

**T.C.**  
**KIRKLARELİ ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**  
**MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**PLASTİK ESASLI LEVHALARIN VAKUM VE ISI İLE ŞEKİL VERME  
PARAMETRELERİNİN ÜRÜNÜN KALINLIK DAĞILIMI ÜZERİNE  
ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Ertuğ CABBAR**

**TEMMUZ - 2021**

**T.C.**  
**KIRKLARELİ ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**  
**MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**PLASTİK ESASLI LEVHALARIN VAKUM VE ISI İLE ŞEKİL VERME  
PARAMETRELERİNİN ÜRÜNÜN KALINLIK DAĞILIMI ÜZERİNE  
ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Ertuğ CABBAR**

**Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Olcay EKŞİ**

**Temmuz – 2021**

## ETİK BEYAN

Kırkırelı Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez ve Proje Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında; tez içinde sunduğum bilgileri, verileri ve dokümanları, değişik sonuç verebilecek şekilde araştırma araç gereçleri kullanmadan, işlem veya kayıt sonuçlarını değiştirmeden akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi, bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu, tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi, bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Mak. Müh. Ertuğ CABBAR  
28/07/2021

## ÖZET

### PLASTİK ESASLI LEVHALARIN VAKUM VE ISI İLE ŞEKİL VERME PARAMETRELERİNİN ÜRÜNÜN KALINLIK DAĞILIMI ÜZERİNE ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

Ertuğ CABBAR

Yüksek Lisans Tezi

Kırklareli Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Olcay EKŞİ

Temmuz 2021, 51 sayfa

Plastik esaslı levhaların vakum ve ısı ile şekil verme parametrelerinin ürünün kalınlık dağılımı üzerine etkisinin araştırılması üzerine deneysel bir araştırma yapılmıştır. Yapılan araştırmada malzeme türü, malzeme kalınlığı, erkek kalıp çapı ve ön şekil verme sırasında dalma derinliğinin değiştirilmesinin ürünün kalınlık dağılımını nasıl etkilediği belirlenmiştir.

Farklı parametreler kullanılarak imal edilen numunelerin her birinden çeyrek dilim parça kesilmiştir. Kesilen parçaların her iki yüzeyinde daha önceden belirlenen 28 adet ölçüm noktasından kalınlık ölçümleri alınıp veriler karşılaştırılmıştır.

Yapılan araştırmanın sonucunda erkek kalıp ve dalma derinliği değişimlerin nihai ürün kalınlık dağılımını açıklamak için bir kurala bağlanamayacağını göstermiştir. Her bir erkek kalıp çapı ve dalma derinliği için ayrı ayrı çıkarımlar yapılması gerekmektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Vakum ve ısı ile şekil verme yöntemi, Termoplastik Levha, Polivinil Klorür (PVC), Polilaktik Asit (PLA).

## ABSTRACT

### INVESTIGATION OF THE EFFECT OF THERMOFORMING PARAMETERS FOR PLASTIC-BASED SHEETS ON THERMOFORMED PRODUCT'S FINAL THICKNESS DISTRIBUTION

Ertuğ CABBAR

MSc Thesis

Kirklareli University

Institute of Science

Supervisor: Asst. Prof. Olcay EKŞİ

July 2021, 51 pages

Experimental research was conducted on the investigation of the effect of thermoforming parameters for plastic-based sheets on thermoformed product's final thickness distribution. In this work, effect of material type, material thickness, male mold (plug) diameter, and varying plug depth on thickness distribution of the product has been investigated during thermoforming.

A quarter of each sample was cut and taken for measurements. Thickness was measured at 28 points which were predetermined paths. Measured experimental data was compared for each case.

As a result of the research, it has been shown that the changes in the diameter of the male mold and the length of the plug depth cannot be attributed to a rule to explain the final product thickness distribution. Separate inference should be made for each die diameter and plug depth.

**Anahtar Kelimeler:** Thermoforming, Thermoplastic Sheet, Polyvinyl Chloride (PVC), Polylactic Acid (PLA)

## TEŞEKKÜR

Hayatım boyunca beni destekleyen, karılıksız seven annem Özlem CABBAR'a, babam Faruk CABBAR'a ve canımdan çok sevdiğim eşim Zeynep CABBAR'a minnet ve şükranlarımı sunarım.

Tez dönemim süresince beni yönlendiren tez danışmanım Sayın Dr. Öğr. Üyesi Olcay EKŞİ'ye teşekkür ederim.



## İÇİNDEKİLER

<b>ÖZET .....</b>	<b>İV</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>V</b>
<b>TEŞEKKÜR.....</b>	<b>VI</b>
<b>İÇİNDEKİLER.....</b>	<b>Vii</b>
<b>ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....</b>	<b>İX</b>
<b>RESİMLERİN LİSTESİ.....</b>	<b>X</b>
<b>SİMGELER VE KISALTMALAR.....</b>	<b>Xİİ</b>
<b>1. GİRİŞ.....</b>	<b>1</b>
<b>2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI .....</b>	<b>3</b>
<b>3. MATERYAL VE DENEYSEL YÖNTEM.....</b>	<b>9</b>
3.1. Kullanılan Termoplastik Malzemeler.....	9
3.2. Vakum ve Isı ile Şekil Verme Cihazı .....	11
3.2.1. Seramik ısıtıcılar .....	12
3.2.2. Dalma derinliği masterları ve erkek kalıplar .....	12
3.2.3. Dişi kalıp ve plaka kitleme çenesi .....	13
3.3. Numune Hazırlığı .....	14
3.4. Deneyin Yapılışı.....	15
<b>4. BULGULAR VE TARTIŞMA .....</b>	<b>19</b>
4.1. 0,45 mm Kalınlıktaki PVC Levha Numunelerin Değerlendirilmesi .....	19
4.1.1. Dalma derinlik burç uzunluğu 25 mm .....	19
4.1.2. Dalma derinlik burç uzunluğu 30 mm .....	20
4.1.3. Dalma derinlik burç uzunluğu 35 mm .....	23
4.1.4. Dalma derinlik burç uzunluğu 40 mm .....	25
4.1.5. Dalma derinlik burç uzunluğu 45 mm .....	26
4.1.6. Erkek kalıp çapı 30 mm .....	29
4.1.7. Erkek kalıp çapı 35 mm .....	29
4.1.8. Erkek kalıp çapı 40 mm .....	31
4.1.9. Erkek kalıp çapı 45 mm .....	32
4.1.10. Erkek kalıp çapı 50 mm .....	34
4.2. 0,25 mm Kalınlıktaki PVC Levha Numunelerin Değerlendirilmesi .....	36

4.2.1. Dalma derinliği: 35 mm .....	36
4.2.2. Erkek kalıp çapı 40 mm .....	39
4.3. 0,90 mm Kalınlıktaki Bambu zlı Levha Numunelerin Değerlendirilmesi .....	42
4.3.1. Dalma derinlik burç uzunluğu 35 mm .....	42
4.3.2. Erkek kalıp çapı 40 mm .....	44
<b>5. SONUÇ VE ÖNERİLER .....</b>	<b>47</b>
<b>KAYNAKLAR.....</b>	<b>49</b>
<b>ÖZGEÇMİŐ .....</b>	<b>51</b>





## ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge 4.1. Dalma derinliği 25 mm için farklı erkek kalıp çap değerlerinde karşılaştırmalı kalınlık dağılımı.....	19
Çizelge 4.2. Dalma derinliği 30 mm için farklı erkek kalıp çap değerlerinde karşılaştırmalı kalınlık dağılımı.....	21
Çizelge 4.3. Dalma derinliği 35 mm için farklı erkek kalıp çap değerlerinde karşılaştırmalı kalınlık dağılımı.....	23
Çizelge 4.4. Dalma derinliği 40 mm için farklı erkek kalıp çap değerlerinde karşılaştırmalı kalınlık dağılımı.....	25
Çizelge 4.5. Dalma derinliği 45 mm için farklı erkek kalıp çap değerlerinde karşılaştırmalı kalınlık dağılımı.....	27
Çizelge 4.6. Erkek kalıp çapı 30 mm için farklı dalma derinliği değerlerinde karşılaştırmalı kalınlık dağılımı .....	29
Çizelge 4.7. Erkek kalıp çapı 35 mm için farklı dalma derinliği değerlerinde karşılaştırmalı kalınlık dağılımı.....	30
Çizelge 4.8. Erkek kalıp çapı 40 mm için farklı dalma derinliği değerlerinde karşılaştırmalı kalınlık dağılımı .....	32
Çizelge 4.9. Erkek kalıp çapı 45 mm için farklı dalma derinliği değerlerinde karşılaştırmalı kalınlık dağılımı.....	33
Çizelge 4.10. Erkek kalıp çapı 50 mm için farklı dalma derinliği değerlerinde karşılaştırmalı kalınlık dağılımı.....	35
Çizelge 4.11. Dalma derinliği 35 mm için farklı erkek kalıp çap değerlerinde karşılaştırmalı kalınlık dağılımı.....	36
Çizelge 4.12. Erkek kalıp çapı 40 mm için farklı dalma derinliği değerlerinde karşılaştırmalı kalınlık dağılımı.....	40
Çizelge 4.13. Dalma derinliği 35 mm için farklı erkek kalıp çap değerlerinde karşılaştırmalı kalınlık dağılımı.....	43
Çizelge 4.14. Erkek kalıp çapı 40 mm için farklı dalma derinliği değerlerinde karşılaştırmalı kalınlık dağılımı.....	45

## RESİMLERİN LİSTESİ

Resim 3.1. PVC (polivinilchlorür) ürün özelliği.....	9
Resim 3.2. Ağırlıkça % 40 bambu özlü filament ürün özelliği.....	10
Resim 3.3. Bambu levha.....	11
Resim 3.4. MY3B Z23 3D yazıcı.....	11
Resim 3.5. Vakum ve ısı ile şekil verme cihazı.....	12
Resim 3.6. Seramik ısıtıcılar.....	12
Resim 3.7. St 37-2 malzeme özellikleri.....	13
Resim 3.8. Dalma derinliği burçları ve erkek kalıplar.....	13
Resim 3.9. 5083 alüminyum malzeme özellikleri.....	14
Resim 3.10 Dişi kalıp ve plaka kitleme çenesi.....	14
Resim 3.11. Termoplastik levha konumlandırılması.....	15
Resim 3.12. 300°C'deki ısıtıcıların sıcaklık dağılımı.....	16
Resim 3.13. Ön şekil verme işlemi.....	16
Resim 3.14. Numune.....	17
Resim 3.15. Bambu özlü numuneler.....	17
Resim 3.16. Çeyrek dilim numune.....	17
Resim 4.1. 12 numaralı numune ısıl şekillendirme sıcaklık dağılımı.....	20
Resim 4.2. 12 numaralı numune dikey ve yatay sıcaklık dağılımı.....	20
Resim 4.3. 19 numaralı numune ısıl şekillendirme sıcaklık dağılımı.....	22
Resim 4.4. 19 numaralı numune dikey ve yatay sıcaklık dağılımı.....	22
Resim 4.5. 19 numaralı numune erkek kalıbın termal etkisi.....	22
Resim 4.6. 40 numaralı numune ısıl şekillendirme sıcaklık dağılımı.....	24
Resim 4.7. 40 numaralı numune dikey ve yatay sıcaklık dağılımı.....	24
Resim 4.8. 40 numaralı numune erkek kalıbın termal etkisi.....	25
Resim 4.9. 64 numaralı numune ısıl şekillendirme sıcaklık dağılımı.....	28
Resim 4.10 64 numaralı numune dikey ve yatay sıcaklık dağılımı.....	28
Resim 4.11. 88 numaralı numune ısıl şekillendirme sıcaklık dağılımı.....	37
Resim 4.12. 88 numaralı numune dikey ve yatay sıcaklık dağılımı.....	37
Resim 4.13. 88 numaralı numune erkek kalıbın termal etkisi.....	38
Resim 4.14. 94 numaralı numune ısıl şekillendirme sıcaklık dağılımı.....	38

Resim 4.15. 94 numaralı numune dikey ve yatay sıcaklık dağılımı.....	39
Resim 4.16. 94 numaralı numune erkek kalıbın termal etkisi .....	39
Resim 4.17. 103 numaralı numune ısıl şekillendirme sıcaklık dağılımı .....	41
Resim 4.18. 103 numaralı numune dikey ve yatay sıcaklık dağılımı.....	41
Resim 4.19. 103 numaralı numune erkek kalıbın termal etkisi .....	41
Resim 4.20. 106 numaralı numune ısıl şekillendirme sıcaklık dağılımı .....	42
Resim 4.21. 106 numaralı numune erkek kalıbın termal etkisi .....	42
Resim 4.22. 119 numaralı numune ısıl şekillendirme sıcaklık dağılımı .....	43
Resim 4.23. 119 numaralı numune dikey ve yatay sıcaklık dağılımı.....	44
Resim 4.24. 119 numaralı numune erkek kalıbın termal etkisi .....	44
Resim 4.25. 134 numaralı numune ısıl şekillendirme sıcaklık dağılımı .....	45
Resim 4.26. 134 numaralı numune erkek kalıbın termal etkisi .....	46

## SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

### Simgeler

### Açıklamalar

<b>MPa</b>	Megapaskal
<b>pH</b>	Bir çözeltinin asitlik veya bazlık derecesini gösteren ölçü birimidir.
<b>mm</b>	Milimetre
<b>cm</b>	Santimetre
<b>°C</b>	Santigrat derece
<b>%</b>	Yüzde işareti
<b>W</b>	Watt

### Kısaltmalar

### Açıklamalar

<b>PHBV</b>	Polihidroksialkanoat
<b>PHB</b>	Polihidroksibütirat
<b>PLA</b>	Polilaktikasit
<b>PS</b>	Polistiren
<b>ATBC</b>	Asetiltributilsitrat
<b>PVC</b>	Polivinilchlorür
<b>3D</b>	Üç boyutlu
<b>STL</b>	Üç boyutlu model dosya uzantısı

## 1. GİRİŞ

Plastik esaslı levhaların vakum ve ısı ile şekil verme parametrelerinin ürünün kalınlık dağılımı üzerine etkisi araştırılmıştır. Yapılan araştırmada malzeme türü, malzeme kalınlığı, erkek kalıp çapı ve ön şekil verme sırasında dalma derinliğinin değiştirilmesiyle ürünün kalınlık dağılımının nasıl değiştiği tespit edilmiştir.

Parametreler tek tek değiştirilerek nihai malzemenin kalınlığına nasıl etki ettiği incelenmiş ve numuneler oluşturulurken kullanılan parametreler kayıt altına alınmıştır. Bu parametrelerin belirlenmesi için oluşturulan her numuneden çeyrek dilim parça alınarak, alınan çeyrek dilimin her iki köşesinde belirlemiş olduğumuz 28 ölçüm noktasından veriler alınarak karşılaştırılmıştır. Alınan kayıtlar çalışmanın sonunda karşılaştırılmış olup nihai ürünün en uygun ölçülerde şekillendirilebilmesi için dikkat edilmesi gereken parametreler belirlenmiştir.

Vakum ve ısı ile şekil verme yönteminin ön ısıtma aşamasında, kızıl ötesi seramik ısıtıcılar tarafından numunelerin yüzey sıcaklık homojen olarak dağılmadığı tespit edilmiştir.

Petrokimya tabanlı plastiklerin zaman içerisinde kaynakların azalacağı ve çevreye verdiği etkileri göz öne alındığında alternatif ürünlerin üretilmesi gerekliliği ortaya çıkmıştır. Bu sebeple günümüzün ve geleceğimizin en önemli termoplastik malzeme konusu olan biyo bozunur plastik malzemeler üzerinde çalışmalar yoğunlaşmıştır. Yaptığımız tez çalışmasında biyo bozunur plastiklerin vakum ve ısı ile şekil verilebilirliği araştırılmıştır.



## 2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI

Plastik esaslı malzemelerin vakum ve ısı ile şekil verme yöntemi yaygın olarak ambalajlama sektöründe kullanılmaktadır. Türkiye ambalaj sektöründeki üretimin %40'lık oranı plastik hammaddeler kullanılarak üretilen ambalajlama ürünlerinden oluşmaktadır. Plastik ambalaj üretimi 2019 yılının ilk 6 ayında 1 milyon 746 bin ton ve 5,4 milyar dolar olarak gerçekleşmiştir (Türk plastik sanayicileri araştırma geliştirme ve eğitim vakfı, 2019).

Vakum ve ısı ile şekil verme prosesinde, termoplastik malzeme öncelikle ergime sıcaklığı noktasının altında bir sıcaklıkta ön ısıtma işlemine tabi tutulur. Ön ısıtma işlemi tamamlandıktan sonra üretimi yapan kişiye bağlı olarak iki seçenek kullanılarak malzeme şekillendirilir. Birinci seçenekte, erkek ve dişi kalıplar birlikte kullanılır. İlk adımda erkek kalıp ve dalma derinlik burcu yardımıyla termoplastik levhaya ön şekil verme işlemi uygulanır. Ön şekil verme işlemi tamamlandıktan sonra dişi kalıp kanalları vasıtasıyla vakum uygulanarak termoplastik levhanın dişi kalıbın şeklini alması sağlanır. İkinci seçenekte ise sadece dişi kalıp kullanılır. Erkek kalıp ve dalma derinlik burcu vasıtasıyla ön şekil verme işlemi uygulamadan sadece dişi kalıp kanalları vasıtasıyla vakum uygulanarak termoplastik levhanın dişi kalıbın şeklini alması sağlanır. Dünya genelinde vakum ve ısı ile şekil verme prosesi, termoform (thermoforming) olarak nitelendirilmektedir. Termoform işlemi ambalajlama sektöründe son zamanlarda ekonomik ve yöntem değişkenlerinin iyileştirilmesi sonucunda avantajlı bir üretim yöntemi olarak öne çıkmaktadır (Schwarzmann, 2019), (Engelmann, 2012), (Klein, 2009), (Throne, 2008), (Rosen, 2002), (Gruenwald, 1998), (Florian, 1996), (Throne, 1996), (Bhattacharyya, Bowis ve Jayaraman, 2003) (Hsiao ve Kikuchi, 1999).

Morales, Candal , Santana, Gordillo ve Salazar (2014) yaptıkları çalışmada vakum ve ısı ile şekil verme yöntemine çeşitli parametrelerin etki ettiği görülmüştür. Bu parametreler; levha sıcaklığı, erkek kalıp oranı, erkek kalıp malzemesi, erkek kalıp sıcaklığı, yüzey kalitesi, erkek kalıp geometrisi ve hava basıncıdır. Morales ve diğerleri (2014) yaptıkları çalışmada sadece erkek kalıp malzemesi değiştirmiştir. Deneyde erkek kalıp malzeme değişimi dışında diğer değişkenler değiştirilmemiştir. Kullanılan farklı malzemelerdeki

erkek kalıp ile plastik esaslı malzeme arasında farklı sürtünme etkileri olduğu gözlemlenmiştir. Böylece erkek kalıp malzemesi değiştiğinde nihai parçanın kalınlığı da değiştiği ortaya konmuştur.

Vakum ve ısı ile şekillendirme yönteminde, plastik malzemenin her bir noktasını aynı derece homojen ısıtmak oldukça zordur. Homojen ısıtma işleminin iyileştirilmesi adına yapılan Schmidt, Maoult ve Monteix (2003) çalışmasında 600 W uzun dalga kızılötesi ısıtıcı, 650 W orta dalga kızılötesi ısıtıcı ve 950 W halojen lambalar kullanmıştır. Deney sonucunda, sıcaklık yüzey dağılımı ve enerji verimliliği temel alındığında halojen lambaların kullanılması gerekliliği ortaya çıkmıştır. Diğer ısıtıcılara nazaran, halojen lambaların kullanımı ısıtılan yüzeyde sıcaklık dağılımının daha eşit olmasını sağlamıştır.

Plastik esaslı her malzemenin düzgün şekillendirilebilmesi için değişken parametrelerin doğru seçilmesi önemlidir. Deneme yanılma yoluyla doğru değerleri bulma yöntemi maliyetli olduğu için tercih edilmemesi gerekmektedir. Wang, Hamila ve Boisse (2013) yayınladığı makalede lif takviyeli termoplastik kompozit malzemeler için ısıllı şekillendirme simülasyonu oluşturmuşlardır. Simülasyon yardımıyla kısa sürede en az maliyetle ayarlanması gereken doğru değerler belirlenmiş ve maliyetli deneme yanılma yönteminden kaçınılmıştır.

Parametrelerin uygun değerleri seçildikten sonra vakum ve ısı ile şekillendirme işlemi sonucunda kaliteli ve düzgün ürünler üretilebilir. Üretilen ürünler plastik esaslı malzemeler olduğu için çevreye verdiği etkileri olabildiğince azaltılmalıdır. Çevreye en az zararı verebilmek için son zamanlarda biyo bozunur plastik malzemeler kullanılmaktadır. Petro kimyasal plastiklerin yerine biyo bozunur plastiklerin kullanılabilirliği üzerine Hottlea, Bilec ve Landisc (2017) yaptıkları çalışmada biyo etilenin şeker kamışından damıtılmasıyla üretimi, mısırdan biyo bozunur polilaktasitin üretilebileceğini göstermiştir. Ambalajlama sektöründe doğada yüksek oranda geri dönüşebilen biyo temelli plastiklerin kullanılması sonucunda çevreye verilen zarar yüksek oranda azalacaktır.

Ambalajlama sektöründe biyo bozulabilir plastiklerin kullanılabilmesi için mevcut kullanılan petro kimyasal temelli plastiklerin mekanik özelliklerinden daha iyi veya eş değer olması gerekmektedir. Bu konuyla ilgili olarak Kovalcik, Machovsky, Kozakova ve Koller (2015) yaptıkları çalışmada bakteriler tarafından üretilen biyo bozunur olan polihidroksialkanoat (PHBV) malzemesi seçilmiştir. PHBV'nin mekanik özelliklerinin



iyileştirilmesi için ağırlıkça % 10 oranda odun özlü lifler katılmıştır. Bunun sonucunda doğa dostu biyo temelli malzemeler, petro kimyasal temelli plastikler yerine kullanılabilmesi kanıtlanmıştır. Kullanılan malzemelerin mekanik dayanım özelliklerini geliştirebilmek adına doğal elyaf takviyeli kompozit malzemelerin üretimine başlanmıştır.

2000-2010 yılı arasında Faruka, Bledzka, Fink ve Saind (2012) yaptıkları incelemelerde görüleceği üzere biyo kompozit plastik malzemelerin, biyo bozunurluk, düşük maliyet, düşük bağıl yoğunluk, yüksek özgül dayanıklılık ve yenilenebilir doğaları nedeniyle son yıllarda önemli ölçüde kullanımı artmıştır.

Endüstride biyo kompozit ve biyo plastik malzemeleri yedek parça olarak uygunluğunu test etmek için Bravo, Toubal, Koffi ve Erchiqui (2018) ekibiyle, dişli parçası olarak huş elyaf takviyeli biyo bozunur olan polietilen malzemesiyle, yarı bozunur olan biyo kompozit polietilen malzemesini üretmiştir. Yapılan deneyde malzeme yorulması, yüksek devir ve sıcaklıkta malzemelerin verdiği tepkiler incelenmiştir. İnceleme sonucunda yarı bozunur olan biyo kompozit malzemenin yedek parça olarak daha uygun olduğu görülmüştür. Böylece tamamen biyo bozunur malzemelerin endüstride daha yaygın kullanılabilmesi için geliştirilmesi gerekmektedir.

Yarı bozunur olan biyo kompozit malzeme oluşturma aşamasında petro kimyasal esaslı plastik malzemelere takviye malzemesi eklenerek mekanik özellikleri iyileştirilir. Bravo, Toubal, Koffi ve Erchiqui (2015) yaptıkları çalışmada, takviye malzemesine ek olarak bağlacı madde kullanmışlardır. Bunun sonucunda mevcut mekanik özelliklerden daha yüksek mukavemetli malzeme üretildiği gözlemlenmiştir.

Boronat, Fombuena, Garcia-Sanoguera, Sanchez-Nacher ve Balart (2015) yaptıkları çalışmada, matris olarak şeker kamışı, dolgu malzemesi olarak yumurta kabuğu kullanılarak polietilen temelli biyo kompozit malzeme üretilmiştir. Farklı dolgu malzeme oranlarıyla üretilen ürün üzerinde yapılan deneylerde yumurta kabuğu oranı arttıkça entalpinin azalarak erime sıcaklığına etki etmeden bozunma sıcaklığını geciktirdiği görülmüştür. Biyo kompozit malzemeler hakkında bir diğer çalışma; Sehaqui, Allais, Zhou ve Berglund (2011) yaptıkları çalışmada odun lifi ağırlıkça % 90 olduğunda çekme mukavemeti 98 MPa'dan 160 MPa'a çıktığı görülmüştür. Çekme dayanımının 2 katına çıkması nanofibril selüloz ağının, odun lifleri arasında yük transferini iyileştirmesidir.

Kuciel, Jakubowska ve Kuzniar (2014) yaptıkları çalışmada şeker kamışının etanolünden elde edilen biyo etilen için dört farklı dolgu malzemesi seçilmiştir. Bu dolgu malzemeleri; odun tozu, ultra ince selüloz tozu, kıyılmış kenaf lifleri ve mineral tuf dolgusunun mikro partiküllerdir. Yapılan testlerin sonucunda odun tozu dolgulu biyo polietilenin diğer malzeme gruplarına göre sertliğindeki artış, iyi darbe sönümlemesi ve ısıl deformasyona karşı dirençli olduğu görülmüştür. Fakat diğer malzeme gruplarıyla karşılaştırıldığında su ve nem oluşumunun en fazla görüldüğü biyo kompozit malzeme olmuştur. Bu yüzden oluşturulacak biyo kompozit malzemenin kullanım şartlarına göre dolgu malzemesi seçilmelidir.

Biyo kompozit malzeme üretiminde farklı plastik malzeme gruplarında birbirinden farklı dolgu malzemeleri kullanılabilir. Temel prensip olarak biyo bozunur malzemelerin kullanılarak üretilmesidir. Sánchez-Safonta, Aldureida, Lagarónb, Gámez-Pérez ve Cabedoa (2018) polyester sınıfına polihidroksibütirat (PHB) plastiğini için dolgu malzemesi olarak badem kabuğu, pirinç kabuğu, deniz yosununun kullanılarak biyo kompozit plastik üretilmiştir.

Ambalajlama sektöründe biyo bozunur olarak en çok tercih edilen plastiklerin başında polilaktikasit (PLA) ve polihidroksialkanoat (PHBV) gelmektedir. PLA'nın tercih edilme sebebi ise nişasta ve şeker gibi yenilebilir bitki kaynaklarından türetilen biyolojik olarak çözülüp geri dönüştürülen bir plastik olduğu içindir Lima, Aurasb ve Rubinob (2008). Öte yandan PHBV ele alındığında biyo bozunur olması ve gaz bariyer özellikleri yüksek olması sebebiyle tercih edilmektedir. Ancak, PHBV plastiği vakum ve ısı ile şekil verme yöntemi açısından değerlendirdiğinde şekil verilebilirliği düşük olduğu görülmektedir. Bu problemi çözmek için Gonzalez-Ausejo ve diğerleri (2017) yaptıkları çalışmada PHBV ile PLA'nın birleştirilmesiyle oluşturulan biyo plastiğin ısı ile şekillendirilebilirliğinin iyileştiği görülmüştür. Bu yeni gelişmelerle birlikte biyo bozunur plastiklerin gün geçtikçe tercih edilme cazipliği artacağı görülmektedir.

Suwanmanee ve diğerleri (2013) ambalajlama sektöründe biyo bozunur ürünler üzerine yaptıkları çalışmada PS ile PLA ambalaj malzemesi olarak seçilmiştir. İki malzemenin karşılaştırmasında PS malzemesinin PLA'ya göre çevreye daha az zarar verdiği gözlemlenmiştir. Böylece biyo bozunur malzemeler arasında bile çevreye verdiği etkilerin farklılık gösterdiği sonucu ortaya çıkmaktadır.

Biyo kompozit malzeme üretiminde, kullanılan malzemeler oluşturulan malzemenin mekanik özelliklerini şekillendirir Rapa ve diğerleri (2016) yaptıkları çalışmada, PLA malzemesiyle asetiltributilsitrat (ATBC) plastiği kullanılarak biyo kompozit malzeme imal edildi. İmal edilen biyo kompozit malzeme incelendiğinde PLA'ya göre gevrekliğinin azaldığı, termal özelliklerinin iyileştiği görülmüştür. Böylece oluşturulan biyo kompozit malzemenin yağlanmayan gıdaların soğutma sıcaklıklarında ve 4,5 pH'ın üzerinde bir pH'ta ambalajlanması için uygun olduğu görülmüştür.





### 3. MATERYAL VE DENEYSEL YÖNTEM

Vakum ve ısı ile şekil verme prosesinde, termoplastik levha öncelikle kızıl ötesi seramik ısıtıcıların sıcaklığı 300 °C ulaşana kadar beklenir. Sıcaklık istenilen değere ulaştıktan sonra 1 dakika boyunca termoplastik levha ön ısıtma işlemine tabi tutulur. Ön ısıtma işlemi tamamlandıktan sonra belirlenen erkek kalıp çapı ve dalma derinlik burcu yardımıyla termoplastik levhaya ön şekil verme işlemi uygulanır. Ön şekil verme işlemi tamamlandıktan sonra dişi kalıp kanalları vasıtasıyla vakum uygulanarak termoplastik levhanın dişi konik kalıbın şeklini alması sağlanır. Erkek kalıp ve dalma derinlik burcu vasıtasıyla ön şekil verme işlemi uygulamadan sadece dişi kalıp kanalları vasıtasıyla vakum uygulanarak termoplastik levhanın dişi kalıbın şeklini alması sağlanır. İmal edilen malzemelerin her birine numune numarası verilir.

#### 3.1 Kullanılan Termoplastik Malzemeler

Yapılan çalışmada termoplastik malzeme olarak 0,45 mm ve 0,25 mm kalınlığında PVC (polivinilklorür) kullanılmıştır. 0,45 mm ve 0,25 mm kalınlığındaki rulo halindeki PVC malzemesinden 15 x 15 cm ölçülerinde kesilerek numuneler hazır hale getirilmiştir.

Deney Adı	Birimi	Değeri	Metodu
Viskozite Sayısı (Sikloheksanon 25° C)	cm <sup>3</sup> /g	76-86	SOLVAY 1A/93
Serbest Alkali (NaOH)	g/l	8-15	ASTM D-2022
K sayısı (Sikloheksanon 25° C)		56-59	SOLVAY 1A/93
Yığın Yoğunluğu	g/cm <sup>3</sup>	0,56-0,62	SOLVAY 4A/91
Elek Analizi			
- 0,250 mm üstü	% wt	Max. 3	SOLVAY 8A/92, 8F/92
- 0,063 mm üstü	% wt	Min. 90	SOLVAY 8A/92, 8F/92
Uçucu Madde	% wt	Max. 0,5	SOLVAY 2A/90
Kirlilik	adet/ft <sup>2</sup>	Max 60	SOLVAY 6A/92

Resim 3.1. PVC (polivinilklorür) ürün özelliği

Plastik esaslı malzemelerle karşılaştırıldığında kompozit plastikler, biyo bozunabilirliği daha yüksek ürünlerdir. Plastik esaslı biyo bozunur malzemelerin vakum ve ısı ile şekil verme parametrelerinin incelenmesi için ağırlıkça % 60 PLA (polilaktik asit) % 40 bambu içeren biyo plastik levhalar, 1.75 mm çaplı bambu takviyeli PLA filament (Azure film) kullanılarak 3 boyutlu yazıcı ile üretilmiştir.

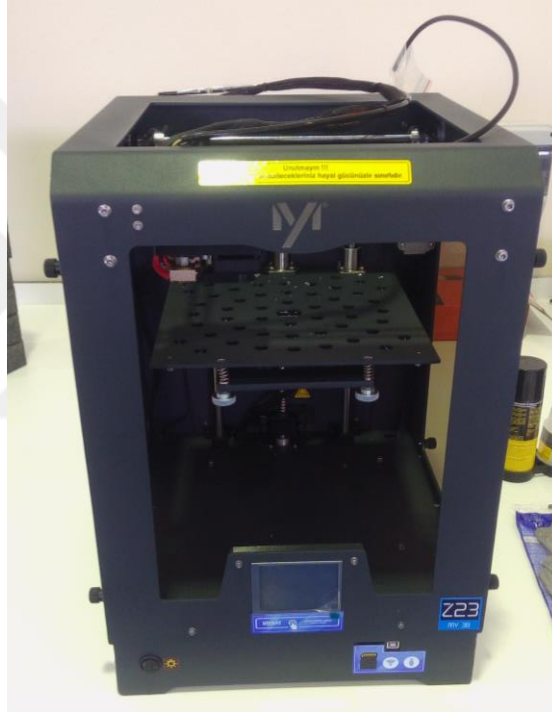
Deney Adı	Birimi	Değeri	Metodu
Esneklik Katsayısı	MPa	3200	ISO 527
Çekme Mukavemeti	MPa	47	ISO 527
Çekme Mukavemetinde Uzamana Miktarı	%	4	ISO 527
Kopma Mukavemeti	MPa	34	ISO 527
Kopma Mukavemetinde Uzamana Miktarı	%	7	ISO 527
Çentikli Darbe Dayanımı	kJ/m <sup>2</sup>	4,2	ISO 179-1/1 eA
Çarpma Dayanımı	kJ/m <sup>2</sup>	21	ISO 179-1/1 eU
Erime Akış Hızı	g/10 dak	2,5-5	ISO 1133
Erime Sıcaklığı	° C	> 155	ISO 3146-C
Yoğunluk	g/cm <sup>3</sup>	1,19	ISO 1183

Resim 3.2. Ağırlıkça % 40 bambu özlü filament ürün özelliği

Solidworks çizim programında 0,90 mm kalınlıkta 15 x 15 cm ölçülerinde plaka çizimi yapılır ve STL formatında kaydedilir. STL formatındaki plaka çizimi 3D yazıcı programında (3D Simplify) açılır. 3D yazıcı programı vasıtasıyla yazıcı ayarları düzenlenir. 0,40 mm çapında ekstrüder nozul seçimi yapılır. 0,90 mm kalınlıkta 15 x 15 cm ölçülerindeki levha 5 katmanda +/- 45 derece açılarda ızgara dolgu deseni seçilerek ayarlanır. 2 adet kabuk kenar çizgisi levha ölçülerinden 4 mm dıştan öteleme yapılacak seçilir. Bambu özlü PLA malzemenin erimesini sağlamak için ekstrüder sıcaklığı 230° C, erimiş bambu özlü levhaların katmanlar halinde imal edilebilmesi için yazıcı tabla sıcaklığı 60° C ayarlanmıştır. Ağırlıkça % 40 oranında bambu içeren filamentin dolgu oranı seçiminde Evlen, Özdemir ve Çalışkan (2019) yaptıkları çalışmadan referans alınarak % 33 dolgu oranı seçilmiştir. 3D (üç boyutlu) yazıcı kullanılarak 0,90 mm kalınlığında 15 x 15 cm ölçülerinde levhalar halinde üretilmiştir.



Resim 3.3. Bambu levha



Resim 3.4. MY3B Z23 3D yazıcı

### 3.2 Vakum ve Isı ile Şekil Verme Cihazı

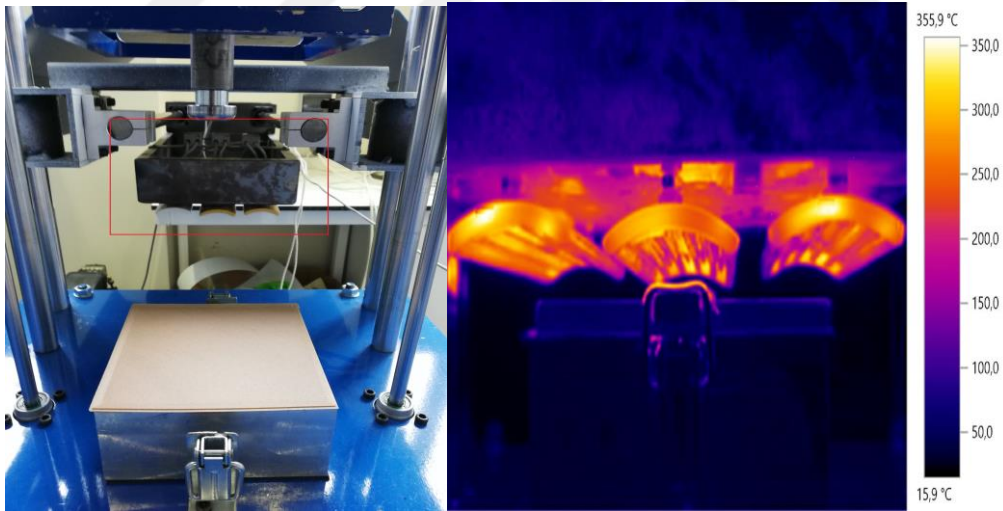
Vakum ve ısı ile şekil verme cihazında 15 x 15 cm ölçülerinde önceden hazırlanmış termoplastik plakalar, seramik ısıtıcıların (3 adet Orion marka kızıl ötesi seramik ısıtıcı 1000 W) sıcaklığı 300 °C ulaştıktan sonra 1 dakika boyunca ön ısıtma işlemi uygulanır. Ön ısıtma işlemi sonrasında erkek kalıp yardımıyla termoplastik malzemeye ön şekillendirme uygulanır. Akabinde vakum uygulanarak dişi kalıbın şeklini alması sağlanır.



Resim 3.5. Vakum ve ısı ile şekil verme cihazı

### 3.2.1 Seramik ısıtıcılar

Vakum ve ısı ile şekil verme cihazımızda 3 adet 1000 Watt Orion marka kızıl ötesi seramik ısıtıcı kullanarak termoplastik malzemeler uygun sıcaklığa ısıtılmıştır.



Resim 3.6. Seramik ısıtıcılar

### 3.2.2 Dalma derinliği ayarı için burçlar ve erkek kalıplar

Dalma derinliği uzunlukları 25 mm, 30 mm, 35 mm, 40 mm ve 45 mm'dir. Erkek kalıpların çap ölçüleri 30 mm, 35 mm, 40 mm, 45 mm ve 50 mm'dir. Dalma derinlik burçları ve erkek kalıp çapları St 37-2 malzemeden imal edilmiştir.



Nominal kalınlık (mm)	3	3-100	100-150	150-250
Rm- Çekme Dayanımı (MPa) Yassı ve Uzun Ürünler	360-510	360-510	350-500	340-490

Nominal kalınlık (mm)	16	16-40	40-63	80-100	100-150	150-200	200-250
ReH- Minimum Verim Gücü (MPa) Yassı ve Uzun Ürünler	235	225	215	215	195	185	175

KV- Darbe Enerjisi (J) Boylamı	-20° 27	0° 27	+20° 27
--------------------------------	------------	----------	------------

Nominal Kalınlık (mm)	1	1-1,5	1,5-2	2-2,5	2,5-3
A- Min. Uzama Lo=80 mm (%) paralel	17	18	19	20	21

Nominal Kalınlık (mm)	Mar.40	40-63	63-100	100-150	150-250
A- Min. Uzama Lo=5,65 √So (%) paralel	26	25	24	22	21

Resim 3.7. St 37-2 malzeme özellikleri



Resim 3.8. Dalma derinliği burçları ve erkek kalıplar

### 3.2.3 Dişi kalıp ve plaka kitleme çenesi

Ön ısıtma işlemi öncesinde kitleme çenesi yardımıyla 15 x 15 cm ölçülerindeki plakanın dişi kalıp üzerinde sabitlenmesi sağlanır. Deneyde kullanılan konik dişi kalıp 5083 alüminyum malzemeden imal edilmiş olup konik dişi kalıp Resim 3.10'de görülmektedir. Ön şekillendirme sonrasında konik dişi kalıp vakum delikleri vasıtasıyla plakaya vakum uygulanarak dişi kalıbın şeklini alması sağlanır.

Akma Dayanımı	Çekme Dayanımı	Uzama %	Brinell Sertlik	Yoğunluk	Isı İletkenliği
115-125 MPa	270-275 MPa	15-16	73-75 HB	2,66 g/cm <sup>3</sup>	110-40 W/m.K

Resim 3.9. 5083 alüminyum malzeme özellikleri



Resim 3.10. Dişi kalıp ve plaka kitleme çenesi

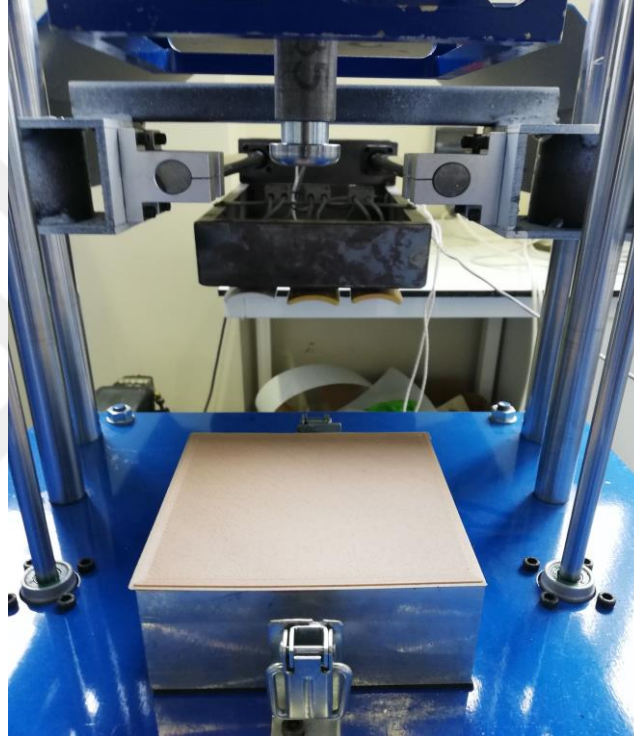
### 3.3 Numune Hazırlığı

0,45 mm ve 0,25 mm kalınlığındaki PVC levhalar, 5 farklı dalma derinliği her biri için 5 farklı erkek kalıp çapı kullanılarak numuneler oluşturulmuştur. 0,90 mm kalınlığındaki bambu levhalarda ise dalma derinliği 35 mm seçilip 5 farklı erkek kalıp çapı, ayrıca erkek kalıp çapı 40 mm seçilip 4 farklı dalma derinliği (25 mm, 30 mm, 40 mm ve 45 mm) kullanılarak numuneler oluşturulmuştur.

0,45 mm ve 0,25 mm kalınlıkta PVC levha numuneleri ile 0,90 mm kalınlıkta bambu levha numuneleri kullanılarak, belirlenmiş olan her bir dalma derinliği ile erkek kalıp çapı için 3'er numune oluşturulmuştur. Nihai numuneden çeyrek parça kesilir. Kesilen parçanın her iki yüzeyinden daha önce belirlenmiş olan 28 ölçüm noktasından alınan kalınlık ölçümleri alınır. Alınan ölçümlerin ortalamaları alınarak ölçme işlemi sonuçlanır.

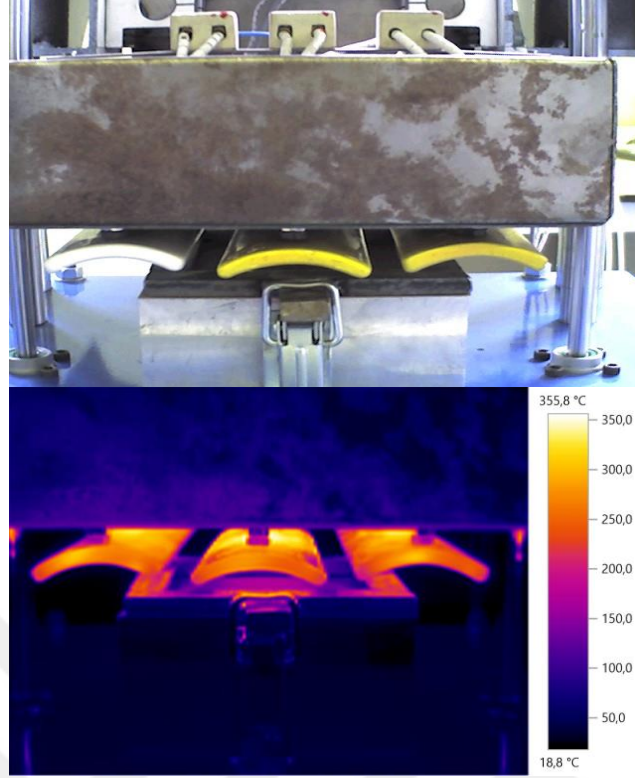
### 3.4 Deneyin Yapılışı

15 x 15 cm ölçülerindeki termoplastik levhalar dişi kalıp üzerinde plaka kitleme çenesiyle sabitleyerek konumlandırılır. Her bir numune için dalma derinlik burç uzunluğu ve erkek kalıp çapı belirlenir. Belirlen dalma derinlik burcu ile erkek kalıp çapı resim 3.11.'de görüleceği üzere hareketli st tablaya montajı gerçekleştirilir. Kızıl tesi seramik ısıtıcıların sıcaklığı 300 °C ulaşması beklenir.



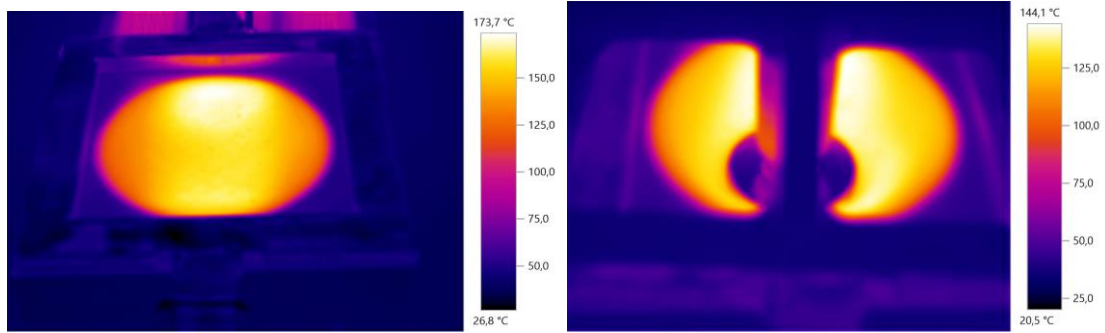
Resim 3.11. Termoplastik levha konumlandırılması

300 °C sıcaklığa yükselen seramik ısıtıcılar termoplastik levhanın üzerine getirilerek 1 dakika boyunca ısıtma işlemine tabi tutulur. Her bir işlemin ardından Testo 875-i termal kamera ile görüntü kaydı alınır ve sıcaklık dağılımını her bir Şekil verme operasyonunda belirlenir.



Resim 3.12. 300 °C'deki ısıtıcıların sıcaklık dağılımı

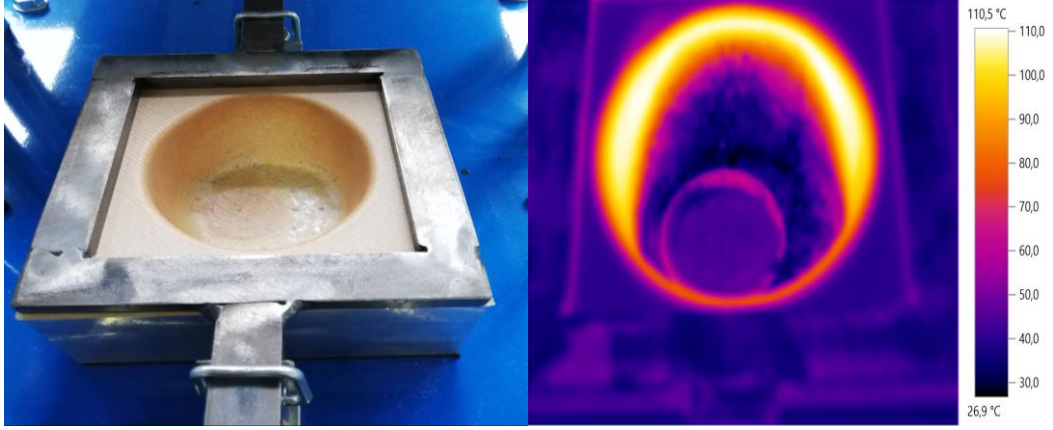
Ön ısıtma işlemi sonrasında erkek kalıp yardımıyla termoplastik malzemeye ön şekil verme işlemi uygulanır.



Resim 3.13. Ön şekil verme işlemi

Ön şekil verme işlemi tamamlandıktan 5 saniye sonra konik dişi vakum delikleri vasıtasıyla plakaya vakum uygulanarak dişi kalıbın şeklini alması sağlanır. Dişi kalıbın şeklini alan her bir levhaya numune kodu verilir. Numune kodu verilen her bir numunenin şekil verme parametreleri kayıt altına alınır.



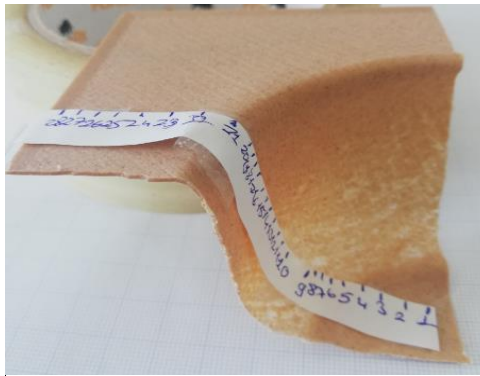


Resim 3.14. Numune

Oluşturulan her numune çeyrek dilim boyutta kesilir. Kesilen her çeyrek dilim levhanın her iki kesim yüzeyinden, 28 farklı noktasından kalınlık ölçümü alınır. Alınan kalınlık dağılımı verileri levha kalınlığı, malzeme türü, erkek kalıp çapı, dalma derinliği gibi parametreler göz önüne alınarak incelenir.



Resim 3.15. Bambu özlü numuneler



Resim 3.16. Çeyrek dilim numune



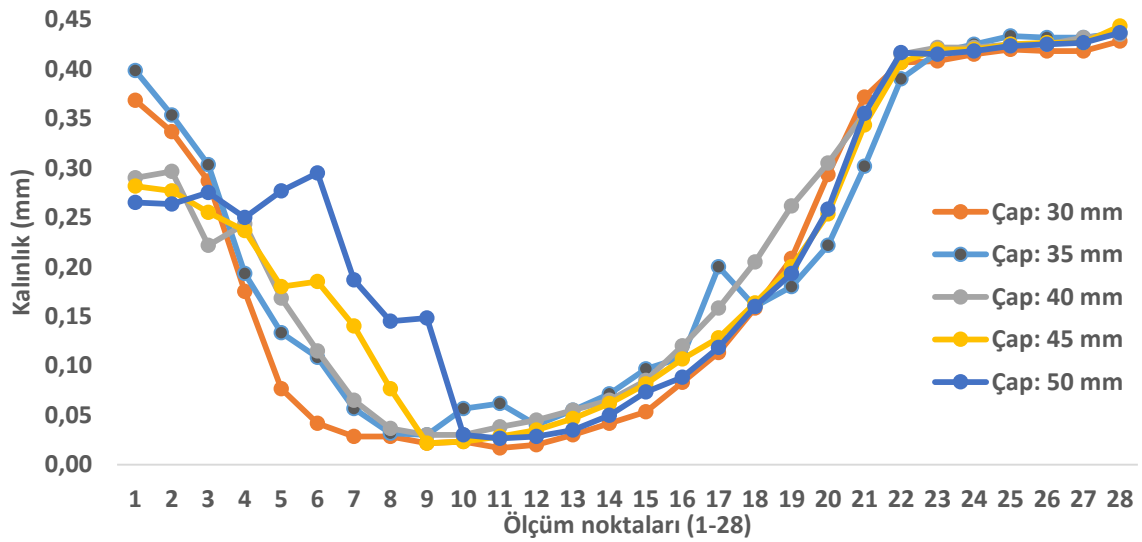
## 4. BULGULAR VE TARTIŞMA

### 4.1 0,45 mm Kalınlıktaki PVC Levha Numunelerin Değerlendirilmesi

#### 4.1.1 Dalma derinlik burç uzunluğu 25 mm

0,45 mm kalınlığındaki PVC levhanın vakum ve ısı ile şekil verme işleminde dalma derinliği 25 mm seçilmiştir ve numuneler oluşturulurken dalma derinliği değiştirilmemiştir.

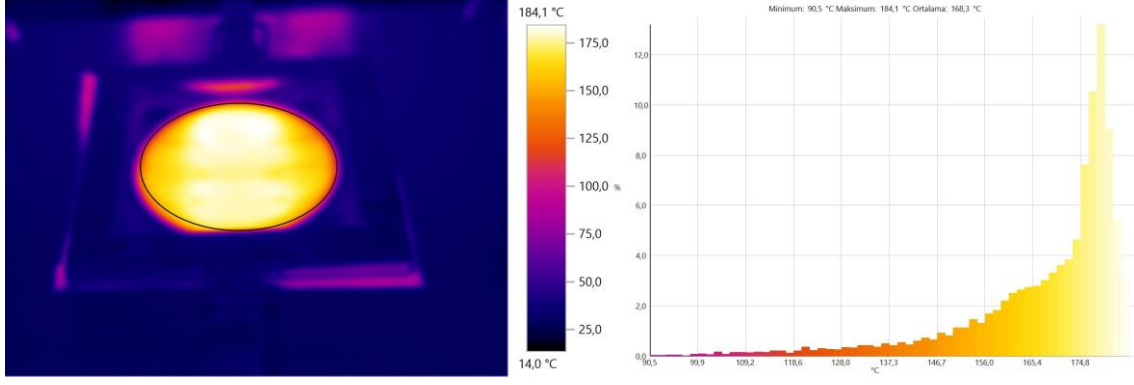
Çizelge 4.1. Dalma derinliği 25 mm için farklı erkek kalıp çap değerlerinde karşılaştırmalı kalınlık dağılımı



Derinlik 25 mm olarak sabit tutulurken 30 mm, 35 mm, 40 mm, 45 mm ve 50 mm olan erkek kalıp çapları kullanılarak numuneler oluşturulmuştur. Oluşturulan her numunedan çeyrek dilim parça kesilip 28 farklı noktadan kalınlık dağılımı incelenmiştir.

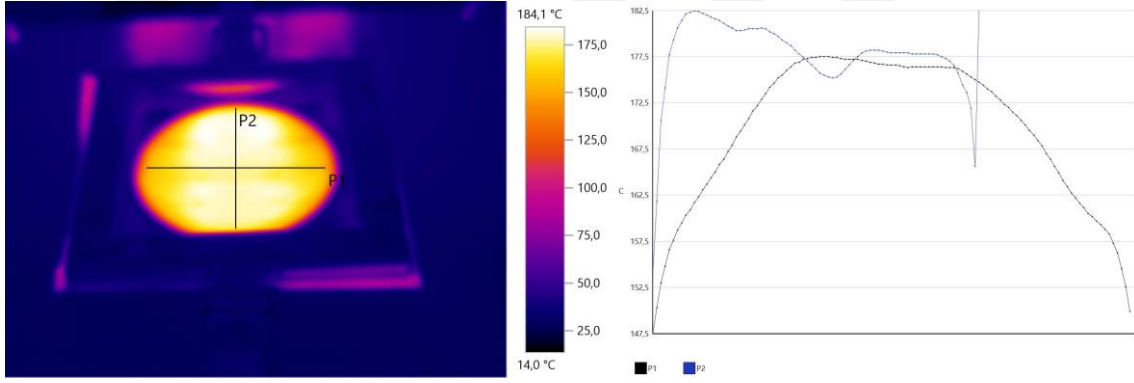
Çizelge 4.1.1'i incelediğimizde erkek kalıp çapı 35 mm ile 40 mm'de her bir noktada doğrusal olarak kalınlık değişimi olduğu gözlemlenmiştir.

Dalma derinliği 25 mm, erkek kalıp çapı 35 mm seçilen numune numarası 12'dir. 12 numaralı numunenin termal kamera görüntüleri incelendiğinde ön ısıtma sıcaklık işleminde seramik ısıtıcılar 300 °C sıcaklığa ayarlandığında PVC levha yüzeyinde minimum 90,5 °C, maksimum 184,1 °C ve ortalama levha sıcaklığı 168,3 °C sıcaklıkta olduğu tespit edilmiştir.



Resim 4.1. 12 numaralı numune ısıtılma sıcaklık dağılımı

Isıtılan PVC levha yüzeyini, dikey ve yatay çizgilerde sıcaklık dağılımını incelediğimizde levhanın merkez dikey çizgilerde ortalama sıcaklık dağılımının 168 °C olduğu görülmüştür.



Resim 4.2. 12 numaralı numune dikey ve yatay sıcaklık dağılımı

P1 yatay sıcaklık çizgisi ile P2 dikey sıcaklık çizgisi karşılaştırıldığında P2 dikey sıcaklık çizgisindeki sıcaklık dağılımının, P1 yatay sıcaklık çizgisine göre daha homojen dağıldığı tespit edilmiştir. Bu sıcaklık dağılımının 3 adet kızıl ötesi seramik ısıtıcının konumlandırılmasından kaynaklandığı sonucuna varılmıştır.

#### 4.1.2 Dalma derinlik burç uzunluğu 30 mm

Derinlik, 30 mm olarak sabit tutulurken 30 mm, 35 mm, 40 mm, 45 mm ve 50 mm olan erkek kalıp çapları kullanılarak numuneler oluşturulmuştur.

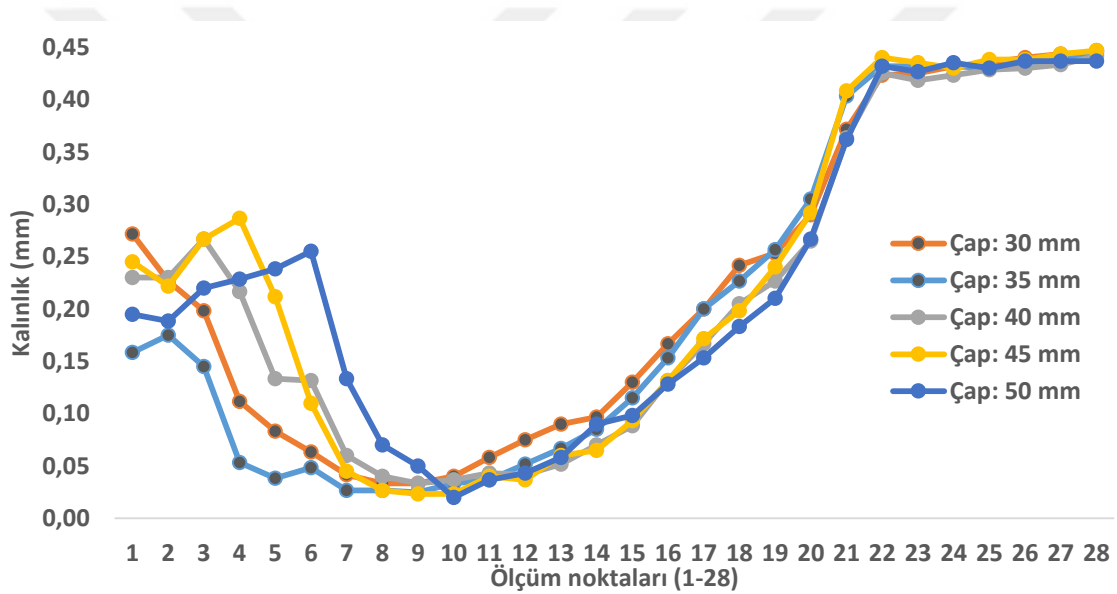
Dalma derinliği, 25 mm uzunluktan 30 mm uzunluğa yükseltildiğinde tüm erkek kalıp çaplarında 1. kalınlık ölçüm noktasından 9. kalınlık ölçüm noktasına kadar her ölçüm noktasındaki veriler karşılaştırıldığında 0,40 mm'den 0,30 mm'ye azaldığı tespit



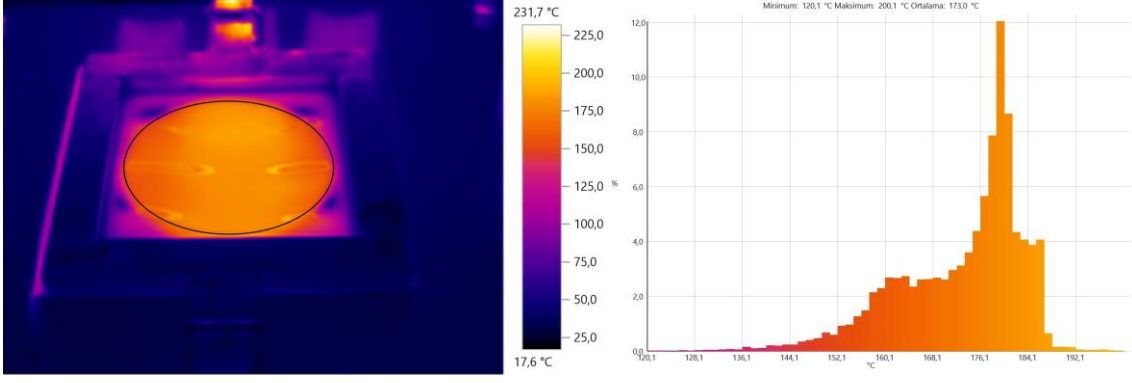
edilmiştir. Ön şekil verme aşamasında dalma derinliğinin 5 mm artmasından numune kalınlığında 0,10 mm incelmeye neden olmuştur.

10. ölçüm noktasından 28. ölçüm noktasına kadar veriler karşılaştırıldığında dalma derinliği 25 mm'den 30 mm'ye yükseltilmesi sonucunda kalınlıkta kayda değer bir değişiklik gözlemlenmemiştir. 1. ölçüm noktasından 10. Ölçüm noktasına gidildikçe erkek kalıp çapının artması 5. Noktaya kadar kalınlığın da artmasına neden olmuştur. 11. noktadan sonra 22. Noktaya kadar yani numune yan duvarında da çap değeri arttıkça aynı ölçüm noktasında kalınlık değerleri artış eğilimindedir.

Çizelge 4.2. Dalma derinliği 30 mm için farklı erkek kalıp çap değerlerinde karşılaştırmalı kalınlık dağılımı

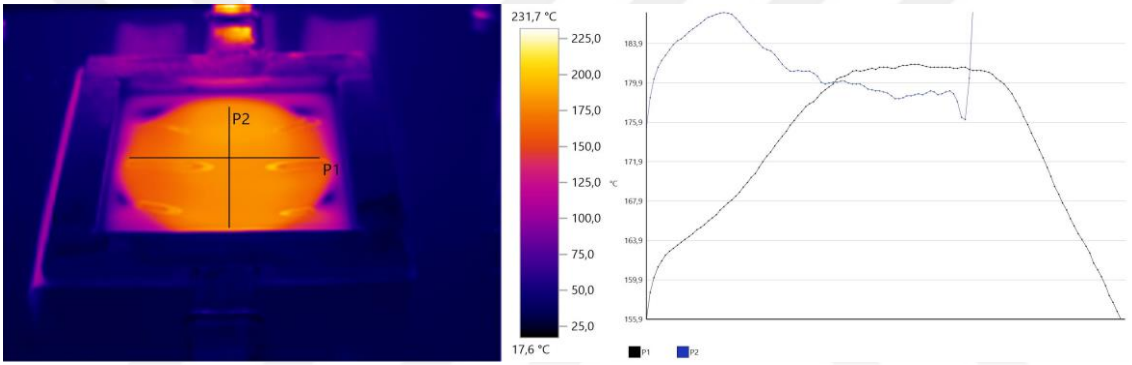


Dalma derinliği:30 mm için erkek kalıp çapı 35 mm seçilen numunenin numarası 19'dur. 19 numaralı numunenin termal kamera görüntüleri incelendiğinde ön ısıtma sıcaklık işleminde seramik ısıtıcılar 300 °C sıcaklığa ayarlandığında PVC levha yüzeyinde minimum 120,1 °C, maksimum 225 °C ve ortalama levha sıcaklığı 173 °C sıcaklıkta olduğu tespit edilmiştir.



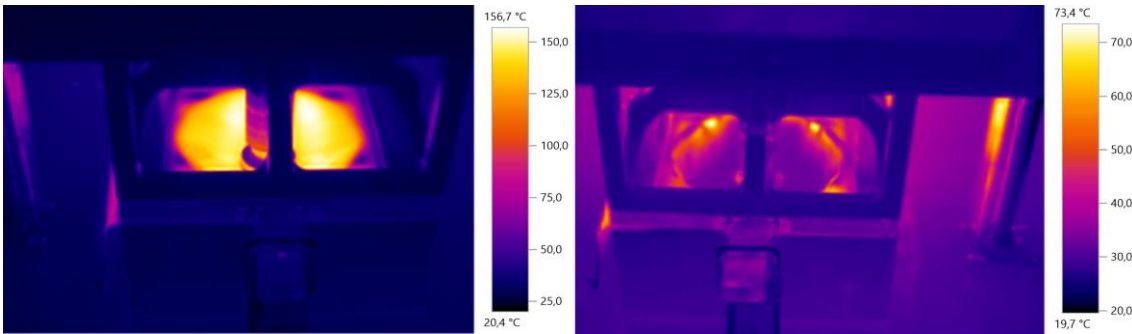
Resim 4.3. 19 numaralı numune ısıll şekillendirme sıcaklık dağılımı

P2 yatay sıcaklık çizgisi incelendiğinde 155 °C sıcaklıktan 181 °C sıcaklığa kadar her bir noktada farklı sıcaklık dağılımı olduğu tespit edilmiştir.



Resim 4.4. 19 numaralı numune dikey ve yatay sıcaklık dağılımı

19 numaralı numunenin ön şekil verme işlemi sırasında erkek kalıbın termoplastik yüzeye temas ettiğindeki maksimum yüzey sıcaklığı 150 °C olduğu, levhaya vakum uygulanarak dişi kalıbın şeklini alması sağlandığında ise 70 °C sıcaklığa düştüğü gözlemlenmiştir.



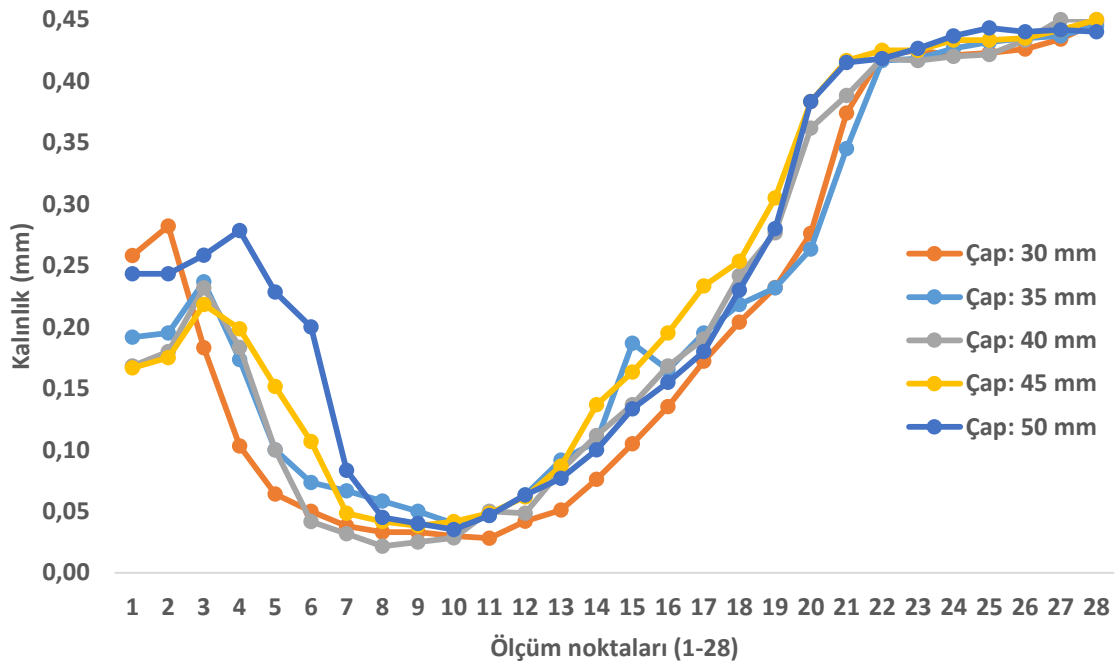
Resim 4.5. 19 numaralı numunede erkek kalıbın termal etkisi

### 4.1.3 Dalma derinlik burç uzunluğu 35 mm

Derinlik, 35 mm olarak sabit tutulurken 30 mm, 35 mm, 40 mm, 45 mm ve 50 mm olan erkek kalıp çapları kullanılarak numuneler oluşturulmuştur.

Çizelge 4.1.2 ile çizelge 4.1.3 karşılaştırıldığında erkek kalıp çapı 35 mm seçilen numunelerin kalınlık dağılımı incelendiğinde 1. 2. ve 3. ölçüm noktalarındaki kalınlığın 0,05 mm daha kalın olduğu tespit edilmiştir. Bu kalınlık farklılığının sebebi dalma derinliğinin 30 mm'den 35 mm'ye yükseltilmesidir.

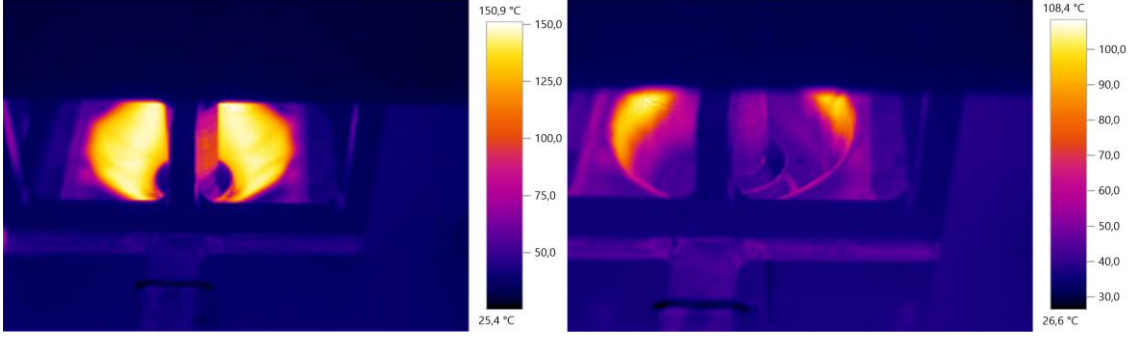
Çizelge 4.3. Dalma derinliği 35 mm için farklı erkek kalıp çap değerlerinde karşılaştırmalı kalınlık dağılımı



35 mm çaplı erkek kalıp ile birlikte 30 mm dalma derinliği seçildiğinde 0,05 mm kalınlığına 4. ölçüm noktasında ulaşılırken, 35 mm dalma derinliği seçilen numunede ise 8. ölçüm noktasında ulaşıldığı tespit edilmiştir.

Çizelge 4.1.2 ile çizelge 4.1.3 incelendiğinde 40 mm, 45 mm ve 50 mm erkek kalıp çaplarındaki numunelerin 1. 2. 3. 4. 5. ölçüm noktalarında en az 0,03 mm en fazla ise 0,1 mm kalınlığın düştüğü tespit edildi. Dalma derinliği artırıldığında büyük erkek kalıp çapları (40 mm, 45 mm ve 50 mm) kullanılarak imal edilen numunelerdeki kalınlığın düştüğü gözlemlenmiştir.





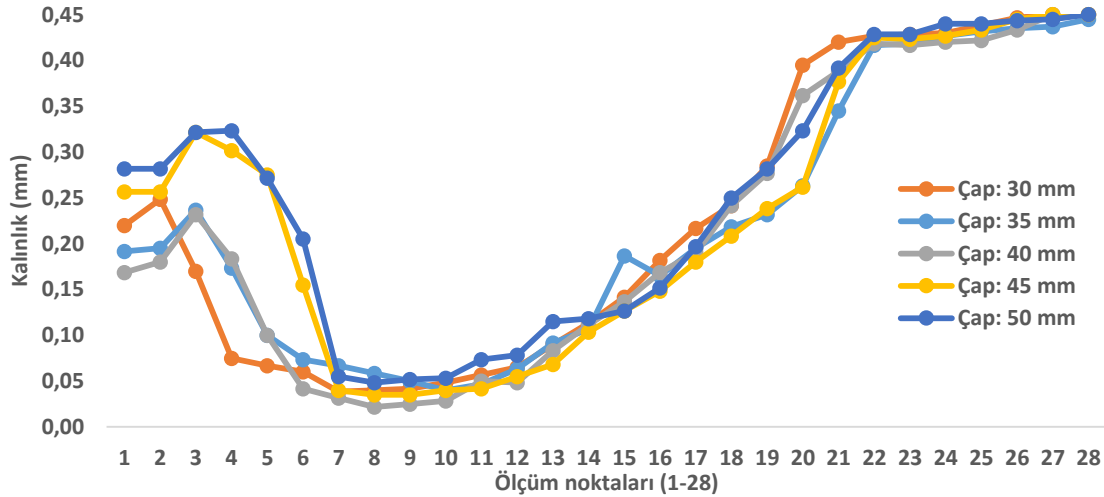
Resim 4.8. 40 numaralı numunede erkek kalıbın termal etkisi

#### 4.1.4 Dalma derinlik burç uzunluğu 40 mm

Derinlik 40 mm olarak sabit tutulurken 30 mm, 35 mm, 40 mm, 45 mm ve 50 mm olan erkek kalıp çapları kullanılarak numuneler oluşturulmuştur.

Çizelge 4.1.4 ile çizelge 4.1.3 karşılaştırıldığında; erkek kalıp çapı 30 mm kullanılarak oluşturulan numunelerin 1. 2. 3. ve 4. ölçüm noktalarındaki numune kalınlığının minimum 0,01 maksimum ise 0,04 mm daha ince olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, 8.-20. ölçüm noktalarında ise minimum 0,0067 maksimum ise 0,11 mm daha kalın olduğu gözlemlenmiştir. 21. 22. 23. 24. 25. 26. 27. 28. kalınlık ölçüm noktalarındaki veriler karşılaştırıldığında 0,45 mm kalınlığına yakın ölçümler alındığı görülmüştür.

Çizelge 4.4. Dalma derinliği 40 mm için farklı erkek kalıp çap değerlerinde karşılaştırmalı kalınlık dağılımı



Erkek kalıp çapı 35 mm kullanılarak dalma derinliği 35 mm'den 40 mm'ye çıkartılan numuneler karşılaştırıldığında; 1. 2. 3. 4. 5. 6. 7. 8. ve 9. ölçüm noktalarında minimum 0,02 mm maksimum ise 0,042 mm daha az kalınlığa sahip olduğu tespit edildi. 10. ölçüm

noktasından 21. ölçüm noktasına ölçüm noktalarındaki veriler karşılaştırıldığında dalma derinliği 40 mm seçilen numunelerin kalınlığı minimum 0,03 mm maksimum ise 0,12 mm daha kalın olduğu görülmüştür.

Erkek kalıp çapı 40 mm kullanılarak dalma derinliği 35 mm'den 40 mm'ye çıkartılan numuneler 1. ve 2. ölçüm noktasında 0,05 mm daha ince olduğu tespit edilmiştir. 3. ölçüm noktasından 26. ölçüm noktasına kadar kalınlık ölçümleri karşılaştırıldığında minimum 0,04 mm maksimum ise 0,09 mm daha kalın olduğu görülmüştür.

Erkek kalıp çapı 45 mm seçilerek dalma derinliği 35 mm'den 40 mm'ye çıkartılan numuneler karşılaştırıldığında; 40 mm dalma derinliği seçilen numunelerde 1. ölçüm noktasından 6. ölçüm noktasına kadar numune kalınlık ölçümlerinin minimum 0,05 maksimum ise 0,15 mm daha kalın olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, 7. ölçüm noktasından 21. ölçüm noktasına kadar minimum 0,02 mm maksimum ise 0,04 mm daha ince olduğu kayıt altına alınmıştır.

Erkek kalıp çapı 50 mm seçilerek dalma derinliği 35 mm'den 40 mm'ye çıkartılan numuneler karşılaştırıldığında; 40 mm dalma derinliği seçilen numunelerde 1. ölçüm noktasından 14. ölçüm noktasına kadar kalınlık ölçümü minimum 0,01 mm maksimum ise 0,05 mm daha kalın olduğu tespit edilmiştir. Buna ilave olarak, 20. ve 21. ölçüm noktalarında minimum 0,02 mm maksimum ise 0,06 mm daha incedir.

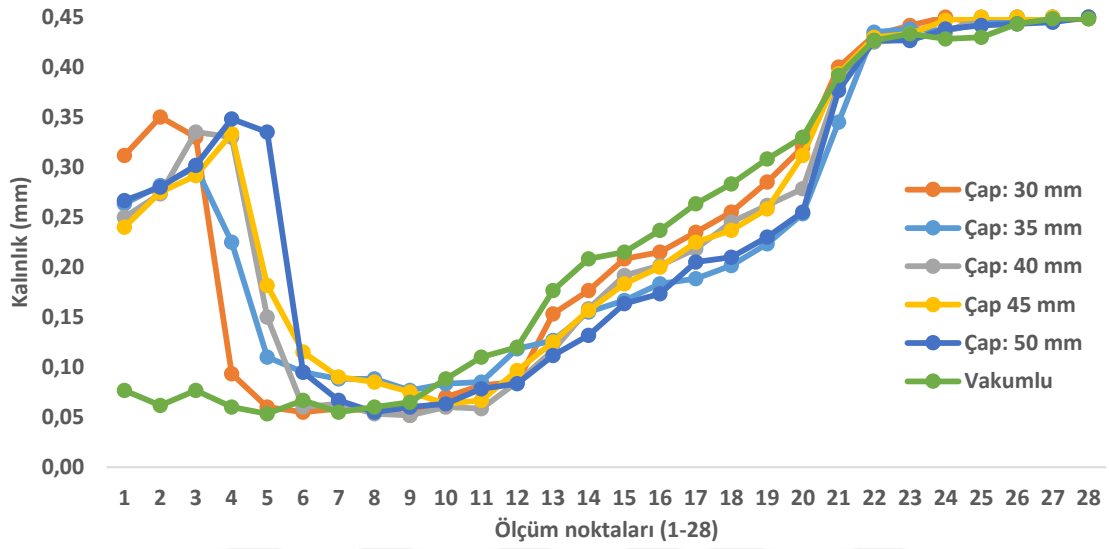
#### **4.1.5 Dalma derinlik burç uzunluğu 45 mm**

Derinlik 45 mm olarak sabit tutulurken 30 mm, 35 mm, 40 mm, 45 mm ve 50 mm olan erkek kalıp çapları kullanılarak numuneler oluşturulmuştur. İlave çalışma olarak erkek kalıp kullanılmadan vakum etkisiyle numunelere de şekil verilmiştir.

Çizelge 4.1.4 ile çizelge 4.1.5 erkek kalıp çapı 30 mm kullanılarak oluşturulan numunelerin kalınlık dağılımı incelenmiştir. Yapılan incelemede 1. 2. 3. ve 4. ölçüm noktalarında dalma derinliği 45 mm seçilen numunelerin kalınlıkları minimum 0,02 mm maksimum ise 0,16 mm daha kalın olduğu tespit edilmiştir. 7. ölçüm noktasından 19. ölçüm noktasına kadar kalınlık ölçümleri incelendiğinde minimum 0,001 mm maksimum ise 0,06 mm daha kalın olduğu kayıt altına alınmıştır.

Erkek kalıp çapı 35 mm, dalma derinliği 35 mm'den 40 mm'ye çıkartılan numuneler karşılaştırıldığında; 1. ölçüm noktasından 16. ölçüm noktasına kadar kalınlık ölçümleri minimum 0,001 mm maksimum ise 0,03 mm daha kalın olduğu kayıt altına alınmıştır.

Çizelge 4.5. Dalma derinliği 45 mm için farklı erkek kalıp çap değerlerinde karşılaştırmalı kalınlık dağılımı



Erkek kalıp çapı 40 mm kullanılarak dalma derinliği 40 mm'den 45 mm'ye çıkartılan numuneler karşılaştırıldığında 1. ölçüm noktasından 18. ölçüm noktasına kadar kalınlık ölçümleri minimum 0,008 mm maksimum ise 0,038 mm daha kalın olduğu tespit edilmiştir. 19. ölçüm noktasından 24. ölçüm noktasına kadar kalınlık ölçümleri ise minimum 0,006 mm maksimum 0,075 mm daha ince olduğu tespit edilmiştir.

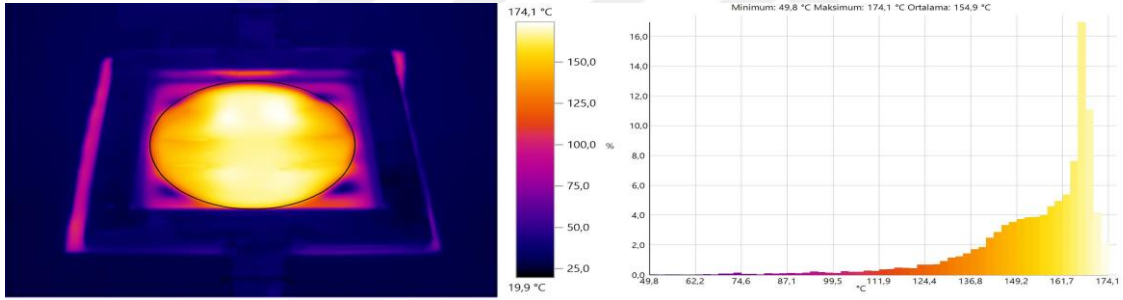
Erkek kalıp çapı 45 mm kullanılarak dalma derinliği 40 mm'den 45 mm'ye çıkartılan numuneler karşılaştırıldığında 1. ölçüm 0,016 daha ince olduğu tespit edilmiştir. 2. 3. ve 4. ölçüm noktalarında kalınlık ölçümleri minimum 0,019 mm maksimum ise 0,033 mm daha kalın olduğu ölçülmüştür. 5. ve 6. ölçüm noktasında kalınlık ölçümleri minimum 0,04 mm maksimum ise 0,09 mm daha ince olduğu kayıt altına alınmıştır. 7. ölçüm noktasından 28. ölçüm noktasına kadar kalınlık ölçümleri minimum 0,04 mm maksimum ise 0,06 mm daha kalın olduğu tespit edilmiştir.

Erkek kalıp çapı 50 mm kullanılarak dalma derinliği 40 mm'den 45 mm'ye çıkartılan numuneler karşılaştırıldığında 1. 2. ve 3. ölçüm noktalarında kalınlık ölçümleri minimum 0,001 mm maksimum ise 0,02 mm daha ince olduğu kayıt altına alınmıştır. 4. ölçüm noktasından 17. ölçüm noktasına kadar kalınlık ölçümleri minimum 0,007 mm

maksimum ise 0,11 mm daha kalın olduğu tespit edilmiştir. 18. ölçüm noktasından 28. ölçüm noktasına kadar minimum 0,002 mm maksimum 0,05 mm daha ince olduğu kayıt altına alınmıştır.

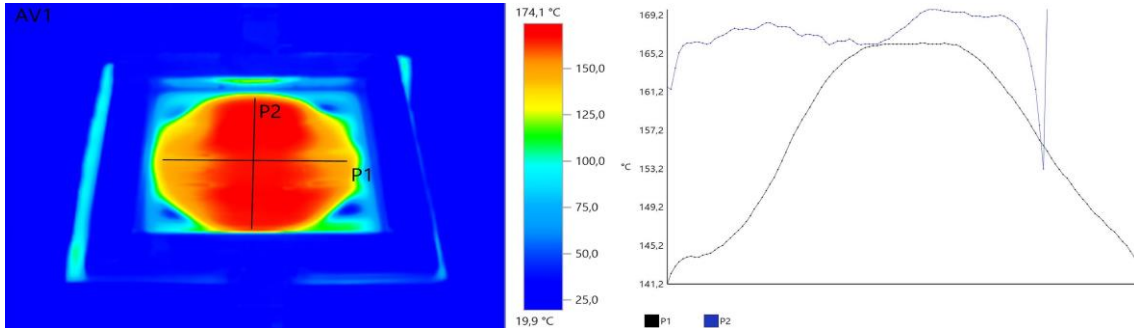
Çizelge 4.1.5 incelendiğinde erkek kalıp kullanmadan vakum etkisi altında imal edilen numunelerin 1. ölçüm noktasından 6. Ölçüm noktalarında kalınlık ölçümleri dikkate alındığında erkek kalıp kullanılan numunelerin kalınlıklarına göre minimum 0,03 mm maksimum ise 0,3 mm daha ince olduğu tespit edilmiştir. 10. ölçüm noktasından 28. ölçüm noktalarında kalınlıkları, diğer erkek kalıp ile üretilmiş numunelere göre minimum 0,006 mm maksimum ise 0,07 mm daha fazla kalınlığı olduğu görülmektedir.

Dalma derinliği 45 mm, erkek kalıp çapı 30 mm seçilen numunenin numarası 64'tür. 64 numaralı numunenin termal kamera görüntüleri incelendiğinde PVC levha yüzeyinde minimum 49,8 °C, maksimum 174,1 °C ve ortalama levha sıcaklığı 154,9 °C sıcaklıkta olduğu tespit edilmiştir.



Resim 4.9. 64 numaralı numune ısıtılma sıcaklık dağılımı

Resim 4.7. ile resim 4.10. karşılaştırıldığında 40 numaralı numunenin ve 64 numaralı numuneden P1 yatay sıcaklık dağılımının 10 °C yüksek olduğu gözlemlenmiştir.



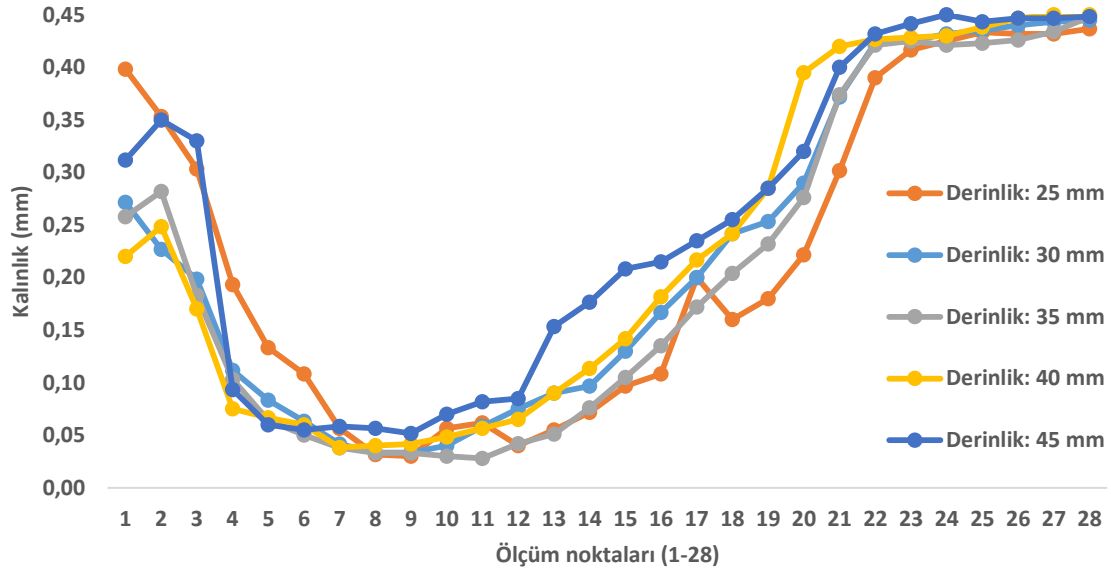
Resim 4.10 64 numaralı numune dikey ve yatay sıcaklık dağılımı



#### 4.1.6 Erkek kalıp çapı 30 mm

Erkek kalıp çapı 30 mm olarak sabit tutulurken 25 mm, 30 mm, 35 mm, 40 mm ve 45 mm olan dalma derinliği seçilerek numuneler oluşturulmuştur. Oluşturulan her numuneden çeyrek dilim parça kesilip 28 farklı noktadan kalınlık dağılımı incelenmiştir.

Çizelge 4.6. Erkek kalıp çapı 30 mm için farklı dalma derinliği değerlerinde karşılaştırmalı kalınlık dağılımı

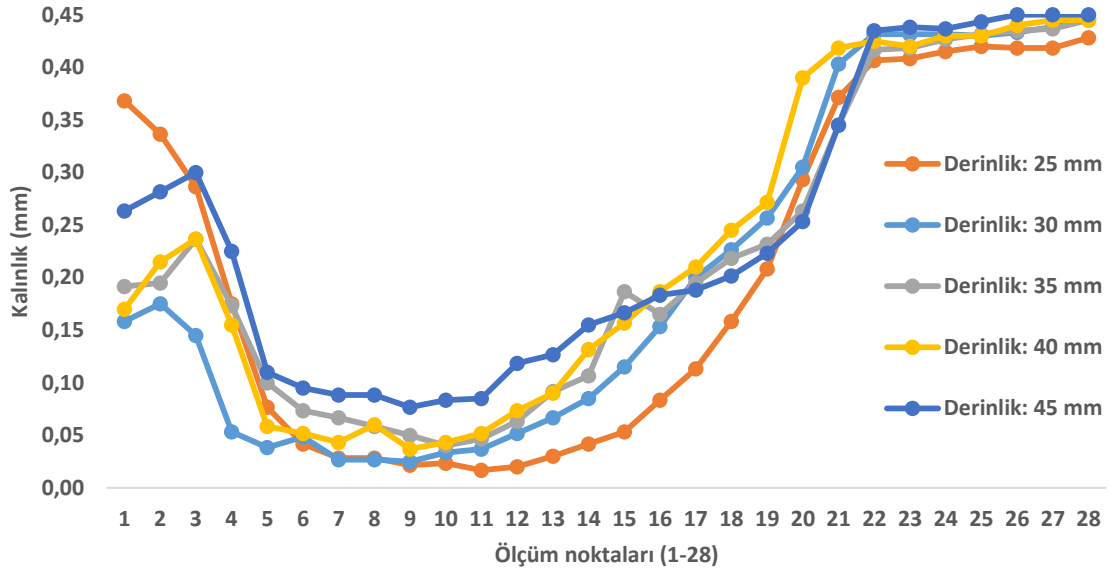


#### 4.1.7 Erkek kalıp çapı 35 mm

Erkek kalıp çapı 35 mm olarak sabit tutulurken 25 mm, 30 mm, 35 mm, 40 mm ve 45 mm olan dalma derinliği kullanılarak numuneler oluşturulmuştur. Oluşturulan her numuneden çeyrek dilim parça kesilip 28 farklı noktadan kalınlık dağılımı incelenmiştir.

Çizelge 4.1.6 ile çizelge 4.1.7 dalma derinliği 25 mm kullanılarak oluşturulan numunelerin kalınlık dağılımı incelenmiştir. Dalma derinliği 25 mm seçilen, erkek kalıp çapı 30 mm'den 35 mm'ye çıkartılan numuneler karşılaştırıldığında; 1. ölçüm noktasından 18. ölçüm noktasına kadar kalınlık ölçümleri minimum 0,01 mm maksimum ise 0,06 mm daha ince olduğu tespit edilmiştir. 19. ölçüm noktasından 22. ölçüm noktalarında et kalınlık ölçümleri ise erkek kalıp çapı 35 mm kullanılan numunelerde minimum 0,01 mm maksimum ise 0,07 mm daha kalın olduğu kayıt altına alınmıştır. 23. ölçüm noktasından 28. ölçüm noktalarında kalınlık ölçümleri ise erkek kalıp çapı 35 mm kullanılan numunelerde minimum 0,01 mm maksimum ise 0,02 mm daha ince olduğu tespit edilmiştir.

Çizelge 4.7. Erkek kalıp çapı 35 mm için farklı dalma derinliği değerlerinde karşılaştırmalı kalınlık dağılımı



Dalma derinliği 30 mm kullanılarak erkek kalıp çapı 30 mm'den 35 mm'ye çıkartılan numuneler karşılaştırıldığında; 1. ölçüm noktasından 19. ölçüm noktasına kadar kalınlık ölçümleri minimum 0,005 mm maksimum ise 0,12 mm daha ince olduğu kayıt altına alınmıştır. 20. ölçüm noktasından 28. ölçüm noktasına kadar kalınlık ölçümleri minimum 0,005 mm maksimum ise 0,03 mm daha kalın olduğu kayıt altına alınmıştır.

Dalma derinliği 35 mm kullanılarak erkek kalıp çapı 30 mm'den 35 mm'ye çıkartılan numuneler karşılaştırıldığında; 1. ve 2. ölçüm noktalarında kalınlıkları minimum 0,06 mm maksimum ise 0,08 mm daha ince olduğu tespit edilmiştir. 3. ölçüm noktasından 18. ölçüm noktasına kadar kalınlıklar minimum 0,01 mm maksimum ise 0,07 mm daha yüksek olduğu kayıt altına alınmıştır. 19. ölçüm noktasından 28. ölçüm noktasına kadar kalınlık ölçümleri incelendiğinde, minimum 0,01 mm maksimum ise 0,03 mm daha düşük kalınlığa sahip olduğu tespit edilmiştir.

Dalma derinliği 40 mm kullanılarak erkek kalıp çapı 30 mm'den 35 mm'ye çıkartılan numuneler karşılaştırıldığında; 1. ve 2. ölçüm noktalarında kalınlıkları minimum 0,03 mm maksimum ise 0,05 mm daha düşük olduğu tespit edilmiştir. 3. ve 4. ölçüm noktalarında kalınlıkları minimum 0,03 mm maksimum ise 0,05 mm daha yüksek kalınlığa sahip olduğu tespit edilmiştir. 5. Ölçüm noktasından 28. ölçüm noktasına kadar minimum 0,009 mm maksimum ise 0,03 mm daha düşük kalınlığa sahip olduğu tespit edilmiştir.

Dalma derinliği 45 mm seçilen, erkek kalıp çapı 30 mm'den 35 mm'ye çıkartılan numuneler karşılaştırıldığında; 1. 2. ve 3. lüm noktalarında kalınlıkları minimum 0,03 mm maksimum ise 0,07 mm daha düşük kalınlığa sahip olduğu tespit edilmiştir. 4. lüm noktasından 12. lüm noktasına kadar kalınlık ölçümleri minimum 0,002 mm maksimum ise 0,13 mm daha yüksek kalınlığa sahip olduğu kayıt altına alınmıştır. 13. lüm noktasından 28. lüm noktasına kadar kalınlık ölçümleri minimum 0,01 mm maksimum ise 0,07 mm daha düşük olduğu kayıt altına alınmıştır.

#### **4.1.8 Erkek kalıp çapı 40 mm**

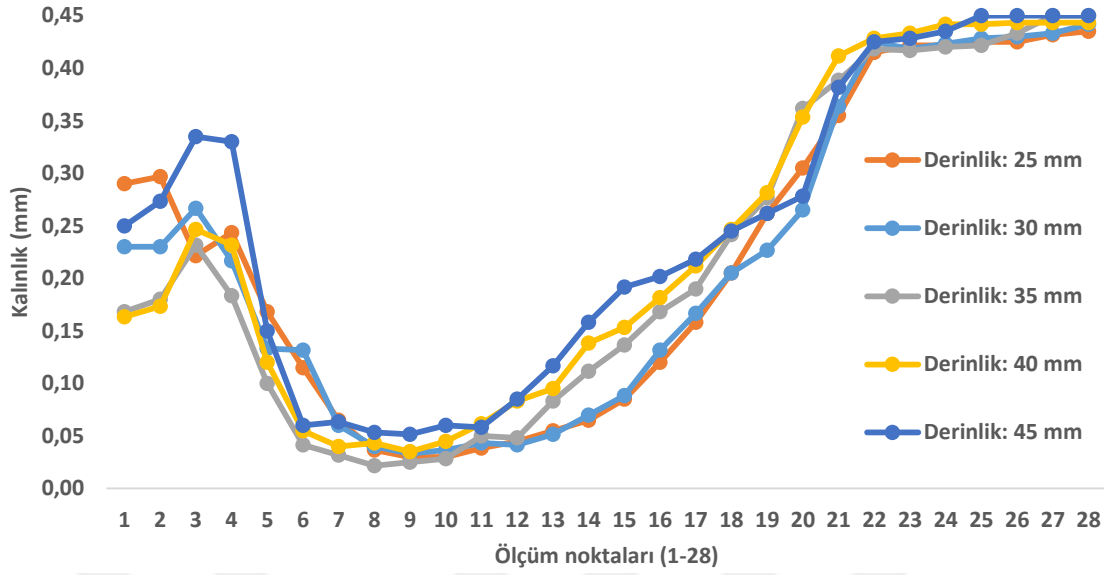
Erkek kalıp çapı 40 mm olarak sabit tutulurken 25 mm, 30 mm, 35 mm, 40 mm ve 45 mm olan dalma derinliği kullanılarak numuneler oluşturulmuştur. Oluşturulan her numuneden çeyrek dilim parça kesilip 28 farklı noktadan kalınlık dağılımı incelenmiştir.

Çizelge 4.1.7 ile izelge 4.1.8 dalma derinliği 25 mm kullanılarak oluşturulan numunelerin kalınlık dağılımı incelenmiştir. Dalma derinliği 25 mm kullanılarak erkek kalıp çapı 35 mm'den 40 mm'ye çıkartılan numuneler karşılaştırıldığında; 1. 2. ve 3. lüm noktalarında kalınlıkları minimum 0,04 mm maksimum ise 0,07 mm daha düşük kalınlığa sahip olduğu tespit edilmiştir. 4. lüm noktasından 28. lüm noktasına kadar kalınlıkların minimum 0,01 mm maksimum ise 0,06 mm daha fazla olduğu kayıt altına alınmıştır.

Dalma derinliği 30 mm seçilen, erkek kalıp çapı 35 mm'den 40 mm'ye çıkartılan numuneler karşılaştırıldığında; 1. lüm noktasından 11. lüm noktasına kadar kalınlıklar minimum 0,01 mm maksimum ise 0,15 mm daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. 12. lüm noktasından 28. lüm noktasına kadar kalınlıkların minimum 0,01 mm maksimum ise 0,04 mm daha düşük olduğu kayıt altına alınmıştır.

Dalma derinliği 35 mm seçilen, erkek kalıp çapı 35 mm'den 40 mm'ye çıkartılan numuneler karşılaştırıldığında; 1. lüm noktasından 28. lüm noktasına kadar kalınlık ölçümleri minimum 0,01 mm maksimum ise 0,12 mm daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.

Çizelge 4.8. Erkek kalıp çapı 40 mm için farklı dalma derinliği değerlerinde karşılaştırmalı kalınlık dağılımı



Dalma derinliği 40 mm seçilen, erkek kalıp çapı 35 mm'den 40 mm'ye çıkartılan numuneler karşılaştırıldığında; 1. ve 2. ölçüm noktalarında kalınlıkların minimum 0,01 mm maksimum ise 0,04 mm daha düşük olduğu kayıt altına alınmıştır. 3. ölçüm noktasından 19. ölçüm noktasına kadar kalınlıklar minimum 0,01 mm maksimum ise 0,09 mm daha yüksek olduğu görülmüştür. 20. ölçüm noktasında kalınlık ölçümü 0,04 mm daha düşük olduğu gözlenmiştir. 21. ölçüm noktasından 28. ölçüm noktasına kadar minimum 0,01 mm maksimum ise 0,04 mm daha ince kalınlık değerleri tespit edilmiştir.

Dalma derinliği 45 mm seçilen erkek kalıp çapı 35 mm'den 40 mm'ye çıkartılan numuneler karşılaştırıldığında; 1. ölçüm noktasından 14. ölçüm noktasına kadar kalınlıkları minimum 0,01 mm maksimum ise 0,04 mm daha düşük kalınlığa sahip olduğu kayıt altına alınmıştır. 15. ölçüm noktasından 28. ölçüm noktasına kadar kalınlıkların minimum 0,01 mm maksimum ise 0,04 mm daha yüksek olduğu kayıt altına alınmıştır.

#### 4.1.9 Erkek kalıp çapı 45 mm

Erkek kalıp çapı 45 mm olarak sabit tutulurken 25 mm, 30 mm, 35 mm, 40 mm ve 45 mm olan dalma derinlikleri kullanılarak numuneler oluşturulmuştur. Oluşturulan her numuneden çeyrek dilim parça kesilip 28 farklı noktadan kalınlık dağılımı incelenmiştir.

Çizelge 4.1.8 ile çizelge 4.1.9'da dalma derinliği 25 mm seçilerek oluşturulan numunelerin kalınlık dağılımı incelenmiştir. Dalma derinliği 25 mm seçilerek erkek kalıp çapı 40 mm'den 45 mm'ye çıkartılan numuneler karşılaştırıldığında; 1. ve 2. ölçüm noktalarında kalınlıkları minimum 0,01 mm maksimum ise 0,02 mm daha düşük olduğu

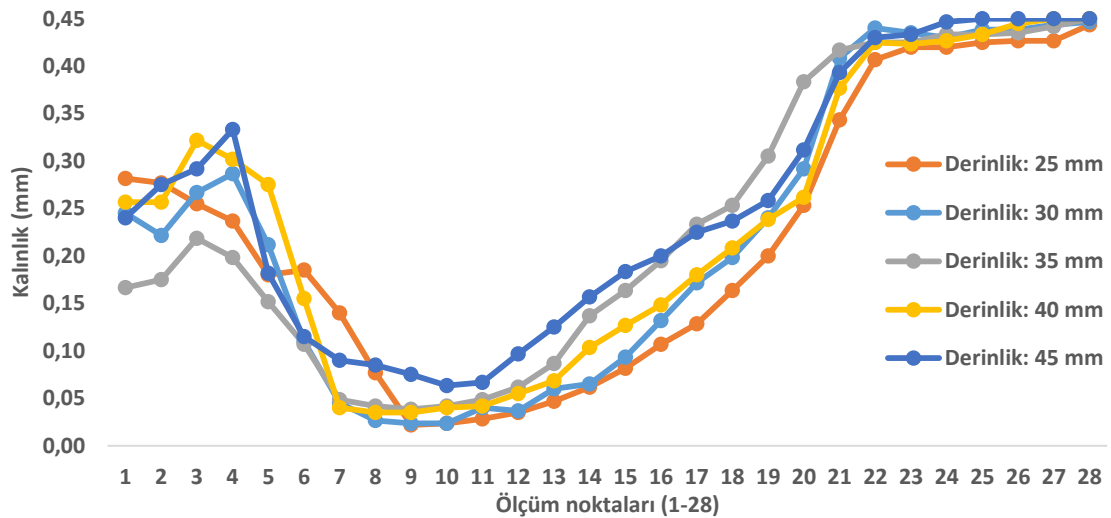
görülmektedir. 3. ölçüm noktasındaki kalınlığına bakıldığında 0,03 mm daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. 4. ölçüm noktasından 8. ölçüm noktasına kadar kalınlık ölçümleri minimum 0,01 mm maksimum ise 0,04 mm daha yüksek olarak kayıt altına alınmıştır. 9. ölçüm noktasından 28. ölçüm noktasına kadar kalınlık ölçümleri minimum 0,01 mm maksimum ise 0,06 mm daha düşük olduğu tespit edilmiştir.

Dalma derinliği 30 mm seçilerek, erkek kalıp çapı 40 mm'den 45 mm'ye çıkartılan numuneler karşılaştırıldığında; 1. ölçüm noktasında 0,01 mm daha yüksek kalınlığa sahip olduğu tespit edilmiştir. 2. ölçüm noktasında ise 0,01 mm daha düşük kalınlığa sahip olduğu görülmektedir. 3. ölçüm noktasından 5. ölçüm noktasına kadar kalınlıklar minimum 0,01 mm maksimum ise 0,07 mm daha yüksek olarak kayıt altına alınmıştır.

6. ölçüm noktasından 18. ölçüm noktasına kadar kalınlıklar minimum 0,01 mm maksimum 0,03 mm daha düşük değerde olduğu görülmektedir. 19. ölçüm noktasından 28. ölçüm noktasına kadar minimum 0,01 maksimum 0,04 mm daha yüksek olduğu görülmektedir.

Dalma derinliği 35 mm seçilerek erkek kalıp çapı 40 mm'den 45 mm'ye çıkartılan numuneler karşılaştırıldığında; 1. ölçüm 3. ölçüm noktasına kadar kalınlıklar minimum 0,01 mm maksimum 0,03 mm daha düşük olduğu tespit edilmiştir. 4. ölçüm noktasından 28. ölçüm noktasına kadar kalınlıklar minimum 0,01 mm maksimum 0,06 mm daha yüksek olduğu kayıt altına alınmıştır.

Çizelge 4.9. Erkek kalıp çapı 45 mm için farklı dalma derinliği değerlerinde karşılaştırmalı kalınlık dağılımı



Dalma derinliği 40 mm seçilen erkek kalıp çapı 40 mm'den 45 mm'ye çıkartılan numuneler karşılaştırıldığında; 1. lüm noktasından 10. lüm noktasına kadar kalınlıkların minimum 0,01 mm maksimum ise 0,15 mm daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Kalınlıkların, 11. lüm noktasından 28. lüm noktasına kadar minimum 0,01 mm maksimum 0,09 mm daha düşük olduğu grlmştir.

Dalma derinliği 45 mm seçilen, erkek kalıp çapı 40 mm'den 45 mm'ye çıkartılan numuneler karşılaştırıldığında; 1. lüm noktasından 4. lüm noktasına kadar kalınlıkların minimum 0,01 mm maksimum 0,04 mm daha düşük olduğu tespit edilmiştir. 5. lüm noktasından 18. lüm noktasına kadar kalınlıkların minimum 0,01 mm maksimum ise 0,12 mm daha yüksek olduğu kayıt altına alınmıştır. 19. ve 20. lüm noktalarındaki kalınlıklar 0,01 mm daha düşük tespit edilmiştir. 21. lüm noktasından 28. lüm noktasına kadar kalınlıkların minimum 0,01 mm maksimum ise 0,02 mm daha yüksek olarak llmştir.

#### **4.1.10 Erkek kalıp çapı 50 mm**

Erkek kalıp çapı 50 mm olarak sabit tutulurken 25 mm, 30 mm, 35 mm, 40 mm ve 45 mm olan dalma derinlik değerleri kullanılarak numuneler oluşturulmuştur. Oluşturulan her numuneden çeyrek dilim parça kesilip 28 farklı noktadan kalınlık dağılımı incelenmiştir.

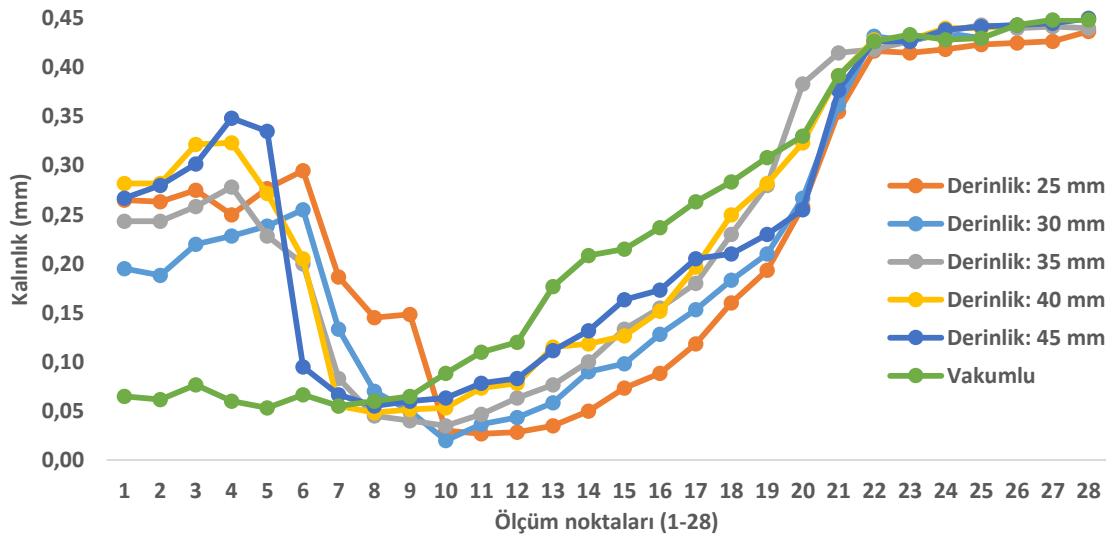
Çizelge 4.1.9 ile izelge 4.1.10 dalma derinliği 25 mm kullanılarak oluşturulan numunelerin kalınlık dağılımı incelenmiştir. Dalma derinliği 25 mm seçilen erkek kalıp çapı 45 mm'den 50 mm'ye çıkartılan numuneler karşılaştırıldığında; kalınlığın 1. ve 2. lüm noktalarında 0,02 mm daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. 3. lüm noktasından 10. lüm noktasına kadar kalınlıkların minimum 0,02 mm maksimum 0,12 mm daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. 11. lüm noktasından 28. lüm noktasına kadar kalınlıkların minimum 0,01 mm maksimum 0,02 mm daha düşük olduğu kayıt altına alınmıştır.

Dalma derinliği 30 mm seçilen erkek kalıp çapı 45 mm'den 50 mm'ye çıkartılan numuneler karşılaştırıldığında; 1. lüm noktasından 4. lüm noktasına kadar minimum 0,04 mm maksimum 0,06 mm daha düşük kalınlığa sahip olduğu gözlenmiştir. 5. lüm noktasından 12. lüm noktasına kadar kalınlıkların minimum 0,01 mm maksimum 0,14 mm daha yüksek olduğu kayıt altına alınmıştır. 13. lüm noktasından 28. lüm

noktasına kadar kalınlıkların minimum 0,01 mm maksimum ise 0,04 mm daha düşük olduğu tespit edilmiştir.

Dalma derinliği 35 mm seçilen erkek kalıp çapı 45 mm'den 50 mm'ye çıkartılan numuneler karşılaştırıldığında; 1. ölçüm noktasından 9. ölçüm noktasına kadar kalınlıkların minimum 0,02 mm maksimum 0,08 mm daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. 10. ölçüm noktasından 28. ölçüm noktasına kadar kalınlıkların minimum 0,01 mm maksimum 0,05 mm daha düşük olduğu tespit edilmiştir.

Çizelge 4.10. Erkek kalıp çapı 50 mm için farklı dalma derinliği değerlerinde karşılaştırmalı kalınlık dağılımı



Dalma derinliği 40 mm seçilen erkek kalıp çapı 45 mm'den 50 mm'ye çıkartılan numuneler karşılaştırıldığında; 1. ölçüm noktasından 28. ölçüm noktasına kadar kalınlıkların minimum 0,01 mm maksimum 0,06 mm daha yüksek olduğu kayıt altına alınmıştır.

Dalma derinliği 45 mm seçilen erkek kalıp çapı 45 mm'den 50 mm'ye çıkartılan numuneler karşılaştırıldığında; 1. ölçüm noktasından 5. ölçüm noktasına kadar kalınlıklar minimum 0,01 mm maksimum 0,15 mm daha yüksek değere sahiptir. 6. ölçüm noktasından 28. ölçüm noktasına kadar kalınlıkların minimum 0,01 mm maksimum ise 0,06 mm daha düşük olduğu tespit edilmiştir.

Çizelge 4.1.10 incelendiğinde erkek kalıp kullanmadan vakum etkisi altında imal edilen numunelerin 1. ölçüm noktasından 7. ölçüm noktasına kadar kalınlık ölçümleri dikkate alındığında erkek kalıp kullanılan numunelerin kalınlıklarına göre minimum 0,01 mm

maksimum ise 0,22 mm daha düşük olduğu tespit edilmiştir. 9. ölçüm noktalarında 28. ölçüm noktasında kalınlıkların minimum 0,005 mm maksimum ise 0,12 mm daha yüksek olduğu kayıt altına alınmıştır.

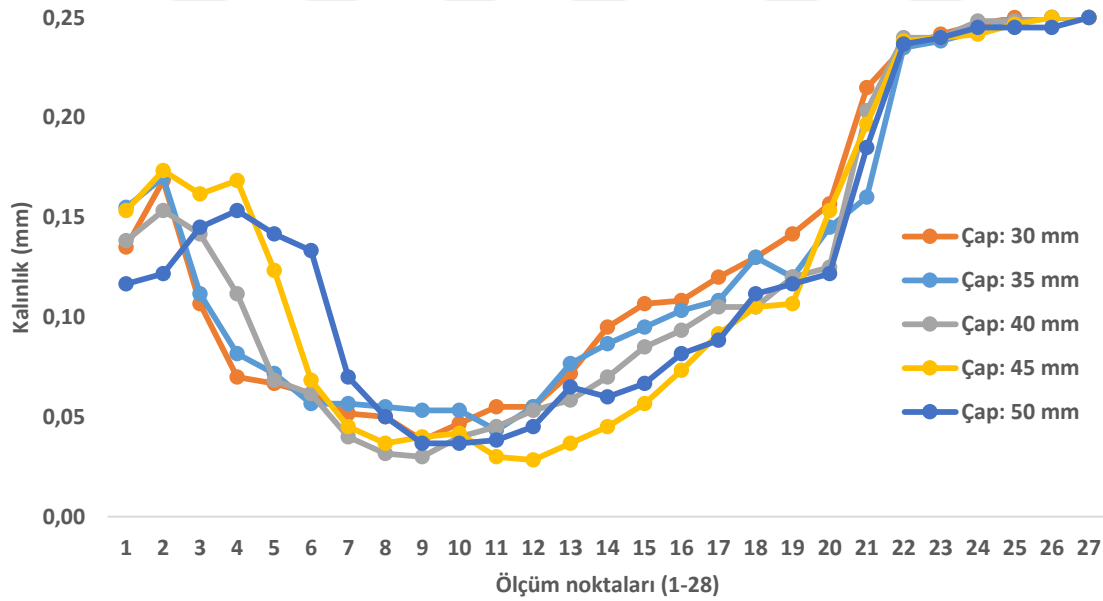
## 4.2. 0,25 mm Kalınlıktaki PVC Levha Numunelerin Değerlendirilmesi

### 4.2.1. Dalma derinlik burç uzunluğu 35 mm

Derinlik değeri 35 mm olarak sabit tutulurken 30 mm, 35 mm, 40 mm, 45 mm ve 50 mm olan erkek kalıp çapları kullanılarak numuneler oluşturulmuştur. Oluşturulan her numuneden çeyrek dilim parça kesilip 28 farklı noktadan kalınlık dağılımı incelenmiştir.

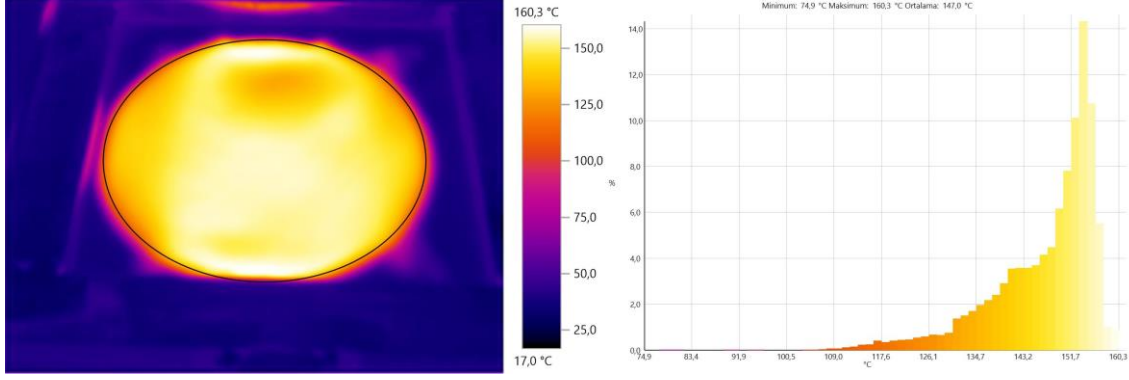
Numuneleri incelendiğinde dalma derinliği ve erkek kalıp çapı değişiminin numunelerin kalınlık dağılımına etkisinin dikkate değer sonuçlarının, 1. ölçüm noktasından 21. ölçüm noktasına kadar olduğu gözlemlenmiştir. 22. ölçüm noktasından 28. ölçüm noktalarındaki kalınlık değişimlerine dalma derinliği ve erkek kalıp çapı değişiminin etki etmediği kayıt altına alınmıştır.

Çizelge 4.11. Dalma derinliği 35 mm için farklı erkek kalıp çap değerlerinde karşılaştırmalı kalınlık dağılımı



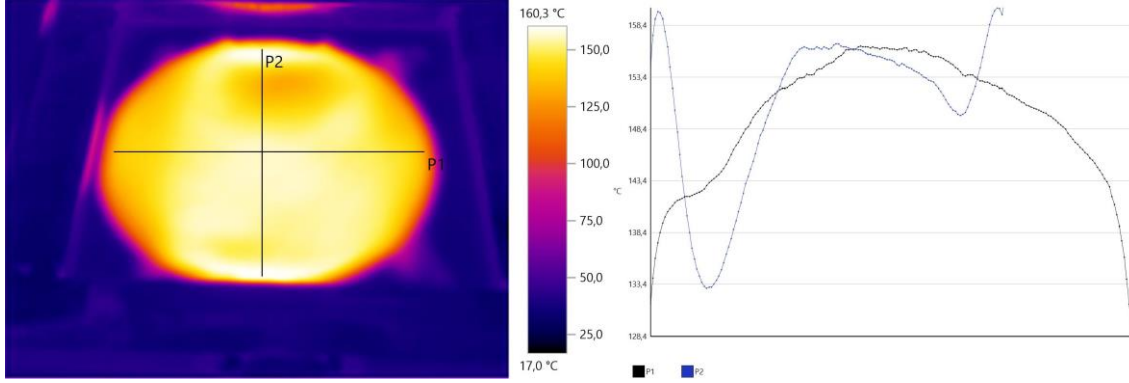
Dalma derinliği 35 mm, erkek kalıp çapı 40 mm seçilen numunenin numarası 88'dir. 88 numaralı numunenin termal kamera görüntüleri incelendiğinde ön ısıtma sıcaklık işleminde seramik ısıtıcılar 300 °C sıcaklığa ayarlandığında PVC levha yüzeyinde minimum 74,9 °C, maksimum 160,3 °C ve ortalama levha sıcaklığı 147 °C sıcaklıkta olduğu tespit edilmiştir.





Resim 4.11. 88 numaralı numune ısıll şekillendirme sıcaklık dağılımı

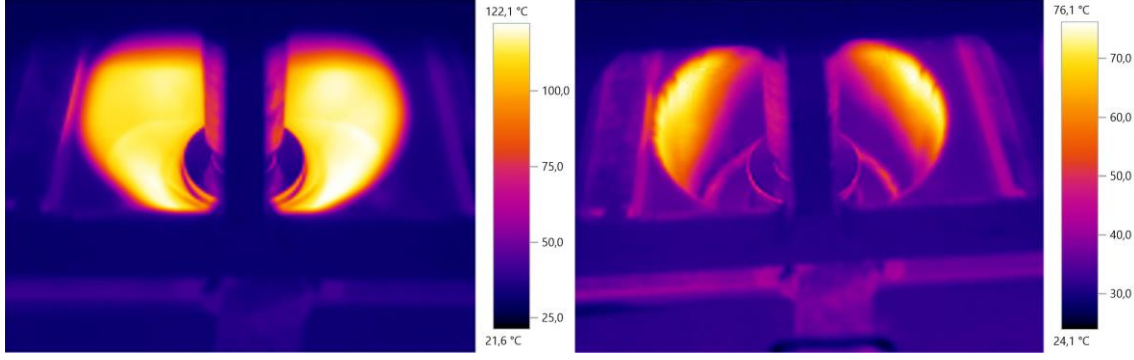
Isıtılan 0,25 mm kalınlığa sahip PVC levha yüzeyi, dikey ve yatay çizgilerle sıcaklık dağılımı incelendiğinde levhanın merkez dikey çizgilerde ortalama sıcaklık dağılımının 150 °C olduğu görülmüştür.



Resim 4.12. 88 numaralı numune dikey ve yatay sıcaklık dağılımı

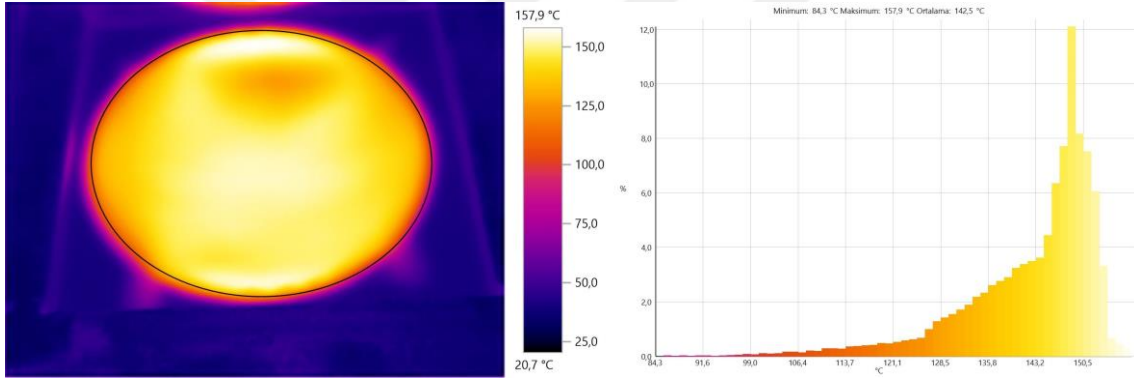
P1 yatay sıcaklık çizgisi ile P2 dikey sıcaklık çizgisi karşılaştırıldığında P2 dikey sıcaklık çizgisindeki sıcaklık dağılımının, P1 yatay sıcaklık çizgisine göre daha homojen dağıldığı tespit edilmiştir.

88 numaralı numunenin ön şekil verme işlemi sırasında erkek kalıbın termoplastik yüzeye temas ettiğindeki maksimum yüzey sıcaklığı 122,1 °C olduğu, levhaya vakum uygulanarak dişi kalıbın şeklini alması sağlandığında ise 76,1 °C sıcaklığa düştüğü gözlemlenmiştir.



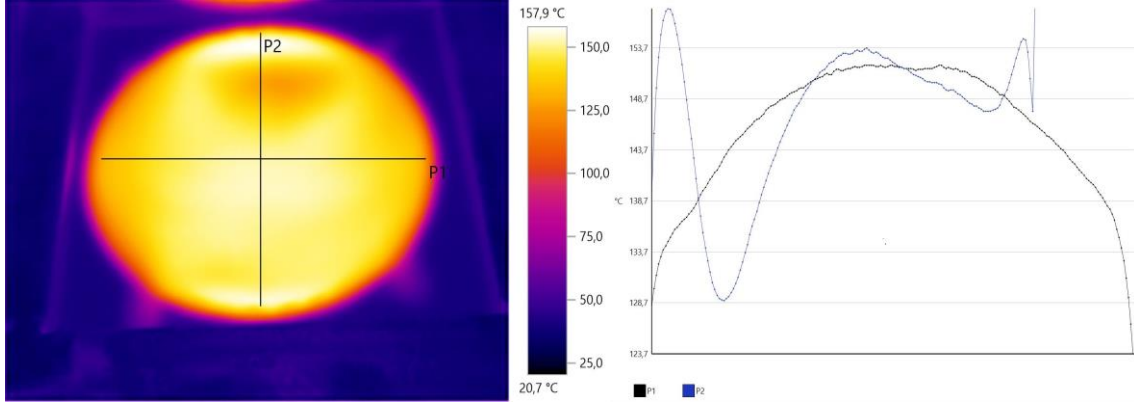
Resim 4.13. 88 numaralı numuneye erkek kalıbın termal etkisi

Dalma derinliği 35 mm, erkek kalıp çapı 50 mm seçilen numunenin numarası 94'dür. 94 numaralı numunenin termal kamera görüntüleri incelendiğinde ön ısıtma sıcaklık işleminde seramik ısıtıcılar 300 °C sıcaklığa ayarlandığında PVC levha yüzeyinde minimum 84,3 °C, maksimum 157,9 °C ve ortalama levha sıcaklığı 142,5 °C sıcaklıkta olduğu tespit edilmiştir.



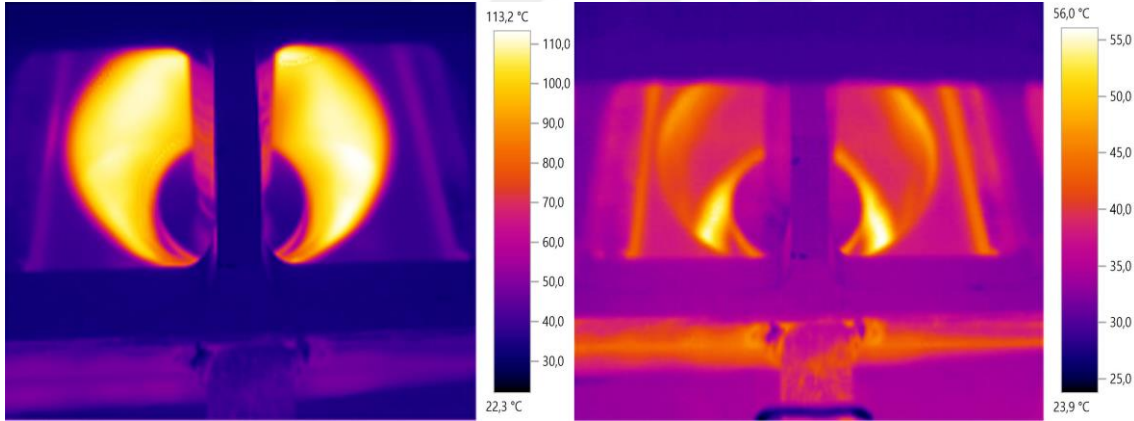
Resim 4.14. 94 numaralı numune ısıl şekillendirme sıcaklık dağılımı

Isıtılan 0,25 mm kalınlığa sahip PVC levha yüzeyini, dikey ve yatay çizgilerde sıcaklık dağılımı incelendiğinde levhanın merkez dikey çizgilerde ortalama sıcaklık dağılımının 150 °C olduğu görülmüştür. Resim 4.12 ile resim 4.15. incelendiğinde termoplastik levhanın maksimum sıcaklık noktasında 2,4 °C sıcaklık farkı olduğu gözlemlenmektedir.



Resim 4.15. 94 numaralı numune dikey ve yatay sıcaklık dağılımı

94 numaralı numunenin ön şekil verme işlemi sırasında erkek kalıbın termoplastik yüzeye temas ettiğiindeki maksimum yüzey sıcaklığı 113,2 °C olduğu, levhaya vakum uygulanarak dişi kalıbın şeklini alması sağlandığında ise 56 °C sıcaklığa düştüğü gözlemlenmiştir.



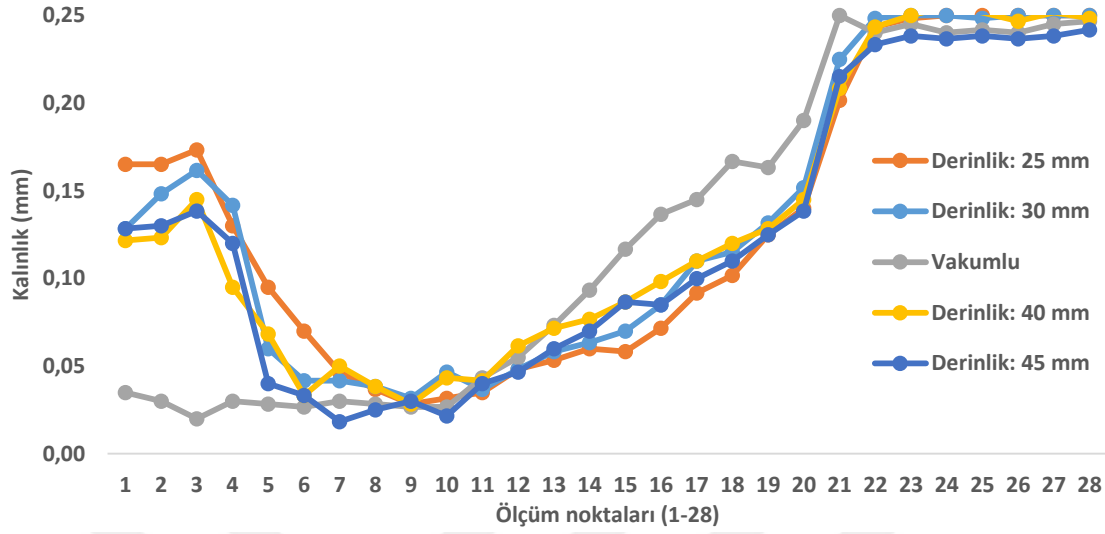
Resim 4.16. 94 numaralı numune erkek kalıbın termal etkisi

Resim 4.13 ile resim 4.16 incelendiğinde 88 numaralı numunenin 94 numaralı numuneye göre erkek kalıbın termoplastik levhaya temas ettiği anda yüzey sıcaklığı 8,9 °C daha yüksek yüzey sıcaklığına sahip olduğu kayıt altına alınmıştır.

#### 4.2.2. Erkek kalıp çapı 40 mm

Erkek kalıp çapı 40 mm olarak sabit tutulurken 25 mm, 30 mm, 40 mm ve 45 mm olan dalma derinliği kullanılarak numuneler oluşturulmuştur. Oluşturulan her numuneden çeyrek dilim parça kesilip 28 farklı noktadan kalınlık dağılımı incelenmiştir.

Çizelge 4.12. Erkek kalıp çapı 40 mm için farklı dalma derinliği değerlerinde karşılaştırmalı kalınlık dağılımı

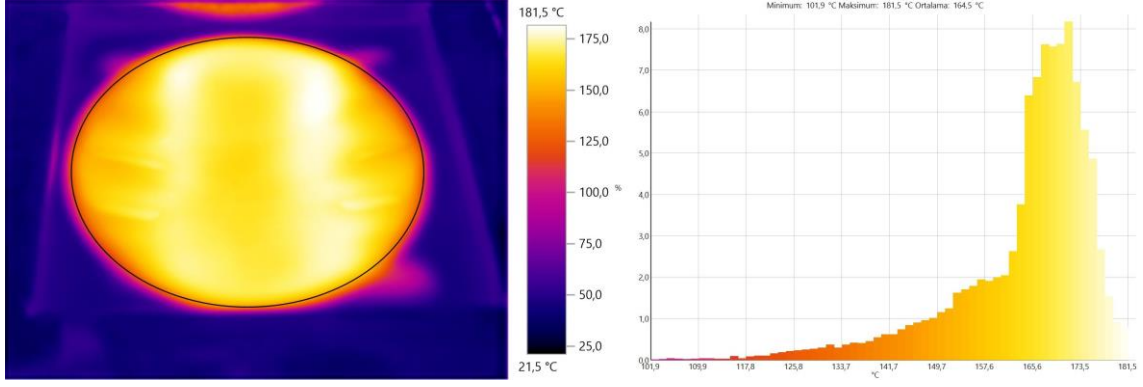


Erkek kalıp çapı ve dalma derinliği seçilmeden sadece vakum uygulanarak dişi kalıbın şeklini alan numunelerin kalınlık dağılımlarını incelediğimizde (çizelge 4.2.2) erkek kalıp çapı ve dalma derinliği seçilen numunelere göre 1. ölçüm noktasından 6. ölçüm noktasına kadar kalınlıkların daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. 13. ölçüm noktasından 28. ölçüm noktasına kadar genel olarak daha yüksek kalınlığa sahip olduğu kayıt altına alınmıştır.

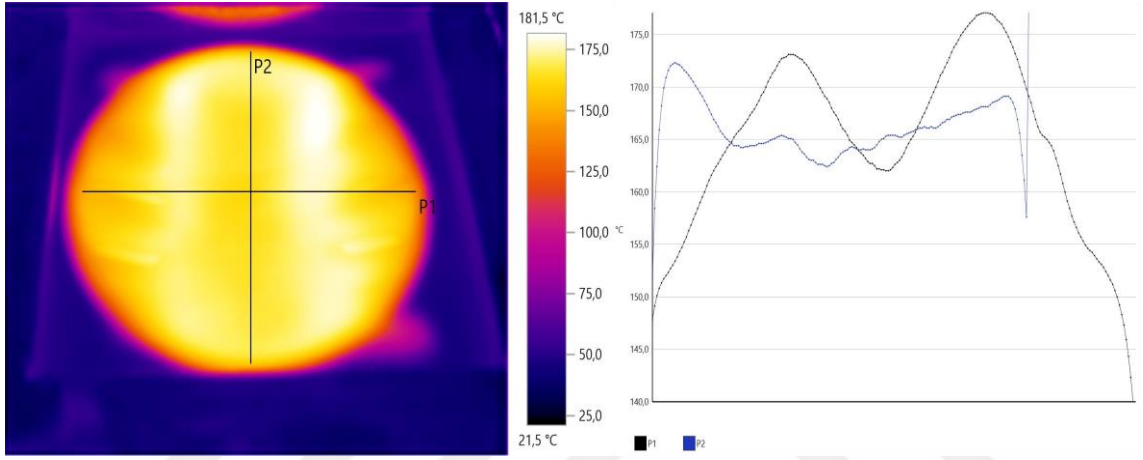
Dalma derinliği 40 mm, erkek kalıp çapı 40 mm seçilen numunenin numarası 103'dür. 103 numaralı numunenin termal kamera görüntüleri incelendiğinde ön ısıtma sıcaklık işleminde seramik ısıtıcılar 300 °C sıcaklığa ayarlandığında PVC levha yüzeyinde minimum 101,9 °C, maksimum 181,5 °C ve ortalama levha sıcaklığı 164,5 °C sıcaklıkta olduğu tespit edilmiştir.

Isıtılan 0,25 mm kalınlığa sahip PVC levha yüzeyini, dikey ve yatay çizgilerde sıcaklık dağılımı incelendiğinde; P2 dikey sıcaklık çizgisinde yüzey sıcaklığı ortalama olarak 168 °C, P1 yatay sıcaklık çizgisinde ise yüzey sıcaklığı ortalama 160 °C'dir.

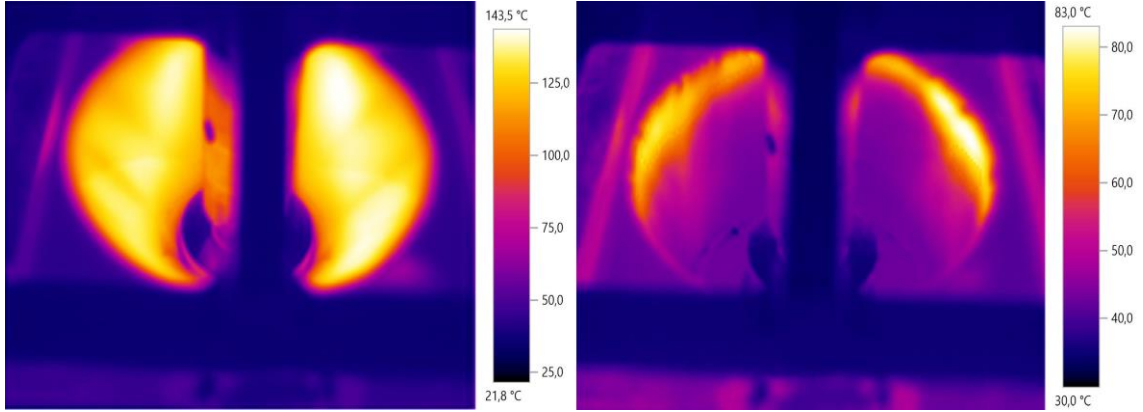
103 numaralı numunenin ön şekil verme işlemi sırasında erkek kalıbın termoplastik yüzeye temas ettiğiandeki maksimum yüzey sıcaklığı 143,5 °C olduğu, levhaya vakum uygulanarak dişi kalıbın şeklini alması sağlandığında ise 83 °C sıcaklığa düştüğü gözlemlenmiştir.



Resim 4.17. 103 numaralı numune ısıtma sıcaklık dağılımı



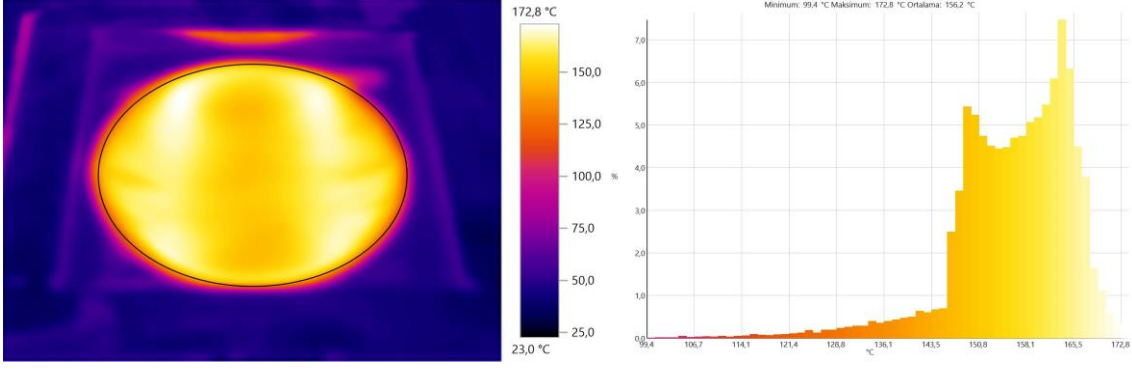
Resim 4.18. 103 numaralı numune dikey ve yatay sıcaklık dağılımı



Resim 4.19. 103 numaralı numune erkek kalıbın termal etkisi

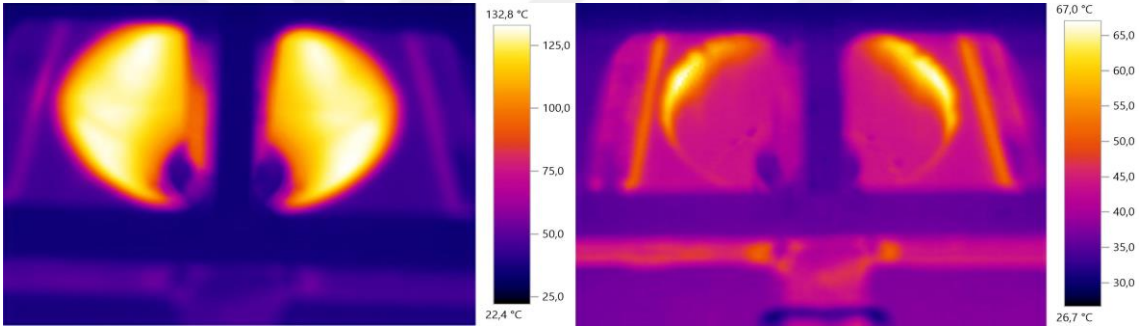
Dalma derinliği 45 mm, erkek kalıp çapı 40 mm seçilen numunenin numarası 106'dır. 106 numaralı numunenin termal kamera görüntüleri incelendiğinde ön ısıtma sıcaklık işleminde seramik ısıtıcılar 300 °C sıcaklığa ayarlandığında PVC levha yüzeyinde minimum 99,4 °C, maksimum 172,8 °C ve ortalama levha sıcaklığı 156,2 °C sıcaklıkta olduğu tespit edilmiştir.





Resim 4.20. 106 numaralı numune ısıll şekillendirme sıcaklık dağılımı

106 numaralı numunenin ön şekil verme işlemi sırasında erkek kalıbın termoplastik yüzeye temas ettiğindeki maksimum yüzey sıcaklığı 132,8 °C olduğu, levhaya vakum uygulanarak dişi kalıbın şeklini alması sağlandığında ise 67 °C sıcaklığa düştüğü gözlemlenmiştir.



Resim 4.21. 106 numaralı numune erkek kalıbın termal etkisi

### 4.3. 0,90 mm Kalınlıktaki Bambu Özlü Levha Numuneleri

% 40 oranda bambu içeren filament % 33 doluluk oranıyla 3D (üç boyutlu) yazıcı kullanılarak 0,90 mm kalınlığında 15 x 15 cm ölçülerinde plakalar halinde numuneler üretilmiştir.

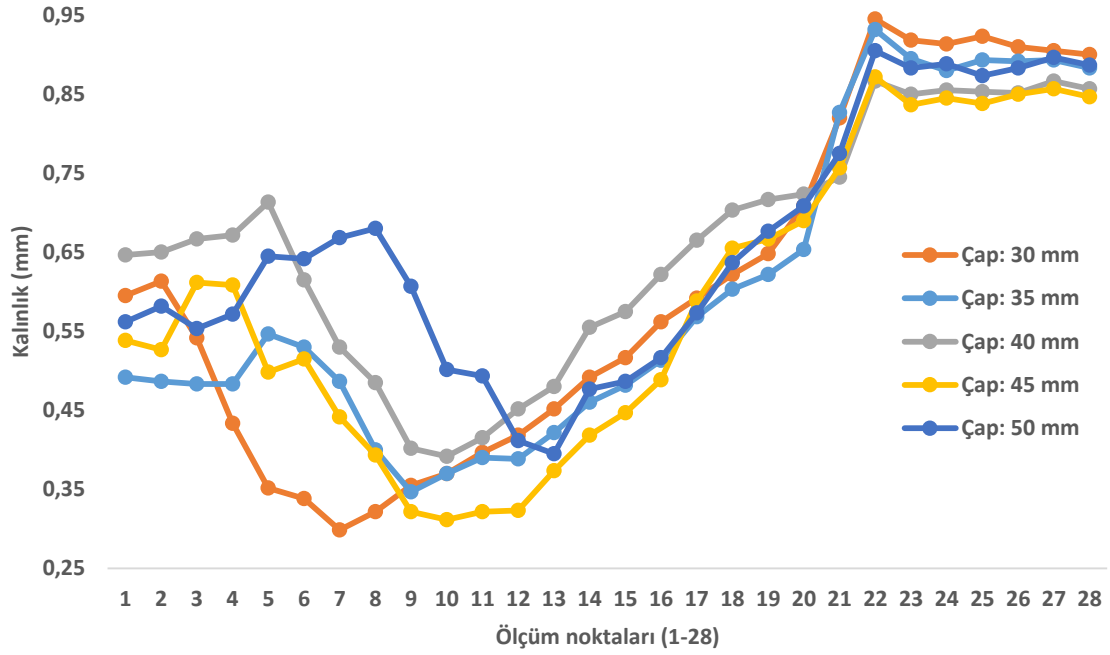
#### 4.3.1 Dalma derinlik burç uzunluğu 35 mm

0,90 mm kalınlığındaki % 40 oranında bambu takviyeli PLA levhanın vakum ve ısı ile şekil verme işleminde dalma derinliği 35 mm seçilmiştir. Derinlik 35 mm olarak sabit tutulurken 30 mm, 35 mm, 40 mm, 45 mm ve 50 mm olan erkek kalıp çapları kullanılarak numuneler oluşturulmuştur. Oluşturulan her numuneden çeyrek dilim parça kesilip 28 farklı noktadan kalınlık dağılımı incelenmiştir.

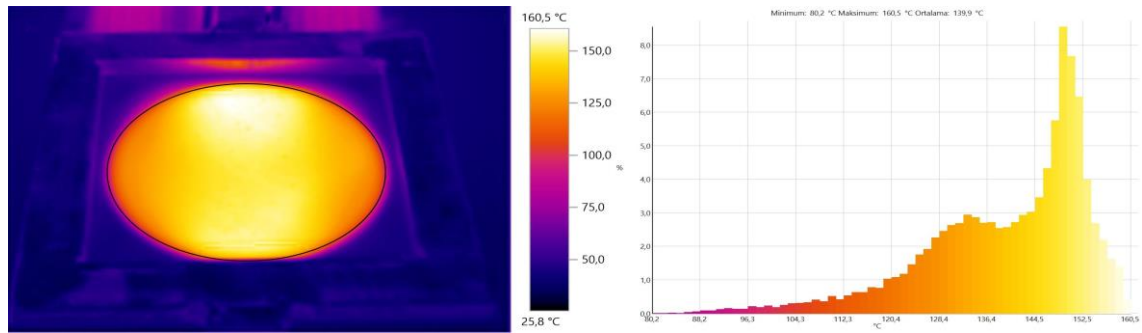
Çizelge 4.13. incelendiğinde erkek kalıp çapı 35 mm seçilen numuneler ile erkek kalıp çapı 50 mm seçilen numuneler karşılaştırıldığında 1. ölçüm noktasından 12. Ölçüm

noktasına kadar kalınlıkların minimum 0,01 mm maksimum 0,13 mm daha yüksek olduğu görülmektedir. Erkek kalıp çapı 30 mm ile erkek kalıp çapı 40 mm kullanılan numunelerin kalınlıkları karşılaştırıldığında; 1. ölçüm noktasından 28. ölçüm noktasına kadar minimum 0,02 maksimum ise 0,36 mm kalınlığa sahip olduğu tespit edilmiştir.

Çizelge 4.13. Dalma derinliği 35 mm için farklı erkek kalıp çap değerlerinde karşılaştırmalı kalınlık dağılımı

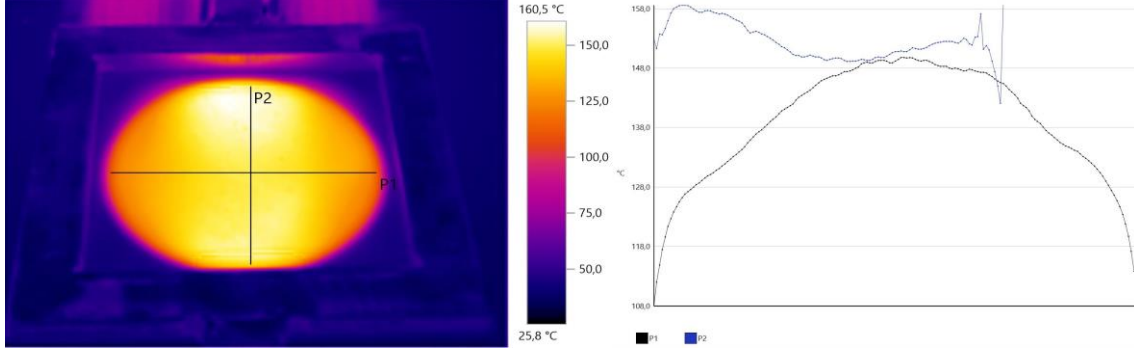


Dalma derinliği 35 mm, erkek kalıp çapı 40 mm seçilen numunenin numarası 119'dür. 119 numaralı numunenin termal kamera görüntüleri incelendiğinde ön ısıtma sıcaklık işleminde seramik ısıtıcılar 300 °C sıcaklığa ayarlandığında PLA levha yüzeyinde minimum 80,2° C, maksimum 160,5 °C ve ortalama levha sıcaklığı 139,9 °C olduğu tespit edilmiştir.



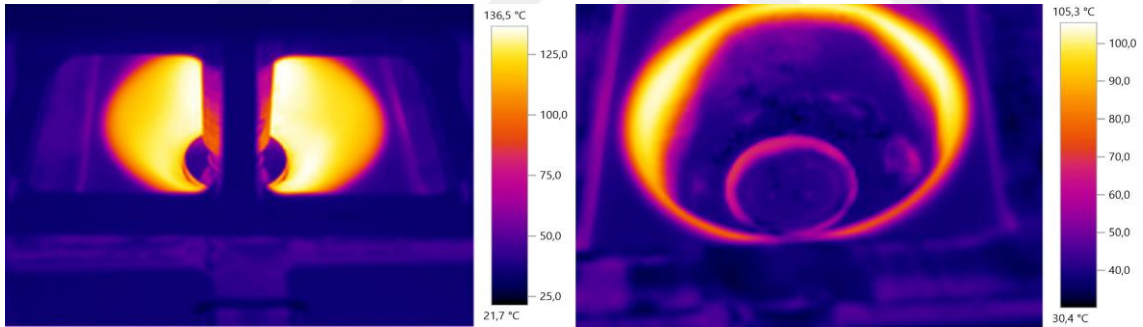
Resim 4.22. 119 numaralı numune ısıll şekillendirme sıcaklık dağılımı

119 numaralı numunenin yatak ve dikey sıcaklık dağılımları incelendiğinde, P1 yatak sıcaklık dağılımı 110 °C maksimum ise 150 °C sıcaklığa ulaştığı görülmektedir. Sıcaklık dağılımının homojen olmaması, 40 °C sıcaklık farkına bağlanabilir.



Resim 4.23. 119 numaralı numune dikey ve yatay sıcaklık dağılımı

106 numaralı numunenin ön şekil verme işlemi sırasında erkek kalıbın termoplastik yüzeye temas ettiği maksimum yüzey sıcaklığı 136,5 °C olduğu, levhaya vakum uygulanarak dişi kalıbın şeklini alması sağlandığında ise 105,3 °C sıcaklığa düştüğü gözlemlenmiştir.



Resim 4.24. 119 numaralı numune erkek kalıbın termal etkisi

### 4.3.2 Erkek kalıp çapı 40 mm

Erkek kalıp çapı 40 mm olarak sabit tutulurken 25 mm, 30 mm, 40 mm ve 45 mm olan dalma derinlikleri kullanılarak numuneler oluşturulmuştur. Oluşturulan her numuneden çeyrek dilim parça kesilip 28 farklı noktadan kalınlık dağılımı incelenmiştir.

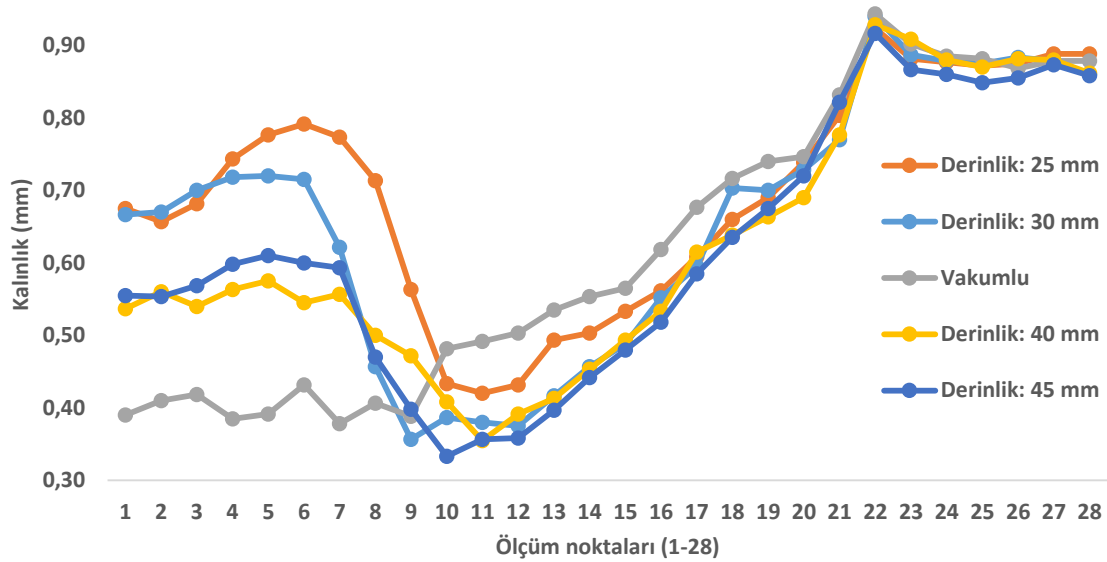
Çizelge 4.14. incelendiğinde 1. ölçüm noktasından 7. ölçüm noktasına kadar kalınlıkların, dalma derinliği (25 mm, 30 mm ve 45 mm) arttıkça azalmaktadır.

1. ölçüm noktasından 9. ölçüm noktasına kadar kalınlık dağılımı incelendiğinde vakum ile şekil verilen numunelerin kalınlıkları, erkek kalıp ile şekillendirilen numunelere göre

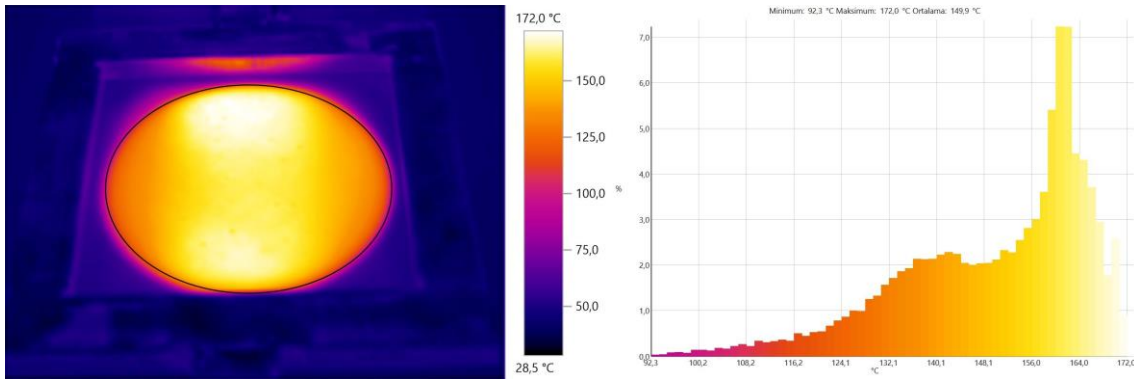


minimum 0,01 maksimum ise 0,28 mm daha düşük olduğu görülmektedir. 10. ölçüm noktasından 21. ölçüm noktasına kadar kalınlıkların vakum ile oluşturulan numunelerde minimum 0,03 mm maksimum ise 0,07 mm kalın olduğu tespit edilmiştir.

Çizelge 4.14. Erkek kalıp çapı 40 mm için farklı dalma derinliği değerlerinde karşılaştırmalı kalınlık dağılımı



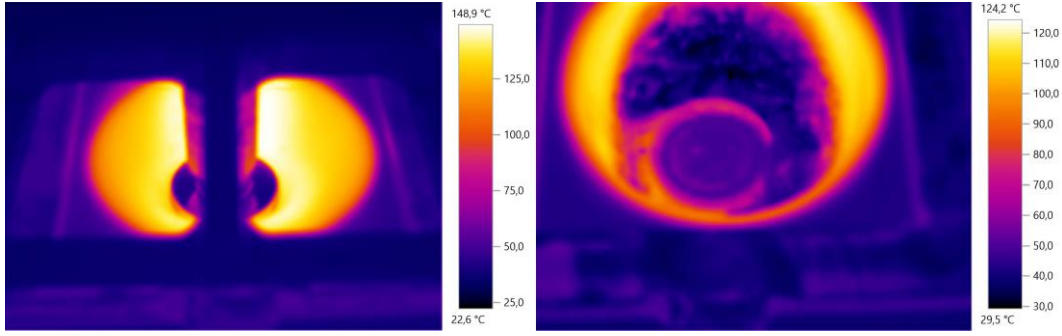
Dalma derinliği 40 mm, erkek kalıp çapı 40 mm seçilen numunenin numarası 134'dür. 134 numaralı numunenin termal kamera görüntüleri incelendiğinde ön ısıtma sıcaklık işleminde seramik ısıtıcılar 300 °C sıcaklığa ayarlandığında PLA levha yüzeyinde minimum 92,3 °C, maksimum 172 °C ve ortalama levha sıcaklığı 149,9 °C olduğu tespit edilmiştir.



Resim 4.25. 134 numaralı numune ısıtma şekillendirme sıcaklık dağılımı

134 numaralı numunenin ön şekil verme işlemi sırasında erkek kalıbın termoplastik yüzeye temas ettiği maksimum yüzey sıcaklığı 148,9 °C olduğu, levhaya vakum

uygulanarak diři kalıbın řeklini alması sađlandıđında ise 124,2 °C sıcaklıđa dűřtűđű gűzlemlenmiřtir.



Resim 4.26. 134 numaralı numune erkek kalıbın termal etkisi



## 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Yapılan çalışmada erkek kalıp kullanılarak oluşturulan numunelerin ve sadece vakum kullanılarak şekillendirilen numunelerin kalınlık dağılımları karşılaştırılmıştır. Erkek kalıp ve dalma derinlik burcu kullanılan numunelerin, sadece vakum uygulanarak oluşturulan numunelere göre 1. ölçüm noktasından 9. ölçüm noktasına kadar nihai ürün kalınlıkları daha kalın olduğu, 10. ölçüm noktasından 21. ölçüm noktasına kadar nihai ürün kalınlıkları daha ince olduğu tespit edilmiştir. 24° C sıcaklıkta olan erkek kalıp çapı, ön şekil verme işlemi sırasında ısıtılmış termoplastik yüzeye temas ettiğinde ısı transferinden dolayı termoplastik yüzeyin incelmeye izin vermeden yüzeyi katılaştırır. Bu sebeple erkek kalıp çapı ve dalma derinlik burcu kullanılan numunelerin 1. ölçüm noktasından 9. ölçüm noktasına kadar alınan ölçümlerde yüzey kalınlığı, sadece vakum işlemi uygulanan numunelere göre daha kalındır.

Dalma derinliği ve erkek kalıp çapının artırılması veya azaltılması sonucunda elde edilen nihai ürünün kalınlık dağılımına etki ettiği kayıt altına alınmıştır. Numuneler üzerinden 28 farklı ölçüm noktasından alınan veriler incelendiğinde her bir ölçüm noktasında kalınlıkların farklı olduğu tespit edilmiştir.

Erkek kalıp çapı veya dalma derinliği arttırıldığında veya azaltıldığında ürünü kalınlığı ölçüm alınan bazı noktalarda artış gösterirken bazı noktalarda azalma göstermektedir. Bu sebeple dalma derinliği ve erkek kalıp çapı ölçüsünün arttırılması veya azaltılması sonucunda ürün kalınlığı etkisi genellemeye bağlanamadığını göstermiştir.

Deneyler sonucunda erkek kalıp çapı 40 mm seçilen dalma derinliği arttıkça (25 mm, 30 mm,45 mm) 1. ölçüm noktasından 7. ölçüm noktasına kadar kalınlığının azaldığı 13. ölçüm noktasından 21. Ölçüm noktasına kadar kalınlığın arttığı tespit edilmiştir. Bunun sonucunda, belirli erkek kalıp çapları ve dalma derinlik değerleri için bir genelleme yapılabilir.

Numunelerin kalınlık dağılımları incelendiğinde 22. ölçüm noktasından 28. ölçüm noktasına kadar kalınlıklar 0,02 mm'den fazla değişmediği kayıt altına alınmış, bu sonuç erkek kalıp çapı ve dalma derinlik değerlerinin 22. ölçüm noktasından 28. ölçüm noktasına kadar kalınlık değişimine kayda değer bir etki etmediğini göstermektedir.

Tez çalışmamız kapsamında, Wang, Hamila ve Boisse (2013) lif takviyeli termoplastik malzemeler için ısıl şekillendirme simülasyonu yaptığı gibi % 40 bambu özlü PLA ve

PVC plastik esaslı malzemeler için simülasyon yapılarak istenilen kalınlık dağılımına göre değişken parametrelerin doğru seçilmesine yardımcı bir çalışma yapılabilir. Ağırlıkça % 40 bambu özlü PLA filament ile 3D (üç boyutlu) yazıcı kullanılarak üretilen levhanın vakum ve ısı ile Şekil verme işlemiyle ısıll Őekillendirmeye uygun olduğu görölmüştür.

Termoplastik levhaların ısıll Şekillendirme sürecinde sıcaklık dağılımları ve termal kamera görüntüleri incelendiğinde numunelerin ön ısıtma aşamasında homojen sıcaklık dağılımına sahip olmadığı görölmüştür. Levhaların ön ısıtma aşamasında her bir noktada sıcaklığın eşit dağılmasını sağlayabilmek için homojen ısıtma işleminin iyileştirilmesi adına Schmidt, Maoult ve Monteix (2003) deney sonucunda tasdiklenen kızıl ötesi seramik ısıtıcılar yerine halojen lambaların kullanılması değerlendirilebilir.

Yaptığımız deney çalışmasındaki vakum ve ısı ile Şekil verme parametrelerine ilave olarak Morales ve diğerleri (2014) yaptıklarına benzer olarak dişi kalıp malzemesi değiştirilerek kalınlık dağılımına etkisi üzerinde araştırma yapılabilir.

## KAYNAKLAR

- Bhattacharyya, D., Bowis, M., Jayaraman K.,** (2003). Thermoforming woodfibre–polypropylene composite sheets. *Composites Science and Technology*, 353-365.
- Boronat, T., Fombuena, V., Garcia-Sanoguera, D., Sanchez-Nacher, L., Balart, R.** (2015). Development of a biocomposite based on green polyethylene biopolymer and eggshell. *Materials and Design*, 177–185.
- Bravo, A., Toubal, L., Koffi, D., Erchiqui F.** (2015). Development of novel green and biocomposite materials: Tensile and flexural properties and damage analysis using acoustic emission. *Materials and Design*, 16–28.
- Bravo, A., Toubal, L., Koffi, D., Erchiqui F.** (2018). Gear fatigue life and thermomechanical behavior of novel green and bio-composite materials VS high-performance thermoplastics. *Polymer Testing*, 403- 414.
- Engelmann, S.** (2012). *Advanced Thermoforming: Methods, Machines and Materials, Applications and Automation.* WILEY.
- Evlen, H., Özdemir, M., Çalışkan, A.,** (2019). Doluluk oranlarının PLA ve PET malzemelerin mekanik özellikleri üzerine etkileri. *Politeknik Dergisi*, 1031-1037
- Faruka, O., Bledzka, A. K., Fink, H. P., Saind M.** (2012). Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000–2010 in *Polymer Science. Progress in Polymer Science*, 1552– 1596.
- Florian, J.** (1996). *Practical Thermoforming: Principles and Applications.* CRC Press.
- Gonzalez-Ausejo, J., Sanchez-Safont, E., Lagaron, J. M., Olsson, R. T., Gamez-Perez, J., Cabedo, L.** (2017). Assessing the thermoformability of poly(3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate)/poly(acid lactic) blends compatibilized with diisocyanates. *Polymer Testing*, 235-245.
- Gruenwald, G.** (1998). *Thermoforming A Plastics Processing Guide.* CRC Press.
- Hottlea, T. A., Bilec, M. M., Landisc A. E.** (2017). Biopolymer production and end of life comparisons using life cycle assessment. *Resources, Conservation and Recycling*, 295–306.
- Hsiao, S. W., Kikuchi, W.** (1999). Numerical analysis and optimal design of composite thermoforming process. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 1-34.
- Klein, P.** (2009). *Fundamentals of Plastics Thermoforming (Synthesis Lectures on Materials Engineering).* Morgan and Claypool Publishers.
- Kovalcik, A., Machovsky, M., Kozakova, Z., Koller M.** (2015). Designing packaging materials with viscoelastic and gas barrier properties by optimized processing of poly(3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate) with lignin. *Reactive and Functional Polymers*, 25–34.

- Kuciel, S., Jakubowska, P., Kuzniar, P.** (2014). A study on the mechanical properties and the influence of water uptake and temperature on biocomposites based on polyethylene from renewable sources. *Composites: Part B*, 72-77.
- Lima, L. T., Aurasb, R., Rubinob, M.** (2008). Processing technologies for poly(lactic acid). *Progress in Polymer Science*, 820–852.
- Morales, R. A., Candal, M. V., Santana, O. O., Gordillo, A., Salazar, R.** (2014). Effect of the thermoforming process variables on the sheet friction coefficient. *Materials and Design*, 1097–1103.
- Rapa, M., Mitelut, A. C., Tanase, E. E., Grosu, E., Popescu, P., Popa, M. E., Rosnes, J. T., Sivertsvik, M., Darie-Nita, R. N., Vasile C.** (2016). Influence of chitosan on mechanical, thermal, barrier and antimicrobial properties of PLA-biocomposites for food packaging. *Composites Part B*, 112-121.
- Rosen, S. R.** (2002). *Thermoforming: Improving Process Performance*. Society of Manufacturing Engin.
- Sánchez-Safonta, E. L., Aldureida, A., Lagarónb, J. M., Gámez-Pérez, J., Cabedo, L.** (2018). Biocomposites of different lignocellulosic wastes for sustainable food packaging applications. *Composites Part B*, 215–225.
- Schmidt, F.M., Le Maout, L., Monteix S.** (2003). Modelling of infrared heating of thermoplastic sheet used in thermoforming process. *Journal of Materials Processing Technology*, 225–231.
- Schwarzmann, P.** (2019). *Thermoforming A Practical Guide*. Hanser.
- Sehaqui, H., Allais, M., Zhou, Q., Berglund, L. A.** (2011). Wood cellulose biocomposites with fibrous structures at micro- and nanoscale. *Composites Science and Technology*, 382-387.
- Suwanmanee, U., Varabuntoonvit, V., Chaiwutthinan, P., Tajan, M., Mungcharoen, T., Leejarkpai, T.** (2013). Life cycle assessment of single use thermoform boxes made from polystyrene (PS), polylactic acid, (PLA), and PLA/starch: cradle to consumer gate. *Int J Life Cycle Assess*, 401-417
- Throne, J. L.** (1996). *TECHNOLOGY OF THERMOFORMING*. Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG.
- Throne, J. L.** (2008). *Understanding Thermoforming*. HANSER.
- Türk Plastik Sanayicileri Araştırma Geliştirme ve Eğitim Vakfı.** (2019). *Türkiye Plastik Ambalaj Sektör İzleme Raporu – 2019/6*. İstanbul: Türk Plastik Sanayicileri Araştırma Geliştirme ve Eğitim Vakfı.
- Wang, P., Hamila, N., Boisse P.** (2013). Thermoforming simulation of multilayer composites with continuous fibres and thermoplastic matrix. *Composites: Part B*, 127–136.