



**T.C.
DÜZCE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**KIZILÖTESİ ISITMA İLE KÜRLENEN KARBON FİBER KATKILI
KOMPOZİT MALZEMEDE TAGUCHİ YÖNTEMİ KULLANILARAK
OPTİMUM KÜR ÇEVİRİMİNİN BELİRLENMESİ**

YAKUP OKAN ALPAY

**DOKTORA TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**DANIŞMAN
PROF. DR. İLYAS UYGUR**

DÜZCE, 2020

T.C.
DÜZCE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**KIZILÖTESİ ISITMA İLE KÜRLENEN KARBON FİBER
KATKILI KOMPOZİT MALZEMEDE TAGUCHİ YÖNTEMİ
KULLANILARAK OPTİMUM KÜR ÇEVİRİMİNİN
BELİRLENMESİ**

Yakup Okan ALPAY tarafından hazırlanan tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından Düzce Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Prof. Dr. İlyas Uygur, Düzce Üniversitesi

Eş Danışman

Prof. Dr. Mehmet Fırat, Sakarya Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. İlyas UYGUR
Düzce Üniversitesi

Prof. Dr. Cihat TAŞÇIOĞLU
Düzce Üniversitesi

Prof. Dr. Fehmi ERZİNCANLI
Düzce Üniversitesi

Doç. Dr. Mehmet Akif Erden
Karabük Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Kenan ÇINAR
Namık Kemal Üniversitesi

Tez Savunma Tarihi: 16/03/2020

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.

16 Mart 2020

Yakup Okan ALPAY

TEŞEKKÜR

Doktora öğrenimim ve bu tezin hazırlanmasında süresince gösterdiği her türlü destek ve yardımdan dolayı çok değerli hocam Prof. Dr. İlyas UYGUR'a en içten dileklerle teşekkür ederim.

Prof. Dr. Fehmi ERZİNCANLI ve Prof. Dr. Cihat TAŞÇIOĞLU'na tez yazma sürecim boyunca verdikleri katkılardan dolayı çok teşekkür ederim.

Bu çalışma boyunca yardımlarını ve desteklerini esirgemeyen saygıdeğer iş arkadaşlarım Dr. Öğr. Üyesi Mert Kılınçel, Dr. Öğr. Üyesi Fikret POLAT ve Arş. Gör. Rıdvan ONGUN'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Bilimsel alanıma olan merakımın gelişmesi ve bilimsel araştırma yapma konusunda becerimin gelişmesinde küçümsenemeyecek katkıları olan saygıdeğer hocam Prof. Dr. Fazıl Önder Sönmez'e, Prof. Dr. Nuri Ersoy'a, Dr. Öğr. Üyesi Fatih Ertuğrul Öz ve Dr. Öğr. Üyesi Kenan Çınar'a çok teşekkür ederim.

Süreç içerisinde desteğini benden eksik etmeyen ve olayları yorumlama biçimi ve zekasına her daim hayran olduğum sevgili eşim Emel Türker ALPAY'a, hayatı bir bütün olarak algılamama yardımcı olduğu için ve daha birçok sebepten ötürü ne kadar teşekkür etsem azdır.

Hayatım boyunca desteklerini hiçbir koşulda benden esirgemeyen annem, babam ve sevgili kardeşime her zaman minnettar kalacağım.

Bu tez çalışması, Düzce Üniversitesi BAP- 2017.06.05.603 numaralı Bilimsel Araştırma Projesiyle desteklenmiştir.

16 Mart 2020

Yakup Okan ALPAY

İÇİNDEKİLER

ŞEKİL LİSTESİ.....	vii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	ix
KISALTMALAR.....	x
SİMGELER	xi
ÖZET.....	xii
ABSTRACT	xiii
EXTENDED ABSTRACT.....	xiv
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR TARAMA.....	3
2.1. POLİMER MATRİSLİ KOMPOZİT MALZEMELER.....	3
2.1.1. Matris Elemanları	3
2.1.1.1. Termoset Reçineler	3
2.1.1.2. Termoplastik Reçineler.....	4
2.1.2. Elyaf Tipleri	4
2.1.2.1. Cam Elyaf	6
2.1.2.2. Karbon Elyaf.....	6
2.1.2.3. Aramid elyaf.....	6
2.1.3. Prepreg Malzemeler ve Üretim Yöntemi	7
2.2. POLİMER MATRİSLİ KOMPOZİT MALZEMELERİN ÜRETİM YÖNTEMLERİ.....	8
2.2.1. Konvansiyonel Yöntemler.....	8
2.2.1.1. El Yatırma	8
2.2.1.2. Vakum Torbalama.....	9
2.2.1.3. Vakum İnfüzyon.....	9
2.2.1.4. Kompozit Kalıplama	10
2.2.1.5. SMC-BMC.....	10
2.2.1.6. Reçine Transfer Yöntemi (RTM).....	11
2.2.1.7. Filaman Sarma	11
2.2.1.8. Otoklav.....	12
2.2.2. İleri Üretim Yöntemleri	13
2.2.2.1. Mikrodalga ile Kırılma.....	14
2.2.2.2. Ultraviyole ile kırılma	14
2.2.2.3. İndüksiyon ile kırılma	15
2.2.3. Kompozit Malzeme Sektöründe Kızılötesi.....	16
2.2.3.1. Kızılötesi radyasyon fiziği.....	17
2.2.3.2. Kızılötesinin Endüstride Kullanım alanları.....	21
2.3. KÜRLENME KİNETİĞİ	24
2.3.1. Kırılma Davranışının Belirlenmesi	25

2.3.2. Kinetik Modeller.....	26
3. MATERYAL YÖNTEM	28
3.1. KIZILÖTESİ KÜRLEME FIRINI	28
3.2. MALZEME VE EKİPMANLAR	29
3.2.1. Karbon fiber prepreg	29
3.2.2. Kızılötesi Lamba.....	31
3.2.3. Lamba Tutucu	32
3.2.4. Fırın Gövdesi.....	32
3.2.5. PLC Ünitesi ve Adım Kontrol Cihazı	33
3.2.6. Vakum Tertibatı	34
3.2.7. Sıcaklık Ölçümleri	35
3.3. DENEY PROSEDÜRÜ	37
3.3.1. Sıcaklık Dağılım Testleri.....	37
3.3.2. Optimum Kür Çevrimi Testleri	42
3.3.2.1. Taguchi Deney Tasarımı Yöntemi ve Uygulanması.....	45
3.3.3. SEM Analizleri.....	48
4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	49
4.1. SICAKLIK DAĞILIM TESTLERİ BULGULARI	49
4.1.1. Kızılötesi lamba-Numune Arası Optimum Mesafenin Belirlenmesi	49
4.1.2. Temsili Bölge Tayini Testleri.....	56
4.1.3. Optimum Numune Kalınlığının Belirlenmesi	57
4.1.4. Termokupl ve Termal Kamera Verilerinin Karşılaştırılması.....	62
4.2. OPTİMUM KÜRLENME ÇEVİRİMİ DENEYİ BULGULARI.....	63
4.3. DENEY SONUÇLARININ ANALİZİ	66
4.3.1. Anova kullanılarak Veri Analizi	73
4.3.2. Doğrulama Deneyleri	75
4.4. SEM ANALİZİ SONUÇLARI	80
4.5. TEORİK ENERJİ İHTİYACI HESABI.....	81
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	83
6. KAYNAKLAR	86
ÖZGEÇMİŞ	94

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1. Fiber oryantasyonları a) Tek eksenli b)iki eksenli c) çok eksenli d) kırpık tek eksenli e) kırpık rastgele eksenli.	5
Şekil 2.2. Bir kompozit levhayı oluşturan katmanların elyaf oryantasyonları.	5
Şekil 2.3. Şematik prepreg üretimi işlemi [22].	8
Şekil 2.4. a. Filaman sarma şematik gösterim b. Filaman sarma mandrel ve tank gösterimi.	12
Şekil 2.5. Otoklav içerisine sürülen hazırlanmış kalıp.	13
Şekil 2.6. İndüksiyon ısıtma mekanizmaları.	15
Şekil 2.7. Elektromanyetik spektrum ve kızılötesinin spektrumdaki yeri [43].	17
Şekil 2.8. Kızılötesi spektrum [43].	18
Şekil 2.9. Siyah cisim yayıcı güç spektrumu.	19
Şekil 2.10. Ölçülen IR kaynağı yayıcı güç spektrumu.	20
Şekil 2.11. Konvansiyonel/Radyant hibrit bisküvi fırını [46].	22
Şekil 2.12. Radyant gıda kurutma ünitesi gösterimi [46]	22
Şekil 2.13. a) Çift Diyafram Sıcak Şekillendirme ile Üretim Yöntemi b) Diyaframlar ve kompozit malzemenin ayrıntılı gösterimi [47].	23
Şekil 2.14. IR birleştirme işleminin gösterimi a) Isıtma evresi b) Isıtma modülünün devreden çıkması c) Malzemelerin kalıp içerisinde birleşmesi.	24
Şekil 2.15. Epoksi-amin karışımının kürlenme süreci [49].	25
Şekil 2.16. DSC cihazından elde edilen örnek ısı Akışı- Sıcaklık grafiği [50].	26
Şekil 2.17. Polimerizasyon oranının ısıtma hızına göre değişim grafiği örneği [61].	27
Şekil 3.1. Kızılötesi karbon fiber kürlenme fırını.	28
Şekil 3.2. Sıcak pres için üreticinin önerdiği kürlenme çevrimi.	30
Şekil 3.3. Otoklav için üreticinin önerdiği kürlenme çevrimi.	30
Şekil 3.4. Kuartz halojen kızılötesi lamba [64].	31
Şekil 3.5. Kızılötesi lambanın içinde bulunduğu reflektör [65].	31
Şekil 3.6. Yüksekliği ayarlanabilir kızılötesi lamba tutucu.	32
Şekil 3.7. Kızılötesi fırın gövdesi 3 boyutlu çizimi.	33
Şekil 3.8. PLC kontrol ünitesi.	34
Şekil 3.9. a) Vakum sızdırmazlık bandı.	35
Şekil 3.10. a) Tezde kullanılan termal kamera b) Tezde kullanılan bakır lama uçlu K tipi termokupl.	36
Şekil 3.11. Prepreg numune geometrisi.	37
Şekil 3.12. Numunenin fırın üzerindeki yerleşimi.	38
Şekil 3.13. Çalışmada kullanılan çekme testi cihazı.	43
Şekil 3.14. Şematik kürlenme çevrimi.	44
Şekil 4.1. Isıtıcı lamba – numune arası mesafeye göre SHİ değerinin değişim grafiği.	49
Şekil 4.2. 8. Hareketli ortalamalara göre Isıtıcı lamba – numune arası mesafeye göre SHİ değerinin değişim grafiği.	50
Şekil 4.3. 1. Bölgenin sıcaklık – zaman grafiği.	51
Şekil 4.4. 2. Bölgenin sıcaklık – zaman grafiği.	51
Şekil 4.5. 3. Bölgenin sıcaklık – zaman grafiği.	51

Şekil 4.6. 4. Bölgenin sıcaklık – zaman grafiği.	52
Şekil 4.7. 5. Bölgenin sıcaklık – zaman grafiği.	52
Şekil 4.8. 6. Bölgenin sıcaklık – zaman grafiği.	52
Şekil 4.9. 7. Bölgenin sıcaklık – zaman grafiği.	53
Şekil 4.10. 8. Bölgenin sıcaklık – zaman grafiği.	53
Şekil 4.11. 9. Bölgenin sıcaklık – zaman grafiği.	53
Şekil 4.12. Isıtıcı lamba – Numune arası mesafeye göre bölgeler arası maksimum sıcaklık farkları.	54
Şekil 4.13. Numune yüzeyi ortalama sıcaklıklarının tüm mesafeler için deneyler boyunca değişim grafiği.	55
Şekil 4.14. Tüm yüzeyin ortalama sıcaklığına göre bölgelerin normalize edilmiş sıcaklık grafiği.	56
Şekil 4.15. Deney boyunca 1. bölge için katmanların sıcaklık değişimleri.	57
Şekil 4.16. Deney boyunca 2. bölge için katmanların sıcaklık değişimleri.	58
Şekil 4.17. Deney boyunca 3. bölge için katmanların sıcaklık değişimleri.	58
Şekil 4.18. Deney boyunca 4. bölge için katmanların sıcaklık değişimleri.	58
Şekil 4.19. Deney boyunca 5. bölge için katmanların sıcaklık değişimleri.	59
Şekil 4.20. Deney boyunca 6. bölge için katmanların sıcaklık değişimleri.	59
Şekil 4.21. Deney boyunca 7. bölge için katmanların sıcaklık değişimleri.	60
Şekil 4.22. Deney boyunca 8. bölge için katmanların sıcaklık değişimleri.	60
Şekil 4.23. Deney boyunca 9. bölge için katmanların sıcaklık değişimleri.	60
Şekil 4.24. Kat çiftleri arası sıcaklık farkları.	61
Şekil 4.25. 2 °C/dk ısıtma hızıyla ısıtılan numunenin hem termal kamera hem termokupl ile alınmış sıcaklık değişim grafiği.	62
Şekil 4.26. 5 °C/dk ısıtma hızıyla ısıtılan numunenin hem termal kamera hem termokupl ile alınmış sıcaklık değişim grafiği.	63
Şekil 4.27. 2 °C/dk ısıtma hızında yapılan deneylerin grafiği.	64
Şekil 4.28. 4 °C/dk ısıtma hızında yapılan deneylerin grafiği.	64
Şekil 4.29. 6 °C/dk ısıtma hızında yapılan deneylerin grafiği.	65
Şekil 4.30. 8 °C/dk ısıtma hızında yapılan deneylerin grafiği.	65
Şekil 4.31. 10 °C/dk ısıtma hızında yapılan deneylerin grafiği.	66
Şekil 4.32. Elastik Modül için S/N oranı etki grafiği.	69
Şekil 4.33. Çekme mukavemeti için S/N oranı etki grafiği.	69
Şekil 4.34. Çekme mukavemeti için deney parametrelerinin etkisi.	71
Şekil 4.35. Elastik modül için deney parametrelerinin etkisi.	72
Şekil 4.36. Elastik modül için normal olasılık grafiği.	74
Şekil 4.37. Elastik modül için normal olasılık grafiği.	74
Şekil 4.38. Kızılötesi için bulunan optimum kür çevrimi parametreleri ile otoklavda kürlenen numunenin çekme testi grafiği.	79
Şekil 4.39. Optimum kür çevrimi ile otoklavda ve kızıl ötesi fırında kürlenen numunelerin önceki en yüksek ve en düşük değerlerinin karşılaştırılması.	79
Şekil 4.40. Kusurlu numune ait a) 400 µm ölçeğinde SEM görüntüsü b) 40 µm ölçeğinde SEM görüntüsü, kızılötesi ile kürlenen numuneye ait c) 400 µm ölçeğinde SEM görüntüsü d) 400 µm ölçeğinde SEM görüntüsü,otoklavda üretilen numuneye ait e) 400 µm ölçeğinde SEM görüntüsü f) 40 µm ölçeğinde SEM görüntüsü.	81

ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Çizelge 3.1. OM11 kodlu kürlenmiş reĒineye ait mekanik �zellikler.....	29
Çizelge 3.2. Isıtıcı – numune arası optimum mesafenin belirlendiği deney tasarımı.....	40
Çizelge 3.3. Optimum katman sayısının belirlendiği deney tasarımı.....	41
Çizelge 3.4. Termokupl-Termal kamera sıcaklık verileri karşılaştırılması deney tasarımı.	42
Çizelge 3.5. K�r �evrim parametrelerin verilen değerler.....	44
Çizelge 3.6. Çekme mukavemeti ve elastik modül için kontrol faktörleri olarak seçilen parametreler ve seviyeleri.	46
Çizelge 3.7. Taguchi deney tasarımı metodu ile belirlenen deney parametrelerinin değerleri.	47
Çizelge 4.1. Tüm bölgelerin normalize sıcaklık değerleri ve birim değerden yüzde farkları.	57
Çizelge 4.2. Çekme deneyi sonuçları ve S/N oranı değerleri.....	67
Çizelge 4.3. Kontrol faktörlerinin S/N oranları için cevap tablosu.....	68
Çizelge 4.4. Çekme mukavemeti ve elastik modül için ANOVA sonuçları.	73
Çizelge 4.5. Çekme mukavemeti ve elastik modül için deneysel ve tahmin değerlerin karşılaştırılması.	76

KISALTMALAR

BMC	Bulk Molding Compound
CFRP	Karbon fiber katkılı plastik
DSC	Diferansiyel Taramalı Kalorimetre
DMA	Dinamik Mekanik Analizör
IR	Kızılötesi
PEEK	Polieter eter keton,
PEI	Polyethylenimine
PEKK	Polieter keton keton
PLC	Programlanabilir Mantıksal Kontrol
PP	Polipropilen
PVC	Polivinil klorür
PPS	Polifenilen Sülfid
RTM	Reçine Transfer Yöntemi
SEM	Taramalı Elektron mikroskobu
SMC	Sheet Molding Compound
UV	Ultra viyole

SİMGELER

A	Kinetik sabit
CI	Güven aralığı
c_0	Işık hızı
dB	Desibel
dk	Dakika
E	Elastik Modül
E_i	Aktivasyon enerjisi
Emp	Elastik modül tahmin değeri
h	Planc sabiti
Hr	Isıtma hızı
K	Kelvin
k	Boltzmann Sabiti
K_{IC}	Kırılma Tokluğu
kj	Kilojul
mm	Milimetre
mV	Milivolt
n	Refrakter İndeksi
r	Doğrulama deney sayısı
R	Gaz sabiti
Pt	Plato süresi
sn	saniye
S/N	Sinyal Gürültü Oranı
t	Zaman
Tsp	Çekme mukavemeti tahmin değeri
T	Sıcaklık
V_e	Hatanın serbestlik derecesi
V_{ep}	Hatanın varyansı
λ	Dalga boyu
λ_{max}	En yüksek dalga boyu
μm	Mikrometre
σ	Çekme mukavemeti
α	Kürlenme derecesi
°C	Santigrat derece

ÖZET

KIZILÖTESİ ISITMA İLE KÜRLENEN KARBON FİBER KATKILI KOMPOZİT MALZEMEDE TAGUCHİ YÖNTEMİ KULLANILARAK OPTİMUM KÜR ÇEVİRİMİNİN BELİRLENMESİ

Yakup Okan ALPAY

Düzce Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Doktora Tezi

Danışman: Prof. Dr. İlyas UYGUR

Mart 2020, 93 sayfa

Kompozit malzemeler endüstride yüksek mekanik özellikler ve düşük ağırlık gerektiren birçok ileri uygulamada yaygın olarak kullanılmaktadır. Önceden reçine emdirilmiş karbon elyaflardan oluşan prepreg denilen kompozit malzemeler yaygın olarak havacılık ve uzay sanayi gibi en ileri uygulamalarda bir sıcaklık ve basınç fırını olan otoklav yöntemi üretilmektedirler. Fakat otoklavın hem ilk yatırım maliyetleri hem de işletme giderleri yüksek olduğu için birim ürün maliyetleri çok yüksek çıkmaktadır. Bu yüzden otoklav dışı ileri üretim yöntemi araştırmaları polimer matrisli kompozit malzemeler alanına önde gelen çalışma konularından biridir. Bu çalışmada, otoklav dışı alternatif üretim yöntemlerinden biri olan kızılötesi ile üretim yönteminde optimum kür çevriminin belirlenmesi amaçlanmıştır. Kızılötesinin elektromanyetik dalgalarla hacimsel ısıtma yapması, hızlı ısıtma yapabilmesi, homojen ve otoklava göre daha kontrollü bir ısıtma yapabilmesi gibi potansiyel avantajları vardır. Çalışmada, bu avantajların, daha hızlı bir kürlenme sağlayarak işlem süresini kısaltıp kısaltamayacağı belirlenmiş, çekme mukavemetini maksimum yapacak optimum ısıtma hızı, maksimum sıcaklık ve maksimum sıcaklıkta kalma süresi (plato süresi) Taguchi metodu kullanılarak belirlenmiştir. Sonuçlar malzemenin teknik verileri ile ve optimum kızılötesi için belirlenen optimum kür çevrimi ile otoklavda üretilen numune ile karşılaştırılmıştır. Optimum kür çevrimine göre yapılan testler sonucu çekme mukavemeti değeri, doğrulama testleri öncesi yapılan kızılötesi kür çevrimi sonuçlarının en yüksek olanından %6,2 daha yüksek çıkarken, malzemenin teknik malzeme raporunda otoklavda üretim için verilen çekme mukavemeti değerinden %18,8 daha yüksek çıkmıştır. Bunun yanında, otoklav için önerilen kür çevrimi toplam 130 dk iken, kızılötesi için önerilen optimum kür çevrimi 85 dk'dır. Dolayısıyla kür çevrimi süresi 45 dk kısaltılarak %35 oranında zamandan tasarruf edilmiştir.

Anahtar sözcükler: Kızılötesi, Kürlenme, Taguchi, Optimizasyon.

ABSTRACT

DETERMINATION OF THE OPTIMUM CURE CYCLE OF CARBON FIBER REINFORCED COMPOSITE MATERIALS USING TAGUCHI METHOD

Yakup Okan ALPAY

Düzce University

Graduate School of Natural and Applied Sciences, Department of Mechanical Engineering

Doctoral Thesis

Supervisor: Prof. Dr. İlyas UYGUR

March 2020, 93 pages

Composite materials are widely used in industry in many advanced applications that require high mechanical properties and low weight. Composite materials consisting of carbon fibers previously impregnated with resin are called prepreg. These materials are widely produced in the most advanced applications such as the aerospace industry employing the autoclave method, which is a high temperature and pressure furnace. However, since both autoclave's initial investment costs and operating expenses are high, unit product costs are very high. Therefore, out-of-autoclave manufacturing method research is hot topic in the field of polymer matrix composite materials. In this study, it was aimed to determine the optimum cure cycle in infrared curing method, which is one of the alternative out-of-autoclave manufacturing methods. Infrared has potential advantages such as volumetric heating with electromagnetic waves, rapid heating, more controlled and homogeneous heating compared to autoclave. In the study, it has been determined whether these advantages can shorten the processing time by providing a faster cure. In addition, optimum heating speed, maximum temperature and maximum temperature residence time (plateau time) that will maximize the tensile strength have been determined by using the Taguchi method. The results were compared with the technical data of the material and the sample produced in the autoclave with the optimum curing cycle determined for infrared. The tensile strength value was 6.2% higher than the highest results of the infrared cure cycle before the verification tests, while the tensile strength value was 18.8% higher for the autoclave production in the technical datasheet of the material. In addition, while the recommended curing cycle for the autoclave is 130 minutes in total, the recommended optimum cure cycle for infrared is 85 minutes. Therefore, the cycle time was shortened by 45 minutes and 35% of time was saved.

Keywords: Infrared, Curing, Taguchi, Optimization.

EXTENDED ABSTRACT

DETERMINATION OF THE OPTIMUM CURE CYCLE OF CARBON FIBER REINFORCED COMPOSITE MATERIALS USING TAGUCHI METHOD

Yakup Okan ALPAY
Düzce University

Graduate School of Natural and Applied Sciences, Department of Mechanical
Engineering

Doctoral Thesis

Supervisor: Prof. Dr. İlyas UYGUR

March 2020, 93 pages

1. INTRODUCTION

Fiber-reinforced composite materials have become increasingly used in the aviation and aerospace industry, sports equipment, motorsport and maritime transportation, where lightness is very important, due to their high strength/weight ratio. Particularly, resin impregnated carbon fiber composite materials (prepregs) are preferred in advanced applications because they show very high mechanical properties with high fiber/resin ratios. The most common and advanced manufacturing method of such materials is autoclave manufacturing. This system, which provides the curing of the resin in the prepreg material with the help of high temperature and pressure, has led the researchers to alternative production methods because both the initial investment and operating costs are very high.

One of the promising alternative production methods is curing with infrared. In infrared curing, it is possible to obtain homogeneous temperature distribution due to volumetric heating with electromagnetic waves. Also, the fact that the heating rates can be very high can increase the speed of the curing cycle. This indicates that the prepreg material produced for autoclave treatment may be subject to a different cure cycle when treated with infrared. This study includes determining the optimum process parameters for infrared curing of a carbon fiber prepreg material produced for autoclave.

2. MATERIAL AND METHODS

An infrared curing oven has been designed and manufactured for this study. The oven is PLC controlled, and temperatures are monitored by using thermal camera or K type leaf thermocouple according to the experiments. The infrared heater inside the oven is mounted on a height adjustable holder. Thus, the distance between the sample and the heater infrared heater could be adjusted.

The study consists of two separate test stages. In the first stage, temperature distribution through thickness and along the specimen surface was determined. For this purpose, temperature distribution tests were carried out by bringing the specimen to 100mm, 150mm, 200mm and 250mm distances. For each distance, temperature distributions were examined both along the surface and throughout the thickness, and the optimum distance was found to be 200 mm considering both the homogeneity indicated by the temperature distribution and the maximum temperatures that can be reached. One, two, three and four-layered samples were used for temperature distribution tests throughout the thickness. As a result of the tests carried out, it was concluded that the samples in the first two layers were heated by the radiation mechanism by means of infrared rays, and the heat transfer was carried out by conduction from the second layer.

The second test phase in the study consists of tests to find the optimum curing cycle. In these tests, the specimen-infrared heater distance and the number of layers of the specimens were found to be 200 mm and two layers, respectively, in the previous test phase. At this stage, the Taguchi experiment design methodology was used. Curing is characterized by heating rate (Hr), maximum temperature (Tmax), and maximum temperature residence time-Plateau time-(t). In the experiments, 5 different values of each parameter were assigned and the L₂₅ orthogonal array was extracted using the Taguchi method. Accordingly, 25 different curing cycles provided by the method were applied. Each sample was subjected to tensile testing and determined tensile strength and elastic modulus values. Verification experiments were carried out by analyzing these values again with Taguchi method. The optimum curing cycle of an infrared-cured carbon fiber prepreg material was determined as a result of the experiments carried out according to Taguchi test design method.

3. RESULTS AND DISCUSSIONS

According to the results, the tensile strength value was 6.2% higher than the highest results of the infrared cure cycle before the verification tests, while the tensile strength value was 18.8% higher for the autoclave production in the technical datasheet of the material. In addition, while the recommended curing cycle for the autoclave is 130 minutes in total, the recommended optimum cure cycle for infrared is 85 minutes. Therefore, the cycle time was shortened by 45 minutes and 35% of time was saved.

4. CONCLUSION AND OUTLOOK

Findings show that infrared curing can be an alternative to autoclave production method. However, for an infrared curing oven that can be used industrially, the final physical properties of the product to be produced must be clearly known. Also, infrared curing does not give a broad geometric freedom as in the autoclave. Therefore, the product to be cured with infrared must have a planar geometry. Because the energy density falling on the material is highly dependent on the distance between the material and the heater lamp. If a formed product is to be manufactured, the shape of the lamps may be changed and the size of the lamps may be reduced. Therefore, the lamps may be put on the product in a constant distance.

1. GİRİŞ

Kompozit malzemeler en geniş anlamı ile birden çok malzemedan meydana gelen ve kendini meydana getiren malzemelerin fiziksel özelliklerinden farklı fiziksel özelliklere sahip olan malzemeler olarak tanımlanmaktadır. Kompozit malzemeler, yüksek dayanım/ağırlık oranları ile endüstrinin birçok alanında gideren artan şekilde kullanılmaya başlanmıştır. Bu çalışmada üzerinde çalışılacak olan kompozit malzeme ise polimer matrisli kompozit malzeme olarak isimlendirilen, matris olarak reçine ve takviye elemanı olarak elyaftan oluşan kompozit malzemelerdir. Bu tür malzemeler, matris ve takviye elemanlarının ürün üretimi sırasında birleştirilmesi ya da yarı mamül şekilde birleştirilen matris ve takviye elemanının belli ısıl çevrimler ile kürlenmesiyle son ürüne dönüştürülür. İlk durumda, matris elemanı olan reçine, belli üretim teknikleri ile kuru elyafa, son ürün üretimi sırasında emdirilir. İkinci durumda ise, matris ve takviye elemanı yarı mamül halinde birleştirilerek prepreg denilen malzeme oluşturulur. Prepreg malzemeler, reçinenin önceden emdirildiği bu tür malzemelerdir. Prepreg malzemeler, mekanik özelliklerin ön planda olduğu havacılık, uzay sanayi, spor malzemeleri üretimi ve motor sporları alanlarında sıklıkla kullanılmaktadır. En yaygın ve ileri üretim tekniği ise otoklav ile kürlenmedir.

Otoklav, prepreg malzemenin ihtiva ettiği reçinenin belli bir sıcaklık ve basınç rejimi altında kürlenmesini sağlamaktadır. Termoset tipi reçinelerin kullanıldığı prepregler çoğunlukla otoklav içerisinde işlem görürler. Verilen sıcaklık rejimi, reçinenin camsı geçiş ve vitrifikasyon sıcaklıklarına ulaşır geri döndürülemeyecek şekilde son şeklini alıp sertleştirildiği işlemdir.

Otoklav ile üretim her ne kadar en üstün mekanik özelliklere sahip ürünler üretilmesine imkân sağlasa da hem ilk yatırım maliyetleri hem de işletme giderleri çok yüksek olduğu için otoklav ile rekabet edebilecek daha düşük maliyetli alternatif üretim yöntemleri, kompozit malzemeler alanında üzerinde en çok çalışılan konular arasındadır. Alternatif üretim yöntemleri arasında mikrodalga ile kürlenme [1], radyo dalga ile kürlenme [2],

elektromanyetik indüksiyon ile kütleme [3], elektron demeti ile kütleme [4], ultraviyole ile kütleme [5] gibi yöntemler öne çıkmaktadır. Fakat tüm bu yöntemlerin kendi ısıtma doğaları gereği ya homojen ısıtmayı gerçekleştirmek zor olmakta, ya da etkili bir üretim yöntemi olmak için çok yüksek maliyetli yatırımların yapılması gerekmektedir. Dolayısıyla, bu yöntemler hali hazırda ancak spesifik uygulamalarda kullanılmakta ya da proses parametrelerinin belirlenme ve kararlı hale getirilme çalışmaları devam etmektedir.

Alternatif yöntemler arasında göze çarpan yöntemlerden biri de kızılötesi ile kütleme yöntemidir. Bu yöntemde, prepreg malzeme kızılötesi bir ısıtıcının yaydığı elektromanyetik dalgalar aracılığı ile ısıtma gerçekleşir. Radyasyon ile ısıtma da denilen bu yöntemin öne çıkan özelliği malzemeyi hacimsel şekilde ısıtılabilmesidir. Hacimsel ısıtma demek, malzemenin hem iç bölgesinin hem de dış yüzeylerinin aynı anda ısınması demektir. Bu da doğru parametreler ile uygulandığında otoklava özgü konvansiyonel iletim ile ısıtmaya göre özellikle kalınlık boyunca çok daha homojen bir sıcaklık dağılımı göstererek ısıtma gerçekleştirmek anlamına gelmektedir. Ayrıca, bu yöntemde malzeme konvansiyonel ısıtmaya göre çok daha hızlı ısıtılabilir. Dolayısıyla kızılötesi ısıtma, otoklavın ısıtma doğasından dolayı sahip olduğu ısıtma hızı sınırlamalarına tabi değildir. Otoklavda, hızlı ısıtma gerçekleştirilebiliyor olsaydı dahi, ısıtma yüzeyden başlayıp iletim yoluyla malzemenin içerisine yayılacağından, malzemenin kalınlığı boyunca sıcaklık farkı giderek artacağından artık gerilmelere bağlı çarpılmalar artacak ve ürün geometrik olarak daha kararsız olacaktı, ya da ürün post-kür denilen ve üretim süresini ve maliyetini ciddi anlamda artıran uygulamalara tabi tutulmak zorunda kalacaktı. Kızılötesi ile kütlemede malzeme hacimsel olarak ısındığından artık gerilmelere bağlı problemler minimuma inecektir. Bu durum, kızılötesi ile kütlemede farklı kür çevrimlerinin uygulanabileceğini göstermektedir.

Bu çalışmada karbon fiber takviyeli kompozit malzemelerin kızılötesi ısıtma ile kütlenebilmelerinin potansiyeli araştırılmıştır. Öncelikle kızılötesi ısıtmanın etkin şekilde yapılabildiği katman sayısı belirlenmiş ve Taguchi deney tasarımına göre yapılan deneyler sonucu çekme mukavemetini maksimize eden kürlenme çevrimi parametreleri bulunmuştur.

2. LİTERATÜR TARAMA

Bu bölümde öncelikle polimer matrisli kompozit malzemelerin yapıtaşları, geleneksel ve alternatif üretim yöntemleri konuları, bölüm sonunda ise kızılötesinin kompozit malzeme alanında kullanım alanları konusu ayrıntılı şekilde incelenecektir.

2.1. POLİMER MATRİSLİ KOMPOZİT MALZEMELER

2.1.1. Matris Elemanları

Elyaf takviyeli kompozit malzemeler en genel anlamda polimer matrisli, metal matrisli ve seramik matrisli kompozit malzemeler olarak 3 gruba ayrılabilir. Bu çalışmada polimer matrisli kompozit malzemeler ele alındığı için metal ve seramik matrisli kompozit malzemelere yer verilmemiştir.

Polimer matrisli kompozit malzemelerin içeriğinde iki farklı malzeme bulunur; elyaf ve reçine. Reçine, polimer bir matris malzemesi olarak görev yaparken, elyaf, takviye malzemesi olarak kompozit malzemenin mekanik özelliklerinin ana kaynağını oluşturur.

Matris malzemesi olan reçineler temel olarak 2 ayrı grupta incelenir: termoset ve termoplastik reçineler.

2.1.1.1. Termoset Reçineler

Termoset reçineler, katalizör olarak kullanılan bir peroksit ile karıştırıldıklarında ekzotermik kimyasal reaksiyona girerek geri dönüştürülemez şekilde sertleşen polimer malzemelerdir. Sıcaklık, camsı geçiş sıcaklığı denilen kritik sıcaklığın üzerine çıktığında sertleşme gerçekleşir. Bazı tipleri sertleştirici ile kimyasal reaksiyona girmek için gerekli ısı enerjisini veren hızlandırıcılar ile birlikte kullanılır. Karıştırılan polimer ve sertleştirici belli bir süre içerisinde kürlenmeye başlayacaktır. Bu süre, eklenen sertleştirici ve hızlandırıcı oranına göre değişiklik gösterir. Üretim yöntemine göre (elle yatırma, infüzyon, RTM vs.) stiren kullanılarak viskozitesi ayarlanır ve elyaf malzeme üzerine emdirilir. Temel olarak 3 farklı tip polimer bu grupta incelenir: Polyester, vinilester ve epoksi.

Polyester reçineler, en basit tanımı ile çok fonksiyonlu asitler (dikarboksilik asit) ile çok fonksiyonlu alkollerin (glikol) reaksiyonu ile meydana gelen reçinelerdir [6]. Termoset reçineler arasında en düşük mekanik özelliklere sahip olan reçinelerdir. Endüstride en yaygın olan reçine tipidir. Karbon elyaf uygulamalarında ıslatma sorunu yaşanabilmesine rağmen cam elyaf ile mükemmel uyum sağlar. Bu tip reçineler baskı kuvveti olmadan el yătırma ile kalıplanabilmektedir. Raf ömürleri kısadır ama içerisinde az miktarda inhibitör katılarak artırılabilir.

Vinilester reçineler polyester reçinelere benzer yapıdadırlar. Fakat, polyesterler reçinelere göre daha az sayıda ester grubuna sahip oldukları için hidrolize uğrama yatkınlıkları daha düşüktür. Dolayısıyla denizcilik sektöründe sıklıkla kullanılırlar. Bazen polyester reçinenin üzerine su ile temas edecek bir bariyer kot şeklinde de uygulanır [7].

Epoksi reçineler polyester ve vinilester reçinelere farklı olarak amin bazlı bir dondurucu ile reaksiyona girerek sertleşirler. Endüstride yaygın olarak kullanılırlar ve mekanik özellikleri diğer termoset reçinelere göre daha yüksektir.

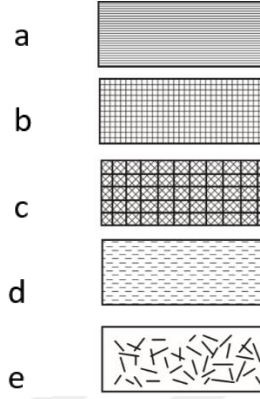
2.1.1.2. Termoplastik Reçineler

Termoplastikler Dünya üzerindeki toplam plastik miktarının %80'ini oluşturur. Fakat, havacılık, deniz ulaşırtmacılığı ve otomotiv gibi endüstrilerde termoset reçinelere göre henüz sınırlı bir kullanımı olmasına karşın, kullanım alanını artırmaya yönelik çalışmalar özellikle havacılık sektöründe giderek artmaya başlamıştır [8]. Termoplastik reçineler, belirli bir sıcaklığın üzerine çıkıldığında orijinal formunu geri kazanan, dolayısıyla geri dönüştürülebilen reçinelerdir. Mühendislik ve yüksek sıcaklık termoplastikleri olarak iki ayrı grupta incelenir. Mühendislik termoplastiklerin en bilinenleri polietilen (PE), polipropilen (PP) ve polivinil klorür (PVC)'dir. Yüksek sıcaklık termoplastikleri ise elyaf katkılı kompozit malzemelerin matrislerini oluşturan PEEK, PEKK, PEI ve PPS'dir. Bu reçinelerin erime sıcaklıkları 300 derecenin üzerinde olduğu için üretim aşamasında enerji maliyetleri yüksektir.

2.1.2. Elyaf Tipleri

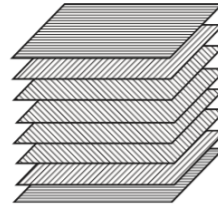
Elyaf lar matris içerisinde belli bir oryantasyonda uzun örgülü, ya da kırpık şekilde homojen dağılılı olarak malzemenin ana mekanik özelliklerini sağlayan tekstil yapıda malzemelerdir.

Uzun örgülü olarak adlandırılan elyaflar Şekil 2.1’de görüldüğü gibi tek eksenli, iki eksenli, çok eksenli veya kırpık şekilde olabilirler.



Şekil 2.1. Fiber oryantasyonları a) Tek eksenli b)iki eksenli c) çok eksenli d) kırpık tek eksenli e) kırpık rastgele eksenli.

Uzun örgülü olan elyaflar kompozit malzemenin belli bir oryantasyonda, belirli yükleme koşullarına dayanıklı olacak şekilde yerleştirilirler. Şekil 2.2’de örnek bir oryantasyon gösterilmiştir.



Şekil 2.2. Bir kompozit levhayı oluşturan katmanların elyaf oryantasyonları.

Elyaf katkılı kompozit malzemelerin en belirleyici taraflarından biri, elyafların oryantasyonlarını, ürünün taşıyacağı yükün tipine göre belirleyerek istenilen yüke en çok dayanıklı olan oryantasyonda ürünün üretimine izin vermesidir. Literatürde farklı elyaf tipleri ve oryantasyonlarının, malzemenin çeşitli yükler altındaki davranışına etkisini karakterize etmeye odaklanmış birçok çalışma mevcuttur [9]–[13].

2.1.2.1. *Cam Elyaf*

Cam elyaf, kompozit sektöründe en yaygın olarak kullanılan elyaf tipidir. En çok kullanıldığı alanlar boru üretimi, kompozit kalıp yapımı, denizcilik ve otomotivdir. Düşük maliyet, yüksek çekme mukavemeti, yüksek kimyasal dayanım ve mükemmel izolasyon özellikleri en belirgin avantajlarıdır. Dezavantajları ise düşük elastikiyet modülü, görece düşük yorulma direnci, yüksek sertlik ve yüksek yoğunluktur.

E-cam ve S-cam olarak iki farklı türü vardır. En yaygın kullanılan tipi E-cam'dır. S-cam ise özellikle havacılık ve savunma sanayiinde kullanılmakta olup çekme dayanımı daha yüksektir.

2.1.2.2. *Karbon Elyaf*

Karbon elyaf, yüksek rijitlik, çekme ve eğilme mukavemeti, mukavemet/ağırlık oranı gibi özellikler istenen uygulamalarda kullanılır. Havacılık ve savunma sanayi, lüks binek araçlar ve motor sporları gibi alanlarda sıklıkla kullanılır. Yüksek maliyeti yüzünden maliyetin daha önemli olduğu diğer alanlarda kullanımı çok kısıtlıdır. Yüksek çekme dayanımına sahip olmasının en önemli sebebi amorf karbon ve grafitik karbonun karışımından oluşmasıdır. Yüksek elektrik iletkenliğine sahip olduğu için iyi izole edilmelidir.

Karbon elyaf prekürsör fiberler olarak bilinen aşağıdaki 3 malzemeden biri kullanılarak elde edilir;

- Polyacrylonitrile (PAN)
- Rayon (suni ipek)
- Zift

Karbon fiber lifleri, yukarıdaki maddelerden birinin bir dizi karbonizasyon, oksidasyon ve ısıl işleme tabi tutularak içeriklerindeki karbon dizilerinin belirli oryantasyonda dizilmeleri ile elde edilir [14].

2.1.2.3. *Aramid elyaf*

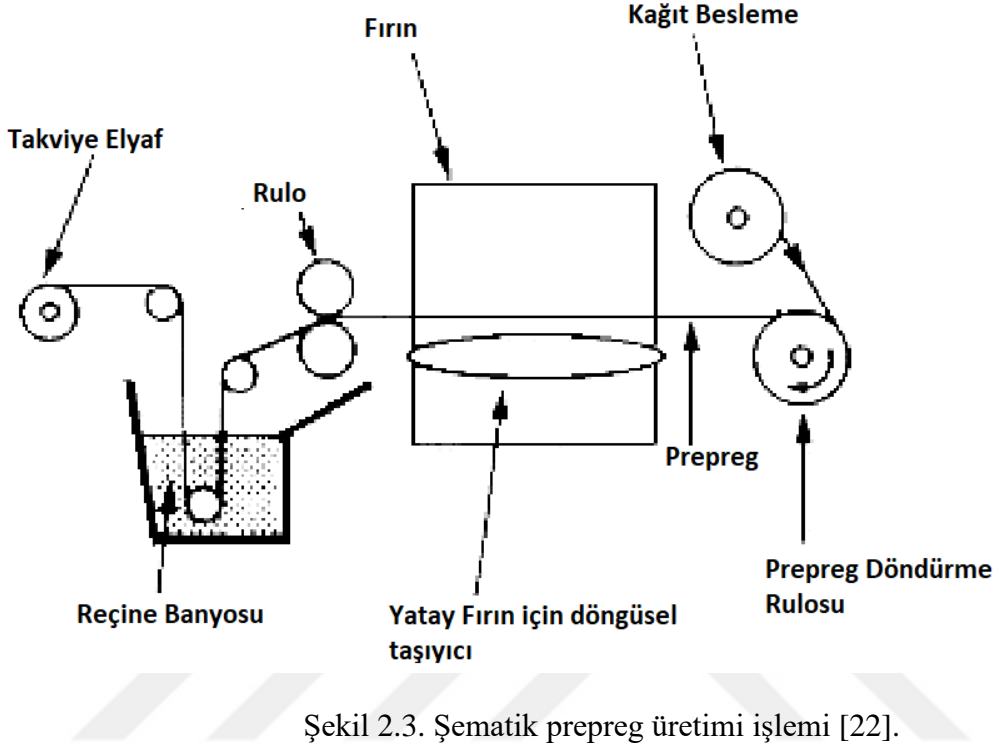
Aramid elyaflar özellikle balistik uygulamaları, yakıt tankları ve darbeye dayanıklı yapıların üretiminde kullanılırlar. Elyaflar arasında en düşük yoğunluk ve en yüksek

mukavemet/ağırlık oranına sahiptir. En önemli dezavantajları ise düşük basma mukavemeti ve düşük işlenebilirliktir.

2.1.3. Prepreg Malzemeler ve Üretim Yöntemi

Prepreg(pre-impregnated) denilen malzemeler, elyaf içerisine belli tekniklerle reçinenin emdirilmesi ile üretilen yüksek teknoloji kompozit malzemelerdir. En belirgin avantajı elyaf/reçine oranının çok yüksek olmasıdır. Bu da çok yüksek mekanik özelliklere sahip olmasını sağlar. Prepreg malzemenin içerisindeki reçine ne sıvı ne de katıdır. Henüz kürlenmemiş durumda olan reçine oda sıcaklığında değil, -18 °C sıcaklıkta derin dondurucuda saklanır. Bu sayede raf ömrü 2 haftadan 1 yıla kadar uzatılmış olur [14]. Günümüzde oda sıcaklığında saklanabilen prepreglerin çalışmalarına da başlanmıştır [15]. Prepreg malzemeler hem termoset hem termoplastik reçinelerle üretilebilirler. Fakat termoplastik kullanımı, termoplastiğin yüksek eriyik viskozitesinden dolayı sınırlıdır [16]. Ancak, termoplastiğin kullanımının artırılmasına yönelik çalışmalar sürmektedir. Shin ve arkadaşları [17] termoplastiğin bu yüksek viskozitesine karşı yarı polimerleşmiş şekilde saklanabilen ve daha düşük viskoziteli olduğu için tam polimer termoplastiklerde görülen elyaf ıslatmama ya da boşluk oluşumu gibi sorunları azaltmışlardır. Kompozit malzemelerde kür çevriminin, malzemenin mekanik özelliklerine direk olarak etkisi vardır. Örneğin Kratz ve arkadaşları, yaptıkları çalışmada [18] termoplastik prepreg malzemelerin Mod I kırılma tokluğu (K_{IC}) değerinin, malzemenin kürlenme çevrimine bağlı olarak %11-%22 civarında azalma gösterdiğini tespit etmişlerdir. Otoklav dışında kürlenebilen prepreglerin üretimi son yıllarda popüler çalışmalar arasına girmiştir. VOB (Vacuum Bag Only) denilen kürlenmek için yüksek sıcaklığa gerek duymayan prepregler bu tür hammaddelere örnek verilebilir. Otoklav için üretilen prepregler içeriğindeki reçinenin kürlenmesi sırasında ortaya çıkan gazın tahliye edilebilmesi ortalama 5-7 atmosfer basınca ihtiyaç duyarlar. VOB prepregler, kalıba serildikten sonra sadece negatif basınca ihtiyaç duyarlar. Malzeme içerisinde hava boşluklarının sadece vakum basıncı altında güvenilir şekilde dışarıya atılabilmesi için, ayrıca, bu malzemelerin çeşitli ürünlerdeki performansının incelendiği çalışmalar son zamanlarda hız kazanmıştır [19]-[21].

Prepreg malzemelerin üretim işlemi şematik olarak Şekil 2.3'te gösterilmektedir.



Şekil 2.3. Şematik prepreg üretimi işlemi [22].

Prepreg üretiminde mekanik özelliklerin geliştirilmesine yönelik modifikasyonlar da yapılabilir. Mohan ve arkadaşları [23] tek yönlü prepreg üreten bir sistemde karbon elyaflara plazma yüzey işlemi yaparak yüzey pürüzlülüğünü ve elyaflar arası yapışmayı artırmışlar, buna bağlı olarak hem mekanik özellikleri artırmışlar, hem de elyafın ıslanabilirliğini artırmışlardır.

2.2. POLİMER MATRİSLİ KOMPOZİT MALZEMELERİN ÜRETİM YÖNTEMLERİ

2.2.1. Konvansiyonel Yöntemler

2.2.1.1. El Yatırma

En basit kompozit malzeme üretim yöntemidir. Fakat en çok kullanılan yöntemlerden biridir. Çünkü el yatırma yöntemi, diğer yöntemlerden çok daha az sarf malzeme alet ve teçhizat gerektirir. Özellikle deniz ulaştırmacılığında çok sık kullanılır. Fakat düşük

reçine/fiber oranlarına ulaşmak söz konusu değildir. Dolayısıyla hafiflik ve dayanıklılığın en önemli parametreler olduğu durumlarda el yatırması tekniğini kullanmak doğru değildir.

2.2.1.2. *Vakum Torbalama*

Vakum torbalama tekniği genel olarak el yatırma tekniğine benzer. Öncelikle el yatırma tekniğinde olduğu gibi reçine elyaf malzemenin üzerine fırça ya da püskürtme yoluyla emdirilir. Daha sonra üzerine soyma kumaşı ve reçine akış filesi yerleştirilerek malzemenin kenarları boyunca sızdırmazlık bandı ile birlikte vakum torbası yerleştirilir. Böylece reçine emdirilmiş olan malzeme vakum ortamına alınır. Bir vakum pompası yardımıyla ortam vakumlanarak malzeme içerisindeki fazla reçinenin portta dışarı atılması sağlanır. Böylece kompozit malzemenin fiber/reçine oranı artırılmış ve ağırlığına oranla mukavemeti önemli ölçüde artırılmış olur.

2.2.1.3. *Vakum İnfüzyon*

Vakum infüzyon yöntemi genel itibari ile vakum torbalamaya benzer. Fakat reçinenin el yatırması şeklinde değil de vakum ortamı içerisindeki elyafa vakum yardımıyla emdirilmesi ile farklılaşır. Elyaf, reçine ile ıslatılmadan serilir. Üzerine reçine akış filesi ve soyma kumaşı yerleştirilir. Vakum ve reçine akış tesisatı kurulur. Sızdırmazlık bandı ile vakum poşeti serilip bağlantılar tamamlanır. Daha sonra bir kap içerisinde reçine hazırlanır ve reçine hattına bağlanır. Reçine tankının içerisine daldırılmış olan reçine hortumunun ağzının açılmasıyla vakum etkisiyle malzeme içerisine yayılan reçine bir müddet sonra vakum girişine ulaşacaktır. Burada çok önemli olan noktalardan birisi de vakum tesisatının çıkış hortumu ile vakum pompası arasına bir “catch pot”, “reçine kaçış tankı” ya da “vakum tankı” denilen bir tank yerleştirmektir. Hem malzeme üzerinden gelen vakum hortumu, hem de vakum pompasından gelen vakum hortumu bu vakum tankına bağlıdır. Dolayısıyla tankın içerisinde vakum ortamı vardır. Vakum tankının kullanılmasının amacı, reçine girişinden vakum çıkışına doğru akan reçinenin vakum tesisatına girişinden sonra, vakum pompasına gitmesine engel olmak, fazla reçinenin vakum tankında birikmesini sağlamaktır. Bir diğer önemli nokta, reçine giriş ve vakum yerleşimlerinin doğru seçilmesidir. Eğer büyük yüzey alanına sahip bir malzeme üretiliyorsa, noktasal reçine girişi yerine malzeme boyunca bir spiral boru serilerek bir hat boyunca reçinenin malzeme üzerine yayılması, kürlenme başlamadan malzemenin yayılımını bitirmesini ve reçine emmemiş kuru noktalar

bırakmasına izin vermeden vakum hattına ulaşmasını sağlar. İyi bir vakum basıncı, düzgün bir vakum infüzyon işleminin temel etmenidir. Vakum infüzyon için, kalıpların özel olarak üretilmesi gerekir. Aşağıdaki başlıkta kompozit kalıplama yöntemi ele alınmıştır.

2.2.1.4. *Kompozit Kalıplama*

Vakum infüzyon için kompozit kalıplamada ürünün son şekli verildikten sonra, strafor ya da mdf malzemeden üretilmek üzere erkek model oluşturulur. Burada en önemli nokta, kalıp eğer tek parçadan oluşuyorsa, negatif açığı kontrolünün yapılması gerektiğidir. Kalıpta negatif açıklar var ise, ürün kalıptan çıkmayacak ve kalıp kırılmak zorunda kalınacaktır. Eğer üründe negatif açıklar varsa, kalıp iki, üç ya da daha çok parçadan yapıp flanşlardan birleştirilebilir.

Kompozit kalıplamayı adım adım anlatacak olursak;

- Flanşlı şekilde erkek model imal edilir.
- Erkek model macunlanıp boyanır. (Akrilik boya)
- Yüze kalıp ayırıcılar sürülür ve 2-3 kat jelkot işlemi yapılır.
- Jelkot kurduktan sonra kalıp yapımı için üretilen kırpık cam elyaflar 4-5 kat boyunca kalıp reçinesi ile ıslatılarak ve hava alma rulosu ile havası alınarak jelkotlu yüzey üzerine tatbik edilir.
- Reçine kurduktan sonra kalıp modelden çıkarılır.
- Eğer ürün büyükse ve esnemesinden endişe ediliyorsa, kalıp çıkarıldıktan sonra tahta ya da sert köpükten bir iskelet ile güçlendirilebilir.

2.2.1.5. *SMC-BMC*

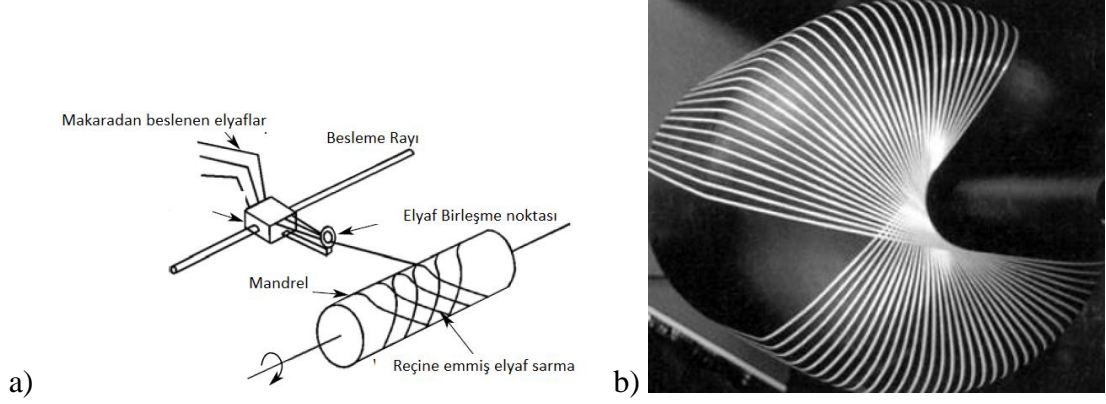
Kompozit malzemeler arasında, seri imalata en uygun yöntem SMC (Sheet Molding Compound) ve BMC (Bulk Molding Compound) ile kalıplama yöntemidir. Her iki yöntem de kapalı kalıp yöntemidir. SMC, doymamış polyeester reçine, doldurucu, kalınlaştırıcı, kalıp ayırıcı ve dondurucu ajanlar ve kırpık elyaf takviye elemanı gibi birçok katkının birleştirilmesi ile oluşturulan hamurun homojen hale getirilip rulolar ile sac haline getirilmesi ile üretilir. BMC ise yine aynı hamurun hamur ya da ekstrüzyondan geçirilip silindirik şekilli bir hamura dönüştürülmesi ile elde edilir.

2.2.1.6. Reçine Transfer Yöntemi (RTM)

RTM yöntemi de bir kapalı kalıpta üretim yöntemidir Vacuum assisted RTM (V-RTM), Light RTM (L-RTM) gibi değişik yöntemleri vardır. En popüler olanı L-RTM'dir. Çünkü metal değil kompozit kalıp kullanılarak üretim yapılır. Dolayısıyla kalıp maliyetleri azaltılmış olur. Bu yöntemin vakum infüzyon yönteminden en önemli farkı çift kalıp ile yapıldığı için ürünün her iki yüzeyinin de parlak çıkmasıdır. Ayrıca bu yöntemde reçine vakum ile çekilmez, basınç ile kalıp boşluğuna enjekte edilir. Bu yüzden, kalıp geometrisinde de infüzyon kalıplarına göre bazı farklılıklar mevcuttur.

2.2.1.7. Filaman Sarma

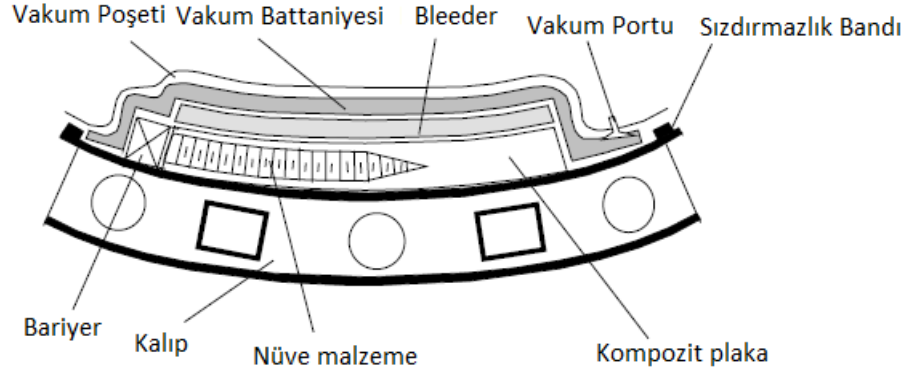
Filaman sarma yöntemi ile silindirik ve döngüsel şekilli ürünler üretilir. Bu yöntemde bir besleyiciye çok sayıda elyaf rulosu bağlanmıştır. Ayrıca üretilmek istenen parçaya ait bir mandrel istenilen hızda döndürülmek üzere yataklanmıştır. Besleyici ile mandrel arasında bir reçine havuzu vardır. Kuru elyaf besleyiciden çıkan reçine havuzunda reçine ile kaplandıktan sonra mandrelin etrafında sarılmaya başlanırlar. Bu yöntemde, üretilecek olan ürünün fiber oryantasyonu ve kalınlığına göre besleyicinin mandrel boyunca hareket hızı ve mandrelin dönüş hızı gibi değişkenler belirlenir. En çok kullanıldığı alan boru üretimidir. Ayrıca yakıt tankı ve basınçlı kaplar da bu yöntemle üretilebilir. Seri imalata uygun bir yöntemdir. Su borusu ya da doğalgaz taşıma borusu olarak kullanıldığında pürüzsüz iç yüzeyi sebebiyle demir ya da beton borulara oranla %10 ile %35 arası enerji tasarrufu sağlar. Ayrıca ağırlığı demir borunun dörtte biri, beton borunun onda biri seviyesindedir [24]. Şekil 2.4'te elyaf besleme ünitesinin şematik gösterimi ve filaman sarma yöntemi ile üretilmekte olan bir tank gösterilmiştir.



Şekil 2.4. a) Filaman sarma şematik gösterim b) Filaman sarma mandrel ve tank gösterimi.

2.2.1.8. Otoklav

Otoklav, temelde bir sıcaklık ve basınç fırınıdır. En ileri mekanik özelliklere sahip olan polimer matrisli kompozit malzemeler bu yöntem ile üretilir. Bu üretim yöntemde kullanılan kompozit malzemeler de diğer yöntemlerde kullanılan kuru elyaflardan farklıdır. Önceki bölümde sözü edilen önceden reçine emdirilmiş elyaflar genel olarak bu yöntem ile işlenirler. Otoklavı diğer yöntemlerden ayırarak havacılık kalitesinde ürün elde edilmesini sağlayan etkenlerden biri reçinenin önceden emdirilmesi ile çok yüksek fiber/reçine değerlerine ulaşılması, diğeri de yüksek basınç altında işlem yapıldığı için katmanların birbirine çok iyi konsolide olması ve reçine içerisinde gerçekleşen kimyasal reaksiyonlar sonucu ortaya çıkan hava boşlukları ve porozitenin yüksek basınç ve vakum sayesinde malzemenin dışına atılmasıdır. Şekil 2.5'te görüldüğü üzere, prepreg katmanların üst üste serilmesinden sonra fazla reçineyi absorbe etmesi için bleeder, havanın sağlıklı şekilde çıkabilmesi için vakum battaniyesi vakum ortamının sağlanması için sızdırmazlık bandı ve vakum poşeti kullanılarak kalıp fırına sürülmektedir. Prepreg malzemenin kürlenme reçetesine göre belirli süre boyunca belirli sıcaklık ve basınç rejimine tabi tutulan ürün kürlenme çevrimi sonunda kalıptan sökülme [25].



Şekil 2.5. Otoklav içerisine sürülen hazırlanmış kalıp.

Otoklav ile üretimde birim maliyetlerin yüksek olmasının sebeplerinden biri kürlenme süresinin uzun olmasıdır. Nele ve arkadaşları [26], birim ürün maliyetini düşürebilmek amacıyla otoklavda farklı kürlenme rejimlerine sahip malzemelerin aynı anda kürlenme işlemine tabi olabilmesi için termal atalet ve kalıp-ürün etkileşimini göz önüne alan ve S parametresi adını verdikleri yeni bir parametre üzerine çalışmışlardır. Bu parametre kullanılarak optimize edilen yeni kür çevriminin ısıtma evresinin 15 dk, soğutma evresinin 32 dk kısaltıldığı not edilmiştir.

Otoklav, her ne kadar üstün özelliklerde kompozit malzeme üretimi yapıyor olsa da hem ilk yatırım maliyetleri hem de işletme maliyetlerinin çok yüksek olması sebebiyle otoklav dışı ileri üretim yöntemleri üzerine çalışmalar yoğun şekilde devam etmektedir. Örneğin otoklavın ısıtma doğasından kaynaklanan nispeten düşük ısıtma hızlarına karşılık (2-5 °C/dk) ve 15 °C/dk ısıtma hızlarına çıkabilen Quickstep yöntemi ile üretim son yıllarda özellikle havacılık sektöründe kullanılmaya başlanmıştır. Bu yöntemde, iki metal kalıp arasına yerleştirilen ürün sıcak akışkan yardımı ile ısıtılır ve kalıp ile malzeme, esnek membranlar aracılığı ile sıcak akışkandan ayrılır. Quickstep üzerine olan çalışmalar özellikle hızlı ısıtma hızlarındaki kürlenme reaksiyonu üzerine yoğunlaşmıştır [27], [28].

2.2.2. İleri Üretim Yöntemleri

Kompozit malzemelerin hayatımıza ve endüstriye giderek daha çok girmesiyle birlikte hem alternatif üretim metotları hem ham madde maliyetleri üzerine daha çok çalışılmaya başlanmıştır. Farklı alanlarda kullanılacak, farklı ihtiyaçlara cevap verebilecek kompozit ürünler için çeşitli üretim yöntemleri geliştirilmeye çalışılmaktadır. Kompozit

malzemelerde birçok üretim yöntemi sürekli gelişme halindedir. Çünkü var olan üretim yöntemlerinin neredeyse tamamının ya malzeme kalitesi ya da birim ürün maliyetleri konularında negatif taraflar barındırmaktadırlar. Örneğin otomotiv sektöründe sıklıkla kullanılan sıcak pres yöntemi ile üretilen formlu ürünlerde ortaya çıkabilen mikro gözenekler ve boşluklar malzemenin delaminasyona uğrama riskini artırmaktadır. Lee ve arkadaşları [29], üretim sistemine vakum tertibatını da ekleyerek üründe ortaya çıkan boşlukların derinliğini yarı yarıya azaltarak malzemenin çekme mukavemetini %5.32, elastik modülünü %19 oranında artırmışlardır. Bir başka örnek ise Reçine Transfer Yöntemi (RTM) için verilebilir. Bu yöntemin çift kalıp ihtiyacı, metal kalıp ihtiyacı, düşük reçine geçirgenliği gibi negatif taraflarını ortadan kaldıracak şekilde ürünün doğasına da uygun olabilecek şekilde Vacuum assisted RTM, Light RTM, yüksek basınçlı RTM gibi alternatif yöntemler geliştirilmiştir ve halen bu yöntemlerin parametreleri üzerinde çalışılmaktadır [30]-[33].

2.2.2.1. Mikrodalga ile Kürleme

Mikrodalga ile kompozit kürleme, hızlı kürlenme ve göreceli olarak kalınlık boyunca yüksek penetrasyon derinliği sunduğu için son yıllarda popüler bir alternatif kompozit üretim metotlarından biri haline gelmiştir. Mikrodalga ile kürlemenin temel mantığı elektromanyetik alan teorisidir. Sıcak gaz ile ısıtmadan farklı olarak elektromanyetik dalgalarla ısıtmada, tüm hacim aynı anda ısınmaya başlar. Burada önemli olan nokta penetrasyon derinliğidir. Elektromanyetik dalgaların penetre ettiği noktadan içeride kalan kısımlar sıcak olan katmanlardan iletim yolu ile ısınacaktır. Mikrodalga ile kompozit kürlemede her ne kadar hızlı kürlenme sağlansa da bunun ısıtılan polimerin mekanik özelliklerinde bozulmalara yol açtığı rapor edilmektedir. Bu bozulmaların hızlı kürlenmeye bağlı olarak gerçekleşen homojen olmayan sıcaklık dağılımlarına bağlı olarak %40 seviyelerine kadar çıkabildiği tespitleri yapılmaktadır [34].

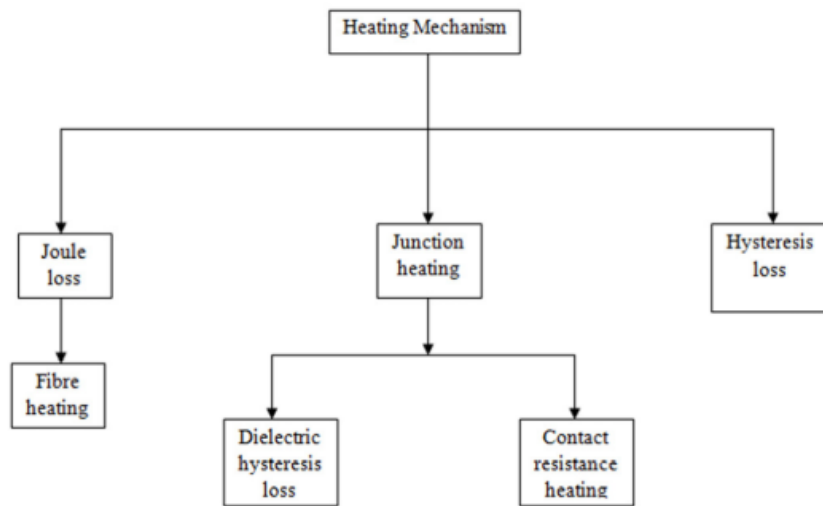
2.2.2.2. Ultraviyole ile kürleme

Ultraviyole ışınları ile kompozit kürleyebilmek için öncelikle kürlenmesi istenen reçinenin içerisine homojen şekilde UV foto reseptörlerin karıştırılması gerekir. Daha sonra malzeme üzerine etkiyen Ultra viyole ışınları reseptörlerle birlikte reçinenin ısınmasını sağlayacaktır. Bu yöntemin dezavantajlarından biri, malzemenin transparan olması gerekliliğidir. Yani

karbon fiber prepreg malzemelerin, opaklıklarından dolayı bu yöntem ile kürlenmeleri çok zordur. Bu yüzden özellikle opak malzemelerin ultraviyole ile kürlenmesinde, genellikle foto reseptörler termal reseptörlerle birlikte kullanılırlar. Foto reseptörler malzeme yüzeyinde ekzotermik bir reaksiyon başlatırlar ve bu reaksiyondan çıkan ısı iletim yoluyla malzemenin iç kısımlarına doğru geçer. Fakat limitli miktarda enerjinin üretilebilmesinden dolayı çıkan ürünün mekanik özellikleri tatmin edici değildir [35].

2.2.2.3. İndüksiyon ile kürlenme

İndüksiyon ile kürlenmenin temelinde ferromanyetik veya iletken malzemelerin, kilohertz megahertz frekanslarında değişken elektromanyetik alan içerisinde titreşerek eddy akımlarını oluşturması ve manyetik kutuplaşma etkisi vardır. Dolayısıyla reçine gibi malzemenin indüksiyon ile kürlenebilmesi için ya içerisinde iletken katkıların bulunması gerekir, ya da karbon fiber prepreg malzeme haline getirilmesi gerekir. Çünkü karbon lifleri iletkenidir. Elyafların indüksiyon ile ısıtılmaları Şekil 2.6'da görüldüğü gibi "Joule loss" mekanizması ile açıklanır [36]. Kompozit malzeme sektöründe indüksiyon ile kürlenme genel olarak yapıştırma/birleştirme uygulamalarında kullanılır. Bunun için genellikle grafitten oluşan yüksek iletkenlikte emiciler (susceptor) kullanılır. Bu emicilerle özellikle termoplastik malzemeler birbirleri arasında ya da metal-kompozit bağlantısı yapacak şekilde birleştirilirler. Bu noktada en önemli konulardan biri, emicilerin erime sıcaklığının, birleştirilecek olan malzemelerin erime sıcaklığından yüksek olması gerekliliğidir [3].



Şekil 2.6. İndüksiyon ısıtma mekanizmaları.

Bu bölümde sözü edilen alışılmadık üretim yöntemlerinin dışında elektron ışın demeti ile kütleme [4], radyo frekans ile kütleme [2], lazer ile kütleme [37], kızılötesi ile kütleme gibi daha başka üretim teknikleri üzerinde de çalışılmaktadır. Fakat bu yöntemlerden ilk üçü, henüz genel kabul görmemiş, çok sınırlı bir alanda kullanılmış ve proses parametrelerinin sağlıklı ve güvenli bir üretime imkan verecek şekilde henüz geliştirilememiş olmalarından dolayı o yöntemler için ayrı bölümler açılmayacaktır. Tezin konusu olan kızılötesi üretim yöntemi ise detaylı olarak sonraki bölümlerde ele alınacaktır.

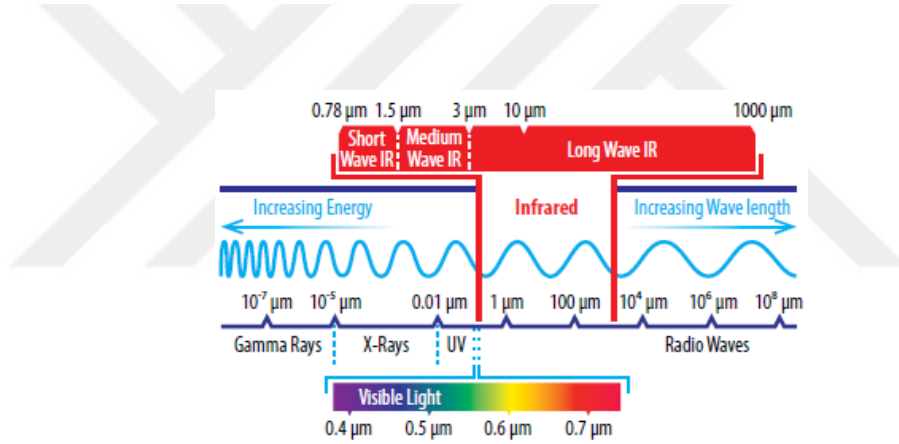
2.2.3. Kompozit Malzeme Sektöründe Kızılötesi

Kızılötesi ile kompozit kütleme ile ilgili hem termoplastikler hem de termoset reçineler üzerine kısıtlı da olsa bilimsel çalışmalar yapılmıştır. Labeas ve arkadaşları [38] termoplastik malzemenin (PEI) diyafram ile şekillendirme yöntemini simule etmişlerdir. Simulasyon sonuçlarına göre farklı kalınlıkta kalıp tablaları için kullanılacak optimum lamba sayısı, gücü ve pozisyonunu belirlemişlerdir. Simulasyon sonuçlarına göre kızılötesi ile ısıtmanın hem homojen hem de hızlı ısıtma sağladığı için ciddi bir potansiyel taşıdığını belirtmişlerdir. Genty ve arkadaşları [39], epoksi bazlı bir yapıştırıcının, düşük sıcaklıklarda kızılötesi ile kürlenmesini araştırmışlar ve kızılötesinin radyasyon doğası ile ilgili termal ve termal olmayan nedenlerle daha hızlı kürlenme sağladığını tespit etmişlerdir. Kumar ve arkadaşları [40] kızılötesi kütleme ve termal kütleme yöntemlerini hem deneysel olarak karşılaştırmışlar hem de kürlenme parametrelerine göre çekme mukavemeti değerlerini verecek matematiksel modeli oluşturmuşlardır. Çalışmada, kızılötesi kütleme ile çekme mukavemetinden herhangi bir ödün vermeden 272 dk olan termal kütleme süresinin 70 dk'ya indiğini rapor etmişlerdir. Schmidt ve arkadaşları [41] termoplastik bir reçineyi üç farklı kızılötesi ısıtıcı ile ısıtmışlar ve simülasyonunu yapmışlardır. Deneyler sonucu en verimli ısıtma sağlayan ısıtıcı çeşidinin halojen lambalar olduğu sonucuna varmışlardır. Nakouzi ve arkadaşları [42] reçine enjeksiyon yöntemi sırasında kızılötesi ile ısıtılan bir termoset malzemenin kürlenme işlemini bir bilgisayar programı yardımı ile simule etmişler ve kızılötesi ile ısıtmanın, diğer ısıtma yöntemlerine göre kürlenme işlemini daha kısa sürede tamamlayacağını bulgulamışlardır. Fakat bilgisayar simülasyonlarını gerçek deneysel sonuçlar ile kıyaslamamışlardır.

Kızılötesinin endüstride kullanım alanlarına geçmeden önce fiziksel bir fenomen olarak kızılötesinin ne olduğu ve nasıl oluştuğunu, yani fiziğini anlamamız gerekmektedir. Alttaki kısımlar kızılötesi fiziğine genel bir bakış olarak planlanmıştır. Daha sonra kızılötesinin çeşitli endüstrilerdeki kullanım alanlarına bakılacaktır.

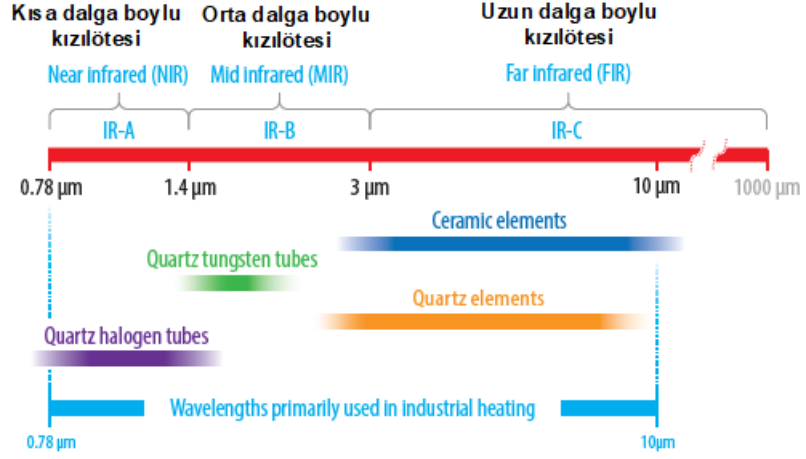
2.2.3.1. Kızılötesi radyasyon fiziği

Kızılötesi (IR) radyasyon, elektromanyetik spektrumdaki görünür ışık ve radyo dalgaları arasında bulunan bir tür elektromanyetik radyasyondur. 0,74 μm (görünür ışığın kırmızı kenarı) ile yaklaşık 100 μm (kısa dalga radyo bandının kaynağı) ile dalga boylarına sahiptir. Şekil 2.7’de elektromanyetik spektrum ve kızılötesinin genel elektromanyetik spektrum içerisindeki yeri gösterilmektedir.



Şekil 2.7. Elektromanyetik spektrum ve kızılötesinin spektrumdaki yeri [43].

Şekil 2.8’de kızılötesi radyasyon spektrumu dalga boyları açısından daha detaylı daha detaylı şekilde gösterilmektedir. Buna göre, 0,78 μm -1,4 μm dalga boyları arası yakın IR, 1,4 μm -3 μm dalga boyları arası orta IR, 3 μm -1000 μm arası ise uzak IR olarak adlandırılır.



Şekil 2.8. Kızılötesi spektrum [43].

Kızılötesi radyasyon, bir elektromanyetik dalga olduğundan dolayı hem spektral hem yöne bağlı bir karakter sergiler. Spektral bağlılık, kızılötesi yayıcıdan salınan enerjinin farklı dalga boylarını içermesinden ileri gelir. Farklı dalga boylarına sahip her bandın yayacağı radyasyonun oranı, yayıcının sıcaklığı ve lambanın emisivite değeri gibi değişkenlere bağımlılık gösterir. Maksimum radyasyonun meydana geldiği dalga boyu, ısıtıcının sıcaklığı ile belirlenir. Bu ilişki, Planck yasası, Wien deplasman yasası ve Stefan-Boltzmann yasası gibi siyah cisim (black body) radyasyonu için temel yasalarla açıklanmaktadır.

Planck Yasası

Planck yasası, belirli bir sıcaklıkta 100 IR radyasyonu yayan bir siyah cisim kaynağından gelen radyasyonun spektral dağılımını sunar.

Nokta kaynakları birleştirilerek spesifik bölgeler için tüm spektral dağılım elde edilebilir. Bu nedenle, IR radyasyonunu karakterize etmek için ortalama yüzey sıcaklığı ve emisyon değeri kullanılarak spektral dağılımın yaklaşık bir değeri kullanılabilir. Planck, refrakter indeksi “ n ” olan saydam bir ortamdaki siyah cisim yüzeyinin spektral yayıcı (emissive) güç dağılımını aşağıdaki Planck denklemi (Denklem 2.1) ile ifade etmiştir.

$$E_{b\lambda}(T, \lambda) = \frac{2\pi hc_0^2}{n^2 \lambda^2 [e^{hc_0/n\lambda kT} - 1]} \quad (2.1)$$

Denklemden k , Boltzmann sabiti ($1,3806 \times 10^{-23}$ J/K), n ortamın refraktif indeksidir. Bu değer vakum ortamı için 1, birçok gaz ortamı için de 1'e yakın bir değerdir. λ dalga boyu

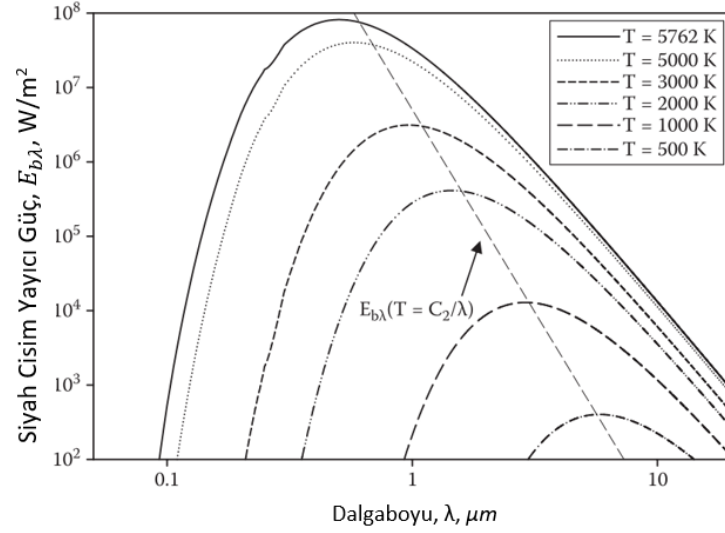
(μm), T kaynağın sıcaklığını (K), c_0 ışık hızını (km/sn), h ise Planc sabitini ($6,626 \times 10^{-34} j.s$) temsil etmektedir.

Bir yüzeyin spesifik sıcaklığı bilindiğinde, radyasyon ısı akısının toplam miktarını tahmin etmek için Planc Yasası kullanılabilir [44].

Wien Deplasman Yasası

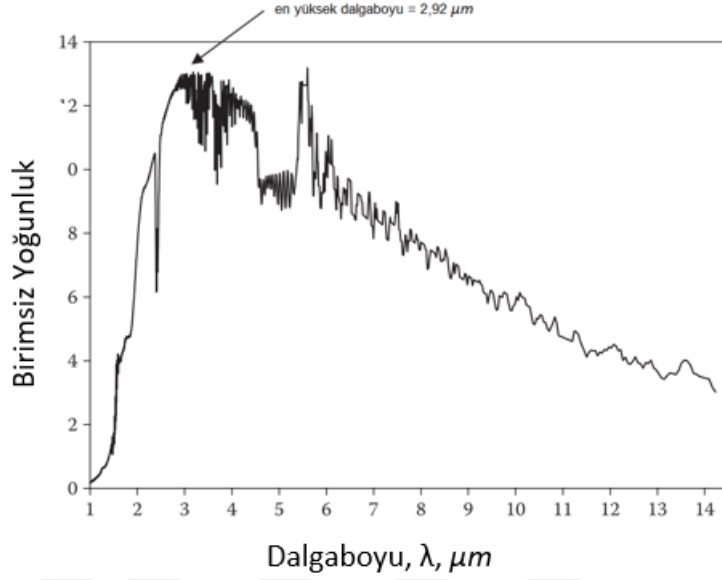
Wien deplasman yasası, siyah cisim tarafından yayılan radyasyonun spektral dağılımı maksimum olduğu andaki dalga boyunu, yani en yüksek dalga boyunu, elde etmeye yarar.

$$\frac{d}{d(n\lambda T)} \left(\frac{E_{b\lambda}}{n^3 \lambda^5} \right) = 0 \quad (2.2)$$



Şekil 2.9. Siyah cisim yayıcı güç spektrumu.

Şekil 2.9 kaynak sıcaklığı ile en yüksek dalga boyu arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Şekil 2.10 ise sıcaklığı bilinmeyen bir yüzey ile yayıcı güç spektrumu arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Bu ölçümler, Fourier Transform Infrared (FTIR) analizleri ile elde edilir.



Şekil 2.10. Ölçülen IR kaynağı yayıcı güç spektrumu.

İstenen spektral dağılım için gereken IR lambaların kaynak sıcaklıkları şu şekilde tahmin edilebilir.

$$\lambda_{max} = \frac{2898}{T} \quad (2.3)$$

Denklem 2.3'te λ_{max} en yüksek dalga boyunu, T ise kaynak sıcaklığını temsil etmektedir. Eğer kaynağın sıcaklığı bilinirse, en yüksek dalga boyu denklemden çıkarılabilir. Şekil 10'da verilen örnek FTIR grafiği ve Denklem 2.3 göz önüne alındığında, en yüksek dalga boyu $2,92 \mu m$ olan bir IR kaynağının sıcaklığı $720 \text{ }^\circ\text{C}$ olarak bulunur. [44]

2.2.3.1.1. Stefan - Boltzmann Yasası

Stefan Boltzmann yasası, belli bir sıcaklıkta, bir IR kaynağından yayılan radyasyonun gücünü belirlemede kullanılır. Bu kavram, ısı ışınım gücü olarak da adlandırılır.

$$E_b = \frac{ac}{4} T^4 \quad (2.4)$$

Denklem 2.4'te c ışık hızını belirtmektedir ve bu bilinen bir değerdir. Fakat "a" değeri bilinmemektedir. Bu değeri bulanlar ise Josef Stefan ve Ludwig Boltzmann'dır. Birbirlerinden habersiz olarak yaptıkları çalışmalarla "a" değerini bulmuşlar. Dolayısıyla

Denklem 2.5'te geçen $\frac{ac}{4}$ değerini hesaplamışlardır. Bu değer bugün bildiğimiz Stefan-Boltzmann sabiti olup

$$\sigma = \frac{ac}{4} = 5.67 \times 10^{-8} \text{ (W/m}^2\text{K)} \quad (2.5)$$

'dir. Dolayısıyla ısı ışıma gücü denklemi en sade şekliyle Denklem 2.6'da görüldüğü gibidir.

$$E_b = \sigma T^4 \quad (2.6)$$

2.2.3.2. Kızılötesinin Endüstride Kullanım alanları

Kızılötesi, endüstride birçok farklı alanda kullanılmaktadır. Bu alanlar arasında gıda işleme, gıda işleme, paketlenme, sıcaklık ölçümü, plastik işleme, kompozit kürlenme ve evsel ısıtma gibi alanlar başta gelenlerdir.

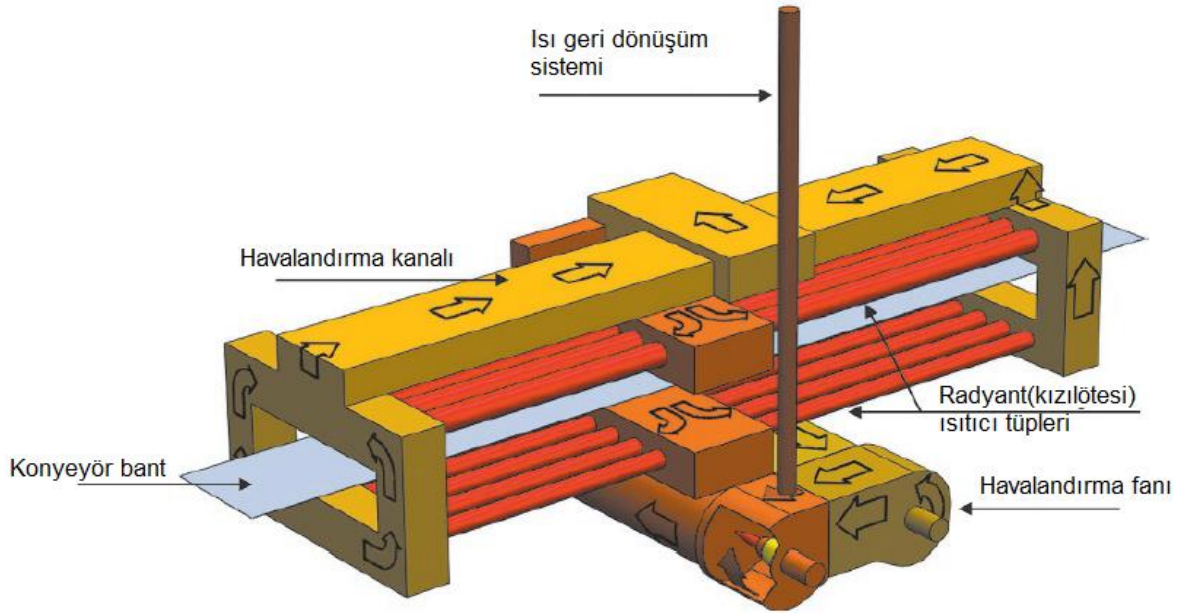
Gıda işleme

Kızılötesi, gıda endüstrisinde gıda kurutma, fırınlama, pastörizasyon gibi alanlarda kullanılmaktadır. Klasik sıcak hava ile kurutma yöntemine göre en önemli avantajları arasında kısa kurutma süresi, düşük enerji ihtiyacı, yüzey kalitesi, proses parametrelerinin daha doğru şekilde kontrol edilebilmesi ve hem kalınlık boyunca hem de ısınma yüzeyi boyunca daha homojen sıcaklık dağılımı elde edilmesi sayılabilir [45].

Bisküvi ve kraker gibi hamur fazından fırınlanarak çıkarılacak gıda ürünleri için genellikle hibrid fırınlar kullanılır. 18-20 m civarına kadar uzayabilen bu hibrid fırınların bir kısmı radyant ısıtıcılarla elektromanyetik dalgalarla, bir kısmı ise konvansiyonel ısıtma ile, yani sıcak hava ile ısıtılan bölümlerden meydana gelir [46]. Şekil 2.11'de bir hibrid fırın, Şekil 2.12'de ise radyant ısıtma sisteminin şematik bir gösterimi yer almaktadır.



Şekil 2.11. Konvansiyonel/Radyant hibrit bisküvi fırını [46].

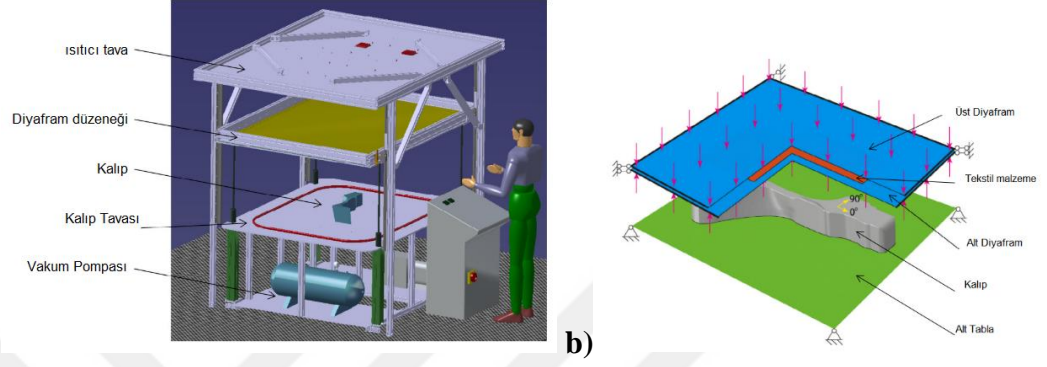


Şekil 2.12. Radyant gıda kurutma ünitesi gösterimi [46].

Sıcak şekillendirme

Özellikle termoplastiklerin sıcaklıkla işlenmeleri uygulamalarında kızılötesi ile ısıtma sıklıkla kullanılmaktadır. “Termoform” da denilen yöntemde, termoplastik prepreg malzeme, istenilen sıcaklığa ısıtıldıktan sonra kalıp içerisinde şekil verilir. Bu yöntem farklı

şekillerde uygulanabilir. Çift diyafram ile şekillendirme yönteminde, malzeme iki diyafram arasına konur ve bu iki diyaframın arası vakumlanır. Böylece malzeme vakum ortamına alınmış olur.

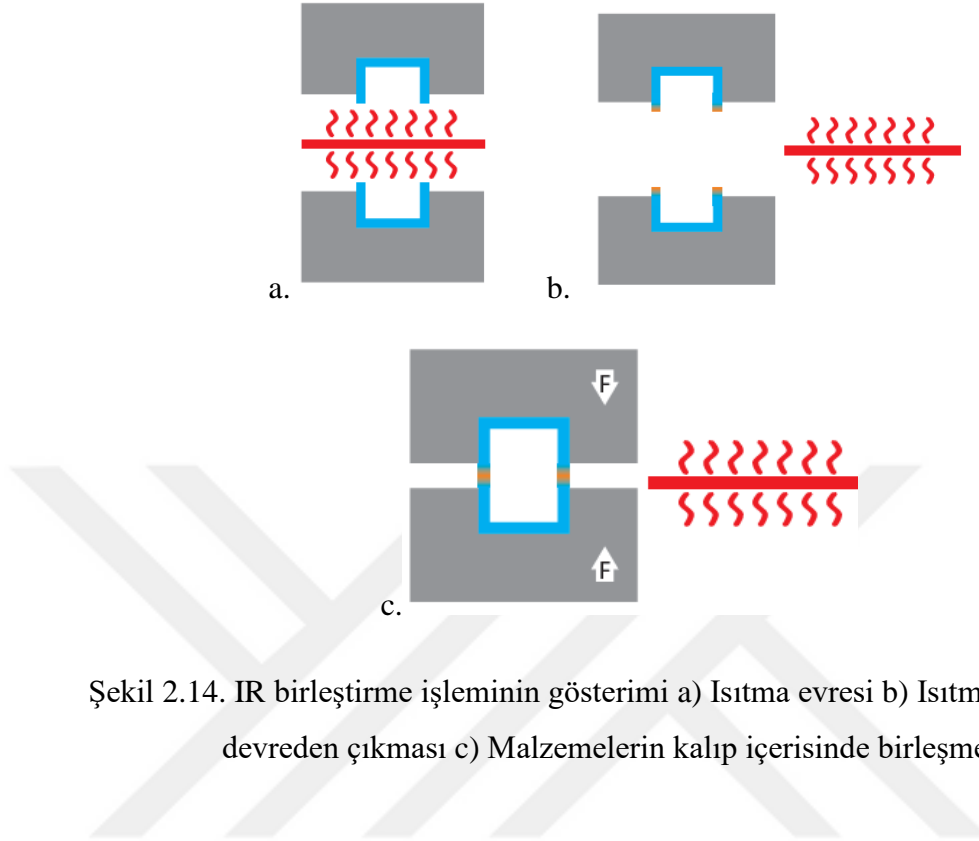


Şekil 2.13. a) Çift Diyafram Sıcak Şekillendirme ile Üretim Yöntemi b) Diyaframlar ve kompozit malzemenin ayrıntılı gösterimi [47].

Daha sonra Şekil 2.13’de gösterilen diyaframların arasındaki fiber takviyeli kompozit malzeme istenilen sıcaklığa getirilir ve diyaframlar erkek kalıbın üzerine getirilip alt diyafram ile kalıp arasında ikinci bir vakum ortamı meydana getirilir. Daha sonra vakum altında soğumaya bırakılıp malzeme içerisindeki reçine ya da bağlayıcının camsı geçiş sıcaklığının altına düşüp sertleşmesi beklenir [47].

Plastik malzemelerin birleştirme işlemleri

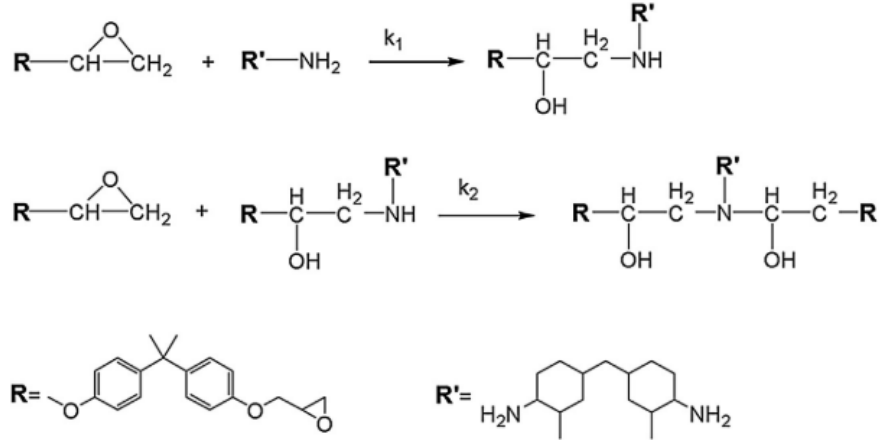
Özellikle otomotiv, havacılık ve yapı sektörlerinde termoplastik malzemelerin birleştirilmelerinde kızılötesi uygulamalar önemli bir pay sahibi olmaya başlamıştır. Şekil 2.14’te görüldüğü gibi kalıp üzerinde birleştirme alanlarına konulan kızılötesi ısıtıcılar, birleştirilecek olan malzemeyi istenilen sıcaklığa kadar çıkarır. Bu sayede malzeme içerisindeki reçine, erime noktasının üzerinde bir sıcaklığa getirilir. Daha sonra kızılötesi birleştirme modülü aradan çıkarak kalıplar birleştirilir. Böylece birleştirilecek olan malzemeler kalıp üzerinde istenilen pozisyonda dururken soğutulmaları ve tek bir parça olarak kalıptan çıkmaları sağlanır [48].



Şekil 2.14. IR birleştirme işleminin gösterimi a) Isıtma evresi b) Isıtma modülünün devreden çıkması c) Malzemelerin kalıp içerisinde birleşmesi.

2.3. KÜRLENME KİNETİĞİ

Polimer matrisli kompozit malzemelerde yüksek kaliteli ürünler elde etmek için malzeme içerisindeki reçinenin kürlenme işleminin ve reaksiyonlarının kontrol altında tutulması gerekir. Kürlenme sırasında, oxirane fonksiyonel monomerleri (reçine), amin içeren bir sertleştirici ile Şekil 2.15'te görüldüğü gibi 3 boyutlu bir ağ yapısı oluşturur. Çapraz bağların kurulduğu bu kimyasal reaksiyona kürlenme adı verilir [49].

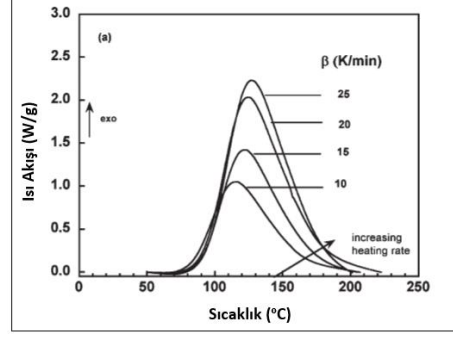


Şekil 2.15. Epoksi-amin karışımının kürlenme süreci [49].

Kür çevrimi üzerine çalışmak ve kimyasal düzeyde kür çevrimi optimizasyon çalışmaları yapabilmek için kürlenme kinetiği ile reolojik parametreler arasındaki ilişkiyi iyi bilmek gerekir.

2.3.1. Kürlenme Davranışının Belirlenmesi

Kürlenme davranışı yaygın olarak DSC (Diferansiyel taramalı kalorimetre) ve DMA (Dinamik mekanik analizör) cihazları ile deneysel olarak belirlenir. Bu cihazlar ile kürlenme başlangıcı, kürlenme ısı, kürlenme derecesi, camı geçiş sıcaklığı, maksimum kürlenme oranı gibi kürlenme reaksiyonu ve polimerin davranışına ilişkin çok önemli veriler elde edilir [50]. Bunun dışında, bir sonraki bölümde bahsedilecek olan kinetik parametreler de bu yöntemler ile belirlenir. Şekil 2.16 bir DSC cihazından elde edilen örnek bir ısı akışı-sıcaklık grafiğini göstermektedir. DSC cihazı, bir numune ısıtılırken ya da sabit sıcaklıkta tutulurken numune ve referans numune üzerindeki ısı akışı değişimi izlenir ve sıcaklık değişimi ve zamana göre gerekli hesaplamalar yapılarak kürlenme davranışı belirlenir [51].



Şekil 2.16. DSC cihazından elde edilen örnek ısı Akışı-Sıcaklık grafiği [50].

2.3.2. Kinetik Modeller

Bu çalışmada bahsedilen reçine CFRP malzemelerde yaygın olarak kullanılan epoksi reçinedir. Epoksi reçinenin kürlenme sürecini karakterize eden parametrelere kinetik parametreler adı verilir. Kinetik parametrelerin DSC ve DMA cihazları ile deneysel olarak bulunurlar. Kürlenme süreci, ampirik kinetik modeller kullanılarak izlenir. Bu modeller, bahsedilen cihazlardan alınan kinetik parametreleri de içerecek şekilde yapılandırılmıştır. En yaygın kullanılan modeller Denklem'2.7 de gösterilen n^{th} order ve Denklem'2.8'de gösterilen otokatalitik modellerdir [52].

$$\frac{d\alpha}{dt} = (K_1)(1 - \alpha)^n \quad (2.7)$$

Burada, K_1 orantı sabiti, n reaksiyon derecesidir.

$$\frac{d\alpha}{dt} = (K_1 + K_2\alpha^m)(1 - \alpha)^n \quad (2.8)$$

Burada K_2 otokatalitik kürlenme reaksiyonu için orantı sabiti, α kürlenme derecesi (ya da dönüşüm oranı), m ve n ise reaksiyonun kinetik üsleridir.

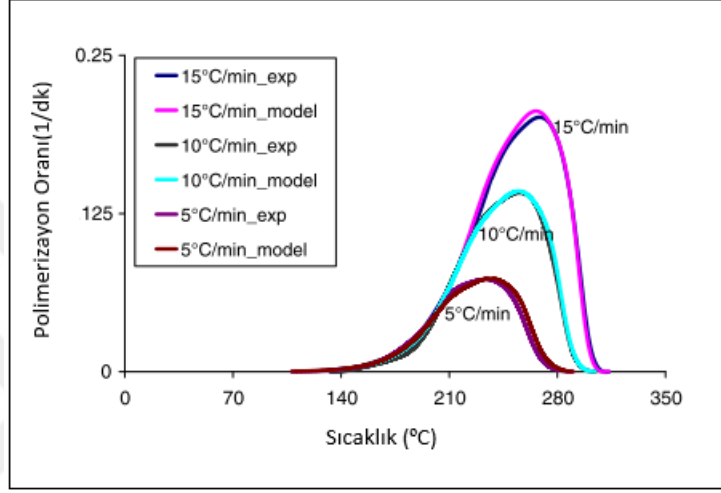
Denklem 2.9'da gösterilen Arrhenius denklemi ile sıcaklığa bağlı olarak orantı sabitleri bulunur.

$$K_i = A \exp\left(\frac{E_i}{RT}\right) \quad (2.9)$$

Burada E_i aktivasyon enerjisi, A kinetik sabit, R gaz sabiti ve T mutlak sıcaklıktır.

Yukarıdaki izotermal modeller ve bu modellerin modifiye edilmiş versiyonları kullanılarak izotermal ve izotermal olmayan kürlenme çevrimleri izlenip yeni kür çevrimleri elde

edilmekte, belli kür çevrimlerinin karakteristikleri incelenmekte ve bu modeller kullanılarak kürlenme simülasyonları yapılmaktadır [50], [53]-[60]. Aşağıdaki grafik farklı ısıtma hızlarında, izotermal olmayan koşullarda, bir epoksi polimerin polimerleşme oranının sıcaklığa bağlı değişiminin deneysel ve kinetik model ile karılatırılmasını göstermektedir [61].

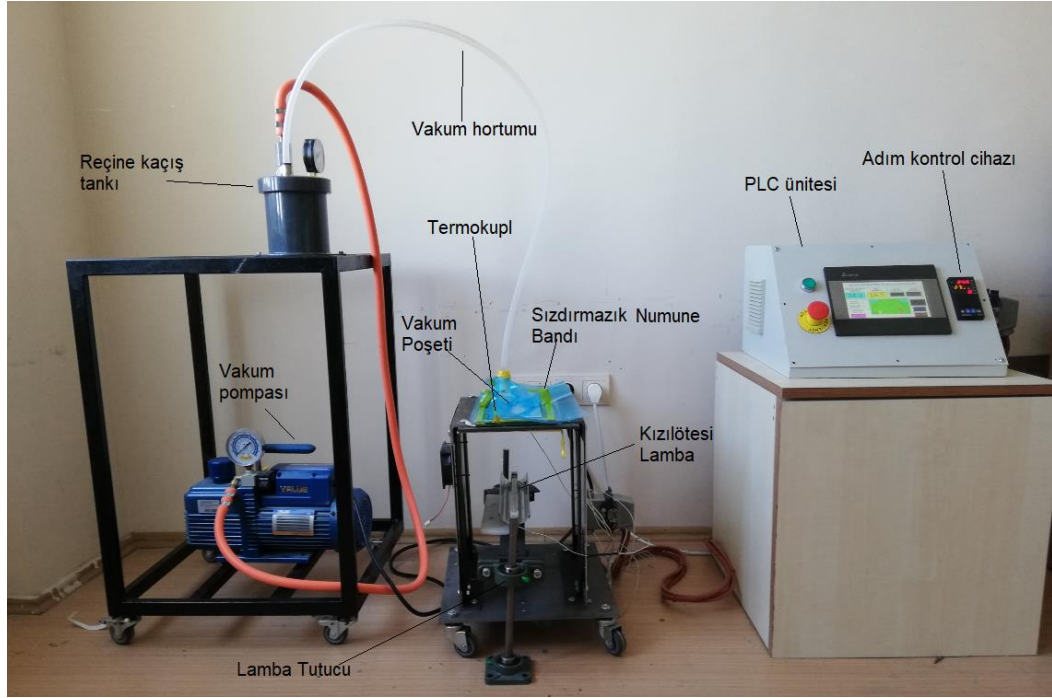


Şekil 2.17. Polimerizasyon oranının ısıtma hızına göre değişim grafiği rneği [61].

3. MATERYAL YÖNTEM

3.1. KIZILÖTESİ KÜRLEME FIRINI

Kızılötesi ile yapılan üretimler, tez çalışması için üretilen bir kızılötesi kürleme fırını ile yapılmıştır. Şekil 3.1’de görüleceği gibi fırının üzerinde 8 mm kalınlığında temperlenmiş cam kalıp koyulmuştur ve kürlenecek olan numuneler, camın üzerine serilmiştir. Fırının içerisindeki kızılötesi lamba aşağıdan yukarıya doğru numuneyi ısıtmaktadır. Fırının duvarları alüminyumdan yapılmıştır. Parlak bir yüzeye sahip olan alüminyum, kızılötesi lambadan çıkan ışınları absorbe etmemekte, yansıtmaktadır. Bu da enerji kaybını en aza indirmektedir. Fırın, istenilen ısıtma hızı ve sıcaklık seviyelerinin elde edilmesini sağlayan PLC (Programlanabilir mantıksal kontrol) ve adım kontrol cihazları ile donatılmıştır. Kızılötesi ısıtıcı olarak Ceramicx firmasından tedarik edilen kısa dalga boylu (1-3 μm) halojen kızılötesi lamba kullanılmıştır. Numune ile kızılötesi ısıtıcı lambanın arasındaki mesafenin ayarlanabilmesi için yüksekliği ayarlanabilir bir lamba tutucu tasarlanmıştır.



Şekil 3.1. Kızılötesi karbon fiber kürleme fırını.

Cam üzerine serilen karbon fiber prepreg malzeme, sızdırmazlık bandıyla çevrelenip vakum poşeti ile vakum ortamına alınmıştır. Numunenin en üst katmanının üzerinde yanmaz silikon kağıt vardır. Malzeme içerisine ilgili testlerde bakır lama uçlu K tipi termokupl yerleştirilmiştir. Vakum poşetinin altından reçine kaçış tankına doğru çekilmiş vakum hortumu ve vakum pompası yardımı ile numune vakum ortamına alınmıştır. Bu bölümde bahsedilen tüm malzeme ve ekipmanlar aşağıdaki bölümde ayrıntılı olarak ele alınmıştır.

3.2. MALZEME VE EKİPMANLAR

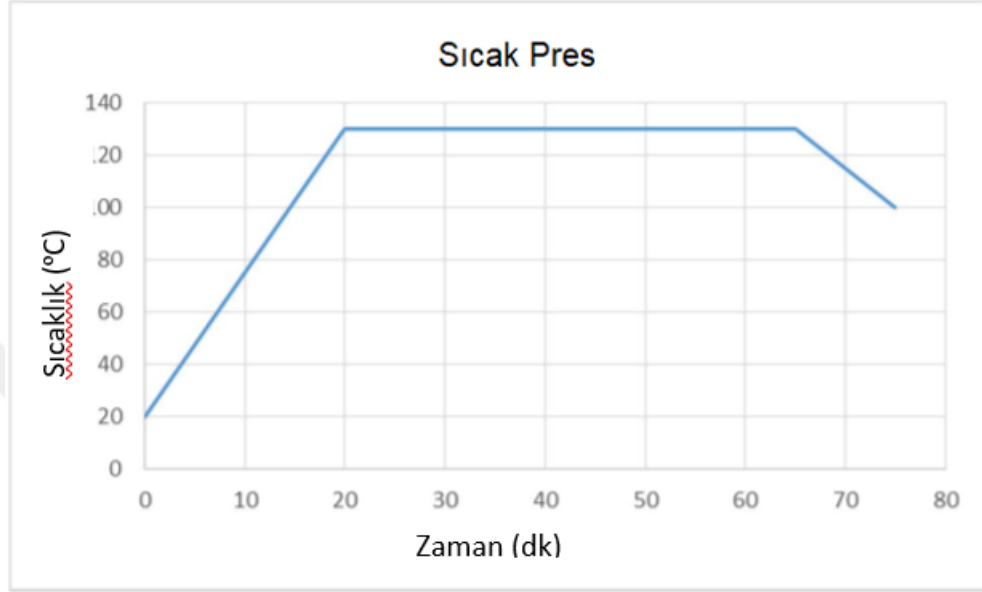
3.2.1. Karbon fiber prepreg

Tez çalışmasında kullanılmak üzere seçilen prepreg malzeme, KordSa firmasından temin edilen OM11 reçine kodlu karbon fiber takviyeli kompozit malzemedir. Önceden reçine emdirilmiş (prepreg) malzemenin içeriğinde takviye elemanı olarak 245 gr/m² yoğunluğunda ve [0/90] yönlerinde twill örgülü karbon elyaf kullanılmıştır [62]. OM11 kodlu reçinenin özellikleri ise Çizelge 3.1’de verilmiştir. Malzeme işlendikten sonra ortalama 0,75 mm kalınlığında olmaktadır.

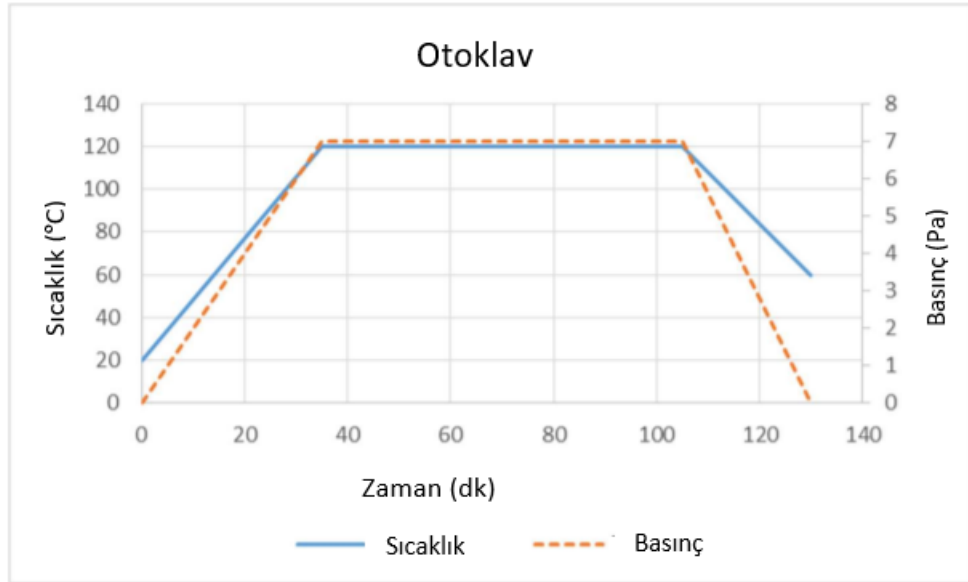
Çizelge 3.1. OM11 kodlu kurlenmiş reçineye ait mekanik özellikler.

Çekme Testi (ISO 527-2)	Çekme Mukavemeti (MPA)	39
	Elastik Modül (E)	2.8
	Kopma anında uzama (%)	2
	Kayma Mukavemeti (MPA)	1038
Eğme Testi (ISO 178)	Eğme Mukavemeti (MPA)	130
	Eğme Modülü (GPA)	2.4
	Maksimum uzama (%)	7
Tg(°C) DMA	E' Başlangıcı	≥ 120

Tezde kullanılan prepreg sistemi için üreticinin önerdiği iki ayrı üretim metodu için iki farklı kurlenme çevrimi vardır. Şekil 3.2 ve Şekil 3.3'te prepreg sisteminin otoklav ve sıcak pres üretim metotları için üreticinin önerdiği sıcaklık ve basınç çevrimleri gösterilmektedir.



Şekil 3.2. Sıcak pres için üreticinin önerdiği kurlenme çevrimi.

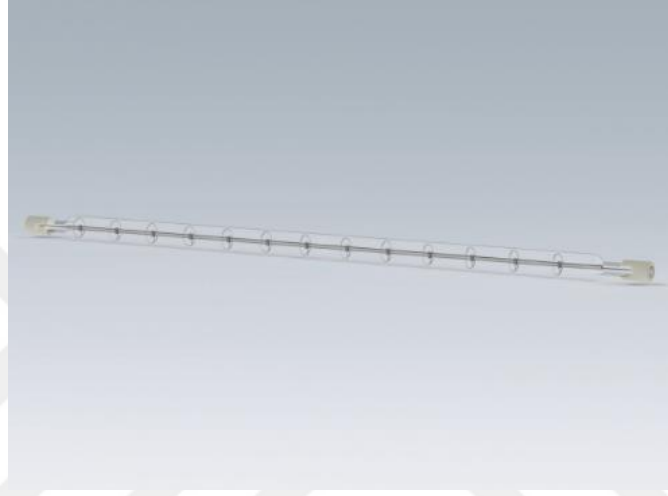


Şekil 3.3. Otoklav için üreticinin önerdiği kurlenme çevrimi.

Tez çalışmasında, malzemenin otoklav için önerilen kurlenme çevrimi esas alınmıştır.

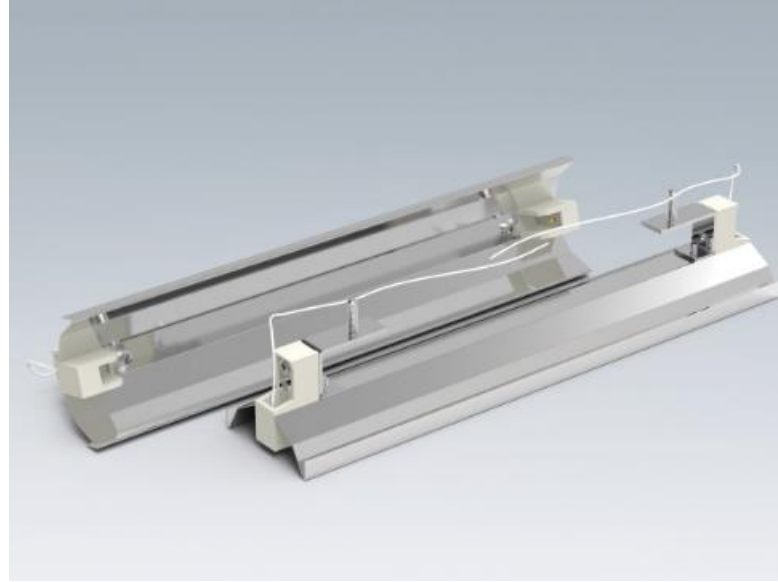
3.2.2. Kızılötesi Lamba

Tez çalışmasında, Ceramicx firmasından tedarik edilen kısa dalga boylu (1-3 μm) kuartz halojen tip kızılötesi ısıtıcı lamba kullanılmıştır. Şekil 3.4'te görüldüğü gibi, lamba 277 mm boyunda ve 10 mm çapında halojen dolu bir tüp içerisinde bulunan ve 2600 °C sıcaklığa çıkabilen tungsten bir filamentte sahiptir. Lambanın gücü 1 kW'dır.



Şekil 3.4. Kuartz halojen kızılötesi lamba [64].

Kızılötesi lamba, dalgaları daha homojen şekilde dağıtmak ve hedefe yönlendirmek için Şekil 3.5'te görülen reflektör içerisine alınmış ve tutucuya o şekilde bağlanmıştır.



Şekil 3.5. Kızılötesi lambanın içinde bulunduğu reflektör [65].

3.2.3. Lamba Tutucu

Lamba tutucu, fırın gövdesi içerisinde, kızılötesi lambayı istenilen yükseklikte tutabilecek şekilde tasarlanmış bir tutucu ayaktır. Şekil 3.6'de görüldüğü gibi kızılötesi lamba, iki ayak arasında yerleştirilmiş bir lamanın üzerine sabitlenmiştir. Ayaklar, dikey mil tutucu bir rulmana sabitlenmiş millerden oluşmaktadır. Lambanın bağlı bulunduğu lama ise mile yataklanmış olan ve mil üzerinde hareket edebilen rulmanlara bağlanmıştır. Mil üzerinde yükseklikler işaretlenmiştir. Mile yataklanmış rulmanlar istenilen yüksekliğe ayarlanıp sabitlenerek lamba ile numune arası mesafe hassas şekilde tayin edilebilmektedir.

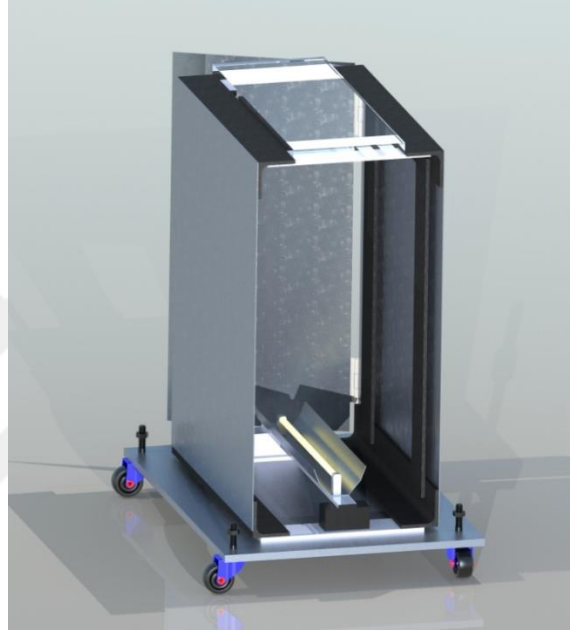


Şekil 3.6. Yüksekliği ayarlanabilir kızılötesi lamba tutucu.

3.2.4. Fırın Gövdesi

Fırının gövde iskeleti 4 mm kalınlığında lamalardan yapılmıştır. Şekil 3.7'de üç boyutlu çizimi görülen fırın gövdesinin iki tarafı alüminyum sac ile kapatılmıştır. Alüminyum yüzeyi parlak olduğundan, üzerine gelen kızılötesi ışınları absorbe etmeyerek yansıtacaktır. Bu da enerji tasarrufu sağlayacaktır. Fırının diğer iki yüzeyi açık bırakılmıştır. Fırın içerisindeki lambanın, kapalı bir fırın içerisinde durursa aşırı ısınacağı ve işlevini yerine getirememesi riski olacağı değerlendirildiğinden, fırının daha dar olan iki yüzeyi açıkta bırakılmıştır. Ayrıca bu iki yüzeyin açıkta bırakılması lamba tutucunun yerleştirilebilmesi için fazladan bir yer kullanımına da olanak vermiştir. Şekil 3.1'de görüldüğü gibi, lamba tutucunun ayakları fırın gövdesinin içerisine değil dışarısında koyularak önemli bir yer tasarrufu elde edilmiştir. Fırının üst yüzeyi, L köşebentler ve lamalar ile oluşturulmuştur.

Bu üst yüzey üzerine 8 mm kalınlığında sıcaklığa dayanıklı temperli cam konulmuştur. Cam yüksek geçirgenliği ve şeffaflığı sayesinde göz ardı edilebilecek miktarda ışını absorbe edecek, geri kalan kızılötesi ışınların ise üzerine serilen karbon fiber prepreg numuneye geçmesini sağlayacaktır.



Şekil 3.7. Kızılötesi fırın gövdesi 3 boyutlu çizimi.

3.2.5. PLC Ünitesi ve Adım Kontrol Cihazı

PLC (Programlanabilir Mantıksal Kontrol) ünitesinde, Delta markasının ürünleri kullanılmıştır. PLC kontrol ünitesi ve adım kontrol cihazı, kızılötesi lambanın gücünü, istenilen ısıtma hızı ve sıcaklık değerlerinin uygulanabilmesi için içeriğindeki PID kontrol parametrelerine göre değiştirmektedir. Bunu yaparken, malzeme üzerindeki termokupldan aldığı veriler ile istenen kür çevrimi dahilinde hedef ısıtma süreleri ve sıcaklık değerlerini karşılaştırmaktadır. Şekil 3.8’de görülen sistemde adım kontrol cihazına istenen kür çevrimi girilmektedir.



Şekil 3.8. PLC kontrol ünitesi.

Kür çevrimini girmek için her ısıtma hızı bölgesi ve sabit sıcaklıkta kalınacak bölgeler ayrı ayrı birer adım olarak girilmektedir. Isınma kısmında ısınma hızı, ulaşılmak istenen sıcaklığa, mevcut sıcaklık göz önüne alınarak ne kadar sürede ulaşılabileceği bilgisi girilerek belirtilir. Sabit sıcaklık adımında ise sıcaklık ve süre bilgisi girilerek malzemenin istenen süre boyunca sabit sıcaklıkta kalması sağlanır. Sistem, ısıtıcı lambanın gücünü yüzde olarak değiştirir. Kullanıcı ara yüzünde ise anlık mevcut güç yüzde biçiminde gösterilir. PID parametreleri, hedef sıcaklığa varmadan 2 derece önce gücün belli oranda azalmaya başlaması şeklinde tanımlanmıştır. Bu değerlerin değiştirilmesi ile birlikte daha hassas aralıklarda işlem yapmak mümkündür. Kür çevriminin tamamlanması ile birlikte sistem otomatik olarak kapanır.

3.2.6. Vakum Tertibatı

Fırın gövdesi üzerindeki cam kalıp üzerine malzeme serildikten sonra öncelikle malzeme Şekil 3.9'da gösterilen sızdırmazlık bandı ile çevrenir. Daha sonra vakum poşeti, sızdırmazlık bandının üzerine yapıştırılarak malzeme vakum ortamına alınmış olur. Burada dikkat edilmesi gereken husus, vakum poşeti sızdırmazlık bandının üzerine yapıştırılırken gerekli yerlerde potların verilmesidir. Pot, sızdırmazlık bandı ile uygulanır ve vakum poşetinin bir parça bant üzerine sarılması ve katlanması suretiyle yapılır. Pot atılmasının amacı ise vakum yapıldığında vakum poşetinin sızdırmazlık bandına yapıştığı yerlerde gerilmeler oluşmasını engellemektir. Pot atılmadığı takdirde bu gerilmeler sızdırmazlık

bandının cam kalıptan ayrılmasına, malzeme üzerinde belli bölgelere yeterli negatif basıncın gelmemesine veya vakum poşetinde yırtılmasına yol açabilir.



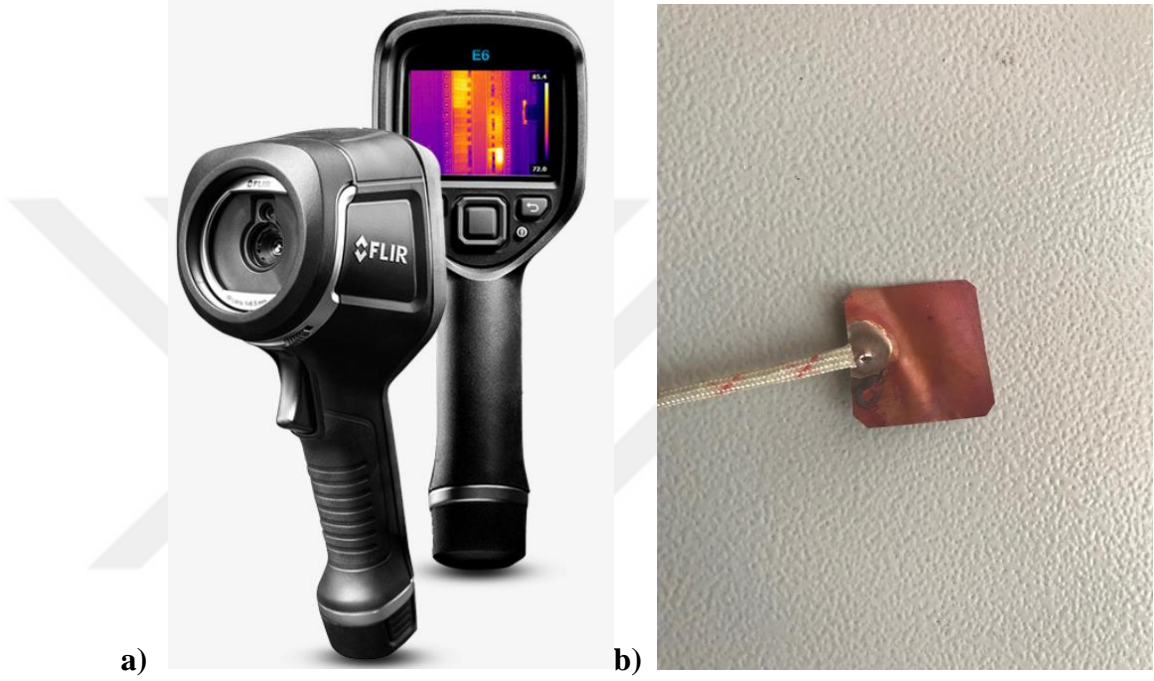
Şekil 3.9. Vakum sızdırmazlık bandı.

Vakum işlemi için 10 m³/saat çekim kapasitesine sahip 0,75 kW gücünde bir vakum pompası kullanılmıştır. Vakum pompası ile vakum ortamı arasında reçine kaçış tankı ya da “catch pot” denilen silindirik bir hazne vardır. Bu hazne vakum sırasında reçinenin vakum pompasına kaçmasını önler. Vakum pompası kaçış tankı içerisinde negatif basınçlı bir hacim oluşturur, kaçış tankı da prepreg malzemenin içerisinde bulunduğu vakumlu ortama bir hortum ile bağlı olduğundan vakum kesintisiz olarak sağlanır.

3.2.7. Sıcaklık Ölçümleri

Yapılan üretimlerde sıcaklık ölçümleri için Şekil 3.10’da gösterilen K tipi termokupl ve FLIR E6 termal kamera kullanılmıştır. Termal kamera, 120 x 160 piksel çözünürlüğünde, -20 °C-250 °C sıcaklık aralıklarında ± 2 °C hassasiyetle ölçüm yapabilmektedir. Kızılötesi kamera (termal görüntüleme cihazı olarak da bilinir) nesnelerin kızılötesi enerjisini algılar ve ölçer. Kamera, kızılötesi verilerini ölçülen nesnenin belirgin yüzey sıcaklığını gösteren bir elektronik görüntüye dönüştürür. Termal kamera, kızılötesi enerjiyi bir ızgara şeklinde düzenlenmiş binlerce detektör pikseli içeren özel bir detektör çipine (sensör dizisi) odaklayan bir optik sistem içerir. Sensör dizisindeki her bir piksel burada odaklanan kızılötesi enerjiye tepki verir ve bir elektronik sinyal üretir. Kamera işlemcisi her pikselden sinyali alır ve buna bir matematiksel hesaplama uygulayarak nesnenin belirgin sıcaklığının bir renk haritasını oluşturur. Her sıcaklık değeri farklı bir renkle gösterilir. Bunun

sonucunda oluşan renk matrisi bu nesnenin sıcaklık resmi (termal görüntüsü) olarak kameranın ekranına ve belleğe gönderilir [66].



Şekil 3.10. a) Tezde kullanılan termal kamera b) Tezde kullanılan bakır lama uçlu K tipi termokupl.

Termokupllar bir metal çifti kullanarak sıcaklık ölçmeye yarayan aygıtlardır. Bütün iletkenler ısıtıldıklarında içlerinde bulunan elektronlarda bir hareketlenme olur. Ancak bu hareketlenme çeşitli iletkenler arasında farklılık gösterebilir. Bu maddenin ayırt edici özelliklerinden birisidir. İki farklı iletkenin boşta kalan uçlarına hassas bir voltmetre bağlarsak, kaynaklanan ucu ısıtırsak sıcaklıkla orantılı olarak voltmetrede mV mertebesinde bir doğru akım gerilimi elde ederiz. Elde edilen gerilim değeri, kullanılan metalin sıcaklığa verdiği tepki ile orantılıdır. Bu prensipten hareketle, birtakım voltaj kalibrasyonları sonucu, her sıcaklık değerine karşılık gelen bir voltaj değeri belirlenir ve malzemenin sıcaklığı tayin edilmiş olur [67].

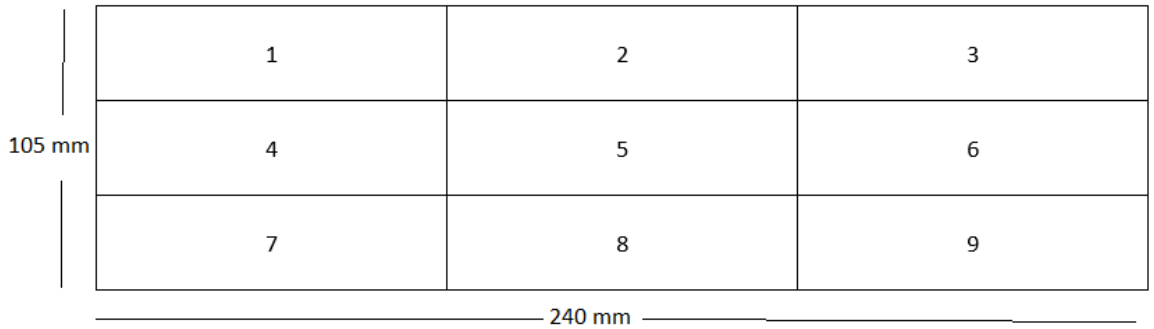
3.3. DENEY PROSEDÜRÜ

Tez çalışması iki ana aşamadan oluşmaktadır. İlk aşama sıcaklık dağılımı testleri, ikinci aşama ise optimum kür çevrimi testlerinden oluşmaktadır.

3.3.1. Sıcaklık Dağılım Testleri

Bu aşama ikinci aşamanın hazırlık aşaması olarak planlanmıştır. İkinci aşamada, yani optimum kür çevrimi testlerini yaparken, en hassas sonuçları alabilmemiz için iki farklı parametrenin belirlenmesi hedeflenmiştir; Optimum malzeme kalınlığı ve ısıtıcı lamba-malzeme arasındaki mesafe. Bunun yanına, yapılan deney çalışmalarından, her bölge için sıcaklık verileri elde edilmiş ve bu veriler tüm numune yüzeyini en iyi temsil eden bölgenin seçilmesi için ayrıca işlenmiştir. Temsili bölgenin belirlenmesinin amacı, optimum kür çevriminin bulunacağı testler için sıcaklık verisinin alınacağı lama tipi termokuplun yerleştirileceği yeri tayin etmektir.

Deneylerde numune geometrisi olarak Şekil 3.11’de gösterildiği şekilde 105 mm x 240 mm boyutlarında prepreg malzemeler kullanılmıştır. Aynı şekil üzerinde görüldüğü gibi numuneler silinmez kalemle 9 ayrı bölgeye ayrılmıştır. Bu bölgelendirmenin amacı, üretim sırasında çekilecek olan termal görüntüleri 9 ayrı bölge şeklinde ele almaktır. Bu sayede, ısıtma sisteminin, numunenin hangi bölgesini hangi hızda ısıttığı ve dolayısıyla ısıtma sırasında numune yüzeyi üzerindeki sıcaklık gradyeni-sıcaklık dağılımı-belirlenecektir.



Şekil 3.11. Prepreg numune geometrisi.

Numune, fırın üzerine Şekil 3.12’de görüldüğü şekilde yerleştirilmiştir. Sıcaklık dağılımı testleri, numune vakum ortamına alınmadan ve üzerindeki silikon malzeme numune

üzerinden alınarak gerçekleştirilmiştir. Çünkü yüzey sıcaklık ölçümleri termal kamera ile alınmıştır. Termal kameranın en iyi şekilde ölçüm alabilmesi için numune ile kamera arasında farklı ısı iletim katsayısına sahip başka bir malzeme bulunmaması gerekir. Homojenlik testleri de sıcaklığın yüzey üzerindeki ve kalınlık boyunca sıcaklık dağılımını belirlemek için yapıldığından, testleri vakum sistemini ile birlikte yapmaya gerek duyulmamıştır.



Şekil 3.12. Numunenin fırın üzerindeki yerleşimi.

Sıcaklık dağılım testleri 600 saniyelik zaman aralıklarında yapılmıştır. Her 10 sn'de bir kez termal kamera ile tüm yüzeyin fotoğrafı çekilmiştir. Her test için toplamda 60 ayrı termal görüntü, her görüntü üzerinde 9 bölgeye tüm yüzey görüntüsünü de işlersek toplamda 10 ayrı bölge işlenmiştir. Yani, her numune için toplamda 600 sıcaklık bölgesi işlenmiş olmaktadır.

Termal görüntüler, manuel olarak alınmıştır. Test boyunca termal kamera, numuneye dik şekilde tutularak ve sadece numuneyi görüntü alanı içerisine alarak termal görüntüler alınmıştır. Termal görüntüler, 0,95 yayma oranı (emisivite) değeri kullanılarak işlenmiştir. Karbon fiber malzeme siyah ve oldukça mat bir yüzeye sahip olduğu için bu şekilde yüksek bir yayma oranı, çok düşük hata oranı ile birlikte sıcaklık verilerini sağlayabilmektedir. Alınan termal görüntüler, üretici firmanın sağladığı yazılım içerisinde işlenmiş olup her

numune için belirlenen toplam 10 ayrı bölgenin, en yüksek, en düşük ve ortalama sıcaklık değerleri kaydedilmiştir.

Farklı ısıtıcı lamba-numune mesafelerini sıcaklık dağılımını nasıl değiştirdiğini belirleyebilmek için tüm testlerden alınan sıcaklık değerlerine uygulanabilecek bir sayısallaştırma yöntemi yaklaşımı uygulanmıştır. Bu tezde aşağıda gösterilen formül, her deney verilerinin “sıcaklık homojenlik indeksi (SHİ)” adı altında sayısal bir veriye dönüştürülmesi için kullanılmıştır [68]. (Denklem 3.1);

$$SHİ = \frac{T_{max} - T_{ort}}{T_{max} - T_{min}} \quad (3.1)$$

Yukarıdaki denklemde T_{max} maksimum sıcaklık değerini, T_{min} minimum sıcaklık değerini, T_{ort} ise yazılımın ürettiği ortalama sıcaklık değerini göstermektedir. Bu formül, mutlak bir homojenlik durumunu göstermez. Aksine, farklı sıcaklık mertebelerindeki uygulamalar için çok farklı sonuçlar verecektir. Her ne kadar farklı uygulamalar için kullanılmaya müsait olmasa da aynı deney sistematiği içerisinde bir parametrenin, homojenlik durumuna etkisinin tahmin edilebilmesi için kullanılabilir. Bu durumda mutlak bir homojenlik durumunun sayısal ifadesinden değil, değişen parametrelerin, bağıl olarak homojenliği ne yönde değiştirdiğine yönelik çıkarsama yapılabileceği değerlendirilmektedir. Aşağıda prosedürü belirtilen ilk grup yüzey sıcaklık dağılım testlerinde, sadece Denklem 3.1’de belirtilen denklem değil, aynı zamanda sıcaklık değişim grafikleri de göz önüne alınarak optimum ısıtıcı lamba-numune mesafesi belirlenmiştir.

Malzeme homojenliğinin belirlenmesi deneyleri 3 aşamada gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada Çizelge 3.2’de görüldüğü gibi numune ile kızılötesi ısıtıcı arasındaki optimum mesafenin belirlenebilmesi için ısıtıcı ile numune arasındaki mesafeler 100 mm, 150 mm, 200 mm ve 250 mm olacak şekilde ayarlanmış ve tek kat numune ile üretimler yapılmıştır. Sıcaklıklar termal kamera ile belirlenmiştir. Sıcaklığın zaman içerisindeki değişimini net biçimde belirleyebilmek için, numunenin üst katmanına herhangi bir malzeme koyulmamıştır.

Bu aşamada, numuneler herhangi bir kürlenme çevrimine tabi tutulmamış olup ısıtıcı lamba tam güçte çalıştırılmıştır. Bunun nedeni, bu testin amacının, bu aşamada bir kürlenmeyi izlemek değil, sıcaklığın numune üzerindeki dağılımını izlemek olmasıdır.

Çizelge 3.2. Isıtıcı – numune arası optimum mesafenin belirlendiği deney tasarımı.

Mesafe	Katman sayısı	Sıcaklık Verileri Alınış Yöntemi
100 mm	1	Termal Kamera
150 mm	1	Termal Kamera
200 mm	1	Termal Kamera
250 mm	1	Termal Kamera

Bu deneyler yapıldıktan sonra tüm numune yüzeyini en iyi temsil edecek olan bölgenin belirlenmesi adına öncelikle tüm testlerde, tüm yüzeylerin ortalama sıcaklıkları tüm deney boyunca ayrı ayrı alınıp işlenmiştir. Daha sonra Denklem 3.2 kullanılarak sıcaklıklar normalize edilmiştir.

$$T_{norm,n} = \frac{T_n}{T_{ort}} \quad (3.2)$$

Yüzeyin tamamının ortalama sıcaklığı birim değer olan “1” kabul edilerek tüm bölgeler için bu değer etrafında bir normal sıcaklık değeri bulunmuştur. Normalize edilen değerler göz önüne alınarak hangi bölge ya da bölgelerin tüm yüzeyi temsil etme kabiliyetinin bulunduğu saptanmıştır.

Bu deneylerin yapılmasından ve değerlendirilmesinden sonra tespit edilen optimum mesafeyi kullanarak, ilgili mesafede kullanılabilecek en uygun katman sayısının belirlenmesi için ikinci aşama deneyler yapılmıştır. Bu aşamada, sonuçlar kısmında ayrıntılı olarak değinileceği üzere, 200 mm mesafe en uygun mesafe olarak belirlenmiş ve optimum kür çevrimi deneylerinde kullanılmak üzere Çizelge 3.3’te gösterildiği şekilde deneyler gerçekleştirilmiştir. Bu deneylerde 4 ayrı katman sayısı kullanılarak deneyler tekrar edilmiş ve sıcaklık verileri termal kamera ile ilk grup verilerin alındığı şekilde alınmış, veriler de aynı şekilde işlenmiştir. 4 katmalı bir yapıda ısıtma sırasında tüm katmanların yüzey sıcaklık dağılımları, ortalama sıcaklıkları gibi değerler elde edilemeyeceği için her katman için ayrı bir üretim yapılmış, tüm üretimlerde veriler ayrı ayrı alınarak işlenmiştir. Daha sonra sonuçlar kısmında ayrıntılı olarak gösterileceği üzere, grafikler üzerinde bu veriler birleştirilmiş ve karşılaştırılmıştır. Hangi katman sayısının en

uygun katman sayısı olduğuna karar vermek için 600 sn boyunca her katmanın sıcaklık verileri izlenmiş ve hangi katmana kadar radyasyon etkisi ile, hangi katmandan sonra iletim mekanizması etkisi ile ısındığı yorumlanmıştır. Bu yorumlamayı yapabilmek için tüm katman sayılarında yapılan deneylerden, tüm bölgeler için ayrı ayrı sıcaklık verileri önceki deney grubundaki gibi alınmıştır. Daha sonra her bölgenin tüm kalınlıklar (kat sayıları) için izlenen sıcaklık farkı değerleri 600 sn boyunca izlenmiştir. Yani, her bölge için 1. ve 2. katlar arası, 2. ve 3. katlar arası ve 3. ve 4. katlar arası ortalama sıcaklık farkları belirlenmiş ve ek bir grafik içerisinde yorumlanmıştır.

Çizelge 3.3. Optimum katman sayısının belirlendiği deney tasarımı.

Mesafe	Katman Sayısı	Sıcaklık Alınış Yöntemi
200 mm	1	Termal Kamera
200 mm	2	Termal Kamera
200 mm	3	Termal Kamera
200 mm	4	Termal Kamera

Sıcaklık dağılım testlerindeki üçüncü grup test ise, termokupl ve termal kamera verilerini birbirleriyle uyumunu test etmek amacı ile yapılmıştır. Çünkü optimum kürlenme çevrimi deneylerinde, sıcaklık verileri termal kamera ile değil termokupl ile alınacaktır. Dolayısıyla bu iki farklı ölçüm aracının sıcaklık verilerinin birbirleri ile uyumlu olması gerekmektedir. Bu amaçla Çizelge 3.4'te gösterilen iki ayrı deney yapılmıştır. Bu deneyler, vakum altında ve iki farklı ısıtma hızı kullanılarak yapılmıştır. Bu testler PLC sisteme termokupl bağlanarak gerçekleştirilmiştir. Öncelikle vakum tertibatı bağlanmış ve malzeme vakum altına alınmıştır. 2 katmanlı olan numunenin üst katmanına termokupl bağlanmıştır. Termokupl lama tipli olduğu için malzemenin üzerine vakum etkisi ile yapışması sağlanmıştır. Fakat termokuplın numuneye direk olarak bağlanması, reçinenin erime sıcaklığından itibaren numune ile termokuplın yapışmasına sebep olacağı için numune ile termokupl arasına pişirme kağıdı konulmuştur. Pişirme kağıdı, termokuplın kablosunu da içine alacak şekilde vakum sızdırmazlık bandına kadar uzatılmıştır. Böylece aynı termokupl tüm denelerde kullanılabilmiştir.

Çizelge 3.4. Termokupl-Termal kamera sıcaklık verileri karşılaştırılması deney tasarımı.

Mesafe	Katman sayısı	Sıcaklık verileri alınış yöntemi	Isıtma Hızı (°C/dk)	Deney koşulu
200 mm	2	Termal Kamera, Termokupl	2	Vakum altında
200 mm	2	Termal Kamera, Termokupl	5	Vakum altında

Üçüncü grup deneyler ilk iki gruba göre daha uzun sürelerde yapılmıştır. 2 °C/dk ısıtma hızıyla yapılan deneyler 55 dk, 5 °C/dk ile yapılan deneyler ise 25 dk süre ile yapılmıştır. Çünkü, bu deneyler ilk iki gruptaki gibi tam güçte yapılmamış, belirtilen ısıtma hızlarında yapılmıştır. Ortam sıcaklığının ortalama 24 °C/dk civarlarında olduğu varsayılırsa, numunelerin, üreticinin öngördüğü çevrime göre 120 °C/dk maksimum sıcaklığa kadar çıkması için 2 °C/dk ısıtma hızı için ortalama 50 dk, 5 °C/dk ısıtma hızı için ortalama 20 dk süre gereklidir. Bu süreler, sabit sıcaklıkta kalma durumundaki sıcaklık değerlerinin karşılaştırılması amacıyla 5'er dk fazladan süre eklenmiştir. Bu sayede hem ısınma sırasında hem de sabit sıcaklıkta termokupl ve termal kameradan alınan sıcaklık verileri karşılaştırılabilmiştir.

3.3.2. Optimum Kür Çevrimi Testleri

Kızılötesi ile ısıtmada optimum kürlenme çevriminin bulunması tezin ana amacını oluşturmaktadır. Optimum kürlenme çevrimi testlerinin hangi fiziksel şartlarda yapılacağını-kızılötesi lamba-numune arası mesafe ve katman sayısı-sıcaklık dağılım testleri ile tayin ettikten sonra optimum kür çevrimini bulabilmek için kür çevrimi parametrelerini belirlemek gerekmektedir. Bu parametreler Şekil 3.13'te görülen UTEST marka 50 kN kapasiteli çekme testi cihazında gerçekleştirilmiştir. Testler ASTM 3039 test standardına göre yapılmıştır. Bu standarda göre test numunesi ölçüleri 25 mm genişlik ve 250 mm uzunluk olacak şekilde kesilmiştir. Testler standardın öngördüğü çekme hızı olan 2 mm/dk hızla gerçekleştirilmiştir.

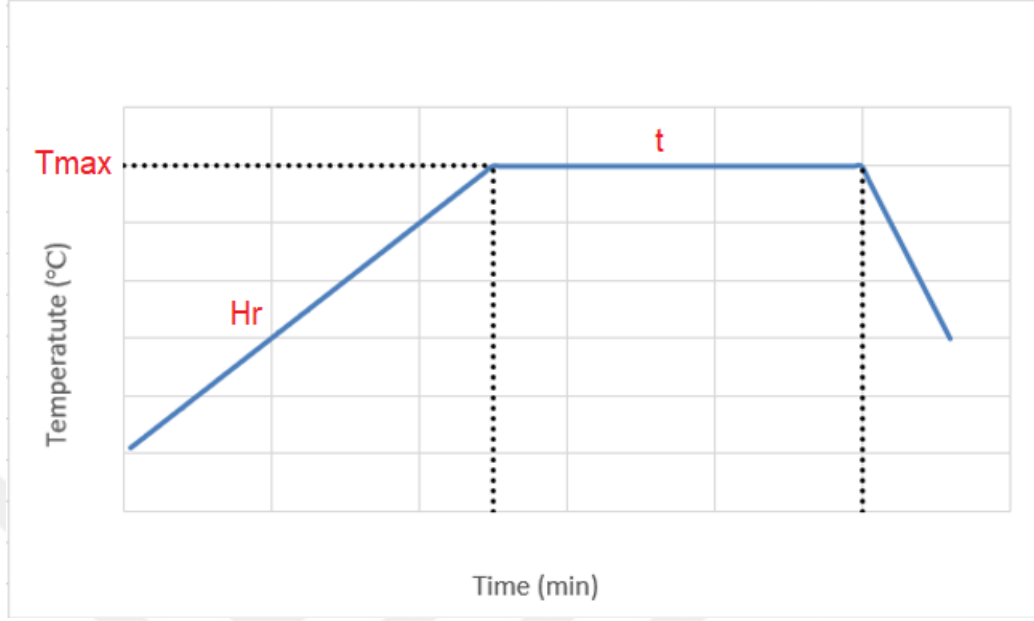


Şekil 3.13. Çalışmada kullanılan çekme testi cihazı.

Tez çalışmasında kür çevrimini belirleyen üç ana parametre üzerinde durulmuştur; Isıtma hızı (Hr), maksimum sıcaklık (Tmax) ve maksimum sıcaklıkta bekleme süresi (t). Çalışmada kullanılan karbon fiber prepreg numunelere ait kürlenme parametreleri şu şekildedir;

$$Hr= 2 \text{ }^{\circ}\text{C/dk} \quad Tmax= 120 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad t= 70 \text{ dk}$$

Tez çalışmasında farklı kür çevrimlerinde üretilecek olan numuneler çekme testine tabi tutulacaktır. Bu testlerden elde edilecek olan çekme grafiklerinden çekme mukavemet değerleri elastik modül değerleri bulunacaktır. Bu değerlerin maksimize edildiği kürlenme parametrelerinin aldığı değerler bize optimum kürlenme çevrimini verecektir. Şekil 3.14'te bir kürlenme çevrimi grafiği gösterimi verilmiştir.



Şekil 3.14. Şematik kürlenme evrimi.

Optimum kürlenme çevrimini bulmak için yukarıdaki parametrelerin, istenen mekanik özelliğini maksimize edecek değerlerinin bulunması gerekmektedir. Bu amaçla yukarıdaki parametrelerin izelge 3.5'te verilen değerleri ile deneyler yapılmasına karar verilmiştir.

Çizelge 3.5. Kr evrim parametrelerin verilen değerler.

Isıtma hızı (°C/dk) (Hr)	Maksimum sıcaklık (°C)(Tmax)	Maksimum Sıcaklıkta kalma süresi (dk) (t)
2	100	30
4	110	60
6	120	90
8	130	120
10	140	150

Tabloda görüldüğü gibi toplam 3 parametrenin 5 farklı değer alması ile yapılması gereken toplam deney sayısı $5^3 = 125$ 'tir. Tüm numunelerin en az 3'er tekrar ile üretilip test edileceği de hesaba katılırsa toplam 375 adet numune üretilmesi gereklidir. Fakat tez çalışmasında deney tasarımlarına kompakt bir bakış getiren ve ayrıntıları aşağıdaki

bölümde verilen “Taguchi deney tasarım metodunu” kullanılmıştır. Bu metod ile toplamda 375 yerine 75 deney numunesi üretilmiştir.

3.3.2.1. Taguchi Deney Tasarımı Yöntemi ve Uygulanması

Taguchi yöntemi, süreç değişkenliklerinin azaltılmasını içeren işlem parametrelerini optimize etmek için kullanılan basit ve sağlam bir tekniktir. Taguchi yöntemiyle yapılan ayrıntılı analiz ve değerlendirmeler sonucunda deney sayısını önemli ölçüde azaltmak mümkündür. Ayrıca Taguchi yöntemi, yüksek kaliteli sistem tasarımı için son derece yararlı olan deneysel bir tasarım tekniğidir [69]. Akıncıoğlu ve arkadaşları [70] Taguchi deney tasarım metodunu kullanarak kriyojenik işlem gören karbid takımların, Hastalloy C22 malzemesinin işlenmesi sırasına takım aşınması ve yüzey pürüzlülüğü üzerine çalışmışlar ve 27 yerine 9 deney yaparak takım aşınmasını azaltacak parametreleri belirlemişlerdir. Tsao [71], CFRP malzemenin kademeli matkap ile delinmesi işleminde uygulanması gereken itiş kuvvetini tahmin etmek için Taguchi metodunu kullanmıştır. Kompozit malzeme alanında Taguchi yöntemi ile deney tasarımı özellikle kompozit malzemelerin kesme delme işlemlerinde delaminasyon gibi problemlerin ortaya çıkmasını engelleyecek şekilde işlem parametrelerinin belirlenmesi konularında geniş şekilde çalışılmıştır [72]-[77]. Taguchi yöntemi, kalite özelliklerini belirlemek için de bazı fonksiyonlar kullanır. Kayıp fonksiyon değerleri de bir sinyal-gürültü (S/N) oranına (η) dönüştürülür. Genel olarak, S/N oranı analizinde; “Nominal en iyi”, “En büyük en iyi” ve “En küçük en iyi” olmak üzere üç farklı kalite özelliği vardır. Bu çalışmada çekme mukavemeti ve elastik modül için yüksek arzulanan olduğu için Taguchi yönteminde en büyük en iyi denklemi kullanılmıştır.

En büyük en iyi,
$$\eta = S/N_L = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y^2} \right) \quad (3.3)$$

Burada; n gözlemlenen değer sayısı, y ise, gözlemlenen veridir [78], [79].

Geleneksel deneysel tasarımlarla karşılaştırıldığında, Taguchi yöntemi, kalite özelliklerini az sayıda denemeyle incelemek için özel bir ortogonal dizi tasarımı kullanmaktadır [80]. Ortogonal dizi seçimi, optimizasyon için incelenecek faktör sayısına, incelenecek etkileşimlerin sayısına, her faktör için gerekli seviyelerin sayısına, deneyin amacına ve tabi

ki deneysel bütçeye ve kaynakların kullanılabilirliğine bağlı olduğu için kritik önem taşır. Kontrol faktörleri olarak seçilen kesme parametreleri ve bu parametre seviyeleri Çizelge 3.6’da verilmiştir.

Çizelge 3.6. Çekme mukavemeti ve elastik modül için kontrol faktörleri olarak seçilen parametreler ve seviyeleri.

Sembol	Kontrol Faktörleri	Seviyeler				
		1	2	3	4	5
A	Isıtma hızı – Hr -2 °C/dk	2	4	6	8	10
B	Maksimum Sıcaklık Tmax - °C	100	110	120	130	140
C	Plato süresi – t - dk	30	60	90	120	150

Taguchi yönteminin ilk adımı, kontrol faktörleri olarak seçilen kesme parametrelerine dayalı uygun bir ortogonal dizi seçmektir. Optimum kesme parametrelerini belirlemek ve bu belirlenmiş parametrelerin etkilerini analiz etmek için en uygun dizi [L25] (53) seçilmiştir. Yürütülen deneyler sonucunda ölçülen değerlerin optimizasyonu ve kalite özelliklerinin belirlenmesi S/N oranları ile sağlanmaktadır. S/N oranları, sistemin kalite karakteristiğinin değişkenliğini yansıtır ve ortalamanın ayarlanmasına bağlı değildir. Hedef değer değiştirilirse bile S/N oranı kaliteyi tahmin etmek kullanışlıdır [81]. Deneylerden elde edilen çekme mukavemeti ve elastik modül sonuçları maksimum değerde olması istenildiği için [82], S/N oranının hesaplanmasında “En büyük en iyi” prensibine dayanan denklem seçilmiştir. Taguchi deney tasarımına göre yapılan deney tasarımında Çizelge 3.7’de gösterilen 25 farklı kür çevriminin uygulanmasına karar verilmiştir.

Çizelge 3.7. Taguchi deney tasarımı metodu ile belirlenen deney parametrelerinin değerleri.

Deney No	Isıtma Hızı – Hr- °C/dk	Max. Sıcaklık – Tmax - °C	Plato süresi – t - dk
1	2	100	30
2	2	110	60
3	2	120	90
4	2	130	120
5	2	140	150
6	4	100	60
7	4	110	90
8	4	120	120
9	4	130	150
10	4	140	30
11	6	100	90
12	6	110	120
13	6	120	150
14	6	130	30
15	6	140	60
16	8	100	120
17	8	110	150
18	8	120	30
19	8	130	60
20	8	140	90
21	10	100	150
22	10	110	30
23	10	120	60
24	10	130	90
25	10	140	120

Yukarıdaki deneylerin yapılmasından sonra taguchi metodu, he iki kriter için (Maksimum çekme mukavemeti ve maksimum elastik modül) birer set doğrulama deneyi daha verecektir. Taguchi metodunun vereceği doğrulama deneylerinin sonuçları istatistiksel olarak anlamlı ve metodun tahmin ettiği değerler arasında çıkarsa, en son edinilen doğrulama deneyinin döndürdüğü parametre değerleri, kızılötesi ile kütleme yönteminde kullandığımız prepreg için optimum kür çevrimi olmuş olacaktır.

Bulunan bu değerler hem malzemenin üretici tarafından sağlanan teknik raporundaki verilere göre hem de bu optimum parametrelere göre otoklavda üretilmiş olan bir numune ile karşılaştırılmıştır. Fakat, bu parametrelerden ısıtma hızı değerlerine kullanılan otoklavda çıkılamadığı için ısıtma hızı parametresi otoklavda çıkılabilen maksimum değer olan 5 °C/dk olarak girilmiştir. Tüm deneylerden sonra kızılötesi ile üretilen ürünlerin, kızılötesi kür çevrimi kullanılarak otoklavda üretilen ürünlerin ve malzemenin fabrika verisi çekme testinin sonuçları karşılaştırılmıştır.

3.3.3. SEM Analizleri

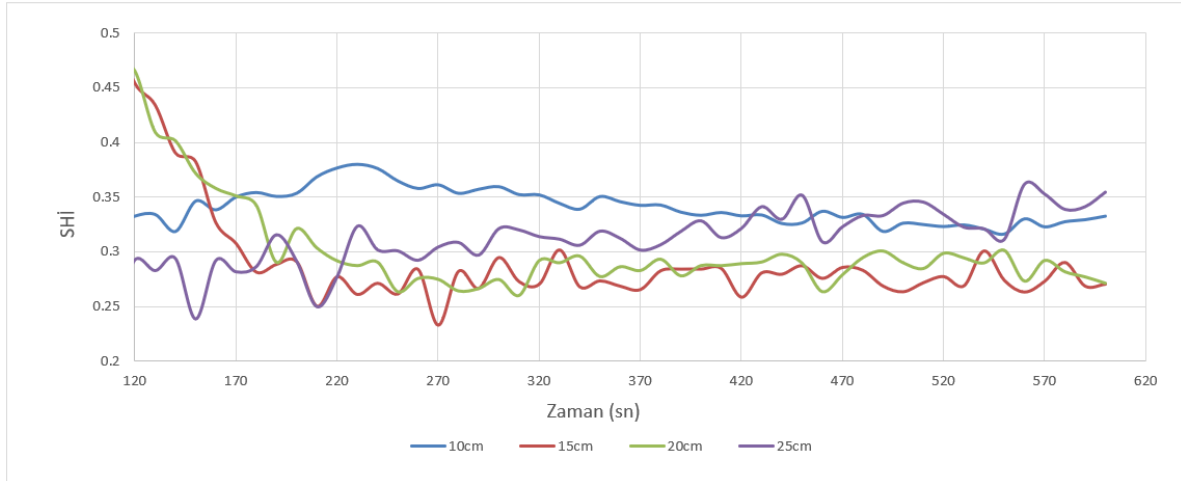
SEM (Taramalı elektron mikroskobu), malzemelerin iç yapıları, topografya ve kompozisyonları hakkında ayrıntılı bilgiler çıkarılabilen görüntülerin elde edildiği cihazdır. Bu yöntem ile iletken her türlü malzemenin mikron ve nano boyutta görüntüleri alınabilir [83]. Kompozit malzeme alanında SEM özellikle malzemelerin torna freze ve delik delme işlemlerinden sonra, işlem yüzeyinde oluşan hasar mekanizmalarını belirleyebilmek [84]-[87], ayrıca kompozit- kompozit ve kompozit- metal yapışmalarının belirli yükler altında hasar mekanizmalarını inceleyebilmek [88]-[91] için sıklıkla başvurulan bir yöntemdir. Bu çalışmada, vakum altında tutulmamış olan kusurlu bir numune, kızılötesi ile ve otoklav ile üretilmiş olan numuneler SEM analizi kullanılarak karşılaştırılmışlardır. Bu karşılaştırma ile vakumun ve dış basıncı, malzemenin konsolidasyonuna olan etkileri incelenmiştir.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

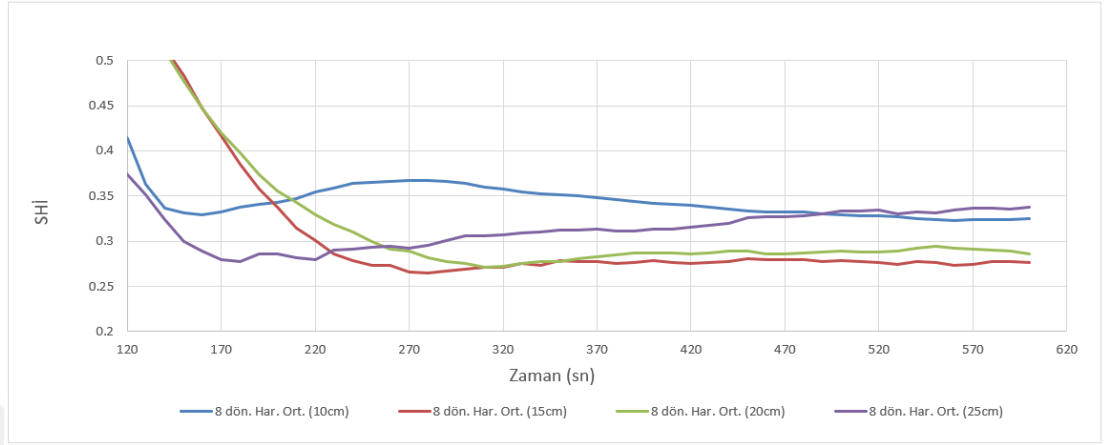
4.1. SICAKLIK DAĞILIM TESTLERİ BULGULARI

4.1.1. Kızılötesi lamba-Numune Arası Optimum Mesafenin Belirlenmesi

Sıcaklık dağılım testlerinde ilk olarak kızılötesi ısıtıcı lamba ile numune arasındaki mesafenin, yüzey sıcaklığına ve homojenliğine etkisine bakılmıştır. Bu amaçla 100 mm, 150 mm, 200 mm ve 250 mm mesafelerde 600 sn sürecek şekilde testler yapılmış ve materyal ve metod bölümünde anlatıldığı gibi termal kameralar ile alınan görüntüler işlenmiştir. İlenen görüntüler Denklem 3.1’de gösterildiği gibi sıcaklık homojenlik indeksi (SHİ)’ne dönüştürülmüştür. Şekil 4.1’de dört farklı mesafenin, tüm yüzeyin sıcaklık dağılımındaki homojenlik durumunu gösterilmektedir. Şekil 4.2 ise aynı verilerin, daha anlaşılır olması için 8 dönem hareketli ortalamalar metodu ile sadeleştirilmiş şeklini göstermektedir. Hareketli ortalamalar metodu, belirlenen sayı kadar veriyi birleştirerek ortalamalarını alır ve veri setinin trendini daha anlaşılır şekilde gösterir. Bu tez çalışmasında, verilerin daha anlaşılır şekilde sunulabilmesi amacıyla gerektiğinde 8 dönem hareketli ortalamalar metodu ile grafikler tekrar oluşturulmuştur.

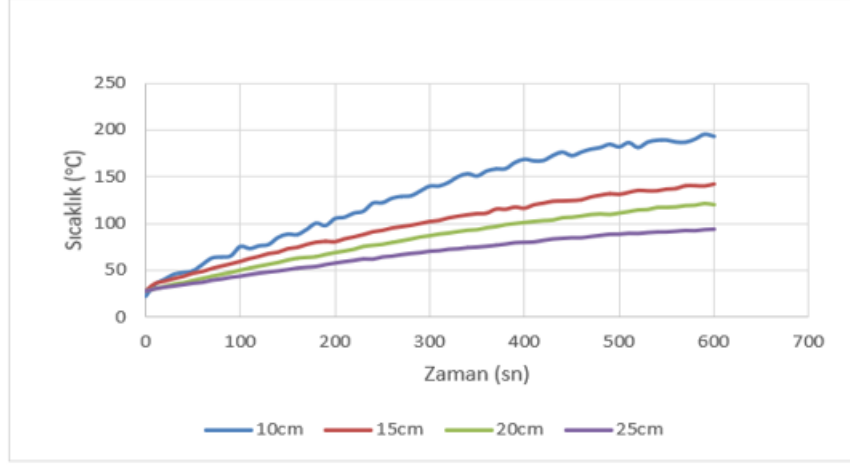


Şekil 4.1. Isıtıcı lamba-numune arası mesafeye göre SHİ değerinin değişim grafiği.

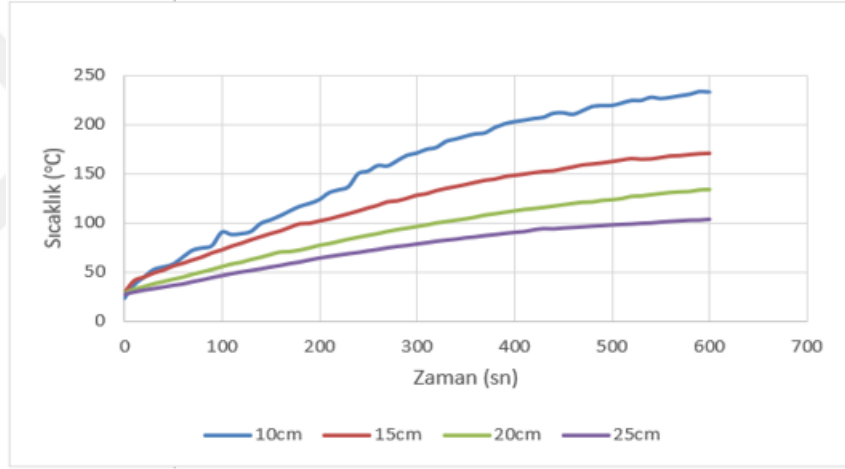


Şekil 4.2. 8. Hareketli ortalamalara göre Isıtıcı lamba-numune arası mesafeye göre SHİ değerinin değişim grafiği

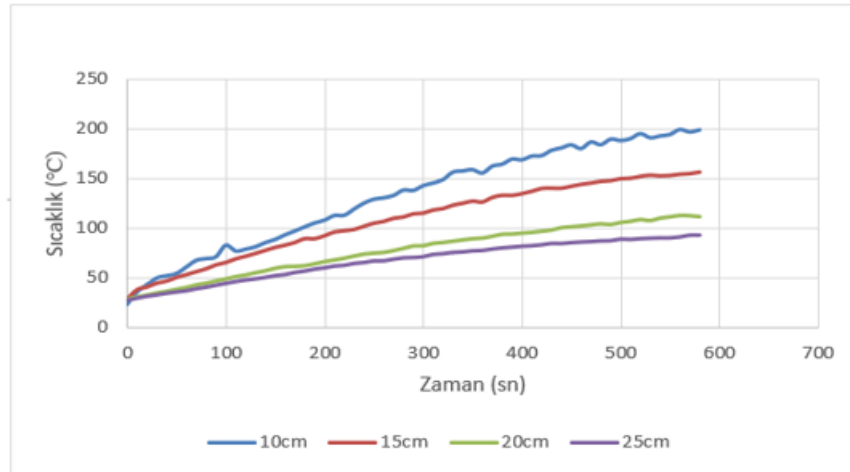
Şekil 4.1 ve Şekil 4.2'deki grafiklerde ilk 120 sn stabil değerler görülmediğinden, grafikte değerlerin daha stabil ve yorumlanabilir olduğu 120 sn-600 sn zaman aralığı gösterilmiştir. Grafiklerde, sıcaklık homojenlik indeksini düşük olması daha homojen bir sıcaklık dağılımının görüldüğün işaret etmektedir. Bu grafiklere bakarak 150 mm ve 200 mm mesafelerinin 100 mm ve 250 mm mesafelere göre daha homojen bir sıcaklık dağılımı gösterdiği savunulabilir. Isıtıcı lamba ve numune arasındaki 250 mm mesafenin, bir noktadan sonra enerjinin stabil şekilde numune üzerine yansıtmadığı, ayrıca, ilgili mesafe boyunca bulunan hava tabakasının, ısıtma süreci boyunca radyasyon ile ısıtmaya daha doğrudan bir etki yapmış olabileceği çıkarımları yapılabilir. Fakat materyal ve metod bölümünde de değinildiği gibi SHİ indeksi tek başına homojenliğin bir ölçüsü değildir. Sadece bağlı bir değerlendirmede bulunabilmek için bir araçtır. Dolayısıyla sadece SHİ grafiklerine bakarak numuneler üzerindeki sıcaklık dağılımlarını tayin etmek doğru değildir. Bu sebeple, tüm bölgelerin her dört mesafede sıcaklık gelişimlerini izlemek tüm yüzeyin sıcaklık dağılımını değerlendirebilmek adına daha doğru bir yaklaşım geliştirmemizi sağlayabilecektir. Şekil 4.3-4.11, tüm bölgelerin mesafeye göre sıcaklık değişimlerini ayrı ayrı göstermektedir.



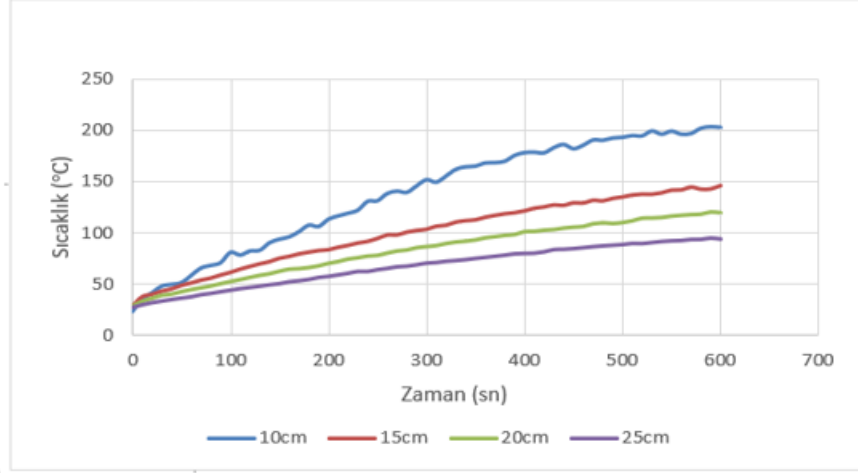
Şekil 4.3. 1. Bölgenin sıcaklık-zaman grafiği.



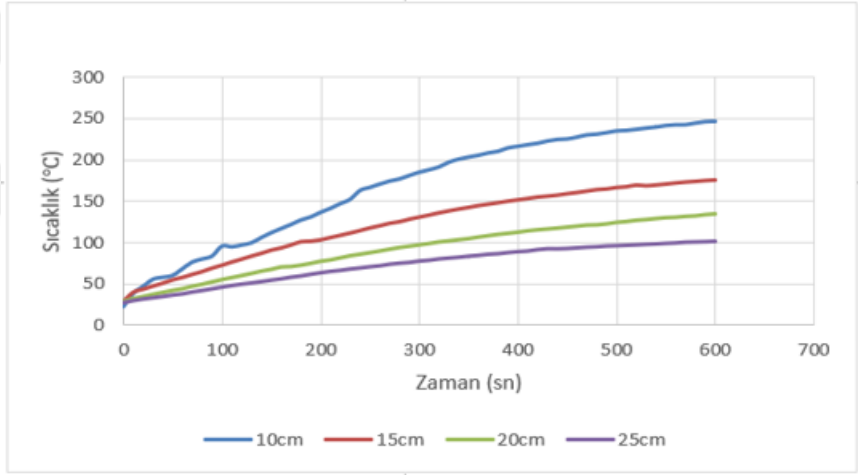
Şekil 4.4. 2. Bölgenin sıcaklık-zaman grafiği.



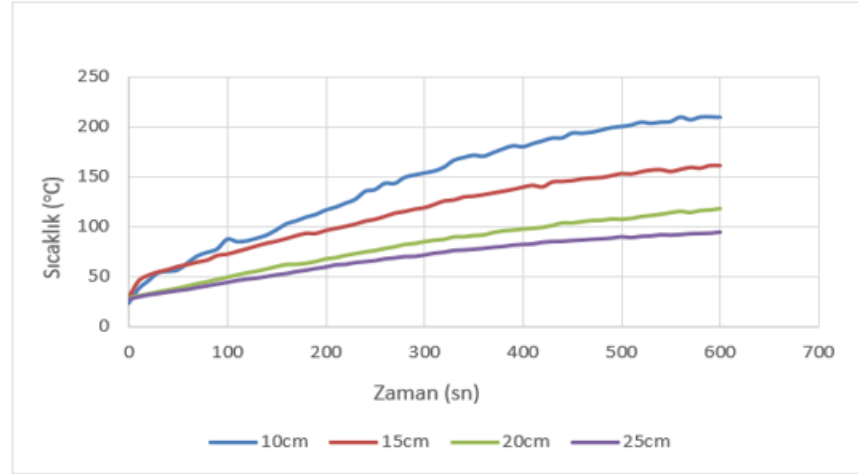
Şekil 4.5. 3. Bölgenin sıcaklık-zaman grafiği.



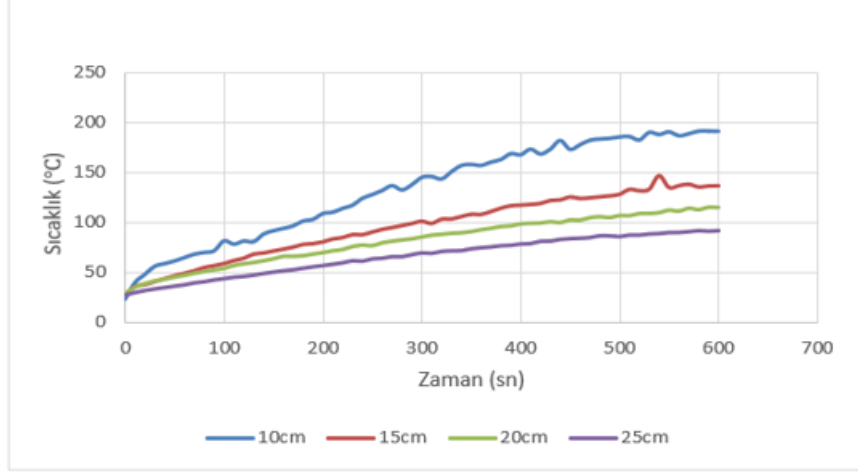
Şekil 4.6. 4. Bölgenin sıcaklık-zaman grafiği.



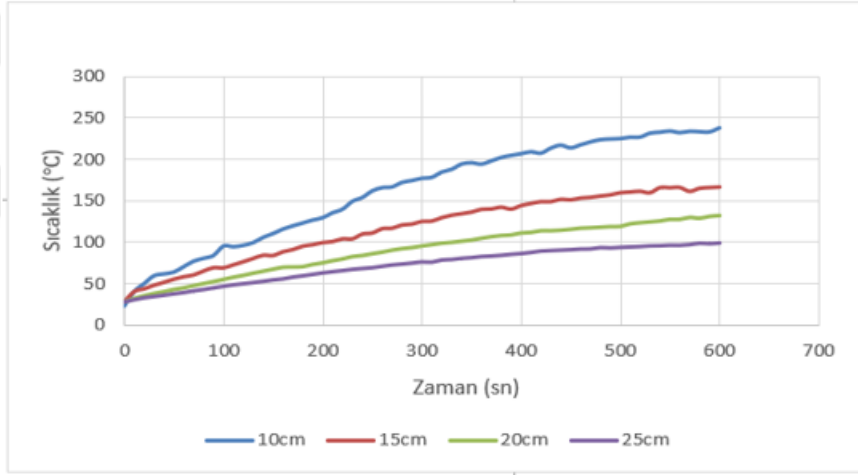
Şekil 4.7. 5. Bölgenin sıcaklık-zaman grafiği.



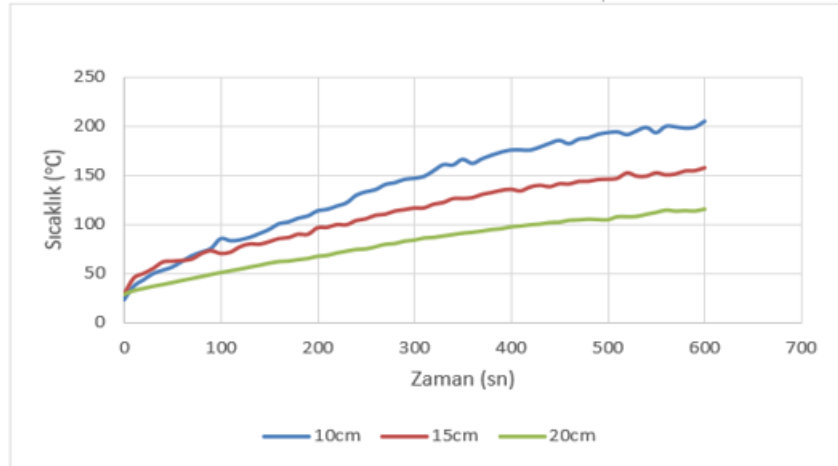
Şekil 4.8. 6. Bölgenin sıcaklık-zaman grafiği.



Şekil 4.9. 7. Bölgenin sıcaklık-zaman grafiği.

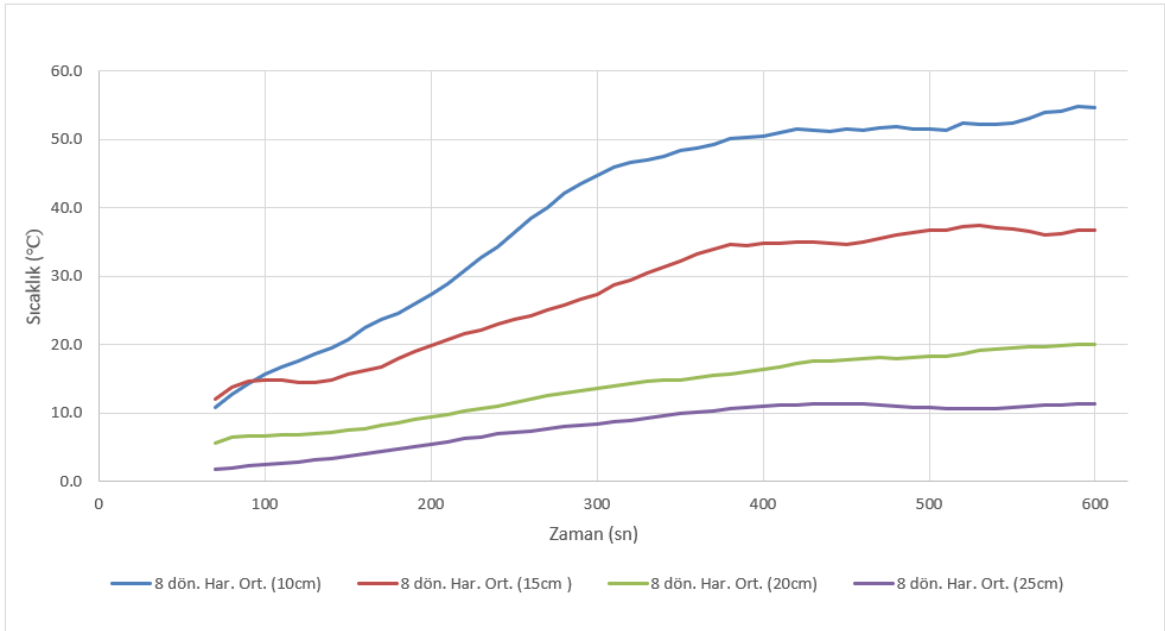


Şekil 4.10. 8. Bölgenin sıcaklık-zaman grafiği.



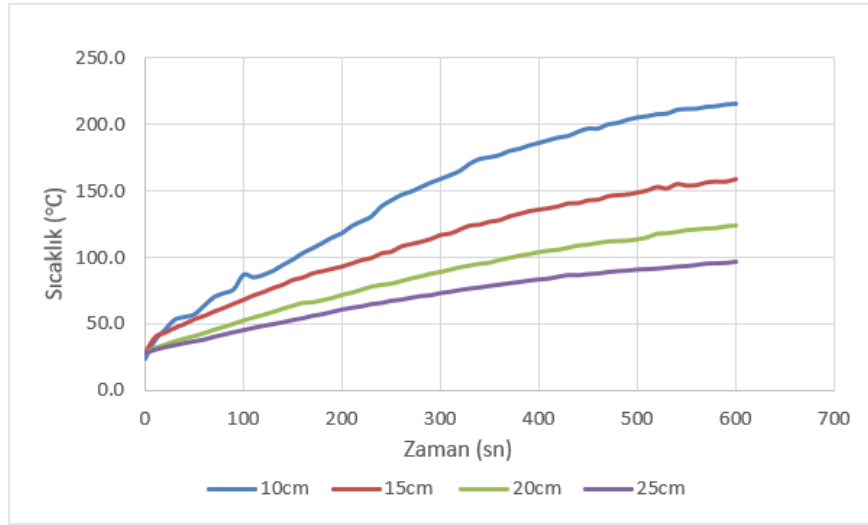
Şekil 4.11. 9. Bölgenin sıcaklık-zaman grafiği.

Şekil 4.3-4.11 arasında gösterilen grafiklerden bölgeler arası maksimum sıcaklık farkları grafiğinin çıkarılması, bize tüm bölgeler ve tüm ısıtıcı lamba-numune arası mesafeler göz önüne alındığında hangi mesafede bölgeler arasındaki sıcaklık farkının maksimum olduğu bilgisini verecektir. Şekil 4.12, Şekil 4.3-4.11 arasında gösterilen grafiklerden derlenmesinden oluşturulmuş olup, bölgeler arası maksimum sıcaklık farklarını göstermektedir. Bu şekilde de verilerin daha anlaşılır olabilmesi için 8 dönem harmonik ortalamaları metodu ile grafik elde edilmiştir. Bu grafikten görüleceği üzere, 200 mm ve 250 mm mesafelerdeki maksimum bölgeler arası sıcaklık farkı sırasıyla 20 °C ve 12 °C'dir. Burada hangi mesafenin optimum olduğu noktasında bir tartışma yürütülebilir. SHİ değerlerine göre 200 mm mesafenin bağlı olarak 250 mm mesafeye göre daha homojen bir sıcaklık dağılımı gösterdiği görülmüştü. Şekil 4.12'deki grafikte ise tersi bir durum görülmektedir. 250 mm mesafe, tüm mesafeler içerisinde en düşük bölgeler arası sıcaklık farkına sahip olan mesafe olarak görülmektedir. Bu noktada 200 mm mesafe ile 250 mm mesafe arasında bir seçim yapabilmek için bir başka veriye daha ihtiyaç duyulmaktadır.



Şekil 4.12. Isıtıcı lamba-Numune arası mesafeye göre bölgeler arası maksimum sıcaklık farkları.

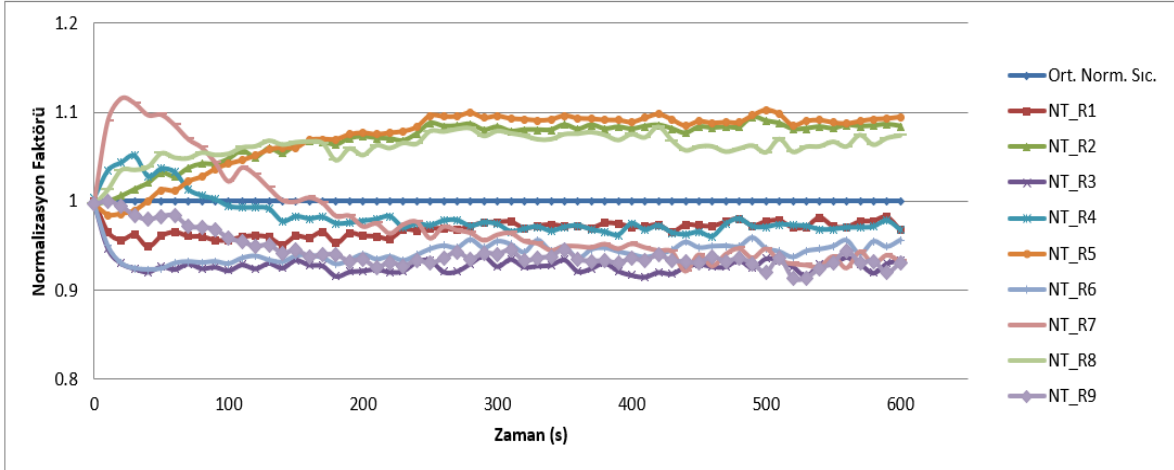
Şekil 4.13'te, tüm mesafeler için sıcaklık değişimleri görünmektedir. Grafiğe göre, test sırasında ulaşılan maksimum sıcaklıklar 100 mm, 150 mm, 200 mm ve 250 mm mesafeler için sırasıyla 219 °C, 156 °C, 129 °C ve 99 °C mertebelerindedir. 200 mm ve 250 mm mesafeler için yapılan önceki karşılaştırmaya ek olarak aşağıdaki grafik de göz önünde bulundurulduğunda, 250 mm ısıtıcı lamba-numune arası mesafenin numuneyi istenilen sıcaklıklara getiremeyeceği görülmektedir. Tez çalışmasında kullanılan prepreg malzemenin üretici tarafından verilen kür çevriminde 120 °C sıcaklıklarda işlem gördüğü ve optimum kür çevrimi testlerinde çıkılacak olan sıcaklıkların 150 °C mertebelerine kadar ulaşacağı göz önüne alındığında 250 mm mesafenin yeterli enerjiyi sağlayamayacağı görülmektedir. Bu durum, ısıtıcı lamba-numune arasında olması gereken optimum mesafe belirlenirken, sadece homojen sıcaklık dağılımının değil, bir fiziki kısıt olan ısıtma kapasitesinin de göz önüne alınması gerekliliği ortaya çıkmıştır. Kızılötesi lambadan numuneye aktarılan enerji yoğunluğunun, aradaki mesafenin karesi ile ters orantılı olduğu göz önünde bulundurulursa hem enerji verimliliği açısından hem de istenilen sıcaklığa çıkılabilmesi noktasındaki fiziksel kısıtlar açısından sistemi değerlendirmek gerekmektedir. Tüm bu bilgiler ve kısıtlar ışığında hem enerji verimliliği hem yüzey boyunca homojenlik hem de numuneyi ısıtmadaki fiziksel kısıtlamalar açısından değerlendirildiğinde ısıtıcı lamba-numune arası mesafe için seçilebilecek en uygun değer 200 mm olduğu sonucuna varılmıştır.



Şekil 4.13. Numune yüzeyi ortalama sıcaklıklarının tüm mesafeler için deneyler boyunca değişim grafiği.

4.1.2. Temsili Bölge Tayini Testleri

Optimum kür çevrimi testleri yapılırken, daha önce de belirtildiği gibi PLC sistem ve adım kontrol cihazı tarafından yönetilecek olan kürleme işlemine sıcaklık verisi, numune üzerine yerleştirilecek olan termokupl ile alınacaktır. Bu durumda termokuplın numunenin hangi bölgesine yerleştirileceğinin tayin edilmesi gerekmektedir. Tayin edilecek olan bölge, tüm numunenin yüzeyini en iyi temsil edebilecek bölge olmalıdır. Bu temsili bölgeyi bulabilmek için materyal metod bölümünde belirtildiği gibi, öncelikle Denklem 3.2 kullanılarak tüm bölgelere ait ortalama sıcaklıklar, tüm yüzeyin ortalama sıcaklığına göre normalize edilmiştir. Şekil 4.14'te görüldüğü gibi 2, 5 ve 7. bölgeler tüm yüzeyin ortalama sıcaklığının üzerinde bir seyirde ısınırken, 1, 3, 4, 6, 7 ve 9. bölgeler tüm yüzeyin ortalama sıcaklığının altında bir ısınma seyri izlemiştir.



Şekil 4.14. Tüm yüzeyin ortalama sıcaklığına göre bölgelerin normalize edilmiş sıcaklık grafiği.

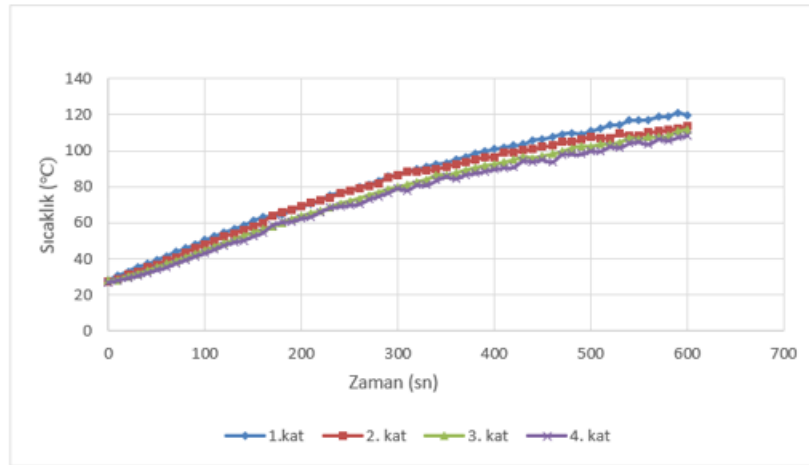
Çizelge 4.1, tüm bölgelerin normalize edilmiş sıcaklıklarını sayısal olarak vermektedir. Tablo ayrıca bu değerlerin birim değerden farklarını da yüzde olarak göstermektedir. Bu değerlere göre 1 ve 4 nolu bölgeler yüzde 3'ün altında bir normalize sıcaklık farkı göstermektedir. Dolayısıyla bu bölgelerin termokupl için en uygun yerleşim noktaları oldukları savunulabilir. Bu tezde, PLC sisteme ulaşım kolaylığı açısından termokupl yerleştirmek için 4 nolu bölge seçilmiştir.

Çizelge 4.1. Tüm bölgelerin normalize sıcaklık değerleri ve birim değerden yüzde farkları.

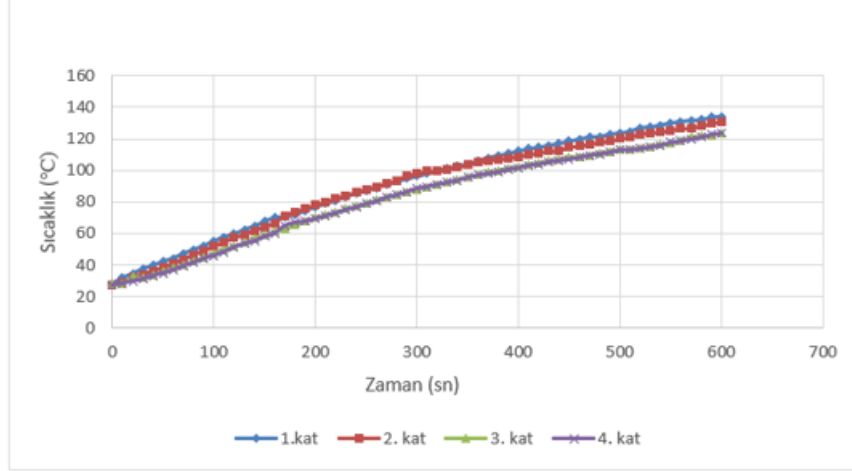
Region	Norm.Temp.	% Difference
1	0.972	2.79
2	1.082	- 8.19
3	0.927	7.31
4	0.971	2.87
5	1.090	- 9.05
6	0.946	5.36
7	0.949	5.13
8	1.068	- 6.83
9	0.933	6.74

4.1.3. Optimum Numune Kalınlığının Belirlenmesi

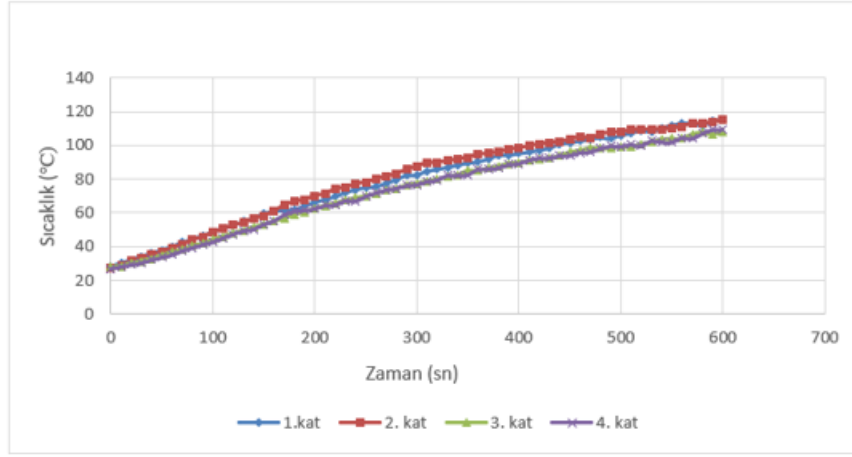
Prepreg numunenin tüm hacminin sıcaklık profilini belirleyebilmek sadece yüzey boyunca gösterdiği sıcaklık dağılımının değil, kalınlık boyunca gösterdiği sıcaklık dağılımının da belirlenmesi gerekir. Kızılötesi ile ısıtma radyasyon ile gerçekleştiği için belirli bir penetrasyon derinliği vardır. Bu derinlik teorik olarak birkaç mm civarlarında olsa da ısıtılan malzemenin emisivite değerine göre deneysel olarak belirlenmesi gerekir. Şekil 4.15-4.23, tüm bölgeler için tüm katların sıcaklık değerlerinin deney boyunca değişimini göstermektedir.



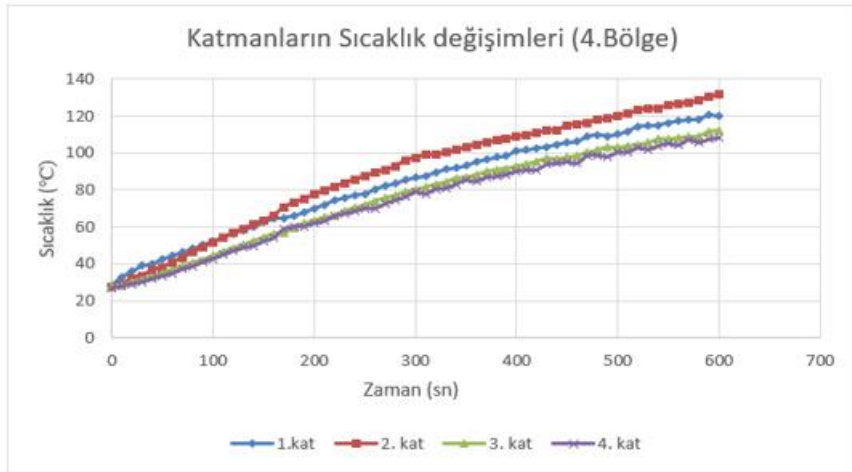
Şekil 4.15. Deney boyunca 1. bölge için katmanların sıcaklık değişimleri.



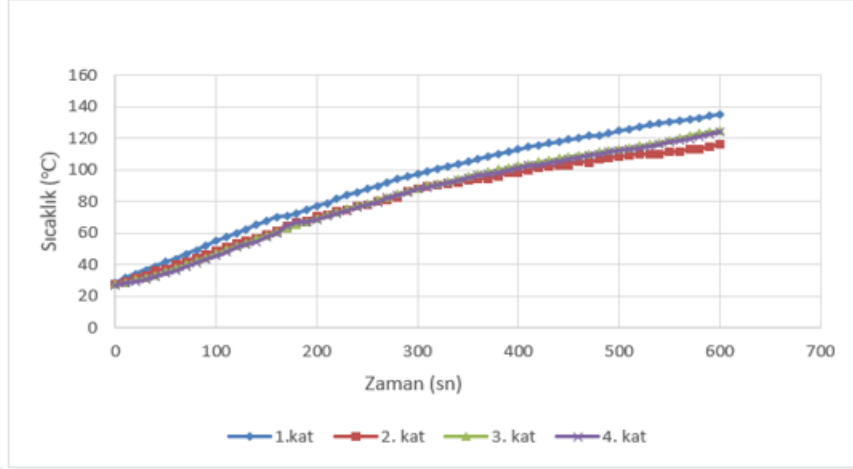
Şekil 4.16. Deney boyunca 2. bölge için katmanların sıcaklık değişimleri.



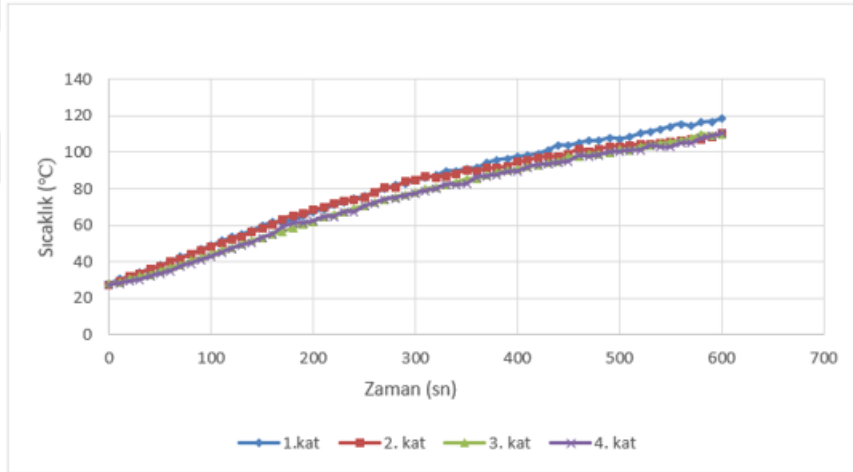
Şekil 4.17. Deney boyunca 3. bölge için katmanların sıcaklık değişimleri.



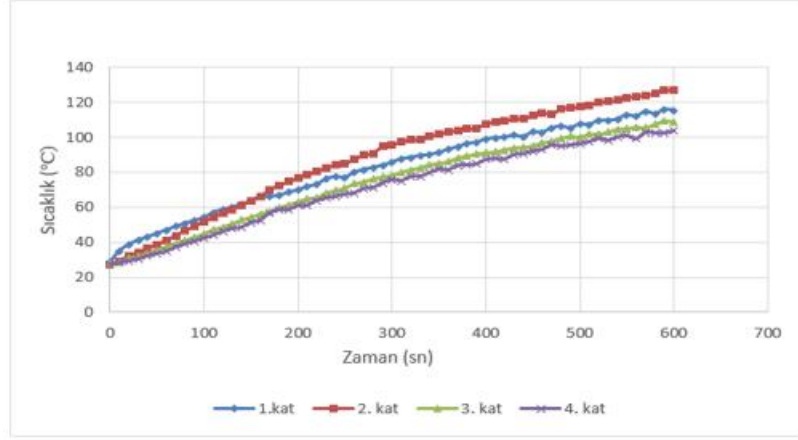
Şekil 4.18. Deney boyunca 4. bölge için katmanların sıcaklık değişimleri.



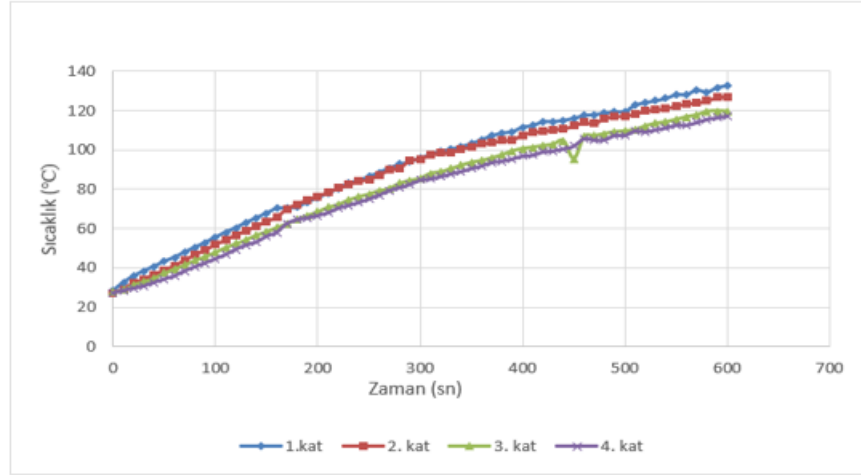
Şekil 4.19. Deney boyunca 5. bölge için katmanların sıcaklık değişimleri.



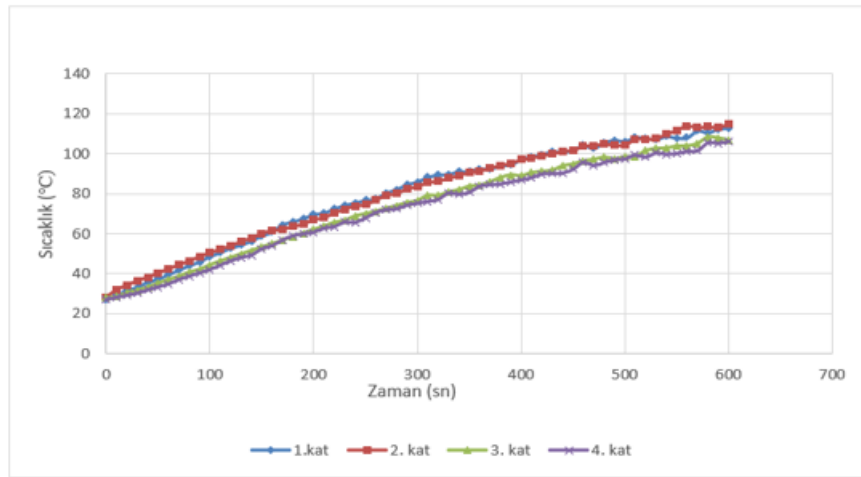
Şekil 4.20. Deney boyunca 6. bölge için katmanların sıcaklık değişimleri.



Şekil 4.21. Deney boyunca 7. bölge için katmanların sıcaklık değişimleri.

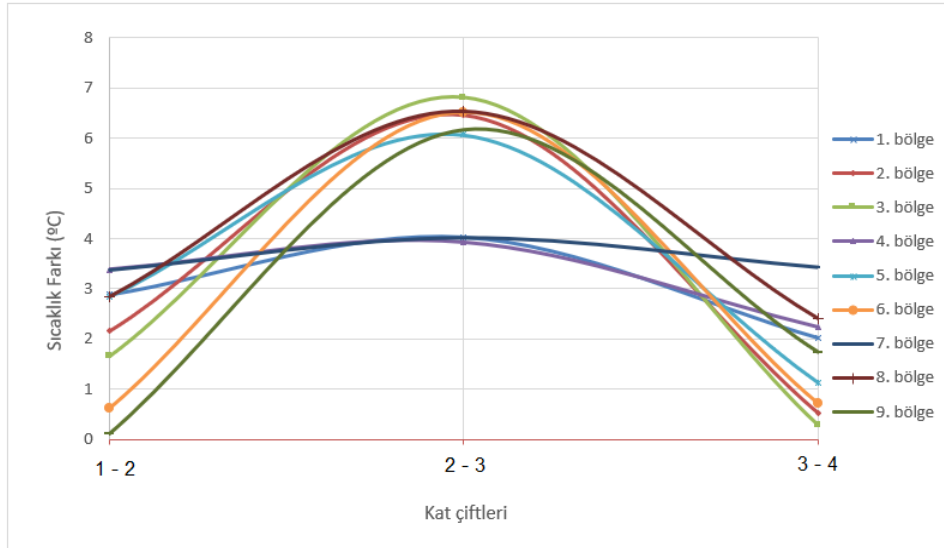


Şekil 4.22. Deney boyunca 8. bölge için katmanların sıcaklık değişimleri.



Şekil 4.23. Deney boyunca 9. bölge için katmanların sıcaklık değişimleri.

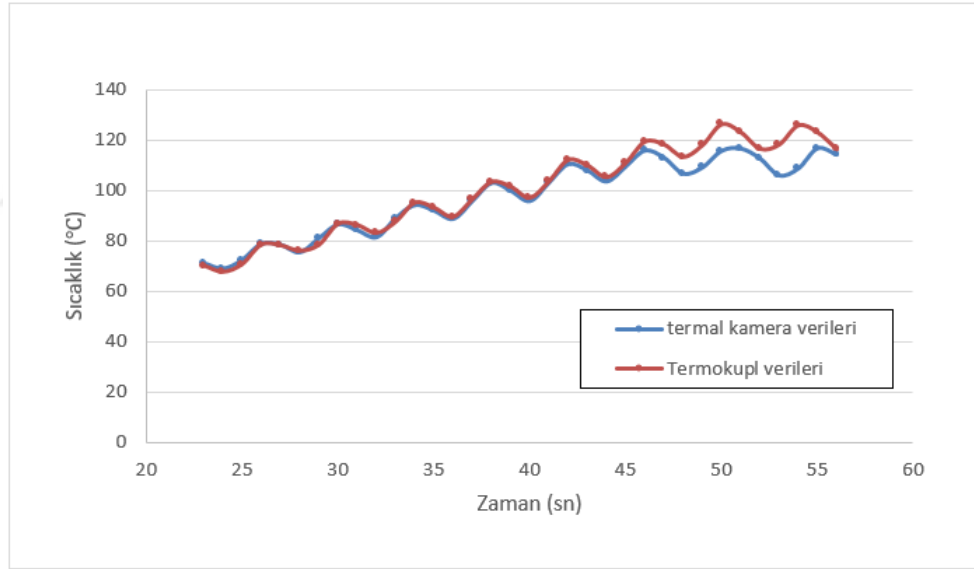
Katmanların sıcaklık değişimleri grafiklerinden genel olarak 1. kat ve 2. Kat arasında ve 3. Kat ile 4. Kat arasında sıcaklıkların birbirlerine daha yakın seyrettiği çıkarımı yapılabilir. Şekil 4.24, katmanlar arası sıcaklık değişimi grafiklerinin tamamını ele alarak sıcaklık değişimleri arasındaki farkı incelemek üzere verilmiştir. Bu grafik, 1-2, 2-3 ve 3-4 nolu katmanlar arasındaki sıcaklık farklarını göstermektedir. Bu grafiğin oluşturulmasının sebebi, ardışık katmanlar arası sıcaklık farklarını izleyerek sıcaklığın akış mekanizması hakkında bir çıkarım yapıp yapılamayacağını saptayabilmektir. Şekli incelediğimizde, bölgelerin tamamında 1. ve 2. katmanların arası sıcaklık farkları ile 3. ve 4. katmanlar arası sıcaklık farklarının oldukça düşük (çoğu durumda 2 °C altında), buna karşılık 2. ve 3. katmanlar arası sıcaklık farklarının ise daha yüksek olduğu (Çoğu durumda 6 °C'nin üzerinde) bulunduğu görülmüştür. Bu durumda, 2. katmandan itibaren ısı iletim mekanizmasının değiştiği savunulabilir. Bu sava göre, ısı iletimi, 2. katmana kadar kızılötesi ışınlar vasıtasıyla ışıma ile, 2. Katan itibaren ise alt katmanlardan iletim yolu ile ısınmıştır. Dolayısıyla 2. katman ile 3. katman arasında aynı yöntem ile ısınma olmadığından sıcaklık farkı diğer katmanlar arasındaki sıcaklık farkına göre daha yüksek çıkmıştır. Sonuç olarak, kızılötesi ile optimum kürlenme çevriminin bulunmaya çalışıldığı çalışmada, ışıma ile ısınan ilk iki kat asıl öneme sahip olan katlardır ve optimum kürlenme çevrimi için 2 katlı numunelerin kullanılması gerektiği belirlenmiştir.



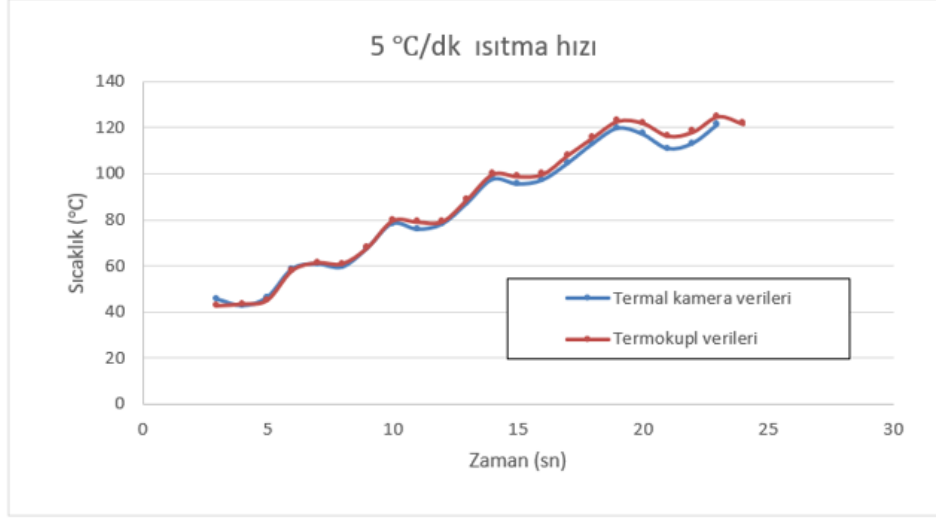
Şekil 4.24. Kat çiftleri arası sıcaklık farkları.

4.1.4. Termokupl ve Termal Kamera Verilerinin Karşılaştırılması

Çalışmanın amacı olan optimum kürlenme çevriminin bulunmasına yönelik deneylere geçmeden önce, termal kamera ile termokupl'dan alınan verilerin birbirleri ile tutarlı sonuçlar üretip üretmediklerinden emin olunması amacıyla hem termokupl hem de termal kamera ile veri alınan temsili bir kürlenme çevrimi tatbik edilmiştir. Homojen sıcaklık dağılımı deneyleri termal kamera görüntülerine, optimum kür çevrimi deneyleri ise termokupl verilerine dayandığı için bu iki ayrı sıcaklık ölçüm aletinin birbirleri ile tutarlı şekilde sonuçlar üretmesinin, yapılan deney sistematığının sürekliliği açısından önem teşkil etmektedir. Şekil 4.25 ve Şekil 4.26 sırasıyla 2 °C/dk ve 5 °C/dk ısıtma hızları ile ısıtılmış numunelerin termal kamera ile ve termokupl ile elde edilmiş sıcaklık değişimlerinin grafiklerini göstermektedir.



Şekil 4.25. 2 °C/dk ısıtma hızıyla ısıtılan numunenin hem termal kamera hem termokupl ile alınmış sıcaklık değişim grafiği.

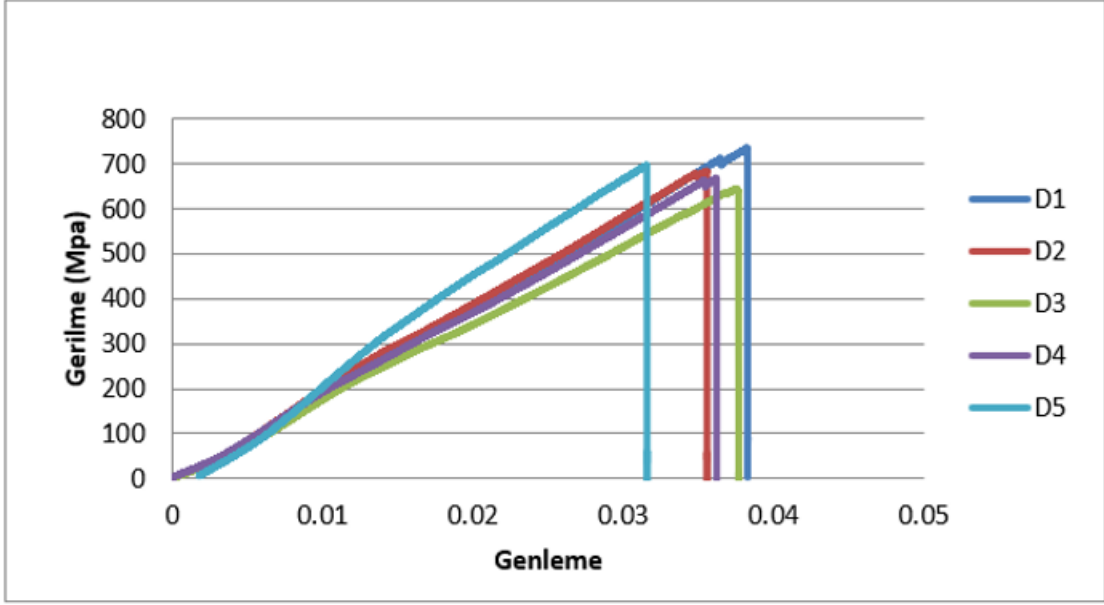


Şekil 4.26. 5 °C/dk ısıtma hızıyla ısıtılan numunenin hem termal kamera hem termokupl ile alınmış sıcaklık değişim grafiği.

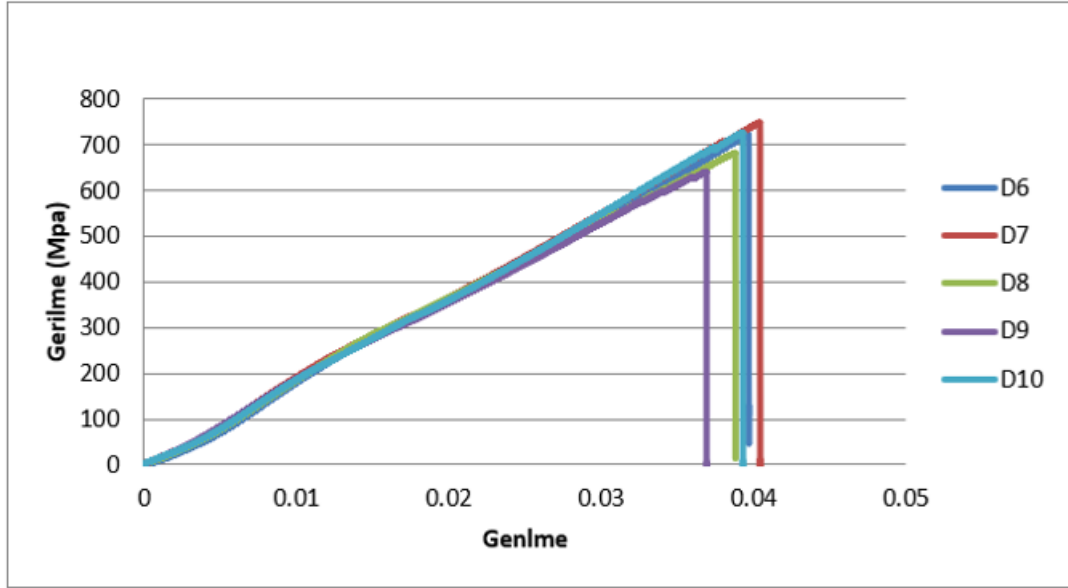
Yukarıdaki grafiklere göre hem 2 °C/dk ile ısıtılan numune hem de 5 °C/dk ile ısıtılan numune 110-120 °C aralığına kadar oldukça benzer sıcaklık verileri sağlarken, 120 °C sabit sıcaklık evresine girdiklerinde ortalama 8 °C lik bir fark oluşmaya başlamıştır. Her ne kadar 110-120 °C sıcaklıklar arasında belirli miktar fark görünse de ısınma dalgalanması aynı trendde olduğundan ve bahsedilen sıcaklıklara kadar iki farklı ölçüm yönteminin verdiği sıcaklık değerleri arasında anlamlı bir fark görülmediğinden deneylerin sürekliliği ve tutarlılığı açısından bir problem olmadığı kanaatine varılmıştır.

4.2. OPTİMUM KÜRLENME ÇEVİRİMİ DENEYİ BULGULARI

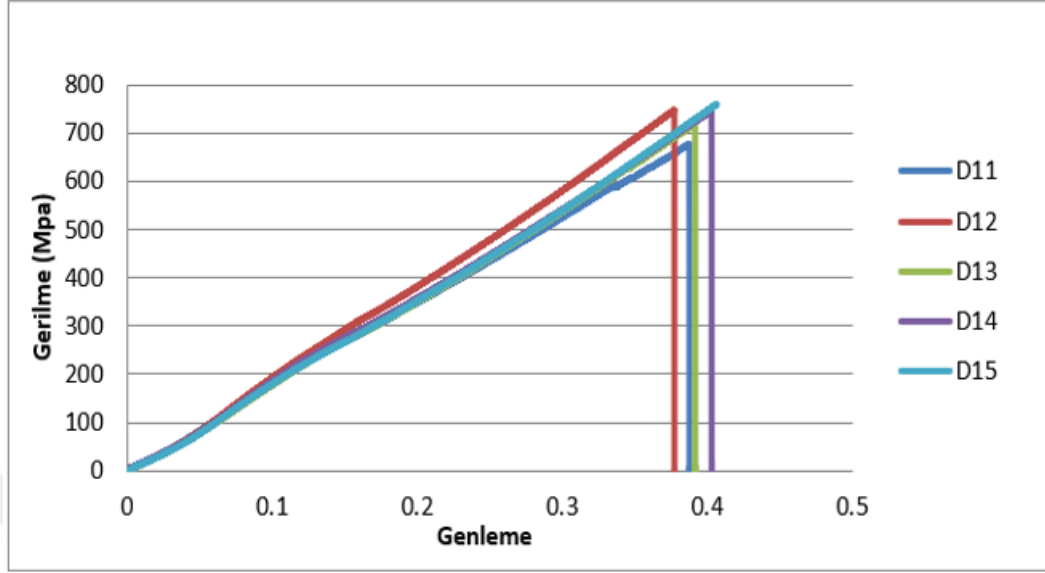
Optimum kürlenme çevrimi deneyleri, materyal metod bölümünde Taguchi deney tasarım metodu ile belirtilen deneyleri kapsamaktadır. Şekil 4.27-4.31 farklı ısıtma hızlarında yapılan deney sonuçlarını göstermektedir. Bu deneylerdeki maksimum sıcaklık ve plato süresi (maksimum sıcaklıkta kalma süresi) grafik üzerinde gösterilmiştir. Grafiklerde “Dn” şeklinde gösterilen, deney numarasıdır. Bu deney numaraları, deneylerin hangi parametrelerle gerçekleştirildiğini göstermektedir ve materyal metod bölümünde bu deneylerin parametre değerlerine ulaşılabilir.



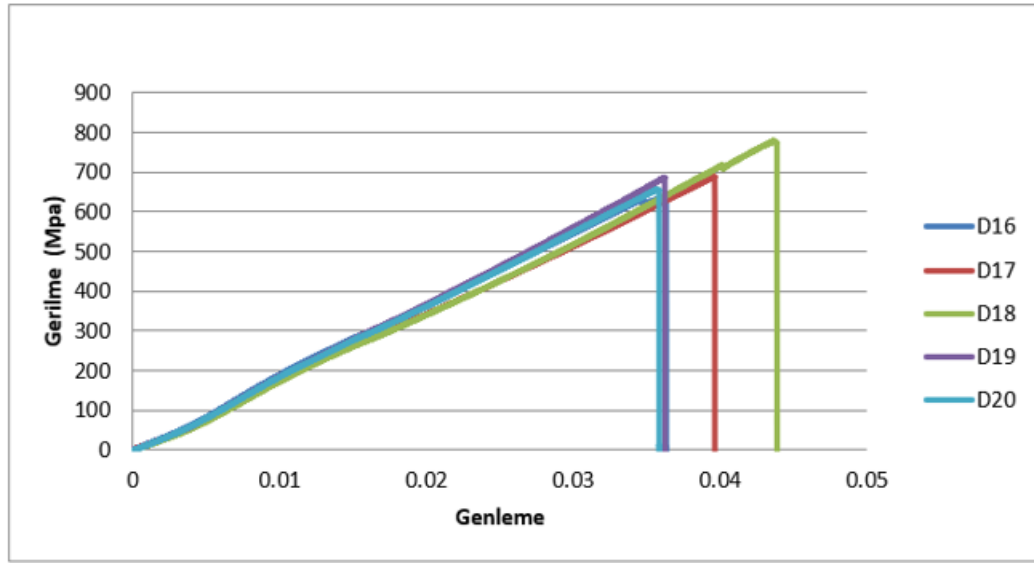
Şekil 4.27. 2 °C/dk ısıtma hızında yapılan deneylerin grafiği.



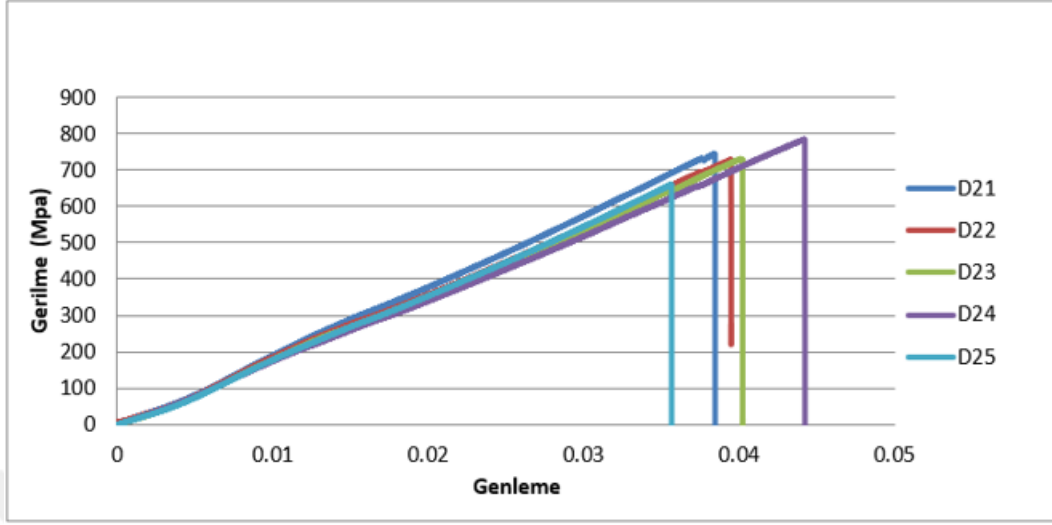
Şekil 4.28. 4 °C/dk ısıtma hızında yapılan deneylerin grafiği.



Şekil 4.29. 6 °C/dk ısıtma hızında yapılan deneylerin grafiği.



Şekil 4.30. 8 °C/dk ısıtma hızında yapılan deneylerin grafiği.



Şekil 4.31. 10 °C/dk ısıtma hızında yapılan deneylerin grafiği.

4.3. DENEY SONUÇLARININ ANALİZİ

Yapılan optimum kürlenme çevriminin sonuçları Çizelge 4.2’de verilmiştir. Deney sonuçları Taguchi sistematığı içerisinde ve istatistiksel olarak analiz edilmiştir.

Çizelge 4.2.Çekme deneyi sonuçları ve S/N oranı değerleri.

Deney no	Isıtma hızı(°C/dk)	Plato süresi (t)	Maksimum sıcaklık(°C)	Çekme mukavemeti (σ_c ,Mpa)	Elastik Modül E_{xx} ,Mpa)
1	2	100	30	741.165 \pm 5.5	18772.85 \pm 6.3
2	2	110	60	764.1443 \pm 3.8	18678.32 \pm 2.5
3	2	120	90	748.0241 \pm 9.2	17539.76 \pm 1.0
4	2	130	120	714.0492 \pm 2.3	18810.8 \pm 8.5
5	2	140	150	738.8706 \pm 10.5	18953.85 \pm 2.5
6	4	100	60	784.2476 \pm 8.3	17618.05 \pm 8.3
7	4	110	90	779.2722 \pm 3.9	19444.72 \pm 4.5
8	4	120	120	696.9134 \pm 2.0	18105.65 \pm 2.7
9	4	130	150	762.3132 \pm 4.7	17885.73 \pm 12.5
10	4	140	30	717.8661 \pm 11.9	17793.13 \pm 5.0
11	6	100	90	736.7639 \pm 8.7	17860.74 \pm 2.4
12	6	110	120	781.8056 \pm 4.5	19864.96 \pm 0.17
13	6	120	150	788.2316 \pm 9.7	18695.39 \pm 0.34
14	6	130	30	814.3019 \pm 9.0	19159.63 \pm 3.3
15	6	140	60	797.5907 \pm 4.9	19347.87 \pm 3.3
16	8	100	120	700.164 \pm 9.1	18292.15 \pm 2.6
17	8	110	150	693.8593 \pm 0.75	18256.85 \pm 4.7
18	8	120	30	817.2126 \pm 4.82	19188.07 \pm 7.3
19	8	130	60	782.2736 \pm 13.8	19886.12 \pm 4.5
20	8	140	90	656.8198 \pm 0.02	18317.48 \pm 9.1
21	10	100	150	787.3195 \pm 5.7	20190.76 \pm 4.0
22	10	110	30	820.2112 \pm 12.5	19236.58 \pm 4.0
23	10	120	60	808.8903 \pm 10.6	19049.11 \pm 4.5
24	10	130	90	797.5402 \pm 1.6	18617.09 \pm 4.6
25	10	140	120	737.7846 \pm 11.7	19150.91 \pm 3.2

S/N oranının hesaplanmasında “En büyük en iyi” prensibine dayanan denklem seçilmiştir. Bu denklem kullanılarak hesaplanan S/N oranları Çizelge 4.2’de gösterilmiştir. Yapılan 25 deneyden sonra çekme mukavemeti ve elastik modül için ortalama S/N oranları sırasıyla 57,587 dB ve 85,45 dB olarak hesaplanmıştır.

¹T_{m-S/N} (Çekme mukavemeti S/N oranı toplam ortalama) = 57.587 dB

²E_{m-S/N} (Elastik modül S/N oranı toplam ortalama değeri) = 85.453 dB

Çizelge 4.3'te kontrol faktörleri olarak ifade edilen deney parametreleri, seçilen ortogonal diziye göre farklı seviyeler ve olası etkileri göz önünde bulundurularak ayırt edilmiştir. Bu seviyeler deneysel çalışmada çekme mukavemeti ve elastik modül analizi için her bir seviye için hesaplanan ortalama sinyal gürültü oranlarını ifade etmektedir. Her faktör düzeyinin kalite karakteristiği üzerindeki etkileri S/N oranları kullanılarak analiz edilebilir. Bu etkiler, deneysel sonuçların veya S/N oranlarının toplam ortalama değerlerine göre tanımlanabilir ve değerlendirilebilir. Optimum değer hesaplamasında bir diğer gereklilik de optimum seviyeleri belirlemektir.

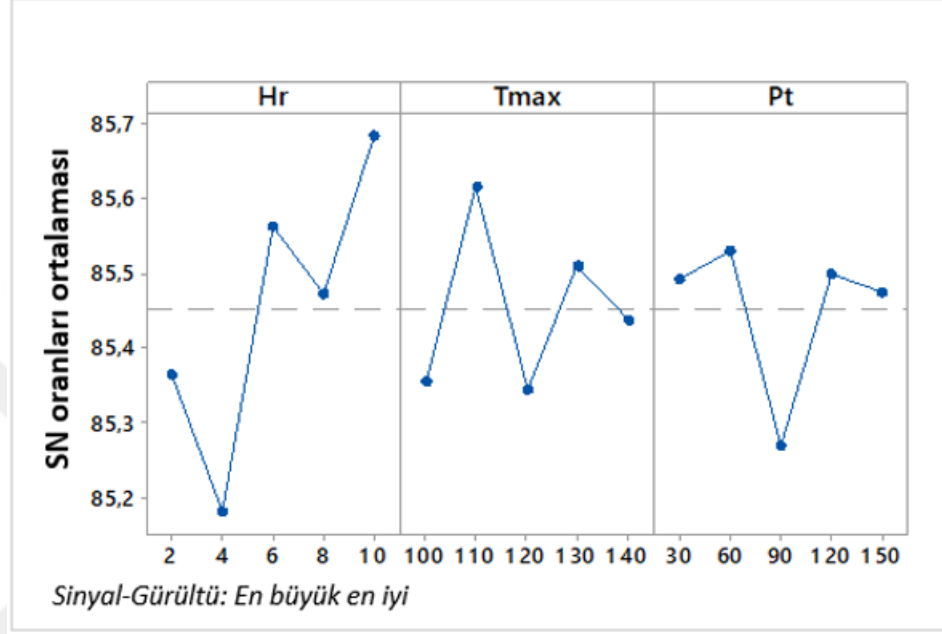
Çizelge 4.3. Kontrol faktörlerinin S/N oranları için cevap tablosu.

Seviyeler	Çekme Mukavemeti			Elastik Modül		
	A	B	C	A	B	C
Seviye 1	57.40	57.49	57.85	85.36	85.36	85.49
Seviye 2	57.47	57.69	57.92	85.18	85.62	85.53
Seviye 3	57.88	57.74	57.41	85.56	85.35	85.27
Seviye 4	57.24	57.77	57.21	85.47	85.51	85.50
Seviye 5	57.95	57.25	57.54	85.69	85.44	85.47
Delta	0.71	0.52	0.71	0.50	0.27	0.26

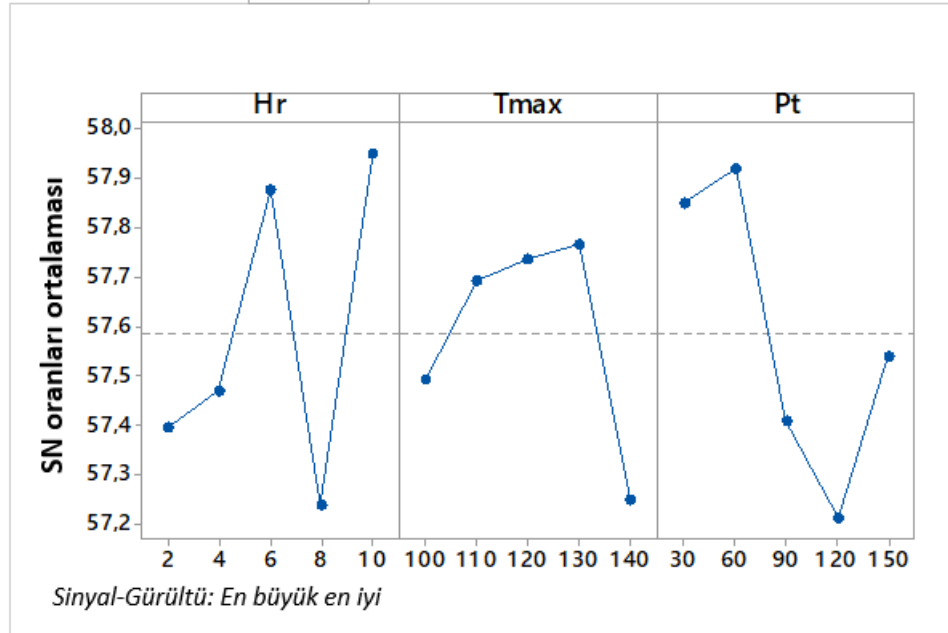
Optimum seviyeler, L_{25} ortogonal dizi tarafından üretilen kombinasyonların sonuçlarına göre kontrol faktörlerinin farklı seviyelerini değerlendirerek belirlenebilir.

Kontrol faktörlerine ve seviyelerine göre hesaplanan S/N oranları dağılımları Şekil 4.32-4.33'de gösterilmiştir. Optimum değer hesaplamasında bir diğer gereklilik de optimum seviyeleri belirlemektir. Optimum seviyeler, L_{25} ortogonal dizi tarafından üretilen kombinasyonların sonuçlarına göre kontrol faktörlerinin farklı seviyelerini değerlendirerek belirlenebilir. Çalışmada “En büyük en iyi” karakteristik seçildiğinden, kontrol faktörlerinin optimal kombinasyonunu belirlemek için tüm seviyeler için en büyük ortalama değerleri seçilmiştir. Buna göre çekme mukavemeti deney parametrelerinin optimum kombinasyonu $A_5B_4C_2$ ($A_5=10$ °C/dk ısıtma hızı, $B_4 = 130$ °C maksimum sıcaklık, $C_2 = 60$ min plato süresi) olarak belirlenmiştir. Aynı şekilde elastik modül için $A_5B_4C_2$

($A_5=10$ °C /min ısıtma hızı, $B_2= 110$ °C maksimum sıcaklık, $C_2 = 60$ min plato süresi)
optimum kombinasyonu elde edilmiştir.

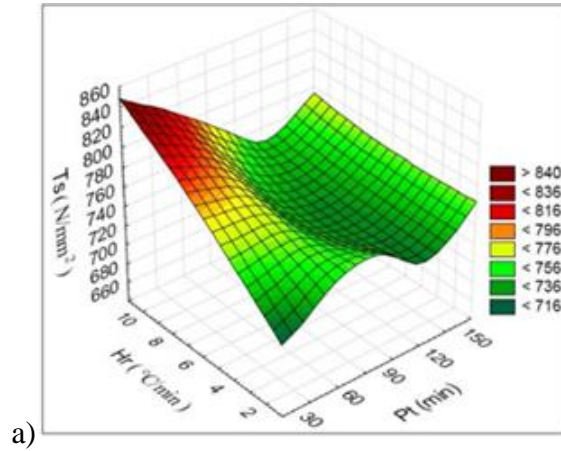


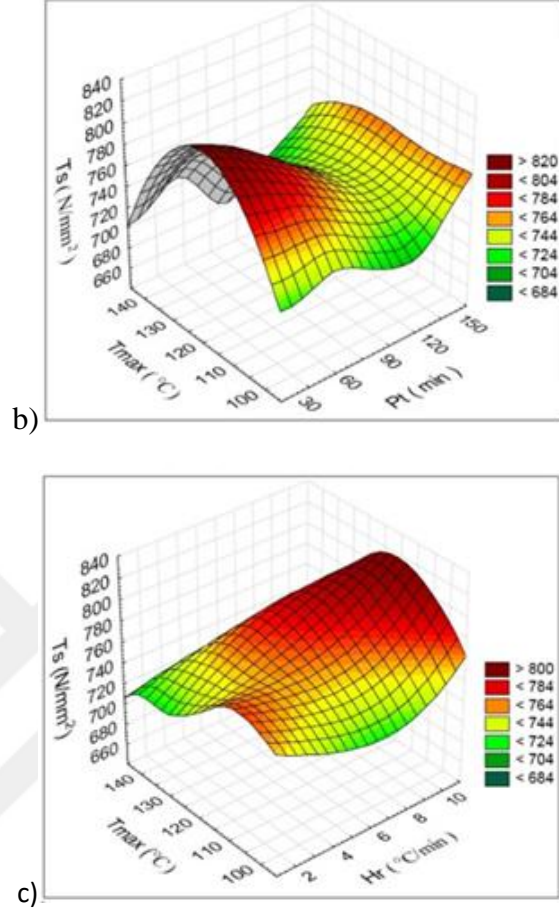
Şekil 4.32. Elastik Modül için S/N oranı etki grafiği.



Şekil 4.33. Çekme mukavemeti için S/N oranı etki grafiği.

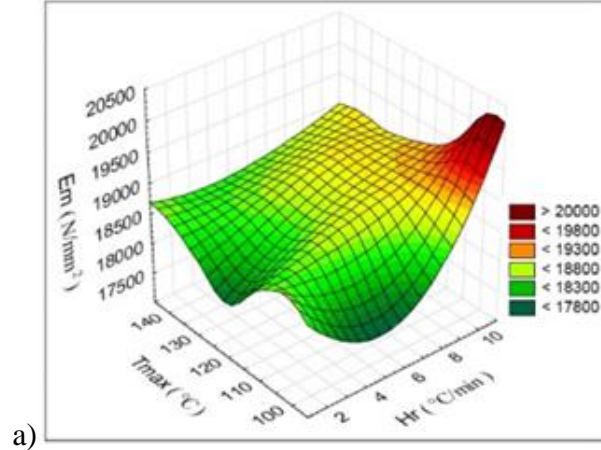
Şekil 4.34.a'da ısıtma hızı (Hr) ile plato süresinin (dk) çekme mukavemeti üzerine etkileri gösterilmiştir. Grafik incelendiğinde 60 dakikada çekme mukavemetinin arttığı görülmektedir. Aynı şekilde 10 °C/dk ısıtma hızında da çekme mukavemeti değerinin arttığı görülmektedir. Bu durum Taguchi metodu ile elde edilen optimum koşullarla paralellik göstermektedir. Ayrıca Şekil 4.34.a'da 120 dk plato süresinde çekme mukavemeti düşmüş 150 dk da tekrar yükselmiştir. Isıtma hızı incelendiğinde bu değer arttıkça çekme mukavemeti değerinin de arttığı görülmektedir. Şekil 4.34.b'de maksimum sıcaklık ve plato süresinin çekme mukavemetine olan etkileri gösterilmiştir. Bu grafikte ise, 60 dk plato süresinde ve 130 °C sıcaklıkta çekme mukavemeti değerinin arttığı görülmektedir. Şekil 4.34.b incelendiğinde 100 °C maksimum sıcaklık ve 120 dk plato süresi değerlerinde çekme mukavemeti değerinin düştüğü görülmektedir. Şekil 4.34.c'de ise, maksimum sıcaklık ve ısıtma hızı faktörlerinin çekme mukavemeti üzerine etkileri gösterilmiştir. Burada da görüldüğü gibi 10 °C/dk ısıtma hızı ve 130 °C maksimum sıcaklık değerlerinde çekme mukavemeti değerinin arttığı görülmektedir.



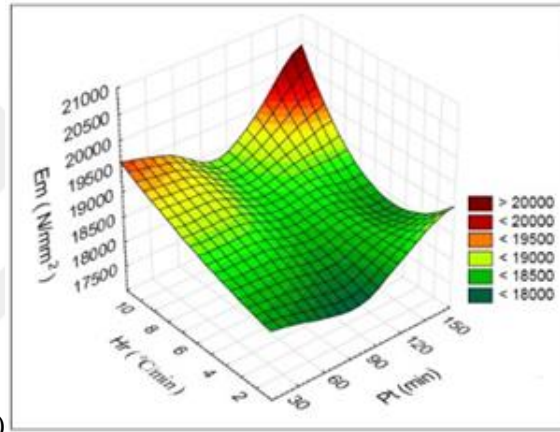


Şekil 4.34. Çekme mukavemeti için a) T_s - Hr - Pt b) T_s - T_{max} - Pt c) T_s - T_{max} - Hr deney parametrelerinin değişimi

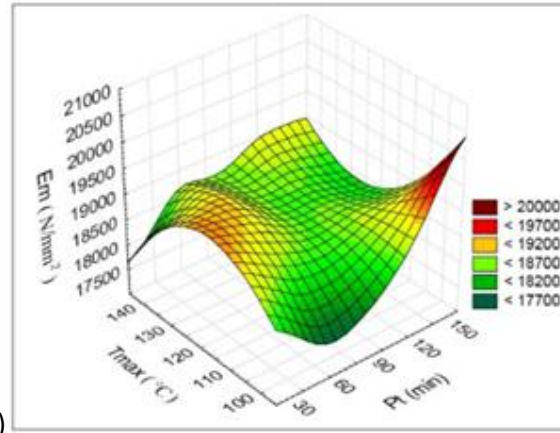
Şekil 4.35.a'da maksimum sıcaklık ve ısıtma hızının elastik modüle olan etkisi gösterilmiştir. Burada maksimum elastik modül değeri 10 $^{\circ}C$ /dk ısıtma hızı ve 110 $^{\circ}C$ maksimum sıcaklıkta olduğu görülmektedir. Şekil 4.35.a incelendiğinde 120 $^{\circ}C$ de ve 4 $^{\circ}C$ /dk ısıtma hızında elastik modülün düştüğü görülmüştür. Şekil 4.35.b'de ısıtma hızı ve plato süresinin elastik modül üzerine etkileri gösterilmiştir. Burada 150 min plato süresi ve 10 $^{\circ}C$ /dk ısıtma hızı değerlerinde elastik modül değerinde artış olduğu görülmüştür. Ayrıca bu durum 60 dk plato süresi ve 10 $^{\circ}C$ /dk ısıtma hızı değerlerinde de görülmektedir. Şekil 4.35.c'de maksimum sıcaklık ve plato süresinin elastik modül üzerine etkileri gösterilmiştir. Burada 150 dk plato süresi ve 110 $^{\circ}C$ sıcaklıkta elastik modülün arttığı görülmüştür. Grafik incelendiğinde sıcaklık arttığında elastik modülün de arttığı, ancak 140 $^{\circ}C$ de elastik modülün birden düştüğü görülmüştür.



a)



b)



c)

Şekil 4.35. Elastik modül için a)Em-Tmax-Hr b)Em-Hr-Pt c)Em-Tmax-Pt deney parametrelerinin değişimi

4.3.1. Anova kullanılarak Veri Analizi

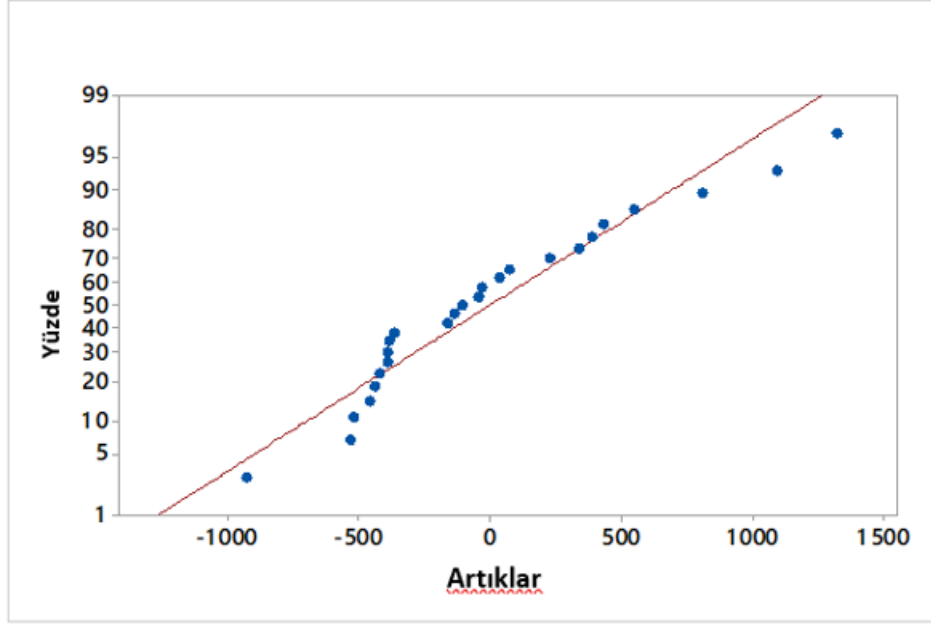
Isıtma hızı, maksimum sıcaklık ve plato süresinin çekme mukavemeti ve elastik modül üzerine etkileri ANOVA metodu ile analiz edilmiş, deney sonuçları %95’lik bir güven düzeyinde değerlendirilmiştir. Çekme mukavemeti ve elastik modül için ANOVA değerleri Çizelge 4.4’te gösterilmiştir.

Çizelge 4.4. Çekme mukavemeti ve elastik modül için ANOVA sonuçları.

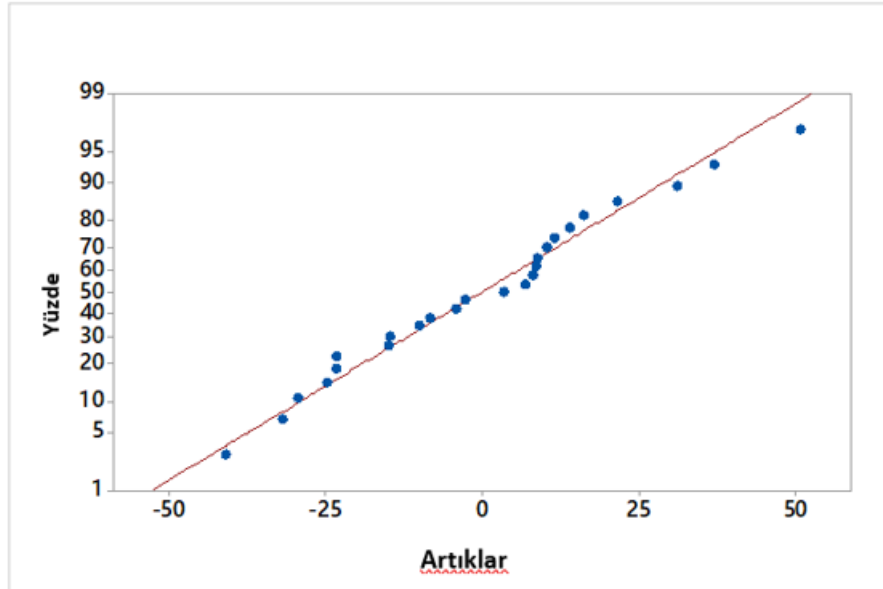
Faktörler	Serbestlik Derecesi (DF)	Kareler Toplamı (SS)	Ortalama kare (MS)	F	P	Katkı (%)
Çekme Mukavemeti (N/mm²)						
Isıtma hızı (°C/dk)	4	14324	3581	3.52	0.040	30.501
Tmax (°C)	4	7034	1759	1.73	0.035	14.978
Pt (min)	4	13409	3352	3.30	0.048	28.553
Hata (e)	12	12194	1016	-	-	25.968
Toplam	24	46961	-	-	-	-
Elastik Modül (N/mm²)						
Isıtma hızı (°C/dk)	4	3412437	853109	1.45	0.277	27.035
Tmax (°C)	4	1161725	290431	0.49	0.740	9.204
Pt (min)	4	1001792	250448	0.43	0.787	7.937
Hata (e)	12	7046416	587201	-	-	55.824
Toplam	24	12622370	-	-	-	-

Çizelge 4.4’te çekme mukavemeti için ANOVA değerleri değerlendirildiğinde yüzde dağılımları; %30,501 ile Isıtma Hızı (Hr), %28,553 ile Plato süresi (Pt) ve %14,978 ile maksimum sıcaklık (Tmax) olarak elde edilmiştir. Çizelge 4.4’te çekme mukavemetine etki eden en etkili parametre %30,501 ile ısıtma hızı olmuştur. Aynı şekilde elastik modül için yüzde dağılımları; ısıtma hızı (Hr) %27,35, maksimum sıcaklık (Tmax) %9,204 ve plato süresi (Pt) %7,937 olarak elde edilmiştir. Elastik modül için de en etkili parametre %27,35 ile ısıtma hızı (Hr) olmuştur.

Şekil 4.36 ve Şekil 4.37’de elastik modül ve çekme mukavemeti için normal olasılık grafiği verilmiştir. Doğrusal modelin normal olasılık grafiğinde artıkların düz çizgiye makul derecede yakın olduğu görülmektedir. Bu, hataların normal dağıldığını ve modelde belirtilen terimlerin önemli olduğu anlamına gelir [92].



Şekil 4.36. Elastik modül için normal olasılık grafiği.



Şekil 4.37. Elastik modül için normal olasılık grafiği.

4.3.2. Doğrulama Deneyleri

Doğrulama deneyleri ve kalite kayıplarının belirlenmesi Taguchi yönteminin son adımındır ve bu uygulamaların amacı kalite özelliklerini analiz etmektir. Doğrulama deneylerinin amacı, analiz aşamasında elde edilen sonuçların geçerliliğini doğrulamaktır.[93] Maksimum Çekme mukavemeti ve elastik modül için yapılan değerlendirmede kontrol faktörlerinin bireysel etkileri dikkate alınarak maksimum optimum kombinasyonlar elde edilmiştir. Bu durumda çekme mukavemeti için optimum kombinasyon olan A5B4C2 için çekme mukavemeti tahmin değeri (Tsp) Denklem 4.1 ve Denklem 4.2 kullanılarak hesaplanmaktadır. Aynı şekilde elastik modül için A5B2C2 kombinasyonu kullanılarak, elastik modül tahmin değeri (Emp) Denklem 4.3 ve Denklem 4.4 kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$T\eta_g = A_5 + B_4 + C_2 - 2\eta_{S/N} \quad (4.1)$$

$$T_{S_p} = 10^{T\eta_g/20} \quad (4.2)$$

$$E\eta_g = A_5 + B_2 + C_2 - 2\eta_{S/N} \quad (4.3)$$

$$E_{m_p} = 10^{E\eta_g/20} \quad (4.4)$$

Denklemlerde A_5 , B_4 , C_2 ve A_5 , B_2 , C_2 ilgili faktörlerin optimum seviyelerine ait S/N oranlarıdır. $\eta_{S/N}$, bütün faktörlerin S/N oranlarının ortalamasıdır. Bu değerler dikkate alındığında çekme mukavemeti tahmin değeri (Tsp): 838,108 N/mm² ve elastik modül tahmin değeri (Emp): 19801,587 N/mm² olarak hesaplanmıştır. Doğrulama deneylerinin kalite özelliğini doğrulamak için, güven aralığı (CI) kullanılır. Güven aralığı, gerçek ortalamanın belirtilen güven düzeyine düşmesi gereken bir maksimum ve minimum değerdir. Optimum değerlerin tahmin edilmesinde kullanılan CI Denklem 4.5 de gösterildiği şekilde hesaplanır [94], [95].

$$CI = \sqrt{F_{\alpha;1,V_e} \times V_{ep} \times \left(\frac{1}{n_{eff}} + \frac{1}{r} \right)} \quad (4.5)$$

Burada α önem düzeyi, $F_{\alpha;1}$, önem düzeyi α 'nın F oranı, $1 - \alpha$ güven aralığı, V_e hatanın serbestlik derecesi, V_{ep} hatanın varyansı, r doğrulama deney sayısı ve n_{eff} etkin ölçülen sonuçların sayısıdır.

$$n_{eff} = \frac{N}{1+V_t} \quad (4.6)$$

Burada N toplam deney sayısını (25), V_t , ortalamanın hesaplandığı işlem parametrelerine ait toplam serbestlik derecesidir. (12). Buna göre çekme mukavemeti ve elastik modül için $n_{eff} = 1,923$ olarak hesaplanmıştır. Bu çalışmada yürütülen deneysel çalışmaların performansını değerlendirmek için çekme mukavemeti ve elastik modül için elde edilen optimum koşullar ($A_5B_4C_2$ ve $A_5B_2C_2$) kullanılarak her iki parametre için üç doğrulama deneyi gerçekleştirilmiştir. Çekme mukavemeti ve elastik modül için %95 güven aralığında yapılan değerlendirmede $\alpha=0.05$ ve $V_e = 12$ dikkate alınarak tablodan $F_{\alpha:1}=4.7472$ olarak bulunmuştur. Çekme mukavemeti için $V_{ep} = 1016$ ve elastik modül için $V_{ep} = 587201$ olarak Çizelge 4.5'ten okunmuştur. Denklem 4.5 ve Denklem 4.6 kullanılarak çekme mukavemeti için $CI=64,124$ ve elastik modül için $CI= 1542$ olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 4.5. Çekme mukavemeti ve elastik modül için deneysel ve tahmin değerlerin karşılaştırılması.

	Çekme Mukavemeti (N/mm ²)			
	Seviye	Test	Tahmin	Hata %
Optimum kombinasyon	$A_5B_4C_2$	871,96	838,108	3.99
Rastgele kombinasyon	$A_2B_1C_2$	767,891	784,247	2.13
	Elastik Modül (N/mm ²)			
	Seviye	Test	Tahmin	Hata %
Optimum kombinasyon	$A_5B_2C_2$	19383.98	19801.587	2.16
Rastgele kombinasyon	$A_2B_1C_2$	17618.053	18121.744	2.86

Taguchi deney tasarımına göre doğrulama deneyleri sonucu çekme mukavemeti için bulunan optimum kürlenme çevrimi

$$\text{Isıtma hızı (Hr)} = 10 \text{ } ^\circ\text{C/dk}$$

-Maksimum Sıcaklık(Tmax) = 130 °C

-Plato süresi(t) = 60 dk

Maksimum elastik modül için bulunan optimum kür parametreleri;

-Isıtma hızı(Hr) = 8 °C/dk

-Maksimum Sıcaklık(Tmax) = 140 °C

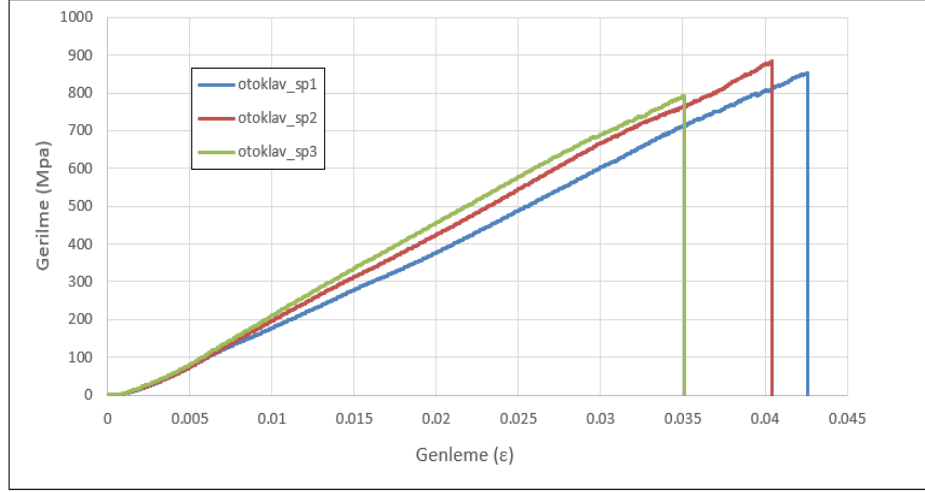
-Plato süresi(t) = 90 dk şeklinde bulunmuştur.

Çekme mukavemeti için optimum seviyeler dikkate alınarak (A₅B₄C₂) yürütülen doğrulama deneyleri sırasıyla 875,25, 849,76 ve 890,83 N/mm² olarak elde edilmiş ve bunların ortalamaları da 871,946 N/mm² olarak hesaplanmıştır. Aynı şekilde elastik modül için optimum seviyeler dikkate alınarak (A₅B₂C₂) yürütülen doğrulama deneyleri sırasıyla 19929,81, 19486,04 ve 18736,09 N/mm² olarak elde edilmiş ve bunların ortalamaları da 19383,98 N/mm² olarak hesaplanmıştır. Her iki parametre için hesaplanan CI değerleri dikkate alınarak çekme mukavemeti değerleri 838,108–64.154 <871,946 <838,108+64,154 = 773,954 <871,946 <902,262 aralığındadır. Elastik modül için, 19801,587–1542 <19383,98 <19801,587+1542= 18259,58 <19383,98 <21343,587 aralığındadır. Sonuçlar değerlendirildiğinde çekme mukavemeti ve elastik modül için yürütülen doğrulama deneylerinin sonucu belirlenen güven aralığı içerisinde gerçekleşmiştir. Bu durum optimizasyonun teknik olarak başarılı olduğunu göstermektedir. Ne var ki, doğrulama testlerinden çıkan ve Taguchi metodunun çekme dayanımı için önerdiği optimum kür çevriminin verdiği çekme dayanımı sonucuna bakıldığında, test tasarımı içerisinde yapılan tüm testlerin çekme dayanımı sonucundan yüksek olduğu, fakat elastik modül için bakıldığında bazı aynı durumun geçerli olmadığını görmekteyiz. Yani Taguchi doğrulama testi, elastik modül için optimum değer üretememiştir. Bu durumda çalışmada elastik modül için değil sadece çekme dayanımı için optimum kür çevriminden bahsedebiliriz. Elastik modül için bulunan çevrimin optimum olmamış olması, Taguchi deney tasarımının yanlış olduğu anlamına gelmez. Zira, Taguchi metodu sadece optimizasyon için değil, sadece deney tasarımı bulmak için de kullanılabilir [96]. Sonraki adım elde edilen tahmini değerlerle, deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçların karşılaştırılmasıdır. Güvenilir analiz için bu karşılaştırmadaki hata değerlerinin %20'den az olması gerekmektedir.

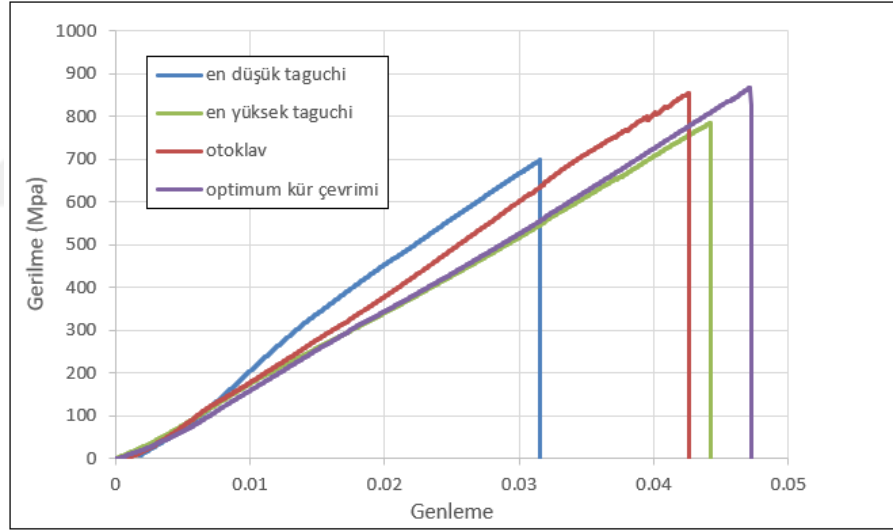
Çizelge 4.5'te görüldüğü gibi doğrulama deneyi sonuçlarıyla Taguchi tekniği ile elde edilen tahmin sonuçları arasındaki fark çok küçük çıkmıştır. Bu durum optimizasyonun başarılı bir şekilde gerçekleştiğini göstermektedir. Fakat yukarıda anlatıldığı sebepten ötürü elastik modül için değil, maksimum çekme mukavemeti açısından bir optimum kür çevriminden bahsedilebilir. Deneylerden elde edilen $820,2 \text{ N/mm}^2$ değeri, doğrulama deneyleriyle $871,9 \text{ N/mm}^2$ ye yükseltilmiştir. Fakat elastik modül için deneylerden elde edilen 20190 N/mm^2 değeri yükseltilemeyerek yine $19383,98 \text{ N/mm}^2$ değeri elde edilmiştir.

Taguchi yöntemi ile bulunan optimum kür çevrimine göre belirlenen çekme mukavemeti değeri, malzemeye ait üreticinin sağladığı teknik rapordaki çekme dayanımı değeri olan 733 MPa değerine göre %18,8 yüksek çıkmıştır. Kompozit malzemelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesi konusu literatürde kompozit malzeme alanında yoğun şekilde çalışılmış konulardan biridir[97]-[101]. Literatürde kürlenme şeklinin, malzemenin mekanik özelliklerine önemli etkileri olduğuna yönelik çalışmalar da bulunmaktadır. Pattanaik ve arkadaşları [102] katkılı bir epoksi reçineyi mikrodalga, sıcak fırın ve ortam sıcaklığında kürlenmeye tabi tutmuşlar ve mikrodalga ile kürlenmede en yüksek çekme ve darbe dayanımı değerlerini elde etmişlerdir. Benzer şekilde Benli ve arkadaşları [103] yaptıkları çalışmada dört farklı kürlenme rejimine tabi tuttukları kompozit harç malzemelerin, çekme ve basma deneylerine tabi tutmuşlar ve malzemelerin çekme ve basma dayanımlarının kürlenme rejimine göre önemli oranlarda değiştiğini bulgulamışlardır. Dominguez ve arkadaşları [104], kalıp dışı pultrüzyon işlemi ile üretilen ürünlerin kürlenme kinetiğinin, malzemenin mekanik davranışına önemli etkileri olduğunu not etmişlerdir.

Şekil 4.38 kızılötesi optimum kürlenme parametrelerini kullanarak otoklavda üretilen numunenin çekme deneyi sonuçlarını göstermektedir. Otoklavda yapılan üç deneyden çıkan çekme mukavemetlerinin ortalaması yaklaşık 840 MPa olarak hesaplanmıştır. Bu değer, kızılötesi ile kürlenmiş numunenin çekme mukavemeti değerinden yaklaşık %2,6 kadar daha yüksektir.



Şekil 4.38. Kızılötesi için bulunan optimum kür çevrimi parametreleri ile otoklavda kürlenen numunenin çekme testi grafiği.



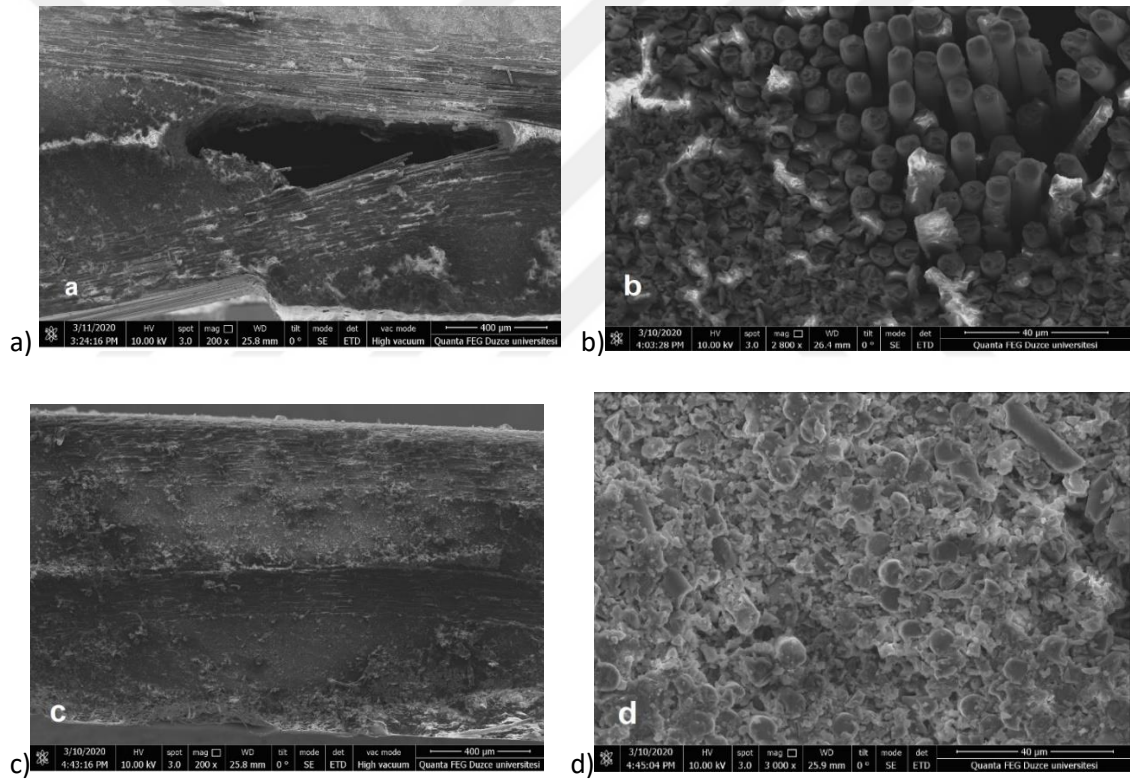
Şekil 4.39. Optimum kür çevrimi ile otoklavda ve kızıl ötesi fırında kürlenen numunelerin önceki en yüksek ve en düşük değerlerinin karşılaştırılması.

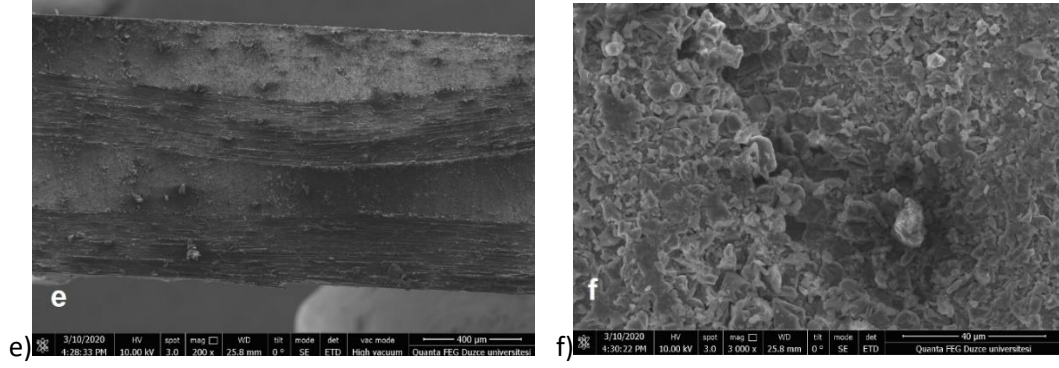
Şekil 4.39 optimizasyon işlemi öncesi Taguchi ortogonal dizisine göre uygulanan kür çevrimlerinden çekme mukavemeti en düşük ve en yüksek çıkanlar numuneler ile Taguchi doğrulama deneylerine göre belirlenen optimum kür çevrimi ile otoklavda ve kızılötesi fırında kürlenen numunelere ait çekme deneyi eğrilerini göstermektedir. Grafiğe göre kızılötesi için Taguchi yöntemiyle elde edilen optimum kürlenme çevrimine ait çekme dayanımı değerinin hem aynı çevrimle otoklav ile üretilen numunenin, hem üreticinin malzeme teknik raporunda verdiği çekme dayanımı verisinin hem de deney tasarımı ile

doğrulama deneyinden önce yapılan deneylerden elde edilen çekme dayanımı değerlerinden daha yüksek çıktığı görülmektedir.

4.4. SEM ANALİZİ SONUÇLARI

Vakum altına alınmadan kızılötesi prosese tabi tutulmuş, kızılötesi ile kürlenmiş ve kızılötesi kürlenme çevrimi ile otoklav içerisinde kürlenmiş numunelerden alınmış SEM görüntüleri Şekil 4.40'ta gösterilmiştir. Her numune ile ilgili 40 µm ve 400 µm boyutlarında olmak üzere ikişer görüntü alınmıştır.





Şekil 4.40. Kusurlu numuye ait a)400 μm ölçeğinde SEM görüntüsü b)40 μm ölçeğinde SEM görüntüsü, kızılötesi ile kürlenene numuneye ait c)400 μm ölçeğinde SEM görüntüsü d)400 μm ölçeğinde SEM görüntüsü,otoklavda üretilene numuneye ait e)400 μm ölçeğinde SEM görüntüsü f)40 μm ölçeğinde SEM görüntüsü.

SEM görüntüleri incelendiğinde, kürlenme esnasında vakum kullanılmayan numunede katmanlar arası birçok yerde delaminasyon benzeri boşluklu yapıların bulunduğu gözlenmiştir. Vakum altında kızılötesi kürlenene numunede bu şekilde bir boşluklu yapı gözlenmemektedir. Otoklavda optimum kızılötesi kürlenme parametreleriyle 7 bar dış basınç ve vakum basıncı altında kürlenene numuneye ait görüntülere bakıldığında, boşluklu yapının gözlemlenmemesine ek olarak katmanların daha belirgin halde olduğu görülmektedir. Bu durum, yüksek basınç altında katmanların daha konsolide yapıda olduğunu göstermektedir. Dış basıncın ortalama %20 civarında bir kalınlık düşüşüne sebep olduğu göz önüne alındığında malzeme içerisindeki konsolidasyon farkı anlaşılabilir. Fakat deneyler sonucunda, bu yüksek konsolidasyonun, çekme mukavemeti değerine olan etkisine yönelik bir veri elde edilmemiştir.

4.5. TEORİK ENERJİ İHTİYACI HESABI

Otoklav ve kızılötesi kürlenme metotlarının maliyet karşılaştırmalarını tam olarak yapabilmek çok güçtür. Çünkü kızılötesi ısıtıcı sürekli tam güçte çalışmamakta, verilen kürlenme çevrimine göre ve termokuplardan gelen sıcaklık verilerine göre sürekli olarak gücü ayarlamakta ve bazen tamamen kapatmaktadır. Ayrıca otoklav içerisine koyulacak olan numunenin boyutları ve sayısı da birim ürün maliyetlerini ciddi oranda etkilemektedir.

Fakat yine de çeşitli varsayımlar öne sürerek teorik bir karşılaştırma yapabilmek mümkündür.

Örneğin 2 m³ hacminde bir otoklavda ve kızılötesi bir fırında kürlenmesi istenen 1 kg ağırlığında bir numunenin 20°C'den 120 °C'ye çıkarılması için gereken enerji miktarlarını karşılaştıralım. Otoklavda bu ısıtma sıcak azot gazının ısıtılması ile gerçekleştirileceğinden 2m³ hacminde bir otoklav kazanının içerisindeki azotun 7 bar basınca getirilip sıcaklığının 100 °C artırılması için gereken enerji 1400 kJ'dür. ($C_{pN_2} = 1.04 \text{ kJ/kg.K}$, $d_{N_2} = 1.17 \text{ kg/m}^3$). Kızılötesi ısıtmada sadece ürün ısıtılacağı için ürünün ısı kapasitesini bilmek yeterlidir. Epoksi malzemenin ısı kapasitesi, $C_{p\text{epoksi}}$, 1 kJ/kg.K olarak alındığında kızılötesi ısıtma ile sıcaklığı 100°C artırılabilecek olan bir epoksi malzeme için gerekli ısı miktarı 100 kJ'dür. Bu durumda kızılötesi kürelemede ihtiyaç uyulacak olan enerjinin, otoklavdan 14 kat daha düşük olacağı ortaya çıkmaktadır. Fakat toplam yük miktarı, küreleme süresi ve iki sistemdeki farklı ısı kayıpları arasındaki bu farkın artmasına ya da azalmasına sebep olabilir. Bu çerçeveden bakıldığında, kızılötesi ile kürelemede birim ürün maliyetlerinin düşürüleceği iddia edilebilir.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Çalışmada kısa dalga boylu kızılötesi ısıtıcı için yüzey boyunca homojen sıcaklık dağılımı ve ulaşılabilen en yüksek sıcaklık göz önüne alındığında en uygun ısıtıcı-numune arası mesafenin 200 mm olduğu belirlenmiştir.

Kızılötesi ile karbon fiber katkılı kompozit malzeme kürlemede kalınlık boyunca radyasyon yoluyla ısıtılabilen maksimum kalınlığın 1,5 mm olduğu görülmüştür. Bu kalınlık, çalışmada kullanılan malzeme için toplam 2 katmana tekabül etmektedir. Daha kalın malzemelerin ilgili kalınlık ya da katman sayısından sonraki kısımlarının iletim yoluyla ısındığı sonucuna varılmıştır.

Taguchi deney tasarımına göre yapılan deneyler sonucunda maksimum çekme dayanımına göre optimum kürlenme çevrimi için kürlenme parametreleri;

-Isıtma hızı (Hr) = 10 °C/dk

-Maksimum Sıcaklık (Tmax) = 130 °C

-Plato süresi(t) = 60 dk

Maksimum elastik modül için bulunan optimum kür parametreleri;

-Isıtma hızı (Hr) = 8 °C/dk

-Maksimum Sıcaklık (Tmax) = 140 °C

-Plato süresi(t) = 90 dk şeklinde bulunmuştur.

Bu parametrelere göre yapılan doğrulama deneyleri sonucunda çekme mukavemeti değeri 871 MPa olarak bulunmuştur. Bu sonuç, malzemenin otoklav içi verilen teknik malzeme raporunda belirtilen 733 Mpa değerinden %18,8 daha yüksektir. Kür çevrimi toplam süresi ise otoklav için verilen 130 dk'lık kür çevriminden %35 kadar daha kısadır.

Elastik modül için yapılan doğrulama deneyinde bir gelişim kaydedilememiştir. Dolayısıyla çekme mukavemetini maksimum yapan kürlenme çevrimi optimum kürlenme çevrimi olarak kabul edilmiştir.

Çalışmalar sonucunda kürlenme çevriminin verimliliğine en çok etki eden parametrenin ısıtma hızı olduğu belirlenmiştir. Sonuç literatüre uyum içerisindedir.

Kızılötesi kürlenme için bulunan optimum kürlenme çevrimi ile malzeme otoklavda kürlenmiş ve çekme mukavemeti 840 MPa olarak belirlenmiştir. Bu değer, kızılötesi için bulunan değerden 31 MPa kadar düşük, fakat teknik malzeme raporundaki veriye göre yaklaşık 107 MPa daha yüksektir. Bu da ısıtma hızının en etkili parametre olduğu verisini desteklemektedir.

Kızılötesi kürlenme ile üretilen 2 katlı numunelerin kürlenme işlemi sonrası kalınlıkları ortalama 1,3 mm olarak ölçülmüştür. Otoklavda üretilen numuneler ise ortalama 1,1 mm kalınlığa sahiptirler. Buradan iki ayrı sonuca ulaşılabilir; Belirli bir kalınlıkta ürün üretilmesi istendiği zaman kızılötesi ile üretilecek ürün için %20 kadar daha az malzeme gerekecektir. Bu da gerekli malzeme maliyetini azaltacaktır. Bunun dışında, kızılötesi kürlenmenin bir dış basınç altında yapıldığında basıncın etkisi ile kalınlığı otoklav seviyesine düşeceğinden, malzemenin çekme dayanımı da aynı oranda artacaktır. Yani, otoklav ile kızılötesi kürlenme proseslerini değil de konvansiyonel ısıtma ile kızılötesi ısıtmayı karşılaştırırsak, sonuçların kızılötesi lehine daha da ayırt edici duruma gelmiş olacağını varsayabiliriz.

SEM görüntülerine göre, vakum basıncı, malzemede ortaya çıkabilecek katmanlar arası delaminasyon benzeri boşluklu yapıların önüne geçmiştir.

1 kg ağırlığında bir CFRP malzemenin kızılötesi fırın ve 2m³ hacminde bir otoklav fırınında kürlenme işlemini karşılaştırırsak kızılötesi kürlenme için gerekli enerji teorik olarak otoklava oranla 14 kat daha düşük olarak hesaplanmıştır.

Bu çalışma, kızılötesi ile kürlenmenin, otoklava alternatif bir üretim yöntemi olup olmayacağına odaklanmıştır. Bulgular, kızılötesi ile kürlenmenin otoklava alternatif bir üretim yöntemi olabileceğini göstermektedir. Fakat endüstriyel olarak kullanılacak bir kızılötesi kürlenme fırını için üretilmek istenen ürünün nihai fiziksel özelliklerinin net olarak bilinmesi gerekir. Ayrıca, kızılötesi ile kürlenme, otoklavdaki gibi geniş bir geometrik serbestlik vermemektedir. Dolayısıyla kızılötesi ile kürlenmek istenen ürünün düzlemsel bir geometrisi olması gerekmektedir. Çünkü malzeme üzerine düşen enerji yoğunluğu malzeme ile ısıtıcı lamba arasındaki mesafeye oldukça bağlıdır. Bu çalışmada

malzemenin her noktası, ısıtıcı ile aynı mesafede bulunmaktadır. Eğer formlu bir ürün üretmek istenirse, lambaların şekli değiştirilerek küçültülebilir ve belli algoritmalarla malzeme üzerine yaklaşık eşit şekilde dağıtılabılır. Ya da yine lambalar küçültülerek sayıları artırılıp bir algoritma vasıtasıyla malzeme şekline göre her lambanın gücü farklı şekilde ayarlanarak malzeme üzerine düşen enerji yoğunluğu eşitlenebilir.



6. KAYNAKLAR

- [1] N. Li, Y. Li, J. Jelonnek, G. Link, and J. Gao, “A new process control method for microwave curing of carbon fibre reinforced composites in aerospace applications,” *Composites Part B:Engineering*, c. 122, ss. 61–70, 2017.
- [2] A. J. Gourdenne, “Radiofrequency (27.12 MHz) processing of thermosetting DGEBA epoxy resins,” *High Performance Polymers*, c. 17, sayı 3, ss. 425–448, 2005.
- [3] T. Bayerl, M. Duhovic, P. Mitschang, and D. Bhattacharyya, “The heating of polymer composites by electromagnetic induction - A review,” *Composites Part A Applied Science and Manufacturing*, c. 57, sayı 10, ss. 27–40, 2014.
- [4] D. Abliz, Y. Duan, X. Zhao, and D. Li, “Low-energy electron beam cured tape placement for out-of-autoclave fabrication of advanced polymer composites,” *Composites Part A Applied Science and Manufacturing*, c. 65, ss. 73–82, 2014.
- [5] M. Bajpai, V. Shukla, and F. Habib, “Development of a heat resistant UV-curable epoxy coating,” *Progress in Organic Coatings*, c. 53, sayı 4, ss. 239–245, 2005.
- [6] G. Başer, “Production of fiber reinforced thermoplastic composites,” Doktora tezi, Polimer bilimleri ve mühendisliği departmanı, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2012.
- [7] “Polyester Reçineleri | BOYTEK A.Ş.” [Online]. Available: <https://www.boytek.com.tr/polyester-recineleri/>. [Accessed: 21-Jan-2020].
- [8] M. Biron, *Thermoplastics and Thermoplastics composites*. Amerika Bileşik Devletleri, New York, Elsevier Science, 2007, ss.10.
- [9] N. Ghamarian, *Effect of Fiber Orientation on the Mechanical Properties of Laminated Polymer Composites*. Amerika Bileşik Devletleri, New York, Elsevier Ltd., 2016, ss.1-20.
- [10] M. A. Vicente, G. Ruiz, D. C. González, J. Mínguez, and M. Tarifa, “Effects of fiber orientation and content on the static and fatigue behavior of SFRC by using CT-Scan technology,” *International Journal of Fatigue*, c. 128, sayı 6 , 2019.
- [11] A. U. Al-saadi, T. Aravinthan, and W. Lokuge, “Effects of fibre orientation and layup on the mechanical properties of the pultruded glass fibre reinforced polymer tubes,” *Engineering Structures*, c. 198, sayı 10, 2019.
- [12] A. V. Borgaonkar, M. B. Mandale, V. G. Salunkhe, and S. B. Potdar, “Experimental investigations of different fiber orientations on damping loss factor of fiberglass composite specimens,” *Materials Today: Proceedings*, Basımda.
- [13] S. Manohar, P. Samal, J. Dehury, and P. Paramita, “Materials Today : Proceedings Effect of fiber content and orientation on mechanical properties of epoxy composites reinforced with jute and Kevlar,” *Materials Today: Proceedings*, Basımda.
- [14] P.K Mallick, *Fibre-reinforced composites materials, manufacturing and design*, 3.

baskı, Birleşik Krallık, Londra ,CRC Press, 2007, ss.68-72.

- [15] T. Centea, L. K. Grunenfelder, and S. R. Nutt, “A review of out-of-autoclave prepregs - Material properties, process phenomena, and manufacturing considerations,” *Composites Part A Applied Science and Manufacturing*, c. 70, ss. 132–154, 2015.
- [16] P. P. Parlevliet, H. E. N. Bersee, and A. Beukers, “Residual stresses in thermoplastic composites-A study of the literature-Part I: Formation of residual stresses,” *Composites Part A Applied Science and Manufacturing*, c. 38, sayı 3, ss. 1847–1857, 2006.
- [17] J. H. Shin, D. Kim, T. Centea, and S. R. Nutt, “Thermoplastic prepreg with partially polymerized matrix: Material and process development for efficient part manufacturing,” *Composites Part A Applied Science and Manufacturing*, c. 119, ss. 154–164, 2019.
- [18] C. Hunt, J. Kratz, and I. K. Partridge, “Cure path dependency of mode I fracture toughness in thermoplastic particle interleaved toughened prepreg laminates,” *Composites Part A Applied Science and Manufacturing*, c. 87, ss. 109–114, 2016.
- [19] L. Hamill, T. Centea, and S. Nutt, “Surface porosity during vacuum bag-only prepreg processing: Causes and mitigation strategies,” *Composites Part A Applied Science and Manufacturing*, c. 75, ss. 1–10, 2015.
- [20] J. Kratz and P. Hubert, “Vacuum-bag-only co-bonding prepreg skins to aramid honeycomb core. Part II. In-situ core pressure response using embedded sensors,” *Composites Part A Applied Science and Manufacturing*, c. 72, ss. 219–227, 2015.
- [21] J. Kratz and P. Hubert, “Vacuum bag only co-bonding prepreg skins to aramid honeycomb core. Part I. Model and material properties for core pressure during processing,” *Composites Part A Applied Science and Manufacturing*, c. 72, ss. 228–238, 2015.
- [22] H. Heat, S. Affects, and E. H. S. Today, “OSHA Technical Manual,” 2011.
- [23] P. R. Krishna Mohan, M. Anil Kumar, S. G. Kumar, and P. M. Mohite, “Development of in-house unidirectional carbon/epoxy prepregs and its characterization for aerospace applications,” *Procedia Structural Integrity*, c. 14, sayı 2018, ss. 176–183, 2019.
- [24] Sanjay K. Mazumdar, *Composites Manufacturing; Materials, Product, and Process Engineering*. Amerika Birleşik Devletleri, CRC Press, 2002, ss.155-156.
- [25] K.-T. H. Suresh G. Advani, *Manufacturing techniques for polymer matrix composites (PMCs)*. Oxford, Woodhead Publishing Limited, p.139-142, 2012.
- [26] L. Nele, A. Caggiano, and R. Teti, “Autoclave Cycle Optimization for High Performance Composite Parts Manufacturing,” *Procedia CIRP*, c. 57, ss. 241–246, 2016.
- [27] L. A. Khan, A. Nesbitt, and R. J. Day, “Hygrothermal degradation of 977-2A carbon/epoxy composite laminates cured in autoclave and Quickstep,” *Composites Part A Applied Science and Manufacturing*, c. 41, sayı 8, ss. 942–953, 2010.

- [28] L. A. Khan, A. Kausar, and R. J. Day, "Aerospace composite cured by quickstep and autoclave processing techniques: Evaluation and comparison of reaction progress," *Aerospace Science and Technology*, c. 65, ss. 100–105, 2017.
- [29] J. M. Lee, B. M. Kim, and D. C. Ko, "Development of vacuum-assisted prepreg compression molding for production of automotive roof panels," *Composite Structures*, c. 213, ss. 144–152, 2019.
- [30] E. Bistekos, R. Emmerich, P. Gerard, A. Zoller, R. R. Gallardo, and A. Siadat, "Compression of reactive thermoplastic composites using Compression RTM RTM of reactive thermoplastic composites using microwaves microwaves and and cure cure monitoring monitoring A new methodology to analyze the functional and physical architecture of ex," *Procedia CIRP*, c. 85, ss. 249–254, 2019.
- [31] A. Keller, C. Dransfeld, and K. Masania, "Flow and heat transfer during compression resin transfer moulding of highly reactive epoxies," *Composites Part B: Engineering*, c. 153, ss. 167–175, 2018.
- [32] P. Cirp, A. Vita, P. Stief, J. Dantan, A. Etienne, and A. Siadat, "Comparative life cycle assessment of low-pressure RTM , compression Comparative life cycle assessment RTM RTM manufacturing processes to produce CFRP RTM and high-pressure RTM manufacturing processes to produce CFRP car functional hoods A new methodology ," *Procedia CIRP*, c. 80, ss. 352–357, 2018.
- [33] N. K. Naik, M. Sirisha, and A. Inani, "Progress in Aerospace Sciences Permeability characterization of polymer matrix composites by RTM / VARTM," *Progress in Aerospace Sciences*, c. 65, ss. 22–40, 2014.
- [34] C. O. Mgbemena *et al.*, "Accelerated microwave curing of fibre-reinforced thermoset polymer composites for structural applications: A review of scientific challenges," *Composites Part A Applied Science and Manufacturing*, c. 115, ss. 88–103, 2018.
- [35] T. Glauser, M. Johansson, and A. Hult, "Electron-beam curing of thick thermoset composite matrices," *Polymer*, c. 40, sayı 19, ss. 5297–5302, 1999.
- [36] N. Banik, "A review on the use of thermoplastic composites and their effects in induction welding method," *Materials Today: Proceedings*, c. 5, sayı 9, ss. 20239–20249, 2018.
- [37] D. Abliz, Y. Duan, L. Steuernagel, L. Xie, D. Li, and G. Ziegmann, "Curing methods for advanced polymer composites -A review," *Polymers and Polymer Composites*, c. 21, sayı 6, ss. 341–348, 2013.
- [38] G. N. Labeas, V. B. Watiti, and C. V. Katsiropoulos, "Thermomechanical simulation of infrared heating diaphragm forming process for thermoplastic parts," *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, c. 21, sayı 4, ss. 353–370, 2008.
- [39] S. Genty, P. Tingaut, and M. Aufray, "Fast polymerization at low temperature of an infrared radiation cured epoxy-amine adhesive," *Thermochimica Acta*, c. 666, ss. 27–35, 2018.
- [40] P. K. Kumar, N. V Raghavendra, and B. K. Sridhara, "Optimization of infrared

- radiation cure process parameters for glass fiber reinforced polymer composites,” *Material Design*, c. 32, sayı 3, ss. 1129–1137, 2011.
- [41] F. M. Schmidt, Y. Le Maout, and S. Monteix, “Modelling of infrared heating of thermoplastic sheet used in thermoforming process,” *Journal of Materials Processing Technology*, c. 143–144, sayı 1, ss. 225–231, 2003.
- [42] S. Nakouzi, J. Pancrace, F. M. Schmidt, Y. Le Maout, and F. Berthet, “Curing simulation of composites coupled with infrared heating,” *International Journal of Materials Forming*, c. 3, sayı 1, ss. 587–590, 2010.
- [43] C. Wilson, “HeatWorks,” sayı (2017,10 Mayıs), [online]erişim: http://www.ceramicx.com.tr/contentfiles/PDF/hw17_web.pdf.
- [44] Z. Pan, G.G. Atungulu, *Infrared Heating for Food and Agricultural Processing*, Amerika Birleşik Devletleri, Florida, CRC Press, 2011, ss. 24-26.
- [45] D. K. Krishnamurthy, H. K. Khurana, S. Jun, J. Irudayaraj, “Infrared Heating in Food Processing: An Overview,” *Comprehensive Review of Food Science and Food Safety*, c. 7, ss. 1–13, 2008.
- [46] I. Davidson, *Biscuit, cookie and cracker production, process, production and packaging equipment*. Amerika Birleşik Devletleri, Elsevier Academic Press, 2019, ss. 83-84.
- [47] S. Chen *et al.*, “Double diaphragm forming simulation for complex composite structures,” *Composites Part A Applied Science and Manufacturing*, c. 95, ss. 346–358, 2017.
- [48] F. Wilson and R. Harrington, “HeatWorks,” (2017, 21 Mayıs), [online] erişim: http://www.ceramicx.com.tr/contentfiles/PDF/heatworks_20_issu.pdf.
- [49] M. Erdmann, V. Trappe, H. Sturm, U. Braun, and E. Duemichen, “Cure conversion of structural epoxies by cure state analysis and in situ cure kinetics using nondestructive NIR spectroscopy,” *Thermochimica Acta*, c. 650, ss. 8–17, 2017.
- [50] R. Hardis, J. L. P. Jessop, F. E. Peters, and M. R. Kessler, “Cure kinetics characterization and monitoring of an epoxy resin using DSC, Raman spectroscopy, and DEA,” *Composites Part A Applied Science and Manufacturing*, c. 49, ss. 100–108, 2013.
- [51] Anonim,[2020,8 Mart], *Diferansiyel Taramalı Kalorimetri (DSC)*, Rotalab Bilimsel Cihazlar , [Online] Erişim: <http://www.rotalab.com/tr/urunler/termal-analiz-sistemleri/diferansiyel-taramali-kalorimetre-dsc.html>.
- [52] D. Ratna, *Handbook of Thermoset Resins*. İngiltere, Shopsire, Smithers, 2009, ss.45-47.
- [53] G. Yue, B. Zhang, F. Dai, and S. Du, “Three-dimensional Cure Simulation of Stiffened Thermosetting Composite Panels,” *Journal of Materials Science and Technology*, c. 26, sayı 5, ss. 467–471, 2010.
- [54] P. I. Karkanis and I. K. Partridge, “Cure modeling and monitoring of epoxy/amine resin systems. I. Cure kinetics modeling,” *Journal of Applied Polymer Science*, c. 77,

- sayı 7, ss. 1419–1431, 2000.
- [55] G. Struzziero and A. A. Skordos, “Multi-objective optimisation of the cure of thick components,” *Composites Part A Applied Science and Manufacturing*, c. 93, ss. 126–136, 2017.
- [56] T. A. Bogetti and J. Gillespie, John W., “Cure Simulation of Thick Thermosetting Composites. Report No. ADA224885,” ss. 72, 1990.
- [57] Z. S. Guo, S. Du, and B. Zhang, “Temperature field of thick thermoset composite laminates during cure process” *Composite Science and Technology*, c. 65, sayı 3, ss. 517–523, 2005.
- [58] D. C. Blest, B. R. Duffy, S. McKee, and A. K. Zulkifle, “Curing simulation of thermoset composites,” *Composites Part A Applied Science and Manufacturing*, c. 30, sayı 11, ss. 1289–1309, 1999.
- [59] O. G. Kravchenko, S. G. Kravchenko, and R. B. Pipes, “Cure history dependence of residual deformation in a thermosetting laminate,” *Composites Part A Applied Science and Manufacturing*, c. 99, ss. 186–197, 2017.
- [60] D. Roçu, C. N. Caçcaval, F. Mustafaça, and C. Ciobanu, “Cure kinetics of epoxy resins studied by non isothermal DSC data,” *Thermochimica Acta*, c. 383, sayı 1, ss. 119–127, 2002.
- [61] Y. Abou Msallem, F. Jacquemin, N. Boyard, A. Poitou, D. Delaunay, and S. Chatel, “Material characterization and residual stresses simulation during the manufacturing process of epoxy matrix composites,” *Composites Part A Applied Science and Manufacturing*, c. 41, sayı 1, ss. 108–115, 2010.
- [62] KordSa,[2020,18 Şubat], *Technical Data Sheet*, KordSa, [Online]. Available: <https://composite.kordsa.com/en/images/pdf/product/KCF3K-TW245.pdf>.
- [63] KordSa, [2020,17 Şubat], *Technical data Sheet*, KordSa, [Online]. Erişim: <https://composite.kordsa.com/en/images/pdf/product/OM11.pdf>.
- [64] Anonim, [2020, 21 Şubat] *Infrared Rezistans*, Ceramicx, [Online]. Erişim: <https://shop.ceramicx.com.tr/QHM-Kuartz-Halojen-Lamba,PR-1401.html>.
- [65] Anonim, [2020, 21 Şubat], *Kızılötesi Reflektör*, Ceramicx, [Online]. Erişim: <https://shop.ceramicx.com.tr/QTMR-Orta-Boy-Lamba-Reflektoru,PR-1426.html>.
- [66] Anonim, [2020,22 Şubat], *Termal Kameralar Nasıl çalışır?*, Fluke, [Online]. Erişim: <https://www.fluke.com/tr-tr/bilgi-edinin/en-iyi-uygulamalar/olcum-temel-ilkeleri/termografi/termal-kameralar-nasil-calisir>.
- [67] ASTM Committee E20 on Temperature Measurement, *Manual on The Use Of Thermocouples in Temperature Measurement*. Amerika Birleşik Devletleri, ASTM International, 1993, ss.23-24.
- [68] Y. O. Alpay, M. Kilincel, R. Ongun, and O. Erol, “Determination of The Heating Homogeneity of Infrared Cured Carbon Fiber Reinforced Plastics (CFRPs),”*Journal of Engineerig Research and Applied Science* c. 6, ss. 698–702, 2017.
- [69] M. Savaşkan, Mustafa Ürgen, “Deney tasarımı yöntemi ile matkap uçlarında

- performans optimizasyonu,” İstanbul Teknik Üniversitesi Dergisi, c.3, sayı 6, ss. 117–128, 2004.
- [70] S. Akıncıoğlu, H. Gökkaya, and İ. Uygur, “The effects of cryogenic-treated carbide tools on tool wear and surface roughness of turning of Hastelloy C22 based on Taguchi method,” *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, c. 82, sayı 1, ss. 303–314, 2016.
- [71] C. C. Tsao, “Prediction of thrust force of step drill in drilling composite material by Taguchi method and radial basis function network,” *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, c. 36, sayı 1, ss. 11–18, 2008.
- [72] T. sunny, J. Babu, and J. Philip, “Experimental Studies on Effect of Process Parameters on Delamination in Drilling GFRP Composites Using Taguchi Method,” *Procedia Materials Science*, c. 6, ss. 1131–1142, 2014.
- [73] N. Geier, J. P. Davim, and T. Szalay, “Advanced cutting tools and technologies for drilling carbon fibre reinforced polymer (CFRP) composites: A review,” *Composites Part A Applied Science and Manufacturing*, c. 125, p. 105552, 2019.
- [74] K. S. Prasad and G. Chaitanya, “Analysis of delamination in drilling of GFRP composites using Taguchi Technique,” *Materials Today: Proceedings*, c. 18, ss. 3252–3261, 2019.
- [75] E. Kilickap, “Optimization of cutting parameters on delamination based on Taguchi method during drilling of GFRP composite,” *Expert Systems with Applications*, c. 37, sayı 8, ss. 6116–6122, 2010.
- [76] S. Nikbakt, S. Kamarian, and M. Shakeri, “A review on optimization of composite structures Part I: Laminated composites,” *Composite Structures*, c. 195, sayı March, ss. 158–185, 2018.
- [77] R. Sreenivasulu, “Optimization of surface roughness and delamination damage of GFRP composite material in end milling using taguchi design method and artificial neural network,” *Procedia Engineering*, c. 64, ss. 785–794, 2013.
- [78] C. Camposeco-negrete, “Optimization of cutting parameters for minimizing energy consumption in turning of AISI 6061 T6 using Taguchi methodology and ANOVA,” *Journal of Cleaner Production*, c. 53, ss. 195–203, 2013.
- [79] K. Krishnaiah and P. Shahabudeen, *Applied Experimental Design and Taguchi Method*, Hindistan, New Delhi, Eastern Economy Press, 2012, ss.21–38.
- [80] I. Asiltürk and S. Neşeli, “Multi response optimisation of CNC turning parameters via Taguchi method-based response surface analysis,” *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, c. 45, sayı 4, ss. 785–794, 2012.
- [81] W.Y.Fowlkes M.Cleveling, “A Primer on the Taguchi Method”, Amerika Birleşik Devletleri, *New Jersey*, 1995. ss. 120-128.
- [82] D. K. Baek, T. J. Ko, and H. S. Kim, “Optimization of feedrate in a face milling operation using a surface roughness model,” *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, c. 41, sayı 3, ss. 451–462, 2001.

- [83] Anonim, [2020,11 Mart], *Taramalı Elektron mikroskobu (SEM) Nasıl Çalışır? Ne İşe Yarar?*, Türkiye Atom Enerjisi Kurumu, [Online]. Erişim: <https://www.taek.gov.tr/tr/sik-sorulan-sorular/148-malzeme-teknolojisi-sss/948-taramali-elektron-mikroskobu-sem-nasil-calisir.html>.
- [84] P. F. Mayuet, F. Giroto, A. Lamıkiz, S. R. Fernández-Vidal, J. Salguero, and M. Marcos, "SOM/SEM based Characterization of Internal Delaminations of CFRP Samples Machined by AWJM," *Procedia Engineering*, c. 132, ss. 693–700, 2015.
- [85] J. Hapke, F. Gehrig, N. Huber, K. Schulte, and E. T. Lilleodden, "Compressive failure of UD-CFRP containing void defects: In situ SEM microanalysis," *Composite Science and Technology*, c. 71, sayı 9, ss. 1242–1249, 2011.
- [86] D. Geng, Y. Liu, Z. Shao, M. Zhang, X. Jiang, and D. Zhang, "Delamination formation and suppression during rotary ultrasonic elliptical machining of CFRP," *Composites Part B:Engineering*, c. 183, ss. 107698, 2020.
- [87] A. Meram and A. Can, "Experimental investigation of screwed joints capabilities for the CFRP composite laminates," *Composites Part B:Engineering*, c. 176, ss 107142, 2019.
- [88] H. N. Li *et al.*, "Damage behaviors of unidirectional CFRP in orthogonal cutting: A comparison between single- and multiple-pass strategies," *Composites Part B:Engineering*, c. 185, ss. 107774, 2020.
- [89] Y. Xie, B. Yang, L. Lu, Z. Wan, and X. Liu, "Shear strength of bonded joints of carbon fiber reinforced plastic (CFRP) laminates enhanced by a two-step laser surface treatment," *Composite Structures*, c. 232, ss. 111559, 2020.
- [90] K. Zhang, H. Li, H. Cheng, B. Luo, and P. Liu, "Combined effects of seawater ageing and fatigue loading on the bearing performance and failure mechanism of CFRP/CFRP single-lap bolted joints," *Composite Structures*, c. 234, ss. 111–677, 2020.
- [91] M. A. G. Silva, H. Biscaia, and P. Ribeiro, "On factors affecting CFRP-steel bonded joints," *Construction and Building Materials*, c. 226, ss. 360–375, 2019.
- [92] F. Kara, "Optimization of surface roughness in finish milling of AISI P20+S plastic-mold steel," *Materials Technology*, c. 52, sayı 2, ss. 195–200, 2018.
- [93] P. Hill, T., & Lewicki," *Statistics: Methods and applications : a comprehensive reference for science, industry, and data mining.*", Amerika Birleşik Devletleri, Tulha Academic Press, 2006, ss. 48-60.
- [94] G. Samtaş and S. Korucu, "Kriyojenik İşlem Görmüş EN AW 5754 (AlMg3) Alüminyum Alaşımının Frezelenmesinde Yüzey Pürüzlülüğü İçin Kesme Parametrelerinin Optimizasyonu," *Journal of Polytechnic*, c. 22, sayı 3, ss. 665–673, 2018.
- [95] G. Samtaş and S. Korucu, "Temperlenmiş Alüminyum 5754 Alaşımının Frezelenmesinde Kesme Parametrelerinin Taguchi Metodu Kullanılarak Optimizasyonu," *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, c. 7, sayı 1, ss. 45–60, 2019.

- [96] P. T. Curtis and D. L. Whitehead, “The effect of fabrication-induced surface roughness on the compressive and flexural properties of carbon fibre- reinforced plastics,” *Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, c. 3, sayı 1, ss. 11–19, 2017.
- [97] M. Akhsin and A. Y. Chua, “Load-displacement experimental data from axial tensile loading of CFRP-SPCC hybrid laminates”, *Data in brief*, c. 29, ss. 105–306, 2020.
- [98] B. Ogun, L. Parnas, and D. Coker, “ScienceDirect Structural ScienceDirect Interlaminar tensile strength of different angle-ply CFRP composites Interlaminar tensile strength of different angle-ply CFRP composites,” *Procedia Structural Integrity*, c. 21, ss. 198–205, 2019.
- [99] M. Kumar and N. K. Naik, “Prediction of mechanical behavior of composites under high strain rate tensile loading,” *Mechanics Research Communications*, c. 90, ss. 1–7, 2018.
- [100] W. Gauthier, A. Mart, and J. M. D. Tasc, “Mechanical properties of high-strength carbon fibres . Validation of an end-effect model for describing experimental data”, *Carbon*, c. 42, sayı 7, ss. 1275–1278, 2004.
- [101] M. M. Shokrieh and M. J. Omid, “Tension behavior of unidirectional glass / epoxy composites under different strain rates,” *Composite Structures*, c. 88, sayı 4, ss. 595–601, 2009.
- [102] A. Pattanaik, M. Mukherjee, and S. B. Mishra, “Influence of curing condition on thermo-mechanical properties of fly ash reinforced epoxy composite,” *Composites Part B: Engineering*, c. 176, ss. 107301, 2019.
- [103] A. Benli, M. Karatas, and Y. Bakir, “An experimental study of different curing regimes on the mechanical properties and sorptivity of self-compacting mortars with fly ash and silica fume”, *Construction and Building Materials*, c. 144, ss. 552–562, 2017.
- [104] I. Saenz-dominguez, I. Tena, M. Sarrionandia, J. Torre, and J. Aurrekoetxea, “Effect of ultraviolet curing kinetics on the mechanical properties of out of die pultruded vinyl ester composites,” *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, c. 109, ss. 280–289, 2018.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Yakup Okan ALPAY

Doğum Tarihi ve Yeri : 01.08.1986

Yabancı Dili : İngilizce

E-posta : yakupalpay@duzce.edu.tr

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Doktora	Makine Müh.	Düzce Üniversitesi	2020
Y. Lisans	Makine Müh.	Boğaziçi Üniversitesi	2014
Lisans	Makine Müh.	İstanbul Üniversitesi	2010
Lise		Muğla Anadolu Lisesi	2005