



Experimental analysis of an electromagnetic pulse forming systems pre-heated by induction

Besim Baranoğlu^{1,2*}, Mehmet Efe Özbek³, Elif Aydın³

¹Department of Manufacturing Engineering, Atılım University, Ankara, 06836, Turkey

²Metal Forming Center of Excellence, Atılım University, Ankara, 06836, Turkey

³Department of Electrical and Electronics Engineering, Atılım University, Ankara, 06836, Turkey

Highlights:

- Design and implementation of electromagnetic forming system
- Induction heating system design
- Experimental results of electromagnetic pulse forming systems pre-heated by induction

Keywords:

- Electromagnetic forming
- High speed forming
- Sheet metals
- Induction heating

Article Info:

Research Article
Received: 16.08.2019
Accepted: 18.05.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.605773

Acknowledgement:

The Scientific and Technological Research Council of Turkey
Project number: 215M929

Correspondence:

Author: Besim Baranoğlu
e-mail:
besim.baranoglu@atilim.edu.tr
phone: +90 312 586 8680

Graphical/Tabular Abstract

High speed forming is a trending technique in sheet metal forming processes. Electromagnetic forming is one of the methods in high speed forming which is mostly employed in forming of sheet metal and pipes. For brittle materials, to increase formability, heating is employed, which would slow down the forming process if performed externally. Induction heating provides a proper option where the heating and forming processes can be sequentially applied. Induction heating is currently employed in many heating processes, both for industrial and domestic use. Its advantages such as efficiency, fast heating, safety, cleanness and accurate control makes it appropriate for such purposes. In this study, an electromagnetic forming system combined with induction heating is designed and constructed. This way, a controlled heating can be performed which is followed by the electromagnetic forming process.

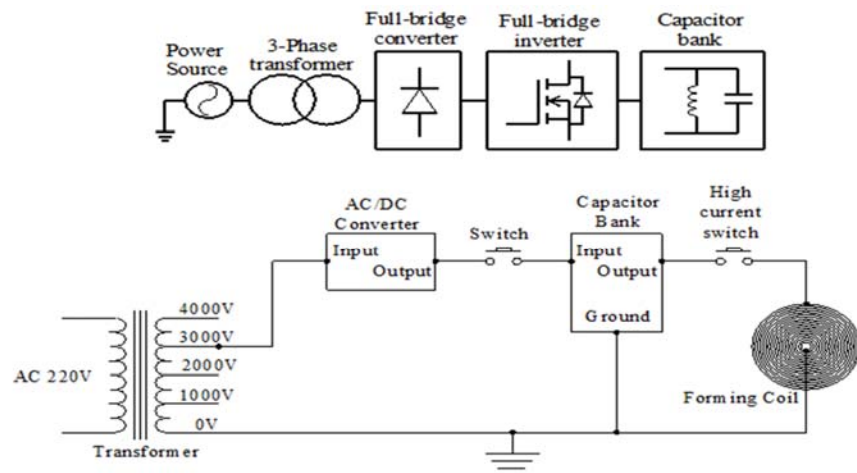


Figure A. Induction heating system circuit diagram and forming system circuit design

Purpose: To combine the heating and forming process in an induction heating/electromagnetic forming system to improve the formability of brittle materials.

Theory and Methods:

Induction heating and electromagnetic forming methods are employed within the study. The material is first heated and then formed with the coil-die set system.

Results:

The combined induction heating/electromagnetic forming system is utilized to bulge Al7075 sheets of 0.75 mm thickness. It has been seen that the forming can be done effectively. The material that is used in the tests (Al7075) does not have an improved formability in the temperature regions tested; therefore, the system, although worked with good precision, did not lead to better forming results for the tested material.

Conclusion:

The combined induction heating and electromagnetic forming system that utilizes the coil-die set system is successfully operated and tested. The system is shown to perform well in forming of Al7075 sheet samples.



İndüksiyon ön ısıtmalı bir elektromanyetik darbe şekillendirme sisteminin deneysel analizi

Besim Baranoğlu^{1,2}*, Mehmet Efe Özbek³, Elif Aydın³

¹Atılım Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İmalat Mühendisliği Bölümü, 06836 İncek Ankara, Türkiye

²Atılım Üniversitesi, Metal Şekillendirme Mükemmeliyet Merkezi, 06836 İncek Ankara, Türkiye

³Atılım Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 06836 İncek Ankara, Türkiye

Ö N E Ç İ K A N L A R

- Elektromanyetik şekillendirme sistemi tasarımı ve uygulaması
- İndüksiyon ısıtma sistemi tasarımı
- İndüksiyon ön-ısıtmalı elektromanyetik şekillendirme sisteminin deney çıktıları

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 16.08.2019

Kabul: 18.05.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.605773

Anahtar Kelimeler:

Elektromanyetik
şekillendirme,
yüksek hızlı şekillendirme,
gevrek sac malzemeler,
indüksiyon ısıtma

ÖZET

Bu çalışmada, özellikle otomotiv, uçak, uzay ve savunma sanayinde kullanımları giderek artmakta olan alüminyum, magnezyum, titanyum ve nikel alaşımları gibi gevrek malzemeleri şekillendirebilmek amacıyla tasarımı yapılan bir indüksiyon ısıtma sistemi ve bir elektromanyetik şekillendirme sistemi kurulmuştur. Devreye alınan sistemler Al7075 levhaları ile test edilmiştir. İndüksiyon ısıtma sistemi ile ön ısıtması yapılan farklı kalınlıktaki sac malzemeler elektromanyetik şekillendirme sistemi ile şekillendirilmiş ve bu sürecin etkinliği değerlendirilmiştir. Sistemin, uygun kalıp ve bobin tasarımları ile değişik sanayi uygulamalarında kullanılan metal alaşımlarını ılık ve sıcak olarak nitelendirilecek sıcaklıklarda şekillendirebilecek bir kapasiteye sahip olduğu gözlemlenmiştir.

Experimental analysis of an electromagnetic pulse forming system pre-heated by induction

H I G H L I G H T S

- Design and implementation of electromagnetic forming system
- Induction heating system design
- Experimental results of an electromagnetic forming system pre-heated by induction

Article Info

Research Article

Received: 16.08.2019

Accepted: 18.05.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.605773

Keywords:

Electromagnetic forming,
high speed forming,
brittle sheet metals,
induction heating

ABSTRACT

In this study, an induction heating and an electromagnetic forming system are implemented which are designed to form brittle materials such as aluminum, magnesium, titanium and nickel alloys which finds more applications in especially automobile, aerospace and defense industries. The implemented systems are tested with Al7075 alloy sheets. The sheet material of different thicknesses is first heated using the induction heating system and then formed with the electromagnetic forming system after which the effectiveness of the process is evaluated. It has been observed that, with proper die sets and coil designs, the system has a capacity to form, both warm and cold, different metal alloys that are employed in different industrial applications.

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: *besim.baranoglu@atilim.edu.tr, efe.ozbek@atilim.edu.tr, elif.aydin@atilim.edu.tr /

Tel: +90 312 586 8680

2102

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Son yıllarda yüksek hızlı şekillendirme tekniklerine yönelik artan bir ilgi ve yüksek bir talep bulunmaktadır. Elektromanyetik şekillendirme, özellikle sac metal ya da cidarlı boru malzemelerin şekillendirilmesinde kullanılan yüksek hızlı bir şekillendirme teknolojisidir. Teknolojinin temeli, zamanla birlikte değişen elektromanyetik alanın, yakın bir iletken malzeme üzerinde akım oluşturması ve buna karşılık oluşan Lorentz kuvvetlerinin malzemeyi plastik (kalıcı) deformasyona uğratmasıdır. Bu alandaki ilk çalışmalar 1950'li yıllarda Harvey ve Brower'ın patenti ile başlamış sayılabilir [1]. 1969 yılında yayınladığı bir çalışmada [2] Brower teknolojiyi daha ayrıntılı bir şekilde anlatmıştır. Bu teknolojinin uygulama alanları ve çalışma esasları ile ilgili çok detaylı bir inceleme, Psyk ve arkadaşları tarafından yayınlanmıştır [3].

Elektromanyetik şekillendirme, geleneksel şekillendirme olarak tabir edilebilecek olan diğer sac metal şekillendirme işlemlerine göre belirli bazı avantajlar içermektedir. Bu avantajların en önde gelenleri: şekillendirme işleminin şekillendirilen metal yüzeyine dokunmadan yapılıyor olması ve bobinden geçen akımın frekansının yüksek olması dolayısı ile şekillendirme işleminin çok kısa zamanda (mikro saniyeler mertebesinde) gerçekleşmesidir. Özellikle otomotiv, uçak ve beyaz eşya sektörlerinde elektromanyetik şekillendirme işlemleri, üretim hızının artırılması, metal yüzeyine dokunulmadığı için pürüzsüz yapıların elde edilebilmesi ve şekillendirme sınırlarının daha yüksek olması (yırtılmaların daha az olması) nedeni ile yoğun olarak kullanılmaktadır [3].

Kullanılan indüksiyon bobinine ve elektromanyetik alanın şekillendirme için kullanıldığı malzemenin geometrisine göre değişik amaçlarla elektromanyetik şekillendirme işlemleri yapılabilir: (a) boru çapı daraltılabilir, (b) boru çapı genişletilebilir, (c) sac malzeme bir kalıp içine ya da serbest olarak şekillendirilebilir [4-9].

Bunların yanında, sac metali kesmek için de elektromanyetik alan kullanımı literatürde mevcuttur ancak bu konuda çalışmalar nispeten azdır. Benzer şekilde, elektromanyetik darbe ile birleştirme teknolojileri de literatürde yer almaktadır [3, 10].

Son yıllarda, farklı ısıtma teknolojilerine de yüksek talep ve artan bir ilgi oluşmuştur. Elektromanyetik ısıtma, avantajlarından dolayı ilgi gören tekniklerden biridir. Elektromanyetik ısıtma yüksek hızlı bir işlemdir ve metal parçaları ısıtmak için sadece birkaç saniye veya dakikaya ihtiyaç duyar. Sac metal ısıtma, elektromanyetik ısıtmanın en değerli uygulama alanlarından biridir [11].

İletken malzemelerin ısıtılması birçok sektörde ihtiyaç duyulan önemli bir işlemdir. Elektrikli ısıtma, çok defa, yakıt kullanan geleneksel ısıtma yöntemlerine tercih edilir. Bu tercih, elektrikli ısıtmanın yüksek verim, düşük maliyet,

temizlik, kompaktlık, hızlı başlatma ve kapatma ile kolay sıcaklık kontrolü gibi avantajlarından kaynaklanmaktadır. Ancak bu avantajlardan etkin bir şekilde yararlanmak için uygun bir indüksiyon ısıtıcısının geliştirilmesi gereklidir [12]. Elektromanyetik prensiplere dayalı bir ısıl işlem olan indüksiyonla ısıtma günümüzde yaygın olarak kullanılmaktadır. İndüksiyonla ısıtma, metallerin işlenmesi (sertleştirme ve tavlama), deformasyon öncesi ısıtma (dövme, ekstrüzyon, bükme ve delme), lehimleme, büzülme, kaplama, eritme, kristal büyümesi, kapak sızdırmazlığı ve karbon buharı birikmesi gibi işlemler için kullanılır [13, 14]. Evlerde kullanılan indüksiyonlu elektrikli ocaklar, indüksiyonlu ısıtma sisteminin kullanım alanlarına önemli bir örnektir. Uygulama alanı kullanılan frekansa göre farklılık göstermektedir ve indüksiyon fırınlarının çalışma frekansı 10 Hz ile 800 kHz arasında değişebilmektedir.

İndüksiyonlu ısıtma teknolojisi günümüzde, yüksek ısıtma verimliliği, yüksek hız ve çevre koruma özellikleri ile metalik malzemelerin işlenmesinde tercih edilen bir teknolojidir. Çeşitli endüstri kollarında, metal ısıl işlem, sıcak montaj ve kaynak, eritme işlemlerinde yaygın olarak kullanılır. İndüksiyonlu ısıtma iş parçasını bir bütün olarak ısıtmanın yanı sıra, iş parçasının belirlenmiş bir bölgesini ısıtmak için de kullanılabilir [15, 16].

Bu çalışmada, bir indüksiyon ısıtma sistemi ve bir elektromanyetik şekillendirme sistemi tasarlanmış, bu sistemler ayrı ayrı test edilerek deney sonuçları sunulmuştur. İndüksiyon ısıtma sistemi ile ön ısıtması yapılan sac malzemeler elektromanyetik şekillendirme sistemi ile şekillendirilmiş ve deney sonuçları analiz edilmiştir. Deneylerde, özellikle havacılık ve uzay sanayiinde giderek artan kullanımı sebebi ile [17] Al7075 alaşımı sac malzeme kullanılmıştır.

2. DENEYSEL ÇALIŞMA (EXPERIMENTAL WORK)

2.1. İndüksiyon ısıtma sistemi (Induction heating system)

İndüksiyonlu ısıtma sisteminin tasarımı çoğunlukla genel hesaplamalara ve deneyime bağlıdır. Bu, tasarımı pahalı, zor ve zaman alıcı bir iş haline getirir. Bu çalışmada, belirli bir sac levhanın gerekli bir kısmını istenen zaman aralığında istenen sıcaklığa ısıtmak için uygun indüksiyon ısıtıcı tasarımı yapılmıştır.

İndüksiyonla ısıtma sırasında, Eddy akımı, ilk indüksiyon akımına ters şekilde akar. Metal Eddy akımlarının yardımı ile ısınır. Bu nedenle Eddy akımını etkileyen her faktör dikkate alınmalıdır. Bunlar genellikle kullanılan metalin fiziksel ve elektriksel özelliklerini kapsar. Ayrıca yüksek frekanslarda, deri kalınlığının (δ) da dikkate alınması gerekir. Deri kalınlığı alternatif akımın metale ne kadar nüfuz ettiğinin bir göstergesidir. Frekans arttıkça, akım metalin merkezinden uzaklaşarak yüzeye yaklaşır. Akımın metalin yüzeyine yoğunlaşması metalin etkin direncinin artmasına neden olur [12].

Elektromanyetik sac metal ısıtmanın matematiksel analizi oldukça karmaşık işlemler içermektedir. Son zamanlarda yapılan bazı yayınlarda bu işlemin çalışma prensipleri açıklanmış ve sayısal analiz için yöntemler önerilmiştir [18-21]. Manyetik indüksiyon prensibi sayesinde indüksiyon ısıtıcıları metalleri ısıtmak için kullanılır.

İndüksiyonlu ısıtma sistemi temel olarak bir redresör devresi, bir invertör devresi, bir bobin, bir kondansatör ve bir direnç içeren bir rezonans devresinden oluşur. Rezonans devreleri, enerjiyi en uygun ve verimli şekilde ısıtılacak parçaya aktarmak için kullanılır. İndüksiyonlu ısıtmada gereken yüksek frekanslı akımı üretmek için kullanılan standart yöntemlerden biri köprü tipi invertördür [22]. Bu çalışmada tasarlanan indüksiyon ısıtma sisteminin nominal çıkış gücü ve frekansı sırasıyla 1kW ve 13 kHz'dir (Şekil 1). İşlenecek parçanın veya ocağın ısıtma hızı, indüklenen akımın frekansına, indüklenen akımın yoğunluğuna, malzemenin özgül ısısına, malzemenin manyetik geçirgenliğine ve malzemenin elektriksel direncine bağlıdır. Çalışma frekansı, iş parçasındaki ısıtma derinliğinin yanı sıra, enerji aktarım hızını da etkiler. İndüksiyon sisteminin çalışma frekansı iş parçasının büyüklüğü ve ısıtma uygulamasının türüne göre seçilir ve bu frekans, tank devresinin kapasitansı, bobinin indüktansı ve iş parçasının malzeme özelliklerine göre belirlenir.

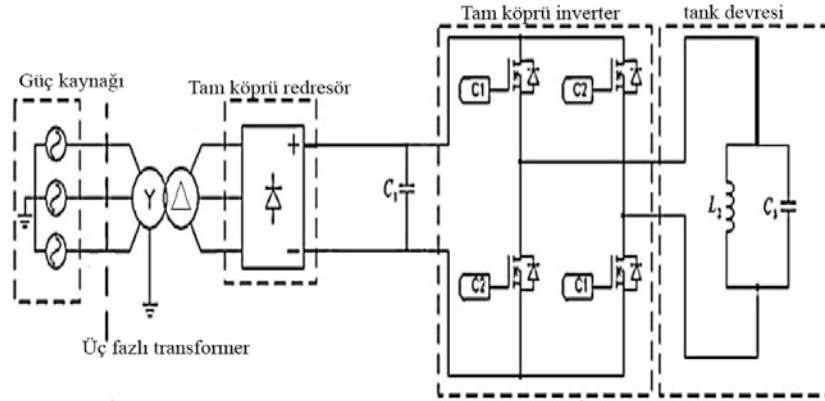
Bu çalışmada frekans değeri 13 KHz olarak belirlenmiştir. Boyutları 20 cm x 30cm x 0,5 mm olan bir alüminyum parçanın ısıtılması amaçlanmıştır. Isı miktarı

$$Q = mc \Delta T \text{ (kalori)} \quad (1)$$

olarak hesaplanır (Eş. 1). Bu eşitlikte, Q, elektromanyetik işlemde sonra ulaşılan ısı değeri, m, malzemenin kütlesi olup c değeri 0,217 ve ΔT ise 300°C'dir. Yukarıda belirtilen iş parçasının kütlesi 90 gr ve alüminyum malzeme sacının erime noktası ve özgül ısı değerleri sırasıyla 660°C ve 0,902 J/g°C'dir. Ancak bu çalışmada erime hedeflenmemiştir. İş parçasının ortalama 200°C'ye kadar ısıtılması yeterli görülmüş ve ihtiyaç duyulan güç 1kW olarak hesaplanmıştır. Bu uygulama için baz voltajı 100 V olarak seçilmiş, bu nedenle yük yaklaşık 100 V genlikli bir kare dalgaya maruz bırakılmıştır. Buna bağlı olarak akımın rms değeri yaklaşık 11 A bulunmuştur. Bu gerilim ve akım değerlerini kullanarak anma gerilimi 600 V ve anma akımı 40 A olan IGBT cihazları uygulama için güvenle seçilebilir. Doğrultucu diyotlar 10 A gibi daha düşük bir anma akımına sahip olabilir. Ancak, ani gerilim düşüşleri veya frekans değişimlerinin akım artışlarına neden olabileceği dikkate alınmıştır. Ayrıca, gelecekteki çalışmalar için daha güçlü bir sisteme sahip olmak ve farklı boyutlardaki malzemeleri de ısıtabilmek için, daha yüksek kapasiteli cihazların kullanılması tercih edilmiş ve Tablo 1'de listelenen cihazlar kullanılmıştır. Tablo 1'de ayrıca, daha önceki bir çalışmamızda [23] kullanılmış olan diğer devre parametrelerinin listesi de verilmiştir.

Sistemin çalışması için Darbe Genişlik Modülasyonu (PWM) sinyalleri üretmek çok önemlidir. Bu çalışmada, TMS 320F28335 Dijital Sinyal İşlemcisi (DSP), kapı sinyalleri üretmek için kullanılmıştır (Şekil 2).

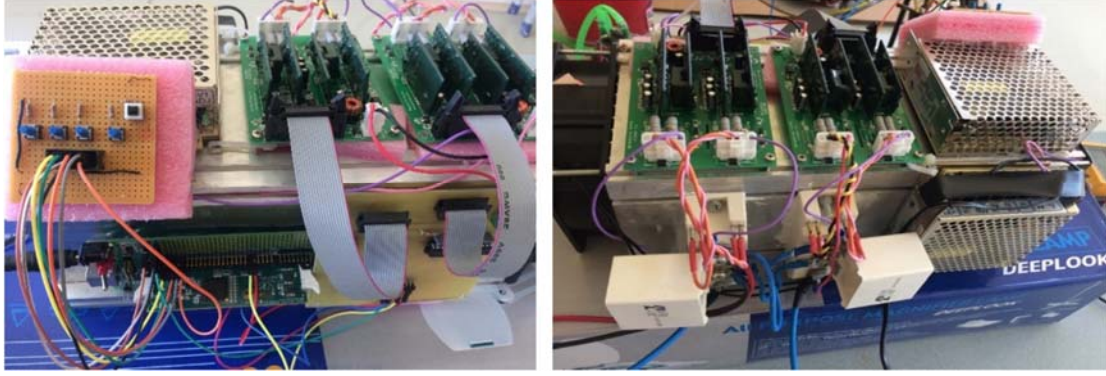
Yapılan hesaplamalar ve benzetim çalışmaları sonucunda tasarlanan indüksiyonlu ısıtma sistemi [23] bu çalışmamızda



Şekil 1 İndüksiyon ısıtma sisteminin devre şeması (Schematic diagram of induction heating circuit)

Tablo 1. Kullanılan malzemeler ve model numaraları (Devices and their model numbers)

Aygıt	Model / Değer
Güç kaynağı (doğrultucu dahil)	500 VDC 50ADC çıkış 400 VAC, 50 Hz, 3- faz giriş
IGBT Modülleri	SKM150GB12T4 150A 1200V
IGBT Sürücüleri	DA102D2 IGBT LMY
Rezonans kondansatörü	45µF
Rezonans bobini	3µH
DSP	TMS 320F28335



Şekil 2. DSP tarafından kontrol edilen IGBT sürücü devreleri kullanılarak PWM ile tetiklenen anahtarlar [23]
(Switches triggered with PWM using IGBT driver circuits controlled by DSP [23])

kurularak test edilmiştir. Rezonans devresini oluştururken yassı devre kullanılmıştır. 90 gram ağırlık ve 200 x 300 x 0.5mm boyutlarında alüminyum bir iş parçası üzerinde ısıtma deneyleri yapılmıştır. Sistemin çıkışında oluşan sıcaklık, kızılötesi termal kamera kullanarak ölçülmüştür. Tablo 2’de ölçüm sonuçlarından örnekler verilmiştir.

Tablo 2. Sistemin giriş gerilimi, giriş akımı, çalışma parçasının ısı değeri ve ısınma zamanı
(Input voltage, input current of the system, temperature of working sheet and heating time)

Giriş gerilimi (V)	Giriş akımı (A)	Çalışma parçasının ısı değeri (°C)	Zaman (s)
50	2	36	30
70	3,6	53	65
98	8	170	205
120	12	230	300
139	13,2	282	420
148	14,7	291	450

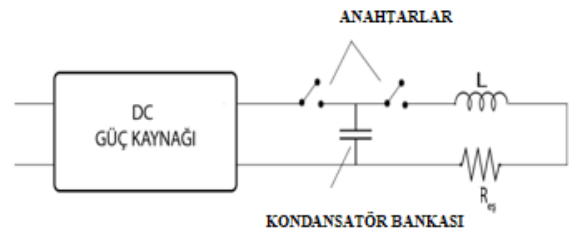
2.2. Elektromanyetik şekillendirme sistemi (Electromagnetic forming system)

Genel olarak elektromanyetik şekillendirme sistemi; bobin ve iletken sac malzemenin karşılıklı indüksiyonundan oluşan bir sistemdir [3, 9]. Bu uygulamada şekillenecek sac ile şekillenmeyi sağlayan bobin yüzeyi arasında mekanik bağlantı yoktur. Bu şekillendirme sistemi, elektromanyetik alanı oluşturacak yüksek enerjili bir sistem olup güç kaynağı, kondansatör bankası, yüksek akım anahtarı, direnç ve bobinden oluşmaktadır.

Şekillendirme sırasında kullanılan bobin üzerinden yüksek frekanslı akım geçirilmektedir. Çalışmalar göstermektedir ki, bu akımın frekansının yüksekliği ve akım tepe değeri oluşan manyetik alanın büyüklüğünü etkilemektedir. Temelde, şarjı oluşturmak için bir direnç (R)-bobin (L)-kondansatör (C) devresi oluşturulur (Şekil 3).

Bu devrenin toplam enerjisi (E_c) Eş. 2 ile ifade edilebilir.

$$E_c(t) = \frac{1}{2} CV^2(t) \quad (2)$$



Şekil 3. Seri R-L-C devresi (Series R-L-C circuit)

Burada, belirli bir t zamanında kondansatör üzerinde ölçülen gerilim farkı V ile ve kondansatörün toplam kapasitesi C ile gösterilmektedir. Seri R-L-C devrelerinin az sönümlü (underdamped) olması durumunda, sönümlü bir dalga akımı ortaya çıkmaktadır. Bu akımın doğal frekansı Eş. 3 olarak verilebilir.

$$\omega_0 = 1/\sqrt{LC} \quad (3)$$

Sistemin sönümlenme katsayısı (β)

$$\beta = \frac{R}{2L} \quad (4)$$

Eş. 4 ile ifade edilirse, sistemin deşarj frekansı eşitliği Eş. 5 ile ifade edilebilir.

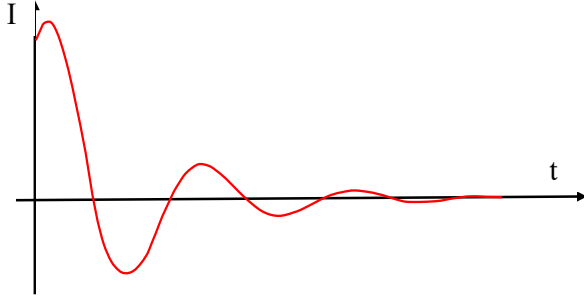
$$\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2} \quad (5)$$

Deşarj akımının zamana göre değişimi, örnek bir grafik olarak Şekil 4’te verilmiştir. Deşarj akımı zamana bağlı olarak Eş. 6 ile ifade edilebilir.

$$I(t) = \frac{V_0}{\omega L} e^{-\beta t} \sin(\omega t) \quad (6)$$

Burada dikkat edilmesi gereken hususlar şunlardır: (a) kondansatörün sistem devreye alınmadan önceki gerilim farkı (V_0) ne kadar yüksek olursa, darbe akımı tepe değeri o kadar yüksek olacaktır. (b) sistemin frekansı, sistem parametreleri olan R, L ve C değerleri ile değişmektedir. Buna göre, uygun kapasitede kondansatörlerin seçimi, uygun

bobin tasarımı ve sistemin direncinin frekansı istenilen değerde tutacak şekilde ayarlanması önem arz etmektedir.



Şekil 4. RLC devresinin deşarj akımının zamana göre değişimi
(Variation of the discharge current of the RLC circuit versus time)

Sistemin temel çalışma prensibi şu şekilde izah edilebilir: Doldurulan kondansatörler ile bobin arasındaki anahtar kapatıldığı zaman kısa bir sürede, Şekil 4'te görüldüğü gibi yüksek genlikli sinüzoidal sönümlü bir uyartım akımı oluşur ve bu akım bir elektromanyetik alan yaratır. Oluşan elektromanyetik alan Maxwell denklemi ile bulunabilir:

$$\nabla \cdot E = \frac{\rho}{\epsilon} \quad (7)$$

Eş. 7'de ρ serbest elektrik yük yoğunluğu (C/m^3), ∇ iraksama operatörü, E elektrik alan (V/m) ve ϵ ise elektriksel geçirgenlik ifadeleridir (F/m). Akımın Şekil 4'teki gibi değişken olmasından dolayı elektromanyetik alan metal üzerinde, 2. Maxwell Denklemi gereğince, akım oluşmasına sebep olur:

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (8)$$

Eş. 8'de yer alan B manyetik akı yoğunluğudur (T). Lenz Yasası'na göre; oluşan elektromanyetik alan metal yüzeyinde bobin üzerindeki akımla ters yönde girdap akımları oluşturur. Oluşan bu ters akım Lorentz kuvveti meydana getirir ve metalin şekillenmesini sağlar [4]:

$$F = J \times B \quad (9)$$

Eş. 9'daki denklemde F oluşan kuvvet (N) ve J akım yoğunluğudur (T). Elektromanyetik şekillendirme işleminde şekillendirilecek sacın konumunun bobine yakın olması deri kalınlığı (δ) açısından önemlidir. Akımın şekillendirilecek saca nüfuz etmesi deri kalınlığı ile ilişkilidir. Deri kalınlığı doğrudan devrenin frekansına, yükün (şekil verilmek istenen parça) elektriksel iletkenliği ve manyetik geçirgenliğine bağlıdır (Eş. 10).

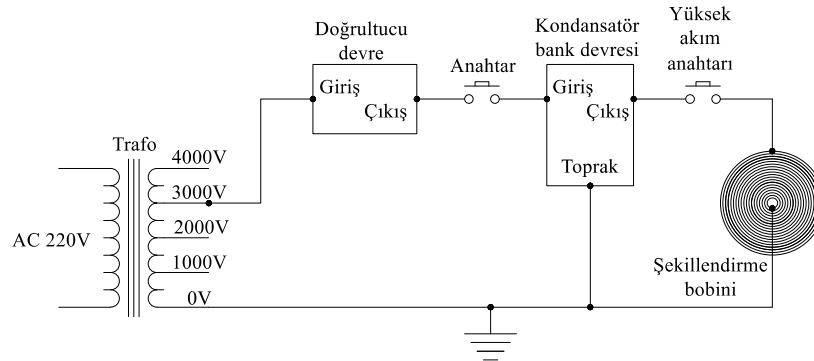
$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \sigma \mu}} \quad (10)$$

Enerji kondansatör bankasında depolandıktan sonra, yüksek akım anahtarı açık konumdan kapalı konuma getirilmesiyle birlikte istenilen yüksek enerjinin aktarımı sağlanmış olur (Eş. 11).

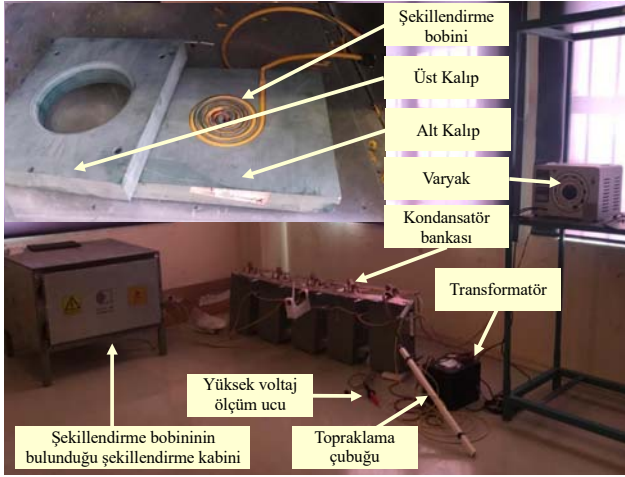
$$E_L = \frac{1}{2} L \cdot I(t)^2 \quad (11)$$

İşlemin en iyi bir şekilde çalışması için, kondansatörlerde depolanan enerjinin istenen yönde aktarılması ve parça ile bobin arasındaki boşluğa manyetik kuvvetin dağıtılması gerekmektedir. Ortaya çıkan elektrik enerjisi sonucunda çok yüksek genlikli (kA 'ler seviyesinde) ve zamana göre değişen bir akım akmaya başlar. Bobin üzerinde oluşan akım yönüne bakıldığında bu akım, temel bir prensip olan sağ el kuralıyla yukarı (parçaya) doğru bir manyetik alan oluşturur. Daha öncede belirtildiği gibi Lenz yasasına göre, manyetik alan şekillendirilmek istenen sac üzerinde kendisine karşı koyacak yönde ikinci bir akım indükler. İndüklenen bu akım (Eddy akımı) manyetik alanın darbe şekliyle ilintilidir ve bu akımlar baz alınıp sağ el kuralı uygulandığında aşağıya (bobine) doğru ikinci bir manyetik alan oluşturulur. Bu alanların birbirlerine zıt yöndeki etkisi sonucu şekillendirilmek istenilen sacda şişme olarak adlandırdığımız kalıcı deformasyon ortaya çıkar.

Daha önce yapılan bir çalışmada tasarlanan elektromanyetik sac metal şekillendirme sisteminde (Şekil 5) yüksek akım seviyelerine ulaşmak için darbe kondansatörleri kullanılmış ve farklı parametrelerin etkisi incelenmiştir [9]. Ayrıca sistemin çalışma parametreleri analitik olarak elde edilmiştir [9]. Bu çalışmada kullanılan sistemde $625\mu F$ 'lık darbe kondansatörleri kullanılmıştır (Şekil 6).



Şekil 5. Elektromanyetik şekillendirme sistemi devre şeması (Schematic circuit diagram of electromagnetic forming system)



Şekil 6. Elektromanyetik şekillendirme sistemi
(Electromagnetic forming system)

2.3. Elektromanyetik şekillendirme sistemi ile indüksiyon ısıtma sisteminin birleştirilmesi ve deneysel sonuçlar (Combination of electromagnetic forming system and induction heating system and experimental results)

Öncelikle, indüksiyon ısıtma sistemi ve elektromanyetik şekillendirme sistemi ayrı ayrı çalışır hale getirilmiştir. Daha sonra sistemin, malzemeleri ılık ve sıcak olarak nitelenen sıcaklıklarda şekillendirecek bir kapasiteye ulaşması için, elektromanyetik şekillendirme sistemi indüksiyon ile ısıtma yapabilecek şekilde genişletilmiştir. Ön ısıtma elektromanyetik indüksiyon yöntemi ile sağlanmış ve belirli bir sıcaklığa gelen malzeme daha sonra yüksek genlikli darbe akımının etkisine maruz bırakılarak şekillendirilmiştir. Bu sistemin tasarımını konu alan 2015/17429 numaralı ve “Elektromanyetik sac metal şekillendirme sisteminde yenilik” isimli bir patent başvurusu da inceleme aşamasındadır.

2.3.1. Alüminyum malzeme için çekme testi sonuçları (Tensile Test Results for Aluminum)

Elektromanyetik şekillendirme deneylerinde iki farklı kalınlıkta (1 mm ve 0,75 mm) AL7075 Alüminyum malzeme kullanılmıştır. Malzeme mekanik özelliklerinin tespiti için Atılım Üniversitesi Metal Şekillendirme Mükemmeliyet Merkezi'nde yer alan Mekanik Karakterizasyon Laboratuvarında, Zwick marka aksel çekme test cihazı kullanılarak sıcaklığa bağlı deneyler gerçekleştirilmiştir. Sıcak testlerde de soğuk deneylerde olduğu gibi uzama yönünde ekstansometre kullanılmıştır – ancak, sıcak testlerde soğuk testlerden farklı olarak, hadde yönü (RD) ve hadde yönüne dik (TD) deneyler yapılmamıştır (Şekil 7).

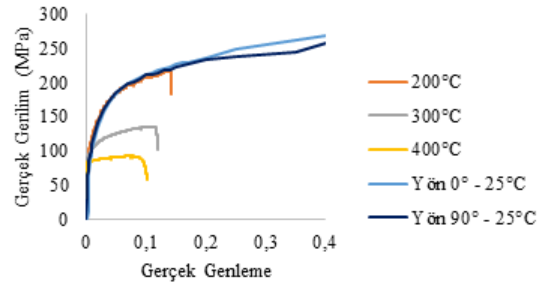
Çekme testi sonuçlarının değerlendirirken birkaç hususa dikkat çekmek gereklidir:

- Yaklaşık 200°C sıcaklığa kadar mekanik davranışta bir değişiklik olmamakla birlikte, malzemenin şekillendirilebilirliğinin azaldığı (gevrekliğinin arttığı ve tokluğunun azaldığı) gözlemlenmektedir. Ancak, sac

şekillendirmede sadece çekme testi ile bu sonuca varmak doğru olmayacaktır, çünkü malzeme bu testte tek eksende gerilime tabi tutulmaktadır. Doğru değerlendirme için şekillendirme sınır diyagramı karşılaştırması gerekecektir; ancak ülkemizde (henüz) sıcak ortamda şekillendirme sınır diyagramı (FLD) elde edilebilecek bir sistem yoktur.

- Sıcaklıklar arttıkça, malzemenin mukavemet değerlerinde düşme oluşmakla birlikte, şekillendirilebilirliğin daha da azaldığı görülmektedir.

Testlerin AL7075 serisi malzeme için daha yüksek sıcaklıklarda yapılması, malzemenin alaşım ve ısıl işlem yapısını bozacaktır. Bu sebeple gerçekleştirilmemiştir. Ayrıca, 400°C sıcaklık yakınlarında uzun süre beklemek de ısıl işlem özelliğini etkileyebilir.



Şekil 7. AL 7075 1mm kalınlık için oda sıcaklığı ve yüksek sıcaklıkta çekme testi sonuçları
(Tensile test results at room temperature and higher temperatures)

Testler, ASTM E21 (Elevated Temperature Tension Test of Metallic Materials) standardı kullanılarak yapılmıştır. Bu standart dahilinde çekme hızı dakikada en fazla 1 mm olarak belirlenmiştir.

Elektromanyetik şekillendirmede ortaya çıkan genleme hızları (100-100 s⁻¹), ASTM E51'in belirlediği hızlarda yapılan çekme testlerinde elde edilen genleme hızlarından (0-1 s⁻¹) oldukça yüksektir. Özellikle ılık ve yüksek sıcaklıklarda metal malzemelerin mekanik özellikleri genleme hızlarına karşı oldukça hassastır (genellikle genleme hızı arttıkça akma ve çekme gerilmelerinde artış görülmektedir). Bu sebeple, standardın belirlediği hızlarda yapılmış testler ile elde edilmiş olan akma eğrileri, gerçek deformasyon hızlarındaki mekanik özellikler ile uyumlu olmayabilir. Ancak, yüksek genleme hızlarında test gerçekleştirilmesi, özellikle de sıcak testlerin gerçekleştirilmesi, özel teçhizat gerektirdiğinden bu çalışma kapsamında yapılamamıştır.

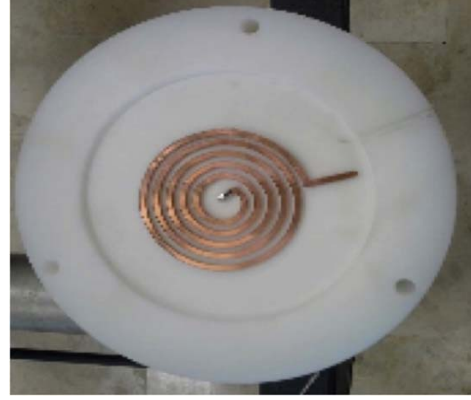
Yine ASTM E21 standardı dikkate alındığında, malzemenin belirlenen sıcaklıkta homojen olması beklenmektedir ve bu da yaklaşık olarak 5-20 dakika malzemeyi fırın içinde bekletmeyi gerekli kılar 200°C-300°C aralığında bekleme süresi çok etki etmese de, yüksek sıcaklık testlerinde bu bekleme süresi malzemenin ısıl işlem özelliklerini ve iç yapısını etkileyebileceği için, elde edilen sonuçların hızlı bir ısıtma ile (örn. 1 – 3 dakika) elde edilecek sonuçlardan farklı olması muhtemeldir. Bu deneylerde, ısıtma sistemine

paralel çalışacak şekilde, Şekil 5’de verilen devre şemasına uygun bir şekillendirme sistemi oluşturulmuştur. Kondansatör bankası olarak 5 adet 4,5 kV anma gerilimli, 20 kA şok akım boşaltabilecek Vishay marka darbe kondansatörü kullanılmıştır (Şekil 6).

2.3.2. Yassı bobin tasarımı ve yassı bobin parametreleri (Design of flat coil and flat coil parameters)

Bobin elektromanyetik işlem için önemli bir araçtır ve her özel şekillendirme için adapte edilmesi gerekmektedir. Bu bobinin en önemli görevi yüksek akımı iletmek ve dolayısıyla oluşan manyetik alanın ve basıncın dağılımını sağlamaktır [4, 24]. Bobin tasarımı, bobin ömrünü de belirleyen mekanik dayanıklılığın yanı sıra direnç ve indüktans gibi elektriksel özellikler de düşünülerek yapılmalıdır. Bu nedenle direnci ve bobinin indüktans değerini de etkileyen sarma sayısı önemlidir ve şekillendirme sürecini etkilemektedir. Helezon şeklindeki bobin genellikle sıkıştırma veya genişletme işlemlerinde kullanılırken sac şekillendirme işlemlerinde yassı bobin tercih edilmektedir. Deneyler sırasında, ilk önce altı sarımlı 3mm x 3mm kesit alanlı bir bobin ile denemeler yapılmıştır (Şekil 7). Bu bobin ile şekillendirilen örneklerden biri Şekil 8 ‘de verilmiştir. Ancak, bu bobinin kullanılmasından iki sebeple vazgeçilmesi gerekmiştir: Birinci sebep, bu bobinin empedansının ısıtma sistemi ile tam uyumlu olamamasıdır. İkinci sebep ise, yüksek voltajlarda (2 kV ve üstü) bobinin

kesit alanı dolayısıyla ile hem fazla ısınması hem de yapısal olarak yüklere karşı dayanımının istenilen seviyede olmamasıdır.

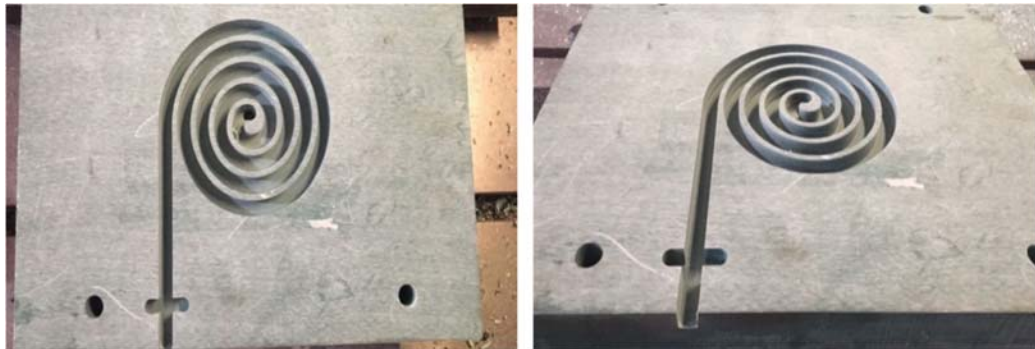


Şekil 7. Başlangıç denemelerinde kullanılan bobin
(Coil used in initial experiments)

Bu sebeplerle, yeni bir tasarıma gidilmiş, 8mm çaplı (kesit alanı yaklaşık 50 mm²) sert ve yalıtımlı bir kablodan bobin imal edilmiştir. Polimer döküm bloklar içine, üzerindeki yüke dayanabilmesi için CNC dik işleme tezgâhı ile 8,9 mm kalınlığında spiral bir kanal açılmış, bobin bu kanala yerleştirilmiştir (Şekil 9). Üst tarafta ise 150 mm çapta delik içeren karşı sıkıştırma pot çemberi kullanılmıştır. Mekanik



Şekil 8. Başlangıç denemelerinde şekillendirilen malzeme (üst ve alt görünüş)
(Material formed in initial experiments (top and bottom view))



Şekil 9. Polimer döküm blok içine CNC ile açılan spiral kanal
(Spiral channel machined with CNC vertical milling machine on cast polymer blocks)

olarak (mengeneler vasıtası ile) bağlanan bu sistem için pot çemberi basıncını ölçmenin imkânı şu anki sistem için yoktur. İleride, hidrolik vb. bir pres altında çalışılması durumunda pot basıncı ile ilgili de çalışılabilecektir. Şu an için, denemeler sonrası yapılan gözle muayene sonucunda, uygulanan pot çemberi basıncının yeterli olduğu değerlendirilmektedir.

Oluşturulan yeni bobin sistemi ile gerçekleştirilen çalışmalar esnasında, 3000 V denemelerinde kalıbın içindeki spiral duvarlar kırılmış, bunun üzerine yeni bir kalıp imal edilmiştir. Ancak 4000 V denemelerinde, ilk denemede kalıp kırılması yaşanmıştır (Şekil.10). Bu sebeple, 3000V ve 4000V ile sadece iki deneme soğuk olarak yapılmıştır. Diğer deneyler 1000 V – 2500 V aralığında 500 V'luk basamaklarla gerçekleştirilmiştir.

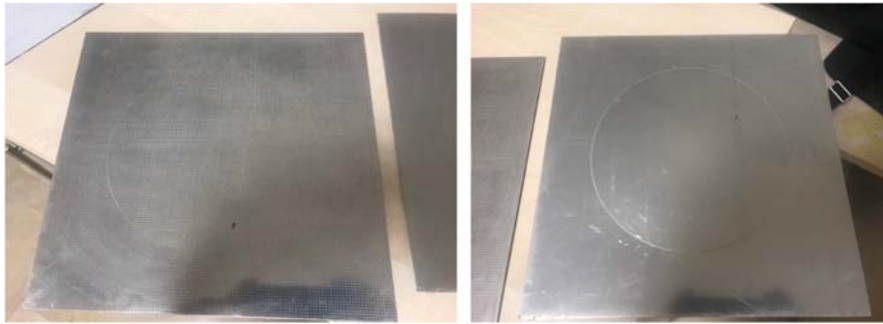
3. DENEY SONUÇLARI (EXPERIMENT RESULTS)

Deneyler 0,75 mm kalınlığında Al7075 serisi sac malzeme üzerinde yapılmıştır. Daha kalın (1,25 mm) sac ile yapılan testlerde 2000 V'a kadar etkin bir sonuç elde edilememiştir (Şekil 11). Denemeler oda sıcaklığında (yaklaşık 20°C) ve

260°C sıcaklıkta gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, Atılım Üniversitesi Metal Şekillendirme Mükemmeliyet Merkezi'nde optik ölçümlerle elde edilmiştir. Bu ölçümlerde GOM ATOS üç boyutlu ölçüm cihazı kullanılmıştır Bunun için numuneler (parlak yüzey oluşmasını diye) tebeşir boyası ile boyanmış ve markalanmıştır. Sonrasında tüm ölçümler, GOM-ATOS teçhizatı kullanılarak ölçülmüş ve bilgisayar ortamında katı modelleri elde edilmiştir (Şekil 12). Katı modeller, ilgili yazılım kullanılarak stl formatlarına çevrilmiş ve üzerlerinde değişik noktalardan ölçümler gerçekleştirilmiştir. Şekillendirme miktarının en belirgin gözlemlenebildiği tepe yüksekliği (dome height) ölçümleri, hem oda sıcaklığı hem de 260°C için Tablo 3'te verilmiştir. Elde edilen katı modeller, arzu edilirse, sayısal sonuçlarla da karşılaştırılma amaçlı kullanılabilir. Şekil 13, oda sıcaklığında ve 260°C sıcaklıkta yapılan deneylerdeki optik ölçüm ile elde edilen tüm modellerin gmsh (www.gmsh.info) yazılımı ile oluşturulmuş görüntülerini içermektedir. Bu görüntülerde bazı üçgenleme yoğunluğu farkları (renk tonundan fark edilebilir) normaldir; nitekim ölçüm için çekilen fotoğrafların her biri yeni bir nokta bulutu oluşturmakta ve üçgenleme toplam nokta bulutu içindeki tüm noktalar kullanılarak yapılmaktadır – dolayısı ile ölçüm



Şekil 10. Kalıp kırılması ve kırılan kalıp resimleri (Die failure and pictures of the failed dies)



Şekil 11. Kalınlık 1,25 mm Al7075 serisi sac üzerinde 1000 V (solda) ve 1500 V (sağda) değerleri için etkin bir şekillendirme sağlanamamıştır

(Thickness 1.25 mm Al7075 series sheet metal for 1000 V (left) and 1500 V (right) values for effective shaping could not be achieved)



Şekil 12. Optik ölçüm için hazırlanan numuneler (ön görünüş) – tamamı oda sıcaklığında soldan sağa 1000, 1500, 2000, 3000, 4000 V (Samples for optical measurement (front view) - all at room temperature from left to right 1000, 1500, 2000, 3000, 4000 V)

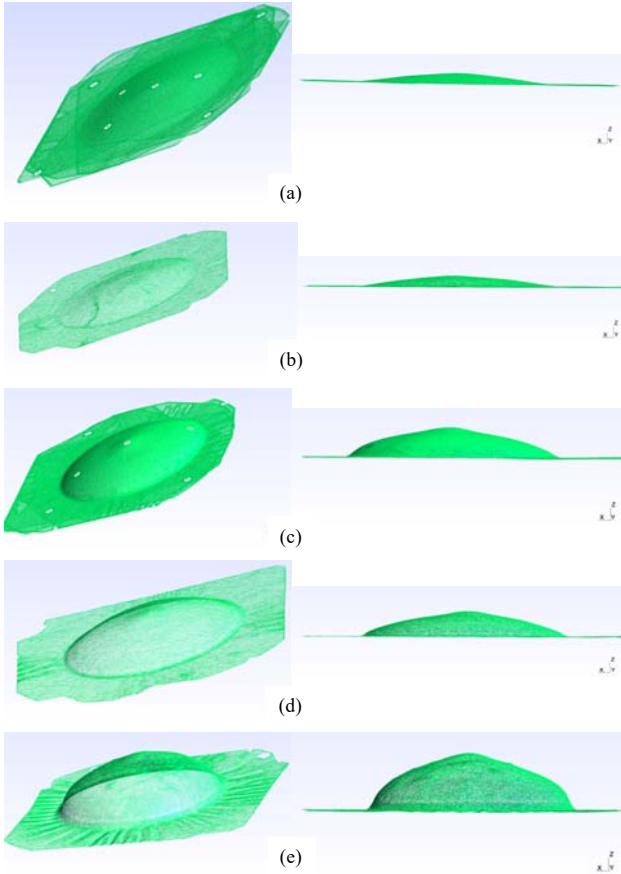
için az sayıda nokta yeterli olmuşsa daha az yoğunlukta, çok sayıda nokta gerekli olmuşsa çok yoğunlukta üçgenleme gerçekleştirilmiştir.

Tablo 3. Oda sıcaklığı ve 260°C için tepe yüksekliği ölçümleri

(Room temperature and peak height measurements for 260°C)

Uygulanan gerilim (V)	Oda sıcaklığında tepe yüksekliği (mm)	260°C sıcaklıkta tepe yüksekliği (mm)
1000	11,68	8,53
1500	15,94	11,63
2000	24,72	19,41
2500	30,69	Yok
3000	33,16	Yok
4000	37,86	Yok

Dikkat edilirse, Şekil 13'e de kalıp patlaması sırasında sac yüzeyine çarpan kalıp içi materyalinin sacda oluşturduğu penetrasyonlar görülebilir.



Şekil 13. Elektromanyetik darbe şekillendirme denemeleri sonrası elde edilen numune geometrilerinin optik ölçüm katı modelleri: (a) Oda sıcaklığında 1000 V (b) 260°C sıcaklıkta 1000 V (c) Oda sıcaklığında 2000 V (d) Oda sıcaklığında 2000 V ve (e) Oda sıcaklığında 4000 V

(Solid models of the samples obtained after electromagnetic pulse forming trials: (a) 1000 V at room temperature (b) 1000 V at 260°C (c) 2000 V at room temperature (d) 2000 V at 260°C and (e) 4000 V at room temperature)

Yapılan tüm bu deneyler sonucunda aşağıdaki gözlemler gerçekleştirilmiştir:

- Numunelerin (4000 V denemesinde kalıp patlaması dikkate alınmazsa) hiçbirinin yüzeyinde hasar söz konusu değildir; nitekim herhangi bir kalıp sürtünmesi yaşanmadığından, sürtünme çizikleri beklenmemektedir. Yine de, özellikle pot çemberinin radyus kısmında dahi sürtünme çizikleri veya numunenin herhangi bir yerinde çatlak/yrırtık oluşmamıştır.
- Sac numunenin pot bölgesinde oluşan kırışıklıklar, pot çemberi basıncının artırılması gerektiğini ifade etmekle birlikte, sonuçları etkileyecek bir sorun olarak değerlendirilmemektedir. Kırışıklık bölgesi, şekillendirme kısmına geçiş yapmamıştır. Çoğu şekillendirmede, pot bölgesi zaten kesilmekte (trimlenmekte) dolayısı ile buradaki hasar göz ardı edilebilmektedir.
- Malzemeyi ısıtmak, beklenen aksine, malzemenin aynı voltajda daha az şekillendirilmesini sağlamıştır. Bunun sebebi, muhtemelen, sıcak rejimde yüksek şekillenme hızı (yüksek genleme hızlarının oluşması) dolayısı ile malzemenin akma gerilmesinde oluşan yükselme eğilimidir. Dikkat edilirse, denemeler (imkanlar doğrultusunda) 200°C yakınlığında (260°C) gerçekleştirilmiştir ve çekme testi sonuçlarında bu sıcaklıkta belirgin bir mukavemet düşüşü söz konusu değildir. Ancak, ılık rejim olarak değerlendirilebilecek olan bu sıcaklıkta şekillendirme hızı etkili olmaktadır ve muhtemelen etki eden temel parametre budur.
- Ortaya çıkan şekillendirilmiş ürün, tam bir küresel kubbe şeklini almamıştır. Dikkat edilirse, orta kısım daha yüksek bir noktaya yerleşmiştir. Manyetik alan bu bölgede en yoğun noktada olmakla birlikte, küresel bir kubbe daha çok beklenen şekildir. Bu şeklin elde edilmesinin sebebinin, yüksek şekillendirme hızlarındaki dinamik etkiler olduğunu değerlendirmekteyiz.

Al7075 malzeme, oldukça gevrek bir malzemedir. Bu çalışmada 3000 V ve 4000 V denemelerinde, bu malzeme için oldukça yüksek tepe noktası yüksekliğine erişilmiştir. Bu malzeme için bu yükseklik normal bir derin çekme yöntemi ile beklenmemektedir.

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada, değişik sanayi uygulamalarında kullanılan metal türlerini şekillendirebilmek amacıyla tasarımları yapılan üç fazlı orta frekanslı bir indüksiyon ısıtma sistemi ve bir elektromanyetik şekillendirme sistemi kurulmuş, ayrı ayrı çalışır hale getirilmiş ve farklı kalınlıktaki sac malzemeler ile denemeler yapılmıştır. Sistemin gevrek metal malzemeleri ılık ve sıcak olarak nitelendirilecek sıcaklıklarda şekillendirecek bir kapasiteye ulaşması için elektromanyetik şekillendirme sistemi indüksiyon ile ön ısıtma yapabilecek şekilde genişletilmiştir.

Özellikle ılık sac şekillendirme söz konusu olduğunda, kalıp içinde ısıtmanın önemi büyüktür. Bu sayede malzemenin ısıtma bölgesinden kalıba transferi sırasında zaman ve ısı kaybı engellenebilmektedir. Ayrıca, indüksiyon ile ısıtma oldukça hızlı bir sıcaklık artışı sağlayabileceğinden, aynı

kalıp içinde aynı bobin kullanılarak ısıtma/şekillendirme sistemi gerek imalat süresi ve süreci açısından gerekse malzemenin sıcak bölgede uzun süre tutulmaması gerekeceğinden, çok daha etkin bir sistem olacaktır.

Geliştirilen şekillendirme sistemi ile Al7075 levhaları şişirmek için denemeler yapılmış ve şekillendirmenin etkili bir şekilde yapılabileceği görülmüştür. Testlerde kullanılan alaşımın 200°C yakınlığında mukavemet özelliklerinin değişmiyor olması sebebi ile bu malzeme test edilen sıcaklık bölgelerinde gelişmiş bir şekillendirilebilirliğe sahip değildir. Bu nedenle, test edilen malzeme için sistemin ısıtma etkinliği tam olarak tespit edilememiştir. Ancak, ısıtma ve şekillendirme sisteminin aynı kalıp içinde yapılabiliyor olması önemli bir avantajdır.

Çalışmanın sonuçları değerlendirildiğinde, uygun kalıp ve bobin tasarımları ile farklı gevrek metal malzemelerin şekillendirilebilmesi için de uygun bir yöntemin oluşturulduğu görülebilir. Bu malzemeler arasında özellikle otomotiv, uçak, uzay ve savunma sanayinde ön plana çıkmakta olan magnezyum, titanyum ve nikel alaşımları dikkat çekmektedir. Bu malzemeler ile yapılacak çalışmalar, gelecek planı içinde değerlendirilebilir.

5. SİMGELER (SYMBOLS)

Q	: Isı enerjisi (J)
m	: Kütle (kg)
c	: Birim ısı kapasite (J/kg ^o K)
ΔT	: Sıcaklık değişimi (°C veya °K)
E_c	: Devrenin toplam enerjisi (J)
t	: Zaman (s)
C	: Kapasitans (F)
V	: Gerilim (V)
ω_0	: Doğal frekans (rad/s)
L	: İndüktans (H)
R	: Direnç (Ω)
β	: Sönümlenme katsayısı (Ω/H)
ω	: Deşarj frekansı (rad/s)
I	: Deşarj akımı (A)
V_0	: Şarj gerilim farkı (V)
ρ	: Serbest elektrik yük yoğunluğu (C/m ³)
E	: Elektrik alan (V/m)
ϵ	: Elektriksel geçirgenlik (F/m)
B	: Manyetik akı yoğunluğu (T)
F	: Kuvvet (N)
J	: Akım yoğunluğu (A/m ²)
δ	: Deri kalınlığı (m)
f	: Frekans (Hz)
σ	: Elektrik iletkenlik katsayısı (S/m)
μ	: Manyetik geçirgenlik (H/m)
E_L	: Aktarılan enerji (J)

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışma, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından desteklenen 215M929 projesi kapsamında yürütülmüştür. Yazarlar bu destek için TÜBİTAK'a teşekkürlerini sunar.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Harvey, G. W., Brower, D. F., Metal Forming Device and Method, US-Patent Nr. 2976907, 1958.
2. Brower, D. F., Metals Handbook, v.4, ASM, 1969.
3. Psyk, V., Risch, D., Kinsey, B. L., Tekkaya, A. E., Kleiner, M., Electromagnetic forming – a review, Journal of Materials Processing Technology, 211, 787-829, 2011.
4. Paese, E., Geier, M., Homrich, R. P. and Pacheco, J. L., Simplified mathematical modeling for an electromagnetic forming system with flat spiral coil as actuator, Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 33, 324–331, 2011.
5. Cao, Q., Li, L., Lai, Z., Zhou, Z., Xiong, Q., Zhang, X. and Han X., Dynamic analysis of electromagnetic sheet metal forming process using finite element method, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 74, 361–368, 2014.
6. Cao, Q., Han X., Lai, Z., Zhou, Z., Xiong, Q., Zhang, X. and Li, L., Effects of current frequency on electromagnetic sheet metal forming process, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 24 (3), 1-4, 2014.
7. Lai, Z., Han, X., Cao, Q., Qiu, L., Zhou, Z. and Li, L., The electromagnetic flanging of a large-scale sheet workpiece, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 24 (3), 1-5, 2014.
8. Paese, E., Geier, M., Homrich, R. and Rossi, R., A coupled electric–magnetic numerical procedure for determining the electromagnetic force from the interaction of thin metal sheets and spiral coils in the electromagnetic forming process, Applied Mathematical Modelling, 39 (1), 309 – 321, 2015.
9. İnanan, G., Baranoglu, B., Aydın, E., An Application of high-power electromagnetic pulse: Forming of sheet metal using electromagnetic waves, Eleco 2015, Bursa-Turkey, 26-29, November, 2015.
10. Cai, W., Daehn, G., Li, J., Mishra, R., Vivek, A., Khan, H., Komarasamy, M., A state-of-the-art review on solid-state metal joining, Journal of Manufacturing Science and Engineering, 141 (3), 2019.
11. Yanagimoto, J., Oyamada, K., Nakagawa, T., Springback of high strength steel after hot and warm sheet formings, CIRP Annals - Manufacturing Technology, 54 (1), 213–216, 2005.
12. Davies, E. J. and Simpson, P., Induction Heating Handbook, McGraw Hill Book Company, Ltd., London, UK, 1979.
13. Mori, K., Maki, S., Tanaka, Y., Warm and hot stamping of ultra high tensile strength steel sheets using resistance heating, CIRP Annals - Manufacturing Technology, 54 (1), 209–212, 2005.
14. Qu, H.P., Lang, Y.P., Yao, C.F., Chen, H.T., Yang, C.Q., The effect of heat treatment on recrystallized microstructure, precipitation and ductility of hot rolled Fe-Cr-Al-REM ferritic stainless steel sheets, Materials Science and Engineering: A, 562, 9-16, 2013.
15. Pepelnjak, P., Baranoglu, B., Kayhan, E., Kaftanoglu, B., Numerical simulation of deep drawing process with

- local heating at the flange region, 8th International Conference and Exhibition on Design and Production of Machines and Dies/Molds, Kusadasi-Turkey, 2015.
16. Yoshihara, S., Nishimura, H., Yamamoto, H., Manabe, K., Formability enhancement in magnesium alloy stamping using a local heating and cooling technique: circular cup deep drawing process, *Journal of Materials Processing Technology*, 132, 609-613, 2003.
 17. Kılıç S., Kaçar İ., Öztürk F., New trend in aerospace industry: Al-Li based alloys, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 34 (2), 275-296, 2019.
 18. Kulkarni, V. V., Swami, L. B, MOSFET based high frequency inverter for induction heating equipment using MATLAB/SIMULINK environment, *International Journal of Innovations in Engineering Research and Technology*, 1 (1), 1-6, 2014.
 19. Abdulbaqi, I.M., Kadhim, A-H. A., Abdul-Jabbar, A. H., Fathil, A.A. and Hasan, T.K., Design and implementation of an induction furnace, *Diyala Journal of Engineering Sciences*, 8 (1), 64-82, 2015.
 20. Jenkins, B., Mullinger, P., *Industrial and Process Furnaces*, Elsevier, USA, 2014.
 21. Ünver Ü, Ünver M., Analysis of efficiency of tunnel type induction furnace inductors with respect to variation of diameter of heated workpiece, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 33 (1), 155-165, 2018.
 22. Liu, K. H. ,Oruganti, R., and Lee, F. C., Resonant switches-topologies and characteristics, *IEEE Power Electronics Specialists Conference*, Toulouse, France,106-116, 1985.
 23. Zafarmand, F., Uslu, A., Aydemir, M. T., Ünver, H. M., Baranoğlu, B., Aydın, E., Design and implementation of an induction heating system for brittle sheet metals, *International Journal of Natural and Engineering Sciences*, 2, 29-33, 2017.
 24. Paesea, E., Geier, M., Homrich, R. P., Rosa, P., Rossi, R., Sheet metal electromagnetic forming using a flat spiral coil: Experiments, modeling, and validation, *Journal of Materials Processing Technology*, 263, 408-422, January 2019.