

**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**NOKTA DİRENÇ KAYNAĞINDA ISIL VE YAPISAL ANALİZLERİN SONLU  
ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Başar YAVUZ**

**Makina Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Malzeme ve İmalat Programı**

**MAYIS 2015**



**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**NOKTA DİRENÇ KAYNAĞINDA ISIL VE YAPISAL ANALİZLERİN SONLU  
ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Başar YAVUZ  
503121319**

**Makina Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Malzeme ve İmalat Programı**

**Tez Danışmanı: Prof. Dr. Murat VURAL  
Anabilim Dalı : Herhangi Mühendislik, Bilim  
Programı : Herhangi Program**

**MAYIS 2015**



İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 503121319 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Başar YAVUZ** ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**Nokta Direnç Kaynağında Isıl ve Yapısal Analizlerin Sonlu Elemanlar Yöntemi ile İncelenmesi**” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

**Tez Danışmanı :**      **Prof. Dr. Murat VURAL**      .....

İstanbul Teknik Üniversitesi

**Jüri Üyeleri :**      **Prof. Dr. Adnan DİKİCİOĞLU**      .....

İstanbul Teknik Üniversitesi

**Doç. Dr. Erişan Filiz PİROĞLU**      .....

İstanbul Teknik Üniversitesi

**Teslim Tarihi :**      **04 Mayıs 2015**

**Savunma Tarihi :**      **25 Mayıs 2015**



*Aileme ve Būşra'ya*





## ÖNSÖZ

Endüstride yaygın olarak kullanılan elektrik nokta direnç kaynağı üzerinde son yıllarda önemli çalışmalar yapılmaktadır. İçerdiği karmaşık fiziksel özelliklerden dolayı deneysel olarak test edilmesi zor ve pahalı olan bu yöntemin anlaşılması için sonlu elemanlar yöntemi iyi bir alternatiftir. Bu çalışmada bu nokta direnç kaynağına ait ısı dağılımı, yapısal deformasyon ve gerilme durumlarını incelemeye çalıştım.

Bu çalışmanın yazılması sırasında bilgi ve tecrübesi ile bana yol gösteren değerli hocam Prof.Dr. Murat VURAL'a, sonlu elemanlar yöntemi simülasyon çalışmaları sırasında yardımlarını esirgemeyen arkadaşım Ar.Gör. Gürkan SARIKAYA'ya, her zaman ve her durumda yanımda olduklarını bildiğim anneme-babama ve kardeşime, son olarak da her zaman yanımda olan ve her hareketimde beni destekleyen canım Büşrama teşekkür ederim.

Mayıs 2015

Başar YAVUZ  
Makina Mühendisi



## İÇİNDEKİLER

### Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER .....	ix
KISALTMALAR .....	xi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xiii
ÖZET.....	xvii
SUMMARY .....	xix
<b>1.GİRİŞ .....</b>	<b>1</b>
1.1 Tezin Amacı .....	1
1.2 Literatür Araştırması .....	2
<b>2.ELEKTRİK DİRENÇ NOKTA KAYNAĞI.....</b>	<b>3</b>
2.1 Giriş.....	3
2.2 Yöntemin Prensipleri ve Özellikleri .....	3
2.3 Isı Enerjisi Oluşumu.....	5
2.4 Isıl Denge .....	6
2.5 Kaynak Parametrelerini Etkisi .....	6
2.5.1 Kaynak Akımının Etkisi.....	7
2.5.2 Kaynak Süresinin Etkisi.....	7
2.5.3 Kaynak Basıncının Etkisi.....	8
2.5.4 Elektrotların Etkisi .....	8
2.5.5 Yüzey Durumunun Etkisi.....	9
2.5.6 Metal Bileşiminin Etkisi .....	9
2.6 Nokta Direnç Kaynağında Kullanılan Elektrotların Özellikleri.....	9
2.7 Kaynak Çekirdeği.....	9
2.8 Isıl Denge .....	10
2.9 Isı Tesiri Altındaki Bölge (ITAB).....	11
<b>3.SONLU ELEMANLAR ANALİZİ.....</b>	<b>13</b>
3.1 Giriş.....	13
3.2 Sonlu Elemanlar Metodu.....	15
3.2.1 Ön İşlem.....	17
3.2.2 Hesaplama .....	18
3.2.3 Son İşlem.....	18
3.3 Sonlu Eleman Tipleri .....	18
3.4 Sistemin Sonlu Elemanlara Bölünmesi .....	20
3.5 Yükler.....	20
3.6 Sınır Koşulları .....	21
3.7 Ayırıklaştırma.....	21
<b>4. NOKTA DİRENÇ KAYNAĞININ MODELLENMESİ VE UYGULANAN SİMÜLASYON İŞLEMLERİ.....</b>	<b>25</b>
4.1 Isıl Model Analizi.....	26
4.2 Mekanik Model Analizi .....	28

<b>5. SAYISAL ÇALIŞMA.....</b>	<b>29</b>
5.1 Sınır Koşulları .....	30
5.2 Malzeme Özellikleri .....	31
5.3 Sayısal Yöntem.....	33
<b>6. SONUÇLAR VE TARTIŞMA .....</b>	<b>35</b>
6.1 S235.....	35
6.2 304.....	38
6.3 A1-7075.....	41
<b>7. DEĞERLENDİRME VE ÖNERİLER.....</b>	<b>45</b>
<b>KAYNAKLAR.....</b>	<b>47</b>

## **KISALTMALAR**

<b>RSW</b>	: Resistance Spot Welding
<b>FEM</b>	: Finite Element Method
<b>SEM</b>	: Sonlu Elemanlar Modeli
<b>SEY</b>	: Sonlu Elemanlar Yöntemi
<b>ITAB</b>	: Isı Tesiri Altındaki Bölge
<b>ISO</b>	: International Standard Organization
<b>CAD</b>	: Computer Aided Design
<b>2B</b>	: 2 Boyut
<b>3B</b>	: 3 Boyut



## ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 5.1 : S235 e ait mekanik özellikler .....	31
Çizelge 5.2 : S235 e ait ısı özellikler .....	31
Çizelge 5.3 : 304 e ait mekanik özellikler. ....	32
Çizelge 5.4 : 304 e ait ısı özellikler .....	32
Çizelge 5.5 : Al-7075 e ait mekanik özellikler .....	33
Çizelge 5.6 : Al-7075 e ait ısı özellikler .....	33





## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

Şekil 2. 1 : Kaynak işlem basamakları	4
Şekil 2. 2 : Nokta direnç kaynak makinesi ve kaynak bölgesinin şematik gösterimi	4
Şekil 2. 3 : Nokta direnç kaynak makinesi	4
Şekil 2. 4 : Kaynak işlemindeki ısı dağılımı	6
Şekil 2. 5 : Uygulanabilir akım aralığı şeması	7
Şekil 2. 6 : Kaynak süresini çekirdek oluşumuna etkisi a)kısa kaynak zamanı b)ortakaynak zamanı c)uzun kaynak zamanı	8
Şekil 2. 7 : TS EN 2582 göre nokta kaynağı elektrot başlıkları	9
Şekil 2. 8 : Nokta kaynağında dirençler ve sıcaklık dağılımı	10
Şekil 2. 9 : Nokta direnç kaynağı ile oluşan kaynak çekirdeği	10
Şekil 2. 10: Nokta direnç kaynağı ile birleştirilmiş yapının sıcaklık dağılımı ve metalürjik yapısı	12
Şekil 3. 1 : Sonlu Elemanlar Analizi Akış Şeması	15
Şekil 3. 2 : Sonlu eleman modeli	16
Şekil 3. 3 : Yük etkisindeki sistem ve oluşturulan sonlu elemanlar modeli	17
Şekil 3. 4 : Tek boyutlu eleman	18
Şekil 3. 5 : İki boyutlu elemanlar	19
Şekil 3. 6 : 1 boyutlu elemanlar oluşturulmuş köprü modeli	19
Şekil 3. 7 : Kanatlı fan diskinde ait sonlu elemanlar modeli	19
Şekil 3. 8 : Arabaya ait sonlu elemanlar modeli	20
Şekil 3. 9 : Lineer ve parabolik sonlu eleman örnekleri	20
Şekil 3. 10: Ayrıklaştırma hatası olamayan model	22
Şekil 3. 11: Ayrıklaştırma hatasına sahip bir model	23
Şekil 5. 1 : Modele ait sonlu elemanlar modeli	29
Şekil 5. 2 : Sac parçalarının ölçüleri	30
Şekil 5. 3 : Kaynak çekirdeğine ait ölçüler	30
Şekil 6.1 : S235 için 0.5 saniyedeki sıcaklık dağılımı	35
Şekil 6.2 : S235 için 1. saniyedeki sıcaklık dağılımı	36
Şekil 6.3 : S235 için 5. saniyedeki sıcaklık dağılımı	36
Şekil 6.4 : S235 için 10. saniyedeki sıcaklık dağılımı	37
Şekil 6.5 : S235-Oluşan deformasyon miktarı	37
Şekil 6.6 : S235- En yüksek gerilme değeri	38
Şekil 6.7 : 304 için 0.5 saniyedeki sıcaklık dağılımı	38
Şekil 6.8 : 304 için 1. saniyedeki sıcaklık dağılımı	39
Şekil 6.9 : 304 için 5. saniyedeki sıcaklık dağılımı	39
Şekil 6.10 : 304 için 10. saniyedeki sıcaklık dağılımı	40
Şekil 6.11 : 304-Oluşan deformasyon miktarı	40
Şekil 6.12 : 304-En yüksek gerilme değeri	41

<b>Şekil 6.13</b> : Al-7075 için 0.5 saniyedeki sıcaklık dağılımı	41
<b>Şekil 6.14</b> : Al-7075 için 1. saniyedeki sıcaklık dağılımı	42
<b>Şekil 6.15</b> : Al-7075 için 5. saniyedeki sıcaklık dağılımı	42
<b>Şekil 6.16</b> : Al-7075 için 10. saniyedeki sıcaklık dağılımı	43
<b>Şekil 6.17</b> : Al-7075- Oluşan deformasyon miktarı	43
<b>Şekil 6.18</b> : Al-7075-En yüksek gerilme değeri	44

## NOKTA DİRENÇ KAYNAĞINDA ISIL VE YAPISAL ANALİZLERİN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE İNCELENMESİ

### ÖZET

Elektrik nokta direnç kaynağı endüstride sacların birleştirilmesi sırasında yaygın olarak kullanılan bir birleştirme yöntemidir. Özellikle sac parçaların yoğun olarak kullanıldığı beyaz eşya, otomotiv gibi endüstri kollarında kendine geniş kullanım alanı bulmaktadır. Bu yöntemde saclara yüksek basınç altında elektrik akımı uygulanır. Bu akım sonucu oluşan ısı enerjisi de kaynak çekirdeğinin oluşturulmasında kullanılır. Elektrik direnç nokta kaynağında elektriksel, ısı, mekanik ve metalürjik olaylar birbirleriyle bağdaşık ve etkileşim halinde etki ederler. Bu durum sistemin tüm etkileri tek bir seferde gösterecek bir matematik modelin oluşturulmasını zorlaştırmaktadır. Bu nedenle genellikle analiz tek bir etki üzerine yapılır ve bu şekilde sonuca ulaşılmaya çalışılır. Elektrik akımı sonucu oluşan ısı Joule kanununa göre oluşur. Bu ısının bir kısmı ortam dağılırken çoğunluğu çekirdeğin ergimesi ve katılarak birleştirilmesi sırasında kullanılır. Yöntemde uygulanan baskı kuvveti de ayrıca önem arz etmektedir. Elektrot kuvvetlerinin uyguladığı kuvvet ergimiş haldeki kaynak çekirdeğine baskı oluşturur ve kaynak banyosunun dağılmasını engeller. Ayrıca kaynak bölgesi için zararlı olan atmosferik gazların ve toz parçacıklarının kaynak bölgesine ulaşmasını da engellemiş olur. Nokta direnç kaynağında akımın düzgün bir şekilde akması önemlidir. Elektrotların uyguladığı baskı kuvveti bu akımın da doğru bir şekilde akmasına yardımcı olmaktadır.

Bu parametrelerin doğru bir şekilde uygulanması ile kaliteli bir kaynak çekirdeği oluşumu sağlanır. Kaliteli bir kaynak birleştirmenin sahip olduğu dayanımı belirlemektedir. Bu nedenle kaynak kalitesi feragat edilebilecek bir özellik değildir.

Sıcaklık dağılımı da metalürjik yapıyı dolayısıyla kaynak kalitesini ve dayanımı etkilemektedir.

Bu çalışmada kaynak işlemi sonucunda ki ısı dağılımı, uygulanan baskı kuvvetleri nedeniyle oluşan deformasyon ve en yüksek gerilme durumlarının tespiti amacıyla sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak bir model oluşturulmuştur. Daha sonra oluşturulan bu model yardımıyla bir sümülasyon çalışması yapılmıştır. Bu model yardımıyla deneysel olarak tespit edilmesi zor ve maliyetli olan nokta direnç kaynağına ait parametrelerin incelenmesi ekonomik ve hızlı bir şekilde sağlanmış olur.

Ayrıca bu çalışma değişik malzemeler için gerekli olan optimum ısı ve kuvvet değerlerinin belirlenmesi sırasında veri kaynağı olarak kullanılabilir.



## **THERMAL AND STRUCTURAL ANALYSIS OF RESISTANCE SPOT WELDING BY FINITE ELEMENTS METHOD**

### **SUMMARY**

Resistance spot welding is widely used in the industrial applications. It is used to join the sheet materials. RSW can be applied into the automation easily. Especially in automotive industry, it is the main welding method. It has thermal, structural and electrical phenomena together. This makes the experimental analysis very hard. In this method first we put sheet metals together, and then RSW electrodes applied pressure and give electrical current. After that, system stops the current flow while pressure is still applied. The last, system release the pressure and we can take the sheet metals. Current flow creates heat. Heat is created with Joule law. This heat melts the material. Sheet materials join and solidified in each other. In sheet metals heat should applied in small amount and in short time. Because, high heat flow in sheet metals create distortions.

RSW has some parameters. Some parameters change the welding quality. Welding time and welding current have more effect than the other parameters. If we increase the welding time metals can burn. If we decrease the time then we take low quality weld area. Current is also important. According to Joule law current generates the heat. When the high current is applied, cracks can be created. When the low current is used, then we need more time for joining. This increases the weld area and decreases the welding quality.

Heat affected zone is the most important topic in the all welding methods. This area has its own microstructure. Heating and cooling time determine the microstructure in this area. This area also identifies the quality of the welding. Because big heat affected zone changes the materials microstructure.

In this paper, the thermal and structural analysis in resistance spot welding is examined with using finite element analysis. For this research S235, 304 and Al-7075 are used as sheet metal's material.

Finite element analysis is widely used in engineering analysis. Engineers and researchers want to examine the system in order to make better systems. Generally, experimental analyses are expensive and hard to set up. With these difficulties, people make this analysis by using computers. Every machine or application can be modeled by using mathematical models. Some of them have many equations which are hard to solve. Computers are used to solve these equations. Finite element method is used for this approach. Every system has infinite points. Finite element method describes the system with finite points. Systems represented with these new model which gives the original system response. FEM gives the result with some errors. These all points are named as node. Nodes link with each other. These nodes create the elements. Elements can be 1, 2 or 3 dimensional. FEM is a numerical method. It is used in fluid mechanics, structural-thermal analysis, vibrations etc.

FEM try to find changes in nodes by using some equations. In order to reach the solution, system should be fixed in some points.

Finite element method has some steps in order to reach the results. First, system is divided into the small parts which are called as element. For the elements physical behaviors are defined. Equations are created for these elements. Unknown data are solved by using equation system. The last, desired element data are found.

For the complex systems, thousands of equations are exist. When the system become more complex, then the equations are also become complex and hard to solve. These equations cannot solve analytically. Computers are used for this kind of situation. In some models computers cannot solve the system, as well.

In this method, 1-D and 2-D elements are used. 1-D element carries the force parallel to its axes. These kinds of elements are used to model the bridge or truss system. The other option is using 2-D element. It is used generally pressure vessel system analysis. If the thickness of the material is much lower than the other dimensions, then 2-D elements are good for it. These elements are located differently in order to get 3-D system. On the other hand some computer programs use their own element types.

Resistance spot welding is a very fast method and has different phenomena together. That's why researchers cannot easily test it experimentally. In order to examine the process, researchers use some FEM. However, researchers cannot analysis all phenomena in one step. In some cases, some special programs are used to examine.

In thermal analysis, Fourier hear equation is used. Some reference points and initial conditions are added. After that thermal analysis can be done.

In structural analysis, there are two basic equations. One of them is balance equations. The other one is structure equations. Von mises yield criterion is used for the structural system analysis.

For this paper, two sheet metals are used. These metals are joint by using resistance spot welding. And also finite element model is used to examine the thermal and structural behavior while the welding operation has been done.

Finite model has nearly 150000 nodes and 28000 elements. The model has 100x1x10 (mm) dimensions. Ambient temperature is added as 22 C. Three types of materials are used as sheet metals which are S235, 304 and Al-7075. All thermal and structural properties are added to the system. And 5000 N force applied to the system as an electrode pressure.

In analysis process, we accepted that weld nugget has occurred in 0.3 s. After that system starts to cool while 5000 N force is applied in 1 s. As a result we try to understand thermal and structural behavior of system.

Temperature distribution, deformation and max equivalent stress are found for three materials.

For S235, we find the temperature distribution. Deformation is found 0.003 mm and max equivalent stress is measured as 1153 MPA.

For 304, temperature distribution is found in different times. Deformation is found 0.003 mm and max equivalent stress is measured as 1147 MPa.

For Al-7075, temperature distribution is found, as well. Deformation is measured as 0.03 mm and max equivalent stress is measured as 634 MPA during the welding operation.

With this research, we get some outcomes. Temperature distribution has low heat flow until 1 second. After this, it cools in high rate.

Temperature distribution has circular shape. It has not elliptical shape like the weld nugget.

There are symmetrical deformation occurs around the weld nugget. This deformations occur due to electrode applied force.

Max equivalent stress has max value instantly. However, this value decreases in some point after the welding operations.

Max equivalent stress occurred around the weld nugget. And also some stress occurrence exists at the edge of the electrode applying area in the sheet metal.

By using this research we can do some new research in the future. Optimum force can be found for different type of materials.

The prediction of the deformation at the electrode can be examined.

After the long using of electrode, some cracks may occur. We can predict the crack occurrence speed.

Max equivalent stress should be decreased. We can use this research in order to decrease the max equivalent stress.





## **1.GİRİŞ**

Elektrik direnç kaynak metotları günümüz endüstriyel uygulamalarında yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Nokta direnç kaynağı da bu endüstriyel uygulamalar sırasında ince sacların birleştirilmesi işleminde kendine kalıcı bir yer edinmiştir. Otomasyona uygunluğu, hızlı ve düzgün kaynak yapması nedeniyle imalat sektöründe kullanımı yoğundur. Yöntem ısı, mekanik ve elektriksel etkenleri bir arada bulundurmaktadır. Yöntemin işleyişine bakacak olursak, öncelikle birleştirilmek istenen parçalar üst üste getirilir, uygulanan basınç ve yüksek akım girdisi sayesinde malzemelerin birleşme noktasında yüksek sıcaklık oluşturulur. Bu sayede malzemelerin ergimesi ve birleşerek yeniden katılaşması sağlanır. Bu şekilde birleştirme işlemi tamamlanmış olur. Bu işlemin gerçekleşmesi için temas yüzeyindeki direnç önemlidir. Ayrıca akımın düzgün bir yol izleyerek malzeme temas yüzeyinde ergime ısısına ulaşabilmesi için uygulanacak baskı kuvveti de aynı derecede önem arz etmektedir. Kaynaklı malzemenin kalitesini yukarıda belirtilen parametrelerle beraber, oluşan çekirdek çapının şekli ve boyutları da etkilemektedir. Çekirdek bölgesinde oluşan ısı uygulanan akımın karesi, malzeme direnci ve kaynak süresinin çarpımları ile bulunmaktadır.

### **1.1 Tezin Amacı**

Bu çalışmada nokta direnç kaynağındaki ısı dağılımı ve uygulanan baskı kuvvetlerinden dolayı oluşan deformasyonlar ve gerilme değerlerinin belirlenmesine çalışılmıştır. Bu olgunun sayısal modellenmesi için Ansys sonlu elemanlar paket programı kullanılmış, sıcaklık ve baskı kuvvetlerinin malzeme üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bu analiz ile yeni malzemelerde optimum sıcaklık ve kuvvet değerlerinin belirlenmesi sırasında bir kaynak oluşturması istenmiştir.

## 1.2 Literatür Araştırması

Daha kaliteli ve daha ekonomik kaynak işlemleri gerçekleştirmek amacıyla çeşitli ülkelerden araştırmacılar çalışmalar yapmaktadır. Direnç nokta kaynağının en önemli noktası çekirdek sıcaklığı olduğu için özellikle bu alanda yapılan çalışmalar diğer araştırmacılar için son derece önemli veriler ortaya çıkarmaktadır. Deney işlemlerinin zorluğu ve maliyetli oluşu araştırmacıları direnç nokta kaynağı incelemeleri sırasında 1, 2 ya da 3 boyutlu olarak oluşturulan modelleri kullanmaya yöneltmektedir.

Zhigang ve diğ. sonlu elemanlar yöntemini kullanarak nokta direnç kaynağının ısı ve mekanik özelliklerini incelemiştir[1]. Moshayedi ve Sattari-Far östenitik paslanmaz çeliklerde kaynak çekirdeğinin büyümesini deneysel ve nümerik olarak incelemiştir[2]. Yine Moshayedi ve Sattari-Far kaynak süresinin ve akımın artması ile gerilme üzerindeki etkisini incelemiştir. Kaynak süresi ve akımın artması ile kaynak çekirdeğinde ki radyal artırmaların arttığını gözlemlemiştir[3]. Gould çekirdek oluşumunu ve büyümesini incelemiştir. Bu çalışmasında deneysel çalışmanın yanında sonlu farklar yöntemi kullanarak oluşturduğu bir boyutlu ısı transfer modelini de kullanmıştır. Çekirdek genişlemesinde sınırlamaya neden olan radyal ısı transferinin önemini göstermiştir[4]. Tsai ve Jammal Ansys paket programını kullanarak nokta direnç kaynağının karakteristiklerini incelemiştir[5,6]. Feulvarch ve diğ. ara yüzey temas özelliklerinin ölçülebilmesi için bir formülasyon geliştirmiştir[7,8].

Florea ve diğ. 6061-T6 alaşımı üzerinde yaptıkları çalışmalar ile kaynak parametrelerinin yorulma dayanımı ve mikro yapı üzerinde yüksek oranda etkili olduğu sonucunu çıkarmışlardır[9].

Loulou ve Bardon elektrot yüzeyi ile metal arasındaki ısı transfer katsayısının tahmininde bir metot kullanmışlardır[10,11].

Zou ve diğ. direnç nokta kaynağında kullanılan elektrotun ömrünü arttırmak için yapılan kaplamanın etkisini incelemiştir. Yaptıkları çalışmalar sonucunda kaplama yapılmış elektrotla daha düşük akım değerlerinde istenilen kaynak işleminin yapılabildiğini göstermiştir[12].

## **2.ELEKTRİK DİRENÇ NOKTA KAYNAĞI**

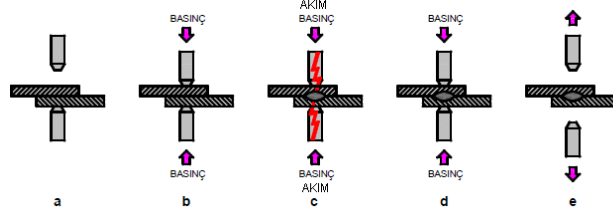
### **2.1 Giriş**

Sac parçaların birleştirilmesi için saclara birleştirilmek istenen noktadan delikler açılır ve bu delikler üzerinden perçin, vida gibi tespit elemanları kullanılarak birleştirme sağlanmış olur. Bu birleştirme işlemi için diğer ve daha yaygın olarak kullanılan yöntem direnç nokta kaynağıdır. Nokta direnç kaynağı endüstride uzun yıllardır kullanılmaktadır. Elektrik direnç nokta kaynağı 1885-1900 yılları arasında Elihu Thompson tarafından patenti alınan ve o yıllardan bu yana kullanılan bir yöntemdir[13].

Bu yöntem sacların yoğun olarak kullanıldığı otomotiv, beyaz eşya, çelik kapılar, hassas cihazların imalatı gibi alanlarda kullanılmaktadır. İnce kesitli malzemelerin yüksek ısı girdisi sırasında şekilleri bozulur, bu nedenle bu malzemelerin birleştirilmesi işlemi düşük ısı girdili ve kısa sürede gerçekleşen bir yöntem ile olmalıdır. Bu özelliklerin sağlanması sırasında direnç nokta kaynağı karşımıza çıkan ilk metottur.

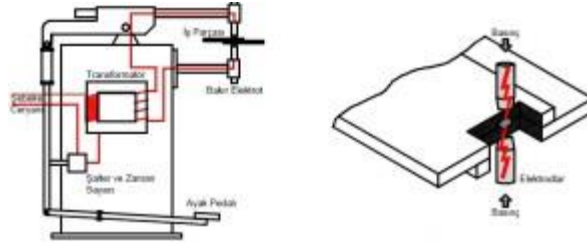
### **2.2 Yöntemin Prensi ve Özellikleri**

Direnç nokta kaynağında elektrik akımı birleştirilmek istenen parçaların üzerinden geçmektedir. Bu elektrik akımına karşı malzemenin sahip olduğu direnç birleşim noktasında malzemelerin ergimesine ve birleşmenin sağlanmasına neden olur. İki ya da daha fazla malzeme bu işlem sırasında kaynak yapılabilir. Sistem genel olarak 4 bölümden oluşur. Öncelikle malzeme kaynak makinesine yerleştirilir. İlk bölümde elektrotlar malzemeleri sıkıştırırlar. İkinci aşamada elektrik akımı malzeme üzerinden akar. Üçüncü aşamada uygulanan elektrik akımı kesilir ancak basma kuvveti devam eder. Son aşama ise elektrotların iş parçası ile temasta olmadığı ölü süreyi kapsamaktadır. Şekil 2.1 de malzemenin kaynak makinesine yerleştirilmesi ve nokta direnç kaynağının 4 aşaması gösterilmektedir.



**Şekil 2. 1:** Kaynak işlem basamakları [14].

Bu işlem sırasında uygulanan basma kuvveti hidrolik, mekanik ya da pnömatik olarak uygulanmaktadır. İşlem yüksek akım ve düşük voltaj koşullarında yapılmaktadır. Şekil 2.2 de direnç nokta kaynak makinesi ve kaynak bölgesinin şematik gösterimi bulunmaktadır.



**Şekil 2. 2:** Nokta direnç kaynak makinesi ve kaynak bölgesinin şematik gösterimi [15].

Ayrıca şekil 2.3 de bu direnç nokta kaynak makinesi örneği görülmektedir.



**Şekil 2. 3:** Nokta direnç kaynak makinesi [16].

### 2.3 Isı Enerjisi Oluşumu

Kaynak makinasının sahip olduğu sekonder devre ve kaynak ile birleştirilecek olan parçalar işlem sırasında seri dirençli bir devre gibi davranırlar. Bu noktalarda üretilen ısı Joule kanununa göre dirençleri ile doğru orantılı olarak oluşmaktadır. Denklem 2.1 de Joule kanunu gösterilmektedir.

$$Q=k \times i^2 \times R \times T \quad (2.1)$$

Bu denklemde;

Q: üretilen ısı (joule)

i: kaynak akımı (amper)

R: toplam direnç (ohm)

k: katsayı

İki levhanın birleştirilmesi sırasında devrede 7 adet direnç elemanı oluşmaktadır. Bu dirençleri sıralarsak[17];

1. Üst elektrotun direnci
2. Üst elektrot ile üst levha arasındaki temas direnci
3. Üst levhanın direnci
4. Üst levha ile alt levha arasındaki temas direnci
5. Alt levhanın direnci
6. Alt levha ile elektrot arasındaki temas direnci
7. Alt elektrotun direnci

Isı yalnızca kaynak çekirdeğini oluşturduğu yerde değil, yukarıda sıralanan dirençlerin buldukları alanlarda direnç değerleriyle orantılı olarak da oluşur. Ancak ideal olarak istenen ısının üst levha ile alt levha arasında oluşması ve kaynak işlemini düzgün ve istenilen şekilde gerçekleşmesidir. Ancak diğer noktalarda ısı oluşumu durdurulamayacağından en alt değerlerde tutulmaya çalışılmaktadır. Bu ısı oluşumun azalması için elektrotlarda su ile soğutma işlemi yapılmaktadır. Malzemelerin kaynak sıcaklığına ulaşan bölgesi öncelikle iki levhanın temas noktasıdır. Burada oluşan ısı ile bu bölgede kaynak çekirdeği oluşturulur.

Belirli bir akım değerinde oluşan ısı miktarını etkileyen ana faktörler şu şekilde sıralanabilir[17];

1. Kaynak edilen malzemenin direnci
2. Elektrot malzemesinin direnci

3. İş parçaları arasındaki temas direnci
4. İş parçaları ile elektrotlar arasındaki temas dirençleri

## 2.4 Isıl Denge

Elektik direnç kaynağı çalışma prensibi sebebiyle ısı enerjisi üretmektedir. Bu enerjinin çoğunluğu malzemenin ergiyerek birleşmesi işleminde kullanılır. Bu ısının bir miktarı ortama dağılır. Ayrıca kaynak işleminden sonra ki soğuma aşamasında da ısı ortama yayılmaktadır. Şekil 2.4 de bu ısı yayılımı gösterilmiştir. Şekil 2.4 de gösterilen kısaltmalar şu şekildedir;

$Q_{zu}$ : Verilen ısı miktarı

$I_s(t)$ : Kaynak akımı

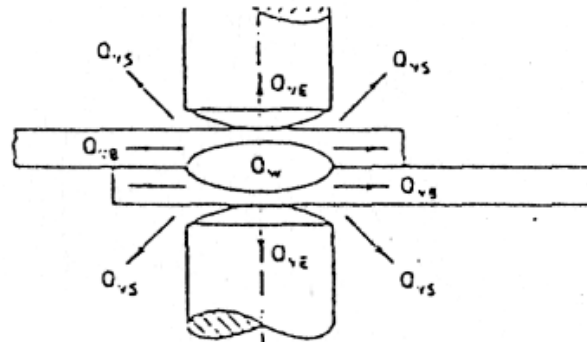
$R_Q(t)$ : Toplam direnç

$t_g$ : Kaynak süresi

$Q_v$ : Kaybolan toplam ısı miktarı

$Q_{vz}$ : Elektrotlara iletim yoluyla kaybolan ısı miktarı

$Q_{vB}$ : Saclara iletim yoluyla kaybolan ısı



$$Q_{zu} = c \int_0^{t_g} I_s^2(t) R_Q(t) dt \quad Q_w = Q_{zu} - Q_v$$

$$Q_v = Q_{vE} + Q_{vB} + Q_{vS} \quad \eta = \frac{Q_w}{Q_{zu}} \cdot 100\%$$

Şekil 2. 4: Kaynak işlemindeki ısı dağılımı [18].

## 2.5 Kaynak Parametrelerini Etkisi

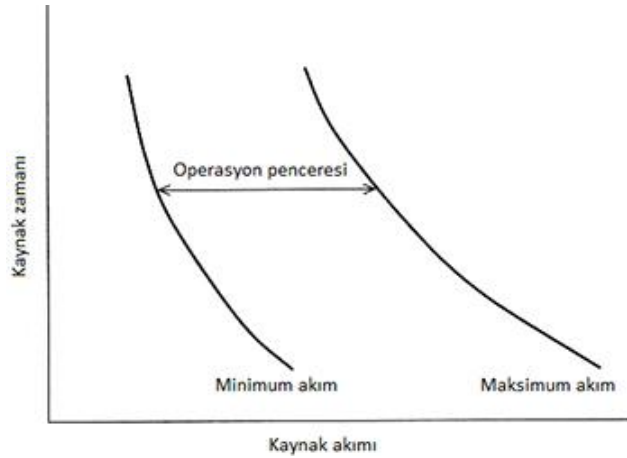
Nokta direnç kaynağında kaynak işlemini etkileyen parametreler şu şekilde sıralanmaktadır;

1. Kaynak akımı

2. Kaynak süresi
3. Kaynak basıncı
4. Elektrotlar
5. Yüzey durumu
6. Metal bileşimi

### 2.5.1 Kaynak Akımının Etkisi

Direnç nokta kaynak işleminde ısı Joule yasasına göre oluşmaktadır. Bu yasada akımın karesi yer almakta, bu durum akımı en önemli kaynak parametresi haline getirmektedir. Teorik olarak hesaplanan en küçük akım değeri kayıplardan dolayı işlevsel değildir. Eğer uygulanan akım zamana göre düşük olursa bu durumda uzun süreli kaynak durumu meydana gelir ve ısıtılan bölge genişlemiş olur. Bu bölgenin genişlemiş olması ince kalınlıktaki malzemelerde çeşitli deformasyonlara yol açmaktadır. Ancak bu akımın çok yüksek tutulması durumunda ise akım malzemede rahat bir şekilde geçemediğinden dolayı çatlaklara ve ark oluşumuna neden olur[19]. Şekil 2.5 te tipik bir uygulanabilir akım aralığı grafiği gösterilmektedir.

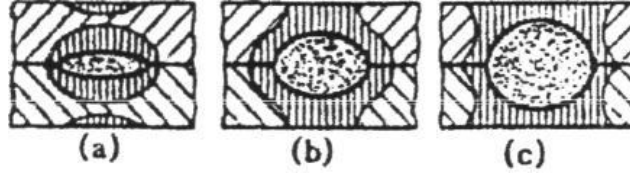


Şekil 2. 5: Uygulanabilir akım aralığı şeması [21].

### 2.5.2 Kaynak Süresinin Etkisi

Kaynak zamanı üretilen ısı miktarının etkileyen bir parametredir. Kaynak süresi uygulanacak akım değeri, malzeme kalınlığına ve malzeme bileşimine göre belirlenmektedir[17]. Eğer bu süre kısa tutulursa yetersiz bir kaynak oluşur. Bu durum zamanla kaynağın kopmasına ya da yetersiz kaynak oluşumuna neden olur. Ancak süre uzun tutulursa ergimiş bölge büyümesi ve uygulanan elektrot kuvveti ile

patlama ya da diğerk tipte hasarlar oluşabilir. Kaynak çekirdeğini oluşumunda sürenin etkisi şekil 2.6 de gösterilmiştir.



**Şekil 2. 6:** Kaynak süresini çekirdek oluşumuna etkisi a)kısa kaynak zamanı b)ortakaynak zamanı c)uzun kaynak zamanı [20].

### 2.5.3 Kaynak Basıncının Etkisi

Baskı kuvveti oluşacak kaynak çekirdeğini doğrudan etkilemektedir. Uygulanan baskı kuvvetinin az olması durumunda parçalar arasındaki direnç değeri yükselecektir. Bu yükselme kaynak işlemi sırasında patlamalara neden olabilir. Tam tersi olarak uygulanan yüksek baskı kuvveti sonucunda akım yoğunluğu ve direnç değeri düşer. Buda kaynak çekirdek çapında düşüş yaratır.

Akım geçişi sırasında oluşacak baskı azalması ısı üretim hızında artışa, daha yüksek miktarda metal fişkirmasına neden olabilmektedir. Aşırı ısı artışının sebep olabileceği durumlar şunlardır[17];

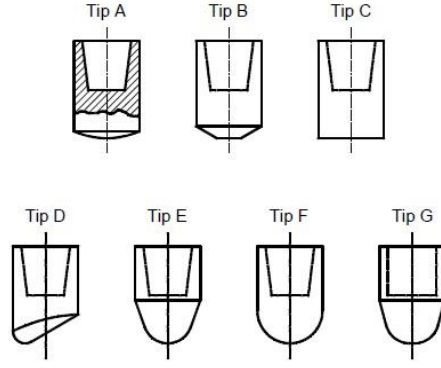
- 1) Kaynak dikişi dış yüzeylere doğru erir
- 2) Elektrotların ömrü azalır
- 3) Karıncalanma ve yüzeyin korozyon direncinde azalma meydana gelir

Uygulanan çok yüksek basınç değerleri malzemede istenmeyen distorsiyonlara neden olmaktadır.

### 2.5.4 Elektrotların Etkisi

İlk kullanılan elektrotlar saf bakırdan üretilmekteydi. Ancak sahip oldukları düşük elektriksel iletkenlik ve mekanik özelliklerinden dolayı daha sonraki dönemlerde çeşitli bakır alaşımlı elektrotlar kullanılmaktadır. Kullanılan alaşımın sertliğinin artması genel olarak elektrotun ısıl ve elektriksel direncini artırır. Ayrıca yapılacak olan kaynak işlemine göre uygun geometriye sahip elektrotlar kullanılmaktadır. Şekil 2.7 da TS EN 2582 ye göre bazı elektrot geometrileri gösterilmektedir.





**Şekil 2. 7:** TS EN 2582 göre nokta kaynağı elektrot başlıkları [15].

### 2.5.5 Yüzey Durumunun Etkisi

Yüzey durumu oluşturduğu dirençten dolayı ısı üretimini etkiler. Temiz bir yüzeyde düzgün bir kaynak çekirdek oluşumu gözlenir.

### 2.5.6 Metal Bileşiminin Etkisi

Metale ait olan özgül elektrik direnci Joule kanunundaki direnç değerini etkilediği için oluşacak ısı miktarını da doğrudan etkiler. En genel olarak malzemenin bileşimi kaynak işlemi için gerekli olan ısı değerini etkilemektedir.

## 2.6 Nokta Direnç Kaynağında Kullanılan Elektrotların Özellikleri

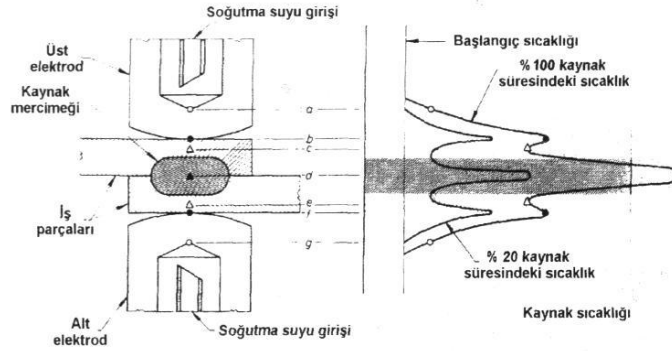
Nokta direnç kaynağında kullanılan elektrotlar uygulanan yüksek basınç değerlerine göre gerekli mekanik özelliklere sahip olmalıdır. Ayrıca elektrik iletkenlik katsayısı ve ısıl iletim katsayısı değerleri yüksek olmalı, düşük elektriksel direnç özelliği göstermelidir. Bu işlemde kullanılan elektrotların özellikleri ISO 5182 de ayrıntılı olarak belirtilmektedir.

## 2.7 Kaynak Çekirdeği

Nokta direnç kaynağında amaç iki metalin birleşme noktasında bir kaynak çekirdeği oluşturmaktır. Bu işlemde Joule kanunu gereği olarak ısı oluşur. Bu ısı öncelikle iki metalin temas yüzeyinde oluşur. Burada ısıdan dolayı ergiyen ve birbiri içinde karışan küçük parçalar birleşerek çekirdeği oluştururlar.

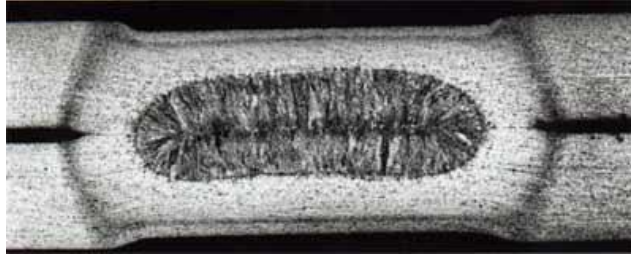
Elektrotlar su ile soğutuldukları, düşük elektrik direnci ve yüksek ısıl iletkenlik katsayısına sahip oldukları için elektrotun iş parçası ile temas ettiği noktalarda

ergime oluşmaz. Şekil 2.8 de nokta kaynağındaki dirençler ve ısı dağılımı gösterilmiştir.



Şekil 2. 8: Nokta kaynağında dirençler ve sıcaklık dağılımı [17].

Oluşan bu ısı ile ergiyen ve birbirine içine geçen metaller şekil 2.9 da gösterilen kaynak çekirdeğini oluştururlar. Kaynak işleminin dengeli olarak soğuması tane yönelmesini etkiler ve kaynağın daha kaliteli olmasını sağlamaktadır.



Şekil 2. 9: Nokta direnç kaynağı ile oluşan kaynak çekirdeği [22].

Ayrıca uygulanan elektrik akımından sonra elektrot baskı kuvvetinin devam etmesi de oluşan bu çekirdeğin kalitesini etkilemektedir.

## 2.8 Isıl Denge

Eğer aynı yapıda ve kalınlıkta iki malzeme, aynı şekle ve kütleye sahip elektrotlar ile kaynak ediliyorsa ısı birleşim noktasında eşit olarak dağılacak ve çekirdek oval bir kesite sahip olacaktır. Bu şartların sağlandığı durumda ısıl dengede vardır. Eğer levhalardan biri daha yüksek elektriksel dirence sahip ise burada ısı daha çabuk üretilecek ve bu durum ısıl dengelyi ortadan kaldıracaktır. Örneğin paslanmaz çelik ile orta karbonlu çelik kaynak edilirse, ısıl dengelyi sağlamak amacıyla ya yüksek dirençli paslanmaz çelik tarafındaki elektrot temas alanı artırılır, ya da düşük

dirençli karbonlu çelik tarafında daha yüksek dirençli elektrot kullanılır[17]. Bu şekilde ısı denge sağlanmış olur. Aynı durum aynı tipteki farklı kalınlıktaki malzemelerin kaynağı sırasında da geçerlidir.

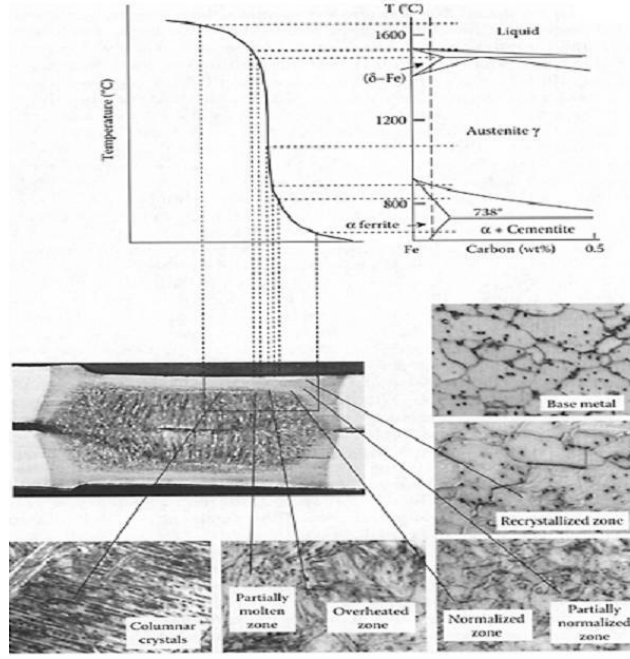
Isıl dengeyi etkileyen faktörler şu şekilde sıralanabilir[17];

- 1) Kaynak edilecek malzemelerin özgül ısı ve elektriksel iletkenlikleri
- 2) Kaynak edilecek parçaların geometrileri
- 3) Elektrotların ısı ve elektriksel iletkenlikleri
- 4) Elektrotların geometrisi

## **2.9 Isı Tesiri Altındaki Bölge (ITAB)**

Teorik olarak ITAB ortam sıcaklığının üstünde kalan bölgeyi tanımlamakla birlikte genel olarak kaynak ısısından etkilendiği ölçülebilen bölgeyi açıklamak için kullanılır. Genel olarak ITAB 3 ana bölgeye ayrılır. İlki süper kritik bölgedir. Burası kaynak çekirdeğine bitişik olan bölgedir ve tane irileşmesi görülür. İkinci bölge orta bölgedir. Buradaki sıcaklık süper kritik bölgenin sıcaklığından daha düşüktür. Bu bölgede kısmi dönüşüm gözlenir. Üçüncü ve son bölge kritik altı bölgedir, burada ısının etkisi görülmez.[23]

Isı etkisi altındaki bölgedeki sıcaklık dağılımı ve soğuma hızı bilirse kaynak çekirdeğin soğuma sonrası içyapısı belirlenebilmektedir. Şekil 2.10 da ITAB ın metalürjik yapısı görülmektedir.



**Şekil 2. 10:** Nokta direnç kaynağı ile birleştirilmiş yapının sıcaklık dağılımı ve metalürjik yapısı [24].

### **3.SONLU ELEMANLAR ANALİZİ**

#### **3.1 Giriş**

Günümüz mühendislik işlemlerinde kullanılan her türlü olgu bir fiziksel sisteme dayanmaktadır. Bu sistemin çözümü çoğu zaman kolay olmamaktadır. Bu sistemleri çözümleyebilmek için bir takım denklem ve eşitlikler yardımıyla matematik modeller oluşturulur. Daha sonra oluşturulan bu modellerde çeşitli kabuller yapılır ve analitik bir çözüme ulaşılmaya çalışılır. Oluşturulan bu matematik modeller karmaşık yapıda ki sistemlerin çözümlenmesi sırasında yetersiz kalmakta ve çoğu durumda çözüme ulaşamamaktadır. Bu gibi karmaşık yapılarda çözüme ulaşabilmek için bilgisayar modellemesi kullanılmaktadır. Bu bilgisayar yardımıyla modellemesi yapılan karmaşık yapılar binlerce denklemden oluşmaktadır.

Yaygın olarak kullanılan bilgisayar programlarının çoğu bu fiziksel sistemler için matematik modelleri oluşturmakta ve bu modellerin çözümü için de Sonlu Elemanlar Analizi (SEA) ya da Sonlu Elemanlar Metodu (SEM) yöntemlerini kullanmaktadırlar. Sonlu elemanlar metodu karmaşık yapıların modellenmesi, değişik sınır şartlarının belirlenebilmesi ve malzeme özelliklerinin girilebilmesinin yanında diğer mühendislik programları ile entegre bir şekilde çalışabildiği için birçok mühendislik uygulamasında kendine yer bulmaktadır.

Sonlu elemanlar metodu, modeli bütün olarak çözmenin zorluğunu ortadan kaldırmak amacıyla modeli daha küçük elemanlara böler ve bu şekilde çözüme ulaşmaya çalışır. Metod temel olarak her objenin sonsuz sayıda noktadan oluştuğu gerçeğini kabul eder ve bu sonsuz sayıdaki noktayı sonlu sayıda noktaya indirir ve bu şekilde işleme başlar. Bu şekilde sonsuz sayıdaki noktayı objenin şeklini bozmadan sonlu sayıdaki nokta ile ifade eder. Bu sınırlı sayıdaki noktaların her biri düğüm noktası (node) olarak adlandırılır. Bu düğüm noktalarının birleşmesi ile oluşan 1, 2, 3 boyutlu şekillere de eleman (element) denir. Böylece tasarımın sonlu elemanlar

modeli oluşturulmuş olur. Bu şekilde belirli bir yaklaşımla çözüme ulaşılır. Bazı karmaşık yapılar için bu yakınlaşık çözümler tek yoldur ve yeterli olduğu kabul edilmektedir. Sonlu elemanlar metodu nümerik bir metottur ve katı cisimler mekaniği, akışkanlar mekaniği, ısı ve titreşim gibi mühendislik uygulamalarının bilgisayar yardımı ile çözümünde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu uygulamalarda katı modeldeki değişimler direkt olarak düğüm noktalarındaki değişimler olarak karşılık bulurlar. Sonlu elemanlar yöntemi bu değişimlerin sonucu olarak düğüm noktalarında oluşan yer değiştirmeleri belirli formüller kullanarak çözmeye çalışır. Bu çözüme ulaşılabilmesi için modelin belirli noktalardan sabitlenmesi gerekmektedir. Bu yöntemin bilgisayarlarda kullanılması ile pahalı deneysel yöntemlerle yapılabilen birçok yapısal analiz kolay, hızlı ve ekonomik olarak yapılabilmektedir.

Metodun tarihine bakacak olursa ilk çalışmaların havacılık endüstrisinin ihtiyaçları doğrultusunda 1950li yıllarda yapıldığı görülmektedir. Metodun temelleri Hrennikoff ve Courant ın yaptığı çalışmalara dayanmaktadır. 1950li ve 1960lı yıllarda Feng kısmi diferansiyel denklemlerin çözümü için sistematik bir yöntem önermiştir. Sonlu farklar yöntemi olarak adlandırılan bu yöntem sonlu elemanlar analizi için büyük bir buluş özelliği taşımaktadır. 1960lı yıllarda metodun matematiksel modelinin oluşturulması ile mühendislik alanlarında kullanımı giderek artmıştır. Sonlu elemanlar teimi ilk olarak 1960 yılında Clough tarafından kullanılmıştır[25]. İki boyutlu modellerden 3 boyutlu modellere geçmek görece daha kolay olmuştur. Metod 1970li yıllarda kişisel bilgisayarlarda kullanılmaya başlanmış ve yaygınlaşmıştır. 1990lı yıllarda ise büyük ölçekteki modeller analiz edilebilir hale gelmiştir.

Günümüzde ise diğer mühendislik programlarıyla entegre olarak çalışabilmesi dolayısıyla tüm mühendislik alanlarında kullanılmaktadır. Metodun uygulama alanlarına bakacak olursak [26];

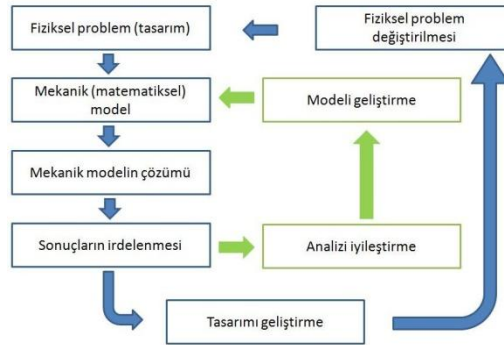
- 1) İnşaat Mühendisliği: Yapıların periyodik olmayan yüklere cevabı, stabilite analizi...
- 2) Uçak Mühendisliği: Doğal frekanslar, stabilite analizi...
- 3) Jeomekanik: Toprak ve yapı etkileşiminin incelemeleri...

- 4) Nükleer Mühendislik: Yapıların dinamik yüklere cevapları, basınç analizleri...
- 5) Mekanik Tasarım: Tüm analiz işlemlerinde...

Bilindiği üzere sonlu elemanlar metodu belirli bir hata payı ile sonuç vermektedir. Dolayısıyla analizi doğrulamak için analitik ya da deneysel çözümlerin üretilmesi gereklilik göstermektedir. Yaygın olarak karşılaşılan problemler için yaklaşık olan bu çözümler çizelgeler şeklinde bulunmaktadır.

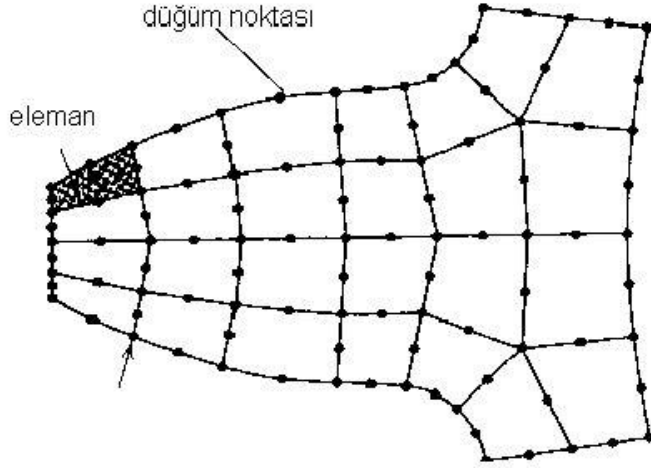
### 3.2 Sonlu Elemanlar Metodu

Tasarım aşamasındaki karmaşık ve büyük bir geometriye sahip olan mühendislik uygulamalarının analizi sırasında tüm sistemi analiz etmek çok zordur. Analiz için gerekli olan matematik modeli oluşturmak bazı durumlarda mümkün olmamaktadır. Bu sorunu ortadan kaldırmak için tüm sistemi analiz etmek yerine sistemin karakteristik özelliklerine sahip olan sonlu eleman analiz edilir ve sistemin tamamı hakkında bilgi sahibi olunmuş olur. Tabiki alınan bu bilgiler belirli bir hata payına sahiptirler. Sonlu elemanlar analizine ait akış şeması şekil 3.1 de gösterilmektedir.



**Şekil 3. 1:** Sonlu elemanlar analizi akış şeması [27].

Bu analiz işleminde karmaşık geometriye sahip yapı daha küçük, basit çok sayıda bölgeye ayrılır, bu alt bölgeler eleman olarak adlandırılır. Bu elemanlar düğüm noktaları ile birbirlerine bağlanarak geometriye ait sonlu eleman modelini oluştururlar. Şekil 3.2 de yapısal bir analiz için oluşturulmuş sonlu eleman modeli gösterilmektedir.



Şekil 3. 2: Sonlu eleman modeli [28].

Örnek olarak sonlu eleman metodu ile yapılan bir yapısal analiz şu işlem sıralarıyla gerçekleştirilir[28];

- 1) Yapı parçalara ayrılır
- 2) Oluşturulan elemanlar için fiziksel davranışlar tanımlanır
- 3) Düğüm noktaları ile bağlanan bu elemanlar için denklem sistemi oluşturulur
- 4) Düğüm noktaları üzerindeki bilinmeyen değerler analiz çeşidine uygun olarak denklem sistemleri yardımıyla çözülür
- 5) Seçilen eleman için istenilen değerler hesaplanır

Yapılan bu işlemlerin matematiksel temeline bakacak olursak karşımıza her bir eleman için şu denklem çıkmaktadır.

$$[k]x[d]=[f] \quad (3.1)$$

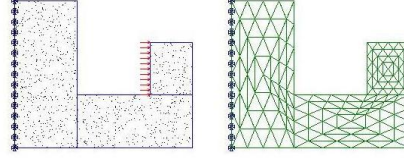
Bu denklemde k her bir elemana ait rijitlik matrisini, d oluşan deformasyon vektörünü, f ise eleman üzerinde ki kuvvetler vektörünü göstermektedir. Modele ait olan rijitlik her bir elemana ait olan rijitlik matrislerinin toplanması ile elde edilmektedir. Tüm modele etki eden kuvvet ve oluşan deformasyonun belirlenmesi için (3.1) denkleminin benzer bir ilişki yazılır.

$$[K]x[D]=[F] \quad (3.2)$$



Burada  $K$  tüm sisteme ait rijitlik matrisi,  $D$  tüm yapıdaki deformasyon vektörü,  $F$  tüm yapı için kuvvet vektörü olarak tanımlanmaktadır[29].

Şekil 3.3 deki gibi karmaşık bir yapıya bakacak olursak bu elemanları çözümünü analitik olarak yapmak oldukça zordur.



**Şekil 3. 3:** Yük etkisindeki sistem ve oluşturulan sonlu elemanlar modeli [30].

Bu durumda oluşturulan sonlu elemanlar modelindeki her bir elemana ait olan rijitlik matrisleri hesaplanarak sisteme ait olan rijitlik ve deformasyon değerleri bulunabilmektedir. Doğal olarak geometrinin karmaşıklaşması ile oluşturulacak olan matematik modelde zorlaşacak ve çözüm işlemi analitik olarak yapılamayacak seviyelere gelecektir. Bu durumlar da bu işlemler bilgisayar programları ile yapılmasına rağmen karmaşık geometriye sahip modellerde işlem zaman alacaktır.

Günümüzde kullanılan sonlu elemanlar paket programları genel olarak 3 aşamada bu analiz işlemlerini gerçekleştirmektedir.

- 1) Ön işlem
- 2) Hesaplama
- 3) Son işlem

### 3.2.1 Ön İşlem

Bu işlem yapılacak olan geometrinin özelliklerini girilmesi, uygulanan yüklerin ve diğer analiz özelliklerinin girildiği ve işleme hazırlandığı bölümdür. İlk kullanılan programlarda sistem geometrisi tamamen bu işlem sırasında programa girilmekte iken günümüzde diğer mühendislik programları ile entegre çalışabilen sonlu elemanlar programları ile diğer programlarda hazırlanan CAD dosyaları üzerinden matematik model oluşturularak analiz işlemi gerçekleştirilmektedir.

### 3.2.2 Hesaplama

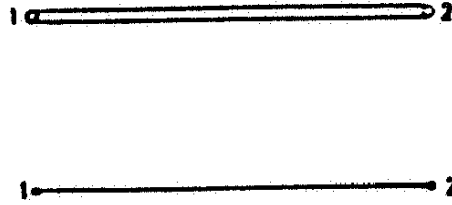
Bu bölümde girilen özelliklere göre sisteme ait matematik model yardımı ile analiz işlemi yapılmakta ve sonuca ulaşılmaktadır.

### 3.2.3 Son İşlem

Bu bölüm yapılan işlemin sonuçlarının grafik ve görseller yardımı ile kullanıcıya verildiği bölümü kapsamaktadır. Bu bölümde oluşan deformasyon, ısı dağılımı gibi sonuçlar kullanıcı tarafından anlaşılır hale getirilir. Yeni sonlu elemanlar programlarında oluşan veriler animasyon şeklinde gösterilerek analiz işlemi daha görsel hale getirilmiştir.

### 3.3 Sonlu Eleman Tipleri

Analiz işlemi yapılacak olan modelin elemanlara ayrılması sırasında sistemin özelliklerine benzeyen sonlu eleman tipleri kullanılır. Aşağıda değişik boyutta elemanlar gösterilmektedir.

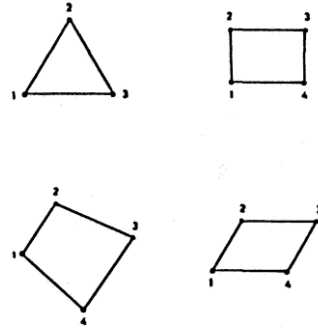


Şekil 3. 4: Tek boyutlu eleman [26].

Şekil 3.4 de gösterilen 1 boyutlu eleman kafes sistemi ya da köprü gibi sistemlerin modellenmesi sırasında kullanılmaktadır. Bu tip elemanlar genellikle eksenlerine paralel yönde kuvvet taşımaktadırlar.

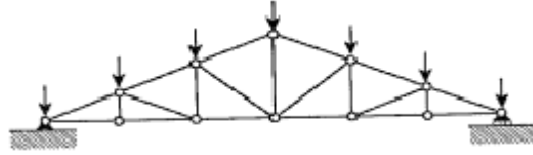
Bir boyutlu olan sonlu elemanlar eksenlerine paralel yükleri taşıyabilirler ancak 2 veya 3 boyutlu uzayda çeşitli şekillerde konumlandırılarak kullanılabilirler.

Şekil 3.5 de gösterilen iki boyutlu elemanlar düzlem eleman olarak adlandırılırlar. Genellikle öteleme deformasyonunun incelenmesi amacıyla kullanılırlar. Kalınlıkları diğer boyutlarına göre çok küçük olan basınçlı kaplar sac mamulleri gibi yapıların modellenmesinde kullanılırlar.



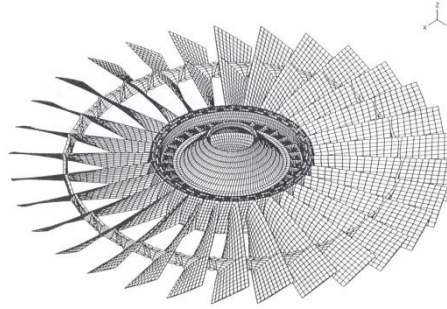
**Şekil 3. 5:** İki boyutlu elemanlar [26].

Şekil 3.6 da 1 boyutlu elemanlarla oluşturulmuş bir köprü modeli örnek olarak verilmektedir.



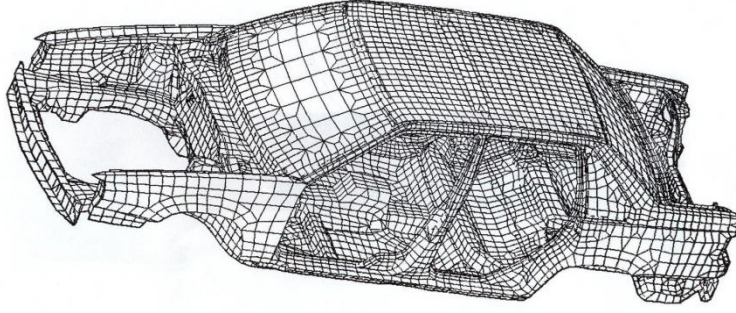
**Şekil 3. 6:** 1 boyutlu elemanlar oluşturulmuş köprü modeli [31].

Şekil 3.7 de sonlu elemanlar modeli ile oluşturulmuş bir fan diskini gösterilmektedir.



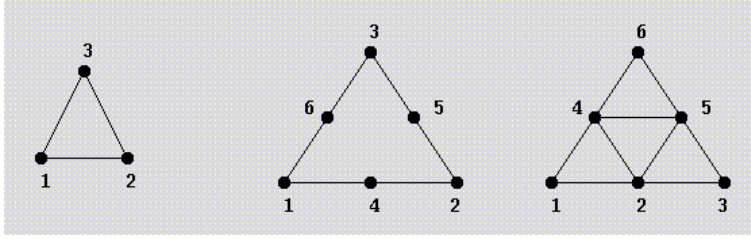
**Şekil 3. 7:** Kanatlı fan diskine ait sonlu elemanlar modeli [31].

Şekil 3.8 de bir arabaya ait sonlu elemanlar modeli gösterilmektedir.



**Şekil 3. 8:** Arabaya ait sonlu elemanlar modeli [31].

Sonlu elemanlar ayrıca lineer ve parabolik sonlu elemanlar olarak da gruplanabilirler. Yalnızca köşe noktalarında düğüm noktası bulunan elemanlara lineer, kenar eğrileri üzerinde de düğüm noktası bulunuyorsa parabolik sonlu elemanlar olarak adlandırılırlar. Parabolik sonlu elemanlar daha karmaşık denklemlere sahiptirler ayrıca lineer elemanlar göre daha hassas sonuçlar vermektedirler. Şekil 3.9 da lineer ve parabolik sonlu elemanlar gösterilmektedir.



**Şekil 3. 9:** Lineer ve parabolik sonlu eleman örnekleri [32].

Genel sonlu elemanların yanı sıra yeni programlar bazı durumlarda kendilerine özgü elemanlar kullanarak işlemlerini gerçekleştirirler.

### 3.4 Sistemin Sonlu Elemanlara Bölünmesi

Burada ilk yapılacak işlem sistem için uygun olan eleman tipini seçmek ve bu eleman tipine göre sistemi sonlu sayıda elemana bölmektir. Seçilen eleman tipi sistemi ne kadar iyi temsil ederse analiz sonucunda alınacak olan sonuç da o derecede doğruya yakın olmaktadır.

### 3.5 Yükler

Uygulanan yükler iki gruba ayrılabilir:

1. Tekil yükler

## 2. Yayılı yükler

Uygulanan tekil yükler düğüm noktalarına uygulanacak şekilde ayarlanmalıdır. Klasik lineer teoriye göre bir noktaya uygulanan tekil yük[33];

1. Kiriş için sonlu bir deplasman ve gerilme değeri oluşturur
2. Levha için sonlu bir deplasman ve sonsuz gerilme oluşturur
3. İki yada üç boyutlu cisim için sonsuz deplasman ve gerilme oluşturur

Uygulanan bu tekil yükler malzemede akmaya neden olur. Ancak lineer teori bu akma olayını modellemez. Bu nedenle bu tekil yükler belirli bir alana uygulanan yüksek yoğunluklu yayılı yükler şeklinde modellenirler[33].

Ancak analiz sırasında uygulanan yayılı yükler düğüm noktalarına dağıtılarak modellenirler.

### 3.6 Sınır Koşulları

Sınır koşulları mekanikte mesnet olarak tanımlanan yapılardır. Bu mesnetler sonlu elemanlar analizi sırasında doğru olarak sisteme eklenmelidir. Bu sınır koşullarının yanlış olarak girilmesi sonlu elemanlar modeli için oluşturulan matrislerin ve denklemlerin çözülmesini zorlaştırmanın yanı sıra bazı durumlarda çözüme ulaşılmasını da engelleyebilmektedir. Ayrıca sınır şartlarının doğru uygulanmaması durumunda fiziksel sistem tam olarak modellenemeyeceğinden alınacak sonuçlar yanlış olacaktır.

Bazı sistemler için bu sınır şartlarının belirlenmesi zor olabilmektedir. Bu gibi durumlar da sistemin üst ve alt sınırlarını iki ayrı analiz yardımıyla belirlemek ve bu sonuçlara göre sınır koşullarının girilmesi daha doğru olacaktır[33].

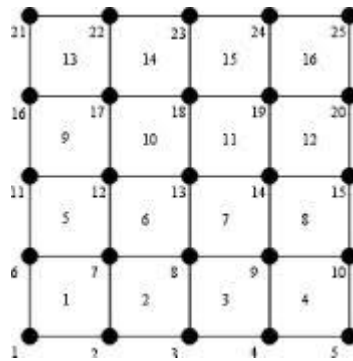
### 3.7 Ayrıklaştırma

Ayrıklaştırma işlemi matematikte sonsuza giden bir modeli ya da denklemi yaklaşık olarak ifade edebilecek olan daha küçük bir modele indirgenmesi sürecini incelemektedir. Bu işlemin sonlu elemanlar yöntemi ile ilişkisine bakacak olursak

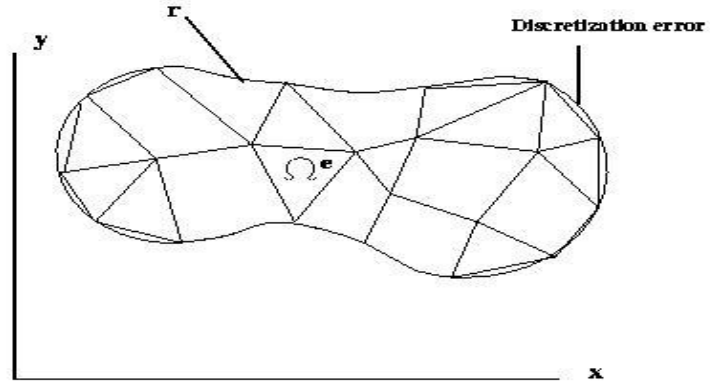
modeli çözmek için gerekli olan eleman sayısının bulunması sorunu yatmaktadır. Bilindiği üzere eleman sayısı arttıkça çözüme ait olan hassasiyet artmaktadır. Ancak bu durum işlem süresini uzattığı için belirli bir hata payında kabul edilen eleman sayısı kullanılmaktadır. Bu nedenle ayırıklaştırma işlemi dikkatli bir şekilde gerçekleştirilmelidir. Ayırıklaştırma işlemi sırasında dikkat edilmesi gereken bazı noktalar şu şekilde sıralanabilir[33];

1. Sonlu elemanlar ağı mümkün olduğu şekilde uniform olmalıdır
2. Sahip olduğu avantajlardan dolayı 4 kenarlı elemanlar 3 kenarlı elemanlara tercih edilmelidir
3. Non-lineerliği hesaba katan analizlerde lineer analizlere göre daha sık bir ağ yapısı oluşturulmalıdır
4. Elemanların kenar uzunlukları oranı eleman tiplerine göre değişiklik göstermekle birlikte, uzunluk oranı deplasman hesapları için 10'un altında, gerilme hesapları için 5'in altında bir değer olmalıdır
5. Yüksek mertebeden elemanlar için ara düğüm noktalarının dağılımı uniform yapılmaya çalışılmalıdır.

Şekil 3.10 da ayırıklaştırma işlemi sorunsuz gerçekleşmiş bir yapı görülmekte iken şekil 3.11 de ayırıklaştırma hatasına sahip bir model gösterilmiştir.



Şekil 3. 10: Ayırıklaştırma hatası olmayan model [34].



**Şekil 3. 11:** Ayrıklaştırma hatasına sahip bir model [35].





#### **4. NOKTA DİRENÇ KAYNAĞININ MODELLENMESİ VE UYGULANAN SİMÜLASYON İŞLEMLERİ**

Nokta direnç kaynağı işlemi çok kısa sürede gerçekleşen bir birleştirme işlemi olarak karşımıza çıkmaktadır. Malzeme ergimesi, çekirdek oluşumu ve soğuma bu kısa zamanda gerçekleşir. Bu nedenle deneysel olarak bu işlemin analiz edilmesi oldukça zor olmaktadır. Nokta direnç kaynağında elektriksel, ısı, mekanik ve metalürjik yapılar çok kısa sürede ve birbirleriyle etkileşerek değiştiği için bu parametrelerin bir arada deneysel olarak incelenmesi oldukça zordur. Bu nedenle bu gibi analizlerde sonlu elemanlar yöntemini kullanan paket programlar yaygın olarak kullanılmaktadır.

İşlem sırasında oluşan sıcaklık dağılımı ve ısı deformasyonun yanı sıra uygulanan elektrot baskı kuvvetinin etkileri de incelenebilmektedir.

Kullanılan paket programların sahip olduğu meziyetlere rağmen ısı, mekanik ve elektriksel olayların bütünlük olarak incelenmesi mümkün olmamaktadır. Bu nedenle inceleme bölümlere ayrılarak belirli bir yakınsama şeklinde yapılmaktadır. Ancak bazı durumlarda kullanılmak için SYSWELD gibi özel denklemler ve formülasyonlar kullanan paket programlarda geliştirilmiştir.

Nokta direnç kaynağında ısı ve mekanik etkilerin incelenmesi sırasında kullanılan formüller ve diğer bilgiler aşağıda açıklanmaktadır.

Bu çalışmada nokta direnç kaynağında ki ısı dağılımı, bu ısı ve uygulanan baskı kuvvetinden dolayı oluşan deformasyon incelenmektedir. Bu işlemler şu sıra ile gerçekleşmektedir;

- Öncelikle kaynak çekirdeğinin ergime sıcaklığına ulaştığı ve soğumaya başladığı kabul edilir ve sıcaklık dağılımı incelenir.

- Daha sonra malzemedeki ısı dağılımı ve uygulanan basınçtan dolayı oluşan mekanik deformasyonlar incelenmektedir.

#### 4.1 Isıl Model Analizi

Bir hacim, herhangi bir yüzey, S, tarafından sınırlanırsa ısı akışına ait denge ilişkisi şu şekilde ifade edilir.

$$-\left(\frac{\partial R_x}{\partial x} + \frac{\partial R_y}{\partial y} + \frac{\partial R_z}{\partial z}\right) + Q(x, y, z, t) = \rho C \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial t} \quad (4.1)$$

$R_x, R_y, R_z$ : birim alandaki ısı akış oranları

$T(x, y, z, t)$ : geçerli olan sıcaklık

$Q(x, y, z, t)$ : iç ısı üretim oranı

$\rho$ : yoğunluk

$C$ : özgül ısı

$t$ : zaman

Model Fourier ısı akış denklemi dikkate alınarak son şekline getirilir.

$$R_x = -k_x \frac{\partial T}{\partial x} \quad (4.2.a)$$

$$R_y = -k_y \frac{\partial T}{\partial y} \quad (4.2.b)$$

$$R_z = -k_z \frac{\partial T}{\partial z} \quad (4.2.c)$$

Bu denklemlerde  $k_x, k_y$  ve  $k_z$  x-y-z eksenlerindeki ısı iletkenlikleri ifade etmektedir.

4.2.a, 4.2.b ve 4.2.c denklemlerini 4.1 denkleminde yazarsak

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q = \rho C \frac{\partial T}{\partial t} \quad (4.3)$$

Üstteki denklem ısı iletimin tanımlayan diferansiyel denklemdir. Başlangıç ve sınır şartlarının uygulanması ile sonuca ulaşılabilir.

Başlangıç şartları;

$$T(x, y, z, 0) = T_0(x, y, z) \quad (4.4)$$

Sınır şartları;

$$(k_x \frac{\partial T}{\partial x} N_x + k_y \frac{\partial T}{\partial y} N_y + k_z \frac{\partial T}{\partial z} N_z) + q_s + h_c(T - T_\infty) + h_r(T - T_r) = 0 \quad (4.5)$$

Denklem 4.5 de;

$N_x, N_y, N_z$ : sınıra normal çizilen harici kosinüs

$h_c$ : konveksiyon ile ısı transfer katsayısı

$h_r$ : radyasyon ile ısı transfer katsayısı

$q_s$ : sınır ısı akışı

$T_\infty$ : çevre sıcaklığı

$T_r$ : radyasyon ısı kaynağı sıcaklığı şeklinde ifade edilir.

Radyasyon ısı transferi katsayısı şu şekilde ifade edilir;

$$h_r = \sigma \epsilon F (T^2 + T_r^2)(T + T_r) \quad (4.6)$$

$\sigma$ : Stefan-Boltzmann sabiti

$\epsilon$ : etkin yayınım

$F$ : konfigürasyon faktörüdür.

Yüksek sıcaklık çevrimine dayalı kaynak işleminde, sıcaklığa bağlı malzeme özelliklerini göz önünde bulundurursak, geçici sıcaklık, iki zaman aralı öteleme yöntemi ile hesaplanır.

$$T(\tau) = T(t - \Delta t) + \frac{\tau}{\Delta t} [T(t - \Delta t) - T(t - 2\Delta t)] \quad (4.7)$$

Sıcaklığa bağlı malzeme katsayısına  $g$  dersek, yani  $T(\tau)$ ' nin bir fonksiyonu ile ifade edilirse,  $t$  anındaki malzeme katsayısı şu şekilde tanımlanır;

$$g = \frac{1}{\Delta t} \int_{t-\Delta t}^t g[T(\tau)] d\tau \quad (4.8)$$

## 4.2 Mekanik Model Analizi

Mekanik modelde kullanılan iki tane denklem sistemi vardır. Bunlar denge denklemleri ve yapı denklemleridir.

Denge denklemleri;

$$\sigma_{ij,j} + \rho b_i = 0 \quad (4.9.a)$$

$$\sigma_{ij} = \sigma_{ji} \quad (4.9.b)$$

Burada;

$\sigma_{ij}$ : gerilme

$b_i$ : kütle kuvvetini ifade eder.

Yapı denklemleri (ısı elasto-plastik malzemeler)

Termal elasto-plastik malzeme modeli, Von Mises elastikiyet kriteri ve izotropik uzama sabitleştirme kuralına uygun olarak çalışmaktadır.

$$[d\sigma] = [D^{ep}][d\varepsilon] - [C^{th}]dT \quad (4.10)$$

$$[D^{ep}] = [D^e] + [D^p] \quad (4.11)$$

$[D^e]$ : elastik rijitlik matrisi

$[D^p]$ : plastik rijitlik matrisi

$[C^{th}]$ : termal rijitlik matrisi

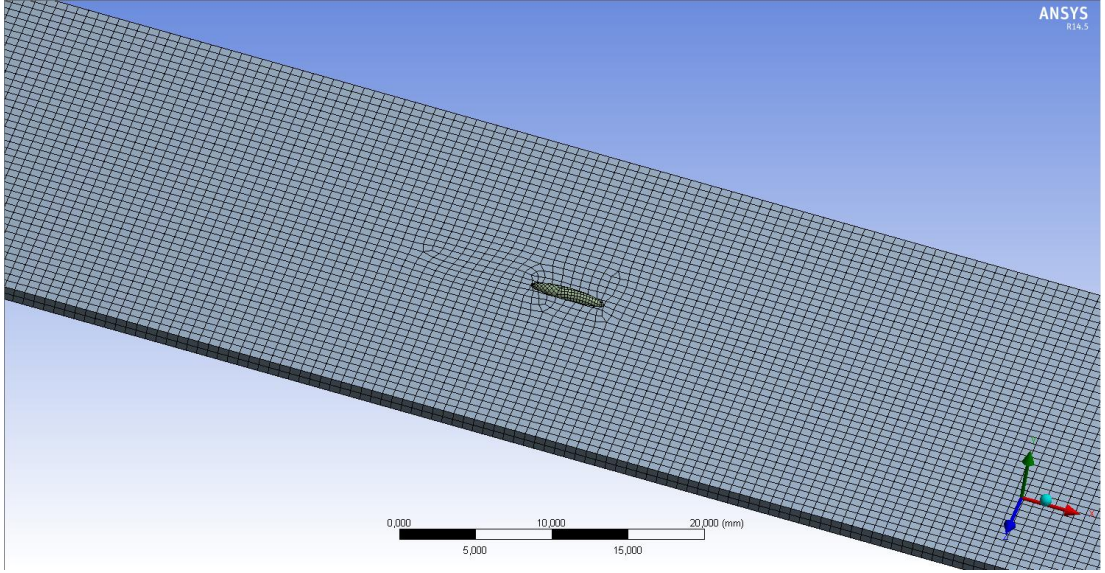
$d\sigma$ : gerilme artışı

$d\varepsilon$ : uzama artışı

$dT$ : sıcaklık artışını tanımlamaktadır.

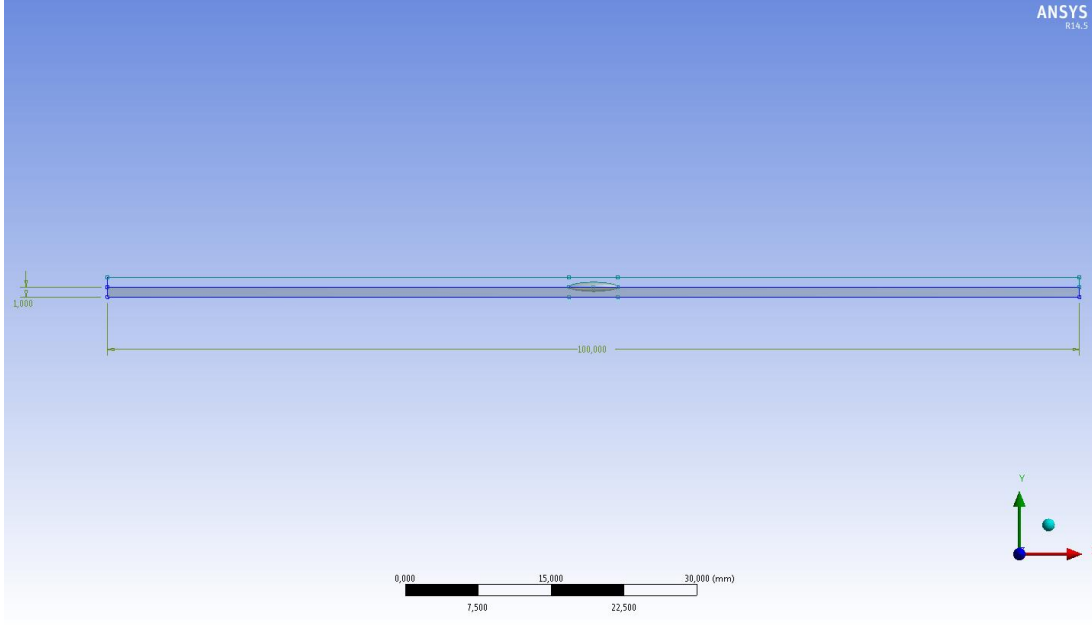
## 5. SAYISAL ÇALIŞMA

Bu çalışmada nokta direnç kaynağı ile birleştirilmiş sac parçaların birleştirilmesi sırasındaki ısı dağılımı ve uygulanan elektrot baskı kuvvetlerinin oluşturduğu deformasyonun modellenmesi için ANSYS sonlu elemanlar paket programı kullanılmıştır. Bu çalışmada model 146314 adet düğüm noktasına ve 27661 adet elemana sahiptir. Bu sistemin sonlu elemanlar modeli şekil 5.1 de gösterilmektedir.

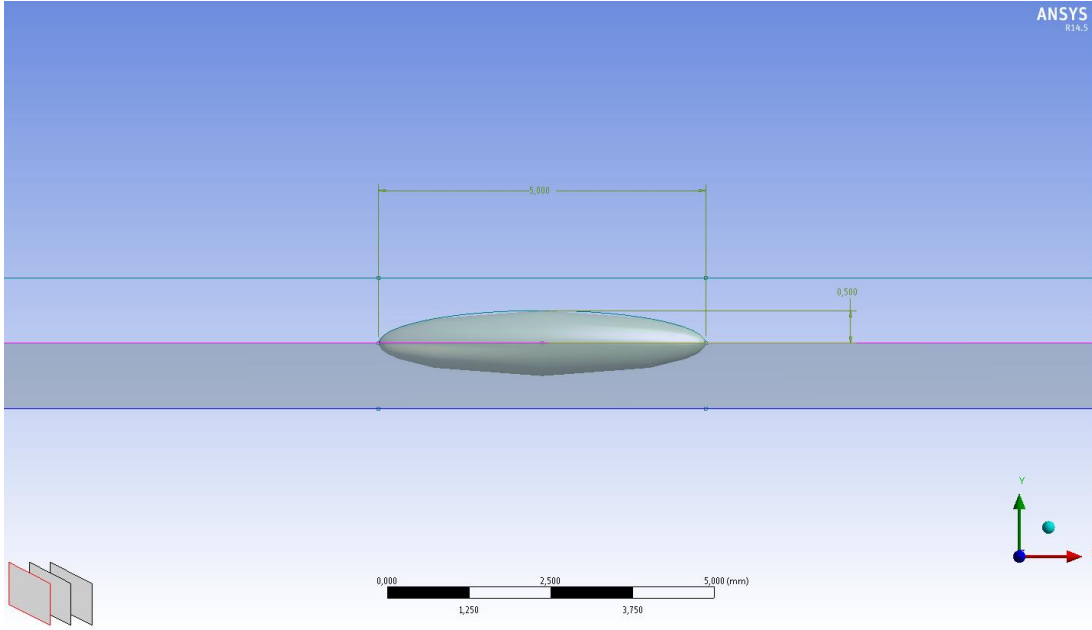


**Şekil 5. 1:** Modele ait sonlu elemanlar modeli.

Bu analiz için Ansys 14.5 sonlu elemanlar paket programı ile oluşturulmuş 3 boyutlu model kullanılmıştır. Model (100x1x10)mm ölçülerde iki sac parçanın birleştirilmesi ile oluşturulmuştur. Bu model üzerinden ısı dağılımının tespiti amacıyla ısı analiz oluşan deformasyon ve en yüksek gerilme değerlerinin tespiti amacıyla ise yapısal analizler yapılmıştır. Şekil 5.2 de sac parçalara şekil 5.3 de ise kaynak çekirdeğine ait ölçüler gösterilmektedir.



**Şekil 5. 2:** Sac parçaların ölçüleri.



**Şekil 5. 3:** Kaynak çekirdeğine ait ölçüler.

### 5.1 Sınır Koşulları

Sisteme uygulanan sınır şartları ve malzeme özelliklerini doğru bir şekilde uygulanması analiz sonucunun gerçeğe daha yakın sonuçlar vermesini sağlamaktadır. Bu çalışmada kullanılan malzemelere göre ergime sıcaklık değerleri girilmiştir. Daha sonra nokta direnç makinasındaki elektrot baskı kuvvetlerinin modellenmesi

amacıyla 5000 N değerinde yayılı yük uygulanmış bu sayede malzemeye ait yapısal analiz sonuçları elde edilebilmiştir. Bu analizler sırasında birleştirilen sacların yan yüzeyleri analize referans olacak şekilde 22 derece olarak belirtilmiştir. Analizde ortam sıcaklığı 22 derece kabulü edilmiştir. Ayrıca oluşan deformasyonun daha iyi analizi için sac parçaların kayması ihmal edilmiştir.

## 5.2 Malzeme Özellikleri

Bu çalışmada 3 çeşit sac malzeme kullanılmıştır. Kullanılan malzemeler; S235, 304 ve A1-7075. Bu malzemelere ait mekanik ve ısı özellikler aşağıda sırasıyla gösterilmektedir.

S235'e ait malzeme özellikleri;

**Çizelge 5.1:** S235 e ait mekanik özellikler [36].

Yoğunluk	7700 kg/m <sup>3</sup>
Poisson oranı	0.3
Elastiklik Modülü	200 GPa
Akma Dayanımı	1034 MPa
Çekme Dayanımı	1158 Mpa

**Çizelge 5.2:** S235 e ait ısı özellikler [36].

Isıl iletim katsayısı	42.7 W/mK
Özgül ısı	477 J/kgK

304'e ait malzeme özellikleri

**Çizelge 5.3:** 304 e ait mekanik özellikler [37].

Yoğunluk	7700 kg/m <sup>3</sup>
Poisson oranı	0.3
Elastiklik Modülü	200 GPa
Akma Dayanımı	1034 MPa
Çekme Dayanımı	1158 Mpa

**Çizelge 5.4:** 304 e ait ısı özellikler [37].

Isıl iletim katsayısı	42.7 W/mK
Özgül ısı	477 J/kgK



Al-7075'e ait malzeme özellikleri;

**Çizelge 5.5:** Al-7075 e ait mekanik özellikler [38].

Yoğunluk	2800 kg/m <sup>3</sup>
Poisson oranı	0.3
Elastiklik Modülü	71.7 GPa
Akma Dayanımı	572 MPa
Çekme Dayanımı	503 Mpa

**Çizelge 5.6:** Al-7075 e ait ısıl özellikler [38].

Isıl iletim katsayısı	130 W/mK
Özgül ısı	0.96 J/gC

### 5.3 Sayısal Yöntem

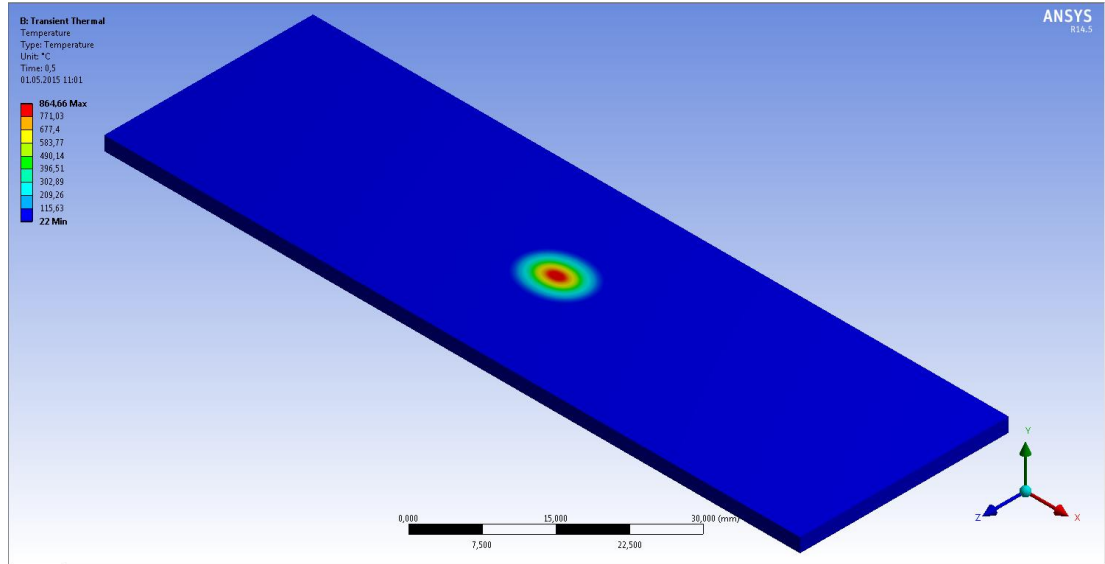
Model ısıl ve yapısal analizler için oluşturulmuştur. Bu ısıl analiz sırasında ilk olarak 0.3 saniyede malzemelerin ergime sıcaklığına ulaştıkları ve çekirdeğin oluştuğu kabul edilmiştir. Daha sonra ki adımlarda malzemenin soğuması ve oluşan ısıl dağılımının belirlenmesi istenmiştir. Yapısal analiz sırasında ise ısıl analizde elde edilen verilerin yanı sıra elektrot basma kuvvetlerini temsilen kuvvet uygulanmıştır. Uygulanan bu kuvvetler ve ısıl etki sonucu oluşan deformasyon ölçülmüştür. Ayrıca bu baskı kuvvetlerini saclarda oluşturduğu en yüksek gerilme değerleride incelenmiştir. Bu analizlerin yapılabilmesi amacıyla 3 boyutlu bir katı model oluşturulmuştur. Sınır koşullarının eklenmesi ile nokta direnç kaynağına ait ısıl ve yapısal simülasyon çalışması gerçekleştirilmiştir.



## 6. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

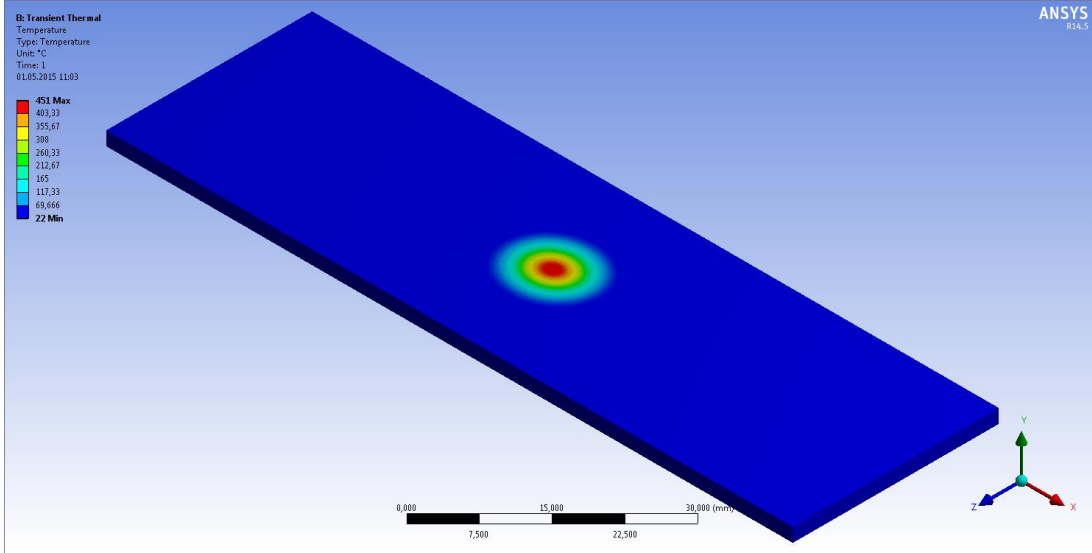
### 6.1 S235

Birleştirilen sac parçaların kaynak sonrasındaki ısı dağılımı, elektrotların oluşturduğu deformasyon ve gerilme değerleri yapılan similasyon çalışması ile bulunmuştur. Şekil 6.1 de S235 malzemesinin 0.5 saniyedeki ısı dağılımı gösterilmiştir.



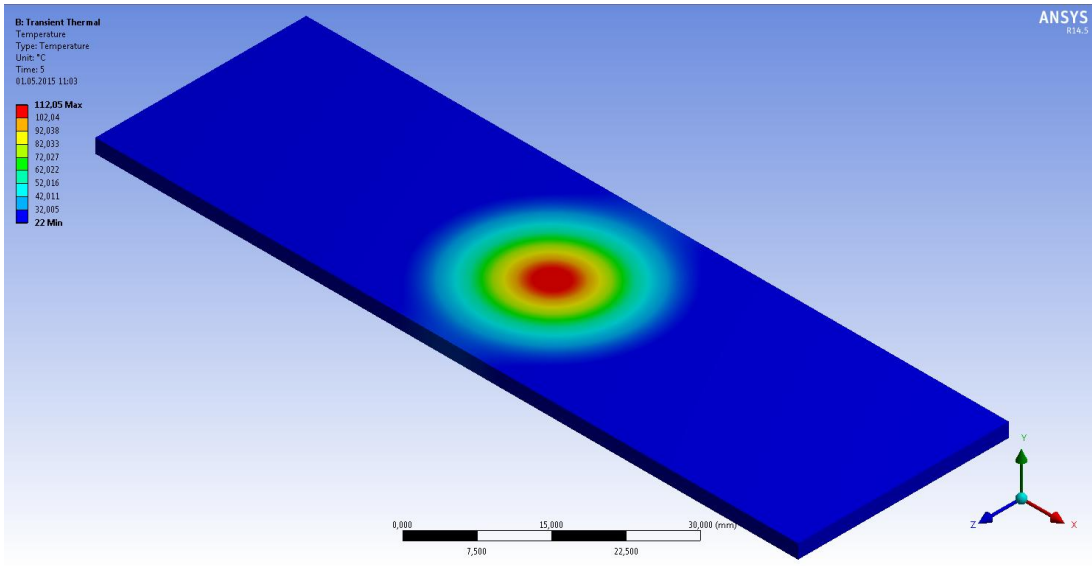
Şekil 6.1: S235 için 0.5 saniyedeki sıcaklık dağılımı.

Bu işlemde 0,3 saniyede 1500 °C ulaştığı kabul edilen malzemenin daha sonra soğumaya başladığı görülmektedir. Bu soğuma sırasında 0,5 saniyede en yüksek sıcaklık değeri 847,78 °C olarak ölçülmüştür. Malzemenin soğuması 1.saniye kadar yavaş bir seyir halinde devam etmektedir. Bu saniyede ölçülen en yüksek sıcaklık değeri 430 °C civarlarındadır. Şekil 6.2 de 1. saniyedeki sıcaklık dağılımı gösterilmektedir.

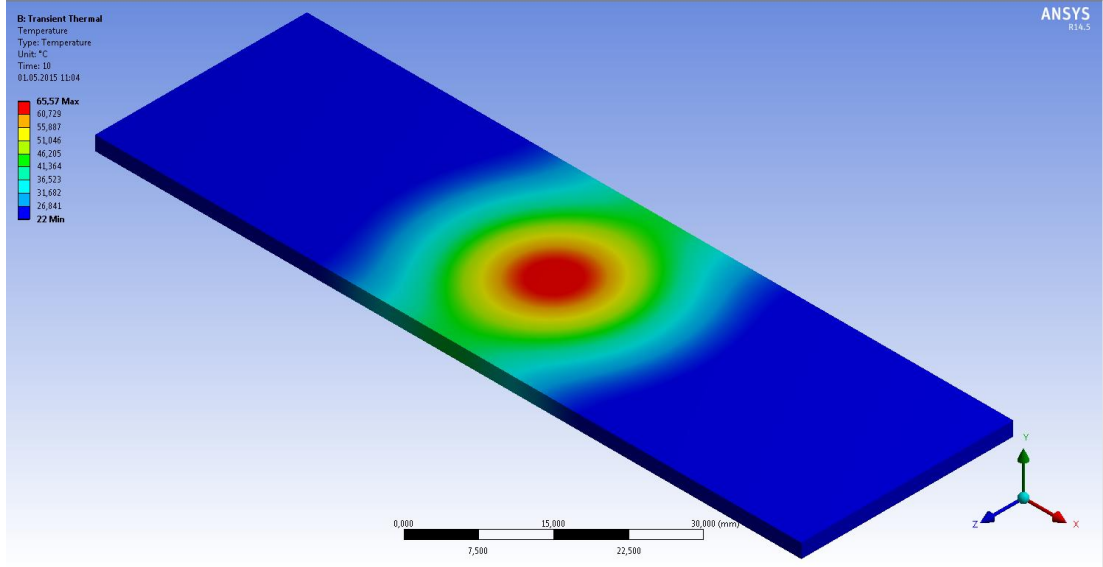


Şekil 6.2: S235 için 1. saniyedeki sıcaklık dağılımı.

Daha sonra ki süreçte sıcaklık daha hızlı bir seyirde azalmıştır. Şekil 6.3 de 5. Saniye de ölçülen en yüksek sıcaklık değeri 112 °C ye düşmüştür. Yapılan simülasyon çalışmasının son değeri olan 10. saniyede sıcaklık şekil 6.3 de gösterilmiştir ve sıcaklığın 65 °C olduğu gözlenmiştir.

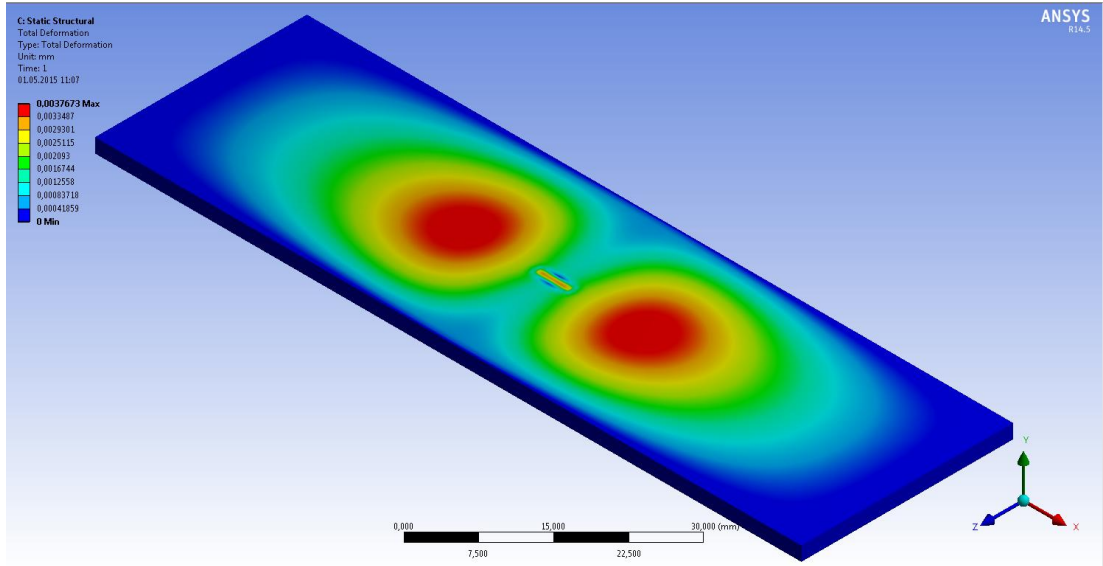


Şekil 6.3: S235 için 5. saniyedeki sıcaklık dağılımı.

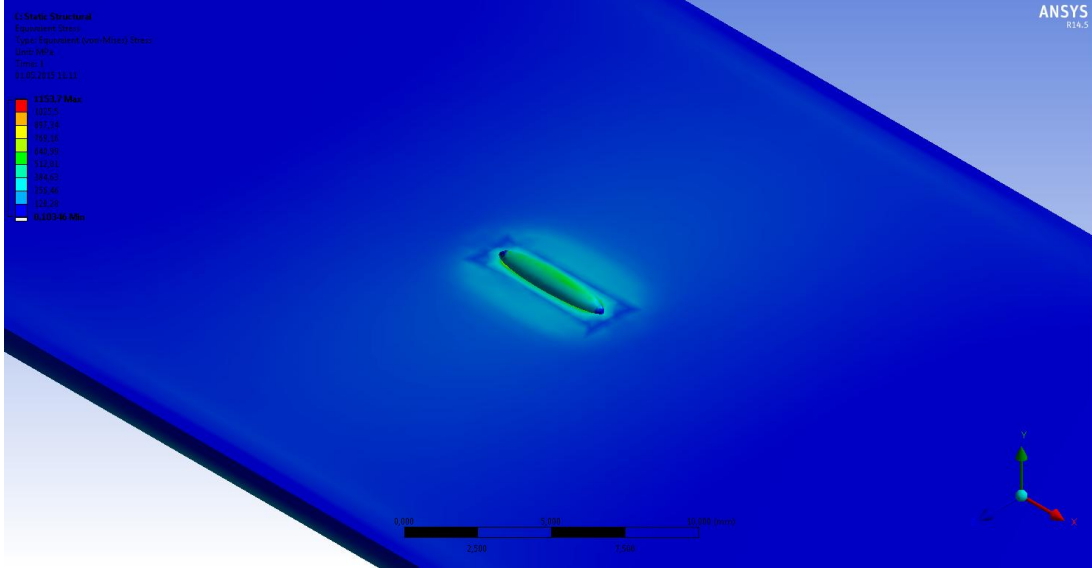


**Şekil 6.4:** S235 için 10. saniyedeki sıcaklık dağılımı.

Bu işlem sırasında uygulanan elektrot baskı kuvvetlerinden dolayı oluşan deformasyon değeri kaynak çekirdeğinin etrafında simetrik olarak oluşmuştur. En yüksek değer 0.003 mm seviyesinde ölçülmüştür ve şekil 6.5 de gösterilmektedir. Oluşan en yüksek gerilme değeri elektrotların bastığı alanda oluşmuştur. Anlık olarak 1153 MPa kadar ulaşan gerilme değeri 1 saniyelik işlem sonunda 500 MPa civarında olduğu şekil 6.6 da gösterilmiştir.



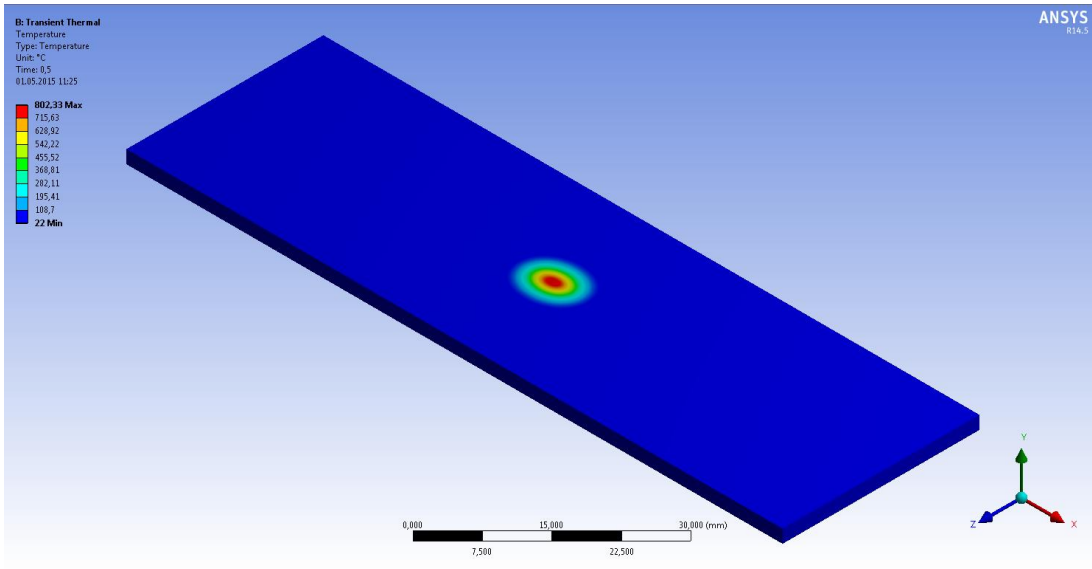
**Şekil 6.5:** S235-Oluşan deformasyon miktarı.



Şekil 6.6: S235- En yüksek gerilme değeri.

## 6.2 304

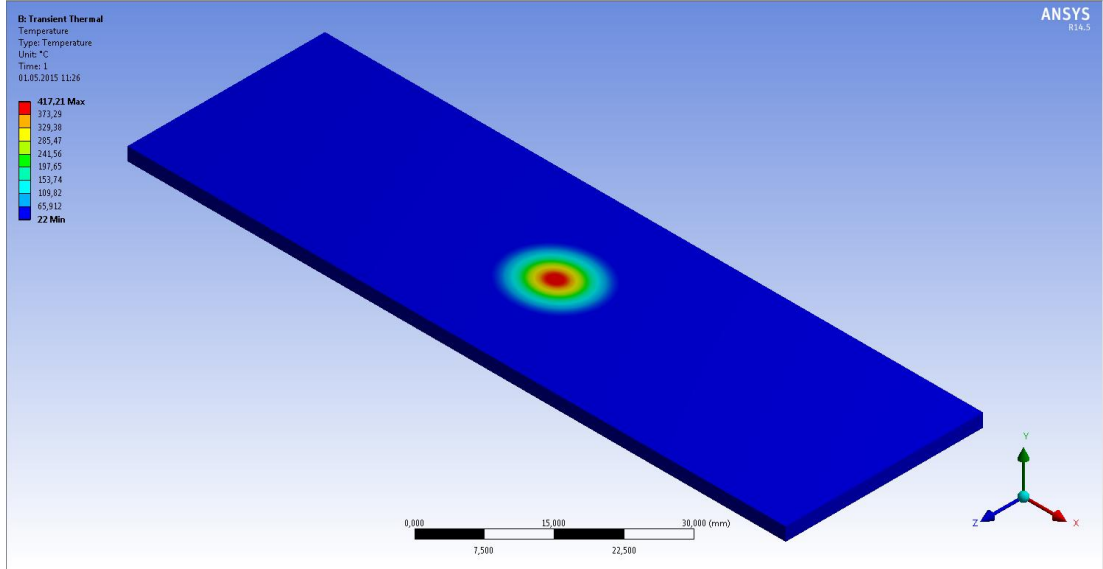
304 çeliği için malzemenin 0,3 saniyede 1400 °C ulaştığı kabul edilir ve daha sonra malzemenin soğumaya başladığı görülmüştür. 0,5 saniyede sıcaklık 800 °C seviyelerinde bulunmaktadır. Bu durum şekil 6.7 de gösterilmiştir.



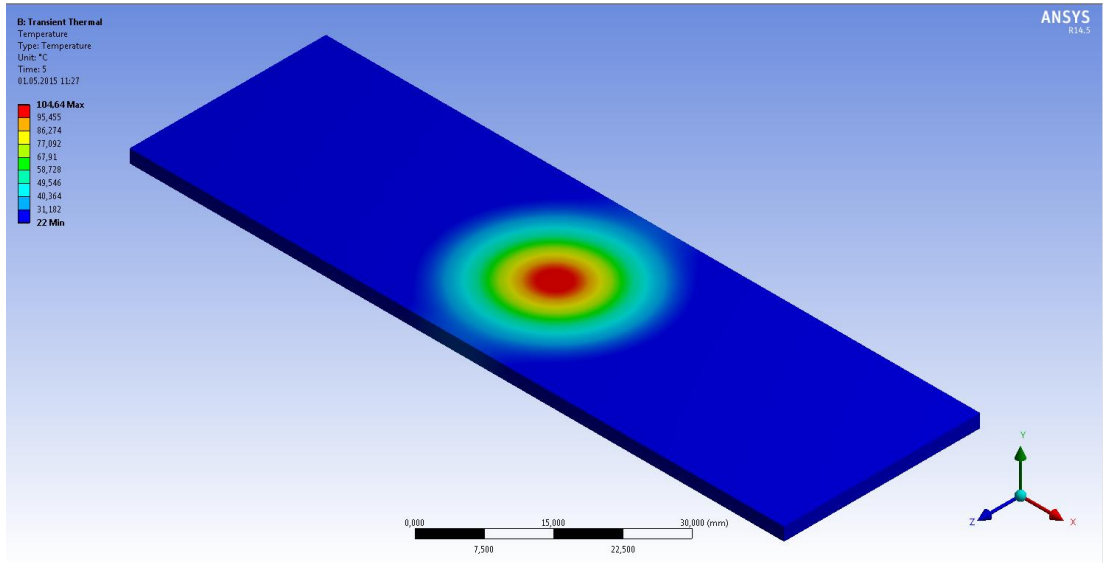
Şekil 6.7: 304 için 0.5 saniyedeki sıcaklık dağılımı.

1. saniyede 417 °C olarak ölçülen en yüksek sıcaklık daha sonra hızlı bir şekilde soğuyarak 5. saniyede 104 °C, 10. saniyede 60 °C seviyelerine gerilemiştir. Şekil 6.8

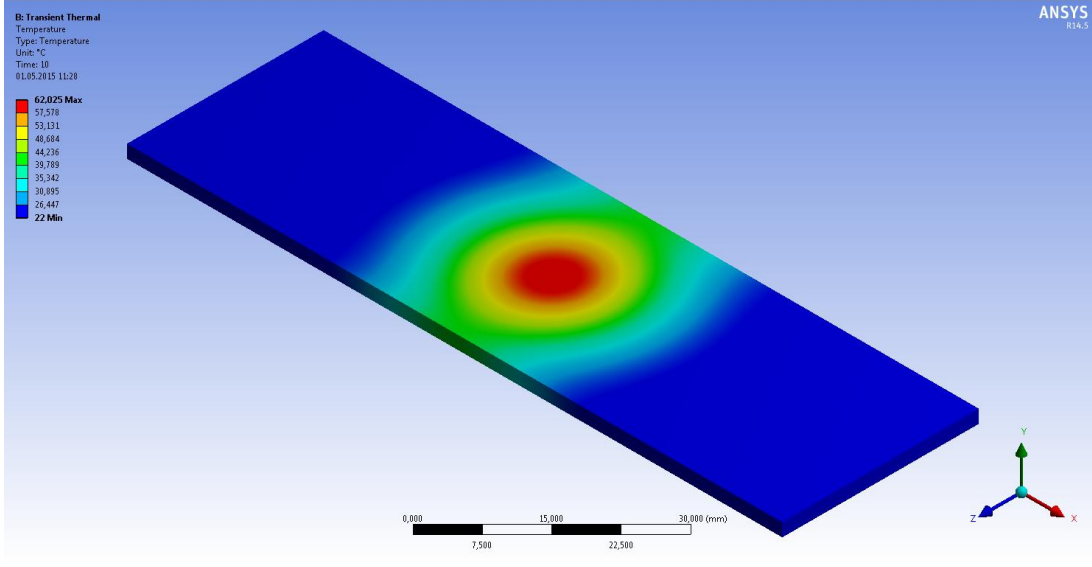
de 1. saniyedeki şekil 6.9 da 5. saniyedeki şekil 6.10 da ise 10. saniyedeki sıcaklık dağılımı gösterilmektedir.



Şekil 6.8: 304 için 1. saniyedeki sıcaklık dağılımı.

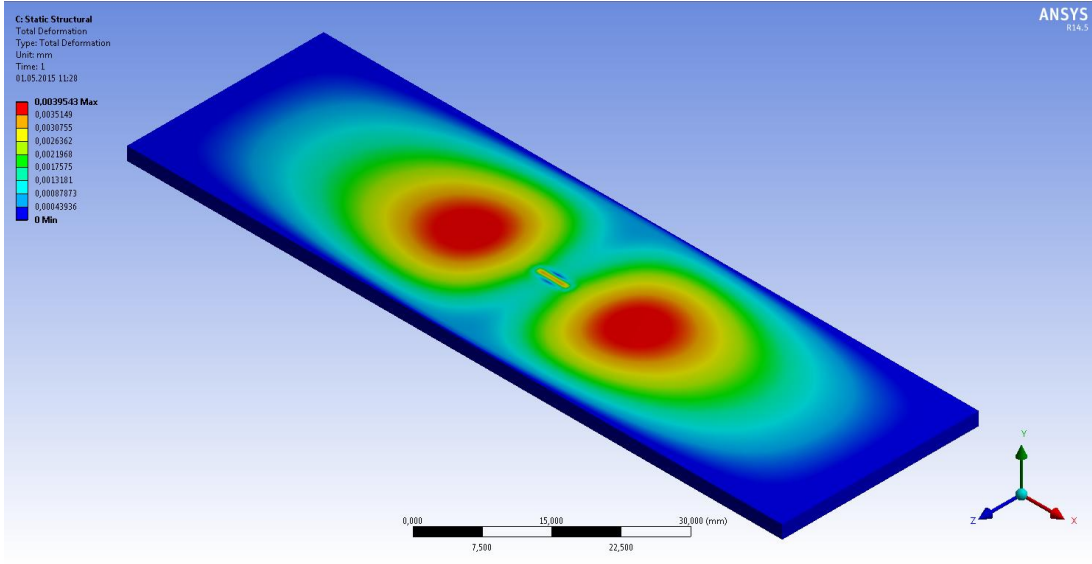


Şekil 6.9: 304 için 5. saniyedeki sıcaklık dağılımı.



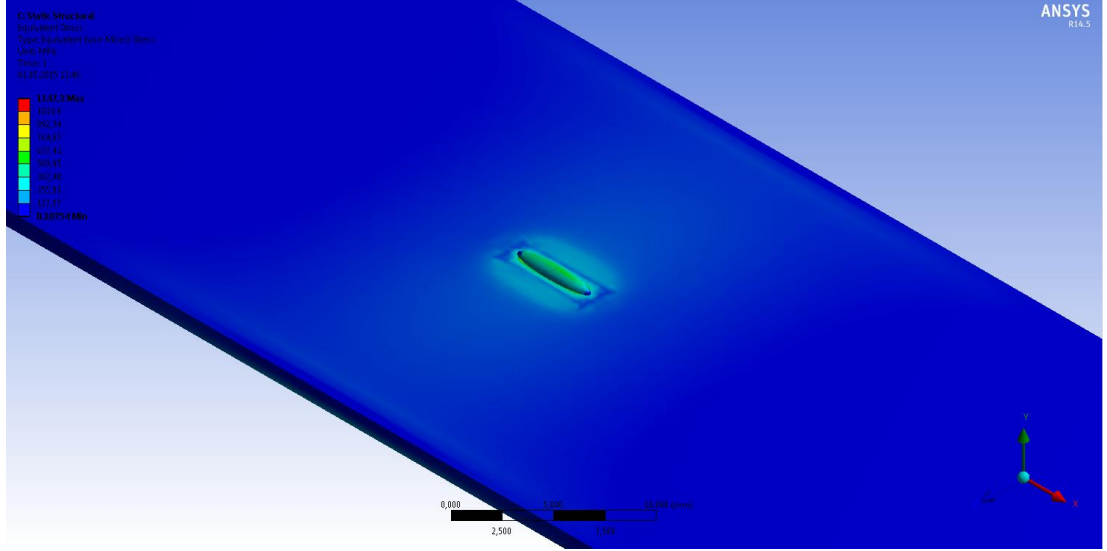
**Şekil 6.10:** 304 için 10. saniyedeki sıcaklık dağılımı.

Elektrot baskı kuvvetlerinden dolayı oluşan deformasyon çekirdek etrafında simetrik şekilde oluşmakta ve ölçülen değer 0.003 mm seviyesindedir. İşlem sonucunda malzemedeki en yüksek gerilme değeri 1147 MPa seviyesine ulaşmış ve işlem sonucunda 500 MPa civarı olduğu görülmüştür. Bu durumlara ait görseller şekil 6.11 ve şekil 6.12 de gösterilmiştir.



**Şekil 6.11:** 304-Oluşan deformasyon miktarı.

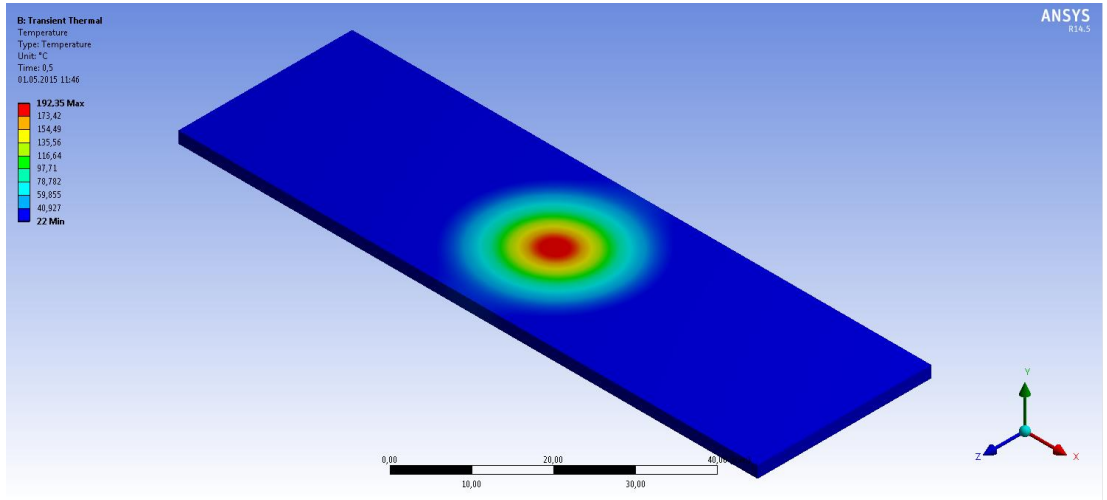




Şekil 6.12: 304-En yüksek gerilme değeri.

### 6.3 Al-7075

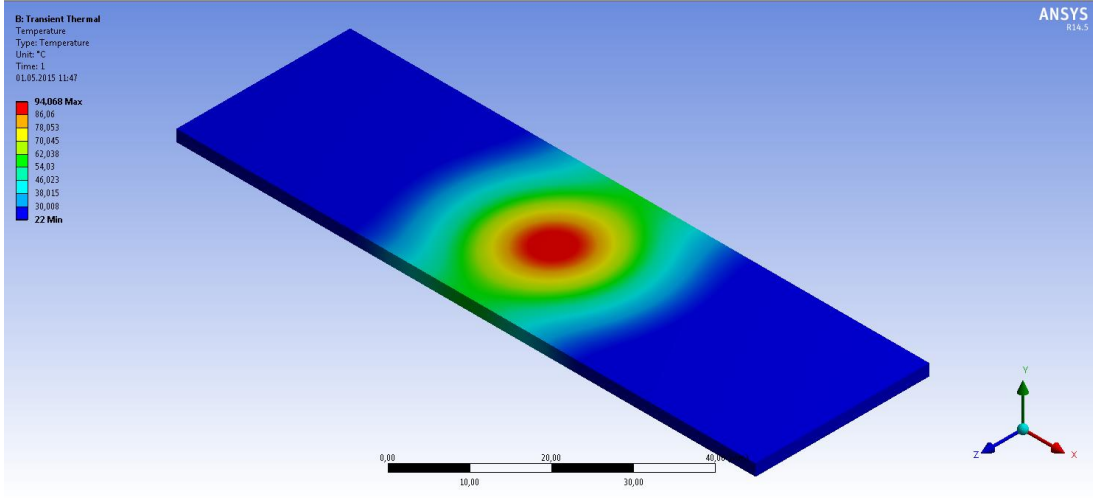
Al-7075 için, malzemenin 0.3 saniyede 560 °C ulaştığı kabul edilmiş daha sonra malzemenin soğuması gözlenmiştir. 0.5 saniyede sıcaklık 192.35 °C seviyelerinde bulunmaktadır. Bu durum şekil 6.13 de gösterilmiştir.



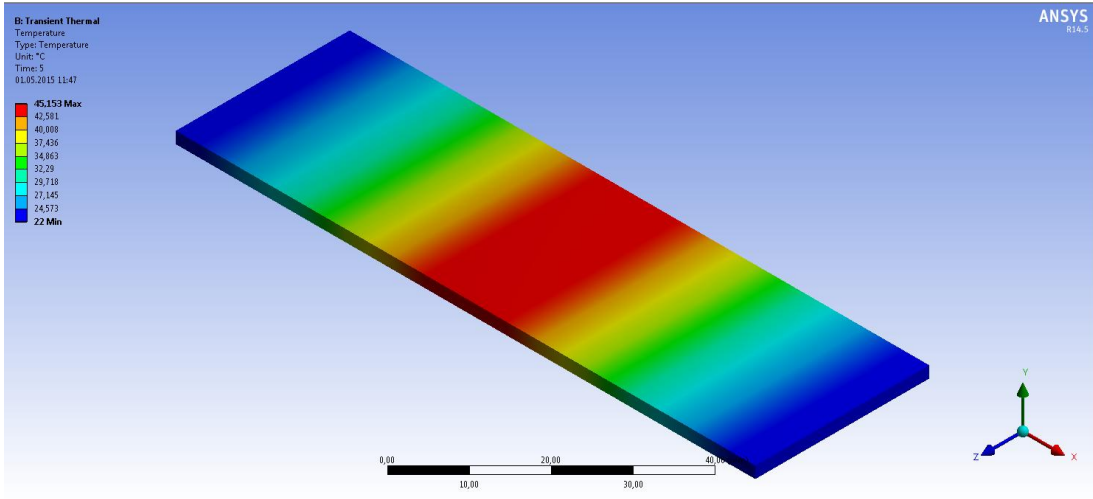
Şekil 6.13: Al-7075 için 0.5 saniyedeki sıcaklık dağılımı.

1. Saniyede 94 °C olarak ölçülen en yüksek sıcaklık daha sonra hızlı bir şekilde soğuyarak 5. saniyede 45 °C düştüğü ve parçanın geneline ısının yayıldığı görülmüştür. Sıcaklık 10. saniyede 37.84 °C seviyelerine gerilemiştir. Şekil 6.14 de

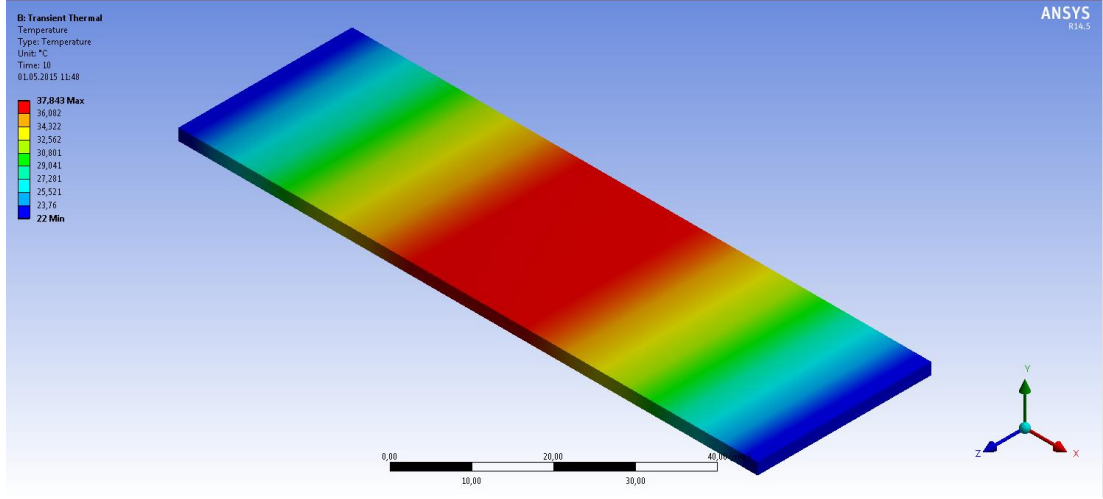
1.saniyedeki Şekil 6.15 de 5. saniyedeki ve Şekil 6.16 da 10. saniyedeki sıcaklık dağılımı gösterilmektedir.



Şekil 6.14: Al-7075 için 1. saniyedeki sıcaklık dağılımı.

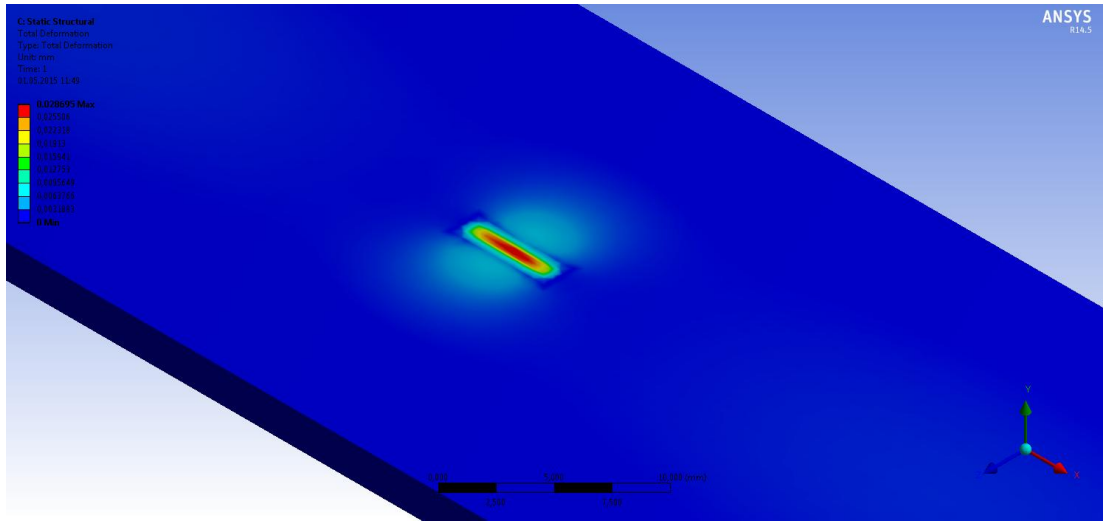


Şekil 6.15: Al-7075 için 5. saniyedeki sıcaklık dağılımı.

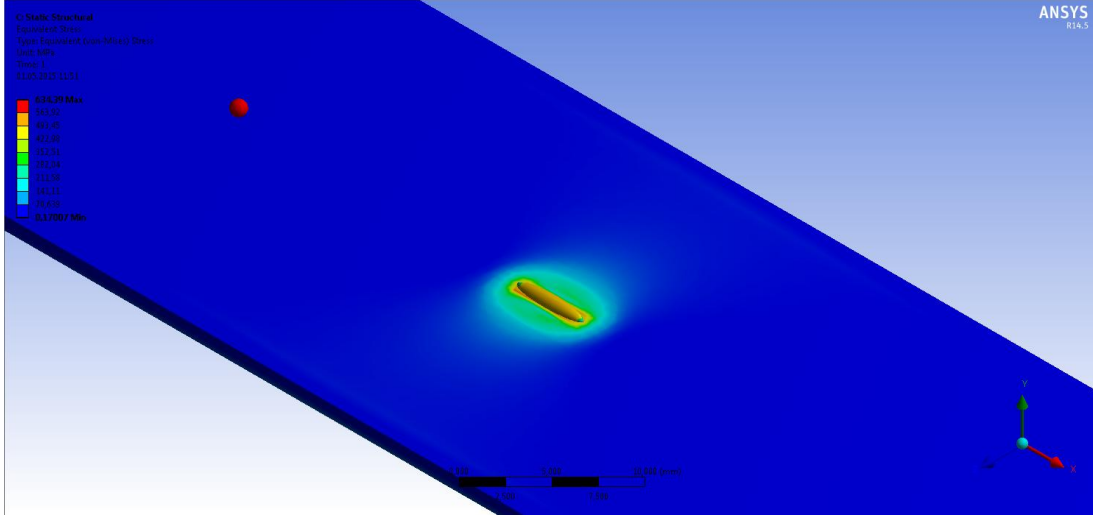


**Şekil 6.16:** Al-7075 için 10. saniyedeki sıcaklık dağılımı.

Elektrot baskı kuvvetlerinden dolayı oluşan deformasyon çekirdek etrafında simetrik şekilde oluşmakta ve ölçülen deformasyon miktarı 0.03 mm seviyesindedir. Deformasyon kaynak çekirdeğine çok yakın olan bölgede etkili olmuştur. İşlem sonucunda malzemedeki en yüksek gerilme değeri 634 MPa seviyesine ulaşmış ve işlem sonucunda gerilme değerinin çekirdek etrafında genel olarak 480 MPa civarı olduğu görülmüştür. Bu durumlara ait görseller şekil 6.17 ve şekil 6.18 de gösterilmiştir.



**Şekil 6.17:** Al-7075- Oluşan deformasyon miktarı.



Şekil 6.18: Al-7075-En yüksek gerilme değeri.

## 7. DEĞERLENDİRME VE ÖNERİLER

Bu çalışmada nokta direnç kaynağına ait ısı dağılımı, oluşan deformasyon ve en yüksek gerilme değerinin belirlenmesi için sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak hazırlanan model analiz edilmiştir. Sınır koşulları ve malzeme özellikleri gibi yan girdilerin modele eklenmesi ile değişik zamanlardaki ısı dağılımı incelenmiştir. Ayrıca uygulanan kuvvet nedeniyle oluşan deformasyonların yanı sıra en yüksek gerilme değerlerine de ulaşılmıştır. Uygulanan sınır şartlarının değiştirilmesi ile kaynak işleminin değişik sıcaklıklardaki durumu incelenebilmektedir. Bu modelle ayrıca değişik malzemeler için optimum sıcaklık ve kuvvet değerlerinin bulunması daha kolaylaşacaktır. Bu çalışma sonucunda aşağıda sıralanan sonuçlara ulaşılabılır;

- a) Sıcaklık dağılımı 1. saniye sonuna kadar yavaş bir seyir halinde dağılmıştır. Ancak daha sonra hızlı bir soğuma durumu göstermiştir.
- b) Isıl dağılımı kaynak çekirdeğinin sahip olduğu eliptik yapı gibi değil dairesel bir şekilde yayılma göstermiştir.
- c) Uygulanan baskı kuvvetinden dolayı oluşan deformasyon kaynak çekirdeğinin iki tarafında simetrik olarak oluşmuştur.
- d) En yüksek gerilme durumu anlık olarak yüksek seviyelere çıkmaktadır. Ancak daha sonra bir miktar düşerek etkisini göstermektedir.
- e) En yüksek gerilme durumu kaynak çekirdeğinin etrafında bir dağılım göstermiştir.
- f) Ayrıca bu gerilme elektrot kuvvetinin uygulandığı kenar noktalarda da yüksek bir değer göstermiştir.

Bu çalışma yardımıyla daha sonra şu çalışmalar yapılabilir;

- a) Kullanılan model ile malzemelerde uygulanması gereken optimum kuvvet değerinin belirlenmesi
- b) Yapılacak olan eklemelerle kaynak elektrotlarında oluşan deformasyon tahmini

- c) Uzun kullanım sırasında elektrotlarda oluşan çatlakların ilerleme hızının tahmin edilmesi
  - d) En yüksek gerilme değerinun düşürülmesi çalışmaları
- gibi alanlarda yeni araştırmacılara yol gösterici bir çalışma olabilir.

## KAYNAKLAR

- [1] **Zhigang H., Yuanxun W., Chunzhi L., Chuanyao C.**, A Multi-coupled finite element analysis of resistance spot welding process, *Acta Mechanica Sinica Sinica* 2006, syf 86-94
- [2] **Moshayedi H., Sattari-Far I.**, Numerical and experimental study of nugget size growth in resistance spot welding of austenitic stainless steel, *Journal of Materials Processing Technology* 2012, syf 347-354
- [3] **Moshayedi H., Sattari-Far I.**, Resistance spot welding and the effects of welding time and current on residual stress, *Journal of Materials Processing Technology* 2014, syf 2545-2552
- [4] **Gould J.E.**, An examination of nugget development during spot welding using both experimental and analytical techniques, *Weld Journal*, Vol.66(1), 1994 syf.1–10.
- [5] **Tsai C.L., Jammal O.A.**, Dickinson DW, 1992. Modeling of resistance spot weld nugget growth, *Weld Journal*, Vol.71(2), syf.47–54.
- [6] **Tsai C.L., Jammal O.A.**, Dickinson DW, 1989. Study of nugget formation in resistance spot welding using finite element method. In: Paper presented at the trends in welding research, *2nd International Conference*, Materials Park, OH, USA
- [7] **Feulvarch E., Robin V., Bergheau J.M.**, Resistance spot welding simulation: a general finite element formulation of electrothermal contact conditions. *Joining Material Process Technology* 2004, Vol.153, syf. 436–441.
- [8] **Feulvarch E., Robin V., Bergheau J.M.**, Resistance spot welding process: experimental and numerical modeling of weld growth mechanisms with

consideration of contact conditions. *Numerical Heat Transfer Technology*, Part A 2006, Vol.49, syf. 345–367.

- [9] **Florea R.S., Bammann D.J., Yeldell A., Solanki K.N., Hammi Y.**, Welding parameters influence on fatigue life and microstructure in resistance spot welding of 6061-T6 aluminum alloy, *Materials and Design* 2013, syf. 456-465
- [10] **Loulou T., Bardon JP.**, Estimation of thermal contact conductance during resistance spot welding. *Exp Heat Transfer* 2001, Vol.14, syf.251–264.
- [11] **Loulou T., Bardon JP.**, Thermal characterization of resistance spot welding resistance spot welding. *Numerical Heat Transfer*, Part B 2006, Vol.49, syf.559–584.
- [12] **Zou J., Zhao Q., Chen Z.**, Surface modified long-life electrode for resistance spot welding of Zn-coated steel, 2009, *Journal of Materials Processing Technology*, syf. 4141-4146
- [13] [http://www.weldinginfocenter.com/history/his\\_01.html](http://www.weldinginfocenter.com/history/his_01.html)
- [14] MEGEP, Direnç kaynağı ve lehimleme, 2006
- [15] <http://www.pukamakina.com/teknik-bilgiler/elektrik-direnc-kaynagi-punta-kaynak>
- [16] <http://www.saglamakina.com/index.php>
- [17] **Anık,S.** Kaynak teknolojisi el kitabı, 1983
- [18] **Anık,S.**, 1000 Soruda Kaynak Teknolojisi, Cilt 1, Birsen Yayınevi, 1993, İstanbul
- [19] **Şahin U.O.**, Elektrik direnç kaynağını etkileyen parametreler
- [20] **Kaluç, E.**, Kaynak Teknoloji El Kitabı, Yıldız Fotokopi, 2003, Kocaeli
- [21] **K. Weman**, “Welding Processes Handbook”, (2003), Woodhead Publishing Ltd., Cambridge, England



- [22] <http://materialteknologi.hig.no/Lettvektdesign/joining%20methods/joining-welding-resistance%20spot%20welding.htm>
- [23] **Güngör O.**, Elektrik nokta direnç kaynağının sonlu elemanlar yöntemi ile parametrik incelenmesi,2010
- [24] **Hu S.J., Senkara J., Zhang H.**, 1996. Quality definition of resistance spot welds: a structural point of view, *Proc. of International Body Engineering Conf. IBEC'96, Body and Engineering Section*, Detroit (MI), 91.
- [25] **Moaveni S.**, 2003, "Finite Element Analysis ,6-7, A Brief History of Finite Element Method, Minnesota State University, Mankato
- [26] **Arıkan S.**, , "Sonlu Elemanlar Yönteminin Mühendislikteki Uygulamaları", ODTU,Ankara
- [27] <http://artunbotke.com/2012/05/09/sonlu-elemanlar-analizi-fea-nedir-2-teori/>
- [28] <http://www.elektrikport.com/teknik-kutuphane/sonlu-elemanlar-metodu-nedir-nerelerde-kullanilir/11661#ad-image-0>
- [29] **Celasun, H.**, 1976. Yapı sistemleri matris analizi ve sonlu elemanlar metodu, Çağlayan Basımevi
- [30] <http://inducta.com.au/Stress2D.htm>
- [31] <http://compmech.se/Structure.htm>
- [32] <http://www.vki.com/2013/Support/docs/vistools-1.html>
- [33] **Ergin, A., Bayraktarkatal, E., Ünsan, Y.**, 2000. Sonlu Elemanlar Metodu ve Gemi İnşaatı Sektöründeki Uygulamaları Seminer Kitabı, Yapım Mat.
- [34] [http://www.featflow.de/en/software/featflow2/featflow2\\_concepts/tutorial\\_conceptmesh.html](http://www.featflow.de/en/software/featflow2/featflow2_concepts/tutorial_conceptmesh.html)
- [35] [http://cdac.in/index.aspx?id=ev\\_hpc\\_hypack\\_partial-diff-eqns-solvers-mpi](http://cdac.in/index.aspx?id=ev_hpc_hypack_partial-diff-eqns-solvers-mpi)
- [36] <http://www.steelss.com/Carbon-steel/s235.html>

[37] <http://www.steelss.com/Stainless-Steel/304.html>

[38] <http://www.crpmeccanica.eu/PDF/aluminium-7075-t6-7075-t651.pdf>

## ÖZGEÇMİŞ



**Ad Soyad** : Başar YAVUZ  
**Doğum Yeri ve Tarihi** : İstanbul 31.03.1989  
**E-Posta** : basaryavuzz@gmail.com

### ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2012, İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği