurutma sisteminin veri kaydetme cihazı ve sensörler

<b>CİHAZ (Marka)</b>	<b>ÖZELLİK</b>
<b>Data-logger</b> (Almemo 2890-9)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Delta-sigma 24-bit, 50 ölçüm/sn</li> <li>• RS 232 bilgisayar çıkışı,</li> <li>• Analog sinyal, hafıza kartı, röle modülü veya network çıkışı</li> <li>• Grafik, 128x128 piksel, 16 satır, arkadan aydınlatmalı</li> <li>• 512 kB dahili (100,000 veri)</li> <li>• 6 NMH şarjlı batarya, 1600 mA, 2.5 saatte hızlı şarj.</li> <li>• 204 x 109 x 44 mm (B x E x Y), 550 gr. ABS plastik (maks. 70 °C)</li> </ul>
<b>Ağaç nem sensörü</b> (Moisture Sensor Type FHA636MF)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ölçüm aralığı ahşap için %7-%30 nem</li> <li>• Plastik saplı 40 x 130 mm (E x B), 260 gr.</li> <li>• 0 – 60 oC çalışma sıcaklığı</li> <li>• 0 – 2 V sinyal çıkışı</li> <li>• 7,5 – 12 V güç kaynağı</li> <li>• Maks.10mA akım tüketimi</li> </ul>
<b>Debimetre</b> (Pitot Tubes for Differential Pressure Sensors )	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Yarı küre kafalı pitot tüp</li> <li>• Pitot tüp ucunda 3d dinamik basınç ölçmek için açıklık vardır.</li> <li>• Statik basınç ölçme için üstünde 12 delik mevcuttur.</li> <li>• Nikel kaplamadır.</li> <li>• 350 oC'ye kadar dayanıklıdır.</li> </ul>
<b>Debimetre</b> (Differential pressure and Pitot tube measurement Measuring connector type)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ±0,5% hassasiyet</li> <li>• 25oC nominal sıcaklık</li> <li>• Maksimum 1,5% sıcaklık sapması</li> <li>• -10 ile +60oC ve 10 ile 90%RH çalışma aralığı</li> <li>• 40m/s basınç farkı</li> </ul>
<b>Sıcaklık-Nem sensörü</b> (Kimo TH 100)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Polimer film nem sensörü</li> <li>• Ekranız</li> <li>• 0-100 % bağıl nem</li> <li>• Kapasitif ve Pt100 sensör</li> <li>• ± 2,95 % hasasiyet</li> <li>• 4-20 mA çıkış sinyali</li> <li>• 24 volt</li> </ul>
<b>Basınç sensörü</b> (Temperature-Compensated Pressure Sensors Type FD821408R)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 0 - 1,6 bar basınç transmitter</li> <li>• ± 0,25 % hassasiyet</li> <li>• 4-20 mA çıkış sinyali</li> <li>• 24 volt</li> </ul>
<b>Sıcaklık sensörü</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• K tipi termokupl</li> <li>• -200 ila +200oC</li> <li>• ± 0,2 % hassasiyet</li> <li>• 0,1 o ölçüm çözünürlüğü</li> <li>• Ölçen kısım CrNi kaplı</li> <li>• Ahlborn konektör</li> <li>• Tetcis K tipi termokupl</li> </ul>

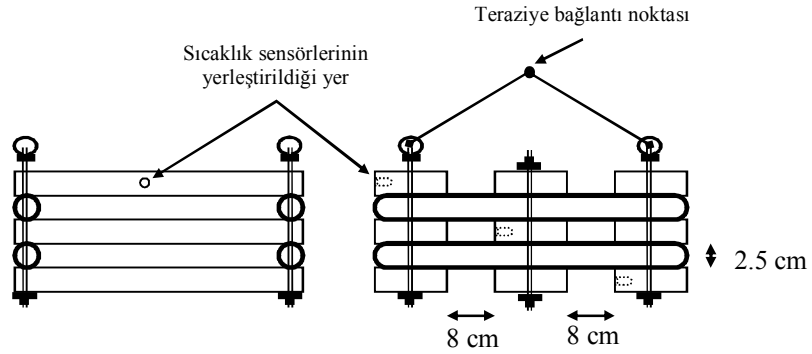
### 3.1.2. Deney numunelerin hazırlanması

İmal edilen kurutma fırınında meşe, çam ve kavak cinsi kerestelerinin kurutulması amaçlanmıştır. İşlenerek kereste haline getirilen meşe kerestesi numunesi Adapazarı sanayisinden, çam ve kavak keresteleri numuneleri ise Isparta sanayisinden temin edilmiştir. Şekil 3.10'da görüldüğü gibi numuneler 50 x 9 x 2 cm boyutlarında hazırlanmış ve deneylerin yapılacağı zamana kadar dondurucuda bekletilmiştir.



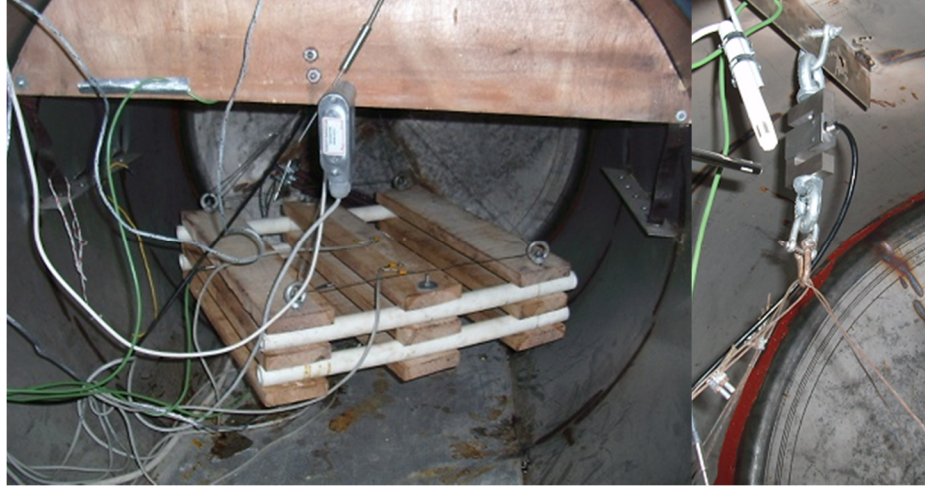
Şekil 3.10. Numune kerestelerin boyutları

Her deney için yan yana ve üst üste üçer adet olmak üzere 9 adet kereste numunesi hazırlanmıştır (Şekil 3.11). Numunelerin bu şekilde hazırlanmasındaki amaç, istifin altında, üstünde ve ortasında kalan kerestelerin tepkilerini takip etmektir.



Şekil 3.11. Kereste istifleri

İstiflerin arasında ortam neminden etkilenmemesi amacı ile 25 mm çapında plastik borular kullanılmıştır. Kereste istifinin askıda kalması, galvaniz kaplı vidalı bir mülle birbirine bağlanarak sağlanmıştır. Şekil 3.12'de görüldüğü üzere keresteler, üstündeki halkalardan çelik halatla teraziye bağlanmıştır.



Şekil 3.12. Numunelerin teraziye bağlantılı hali

### 3.1.3. Deneilerin yapılışı

Bu çalışmada farklı sıcaklıklarda ve basınçlarda, otomasyon sistemi desteği ile çalışabilen kurutma fırınında deneyler yapılmıştır. Deneylerde kullanılacak keresteler yaşken temin edilmiş ve kurumalarını önlemek için deneyler yapılmaya kadar dondurucuda üzerleri naylonla sarılmış şekilde bekletilmiştir.

TSE 2456' da, çarpılma gibi şekil değişikliklerinin önlenmesi için kereste kurutma havası hızının 3 m/s olması gerektiği vurgulanmıştır. Kullanılan deney sisteminde kereste yüzeylerine en fazla 3 m/s en az 2 m/s kurutma havası gelecek şekilde fan ayarlanmıştır.

Otomasyon sistemi yardımı ile çalışma sıcaklığı ve basıncı ayarlan sistemde; meşe, kavak ve çam cinsi kerestelerin kurutulması için farklı deneyler yapılmıştır. Kerestelerde istenilen kuruluğa erişildiğinde deneyler otomatik olarak sonlanmaktadır. Meşe, kavak ve çam numuneleri için deneyler iki farklı çalışma şartı için yapılmıştır. Bunlar:

- **Kurutma fırınının çalışma sıcaklığı:** Kurutma fırınında, meşe, kavak ve çam cinsi keresteler için 50°C ve 60°C sıcaklıkta ayrı ayrı deneyler yapılmıştır.

- **Kurutma fırınının çalışma basıncı:** Kurutma fırınında 0.75 bar ve 0.9 bar olmak üzere iki farklı çalışma basıncında meşe, kavak ve çam cinsi keresteler için ayrı ayrı deneyler yapılmıştır.

Üç farklı cinsteki kerestenin özellikleri ve uygulanan deneysel çalışma şartları Çizelge 3.3'te verilmiştir.

Çizelge 3.3. Keresteler için deneyler yapılırken kullanılan değerler.

AÇIKLAMA		Fırının Çalışma Sıcaklığı ve Basıncı		
		1. Deney	2. Deney	3. Deney
<b>PLC ayarları</b>	Kurutma sıcaklığı [°C]	50	50	60
	Çalışma basıncı [bar]	0.9		0.75
	Vakumlama basıncı [bar]	0.25		
	Vakumda bekleme süresi [dak.]	10		
<b>Kereste</b>	Boyutları [cm]	2 x 9 x 50 (9 adet)		
	Hacmi [m <sup>3</sup> ]	0.0081		
	Yüzey alanı [m <sup>2</sup> ]	1.0224		
	Kavak Ağırlığı [kg]	7.68	7.74	7.62
	Çam Ağırlığı [kg]	8,74	8,82	8,7
	Meşe Ağırlığı [kg]	12,23	12,30	12,14

## 3.2. Yöntem

### 3.2.1. Ağaç malzemesinin neminin bulunması:

Kerestenin nemi, kereste ağırlığının aynı ağaca ait tam kuru kerestenin ağırlığına oranlanması ile bulunabilir.

TSE 4087'ye göre kereste kurutma odasında  $103 \pm 2$  °C sıcaklıkta kurutulur ve kurutulan keresteler 4 ila 6 saat ara ile tartılır. Her tartma işlemi yapıldıktan sonra bir

önceki tartma işlemi sonuçları ile arasındaki kütle farkının her kereste parçası için % 1'den az olması halinde tam kuru rutubet haline ulaşılmış olur.



Şekil 3.13. Kereste numunelerinin etüv fırınında kurutulması

Deneysel çalışmada kurutma yapılacak meşe, kavak ve çam kerestelerinden 4'er adet kereste numunesi önce tartılmış, sonra 10 gün gölgede bekletilerek kurutulmuştur. Daha sonra 15 saat süresince etüv fırınında 100°C'de kurutulmuştur (Şekil 3.13). Kurutmaya tabi tutulan numunelerin sonuçları Çizelge 3.6, Çizelge 3.7 ve Çizelge 3.8'de sunulmuştur. Her ağaç cinsi için kullanılan 4 numunenin ortalaması, ağaç malzemenin özgül kütleinin tespitinde kullanılmıştır.

Çizelge 3.4. Meşe kereste numunelerinin özgül kütle test sonuçları

Numuneler		1	2	3	4	Ortalama
Numunelerin Boyutları (mm)	Fırınlanmamış	125 x 90 x 20.5				
	Fırınlanmış	124 x 89.5 x 20	124 x 89.5 x 20	124 x 89 x 20	124.5 x 89.5 x 20	
Ağaç numunelerin hacmi (Tam kuru hal) [cm <sup>3</sup> ]		221.96	221.96	217.28	222.86	221
Numunelerin ilk ağırlıkları (gr)		268.8	268.1	280.91	258.2	269.00
Denge rutubetinde numune ağırlıkları (gr)		190.1	188.01	212.13	197.26	197
Tam kuru halde numune ağırlıkları (gr)		173.91	170.5	194.37	182.08	180.214
Özgül Kütle (Tam kuru hal) [kg/m <sup>3</sup> , (gr/cm <sup>3</sup> )]		0.78352 (783.52)	0.76816 (768.16)	0.89455 (894.55)	0.81702 (817.02)	0.81581 (815.81)

Çizelge 3.5. Kavak kereste numunelerinin özgül kütle test sonuçları

Numuneler		1	2	3	4	Ortalama
Numunelerin Boyutları (mm)	Fırınlanmamış	125 x 90 x 20.5				
	Fırınlanmış	122 x 88 x 19	122.5 x 88 x 19	123 x 88,5 x 19	123 x 88 x 19,5	
Ağaç numunelerin hacmi (Tam kuru hal) [cm <sup>3</sup> ]		203.984	204.82	206.8245	211.068	206.67
Numunelerin ilk ağırlıkları (gr)		178.38	161.51	151.98	172.86	166.18
Denge rutubetinde numune ağırlıkları (gr)		89.74	88.68	86.75	100.14	91.33
Tam kuru halde numune ağırlıkları (gr)		82.55	81.7	80.19	92.58	84.26
Özgül Kütle (Tam kuru hal) [kg/m <sup>3</sup> , (gr/cm <sup>3</sup> )]		0.40469 (404.69)	0.39889 (398.89)	0.38772 (387.72)	0.43863 (438.63)	0.40748 (407.48)

Çizelge 3.6. Çam kereste numunelerinin özgül kütle test sonuçları

Numuneler		1	2	3	4	Ortalama
Numunelerin Boyutları (mm)	Fırınlanmamış	125 x 90 x 20.5				
	Fırınlanmış	123 x 88 x 19	123 x 88.5 x 19	123,5 x 88,5 x 19	123 x 89 x 19,5	
Ağaç numunelerin hacmi (Tam kuru hal) [cm <sup>3</sup> ]		205.656	206.8245	207.67	213.47	208.4
Numunelerin ilk ağırlıkları (gr)		152.3	164.67	154.02	161.51	158.1
Denge rutubetinde numune ağırlıkları (gr)		131.89	140.27	129.51	135.22	134.2
Tam kuru halde numune ağırlıkları (gr)		121.62	129.1	119.26	124.64	123.66
Özgül Kütle (Tam kuru hal) [kg/m <sup>3</sup> , (gr/cm <sup>3</sup> )]		0.59135 (591.35)	0.62438 (624.38)	0.57429 (574.29)	0.58388 (583.88)	0.59348 (593.48)

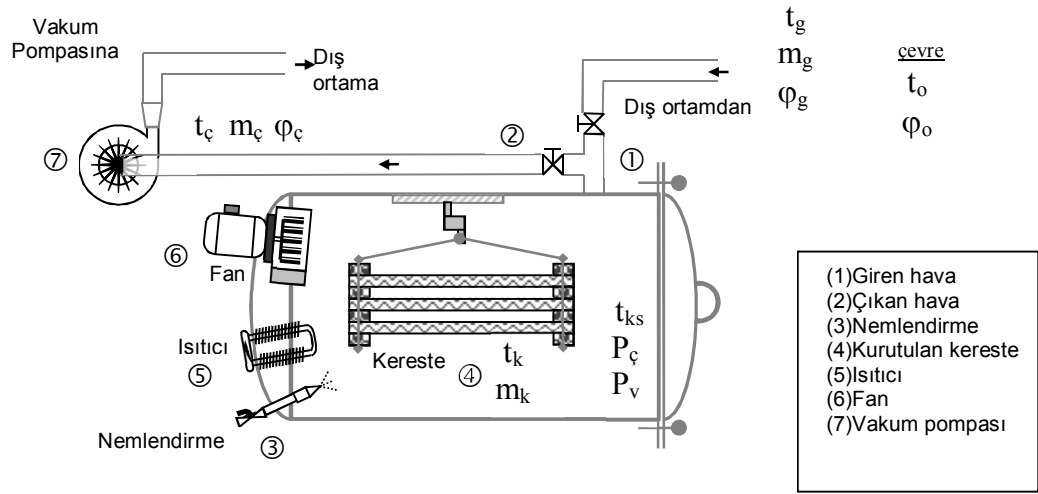
### 3.2.2. Termodinamik analiz

Kurutma işlemlerinde, ağaç malzemelerin en kısa sürede ve en az enerji ile kurutulması istenir. Kurutma sisteminin kütle ve enerji analizinde kullanılan semboller Şekil 3.14’te verilmiştir.

#### 3.2.2.1. Kütle analizi

Tam kuru haldeki kereste ağırlığı ile içerdiği su ağırlığının toplamı, kerestenin kütlesi olarak tanımlanır.

$$m_k = m_{kk} + m_{ks} \quad (3.1)$$



Şekil 3.14. Kurutma fırınının sistematik gösterimi

Kütle korunumu yasasında, bir kontrol hacminden kütle geçişi, aynı zaman aralığında kontrol hacmindeki toplam kütle değişimine eşit kabul edilir (Çengel ve Boles, 2008).

$$m_g - m_ç = \Delta m_{KH} \quad (3.2)$$

Kurutma fırınına giren ve çıkan nemli havanın kütleleri, tam kuru hava ağırlığı ve su buharı ağırlığının toplamıdır.

$$m_g = m_{gkh} + m_{gsb} \quad (3.3)$$

$$m_ç = m_{çkh} + m_{çsb} \quad (3.4)$$

Kurutma esnasında düzensiz buharlaşmadan oluşabilecek deformasyonları önlemek amacıyla nemlendirme yapılmaktadır. Aynı zamanda kurutma fırınına nemli hava ile birlikte su buharı da girer. Kurutma havası dışarı çıkarken, giren havada bulunan su buharı ile birlikte nemlendirme ünitesinden ve keresteden buharlaşan suyu da taşır. Çıkan su buharı kütlesi:

$$m_{çsb} = m_{gsb} + m_{ks} + m_n \quad (3.5)$$

olarak ifade edilir.

### 3.2.2.2. Enerji analizi

Genel olarak termodinamiğin 1. yasası olan enerjinin korunumu aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$E_{giren} - E_{çıkan} = \Delta E_{sistem} \quad (3.6)$$

Kurutmada kullandığımız sistemde kinetik ve potansiyel enerji değişimleri yoktur. Sadece giren ve çıkan havanın önemi vardır. Yapılan çalışmada giren iş tanımları elektrikle yapıldığından ısı enerjisi girişi yoktur. Ayrıca fanın ve vakum pompasının harcadığı enerji karşısında sistemde iş çıkışı da yoktur. Buna göre ifadeyi ayrıntılı yazacak olursak (Çengel ve Boles, 2008),

$$W_{giren} - Q_{çıkan} = [\sum m_g \cdot h_g - \sum m_c \cdot h_c] \quad (3.7)$$

şeklinde ifade edebiliriz. Kurutma havası nemli olduğundan giren ve çıkan havanın entalpileri şöyledir (Çengel ve Boles, 2008):

$$h_g = T_{g^*} \cdot (C_p)_h + \omega_{fg} \cdot h_{d(t_g)} \quad (3.8)$$

$$h_c = T_{c^*} \cdot (C_p)_h + \omega_{fc} \cdot h_{d(t_c)} \quad (3.9)$$

Kurutma işlemi yapılan sistemde, fan ve vakum pompasının yaptığı iş suyun buharlaşmasını hızlandırmak, ısıtıcıların yaptığı iş ise suyu buharlaştırmaktır.

**a) Isıtıcılar:** Kurutma fırını elektrikli rezistanslarla ısıtılmaktadır.  $\Delta t$  zaman aralığında yapılan elektrik iş;

$$W_{It} = V_I \cdot I_I \cdot \Delta t \quad (3.10)$$

Isıtıcıların verimleri, tükettikleri elektrik enerjisinin neredeyse tamamını ısıya dönüştürebildikleri için 1 olarak kabul edilir (Çengel ve Boles, 2008).

$$\eta_I = \frac{W_{It}}{W_{Ig}} \cong 1 \quad (3.11)$$

**b) Fan:** Kurutma fırını içerisinde hava sirkülasyonunu sağlamak için elektrik motorlu fan kullanılmıştır. Fanın yaptığı iş (Çengel ve Boles, 2008);

$$W_{Ft} = m_{fan} \cdot \left( \frac{V_{fan}^2}{2} \right) \quad (3.12)$$

şeklinde ifade edilir. Fan verimiyle motorun mekanik veriminin çarpımı, elektrik motorlu fanın verimini verir. Buna göre;

$$\eta_{Fm} = \eta_F \cdot \eta_m \quad (3.13)$$

**c) Vakum pompası:** Kompresör gibi çalışarak, kurutma fırını içindeki havanın dışarıya atılmasını sağlar. Kurutma havası istenilen sıcaklığa ulaştığında ve gerekli bekleme süresi tamamlandığında çalışmaya başlayarak fırın içerisindeki havayı dışarıya atar. İzentropik hal değişimine göre kompresörün yaptığı iş (Çengel ve Boles, 2008);

$$W_{VPt} = m_c \cdot \left[ \frac{k \cdot R_k \cdot T_{ks}}{k-1} \right] \cdot \left[ \left( \frac{P_o}{P_{fv}} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] \quad (3.14)$$

İzentropik hal değişiminde hava için  $k=1.4$  kabul edilir. Vakum pompası elektrik motoruyla çalıştığından vakum pompasının verimi,

$$\eta_{VPm} = \eta_{VP} \cdot \eta_m \quad (3.15)$$

Kurutma fırınına giren enerjiler;

$$W_{giren} = W_{Fg} + W_{Ig} + W_{VPg} \quad (3.16)$$

olarak formüle edilir.

Yapılan deneysel çalışma sisteminde ısı enerjisi çıkışı olmaktadır. Bunlar; fırının ısınması, kerestenin ısınması, nemlendiriciden ve keresteden suyun buharlaşması için gerekli ısı enerjilerinden ve toplam ısı kaybından oluşmaktadır. Buna göre,

$$Q_{çıkan} = Q_{F1} + Q_K + Q_N + Q_{IK} \quad (3.17)$$

Kurutma fırını ilk çalıştığında içindeki havanın ısıtılması için gerekli ısı enerjisi (Çengel ve Boles, 2008),

$$Q_{F1}=(V_f \cdot \rho_h) \cdot (C_p)_h \cdot (T_{ks}-T_o) \quad (3.18)$$

Kurutulan kerestenin ve keresteden ayrılan suyun ısıtılması için ısı enerjisi (Çengel ve Boles, 2008),

$$Q_K=(m_k \cdot (C_p)_k \cdot (T_{ks}-T_o)) + (m_{ks} \cdot h_{ds}) \quad (3.19)$$

Kurutma sırasında nemlendirme ünitesinden ayrılan suyun ısıtılması için gerekli ısı enerjisi (Çengel ve Boles, 2008),

$$Q_N=m_n \cdot h_{ds} \quad (3.20)$$

Fırından dış ortama olan ısı kaybı (Incropera and DeWitt, 2004).

$$Q_{IK}=(F \cdot K \cdot (T_{ks}-T_o)) \cdot \Delta T \quad (3.21)$$

şeklinde ifade edilir. Elde edilen enerjinin verilen enerjiye oranı, kurutma sisteminin verimini verir (Akpınar et al., 2006).

$$\eta = \left( \frac{Q_{çıkan} + (\sum m_c \cdot h_c)}{W_{giren} + (\sum m_g \cdot h_g)} \right) \quad (3.22)$$

### 3.2.3. Hata analizi

Kline ve McClintock tarafından geliştirilen belirsizlik analizi yöntemi, deneysel bulguların hata analizi için kullanılmaktadır. Bu yöntemde ölçülmesi gereken büyüklük  $R$ , ve bu büyüklüğe etki eden  $n$  adet bağımsız değişkenler  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ , ise;

$$R = R(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \quad (3.23)$$

olarak yazılır. Her bir bağımsız değişkene ait hata oranları  $w_1, w_2, w_3, \dots, w_n$ , ve  $R$  büyüklüğünün hata oranı  $W_R$  ise (Genceli,1998);

$$W_R = \left( \left( \frac{\partial R}{\partial x_1} \right) \cdot w_1 \right)^2 + \left( \left( \frac{\partial R}{\partial x_2} \right) \cdot w_2 \right)^2 + \dots + \left( \left( \frac{\partial R}{\partial x_n} \right) \cdot w_n \right)^2 \quad (3.24)$$

**a) Giren-çıkan havanın enerjisi için;**

Kurutma fırınına giren ve çıkan havanın enerjisi Denklem 3.8 ve 3.9 ile hesaplanır. Giren havanın hata analizi çıkan hava içinde geçerli olacağından sadece giren havanın enerji hesabı için kullanılan hata analizi denklemi verilmiştir. Ölçülen debi yardımı ile giren havanın kütlesi bulunmuştur. Buna göre giren hava;

$$Q_g = \sum m_g \cdot h_g = m_g \cdot (T_g \cdot (C_p)_h + \omega_{fg} \cdot h_{d(tg)}) \quad (3.25)$$

Giren havanın kütlesi ve sıcaklığı ölçülmüştür. Buna göre;

$$W_{Qg} = \left[ \left( \left( \frac{\partial Q_g}{\partial m_g} \right) \cdot w_{Mg} \right)^2 + \left( \left( \frac{\partial Q_g}{\partial T_g} \right) \cdot w_T \right)^2 \right]^{1/2} \quad (3.26)$$

Hata oranları;

$w_{Mg}$	Giren havanın ağırlığı (debi x yoğunluk x zaman)
$w_T$	Sıcaklık sensörü

**b) Giren işin enerjisi için;**

Kurutma işleminde giren iş, ısıtıcıların, fanın ve vakum pompasının kullandığı elektrik enerjisidir. Denklem 3.16 ile hesaplanır. Buna göre hata analizi;

$$W_{Wgiren} = \left[ \left( \left( \frac{\partial W_{giren}}{\partial W_{Fg}} \right) \cdot w_{es} \right)^2 + \left( \left( \frac{\partial W_{giren}}{\partial W_{Ig}} \right) \cdot w_{es} \right)^2 + \left( \left( \frac{\partial W_{giren}}{\partial W_{VPg}} \right) \cdot w_{es} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (3.27)$$

Hata oranları;

$w_{es}$	Elektrik güç metre (elektrik sayacı)
----------	--------------------------------------

**c) Çıkan ısı enerjisi - fırın içindeki havanın ısıtma enerjisi için;**

Kurutma fırını ilk çalıştırıldığında kurutma sıcaklığına kadar olan ısıtma enerjisi Denklem 3.18 ile hesaplanır. Buna göre hata analizi;

$$W_{QFI} = \left[ \left( \left( \frac{\partial Q_{FI}}{\partial \Delta T_{FI}} \right) \cdot w_T \right)^2 \right]^{1/2} \quad (3.28)$$

Hata oranları;

$w_T$  Sıcaklık sensörü

**d) Çıkan ısı enerjisi - kerestenin ve içeriğindeki suyun ısıtma enerjisi için;**

Nemli kerestelerin ısıtılmasına harcanan enerji Denklem 3.19 ile hesaplanır. Buna göre hata analizi;

$$W_{QK} = \left[ \left( \left( \frac{\partial Q_K}{\partial m_k} \right) \cdot w_{Mk} \right)^2 + \left( \left( \frac{\partial Q_K}{\partial m_{ks}} \right) \cdot w_{Mk} \right)^2 + \left( \left( \frac{\partial Q_K}{\partial T_{KI}} \right) \cdot w_T \right)^2 \right]^{1/2} \quad (3.29)$$

Hata oranları;

$w_{Mk}$  Ağırlık sensörü (kereste ağırlığının ölçülmesi)

$w_T$  Sıcaklık sensörü

**e) Çıkan ısı enerjisi - nemlendiricinin kullandığı enerjisi için;**

Nemlendirme ünitesinden buharlaşacak suyun ısıtılmasında harcanan enerji Denklem 3.20 ile hesaplanır. Buna göre hata analizi;

$$W_{QN} = \left[ \left( \left( \frac{\partial Q_N}{\partial m_n} \right) \cdot w_m \right)^2 \right]^{1/2} \quad (3.30)$$

Hata oranları;

$w_m$  Terazi (Su miktarı ölçme)

**f) Çıkan ısı enerjisi - ısı kaybı sebebiyle harcanan enerjisi için;**

Kurutma fırını yüzeyinden meydana gelen ısı kaybı nedeniyle harcanan enerji Denklem 3.21 ile hesaplanır. Buna göre hata analizi;

$$W_{Q_{IK}} = \left[ \left( \left( \frac{\partial Q_{IK}}{\partial \Delta T_{IK}} \right) \cdot w_T \right)^2 \right]^{1/2} \quad (3.31)$$

Hata oranları;

$w_T$  Sıcaklık sensörü

#### 4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Bu çalışmada; otomasyon sistemi ile desteklenmiş bir kurutma fırınının iyileştirilmesi yapılarak, kavak, çam ve meşe ağaçlarının kerestelerinin farklı çalışma şartlarında kurutma işlemleri yapılmıştır. Deneylerde kullanılan kurutma fırınının farklı çalışma şartlarında çalıştırılması sonucu elde edilen bulgular ve analizler bu bölümde sunulmuştur.

##### 4.1. Farklı Kurutma Sıcaklığında ve Basıncında Yapılan Deneyler

Kullanılan tüm ağaç malzemeler; 50°C sıcaklıkta 0.9 ile 0.75 bar ön vakumlama basıncı ve 60°C sıcaklıkta 0.9 bar ön vakumlama basıncında kurutmaya tabii tutulmuştur. Farklı kereste türleri için yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar Çizelge 4.1, Çizelge 4.2 ve Çizelge 4.3'te verilmiştir. Yapılan deneylerde tüm kereste türlerinde 60°C sıcaklıkta 0.9 bar ön vakumlama basıncı çalışma şartlarında minimum kurutma süresine ulaşılmıştır. Meşe keresteleri hariç 50°C sıcaklıkta 0.75 bar ön vakumlama basıncı ile yapılan deneylerde ise kurutma süreleri ağaç cinsleri için kendi içlerinde en uzun kurutma süresine sahiptir. Meşe kerestesinde 50°C sıcaklıkta 0.75 bar ön vakumlama basıncında ve 60°C sıcaklıkta 0.9 bar ön vakumlama basıncında yapılan deneylerin kurutma süreleri aynıdır. Bunun nedeni 60°C sıcaklıkta 0.9 bar ön vakumlama basıncında yapılan deneyde daha fazla suyun buharlaşmasıdır.

Çizelge 4.1. Kavak kerestesi ile farklı çalışma şartlarında yapılan deneylerde elde edilen sonuçlar

AÇIKLAMA	1. DENEY	2. DENEY	3. DENEY
Kurutma sıcaklığı [°C]	50	50	60
Ön vakumlama basıncı [bar]	0.9	0.75	0.9
Kurutulmuş kerestenin ağırlığı [kg]	6.4	6.34	6.27
Keresteden buharlaşan su [kg]	1.28	1.28	1.47
Kurutma süresi [dakika] [(saat: dakika)]	818 13:38	1000 16:40	741 12:21
Kurutma fırının dışardan aldığı hava miktarı [m <sup>3</sup> ]	24.12	17.67	18.9
Taze giren havanın ortalama sıcaklığı [°C]	21.45		
Nemlendirme ünitesinde buharlaşan su miktarı [kg]	1		

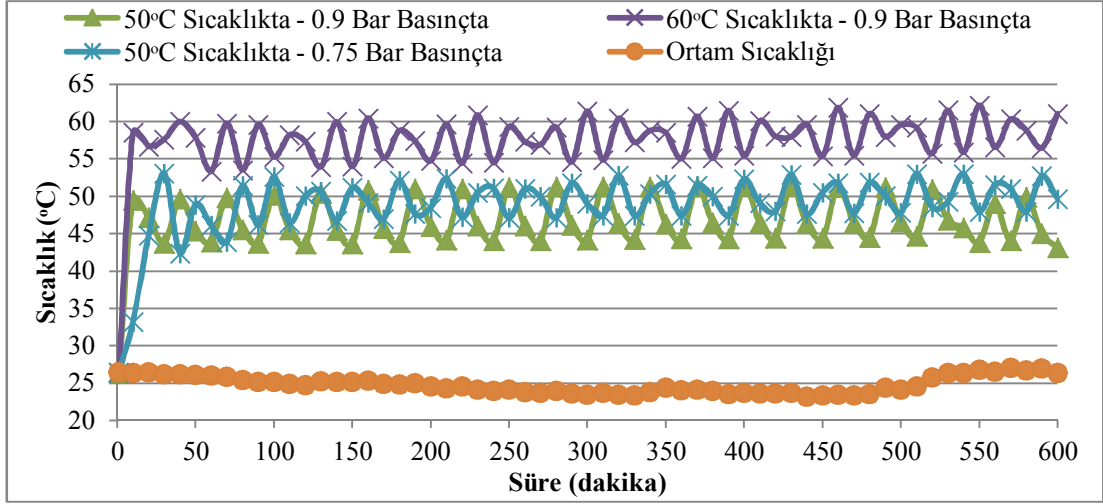
Çizelge 4.2. Çam kerestesi ile farklı çalışma şartlarında yapılan deneylerde elde edilen sonuçlar

AÇIKLAMA	1. DENEY	2. DENEY	3. DENEY
Kurutma sıcaklığı [°C]	50	50	60
Ön vakumlama basıncı [bar]	0.9	0.75	0.9
Kurutulmuş kerestenin ağırlığı [kg]	7.34	7.39	7.35
Keresteden buharlaşan su [kg]	1.4	1.3	1.5
Kurutma süresi [dakika]	993	944	808
[(saat: dakika)]	16:33	15:44	13:28
Kurutma fırının dışardan aldığı hava miktarı [m <sup>3</sup> ]	26.5	16.4	17.22
Taze giren havanın ortalama sıcaklığı [°C]	21.79		
Nemlendirme ünitesinde buharlaşan su miktarı [kg]	1		

Çizelge 4.3. Meşe kerestesi ile farklı çalışma şartlarında yapılan deneylerde elde edilen sonuçlar

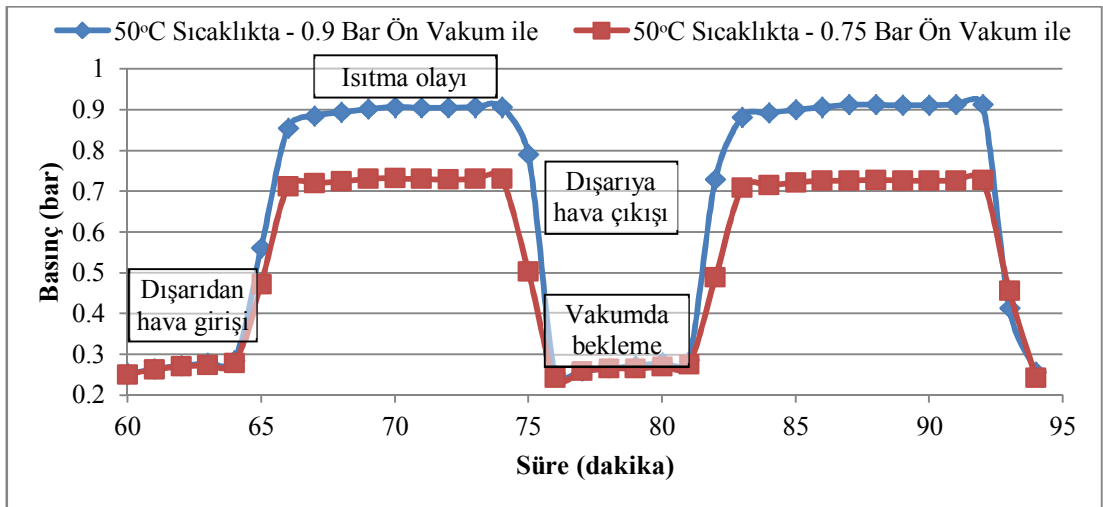
AÇIKLAMA	1. DENEY	2. DENEY	3. DENEY
Kurutma sıcaklığı [°C]	50	50	60
Ön vakumlama basıncı [bar]	0.9	0.75	0.9
Kurutulmuş kerestenin ağırlığı [kg]	11.01	10.9	11.1
Keresteden buharlaşan su [kg]	1.22	1.24	1.3
Kurutma süresi [dakika]	782	758	758
[(saat: dakika)]	13:02	12:38	12:38
Kurutma fırının dışardan aldığı hava miktarı [m <sup>3</sup> ]	19.84	15.88	12.58
Taze giren havanın ortalama sıcaklığı [°C]	20.28		
Nemlendirme ünitesinde buharlaşan su miktarı [kg]	1		

Şekil 4.1’de kavak keresteleri ile yapılan deneylerde zamana bağlı olarak sıcaklıkların değişimleri görülmektedir. 50°C ve 60°C sıcaklıkta, 0.9 bar ön vakumlama basıncında yapılan deneylerde kurutma fırını içindeki hava istenilen sıcaklığa yaklaşık 15 dakika içerisinde ulaşmıştır. Buna karşın 50°C sıcaklıkta 0.75 bar ön vakumlama basıncında yapılan deneyde kurutma fırını içindeki havanın istenilen sıcaklığa ulaşması kurutma fırını içerisindeki havanın düşük basınçlarda daha az olmasından dolayı yaklaşık 30 dakikaya kadar çıkmıştır.



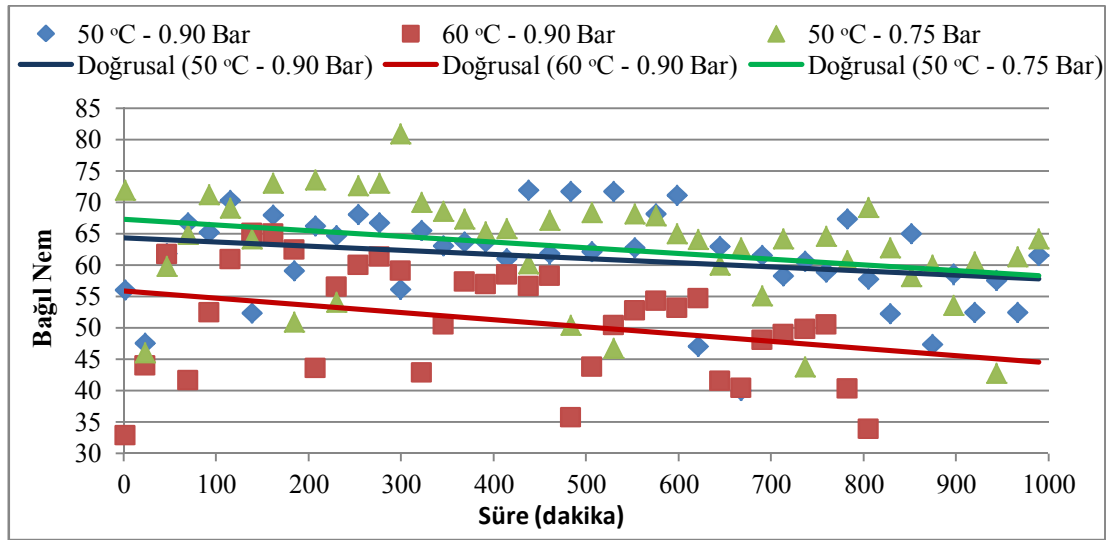
Şekil 4.1. Kavak keresteleri ile yapılan deneylerinin farklı çalışma sıcaklıklarının zamana göre değişimi

Şekil 4.2'de çam keresteleri ile yapılan deneylerde 50°C çalışma sıcaklığı için basıncın zamana göre değişiminin bir kısmı görülmektedir. Diğer ağaç keresteleri ile yapılan deneylerde de basıncın zamana göre değişimi aynı benzerliği göstermektedir. Tüm deneyler için vakumlama basıncı 0.25 bardır. 0.9 bar ön vakumlama basıncında hava miktarı; 0.75 bar ön vakumlama basıncında yapılan deneylere göre daha fazladır. Bu sebepten havanın ısıtılması 0.9 bar ön vakumlama basıncında yapılan deneylerde daha uzun sürmüştür.



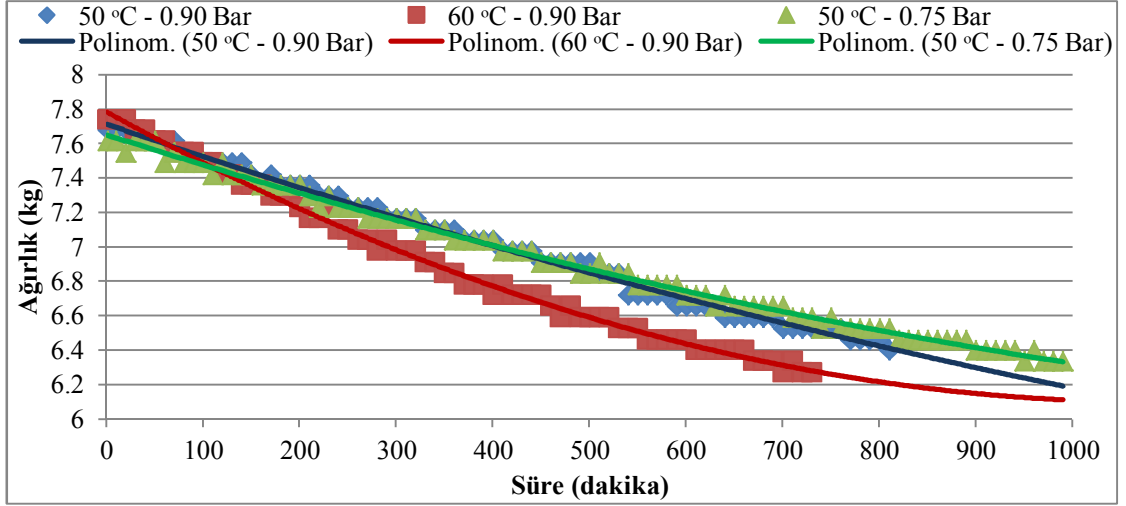
Şekil 4.2. 50°C sıcaklıkta yapılan deneyde basıncın zamana göre değişimi

Şekil 4.3'te çam keresteleri ile yapılan deneylerde, kurutma sistemi içindeki hava neminin kurutma süresi boyunca değişimi görülmektedir. Diğer ağaç türleri ile yapılan deneyler için de kurutma süresi boyunca hava neminin değişimi benzerlik göstermiştir. Şekil 4.3'ten görüldüğü gibi kurutma sistemi içindeki havanın nem değişimleri birbirine benzerlik göstermektedir. Ayrıca her deney için sistem içinde nemlendirme amaçlı bulunan sudan ortalama 1 kg buharlaştığı gözlenmiştir.



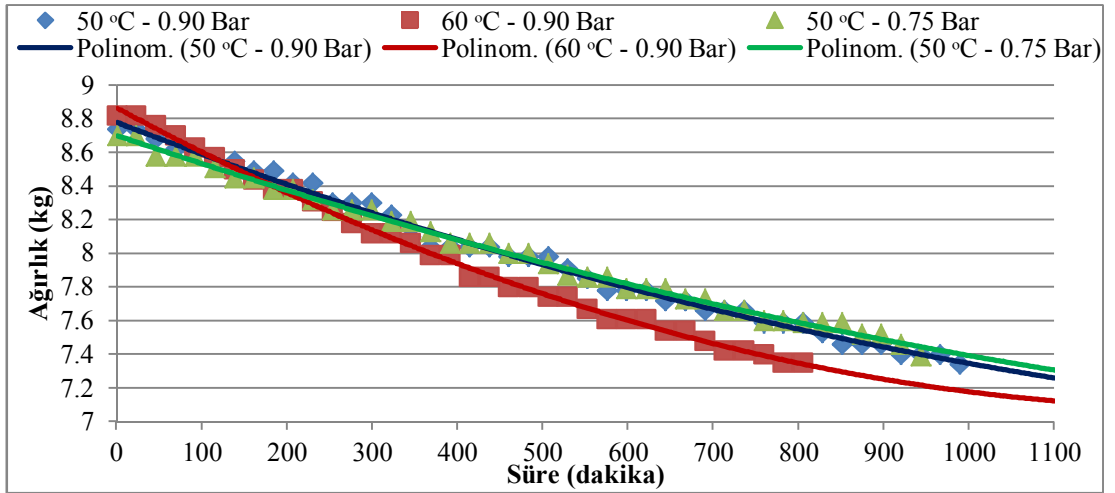
Şekil 4.3. Çam keresteleri için sıcaklığa ve basınca bağlı deneylerde fırın içi bağıl nem değerleri

Farklı sıcaklık ve basınçtaki kurutma deneylerinde kavak kerestelerinin ağırlıklarının zamana bağlı olarak değişimi Şekil 4.4'te verilmiştir. Kurutma işlemine tabi tutulan kavak keresteleri başlangıçta birbirine yakın ağırlıkta olduğundan kurutma işlemi sonunda da birbirlerine yakın ağırlıklara ulaşılmıştır. Verilen şekilde de görüldüğü üzere aynı sıcaklık ve farklı basınçlarda yapılan deneylerde zamana bağlı ağırlık azalması birbirine yakın olsa da düşük basınçta yapılan deneyde zamanla yavaşlama görülmektedir. 50°C sıcaklıkta ve 0.9 bar ön vakumlama basıncında yapılan deneyde ise ağırlıkta doğrusal olarak bir azalma görülmektedir. 60°C sıcaklıkta 0.9 bar ön vakumlama basıncında yapılan deneyde ise daha hızlı bir ağırlık düşüşü olmuştur.



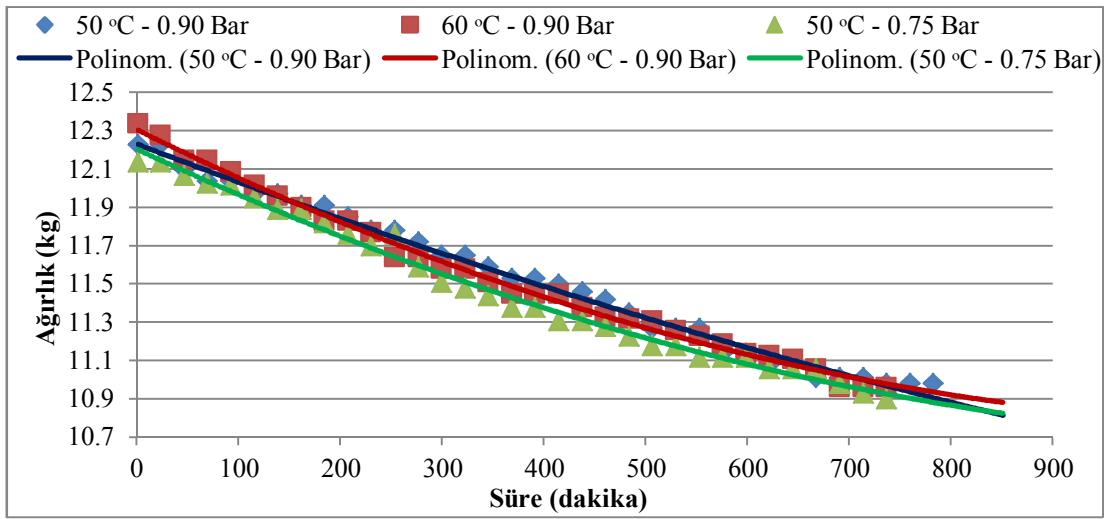
Şekil 4.4. Kavak kerestesinin farklı sıcaklık ve basınçlardaki ağırlık değişimi

Şekil 4.5'te farklı sıcaklık ve basınç altında çam kerestelerinin ağırlıklarının zamanla değişimi görülmektedir. Deneylerde kullanılan çam kerestelerinin kurutma işlemi başlangıcındaki ağırlıkları birbirine yakındır. Bundan dolayı kullanılan keresteler kurutma işlemi sonunda da birbirlerine yakın ağırlığa sahiptir. 50°C sıcaklıkta farklı basınçlarda yapılan deneylerde ağırlık düşüşü birbirine çok yakındır. Fakat yüksek sıcaklıkta yapılan deneyde suyun buharlaşması daha hızlı olduğundan ağırlık azalması, 50°C sıcaklıkta yapılan deneylere göre daha hızlı gerçekleşmiştir.



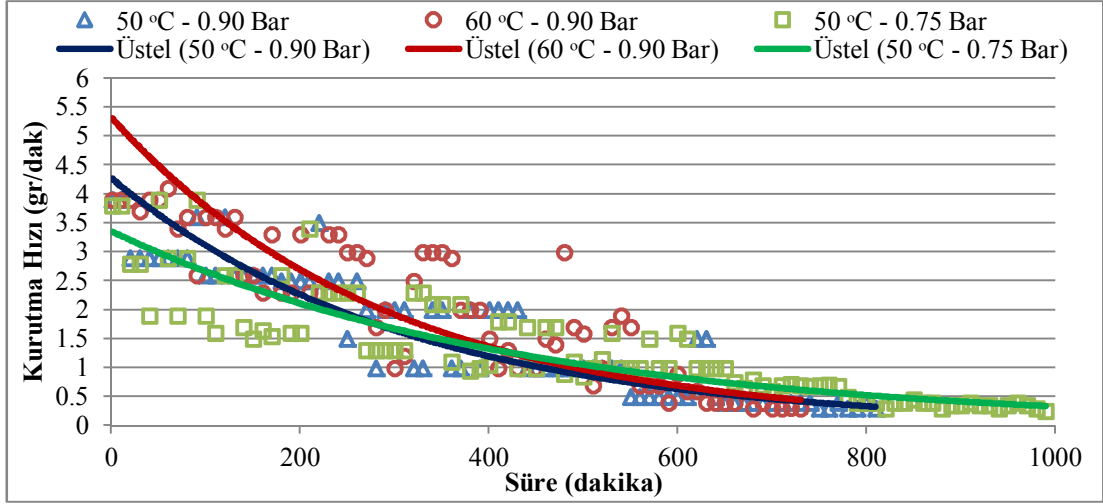
Şekil 4.5. Çam kerestesinin farklı sıcaklık ve basınçlardaki ağırlık değişimi

Şekil 4.6’da meşe kerestelerinin farklı sıcaklık ve basınç altında zamana bağlı olarak ağırlıklarındaki azalma görülmektedir. Kurutma başlangıcında ağırlıkları birbirine yakın olması ve kurutma işlemi sonunda aynı oranda su buharlaşması nedeniyle birbirlerine yakın ağırlıktadırlar. Şekilden de görüldüğü gibi farklı sıcaklık ve basınçlarda yapılan tüm deneylerde keresteler içindeki suyun buharlaşması ile ağırlıklarının azalması birbirine çok yakın seyretmiştir. Bunun nedeni ağaç türleri arasında sert olarak adlandırılan meşe ağacının gözeneklerinin ufak olması sonucu içindeki suyun buharlaşmasının zorlaşmasıdır.



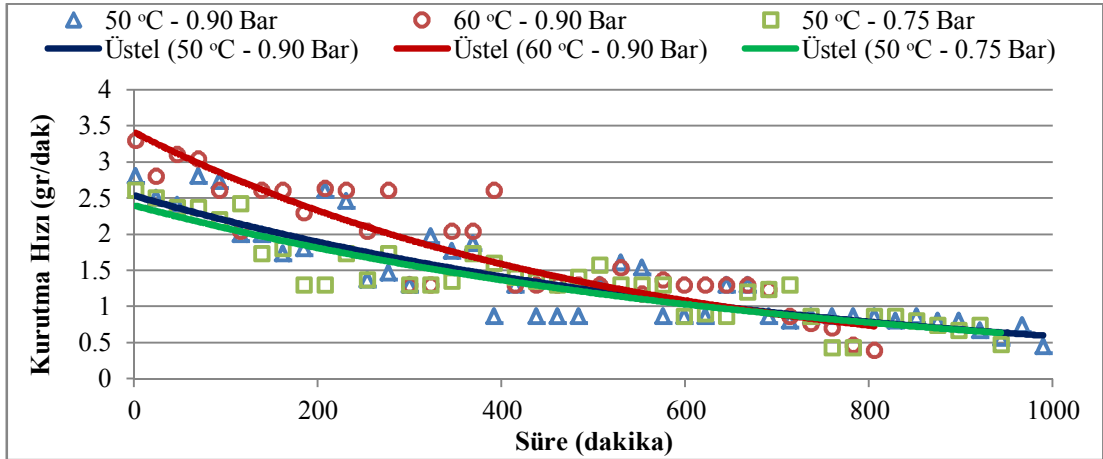
Şekil 4.6. Meşe kerestesinin farklı sıcaklık ve basınçlardaki ağırlık değişimi

Kavak kerestesinin farklı sıcaklık ve basınçlardaki kurutma hızının zamanla değişimi Şekil 4.7’de görülmektedir. 60°C sıcaklıkta yapılan deneyde kuruma hızının daha yüksek olmasından dolayı kuruma süresi daha azdır. Kurutma hızı en az olan 50°C sıcaklıkta 0.75 bar ön vakumlama basıncında yapılan deneydir. Bunun nedeni kurutma fırını içerisindeki kurutma havasının az olmasından dolayı fırın içi sıcaklığının istenilen sıcaklığa diğer deneylere göre daha uzun sürede ulaşmıştır ve kuruma süresi daha uzun olmuştur.



Şekil 4.7. Kavak kerestesinin farklı sıcaklık ve basınçlardaki kurutma hızının zamanla değişimi

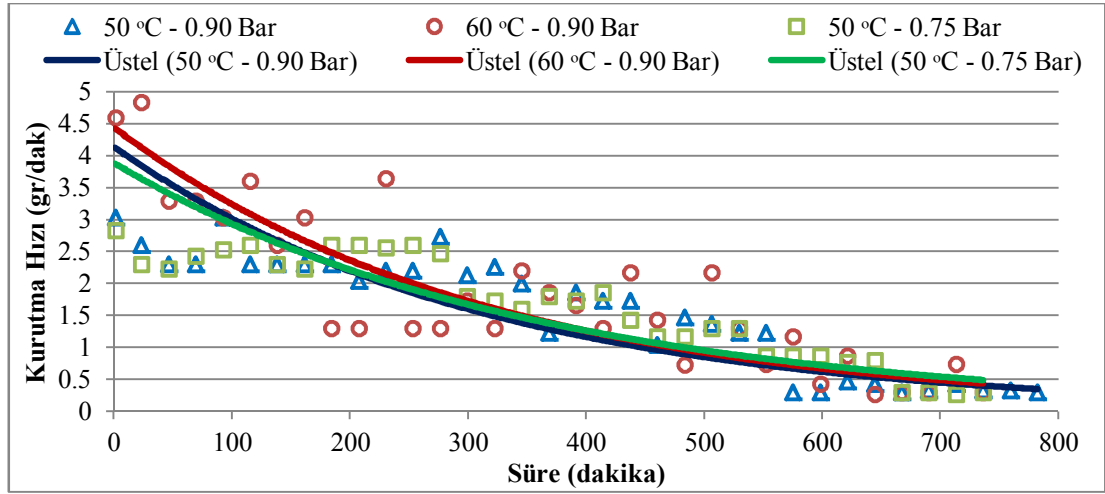
Şekil 4.8’de çam kerestesinin farklı sıcaklık ve basınçlardaki kurutma hızının zamanla değişimi görülmektedir. 60°C sıcaklıkta 0.9 bar ön vakumlama basıncında yapılan deneyde kurutma hızı yüksek olmasına bağlı olarak kurutma süresi ise kısadır. 50°C sıcaklıkta 0.75 bar ve 0.9 bar ön vakumlama basıncında yapılan deneyler ise birbirine yakın kuruma hızı ve zaman değişimi göstermiştir.



Şekil 4.8. Çam kerestesinin farklı sıcaklık ve basınçlardaki kurutma hızının zamanla değişimi

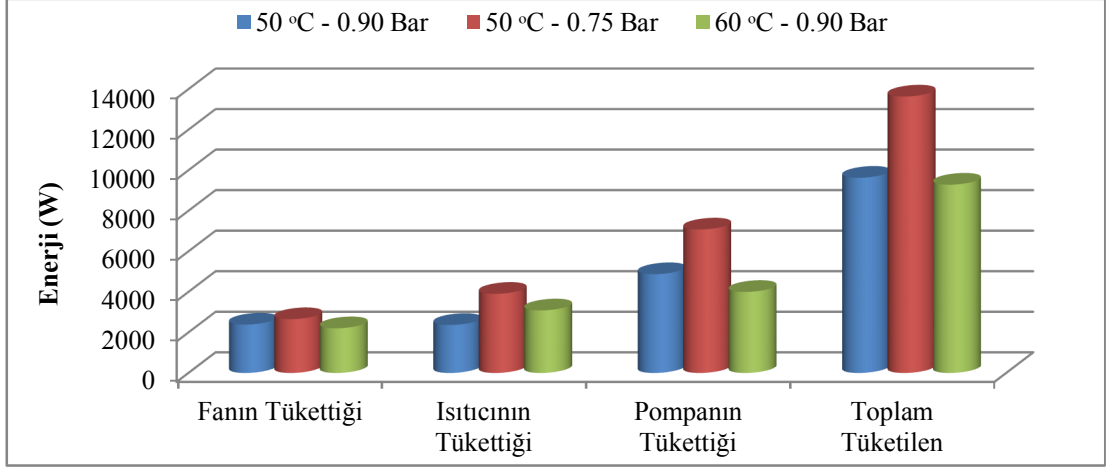
Meşe kerestesinin farklı sıcaklık ve basınçlardaki kurutma hızının zamanla değişimi Şekil 4.9’da görülmektedir. Meşe keresteleri ile yapılan tüm deneyler birbirine yakın

kurutma hızı ve zaman değişimi göstermiştir. Bunun nedeni meşe ağacının gözeneklerinin dar olması sonucu içindeki suyun buharlaşmasının zorlaşmasıdır.



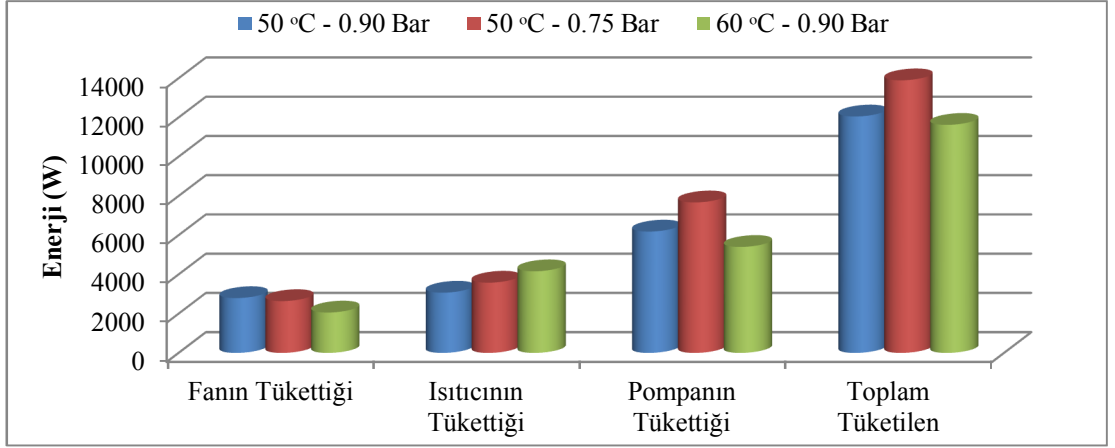
Şekil 4.9. Meşe kerestesinin farklı sıcaklık ve basınçlardaki kurutma hızının zamanla değişimi

Deneysel kurutma sisteminde fan, ısıtıcılar ve vakum pompasında enerji tüketilmektedir. Kavak kerestelerinin kurutulması esnasındaki enerji tüketimleri Şekil 4.10'de verilmiştir. Fanın tükettiği enerjinin, tüm çalışma şartlarında yapılan deneylerde birbirine yakın olduğu görülmüştür. Isıtıcıların tükettiği enerji 50°C sıcaklıkta 0.9 bar ön vakumlama basıncında en düşükken, 50°C sıcaklıkta 0.75 bar ön vakumlama basıncında daha yüksektir. Bunun nedeni, 50°C sıcaklıkta 0.75 bar ön vakumlama basıncında yapılan deneyin daha uzun sürmesi sonucu ısıtıcıların daha fazla devrede kalmasıdır. Vakum pompasının ise 50°C sıcaklıkta 0.75 bar ön vakumlama basıncında daha sık çalışmasından ve deney süresinin daha uzun olmasından dolayı en çok enerji bu çalışma şartında harcamıştır. Toplam tüketilen enerjide 50°C sıcaklıkta 0.75 bar ön vakumlama basıncında yapılan kurutmada en çok enerji tüketilirken, diğer çalışma şartlarında yapılan kurutmalarda birbirine yakın enerji tüketilmiştir.



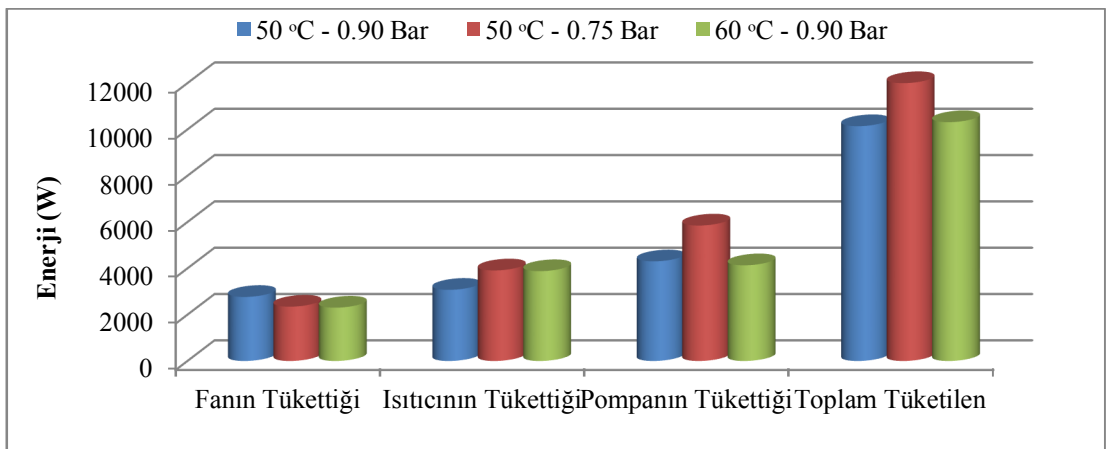
Şekil 4.10. Kavak kerestesi ile yapılan kurutma deneylerinde tüketilen enerjiler

Şekil 4.11’de çam kerestesi ile yapılan kurutma deneylerindeki enerji tüketimleri görülmektedir. 50°C sıcaklıkta 0.9 bar ön vakumlama basıncında ve 50°C sıcaklıkta 0.75 bar ön vakumlama basıncında yapılan deneylerde fanın tükettiği enerji birbirine yakinken, 60°C sıcaklıkta 0.9 bar ön vakumlama basıncında fanın daha az çalışmasından dolayı daha az enerji harcamıştır. Isıtıcıların tükettiği enerji 50°C sıcaklıkta 0.9 bar ön vakumlama basıncında en düşükken, 60°C sıcaklıkta 0.9 bar ön vakumlama basıncında daha yüksektir. Bunun nedeni 60°C sıcaklıkta 0.9 bar ön vakumlama basıncında fırın içindeki havayı istenilen sıcaklığa çıkarana kadar ısıtıcıların çalışmasıdır. Vakum pompası en az enerjiyi ise 60°C sıcaklıkta 0.9 bar ön vakumlama basıncında tüketmiştir. Vakum pompası en çok enerjiyi 50°C sıcaklıkta 0.75 bar ön vakumlama basıncında tükettiği görülmüştür. Bunun nedeni, vakum pompasının daha fazla devreye girmesidir. Toplam enerji tüketiminde 50°C sıcaklık 0.75 bar ön vakumlama basıncı ile yapılan kurutmada en fazla enerjiyi tüketilirken, diğer çalışma şartlarında yapılan kurutmalarda birbirine yakın enerji tüketilmiştir.



Şekil 4.11. Çam kerestesi ile yapılan kurutma deneylerinde tüketilen enerjiler

Meşe keresteleri ile yapılan kurutma deneylerindeki enerji tüketimleri Şekil 4.12’da görülmektedir. Tüm çalışma şartlarında fanın tükettiği enerji miktarların hemen hemen birbirine yakın olduğu görülmektedir. Aynı şekilde ısıtıcılarda da farklı çalışma şartlarında birbirine yakın enerji tüketilmiştir. Vakum pompası ise 60°C sıcaklıkta 0.9 bar ön vakumlama basıncında ve 50°C sıcaklıkta 0.9 bar ön vakumlama basıncında birbirine yakın enerji tüketirken, 50°C sıcaklıkta 0.75 bar ön vakumlama basıncında daha sık devreye girmesinden dolayı en çok enerjiyi tüketmiştir. Bundan dolayı yapılan kurutma deneylerinde toplam enerji tüketimini vakum pompası belirlemiştir. Toplam tüketilen enerjide 50°C sıcaklıkta 0.75 bar ön vakumlama basıncında yapılan kurutma deneyinde en çok enerjiyi tüketilirken, diğer çalışma şartlarında yapılan kurutma deneylerinde birbirine yakın enerji tüketilmiştir.

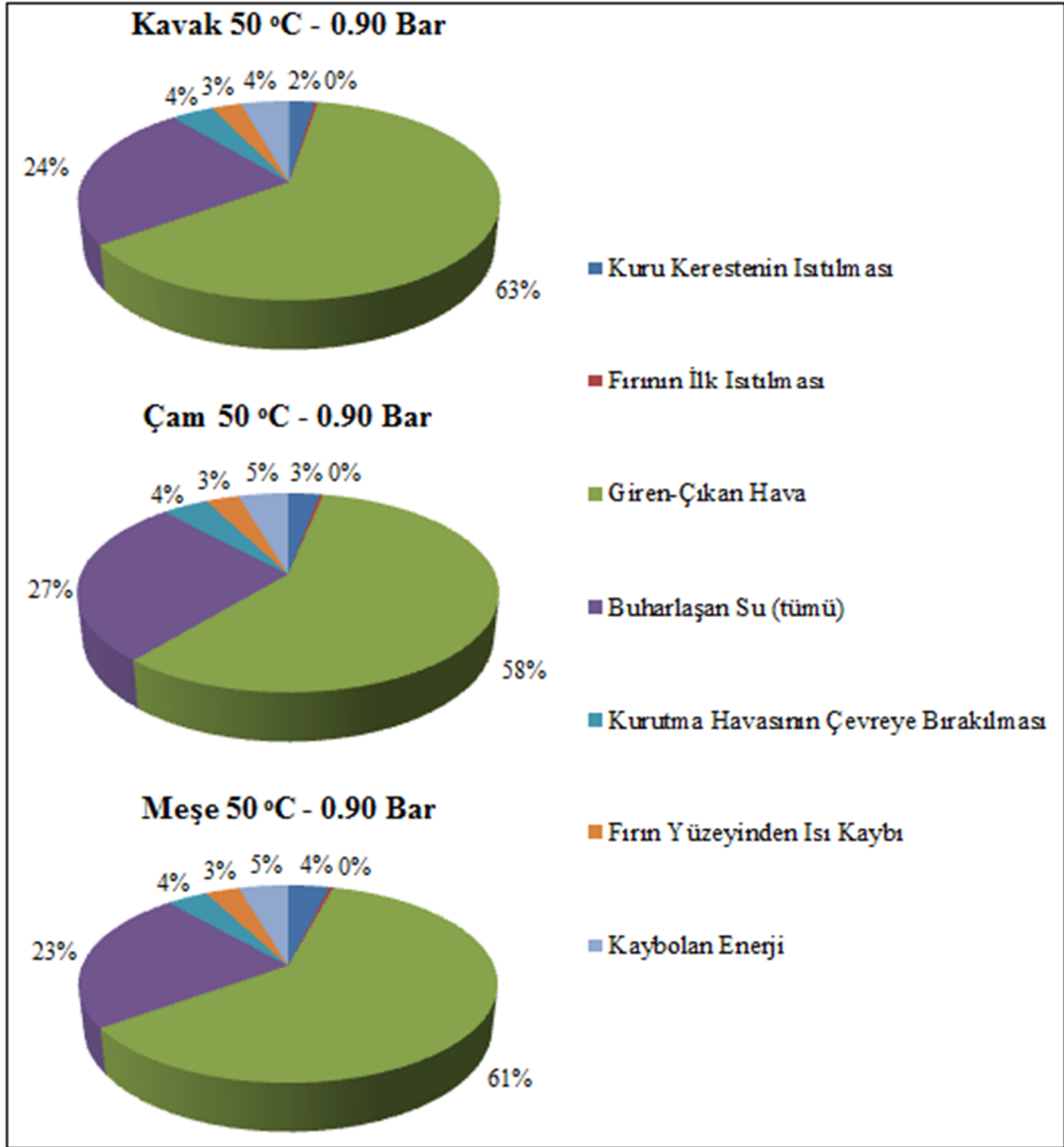


Şekil 4.12. Meşe kerestesi ile yapılan kurutma deneylerinde tüketilen enerjiler

## 4.2. Deney Sisteminin Enerji Analizi

Yapılan deneyler üniversitemizin Makine Eğitimi Bölümü'nün atölyesinde gerçekleştirilmiştir. Keresteler istenilen ağırlık düşümü sağlanana kadar kurutma fırını sürekli olarak çalıştırılmıştır. Kurutma fırını içindeki basıncın korunabilmesi için hava giriş-çıkışı tek noktadan sağlanmıştır.

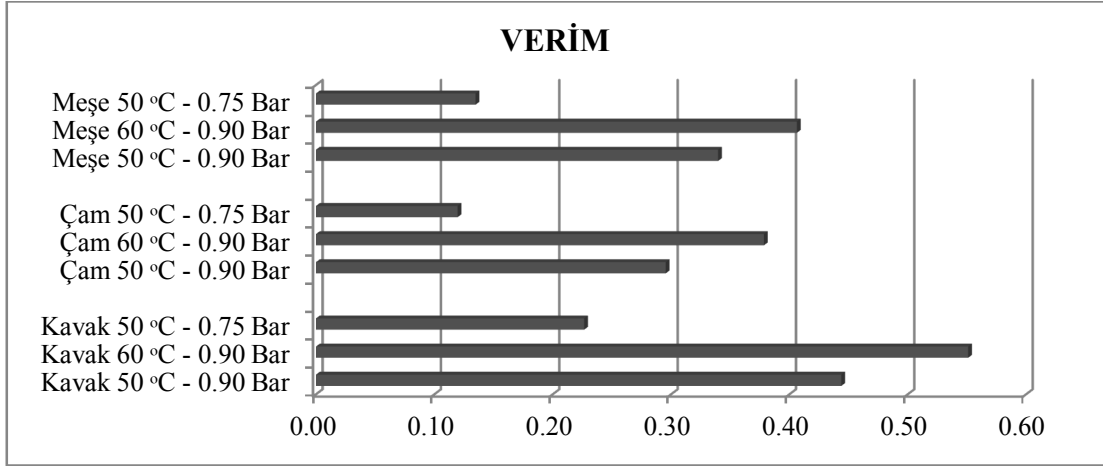
Termodinamiğin I. Yasa eşitlikleri kullanılarak deneylerde kullanılan kurutma sisteminin enerji analizi yapılmıştır. Şekil 4.13'da kavak, çam ve meşe keresteleri için 50°C sıcaklıkta 0.9 bar ön vakumlama basıncına ait enerji dağılımları görülmektedir. Buharlaşan suyun çektiği enerji ve kurutma havasının değişimi nedeniyle çektiği enerji, harcanan ısı enerjisinin büyük bir kısmını oluşturmaktadır. Çam kerestesi ile yapılan deneyde buharlaşan suyun çektiği enerjinin kavak ve meşe keresteleri ile yapılan deneylere göre daha fazla olmasının nedeni, çam kerestesinden buharlaşan su miktarının daha yüksek olmasıdır. İzolasyonun daha da iyileştirilmesi ile ısı kayıplarının oluşturduğu enerji azaltılabilir.



Şekil 4.13. 50°C sıcaklıkta 0.9 bar ön vakumlama basıncında yapılan kavak, çam ve meşe kurutma deneylerine ait enerji analizi

Şekil 4.14’de kurutma fırınının genel verimi verilmiştir. Farklı ağaç türlerine göre, farklı çalışma şartlarında yapılan deneylerde verim değerleri meşe ve çam keresteleri ile yapılan deneylerde fazla değişim göstermemiş, kavak kerestesi ile yapılan deneylerde ise en yüksek verim değerleri alınmıştır. Kavak kerestesi ile yapılan deneylerde verim değerlerinin, aynı çalışma şartlarında çam ve meşe keresteleri ile yapılan deneylerden daha yüksek olmasının nedeni kavağın geniş gözenekli yapıya sahip olması ve daha kısa bir sürede içerisindeki suyun buharlaşmasıdır. Kavak

kerestesi ile yapılan deneylerde sistemden ortalama % 41 verim sağlanırken, çam kerestesi ile yapılan deneylerde sistemden ortalama % 26, meşe kerestesi ile yapılan deneylerde ise ortalama % 29 verim sağlanmıştır. Deneylerde kullanılan tüm ağaç türleri için kurutma sisteminin ortalama verimi % 32 civarındadır.



Şekil 4.14. Kurutma fırınının enerji verimi

### 4.3. Belirsizlik Analizi

Belirsizlik analizi verilen bilgilerin doğruluk sınırlarını belirler. Kurutucuda kullanılan ölçüm cihazlarının hata oranları Çizelge 4.4’de verilmiştir.

Çizelge 4.4. Deneyler esnasında kullanılan cihazların hata oranları

Cihazlar	Birim	Hata
Debimetre	m/s	± 0.05
Terazi	kg	± 0.2
Ağırlık Sensörü	kg	± 0.2
Elektrik güç metre	kJ	± 12.0
Sıcaklık sensörü	°C	± 1.0
Basınç	bar	± 0.25

50°C sıcaklıkta 0.9 bar ön vakumlama basıncında farklı ağaç türleri ile yapılan deneylerdeki hata analizi sonuçları Çizelge 4.5’de verilmiştir.

Çizelge 4.5. Farklı ağaç türleri ile yapılan deneylerdeki hata analizi sonuçları

Ağaç Türleri	Hesabı yapılan parametreler	Hata miktarı
		[%]
Kavak 50 °C - 0.9 Bar	Giren havanın enerjisi	2.95
	Çıkan havanın enerjisi	0.84
	Giren işin enerjisi	2.70
	Fırın içindeki havanın ısıtılması	5.78
	Kerestenin ısıtılması	1.30
	Nemlendiricinin harcadığı enerji	3.13
	Isı kaybı	1.80
Çam 50 °C - 0.9 Bar	Giren havanın enerjisi	2.77
	Çıkan havanın enerjisi	0.92
	Giren işin enerjisi	2.41
	Fırın içindeki havanın ısıtılması	5.83
	Kerestenin ısıtılması	1.22
	Nemlendiricinin harcadığı enerji	3.13
	Isı kaybı	1.95
Meşe 50 °C - 0.9 Bar	Giren havanın enerjisi	3.32
	Çıkan havanın enerjisi	1.07
	Giren işin enerjisi	2.94
	Fırın içindeki havanın ısıtılması	5.62
	Kerestenin ısıtılması	0.96
	Nemlendiricinin harcadığı enerji	3.13
	Isı kaybı	2.22

## 5. SONUÇ

Endüstride işlenmiş veya işlenmemiş hammaddeler türlerine göre çok sayıda ısıtma ve kurutma işleminden geçerek kullanılabilir hale gelmektedir. Ağaç kurutma işlemi, günümüz teknolojik seviyesinde yapılarak iş, zaman ve paradan tasarruf sağlanmalıdır.

Ağaç malzemelerde suyun buharlaştırılabilmesi için öncelikle yüzeydeki suyun ayrılması sonrada kalan suyun kılcal kanalcıklardan geçerek yüzeye ulaşması gerekmektedir. Bu durumu etkileyen en önemli etkenler; maddenin gözenek dağılımı ve özellikleri, tanecik, tanecik boyutu ve malzemenin içinde meydana gelen basınçtır. Bu çalışmada farklı gözenek yapılarına ve farklı kullanım alanlarına sahip kavak, çam ve meşe keresteleri vakumlu kurutma yöntemi ile kurutulmuştur.

Farklı çalışma şartları altında yapılan deneylerde; sıcaklık, basınç ve nem değerleri kullanılan kurutma fırınındaki PLC otomasyon sistemi ile takip edilmiştir. Ayrıca kurutma süresi boyunca, kurutma fırınının otomatik kontrolü de PLC otomasyon sistemi ile sağlanmıştır.

60°C sıcaklıkta 0.9 bar ön vakumlama basıncında yapılan deneylerde; meşe ve kavak kerestelerinde çatlamların meydana geldiği, çam kerestesinde ise çatlamların yanı sıra çıra özünün çıktığı gözlemlenmiştir. 50°C sıcaklıkta 0.75 bar ön vakumlama basıncında yapılan deneylerde ise fırın içindeki kurutma havası çabuk ısınmaktadır. Fakat ön vakumlama basıncının düşük olmasından dolayı kurutma fırını içindeki kurutma havası azdır. Bu nedenle kerestelerin ısıtılmasında ve kurutma işleminde istenmeyen durumlar ortaya çıkmıştır.

Farklı türdeki keresteler ile yapılan deneylerde en fazla enerjiyi, ısıtıcıların ve vakum pompasının tükettiği görülmüştür. En az enerjiyi ise fanlar tüketmiştir.

Kurutulan tüm ağaç türleri için en yüksek verim değeri 60°C sıcaklıkta 0.9 bar ön vakumlama basıncında yapılan deneylerde, en düşük verim değeri ise 50°C sıcaklıkta

0.75 bar ön vakumlama basıncında yapılan deneylerde elde edilmiştir. 50°C sıcaklıkta 0.75 bar ön vakumlama basıncında yapılan deneylerde verimin düşük olmasının nedeni, kurutma sürelerinin uzun ve tüketilen enerjinin fazla olmasıdır.

Kavak, çam ve meşe kerestelerinin vakumlu kurutma deneylerinde en iyi verim kavak ağacı kerestesi ile yapılan deneylerde elde edilmiştir. Fakat reçine bulunmayan ve dar gözenekli bir yapıya sahip, değerli ve kıymetli bir ağaç olarak bilinen meşe ağacı için PLC otomatik kontrollü vakumlu kurutma fırını daha idealdir. Bu ağaç türünün klasik kurutma fırınları ile % 6-8 rutubet değerlerine ulaşması çok uzun sürmektedir. Fakat PLC otomatik kontrollü vakumlu kurutma fırını ile daha kısa zamanda ve daha az enerji ile istenilen rutubet değerlerine ulaşılmaktadır.

Bu çalışma, kısa sürede ve daha az enerji harcanarak yüksek verime sahip kurutma sistemlerinin tasarlanmasına yardımcı olacak ve ülke sanayisine önemli katkı sağlayacaktır.

## 6. KAYNAKLAR

- Aker, Ö., 2006. Bilgisayar Kontrollü Güneş Enerjili Ahşap Kurutma Fırının Otomasyon Sistemi Tasarımı ve Simülasyonu, Muğla Ün., Fen Bilimleri Enst., Yüksek Lisans Tezi, 101s., Muğla.
- Akkemik, Ü., 2009. Yıllık Halkalar: Ormancılık Bilimlerinden Arkeolojiye Uygulama Alanları, <http://web.ogm.gov.tr/Haber%20Resimleri/Konferanslar/unalakkemiksunum.pdf> Erişim Tarihi: 12.05.2010.
- Akpınar, E.K., Midilli, A., Bicer, Y., 2006. The first and second law analyses of thermodynamic of pumpkin drying process, Journal of Food Engineering, v.72, pp.320-331.
- Awadalla, H.S.F., El-Dip, A.F., Mohamad, M.A., Reuss, M., Hussein, H.M.S., 2004. mathematical modelling and experimental verification of wood drying process, energy conversion and management, v.45, pp.197-207.
- Aytekin, A., 1997. Kereste Kurutma Fırınları için Kurutma Programlarının Bilgisayarla Hazırlanması, Karadeniz Teknik Ün., Fen Bilimleri Enst., Yüksek Lisans Tezi, 92s., Trabzon.
- Berberovic, A., 2007. Numerical Simulation of Wood Drying, Oregon State University.,M.S. Thesis, pp.143, Corvallis, OR, USA.
- Bozkurt, A.Y., Erdin, N., 1987. Ağaç Teknolojisi, İstanbul Üniversitesi Orman Fakültesi Yayınları, Yayın No: 445, 100s., İstanbul.
- Burdurlu, E., 1988. Ağaç Malzemenin Kondenzasyon ve Mikrodalga Teknikleri ile Kurutulması Üzerine Araştırmalar. Hacettepe Ü., Fen Bilimleri E., Yüksek Mühendislik Tezi, 142s., Ankara.
- Ceylan, İ., 2007. Programlanabilir (PLC) Isı Pompalı Kurutucunun Tasarımı, İmalatı ve Kereste Kurutma İşleminde Deneysel İncelenmesi, Gazi Ün., Fen Bilimleri Enst., Doktora Tezi, 123s., Ankara.
- Ceylan, İ., Aktaş, M., Doğan, H., 2007. Energy and exergy analysis of timber dryer assisted heat pump, Applied Thermal Engineering, v.27, pp.216-222.
- Çengel, Y.A., Boles, M.A., 2008. Mühendislik Yaklaşımıyla Termodinamik, Çeviri Editörü Ali Pınarbaşı, İzmir Güven Kitabevi, 5. baskı, 946s., İzmir.

- Dikmen, E., 2010. Farklı Sıcaklıklarda ve Basınçlarda Çalışan Bir Kurutucu Tasarımı ve Değişken Kurutma Parametrelerinin Araştırılması, Süleyman Demirel Üniv., Fen Bilimleri Enst., Doktora Tezi, 83s., Isparta
- Dinçer, İ., Şahin A., 2004. A new model for thermodynamic analysis of a drying process, International Journal of Heat and Mass Transfer, v.47, pp.645-652.
- Eğitimcilerin Paylaşım Mekanı, 2006. İnternet sitesi <http://www.teknikogretmen.org/forum/index.php?topic=359.0> Erişim tarihi: 06.05.2010
- Erden, O., 1997. Jeotermal Enerji ile Kereste Kurutma, Gazi Üniv., Fen Bilimleri Enst., Yüksek Lisans Tezi, 131s., Ankara
- Garrahan, P., Kidlark, J., 2001. Northern Hardwood Initiative: Industry Resource Manual, Section 5: Drying Hardwoods, Forintek Canada Corp., pp. 114, Canada
- Genceli, O.F., 1998. Ölçme Tekniği, Birsen Yayınevi, 387s., İstanbul
- Gorgoda, 2010. İnternet sitesi <http://www.gorgoda.com/oz-isinlari.html> Erişim Tarihi: 08.11.2010
- Gündüz, M., 1994. Ağaç ve Kağıt Kurutmasında Isı ve Kütle Transferinin İncelenmesi, Uludağ Üniv., Fen Bilimleri Enst., Yüksek Lisans Tezi, 94s., Bursa.
- Günerbakan, H., 2005. Endüstriyel kurutma sistemleri, Türk Tesisat Mühendisleri Derneği Dergisi , TTMD, Sayı: 13, s.1-13, Ankara.
- Güngör, A., Özbalta, N., 1997. Endüstriyel kurutma sistemleri, III Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi ve Sergisi, TMMOB Makine Mühendisleri Odası, s.735-748, İzmir.
- Incropera, F.P., DeWitt, D.P., 2004. Isı ve Kütle Geçişinin Temelleri, Çeviri Editörü Taner Derbentli, Literatür Yayıncılık, 3. baskı, s.960, İstanbul.
- Kurutulan, S., 2008. Plc ile Endüstriyel Otomasyon, 5. Basm, Birsen Yayınevi, ISBN: 975-511-200-6, 446s., İstanbul
- Menon, A.S. Mujumdar, A.S., 1987. Drying of solids: principles, classification and selection of dryers, A Handbook of Industrial Drying, A.S. Mujumdar (Ed.), Marcel Dekker Inc., pp. 3-46, New York.

- Milli Eğitim B., 2006. Meslekî Eğitim ve Öğretim Sisteminin Güçlendirilmesi Projesi. [http://megep.meb.gov.tr/mte\\_program\\_modul/modul\\_pdf/543M00036.pdf](http://megep.meb.gov.tr/mte_program_modul/modul_pdf/543M00036.pdf).  
Erişim Tarihi: 05.01.2010
- Molnar, K., 1995. Experimental techniques in drying, A Handbook of Industrial Drying, A.S. Mujumdar (Ed.), Marcel Dekker Inc., pp. 41-70, New York.
- Örs, Y., 1986. Kurutma ve Buharlama Tekniği, Karadeniz Teknik Üniversitesi Basımevi, 174s., Trabzon
- Örs, Y., Keskin, H., 2001. Ağaç Malzemesi, Atlas Yayın Dağıtım, Yayın No: 2, 180s., İstanbul.
- Serbes, T., 2003. İki Farklı Teknik Kurutma Yöntemi ile Kurutulmuş Ağaç Malzemelerin Bazı Fiziksel ve Mekaniksel Özelliklerin Karşılaştırılması, Gazi Üniv., Fen Bilimleri Enst., Yüksek Lisans Tezi, 45s., Ankara.
- Simpson, W.T., (editor), 1991. Dry Kiln Operator's Manual, Agric Handbook No. 188, U.S. Dept. Of Agriculture. pp. 274, Washington.
- Strumilla, C., Jones, P., Zylla, R., 1995. Energy aspects in drying, Handbook of Industrial Drying, Vol. 2, A. S. Mujumdar (Ed.), Marcel Dekker, pp. 1241-1276, New York.
- TSE 2456, 1976. Kereste Kurutma Kuralları (Kurutma Odalarında), Türk Standartları Enstitüsü Yayını, Ankara.
- TSE 4087, 1983. Kereste Partisinin Ortalama Rutubet Miktarının Tayini, Türk Standartları Enstitüsü Yayını, Ankara.
- Walas, S. W., 1990. Chemical Process Equipment Selection and Design, Butterworth-Heinemann Inc., ISBN 0-7506-9385-1, pp 747, United States of America.
- Yan, G. C. K., Silva, C. W. D., Wang, X. G., 2001. Experimental modeling and intelligent control of a wood-drying kiln, International Journal of Adaptive Control and Signal Processing, v.15, pp.787-814.
- Yılmaz, S., Ceylan, İ., 2002. Çapraz akımlı sulu yıkayıcıda kurutma havası neminin alınması, Teknoloji, Sayı 1-2, s.29-33
- Yılmaz, S., Doğan, H., 2001. Güneş enerjili nem kontrollü kereste kurutma sistem tasarımı, Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu ve Sergisi, TMMOB Makine Mühendisleri Odası, s.29-34, Kayseri.

Yılmaz, S., Yavuz, C., 2006. Isı pompası destekli kurutma fırınlarında kurutma parametrelerinin kontrolü için alternatif bir yöntem, Zonguldak Karaelmas Ünv. Teknoloji Dergisi, Cilt 9, Sayı 4, s.237-244, Zonguldak.

Yüzgeç, U., 2005. Kurutma Sürecinin Modellenmesi ve Akıllı Öngörülü Denetimi, Kocaeli Ünv., Fen Bilimleri Enst., Doktora Tezi, 195s., Kocaeli.

Zırzakıran, M., 1990. Kondenzasyonlu Kereste Kurutma, Gazi Ünv., Fen Bilimleri Enst., Yüksek Lisans Tezi, 75s., Ankara.

## ÖZGEÇMİŞ



**Adı Soyadı :** Serkan GÖK

**Doğum Yeri ve Yılı:** Adapazarı - 1983

**Medeni Hali :** Bekar

**Yabancı Dili :** İngilizce

**Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl) :**

**Lise :** Sakarya Birinci Endüstri Meslek Lisesi. Elektrik Böl. – 1997–2000

**Ön lisans :** Sakarya Üniv. Sakarya M.Y.O. Elektrik – 2001–2003

**Lisans :** Süleyman Demirel Üniv. Teknik Eğitim Fak. Tesisat Öğr. – 2004–2008

**Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl:**

– Süleyman Demirel Üniversitesi Uluborlu M.Y.O. – 2009

– Isparta / Halk Eğitim Merkezi – 2009–2010

**Yayınları (SCI ve diğer makaleler)**

1- ŞENCAN, A., GÖK, S., DİKMEN, E., 2009. Prediction of Liquid and Vapor Enthalpies of Ammonia-Water Mixture, Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects (In Press).