T.C.
DÜZCE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK FREKANS-VAKUM YÖNTEMİ İLE KAYIN KERESTESİNİN KURUTULMASI

OSMAN HALİT ÜLKER

YÜKSEK LİSANS TEZİ
AĞAÇ İŞLERİ ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMAN
DR. ÖĞR. ÜYESİ HASAN HÜSEYİN CİRİTCİOĞLU

DÜZCE, 2019

T.C.
DÜZCE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK FREKANS-VAKUM YÖNTEMİ İLE KAYIN KERESTESİNİN KURUTULMASI

Osman Halit ÜLKER tarafından hazırlanan tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından Düzce Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Ağaç İşleri Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Dr. Öğr. Üyesi Hasan Hüseyin CİRİTCİOĞLU
Düzce Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Dr. Öğr. Üyesi Hasan Hüseyin CİRİTCİOĞLU
Düzce Üniversitesi _____

Prof. Dr. Öner ÜNSAL
İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa _____

Doç. Dr. Ali Etem GÜREL
Düzce Üniversitesi _____

Tez Savunma Tarihi: 19/08/2019

BEYAN

Bu tez çalışmasının kendi çalışmam olduğunu, tezin planlanmasından yazımına kadar bütün aşamalarda etik dışı davranışımın olmadığını, bu tezdeki bütün bilgileri akademik ve etik kurallar içinde elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara kaynak gösterdiğimi ve bu kaynakları da kaynaklar listesine aldığımı, yine bu tezin çalışılması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını beyan ederim.

19 Ağustos 2019

Osman Halit ÜLKER

TEŞEKKÜR

Yüksek Lisans öğrenimimde ve bu tezin hazırlanmasında gösterdiği her türlü destek ve yardımdan dolayı çok değerli hocam Dr. Öğr. Üyesi Hasan Hüseyin CİRİTCİOĞLU'na en içten dileklerimle teşekkür ederim.

Tez çalışmam boyunca değerli katkılarını esirgemeyen Recep SİVRİKAYA'ya, Ömer BERBER'e ve Baki ERTUĞRUL'a da şükranlarımı sunarım.

Bu çalışma boyunca yardımlarını ve desteklerini esirgemeyen sevgili aileme ve çalışma arkadaşlarıma sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Bu tez çalışması, Düzce Üniversitesi BAP-2018.07.01.719 numaralı Bilimsel Araştırma Projesiyle desteklenmiştir.

19 Ağustos 2019 **Osman Halit ÜLKER**

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ŞEKİL LİSTESİ vi
ÇİZELGE LİSTESİ vii
KISALTMALAR viii
SİMGELER ix
ÖZET x
ABSTRACT xi
1. GİRİŞ 1
2. AĞAÇ KURUTMA SÜRECİ 18
2.1. AĞAÇ MALZEMENİN KURUTULMASI 18
2.2. KURUTMA SIRASINDA ODUN SU İLİŞKİLERİ 19
2.2.1. Odun İçerisinde Suyun Kapiler Hareketi 19
2.2.2. Difüzyon 19
2.3. KURUMA İŞLEMİNİ ETKİLEYEN FAKTÖRLER 20
2.3.1. Malzeme İle İlgili Faktörler 20
2.3.1.1. *Ağacın Yapısı 20*
2.3.1.2. *Yoğunluk 22*
2.3.1.3. *Ahşapta Su Alışverişi 23*
2.3.1.4. *Şekil Değiştirme 23*
2.3.1.5. *Parça Biçimi ve Kalınlığı 23*
2.3.2. Kurutma Yöntemi İle İlgili Faktörler 23
2.3.3. Hava İle İlgili Faktörler 24
2.3.3.1. *Havanın Sıcaklığı 25*
2.3.3.2. *Havanın Hareketi 25*
2.3.3.3. *Havanın Nemi 25*
2.4. KURUTMA KUSURLARI 25
2.5. AHŞABIN DİELEKTRİK ÖZELLİKLERİ 26
2.5.1. Odunun Dielektrik Özelliklerini Etkileyen Faktörler 28
2.5.1.1. *Nemli Odunun Dielektrik Özellikleri 29*
2.5.1.2. *Fırın Kurusu Odunun Dielektrik Özellikleri 29*
2.5.1.3. *Odunun Dielektrik Özelliklerinin Temel Özellikleri 29*
2.5.1.4. *Odunun Dielektrik Özellikleri Üzerine Frekansın Etkisi 30*
2.5.1.5. *Odunun Dielektrik Özellikleri Üzerine Sıcaklığın Etkisi 30*
2.5.1.6. *Odunun Dielektrik Özellikleri Üzerine Elektrik Alan Şiddetinin Etkisi 31*
2.5.1.7. *Odunun Heterojen Yapısının Dielektrik Özellikler Üzerine Etkisi 31*
2.5.1.8. *Odunun Dielektrik Özellikleri Üzerine Rutubet Miktarının Etkisi 31*
2.5.1.9. *Odunun Dielektrik Özellikleri Üzerine Yoğunluğun ve Ağaç Türünün Etkisi 32*
3. AĞAÇ KURUTMA YÖNTEMLERİ 33
3.1. DOĞAL KURUTMA 33

3.2. TEKNİK KURUTMA 34
3.2.1. Güneş Enerjili Kurutma 35
3.2.2. Klasik Kurutma 35
3.2.3. Kondenzasyonlu Kurutma 36
3.2.4. Yüksek Sıcaklıklarda Kurutma 36
3.2.5. Vakumlu Kurutma 36
3.2.6. Buharlı Kurutma 36
3.2.7. Yağ İçinde Kaynatma ile Kurutma 37
3.2.8. Kimyasal Kurutma 37
3.2.9. Solvent Kurutma 37
3.2.10. Presle Kurutma 38
3.2.11. Mikrodalga Kurutma 38
3.2.12. Kızılötesi (İnfrared) Işınlarla Kurutma 38
3.2.13. Yüksek Frekansla Kurutma 39
3.3. YÜKSEK FREKANS-VAKUM KURUTMA YÖNTEMİ 39
3.3.1. YF-V Kurutma Yönteminin Avantaj ve Dezavantajları 40

4. MATERYAL METOT 42

4.1. MATERYAL 42
4.1.1. Doğu Kayını (*Fagus orientalis Lipsky*) Odunu 42
4.1.1.1. *Makroskopik Özellikleri 42*
4.1.1.2. *Mikroskopik Özellikleri 43*
4.1.1.3. *Fiziksel ve Mekaniksel Özellikleri 43*
4.1.1.4. *İşlenme ve Kurutma Özellikleri 43*
4.1.1.5. *Dayanıklılık ve Emprenye Edilebilme Özelliği 43*
4.1.1.6. *Kullanış Yerleri 44*
4.1.2. YF-V kurutma fırını 44
4.1.3. Yüksek Frekans Jeneratörü 45
4.2. METOT 45

5. BULGULAR VE TARTIŞMA 53

5.1. YÜKSEK FREKANS VAKUM UYGULANMA PARAMETRELERİ 53
5.2. KURUTMANIN DEĞERLENDİRİLMESİNE İLİŞKİN BULGULAR 60

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 65

7. KAYNAKLAR 70

ÖZGEÇMİŞ 77

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1. Ağacın iç yapısı. 22
Şekil 2.2. Doğal kurutma örneği. 24
Şekil 2.3. Teknik kurutma fırını örneği. 24
Şekil 2.4. YF Isıtma sistemi şematik gösterimi. 26
Şekil 2.5. Harici bir elektrik alanı yokken ve uygulandıktan sonra odun hücre kesitinde oluşan polarizasyon. 27
Şekil 2.6. Odunun lif yönleri.. 31
Şekil 3.1. Ağaç malzeme doğal kurutma yöntemleri 34
Şekil 3.2. Isı transfer şekline göre kereste kurutma metotları 35
Şekil 4.1. YF-V kurutma sistemi. 44
Şekil 4.2. Deneylerin gerçekleştirildiği YF-V fırını ve kontrol ünitesi. 45
Şekil 4.3. Yüksek frekans üreteci 45
Şekil 4.4. Deney örneklerinin hazırlanması ve aşamaları 46
Şekil 4.5. Hassas terazi 46
Şekil 4.6. Etüv fırını 47
Şekil 4.7. Ağaç numunelerin YF-V fırını içerisine yerleştirilmesi 48
Şekil 4.8. EDG (1992)'ye göre sonuç rutubeti ve çatal örnek ile ilgili standart. 49
Şekil 4.9. Kurutma sonrası kereste gerilimini (sertleşmesini) belirlemek için çatal örnek hazırlanması aşamaları. 49
Şekil 4.10. Kurutma sonrası kerestede yüzey sertleşmesi olup olmadığını belirlemek için kullanılan Trada şablonu. 50
Şekil 4.11. Dilimleme (Slicing) testi numune hazırlanma aşamaları. 52
Şekil 5.1. Kurutma sırasında uygulanan güç periyotları. 54
Şekil 5.2. Kurutma sırasında Kayın kerestede oluşan sıcaklık değişimi. 55
Şekil 5.3. Kurutma sırasında uygulanan vakum basıncı aralıkları. 56
Şekil 5.4. YF-V fırınına yüklenen Kayın keresteler. 56
Şekil 5.5. Kayın kerestelerden alınan su miktarları. 57
Şekil 5.6. Kereste kurutma sonucu elde edilen su örnekleri. 58
Şekil 5.7. Kayın kerestelerde zamana bağlı olarak ortalama rutubet değişimi. 59
Şekil 5.8. Tahribatsız rutubet ölçer. 60
Şekil 5.9. Trada şablonunda ölçüm yapılması. 62
Şekil 5.10. YF-V yöntemi ile kereste kurutmada tespit edilen yüzey ve uç çatlakları. .. 62
Şekil 5.11. YF-V yöntemi ile kereste kurutmada tespit edilen oluklaşma örneği. 63
Şekil 5.12. Dilimleme (Slicing) testi uygulama aşaması 64

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa No

Çizelge 4.1. Doğu Kayını odununun fiziksel ve mekanik özellikleri. 43
Çizelge 4.2. EDG (1992)'ye göre kurutma kalitesinin değerlendirilmesinde yararlanılan toleranslar. 51
Çizelge 4.3. Dilimleme testinin değerlendirilmesinde yararlanılan toleranslar. 52

KISALTMALAR

DN	Düşük nem
EDG	European drying group
IR	Infrared
KK	Konvensiyel kurutma
LDN	Lif doygunluğu noktası
LVL	Lamine kaplama kereste
MB	Metil bromide
MD	Mikro dalga
MDF	Orta yoğunluklu lif levha
RF	Radyo frekans
RFI	Radyo frekans ısıtma
RF/V	Radyo frekans/Vakum
SAE	Sonlu elamanlar analizi
TS EN	Türk standartları enstitüsü
YF	Yüksek frekans
YFI	Yüksek frekans ısıtma
YF-V	Yüksek frekans-vakum
YS	Yüksek sıcaklık

SİMGELER

cm	Santimetre
D	Yoğunluk
dk	Dakika
E	Elektriksel alan
f	Frekans
G_A	Başlangıç ağırlığı
G_{ist}	Kontrol anındaki ağırlık
g	Gram
Hg	Cıva
Hz	Hertz
km	Malzemenin dielektrik sabiti
kPa	Kilopascal
kV	Kilovolt
kW	Kilowatt
L	Liflere paralel
m	Metre
m_0	Yaş ağırlık
m_1	Tam Kuru ağırlık
m^3	Metre küp
mbar	Milibar
MHz	MegaHertz
mm	Milimetre
psi	Basınç birimi
R	Radyal
T	Teğet
U_a	Başlangıç rutubeti
U_{ist}	Kontrol anındaki rutubet
Qm	Elektriksel yük yoğunluğu
µm	Micron
°C	Santigrat derece
%	Yüzde
<	Küçüktür
$ß_r$	Radyal daralma yüzdesi
B_t	Teğet daralma yüzdesi
σ_E	Eğilme direnci
$\sigma_Ç$	Çekme direnci
σ_B	Basınç direnci
ω	Ağacın rutubeti
ε'	Dielektrik sabiti
ε''	Dielektrik kayıp
δ	Tanjant

ÖZET

YÜKSEK FREKANS-VAKUM YÖNTEMİ İLE KAYIN KERESTESİNİN KURUTULMASI

Osman Halit ÜLKER
Düzce Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü, Ağaç İşleri Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı
Yüksek Lisans Tezi
Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Hasan Hüseyin CİRİTCİOĞLU
Ağustos 2019, 76 sayfa

Doğal ve yenilenebilir bir kaynak olan ağaç malzemeler ormandan kesildiklerinde yoğun miktarda su ihtiva ederler. Ağaç malzeme bünyesindeki bu su, kullanım amacı için uygun değildir ve malzemeden uzaklaştırılması (kurutulması) gerekir. Çoğu kurutma yönteminde kurutma kalitesini artırmak için yeni kesilmiş ağaç malzemelere bazı ön işlemler (ön kurutma, buharlama vb.) uygulanmaktadır. Bu çalışmanın amacı ise ön işleme tabi tutulmaksızın yüksek frekans vakum (YF-V) yöntemi ile kurutma sürecinin uygulanabilirliğinin incelenmesidir. Çünkü kurutma öncesi uygulanan ön işlemler işletmelere zaman ve ekonomik kayıplar doğurmaktadır. Çalışmada endüstride yaygın kullanım alanına sahip, yerli türlerimizden Doğu Kayını (*Fagus orientalis Lipsky*) odunu kullanılmıştır. Kurutma işlemi Düzce ilinde faaliyet gösteren Sivrikaya Orman Ürünleri Ltd. Şti. tesislerinde gerçekleştirilmiştir. Çalışmada 10 kV anma geriliminde, 50 kW gücünde, 6,75 MHz frekans üretecine sahip, 8 m³'lük yüksek frekans vakum kurutma fırını kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan deney örnekleri 4 x 16 x 90 cm ve 6 x 16 x 90 cm ebadında hazırlanmış ve bu örneklerin başlangıç rutubetleri ortalama %80 olarak belirlenmiştir. Kurutma süreci boyunca belirli aralıklarla fırında uygulanan enerji ve vakum büyüklükleri, kereste sıcaklıkları, kaybedilen su miktarı ve kerestelerin kütleleri ölçülmüştür. Kurutma işlemi sonunda deney örneklerinin kurutma kalitesi ve ortaya çıkan kurutma kusurları EDG (1992) standardına göre değerlendirilmiştir. Deney örnekleri %80 başlangıç rutubetinden %10 sonuç rutubetine 9 günde düşürülmüştür. Standarda göre yapılan kurutma kalitesi incelemelerinde deney örneklerinde çok küçük yüzey çatlakları, yalnızca bir örnekte öz çatlağı ve oluklaşma kusuru tespit edilmiştir. Ayrıca yapılan çatal örnek testlerinde kurutma sonrası numunelerde herhangi bir yüzey sertleşmesi (iç gerilme) olmadığı tespit edilmiştir. Ön işlem uygulanmaksızın gerçekleştirilen kurutma sonucu kurutulan örneklerin kurutma kalite sınıfının EDG (1992)'ye göre mükemmel (exclusive) olduğu belirlenmiştir. Sonuç olarak Kayın odunun YF-V yöntemi ile ön kurutma işlemi uygulanmaksızın kaliteli bir şekilde kurutulabildiği görülmüştür. YF-V yönteminin, diğer ağaç türleri içinde ön işlemsiz kaliteli kurutma yapılması için kullanılabileceği düşünülmektedir.

Anahtar sözcükler: Doğu Kayını, Ön işlem, Yüksek Frekans-Vakum Kurutma

ABSTRACT

DRYING OF BEECH WOOD LUMBER WITH USING HIGH FREQUENCY-VACUUM METHOD

Osman Halit ÜLKER
Düzce University
Graduate School of Natural and Applied Sciences, Department of Woodworking Industrial Engineering
Master's Thesis
Supervisor: Assist. Prof. Dr. Hasan Hüseyin CİRİTCİOĞLU
August 2019, 76 pages

Wood materials, which are natural and renewable resources, contain a large amount of water when cut from the forest. This water in the wood material is unsuitable for its applications and must be removed (dried). In most drying methods, some pre-treatments (pre-drying, steaming, etc.) are applied to freshly cut wood materials to improve the drying quality. The aim of this study was to examine the efficiency of High Frequency-Vacuum (HF-V) for drying of wood without any pretreatments. Because the pre-treatments applied before drying cause time and economic losses to the enterprises. In this study, one of our domestic species, Eastern Beech (*Fagus orientalis Lipsky*) wood which is widely preferred in industry, was used. Drying process were performed in Sivrikaya Forest Products Company's facilities. A high frequency vacuum drying kiln with capacity of 8 m³ at maximum power of 50 kW, electrode voltage of 10 kV was used at frequency 6.75 MHz. The test specimens used in the study were prepared with dimensions of 4 x 16 x 90 cm and 6 x 16 x 90 cm and the average initial moisture content of samples were determined as 80%. During the drying process, the energy consumption and vacuum amount, wood temperature, the wood weight and water loss amounts were measured periodically. At the end of the drying process, the drying quality of the test specimens and the drying defects were evaluated according to the EDG (1992) standard. The wood moisture content was reduced from 80% to final moisture of 10% within 9 days. Very small surface checks occurred in the test samples and the pith checking and cupping was only observed for one sample. In addition, prong test showed no casehardening (residual stress) in the dried samples after drying. The drying quality of the dried samples without any pretreatments was in the class of "exclusive" according to EDG (1992). As a result, it can be concluded that beech wood can be dried without any pretreatments by HF-V drying method with satisfied quality. It is believed that the HF-V method can be also used for high quality drying of other wood species without any pretreatments.

Keywords: Eastern Beech, High Frequency-Vacuum Drying, Pre-Treatment

1. GİRİŞ

Doğal ve yenilenebilir bir kaynak olan ağaç, yıllardır hem sanayide hammadde olarak hem de yakıt olarak çok farklı kullanım alanlarına sahiptir. Ahşap, lignin matrisine gömülmüş selüloz liflerinden (germe yüklerine karşı dirençli) oluşan, basınç dayanımı yüksek, organik bileşenlere sahip doğal bir kompozit malzemedir. Odun, ağaçların ve diğer odunsu bitkilerin saplarında ikincil ksilem olarak üretilir. Odun boruları olarak da bilinen ksilemler; su ve besin maddelerinin yapraklara ve diğer dokulara transferine aracılık etmekle birlikte canlı bir ağaçta odunsu bitkilerin büyümesine veya yer çekimine karşı ayakta durmasını sağlayacak destek görevi görmektedir [1].

Gözenekli bir biyomateryal olan ağaç, kılcal borulardan oluşmaktadır. Bu gözenekli yapı, katı (ahşap), sıvı (su) ve gazdan (hava) oluşan bir sistemdir. Ağaç malzeme içerisinde su, bağlı veya serbest su olmak üzere iki şekilde bulunmakla beraber çevresel koşullara bağlı olarak (iklim koşulları) katı veya sıvı halde de görülebilir [2].

Canlı ağaç, suyu doğal olarak emen ve sürekli yenilenmek için güneş enerjisi kullanan higroskopik bir malzeme olup, ağacın büyüyüp gelişebilmesi için tüm canlı organizmalarda olduğu gibi hücreleri arasında su taşınımı temel bir gereksinimdir. Canlı ya da yeni kesilmiş ağaçlardaki rutubet miktarı, ağacın türüne bağlı olarak %45 ila %200 arasında değişebilmektedir [3].

Canlıyken büyük miktarda su içeren ağaç, kurudukça bünyesinde bulunan bu suyun çoğunu kaybetmektedir. Kurumaya başladıktan sonra odunda kalan nem, çevresindeki havanın bağıl nemi ile dengelenmeye çalışmaktadır. İşlenmiş haldeki ağaçta, kullanımda nem içeriği değişikliği problemi yaşanmaması için ahşabın doğru yöntemlerle kurutulması, taşınması ve depolanması kuruduktan sonra oluşabilecek problemlerin azaltılabilmesinde büyük önem taşımaktadır. Eğer ağaç malzemenin rutubet miktarı bulunduğu çevre koşullarına göre uygun sınırlarda kontrol edilebilirse, boyutsal farklılık kaynaklı sorunlardan çoğunlukla kaçınılması mümkündür [4].

Ağaç malzemelerin ürün olarak kullanılabilir olmasını sağlamak üzere gerçekleştirilen üretim süreçleri içerisinde, en çok enerji harcayan aşamalardan biri de ağaç malzemenin kurutulması işlemidir. Ağaç malzemenin içerisinde yer alıp istenmeyen ve ürüne dönüştürme süreci ve sonrasında çeşitli problemlerin ortaya çıkmasına neden olan

mevcut suyun ağaç malzemeden uzaklaştırılmasına kurutma denir [5]. Kurutma, kereste üretim sürecinin en yoğun enerji gerektiren ve zaman alan bileşeni olup ağaç özelliklerini geliştirmek için gerekli bir adımdır [6].

Ağaç malzemenin kurutulmasının bilinen çok sayıda avantajı bulunmaktadır. Kurutulan ağaç malzeme, daha hafif, boyutsal kararlılığı daha yüksek, mantar ve böcek gibi zararlılara karşı daha dayanıklı hale gelmektedir. Bu avantajların yanı sıra kurutulan ağaç malzemenin mekanik özelliklerinde iyileşmeler olmakta, yapıştırma ve üst yüzey işlemlerinin (boyama, vernikleme vb.) kalitesinde de kayda değer iyileştirmeler sağlanmaktadır [5], [7].

Ağaç malzemenin kurutulmasında ideal sonuçların elde edilmesi için kurutulacak ağaç malzemenin kalitesinin korunması amacıyla kurutma sonucu ortaya çıkabilecek kusurların (çatlama, renk değişikliği, şekil bozuklukları, yüzey deformasyonları vb.) minimum düzeyde olması, kurutma süresinin olabildiğince kısa olması ve kurutma giderlerinin düşük olması beklenilmektedir. Ağaç malzeme higroskopik özellikleri nedeniyle ortamdaki rutubet miktarına bağlı olarak nem alışverişinde bulunmakta ve fiziksel özelliklerinde değişimler ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle, ağaç malzemenin ürün olarak kullanılacağı yerdeki rutubet değerlerine yakın rutubet miktarına sahip olması büyük önem taşımaktadır [5], [7].

Ağaç malzemenin farklı kullanım alanlarında sorunsuz bir şekilde kullanılabilmesi için kurutma şarttır. Başarılı ve verimli kurutmanın anahtarı ise kurutma işleminin kontrollü yapılmasıdır. Kurutma sürecinde etkili olan faktörlerin (sıcaklık, bağıl nem, hava sirkülasyonu vb.) süreç içerisinde kontrol edilmesini sağlamak suretiyle, kurutma işleminin kontrollü olarak gerçekleştirilmesi mümkün olmaktadır. Kontrolsüz kurutma, ürünün ekonomik özellikleri ve kullanım özelliklerini olumsuz yönde etkileyebilir ve kurutma hatalarına neden olabilir. Kurutmada tercih edilen genel yaklaşım; ağaç türüne göre ve malzemenin kalınlığına bağlı olarak, nihai ürün gereksinimlerinin izin verdiği kadar hızlı kurutma işlemi gerçekleştirilmesidir. Kurutmanın daha yavaş yapılması genellikle ekonomik olmayabilir. Yapılarda, çerçeve konstrüksiyon yapımında kullanılan yumuşak ağaç türleri için genellikle %15'lik bir ortalama rutubet miktarına sahip kurutma hedeflenirken mobilya, dolap ve doğramalar için kullanılan sert ağaç türleri için genellikle %6 ila %8 rutubet miktarına kadar kurutma hedeflenmektedir. Kurutma işleminin ayrıntılarını belirlemede; ağaç malzeme türü, başlangıç nem içeriği, kereste kalınlığı, maliyetler ve nihai kullanım beklentileri ana faktörlerdir [4].

Ağaç malzemenin kurutulmasında pek çok metot kullanılmaktadır. Bu metotlardan en yaygın olarak kullanılanları ise ya doğrudan doğruya açıkta veya sundurmalar altında istif edilerek gerçekleştirilen doğal kurutma, ya da bu amaçla inşa edilmiş kurutma fırınlarında gerçekleştirilen teknik (suni) kurutmadır. Doğal kurutma, kereste olarak ölçülendirilmiş malzemelerin aralarında hava dolaşımı sağlanacak şekilde (aralarına çıtalar konularak) üst üste istiflenerek açık havada bırakılması işlemidir. Doğal kurutmanın sağladığı en büyük avantaj düşük maliyetli olmasıdır. Bu yöntemde kurutma süreci çok uzun süreler almakla birlikte istenilen rutubet düzeyine ulaşmak çoğu zaman mümkün olmamaktadır. Kuruma miktarının iklim koşullarından direkt etkilenmesi ve kontrol edilemez olması en büyük engel olarak karşımıza çıkmaktadır. Ayrıca uygun ortam oluşturulamaması durumunda çok sayıda sorun (güneş etkisi ile renk değişimi, ortamdaki ağaç zararlılarına açık olması, yağış etkisiyle mantar oluşumu, ardaklanma vb.) ortaya çıkabilmektedir. Bu nedenle teknik kurutma yöntemleri, ağaç malzemenin kalitesinin korunmasında sağladığı avantajlar ve görece istenilen son rutubet değerlerinin elde edilebilir olması nedeniyle tercih edilmektedir [5], [7].

Teknik kurutmada, kurutma ekipmanları kullanmak suretiyle, uygulanacak kurutma parametreleri kontrol edilip ayarlanabilmekte ve böylece ağaç malzemenin özellikleri, kurutmanın hedefi ve kalite unsurları dikkate alınarak gerekli etkide ve istenilen sonuç rutubetine kadar kurutma yapılması sağlanabilmektedir. Teknik kurutma, kullanılan kurutucu maddenin şekli, sıcaklığı, basıncı veya ısı transferi gibi belirli kriterlere göre yapılabilmekte ve uygulanan yönteme göre isimlendirilmektedir [8].

İyi bir kurutma işleminde; kurutma sonunda malzemenin kalitesini kaybetmemesi, kurutma maliyetinin düşük olması ve mümkün olan en kısa zamanda kurutma eyleminin gerçekleşmesi amaçlanmaktadır. Bu sebepten dolayı, ekonomik değeri yüksek, zor kurutulan kalın kerestelerin klasik yöntemlerle kurutulması çok uzun zaman alıp istenilen kurutma veriminin tam olarak elde edilememesi endüstride sıkça karşılaşılan bir problemdir. Endüstride yaşanan bu problemlerin çözümü üzerine odaklanılmış ve çok sayıda farklı kurutma yöntemi geliştirilmiştir [9], [10].

Konvansiyonel (teknik) kereste kurutma fırınları, sistem içerisinde sıcak havanın dolaşımı sağlanarak kondüktif (iletim) ısı transferi yoluyla her bir kereste yüzeyine ve her bir levhanın yüzeyinden merkezine doğru ısı transferine dayanarak işlev görmektedir [11].

Bu tip kurutma sistemleri büyük miktarda enerji gerektirir; kullanılan bu enerjinin önemli bir kısmı, havalandırma yoluyla atmosfere salınmakta ve büyük miktarda enerji kaybı yaşanmaktadır. Malzemelerde homojen kuruma sağlanabilmesi için hava dolaşımı sağlanacak şekilde, kurutulacak keresteler arasında hava boşlukları bırakılması gerektiği için kurutma kapasitesinde önemli oranda kayıplar ortaya çıkmaktadır. Bu tip sistemlerde ortaya çıkan bir diğer olumsuzluk ise ısı iletiminin malzeme yüzeyinden merkezine doğru iletim yoluyla olması nedeniyle özellikle kalın kerestelerin merkezlerine ısının iletilmesinin uzun zaman alması ve bu nedenle çoğu zaman ağaç malzemenin merkezine yakın bölgelerde kurutmanın sağlanamamasıdır. Bu nedenle, kalın kerestelerde homojen kurutma gerçekleştirilememektedir [11]. Bu kurutma sistemleri, nispeten küçük kapasiteleri ve yüksek kaliteli keresteler için gereken uzun kurutma süreleri nedeniyle, üretim sistemlerinde klasik bir "darboğaz" problemi oluşturmaktadır.

Konvansiyonel kurutma sistemlerinde ortaya çıkan bu gibi problemler nedeniyle uzun yıllar boyunca alternatif ve daha etkin kurutma sistemleri üzerinde çok sayıda araştırma gerçekleştirilmiştir [12]. Bu arayışlarda temel hedef malzeme kalitesi bozulmaksızın daha kısa sürede ve daha düşük maliyetle kurutma işleminin gerçekleştirilmesi esasına dayanmaktadır [14].

Ağaç malzemeyi kurutmak için çok sayıda yöntem bulunmaktadır. Bu yöntemlerin çoğunda, ağaç malzemede kurutmaya bağlı olarak ortaya çıkan kusurların azaltılması, kurutma sürelerinin kısaltılması ve düşük maliyetle kurutmanın gerçekleştirilebilmesi için kurutma öncesi ağaç malzemelere ön işlemler uygulanmaktadır [13].

Bu işlemler; ağaç malzemenin tek ya da her iki yüzeyinin rendelenmesi (blanking and presurfacing), kimyasal yüzey işlemleri (chemical surface treatments), polietilen glikol uygulaması (polyethylene glycol-PEG), ön sıkıştırma işlemi (precompression), ağaç malzemenin dondurulması ve ağaç malzemenin buharlanması gibi işlemlerdir [13].

Ağaç malzeme yüzeyinin rendelenmesi sonucu rendelenmemiş malzemelere göre kurutma hızının yaklaşık %12 arttığı, kullanılan enerji miktarında ve yüzey çatlağı oluşumunda yaklaşık %8 azalma olduğu bildirilmiştir. Bu iyileşmenin, rendeleme işlemi ile ağaç malzeme yüzeyinin daha güçlü hale gelmesi ve kuruma gerilmelerine karşı koyabilir olması ile ilişkili olduğu düşünülmektedir [13]. Ağaç malzemenin kurutulması öncesinde yapılan ve en yaygın olarak kullanılan ön işlemlerden bir diğeri ise

buharlama işlemi olup Meşe, Kayın gibi ağaç türlerine ön buharlama işlemi uygulanarak kuruma gerilimlerinin azaltılması, çarpılma ve çatlamanın azaltılması yanı sıra malzeme içerisindeki renk dağılımının homojenleştirilmesi amaçlanmaktadır [14]. Ayrıca kurutma öncesi yapılan buharlama işlemi, kuruma hızını artırarak kuruma zamanını kısaltmakta ve beraberinde işletme maliyetlerini düşürmektedir [7], [15].

Hermawan ve arkadaşları (2012)'nin belirttiğine göre Kobayaşi vd. (2003) yapmış oldukları çalışmada; yüksek sıcaklıktaki buharla ön işleme tabi tutulmuş kerestenin, daha kısa kuruma süresine sahip olduğu ve ön işlem uygulanmamış keresteye oranla daha az yüzey çatlağına sahip olduğunu gözlemlemişlerdir. Ayrıca kerestelerin, ön işlem sırasında 160 °C'ye kadar yüksek sıcaklığa maruz kalmaları sonucu kerestenin yüzey renginin koyulaştığını bildirmişlerdir [16].

Kurutma işlemi öncesinde uygulanan bu ön işlemler yukarıda belirtildiği gibi kurutma süresinin kısaltılması, kurutma kalitesinin iyileştirmesi gibi birçok avantaj sağlasa da bu işlemlerin uygulanması için genellikle işletmeler ya ek yatırım maliyetlerine katlanmak zorunda kalmakta ya da yapılan ön işlemler için ek süreç ve zamana ihtiyaç duymaktadır. Bu nedenle kurutma öncesi uygulanan işlemlerin elimine edilmesi ve arzu edilen kurutma kalitesine bu ön işlemler uygulanmaksızın ulaşılması endüstri açısından güncelliğini koruyan bir problem olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu nedenle özellikle son 30 yıl içerisinde ağaç malzemenin ön işlemsiz olarak arzu edilen kalite düzeyinde kurutulmasını sağlayabilmek için alternatif kurutma yöntemleri arayışı üzerindeki çalışmalara yoğunlaşıldığı görülmektedir.

Bu arayışlar içerisinde dielektrik ısıtma sistemi sağladığı etkin ısıtma mekanizması nedeniyle ön plana çıkmaktadır. Dielektrik ısıtma terimi Radyo Frekans (RF) ve Mikrodalga (MD) yöntemlerini kapsamaktadır. Bu yöntemler, ağacın dielektrik özelliğinden faydalanılarak, alternatif akımın hareketiyle ortaya çıkan, yüksek frekanslarda odunların kurutulması esasına dayanır. Bu yöntemlerde kurutma hızı, kurutmadaki hareket kuvvetleri, yani basınç ve sıcaklık gradyanları aynı yönde (içten dışa doğru) hareket ederek kurutma hızını önemli ölçüde artırır, böylece kısa kuruma süreleri elde edilebilir [12],[17].

Dielektrik (MD veya RF) ısıtma, elli yıldan fazla süredir kullanılan ticari bir teknolojidir. Dielektrik ısıtma, iletken olmayan malzemeleri, üniform bir sıcaklık artışı ile ısıtmak için eşsiz bir kabiliyete sahiptir. Bu ısıtma eylemi, suyun güçlü dielektrik

özelliklerinden ve ahşap gibi higroskopik malzemelerdeki seçici ısınmadan faydalanarak elde edilebilir [18].

Bu yöntemlerin kullanılmasında bazı çalışmalarda özellikle çok kalın kesitli ağaç malzemenin kurutulmasında ön işlem uygulamaları ile kombine ederek kurutma işleminin verimliliğinin artırılmasına yönelik çalışmaların yapıldığı görülmektedir. Kalın kerestelerin, iç rutubetlerindeki akış yönlerinin değişimini gözleyebilmek için yapılan bir çalışmada dielektrik ısıtma yönteminin bu avantajlarını doğrular nitelikte sonuçlar elde edilmiştir. Bu doğrultuda Lee ve Hayashi (2000)'in yapmış oldukları çalışmada, alın kısımları kaplanmış 76 mm kalınlığındaki Japon Sediri, buharlama ile ön işleme tabi tutulmuş ve düşük buhar basıncı ile bu ön işlem desteklenmiştir. Akabinde radyo frekans vakumlu (RF/V) kurutma yöntemi ile kurutulmuş ve konvansiyonel yöntemlere göre daha kısa kuruma süreleri ve daha az hacimsel daralma değerleri bulmuşlardır. Bununla birlikte çoğu örnek için de verimlilik artışı sağlamayı başarmışlardır [19]. Literatürde dielektrik ısıtma yöntemini kullanan çok sayıda çalışma bu yöntemlerin uygulanmasında kullanılan sistem parametrelerinin kurutma süreci ve performansı üzerindeki etkilerine odaklanmıştır.

Örneğin, Koumoutsakos ve arkadaşları (2001) tarafından yapılan diğer çalışmada Kuzeybatı Amerikan Ladini ve Kırmızı Ardıç türlerinin kurutulmasında radyo frekans vakumlu kurutma yöntemini kullanmışlar, kerestelerin ortalama rutubet miktarlarını, sıcaklık ve basınç değişimlerini zamana bağlı olarak izlemişlerdir. Deneyleri, farklı voltaj koşulları, güç yoğunlukları, ortam basıncı, ortam sıcaklığı ve yüksek başlangıç rutubetleri parametrelerine göre gerçekleştirmişlerdir. Ayrıca deneylerde iki farklı fırın basıncı denemişlerdir. Tahminler yapabilmek amacı ile 1D modelini kullanmışlar ve bu tahminleri kendi yaptıkları deney sonuçları ile karşılaştırmışlardır. Matematiksel modelin, kuruma sırasında gözlemledikleri olayların çoğunu uygun şekilde açıklayabildiğini, özellikle ortalama rutubet miktarı ve kurutma zamanındaki gelişim konularında tutarlı sonuçlar elde edildiğini belirtmişlerdir [12].

Ayrıca dielektrik ısıtma kullanan kurutma sistemlerinin etkinliğini ve diğer yöntemlere karşı sağladığı avantajları ortaya koymayı hedefleyen çalışmalar yöntemin endüstriyel olarak kullanılabilirliğini ortaya koymaktadır. Örneğin, Avramidis ve Zwick (1996) yaptıkları çalışmada, RF/V kurutma işleminin, geleneksel yöntemlerle uzun kurutma süresi gerektiren ürünler söz konusu olduğunda, ekonomik olarak uygulanabilir olduğunu belirtmişlerdir [20].

Resch (2006) yaptığı çalışmada; Meşe, Ladin, Kayın ve Huş ağaçlarını kullanmış olup dielektrik ısıtmayı kullanmanın avantajlarını belirlemiştir. Bu avantajlar ise yığılmış keresteler için hızlı ve oldukça eşit ısı transferi sağlanması, çok yüksek kuruma oranları göstermesi ve ahşabın önemli derecede iyi yüzey sertleştirme oranı sağlanması olarak belirtilmiştir. Ayrıca oksidatif renk değişikliği de dahil olmak üzere çeşitli kurutma kusurlarından arınması da sağlanmıştır [21].

Dielektrik kurutma yöntemleri (MD ve RF) karşılaştırıldığında birbirlerine karşı avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır. Örneğin; mikrodalga kurutma sisteminde magnetronlar tarafından oluşturulan 9,5 MHz ile 2,45 GHz arasında değişen ve 1 mm'den küçük dalga boyunda elektromanyetik dalgalar malzemeye dıştan içe doğru yönlendirilmektedir. Mikrodalga kaynağı kurutulacak malzemeden uzaklaştıkça etkisi azalmaktadır. Bu nedenle özellikle kurutulmak üzere sistem içerisine istiflenen kereste yığınlarının iç kısımlarına etkin bir şekilde ulaşılamamaktadır. Bu olumsuzluğun giderilmesi ve yığının her noktasına mikrodalga enerjisini oluşturabilmek için konvansiyonel kurutma sistemlerinde olduğu gibi kurutulacak keresteler arasına çıtalar konularak boşluklar bırakmak gerekmektedir. Bu nedenle fırın yükleme kapasitesinde ciddi oranlarda kayıplar yaşanmaktadır. MD yönteminde dalga boylarının çok küçük olması nedeniyle küçük açıklıklardan sızabilmekte ve ortama yayılarak yakında bulunan canlıların radyoaktif enerjiye maruz kalmalarına neden olabilmektedir [22].

MD yönteminin bazı avantajları da bulunmaktadır. Örneğin; MD yöntemi ile RF yöntemi karşılaştırıldığında, mikrodalganın dalga boyu daha kısadır ve alanı daha düzgündür, daha yüksek enerji yoğunluğuna sahiptir, daha kısa kurutma süreci ve daha az enerji ihtiyacı bulunmaktadır. Ayrıca, sıcaklık farkı, RF kurutma sisteminde olduğu kadar geniş değildir, bu nedenle ağaç malzemede daha az boyutsal daralmaya neden olur [22].

RF yönteminin MD yöntemine göre sağladığı en büyük avantaj ise, nüfuz derinliğinin çok daha yüksek olması nedeniyle özellikle kalın kesitli malzemelerde daha homojen ve etkin ısıtma sağlayabilmesidir. RF metodunda keresteler, arada boşluk olmayacak şekilde üst üste çıtasız istifleme yöntemiyle istiflenerek üst kısımdan baskı uygulanmaktadır. Baskı uygulanan kerestelerin arasına belirli sıklıkta metal plakalar konulmaktadır [9]. Ayrıca RF yönteminde 6,78 kHz frekansta ve yaklaşık 15 cm'lik dalga boyunda dalgalar kullanıldığından MD yönteminin taşıdığı olumsuzlukları taşımazlar [22].

Beyaz meşe odunu kullanılarak bitki sağlığı tedavisi için yapılan çalışmada ise radyo frekans ve mikrodalga ısıtma karşılaştırmalı olarak uluslararası standartlara uygun incelenmiş olup, çalışmada belli ölçüye kadar olan parçalarda ısıtma oranlarının nispeten benzer olduğu, bu ölçülerin üzerinde ise, RF ısıtması, MD'dan daha yüksek bir ısıtma homojenliği ile %40'dan daha hızlı olmuştur. Nüfuz etme derinliği ve termal görüntü analizleri için elde edilen teorik değerler, RF (19 MHz)'in odunlara daha düzgün bir şekilde nüfuz ettiğini, odun kütlesel hacim işlemleri için MD'den (2,45 GHz) daha iyi olduğunu ve bu koşullar altında RF'nin daha iyi bir ısıtma homojenliği sağladığı görülmüştür [23].

Literatürde Radyo Frekans yöntemi birçok çalışmada Yüksek Frekans (High Frequency) olarak da anılmaktadır. Yüksek Frekans-Vakum (YF-V) kurutma teknolojisi ise, iki farklı yöntemin birlikte kullanıldığı özel bir kurutma yöntemidir. Bu yöntemde, yüksek frekanslı akım ile ısıtma sağlanırken ortamdaki hava basıncı düşürülerek suyun kaynama noktasının azalması ve daha düşük sıcaklıklarda buharlaşması sağlanmaktadır. Sonuç olarak, suyun ahşap üzerinde hareketi artar ve atmosferik basınçta elde edilenden çok daha kısa kuruma sürelerine ulaşılır.

Tomruktan biçilen işlem görmemiş yaş kereste, RF ısıtması için mükemmel bir malzemedir. Su son derece dipolar bir moleküldür ve dielektrik sabiti kuru hücre duvarının yirmi katına eşittir. Sonuç olarak, su ahşaptan çok daha hızlı ısıtılacaktır. Bu nedenle su, dahili olarak onu çevreleyen materyalden daha fazla ısıtılır. Bu gerçek, yaş kerestede, dielektrik kurutma için doğal bir uygulama olan radyo frekans spektrumunda dalgalı elektrik alanına tabi tutulduğunda nemin alınmasını sağlar. Ayrıca, kereste içindeki düzensiz nem içeriği dağılımının dengelenmesi RF/V kurutma yöntemine de atfedilen bir özelliktir [24], [25], [26].

RF/V yönteminin ahşap kurutmada kullanımına yönelik çok sayıda çalışma bulunmaktadır. İlk endüstriyel RF/V kurutucuları Rus Bilim Akademisi tarafından Moskova'da 1960'lı yıllarda inşa edilmiştir. Bazı modellerin uzunluğu 8m, yüksekliği 3m ve genişliği 3m'dir ve yaklaşık 10m³ kereste alabilmektedir. 13.56 MHz frekansta çalışan ve yaklaşık 44 kW güç kullanan vakum odasının üstünde bulunan RF jeneratörü, elektrotlar arasında maksimum 10 kW yüksek frekans akım üretebilmektedir. İlk olarak, Rus sert ağaç türlerinin kurutulması amaçlanmıştır [27]. Ayrıca odunun dielektrik ısıtmasını endüstriyel işlemlerde öneren ve uygulayan ilk Rus bilim adamları olup, hızlı ve homojen olarak üretilen ısının benzersiz özellikleri nedeniyle, dielektrik ısıtmanın

ahşap kurutma, yapıştırma, emprenye ve preslemede önemli bir rol oynadığını belirtmişlerdir [24].

ABD'de, 1973 yılında küçük bir RF/V kurutucusu inşa edilmiş ve Koppelman tarafından patenti alınmıştır. Bu fırın silindir şeklinde inşa edilerek keresteler iki elektrot arasında kurutulmuştur. Fırında oluşan su buharı ilk önce soğutulmuş silindir duvarlarında, daha sonra bir dış kondenserde yoğunlaştırılmıştır [28].

RF teknolojisinde yaşanan gelişmeler sonucu 1990'lı yıllarda, kurutma teknolojisinin bir parçası olarak odunun dielektrik ısıtılmasına ilgi tekrar yoğunlaşmıştır. RF ısıtma, masif ahşap ürünleri endüstrisinde birçok uygulama için (laminasyon, tabakalı malzeme üretimi, lamine bükme mobilya elemanlarının üretilmesi vb.) en efektif uygulama yöntemlerinden biri olarak yaygınlığını artırmıştır. Yapılan bir çalışmada frekansı 13.56 MHz ve voltajı 4000 V olan RF jeneratörü kullanmış olup, çam ve kavak ağacı kullanarak kavisli lamine kaplama kereste (LVL) denemesi yapmışlardır. Frekans, elektrot voltajı, RF uygulama süresi ve nem içeriği kavisli LVL'nin mekanik özelliklerini etkilemiştir. RF uygulama süresi ve nem içeriği, kavisli LVL'nin mekanik özelliklerini etkileyen elektrik parametrelerinden (örneğin, frekans ve voltaj) daha önemli faktörler olarak ön plana çıkmıştır [29].

Bu gelişmeler ve endüstriyel uygulamalarda yaygınlaşma aynı zamanda RF/V kurutma sistemlerinde de görülmüştür. Örneğin; ABD'de kırmızı meşeden üretilecek mobilya parçalarının kurutulması için özel olarak tasarlanmış bir RF/V kurutucusu üretilmiştir. 2000 ila 4000 saat arasında ömür beklentisi olan Siemens tüplerini kullanarak 2 ila 4 MHz'de çalışan bir RF jeneratörü kullanıp yaklaşık 20 m^3 kapasiteye sahip olan otoklav içerisinde 2,3 kPa gibi düşük bir basınç seviyesinde vakum uygulanmıştır. Aynı dönem içerisinde New York Eyaleti'nde ticari olarak faaliyet gösteren dört kurutucunun olduğu bildirilmiştir [30].

Kanada'da, yüksek yoğunluklu sert ağaçların RF/V ile kurutulmasındaki başarı, yumuşak ağaç tomruğu endüstrisinde de ilgiyi artırmıştır. 23 m^3 kapasiteli yeni bir RF/V odasında çeşitli Kanada düşük yoğunluklu yumuşak ağaç türleri, 3 MHz frekansta ve maksimum 260 kW güçte kurutulmuştur [11], [18], [31].

RF/V teknolojisi, geleneksel fırınlarda kurutulamayan geniş kereste boyutlarını kurutmayı başarmıştır, sıcak hava kurutucularının ise aşırı kurutma sürelerine ihtiyacı olmakta ve kabul edilemez kurutma kusurlarına neden olmaktadır. Araştırma, kalınlığı

36 ila 152 mm arasında ve genişliği 101 ila 190 mm arasında değişen büyük Kanada Batı Sahili yumuşak ağaç türleri üzerinde gerçekleştirilmiştir. Kabul edilebilir zaman çizelgelerine sahip kurutma programları ile oluşturulan türlere uygun çizelgeler kerestelerde renk değişimi ve iç stresleri ortadan kaldırmış ve yüzey çatlaklarını büyük ölçüde azaltmıştır. Bu araştırmaya dayanarak, HeatWave Technologies Inc. ticari RF/V kurutma fırınlarının bir dizi modelini geliştirmiştir [32].

Laboratuvar ortamında RF/V fırınında yapılan başka bir çalışmada iki farklı yüksek rutubet miktarına sahip ağacın kalın kesitli numunelerini kullanarak, ağaçların uzunluk etkilerini incelemişler ve kısa numunelerin, lif doygunluğu rutubet miktarının üzerindeki nem içeriğinde uzun olanlardan daha hızlı kuruduğunu görmüşlerdir. Ayrıca numune uzunluğunun, nemin atılma hızını etkilediği anlaşılmış ve spesifik olarak, daha kısa olan numunelerin, uzun olanlar karşılaştırıldığında nem içerikleri, lif doygunluğu rutubet miktarı noktasının üstünde olduğunda daha hızlı bir oranda kurutulduğu görülmüştür [33].

Çin Tırpan Ağacı (Cunninghamia lanceolata) kullanılarak yapılan başka bir çalışmada, nem içeriğinin, numune kalınlığının ve RF güç seviyesinin ısıtma hızları üzerindeki etkisi incelenmiş olup uygulanan güç sıcaklık artış hızını önemli ölçüde etkilemiş, kalınlığın ısıtma hızı üzerinde önemli bir etkisi olmamış, RF güç seviyeleri odun ısınma oranını önemli ölçüde etkilemiştir [34].

75 m^3 kapasiteli ve 300 kW radyo frekansı üreten görünüşte en büyük Heat-Wave ünitesi, birincil konvansiyonel kurutma esnasında çok ıslak kalmış olan Pasifik kıyısı Göknar cinsi ahşap kerestelerin yeniden kurutulması amacıyla üretilmiştir [35].

Japonya'da da bazı şirketler, 13.56 MHz frekans jeneratörleri ve kapasiteleri 5 ila 40 m^3 arasında değişen yüksek frekans ısıtmalı kereste kurutucuları üretmişlerdir. Bazıları sırasıyla kurutma bölmesi ve su buharı kondenseri olarak iki silindir kullanan RF/V yaklaşımına karar verirken, bazıları atmosfer basıncında sıcak hava konveksiyonuyla kurutmayı içeren RF ısıtmasını birleştiren hibrit fırınları tercih etmiştir [21].

Avusturya'da, Moskova Bilim Akademisi'nin tasarımını temel alan ve Rusya'da üretilen ticari bir RF/V kurutma odası, RF/V teknolojisinin Avrupa'nın önemli sert ve yumuşak ağaç türlerinin kurutulması amacıyla fizibilitesini araştırmak amacıyla denenmiştir. Maksimum kapasitesi 10 m^3 olan bu tesiste, 13.56 MHz'de 10 kW'lık maksimum güce sahip yüksek frekanslı voltaj sağlayan oldukça eski bir jeneratör

kullanılmıştır. Bu kurutma odası, kuruma oranını belirlemek için yük hücreleri ve yoğunlaşma tuzakları ile donatılmıştır ve fiber optik ile sıcaklık ölçümü yapmıştır. Elde edilen sonuçlara göre Meşe ağacının ısıya daha dayanıklı olduğu kanıtlanırken yaygın kullanılan ölçülerdeki Kayın, Huş ve Ladin kerestelerinin 2 ila 4 gün içinde kurutulabildiği ve sonuçların oldukça umut verici olduğu belirtilmiştir [36].

Başka bir çalışmada ise başlangıçta rutubet miktarı oldukça yüksek plantasyon kavaklarının kurutulması için RF/V yönteminin (6.78 MHz kullanarak) oldukça uygun olduğunu ispatlamıştır [37].

Lee ve arkadaşları (2010) tarafından yapılan çalışmada, RF/V yöntemi ile kurutma süreci performansının iyileştirilebilirliğini araştırmıştır. Bu çalışmada, Japon Sedirinin öz odunundan elde edilen kerestelerin RF/V yöntemi ile kurtulmasında yüksek sıcaklık ve düşük nemle (YS-DN) ön muamelenin kuruma özelliklerine etkisini araştırmışlardır. Çalışma sonucu yüzey çatlakları, YS-DN tedavisi ile etkili bir şekilde engellenmişken, kesilmiş YS-DN numunelerinde yüzey çatlaklarının bulunmadığı tespit edilmiştir. RF/V kuruma sırasında öz çatlaklarının oluşumunu önlemek için, YS-DN uygulamasının lif doygunluğu rutubet noktasında bitirilmesini önermişlerdir [38].

Kendall ve arkadaşlarının (2010) yapmış oldukları araştırma kapsamında, Doğu Kanada'daki sert ağaç türleri üzerine çalışan işletmelerin rekabet gücünü artırmak için tasarlanan bu çalışmada; Akçaağaç üzerine çalışmalar yapılmış olup RF/V teknolojisinin gelişimini takip etmek için daha fazla araştırmaya gereksinim duyulduğu bildirilmiştir. Sert ağaç türlerinden ürünler üreten üreticilerle iş birliklerinin artırılmasının gerekliliği önerilmiştir [39].

RF/V yöntemi ile ahşabın kurutulması sürecine yönelik teorik yaklaşımları ele alan sınırlı sayıda çalışmanın var olduğu görülmüştür. Bu çalışmalar RF/V yöntemi kullanılacak fırınlarda kuruma sürecinin tahmin edilmesi ve modellenmesi esasına dayanmaktadır. Koumoutsakos ve arkadaşları yaptıkları çalışmada RF/V yöntemi sürecinde ısı ve nemin malzeme içerisindeki davranışını matematiksel olarak modellemişler ve kuruma sürecinde etkili olan en önemli parametrelerin neler olduğunu belirlemişlerdir. Kuzeybatı Amerikan Ladini ve Kırmızı Ardıç olmak üzere iki farklı türün kalın kerestelerini, iç rutubetlerinin akış yönlerinin nasıl değiştiğini gözleyebilmek için radyo frekanslı vakumlu kurutma fırınında kurutmuşlardır [17]. Bu çalışmada elde edilen modelin, çeşitli kurutma koşullarındaki tahmin başarısını değerlendirdikleri bir

diğer çalışmalarında, kuruma süresi ve ortalama rutubet düzeyinin tahmininde modelin oldukça başarılı olduğunu belirlemişlerdir [12].

Yazarlar yaptıkları bir diğer çalışmada daha önceki modeli geliştirerek iki boyutlu model ile kalın ahşapların kurutulması için daha etkin bir optimizasyon modeli geliştirmiştir [40]. Ayrıca Avradimis ve arkadaşları (2006) yaptıkları başka bir çalışmada ahşabın dielektrik özelliklerini öngörebilen bir yapay sinir ağı geliştirmiş ve deneysel verilerle test etmişlerdir [41].

RF/V yöntemi ile ilgili modellemeye dayanan bir diğer çalışmada Koumoutsakos (2001), RF/V kurutma sırasında ahşapta ısı ve nem mekanizmalarıyla birleşen elektromanyetik enerji dağılımını incelemeyi amaçlamış, sayısal ve deneysel içerikli çalışmalar yapmıştır [42].

Jia ve arkadaşları (2015) kare kenarlı kerestenin RF/V kurutması sırasındaki kütle ve ısı aktarım mekanizmalarını analiz etmiş, sürekli RF/V kurutma sırasında gözenekli malzemelerin ısı ve kütle transfer teorisine dayanan tek boyutlu bir matematik modeli geliştirmişlerdir [43].

Zhao ve arkadaşları (2018) ahşabın yüksek frekanslı ısıtma işlemini tahmin etmek için oluşturdukları, Maxwell denklemine ve ısı transfer denklemine dayanan, sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yüksek frekanslı ısıtma sırasında ahşabın üç boyutlu bir sıcaklık dağılım modelini oluşturmuşlardır. Moğol Çamı kullanılarak yapılan bu çalışmada, oluşturulan sıcaklık alanı modeli, yüksek frekanslı ısıtma sırasında ahşabın sıcaklık homojenliğini iyileştirmek ve kurutulmuş ahşabın kalitesini optimize etmek için temel verileri ve teorik temeli sağlamaktadır [44].

Salinas ve arkadaşları (2018) yaptıkları çalışmada elektromanyetik bir alandan dielektrik malzemeye (odun) transfer edilen enerji üzerine odaklanmıştır. Bu ilişki dielektrik kayıp faktörünün hesaplanmasını ve bunun geleneksel denklemlerle olan ilişkisini açıklamak için gerekmektedir. Bu amaçla radyo frekanslı ısıtmayı kullanarak Şili'nin önemli ağaç türlerinden olan kare kesitli olarak hazırlanan Çam (*Pinus radiata*) numuneleri kullanılarak gerçekleştirilen denemeler ile geliştirilen model sonuçları karşılaştırılmak suretiyle oluşturulan modelin güvenirliği test edilmiş ve oluşturulan modelin deney sonuçları ile uyumlu olduğu bildirilmiştir [45].

YF-V yönteminin geleneksel kurutma ile karşılaştırıldığı ve YF-V yönteminin sağladığı avantajları ortaya koyan çalışmalar yöntemin etkinliğini ortaya koymaktadır. Örneğin;

Ünsal yaptığı çalışmada YF-V yöntemiyle kurutmanın klasik kurutma yöntemlerine oranla ağaç malzemelerin 1/10 süre zarfında kaliteli bir şekilde kuruduğunu gözlemlemiştir [46].

Aynı çalışmada, Meşe, Ceviz, Kayın, Iroko ve Kestane ağaçlarının kurutulmasında yüksek frekanslı kurutma sisteminin, özellikle vakumlu kurutma ile birleştiğinde, yatırım maliyetlerinin yüksek olmasına rağmen, işletme giderlerinin azlığı, kurutma sürelerinin kısalığı ve yüksek kurutma kalitesiyle, 10 cm'den daha kalın olan kurutmaya karşı hassasiyeti bulunan kerestelerin kurutulması için uygun bir yöntem olduğunu belirtmişlerdir. Bu yöntem ile kurutma süresinin ağaç türüne ve kalınlığına bağlı olarak 7-10 güne inebildiğini, bu sürenin iğne yapraklı yumuşak ağaç türlerinde 2-3 gün sürdüğünü gözlemlemişlerdir. Elde ettikleri sonuçlara göre $1m^3$ kerestenin kurutma maliyetinin klasik yöntemlere göre yarı yarıya azaldığı sonucuna varmışlardır [46].

Ünsal ve arkadaşları (2014) yılında yaptıkları çalışmada kalın Meşe, Ceviz (Dipçik taslağı), Kayın ve Iroko ağaçlarını kullanmışlardır. Çalışmada, ebatları büyük olan ve zor kuruyan ağaçlar için YF-V metodunun, geleneksel yöntemlere göre daha kısa sürede ve çok daha az kurutma kusurları içerecek şekilde kurutabildiğini görmüşlerdir ve bu nedenle frekans kaynaklı kurutma yöntemlerinin ön plana çıktığını belirtmişlerdir [9].

Kırmızı meşe ağacı kullanılarak, izotermal olmayan nem hareketi ve radyo frekans ısıtmanın kombinasyonuyla oluşturulan kurutmada, yeni kesilmiş örneklerin kurutulması sürecinde aşırı yüzey çatlakları oluştuğu görülmüştür. Kurutma sürecinin başlangıcında bir ön kurutma adımı eklendiğinde izotermal olmayan radyo frekanslı kurutmanın başarıyla uygulanabilir olduğu sonucuna varılmıştır. Başlangıç rutubet miktarı %85 olan 25 mm kalınlığındaki keresteler için, kurutma süresi kereste kalitesinden ödün vermeden geleneksel fırın kurutmasındakinin üçte birine kadar azaltılabildiği görülmüştür [47]. Ayrıca genel kural olarak yüksek frekanslı ısıtma yöntemlerinin, yeni fırınlar için ekonomik olarak cazip hale geldiği, geleneksel kurutmaya oranla dört kat arttığı öne sürülmektedir [48].

RF/V yönteminin geleneksel kurutma ile karşılaştırıldığı ve RF/V yönteminin sağladığı avantajları ortaya koyan bir başka çalışma ise yapılacak yatırımın geri dönüşünün kısa sürede olacağını ortaya koymaktadır. Geleneksel ve radyo frekans vakumlu kurutma teknolojilerini kullanarak 2 x 4 cm ölçülerinde Pacific Kıyısı Göknar kerestesinin kurutulması için ilk ticari ölçekli kurut/sırala/yeniden kurut (Q-Sift®) stratejisinin

deneysel bir değerlendirmesini sunan bu araştırmada, Q-Sift yöntemi uygulamasının ürünlerin kuruma süresini azalttığını göstermiştir. Yöntemin endüstriye uygulanabilirliğini belirlemek için bir ekonomik model geliştirilmiş ve ekonomik göstergelere ilişkin veriler sunulmuştur. Uygulanan bu yeni stratejide yatırımın geri dönüş süresinin 1,5 yıldan daha kısa olduğu ifade edilmiştir [49].

Düşük RF (10 kHz'e kadar) ve temaslı vakum kurutma kombinasyonundan oluşan kurutma sürecini ele alan bu çalışmasında Huş ağacı kullanılarak nem taşınımı araştırmaları yapılmıştır. Yapısal değişimleri azaltmak için 70°C'den düşük sıcaklıklar uygulanmıştır. Bu yöntem aracılığı ile konvansiyonel kurutma yöntemlerine nazaran malzeme içerisindeki rutubetin giderilme oranının %25 oranında arttığı ifade edilmiştir. Huş ağacında nem taşınımı üzerinde iç basıncın önemli oranda etkili olduğu kanıtlanmıştır [50].

Konvansiyonel kurutma (KK) ile RF/V kurutma sisteminin karşılaştırıldığı bir diğer çalışmada ise, RF/V kuruma süresinin KK'ya kıyasla %50'ye varan oranlarda kısaldığı belirlenmistir. Ayrıca RF/V kurutmada, keresteler arasında ve içinde daha homojen bir rutubet dağılımının olduğu, deney örneklerinin genişlik ve kalınlıktaki çekme ile teğet/radyal yönlerde hacimsel çekmelerin önemli ölçüde daha az olduğu görülmüştür [51].

Literatürde RF yönteminin farklı amaçlar için kullanıldığı çalışmalar da bulunmaktadır. Örneğin; Tubajika ve arkadaşları (2007) çürüğe neden olan farklı mantar türlerinin giderilmesinde kullanılan metil bromide (MB) alternatif olarak RF uygulamasının etkilerini araştırmıştır. Çalışmada, ağaç türü olarak kavak, kırmızı meşe ve sarıçam ağaçları 40 kW'lık bir dielektrik fırın içerisinde 60°C ve 70°C arasındaki sıcaklıklarda 2 dakika süreyle RF'ye maruz bırakmış ve ahşabın yaklaşık %98-100'ünde mantarın tamamen önlenebildiğini gözlemlemişlerdir [52].

Zhou ve ark (2012) kontrplak ve orta yoğunluklu lif levhalardan (MDF), bükme lamine mobilya bileşeni üretimini ele almıştır. Çalışmada malzemelerin bükülme performansının, radyo frekansla ısıtma (RFI) kullanılarak 25ºC-175ºC aralığındaki sıcaklık etkisi ile geliştirilmesi amaçlanmıştır [53].

Zhou ve arkadaşları (2014) yaptıkları bir diğer çalışmada ise RFI kullanımı ile üretilecek bükme lamine mobilya bileşenleri sonlu elemanlar analizi (SEA) kullanılmak suretiyle modellenmiş ve tahmin modelleri oluşturulmuştur. SAE analizi sonucu elde

edilen tahminler yapılan deneylerle doğrulanmıştır [54].

Resch ve Hansmann (2002), 1.5 m uzunluğunda kurutma odası ve içindeki ahşabın ağırlık, sıcaklık ve basıncının kesintisiz ölçülmesine olanak tanıyan laboratuvar ölçekli YF-V kurutucu imal etmiştir. Bu kurutma sistemi ile yapılan testler arasında 75 mm kalınlıktaki Okaliptüs kerestesi, yaklaşık 290 saat içinde %42 rutubet düzeyinden %11 düzeyine herhangi bir çökme ve deformasyon olmaksızın hızla kurutulabildiğini yayınladıkları raporda belirtmişlerdir [55].

Kayıp faktörü üzerine yapılan çalışmalardan; Zhou (1997) yaptığı çalışmada Kırmızı Sedir ve Batı Göknarı ağaçlarının dielektrik özelliklerini (kayıp faktörü) farklı rutubet miktarı, sıcaklık ve elektrik alanı güç seviyelerinde değerlendirmiştir. Bu amaçla 13.56 MHz frekansında laboratuvar ölçekli RF/V fırını kullanılmıştır. Denemelerde sırasıyla rutubet miktarı %10-80 arasında, sıcaklık 25-55°C aralığında ve elektrot voltajı 0,8 ila 1,1 kV aralığında farklı parametreler kullanılmıştır. Dielektrik kayıp fonksiyonu üzerinde nem içeriği, sıcaklık, elektrik alanı gücü ve ağaç türünün belirgin bir şekilde etkili olduğu belirlenmiştir [56], [57].

RF yönteminin farklı sektörler için kullanıldığı çalışmalarda bulunmaktadır. Örneğin gıda sektöründe; 27 MHz, 10 kW gücünde laboratuvar ölçekli RF kurutucusuyla denemeler yapılmış ve elde edilen verilerle RF teknolojisiyle bir çay kurutucusu projesi yapılmıştır [58].

Donmuş gıdaların çözündürülmesi, hazır gıdaların ambalajda sterilizasyonu, işlenmiş et ürünlerinin pişirilmesi ve sebzelerin haşlanması gibi uygulamaların yanı sıra radyo frekans tanımlama sistemiyle gıda güvenliğinin sağlanması ve takibinde de kullanılmaktadır [59].

Tekstil sektöründe ise; RF yöntemiyle pamuk, yün, viskon, kaşmir ve gevşek elyafların kurutulması sağlanabilmektedir [60].

RF işlemi, pek çok avantaja sahip olması bakımından yeni nesil uygulamalar arasında yer almaktadır. Ayrıca yöntemle ilgili daha önce yapılan çalışmalardan görüldüğü üzere kurutma sürecini kısaltması ve bu sayede işletmelerin daha hızlı bir şekilde müşteri isteklerine cevap verebilmesini sağlamak suretiyle etkin rekabet edebilme yetisi kazandırması açısından da önem taşımaktadır [15].

Daha önce yapılmış çalışmalarından görüldüğü üzere çoğu kurutma sistemlerinde kurutma sürecini hızlandırarak, kurutma süresini kısaltmak üzere ön işlemler

uygulandığı görülmektedir. Kullanılan bazı ön işlem uygulamalarında ağaç malzemede renk değişiklikleri gözlenebilmekle beraber, işletmelere hem zaman kaybı hem de ekonomik kayıplar yaşatmaktadır. Ön işlemler olmadan kurutma işleminin gerçekleştirilmesi ise gerek zamandan gerekse ekonomik yönden tasarruf sağlayacağı düşünülmektedir.

Ayrıca yerli ağaç türlerimizin dielektrik ısıtma sistemi kullanılarak kurutulmasına yönelik çok az sayıda çalışmanın yapılmış olduğu ve YF-V yönteminde kurutma süreci adımlarının belirlenmesine yönelik çalışmalarında oldukça kısıtlı olduğu görülmektedir.

Literatürde görülen bu eksiklikler göz önünde bulundurularak bu çalışmada YF-V kullanılarak kurutma öncesi ön işlemler yapılmaksızın, kalite kaybı yaşanmadan kurutmanın yapılıp yapılamayacağı araştırılmıştır.

Bu çalışmada YF-V kurutma fırını kullanılarak, enerji periyotları, kurutma süresi, kereste sıcaklıkları, kaybedilen rutubet miktarı, vakum periyot ve basınçları, kerestelerin ağırlığı, kurutma sürecinde çıkan su miktarları incelenmiştir. Çalışmada, endüstriyel ölçekli 8 m^3 yükleme kapasiteli; 10 kV anma geriliminde, 50 kW gücünde, 6.75 MHz frekans üretecine sahip YF-V fırını kullanılmıştır.

Çalışma kapsamında ülkemizde yaygın olarak yetişebilen, birçok deneysel çalışma için referans olarak kullanılabilen ve endüstride sıkça kullanılan Doğu Kayını (*Fagus orientalis Lipsky*) kullanılmıştır. Deneyde kullanılacak ağaçlar 16 x 90 cm ölçülerinde, 4 ve 6 cm kalınlık ölçülerinde hazırlanmıştır. Deney örneklerinin başlangıç rutubetlerinden nihai rutubet değerine ulaşana kadar, belirli aralıklarla kurutma sürecine yönelik sistem parametreleri ve kurutmaya ilişkin veriler kayıt altına alınmıştır. Kurutma süreci sonunda deney örneklerinin kurutma kalitesi EDG (1992) [61] standardına göre karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir.

Bu çalışma kapsamında giriş bölümünde genel bilgilere ve daha önce YF-V yöntemi üzerine yapılan çalışmalara değinilmiştir. Literatürde YF-V yöntemi ile ilgili yapılan çalışmaların özellikle yurt dışında yoğunlaştığı gözlenmiş olup YF-V yöntemi ile ilgili olarak yerli ağaçlara yönelik çalışmaların çok az sayıda olduğu görülmüştür. Yapılan çalışmalarda çoğunlukla YF-V yönteminin avantajları üzerine odaklanılmıştır.

Bölüm 2'de ağacın kurutulması, kurutma sürecinde meydana gelen odun su ilişkileri, kurutma kusurları, kuruma olayını etkileyen faktörler ve ağacın dielektrik özellikleri ile ilgili genel kavramlar ele alınmıştır.

Bölüm 3'te ağaç kurutma yöntemlerinden bahsedilmiş olup teknik kurutma yöntemleri kısaca tanıtılmıştır. Ayrıca YF-V yöntemi ele alınmış olup yöntemin özelliklerinin detayına inilmeye çalışılmış avantaj ve dezavantajları üzerine bilgiler verilmiştir.

Bölüm 4'te deneylerde kullanılan materyaller ve metotlar açıklanarak, kerestelerin kurutma süreci bitene kadar yapılan işlemler görsel materyallerle desteklenmek suretiyle açıklanmıştır. Ayrıca ilgili standartlara (TS EN 13183-1 (Türk Standartları Enstitüsü), EDG (1992)) göre kurutma işlemi performansı değerlendirilmiştir.

Bölüm 5'de YF-V yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen kurutma sürecinde, ağaçların başlangıç rutubetinden kurutma sonrası nihai rutubet miktarına ulaşana kadar olan sürece ait gözlemler yapılmak suretiyle kurutulan kerestelerin fiziksel özellikleri ve kurutmaya bağlı olarak ortaya çıkan kusurların tespiti yapılmıştır. Elde edilen bulgular daha önce yapılan çalışmalar ile karşılaştırmak suretiyle tespitler yapılmıştır.

Bölüm 6'da çalışmada elde edilen veriler yorumlanarak, çalışmanın genel değerlendirmesi yapılmış olup elde edilen bulgular ışığında ileri çalışmalar için öneriler sunulmuştur.

2. AĞAÇ KURUTMA SÜRECİ

Bu bölümde ağaç malzemenin kurutulma gerekçeleri ve kurutmanın avantajları, kuruma ve kurutma kavramları, kurutma işleminde ağaç malzemede görülen kusurlar ve çözüm yöntemleri, kuruma olayını etkileyen faktörler ve bu faktörlerin kurutma sürecine etkileri ve ağacın dielektrik özellikleri ele alınmıştır.

2.1. AĞAÇ MALZEMENİN KURUTULMASI

Atmosfer, su buharı ile doygun halde olsa dahi, odunda kuruma kesimden hemen sonra başlar. Kurutma işleminde öncelikli olarak hücrelerde bulunan serbest su açığa çıkmakta, sonra lif doygunluğu rutubet noktasına (LDN) ulaşılmaktadır. Rutubet kaybının devam ettiği süreçte, LDN altındaki rutubet değerlerindeki değişmelerle malzemede daralmalar ve genişlemeler olmakta ve kullanım yerlerinde sakıncalar (birleşim yerlerinde açılma, raflarda kısalma, doğrama ve kapılarda dönme) meydana gelmektedir. Bu olumsuzlukları engelleyebilmek için ağaç malzemenin kullanılacağı yere uygun denge rutubetine gelene kadar kurutulması gerekmektedir [7], [62].

Malzemedeki nemin bulunduğu ortamdaki nemden fazla olduğu durumlarda ağacın içindeki suyun dışarı atılmasına kuruma, bu eylemde dışsal faktörlerin kontrollü olarak malzemenin istenilen nem doygunluğuna çeşitli sistemlerle getirilmesine ise kurutma denir [5], [14].

Ağaç malzemenin kurutulmasının bilinen çok sayıda avantajı bulunmaktadır. Ağacın kullanım aşamasında boyutsal değişikliklere uğramaması, çatlama ve yarılmanın engellenmesi yani ağacın stabil kalabilmesi; ağacın çevresel faktörlerden korunabilmesi, ağacın yüzeyinin yapılacak işlemlere hazır hale getirilebilmesi, üzerinde yapılacak yapıştırma, vernikleme, boyama, delme ve benzeri işlemlere uygun hale gelebilmesi ağacın tam anlamıyla kurutulmasıyla mümkündür [14], [56].

Ağaç malzemedeki fazla suyun giderilmesi ile ağırlığı azalır, böylece nakliye maliyetlerinde azalma görülebilir [6]. Düzgün kurutma, ağaçtaki büzülmeyi ve şişmeyi azaltırken, mukavemet özelliklerinin çoğunun yanı sıra elektriksel ve termal yalıtım

özellikleri de artar. Birçok bakteri ve mantar türü taze kesilmiş ağaç içerisinde yaşayabilir fakat iyi kurutulmuş (%22'den düşük) ağaç içerisinde yaşayamaz böylece uygulanan kurutma sıcaklığı ile ağaç malzeme sterilize edilebilir ve kereste ihracatında kolaylık sağlanabilir [4], [63].

2.2. KURUTMA SIRASINDA ODUN SU İLİŞKİLERİ

Odunun içerisindeki su, hücre çeperi içerisinde ve hücre boşluklarında bulunmaktadır. Hücre boşlukları içerisinde bulunan suya serbest su, hücre çeperi içerisinde miseller ve fibriller arasındaki boşluklarda bulunan suya ise hücre çeperine bağlı su veya higroskopik su adı verilmektedir. Ağaç malzemede serbest suyun hiç bulunmadığı fakat hücre çeperine bağlı suyun mümkün olan en yüksek miktarda bulunduğu rutubet haline lif doygunluğu rutubet hali (LDN) adı verilmektedir [64]. Kurutma eylemi gerçekleşirken LDN üstünde ve LDN altında olmak üzere, odunda malzeme içerisinde bulunan suyun dışarı atılması farklı şekillerde gerçekleşmektedir. Bu nedenle ağaç malzemelerde rutubet miktarı LDN'in altına düşmeye başladığında ağaç malzemede boyutsal değişimler başlamaktadır [65], [66].

2.2.1. Odun İçerisinde Suyun Kapiler Hareketi

LDN üstünde bulunan ağaç malzemedeki su, hücre boşluklarında (lümenlerde) serbest su konumunda bulunur. Hücre boşlukları birer kılcal boru (kapiler boru) olarak düşünülürse, serbest suyun hareketi kapiler kuvvetler aracılığı ile oluşur. Su ile dolu olan bir kılcal boruda suyun hareketi ise; kapilerin her iki ucunda yüzey gerilimleri nedeniyle meydana gelen çekim gücünün farklılığından ileri gelmektedir. Her iki dengeleme gücü farkı kapiler içerisindeki suyun hareketini sağlar. Bir kapilerin çapı daraldıkça çekim gücü artmaktadır. Bunun sonucu olarak, dar olan kapiler geniş olan kapilerden su çeker. Ayrıca ağaç malzeme içerisinde devamlı ve birbirine bağlı kılcal borular bulunduğu gibi hava ile dolu boşluklarda bulunmaktadır. Odun içerisinde oluşan buhar basıncı farkları ile buharlaşan su difüzyon yolu ile bu boşluklarda hareket ederek yoğunlaşma (kondense) meydana gelmektedir [66].

2.2.2. Difüzyon

LDN altında odun içerisinde bulunan bağlı suyun hareketi difüzyon ile gerçekleşmektedir. Bağlı su hem sıvı hem buhar halinde bulunabilmekle birlikte hem

geçitlerden hem de hücre çeperinin diğer kısımlarından difüzyon yolu ile hareket etmektedir. Difüzyon olayı suyun kapiler hareketine göre daha yavaş gerçekleşmektedir. Suyun, odun içerisinde hareket hızının en az olduğu yön yıllık halkalara teğet olduğu yöndür. Çünkü su, bu yönde daha fazla sayıda geçit aşmak zorundadır. Radyal yöndeki su hareketi ise, öz ışınlarının su geçirgenliğinin daha fazla olması nedeniyle teğet yöne nazaran daha hızlı gerçekleşmektedir. Su hareketinin en hızlı olduğu yön ise ağaç liflerine paralel yöndür. Ayrıca öz odunda suyun difüzyonu diri oduna göre daha yavaş gerçekleşir. Çünkü öz odunda su ileten hücre dokusu elemanları, öz odun maddeleri ve tüllerle tıkalı konumdadır. Bununla birlikte hücre çeperlerindeki geçitler diri oduna göre daha dardır. Odun permeabilitesi ise; ağaç malzeme içerisindeki su buharı difüzyonuna karşı gösterilen direnç olup odun içerisindeki kısmi buhar basıncı farkları, odun sıcaklığı, odun boyutları, ısı geçirgenliği ve malzeme yüzeyindeki hava hareket hızı ağaç malzeme içerisinde bulunan suyun hareket hızı üzerine etki eden diğer önemli faktörlerdir [5], [66].

2.3. KURUMA İŞLEMİNİ ETKİLEYEN FAKTÖRLER

Kuruma işlemi; malzeme ile ilgili oluşan faktörlerden (ağacın yapısı, özgül ağırlık, ahşapta su alışverişi, şekil değiştirme, parça biçimi ve kalınlığı), kurutma yöntemi ile ilgili faktörlerden (doğal kurutma, teknik kurutma) ve hava ile ilgili faktörlerden (havanın hareketi, havanın nemi, havanın sıcaklığı) etkilenmektedir [14].

2.3.1. Malzeme İle İlgili Faktörler

Bu faktörler arasında ağaç malzemenin fiziksel ve kimyasal özelliklerinden kaynaklanan faktörler bulunur. Bu faktörler ise; ağacın yapısı, özgül ağırlık, ahşapta su alışverişi, şekil değiştirme, parça biçimi ve kalınlığıdır.

2.3.1.1. *Ağacın Yapısı*

Ağaç; kök, gövde ve taçtan (dallar ve yapraklar) oluşan yapısı ile doğada yaşayan ve büyüyen, bitkiler grubuna ait bir canlı türüdür. Ağaç, büyümek için bir takım besinlere, havaya, ışığa ve suya ihtiyaç duyar [62], [67]. Ağaç, organik bir yapıya sahip olmakla birlikte diğer organik cisimlerde olduğu gibi ağaçların da özellikleri birbirinden farklıdır. Yani ağaç çok türlü (heterojen) bir yapıya sahiptir Ağaç türleri farklı olduğunda, organik yapısı birbirinden farklı iken, aynı tür ağaçların kendi içinde de

farklılıklar gözlemlenir. Bu farklılığın nedeni; bulunduğu bölge, yetişme ortamı ve kalıtsal yapı gibi etkenlerdir. Aynı ağaçtan alınan ahşap malzemelerin özelliklerinin farklılığı, alındığı bölgeye göre değişebilmektedir [68], [69].

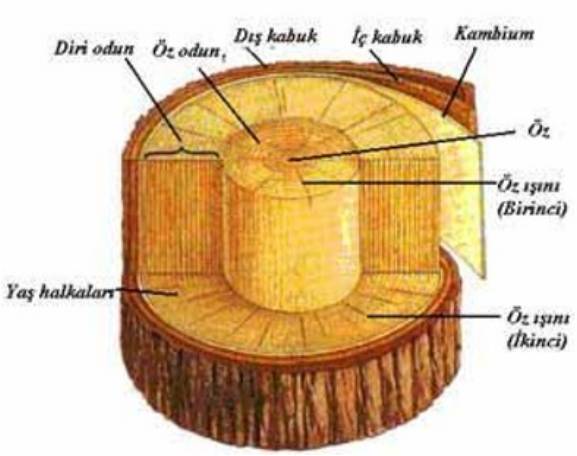
Gövdesinden enine kesilen bir ağaç incelenecek olursa en dışta kabuk, sonra yıllık halkaları meydana getiren hücre tabakaları ve en içte de öz kısmı görülür [70]. Bir ağacın gerçekten canlı olan kısmı, kabuğun altında bulunup odunun yüzey kısmında bulunan ince bir hücre tabakasıdır. Buna katman doku tabakası denir. Bu tabaka, ağacı geliştiren ve büyümesini sağlayan tabakadır [68], [69].

Ağaç kimyasal bileşim bakımından; %40-50 oranında selüloz, %20-35 oranında hemiselüloz, %20 oranında lignin ve %0-5 oranında organik maddelerden oluşur. Selüloz ağacın sert ve dayanıklı yapısını, hemiselüloz hücre duvarını güçlendirerek depo görevi yapan kısmını, lignin ise ağaca sertlik kazandıran yapıyı oluşturur [62],[69].

Bir odunun cinsini tayin etmekte ise ağaç malzemenin rengi, parlaklığı, kokusu, tadı, tekstürü, lif yapısı ve dış görünümü gibi birçok özellik kullanılıp bunlar ağacın fiziksel özelliğini oluştururlar [67], [69].

Ağacın iç yapısını inceleyebilmek için Şekil 2.1'de gösterildiği üzere kesitlerinin alınması gerekir. Ağacın türüne göre değişebilmekle beraber gövde boyunca uzanan, 1-3 mm çapında olan en iç kısmına öz denir. Özün çevresini oluşturan sertleşmiş gözeneklerden oluşan kısmına öz odun, ağacın topraktan aldığı suyu ve içinde bulunan besin maddelerinin iletimini sağlayan odundan daha yumuşak olan kısmına diri odun denir. Ağacın yaşamını ve büyümesini sağlayan ağacı kalınlaştıran diri odunla kabuk arasında bulunan sadece mikroskopla görülebilen kısma kambiyum tabakası, kambiyumun beslenmesini sağlayan ve kombiyumu saran kısma deri doku, deri dokuyu koruyan kısma iç kabuk, ağacın gövdesini saran ağacı dış etkilerden koruyan kısma ise dış kabuk denir. Besin maddelerinin yatay yönde hareket etmesini sağlayan kısım ise öz ışını olup ağacın kalınlaşarak büyümesini gösteren (ilkbahar ve sonbahar) yaş halkalarından oluşmaktadır [69],[70].

Ağaç malzeme esas olarak, bir ağacın gövdesi boyunca birbirine paralel düzenlenmiş içi boş, uzun, iğ şeklindeki hücrelerden oluşur [70]. Yapısı söz konusu olduğunda ise birbirine bağlı kılcal gözenekli yapılardan oluşan bir malzeme olarak muamele edilebilir. Ağaç malzemeye mikroskobik açıdan bakıldığında, oldukça gözenekli ve heterojen bir yapıya sahip olduğu görülebilmektedir [42].



Şekil 2.1. Ağacın iç yapısı [69].

İğne yapraklı odunun büyük bir kısmı traheidlerden müteşekkildir. Bu oran %90 civarıdır. İğne yapraklı ağaçlarda traheidler su iletimini sağlarken destek vazifesi de görürler [42]. İğne yapraklı ağaç türlerinde boyuna paranşim hücreleri az sayıdayken bu hücrelere bazen hiç rastlanmaya da bilir. Trahe ve skleranşim hücreleri ise mevcut değildir [68].

Yapraklı ağaçların odunu iğne yapraklılardan çok daha kompleks bir yapıya sahip olup, yapraklı ağaçların yapısı; boyuna olarak sıralanmış paranşim hücreleri, libriform lifleri, traheler ve traheidlerle lif traheidlerinden ibarettir. Yapraklı ağaçlarda bilhassa vertikal elemanlar çeşitli olup fazla sayıdadır. Traheler bazı ağaç türlerinde büyüklük itibarıyla fazla miktarda ve kafi derecede büyük olup çıplak gözle kolayca görülürler. Paranşim hücreleri çok sayıda bulunabilmekle beraber karakteristik olarak belirli bir tarzda dağılmıştır. Bazen büyük ve bariz kümeler halinde bulunurlar [71].

2.3.1.2. *Yoğunluk*

Yoğunluk, birim hacimdeki madde miktarıdır ve birimi gr/cm^3'tür. Yoğunluğun artması ağaç malzemenin kurumasını zorlaştırmakta, suyun difüzyon hızını düşürmektedir. Kalın çeperli ve dar lümenli ağır odunlar, ince çeperli ve geniş lümenli hafif odunlara kıyasla su akışkanlığına karşı direnç göstermektedir. Neticesinde sık dokulu ağır odunların kuruma süresi uzamaktadır [14]. Genelde halkalı, büyük traheli geniş yapraklı ağaç türlerinde özgül ağırlık artmakta ve kuruma zorlaşmakta, iğne yapraklı ağaç türlerinde ise özgül ağırlık azalmakta ve kuruma kolaylaşmaktadır [66].

2.3.1.3. *Ahşapta Su Alışverişi*

Tam kurumuş bir ağaç ya da bulunduğu ortamdaki denge rutubetinden nemi daha az seviyede olan bir ağaç; nemli bir ortama bırakılırsa, ortam ile ağaç arasında higroskopik denge kuruluncaya kadar bünyesine su alır. Su alması eylemine absorpsiyon, tam tersi durumda ise bünyesinden su vermesi işlemine desorpsiyon denir [14],[66].

2.3.1.4. *Şekil Değiştirme*

Ağaç malzeme ile ortam arasında rutubet dengesine bağlı olarak tam kuru rutubet hali ile lif doygunluğu rutubet hali arasında ağaç malzemenin bünyesine su alması ile hacmi genişlemekte, bünyesinden su vermesi ile hacmi daralmaktadır. Ağaç malzemenin bu genişleme ve daralma olayına ise şekil değiştirme denilmekle birlikte günlük hayatta bu olaya "ahşabın çalışması" denir [14],[66].

2.3.1.5. *Parça Biçimi ve Kalınlığı*

Parça biçimi, kurutulacak kerestenin görselleştirilmiş halidir. Kenarlı ahşap malzeme rutubet çıkışını azaltırken, kuruma süresini uzatmaktadır ve parça kalınlığı arttıkça kuruma süresi de uzamaktadır. Bu yüzden kurutma programlarını parça kalınlıklarına göre düzenleyip, kalınlık arttıkça kurutma süresi uzatılmalıdır [14],[66].

2.3.2. Kurutma Yöntemi İle İlgili Faktörler

Kurutma işlemi, doğal kurutma ve teknik kurutma olmak üzere iki farklı yöntem ile yapılmaktadır.

Ağaç malzemenin doğrudan açıkta veya sundurmalar altında istif edilerek doğal iklim şartları altında kurutulmasına doğal kurutma denilmektedir. Şekil 2.2'de bir örneği gösterilmiş olup ortam şartlarını kontrol altına almak zor olduğundan doğal kurutmanın sağlıklı bir şekilde gerçekleştirilebilmesi için istifleme tekniklerinden yararlanılması gerekmektedir [62], [66].

Doğal kurutmanın, maliyetinin düşük olması avantajıyken, kuruma süresinin uzaması, eşit kurutmanın sağlanamaması, malzemede çatlama ve benzeri kusurların oluşması, ortamdaki parazitlerin ve diğer canlıların zararlı etkilerine uğraması dezavantajıdır [14]. Uzun süre açıkta bekletme sonucu ortaya çıkan değer kayıpları yüksek olup ayrıca doğal kurutmada piyasa isteklerine zamanında cevap vermek mümkün olmamaktadır [66].



Şekil 2.2. Doğal kurutma örneği [72].

Kurutma şeklinin insan gücü ve beyniyle oluşturulan makinelerle sıcaklığın, bağıl nemin ve hava hareketlerinin kontrol altına alınarak gerçekleştirildiği kurutma şekline teknik kurutma denir [14]. Doğal kurutmada karşımıza çıkan olumsuzlukların hiçbirini bu kurutma şeklinde yaşamayız. Şekil 2.3'te bir örneği gösterilen teknik kurutma eylemi kontrollü olduğundan istenilen rutubet değerinde daha kısa sürede ve en az kayıpla malzeme kurutulabilir [66].



Şekil 2.3. Teknik kurutma fırını örneği [67].

2.3.3. Hava İle İlgili Faktörler

Havanın sıcaklığı, havanın nemi ve hava hareketi kurutmayı etkileyen diğer faktörler arasındadır.

2.3.3.1. *Havanın Sıcaklığı*

Kurutma işleminde malzemenin maruz kaldığı sıcaklık arttıkça içerisindeki suyun akışı hızlanmakta ve kurutma süresi kısalmaktadır. Teknik kurutmada en yüksek sıcaklığı kullanırsak verimli bir kurutma gerçekleşmiş olur ancak aşırı sıcaklık uygulaması; hücre çökmeleri, reçine sızmaları, renk değişimleri ve çatlaklar gibi kurutma kusurlarına yol açmaktadır [5].

2.3.3.2. *Havanın Hareketi*

Kurutma işlemi gerek teknik kurutmada gerekse doğal kurutmada ısının taşınması ve rutubetin taşınmasından dolayı sürekli hava hareketine ihtiyaç duyar. Hava, ısı taşıyıcı olarak ağaç malzemeye uygulandığında, malzemedeki suyun ısınmasını sağlar ve iç kısımlardan yüzeye su hareketini hızlandırır. Rutubet taşıyıcı olarak ise ağaç malzemenin yüzeye çıkan nemini uzaklaştırırken yüzey kısmındaki nem alma kapasitesini artırarak havanın gelmesini sağlar [5].

Hızlı ve homojen bir kurutma olabilmesi için fırın içindeki ağaç malzemenin çevresinde ve istif katları arasında eşit dağılımda bir hava akımının sağlanması gerekir. Kurutma fırınlarında fanlar aracılığıyla malzemeye eşit dağılmış ve istenilen hızda uygulanan hava akımı sağlamak mümkündür [5].

Hava hareket hızı arttıkça kuruma hızı artar. Hava hareket hızı gereğinden fazla yükselir ise kurutma kusurlarının oluşma ihtimali de artmaktadır. Bu yüzden hava akım hızının belirli değerler arasında olması gerekmektedir [66].

2.3.3.3. *Havanın Nemi*

Ağaç malzemeyi yalnızca sıcak ve kuru hava ile kurutmak mümkün olmamakla birlikte hava içinde her zaman belli miktarda nem bulunmalıdır. Havanın nemi iki şekilde ifade edilir. Bunlar mutlak ve bağıl nemdir. Mutlak nem, 1 m3 havada bulunan su buharı miktarı olup kurutma sürecinde mühim olan ise bağıl nemdir. 1 m3 havadaki su buharı değerinin, aynı sıcaklıktaki 1 m3 havanın alabileceği en yüksek su buharı miktarına oranı ise bağıl nemi ifade eder. Bağıl nem ise psikometre ile ölçülmektedir [5].

2.4. KURUTMA KUSURLARI

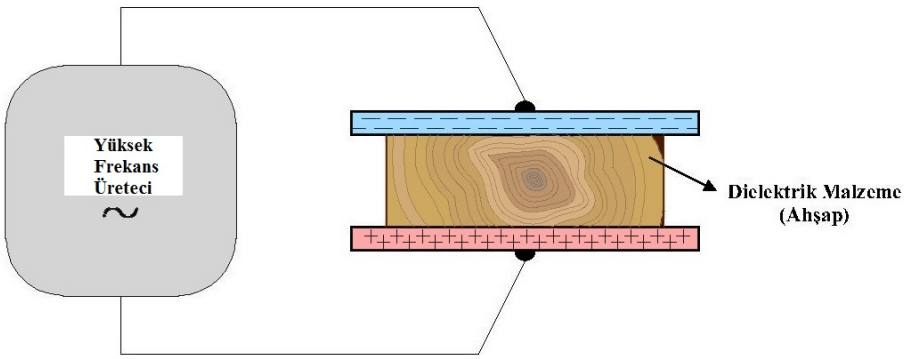
Kurutma sırasında, ağaç malzemenin doğal yapısından kaynaklı kurutma kusurları meydana gelmektedir. Bunlar; ağaç malzemenin kalitesini düşüren çatlaklar,

kabuklaşma, hücre çökmeleri, biçim ve renk değişmeleri, reçine sızmaları gibi kusurlardır. Meydana gelen bu kusurları azaltmak, kurutma makinelerinin kusursuz oluşturulması, kereste istifinin tekniğine uygun olarak yapılması, kurutma yönteminin ağaç malzemenin yapı ve özelliklerine uygun olarak seçilmesi ile mümkündür. Böylece kurutma açısından istenilen değerlere ulaşılabilir [7], [14].

2.5. AHŞABIN DİELEKTRİK ÖZELLİKLERİ

Ahşabın elektrik akımına verdiği tepkiler (doğru akım ve düşük frekanslı alternatif akım) 20. yüzyılın başlarından itibaren incelenmeye başlanmıştır. Ahşabın yüksek frekanslı alternatif akıma verdiği tepkiler sonucu ahşabın özellikleri, 1930'ların başlarında yüksek frekanslı güç kaynaklarının geliştirilmesiyle başlamıştır [73].

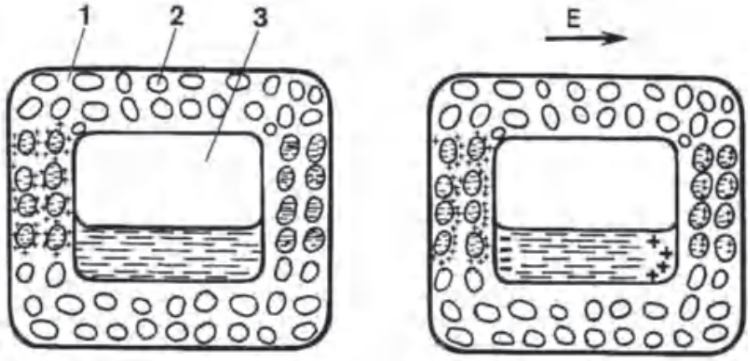
Dielektrik ısıtma terimi MD ve RF yöntemlerini kapsamaktadır [6]. RF ve MD yöntemleri, ağacın dielektrik özelliğinden yararlanılarak alternatif akımın hareketiyle ortaya çıkan, yüksek frekanslarda odunların kurutulması işlemidir. Dielektrik ısıtma için kullanılan elektromanyetik radyasyonun elektriksel frekansları RF için 1-100 MHz arasında iken MD için 300 MHz'den 300 GHz'e kadar olduğu kabul edilmektedir [6], [21],[74]. YF ile ısıtma işlemi için sık kullanılan paralel plakalı YF sistemi, Şekil 2.4'te görüldüğü üzere iki paralel levha arasına yerleştirilen dielektrik (ahşap) özellikli malzemenin maruz kaldığı elektromanyetik ve elektriksel alan enerjisini absorbe etmesi ve oluşan ısının sadece malzemenin kendi içinde üretilmesi esasına dayanmaktadır. Isı üretme mekanizması ise temel olarak polarizasyon etkilerine dayanmaktadır [56].



Şekil 2.4. YF Isıtma sistemi şematik gösterimi.

Dielektrik malzemeler yapısında serbest elektron bulunmayan, yalıtkan malzemeler olup uygulanan elektrik alanından etkilenirler. Hücre duvarının elektrik alanı

uygulanmamış halinde oluşan elektron dağılımı ve elektriksel alan uygulandığında elektron ve atomların yer değiştirmesi Şekil 2.5'te şematize edilmiştir. Elektriksel alan uygulanmamışken elektronlar hücre boşluğu çevresinde homojen olarak dağılmış konumdadırlar. Elektriksel alan uygulanınca eksi yüklü elektronlar alanın artı elektroduna, artı yüklü çekirdek ise eksi elektroda doğru kayma yapmış ve dipol momenti kazanmışlardır [73].



Şekil 2.5. Harici bir elektrik alanı yokken ve uygulandıktan sonra odun hücre kesitinde oluşan polarizasyon, 1; hücre duvarı, 2; mikrofiber tüp, 3;hücre boşluğu [73].

Ahşap gibi bir dielektrik malzemeye bir elektrik alanı uygulandığında, maddenin atomlarındaki ve moleküllerindeki pozitif ve negatif yüklerin yük merkezlerinin kayması ve yer değiştirmesi olayına kutuplaşma veya polarizasyon adı verilir [56]. Bir dış elektrik alan altında elektrik dipolleri elektrik alan ile aynı yönde yönelmeye zorlanırlar. Dielektrik malzemelerin dış elektrik alana verdiği bu tepki malzemenin kutuplanabilirliği ile ölçülür ve bu tepki kutuplanma (polarizasyon) ($P(E)=\varepsilon_o \chi E$) vektörü ile ifade edilir [21],[73].

Dielektrik malzeme olan ahşapta genel anlamda polarizasyon (kutuplanma) mekanizmaları mevcut olup bunlar; elektronik, dipolar (yönelimsel), iyonik, elektrolitik ve ara yüzey (sınır-yük veya yüzeyler arası) polarizasyonlarıdır [73]. Plakalar arasında bulunan dielektrik malzemeye değişken elektrik alanı uygulandığında, dielektrik malzemede bulunan daimi ve indüklenmiş dipoller elektrik alanın yönünü takip etmeye başlarlar. Bu sırada her bir polarizasyon mekanizmasının oluşması veya sonlanması için yeterli bir zamana ihtiyaç duyarlar. Bu zamana gevşeme zamanı, frekansa ise gevşeme frekansı denir [75]. Haliyle her bir polarizasyon mekanizmasının dış elektrik alanın frekansını takip edebileceği belli zaman aralıkları söz konusudur. Düşük frekanslarda tüm polarizasyon mekanizmaları katkı sağlarken, yüksek frekanslarda az sayıda

polarizasyon mekanizması malzemenin toplam polarizasyonuna katkı sağlar. Malzemenin dielektrik sabiti ise dış elektrik alanın frekansına bağlı olarak değişen kutuplanmaya bağlıdır. Artan kutuplanmayla dielektrik sabiti (ε') de artmaktadır. Dış elektrik alanın frekansı gevşeme frekansına yaklaştıkça polarizasyonun tepkisi alanın gerisinde kalır. Bu geride kalma oranı fazla ise dielektrik malzeme içinde alan enerjisi iç sürtünme yoluyla güç kaybına uğrar ve malzemenin ısınmasına neden olur.

Bu güç kaybı, elektrik alanın büyüklüğü ile elektrik alan ile polarizasyon vektörü arasındaki faz açısının (δ) tanjantıyla ($tan\delta$) orantılıdır. Kayıp tanjantı ile dielektrik sabitinin çarpımı ise dielektrik kayıp ($\varepsilon'' = \varepsilon' tan\delta$) olarak adlandırılır. Ahşap içindeki ısı, su moleküllerinin dipolar rotasyonunda uygulanan elektriksel alanın hızla değişen polaritesinde kendilerini yönlendirmeye çalıştıkları zaman üretilir. Bu süreçte birim hacim başına ortaya çıkan güç ise eşitlik 2.1'deki gibi ifade edilir [17], [41], [68], [74].

$$P = kE^2 f \varepsilon' tan\delta = kE^2 f \varepsilon'' \quad (2.1)$$

Burada; k birim sistemine bağlı sabit, E elektrik alan (V/m), f frekans (Hz),

ε' dielektrik sabiti, ε'' dielektrik kayıp olarak ifade edilmektedir.

Ahşaba uygulanan elektriksel alan sonucu dipoller, hızla değişen polariteden etkilenirler ve rastgele sıralanmış olan yükler zıt yönde hareket ederler [68]. Elektriksel alanda frekansa bağlı olarak saniyede milyonlarca kez olan bu yön değişimi dipollerinde benzer şekilde kutuplanmasına ve gevşemesine sebep olur. Bu değişim, elektriksel alan enerjisinden malzeme içerisinde depolanan potansiyel enerjiye ve daha sonra da malzemede rastgele kinetik veya termal enerji dönüşümüne neden olur [74]. Enerji direkt ahşap içerisinde dağılmış su moleküllerine aktarılır, böylece ısıtma tüm alana yayılır ve ahşabın kayıp faktörü nem ile arttığından nem dengelenmesi sağlanabilir. Kurutma hızı, basınç ve sıcaklık gradyanlarının aynı yönde (içeriden dışarıya) olmasından dolayı önemli ölçüde artar [12], [56].

2.5.1. Odunun Dielektrik Özelliklerini Etkileyen Faktörler

Odunun dielektrik özellikleri odunun elde edildiği ağaç türüne göre değişse de, özgül ağırlık, sıcaklık, lif yönü, rutubet miktarı ve alan frekansı gibi faktörlerden etkilenir. Elektrik alan şiddetinin ise odunun dielektrik özellikleri üzerinde önemli ölçüde bir etkisi yoktur [73].

2.5.1.1. *Nemli Odunun Dielektrik Özellikleri*

Ahşap, higroskopik bir malzemedir. Fiziksel ve mekanik özellikleri nem içeriğinden etkilenir. Ahşapta bulunan nem, bağlı su veya serbest su şeklindedir. Bağlı su, hücre çeperini içeren selüloz ve hemiselüloz gibi higroskopik polimerler tarafından fiziksel olarak adsorbe edilir. Serbest su ise ağaç içindeki lümenlerde mevcuttur. Yüksek frekanslı elektrik alanı altında, bağlı ve serbest suyun kendi dielektrik özelliklerini değiştirdiği ve nemli ahşabın dielektrik özelliklerini etkilediği anlaşılır [56]. Nem, dielektrik özellikleri etkileyen en önemli parametre olarak karşımıza çıkar ve ahşabın dielektrik sabiti ve kayıp faktörü genellikle nem içeriği arttıkça artış gösterir [42].

Ahşapta bulunan nemin mutlak değeri hayli yüksek değerlere ulaşabilir. Serbest nem, ağacın dielektrik özelliklerini etkileyerek adsorpsiyon ve kılcal yoğunlaşma sürecinde odunla etkileşime girer. Etkileşimde hem kendi dielektrik özelliklerini değiştirir hem de odunun dielektrik özelliklerini değiştirir. Hücre boşluklarını dolduran serbest su aynı zamanda ahşap ve elektromanyetik alan arasındaki etkileşimin ilişkisini de değiştirir. Bu etkileşim ahşabın dielektrik özelliklerini değiştirir, özelliklede suyun anormal derecede yüksek dielektrik parametrelere sahip olduğu frekanslarda değişiklik gerçekleşir [73].

2.5.1.2. *Fırın Kurusu Odunun Dielektrik Özellikleri*

Fırın kurusu odun, 103 ± 2°C ’de sabit bir sıcaklıkta eşit bir kütleye kadar kurutulmuş odun demektir. Araştırmalar, fırın kurusu odunun dielektrik parametrelerinin, odun yoğunluğundan, sıcaklığından, dış alan frekansından ve vektörün oryantasyonundan, liflerin yönüne göre önemli ölçüde etkilendiğini göstermiştir. Bu etkilenme ağacın türüne göre değişmektedir [73].

2.5.1.3. *Odunun Dielektrik Özelliklerinin Temel Özellikleri*

Alternatif elektromanyetik alan ve odun arasındaki etkileşim, karmaşık bir yapıya sahip olan ağaç malzeme özelliklerinin açıklanmasına yardımcı olur. Elektromanyetik alan, elektrik ve manyetik alan bileşenlerinden oluşur. Bu bileşenlerin ahşap üzerindeki etkisi oldukça değişiktir. Manyetik alanın ahşap üzerindeki etkisi önemsizdir ve pratik amaçlar için dikkate alınmaz. Elektrik alanının odun üzerindeki etkisi ise, elektrik akımlarının oluşmasına neden olduğundan çok güçlüdür [76].

2.5.1.4. *Odunun Dielektrik Özellikleri Üzerine Frekansın Etkisi*

Odunda elektron, iyon, dipol relaksasyon, iyon telaksasyon ve elektroliz kutuplaşma olmak üzere 5 tip kutuplaşma oluşur. Oduna elektrik alanı uygulandıktan sonra her bir tür kutuplaşmanın oluşma süresi farklı olduğundan kutuplaşmaların etkisi de değişir. Yani frekansa bağlı olarak birkaç kutuplaşma çok da etkili değildir. Odunda elektroliz ve iyon relaksasyon kutuplaşması düşük frekanslarda gerçekleşir. Bu tür kutuplaşmalar, büyük relaksasyon süresi sabiti değerleri ile karakterize edilirler. Ara yüzey kutuplaşması ve dipol relaksasyon kutuplaşması 10^4 Hz frekansın üzerinde, odunun dielektrik özelliklerine etki etmektedir. Yüksek frekans ve mikrodalga frekansla kurutmanın gerçekleştirildiği 10^5-10^{10} Hz frekans sınırlarında dipol ve ara yüzey kutuplaşması hakim olup elektron, iyon ve elektroliz kutuplaşmasının etkisi önemsenmez [77].

Fırında kuru odun için çok düşük frekans 10 Hz ve çok yüksek frekans 10^5 Hz'dir. Orta frekanslarda, dielektrik sabiti bir dağılma yaşar ve dielektrik kayıpları gevşeme sıklığındaki pik kaybı ile fırında kuru odun durumunda 10 MHz olur. James (1975) tarafından yapılan çalışmalardan elde edilen deneysel veriler, nem içeriği %12'nin altına düştüğünde dielektrik sabitinde küçük bir düşüş olduğunu göstermiştir. Daha yüksek nem içeriğinde, tamamen ıslatılmış odun için dielektrik sabitinin en yüksek değeri yaklaşık 20 Hz değerindedir [56], [78].

2.5.1.5. *Odunun Dielektrik Özellikleri Üzerine Sıcaklığın Etkisi*

Sıcaklık arttıkça relaksasyon süresi azaldığından odunun dielektrik özellikleri büyük oranda etkilenir. Ayrıca yüksek sıcaklık moleküler bağ kuvvetlerinin etkisini (viskoziteyi) azaltır. Sıcaklıkla birlikte dielektrik sabitindeki artış, oduna bağlı bulunan dipol gruplarının yani amorf bölgedeki metilol gruplarının varlığı ile açıklanır [79]. Bununla birlikte, artan sıcaklıkla dielektrik sabitinin arttığını ve sıcaklığın dielektrik özellikler üzerindeki etkisinin ahşabın nem içeriği yüksek olduğunda daha belirgin olduğunu yapılan çalışmalar kanıtlamaktadır [56],[80].

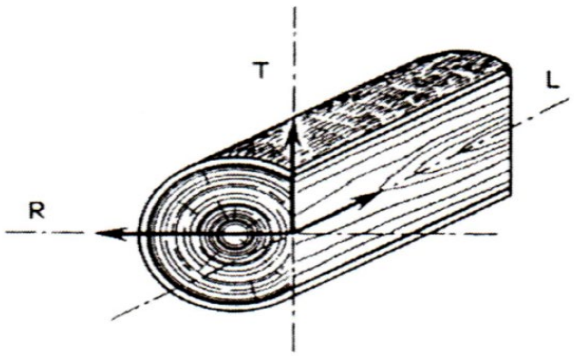
Düşük frekanslarda rutubetli odunun dielektrik sabitinin sıcaklıkla birlikte arttığı ve kutuplaşma aktivasyon enerjisinin rutubet miktarının artışıyla orantılı olarak artış gösterdiği belirtilmektedir [81]. Yine düşük frekanslarda hem selüloz moleküllerinin sabit dipol momenti hem de ara yüzey kutuplaşması termal enerjiyle aktive edilir [82].

2.5.1.6. *Odunun Dielektrik Özellikleri Üzerine Elektrik Alan Şiddetinin Etkisi*

Odun üzerinde elektrik alan şiddetinin etkisinin çok küçük olmasından dolayı konuyla ilgili henüz ayrıntılı araştırma yapılmamıştır. Bu konu üzerinde çalışılması gereken bir alandır [56], [73].

2.5.1.7. *Odunun Heterojen Yapısının Dielektrik Özellikler Üzerine Etkisi*

Ahşap sadece higroskopik bir malzeme değildir, aynı zamanda anizotroptur. Odun yıllık halkalarla bağlantılı olarak Şekil 2.6'da gösterildiği üzere teğet (T), radyal (R) ve liflere paralel (L) yön olmak üzere üç yapısal simetri düzlemi içindedir [77]. Nem içeriği, yoğunluk, sıcaklık ve frekans gibi koşullar aynı olduğunda, üç simetri yönündeki dielektrik özellikler farklılaşır. Bunun sonucunda dielektrik sabitinin büyüklüğünün genel olarak sırayla, liflere paralel, radyal ve teğet yönlerde azaldığı bilinmektedir [56].



Şekil 2.6. Odunun lif yönleri. L, lillere paralel yön; R, radyal yön; T, teğet yön [77].

Tam kuru ve rutubetli odunun alan frekansı ve odun yoğunluğu aynı olduğunda liflere paralel yöndeki dielektrik özellikleri liflere dik yöndekinden genellikle daha büyüktür [83]. Teğet ve radyal yön arasındaki fark daha az belirgindir ve odunun türüne, rutubet miktarına göre değişmektedir [84]. Ayrıca frekans arttıkça aradaki fark azalmaktadır [85], [86].

2.5.1.8. *Odunun Dielektrik Özellikleri Üzerine Rutubet Miktarının Etkisi*

Odunun dielektrik özellikleri üzerine rutubet miktarının etkisi dört rutubet bölgesi dikkate alınarak incelenir. Bunlar; %0-5 (mono moleküler) rutubet miktarı, %5'den %18'e kadar (adsorpsiyon) rutubet miktarı, %18'den LDN'ye kadar rutubet miktarı (kapiler-kondense rutubet) ve LDN'nin üzerinde rutubet miktarı (serbest rutubet) olarak tanımlanır. Odun ile rutubet arasındaki her farklı tip bağ, rutubetli odunun elektrik özellikleri üzerinde kendine özgü bir etkiye sahiptir [77].

Odunun rutubet bölgeleri ile ilişkisi rutubet bölgesi türüne göre değişiklik gösterir. Netice olarak her rutubet bölgesi odunun dielektrik özellikleri üzerinde etkilidir fakat odunun dielektrik özellikleri üzerinde rutubet miktarının etkisinin düşük olduğu görülmektedir [81], [83], [87].

2.5.1.9. *Odunun Dielektrik Özellikleri Üzerine Yoğunluğun ve Ağaç Türünün Etkisi*

Odun çeşitlerinin dielektrik özellikleri arasında gözlenen farklılıklar ağacın türü ile ilgili karakteristikleriyle ilişkilidir. Farklılığın en belirleyici özelliği ise odunun yoğunluğu ve permeabilitesini belirleyen sorpsiyon kapasitesiyken aynı zamanda her bir ağacın genel yapısal özellikleri olduğunu unutmamak gerekir. Ayrıca odun türlerinin dielektrik davranışları arasındaki farklılığın sebebi odunun kimyasal içeriğinden kaynaklanabilmektedir. Bu zamana kadar yapılan çalışmalarda her ağaç türünün dielektrik özelliklerinin farklı olduğu fakat bu farklılığın odunun yoğunluğundan kaynaklandığı belirtilmektedir. Yoğunluk ve dielektrik sabiti arasında pozitif bir doğrusal ilişki olduğu ve nem içeriği arttıkça bu ilişkinin daha belirginleştiği görülmektedir. Odun yoğunluğunun kayıp faktörü üzerindeki etkisinin nem içeriğine bağlı olduğu görülmüştür. Fakat diğer koşullar aynı olduğunda odunun dielektrik özelliklerini belirleyen asıl etmen tam kuru özgül ağırlıktır [77], [83].

3. AĞAÇ KURUTMA YÖNTEMLERİ

Ahşap, insanın varoluşundan bu yana mevcut olup insanoğlunun gelişiminin tüm aşamalarına eşlik etmiştir. İlkel insanlar ahşabı yakıt, silah ve sığınaklarını üretmek için kullanmışlardır. Ahşabın çeşitli nesneler üretmek için kullanılmadan önce kurutulması gerekliliği ise erkenden fark edilmiştir [4].

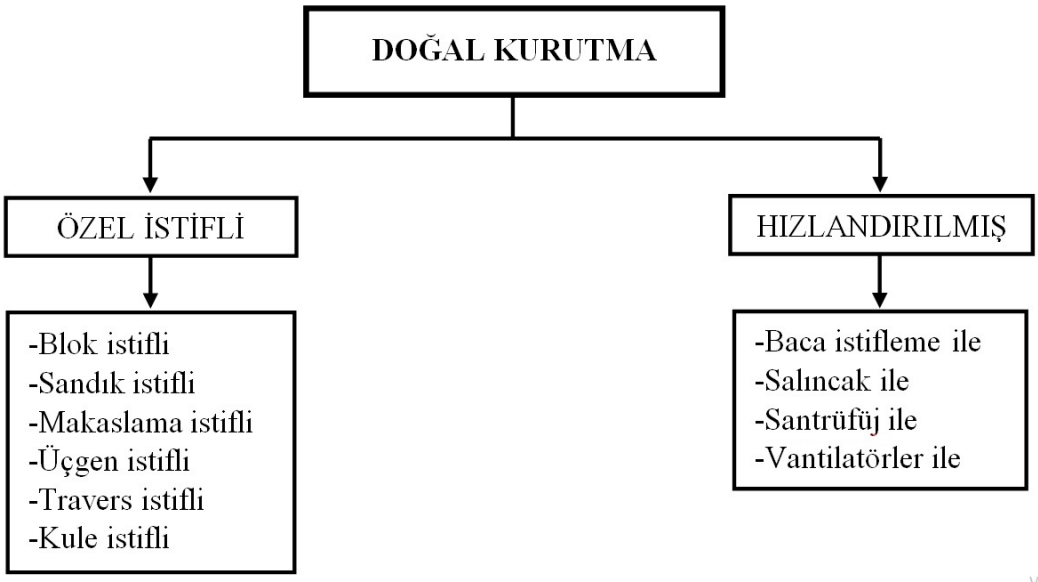
Kurutma işleminde ise pek çok yöntem geliştirilmiş olmasına rağmen sanayide birkaç yöntem ön plana çıkmıştır [8]. Birkaç yönteme bağlı kalmanın sebebi ise, en fazla enerjinin odunun kurutulması aşamasında sarf edilmesidir. Artan maliyetler göz önüne alındığında, kurutma yöntemlerini doğal ve teknik kurutma üzere iki ana grupta incelemek mümkündür [66].

3.1. DOĞAL KURUTMA

Doğal kurutma, kerestenin açık hava şartlarında denge nemine ulaşıncaya kadar bekletilmesidir. Doğal kurutmada keresteler; uygun olarak seçilmiş bir yerde, tertiplenmiş depolarda, yöntemine uygun oluşturulmuş istiflerle, açıkta veya sundurmalar altında kurutulmaktadır. Bu kurutma yöntemi ile ağaç malzemenin rutubeti en fazla %12-15'e kadar düşürülebilmektedir [14], [66].

Doğal kurutmada, kurutmayı olumsuz etkileyen pek çok değişken vardır. Kontrol edilemeyen hava şartları dolayısıyla kurutma istenilen düzeyde olmayıp çeşitli kurutma kusurlarının oluşma tehlikesi bulunmaktadır. Kusurlar arasında kerestede yüzey, iç çatlakları ve çarpılmayı sayabiliriz. Ayrıca keresteler, kuruma esnasında mantar ve böcek istilalarına maruz kalabilir. Bir diğer olumsuz durum da kurutma süresinin çok uzamasıdır (2-24 ay). Kurutma süresi havanın sıcaklığına, rüzgar hızına, bağıl nemine ve kurutmaya başlanan mevsime göre değişebilmektedir [66].

Doğal kurutmayı da kendi arasında aşağıda Şekil 3.1'de gösterildiği üzere sınıflandırmak mümkündür [88].

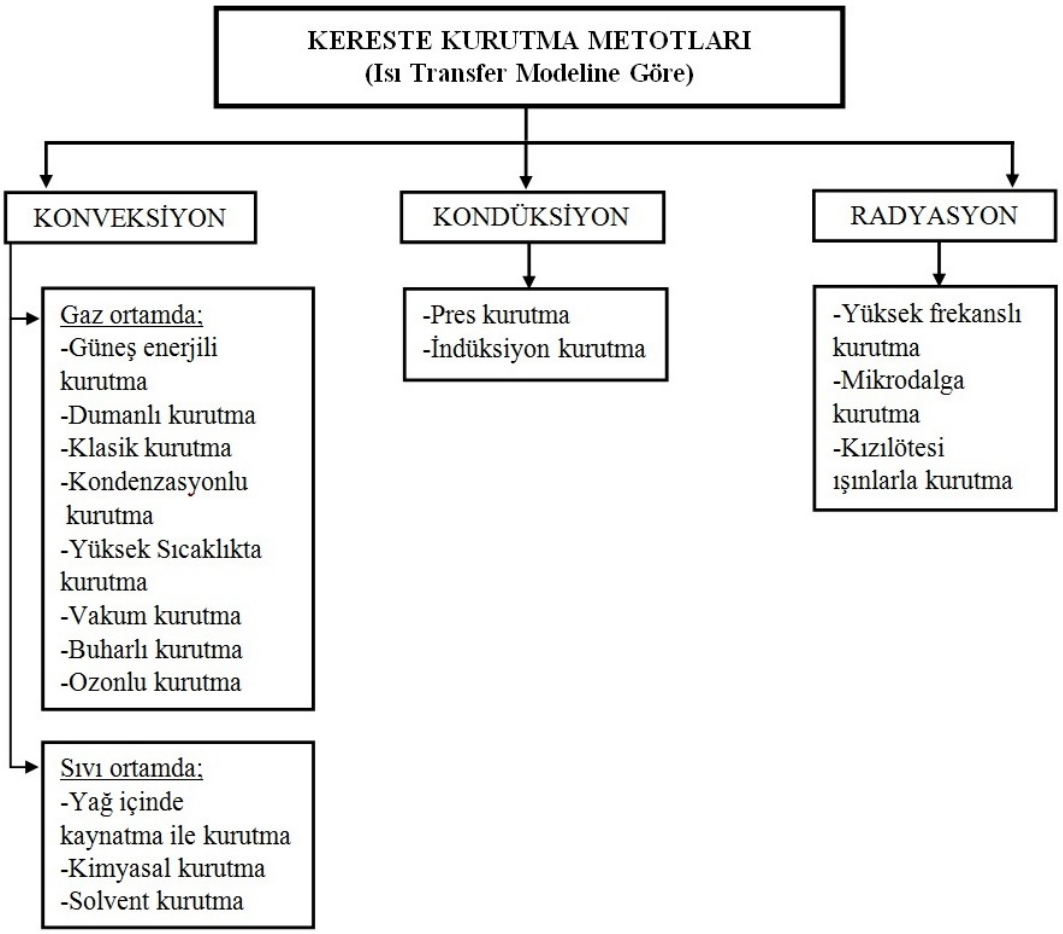


Şekil 3.1. Ağaç malzeme doğal kurutma yöntemleri [88].

3.2. TEKNİK KURUTMA

Teknik kurutma, kereste ya da kullanılan ürünün neminin kuruma son değerlerine ulaşıncaya kadar kontrollü olarak nemin azaltılması için yapılan işlemler olup, bu kurutma sistemleri; ısıtma, soğutma, nem alma gibi birimlerden oluşur [89].

Teknik kurutma işlemleri; kurutucu maddenin şekli, sıcaklığı, basıncı veya ısı transferi gibi belirli kriterlere göre yapılmakta ve uygulanan yönteme göre isimlendirilmektedirler. Kurutma metotları, ısı transferine (kondüksiyon, konveksiyon ve radyasyon) göre sınıflandırıldığında, Şekil 3.2'de gösterildiği gibi karşımıza çıkmaktadır [8].



Şekil 3.2. Isı transfer şekline göre kereste kurutma metotları [8].

3.2.1. Güneş Enerjili Kurutma

Güneş enerjili sistemlerde, yenilenebilir enerji kullanılarak sera tipi ve kolektörlü olmak üzere iki çeşit güneş fırını ile kurutma sağlanabilir. Bu fırınlar nispeten küçük, basit ve pahalı olmayan fırınlar olduğundan bu teknoloji küçük boyuttaki işletmeler için elverişlidir. Güneş enerjili fırınlar direkt güneş enerjisini toplayarak ya da endirekt güneş enerjisini toplayarak işletilebilirler [89]. Enerji kaynağının ücretsiz olması nedeniyle daha çok uygun iklime sahip ülkelerde kullanım alanı bulunmaktadır [68].

3.2.2. Klasik Kurutma

Bu metotta kurutma, ağaç malzemede bulunan rutubetin ağaç yüzeyinden 100°C'nin altındaki sıcaklıklarda hava ve su buharı karışımı yardımı ile uzaklaştırılmasıdır. Bu metoda klasik kurutma denilmesinin nedeni ağaç malzemenin kurutulmasında uzun süredir kullanılan ve en çok uygulanan yöntem olmasıdır. Bu metotta kurutma esnasında fırının çevresinden sıcaklığı düşük taze hava alınmakta dışarıya rutubetli ve sıcak hava verilmektedir [66].

3.2.3. Kondenzasyonlu Kurutma

Sıcak havanın, kendisinden daha soğuk bir yüzeyden geçirilmesi ile taşıdığı suyun yoğunlaştırılması prensibine dayanır. Kondenzasyon cihazından geçirilen hava fırın içinde dolanıma tabi tutularak dışarıya atılmamakta, bu da bu yöntemin klasik kurutma ile arasındaki farkı oluşturmaktadır. Bu kurutma yönteminde en önemli olay 54°C'ye kadar çıkan düşük kurutma sıcaklıklarının uygulanması ve enerji kaynağı olarak elektriğin kullanılmasıdır [66].

3.2.4. Yüksek Sıcaklıklarda Kurutma

Bu metotta kurutma ortamı olarak saf buhar veya hava katılımı olan kızgın buhar kullanılmaktadır. Ağaç malzemedeki su, sıcaklığı 100°C'nin üzerinde bulunan ortamda buharlaşarak ayrılmaktadır. Ağaçtaki rutubet hareketi yüksek buhar difüzyonu ile gerçekleşmektedir. Buharlaşma önce kerestenin yüzeyinden başlamaktadır. Kaynama noktası aşıldıktan sonra kerestenin iç kısımlarında bulunan rutubet de buharlaşmakta ve basınç yaparak dışarıya doğru hareket etmektedir. Kaynama noktası geçildikten sonra difüzyon direnci küçüldüğü için kuruma olayı hızlanmaktadır. Böylece toplam kurutma süresi kısalmaktadır [62],[66].

3.2.5. Vakumlu Kurutma

Vakumlu kurutma, basıncın azalması ile suyun kaynama sıcaklığının düşmesi esasına dayanmaktadır. Isıtılmış ağaç malzemenin bulunduğu ortama vakum uygulandığında, ağaç malzeme içerisindeki suyun buhar basıncı çevresindeki havanın basıncından yüksektir. Vakum uygulandığında odundaki su çok çabuk buharlaşmakta ve odun içerisindeki buhar basıncı ile ortamdaki havanın buhar basıncı arasında bir denge oluşturmak için su buharı yüzeylere doğru hızlı bir şekilde hareket etmektedir [66].

Bu yöntemin avantajı, serbest suyun 100°C altındaki sıcaklıklarda hızla buharlaşma ve uzaklaştırma kabiliyetidir. Vakum fırınları, son yirmi yıldır ticari olarak kullanılmakta olup Avrupa'da kurutulması zor ve yüksek kaliteli sert ağaçların hızlı ve ekonomik bir şekilde kurutulması için standart bir uygulama olarak kabul edilmektedir [90],[91].

3.2.6. Buharlı Kurutma

Buharla kurutma, doyma sıcaklığının (100°C) üstünde olan saf buhar ortamında kurutma prensibine dayanır. Ahşap sıcak organik bir buhara maruz bırakılarak odunda

bulunan su, buharın içinde buharlaşır. Odunda ve ortamda bulunan buhar kurutma odasından çıkarılır, yoğunlaştırılır ve yerçekimi ile birbirinden ayrılır [6], [91].

3.2.7. Yağ İçinde Kaynatma ile Kurutma

Yağ içinde kaynatma yöntemi genel olarak buharda kurutmaya benzer. Odunlar, kaynama noktası sudan yüksek olan organik maddeler içerisine yüksek sıcaklıklarda iken daldırılmakta ve böylece odundaki fazla su kısa sürede buharlaştırılmaktadır. Ayrıca vakum uygulamasıyla işlem süresi kısaltılabilmektedir. Yağ içinde kaynatma işleminde çeşitli petrol ürünleri ve yağların kullanılması mümkün olmakla birlikte kurutucu madde olarak daha çok kreozot kullanılmaktadır [14],[92].

3.2.8. Kimyasal Kurutma

Bu yöntem, polietilen glikol, sodyum klorür (yemek tuzu) ve üre gibi maddeler kullanarak ağaç malzemenin kurutma özelliklerinin değiştirilmesi ve odunun denge rutubeti değerlerinin değiştirilmesi esasına dayanmaktadır. Bu yöntem ile ağaç malzemenin yüzeylerinde iç kısımlara göre daha yüksek bir denge rutubeti oluşmaktadır. Bu yöntem esas anlamda hava ve su buharı içerisinde kurutmanın değişik bir şekli olup yüzey çatlaklarını, dış sertleşmeyi azaltmak için geliştirilmiştir [5].

Kuruma sırasında kolaylıkla yüzey çatlakları oluşan meşe gibi ağaç türlerinin yüzeylerine kimyasal maddeler uygulanarak sıcak ve nemli havada kurutulması sağlanabilmektedir [62].

3.2.9. Solvent Kurutma

Solvent içerisinde kurutma, kurutma ortamı olarak çeşitli sıcak organik solventlerin kullanıldığı genel bir kurutma şeklidir. Bu yöntemde çok kullanılan üç farklı temel prosedür vardır. Hızlı bir kurutma sağlamak için ağaç ve solvent arasında yeterli ısı transferi sağlama üstünlüğü bu üç yöntemi farklı kılmıştır. Bunlar; solvent içerisinde kurutma, azeotropik kurutma ve buharlı kurutmadır [14].

Bu yöntemde, aseton veya alkol gibi suya karışabilen bir solvent hazırlanıp, kereste üzerinde sürekli olarak dolaştırılarak ahşaptaki su ve bazı ağaç ekstraktifler, çok güçlü bir şekilde ağaçtan bu solventlere çekilir. Her ne kadar bu solventler soğuk olarak kullanılabilse de kurutmayı hızlandırmak için yüksek sıcaklığa ihtiyaç duyulur [14].

3.2.10. Presle Kurutma

Presle kurutma yöntemi, bir tahta parçasının karşıt yüzlerine merdaneler tarafından ısının uygulanması olarak tanımlanabilir. Merdaneler 25-100 psi basınçla ahşap yüzeylerine termal temas sağlar. Kullanılan sıcaklıklar 120 ila 230°C arasındadır. Uygulama esnasında odunda bulunan hava genleşir ve nem buharlaşır, yüzeye doğru hareket eder. Bu yöntemin avantajları yüzeye mükemmel ısı transferinin sağlanması, kereste ve kaplama içindeki düzlüğün artmasıdır [6].

3.2.11. Mikrodalga Kurutma

Mikrodalga kurutma günümüzde hızlı kuruma elde etmek için popüler yöntemlerden biridir. Çalışma biçimi olarak mikrodalga ısıtıcıları radyo frekans kurutucularına benzer şekilde çalışır. Ayırıcı özelliği 500 ila 5000 MHz aralığında çok daha yüksek bir frekans kullanmalarıdır. Daha yüksek frekans, malzemeye çok daha yüksek bir enerji aktarımı sağlar fakat frekans arttıkça malzemenin içine girme derinliği azalır. Radyo frekans kurutmada frekans, plakalar arasında üretilirken; mikrodalga kurutmada frekans, bir magnetron veya bir klystron ile üretilir [6].

Suyun, elektromanyetik enerjiyi mikrodalga frekanslarını yayma kabiliyeti, mikrodalga kurutmayı geleneksel kurutmadan ayıran bir avantaj sağlar. Geleneksel kurutma yöntemlerinden farklı olarak, ürünün yüzeyinden iç kısmına ısı transferinin söz konusu olduğu durumlarda, mikrodalga kurutmada enerji ıslak malzeme boyunca dağıtılan sıvı içerisinde üretilir. Mikrodalga kurutmanın bu özelliklerinden dolayı, hacimsel ısıtma, nem seviyelendirme, azaltılmış kuruma süreleri ve yüksek kuruma oranları gibi pek çok avantajı vardır [93].

3.2.12. Kızılötesi (İnfrared) Işınlarla Kurutma

Kızılötesi radyant ısı enerjisi, görünür ışık enerjisinden daha uzun, ancak radyo dalgalarından daha kısa olan ve 0.7 ila 1000 μm arasında uzanan bir dalga boyunda elektromanyetik bir radyasyondur [6].

Bu yöntem, radyasyonun sadece keresteye enerji aktarıldığı bir sistem olup, kurutma işlemi; uygun bir frekans aralığında, 170°C'nin altındaki sıcaklıklarda, İnfrared (IR) radyasyon kullanılarak, malzemeye ısı uygulanmasıyla gerçekleştirilmektedir [94].

3.2.13. Yüksek Frekansla Kurutma

Bu kurutma yönteminde ısınmanın gerçekleşmesi, levhalarına yüksek frekans uygulanan kondansatörün levhaları arasına dielektrik malzemenin konulmasıyla sağlanır. Malzeme sabit tutulursa statik metot, kurutma tünelinde hareket halinde olursa dinamik metot olmak üzere iki uygulaması mevcuttur [62]. Isınma ağaç malzemenin iç kısımlarından dış kısımlarına doğru gerçekleşmektedir. Ağaçtaki rutubet, sıcaklık kaynama noktasını aştığında içten dışa doğru basınç yaparak buharlaşmaktadır ve bu basınç sayesinde buhar ağaç malzemenin daha çok enine kesitlerinden çıkmaktadır [66].

Yüksek frekans ve vakum kurutma kombinasyonundan oluşan yüksek frekans-vakum (YF-V) yöntemi ile ilgili detaylı bilgi ise ana başlık altında aşağıda verilmiştir.

3.3. YÜKSEK FREKANS-VAKUM KURUTMA YÖNTEMİ

Bu kurutma metodunda ısı kaynağı olarak elektrik enerjisi kullanılmaktadır. Dolayısı ile YF-V yönteminin katı ve sıvı yakıta göre daha çevre dostu olması özgünlüğünün bir göstergesidir. Yöntem, daha önce yapılan çalışmalardan da görüldüğü üzere kurutma sürecini kısaltması ve bu sayede işletmelerin daha hızlı bir şekilde müşteri isteklerine cevap verebilmesini sağlar. Bu da etkin rekabet edebilme yetisi kazandırması açısından son derece önem taşır [8], [58].

Son dönemlerde yüksek frekansla vakumun kombine edildiği kurutma yöntemi ile kurutma yapan fırınlar ülkemizde endüstrileşme sürecine girmiş bulunmaktadır. Bu yöntemde, yüksek frekans jeneratöründen sağlanan elektromanyetik dalga ile ısıtma sağlanırken vakumla kurutma yapılmaktadır [95].

Bu ısıtma yönteminin uygulanması sırasında malzemeler, bir elektrot sisteminden geçerler ve böylelikle 27.12 MHz frekansında güçlü bir yüksek frekans (YF) voltajına maruz kalarak üzerlerine dielektrik alırlar. Örneğin, su gibi iyonik (dipolar) materyallerin molekülleri, yüksek manyetik alana maruz kalınca su molekülleri tekrar tekrar sıraya dizilerek çok hızlı bir şekilde ısınırlar. Öte yandan non-iyonik (non-polar) maddeler bu yöntemden etkilenmezler [58].

Yüksek frekans enerji ile kurutma, kurutma alanında verimli bir yöntemdir çünkü sadece su moleküllerini harekete geçirmektedir. Böylelikle kurutulan malzeme fazladan ısıya, güç tüketimine maruz kalmaz ve enerji israfı yapılmamış olur. Buna ek olarak

ısıtma, materyalin her yerinde eş ve aynı miktarda olduğu için, su moleküllerinin birlikte uzaklaştırılması sağlanır. Kurutma aracı olarak kullanılan YF enerjisinde, kurutucunun içinde bulunan çalışma yüzeyleri (bunlar kurutulan ürünle temas eden parçalardır) ayrıca ısıtılmaya ihtiyaç duymazlar [58].

Vakumlu kurutmayla birleştirilen YF ısıtması, şu ana kadar bilinen en hızlı, en verimli ve en yüksek kalitede kurutma yöntemi olup kuruması en zor ağaç türlerine, kalın ürün çeşitlerine uygulanabilmektedir [8], [56], [96].

3.3.1. YF-V Kurutma Yönteminin Avantaj ve Dezavantajları

YF-V teknolojisi ile kereste kurutma üzerine yapılan çalışmalar incelendiğinde bu yöntemin getirdiği birçok avantaj bulunmaktadır.

Bu yöntemde kurutma hızı, geleneksel bir fırındakinden yirmi kat daha yüksek olup farklı türde ve boyutta keresteleri aynı anda kurutma özelliğine sahiptir. Daha fazla üretim ve zamanlama esnekliği sağlamasının yanında hızlandırılmış kurutma sağlamaktadır. YF-V ile kurutulmuş odun, doğal rengini ve görünümünü koruyup geliştirilmiş ürün kalitesi sağlar. Kurutma sırasında ısı, renk değişikliği veya kahverengi lekelenme olmaz ve düşük sıcaklıklarda büzülme önemli ölçüde azalır [15].

Yüksek frekanslı ısıtmada ısı, harici kaynaklardan iletilmek yerine ağaç malzemenin tüm kısımlarına hızlı ve doğrudan aktarılmaktadır. Yüksek frekanslı ısıtmanın bir diğer avantajı da, enerjinin tercihen yüksek nem muhtevası bölgeleri tarafından emilmesi ve nem seviyelendirme etkisinin ortaya çıkmasıdır [97].

Yüksek frekanslı kurutucunun ana avantajlarından biri de suyu, malzemeden daha fazla seçici olarak ısıtabilmesidir. Düşük nem içeriğinde, malzeme yüzeyinden ısı transferini gerçekleştirmek zor olduğundan ahşap gibi higroskopik özelliğe sahip malzemelerin düşük nem içeriğinde kurutulmasında radyo frekans vakum yöntemi önemlidir [6].

Yüksek frekanslı kurutucu için gerekli olan tesis alanı, bir sıcak hava kurutucusundan daha azdır ve ağırlığı da daha azdır. Bu nedenle kurulum temelleri daha az maliyetli olup kazan gerekli değildir. Kullanımı basit ve ucuzdur. En büyük dezavantajı, tasarım konuları ve ekipman karmaşıklığı dolayısıyla kurulum maliyetidir [6], [96].

Enerji tüketimi ve kurutma maliyeti düşük olan YF-V teknolojisi, atık suyu kapalı devre bir sistemde geri kazandırdığı için çevre dostudur. Ayrıca YF-V kurutma sistemi, ısının nüfuz ettiği alan derinliğini artırması ve sisteminde durgun dalgalara sebep olmaması

yönüyle toplu kurutma işlemine izin verir [42].

YF-V yönteminde ağaç ürünlere sürekli bir vakum uygulanırken ahşabı dielektrik olarak ısıtan, kaynama sıcaklığını düşüren ve suyun çıkarılmasına yardımcı olan bir radyo frekansa maruz bırakılırlar. Böylece sert ağaçlar da dahil olmak üzere hızlı kuruma süresine sahip ve yüksek kalitede kurutulmuş ağaç ürünler elde edilir. Renk değişikliği gibi bozulmaların da önemli ölçüde azalması sağlanmış olur [98].

YF-V kurutması diğer yöntemlerden daha hızlıdır. Bu nedenle kereste stoklamaya duyulan ihtiyaç azalır. Ahşap malzeme üst üste yığıldığından YF-V sistemi, geleneksel yöntemle istiflenmesi ve yapıştırılması uzun zaman alacak kısa uzunluktaki ahşap malzemelerin kurutulması için idealdir. Ayrıca eşit miktarda malzeme üreten tesisler için ihtiyaç duyulan arazi alanı azalır. YF-V yönteminin maliyeti yüksek sermaye gerektirdiğinden ekipman satın almayı düşünen işletmeler için ciddi bir fizibilite çalışması yapılmasını gerektirmektedir [90].

YF-V yönteminde, diğer tekniklerle kusursuz şekilde kurutulamayan kütük ev yapımında kullanılan yuvarlak ağaç malzemenin ve Meşe gibi kurutmaya hassas ağaç türlerinden üretilen büyük ebatlı kiriş ve kolonların daha uygun sürelerde kurutulması sağlanabilmektedir [10].

4. MATERYAL METOT

Bu bölümde, deneylerde kullanılan kerestelerin temin edilme aşamasından deneyler sonlanana kadar yapılan işlemler sırası ile birlikte verilmiştir. Kurutma işlemi için Sivrikaya orman ürünlerinden hizmet alımına gidilmiş olup işletmede bulunan orta ölçekli YF-V kurutma fırınında deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Ayrıca süreç görsel materyal ile desteklenerek baz alınan standartlara atıf yapılmıştır.

4.1. MATERYAL

Tez çalışmasında kullanılan Kayın (*Fagus orientalis Lipsky*) ağacı Bolu ili Aladağ ormanlarından temin edilmiştir.

4.1.1. Doğu Kayını (*Fagus orientalis Lipsky*) Odunu

Kafkasya, Kuzey İran, Türkiye ve Kuzey Doğu Avrupa'da yerel bir yayılım göstermektedir. Dolgun ve düzgün gövdeli birinci sınıf orman ağacıdır. Olgun odunlu ağaç grubunda olup, doğal halde kırmızımsı beyaz, fırınlanmış halde ise tuğla kırmızısı rengindedir. Ağaç boyu 35-40 m'ye kadar uzayabilen, gövde çapı 1.0-1.5 m olabilen, kullanılabilir gövde uzunluğu 15-20 m' ye ulaşabilen, ülkemizde tabii olarak yetişen bir ağaç türüdür [62],[99],[100],[101].

4.1.1.1. *Makroskopik Özellikleri*

Makroskopik olarak incelenen Kayın odununda; diri odun ile öz odun arasında renk farkı gözlenmez. Seksen yaşını geçen ağaçlarda kırmızıya yakın kahverengide şekilleri düzenli olmayan, iç kısımda dalgalı şeritli ve yürek oluşumu adı verilen öz odun bulunur. Traheler küçük çaplı olup dağınıktır ve yaş halkaları belirgindir. Geniş öz ışınları; 0.5-1.0 mm aralıkla uzanmakta çıplak gözle dahi görülebilmekte ve kalın öz ışınları yıllık halka sınırında genişlemektedir. Radyal yüzeylerde koyu renkli geniş aynacıklar teğet kesitte kırmızımsı iğ şeklinde lekeler halindedirler. Kayın odunu sert ve ağırdır ayrıca olgun odun özelliklerine sahiptir [99],[102].

4.1.1.2. *Mikroskopik Özellikleri*

Kayın, dağınık traheli bir ağaç türüdür. Traheler yaz odununa doğru gidildikçe sayıları azalmakta, çapları küçülmektedir. Kayının trahe sayısı fazla olup mm² 'de 80-180 adet, teğet çapları 60-80 µm, şekilleri yuvarlak, oval ya da köşelidir. Boyuna paranşimler dağınık ve teğet sıralıdır. Öz odununda içleri yabancı maddelerle dolu traheler bulunabildiği gibi tüller de bulunabilir. Öz ışınları iki tipte izlenmektedir; geniş öz ışınları 1-25 hücre genişliğinde dar öz ışınlara göre birkaç mm yükseklikte, homojen yapıdayken çok nadir heterojen öz ışınlarına rastlanmakta, trahelerle karşılaşma yerlerinde büyük geçitler görülmektedir. Dar öz ışınları 1-5 hücre genişliğindedir ve yükseklikleri 500 µm kadardır [99],[102].

4.1.1.3. *Fiziksel ve Mekaniksel Özellikleri*

Doğu Kayını odununun fiziksel ve mekanik özellikleri Çizelge 4.1'de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Doğu Kayını odununun fiziksel ve mekanik özellikleri [99].

Yoğunluk	D_0	0.68	g/cm^3
	D_{12}	0.72	g/cm^3
Daralma Yüzdesi	$ß_r$	5.8	%
	B_t	11.8	%
	B_v	17.9	%
E-Modül	E-Mod.	15 700	N/mm²
Eğilme Direnci	σ_E	120	N/mm²
Çekme Direnci	$\sigma_Ç$	132	N/mm²
Basınç Direnci	σ_B	60	N/mm²
Din. Eğilme Direnci	σ_{DE}	0.98	kN/cm

4.1.1.4. *İşlenme ve Kurutma Özellikleri*

Dikkatli kurutulması gereken bir ağaç olup, çatlamaya ve dönüklüğe eğilimi vardır. İşlenmesi zor olmayan, yapıştırma ve üst yüzey işlemlerinde zorluk çıkarmayan, verniklemeye uygun, iyi renk veren bir ağaç türüdür [99].

4.1.1.5. *Dayanıklılık ve Emprenye Edilebilme Özelliği*

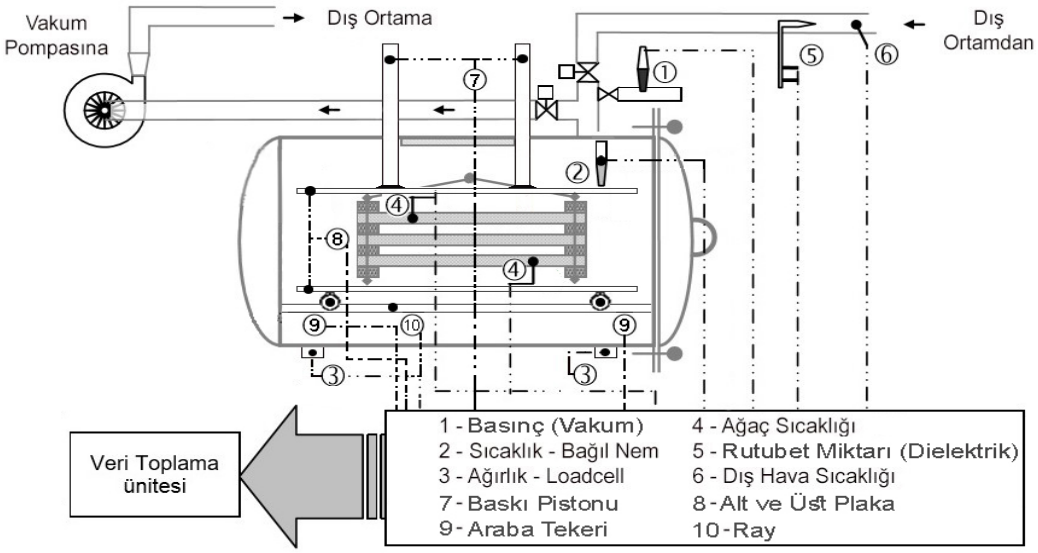
Kayın odunu işlenmesi kolay bir malzeme olup özellikle diri odunu oldukça rahat emprenye edilir. Bunun yanında öz odunu traheler tül yapısı ile dolu olduğundan emprenyede güçlükler meydana çıkmaktadır. Ayrıca öz odun çabuk ardaklanma yapma özelliğine sahip olup böcek ve mantarlara karşı çok hassastır [99].

4.1.1.6. *Kullanış Yerleri*

Kullanım alanı çok yaygındır. Masif ve bükme mobilya imalatında, spor malzemeleri ve alet sapları yapımında, yonga levha, lif levha, kontrplak, kaplama levha, parke endüstrisinde, fıçı sanayinde, karoser yapımında ve tornacılıkta kullanılır [99],[103]. Ayrıca ambalaj, oyuncak, tarım aletleri, demir yolu traversleri ve mutfak aletleri üretiminde de yararlanılmaktadır [62].

4.1.2. YF-V kurutma fırını

Çalışma kapsamında kullanılan YF-V kurutma fırını 10 m boyunda, 1.70 m iç çapında olup keresteleri fırına yerleştirmek için araba ölçüleri baz alındığında; 1 m en, 1 m yükseklik ve 8 m boy uzunluğuna sahiptir. YF-V kurutma fırını 8 m³ kereste kurutma kapasitesine sahiptir. Deneylerin gerçekleştirildiği YF-V kurutma sistemi Şekil 4.1'de gösterilmiştir.



Şekil 4.1. YF-V kurutma sistemi.

YF-V fırınında 120 bar baskı özelliğine sahip hidrolik ünite mevcut olup, yağlı tip 120 bar vakum yapabilen vakum pompasına sahiptir. Fırın içi kereste ağırlığını ve çıkan su miktarını hassas şekilde gösterebilen dört adet 4 tonluk loadcell'e sahiptir. Sıcaklık ölçümü için PT-100 termokupl sıcaklık sensörü kullanılmıştır. Çıkan suyun tahliye işlemi içinse havalı valf sistemi kullanılmaktadır. Bu sistemler için kontrol ünitesi mevcut olup aşağıda Şekil 4.2'de YF-V fırınıyla birlikte gösterilmiştir.



Şekil 4.2. Deneylerin gerçekleştirildiği YF-V fırını ve kontrol ünitesi.

4.1.3. Yüksek Frekans Jeneratörü

Bu çalışmada Şekil 4.3'de görülen YF üreteci kullanılmış olup; 50 kW çıkış gücünde, 10 kV anma geriliminde ve 6.75 MHz frekans üretme kapasitesine sahip olan YF jeneratörüdür.

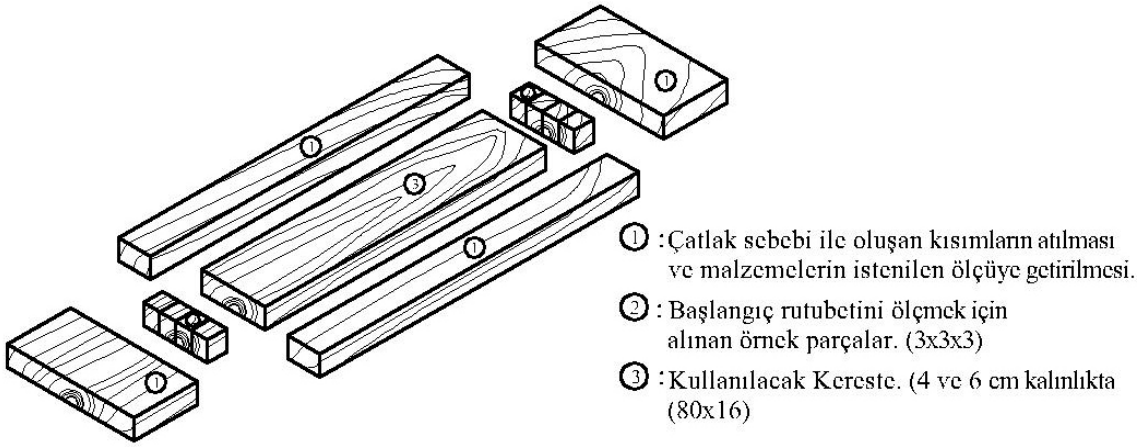


Şekil 4.3. Yüksek frekans üreteci.

4.2. METOT

Kurutma sürecinde kerestelerin hazırlanmasından, kurutma işleminin sonunda kerestelerin sonuç rutubet değerleri ölçülene kadar olan süreç tüm detayları ile ele alınmıştır.

Çalışmada yaklaşık 45 cm çapındaki yeni kesilmiş tomruklardan paralel biçme yöntemi ile elde edilen 80 cm boyunda, 16 cm genişliğinde, 4 cm kalınlık ve 6 cm kalınlıkta olan taslak keresteler elde edilmiştir. Deneyler için düzgün lifli, budaksız, çatlaksız, mantarlaşmamış ve böceklerce tahrip edilmemiş düzgün renkli keresteler elde edilmiş olup elde edilen keresteler baş ve yan kısımlarda var olan kusurlar (çatlak,budak,çıkıntı) giderilerek belirlenen ölçülerde kesilmiştir. Şekil 4.4'de deney örneklerinin hazırlanmasına ilişkin parçaların elde edilmesinde uyulan spesifikasyonlar görülmektedir.



Şekil 4.4. Deney örneklerinin hazırlanması ve aşamaları.

Kullanılan her bir kerestenin başlangıç rutubetini belirleyebilmek için eldeki kerestelerin iki başından dörder parça olmak üzere toplam 8 adet 3x3x3cm ölçülerinde parçalar kesilmiştir. Kesilen deney örneklerindeki rutubet değişimine bağlı kütle kayıplarının belirlenmesi amacıyla, Şekil 4.5'te görülen Precisa-XB3200C marka 3200 g tartım kapasiteli, ±0,01 g ölçüm hassasiyetine sahip hassas terazi ile tartılmış ve değerler kaydedilmiştir.



Şekil 4.5. Hassas terazi.

Başlangıç rutubetinin belirlenmesi amacıyla alınan örneklerde rutubet içeriğinin belirlenmesinde TS EN 13183-1 ve ASTM D 4442-92 standartlarına uyularak fırın metodu kullanılmıştır [104], [105]. İlgili standartlarda belirtildiği şekilde hazırlanan örnekler 103±2 °C' deki Şekil 4.6'te görülen etüv fırınına konulmuş ve her 2 saatte bir ağırlıkları ölçülmek suretiyle kütle kayıpları izlenmiştir. Bu süreç deney örnekleri değişmez ağırlığa (iki ölçüm arası fark <%1 olacak şekilde) gelene kadar sürdürülmüştür.



Şekil 4.6. Etüv fırını.

Süreç sonucu örnekler TS EN 13183-1 standardına uyularak tam kuru ağırlıkları belirlenmiş ve aşağıdaki eşitlik (4.1) kullanılarak deney örneklerinin başlangıç rutubetleri belirlenmiştir.

$$(\%)\omega \frac{m_1 - m_0}{m_0} 100 \qquad (4.1)$$

Burada;

ω = Ağacın rutubeti (%), m_0 = Yaş Ağırlık, m_1 =Tam Kuru Ağırlığı ifade etmektedir. Numunelerden ölçülen bu değerler formülde yerine konarak başlangıç rutubetleri belirlenmiştir.

Deney çalışması kapsamında hazırlanan numuneler, fırın içerisine düzgün bir istifle aralarında boşluk kalmayacak şekilde yerleştirilmiş, aşağıda Şekil 4.7'de gösterilmiştir.



Şekil 4.7. Ağaç numunelerin YF-V fırını içerisine yerleştirilmesi.

Fırın kapağı, kurutma fırını dışarıdan hava almayacak ve dışarı hava vermeyecek biçimde sıkı bir şekilde kapatılmış, vanalardan sızıntı olmadığı kontrol edilmiş ve deneye başlanmıştır.

Vakum basıncı istenilen değerlerde (-0.875/-0.925 arası) transmitter aracılığıyla ayarlanmış ve kerestelerin iç sıcaklığı ise 40-45 °C olacak şekilde, sensör yardımıyla ayarlanmış sıcaklığın düşmesi ve vakum basıncı değerlerinin değişmesi engellenmiştir.

Isıtma ve vakum periyodu devamlı sürdürülmek suretiyle kerestelerden su atımı sağlanmıştır. Deney süresince belirli aralıklarla değerler ölçülmüş olup, ölçülen değerler kereste iç sıcaklığı, vakum basıncı, ağaç malzeme nemi ve malzeme ağırlıklarıdır.

Deney boyunca Kayın odunlarının rutubet miktarı dikkate alınarak kereste iç sıcaklığı LDN'ye gelene kadar dengeli bir kurutma izlenerek serbest su dışarı atılmıştır. LDN noktasına gelindikten sonra sıcaklık 50 °C'ye çıkartılarak süreç tamamlanmıştır.

Keresteler kurutma işleminin başlamasından itibaren sabit aralıklarla fırın bünyesinde bulunan yük hücreleri (loadceller) ile tartılmış, günlük su kayıpları kayıt altına alınarak not edilmiş, günlük rutubet miktarları aşağıdaki eşitliğe (4.2) göre hesap edilmiştir [106].

$$U_{ist} = \frac{G_{ist}}{G_a} \times (U_a + 100) - 100 \qquad (4.2)$$

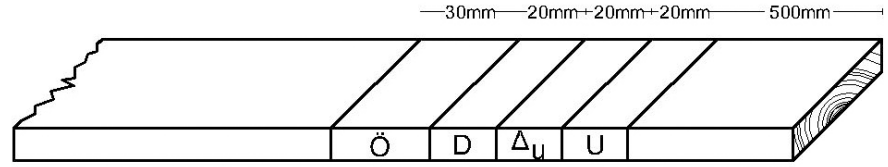
Burada;

U_{ist} = Kontrol anındaki rutubet (%), G_{ist} = Kontrol anındaki ağırlık (g),

G_a = Başlangıç ağırlığı (g), U_a = Başlangıç rutubeti (%)' dir.

Keresteler istenilen rutubet değerine ulaştığında RF üreteci ve vakum sistemi devreden çıkarılıp, vanalar açılarak vakum basıncı boşaltılmıştır. Fırın kapağı açılarak kurutma işlemi sona erdirilmiştir. Kurutma işlemi bittikten sonra keresteler dışarı alınıp fırın

boşaltılmıştır. Kurutulan kereste örneklerinin orta kısımlarından 3x3x3 cm ebatlarında dörder adet parça kesilerek 103°C'deki etüv fırınına konulmuş ve her 2 saatte bir ağırlıkları değişmez olana kadar tartılmıştır. Kerestelerin sonuç rutubet değerleri bu yöntemle de teyit edilmiş, bunun yanında Şekil 4.8'de görülen EDG (European Drying Group) (1992) [61] standardına uygun olarak kerestenin orta kısmının kenarından ve ortasından birer adet çatal örneği alınmıştır. Rutubet farkını belirlemek için test örneği alım yerleri de standartta belirli olup Şekil 4.8'de görülmektedir.

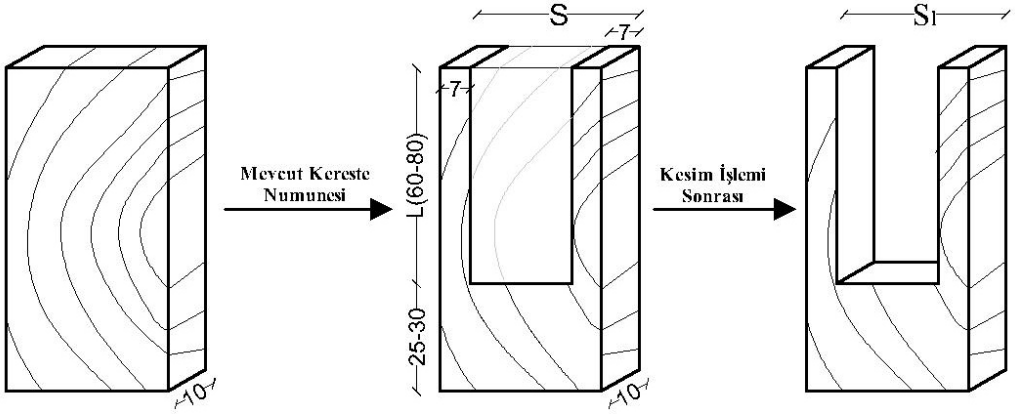


(Ö) Yoğunluk test örneği (D) Dış Sertleşme test örneği (Çatal Örnek)
(Δu) Rutubet farkı test örneği (U) Sonuç Rutubeti test örneği

Şekil 4.8. EDG (1992)'ye göre sonuç rutubeti ve çatal örnek ile ilgili standart.

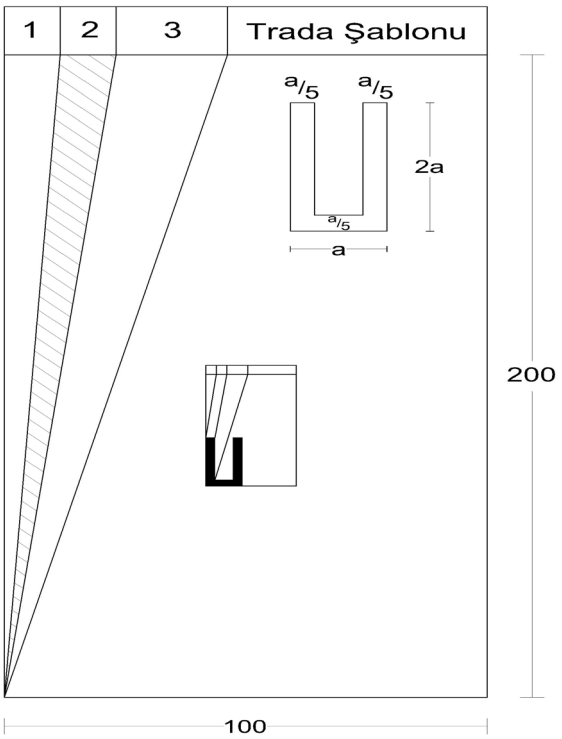
Kurutma sonrası dış sertleşme (gerilme) tespiti için kerestelerden alınan örnekler Şekil 4.9'da görüldüğü üzere hazırlanmıştır. Şekilde detaylı olarak gösterilen çatal örnek hazırlamada en çok dikkat edilmesi gereken kısım lif yönlerinin dikkate alınması olup çatal örnek hazırlamada ise Zhan, Avramidis (2017) tarafından yapılan çalışmadan faydalanılmıştır [107].

Çatal uç test örnekleri, boyuna doğrultuda 10 mm uzunluğunda olacak şekilde deney numunesinin kalınlık ölçüsünde enine doğru kesilerek elde edilmiştir. S kerestenin kalınlığını, L çatal kenar uzunluğunu göstermektedir. Hazırlanan numuneler 0.01 mm hassasiyetle hazırlanmış olup ölçümünde ise kumpas kullanılmıştır.



Şekil 4.9. Kurutma sonrası kereste gerilimini (sertleşmesini) belirlemek için çatal örnek hazırlanması aşamaları [107].

Ardından hiç vakit kaybetmeden kesitler Trada şablonunda Şekil 4.10'da belirtilen alana konulmuş, üzerinden 24 saat geçtikten sonra fotoğrafları çekilmiş daha sonra örnekler ters çevrilerek yine aynı alana konularak ve tersi çevrilen örneklerin de üzerinden 24 saat geçtikten sonra fotoğrafları çekilmiştir. Böylece kerestelerde gerilme (dış sertleşme) olup olmadığı gözlenmiştir.



Şekil 4.10. Kurutma sonrası kerestede yüzey sertleşmesi olup olmadığını belirlemek için kullanılan Trada şablonu (EDG, 1992).

Kurutma sonrası kerestelerin kalite sınıflarının tespiti için EDG (1992) standardı dikkate alınarak ve bu standarda göre değerlendirme yapılmıştır. Dikkate alınan EDG toleransları ise Çizelge 4.2'de verilmiştir.

Bu çizelgede olan toleranslar kullanılarak kurutulmuş kerestelerin şekilsel olarak standartlara uygunluk karşılaştırılması yapılmak suretiyle kurutma kalitesi yorumlanmıştır.

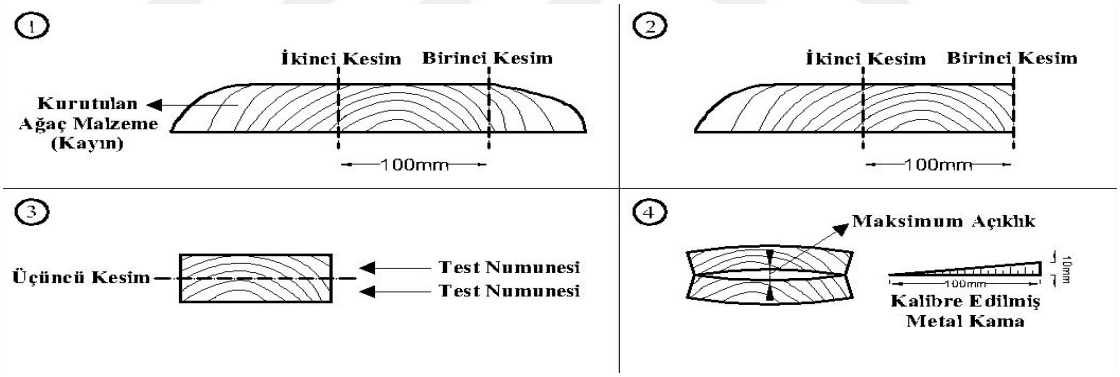
Çizelge 4.2. EDG (1992)'ye göre kurutma kalitesinin değerlendirilmesinde yararlanılan toleranslar.

<table>
<tr><td colspan="3">Kriterler</td><td>S (Standart)</td><td>Q (Quality Dried)</td><td>E (Exclusive)</td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="2">Hedef Sonuç Rutubeti (%) İle Ortalama Rutubet Arasındaki Mak. Sapma</td><td>d≤ 40mm</td><td>2.0/-3.0</td><td>2.0/-2.0</td><td>1.5/-1.5</td></tr>
<tr><td>d>40mm</td><td>3.0/-3.0</td><td>2.5/-2.5</td><td>2.0/-2.0</td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="2">Hedef Sonuç Rutubeti (%) İle Münferit Rutubet Arasındaki Mak. Sapma</td><td>d≤ 40mm</td><td>4.0/Sınırsız</td><td>3.0/-3.0</td><td>2.0/-2.0</td></tr>
<tr><td>d>40mm</td><td>6.0/Sınırsız</td><td>4.0/-4.0</td><td>3.0/-3.0</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Dış Sertleşme</td><td rowspan="2">Çatal Örnek Testi</td><td>İlk Ölçüm</td><td>Orta(2)</td><td>Hafif(1)</td><td>Hafif(1)</td></tr>
<tr><td>24 saat sonraki ölçüm</td><td>Şiddetli(3)</td><td>Orta(2)</td><td>Hafif(1)</td></tr>
<tr><td colspan="3">Kollaps (Örneklerin %10'unda)</td><td>Mak. 6mm.</td><td>Mak. 3mm.</td><td>Mak. 2mm.</td></tr>
<tr><td rowspan="4">Çatlaklar</td><td colspan="2">Yüzey Çatlakları (Her bir Yüzeyde)</td><td>Mak. Derinlik 5mm.</td><td>Mak. Derinlik 3mm.</td><td>Mak. Derinlik 2mm..</td></tr>
<tr><td colspan="2">İç Çatlaklar</td><td>Örneklerin %10'unda</td><td>Örneklerin %5'inde</td><td>Örneklerin %2'sinde</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Uç Çatlakları (Örneklerin %90'ında)</td><td>d≤ 40mm</td><td>Mak. Uzunluk 200mm.</td><td>Mak. Uzunluk 100mm.</td><td>Mak. Uzunluk 50mm.</td></tr>
<tr><td>d>40mm</td><td>300mm.</td><td>300mm.</td><td>100mm.</td></tr>
<tr><td colspan="2">Şekil Değişmeleri</td><td colspan="4">Daralma anizotropisinden kaynaklanan şekil değişmeleri kabul edilir. Fakat düzensiz çıtalama ve istiflemeden kaynaklanan şekil değişmeleri kabul edilmez.</td></tr>
</table>

Ayrıca test sonuçları, çatal testi ile elde edilen sonuçlarla yakından ilgili olduğu düşünülerek kurutulmuş Kayın malzeme sertleşmesinin değerlendirilmesinde, endüstriyel şartlar altında özel olarak dizayn edilen dilimleme testi uygulanmıştır. Dilimleme testi, sertleşmeden kaynaklanan etkilerin kantitatif değerlendirmesinde kullanılabilmektedir [108].

Ağaç malzemenin hazırlanmasında her bir kesit bir ucundan net olarak kesilir ve 100 mm mesafede ikinci bir kesim yapılır, böylece 100 mm genişliğinde ve levhanın kalınlığına eşit yükseklikte dikdörtgen şekilli bir örnek oluşturulur. Bu şekilde döndürülmüş test numunesi, tahta yüzeyine paralel olarak ortadan ikiye dilimlenir.

Oluşturulan iki dilim, sabit iklim koşullarında 20 ± 5 °C, %55 ± %10 bağıl nemde (oda koşullarında) bir test teçhizatına veya şartlandırıcıya yerleştirilir. Yumuşak ağaç numunelerinin en az 24 saat boyunca iklimselleştirilmesi gerekmekte olup şartlandırmanın ardından test numunelerinin dilimleri arasındaki maksimum boşluk bir cetvel veya dikkatli bir şekilde yerleştirilmiş kalibre edilmiş bir metal kama kullanılarak ölçülür [108]. Deney için hazırlanan kurutulmuş ağaç malzemenin hazırlanış aşamaları ise Şekil 4.11'de gösterilmiştir.



Şekil 4.11. Dilimleme (Slicing) testi numune hazırlanma aşamaları [108].

Dilimleme testinden elde edilen ölçüm sonuçların değerlendirilmesinde kullanılan kriterler ise Çizelge 4.3'te belirtilmiş olup her bir kurutma kalitesi sınıfı için, oluşan aralık ölçümlerinin %90'ının aşmaması gereken sınır ölçümlerini göstermektedir.

Çizelge 4.3. Dilimleme testinin değerlendirilmesinde yararlanılan toleranslar [108].

Kalite sınıfı	Şartlandırma sonrası örneklerin %90'ının aşmaması gereken değerler
S (Standart)	3 mm
Q (Quality Dried)	2 mm
E (Exclusive)	1 mm

5. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde, kurutma işlemi sırasında elde edilen bulgular; kurutma süreleri, fırında uygulanan enerji ve vakum büyüklükleri, kereste sıcaklıkları, kaybedilen su miktarı ve kerestelerin ağırlıkları incelenmiştir. Ayrıca deneyler sonucunda kurutma sonrası kalite sınıfını belirleyecek bulgular tespit edilmiş, elde edilen veriler ve sayısal değerler yorumlanmıştır.

5.1. YÜKSEK FREKANS VAKUM UYGULANMA PARAMETRELERİ

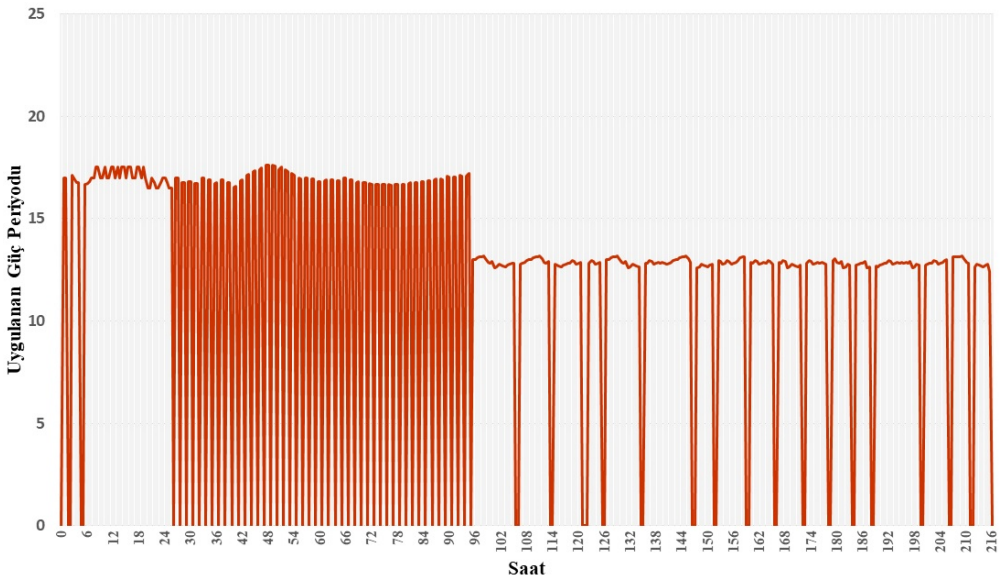
Çalışmada yaklaşık 45 cm çapındaki taze kesilmiş tomruklardan paralel biçme yöntemi ile elde edilen 80 cm boy, 16 cm genişlikte olan 4 cm ve 6 cm kalınlığına sahip Doğu Kayını (*Fagus orientalis Lipsky*) kullanılmıştır. Taslak kerestelerin rutubeti çivili rutubet ölçerle ölçülmüş ve %80 oranında neme sahip olduğu belirlenmiştir. Örneklerin başlangıç rutubet miktarlarını doğrulamak üzere TS EN 13183-1 ve ASTM D 4442-92 standartlarına uyularak fırın metodu ile gerçek rutubet miktarı doğrulanmıştır. Bu amaçla standartlarda belirtilen ölçülerde kurutma öncesi örneklerden alınan numuneler 103±2 °C'de fırında bekletilmiş ve örneklerin tam kuru ağırlıkları belirlenmiştir. Bu işlem sonrası deney örneklerinin başlangıç rutubetinin %78 olduğu ve dielektrik yöntemle belirlenen %80 rutubetin yaklaşık olarak doğru belirlendiği tespit edilmiştir. YF-V yöntemi ile kurutma işleminin yürütülmesi amacıyla sistem parametrelerinde ihtiyati olarak (nihai rutubet miktarının arzu edilen düzeyin altında kalması) %80 başlangıç rutubeti kurutma parametresi olarak kullanılmıştır. Kurutma sürecinde 6.75 MHz frekans altında, 10 kV ve 50 kW güce sahip YF jeneratörü kullanılmıştır. Kurutma sürecinde ihtiyaç duyulan başlangıç sıcaklığının ayarlanması amacıyla jeneratör gücü 17 kW olarak belirlenmiştir. Sistemde gerek sıcaklık değerlerinin ayarlanabilmesi gerekse suyun kaynama noktasını düşürmek suretiyle kurutma sürecinin hızlandırılması amacıyla yaklaşık 0,975 mbar vakum basıncı uygulanmıştır.

Bu vakum basıncı sayesinde teorik olarak malzeme içerisindeki suyun yaklaşık 35°C'de buharlaştırılması sağlanmıştır [109]. Test numunelerinde kereste sıcaklığı, uygulanan vakum değeri, kaybedilen nem oranı, kerestelerin ağırlığı ve çıkan su miktarının

ağırlıkları YF-V fırını otomasyon kontrol sistem yazılımı aracılığı ile bilgisayardan belirli aralıklarla takip edilmiştir.

Kurutma işleminde hücre çökmelerine karşı hassas olan ağaç türlerinde, yüksek rutubete sahip ağaç malzemenin öncelikle ön kurutma işlemine tabi tutulması gerekmektedir. Rutubet oranı lif doygunluğu rutubet derecesinin altına düştükten sonra, teknik kurutmaya geçilmesi uygundur [14].

Bu çalışmada ise %80 oranında neme sahip Kayın ağacı herhangi bir ön kurutma işlemi uygulanmadan, direkt olarak YF-V kurutma yöntemiyle kurutulması bu işletmede ilk kez denenmiştir. Bu yüzden kurutma işleminde herhangi bir periyoda bağlı kalınmamış, kerestelerin kurutma sürecinde günlük alınan parametrelere göre kurutma sürecinin yürütülmesine yönelik uygulanan sistem parametreleri revize edilmek suretiyle kurutmanın kontrollü bir şekilde yürütülmesi sağlanmıştır. Bu çalışmada uygulanan güç periyotları ve periyotlarda uygulanan güç miktarları saat bazında detaylı olarak Şekil 5.1'de görülmektedir.

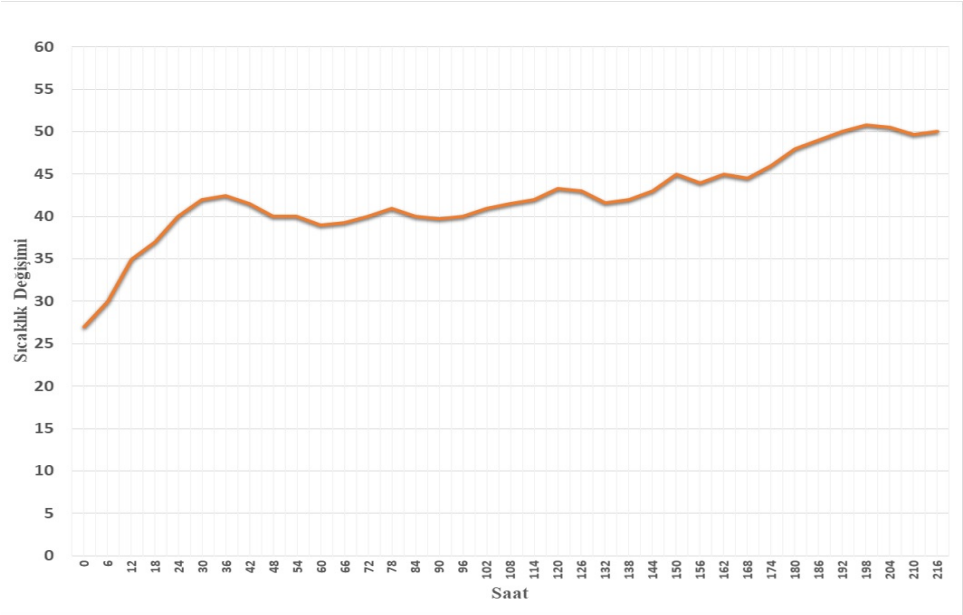


Şekil 5.1. Kurutma sırasında uygulanan güç periyotları.

Kurutmadan kaynaklanabilecek kusurların önüne geçebilmek için, grafikten de anlaşılacağı üzere 17 kW güç uygulanarak kurutmaya başlanmış ve bu güç uygulaması ağaç malzeme sıcaklığını sabit tutabilmek amacıyla periyotlar halinde kesilerek sıcaklık dengelenmesi sağlanmıştır. Bu doğrultuda güç uygulama ve kapatma süreçlerinin ayarlanabilmesi için cihaz güç kontrol ünitesi arzu edilen sıcaklık değerinin ±3 °C sınırlarına ayarlanarak sistemin kapatılıp tekrar açılması sağlanmıştır.

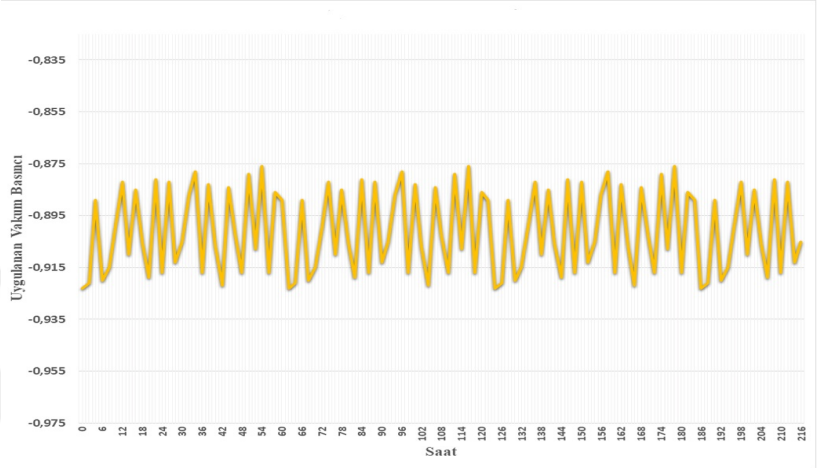
Yukarıda Şekil 5.1'den de görüleceği üzere sistemdeki güç uygulama periyotları 60 dk. güce tabi tutma ve 30 dk. dinlendirme periyodu olacak şekilde belirli aralıklarla tekrarlı olarak uygulanmıştır. Kerestelerin dinlendirilmesi aşamasında vakum basıncı ve ağaç sıcaklığı belirlenen toleranslar içerisinde kalacak şekilde sisteme uygulanan jeneratör gücü kapatılmıştır. Toleransların dışına çıkıldığı anda arzu edilen sıcaklığın korunabilmesi için bu işlem süreç boyunca tekrarlı olarak gerçekleştirilmiştir. Kurutma sürecinin ikinci gününden itibaren ağaç malzeme sıcaklığında stabilite sağlandığı görülmüştür. Bu nedenle sıcaklık kontrolünün arzu edilen tolerans aralıklarında kalındığından emin olunduğunda sistemde harcanan elektrik enerjisi maliyetlerini azaltmak amacıyla uygulanan düşürülmüştür. Bu nedenle beşinci gün itibarıyla uygulanan güç miktarı 17 kW'tan 14 kW'a düşürülmüştür.

Kurutma esnasında ağaç malzeme içerisine yerleştirilen PT 100 termokupllar aracılığı ile alınan sıcaklık değerleri kurutma sürecinin takip edilmesinde referans alınan en önemli işlem parametrelerinden birisi olmuştur. Kurutma sürecinin başlangıcından LDN'ye ulaşılana kadar sıcaklık 40-45°C aralığında tutulmuştur. Ağaç malzeme rutubeti LDN'ye ulaştıktan sonra, mevcut olan sıcaklık 50 °C'ye çıkarılmış ve deney süresince sıcaklığın düşmesinin önüne geçilmiştir. Kurutma başlangıcından bitimine kadar olan süreçte, kerestelerin sahip olduğu sıcaklığı gösterir grafik, aşağıda Şekil 5.2'de gösterilmiştir. Kurutma işlemi süresince oluşan kereste iç sıcaklığı hemen hemen aynı seyir izlemiş yani kereste iç sıcaklığı korunabilmiştir.



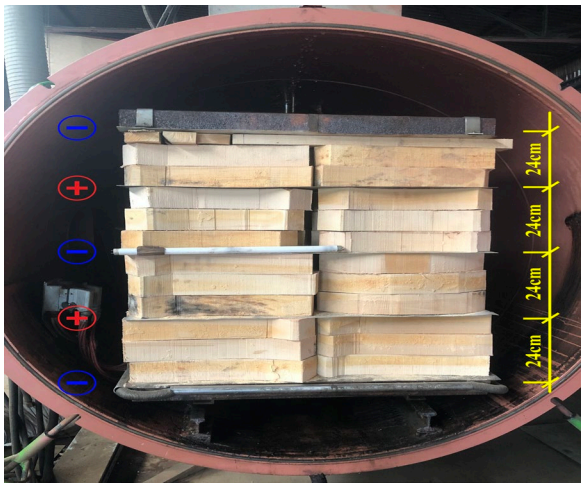
Şekil 5.2. Kurutma sırasında Kayın kerestede oluşan sıcaklık değişimi.

Kurutma esnasında vakum basınç sensörü, transmitter kullanılarak vakum aralığı (en düşük ve en yüksek) -880/-920 milibar olarak ayarlanmış olup aşağıda Şekil 5.3'te grafiksel olarak tüm kurutma süreci boyunca oluşan vakum basıncı zamana bağlı olarak (saat) gösterilmiştir.



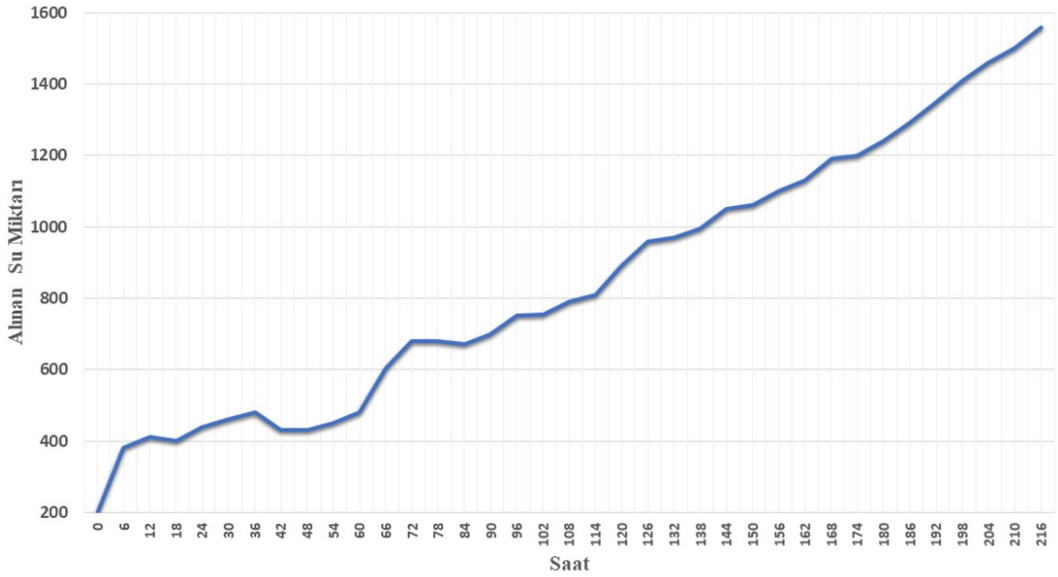
Şekil 5.3. Kurutma sırasında uygulanan vakum basıncı aralıkları.

Kurutma başlamadan önce Kayın keresteler Şekil 5.4'te gösterildiği üzere aralarında boşluk kalmayacak ve tümü birbiriyle temas edecek şekilde istif yapılarak fırına yüklenmiştir. 24 cm aralıklarla 1m×8m boyutunda metal plakalar aralara yerleştirilmiştir. Bu plakalara bağlanan (+) ve (-) yükler şekil üzerinde belirtilmiştir. Fırına yüklenen kerestelerin ağırlıkları gram hassasiyetinde ölçüm kapasitesine sahip olan loadceller ile ölçülmüş olup kurutma işlemi için yapılan yüklemede ölçüm öncesi sistem ağırlık darası alınmış ve toplam kereste ağırlığı 4217 kg olarak ölçülmüştür.



Şekil 5.4. YF-V fırınına yüklenen Kayın keresteler.

Kurutma işlemi için YF-V fırının kapağı hava kaçakları olmayacak şekilde kapatılıp, enerji verilerek kurutma süreci başlatılmıştır. Kurutma süreci boyunca malzeme iç sıcaklıkları, uygulanan vakum basıncı ve ağaç malzemedeki kütle kayıpları takip edilmek suretiyle kurutma sürecinin yönetilmesine yönelik sistem kontrol parametreleri belirlenmiş ve ayarlamalar yapılmıştır. Deney boyunca Kayın odunlarının rutubet miktarı dikkate alınarak suyun dışarı atılması sağlanmıştır. Kurutma işlemi başladıktan sonra ağaçlardan alınan su miktarları devamlı olarak takip edilmiş tüm süreç kayıt altına alınmıştır. Ağaçlardan alınan su miktarları kg/saat olarak grafik halinde Şekil 5.5'te görülmektedir. Kurutma süreci sonunda ağaçlardan çıkan su miktarı 1650 kg olarak ölçülmüştür. Yükleme işlemi başında belirlenen toplam ağaç malzeme ağırlığını yaklaşık %39'u oranında ağaç malzemeden su çıkışı sağlandığı görülmektedir. Bu bilgiler ışığında kurutma süreci başından kurutma süreci sonuna kadar malzeme içerisindeki su miktarının yaklaşık %70 oranında azaldığı görülmektedir.



Şekil 5.5. Kayın kerestelerden alınan su miktarları (kg/saat).

Şekil 5.5'ten görüldüğü üzere kurutma sürecinin başından yetmiş ikinci (72.) saate kadar küçük dalgalanmalarla kütle kaybı yaşanırken akabinde doğrusal olarak artış gösteren bir kütle kaybının oluştuğu görülmektedir. Kütle kaybı verilerinde görülen bu dalgalanmalar yaşanan kütle kaybıyla ilişkili olmayıp toplam kurutma süresinin hesaplanması amacıyla kurutma programında tanımlanan referans başlangıç rutubetinde değişiklikler yapılması sonucu ortaya çıkmıştır.

Burada amaç, ağaç malzeme rutubet miktarının belirlenmesinde kullanılan dielektrik yöntemde ölçüm toleranslarının yüksek olması nedeniyle ölçülen başlangıç rutubetindeki olası hataları göz önünde bulundurmak suretiyle ağaç malzemenin kurutma sonrası arzu edilen rutubet miktarına ulaşıp ulaşmadığının belirlenmesidir.

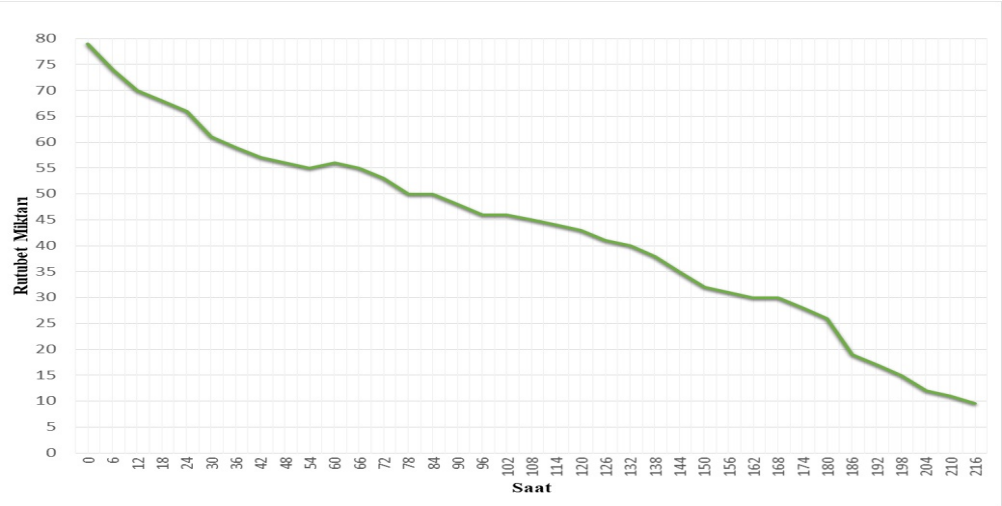
Ağaç malzemelerin kurutulması sonucu ortaya çıkan su buharı kapalı çevrim sistemi içerisinde geri kazanılmıştır. Çıkan suya herhangi bir katılım olmamış, vakum uygulamasıyla saf olarak geri kazanılmıştır. Elde edilen su ise Şekil 5.6'da görülen varillere doldurularak farklı endüstriyel uygulamalarda kullanılmak üzere sevk edilmektedir. İşletme yetkililerinden alınan bilgilere göre kurutma sürecinde elde edilen suların çoğunlukla gübre üretici firmalar tarafından talep edildiği bilgisi alınmıştır.

Ayrıca kerestelerden elde edilen su örneklerinin anti bakteriyel aktiviteye sahip olduğunu gösterir çalışma örnekleri de mevcuttur [110].



Şekil 5.6. Kereste kurutma sonucu elde edilen su örnekleri.

Keresteler kurutma işlemi başlamasından itibaren yazılım programı aracılığıyla düzenli aralıklarla takip edilmiş olup günlük olarak rutubet miktarları izlenmiştir. Kayın ağacı kerestelerinde bulunan nem oranı kurutma başlamadan önce ölçülmüş olup yaklaşık % 80 rutubet miktarına sahip oldukları görülmüştür. %80 rutubet miktarı ile kurutulmaya başlanan keresteler 9 günlük kurutma süresi sonunda yaklaşık % 9.6 rutubet miktarına ulaşmıştır. Şekil 5.7'de saat bazında ölçülen rutubet miktarları görülmektedir.



Şekil 5.7. Kayın kerestelerde zamana bağlı olarak ortalama rutubet değişimi.

Kerestelerin günlük olarak rutubet miktarındaki değişim verileri incelendiğinde kurutma süreci başında rutubet miktarındaki değişim daha yüksek iken kurutma sürecinin ilerleyen aşamalarında zaman bağlı olarak rutubet miktarındaki değişimin azaldığı görülmektedir. Kurutma süreci boyunca yapılan hesaplamalar sonucu kerestelerin sekizinci günün sonunda LDN oranına yaklaştığı ve bu noktadan itibaren artık ağaç malzeme içerisindeki bağlı suyun buharlaştırılması (ağaç malzemeden uzaklaştırılması) sürecine başlanılması nedeniyle zamanı bağlı olarak rutubet miktarındaki değişimin azalma eğiliminde olduğu düşünülmektedir. Şekil 5.7'den görüldüğü üzere zamana bağlı olarak alınan rutubet miktarı verileri bu bilgiyi doğrular niteliktedir. Grafikte 192. saatten itibaren rutubet miktarındaki değişime yönelik doğru eğiminde azalma olduğu görülebilir. Tüm kurutma süreci ele alındığında ağaç malzeme rutubet miktarındaki değişimin dengeli bir şekilde gerçekleştiği söylenebilir.

Fırında kurutulan farklı kalınlıklardaki (4cm, 6cm, 8cm) Kayın keresteler fırından çıktığında Şekil 5.8'de görülen iğne elektrot barındırmayan, 40 mm'ye kadar rutubet ölçebilme özelliği bulunan Muhlbock Vanicek marka tahribatsız rutubet ölçerle son rutubetleri ölçülmüştür. Ağaç türü ve yoğunluğuna göre kalibrasyon yapılabilme özelliği bulunan nem ölçerin ağaç malzeme yoğunluk parametresi, Kayın ağacı yoğunluğuna olabildiğince yakın olacak şekilde (0,610 kg/m^3) değerine ayarlanmak suretiyle kalibre edilerek kerestelerin son rutubet ölçümleri gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.8. Tahribatsız rutubet ölçer.

Yapılan nihai ölçümler sonucu kerestelerin kendi aralarındaki sonuç rutubet farkının ± %1 olduğu görülmüştür. Bu farkın oluşmasının sebebi ise kerestelerin farklı kalınlık ölçülerinde (4cm, 6cm, 8cm) olmasından kaynaklanmaktadır. Kurutma işlemi sonucu fırın içinde elde edilen genel değerlere bakıldığında ise homojen bir kurutma sağlandığı yorumu yapılabilir.

5.2. KURUTMANIN DEĞERLENDİRİLMESİNE İLİŞKİN BULGULAR

Kurutma işlemi bittikten sonra kerestelerin sonuç rutubet değerleri TS EN 13183-1 ve ASTM D 4442-92 standartlarına uyularak fırın metodu ile teyit edilmiştir. Kereste parçalarının elde edilmesinde Şekil 4.8'de görülen, EDG (1992) [61] standardına uygun olarak hareket edilmiştir. Kerestelerden 3x3x3 cm ölçülerinde 4 adet parça kesilerek 103 °C'deki kurutma fırınına (etüve) konulmuş ve her 2 saatte bir ağırlıkları değişmez olana kadar tartılmıştır.

Kerestelerin sonuç rutubet miktarlarını tespit etmek için alınan örneklere dayalı olarak kurutma bitiminde, örnek parçaların hacimsel olarak rutubet dağılımları incelenmiştir. Bu incelemede kenar kısımlar ile orta kısımlar arasında ortalama % 0,2 fark olduğu görülmüştür. Bu sonuca göre kurutma işleminin kerestenin hacimsel olarak tüm bölgelerine eşit dağıldığı ve kerestelerde eş dağılımlı bir kuruma gerçekleştiği söylenebilir.

Kurutma kalitesinin değerlendirilmesi ise EDG (1992)'ye göre yapılmıştır. Kurutma sonucunda kereste nihai sonuç rutubetlerini tespit etmek amacıyla yapılan ölçümlerden

elde edilen sonuçların değerlendirilmesinde, aritmetik ortalama değeri ve ortalamayı meydana getiren münferit değerlerden en büyük ve en küçük olan rutubet değeri baz alınmış ve EDG tolerans tablosunun 1. ve 2. satırı ile karşılaştırılarak yorumlanmıştır. Bulunan rutubet değerlerinin kalınlığa bağlı olarak hangi kalite sınıfına dahil olduğu bu şekilde tespit edilmiştir.

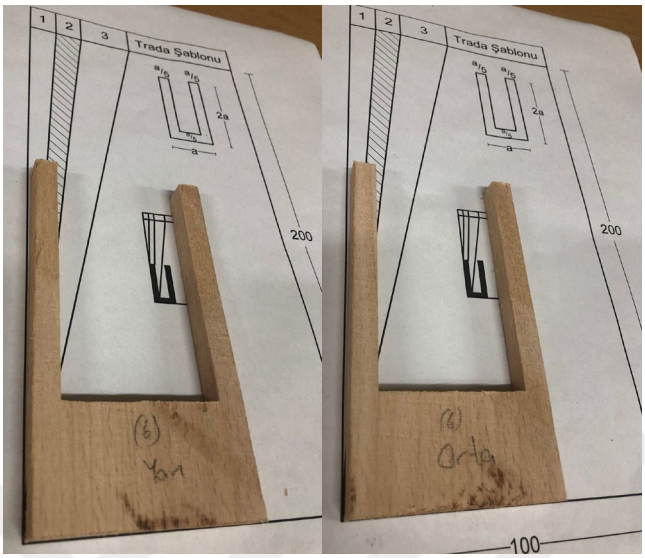
Kerestelerde kurutma işlemi sonrası 4 cm kalınlıkta olan kerestelerde ortalama sonuç rutubet değeri %8,51, 6 cm kalınlıkta olan kerestelerde ortalama sonuç rutubet değeri %10.48 olarak ölçülmüştür. Keresteler kurutulmadan önce hedeflenen sonuç rutubet değeri ise %10'dur. Bu sonuçlara göre 4 cm kalınlıklı kerestelerin EDG tolerans kriterlerine göre sapma değerlerinin -1,5 ile 1,5 arasında kaldığı, 6 cm kalınlıklı kerestelerin tolerans kriterlerine göre sapma değerlerinin ise -2 ile 2 arasında olduğu belirlenmiştir. Elde edilen bu sonuçlara göre her iki kalınlık değeri içinde, hedef sonuç rutubetleri ile hedeflenen ortalama rutubet arasındaki maksimum sapma tolerans değerleri sonucu E(Exclusive) sınıfı kurutma sağlandığı görülmüştür.

Ayrıca yine kerestelerin kalınlıkları göz önüne alınarak hedef sonuç rutubeti ile münferit rutubet arasındaki maksimum sapma değerlerine EDG tolerans tablosundan bakıldığında; 4 cm kalınlıktaki kerestelerin -2.0 ile 2.0 arasında, 6 cm kalınlıktaki kerestelerin ise -3.0 ile 3.0 arasında olduğu tespit edilmiştir. Elde edilen bu karşılaştırma sonuçlarına göre E (Exclusive) sınıfı kurutma sağlandığı tespit edilmiştir.

Kurutma gerilimlerinin (sertleşme) tespiti için Şekil 4.10'da görülen Trada Şablonu kullanılmıştır. Hazırlanan çatal örnekler Şekil 4.19'da görüldüğü üzere 1 cm kalınlığında, kereste kalınlıklarının genişliğinde olup çatal uçları ise 7 mm kalınlığında ve 9 cm boyunda olacak şekilde hazırlanmıştır. Örneklerin hazırlanmasında lif yönlerine dikkat edilmiş olup, Zhan, Avramidis'in (2017) yaptıkları çalışmadan yararlanılmıştır. Hazırlanan çatal örnekler Şekil 5.9'da görüldüğü üzere Trada şablonuna yerleştirilmiş, mesafe değişimleri ölçülmek üzere gerilmelerin miktarı belirlenmiştir. Bu işlem standartta belirtildiği üzere örneklerin kesilip hazırlanmasından hemen sonra ve 24 saat bekletildikten sonra olmak üzere iki kez tekrarlanmıştır. Başlanmadan önce ve işlemin gerçekleştirme aşamalarında fotoğraf çekilerek kayıt altına alınmıştır. Bu sayede kerestelerde gerilme (dış sertleşme) olup olmadığı gözlemlenmiştir.

Her iki gözlem sonucunda Şekil 5.9'da örnekleri görülen, gerek 4 cm gerekse 6 cm kalınlığında olan Kayın kerestelerin uç kısımları ilk ölçümde ve 24 saat geçtikten sonra

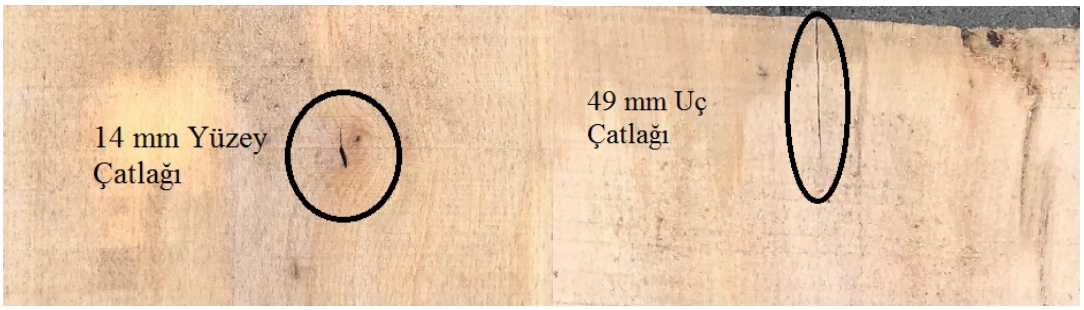
Trada şablonunda 1. bölgede kalmış ve hafif bir dış sertleşme olduğu sonucuna varılmıştır. Bu sonuçlara göre EDG tolerans tablosuna bakıldığında ise E (Exclusive) sınıfı kurutma sağlandığı gözlemlenmiştir.



Şekil 5.9. Trada şablonunda ölçüm yapılması.

Kurutma kalitesinin tespitinde kuruma sırasında meydana gelen çatlaklarında değerlendirilmesi gerekmektedir. Kurutmaya başlamadan önce, kerestelerinin sahip olduğu kusurlar belirlenmiş, çatlaklar keresteler üzerinde işaretlenmiştir. Kurutma sonrasında ise tüm örneklerin sahip oldukları kusurlar EDG standardına uygun olarak ölçülmüştür.

6 cm kalınlığa sahip kereste örneklerinin birinde yaklaşık 59 mm uzunluğunda uç çatlağı ve yaklaşık 14 mm uzunluğunda, 2 mm derinliğinde olan bir yüzey çatlağı tespit edilmiştir. Bu çatlaklar Şekil 5.10'da gösterilmiş olup 6 cm kalınlığındaki deney örnekleri kesildiğinde iç çatlaklara rastlanmamıştır. Ayrıca hücre çökmesi (kollaps) gözlenmeyip bunların dışında herhangi bir kurutma kusuruna rastlanmamıştır.



Şekil 5.10. YF-V yöntemi ile kereste kurutmada tespit edilen yüzey ve uç çatlakları.

Bu sonuçları EDG standardına göre değerlendirdiğimizde; 6 cm kalınlığında olan ağaçta, kollaps oluşumu gözlenmediğinden, iç çatlaklara rastlanmadığından, çatlak derinliği 2 mm'yi geçmemiş olmasından ve uç çatlağı da 100 mm'yi geçmediğinden dolayı deney örneğinde E (Exclusive) sınıfı kurutma sağlanmıştır.

4 cm kalınlığında olan deney örneğinde ise herhangi bir yüzey çatlağına, uç çatlağına, iç çatlaklara ve kollapslara rastlanmamıştır. Herhangi bir kusura rastlanmayan 4 cm kalınlığında olan deney örneklerinde de E (Exclusive) sınıfı kurutma gerçekleştiği görülmektedir.

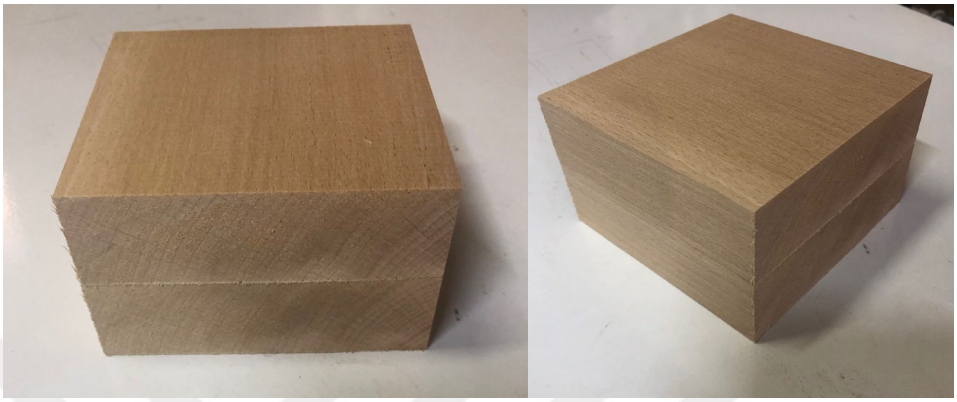
Şekil değişimleri incelendiğinde ise; kerestelerin birkaç örneğinde kuruma sonrası daralma anizotropisine uygun şekil değişimleri (oluklaşma) gözlenmiştir. Bu oluklaşmalar 6 cm kalınlığında olan ağaçların 16 cm genişliğe sahip olmasından dolayı olup çok az düzeydedir. Test numunelerinden birinin ağacın öz odununa yakın olması ve öz odunla diri odun arasında oluşan yoğunluk farkından dolayı orta düzeyde oluklaşma görülmüş olup Şekil 5.11'da gösterilmiştir. Ayrıca öz boyunca uzanan çatlağa sahip bu kerestenin kurutma esnasında çatlağında büyüme ve derinleşme gözlemlenmiştir. Bu veriler EDG standardına göre kabul edilebilir değişmeler olduğu için kurutma sonucunun E (Exclusive) kurutma kalitesi sınıfı gereklerini karşıladığı görülmektedir.



Şekil 5.11. YF-V yöntemi ile kereste kurutmada tespit edilen oluklaşma örneği.

Malzeme sertleşmesinin değerlendirilmesinde kullanılan diğer bir yöntem olan dilimleme (Slicing) testinde ise test numuneleri Şekil 4.11'de şematize edildiği üzere

örneğin baştan bir kısmı kesilerek temizlenmiştir. Temizlenen yüzey baz alınarak 100 mm sonrasında ise tekrardan kesilerek test numunesi hazırlanmıştır. Hazırlanan numune tam ortadan ikiye bölünerek oda şartlarında, (20±5°C, %55±%10 bağıl nemde) şartlandırıcıda bekletilmiş ve sonrasında yüzeyler arasında oluşan boşluğa Şekil 5.12'de gösterildiği üzere bakılmıştır.



Şekil 5.12. Dilimleme (Slicing) testi uygulama aşaması.

Farklı kalınlıktaki (4-6 cm) malzemelere uygulanan dilimleme testi sonucu ağaç malzeme yüzeylerinde herhangi bir boşluk gözlenmemiştir. Çizelge 4.3'e dilimleme testi değerlendirme tolerans çizelgesine bakılmış, E (Exclusive) sınıfı kalite düzeyine sahip olduğu görülmüştür.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada ön işlem uygulanmamış (ön kurutma, buharlama vb.) Doğu Kayını (*Fagus orientalis Lipsky*) odunları Yüksek Frekans Vakum (YF-V) yöntemi kullanılarak kurutulmuş ve kurutma sonrası ürün ve kurutma kalitesi EDG (1992) standartları referans alınarak değerlendirilmiştir.

Çalışma kapsamında kullanılan ağaç malzemeler Bolu ili Aladağ ormanlarından temin edilmiştir. Kurutma işleminde 8 m^3 yükleme kapasitesine sahip, 50 kW gücünde, 10 kV anma gerilimde ve 6,75 MHz frekans üretme kapasitesine sahip olan YF jeneratörü kullanan YF-V fırını kullanılmıştır. Kurutma süreci tedrici olarak önceden belirlenen kurutma parametreleri dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir. Kurutma işlemi Düzce ilinde faaliyet gösteren Sivrikaya Orman Ürünleri Ltd. Şti. tesislerinde çalışma kapsamında belirlenen ön koşullara göre gerçekleştirilmiştir. Ağaç malzemeye ön işlem uygulanmaksızın kurutma yapılması firma içinde yeni bir deneyim niteliğindedir.

Çalışma kapsamında kurutma süreci adımları ağaç malzemenin başlangıç rutubet miktarı (%80) dikkate alınarak planlanmıştır. Kurutma sürecinin ilk aşamasında yüzey çatlaklarının oluşmasının engellenmesi amacıyla malzeme sıcaklığının olabildiğince düşük tutulması amaçlanmıştır. YF-V yönteminin bu amaca hizmet etmek için oldukça uygun bir yöntem olduğu görülmüştür. Çalışmada kullanılan YF-V fırınında yaklaşık 0,975 mbar vakum basıncına ulaşılabilmektedir. Bu sayede suyun kaynama noktasının teorik olarak yaklaşık 40 °C'nin altına düşürülmesi sağlanmış olmaktadır. Böylece kurutma işleminin ilk aşamasında düşük sıcaklıklar kullanılarak malzemede kurutma sağlanması nedeniyle, ağaç malzemede sıklıkla kurutma sürecinin başında oluşan yüzey çatlakları büyük oranda giderilmiştir. Kurutma sonrası EDG (1992)'ye göre yapılan kalite kontrollerinde çok az sayıda deney numunesinde (yaklaşık %2) yüzey çatlaklarına rastlanılmış olup bu yüzey çatlaklarının 14 ila 49 mm arasında ve 1 mm'den daha dar kılcal çatlaklar olduğu tespit edilmiştir. Bu durum uygulanan kurutma yönteminin ön işlemler uygulanmamış olmasına rağmen oldukça iyi sonuçlar ortaya çıkardığını göstermektedir.

Kurutma sürecinin başında arzu edilen ağaç malzeme sıcaklığı 35-45 °C olarak belirlenmiştir. Ağaç malzemede bu sıcaklığa ilk 24 saat içerisinde ulaşılmıştır. Bu sıcaklığa ulaşılmasının kontrollü bir şekilde elde edilmesi için YF-V fırını jeneratör gücü 14-17 kW aralığında fasılalı olarak uygulanmıştır. İlk 6 saat boyunca 60 dk. Güç uygulanıp 30 dk. cihaz durdurulmak suretiyle ısıtma kontrolü sağlanmıştır. Altıncı saatten sonra yirmi dördüncü saate kadar jeneratör gücü 14-17 kW seviyeleri arasında sabit tutularak ağaç malzemenin sıcaklığının 40-45 °C arasına yükseltilmesi sağlanmıştır ve ağaç malzeme LDN ulaşıncaya kadar bu sıcaklığın sabit tutulması için cihaz belirli aralıklarla kapatılıp tekrar devreye sokulması sağlanmıştır. Bu sürecin kontrolünü sağlamak üzere YF-V fırını bilgisayar kontrol ünitesi aracılığıyla düzenli olarak ağaç malzeme iç sıcaklıkları kullanılan PT 100 termocupl sıcaklık sensörleri kullanılarak takip edilmiştir. Sensörlerden alınan sıcaklık verilerinin belirlenen 40 ila 45 °C aralığının dışına çıkması durumunda eğer sıcaklık belirlenen aralığın üzerinde ise cihaz durdurularak soğuma sağlanmış, eğer ölçülen sıcaklık belirlenen aralığın altına düşmüş ise cihaz tekrar devreye alınarak sıcaklığın arzu edilen seviyeye yükseltilmesi sağlanmıştır. Bu süreçte suyun kaynama noktasının arzu edilen düşük sıcaklık seviyelerinde tutulması ve ağaç malzemeden çıkan suyun etkin bir şekilde ortamdan uzaklaştırılmasını sağlamak üzere uygulanan vakum basıncı (0,880 - 0,920 mbar) kullanılan elektronik vakum basıncı sensörleri aracılığı ile kontrol edilerek vakum pompasının otomasyonu sağlanmıştır.

Ağaç malzemede boyutsal değişim ve birçok kurutma kusurunun LDN düzeyine ulaşıldıktan sonra ortaya çıktığı bilinmektedir. Çalışma kapsamında ağaç malzemenin kurutma sürecindeki rutubet miktarının takip edilmesi amacıyla malzeme üzerine bağlanan dielektrik yöntemle nem ölçme prensibine dayanan nem sensörleri aracılığı ile ağaç malzeme içerisindeki rutubet miktarı tüm kurutma periyodunca izlenerek kayıt altına alınmıştır. Ayrıca ağaç malzeme rutubet miktarının ikincil kontrolünü sağlamak amacıyla yapılan yüklemenin ağırlığındaki değişim cihaz gövdesine bağlanmış 4 adet yük hücresinden alınan ağırlık ölçümlerinin aritmetik ortalaması alınmak suretiyle takip edilmiştir. Kurutma sürecinin başında yapılan yüklemedeki ağaç malzeme ağırlığı 4217 kg olarak ölçülmüştür. Ağaç malzemede rutubet miktarı tayininin malzeme ağırlığındaki değişime göre hesaplanması için kullanılan matematiksel formülasyonlar kullanılarak ağaç malzemedeki kütle kayıplarına göre tahmini rutubet miktarları hesaplanarak nem sensörlerinden alınan ölçümlerle karşılaştırmalı olarak süreç takip edilmiştir. Kurutma

sürecinin başında ve sonunda ağaç malzemenin rutubet miktarının belirlenmesi amacıyla fırın metodu kullanılarak ağaç malzemenin rutubet miktarları tespit edilmiş ve %78 olarak tespit edilmiştir. Kurutma süreci sonunda arzu edilen rutubet miktarının (%10) altında kalınmasını garanti altına almak amacıyla kurutma parametresi olarak kullanılan başlangıç rutubet miktarının dielektrik yöntemle ölçülen %80 olarak kullanılmasına karar verilmiştir. Kurutma süreci sonunda deney örneklerinin sahip olduğu rutubet miktarları benzer şekilde fırın yöntemi kullanılarak belirlenmiş olup 4 cm kalınlıktaki örneklerde ortalama %8,51, 6 cm kalınlıktaki örneklerde ise ortalama %10,48 olarak tespit edilmiştir. Kurutma sürecinin başında arzu edilen rutubet miktar %10 olarak belirlenmiştir. Bu doğrultuda YF-V yöntemi ile yapılan kurutmada arzu edilen nihai rutubet miktarına ulaşıldığı görülmektedir. Örneklerin nihai rutubet miktarları arasında ortaya çıkan küçük farkın deney örneklerinin kalınlıkları arsındaki farktan kaynaklandığı düşünülmektedir.

Kurutma sürecinde toplanan veriler incelendiğinde gerek nemölçerlerden alınan veriler gerekse ağaç malzeme kütle kaybına bağlı olarak hesaplanan rutubet miktarı verileri kurutma sürecinin 168 ila 180. saatleri arasında deney örneklerinin LDN rutubet miktarına ulaştığı belirlenmiştir. LDN rutubet miktarının altına düşüldüğünde sıcaklığa bağlı olarak ağaç malzemede ortaya çıkan yüzey çatlakları ve benzeri kurutma kusurlarının ortaya çıkma riski azaldığından kurutma süresini hızlandırmak için ağaç malzeme sıcaklığının 50-53 °C arasına çıkartılması amaçlanmıştır. Bu doğrultuda kurutma sürecinin 168. saatinden (7. gün) itibaren ağaç malzeme sıcaklığının tedrici olarak 50 ila 53 °C aralığına çıkarılması sağlanmış ve kurutma sürecinin sonuna kadar bu sıcaklık aralığının korunması amacıyla kontrollü olarak cihazın çalışma ve dinlenme periyotları sistematize edilmiştir. Kurutma işlemi arzu edilen rutubet miktarı olan %10 seviyesine ulaşıldığı gerek nemölçerlerden alınan veriler gerekse ağırlık ölçümlerine bağlı olarak rutubet miktarının belirlenmesi için yapılan hesaplamalar ile doğrulandıktan sonra kurutma işlemi sonlandırılmıştır. Çalışmada kullanılan 4-6 cm kalınlardaki Doğu Kayını örnekleri için kurutma süreci 216. saatte (9. gün) sonlandırılmıştır.

Kurutma sürecinin sonunda ağaç malzemelerden 1650 kg su elde edilmiş olup ağaç malzeme ağırlığının yaklaşık %39'u oranında ağaç malzemeden su çıkışı sağlandığı görülmüştür. Kurutma süreci boyunca yükleme yapılan ağaç malzeme yığınlarının farklı bölgelerine (üst – orta ve alt) bağlanılan sıcaklık ve nem sensörleri aracılığı ile

malzemelerde oluşan sıcaklık ve nem gradyanları izlenmiş olup RF/V yöntemi ile tüm kurutma süreci boyunca homojen bir ısınma ve rutubet gradyanı sağlandığı görülmüştür. Ayrıca kurutma süreci sonunda da benzer şekilde kereste istifinin farklı bölgelerinden alınan rutubet ölçümleri de bu sonucu doğrular niteliktedir. Yükleme yapılan kereste istifinin farklı bölgelerinden alınan rutubet miktarı ölçümleri arasında benzer kalınlıklardaki örnek rutubetleri arasında ortalama % 1'den daha küçük sapmalar olduğu görülmüştür. Bu durum ağaç malzemenin kurutulması işleminin YF-V yöntemi ile son derece başarılı bir şekilde gerçekleştirildiğinin göstergesidir. Kurutma sonrası yapılan kurutma kalitesi kontrolleri de bu durumu doğrular niteliktedir.

Kurutma sonucu deney örnekleri uluslararası kurutma kalitesini karşılaştırmada kullanılan EDG (1992) standardına göre standartta belirtilen kalite parametreleri ile karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Deney sonucunda, kurutulan kerestelerde EDG standartlarına göre yapılan çatal örnek (prong test) ve dilimleme testi sonuçlarına göre hafif yüzey sertleşmesi gözlenmiş olup herhangi bir hücre çökmesi (kollaps) oluşumu tespit edilmemiştir. Bu veriler ışığında YF-V kurutma yöntemi ile herhangi bir ön işleme tabi tutulmamış Doğu Kayını örneklerinin EDG standardına göre "E" (Exclusive) sınıfında olduğu yani son derece yüksek kurutma kalitesi sınıfı gereklerini karşıladığı anlaşılmaktadır. Daha hızlı kuruma ve kurutma sürecinin görece kısa olması ise kullanılan kurutma yöntemi ile ilişkilendirilebilir.

Kullanılan YF-V yöntemi ilk kurulum maliyeti görece yüksek olmasına rağmen sistemin işletme maliyetleri alternatif kurutma sistemlerine nazaran oldukça düşüktür. Ayrıca sistemin işletilmesinde elektrik enerjisinin kullanılması özellikle konvansiyonel kurutma sistemleri ile karşılaştırıldığında çok daha çevre dostu bir kurutma yöntemi olduğunu ortaya koymaktadır. 9 günlük kurutma süreci boyunca toplam 141 kW elektrik enerjisi tüketilmiştir.

YF-V yöntemi ile ağaç malzemenin kurutulmasının sağladığı bir diğer avantaj ise ağaç malzeme bünyesinden çıkan ve değerli ekstraktif maddeler içeren suyun geri kazanılabilmesidir. Hali hazırda kullanılan konvansiyonel kurutma sistemlerinde bu suyun geri kazanımı mümkün değildir. Bu yöntemlerde ağaç malzeme içerisindeki su buharlaştırılmak suretiyle havaya karışmaktadır. Ağaç malzemelerden çıkarılan bu suların çok sayıda farklı endüstri kollarında (tarım, gübre üretimi, kozmetik, boya ve emprenye maddeleri üretimi vb.) kullanım alanına sahip olduğu gerek firma yetkililerinin bu yönde müşterilerden talepler aldıklarına yönelik beyanatları, farklı

endüstri kollarına daha önceden satışlar yapılmış olması ve gerekse çeşitli akademik çalışmalardan görülmektedir. Bu durum, YF-V yöntemi ile ortaya çıkan tüm çıktıların geri dönüşümü ve katma değerli ürünlere dönüşebilme potansiyelinin olması nedeniyle alternatif kurutma yöntemlerine nazaran çok daha etkin bir kurutma yöntemi olduğu sonucunu doğrulamaktadır.

Ayrıca kurutma sırasında düşük sıcaklıklar kullanılarak kurutma gerçekleştirilebildiğinden ağaç malzemede renk değişikliği veya lekelenme sorunlarının ortaya çıkmadığı da görülmüştür. Bu yöntemde kereste istifleri arasına çıtalar koymak suretiyle hava sirkülasyonu sağlanmasına ihtiyaç duyulmadığından aynı hacimli konvansiyonel kurutma fırınına nazaran kurutma kapasitesi daha yüksektir.

Sonuç olarak, çalışmada kullanılan ağaç malzemeler ön işlem görmemiş olmamasına rağmen, çalışmadan edilen bulgular YF-V yöntemi ile oldukça iyi bir kurutma kalitesi elde edildiğini göstermektedir. Özellikle konvansiyonel kurutma sistemleri ile karşılaştırıldığında kurutma süresinin %70-80 oranında kısaltılabildiğini, bu sayede birim ürün üretim çevrim zamanlarının kısaltılmasında endüstride çok önemli katkılar sağlayabileceğini göstermektedir. Bu nedenle ilerleyen çalışmalarda farklı kurutma yöntemleri ile detaylı karşılaştırmalar yapılması önerilmektedir. Ayrıca ülkemizde yetişen ve endüstride yaygın kullanım alanına sahip farklı ağaç türleri için de YF-V yöntemi ile kurutma sistemi ile denemeler yapılarak farklı türler için gerekli olan kurutma programlarının oluşturulması da önerilmektedir.

7. KAYNAKLAR

[1] S. N. Salikeeva, F. T. Galeyeva, R. R. Safin and N. A. Filipova, *Wood and the technology of wood driying*, Kazan, Tatarstan: Knitu Yayınevi, 2012.

[2] K. Radmanovic, I. Dukic and S. Pervan, "Specific heat capacity of wood", *Drvna industrija*, c. 65, sayı 2, ss. 151–157, 2014.

[3] G. Tsoumis, *Science and technology of wood; structure,properties,utilization*, Vol. 115. New York: Van Nostrand Reinhold, 1991.

[4] Ross, R. J., "Wood handbook-Wood as an engineering material", USDA Forest Service, Forest Products Laboratory, General Technical Report FPLGTR-190, 2010.

[5] R. Kantay, *Kereste Kurutma ve Buharlama*, İstanbul,Türkiye: Ormancılık Eğitim ve Kültür Vakfı, 1993, c. 6, sayı 14.

[6] M. R. Milota ve J. B. Wilson, "Review of innovative drying methods", *Forest Products Department*, ss. 92–111, 1984.

[7] A. Y. Bozkurt ve N. Erdin, *Ağaç teknolojisi*, İstanbul,Türkiye:İstanbul Üniversitesi Orman Fakültesi Yayınları, 2011.

[8] M. Campean, "Timber drying methods – Passing through history into the future", *11.th IUFRO Wood Drying Conference*, 2010, 1, ss. 3–16.

[9] Ö. Ünsal vd., "Çevre dostu kereste kurutma teknolojileri : yüksek frekans ve mikrodalga", *II. Ulusal Akdeniz Orman ve Çevre Sempozyumu*, 2014, ss. 554–559.

[10] S. Korkut, "Kereste kurutmada yeni trend: Yüksek frekans", *I. Ulusal Akdeniz Orman ve Çevre Sempozyumu*, 2011, ss. 1095–1099.

[11] S. Avramidis ve F. Liu, "Drying characteristics of thick lumber in a laboratory radio frequency/vacuum dryer", *Drying Technology*, c. 12, sayı 8, ss. 1963–1981, 1994.

[12] A. Koumoutsakos, S. Avramidis, and S. G. Hatzikiriakos, "Radio frequency vacuum drying of wood. II. experimental model evaluation", *Drying Technology*, c. 19, sayı 1, ss. 85–98, 2001

[13] J. Denig, E. M. Wengert and W. T. Simpson, "Drying hardwood lumber", Forest Products Laboratory, General Technical Report FPL; GTR-118, 2000.

[14] E. Burdurlu, *Kereste Endüstrisi ve Kurutma*, Ankara, Türkiye: Bizim Büro Basımevi, 1995.

[15] T. Kudra and A. S. Mujumdar, *Advanced drying technologies*, Second edition. Newyork, England: CRC press, 2009.

[16] A. Hermawan et al., "Effects of high-temperature and low-humidity pretreatment on the drying properties of sugi boxed-heart timber with black-colored heartwood", *Drying Technology*, c. 30, sayı 7, ss. 780–786, 2012.

[17] A. Koumoutsakos, S. Avramidis and S. G. Hatzikiriakos, “Radio frequency vacuum drying of wood. I. mathematical model”, *Drying Technology*, c. 19, sayı 1, ss. 65–84, 2001.

[18] S. Avramidis and R. Zwick, “Radio frequency/vacuum drying of B.C. softwoods; preliminary experiments.”, *In 43rd Western Dry Kiln Association Meeting,Reno,NV*, ss. 82–92, 1992.

[19] N.H. Lee and K. Hayashi, “Effect of end-covering and low pressure steam explosion treatment on drying rate and checking during radio-frequency/vacuum drying of Japanese cedar log cross sections”, *Forest Products Journal*, c. 50, sayı 2, ss. 73–78, 2000.

[20] R. Zwick and S. Avramidis, “Current status of radio frequency / vacuum drying”, *WDKA*, ss. 45–51, 1996.

[21] H. Resch, “High frequency electric current for drying of wood - historical perspectives”, *Maderas. Ciencia y tecnologia*, c. 8, sayı 2, ss. 67–82, 2006.

[22] X. Li et al., “Microwave-Vacuum drying of wood: model formulation and verification”, *Drying Technology*, c. 26, sayı 11, ss. 1382–1387, 2008.

[23] M. K. Dubey et al.,“Comparative study of radio-frequency and microwave heating for phytosanitary treatment of wood”, *European Journal of Wood and Wood Products*, c. 74, sayı 4, ss. 491–500, 2016.

[24] V. A. Biryukov, “Dielectric heating and drying of wood”, *GLBI Goslesbumizat*, ss. 117, 1961.

[25] R. A. Harris and M. A. Taras, “Comparison of moisture content distribution, stress distribution, and shrinkage of red oak lumber dried by a radio frequency/vacuum drying process and a conventional kiln”, *Forest Product Journal*, c. 34, sayı 1, ss. 44–54, 1984.

[26] S. O. Nelson and A. W. Kraszewski, “Dielectric properties of materials and measurement techniques”, *Drying Technology*, c. 8, sayı 5, ss. 1123–1142, 1990.

[27] K. F. Djakonov and A. A. Gorjaev, “Wood drying with high frequency current”, *Forest Management Publishing*. Moskova, 1981.

[28] E. Koppelman, “Process and apparatus for seasoning wood”, U.S. Patent 3 986 268 A, 1973.

[29] Z. H. Wu, T. Fruno and B. Y. Zhang, “Properties of curved laminated veneer lumber made from fast-growing species with radiofrequency heating for use in furniture”, *Journal of Wood Science*, c. 44, sayı 4, ss. 275–281, 1998.

[30] W. B. Smith, P. F. Schneider and H. Resch, “Rapid fixation of CCA wood preservative with electromagnetic energy”, *Forest Products Journal*, c. 46, sayı 8, ss. 47–51, 1996.

[31] S. Avramidis, R. L. Zwick and J. B. Neilson, “Commercial-scale rf/v drying of softwood lumber. Part 1. Basic kiln design considerations”, *Forest Products Journal*, c. 46, sayı 5, s. 44, 1996.

[32] S. Avramidis and R. L. Zwick, “Commercial-scale rf/v drying of softwood lumber. part 2. Drying characteristics and lumber quality”, *Forest Products Journal*, c. 46, sayı 6, s. 27, 1996.

[33] L. Zhang, S. Avramidis and S. G. Hatzikiriakos, “Moisture flow characteristics during radio frequency vacuum drying of thick lumber”, *Wood Science and Technology*, c. 31, ss. 265–277, 1997.

[34] R. Huang et al., “Factors affecting the temperature increasing rate in wood during radio-frequency heating”, *Drying Technology*, c. 31, sayı 2, ss. 246–252, 2013.

[35] D. Elustondo, S. Avramidis and L. Oliveira, “Industrial evaluation of re-dry strategy for softwood lumber”, *Maderas. Ciencia y tecnología*, c. 7, sayı 2, ss. 65–78, 2005.

[36] H. Resch and E. Gautsch, “Vakuumtrocknung von schnittholz im dielektrischen wechselfeld”, *Holzforschung u. Holzverwertung*, c. 52, sayı 5, ss. 105–108, 2000.

[37] X. Li et al., “Studying on RF/V drying characteristics for plantation poplar”, *9.th International IUFRO Wood Drying Conference*, 2005, ss. 191–196.

[38] N. Lee et al., “Effect of pretreatment with high temperature and low humidity on drying time and prevention of checking during radio-frequency/vacuum drying of Japanese cedar pillar”, *Journal of Wood Science*, c. 56, sayı 1, ss. 19–24, 2010.

[39] J. Kendall and V. Lavoie, “Identification of profitable continuous radio frequency drying applications for the hardwood industry”, *FP Innovations–Forintek Division*, Québec, Canada, 2010, pp. 23

[40] A. D. Koumoutsakos, S. Avramidis and S. G. Hatzikiriakos, “Radio frequency vacuum dyring of wood. III. two-dimensional model, optimization, and validation”, *Drying Technology*, c. 21, sayı 8, ss. 1399–1410, 2003.

[41] S. Avramidis, L. Iliadis and S. D. Mansfield, “Wood dielectric loss factor prediction with artificial neural networks”, *Wood Science and Technology*, c. 40, sayı 7, ss. 563–574, 2006.

[42] A. Koumoutsakos, “Modelling radio frequency/vacuum drying of wood”, Ph.D. dissertation,Department of wood science,The University Of British Columbia, Vancouver, Canada, 2001.

[43] X. Jia, J. Zhao and Y. Cai, “Mass and heat transfer mechanism in wood during radio frequency/vacuum drying and numerical analysis”, *Journal of Forestry Research*, c. 28, sayı 1, ss. 205–213, 2017.

[44] H. Chai, J. Zhao and Y. Cai, “Development and validation of a simulation model for the temperature field during high-frequency heating of wood”, *Forests*, c. 9, sayı 6, ss. 563,2018.

[45] C. Salinas et al., Vasco, “Modelling of radio-frequency heating of piles of pinus radiata wood”, *Bioresources*, c. 13, sayı 1, ss. 945–953, 2018.

[46] Ö. Ünsal vd., “Ahşap kurutmada yüksek frekans-vakum teknolojisi”, *Tarih Kültür ve Sanat Araştırmaları Dergisi*, c. 1, sayı 4, ss. 310–318, 2012.

[47] R. Joseph and P. N. Peralta, “Nonisothermal radio frequency drying of red oak”, *Wood and Fiber Science*, c. 33, sayı 3, ss. 476–485, 2001.

[48] A. S. Mujumdar, “Handbook of industrial drying”, CRC press, 2006.

[49] D. Elustondo, S. Avramidis and R. Zwick, “The demonstration of increased lumber value using optimized lumber sorting and radio frequency vacuum drying”, *Forest Products Journal*, c. 55, sayı 9759, ss. 76–83, 2005.

[50] V. V. Lopatin, M. A. Goreshnev and F. G. Sekisov, “Moisture transport in birch lumber at low radio-frequency and contact vacuum drying”, *European Journal of Wood and Wood Products*, c. 72, sayı 6, ss. 779–784, 2014.

[51] Z. A. Rabidin et al., “Characteristics of timbers dried using kiln drying and radio frequency-vacuum drying systems”, *MATEC Web of Conferences*, 2017, ss. 10001.

[52] K. M. Tubajika et al., “Efficacy of radio frequency treatment and its potential for control of sapstain and wood decay fungi on red oak, poplar, and southern yellow pine wood species”, *Journal of Wood Science*, c. 53, sayı 3, ss. 258–263, 2007.

[53] J. Zhou et al., “Effects of temperature on the bending performance of wood-based panels”, *Bioresources*, c. 7, sayı 3, ss. 3597–3606, 2012.

[54] J. Zhou et al., “Finite element modeling and experimental validation of radio frequency heating (rfh) of curved laminated wood-based panels”, *Holzforschung*, c. 68, sayı 6, ss. 699–705, 2014.

[55] H. Resch and C. Hansmann, “Tests to dry thick eucalyptus boards in vacuum using high frequency heating”, *Holzforschung und Holzverwertung*, c.54, sayı 3, ss. 59–61, 2002.

[56] Z. Bingning, “Dielectric characteristics of two bc coastal species during radio frequency heating”, M.S. thesis, Department of Forestry, University of British Columbia, Vancouver, Canada,1997.

[57] Z. Bingning and S. Avramidis, “On the loss factor of wood during radio frequency heating”, *Wood Science and Technology*, c. 33, sayı 4, ss. 299–310, 1999.

[58] İ. K. Tunçer, “Yüksek frekans RF teknolojisiyle çay kurutma”, *Tarım Makinaları Bilim Dergisi*, c. 2, sayı 3, ss. 197–201, 2006.

[59] H. Çakmak ve Ş. Tavman, “Radyo frekans sistemi ve gıda sanayiindeki uygulamaları”, *DergiPark*, c. 36, sayı 6, ss. 365–372, 2011.

[60] T. Ogulata, D. F. Kadem, ve E. Koc, “Tekstilde kurutma yöntem ve makinalari”, *IV. Ulusal Tesisat Muhendisligi Kongresi ve Sergisi*, 1999, ss. 803–810.

[61] *Recommendation on Assesment of Drying Quality of Timber*, EDG, 1992.

[62] Y. Örs ve H. Keskin, *Ağaç Malzeme Bilgisi*, İstanbul, Türkiye: Atlas Yayın Dağıtım, 2001.

[63] M. C. Mccurdy, “Efficient kiln drying of quality softwood timber”, Ph.D. dissertation, Department of Chemical and Process Engineering, University of Canterbury, Christchurch, New Zeland, 2005.

[64] R. Kantay, “Ağaç malzemenin rutubeti ve ölçülmesi”, *İstanbul Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi*, c. 36, sayı 2, 1986.

[65] J. E. Reeb, “Wood and Moisture Relationships”, *Oregon state univercity extension service*, ss. 1–8, 2009.

[66] A. Y. Bozkurt ve R. Kantay, "Ağaç Malzemenin Kurutulması", *İstanbul Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi*, c. 40, sayı 2, ss. 17,1990.

[67] Berkel A., *Ağaç Malzeme Teknolojisi*, İstanbul, Türkiye: İstanbul Üniversitesi Orman Fakültesi Yayınları, 1972.

[68] P. Perre and R. B. Keey, "Drying of wood principles and practices", *Handbook of Industrial Drying,* ss. 822–872, 2014.

[69] MEB., *Müzik aletleri yapımı*, Ankara, Türkiye: Milli Eğitim Bakanlığı, 2011.

[70] R. B. Miller, "Structure of Wood", *Wood handbook Wood as an engineering material*, c. 2, ss. 2–4, 1999.

[71] A. Y. Bozkurt, "Yapraklı ağaç odunlarının anatomik yapısı", *İstanbul Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi*, c. 2, ss. 45–62, 1967.

[72] Doğal kurutma örneği. (2019, 24 Temmuz). Erişim: http://www.sabriacarkerestecilik.com/urun-cam-109.html#urun.

[73] G. I. Torgovnikov, "Dielectric properties of wood and wood-based materials", *Springer-Verlag*, c. 9, sayı 8, ss. 135–157, 1993.

[74] A. S. Mujumdar, "Handbook of industrial drying", CRC press, 2014, ss.1312

[75] J. Resnik and F. A. Kamke, "High frequency heating of wood with moisture content gradient", *Wood and Fiber Science*, c. 29, sayı 3, ss. 264–271, 1997.

[76] T. E. Timell, "Springer series in wood science", Springer-Verlag, 1992.

[77] Y. Göker vd., "Odunun dielektrik özelliklerini etkileyen faktörler", *İstanbul Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi*, c. 54, sayı 1, s. 36, 2004.

[78] W. L. James, "Dielectric properties of wood and hardboard: variation with temperature, frequency, moisture content, and grain orientation", *Forest Products Journal*, s. 245, 1975.

[79] M. Yokoyama and M. Norimoto, "Contour diagrams of dielectric loss for absolutely dried spruce wood", *Bulletin of the Wood Research Institute*, c. 83, ss. 37–39, 1996.

[80] R. T. Lin, "Review of the dielectric properties of wood and cellulose", *Forest Journal Products*, c. 17, sayı 7, ss. 61–66, 1967.

[81] W. L. James, "Dielectric behavior of douglas fir at various combinations of temperature, frequency, and moisture content", *Forest Products Journal*, c. 37, sayı 6, ss. 44–48, 1977.

[82] M. F. Kabir, "Temperature dependence of the dielectric properties of wheat of rubber wood", *Wood and Fiber Science*, c. 33, sayı 2, ss. 234–238, 2001.

[83] E. Peykens et al., "Dielectric properties of hardwood species at microwave frequencies", *Wood Science and Technology*, c. 18, sayı 4, ss. 267–280, 1984.

[84] M. Norimoto and T. Yamada, "The dielectric properties of wood VI:on the dielectric properties of the chemical constituents of wood and the dielectric anisotropy of wood", c. 12, sayı 51, ss. 31–43, 1971.

[85] M. F. Kabir, W. M. Daud, ve K. Khalid, "Dielectric and ultrasonic properıies of rubber wood. Effect of moisture content, grain direction and frequency.", *Springer-Verlag*, c. 56, ss. 223–227, 1998.

[86] H. Şahin, “Mikrodalga frekanslarda doğal ve emprenye edilmiş odun türlerinin dielektrik özellikleri”, Doktora tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon, Türkiye, 2002.

[87] M. F. Kabir et al.,“Dielectric properties of rubber wood at microwave frequencies measured with an open-ended coaxial line”, *Wood and Fiber Science*, c. 29, sayı 4, ss. 319–324, 1997.

[88] O. Erden, “Jeotermal enerji ile kereste kurutma”, Yüksek lisans tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 1997.

[89] İ. Ceylan, “Programlanabilir (plc) ısı pompalı kurutucunun tasarimi, imalati ve kereste kurutma işleminde deneysel incelenmesi”, Doktora tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2007.

[90] W. P. J. Havener, “Drying northern red oak dimension squares with industrial sized radio-frequency/vacuum dry kilns”, M.S. thesis, College of Environmental Science and Forestry, University of New York, Syracuse , New york, USA, 1990.

[91] R. B. Keey et al., “Kiln-drying of lumber”, Springer Science & Business Media, 2012.

[92] Y. Örs, “Kurutma ve Buharlama Tekniği”, Karadeniz Teknik Üniversitesi Basımevi, 1986.

[93] I. W. Turner et al., “A numerical investigation of combined microwave and convective drying of a hygroscopic porous material: A study based on pine wood”, *Chemical Engineering Research and Design*, c. 76, sayı 2, ss. 193–209, 1998.

[94] E. Cserta, “Drying process of wood using infrared radiation”, Ph.D. dissertation, Faculty of Wood Science,University of West Hungary, Sopron, Hungary, 2012.

[95] Ö. Ünsal vd., “Sarıçam kerestesinin kurutulmasında akustik emisyon yönteminin kullanılması”, *Journal of Advanced Technology Sciences*, c. 5, sayı 2, ss. 28–40, 2011.

[96] X. Jia et al., “The moisture transfer mechanism and influencing factors in wood during radio-frequency / vacuum drying”, *European Journal of Wood and Wood Products*, c. 74, sayı 2, 2014.

[97] W. T. Simpson, “Drying wood: a review - part II”, *Drying Technology*, c. 2, sayı 3, ss. 353–368, 2007.

[98] H. Frederick, S. Sawmill and R. Zwick, “Kootenay wood vine radio frequency/ vacuum wood kiln feasibility study”, Nelson & Area Economic Development Commission, New Zealand, Sep. 6, 1996.

[99] N. Erdin ve A. Y. Bozkurt, “Odun Anatomisi”, İstanbul üniversitesi, 2000.

[100] A. Y. Bozkurt, “Odun Anatomisi”, *İstanbul Üniversitesi Orman Fakültesi Yayınları*, 1992.

[101] R. Anşin ve Z. C. Özkan, “Tohumlu Bitkiler”, Karadeniz teknik üniversitesi basımevi, 1997.

[102] N. As vd., “Türkiye’de yetişen endüstriyel öneme sahip ağaçların anatomik, fiziksel, kimyasal özellikleri”, *İstanbul Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi*, c. 51, sayı 1, ss. 71–88, 2001.

[103] K. Üçüncü, “Tam kuru doğu kayını odununun adsorpsiyon özellikleri”, *İstanbul Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi*, c. 57, sayı 2, ss. 45–59, 2007.

[104] *Kereste parçasının rutubet muhtevası-Fırın kurusu metotla belirleme*, TSE EN 13183-1, 2002.

[105] *Standard test methods for direct moisture content measurement of wood and wood-base materials,* ASTM 4442, 2011.

[106] R. Kantay, “Türkiye’nin önemli bazı orman ağaç türleri kerestelerinin teknik kurutma özellikleri üzerine araştırmalar”, *İstanbul Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi*, c. 28, sayı 1, ss. 139-140,156-158, 1978.

[107] J. Zhan and S. Avramidis, “Impact of conventional drying and thermal post-treatment on the residual stresses and shape”, *Drying Technology*, c. 35, sayı 1, ss. 15–24, 2017.

[108] J. Welling, “EDG-recommendation-Assesment of drying quality of timber”, Oct. 23, 1994.

[109] Vakum pompası hakkında. (2019, 7 Ağustos). Erişim: http://www.vakumpompasi.biz/vakum-hakkinda.

[110] M. Budakçı vd., “Antımicrobial properties of wood water obtaıned by a hıgh frequency vacuum drying method”, *The online journal of science and technology*, c. 8, sayı 3, ss. 21–25, 2018.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Osman Halit ÜLKER

Doğum Tarihi ve Yeri : 11.07.1985 / Kütahya

Yabancı Dili : İngilizce

E-posta : osmanhalitulker@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Y. Lisans	Ağaç İşleri Endüstri Mühendisliği	Düzce Üniversitesi	2019
Lisans	Mobilya ve Dekorasyon Öğretmenliği	Abant İzzet Baysal Üniversitesi	2009
Lise	Elektrik Bölümü	Kütahya Teknik Lisesi	2003

YAYINLAR

H. H. Ciritcioğlu ve O. H. Ülker, “Bir radyo frekans fırınında ahşap örneklerin kurutulması üzerine jeneratör voltajı etkisinin araştırılması”, 3rd International Engineering Research Symposium, yayımlanmak üzere gönderildi, 2019.