

## Ekleme İmalat Yöntemi ile Üretilmiş PLA Levhaların Bağlantı Dayanımları: İndüksiyonla Isıtma ve Yapıştırıcı Teknolojilerinin Karşılaştırılması




\*Makale Bilgisi / Article Info

Alındı/Received: 19.04.2024

Kabul/Accepted: 10.06.2024

Yayımlandı/Published: 20.08.2024

### Joint Strength of PLA Sheets Produced by Additive Manufacturing: Comparison of Induction Heating and Adhesive Technologies

Mustafa ACAROĞLU , Özkan ÖZ\* , Fatih Huzeyfe ÖZTÜRK 

Karabük Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Endüstriyel Tasarım Mühendisliği Bölümü, Karabük, Türkiye

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

#### Öz

Bu çalışmada indüksiyonlu ısıtma ve endüstriyel yapıştırıcı kullanılarak hazırlanan termoplastik malzemeli bağlantıların dayanımları deneysel olarak belirlenmiştir. Bağlantılarda kullanılan Polilaktik Asit (PLA) levhalar 3B yazıcı kullanılarak üretilmiş ve yapıştırma ve indüksiyonlu ısıtma yöntemleri ile birleştirilmiştir. İndüksiyonlu ısıtma prosesinde, bindirme bölgesine farklı geometrilerde (tel ve levha) iletken malzeme yerleştirilmiştir. Yapıştırıcı ile birleştirme yönteminde bindirme yüzeylerinde siyanoakrilat endüstriyel yapıştırıcı kullanılmıştır. Her iki yöntem ile hazırlanan bağlantıların dayanımlarını belirlemek için çekme testleri uygulanmıştır. İndüksiyonlu ısıtma prosesinde iletken malzeme olarak levha, 3 tel ve 5 tel kullanılması durumunda bağlantı hasar yükleri sırasıyla, 1003 N, 1393 N ve 2057 N olarak ölçülmüştür. Yapıştırıcı bağlantıda hasar yükü 2378 N'a ulaşmıştır. Deneysel sonuçlar, indüksiyonlu ısıtma yönteminde bindirme bölgesinin tamamında levha yerine farklı sayılarda tel kullanımının daha uygun olduğunu göstermiştir. Ayrıca, indüksiyonlu ısıtmada 5 tel ile ulaşılan bağlantı dayanım değerinin, yapıştırıcı kullanılarak hazırlanan bağlantı dayanım değerine yakın olması, bu yöntemin yapıştırıcı bağlantılara önemli bir alternatif olabileceğini göstermiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Basit bindirmeli bağlantı; Bağlantı dayanımı; İndüksiyonlu ısıtma; Ekleme imalat.

#### Abstract

In this study, the strengths of thermoplastic joints prepared using induction heating and industrial adhesive were experimentally determined. The Polylactic acid (PLA) sheets used in the joints were produced with a 3D printer and joined using adhesive and induction heating. In the induction heating process, the susceptor with different geometries (wire and sheet) was placed in the overlap region. In the adhesive bonding method, cyanoacrylate industrial adhesive was used on the overlap surfaces. Tensile tests were performed to determine the strength of the joints prepared by both methods. In the case of using a sheet, 3 wires and 5 wires as susceptor in the induction heating process, the joint failure loads were obtained as 1003 N, 1393 N and 2057 N, respectively. In the case of adhesive joint, the failure load reached 2378 N. The experimental results showed that it is more appropriate to use different numbers of wires instead of plates in the entire overlap zone in the induction heating method. In addition, the fact that the joint strength value achieved with 5 wires in induction heating is close to the joint strength value prepared using adhesive showed that this method could be an important alternative to adhesively bonded joints.

**Keywords:** Single lap joint; Joint strength; Induction heating; Additive manufacturing.

#### 1. Giriş

Geleneksel birleştirme yöntemleri (perçinleme, kaynak, cıvata ve yapıştırma) endüstriyel ölçekte, polimer kompozitler, metal ve plastik ana malzeme gruplarında bağlantıların oluşturulması amacıyla günümüzde tercih edilmektedir. Avantaj ve dezavantajları göz önünde bulundurularak seçimi yapılan geleneksel birleştirme yöntemleri temel değişkenleri belli olan kendine özgü hesap yöntemleri bulunan güvenilir yöntemler olarak farklı alanlarda kullanılmaya ve araştırılmaya devam edilmektedir. Bu birleştirme yöntemlerinden yapıştırma,

farklı kimyasal kompozisyonlara sahip yapıştırıcıların ana malzeme gruplarına uygulanabilir olması ve diğer birleştirme yöntemleri ile kullanılabilmesi nedeniyle uygulamalarda önemli avantajlar sağlamaktadır. Özellikle, yapıştırıcı kimyasının değiştirilmesi ile farklı ortam koşullarına dayanıklı ürün çeşitliliğindeki artış, yapıştırıcı bağlantılara olan ilgiyi ve araştırmaları güncel tutmaktadır. Yapıştırıcı ile birleştirmede cıvata ve perçinleme yöntemlerinde delme işlemine bağlı ortaya çıkan gerilme yoğunluklu bölgeler meydana gelmez. Ayrıca, delme işlemi sonrası fiber yapısının bozulması,

bağlantının ağırlığının artması, kapsamlı işçilik ve zaman gereksinimleri gibi dezavantajlar ortadan kaldırılır. Ancak, yapıştırmanın gerçekleşeceği bağlantı yüzeylerinde ön hazırlık (temizleme ve pürüzlendirme) yapılmasının gerekliliği, farklı sabitleme kalıplarına ihtiyaç olması ve kullanılan yapıştırıcıların uzun kürleme süreleri bu yöntemin zorlukları olarak sıralanabilir (Ahmed vd., 2006; Rudnev vd., 2002). Bununla birlikte, yapıştırıcıların kürleme süresini kısaltabilecek hibrit yöntemler üzerinde çalışmalar artmakta ve yapıştırıcıların indüksiyonlu ısıtma ile hibrit kullanımı araştırılmaktadır. İndüksiyonlu ısıtma ile polimer esaslı malzemelerin birleştirilmesi, verimlilik, hız ve bölgesel enerji girişi açısından çeşitli avantajlar sunmaktadır. İndüksiyonla ısıtma, polimer matrisini veya yapıştırıcı içerisine gömülü ferromanyetik parçacıkların hızlı bir şekilde ısınmasını sağlayarak diğer ilgili alt katmanlar üzerindeki etkiyi en aza indiren temas gerektirmeyen yöntemdir (Liu vd., 2017). Bu yöntemde bindirme hattına yakın bölgeyi yerel olarak ve hızlı ısıtmak mümkündür (Baker vd., 1984; Mahdi vd., 2003; Schubbe ve Mall, 1999; Tsamasphyros vd., 2007; Yarlagadda vd., 2002)., Takviyeli yapıştırıcıları ısıtarak ve ısıyı yapıştırıcı katmana aktararak macun formundaki yapıştırıcıları kürlemek amacıyla indüksiyonlu ısıtmanın avantajlarından faydalanılmaktadır (Cebrián vd., 2014).

Polimer malzemelerin birleştirilmesi için indüksiyonlu ısıtmanın bağlantıda tekil kullanımı veya yapıştırıcı ile hibrit kullanılması, yapıştırıcının tekil olarak kullanıldığı durumlar veya ısıtma prensibine dayalı diğer birleştirme yöntemleri ile karşılaştırıldığında önemli avantajlar sunmaktadır. Direnç, kızılötesi veya konveksiyon gibi diğer yaygın yöntemler, ısıyı malzemenin yüzeyine uygulamakta ve istenen sıcaklığa ulaşmak için uzun süre gerektirmektedir ve bu süreçte yüzeyler aşırı ısınmaktadır (Jackowski vd., 2014). İndüksiyonlu ısıtmada birleştirilecek bölgede fiziksel temasa ihtiyaç yoktur. Bölgesel ısıtma parçada ısıdan etkilenen bölgelerin azalmasına yardımcı olur. Isıtmanın hızlı gerçekleşmesi, imalat süresini ve enerji sarfiyatını düşürür. Ancak, bağlantı dayanımını etkileyebilecek değişken sayısının (frekans, güç, basınç, ısıtma süresi, bobin geometrisi, malzeme özellikleri vb.) fazla olması nedeniyle, deneysel yaklaşıma dayalı ampirik çalışmalara ihtiyaç fazladır. Bununla birlikte, değişkenlerin etkilerinin belirlenmesi durumunda prosesin uygulama tekrarı kolaydır. Ek olarak, işlem sonrası temizleme işlemi diğer geleneksel yöntemlere göre nispeten daha kolaydır. Düşük zaman aralıklarında lokal ısıtma avantajı sağlayan bu yöntemin bağlantılarda kullanılabilirliğinin araştırılması ve değişkenlerin dayanıma olan etkilerinin tespit edilmesine

odaklanan deneysel çalışmalar, bu yöntemin güvenilirliğini ve kullanım alanlarının yaygınlaşmasına önemli katkılar sağlamaktadır.

(Jackowski vd., 2014), indüksiyon birleştirme tekniği ile hazırlanan karbon fiber takviyeli polifenilen sülfite bağlantılarda frekans, malzeme oryantasyonu ve bobin tasarımının etkisini incelemişlerdir. Bindirmeli bağlantı arayüzünde 300 °C'yi aşmayan sıcaklığa optimum şekilde ulaşmayı hedeflemişlerdir. Yoğunlaştırıcı iki taraflı dikey döngü tarzı bobinin, yüksek elektrik verimliliği ile bağlantının termal homojenliğine hızlı şekilde ulaşmak için en iyi performansa sahip olduğunu belirtmişlerdir.

(Al-Obaidi vd., 2021), bazalt elyaf takviyeli polimer kompozitleri birleştirmek için indüksiyonlu ısıtma, somun, civata ve iki parçalı içi boş perçinleme kullanmışlardır. İndüksiyonlu bağlantılarda iki parçalı içi boş perçinlemeli bağlantıya göre daha yüksek bağlantı dayanımı elde etmişlerdir. Ayrıca, indüksiyonlu ısıtma sürecinde bağlantıda kompozit liflerin hasar görmediğini belirtmişlerdir.

(Rudolf vd., 2000), katmanlarda akım geçerken karbon fiberlerdeki joule kayıplarına dayanan indüksiyon ısıtma mekanizmasını incelemişlerdir. İş parçasının düzlemindeki ısıdan etkilenen alanın bobinin görüntüsünü yansıttığı bulmuşlardır. Bobin oryantasyonunun ısıtma hızını etkilemediğini ve kompozit katmanı istenen sıcaklığa ulaşmak için geçen sürenin artan frekansla dört kat azaldığını belirtmişlerdir.

(Severijns vd., 2017), çalışmalarında cam fiber destekli levhaların birleştirilmesinde kullandıkları demir parçacıkları ile karıştırılmış macun tipi epoksi yapıştırıcıyı indüksiyonlu ısıtma ile kürlemişlerdir. Deneysel çalışma sonuçları indüksiyon ile kürlenen yapıştırıcının fırın ortamında kürlenen yapıştırıcıya göre bağlantı dayanımını %6 oranında arttırdığını belirtmişlerdir.

(Ciardiello, 2021), basit bindirme geometrisine sahip çekme testi ile hasara uğratılmış polipropilen levha ve demir oksit parçacıklarıyla modifiye edilmiş yapıştırıcı ile hazırlanan bağlantıların tekrar birleştirilerek onarılması durumunda dayanım değerlerindeki değişimi araştırmışlardır. Hasarlı numunelerin birleştirilerek onarılmasında yapısında demir oksit parçacıkları bulunan yapıştırıcının indüksiyonlu ısıtma ile tekrar eritilmesi sağlanmıştır. Yapıştırıcı erime noktasına ulaştığında, bağlantıların üzerine yerleştirilen ağırlık ile basınç uygulanarak onarım işlemi tamamlanmıştır. Elde edilen sonuçlar indüksiyonlu ısıtma ile bağlantıların onarımının mümkün olduğunu göstermiştir. Tekrar birleştirilen

bağlantı dayanımlarının ilk kez üretildiği durumdaki bağlantı dayanım değerlerine %85'lik bir oranda yaklaştığı belirlenmiştir.

(Vattathurvalappil ve Haq, 2019), çalışmalarında cam fiber levhaları ferromanyetik nanopartiküller ile güçlendirilmiş Akrilonitril Bütadien Stiren (ABS) termoplastik yapıştırıcı ile birleştirmişlerdir. Bağlantıların hazırlanmasında geleneksel ısı işlem fırını ile indüksiyonlu ısıtma sistemleri kullanılmıştır. Ön ısıtma işlemi uygulanan levhalar ile indüksiyonla birleştirme işleminin, ısı işlem fırınında hazırlanan bağlantılara göre %15 daha yüksek pik yük değerlerine ulaştıklarını belirtmişlerdir. Termoplastik yapıştırıcıların sunduğu faydalardan tam anlamıyla yararlanmak için, indüksiyonla ısıtma işlemi parametrelerinin optimize edilmesi gerektiğini belirtmişlerdir.

(Saborowski vd., 2021), EN AW-6082 alüminyum alaşımını termal sprey ile kaplayarak cam elyaf takviyeli poliamid 6 veya polipropilenden oluşan bindirmeli bağlantı numuneleri üretmişlerdir. Bağlantıları ısıtma süresi açısından incelemişlerdir. Sonuçlar, kaplama sayesinde birleştirme işlemi için önemli ölçüde zaman tasarrufu ve güçlü yapışma elde edildiğini göstermiştir. Isıtma deneyleri, kaplama kalınlığının ısıtma hızı üzerinde belirgin bir etkisinin olduğunu ortaya koymuştur. Kalın kaplamanın, ince kaplamaya kıyasla elektromanyetik enerjinin daha fazla emilmesini sağladığı için daha yüksek ısıtma hızlarına yol açtığını ve ayrıca, bobin mesafesinin arttırılmasının ısıtma hızını büyük ölçüde düşürdüğünü belirtmişlerdir.



Şekil 1. ONX indüksiyon makinası.

Yapılan çalışmalar, indüksiyonla ısıtmanın hızlı ve bölgesel enerji girişini sağlaması, ferromanyetik partiküllerin verimli şekilde ısıtılması ve polimer-metal hibrit yapıların birleştirilebilmesi gibi avantajlarından dolayı geleneksel birleştirme yöntemlerine önemli bir alternatif veya

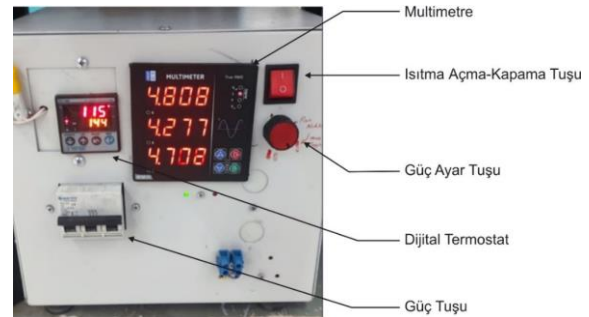
yardımcı yöntem olabileceğini göstermektedir. Bu çalışmada, indüksiyon ısıtma yöntemi kullanılarak 3B yazıcı ile hazırlanmış PLA levhalar, iletken tel ve levha kullanılarak birleştirilmiştir. Çalışmayı literatürdeki benzer çalışmalardan ayıran en önemli özelliği parçacık ve metal ağ formunda iletken tercih edilmemesi ve iletkenlerin yapıştırıcı ile beraber kullanılmamasıdır. PLA levhaların birleştirilmesinde basit bindirmeli bağlantı geometrisi tercih edilmiştir. Bu yöntemle hazırlanan bağlantı dayanım değerleri yapıştırıcı bağlantı dayanım değerleri ile karşılaştırılmıştır.

## 2. Materyal ve Metot

### 2.1. İndüksiyon Makinesi Hazırlık Aşaması

İndüksiyonlu birleştirme yönteminde ONX İndüksiyon Makinaları (Türkiye) tarafından üretilen, 30 kHz frekans ve 50 kW güç üretebilen indüksiyon makinası kullanılmıştır. Şekil 1'de firmanın üretimini yaptığı cihaz gösterilmektedir.

Firmanın metallerin ısıl işleminde kullanılmak amacıyla üretimini yaptığı indüksiyon makinasına deneysel çalışma parametrelerinin kontrolünü sağlayacak şekilde Volt(V), Amper(I) ve Frekans(F) değerlerini ölçmek için akım trafoları, multimetre ve dijital termostat eklenmiştir (Şekil 2).

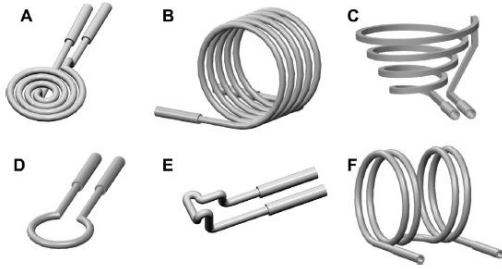


Şekil 2. ONX indüksiyon makinasına yapılan eklentiler.

Takılan multimetrenin akım değerlerine ulaşılabilmesi için çalışmada kullanılan akım trafoları sistemin ana girişine bağlanılarak R-S-T fazlarına ayrı bir şekilde bağlanmıştır. R fazı sıfır fazlı, S fazı 120°geri fazlı ve T fazı 120°ileri fazlı olması anlamına gelmektedir. Cihaza bağlanan akım trafolarının bağlantı uçları K1-L1 olacak şekilde multimetrede bulunan bağlantı noktasına bağlanmıştır. İndüksiyonla ısıtma işlemi sırasında numune üzerindeki sıcaklığı kontrol edebilmek ve ısıtma işlemini istenilen sıcaklık değerlerine ulaştıktan sonra durdurma işlemini yapabilecek röle ve SSR Çıkışlı Dijital Termostat (DT-48EM) kullanılmıştır.

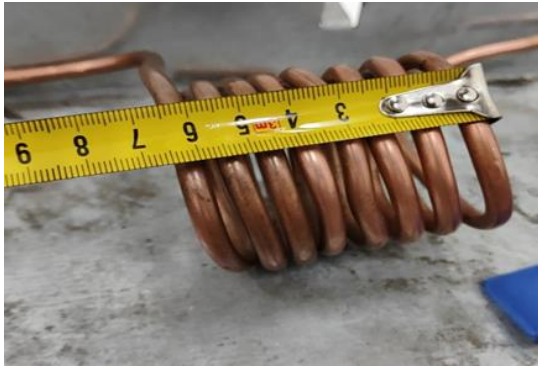
İndüksiyon ısıtma sistemi bobin, soğutma sistemi ve güç kaynağından oluşmaktadır. Bobin tasarımı verimli bir

İndüksiyonlu ısıtmanın gerçekleştirilmesi için gerekli en önemli faktörlerden biridir. Şekil 3'te farklı uygulamalar için indüksiyonlu ısıtma sisteminde kullanılan bobin geometrileri gösterilmiştir.



**Şekil 3.** Bobin geometrileri a) Yassı tabanlı bobin, b) Çok sarımlı helezon bobin, c) Konik bobin, d) Tek sarımlı bobin, e) İş parçasına adapte edilmiş düzensiz geometrili bobin, f) Çift sarımlı helezon bobin (Bayerl vd., 2014).

Şekil 3.b'de gösterilen çok sarımlı helezon bobin indüksiyonla ısıtma uygulamalarında en çok tercih edilen bobin tasarımıdır (Rapoport ve Pleshivtseva, 2006). Bobin malzemesi olarak ısıtmanın maksimum verimlilikte yapılabilmesi için bakır sıklıkla tercih edilmektedir. Bu çalışmada indüksiyonlu ısıtma ile yapılacak birleştirme işlemlerinde bağlantı bindirme alanını içine alacak şekilde sekiz sarımlı helezon bakır bobin hazırlanmıştır (Şekil 4).



**Şekil 4.** Helezon sarmal bakır bobin.

Şekil 4'te gösterilen helezon bobin için, 2,5 metre uzunluğunda, 0,8mm cidar kalınlığında ve 6,42 mm çapında bakır boru kullanılmıştır. Bakır boru, 5 cm çapında sarılarak 6,5 cm uzunluğunda olacak şekilde helezon bobin hazırlanmıştır. Düşük bağlantı hazırlama süreleri göz önüne alınarak indüksiyon makinasına bağlı bakır bobinin soğutulması, su yerine kompresörden elde edilen hava ile gerçekleştirilmiştir.

## 2.2. PLA Levhaların Üretilmesi

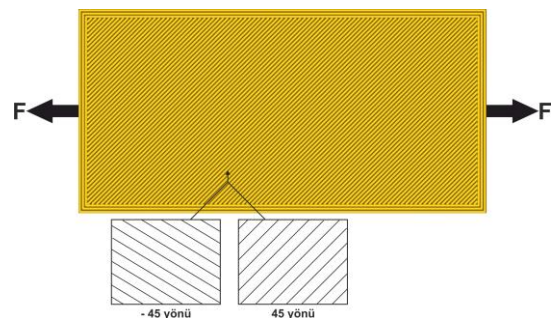
Bağlantılarda kullanılan PLA levhaların hazırlanmasında geri dönüştürülebilir özelliği olan FlashForge (Çin) firmasına ait 1.75 mm çapa sahip PLA filament tercih

edilmiştir. Kullanılan PLA filamentinin erime sıcaklığı 190–220°C aralığındadır (Öz ve Öztürk, 2023a). Levhaların yazdırılmasında Şekil 5'te gösterilen kartezyen tipi CCH X30 3B yazıcı kullanılmıştır. 3B yazdırma süreci, yazdırılacak parçanın bilgisayar destekli tasarım modelinin hazırlanması, hazırlanan model kullanılarak stereolitografi (STL) dosyasının oluşturulması, tercih edilen dilimleme programı ile yazdırma parametrelerini içeren "G" kodlarının tanımlanarak yazıcıya aktarılması aşamalarını içermektedir (Öz vd., 2023; Sürmen ve Güven, 2024; Yavuz ve Yildirim, 2023).



**Şekil 5.** CCH X30 3B Yazıcı.

Bağlantılarda kullanılacak levhalar, bilgisayar destekli tasarım programında (Solidworks) 3B olarak çizilmiş ve 3B tasarım dosyası dilimleme programında açılarak, oluşturulan G-kod dosyaları 3B yazıcıya aktarılmıştır. Bu çalışmada dilimleme programı olarak CURA tercih edilmiş ve PLA için dilimleme programı tarafından önerilen ve seçilen yazdırma parametreleri Çizelge 1'de gösterilmiştir. Literatürde en yaygın kullanılan ve dilimleme programları tarafından önerilen yazdırma açıları 45°/-45° (çapraz) ve 0°/90° (kafes) olarak sıralanabilir (Gopi Mohan vd., 2021). Parçaların yazdırılmasında, dilimleme programı tarafından önerilen ve yaygın olarak tercih edilen 45°/-45° (çapraz) yazdırma açısı kullanılmıştır (Şekil 6).



**Şekil 6.** Levhanın yazdırma yönü.

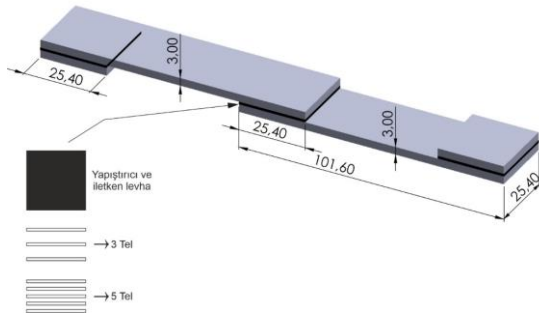
Bununla birlikte, katman kalınlığı, optimum değer olarak belirtilen 0.2 mm seçilmiştir (Demir ve Yüksel, 2022). Ayrıca, indüksiyon ve yapıştırıcı bağlantılarda kullanılan PLA levhalara, yazdırma işleminden sonra, herhangi bir yüzey hazırlama işlemi uygulanmamıştır.

**Çizelge 1.** Yazdırma Parametreleri (Öz ve Öztürk, 2023b).

Parametre	Değer
Yazdırma hızı (mm/s)	60
Katman kalınlığı (mm)	0.2
Yazdırma sıcaklığı (°C)	200
Tabla sıcaklığı (°C)	60
Nozul çapı (mm)	0.4
Yazdırma deseni	Çizgiler
Doluluk oranı (%)	100

### 2.3. Bağlantıların Hazırlanması

Yazdırılan levhaların birleştirilmesinde ASTM D3163-01 standardı kullanılmıştır. Şekil 7, bağlantı geometrisi ve dört farklı bağlantı konfigürasyonunu göstermektedir.



**Şekil 7.** Bağlantı geometrisi (Ölçüler mm cinsinden).

Bindirme bölgesinde yapıştırıcı, iletken levha, 3 ve 5 iletken tel ayrı ayrı kullanılmıştır. İletken tel için 1,20 mm çapa sahip siyah tavlı tel (SAE 1006 çeliği) kullanılmıştır. İletken levha olarak 1 mm kalınlığında DKP sac malzeme (S235 çeliği) tercih edilmiştir. Bununla birlikte, bağlantıda polimerin ergime sıcaklığına çıkartılması amacıyla metalik ağ, grafitik karbon fiberler veya ferromanyetik malzemeler farklı geometrielerde kullanılabilir (Şekil 8) (Zimmerer vd., 2019).



**Şekil 8.** İletken malzeme geometrileri (Zimmerer vd., 2019).

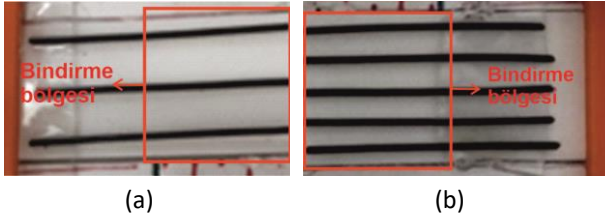
Çizelge 2'de üretilen bağlantıların kısaltmalarına yer verilmiştir. Çizelge 2'de 3T, 5T ve L kısaltmaları sırasıyla, 3 tel, 5 tel ve levha kullanılarak indüksiyonlu ısıtma ile hazırlanan bağlantıları ifade etmektedir. İndüksiyonlu ısıtmanın hangi frekans değerinde yapıldığını belirtmek amacıyla kısaltmaların sonuna frekans değerleri eklenmiştir. İsimlendirmede Y yapıştırıcı bağlantıyı ifade etmektedir. Örnek olarak, 5T-30, 30 kHz frekans değerinde, 5 tel ile indüksiyon yöntemi kullanılarak birleştirilmiş bağlantıyı ifade etmektedir. Çizelge 2'de belirtilen her parametre için 3 adet bağlantı numunesi üretilmiştir.

**Çizelge 2.** Yapıştırma ve indüksiyon ile hazırlanan bağlantıların kısaltmaları.

Kısaltma	Yöntem	Malzeme	Frekans (kHz)
Y	Yapıştırma	Siyanoakrilat yapıştırıcı	-
L-30	İndüksiyon	Levha	30
3T-30		3 Tel	
5T-30		5 Tel	
L-10		Levha	10
3T-10	3 Tel		
5T-10	5 Tel		

İndüksiyon ile birleştirme yönteminde elde edilen numunelerin bağlantı dayanım değerlerini ve hasar tiplerini karşılaştırmak için VODABOND 104 siyanoakrilat tipi yapıştırıcı ile hazırlanan bağlantıların üretimi yapılmıştır. Tel ile üretilen bağlantılarda bindirme bölgesinde bulunan 3 ve 5 tel konfigürasyonu için kalıp hazırlanmıştır. Kalıp yardımıyla teller arası mesafe bindirme genişliği boyunca eşit olacak şekilde bağlantılar üretilmiştir. Şekil 9'da tellerin bindirme bölgesine konumlandırılmaları gösterilmektedir. İndüksiyon kaynağında temel prensip, yüksek frekanslı elektromanyetik alan (EMA) oluşturmak üzere tasarlanan bir indüksiyon bobini kullanılarak iş parçasının ısıtılmasıdır. Elektriksel olarak iletken veya manyetik olarak duyarlı bir malzeme EMA ile çevrelendiğinde EMA'ya eşit frekansta girdap akımı "eddy current" üretilir. Oluşan bu akım iş parçasının sıcaklığını Joule etkisi ile artırır (Banik, 2018). Polimerik yapıya sahip malzemeler manyetikleşme özelliğine sahip olmadıklarından dolayı bağlantılarının yapılabilmesi için elektromanyetik enerjiyi soğurarak onu ısı enerjisine dönüştürebilen malzemeler ile kullanılması gerekir. Manyetikleşme yeteneklerine göre tüm malzemeler paramanyetik, diyamanyetik ve ferromanyetik olarak sınıflandırılabilir. Paramanyetik ve diyamanyetik malzemelerden farklı olarak, ferromanyetik malzemeler yüksek bağlı manyetik geçirgenlik değerine sahiptirler. Oda sıcaklığı koşullarında özellikle demir,

kobalt ve nikel elementleri ferromanyetik özellik sergilerler (Rapoport ve Pleshivtseva, 2006). Ferromanyetik bir malzemenin manyetikleşme özelliğini kaybettiği sıcaklık ise "Curie sıcaklığı" veya "Curie" noktası olarak tanımlanır. Curie sıcaklığı nikel için 353 ile 360 °C arasında değişirken, demir için 770 °C'dir (El-Mashad ve Pan, 2017). Bağlantıların hazırlanmasında PLA levha ergime sıcaklığı (210 °C) demir esaslı iletkenlerin manyetikleşme özelliğini değiştirebilecek curie sıcaklık değerinin (770 °C) oldukça altındadır.



Şekil 9. Bindirme bölgesi tel yerleşimi a) 3 tel ve b) 5 tel.

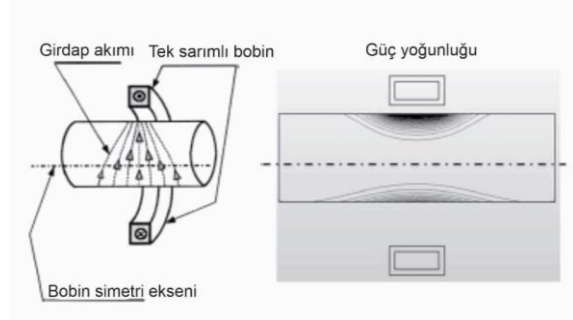
İndüksiyon ile birleştirme işlemi için hazırlanan numuneler helezon sarmal içine yerleştirilerek Çizelge 2'de belirtilen frekans değerlerinde ısıtma işlemine tabi tutulmuştur. Şekil 10, indüksiyon ile ısıtma işlemi sırasında oluşturulan bağlantı numunesini göstermektedir. Belirlenen frekans değerlerinde sıcaklık artışını takip etmek amacıyla levha ve tellerin görünen uç kısımlarına termokupl (K tipi) bağlanmıştır.



Şekil 10. İndüksiyon ile bağlantıların üretimi.

Yüksek frekans değerlerine ulaşan akımın indüksiyon bobin sargıları üzerinde oluşturduğu yakınlık ve deri etkileri indüksiyonlu ısıtma sistemlerinde karşılaşılan ve dikkat edilmesi gereken temel problemler arasında sıralanabilir (Altıntaş, 2016). Yakınlık etkisi bobin içerisindeki iş parçası eksenine ile sarmalın ekseninin üzerinde olmadığı durumlarda ortaya çıkmaktadır (Şekil 11) (Rudnev vd., 2002). Bu durumda, parça ekseninin üst ve alt bölgelerinde sıcaklık farkları meydana gelebilmektedir. Yakınlık etkisinin oluşturabileceği olumsuzluklar göz önünde bulundurularak tüm bağlantı numuneleri helezonun tam ortasına gelecek şekilde konumlandırılmıştır. İletken kesiti içindeki akımın düzgün dağılmaması olarak açıklanan bir diğer etkide deri etkisidir. Deri etkisinde akım yoğunluğu yüzeylerden kesit

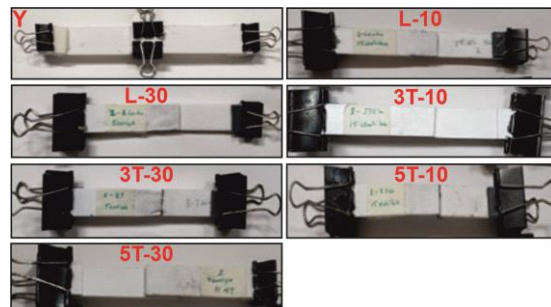
merkezine doğru artış gösterir (Rapoport ve Pleshivtseva, 2006). Bu durumda, ısı homojen olmayacak şekilde parça yüzeyinde yoğunlaşır ve kesit merkezine doğru gittikçe azalır (Mariani ve Malucelli, 2023). Bu çalışmada polimer ile iletken arasında yüzey teması gerçekleşeceğinden ve yüzeylerde birleşmenin istenmesinden dolayı, deri etkisinin deneysel sonuçlara etkisinin sınırlı oranda olması beklenmektedir.



Şekil 11. Yakınlık etkisi (Rudnev vd., 2002).

İndüksiyon bobininin helezon geometriye sahip olmasından dolayı bindirme bölgesinde kontrollü basınç uygulanması sağlanamamıştır. Bindirme bölgesinde PLA levhaların sıkıştırılarak sabitlenmesi amacıyla ısıya dayanıklı şerit bant kullanılmıştır. İndüksiyonlu ısıtma işlemi sırasında birleştirme hattı görünmediğinden metal iletkenlerin uç kısımlarından sıcaklık ölçümü yapılmıştır. Termokupl aracılığı ile ölçülen sıcaklık değeri 210 °C'lik PLA ergime sıcaklığına ulaştığı anda cihaz üzerindeki termostat tarafından güç kesilmiş, numuneler bobin içerisinden çıkarılmış ve oda sıcaklığında soğumaya bırakılmıştır. Düşük ve yüksek frekans değerlerinde iletkenlerin belirlenen ergime sıcaklığına ulaşmasında geçen süre sırasıyla, 15 dakika ve 5 saniye olarak ölçülmüştür.

Şekil 12'de Çizelge 2'de belirtilen parametreler kullanılarak yapıştırma ve indüksiyon yöntemiyle üretilen bağlantılar gösterilmektedir. Her parametre için birleştirme işlemi yapıldıktan sonra levhaların en uç noktalarına 25.4x25.4 mm boyutlarında hizalama levhaları yapıştırılmış ve metal kısaç yardımıyla sabitlenmiştir.



Şekil 12. Hazırlanan bağlantılar.

## 2.4. Çekme Testi

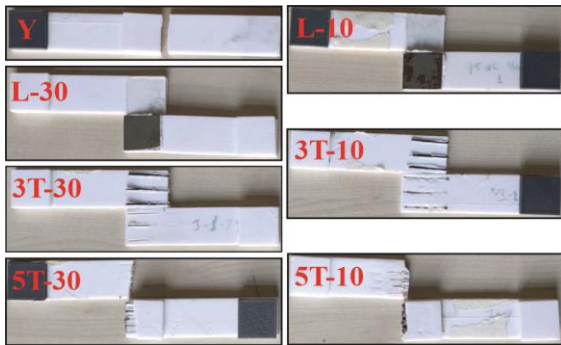
Hazırlanan bağlantıların dayanım değerlerinin belirlenmesi için numunelere, SHIMADZU marka 50 kN yük hücresine sahip çekme test cihazında oda sıcaklığında ve 1 mm/dak hızda numuneler hasara uğrayana kadar çekme yükü uygulanmıştır (Şekil 13). Yük-yer değiştirme verileri bağlantılar hasara uğrayana kadar kaydedilmiştir.



Şekil 13. Çekme test cihazı.

## 3. Bulgular

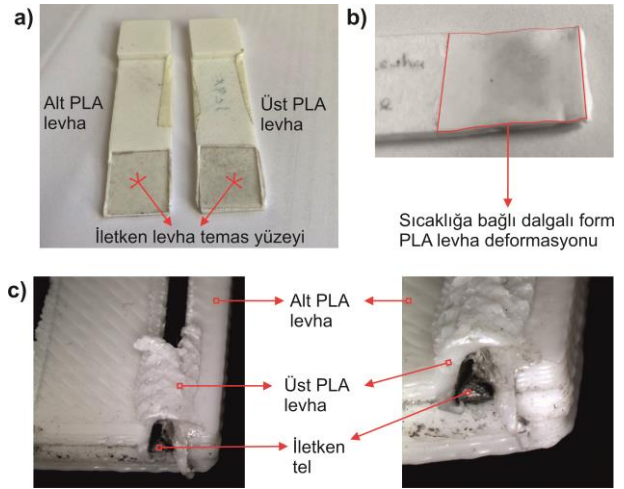
Bu bölümde 3B yazdırma teknolojisi ile üretilen PLA levhaların yapıştırıcı ve indüksiyon ısıtma ile hazırlanan bağlantılarının hasar ve dayanım değerlerinin karşılaştırılmasına yer verilmiştir. Çekme testi sonrası elde edilen maksimum kuvvet değerleri bağlantı dayanımındaki değişimi belirtmek amacıyla kullanılmıştır. Şekil 14 indüksiyon ve yapıştırıcı ile hazırlanan bağlantıların çekme testi sonrası hasar mekanizmalarını göstermektedir. Bağlantı hasar mekanizmalarının incelenmesi hasarın sebebi ile ilgili önemli detayların belirlenmesi açısından önemlidir.



Şekil 14. Bağlantı hasar tipleri.

Şekil 14 incelendiğinde, yapıştırmalı bağlantıda PLA levha hasarı olduğu görülmektedir. Yapıştırmalı bağlantıda yapıştırıcı hasarı meydana gelmeden levha hasarının oluşması ulaşılan hasar yükü değerinde yapıştırıcının yük iletim kabiliyetini devam ettirdiğini ve yapıştırıcının dayanım limitlerine ulaşılmadığını göstermektedir. Levha ve 3 tel kullanılarak indüksiyonlu ısıtma ile hazırlanan

bağlantılar incelendiğinde, iletkenler ile PLA levha arayüzünde düşük bağ kuvvetlerinden dolayı tutunmanın tam olarak gerçekleşmediği belirlenmiştir. Bu durum yük iletiminde önemli oranda kayıplara sebep olmaktadır. 5 tel kullanılarak indüksiyonlu ısıtma ile hazırlanan bağlantılarda hasar, PLA levhada, bindirme bölgesinde meydana gelmiştir. Hasar yüzeyleri incelendiğinde, düşük frekans değerine bağlı olarak ısıtma hızında meydana gelen düşüşün levhaların bindirme bölgelerinde istenmeyen ısıl deformasyonlara neden olduğu görülmüştür. Şekil 15'te tel ve levha kullanılarak hazırlanan bağlantı hasarlarının detay resimleri gösterilmektedir. İndüksiyon prosesi sürecince uygulanan basıncın ve iletkenler kullanılarak ulaşılan sıcaklık değerlerinin PLA levhanın bindirme bölgesinde meydana getirdiği deformasyon davranışı belirgin şekilde birbirinden ayrılmaktadır. Bindirme bölgesinde tel kullanılarak hazırlanan bağlantılarda, literatürdekine benzer şekilde, alt ve üst PLA levha içerisinde teller radyal yönde oyuklar meydana getirerek mekanik birleşme sağlanmıştır (Ma vd., 2020). Levha kullanımında ise basınç ve sıcaklık etkisi ile dayanımı olumsuz yönde etkileyen polimer sıkışması meydana gelmiştir (Choudhury ve Debnath, 2019). Polimer sıkışması, polimer akışının levha yüzeyinde gerçekleşemediğini, dolayısıyla levhanın ergimiş polimer tarafından ıslatılmadığını göstermektedir.



Şekil 15. Bağlantı hasar detay resimleri: a) Polimer sıkışması, b) sıcaklığa bağlı dalgalı deformasyon ve c) Tel-polimer etkileşimi

İndüksiyonlu ısıtma ile hazırlanan bağlantılarda oluşan hasar tipleri iletken geometrisinin, uygulanan basıncın ve frekans değerlerine bağlı olarak değişen ısıtma süresinin hasar davranışını belirleyen ana unsurlar olduğunu göstermiştir. Levha kullanılan bağlantılarda, literatürde düşük kaynak hızıyla ilişkilendirilen aşırı lokal ısınma etkisi belirgin şekilde gözlemlenmiştir (Katsiropoulos vd., 2022). Literatürde, uygulanan basıncın bağlantı yeri arasında yeterli yakın teması sağlayacak ve polimerin sıkışmasına engel olacak düzeyde olması önerilmektedir (Choudhury ve Debnath, 2019). Ayrıca, yüksek sıcaklık nedeniyle

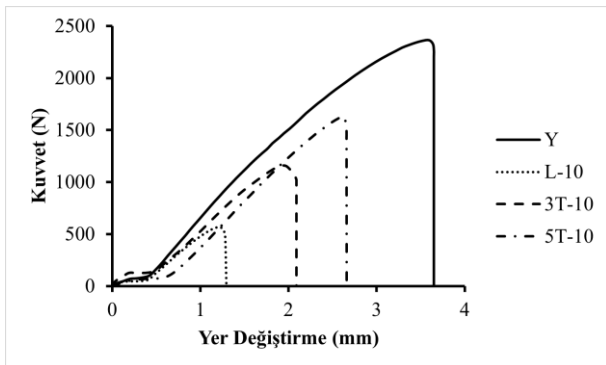
polimerin bozulmasını ve uzun kaynak süresinde polimerin akışını engelleyen sıkışmasının en aza indirilmesi için kaynak süresinin optimize edilmesi gerekliliği vurgulanmaktadır (Choudhury ve Debnath, 2019). Uygun olmayan kaynak süresi ve ısıtmanın, polimerin birleşme yüzeylerini yeterince ıslatmamasına ve bağlantı dayanımında kayıplara neden olduğu açıklanmaktadır (Choudhury ve Debnath, 2019). Dolayısıyla, frekans değerine bağlı ısıtma hızının ve bağlantıya uygulanan basıncın uyumlu olması önem kazanmaktadır.

**Çizelge 3.** Yapıştırıcı kullanılan ve indüksiyon ile 10 kHz frekans değerinde ısıtılan bağlantıların hasar yükleri.

Yöntem	Bağlantı	Hasar Yükü (N)
Yapıştırma	Y	2378
	L-10	585
İndüksiyon	3T-10	1270
	5T-10	1643

Şekil 16'da yapıştırıcı kullanılan ve indüksiyon ile 10 kHz frekans değerinde ısıtılan bağlantıların kuvvet-yer değiştirme eğrileri gösterilmiştir.

Şekil 16'da gösterilen çekme eğrilerine göre en yüksek ve en düşük hasar yük değerleri sırasıyla, yapıştırıcı bağlantı ve iletken levha kullanılan bağlantılarda elde edilmiştir. Tel sayısındaki artış hasar yükünü ve yer değiştirmeyi artırmıştır. Çizelge 3'te yapıştırıcı bağlantıların ve indüksiyon yöntemi kullanılarak 10 kHz frekans değerinde ısıtılan bağlantıların hasar yükleri gösterilmektedir.

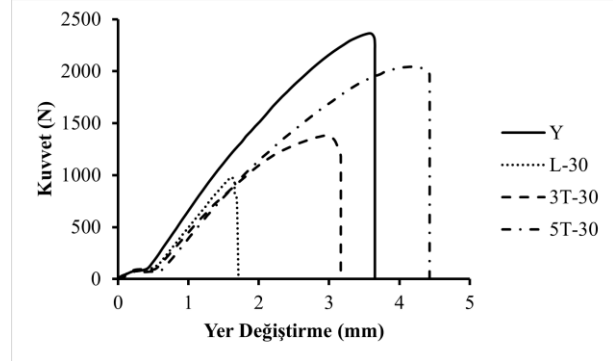


**Şekil 16.** Yapıştırıcı kullanılan ve indüksiyon ile 10 kHz frekans değerinde ısıtılan bağlantıların Kuvvet-Yer değiştirme eğrileri.

İndüksiyon ile hazırlanan bağlantılarda hasar yükleri yapıştırıcı ile hazırlanan bağlantı hasar yükünden düşük çıkmıştır. En düşük hasar yükü L-10 bağlantıda 585 N ve en yüksek hasar yükü yapıştırıcı bağlantıda 2378 N olarak elde edilmiştir. Bağlantıda yapıştırıcı yerine iletken levha kullanılması durumunda, dayanımında %75,40 oranında belirgin bir düşüş meydana gelirken, bu düşüş oranı iletken 5 tel kullanılması durumunda %30,91 olarak hesaplanmıştır. Tel sayısının 3'ten 5'e çıkarılması

durumunda hasar yükündeki artış % 29,37 oranında elde edilmiştir.

Şekil 17'de Yapıştırıcı kullanılan ve indüksiyon ile 30 kHz frekans değerinde ısıtılan bağlantıların kuvvet-yer değiştirme eğrileri gösterilmiştir.



**Şekil 17.** Yapıştırıcı kullanılan ve indüksiyon ile 30 kHz frekans değerinde ısıtılan bağlantıların Kuvvet-Yer değiştirme eğrileri.

Şekil 17 incelendiğinde, Şekil 16'da gösterilen hasar yükü değişimlerine benzer şekilde, yapıştırıcı ile üretilen bağlantıda en yüksek ve iletken levha ile üretilen bağlantıda en düşük dayanım değeri elde edilmiştir. Artan tel sayısının bağlantı dayanımını arttırdığı görülmüştür. Tel sayısındaki artışa bağlı olarak 5T-30 bağlantı hasar yükü değeri, yapıştırıcı bağlantı hasar yükü değerine yaklaşmıştır. Ayrıca, tel sayısındaki artışın yer değiştirmeyi de arttırdığı görülmüştür. Bağlantıların hasar davranışlarındaki farklılıklar kullanılan birleştirme yöntemlerinden kaynaklanmaktadır. Yapıştırıcı bağlantıda bindirme yüzeyinin tamamı yük iletimine katkı sağlarken, indüksiyon yönteminde tel sayısındaki artış veya azalma yük iletimini arttırmakta veya azaltmaktadır. Bununla birlikte, bağlantı rijitliği açısından karşılaştırma yapıldığında bindirme bölgesinde tel kullanılması yapıştırıcıya göre önemli avantajlar sağlamaktadır. Benzer çalışmalar, yüksek rijitliğe sahip tellerin bindirme uzunluğu boyunca, yük doğrultusunda kullanılmasının bindirme uzunluğu boyunca soyulma ve kayma gerilmesi pik gerilme değerlerini azalttığını göstermiştir. Özellikle, eksantrik yüklemeye bağlı olarak erken hasar oluşumunu neden olan soyulma gerilmelerindeki azalma eğilme momentindeki düşüşe işaret etmektedir. Bindirme bölgesinde tel kullanımı bağlantı rijitliğini arttırmasına rağmen, indüksiyon kaynağı sırasında tel çevresinde oluşan ısı etkisindeki kaynak bölgesi parçada deformasyonlara ve kesit daralmasına neden olarak hasarın meydana geldiği bindirme bölgesi uç kısımlarını yük iletimi açısından zayıf bölgeler haline getirmektedir. Bu bölgelerde gerilme yoğunluğu yüksek boyutlara ulaştığı anda hasar meydana gelmektedir. Genel olarak değerlendirildiğinde, indüksiyonlu bağlantıda iki farklı etkiye (ısı girdisi ve rijitlik artışı) bağlı olarak hasar mekanizmasının değerlendirilmesi gerektiğinden,



yapıştırıcıya göre hasar davranışında ve buna bağlı olarak kuvvet-yer değiştirme eğrilerinde farklılıkların olması beklenen bir durumdur (Jafari vd., 2020; Kaji vd., 2017; Ma vd., 2020; Rezvaninasab vd., 2019). Çizelge 4'te yapıştırıcı kullanılan ve indüksiyon ile 30 kHz frekans değerinde ısıtılan bağlantıların hasar yükleri verilmiştir.

**Çizelge 4.** Yapıştırıcı kullanılan ve indüksiyon ile 30 kHz frekans değerinde ısıtılan bağlantıların hasar yükleri.

Yöntem	Bağlantı	Hasar Yükü (N)
Yapıştırma	Y	2378
	L-30	1003
İndüksiyon	3T-30	1393
	5T-30	2057

Bağlantı hasar yükleri karşılaştırıldığında, yapıştırıcıya göre diğer bağlantılar daha düşük hasar yüklerine ulaşmıştır. Bağlantıda yapıştırıcı yerine iletken levha kullanılması durumunda, dayanımında %57,82 oranında bir düşüş meydana gelirken, bu düşüş oranı iletken 5 tel kullanılması durumunda %13,50 olarak hesaplanmıştır. Tel sayısının 3'ten 5'e artırılması durumunda hasar yükündeki artış %47,67 oranında elde edilmiştir.

İndüksiyon yöntemi ile hazırlanan bağlantı dayanımları kendi arasında karşılaştırıldığında 30 kHz frekans değerinde, düşük ısınma süresinde, bağlantı dayanımı açısından daha iyi sonuçlar elde edildiği belirlenmiştir. Yapıştırıcı bağlantı dayanımına en yakın değer iletken sayısını 5 olduğu 5T-30 bağlantıda elde edilmiştir.

Bütün bağlantı hasar yükleri karşılaştırıldığında en yüksek dayanım değeri yapıştırıcı bağlantıda ve en düşük bağlantı dayanımı L-10 bağlantıda meydana gelmiştir. İletken levha kullanımında basınç-frekans uyumunun yetersiz olması dayanımındaki belirgin düşüşün temel sebebi olarak açıklanabilir. Bununla birlikte, çalışma kapsamında termal analiz yapılmamasına rağmen indüksiyonlu ısıtmada dayanımın yapıştırıcıya göre düşük olmasının sebeplerinden biri de metal ve polimer matris termal genişleme farklılığına bağlı termal gerilmelerin varlığı ile açıklanabilir (Tay vd., 1999). Son olarak, tel ve levhanın temin edildiği şekli ile ön yüzey hazırlama işlemleri uygulanmadan bindirme bölgesinde kullanılması da dayanımdaki düşüşün sebepleri arasında sıralanabilir.

#### 4. Sonuçlar ve Tartışma

Bu çalışmada, termoplastik malzemelerin indüksiyon yöntemi ile birleştirme işlemi incelenmiştir. Termoplastik malzeme olarak PLA malzeme kullanılmış ve 3B yazıcı ile levhalar yazdırılmıştır. İndüksiyon yöntemi ile birleştirme işlemi yapılması için iletken levha ve iletken tel kullanılmıştır. İndüksiyon ısıtma sisteminde iletken geometrisinin ve frekansın bağlantı dayanımına ve hasar

yüzeyine etkisine bakılmıştır. İndüksiyon yöntemi ile hazırlanan bağlantıların dayanımı yapıştırıcı bağlantılar ile karşılaştırılmıştır. Deneysel sonuçlar yapıştırıcı bağlantıda PLA levha hasarı oluştuğunu göstermiştir. İletken olarak levha ve 3 telin kullanıldığı indüksiyonla ısıtma ile birleştirilen bağlantılar incelendiğinde, iletkenlerin sadece alt levhada kaldığı ve üst levhaya tutunmadığı görülmektedir. İletken tel sayısının 5'e çıkarılması durumunda bağlantılarda hasar, bindirme bölgesinde meydana gelmiştir. Yapıştırıcıya göre tüm bağlantı konfigürasyonlarının hasar yükleri düşük çıkmıştır.

Yapılan deneysel çalışmalar, uygun parametre ve iletken geometrilerinin seçilmesi durumunda, indüksiyon yönteminin termoplastik malzemelerin birleştirilmesinde önemli bir alternatif olabileceğini göstermiştir. İletken malzeme olarak levha yerine tel kullanımının yapıştırıcı bağlantı dayanımına yakın bağlantı değerleri sağladığı belirlenmiştir. Bununla birlikte, tel sayısının artırılması dayanımı olumlu yönde değiştirmiştir. Deneysel sonuçlar genel olarak değerlendirildiğinde, tel sayısının daha fazla artırılması ve indüksiyon parametrelerinin tel sayısına bağlı olarak değiştirilmesi ile dayanımda artışın devam edebileceği öngörülmektedir. Ayrıca, iletken malzemeler ve PLA levhalar bağlantıda proses süresini kısaltmak amacıyla yüzey hazırlama işlemleri uygulamadan kullanılmış ve bu şartlar altında dayanım değerlerinin belirlenmesi hedeflenmiştir. Farklı metal yüzey hazırlama işlemleri (kumlama, zımparalama, dağlama vb.) uygulanması sonucunda ergimiş PLA ve iletken arasında artan yüzey hacmi ve pürüzlülüğün etkisiyle mekanik kilitlenmenin artması ile dayanım değerlerinde artışı sağlanabileceği öngörülmektedir. Genel olarak, yöntemin yaygınlaşması ile tamamen geri dönüştürülebilir komponentlerden oluşan polimer bağlantıların elde edilmesi mümkündür. Yöntemin yaygınlaşması için benzer çalışmaların artması ve farklı iletken malzemeler, plastik grupları ve ısıtma parametrelerinin deneysel olarak uygulanarak sonuçların tartışılması önem kazanmaktadır.

#### Etik Standartlar Bildirgesi

Bu çalışma Dr. Öğretim Üyesi Özkan ÖZ danışmanlığında Mustafa Acaroğlu tarafından 2023 yılında tamamlanan "İndüksiyon yöntemiyle üretilen termoplastik malzemeli bağlantının mekanik özelliklerinin incelenmesi" başlıklı ve 838401 tez no'lu yüksek lisans tezinden türetilmiştir.

Yazarlar tüm etik standartlara uyduklarını beyan ederler.

#### Yazarlık Katkı Beyanı

Yazar 1: Araştırma, Deneysel tasarım, Yazma-orijinal taslak, Kaynak, Görselleştirme

Yazar 2: Fikir Sahibi, Araştırma, Doğrulama, Metodoloji, Görselleştirme, Yazma – orijinal taslak

Yazar 3: Kaynak, Araştırma, Yazma-orijinal taslak, Görselleştirme, Metodoloji

#### Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarların bu makalenin içeriğiyle ilgili olarak beyan edecekleri hiçbir çıkar çatışması yoktur.

#### Verilerin Kullanılabilirliği

Bu çalışma sırasında oluşturulan veya analiz edilen tüm veriler, yayınlanan bu makaleye dahil edilmiştir.

#### 5. Kaynaklar

- Ahmed, T. J., Stavrov, D., Bersee, H. E. N., & Beukers, A. 2006. Induction welding of thermoplastic composites—An overview. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, **37(10)**, 1638-1651. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2005.10.009>
- Al-Obaidi, A., Kimme, J., & Kräusel, V. 2021. Hybrid Joining by Induction Heating of Basalt Fiber Reinforced Thermoplastic Laminates. *Journal of Composites Science*, **5(1)**. <https://doi.org/10.3390/jcs5010010>
- Altıntaş, A. 2016. İndüksiyon Bobin Tasarımında Kullanılan İletken Türlerinin İndüksiyon Sıvı Isıtıcı Performansına Etkilerinin Araştırılması. *Marmara Fen Bilimleri Dergisi*, **28(1)**. <https://doi.org/10.7240/mufbed.02953>
- Baker, A. A., Callinan, R. J., Davis, M. J., Jones, R., & Williams, J. G. 1984. Repair of mirage III aircraft using the BFRP crack-patching technique. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, **2(1)**, 1-15. [https://doi.org/10.1016/0167-8442\(84\)90035-1](https://doi.org/10.1016/0167-8442(84)90035-1)
- Banik, N. 2018. A review on the use of thermoplastic composites and their effects in induction welding method. *Materials Today: Proceedings*, **5(9)**, 20239-20249. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.06.395>
- Bayerl, T., Duhovic, M., Mitschang, P., & Bhattacharyya, D. 2014. The heating of polymer composites by electromagnetic induction – A review. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, **57**, 27-40. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2013.10.024>
- Cebrián, A. S., Klunker, F., & Zogg, M. 2014. Simulation of the cure of paste adhesives by induction heating. *Journal of Composite Materials*, **48(12)**, 1459-1474. <https://doi.org/10.1177/0021998313487933>
- Choudhury, M. R., & Debnath, K. 2019. A review of the research and advances in electromagnetic joining of fiber-reinforced thermoplastic composites. *Polymer Engineering & Science*, **59(10)**, 1965-1985. <https://doi.org/10.1002/pen.25207>
- Ciardiello, R. 2021. The Mechanical Performance of Re-Bonded and Healed Adhesive Joints Activable through Induction Heating Systems. *Materials*, **14(21)**. 6351 <https://doi.org/10.3390/ma14216351>
- Demir, S., & Yüksel, C. 2022. Evaluation of effect and optimizing of process parameters for fused deposition modeling parts on tensile properties via Taguchi method. *Rapid Prototyping Journal*, **29(4)**, 720-730. <https://doi.org/10.1108/RPJ-06-2022-0201>
- El-Mashad, H. M., & Pan, Z. 2017. Application of Induction Heating in Food Processing and Cooking. *Food Engineering Reviews*, **9(2)**, 82-90. <https://doi.org/10.1007/s12393-016-9156-0>
- Gopi Mohan, R., Santhosh, K., Iyer, R. V., John, L. K., & Ramu, M. 2021. Comparative analysis of mechanical properties of FDM printed parts based on raster angles. *Materials Today: Proceedings*, **47**, 4730-4734. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.05.649>
- Jackowski, J., Goldstein, R., & Nemkov, V. 2014. Induction process and coil design for welding of carbon fiber reinforced thermoplastics. *International SAMPE Technical Conference*.
- Jafari, F., Eslami-Farsani, R., & Khalili, S. M. R. 2020. Investigation of Longitudinal and Transverse Reinforcing Single Lap Joints of the Polymer Composites/Al under Hygrothermal Condition. *Fibers and Polymers*, **21(10)**, 2338-2343. <https://doi.org/10.1007/s12221-020-1100-5>
- Kaji, M., Farahani, M., & Ansari, M. 2017. A reinforcing technique for the adhesive bonded composite joints using metallic wires. *Journal of Adhesion Science and Technology*, **31(17)**, 1963-1975. <https://doi.org/10.1080/01694243.2017.1290573>
- Katsiropoulos, C., Pantelakis, S., Felling, F., Buccoliero, G., & Pappada, S. 2022. A holistic assessment of a stiffened panel production using a novel thermoplastic material and implementing the induction welding process. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, **94(9)**, 1556-1566. <https://doi.org/10.1108/AEAT-12-2021-0362>
- Liu, C. W., Qu, C. Y., Han, L., Wang, D. Z., Xiao, W. B., & Hou, X. 2017. Preparation of carbon fiber-reinforced polyimide composites via in situ induction heating. *High Performance Polymers*, **29(9)**, 1027-1036. <https://doi.org/10.1177/0954008316667789>

- Ma, W., Zhan, X., Yang, H., Bu, H., Li, Y., & Wang, F. 2020. Study on the interface morphology in the induction welding joint of PEEK plate at low power. *Journal of Polymer Engineering*, **40(5)**, 432-439. <https://doi.org/10.1515/polyeng-2020-0011>
- Mahdi, S., Kim, H.-J., Gama, B. A., Yarlagadda, S., & Gillespie, J. W. 2003. A Comparison of Oven-cured and Induction-cured Adhesively Bonded Composite Joints. *Journal of Composite Materials*, **37(6)**, 519-542. <https://doi.org/10.1177/0021998303037006776>
- Mariani, A., & Malucelli, G. 2023. Insights into Induction Heating Processes for Polymeric Materials: An Overview of the Mechanisms and Current Applications. *Energies*, **16(11)**, 4535. <https://doi.org/10.3390/en16114535>
- Öz, Ö., Öztürk, F. H. 2023a. "An investigation on failure behaviour of bonded polylactic acid adherends produced by 3D printing process: experimental and numerical approach". *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, **45(8)**, 399. <https://doi.org/10.1007/s40430-023-04321-8>
- Öz, Ö., & Öztürk, F. H. 2023b. Yazdırma Açısının 3B Yazıcıda Üretilen PLA Numunenin Mekanik Özellikleri Üzerine Etkisinin Deneysel ve Sonlu Elemanlar Metodu ile İncelenmesi. *Politeknik Dergisi*, **26(2)**, 529 - 540. <https://doi.org/10.2339/politeknik.882313>
- Öz, Ö., Öztürk, F. H., & Güleç, C. 2023. Effect of fiber content and plasticizer on mechanical and joint properties of carbon fiber powder reinforced PLA manufactured by 3D printing process. *Journal of Adhesion Science and Technology*, **37(15)**, 2208-2231. <https://doi.org/10.1080/01694243.2022.2121195>
- Rapoport, E., & Pleshivtseva, Y. 2006. *Optimal Control of Induction Heating Processes*. CRC Press.
- Rezvaninasab, M., Farhadinia, M., Mirzaei, A., Ramzaninezhad, M., Khamseh, F., & Alaei, M. h. 2019. Experimental evaluation of reinforcing the single lap joint in both longitudinal and transverse direction under tensile and bending condition. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, **88**, 19-25. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2018.05.020>
- Rudnev, V., Loveless, D., Cook, R. L., & Black, M. 2002. *Handbook of Induction Heating*. CRC Press.
- Rudolf, R., Mitschang, P., & Neitzel, M. 2000. Induction heating of continuous carbon-fibre-reinforced thermoplastics. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, **31(11)**, 1191-1202. [https://doi.org/10.1016/S1359-835X\(00\)00094-4](https://doi.org/10.1016/S1359-835X(00)00094-4)
- Saborowski, E., Dittes, A., Lindner, T., & Lampke, T. 2021. Nickel-Aluminum Thermal Spray Coatings as Adhesion Promoter and Susceptor for Inductively Joined Polymer-Metal Hybrids. *Polymers*, **13(8)**, 1320. <https://doi.org/10.3390/polym13081320>
- Schubbe, J. J., & Mall, S. 1999. Investigation of a cracked thick aluminum panel repaired with a bonded composite patch. *Engineering Fracture Mechanics*, **63(3)**, 305-323. [https://doi.org/10.1016/S0013-7944\(99\)00032-6](https://doi.org/10.1016/S0013-7944(99)00032-6)
- Severijns, C., de Freitas, S. T., & Poullis, J. A. 2017. Susceptor-assisted induction curing behaviour of a two component epoxy paste adhesive for aerospace applications. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, **75**, 155-164. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2017.03.005>
- Sürmen, H. K., Güven, T. 2024. "Tersine Mühendislik ve Eklemeli İmalat ile Kişiyeye Özel Nazal Dilatör Tasarımı ve Üretimi". *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, **24(1)**, 197-206. <https://doi.org/10.35414/akufemubid.1332603>
- Tay, T. E., Fink, B. K., McKnight, S. H., Yarlagadda, S., & Gillespie, J. W. 1999. Accelerated Curing of Adhesives in Bonded Joints by Induction Heating. *Journal of Composite Materials*, **33(17)**, 1643-1664. <https://doi.org/10.1177/002199839903301704>
- Tsamasphyros, G., Prassianakis, I., Christopoulos, A., & Kanderakis, G. 2007. *Non destructive testing of bonded composite repairs using embedded metallic grids—numerical analysis*, Prague: NDT for Safety.
- Vattathurvalappil, S. H., & Haq, M. 2019. Thermomechanical characterization of Nano-Fe3O4 reinforced thermoplastic adhesives and single lap-joints. *Composites Part B: Engineering*, **175**, 107162. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107162>
- Yarlagadda, S., Kim, H. J., Gillespie, J. W., Shevchenko, N. B., & Fink, B. K. 2002. A Study on the Induction Heating of Conductive Fiber Reinforced Composites. *Journal of Composite Materials*, **36(4)**, 401-421. <https://doi.org/10.1177/0021998302036004171>
- Yavuz, I., & Yildirim, A. 2023. Mechanical properties of PLA based closed porous structures manufactured using

FDM process. *Multidiscipline Modeling in Materials and Structures*, **19(3)**, 493-506.

<https://doi.org/10.1108/MMMS-10-2022-0220>

Zimmerer, C., Mejia, C. S., Utech, T., Arnhold, K., Janke, A., & Wosnitza, J. 2019. Inductive Heating Using a High-Magnetic-Field Pulse to Initiate Chemical Reactions to Generate Composite Materials. *Polymers*, **11(3)**, 535.  
<https://doi.org/10.3390/polym11030535>