

# Termoplastik matrisli karbon elyaf takviyeli kompozit malzemelerin kaynaklanmasında indüksiyonla ısıtmanın etkileri

Öner Haşim OLGUN\*, Uğur ÇAVDAR

Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Muradiye, Manisa  
İzmir Demokrasi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, İzmir

Geliş Tarihi (Received Date): 07.11.2017

Kabul Tarihi (Accepted Date): 03.08.2018

## Özet

Termoplastik matrisli kompozitler, mekanik özelliklerinin yanında üretim maliyetleri ve çevresel nedenlerle gün geçtikçe daha çok tercih edilmektedir. Üretim sürecini kısaltarak tasarruf sağlamak üzere ısıtma prosesinin hızlandırılması amacıyla, indüksiyonla ısıtma yönteminin termoplastik matrisli kompozitler üzerindeki etkileri önemli bir araştırma konusu oluşturmaktadır. Bu çalışmada indüksiyonla ısıtma yöntemi ile termoplastik matrisli kompozit malzemenin geometrisine bağlı olarak istenilen bölgesini, karbon elyaf takviye elemanının ısı iletkenlik özelliğini kullanarak mevcut teknolojilere göre daha hızlı şekilde yüksek sıcaklıklarda şekillendirilmesine yönelik değişken ve parametreler incelenecektir. Çalışmada öncelikle indüksiyonla ısıtma yöntemine ilişkin temel bilgiler verilmiş, daha sonra ısıtma prosesine etkileyen unsurlar ve esaslar ile son olarak yöntemdeki parametrelerin değiştirilmesi halinde malzeme üzerindeki etkileri ortaya konmuştur. Çalışmanın, indüksiyonla ısıtma yöntemi ile termoplastik matrisli kompozitlerin üretiminde daha düşük maliyetli proseslerin oluşturulmasına yönelik araştırmalara kaynak olacağı değerlendirilmektedir.

**Anahtar kelimeler:** İndüksiyonla ısıtma, termoplastik kompozit, indüksiyonla kaynak, indüksiyon kaynağı, termoplastik, termoplastik matris.

\* Öner Haşim OLGUN, oner.h.olgun@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0002-6940-3954>  
Uğur ÇAVDAR, ugur.cavdar@idu.edu.tr, <http://orcid.org/0000-0002-3434-6670>

# Effects of induction heating in welding of carbon fiber reinforced thermoplastic composites

## Abstract

*Thermoplastic composites are increasingly preferred not only because of their mechanical features but also production costs and environmental reasons. In order to accelerate heating process for the purpose of economic use of resources by shortening production process, it is essential to study on the effects of the induction heating method on thermoplastic composites. In this study, basic information and components related to induction heating method are explained, then fundamentals and intrinsic structure affecting the heating process are examined and finally the effects of the changes in the parameters of the method on the material are indicated. We assess that this study might be a resource to the researches to create new low-cost production processes of thermoplastic composites.*

**Keywords:** *Induction heating, thermoplastic composite, induction welding, thermoplastic, thermoplastic matrice.*

## 1. Giriş

İleri polimer matrisli kompozitler benzersiz özellikleriyle mühendislik çalışmalarında gün geçtikçe daha çok ilgi çekmektedir. Mekanik özelliklerinin yanında mali ve çevresel nedenlerle de termoplastikler termosetlere göre daha çok tercih edilmektedir. Maliyetleri azaltmak üzere ısıtma prosesinin hızlandırılması üretim sürecini kısaltarak önemli tasarruf sağlayacaktır. İndüksiyonla ısıtma elektrik ve manyetik özellikleri nedeniyle genellikle metallerle beraber anılsa da; son on yıldaki çalışmalarda bu ısıtma yönteminin polimer malzemeler ve kompozitler üzerindeki etkileri de incelenmeye başlamıştır [1-13].

Bu çalışmada indüksiyonla ısıtma yöntemi ile termoplastik matrisli kompozit malzemenin geometrisine bağlı olarak istenilen bölgesini, karbon elyaf takviye elemanının ısı iletkenlik özelliğini kullanarak mevcut teknolojilere göre daha hızlı şekilde yüksek sıcaklıklarda şekillendirilmesine yönelik değişken ve parametreler incelenecektir.

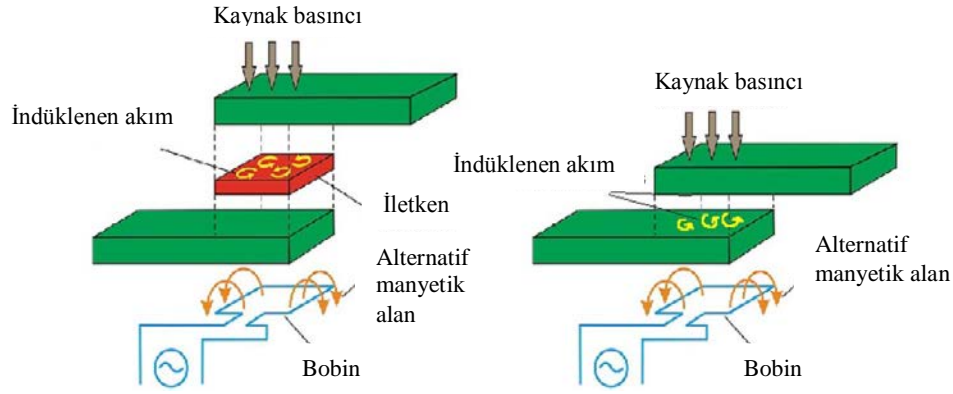
## 2. İndüksiyonla [ısıtarak üretim yöntemi] ısıtma yöntemi ve yöntemin değişkenleri

### 2.1. İndüksiyonla ısıtma prensipleri

Ferromanyetik ve iletken metallerin indüksiyonla ısıtılma olayı indüklenen burgaç akımı ve manyetik polarizasyon etkilerine dayanmaktadır. Manyetik gecikme ile üretilen ısı enerjisi burgaç akımı ile elde edilenden çok daha azdır. Bir malzeme sadece elektrik özelliklere sahipse, manyetik polarizasyon etkisi ile ısıtma gerçekleşmemektedir [1].

Alternatif voltaj iletken bir bobine uygulandığında alternatif bir akım üretilir. Sonuç olarak, bu alternatif akım zamana göre değişen manyetik bir alanı indükler. Manyetik

olarak duyarlı ve elektriksel olarak iletken bir malzeme bobinin alternatif manyetik alanına yaklaştırıldığında, burgaç akımları indüklenir. Burgaç akımının oluşması için kapalı döngü devrelerinin bulunması gerekir. Elyaf takviyeli termoplastiklerde kapalı döngü devreleri örgü veya çapraz katlı elyaf formlarıyla elde edilir. Burgaç akımı, malzemenin direnci ile karşılaşır ve enerji ısı formuna dönüşerek kaybedilir (Şekil 1) [14].



Şekil 1. İndüksiyonla ısıtmada burgaç akımlarının oluşumu [14].

### 2.1.1. Duyarlılık etkileri

Metallerden farklı olarak, polimerler tek başlarına indüksiyonla ısıtma için doğal potansiyel taşıyıcılar. Çünkü ne elektriksel olarak iletkenler ne de elektromanyetikler. Bu yüzden elektromanyetik alanın enerjisini ısıya dönüştürmek için elektromanyetik alana duyarlı takviyeler kullanılır. En çok kullanılan takviye malzemeleri, karbon elyaf kumaşlar ve metalik katkılardır. Bunların yapıları örgü şeklinde veya üniform dağılmış partiküller şeklindedir. Literatürde takviye malzemesinin matrisin içinde üniform dağılmış olarak bulunması (karbon elyaf gibi) ile takviye malzemesi yerine çeşitli iletken özellikleri olan metallerin kullanımına dair açıklamalar Ahmed ve ark.da [14] bulunmaktadır.

Burgaç akımı üretimi için (elektriksel olarak iletken elyaflarda) bir ön koşul kapalı elektriksel döngülerin formasyonudur. Bir kompozitte kapalı döngü elde etmek için elyaflar dalgasız kumaş formunda örülür. Bunun yanında, kısa elyaflar veya iletken partiküllere ait uygulamalar da mevcuttur, ancak hacim oranları sızıntı eşiği değerini geçebilmek için yeterince yüksek olmalıdır. Güçlü elektriksel özellikleri olan metal elyafların yanında, genellikle polimer kompozitlerin hafif yapısına daha uygun olan karbon elyaflar kullanılır.

Başlangıçtaki teorilerde, yalnız elyaf boyunca gerçekleşen direnç kayıpları (Elyaf kesişim noktalarındaki temasın ideal olduğu varsayımı altında) asıl ısınma mekanizması olarak değerlendirilmiştir [15]. Eğer temas ideal (tam) değilse kesişim noktası ısınması (çoğu durumda direnç kaybından daha güçlü) oluşmaktadır [16]. Günümüzde en gelişmiş görüşe göre, iletken elyaf kumaşlarda, hacimsel ısıya aynı anda neden olan üç mekanizma bulunmaktadır. Bunlar sırasıyla; Joule kayıpları (elyaf boyunca), elyaf kesişim noktalarında dielektrik ısınma ve temas (kesişim noktalarında) direncidir. Yarılagadda ve ark. [16, 17] çalışmalarında çok küçük temas direnci değerleri haricinde, kesişim noktası

ısınmasının genellikle Joule kaybı aracılığıyla elyaf ısınmasına göre daha baskın olduğunu ifade etmişlerdir. Ancak sıcaklık, basınç ve elyaf mimarisi gibi işlem parametrelerinin ısınma etkisine etki edebileceği de dikkate alınmalıdır.

Tabaka kalınlığı, tabaka sayısı, arayüz kalınlığının indüksiyonla ısıtma davranışı üzerine etkileri Fink ve ark. [18] tarafından araştırılmıştır. Çalışma sonuçlarına göre; arayüz kalınlığının artması halinde erişilen sıcaklıklarda azalma gözlenmiş, tabaka sayısının önemli miktarda artması halinde erişilen sıcaklıklarda dikkate değer bir artış gözlenmiştir. Kim ve ark. [19]  $0^\circ/0^\circ$  veya  $0^\circ/90^\circ$  oryantasyonlarındaki 2 tabakalı durumlarda ısınmadaki büyük farklılıkları ortaya koymuşlardır. Bu çalışmada elyafların birbiri üzerine en yüksek açıyla ( $0^\circ/90^\circ$ ) yatırılarak oluşturulan kesişim noktalarının en ideal koşul olduğu, bu durumda kesişim noktası ısınmasının baskın olduğu ortaya konulmuştur. Diğer oryantasyonlardaki [örneğin ( $90/0/45$ ) veya ( $60/30/10$ )] ısınmanın daha küçük olduğu ve ısınma örüntüsünün çarpıklaşarak numune geometrisinin bozulduğu gözlenmiştir.

### **2.1.2. Makineden kaynaklanan işlem etkileri**

İndüksiyon düzeneğinin ana etkileri bobin geometrisi, uygulanan elektrik gücü, bobin akımı ile frekans ve kavrama mesafesine bağlıdır. Yüksek frekans numune üzerinde daha fazla güç oluştursa da elektromanyetik alanın penetrasyon derinliğini sınırlar. Bu duruma “yüzey etkisi” denir ve dalga oluşum alanının zıt istikametindeki indüklenen elektromanyetik alandan kaynaklanır.

Düşük penetrasyon derinliği, malzemenin yüzey bölgesindeki ısı enerjisi sınırlar. Bu şartlar altında yüksek frekans jeneratörlerinin düşük frekanslılardan daha az etkili olduğu belirtilmiştir [1]. Kavrama mesafesindeki azalma ise bölgesel sıcaklığı artırsa da numunenin kesitindeki sıcaklık farkı oldukça yüksektir. İndüktör akımının artırılması da polimer ve iletken arasındaki arayüzde bölgesel olarak aşırı ısınmaya yol açmaktadır. Tüm bu parametreler bobin geometrisi ile bağlantılıdır. Araştırmacılar bobin geometrisinin geliştirilmesinin ve makine parametrelerinin düzenlenmesinin, kompozit sektöründe indüksiyonla ısıtmanın uygulanabilirliğini artırmak için elzem olduğunu belirtmektedirler. Bu sorun, son yıllardaki çalışmalarda frekansın sürekli değiştirildiği yeni bir metotla aşılıma çalışılmıştır [20].

### **2.2. Termoplastik kompozitlerin indüksiyonla kaynağı**

Polimer kompozitlerin polimer kompozitlerle kaynağı, birleşecek parçaların erime sıcaklığının üzerinde ısıtılarak bir araya getirilmesi ile karakterize edilir. Polimerler bir arada kalacak şekilde basınç altında soğutulur. Kaynak yapılacak bölgede metal bir ağ veya karbon elyaf kumaş kullanılır. Diğer indüksiyonla kaynak parametreleri, jeneratör gücü, kaynak süresi, kaynak basıncı ve soğuma süresidir [21]. Kaynak işlemi sürekli ve süreksiz olmak üzere sınıflandırılabilir [14]. Sürekli kaynak işleminde işlem gören malzeme veya bobin hareketliken, süreksiz kaynak işleminde durağan bir düzenek kullanılır.

### **2.3. Kaynak düzeneği**

Kaynak düzeneği dört gruba ayrılabilir [22]. İlki gerekli akım ve voltajı indüksiyon bobinine sağlayan radyo frekansı güç jeneratörüdür. İkincisi indüksiyon bobinini de içeren ve malzemeyi ısıtmak için gerekli manyetik alanı üreten ısı merkezidir. Üçüncü grup

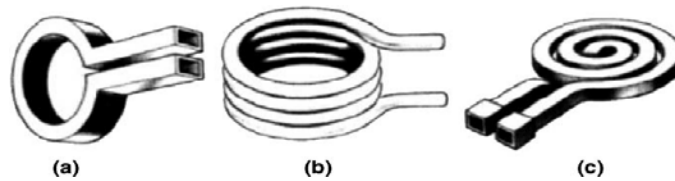
kompozit numunenin kendisidir ve dördüncü grup ise sulu soğutma sistemi gibi ikincil parçaları içerir.

### 2.3.1. Güç kaynağı

Güç kaynağı, kaynak düzeneğinin güvenilirliğini, sürdürülebilirliğini, kompaktlığını, enerji etkinliğini ve maliyetini etkiler [23]. Güç kaynaklarında genelde 50-60 Hz frekanslı 230 veya 340 V'luk alternatif akım gücü bulunmaktadır. Alternatif akım daha kontrol edilebilir hale getirebilmek için doğru akıma dönüştürülür. Frekans, voltaj ve alternatif akımın çıkış gücü indüksiyon bobini ile tanımlanır. Güç kaynaklarının genelde 200 kHz – 2 MHz aralığında frekans üretmesi istenir.

### 2.3.2. Isı merkezi

Kaynak düzeneğinin ikinci ünitesi olan ısı merkezinde bir kapasitör ve bobin bulunmaktadır. Enerji, numuneye indüksiyon bobini aracılığıyla aktarılır. Maksimum kavrama etkinliği için bobinin numuneye olabildiğince yakın olması istenir. Numunede üretilen ısı üzerinde bobin geometrisinin de büyük etkisi bulunmaktadır. İndüksiyon bobininin tasarımı düzenlenerek manyetik alan kaynak bölgesine odaklanabilir. Bobinin dizaynında en etkin ve üniform ısı etki için pek çok husus dikkate alınmalıdır: Bobin yakınındaki daha yüksek manyetik akı yoğunluğu nedeniyle, maksimum enerji transferi için bobin numuneye olabildiğince yakın ve tamamen kaynak alanı üzerinde olmalıdır. Kaynak süresi bobinin mesafesiyle de ilişkilidir. Bobin-numune mesafesinin iki katına çıkarılmasının kaynak süresini %300-400'e kadar artırdığı tespit edilmiştir [21]. Bobinin ısı merkezine bağlantı yerlerinden dolayı manyetik alanın şekli asimetriktir. Dolayısıyla simetrik bir bobinin oluşturduğu ısı örüntü çarpık bir görüntüdedir. Bobin bağlantılarının birbirine paralel olması halinde karşılıklı manyetik alanlar yok olacağından bu bölgede oluşan ısı daha azdır. Bobinin ana kısmı da manyetik akımın yok olmayacağı şekilde tasarlanmalıdır. Kompozitlerin ısıtılması için Şekil 2'de gösterilen üç farklı bobin tipi kullanılabilir: Tek kavisli bir bobin, sarmal bir bobin ve yassı tabanlı bobin. Bu temel tipler değişikliklerle çeşitlendirilebilmektedir. Yassı tabanlı bobinler geniş düz bölgeleri ısıtmak için kullanılırlar ve kaynak bölgesinin her iki tarafında da kullanılabilirler. Bu sayede kesit alanında üniform dağılımlı bir ısı bölgesi oluşturulabilir [21].



Şekil 2. Bobin tipleri (a) tek kavisli bobin (b) sarmal bobin (c) yassı tabanlı bobin [14].

### 2.3.3. Numune

Bobin ve numune arasındaki en yüksek enerji transferi üç parametrenin düzenlenmesiyle elde edilebilir: Voltaj, güç ve frekans. Optimal etkinlik bölgesinin sadece güç kaynağıyla değil, numune tarafından da belirlendiği, bu yüzden her farklı uygulama için farklı makine düzeneklerinin kullanılması gerektiği araştırmacılar tarafından ifade edilmektedir [14].

### 2.3.4. İkincil parçalar

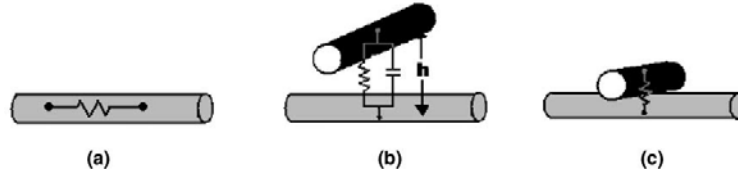
Numunenin bulunduğu bölümdeki parçalar ve test bölgesi de dikkate alınmalıdır. Manyetik alan içerisinde kullanılacak parçaların manyetik olarak iletken olmaması önemlidir [22]. Birleştirme sürecinde basınç kullanılmasına ihtiyaç duyulur. Sürekli ve süreksiz basınç uygulamaları için çeşitli metotlar geliştirilmiştir. Sürekli kaynakta numune induksiyonla ısıtıldıktan sonra bir silindire basınç uygulanarak birleştirilir. Vakumda torbalı kalıplama yöntemi ise süreksiz kaynakta basınç uygulanan bir yöntemdir. Bu yöntem sadece yüksek sıcaklıklarda oldukça düşük viskoziteli termoplastiklerde kullanılır.

## 3. İndüksiyonla ısıtma mekanizmaları ve ısınmaya etki eden faktörler

### 3.1. Isıtma prosesi

#### 3.1.1. Elyaf takviyeli termoplastik kompozitlerin ısıtılması

Isınma oranı; burgaç akımının ve elektriksel direncin frekans ve yoğunluğuna, malzemenin spesifik ısı ve manyetik geçirgenliğine bağlıdır. Miller ve ark. [15], malzemede oluşan burgaç akımının bobin izdüşümünün ayna görüntüsü (tersi) şeklinde yuvarlak bir döngü yarattığını göstermişlerdir. Bu akımın kendi manyetik alanını oluşturması nedeniyle numunenin daha derinindeki bölgelerdeki manyetik alanı yok olabilir. Bu yok oluşun ölçüsü bobine en yakın yüzeyde indüklenen akımın büyüklüğüne bağlıdır. Akım sadece iletken bir doğrultuda veya elyaflarda ilerleyebilir. Bu birbirine dik yatırılmış prepreg yığınlarında ayna görüntüsünün şeklen daha dik açılı olduğu anlamına gelir. Örülmüş tabakalar bobine daha çok benzeyen bir görüntü üretirler. Bunun sebebi örgüdeki yüksek orandaki elektriksel temastır. Üç kategoride tanımlanan ısınma mekanizmaları; Joule kaybı, birleşme noktası ısınması (BNI) ve gecikme kaybıdır. (histerezis kaybı) (Şekil 3)



Şekil 3. Isınma mekanizmaları (a) Joule kaybı (b) BNI (c) gecikme kaybı [14].

#### 3.1.1.1. Joule kaybı – elyaf ısıtma

Elyaf ısınması, elyafın içindeki dirençten kaynaklanan Joule kaybının bir sonucudur. Elyafın uzunluğu, direnci ve kesit alanına bağlıdır. Bu ısınma türünün birincil derecede etkili olduğunu savunan yaklaşım matrisin ısınma üzerinde çok az bir etkisi olduğunu kabul eder. Bu yaklaşıma göre birbirine dik elyaflar arasında çok düşük bir temas direncinin olmasına ihtiyaç duyulur.

#### 3.1.1.2. Birleşme noktası ısınması – dielektrik gecikme kaybı

BNI'nın ilk çeşidinde elyaflar birbirinden çok ince matris katmanlarıyla ayrılır. Alternatif bir elektrik alanının uygulanmasıyla elyaflar arasında bir potansiyel farkı yaratılır ve bir kapasitör etkisi oluşur. Elyafların arasındaki moleküllerin yükünün hareketi ve oryantasyonları dolayısıyla dielektrik ısınma oluşur. Dielektrik ısınma üzerinde direnç

bulunan iletken bir döngü ile paralel yerleştirilmiş bir kapasitör şeklinde modellenebilir. Gillespie ve ark. [24], çalışmalarında çapraz veya açılı tabakalanmış laminantlardaki dielektrik ısınma etkisini maksimize etmek için, arayüzün alt ve üstündeki tabaka kalınlığı ve hacimsel elyaf oranının maksimize edilmesinin ve elyaf çapı ve tabakalar arası reçine kalınlığının minimize edilmesinin gerektiği sonucuna ulaşmışlardır.

### **3.1.1.3. BNI – temas direnci ısınması**

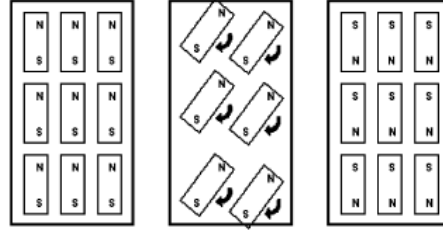
Elyaf temasının oranı yüksek olduğunda temas direnci ısınması baskınlık kazanır. Temas direnci ısınmasının oluşması için doğrudan temas gerekli değildir. Elektronların elyaflar arasındaki mesafeyi geçebileceği kadar küçük olması yeterlidir. Ek olarak, numunenin daha üniform ısınması için daha üniform bir temas yüzeyi gereklidir.

### **3.1.1.4. Joule kaybı ile BNI'nin karşılaştırması**

Yarlagadda ve ark. [16], elyaf ısınmasının sadece elyaflar arasındaki temas direncinin düşük olduğu durumlarda baskın olduğunu ortaya koymuşlardır. Prepregler veya çapraz tabakalarda ise temas direnci yüksek olduğunda BNI baskın olmaktadır. Dokunmuş veya örülmüş kumaşlarda, elyaflar arasında daha geniş bir temas alanı ve böylece daha düşük bir temas direnci dolayısıyla elyaf ısınması baskınlık kazanır. Bunun yanında, proses parametreleri ısınma mekanizmasını BNI'ndan Joule kaybına değiştirebilir. Numune ısındıkça matrisin viskozitesi azalır ve yeterli basınç uygulandığında matriste sıkışmalar nedeniyle dışa taşmalar meydana gelerek daha fazla elyaf teması ve elyaf ısınmasına neden olur [16]. Yarlagadda ve ark. [16], iletken elyaf mimari yapısının baskın olan mekanizmanın belirlenmesinde önemli bir rolü olduğu sonucuna ulaşmışlardır. Örülmüş dokuma yapılar da direkt elyaf temasına bağlı olarak elyaf ısınmasının baskın olduğu, tabaka yatırmalı sistemlerde ise BNI'nin baskın olduğu ortaya konmuştur. BNI'nin temas direncinin,  $10^3 \Omega$  değerinden az olduğu durumlar hariç (karbon elyaf sistemlerinde pek karşılaşılmaz), elyaf ısınmasına göre daha baskın olduğu tespit edilmiştir. Her iki BNI etkisinin (dielektrik gecikme veya temas direnci) kompozitlerde beraber görüldüğü durumlarda temas direnci ısınmasının baskın olduğu gözlenmiştir [16].

### **3.1.1.5. Gecikme kaybı**

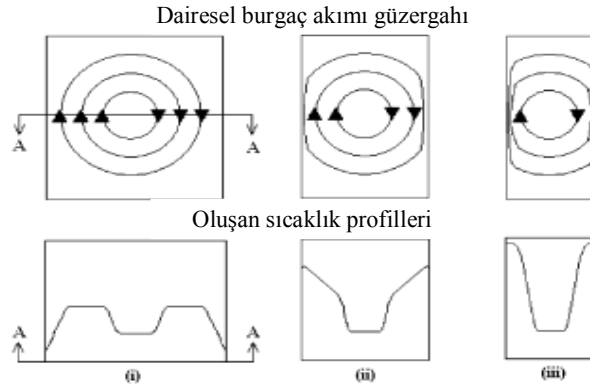
Manyetik bir malzeme değişen manyetik alana maruz kaldığında, malzemedeki manyetik dipoller manyetik alana göre yeniden düzene girerler. Şekil 4'te gösterildiği gibi, değişen manyetik alana uyum sağlamak üzere malzemenin içindeki küçük mıknatısların yön değiştirebilmesi için enerji gerekmektedir. Manyetik dipoller yön değiştirirken titreşirler ve sürtünmeye bağlı olarak enerji ısıya dönüşür. Kullanımda olan kompozit elyaflar manyetik olmadığından gecikme kaybı söz konusu değildir. Bu ısınma süreci sadece metallerde ve Curie sıcaklığına kadar oluşur.



Şekil 4. Manyetik dipollerin manyetik alana göre yön değiştirmesi [14].

### 3.1.2. Kenar etkileri

Kaynak bölgesinin geometrisi indüksiyonla kaynak prosesine etki edebilir. Bobin, numunenin kenarına yakın olduğunda bu durum ortaya çıkar. Şekil 5 (i)'de numunenin bobinden geniş olması durumunda A-A kesitindeki ısı profili şeklini altında gösterilmiştir [15]. Numunenin boyutu Şekil 5 (ii) ve (iii)'deki gibi küçüldüğünde akım bobinin şeklini takip edemez. Kapalı döngü oluşturabilmek için, burgaç akımı numunenin kenarından geçer ve bu bölgelerde sıcaklık profillerinde gösterildiği gibi daha yüksek sıcaklıklara neden olur. Bu olumsuz etkiyi giderebilmek için bobin geometrisi ile numune yüzeyi arasında uyum sağlanmalıdır. Bir diğer yöntem ise kaynak hattında iletken arayüz malzemelerinin kullanımıyla burgaç akımının yönlendirilmesidir.



Şekil 5. Numune geometrisine göre kenar etkileri [15].

### 3.1.3. Diğer ısınma etkileri

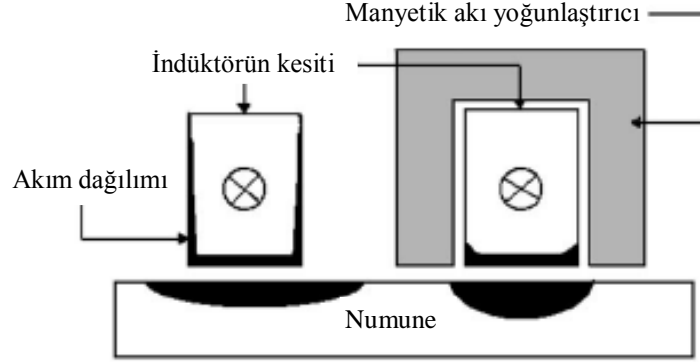
#### 3.1.3.1. Yakınlık etkisi

İletken bir tel ikinci bir iletken telin manyetik alanına yaklaştırıldığında, iki manyetik alanın akımları birbirini etkiler. Akımlar aynı yönde olduğunda manyetik akı çizgileri iki telin merkezinin dışına çıkar. Akımlar zıt yönde olduğunda ise iki telin merkezinde akım yoğunluğu artar. Bu tür bir etkiye en iyi örnek halka şekilli bobinlerdeki halka etkisidir. Bobinin içindeki manyetik akı yoğunluğu dışındakinden fazladır [23].

Yakınlık etkisi ayrıca indüksiyon bobini ile numunenin içinde indüklenen burgaç akımı arasında da oluşur. Bobindeki akımın büyük bölümü numuneye en yakın yüzey boyunca akmaya zorlanır. Yakınlık etkisini artırmak için C şekilli bir akı yoğunlaştırıcı indüktörün üzerine yerleştirilebilir [23]. Akı yoğunlaştırıcı, manyetik olarak iletken bir malzemedir ve



manyetik akının manyetik alanı daha etkin dolaşabilmesini ve yönlendirilmesini sağlar. Akı yoğunlaştırıcılar manyetik alanı istenen bölgeye yönlendirebilir, kontrol edebilir ve odaklayabilirler. Böylece bobinin etkinliği artırılır. Şekil 6’da bu etki diyagram üstünde gösterilmiştir. Şekilde koyu renkli bölgelerde akım yoğunluğu daha fazladır.



Şekil 6. Akı yoğunlaştırıcının numune üzerindeki etkisi [14].

### 3.1.3.2. Yüzey etkisi

İletken bir malzemeden doğru akım geçirildiğinde kesit alanındaki akım dağılımı ünitormdur. Alternatif akımda ise dağılım ünitorm değildir. İndüklenen akım, kesit alanını aynı yoğunlukta geçmek yerine numune yüzeyinden akmaya meyillidir. Bu etkiye yüzey etkisi denir [23]. Yüzey etkisi sonucu ısının çoğu yüzeydeki belirli bir bölgede üretilir. Yüzey etkisini tahmin edebilmek için referans derinliği kullanılır ve burgaç akımı yoğunluğunun %37’ye düştüğü derinlik olarak tanımlanır. Referans derinliği numunenin malzeme özelliklerine bağlıdır. Daha yüksek frekanslar daha küçük referans derinliğine ve dolayısıyla daha sığ yüzey etkisine neden olur. Penetrasyon derinliğinin numunenin kalınlığından fazla olduğu durumlarda frekansın etkisi bulunmaz. İndüksiyonla ısıtma uygulamalarında numunenin tüm kesit alanında ısı bölgesi oluşturabilmek için penetrasyon derinliğinin kalınlıktan büyük olması istenir [14].

### 3.2. Çeşitli modeller

Yarlagadda ve ark.nın [16] çalışmasında, parametrik olmayan değişkenler aracılığıyla hangi ısıtma mekanizmasının baskın olacağını tespitine yönelik modeller geliştirilmiştir. Karbon termoplastik prepreg katmanlarının indüksiyonla ısıtılması sırasında oluşan temas direnci değerlerinin hesaplanabilmesi için bir çalışma ise Kim ve ark. [19] tarafından yapılmıştır. Geliştirilen model üç ısıtma mekanizmasını da içermektedir. Temas direnci değeri, prepreg yüzey özelliklerinin, proses basıncının ve sıcaklığın bir fonksiyonudur. Bir başka çalışmada Kim ve ark. [25], oluşturdukları hesaplama modellerini geliştirmişler ve modellerin etkinliklerini deneysel olarak test etmişlerdir.

## 4. İndüksiyonla ısıtma yönteminde parametrelerin değişmesinin etkileri

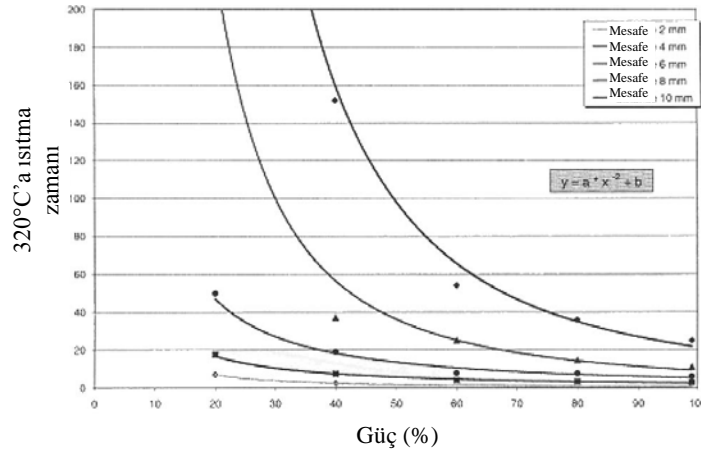
### 4.1. İndüksiyonla ısıtma parametreleri

#### 4.1.1. Frekans

Numunedeki burgaç akımının indüklenmesi alternatif manyetik alana bağlı olduğundan akım frekansı önemli bir parametredir. Frekans ayrıca referans derinliğine etki eder. Frekans yükseldiğinde referans derinliği azalır. Ancak Rudolf ve ark. [21] deneysel olarak, istenen sıcaklığa numunenin ısıtılma süresinin frekans artışına bağlı olarak azaldığı belirlenmiştir. Buna göre, numunede daha fazla enerji üretilmek istendiğinde daha yüksek frekans gerekir. Sonuçta oluşan daha sığ referans derinliği ile bu şartlar dengelenmelidir.

#### 4.1.2. Güç

Numunenin belirli bir bölgesinde oluşturulan ısının miktarı o bölgeye uygulanan güce orantılıdır. Üretilen ısı aynı zamanda frekansın karesi ile orantılıdır. Buna göre, manyetik alanın yoğunluğu azaldığında, azalan güç frekanstaki bir artışla telafi edilebilir. Şekil 7 ısıtma süresinin güce ve bobin/numune mesafesine bağlı olduğunu göstermektedir [14]. Isıtma sistemi tasarlanırken ısıtma süresi, gerekli gücü hesaplarken başlangıç noktası olarak kabul edilebilir, çünkü diğer parametreler malzemenin yapısına bağlı olduğundan büyük değişiklikler gösterebilir.



Şekil 7. Isıtma süresi ve güç arasındaki ilişki [14].

#### 4.1.3. Basınç

Etkili bir birleşme için uygun basıncın uygulanması gerekmektedir. Rudolf ve ark. [26], pratikte uygulanabilecek basınç değerlerinde bir sınır olduğunu tespit etmişlerdir. Basıncın artırılmasıyla kaynak kalitesi azalmıştır. Bunun sebebinin ise kaynak bölgesindeki matrisin dışarı taşması olduğu açıklanmış, basıncın bu taşmaya neden olmayacak şekilde dengelenmesi gerektiği ortaya konmuştur. Yeterli basıncın uygulanmaması halinde aşağıdaki kusurlar meydana gelebilir:

##### 4.1.3.1. Boşluklar

Elyaf demetleri basınç ve ısı altında deforme oldukça elastik enerjinin açığa çıkması, gaz balonlarının yayılması, hava ceplerinin çökmesi, gereken sıcaklığın altına soğutmadan önce

basıncın kaldırılmasına bağılı termal gerilimler boşlukların oluşmasına katkıda bulunur. Hava balonlarının hapsolması için yüzey pürüzlülüğü önemli bir parametredir. Boşlukların oluşumunun devamında katmanlara ayrılma gerçekleşir.

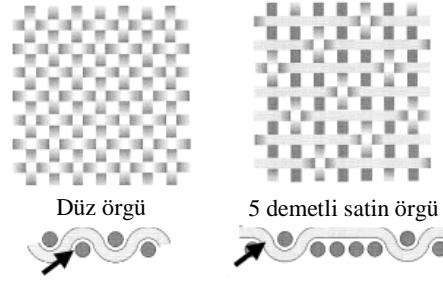
#### 4.1.3.2. Çatlaklar

Çatlaklar, matris ve elyaf takviye arasındaki termal uyumsuzluğa bağılı termal gerilimin sayesinde oluşurlar. Çatlak oluşumu soğutma safhasında basıncın kontrol edilmesiyle önlenir. Böylece matrisin yayılması ve büzülmesi önlenir. Üniform bir sıcaklık profili oluşturulduğunda ve sıcaklık erime veya camsı geçiş sıcaklığının altındayken basınç kaldırılabilir.

#### 4.1.4. Uygulama süresi

Numunenin indüksiyonla ısıtmaya maruz kaldığı süre, polimer moleküllerin kaynak arayüzünde hareketine etki eder. Genel olarak, uzun proses süresi kaynağın daha iyi olmasını sağlar. Çünkü daha fazla polimer zincirinin kaynak arayüzünde hareket edecek zamanı olur. Yetersiz kaynak süresinde düşük sıcaklık nedeniyle ısıtma yetersiz ve kaynak gücü az olur. Süre uzatıldığında, kaynağın kalitesinin arttığı ve sıcaklığın  $T_g$ 'yi (Camsı geçiş sıcaklığı) geçmesi sağlanarak üniform füzyon oluşur. Numunedeki sıcaklık maksimum kaynak sıcaklığını aştığında polimerde termal bozunma ve dolayısıyla kaynak gücünde bozunma meydana gelir [14].

Yarlagadda ve ark. [14] araştırmalarında, elyaf takviyeler arasındaki mesafe değişimleri ile elyaf direncindeki değişimlerin ısınma mekanizmaları üzerindeki etkilerini ortaya koymuşlardır. Buna göre birleşme noktası mesafesi artırıldığında BNI baskınlık göstermektedir, ancak dairesel döngünün direnci arttığından oluşan ısı azalmaktadır. Bir diğer çalışmada [27], bobin ve numune arasındaki mesafenin artmasıyla manyetik alanın yoğunluğunun azalmasıyla yüzeyin, kesitin derinliklerine göre daha hızlı ve fazla ısınacağı ve termal bozunma ve hasarlara neden olabileceği varsayılmış, artan mesafeye ve numune kalınlığına göre ısınma süresinin arttığı, ancak yakın mesafelerde ise yüzey ısısının kaynak arayüzüne göre daha fazla olacağından kesit alanında üniform bir ısı dağılımı yaratılmayacağı tespit edilmiştir. Farklı elyaf türlerinin çaplarındaki değişikliğin ısınmaya etkileri de incelenmiştir [28]. Rudolf ve ark. [21], jeneratör gücünün, numune ve bobin arasındaki mesafenin, bobin geometrisinin ısıtma süresine etkilerini incelemişler, numunedeki elyaf mimarisinin şekli hakkında da sonuçlara ulaşmışlardır. Şekil 8'de gösterilen düz örgü mimarisindeki elyaflarda birleşme noktasının daha fazla olması nedeniyle düz örgü elyaflar 5 demetli satin örgü mimarisindeki elyaflardan daha hızlı ısınmaktadır.



Şekil 8: Düz örgü ve 5 demetli satin örgü yapıları [21].

## 5. Sonuç

İndüksiyonla ısıtma hızlı ve temiz bir prosestir. Yöntemin önemli bir avantajı malzemenin tamamı yerine istenen bölgede ısıtma yapılabilmesidir [29]. Düzensiz yüzeyle karmaşık geometri yapıları uygulanabilir. Bu proseste bir diğer avantaj kaynak alanının ikinci bir ısıtma ile tekrar açılarak bileşenlerin içinin tamirinin, değiştirilmesinin veya hatalı kaynağın düzeltilmesinin mümkün olmasıdır. İyi bir kaynak arayüzeyi oluşturmak için bobinin tasarımı ile elyaf mimarisi ve oryantasyonu öncelikli iki etkidir [30].

Bununla birlikte indüksiyonla kaynak prosesinde makine kurulum maliyetleri yüksektir ve parça geometrisine göre farklı şekillerde bobinler kullanılmalıdır. Üretime yönelik ideal parametreler belirlenerek termoplastik matrisli karbon elyaf takviyeli malzemelerin indüksiyonla ısıtılması sayesinde daha düşük maliyetlerle daha hızlı üretilebilmesinin, öncelikle ülkemizin havacılık ve uzay çalışmalarına hız kazandıracacağı, diğer yandan otomotiv, enerji ve daha birçok sektörde tasarım kolaylıkları ile yeni üretim yöntemlerinin geliştirilmesine katkı sağlayacağı değerlendirilmektedir.

## Kaynaklar

- [1] Bayerl, T., Duhovic, M., Mitschang, P., Bhattacharyya, D., The heating of polymer composites by electromagnetic induction – A review, **Composites: Part A**, 57, 27-40, (2014).
- [2] Menana, H., Féliachi, M., 3-D eddy current computation in carbon-fibre reinforced composites, **IEEE Transactions on Magnetics**, 45(3), 1008–1011, (2009).
- [3] Ramdane, B., Trichet, D., Belkadi, M., Saidi, T., Fouladgar, J., Electromagnetic and thermal modelling of composite materials using multilayer shell elements, **IEEE Transactions on Magnetics**, 72(5), 1134–1137, (2011).
- [4] Chen, S.C., Jong, W.R., Chang, J.A., Dynamic mould surface temperature control using induction heating and its effect on the surface appearance of weld line, **Journal of Applied Polymer Science**, 101, 1174–1180, (2006).
- [5] Kim, S., Shia, C.S., Kim, B.H., Yao, D., Injection moulding nanoscale features with the aid of induction heating, **Polymer-Plastics Technology and Engineering**, 46, 1031–1037, (2007).
- [6] Tanaka, K., Katsura, T., Kinoshita, Y., Katayama, T., Mechanical properties of jute fabric reinforced thermoplastic moulded by high-speed processing using

- electromagnetic induction, **High Performance Structures and Materials IV WIT Transactions on The Built Environment**, 97, 211–219, (2008).
- [7] Border, J., Salas, R., Induction heated joining of thermoplastic composites without metal susceptors, **Proceedings of the 34th international SAMPE symposium**, 1989, 2569-2578, (1989).
- [8] Stokes, V.K., Experiments on the induction welding of thermoplastics, **Polymer Engineering and Science**, 43(9), 1523–1541, (2003).
- [9] Kagan, V.A., Nichols, R.J., Benefits of induction welding of reinforced thermoplastics in high performance applications, **Journal of Reinforced Plastic Composites**, 24(13), 1345–1352, (2005).
- [10] Knauf, B.J., Webb, D.P., Liu, C., Conway, P.P., Polymer bonding by induction heating for microfluidic applications, **Proceedings of the 3rd IEEE international conference on electronics systems and integration technologies (ESTC)**, Berlin, 8, (2010).
- [11] Knauf, B.J., Webb, D.P., Liu, C.C., Conway, P.P., Low frequency induction heating for the sealing of plastic microfluidic systems, **Microfluid Nanofluid**, 9(2-3), 243–252, (2010).
- [12] Shevchenko, N., Fink, B.K., Yarlagadda, S., Tierney, J.T., Heider, D., Gillespie, Jr. J.W., Rapid automated induction lamination (RAIL) for high-volume production of carbon/thermoplastic laminates, Aberdeen Proving Ground: Army Research Laboratory, (2001).
- [13] Zach, T., Lew, J., North, T.H., Woodhams, R.T., Joining of high strength oriented polypropylene using electromagnetic induction bonding and ultrasonic welding, **Materials Science and Technology**, 5, 281–287, (1989).
- [14] Ahmed, T.J., Stavroc, D., Bersee, H.E.N., Beukers, A., Induction welding of thermoplastic composites – An overview, **Composites: Part A**, 37, 1638-1651, (2006).
- [15] Miller, A.K., Chang, C., Payne, A., Gur, M., Menzel, E., Peled, A., The nature of induction heating in graphite-fibre, polymer-matrix composite materials, **SAMPE Journal**, 26 (4), 37-54, (1990).
- [16] Yarlagadda, S., Kim, H.J., Gillespie, Jr.J.W., Shevchenko, N.B., Fink, B.K., A study of the induction heating of conductive fibre reinforced composites, **Journal of Composite Materials**, 36 (4), 401-421, (2002).
- [17] Yarlagadda, S., Kim, H.J., Gillespie, Jr.J.W., Shevchenko, N.B., Fink, B.K., Heating mechanisms in induction processing of carbon fibre reinforced thermoplastic prepreg, **Proceedings of SAMPE sempozyumu**, Long Beach ABD, (Mayıs 2000).
- [18] Fink, B.K., McCullough, R.L., Gillespie, Jr.J.W., Experimental verification of models for induction heating of continuous-carbon-fibre composites, **Polymer Composites**, 17 (2), 198-209, (1996).
- [19] Kim, H., Yarlagadda, S., Gillespie, Jr.J.W., Shevchenko, N.B., Fink, B.K., A study on the induction heating of carbon fibre reinforced thermoplastic composites, **Advanced Composite Materials**, 11 (1), 71-80, (2002).
- [20] Puyal, D., Bernal, C., Burdío, J.M., Acero, J., Millan, I., Methods and procedures for accurate induction heating load measurement and characterization, **IEEE International Symposium on Industrial Electronics**, 805-810, (2007).

- [21] Rudolf, R., Mitschang, P., Neitzel, M., Induction heating of continuous carbon-fibre-reinforced thermoplastics, **Composites: Part A**, 31, 1191-1202, (2000).
- [22] Stokes, V.K., Experiments on the induction welding of thermoplastics, **Proceedings of the Annual Technical Conference 2001**, 1256-1261, (2001).
- [23] Rudnev, V., Loveless, D., Cook, R., Black, M., **Handbook of induction heating**, New York, ABD, Marcel Dekker, (2003).
- [24] Gillespie, Jr.J.W., McCulough, R.L., Fink, B.K., Induction heating of cross-ply carbon-fiber composites, **Proceedings of the 50th Annual Technical Conference 92**, 2106-2109, (1992).
- [25] Kim, H.J., Yarlagadda, S., Shevchenko, N.B., Fink, B.K., Gillespie, Jr.J.W., Development of a numerical model to predict in-plane heat generation patterns during induction processing of carbon fiber-reinforced prepreg stacks, **Journal of Composite Materials**, 37 (16), 1461-1483, (2003).
- [26] Rudolf, R., Mitschang, P., Neitzel, M., Welding of high-performance thermoplastic composites, **Polymers and Polymer Composites**, 7, 309-315, (1999).
- [27] Hübner, M., Mitschang, P., Characterization and modification of the temperature distribution during continuous induction welding, **16th European Conference On Composite Materials**, Seville, Spain, (Haziran 2014).
- [28] O'Shaughnessey, P.G., Dube, M., Villegas, I.F., Modeling and experimental investigation of induction welding of thermoplastic composites and comparison with other welding processes, **Journal of Composites Materials**, 50 (21), 2895-2910, (2016).
- [29] Deng, S., Djukic, L., Paton, R., Ye, L., Thermoplastic-epoxy interactions and their potential applications in joining composite structures – A review, **Composites: Part A**, 68, 121-132, (2015).
- [30] Yousefpour, A., Hojjati, M., Immarigeon, J.P., Fusion bonding/welding of thermoplastic composites, **Journal of Thermoplastic Composite Materials**, 17, 303-339, (2004).