

DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**BENZER VE FARKLI TÜRDEN ALÜMİNYUM
ALAŞIMLARININ SÜRTÜNME KARIŞTIRMA
KAYNAĞININ DENEYSEL VE SAYISAL
OLARAK İNCELENMESİ**

Zeki Alper KADAYİFÇİ

Mart, 2013
İZMİR

**BENZER VE FARKLI TÜRDEN ALÜMİNYUM
ALAŞIMLARININ SÜRTÜNME KARIŞTIRMA
KAYNAĞININ DENEYSEL VE SAYISAL
OLARAK İNCELENMESİ**

**Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Yüksek Lisans Tezi
Makina Mühendisliği Bölümü, Mekanik Anabilim Dalı**

Zeki Alper KADAYİFÇİ

**Mart, 2013
İZMİR**

YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

ZEKİ ALPER KADAYİFÇİ, tarafından **DOÇ. DR. BİNNUR GÖREN KIRAL** yönetiminde hazırlanan “**BENZER VE FARKLI TÜRDEN ALÜMİNYUM ALAŞIMLARININ SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAĞININ DENEYSEL VE SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ**” başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

DOÇ. DR. BİNNUR GÖREN KIRAL



Yönetici



Doç. Dr. Sami SATER

Jüri Üyesi



Doç. Dr. Gınar Yeni

Jüri Üyesi



Prof. Dr. Ayşe OKUR

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

TEŞEKKÜR

İlk olarak yüksek lisans tezimin tüm aşamalarında beni destekleyen ve ı ışık tutan, bilgi ve tecrübelerinin yanı sıra insani yönleri ile de ilerideki yaşamımda bana örnek teşkil eden değerli danışman hocam Doç. Dr. Binnur GÖREN KIRAL' a şükranlarımı sunarım.

Çalışmanın yürütülmesinde bilgi ve birikimlerini esirgemeyen Dr. Şefika KASMAN' a teşekkür ederim.

Kaynak sonrası gerekli testlerin yapılması sırasında laboratuvar imkânlarından yararlanmamı sağlayan Prof. Dr. Onur SAYMAN' a teşekkür ederim. Ayrıca çekme testlerinin yapılmasında yardımlarını esirgemeyen Arş. Gör. Mustafa ÖZEN ve Arş. Gör. Volkan ARIKAN' a teşekkür ederim.

Kaynak işlemlerinin gerçekleştirilmesinde yardımlarını esirgemeyen Umut Kama San. Ve Tic. A. Ş. İşletme müdürü Turgay Bey' e teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak, bu günlere gelmemde bana karşı maddi ve manevi desteğini hiç esirgemeyen aileme teşekkürü bir borç bilirim.

Zeki Alper Kadayıfçı

İzmir, Mart 2013

BENZER VE FARKLI TÜRDEN ALÜMİNYUM ALAŞIMLARININ SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAĞININ DENEYSEL VE SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ

ÖZ

Alüminyum ve magnezyum alaşımları gibi hafif metaller artan bir şekilde ulaşım sanayinde kullanılmaktadır. Korozyon direnci, düşük yoğunluk ve kolay şekil verilebilirlik gibi fiziksel ve mekanik özellikler, yapısal bir malzemenin yoğun bir şekilde kullanımını belirleyen en önemli faktörlerdir. Sürtünme Karıştırma Kaynağı (SKK) alüminyum alaşımları ve diğer hafif malzemelerin birleştirilmesi için önemli avantajlar sunmaktadır. Bu avantajlardan bazıları; düşük çarpılma, düşük artık gerilmeler ve az kaynak hatalarıdır. Düşük ısı girdisi ve tanecik iyileştirmesi nedeniyle sürtünme karıştırma kaynağı ısıtılmalı ve ısıtılmayan alüminyum alaşımlarının füzyon kaynağına göre daha iyi yorulma ve çekme mukavemeti gibi mekanik özelliklere sahiptir.

Bu çalışmada, Al6061 ve Al7075 ince alüminyum plakalardaki benzer ve farklı türden sürtünme karıştırma kaynaklı bağlantıların mekanik özelliklerine kaynak parametrelerinin etkisi incelenmektedir. Bu parametreler pimin dönüş ve ilerleme hızı gibi temel parametrelerdir. Ayrıca, üç boyutlu nonlineer termal ve termomekanik sayısal analizler gerçekleştirilmiştir. Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak kaynak süresince kaynak bölgesindeki gerilme ve sıcaklık dağılımı belirlenmiştir. Hareketli ısı kaynağını modellemek ve sınır koşullarını değiştirmek için APDL (ANSYS Parametric Design Language) kodu geliştirilmiştir.

Deneysel ve sonlu elemanlar analizleri ile elde edilen sonuçlar tablo ve grafik olarak sunulmuştur. AA6061-AA6061, AA7075-AA7075 ve AA7075- AA6061 alüminyum alaşımlarının kaynaklı bağlantı performansının optimum kaynak parametrelerinin belirlenerek geliştirilebileceği sonucuna varılmıştır.

Anahtar sözcükler: Alüminyum alaşımları, sürtünme karıştırma kaynağı, sonlu elemanlar yöntemi.

INVESTIGATION OF SIMILAR AND DISSIMILAR FRICTION STIR WELDING OF ALUMINUM ALLOYS EXPERIMENTALLY AND NUMERICALLY

ABSTRACT

Lightweight materials such as aluminum and magnesium alloys are increasingly used in transportation industries. Physical and mechanical properties such as corrosion resistance, low density and high formability are the most important factors determining the wide spread use of a structural material. Friction Stir Welding (FSW) offers significant advantages for joining aluminum alloys and other light weight materials. Some of these advantages are little distortion, low residual stresses and few weld defects. Because of the lower heat input and grain refinements, friction stir welds in general have better mechanical properties such as the tensile strength and fatigue life than the corresponding fusion welds for both heat treatable and non heat-treatable aluminum alloys.

In this study, the effect of welding parameters on the mechanical properties of similar and dissimilar friction stir welded joints in AA6061 and AA7075 Al-alloys thin sheets are investigated. These parameters are the basic parameters such as rotational and transverse speeds of the pin. Additionally, three-dimensional nonlinear thermal and thermo-mechanical numerical analyses are performed. Stress and temperature distributions in the weld region during the welding are determined using the Finite Element Method (FEM). APDL (ANSYS Parametric Design Language) code is developed to model moving heat source and change boundary conditions.

The results obtained by the experiments and finite element analyses are presented in tabular form and graphically. It is concluded that the performance of the welded joints AA6061 - AA6061, AA7075 - AA7075 and AA7075 - AA6061 Al-alloys can be improved using the optimum welding parameters.

Keywords: Aluminum Alloys, Friction Stir Welding, Finite Element Method.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU.....	ii
TEŞEKKÜR	iii
ÖZ	iv
ABSTRACT	v

BÖLÜM BİR GİRİŞ	1
------------------------------	----------

BÖLÜM İKİ - TEORİK ALTYAPI.....	3
--	----------

2. 1 Alüminyum ve Alüminyum Alaşımları.....	3
2.1.1 Alüminyum	3
2.1.2 Alüminyum Fiziksel ve Mekanik Özellikleri.....	5
2. 2 Alüminyum Alaşımlarının Sınıflandırılması	7
2.2.1 Dövme Alüminyum Alaşımları	7
2.2.1.1 1XXX Serisi Alaşımlar	9
2.2.1.2 2XXX Serisi Alaşımlar	9
2.2.1.3 3XXX Serisi Alaşımlar	10
2.2.1.4 4XXX Serisi Alaşımlar	11
2.2.1.5 5XXX Serisi Alaşımlar	12
2.2.1.6 6xxx Serisi Alaşımları.....	13
2.2.1.7 7xxx Serisi Alaşımları.....	14
2.2.1.8 8xxx Serisi Alaşımları.....	15
2.2.2 Döküm Alüminyum Alaşımları.....	15
2. 3. Alüminyum ve Alaşımlarının Isıl İşlem Özellikleri	16
2.3.1 Isıl İşlemin Amacı	16
2.3.2 Isıl İşlemin Uygulanması	17
2.3.3 Çözeltiye Alma ve Su Verme İşlemi	20

BÖLÜM ÜÇ - ALÜMİNYUM VE ALAŞIMLARININ KAYNAĞI.....21

3. 1 Ergitme Kaynak Yöntemleri.....	23
3.1.1 TIG Kaynağı.....	23
3.1.2 MIG (Metal Inert Gaz) Kaynağı.....	24
3.1.3 Oksijen - Asetilen Kaynağı.....	25
3.1.4 Elektrik Ark Kaynağı.....	26
3.1.5 Plazma Kaynağı.....	27
3.1.6 Lazer Kaynağı	28
3.1.7 Elektron Işın Kaynağı	29
3. 2 Katı Hal Kaynak Yöntemleri.....	29
3.2.1 Sürtünme Kaynağı.....	29
3.2.2 Difüzyon Kaynağı.....	30
3.2.3 Direnç Kaynağı.....	31

BÖLÜM DÖRT - SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAĞI32

4. 1 Kaynak Yönteminin Tanımı	32
4. 2 Kaynak Yönteminin Uygulanışı	33
4. 3 Kaynağın İşlem Karakteristiklerini Etkileyen Faktörler	34
4. 4 Kaynağın Metalürjik Yapısı	35
4.4.1 Dinamik Olarak Yeniden Kristalleşen Bölge (DKB)	35
4.4.2 Termomekanik Etkilenen Bölge (TEB).....	37
4.4.3 Isıdan Etkilenen Bölge (IEB)	37
4.4.4 Esas Malzeme.....	38
4. 5 Karıştırıcı Uç malzemesi ve Tasarımı	38
4. 6 Yöntemin Avantajları.....	40
4. 7 Yöntemin Dezavantajları.....	41
4. 8 Yöntemin Uygulama Alanları.....	41

BÖLÜM BEŞ – SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAĞININ MODELLENMESİ.....43

5. 1 Modelin Oluşturulması.....	43
5. 2 Termal Sınır Koşulları.....	44
5. 3 Sayısal ve Deneysel Çalışmalarda Kullanılan Kaynak Parametreleri.....	46
5. 4 Ansys Programı ile Sayısal Çalışmalar	47
5. 4. 1 [N=1500 dev/dak, t= 20 sn, V=75 mm/dak] için Elde Edilen Sonuçlar	47
5. 4. 2 [N=1500 dev/dak, t= 20 sn, V=100 mm/dak] için Elde Edilen Sonuçlar ...	50
5. 4. 3 [N=1500 dev/dak, t= 20 sn, V=150 mm/dak] için Elde Edilen Sonuçlar ...	53
5. 4. 4 [N=1750 dev/dak, t= 20 sn, V=75 mm/dak] için Elde Edilen Sonuçlar	55
5. 4. 5 [N=1750 dev/dak, t= 20 sn, V=100 mm/dak] için Elde Edilen Sonuçlar ...	58
5. 4. 6 [N=1750 Dev/dak, t= 20 sn, V=150 mm/dak] için Elde Edilen Sonuçlar ..	60
5. 4. 7 [N=2000 Dev/dak, t= 20 sn, V=75 mm/dak] için Elde Edilen Sonuçlar	61
5. 4. 8 [N=2000 dev/dak, t= 20 sn, V=100 mm/dak] için Elde Edilen Sonuçlar ...	64
5. 4. 9 [N=2000 Dev/dak, t= 20 sn, V=150 mm/dak] için Elde Edilen Sonuçlar ..	66
5. 4. 10 [N=1500 dev/dak, t= 40 sn, V=75 mm/dak] için Elde Edilen Sonuçlar ...	67
5. 4. 11 [N=1500 Dev/dak, t= 40 sn, V=100 mm/dak] için Elde Edilen Sonuçlar	70
5. 4. 12 [N=1500 Dev/dak, t= 40 sn, V=150 mm/dak] için Elde Edilen Sonuçlar	72
5. 4. 13 [N=1750 dev/dak, t= 40 sn, V=75 mm/dak] için Elde Edilen Sonuçlar ...	73
5. 4. 14 [N=1750 dev/dak, t= 40 sn, V=100 mm/dak] için Elde Edilen Sonuçlar .	76
5. 4. 15 [N=1750 Dev/dak, t= 40 sn, V=150 mm/dak] için Elde Edilen Sonuçlar	78
5. 4. 16 [N=2000 dev/dak, t= 40 sn, V=75 mm/dak] için Elde Edilen Sonuçlar ...	80
5. 4. 17 [N=2000 dev/dak, t= 40 sn, V=100 mm/dak] için Elde Edilen Sonuçlar .	83
5. 4. 18 [N=2000 dev/dak, t= 40 sn, V=150 mm/dak] için Elde Edilen Sonuçlar .	85
5. 4. 19 [N=1500 dev/dak, t= 60 sn, V=75 mm/dak] için Elde Edilen Sonuçlar ...	86
5. 4. 20 [N=1500 dev/dak, t= 60 sn, V=100 mm/dak] için Elde Edilen Sonuçlar .	89
5. 4. 21 [N=1500 dev/dak, t= 60 sn, V=150 mm/dak] için Elde Edilen Sonuçlar .	91
5. 4. 22 [N=1750 dev/dak, t= 60 sn, V=75 mm/dak] için Elde Edilen Sonuçlar ...	93
5. 4. 23 [N=1750 dev/dak, t= 60 sn, V=100 mm/dak] için Elde Edilen Sonuçlar .	96
5. 4. 24 [N=1750 Dev/dak, t= 60 sn, V=150 mm/dak] için Elde Edilen Sonuçlar	97
5. 4. 25 [N=2000 dev/dak, t= 60 sn, V=75 mm/dak] için Elde Edilen Sonuçlar ...	98
5. 4. 26 [N=2000 dev/dak, t= 60 sn, V=100 mm/dak] için Elde Edilen Sonuçlar	
.....	100

5. 4. 27 [N=2000 Dev/dak, t= 60 sn, V=150 mm/dak] için Elde Edilen Sonuçlar	102
5. 5 Sayısal Sonuçların Değerlendirilmesi	104
5. 5. 1 İlerleme Hızı Etkisinin İncelenmesi	104
5. 5. 2 Devir Sayısının Etkisinin İncelenmesi.....	111
5. 5. 3 Bekleme Süresinin Etkisinin İncelenmesi.....	120

BÖLÜM ALTI- DENEYSEL ÇALIŞMALAR123

6. 1 Giriş ve Amaç	123
6. 2 Kaynak Öncesi İşlemler	124
6. 2. 1 Malzeme	124
6.2.2 Malzemelerin Kaynağa Hazırlanması.....	125
6.2.3 Karıştırıcı Uçların Hazırlanması	126
6.2.4 Deneyler için Belirlenen Kaynak Parametreleri.....	127
6.3 Kaynak İşlemi	128
6.4 Kaynak Sonrası Yapılan Muayeneler.....	129
6.4.1 Çekme Deneyleri	129
6.4.2 Yüzey Sıcaklık Ölçümleri	131

BÖLÜM YEDİ - DENEY SONUÇLARI VE İRDELENMESİ.....132

7. 1. Devir Sayısının Mekanik Özellikler Üzerine Etkisinin İncelenmesi	132
7. 2 İlerleme Hızının Mekanik Özellikler Üzerine Etkisinin İncelenmesi.....	138
7. 3 Çekme Testleri.....	139
7. 4 Sayısal ve Deneysel Sıcaklıkların Karşılaştırılması.....	141

BÖLÜM SEKİZ - SONUÇLAR143

KAYNAKLAR.....145

BÖLÜM BİR

GİRİŞ

Bir malzemenin fiziksel ve mekanik özelliklerinin yanında kolay ve iyi bir şekilde kaynak edilebilirliği, o malzemenin önem ve talebini etkileyen önemli faktörlerin başında gelir. Al-alışımları düşük yoğunluk, yüksek korozyon direnci ve kolay şekil verilebilme özelliklerinden dolayı günümüzde özellikle taşımacılık sektöründe tercih edilmektedir.

Al-alışımlarının ergitme kaynak yöntemleri ile kaynağında yüksek ısı girdisi, bu malzemelerin ısı genleşmelerinin yüksek olması ve katılma sıcaklık aralarının geniş olması sebebiyle katılma esnasında kaynak dikişinde çatlak oluşumuna neden olabilmektedir. Yaşlandırma sertleşmesine tabi tutulmuş Al-alışımlarının ergitme kaynak yöntemleri ile birleştirilmesinde karşılaşılan bir başka problem, kaynak dikişinde aşırı sertleştiricilerin çözünmesi ile ısı tesiri altındaki bölgede (ITAB) aşırı yaşlanma sonucu, sertlik ve mukavemetin düşmesidir. Bu durum kaynak bölgesinde mekanik uyumsuzluğa neden olmaktadır. Belirtilen bu sebeplerden dolayı bu malzemelerin birleştirilmesinde katı hal kaynak yöntemleri (difüzyon, sürtünme ve sürtünme karıştırma kaynağı) ergitme kaynak yöntemlerine göre avantaj sağlamaktadır.

Katı hal kaynak yöntemlerinde bir ergime veya ergitme söz konusu değildir. Bu kaynak yöntemlerinde genel olarak, kaynak edilen malzemelerin ergime sıcaklığı altında bir sıcaklıkta ve belli bir basınç altında, malzemelerin birbiri içine difüze olması sonucu birleşme elde edilir. Bu kaynak yöntemlerinde ilave dolgu maddesi gerekmediğinden kullanılmaz. Kaynak edilen malzemedeki ergimenin olmaması, özellikle Al-alışımlarının kaynağında katı hal kaynak yöntemlerini ergitme kaynak yöntemlerine göre avantajlı kılmaktadır.

Difüzyon kaynağı her ne kadar katı hal yöntemi olsa da, kaynak işleminin uzun sürmesi, kaynak yüzeyi hazırlamanın kritik olması gibi sebeplerden dolayı yaygın bir kullanım alanına sahip değildir. Fakat sürtünme karıştırma kaynağı bir katı hal kaynak yöntemi olarak yüksek kaynak hızı, yüzey hazırlamanın kritik olmaması gibi sebeplerden dolayı diğer kaynak yöntemlerine göre daha çok tercih edilmektedir.

Sürtünme karıştırma kaynağı, Al-alışımlarının kaynağında her ne kadar iyi sonuçlar veriyor olsa da kaynak bölgesinin mukavemeti özellikle yaşlandırma sertleştirilmesi uygulanmış Al-alışımlarında kaynak edilen baz malzeme mukavemetinin altında olmaktadır. Al-alışımlarının kaynak bölgesinde ergitme kaynak yöntemlerinde olduğu kadar olmasa da bir mukavemet kaybı söz konusudur.

Bu çalışmada, yüksek korozyon direncine sahip AA6061 ve yüksek mukavemet özelliğine sahip AA7075 alüminyum alaşımlarının kaynağı farklı kaynak parametreleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kaynak sonrası performansın belirlenmesi için çekme testleri yapılmış ve kaynak esnasındaki yüzey sıcaklıkları ölçülmüştür. Kaynak parametrelerinin (ilerleme hızı, bekleme süresi, devir sayısı) kaynaklı bağlantıların mekanik özelliklere etkisi çekme testleri ile belirlenmiştir. Ayrıca, ANSYS programı kullanılarak geliştirilen APDL kodları ile SKK sayısal olarak modellenmiş; kaynak esnasındaki sıcaklık, gerilme ve yer değiştirme değişimi zamana bağlı olarak elde edilmiştir.

BÖLÜM İKİ

TEORİK ALTYAPI

2. 1 Alüminyum ve Alüminyum Alaşımları

2.1.1 Alüminyum

Alüminyum üzerine çalışmalar, ilk defa 18. yüzyılın sonları ile 19. yüzyılın başlarında gerçekleştirilmiştir. Berzelius, Dalton, Davy, Lavoiser ve Oersted gibi ünlü bilim adamları alüminyum bileşiklerini üzerinde çeşitli çalışmalar yapmışlardır. 1807'de Sir Humprey Davy, bu bileşiklerin içerisinde bir metal olduğunu ileri sürmüş ve buna alüminyum adını vermiştir. 1821'de Fransa, Les Bauz'ta alüminyum üretiminin temel hammaddesi olan cevheri bulmuş ve buna boksit adını verilmiştir. Daha sonra 1825'te Hans Cristian Oersted, metal alüminyum üretimi için önemli bir bileşik olan alüminyum klorür bileşimini hazırlamayı başarmıştır. Bundan iki yıl sonra 1827'de Friedrich Wöhler, bu bileşiğin potasyum ile reaksiyonu sonucu ilk metal alüminyum kimyasal yollarla elde etmeyi başarmıştır. 19. yüzyılın ikinci yarısında alüminyum üretimi için değişik kimyasal yöntemler geliştirilmiş; aynı yüzyılın sonunda da alüminyum sulu çözeltilerinden elektroliz ile elde etmek için yapılan girişimler başarısızlıkla sonuçlanmıştır (Anık, 1960).



Şekil 2. 1 Londra'da bulunan ve Eros adıyla bilinen bu heykel, 1893'te yapılmış olup alüminyumdan üretilmiş ilk heykellerden biridir.

Alüminyum, yumuşak ve hafif bir metal olup mat gümüşümsü renktedir. Bu renk, havaya maruz kaldığında üzerinde oluşan ince oksit tabakasından ileri gelir. Alüminyum, zehirleyici ve manyetik değildir. Kıvılcım çıkarmaz. Saf alüminyumun çekme dayanımı yaklaşık 49 (MPa) iken alaşımlandırıldığında bu değer 700 MPa'a çıkar. Yoğunluğu, çeliğin veya bakırın yaklaşık üçte biri kadardır. Kolaylıkla dövülebilir, makinede işlenebilir ve dökülebilir. Çok üstün korozyon özelliklerine sahip olması, üzerinde oluşan oksit tabakasının koruyucu olmasındandır.

Alüminyumun en önemli özellikleri arasında; iyi elektriksel ve ısı iletkenliğinin yanında yüksek ısı ve ışık yansımaları, sıcak ve soğuk şekillendirilebilme kolaylığı, sünek ve yumuşak olması ve bazı alaşımlarının çökeltme yoluyla sertleştirilebilmesi özellikleri sayılabilir. Bugün bütün dünya da alüminyum ve alaşımları, büyük ticari değeri olan ve büyük miktarlarda üretilen malzeme grubu haline gelmiştir. Alüminyumun uçak ve otomotiv sanayinde önemli rol oynaması, tüm dünya ülkelerinde “stratejik” bir metal olarak görülmesine neden olmuştur (Oğuz, 1990; Anık, 1960; Tülbentçi, 1990).

Alüminyum ve alaşımları tüm imalat sanayisinin hemen her dalında; tarım, inşaat, kimya, gıda, ulaştırma, elektrik ve elektronik sektörlerinde giderek artan oranlarda kullanılmaktadır. Ülkemizde alüminyum sanayisi oldukça yeni olmasına rağmen, alüminyum ürünlerine olan talep ve buna bağlı olarak yurt içinde işlenen alüminyum ürünlerinin miktarı hızla artmaktadır (Oğuz, 1990). Avrupa Alüminyum Birliği, alüminyum üreticileri için en büyük kullanım sektörünün taşımacılık olduğunu bildirmektedir. Özellikle otomobiller, hava taşıtları ve gemi sektörü alüminyum alaşımlarının en önemli kullanım alanlarıdır. Ayrıca bunu; ambalaj ve taşımacılık sektörleri büyük bir gelişme hızı ile takip etmektedir.

Dövme alüminyum ve alüminyum alaşımlarının ısı işlem uygulanamayan soğuk şekil değiştirmeli ve ısı işlem uygulanabilen (çökeltme sertleşmeli) birçok türü taşıt imalat endüstrisinde, gemi yapım endüstrisinde, uçak ve uzay araçları yapımında yer almaktadırlar. Alüminyum serilerinden 2xxx, 5xxx, 6xxx ve 7xxx endüstride en çok talep gören alüminyum alaşımları serileridir (<http://www.aluminium.org/>).

2.1.2 Alüminyum Fiziksel ve Mekaniksel Özellikleri

Alüminyum periyodik cetvelin 3A grubunda bulunur. Atom numarası 13, atom ağırlığı ise 26.981538 g/mol' dür. İyon çapı 0.86 Å olan alüminyumun, atom çapı ise 1.43 Å'dür. Alüminyum, yüzey merkezli kübik kristal kafeslerinden oluşmuştur ve -269°C' den ergime noktası olan 658°C' ye kadar kararlıdır, yani fiziksel dönüşüm göstermez. Yer kabuğunda % 8 oranında bulunan alüminyum, esas olarak alüminyum hidroksitlerden [AlOOH ve Al(OH)₃] üretilen bir metaldir. Bayer yöntemiyle NaOH ile zenginleştirilen boksitin kimyasal formülü Al₂O₃. 2H₂O Diğer boksitlerden dijasporit (Al₂O₃.2H₂O) ve jipsit (Al₂O₃.3H₂O), hidrat suyu içeren, alüminyum üretiminde değer taşımayan, diğer alüminyum oksitlerdir (Yıldırım, 1983).

Tablo 2. 1 Alüminyum temel özellikleri

Atom Numarası	13
Element Serisi	Metaller
Grup, periyot, blok	13, 3, p
Atom ağırlığı	26,9815386 g/mol
Enerji seviyesi başına elektron	2, 8, 3

Tablo 2. 2 Alüminyum fiziksel özellikleri

Yoğunluk	2,70 g/ cm ³
Sıvı haldeki yoğunluğu	2,375 g/ cm ³
Ergime noktası	660,32 °C
Kaynama noktası	2519 °C
Ergime ısısı	10,71 kJ/ mol

Tablo 2. 3 Alüminyum mekanik özellikleri

Isıl iletkenlik	237 W/ mK
Ses hızı	500 m/ s (20 °C)
Vickers sertliği	167 MPa
Brinell sertliği	245 MPa

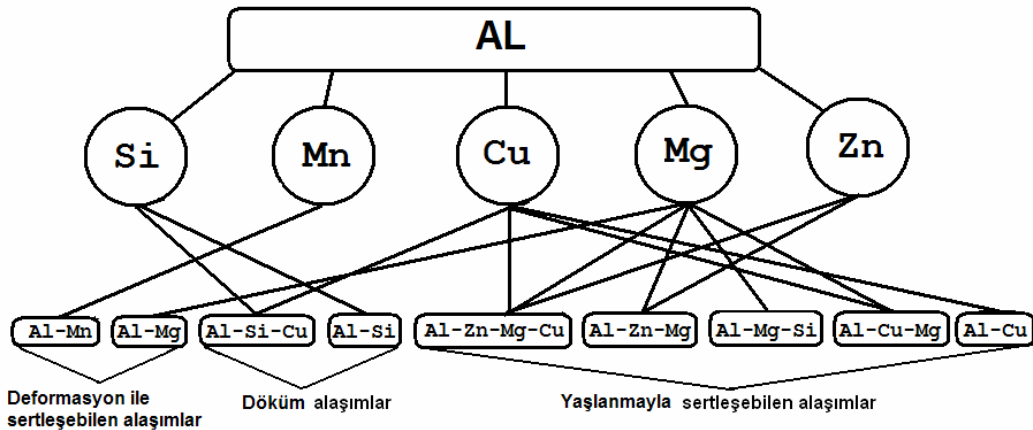
Alüminyum metali aktif olduğundan havadan kolay etkilenir ve üzerinde pasif bir Al_2O_3 filmi meydana gelir. Bu film ince olmakla beraber metali yüksek sıcaklıkta bile korozif etkilerden korur. Alüminyum tozu havada çabucak yanar, ayrıca NaOH ve KOH içinde kolayca erir. Bu metal kükürtlü oksitlere de dayanıklıdır (Öksüz, 1996). Alüminyumun saflık derecesi arttıkça ergime derecesi de yükselir. Katı halden sıvı hale geçerken metalin hacmi büyür. % 99.65 alüminyum içeren metalde bu büyüme % 6.25 civarında iken; % 99.75 alüminyum içeren metalde de % 6.60 büyüme gözlenir. Hem sıvı ve hem de katı alüminyumun yoğunluğu, artan saflık derecesiyle orantılı olarak düşer. % 99.25 Al içeren metalin yoğunluğu 2.727 g/cm^3 iken % 99.40 Al içeren metalin yoğunluğu 2.706 g/cm^3 dür. Alüminyumun saflık derecesi büyüdükçe, ısı ve elektrik iletkenliği de buna paralel olarak artar.

Tablo 2. 4 % 99.5 saflık derecesine sahip alüminyumun genel özellikleri (Öksüz, 1996; <http://sam.davyson.com>).

Sembol	Al
Atom Ağırlığı	26,97 g/mol
Erime Noktası	660 °C
Yoğunluğu (Oda sıcaklığında)	2.706 g/cm ³
Yeniden Kristalleşme Sıcaklığı	150-320 °C
Isıl Genleşme Katsayısı	23.5 $\mu\text{m m}^{-1} \text{K}^{-1}$
Özgül Isısı	0.224 cal/g (100 °C' de)
Gizli Ergime Isısı	94 cal/g
Çekme Mukavemeti	40-100 N/mm ²
Akma Mukavemeti	10-30 N/mm ²
Elastisite Modülü	72 x 10 ³ N/cm ²
Kayma Modülü	27 x 10 ⁵ N/cm ²
% Uzama	45
% Kopma Uzaması	30-40
Sertlik	20 (HV)
Çentik Darbe Tokluğu	100 J/cm ²
Elektrik Direnci	2.65 x 10 ⁻⁸ ohm metre
Katılaşma Esnasında Kendini Çekme	% 6.7
Elektrik İletkenliği	% 59.5 IACS

2. 2 Alüminyum Alaşımlarının Sınıflandırılması

Alüminyum alaşımları temel üretim yöntemlerine göre, dövme ve döküm (dökme) alaşımları olmak üzere ikiye ayrılır. Dövme alüminyum ve alaşımları dört basamaklı bir sayı ile tanımlanırlar. Alüminyuma ilave edilen metale göre; dört rakamdan oluşan bir sınıflandırma kullanılmaktadır. Bu sınıflandırmalarda, sistemindeki birinci rakam, alüminyuma ilave edilen esas metali gösterir. (Tablo 2. 2). 2xxx serisinden 7xxx ana grubuna kadar her grup en büyük alaşım elementine göre adlandırılmaktadır. Dövme alaşımlarında, esas üretim yöntemiyle kütük (ingot) olarak dökülen alaşım, plastik şekil verme yöntemleriyle ürün haline getirilir. Döküm alaşımlarında ise, sıvı halde her türlü bileşim ve özellik ayarı yapılmış olan alaşımın, doğrudan ürün kalıbına dökümü yapılır. Dövme ve döküm alaşımları da element bileşimlerine göre alt sınıflara ayrılmaktadır (Şekil 2. 1). (Öksüz, 1996; Yılmaz, 2002).



Şekil 2. 2 Alüminyumda bileşen elementlerinin genel bileşimleri

2.2.1 Dövme Alüminyum Alaşımları

Bu alaşımlar, isimlendirilmesinden de anlaşılacağı gibi; dövme, haddeleme ve ekstrüzyon gibi plastik şekil verme yöntemleriyle üretilmektedirler. Dört rakamlı sayısal simgenin ilk rakamı, hangi temel alaşım elementini içeren alüminyum alaşımı olduğunu belirtir. 1XXX dizisi saf alüminyum (% 99.00) gösterir. Son iki rakam % 99 değerinin noktadan sonraki rakamlarını belirtir. Soldan ikinci rakam ise, özel olarak denetlenen katkı elementlerin sayısını belirtir ve 1'den 9'a kadar değişebilir.

2XXX'den 8XXX'e kadar olan alüminyum alaşımlarında ilk rakam alaşım türünü, ikinci rakam değişimleri (modifikasyon) simgeler, son iki rakamın özel bir anlamı yoktur. Alaşımı dizideki diğer alaşımlardan ayıran sıra numarası gibi kullanılır (Oğuz, 1990). Tablo 2. 2'de çeşitli alüminyum serileri, ısıtılma durumları ve oluşturdıkları alaşım grupları verilmiştir. Genellikle dövme alüminyum alaşımların 7 sınıflandırılması alaşım elementlerinin katkılarına göre yapılırken, aynı zamanda ısıtılma işlem uygulanabilirliği (yaşlandırma) açısından da bu alaşımlar ele alınmaktadır.

Tablo 2. 5 Dövme alüminyum ve alaşımlarının sınıflandırılması

Alaşımsız Alüminyum	1XXX	Yaşlandırılabilir
Alüminyum Bakır Alaşımı	2XXX	Yaşlandırılabilir
Alüminyum Mangan Alaşımı	3XXX	Yaşlandırılabilir
Alüminyum Silisyum Alaşımı	4XXX	Yaşlandırılmaz
Alüminyum Magnezyum Alaşımı	5XXX	Yaşlandırılmaz
Alüminyum-Silisyum-Magnezyum Alaşımı	6XXX	Yaşlandırılabilir
Alüminyum Çinko alaşımı	7XXX	Yaşlandırılabilir
Alüminyum ve diğer elementler	8XXX	Yaşlandırılabilir

Alüminyum alaşımlarına diğer metallerin ilave edilmesi, mekanik özelliklerin iyileşmesine olanak tanır. Örneğin, ticari vasıftaki alüminyumda mevcut küçük miktarlardaki yapı taşlarının bile alüminyumun mukavemetini saf metale kıyasla % 50'ye kadar arttırmaya yeterli olduğu literatürlerde yer almaktadır. Alüminyum alaşımlarının üretiminde en fazla kullanılan metaller bakır, silisyum, mangan, magnezyum ve çinkodur. Bu metaller, arzu edilen nitelikteki ürünü imal edebilmek için alüminyum alaşımına, tek veya bileşik halde ilave edilebilirler. Döküm alaşımlarında, alaşım yapıcı metaller daha yüksek miktarlarda kullanıldığı zaman hadde alaşımları için bu metallerin toplam yüzdesi, nadiren % 10'un üstüne çıkar. Dökülmüş ve tavlanmış şartlardaki alüminyum alaşımlarının çekme mukavemeti bileşimlerine bağlı olarak ticari alüminyumunun iki misline kadar yükselir. Soğuk işlem, hadde alaşımlarının çekme mukavemetini daha da yükseltir. Alaşımlandırma sonucu alüminyum metalinin mukavemetinde elde edilen yükseliş, diğer özelliklerdeki değişimlerle birlikte meydana gelir. Bu değişimler farklı alaşımlarda nadiren aynı

olur. Çünkü birçok alaşım, esas itibariyle aynı çekme mukavemetine sahip olmasına karşın; süneklik, elektrik ve ısı iletkenliği ile üretim kolaylığı bakımından birbiriyle önemli farklılıklar gösterir. Alaşımlandırmada bazı katkıları, malzemenin yoğunluğunu artırıcı etki gösterirken; bazı alaşımlar da daha hafif olurlar. (Oğuz, 1990).

2.2.1.1 1XXX Serisi Alaşımlar

1xxx grubu alüminyum alaşımları saf ya da çok az alaşım elemanı bulunduran malzemeler olup; levha, folyo ve profil haline kolayca getirilebilirler (Yılmaz, 2002). Bu gruptaki alaşımlar yaşlanma sertleşmesi göstermezler ve bunlara sadece deformasyon sertleşmesi yolu ile kısmen mukavemet kazandırılabilir (Oğuz, 1990). Derin çekme işlemine de uygun olan bu alaşımların iyi korozyon özellikleri ve yüksek ısı ve elektrik dirençleri vardır. Şekillendirme kabiliyeti yüksek ama mukavemetleri düşüktür. Bu alaşımlar mimari uygulamalarda, ısı eşanjörlerinde, elektrik iletim levhalarında ve ambalajlama işlemlerinde kullanılmaktadır (Saldır, 2002). Tablo 2. 3’ de endüstride çok sık kullanım alanı bulan AA1050 alaşımının kimyasal özellikleri verilmiştir.

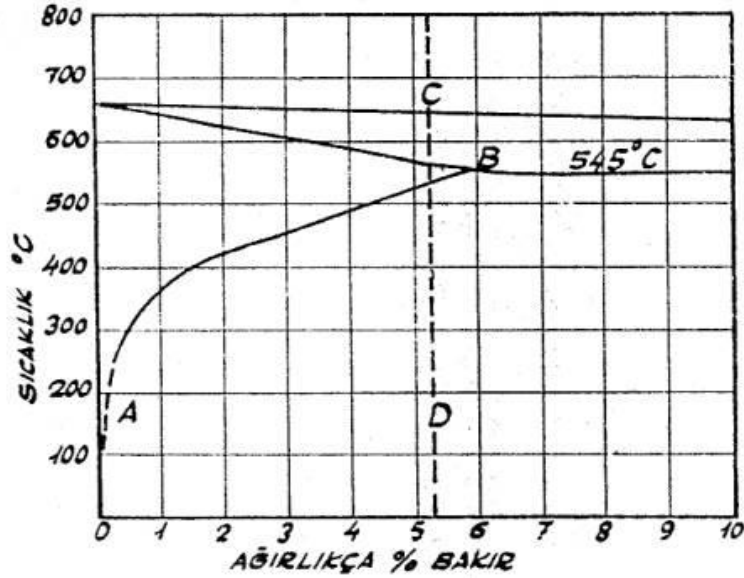
Tablo 2. 6 AA1050 alaşımının kimyasal kompozisyonu (<http://aluminium.matter.org.uk/>)

Alaşım Tipi	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
AA1050	0,25	0,4	0,05	0,05	0,05	-	0,17	0,005	Kalan

2.2.1.2 2XXX Serisi Alaşımlar

Bu grup, farklı yüzdelerde magnezyum ve manganez ihtiva eden bakırın alaşımlandırıcı element olduğu yüksek mukavemet alaşımlarını içine alır. Dür alümin, alüminyum alaşımları içinde en iyi bilinendir. Dür alümin’ in bileşimi, % 3.5- 4.5 bakır, % 0.5 magnezyum, % 0.5 mangan ve az miktarda silisyum ve demirden ibarettir. 1906 yılında Almanya’da keşfedilen alaşımın ismi, ilk defa üretilen şehrin adına (Düren) izafeten verilmiştir. Dür alümin, ısıtılma işlemine tabi

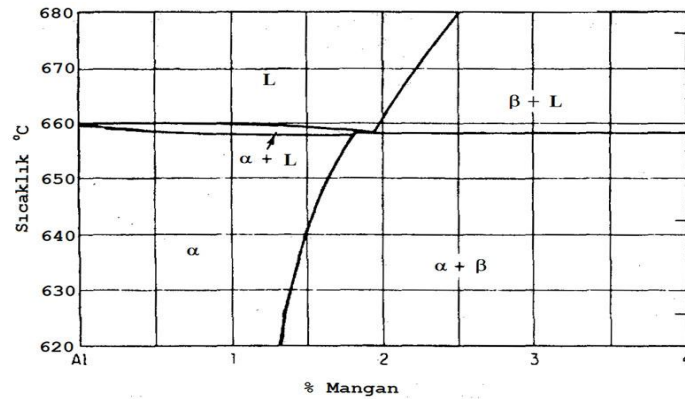
tutulabilecek alaşımlar içinde keşfedilenlerin ilki olması ve yaşlanma sertleşmesi olayının (bir alaşım, normal oda sıcaklığında dört veya beş gün müddetle bırakılacak olursa mukavemet ve sertliğinde kendiliğinden önemli bir artış meydana gelir) ortaya çıkmasına ön ayak olması sebebiyle büyük önem kazanmıştır (Tulgar, 1987).



Şekil 2. 3 Al- Cu denge diyagramı

2.2.1.3 3XXX Serisi Alaşımlar

Bu serinin ana alaşım elementi manganezdır. Genel olarak bir alüminyum-manganez alaşımı % 1.80 oranında manganez içerir. Sıcaklık düşüşüyle beraber manganezin çözünürlüğü de azalır. Isıl işleme yaşlandırma sertleşmesi bu alaşım için mümkündür. Şekil 2. 3’de Al- Mn ikili denge diyagramı verilmiştir.

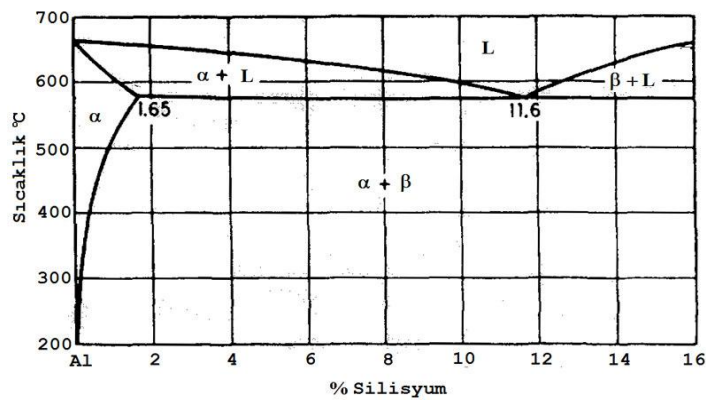


Şekil 2. 4 Al- Mn ikili denge diyagramı (Saldır, 2002)

Manganın etkisi alüminyumun çekme mukavemetini artırmaktadır. Bu alaşım yüksek süneklik ve çok iyi korozyon özelliklerine sahiptir. 1xxx serisi alaşımlardan % 20 daha fazla mukavemete sahiptirler. Bu alaşımlar, saf alüminyum ile yüksek mukavemetli alüminyum alaşımları arasındaki boşluğu doldururlar. Zira % 1.5 mertebesindeki bir mangan ilavesi, mukavemetin önemli miktarda (100 ila 170 N/mm²) artmasına, fakat sünekliğin ise az oranda azalmasına neden olur.

2.2.1.4 4XXX Serisi Alaşımlar

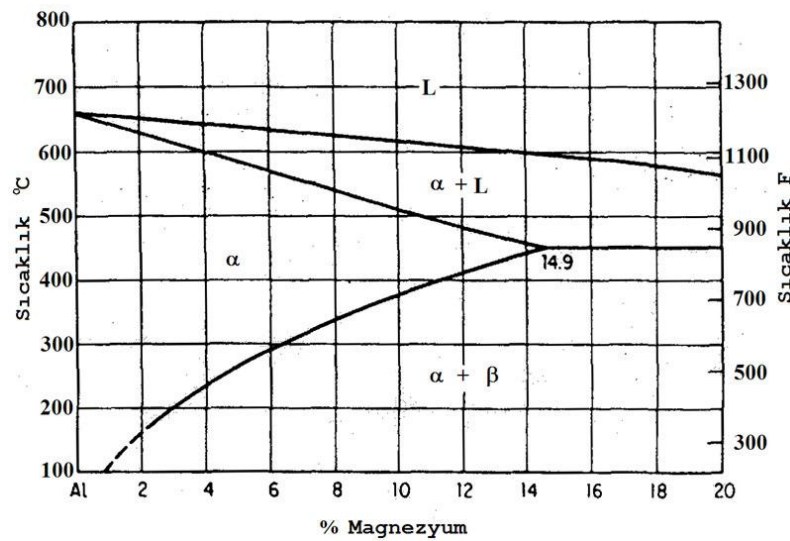
Bu serinin temel alaşım elemanı silisyumdur. Al-Si alaşımlarının en önemli özelliği düşük silisyum katkılarında ergime sıcaklığının düşük olmasıdır. Bu nedenle kaynak çubukları ve sert lehim levhalar için özellikle uygundur. Lehim teli, mimari uygulamalar ve radyatör dilimleri başlıca kullanım yerleridir. Şekil 2. 4’de Al- Si iki bileşenli faz diyagramı görülmektedir. Alüminyumda silisyumun maksimum çözünme sınırı % 1.65’dir. Ancak 4xxx serisi alaşımlarda % 2.5’ a kadar silisyumlu alaşım yapılır. Artan silisyum oranı ergime sıcaklık aralığını azaltır ve dökülebilme yeteneğini artırır (Saldır, 2002). Yüksek silisyumlu alaşımların düşük termal genleşme katsayısı, yüksek korozyon direnci ve yüksek aşınma direnci vardır. Bu nedenle dövme motor pistonları 4032 alaşımlarından yapılır (Saldır, 2002). Diğer taraftan bu alaşımlar ısıtılma işlemi ile sertleştirmeye elverişsizdirler (Öksüz, 1996). Önemli miktarlarda silisyum içeren alaşımlara anodik oksidasyon uygulandığında koyu gri renk alırlar, bu yüzden mimari uygulamalarda dekoratif amaçlı olarak kullanılırlar (Yılmaz, 2002).



Şekil 2. 5 Al-Si ikili denge diyagramı (Saldır, 2002).

2.2.1.5. 5XXX Serisi Alaşımlar

Bu alaşımlar magnezyumu ana katkı eleman olarak içerirler ve mekanik mukavemetleri de orta düzeyden yükseğe kadar geliştirilebilen malzemelerdir. Isıl işlemle sertleştirilebilme yetenekleri sınırlıdır (Öksüz, 1996). Katı fazda magnezyum çözünürlüğü azalan sıcaklık ile hızla düşer. Ancak % 5'den az magnezyum ve yeteri kadar silisyumu olmayan alaşımlar yaşlandırma ile sertleştirilemez. Genellikle soğuk şekil verme işlemi ile sertleştirilebilir alaşımlar elde edilir. 5xxx serisi alaşımlarda magnezyum oranı arttıkça sertlik ve mukavemet artarken süneklik azalır (Saldır, 2002). Yüksek çekme dayanımı, sertlik, aşınma direnci, deniz atmosferine karşı iyi korozyon direnci ve iyi kaynak edilebilirliği önemli özellikleridir. Soğuk şekil değişimine elverişli değildir (Yılmaz, 2002). Mekanik mukavemetin artırılmasında ana etken olan magnezyum % 0. 8- 4. 5 arasında değişen miktarlarda kullanılır (Tablo 2. 7). Alüminyum-magnezyum alaşımlarında, % magnezyum miktarı ne kadar fazla kullanılırsa çekme mukavemeti de o oranda yükselir. Bu alaşımlar çok iyi bir sünekliğe ve tam bir korozyon direncine sahip olduğundan deniz koşullarında, özellikle gemi ve bot yapı malzemeleri üretiminde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (Oğuz, 1990). Alüminyum-magnezyum alaşımları içinde 4 serisi sanayide çok talep görmektedir (Büyükarıslan, 2006). Bu serinin zengin alaşımlarında ötektik sıcaklık 450 °C (840 °F) ve Mg konsantrasyonu % 14.9 dur (Şekil 2. 5) (Öksüz, 1996).



Şekil 2. 6 Al-Mg ikili denge diyagramı (Yükler, 2002).

2.2.1.6. 6xxx Serisi Alaşımları

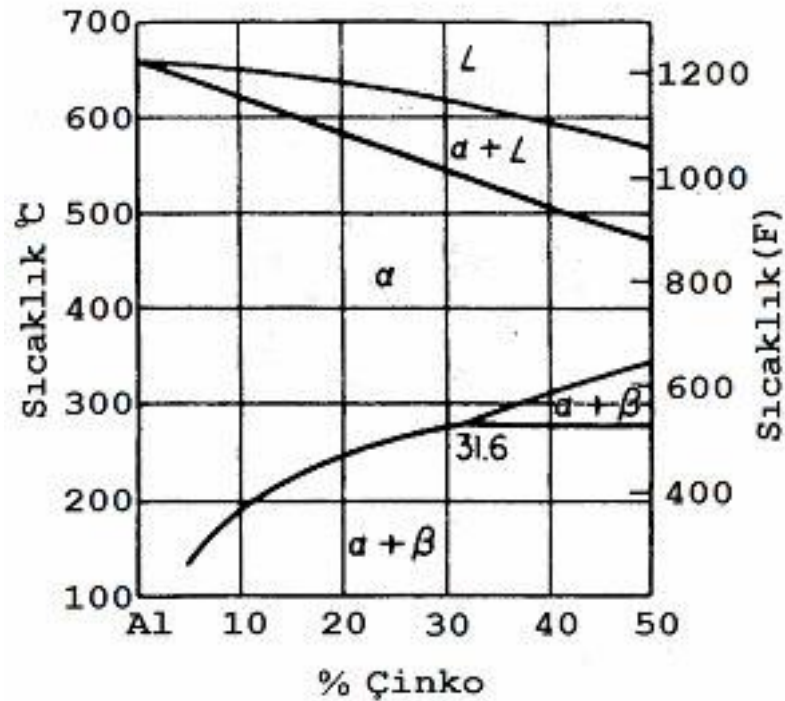
Tablo 2. 8' de 6XXX serisine ait kimyasal içerikler verilmiştir. Bu alaşım, silisyum ve magnezyumun birlikte oluşturdukları seriyi temsil etmektedir. Magnezyum ve silisyum birleşerek Mg_2Si bileşiğini oluşturur. Bu alaşımda sertleşme, Mg_2Si metaller arası bileşiğinin sıcaklık ile değişen çözünürlüğünden ileri gelmektedir. Bu bileşik alüminyum ile basit bir ötektik sistemi oluşturur (Sekil 2. 6) (Saldır, 2002). Ani soğutma ve yaşlandırma arasında oda sıcaklığında depolanan Al-Mg-Si alaşımları ani soğutma ve yaşlandırma yoluyla üretilenden daha düşük mekanik özellikler sergilerler. 6xxx serisi alaşımlar çözeltiye alınır ve suni olarak yaşlandırılırsa alüminyum matrisi içinde Mg_2Si partikülleri çöker. Böylece orta seviyede mukavemet ve sertlik elde edilir. Fakat elde edilen mukavemet 2xxx ve 7xxx serisinde elde edilen değerlerden daha az olur (Öksüz, 1996). Bu grupta en iyi ısıtıl işlem uygulanabilen ve yaygın olan alaşım 6061'dir. Bu alaşımların şekillendirme kabiliyeti, kaynak kabiliyeti, talaş kaldırma kabiliyeti ve korozyon direnci diğer yaşlandırılan alaşımlardan daha fazladır. Bu alaşımlar kararlı olmaları ve çözünme ısıtıl işlemi (solution heat treated) koşullarında çok iyi şekillenebilmeleri ile karakterize edilirler. Şekillendirme, su verme işleminden sonra malzeme üzerinde yürütülebilir ve gerekli mukavemet, malzemeyi daha sonra 160-180 °C' de çökeltme ısıtıl işlemine tabii tutmak suretiyle temin edilir (Büyükarıslan, 2006).

Tablo 2. 7 Bazı 6xxx serisi alaşımların kimyasal bileşimleri (<http://aluminium.matter.org.uk/>).

Alaşım Tipi	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti
AA 6061	0.4	0.7	0.15	0.15	0.8-1.2	0.04-0.35	-	0.25	0.15
AA 6063	0.3	0.6	0.10	0.5	0.4-0.9	-	0.2	0.10	0.20
AA 6082	0.7	0.5	0.4	0.5	0.25	0.10		0.20	0.20
AA 6070	1,3	-	0,28	0,7	0,8	-	-	-	-

2.2.1.7 7xxx Serisi Alaşımları

Bu grupta ana alaşım elemanı olan çinko küçük miktarda magnezyumla kullanıldığında çok yüksek mukavemetli ısıl işlem uygulanabilen alaşımlar meydana gelmektedir. Ana katkı maddesi olan çinko % 5 civarında kullanılır ve alaşımlara çok yüksek çekme dayanımı kazandırır. Çinkonun ana alaşım elemanı olarak ve bir miktar Mg ile birlikte kullanılması malzemenin ısıl işlemle sertleştirilmesini sağlar. Bu alaşımlar tüm alüminyum alaşımları içinde en mukavemetli olanlarıdır ve II. Dünya Savaşı sırasında hava kuvvetlerinde kullanılmak üzere geliştirilmiştir. Uçak gövdelerinin yapımında kullanılan 7075 çok yüksek mukavemeti ile özellik taşır. Al-Zn-Mg serisi alaşımlar orta mukavemetli ve çökelmeyle sertleşebilir konstrüksiyon malzemesidir. Al-Cu-Mg alaşımlarına nazaran daha iyi korozyon direnci gösterirler, fakat korozyon dirençleri Al-Mg ve Al-Mg-Si alaşımlarına nazaran daha azdır (Öksüz, 1996). Bu alaşımlarda temel sertleştirici faz b ($MgZn_2$) fazıdır.



Şekil 2. 7 Al- Zn denge diyagramı

2.2.1.8 8xxx Serisi Alaşımları

Son yıllarda özellikle uzay ve uçak sanayisi için düşük yoğunluklu, yüksek mukavemetli malzemeye duyulan talep, Al- Li alaşımlarını ön plana çıkarmıştır. Al- Li alaşımları düşük yoğunluğun yanında, yüksek elastisite modülü, yüksek yorulma direnci, düşük ve yüksek sıcaklıklarda tokluk özellikleri ile dikkat çekmektedir (Tülbentçi, 1990). Lityumun alüminyum alaşımlarına ilavesinin başlıca nedeni, yoğunluğun azalması ve buna karşın elastiklik modülündeki artışın sağlanmasıdır. Alüminyuma her % 1 lityum ilavesinde alaşımların yoğunluğu % 3 azalırken elastiklik modülünü de % 6 oranında artırmaktadır. Geleneksel olarak % (1. 0-2. 0) arasında lityum içeren alaşımlar ısıtılma işlemi tabi tutulabilir. Hızlı katılaşma yöntemi ile % 4 kadar lityum ilave edilebilir; bu da yüksek mukavemete ve daha düşük ağırlığa neden olabilir (Öksüz, 1996). Bazı 8xxx serisi alaşımların kimyasal bileşimleri Tablo 2.10'da verilmiştir. Lityum içeren alüminyum alaşımlarının diğer geleneksel alüminyum alaşımlarına göre üç dört kat daha yüksek olan üretim maliyetleri nedeniyle; aktif kullanım açısından bu alaşımlar, hem ekonomik hem de teknolojik açıdan geliştirilmeye çalışılmaktadır (<http://www.aluminium.org/>).

Tablo 2. 8 Bazı 8xxx serisi alaşımların kimyasal bileşimleri (Öksüz, 1996).

Alaşım Tipi	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Al
AA8001	-	0,6	-	-	-	-	1,1	-	Kalan
AA8081	-	-	1,0	-	-	-	-	-	Kalan
AA8280	1,5	-	1,0	-	-	-	0,45	-	Kalan

2.2.2 Döküm Alüminyum Alaşımları

Döküm alaşımlar; genellikle kum döküm, pres döküm ve sabit kalıp yöntemleri kullanılarak üretilirler. Bu alaşımlar son derece yüksek fiziksel özellikler gösterir ve işlenmeye elverişlidirler. Döküm alaşımlar kaynak edilebilirler. Isıl işlem dövme alüminyum alaşımlarına çok yaygın olarak uygulanmakla birlikte, döküm alaşımların bir kısmına da başarıyla uygulanabilmektedir. Bu özelliklerin yanında, mukavemet

ve korozyon özellikleri yüksektir. Bu nedenle döküm alaşımlarının kimyasal bileşimleri dövme alaşımlarından oldukça farklı olup silisyum % 5- 12 oranı ile en önemli alaşım elementidir. Silisyum ötektik reaksiyon veren bir element olduğundan ilavesiyle alaşımın akıcılığı ve besleme kabiliyeti artarken, aynı zamanda malzeme mukavemeti de artar. Magnezyum elementi % 0. 3- 1 arasında ısıtma işlemi uygulanabilir alaşımlara eklenir ve çökelme (Mg_2Si) ile malzeme mukavemetinin artması sağlanır. Bakır, yüksek sıcaklık direncini arttırmak amacıyla % 1- 4 arasında kullanılır ve $CuAl_2$ bileşiği şeklinde çökelme fazı oluşturur. Çinko elementi de aynı şekilde malzemeye ilave edilir ve $MgZn_2$ çökeltisi oluşturur. Bor (B) ve titanyum (Ti) döküm alüminyum alaşımlarına tane küçültücü olarak ilave edilirken, sodyum (Na) ve stronsiyum (Sr) elementleri ötektik yapıyı modifiye edici olarak eklenir. Diğer özellikleri de kontrol amacı ile kalay (Sn) ve krom (Cr) gibi elementler kullanılabilir (Öksüz, 1996).

Bu alaşım grubunun özellikleri her ne kadar hafif bir döküm alaşımı yapısı sergiliyorsa da, özellikle otomotiv sanayisinde çok geniş bir şekilde kullanılmaktadırlar. Döküm alüminyum alaşımları genellikle iki fazlıdır. Bazı bileşim özellikleri ısıtma işlemi veya ergimiş metali kalıba dökmeden önce döküm yapısında bir iyileştirme işlemi vasıtasıyla düzeltilebilir (Oysu, 1996; Fine, 1975).

2. 3. Alüminyum ve Alaşımlarının Isıl İşlem Özellikleri

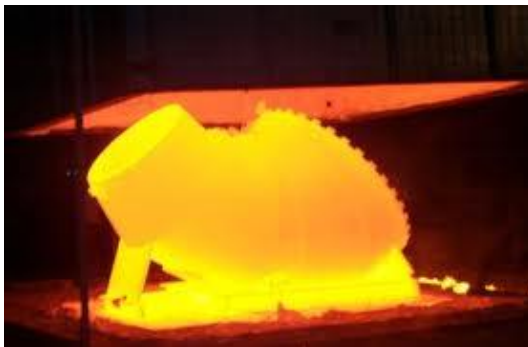
2.3.1 Isıl İşlemin Amacı

Katı durumdaki bir metal veya alaşımda yapı ve özelliklerin düzeltilmesi amacıyla yapılan kontrollü ısıtma ve soğutma işlemlerinin tümüne ısıtma işlemi adı verilmektedir. Isıl işlemin amacı, çoğu kez ısıtma işlemi tabii tutulacak malzemenin cinsine ve üretim yöntemine bağlıdır. Alüminyum alaşımlarının ısıtma işlemi genellikle çökelme ile alaşımın mukavemet ve sertliğini artırmayı amaçlar. Çökelme işlemi uygulanarak mukavemet ve sertliği artırılabilen alüminyum dövme ve Al-döküm alaşımları "ısıtma işlemi uygulanabilir", diğer Al-alaşımları ise "ısıtma işlemi uygulanamayan" olarak bilinir. Isıl işlem uygulanamayan serilere en iyi örnek; 1xxx, 3xxx ve 5xxx serileri

verilebilir. Isıl işlem uygulanamayan alaşımlar öncelikle soğuk işlem veya katı eriyikle sertleştirilirler. Her iki alaşım grubunda da malzemenin yumuşatılması için ısı kullanılır (Doğan, 1989). Özellikle 2000 serisi ve 7000 serisi alüminyum alaşımlarının yüksek mekanik özellikleri ısı ya da termomekanik işlemlerle kazandırılmaktadır. Bu tür alaşımlara mekanik özellikleri artırmak amacıyla uygulanan ısı işlemler Tablo 2.11 ve 2.12 'de verilmiştir (Oysu, 1996).

2.3.2 Isıl İşlemin Uygulanması

Dövme alüminyum alaşımlarına çökelme sertleşmesi uygulanır. Çökelme sertleşmesi, ikinci fazın küçük tanecikler halinde matris fazı içinde çökmesidir. Bu işlem, alaşım sistemlerinde mukavemet arttırmak amacıyla kullanılır. Çökelme sertleşmesi, faz diyagramlarında solvüs eğrisi içeren alaşım sistemlerine uygulanır. Bu işlem iki kademede gerçekleştirilir. Bunlar, çözeltiye alma ve su verme ile yaşlandırma kademeleridir (Kırtay, 1997). Çökelme reaksiyonunun tam olarak gerçekleştirilmesi için gerekli olan ilk koşul, aşırı doymuş katı bir eriyik oluşturmaktır. Bu amaçla alaşıma çözeltiye alma ısı işlemi olarak adlandırılan bir ısı işlem uygulanır. Bu işlemin amacı, alaşımdaki sertleştirme elementlerinin katı eriyik içinde maksimum miktarda yer almasını sağlamaktır. Katı eriyikte çökelti oluşturmak için asıl gereken şey, azalan sıcaklıkla bir katının eriyebilirliğinin azalmasıdır. Bu şekilde katı eriyik, aşırı doymuş katı eriyik olarak yarı kararlı duruma geçmektedir (Oysu, 1996).



Şekil 2. 8 Isıl işlem uygulanan bazı alüminyum parçaları

Tablo 2. 9 Yaşlandırılmayan alüminyum alaşımlarına uygulanan ısı işlemler (Öz arpa, 2005).

Sembol	Açıklaması
F	Üretim- ürünlerde hiç bir özel ısı kontrol veya sertleştirme koşulları kullanılmayan şekillendirme sistemi
O	Tavlama- uygulanan tav, en düşük mukavemet koşullarını, süneklik ve boyutsal kararlılığı sağlamak için uygulanır.
H	Şekil değiştirme sertleştirme- soğuk şekillendirme ile üretilen ürünlere uygulanır. Şekil değiştirme sertleşmesini, mukavemeti bir miktar düşüren ek ısı işlem uygulanması takip eder. H' yi genelde iki veya daha çok sayı takip eder.
W	Çözeltiye alma (çökelti sertleştirme) ısı işlemi- kararlı olmayan alaşımlara yalnızca çözeltiye alma tavlamasından sonra oda sıcaklığında kendiliğinden yaşlanmayı sağlayan tav uygulanır.
T	Isı işlem daha kararlı tav sağlamak içindir. Ürünlere tav uygulaması bazen sabit sertlik derecesi sağlamak için şekil değiştirme sertleştirmeyle birlikte uygulanır

H harfinden sonraki ilk rakam temel işlemi tanımlamaktadır.

- **H1;** sadece şekil değiştirme sertleştirme
- **H2;** Şekil değiştirme sertleştirme ve yapay yeniden kristalleştirme
- **H3;** Şekil değiştirme sertleştirme ve yapı dengelemesi
- **H4;** Şekil değiştirme sertleştirme ve parlatma veya boyama

H harfinden sonraki ikinci harf şekil değiştirme sertliğinin derecesini tanımlamaktadır.

- **Hx2;** Dörtte bir
- **Hx4;** Yarım sert
- **Hx6;** Üç-çeyrek sert
- **Hx8;** Tam sert
- **Hx9;** Çok sert

Tablo 2. 10 Yaşlandırılabilen alüminyum alaşımlarına uygulanan ısıt işlemler (Öz arpa, 2005).

Sembol	Açıklaması
T1	Ekstrüzyon gibi yüksek sıcaklıkta şekil verilmiş parçalar soğutulduktan sonraki doğal yaslandırma
T2	Yüksek sıcaklıkta sekil verme soğutmasından sonra soğuk şekillendirme ve ardından doğal yaslandırma
T3	Çözeltiye alma ısıt işlemi, soğuk şekillendirme ve doğal yaslandırma
T4	Çözeltiye alma ısıt işlemi ve doğal yaslandırma
T5	Yüksek sıcaklıkta sekil verme soğutmasından sonra yapay yaslandırma
T6	Çözeltiye alma ısıt işlemi ve yapay yaslandırma
T7	Çözeltiye alma ısıt işlemi ve stabilizasyon (aşırı yaslandırma)
T8	Çözeltiye alma ısıt işlemi, soğuk şekillendirme ve yapay yaslandırma
T9	Çözeltiye alma ısıt işlemi, yapay yaslandırma ve soğuk şekillendirme
T10	Yüksek sıcaklıkta sekil verme soğutmasından sonra soğuk şekillendirme ve sonra yapay yaslandırma



Şekil 2. 9 Isıt işlem uygulanan alüminyum boru profili

2.3.3 Çözeltiye Alma ve Su Verme İşlemi

Çözeltiye alma işleminde amaç, mevcut alaşım elementlerinin matris içinde maksimum çözünebilirliğinin sağlanmasıdır. Bu yüzden çözeltiye alma sıcaklığının ve süresinin belirlenmesi çok önemlidir. Ötektik sıcaklığa yakın sıcaklıklarda çözeltiye alma işlemi uygulanırsa tane sınırlarında ergimeler oluşabilir. Bu da mekanik özellikleri olumsuz yönde etkiler. Düşük sıcaklıklarda bu işlem gerçekleştirilirse çözeltiye alma süresi uzar. Ticari olarak çözeltiye alma işleminde $\pm 6^\circ\text{C}$ ' ye kadar tolerans tanınır. (Kırtay, 1997).

Su verme işlemi kritik bir aşamadır. Su verme sıcaklığı ve süresinin iyi belirlenmesi gerekir. Bu parametreler alaşımdan alaşıma değişmektedir. Belirlenmiş süre ve sıcaklık aralığında alaşıma su verilemezse daha düşük mekanik özellikler elde edilir (Kırtay, 1997; Brooks, 1984). Su vermede ana amaç yüksek sıcaklık veya çözeltiye alma aşamasında elde edilen katı eriyiğin hızlı soğutma ile oda sıcaklığına çekilmesi ve yeterli derecede atom boşluğunun elde edilmesidir.

Tablo 2. 11 Alüminyum alaşımlarının ısıtma işlem durumlarına göre çözeltiye alma-yaşlanma sıcaklıkları ve yaşlanma süreleri (Öksüz, 1996).

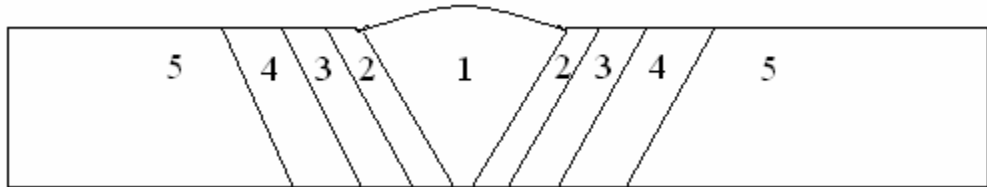
Alaşım	Çöz. Alma Sıc. (°C)	Yaşlanma Sıc. (°C)	Yaşlanma Süresi (saat)
2011	510 $\pm$ 5, 510 $\pm$ 5	Oda Sıc. 155-165	48-12
2014A	505 $\pm$ 5, 505 $\pm$ 5	Oda Sıc.	48- 48
2024	495 $\pm$ 5	Oda Sıc.	48- 48
6061	525 $\pm$ 15, 525 $\pm$ 15	Oda Sıc. 165-195	3-12
6082	530 $\pm$ 10, 530 $\pm$ 10	Oda Sıc. 175-185	7-12
6101A	525 $\pm$ 5, 525 $\pm$ 5	Oda Sıc. 170 $\pm$ 10	120
6463	525 $\pm$ 5, 525 $\pm$ 5	Oda Sıc. 170 $\pm$ 10	5-15
7010	475 $\pm$ 10, 475 $\pm$ 10	172 $\pm$ 3	6-15
7014	460 $\pm$ 10, 460 $\pm$ 10	135 $\pm$ 5, 135 $\pm$ 5	12
7075	460 $\pm$ 10, 460 $\pm$ 10	135 $\pm$ 5, 135 $\pm$ 5	6-24

BÖLÜM ÜÇ

ALÜMİNYUM ve ALAŞIMLARININ KAYNAĞI

Dövme alüminyum alaşımlarından ısıtıl işlem yapılamayan 1xxx, 3xxx ve 5xxx serileri, gaz korumalı ark işlemleri ile en kolay kaynatılabilen grupta yer almaktadırlar. Isıtıl işlem yapılabilen 2xxx ve 4xxx serisi alaşımlar özel ark kaynak teknikleri ile kaynatılabilirler. Yüksek mukavemetli ısıtıl işlem uygulanabilen 7xxx serisi alüminyum alaşımlarının 7075 ve 7178 serileri kaynağı problem oluşturmaktadır. Bu alaşımlarda, ısıtılın tesiri altındaki bölgede (ITAB) sertlik, kaynatılan ana metale göre daha fazladır ve kaynak edildiklerinde, sıcak çatlama meydana gelme olasılığı yüksektir. Bu nedenle kaynakları tavsiye edilmez. Buna karşılık 7005 ve 7039 alaşımları kaynak için özel olarak geliştirilmişlerdir ve kaynak kabiliyetleri iyidir.

Kaynaklı halde ısıtıl işlem kabul eden orta ve yüksek mukavemetli alüminyum alaşımlarının birleştirme yeteneğinin azalmasının esas nedeni, ana metalden başka Şekil 3. 1’den de görüleceği üzere yapısal farklılıklar sergileyen dört farklı bölgenin mevcut olması olarak tanımlanabilir. (Oğuz, 1990).



Şekil 3. 1 Isıtıl işlem kabul eden orta ve yüksek mukavemetli alüminyum alaşımlarda kaynak sonrası ısıtıl etkilenen bölgeler

1. Kaynak dolgu metali, **2.** Dar “fazla ısınmış” nüfuziyet bölgesi (kısmi ergime), **3.** Eriyik işlemli bölge, **4.** Sıcaklıkların 200-300°C’a vardığı IEB, burada eriyebilir bileşenler bu nedenle büyük ölçüde çökelirler (fazla yaşlanma) ve yumuşama meydana gelir, **5.** Sıcaklığın 200 °C’yi geçmediği ve kaynak işleminin etkisiz olduğu ana metal (Oğuz, 1990).

Alüminyum kaynağında ilave alaşımın seçimi, dikiş çatlamasını yok etmekte önemli bir etken olmaktadır. Çatlama genellikle, ana metalden daha yüksek alaşımlı ilave metal kullanmakla asgariye indirilebilir. Örneğin 6061 alaşımı, 6061 ilave metalle kaynak edildiğinde kaynak bölgesinde çatlak oluşma riski artar; ama % 5 Si içeren 4043 ilave metalle kolayca kaynak edilebilir. 4043'ün avantajı, daha düşük sıcaklıklarda ergiyip katılaşmasıdır. Bu nedenle ana metal bir miktar soğuduktan sonra plastik halde kalır ve çatlamaya neden olan büzülme gerilmeleri, ilave metalin plastikliği sayesinde hafifletilir. Başka koşullar altında 5356, 5183 veya 5556 gibi yüksek magnezyumlu ilave metal, dikiş mukavemetini artırıp çatlama duyarlılığını azaltır. 4043 ilave metal, kendisinden daha yüksek magnezyum alaşımlı 5086, 5083 veya 5456 alaşımları üzerinde kullanılmamalıdır. Örneğin aşırı Mg-Si ötektikleri kaynak metali içyapısının sünekliğini azaltıp çatlama duyarlılığını artırır (Oğuz, 1990).

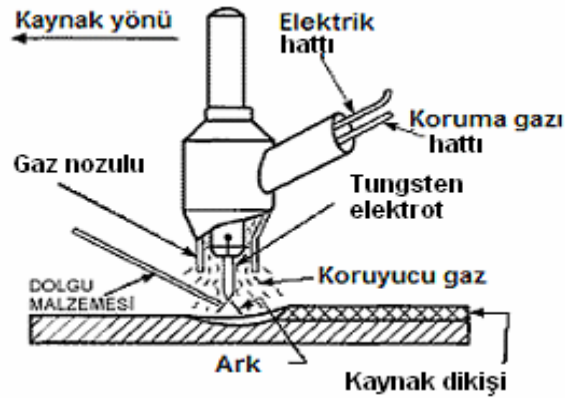
Daha yüksek kaynak hızı uygulamak; kaynak hızı arttıkça, kaynak bölgesine ısı girdisi azalır. Böylece sıcak metalle oda sıcaklığında olan metal arasındaki sıcaklık farkından oluşan gerilmeler daha az şiddetli olur. Aynı biçimde, yüksek kaynak hızlarında, herhangi bir anda sıcak çatlak aşamasında bulunan dikiş boyu kısalmış ve katılaşmış bulunan metal sıcak çatlama eğiliminde olan metali zorlayacak olan yükün bir kısmını alır. Aynı etki, sıcak çatlak eğiliminde olmayan alüminyum alaşımlarının kaynağında da faydalı olmaktadır. Bunlara ek 27 olarak da, daha yüksek kaynak hızlarında meydana gelen hızlı soğuma temposu, daha ince bir dendritik yapı oluşumuna neden olur, bu da çatlama riskini azaltır (Oğuz, 1990).

3. 1 Ergitme Kaynak Yöntemleri

3.1.1 TIG Kaynağı

TIG kaynak yöntemi günümüzde, alüminyum ve alaşımlarının kaynağında geniş çapta kullanıldığından büyük bir önem taşır. Bu konuda TIG kaynak yönteminin başlıca üstünlükleri şöyle sıralanabilir:

- Yüksek bir kaynak hızının sağlanması,
- Kaynak enerjisinin belirli bir bölgeye yoğunlaştırılması,
- Isıl çarpımların azlığı
- Mekanik özelliklerin çok iyi bir şekilde korunabilmesi,
- Sıhhatli kaynak dikişlerinin elde edilmesi
- Kaynak sonrası cüruf oluşturmadiğundan temizleme işlemine ihtiyaç göstermemesi
- Kolay bir şekilde mekanize edilmesi ve birçok pozisyonda uygulanabilmesi



Şekil 3. 2 TIG kaynak yönteminin şematik gösterimi
(<http://www.kaynak.net.com>)

Alüminyumun TIG (Tungsten Inert Gas) kaynağı doğru akım düz kutuplama (DADK) ve doğru akım ters kutuplama (DATK) veya alternatif akımla (AA) yapılabilir (Şekil 3. 2) ince kesitli kaynak edilebilir alüminyuma, ilave metallsiz TIG kaynağı uygulanabilirse de, 6061-T6 gibi bazı ısı işlem kabul eden alaşımlarda çatlama meydana gelebilir. 25 mm kalınlıktaki 28 levhalarda kaynak ağzı açılır ve

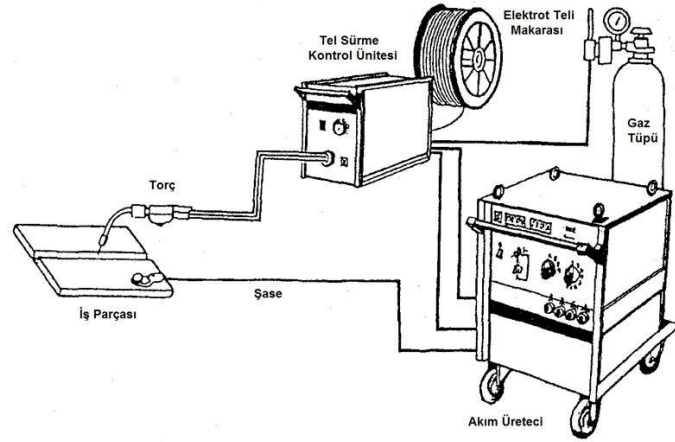
ilave metal kullanılarak kaynak edilebilir. Doğru akım düz kutup otomatik donanımı ile ilave metal kullanmadan 32 mm' ye kadar kesitler birleştirilebilir. Alüminyum kaynağında toryumlu tungsten, alternatif akımda saf tungsten kadar kararlı (stabil) ark sağlayamamaktadır. Toryumlu tungsten genellikle doğru akım düz kutuplamada otomatik kaynakta kullanılır. Alüminyumun alternatif akım kaynağı için elektrotlar 0.25 mm' den 6. 3 mm çapa kadar olur. Her is için uygun elektrot çapının seçilmesi önemlidir. Elektrotun kirli ve pürüzlü olması, asal gazın elektrotun soğumasından önce kesilmiş olması, üflecin içinde gaz besleme sisteminde hava sızmasının varlığı veya elektrot ucunun metale değmesiyle gerçekleşebilir. Elektrotun ucu, alternatif akımda küresel, doğru akımda ise konik şeklindedir. (Oğuz, 1990).

3.1.2 MIG (Metal Inert Gaz) Kaynağı

Şekil 3. 3' de MIG kaynak yönteminin şematik görüntüsü verilmiştir. Koruyucu gaz altında yapılan kaynak yöntemlerinden biri de MIG (Metal Inert Gas) kaynak yöntemidir. Alüminyum ve alaşımlarının ergime kaynağının çoğu MIG yöntemiyle yapılır. Bu yöntemle ısıнын etkisi altında kalan bölge elektrik ark kaynağı ve oksijenasetilen gibi kaynak yöntemlerinkinden daha dardır ve kaynak hızı daha yüksektir. Bu yöntemde doğru akım ters kutuplama (DATK) kullanılır. İmalatta 1.6 mm' ye kadar incelikte alüminyum MIG kaynağı ile birleştirilebilir (Büyükarıslan, 2006).

Alüminyum ve alaşımlarının MIG kaynak yönteminin, diğer kaynak yöntemlerine göre üstünlükleri su şekilde sıralanabilir (Saldır, 1996)

- Düzgün ve kaliteli bir kaynak dikişi ele edilir.
- Kaynak uygulaması diğer yöntemlere göre daha kolaydır.
- Kaynak sonrası aşırı bir temizliğe (cüruf oluşumu gibi) ihtiyaç yoktur.
- Koruyucu gaz kullanıldığı için kaynak bölgesi çok iyi korunur.
- Büzülme ve çekme, gaz eritme kaynağından azdır.
- Yüksek hızda kaynak yapılır. Kesintisiz sürekli dikişler elde edilebilir.
- Kalın parçaların kaynağında yüksek akım uygulanarak ön ısıtmasız kaynak yapılabilir.



Şekil 3. 3 MIG kaynak donanımı (Saldır, 2002).

3.1.3 Oksijen - Asetilen Kaynağı

Alüminyum ve alaşımlarının gaz ergitme kaynağı en eski birleştirme yöntemlerinden biri olup, her tür hafif metale uygulanabilir. Bu yöntemde, oksijen-asetilen alevi ısıyı bölgesel olarak yoğunlaştırabildiği için hidrojen-oksijen alevinden daha az çarpılmalara yol açar. Oksijen-asetilen alevinin en sıcak noktasında 3200 °C'lik sıcaklık elde edildiği için, yöntem kalın parçaların birleştirilmesinde kullanılabilir. Hidrojen-oksijen alevi de ince parçaların kaynağında kullanılabilir (2000 °C). Hidrojen-oksijen alevi Al-Mg alaşımlarında gözenekliliğe yol açar. Magnezyum alaşımlarında, ergime akısını engelleyen oksitlenme meydana gelir. Hafif metallerin kaynağında hafif, yani karbürleyici alevle çalışır. Kesinlikle oksitleyici alevden kaçınılmalıdır (Oğuz, 1990). Redükleyici asetileni fazla alev, oksit tabakasını çözmeye yetmediğinden bir dekapan kullanılması kesinlikle gereklidir. Dekapansız kaynak edilebilen döküm Al-Si alaşımları dışında, bütün hafif metal alaşımlarında dekapan kullanılması zorunludur. Kimyasal açıdan hafif metal dekapanları, alkali ve toprak-alkali metallerin (sodyum, potasyum, lityum) klorür ve flüorürlerinden oluşur (Oysu, 1996).



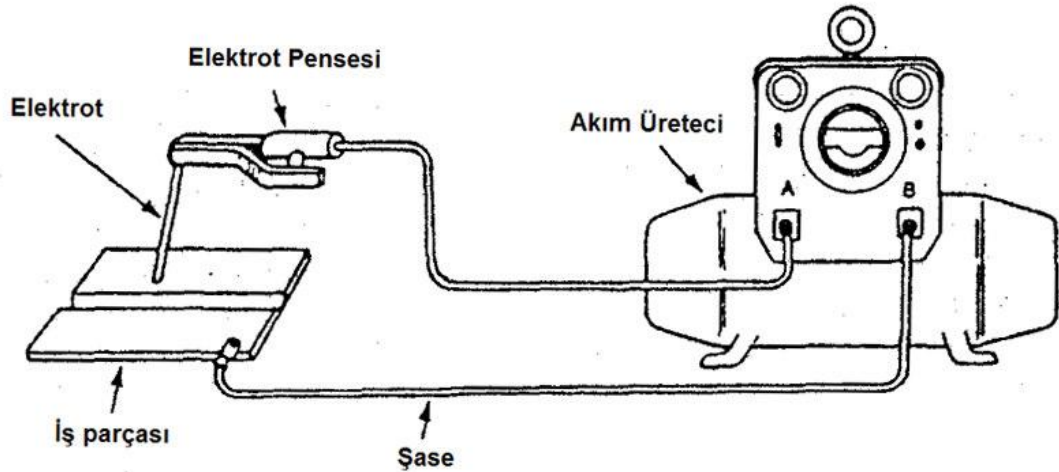
Şekil 3. 4 Oksi- Asetilen Alevi (Anık, 1993).

Diğer Kaynak Yöntemlerine Göre Avantajları:

- Basit, ucuz ve kolay bir kaynak yöntemidir
- Erişilmesi güç ve zor pozisyonlarda kaynak yapabilme özelliği
- Kalın parçaların çok pasolu kaynağında kaliteli kaynak elde edilebilmesi
- Kaynak sonucu kolay ve temizlenebilir yüzey elde edilebilmesi

3.1.4 Elektrik Ark Kaynağı

Alüminyum ve alaşımlarının örtülü elektrotla ark kaynağı diğer yöntemlere göre bazı avantajlar sağladığı için yaygın bir kullanım alanı vardır. Bu avantajlar, kullanımı basit ve kuruluş sermayesi düşüktür. Yani arada bir kaynak yapıp MIG ve TIG kaynağına yatırım yapmak istemeyen küçük atölyelerde cazip görülmektedir. Bu yöntemde, kaynak için uygun koşullardaki elektrik akımı, bu iş geliştirilmiş kaynak makinesi tarafından sağlanır. Akım, kablolar yardımıyla iş parçası ve elektrot pensesine iletilir. Kaynakçı, elektrotu penseye takar ve iş parçasına temas ettirerek arkı oluşturur (Şekil 3. 4). Arkın başlatılması, yanması, yüksekliğinin ayarı, söndürülmesi ve kaynak hızı gibi çeşitli özellikler kaynakçı tarafından ayarlanır.



Şekil 3. 5 Elektrik ark kaynağının şematik gösterimi

Avantajları

- Kaynak süresi, oksijen- asetilen kaynağına göre daha kısadır.
- Bölgesel ısınma dolayısı ile deformasyon tehlikesi azdır.
- İç köse ve bindirme kaynakları kolayca yapılır.
- Tek paso ile daha kalın kaynak dikişi elde edilir.

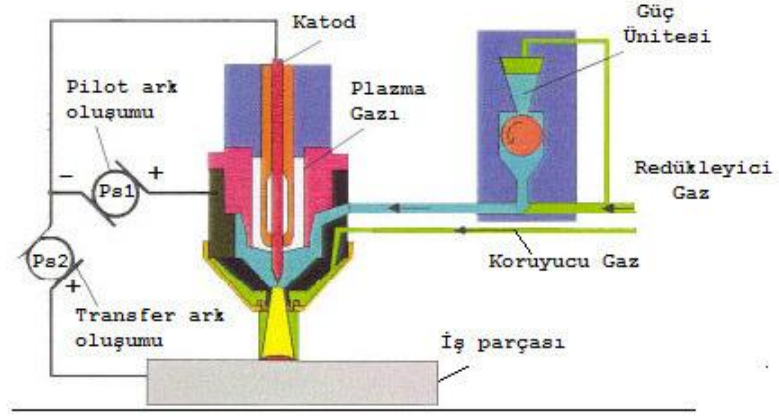
Dezavantajları

- İnce sacların kaynağının yapılamaması
- Elektrotların yanlış kullanılmasından doğan gözeneklerin oluşmasıdır
- Hızlı soğumadan dolayı esas malzeme ve kaynak içyapısının farklı olması

3.1.5 Plazma Kaynağı

Son yıllarda, alüminyum ve alüminyum alaşımlarının plazma ark kaynağı daha derin nüfuziyet, daha az kaynak ağzı hazırlığı, daha az açılmal çarpılmaya neden olacak ısı girdisi ve az sayıda paso ile kaynak ağzının doldurulabilmesi gibi üstünlüklerinden dolayı TIG kaynağına göre daha çok kullanılır konuma gelmiştir. Alın kaynak ağızlarında 8 mm' ye kadar anahtar deliğı tekniğı ile aralık bırakılmadan tek pasoda istenen özelliklere sahip kaliteli kaynak bağlantıları gerçekleştirilebilmektedir. Parça kalınlığı arttıkça, Y-alın kaynak ağzı hazırlığı gerekmektedir. Alüminyumun plazma arkı ile kaynağında, daha önceden de belirtildiğı üzere kare dalgalı alternatif akım veren akım üreteçleri kullanılarak yüzeydeki oksit filmi kırılarak kaliteli kaynak dikişleri gerçekleştirilir. Alüminyumun plazma ark kaynağı oluk, yatay ve aşağıdan yukarıya dik pozisyonda uygulanabilir. En çok kullanılan pozisyon oluk pozisyonu olmasına karşın, aşağıdan yukarıya doğru dik pozisyonda kaynak uygulamasında kaynak banyosu daha rahat kontrol edilir. Silindirik depolama tanklarının yapımında parçayı döndüren pozisyoner kullanılarak oluk pozisyonunda kaynak yapılır. Ancak, gerektiğı durumlarda örneğın, 4- 5 mm kalınlığındaki alüminyum saclardan üretilen taşıyıcı kasalarda dik pozisyonda kaynak tercih edilir. Alüminyumun kaynağında plazma gazı ve koruyucu gaz olarak

kullanılan en ekonomik gaz argondur. Ar + % 30 helyum karışım gazı koruyucu gaz olarak da daha düşük akım şiddetlerinde kullanılır ve bu gaz torç memesi (nozül) ve tungsten elektrotun kullanım ömrü açısından daha iyi sonuçlar vermektedir.



Şekil 3. 6 Plazma ark kaynağı (www.industrialmotionsystems.com)

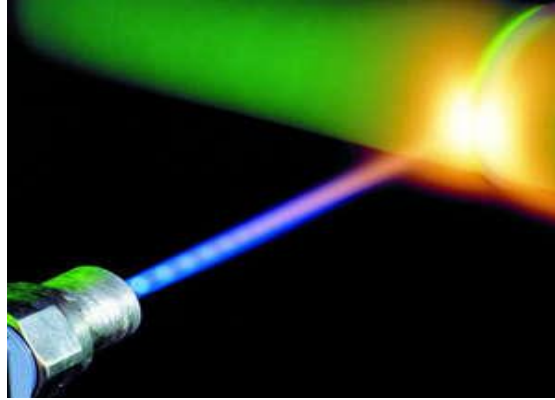
3.1.6 Lazer Kaynağı

Lazerin İngilizce kelime anlamı “Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation” (uyarılmış ışın yayınımlı ile ışık yükseltilmesi veya uyarılmış atomlardan salınan radyasyonlar yardımıyla ışık yükseltilmesi) kelimelerinin baş harflerinden oluşur.

Lazer Kaynağı, lazer ışınının birkaç mikron mertebesinde iyi odaklanabilme yeteneğinden dolayı (3400 °C) tungsten gibi yüksek sıcaklıklarda ergiyen metalleri rahatlıkla ergitebilmektedir. Lazer Kaynağı, çok dar bir kaynak bölgesi oluşturduğu için birçok avantajı da beraberinde getirmektedir. Lazer ışının dar bir alana nüfuz etmesi, dar bir kaynak bölgesinin oluşmasına neden olur. Pratikte alüminyum alaşımlarının yüksek ısı iletme özelliğinden dolayı alüminyum alaşımlarının kaynağında önemli yer tutmaktadır. (Büyükarıslan, 2006).

3.1.7 Elektron Işın Kaynağı

Al alaşımlarının çoğu elektron ışın kaynağı ile kaynak edilebilir. Ancak 6061, 2004 ve 7075 gibi ısı işlem kabul eden bazı alaşımlarda çatlamaya rastlanabilir. Belli bir ısı girişi ile kaynak edilebilen kalınlıklar geniş ölçüde değişir. Böylece belli bir makine 5083 alaşımından 130 mm, 2219 alaşımından ise sadece 50 mm kalınlığı kaynak edebilir. Küt alın birleştirmesi 150 mm kalınlığa kadar kullanılmıştır. Kalın kesitlerin tek pasoda kaynağında bütün kalınlık genişliğince aynı kaynak genişliğini tutmak uygun olur. Böylece iyi bir kök ergimesi ve minimum kusur sağlanmış olur (Oğuz, 1990).



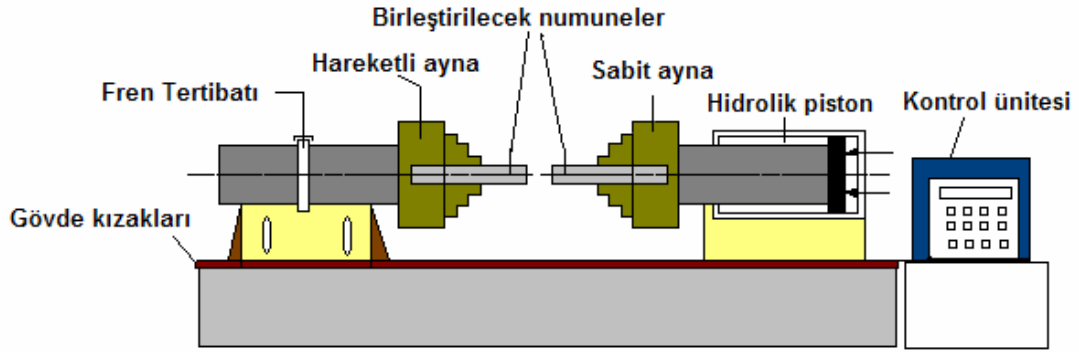
Şekil 3. 7 Elektron Işın Kaynağı ile kaynak edilen bir profil (www.buzlu.org)

3. 2 Katı Hal Kaynak Yöntemleri

3.2.1 Sürtünme Kaynağı

Sekil 3. 7' de sürtünme kaynak yönteminin şematik görüntüsü verilmiştir. Sürtünme kaynağı; biri sabit, diğeri hareketli iki silindirik parçanın, alın yüzeylerinin eksenel basınç yardımıyla birbirlerine sürtünmesi sonucu ortaya çıkan sürtünme ısısı altında yapılan bir katı hal kaynak yöntemidir. Bu kaynak yönteminde kullanılan en önemli parametreler; devir sayısı, sürtünme süresi, sürtünme basıncı, yığma süresi ve yığma basıncı olarak sıralanabilir. Sürtünme kaynağı uygulanmadan malzemelerin alın olarak belirlenen yüzeylerinin yağ, pas ve kirden arındırılması; kaynak kalitesi açısından büyük önem arz etmektedir. Normal olarak kaynak edilemez diye bilinen,

bazı yüksek mukavemetli ısıl işlem kabul eden alüminyum alaşımları, sürtünme kaynağı ile birleştirilebilirler. Mukavemette bir kayıp olmadığı gibi kaynak bölgesi tamamen sünek olur. Bu yöntemde malzemelerin ergimesi için gerekli olan enerji kullanımına ihtiyaç olmadığından maliyetten ve işçilikten tasarruf sağlanır (Özdemir, 2002).



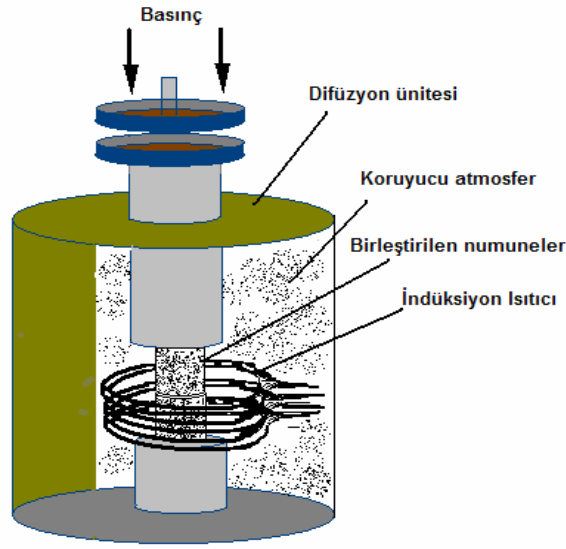
Şekil 3. 8 Sürekli tahrikli sürtünme kaynağının şematik resmi

Sürtünme kaynağında, birleşme bölgesinde meydana gelen mikro yapısal değişiklik dört bölge ayırt edilerek incelenir. Bunlar; birleşme ara yüzeyindeki temas alanı, tamamen deformasyona uğramış bölge, kısmen deformasyona uğramış bölge ve deformasyona uğramamış bölge olarak tanımlanır.

3.2.2 Difüzyon Kaynağı

Sekil 3. 8' de difüzyon kaynak yönteminin şematik görüntüsü verilmiştir. Difüzyon kaynağı, bir katı hal birleştirme kaynağıdır. Birleştirilmek üzere eşleşmiş aynı veya farklı iki malzemenin ergime sıcaklıkları altındaki bir sıcaklıkta, malzemelerde tespit edilebilir plastik akmaya neden olmayacak bir basınç altında, malzeme çifti arasında metalik bağ oluşacak bir sürede tutulmasıyla yapılan kaynak yöntemi olarak tarif edilir (Orhan, 1996). King ve Tanuma tarafından önerilen difüzyon mekanizması üç safhadan oluşmaktadır; Birinci aşamada, plastik deformasyon ve sürünme ile yüzey teması artırılır. İkinci aşamada, birinci safhada yok edilemeyen arakesit boşluklarını difüzyon yoluyla yok edilir. Burada hakim mekanizma tane sınırı difüzyonudur. Üçüncü aşamada ise, arakesitteki tane sınırları göçer ve temas alanı artar (Özdemir, 2002; Orhan, 1996).

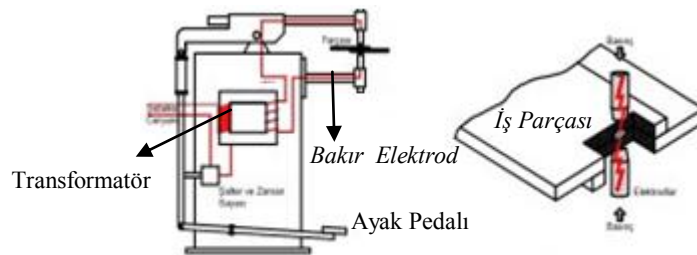
Alüminyumun difüzyon kaynağında ara tabaka kullanılmayan difüzyon kaynaklarının çoğu 450-500°C arasında ve 4 saate kadar çıkan sürelerde yapılır. Fakat bu işlemde ara bölgede oluşan oksit tabakası birleşebilirliği olumsuz etkilemektedir. Bunun için sıvı faz difüzyon işlemi (TLP) tercih edilir. Bu yöntemde, ara bölgeye daha düşük ergime dereceli ilave metal yardımıyla oksit tabakanın oluşumu önlenabilmektedir.



Şekil 3. 9 Difüzyon kaynak seti

3.2.3 Direnç Kaynağı

Direnç kaynağı, iş parçalarından geçen elektrik akımına karşı iş parçalarının gösterdiği dirençten sağlanan ısı ve aynı zamanda basıncın uygulanmasıyla yapılan bir kaynak yöntemidir. Malzemeden geçen elektrik akımının doğurduğu ısının dışında, herhangi bir ısı uygulanmamaktadır. Isı, kaynak edilecek kısımlarda oluşur ve basınç kaynak makinesindeki elektrotlar ya da çeneler aracılığıyla uygulanır (Anık, 1996).



Şekil 3. 10 Punto kaynak makinesi temel bileşenleri

BÖLÜM DÖRT

SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAĞI

4. 1 Kaynak Yönteminin Tanımı

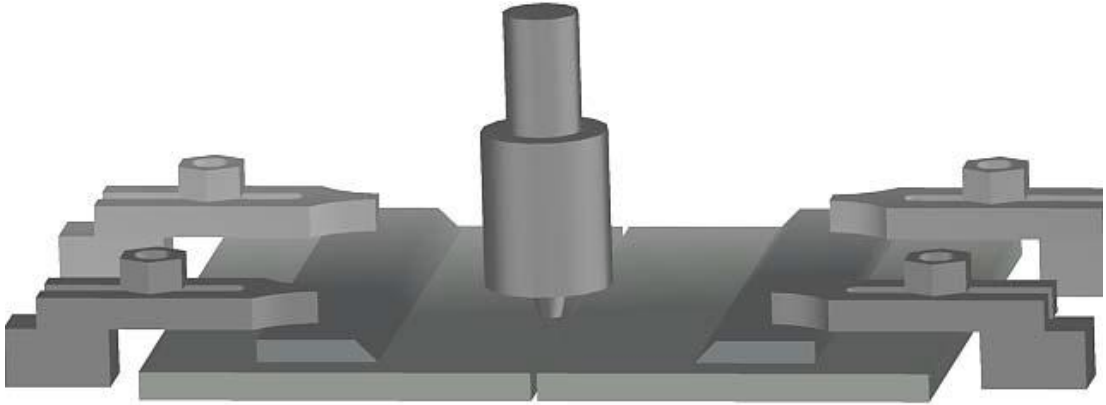
Sürtünme karıştırma kaynak yöntemi, geniş uygulama alanına yayılmış ve farklı geometrilerde kaynak olanağı sağlayan, 1991 yılında İngiliz Kaynak Enstitüsü'nde (TWI), W. Thomas tarafından icat edilen ve geliştirilmeye devam edilen bir katı hal kaynak yöntemidir. Günümüze kadar İngiliz Kaynak Enstitüsü'nde alüminyum ve alüminyum alaşımları için bu kaynak yöntemi ile oluşturulacak birleştirmeler üzerinde birçok araştırma yapılmıştır. Bu çalışmaların sonuçları, bu yöntemin gerek yaşlandırma sertleşmesi yapılmış gerekse yaşlandırma sertleşmesi yapılamayan (1xxx ve 5xxx serileri gibi) alüminyum ve alaşımlarında başarılı ve güvenli bağlantıların ortaya çıktığını göstermiştir. Ayrıca bakır-bakır alaşımları, kurşun-kurşun alaşımları, titanyum-titanyum alaşımları, magnezyum-magnezyum alaşımları, metal matrisli alüminyum kompozitlerde de bu yöntemin uygulanmasına başlanmıştır (Çam, 2002).

Sürtünme karıştırma kaynağı, sürtünme kaynak yönteminin geliştirilmiş farklı bir uygulamasıdır. Bilindiği gibi sürtünme kaynağı genellikle silindirik kesitli malzemelere uygulanan ergitmesiz kaynak yöntemidir (Özsoy, 2002).

Özellikle kaynak yapılması zor olan alüminyum alaşımlarının birleştirilmesinde sürtünme karıştırma kaynağı performansı geliştirilerek araştırmalar sanayinin ilgisini alüminyum alaşımları üzerine yoğunlaştırmıştır. Bu kaynak yöntemi 1 mm' den az ve 35 mm' den kalın olan ve kaynaklanamaz olarak düşünülen alüminyum alaşımlarına uygulanmış ve çok iyi mekanik özellikler elde edildiği araştırmacılar tarafından bildirilmektedir (Özdemir, 2003).

4. 2 Kaynak Yönteminin Uygulanışı

Sürtünme karıştırma kaynağının uygulanışı temelde basittir. Öncelikle kaynak sırasında oluşan titreşim ve hareketleri engelleyebilmek için birleştirilecek levhaların bir mengene ya da tutucu pabuçlar yardımıyla iyice sabitlenmesi gerekir. Çünkü birleştirme esnasında iş parçaları yukarıya doğru, yana doğru kaymaya ve ileriye doğru itilmeye maruz kalacaktır. Yöntemin uygulanabilmesi için sürtünme ısını ve karışımı sağlayabilecek karıştırıcı uca ihtiyaç vardır. Freze pensine bağlanan karıştırıcı uç önceden belirlenmiş bir devirde döndürülür ve kaynak yapılacak levhalara daldırılır. Özel tasarlanmış pime sahip karıştırıcı uç ve omuzu; düzlem boyunca dönme hareketi yaparak levhaları gerekli sürtünme ısısına ulaştırır ve doğrusal hareketle de iki levha arasındaki birleşmeyi sağlar. Karıştırıcı uç takımı, iki görev üstlenmektedir. Bunlardan birisi malzemeyi ısıtarak gerekli sıcaklığına getirmek, diğeri ise doğrusal hareket temin edip karıştırma yaparak iki levhanın birleşmesini sağlamaktır. Şekil 4. 1’de görüldüğü gibi karıştırıcı uç pimi etrafındaki malzeme, sürtünmeyle ısınıp yumuşayarak pimin ucundan arka yüzeye doğru karıştırılır ve karıştırılan malzeme soğuyarak katılaşır (Özarpa, 2005).



Şekil 4. 1 Sürtünme karıştırma kaynak yönteminin aşamaları

Alüminyum yüzeyinde oluşan oksit tabakası da plastik deformasyonla kırılmaktadır. Bu yüzden yöntemin uygulanışı sırasında koruyucu gazı ihtiyaç duyulmaz. Tüm bu olaylar alaşımın ergime noktası altındaki bir sıcaklıkta gerçekleşir. Alüminyum alaşımları farklı kimyasal ve mekanik karakteristiklere

sahiptir. Kaynak yapmadan önce, işlem değişkenlerinin mutlaka belirlenmesi gerekmektedir. Bunlar alaşım çiftlerine göre farklılıklar göstermektedir. Kaynak işlemi zor olan alüminyum alaşımlarının birleştirilmesinde, yöntemin performansı ve üstünlükleri sanayinin ilgisini çekerek, yöntemle ilgili yapılan araştırmalar yaygınlaştırılmıştır. Bu kaynak yönteminin 1 mm' den daha az ve 35 mm' den kalın olan ve kaynatılamaz olarak düşünülen alüminyum alaşımlarına başarıyla uygulandığı ve araştırmacılar tarafından ortaya konulmuştur. (Özdemir, 2003).

4. 3 Kaynağın İşlem Karakteristiklerini Etkileyen Faktörler

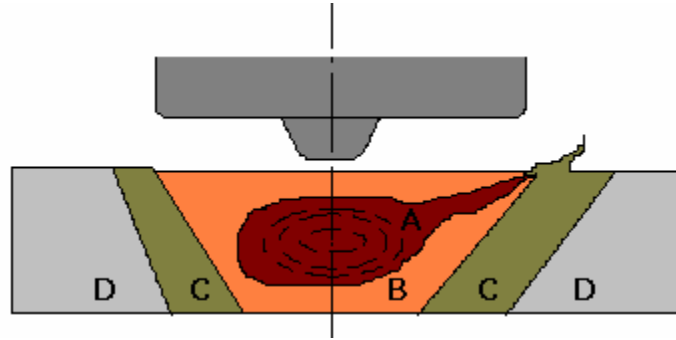
Sürtünme karıştırma kaynak yönteminde, yapılan kaynaklarda birleşme özelliklerini etkileyen dört faktör vardır. Bunlardan birincisi karıştırıcı uç geometrisidir. Seçilen uç profili birleşme bölgesindeki malzemelerin karışma kabiliyetlerini doğrudan etkilemektedir. Malzemelerin plastik deformasyonla karıştırılması ve malzeme akışı, mekanik özellikler üzerinde önemli sonuçlar doğurmaktadır. İkincisi karıştırıcı ucun devir sayısı ve ilerleme hızı olup, bu değişkenlerin her ikisi de kaynağın sürtünme sıcaklığını etkilemekte ve böylece kaynak bölgesinin metalürjik özelliklerinin değişmesine yol açmaktadır. Üçüncüsü; birleştirilen alaşım çiftleri olup, ergime sıcaklıkları ve mekanik özellikleri birbirine yakın malzemeler daha iyi birleşme özellikleri göstermektedir. Son olarak da, karıştırıcı ucun batma derinliği önemlidir. Diğer üç faktörün kontrol edilmesi kolay olmakla beraber, ucun batma derinliği kritik bir faktördür ve kontrol edilmesi güçtür. Batma derinliğinin kaynak süresince sabit kalması gerekmektedir. Fakat özellikle uzun levhaların birleştirilmesi işlemlerinde yüzeylerin çok düzgün olmaması durumunda bunu sağlamak mümkün olmayabilir. Bu nedenle kaynak öncesi yüzey hazırlama oldukça yararlıdır ve bunun için özen gösterilmesi gerekmektedir (Çam, 2002).

Kaynağın işlem karakteristiklerini etkileyen faktörler

1. Karıştırıcı uç geometrisi
2. Devir sayısı ve ilerleme hızı
3. Karıştırıcı ucun batma derinliği

4. 4 Kaynağın Metalürjik Yapısı

Sürtünme karıştırma kaynağı, ergime derecesinin altında birleştirmeler üreten bir katı hal kaynak yöntemidir. Bu yöntemde ısıdan etkilenen bölge, ergitme kaynak yöntemleriyle karşılaştırıldığında yüksek sıcaklık oluşmadığından, oldukça dardır. Kaynak dikişinden esas metale doğru bu bölgeler sıralanırsa, bunlar; sırasıyla dinamik olarak yeniden kristalleşen bölge (DKB), termo mekanik etkilenen bölge (TEB), ısıdan etkilenen bölge (IEB) ve esas malzemeden oluşmaktadır. Şekil 4. 2’de sürtünme karıştırma kaynağı uygulanan alüminyum alaşımının mikro yapısındaki farklı bölgeler görülmektedir.



Şekil 4. 2 Sürtünme karıştırma kaynağı uygulanan alüminyum alaşımının mikro yapısı

A Bölgesi (DKB): Dinamik olarak tekrar kristalleşen bölge

B Bölgesi (TEB) : Termo mekanik olarak etkilenen bölge

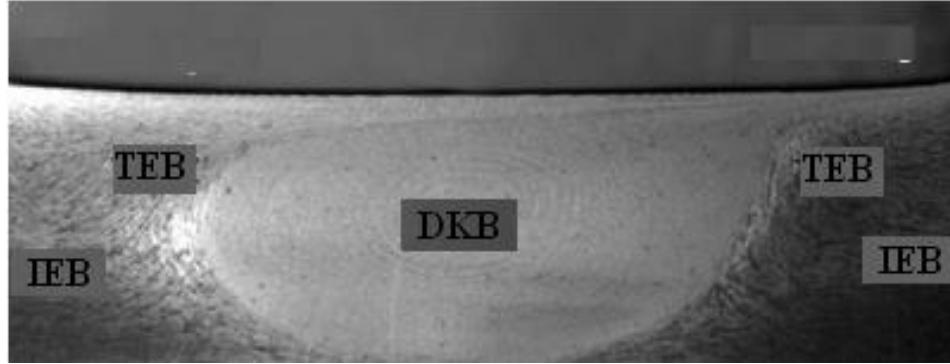
C Bölgesi (IEB) : Isıdan etkilenen bölge

D Bölgesi : Esas Malzeme

4.4.1 Dinamik Olarak Yeniden Kristalleşen Bölge (DKB)

Yoğun plastik deformasyonun olduğu ve yüksek sürtünme sıcaklıklarının meydana geldiği bu bölge “dinamik olarak yeniden kristalleşen bölge” veya “kaynak merkezi” olarak tanımlanmaktadır (Mishra ve diğ., 2003). Bu bölgede dislokasyon yoğunluğu daha düşüktür ve daha ince yönlenmiş tanelerden oluşmaktadır. Tablo 4. 1’de seçilen parametrelere göre bazı alaşımların bu bölgedeki tane boyutları özetlenmiştir. Benzer tipteki alaşımların bazı SKK uygulamalarında bu bölge soğan

halkalarından oluşan (Sekil 4.3) bir havuzu andırmaktadır (Mishra ve diğ., 2003). Benzer olmayan alüminyum alaşımlarında ise bölge, daha düzensiz ve karmaşık bir görünüm sergilemektedir (Sekil 4. 4).



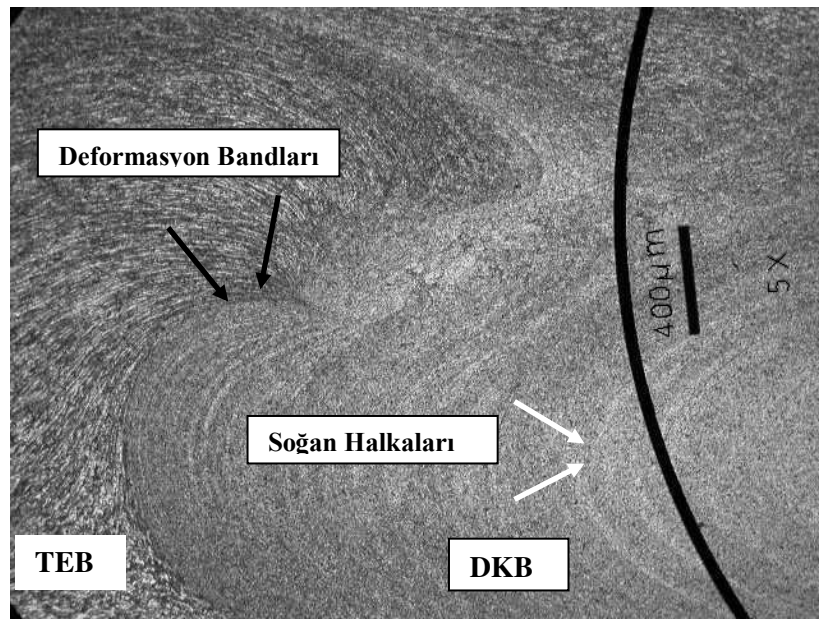
Şekil 4. 3 AA 7075 çiftinin kaynak sonrası mikro yapısal bölgeleri (Mishra ve diğ., 2003).

Tablo 4. 1 SKK uygulanan alüminyum alaşımlarında işlem parametrelerine göre (DKB)'de oluşan tanelerin boyutu (Mishra ve diğ., 2003).

Malzeme	Levha Kalınlığı (mm)	Takım Geometrisi	Devir Sayısı (Dev/dak)	İlerleme Hızı (mm/dak)	Tane Boyutu (mm)
7075Al-T6	6.35	-	-	127	2-4
6061Al-T6	6.3	Silindirik	300-1000	90-150	10
Al-Li-Cu	7.6	-	-	-	9
7075Al-T651	6.35	Vida	350-400	102,152	3.8, 7.5
1100Al	6.0	Silindirik	400	60	4
5054Al	6.0	-	-	-	6
1080Al-O	4.0	-	-	-	20
5083Al-O	6.0	-	-	-	4
2017Al-T6	3	Vida	1250	60	9-10
2095Al	1.6	-	1000	126-252	1.6
7050Al-T651	6.35	-	350	15	1-4
Al-4Mg-1Zr	10	Vida	350	102	1.5
2024Al	6.35	Vida	200-300	25.4	2.0-3.9

4.4.2 Termo mekanik Etkilenen Bölge (TEB)

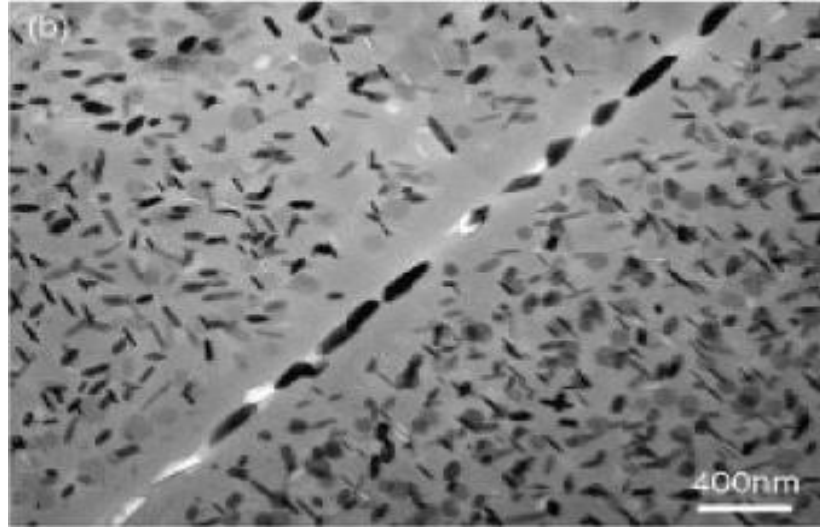
Dinamik olarak yeniden kristalleşen bölge ile ısıdan etkilenen bölge arasında, yüksek deformasyon ve sıcaklığa maruz kalan bölgeyi temsil etmektedir. Ana metalin tanelerinin kaynak merkezinden bu bölgeye ekstrüze edilmesiyle, yoğun bir dövme olayı meydana gelmektedir. Karıştırma esnasında oluşan ısı, bu bölgenin mikro yapı ve mekanik özelliklerini değiştirir. Bunun sonucunda deformasyona uğrayan taneler, uzamış ve yassılaştırmış taneler haline gelmektedir (Şekil 4. 4).



Şekil 4. 4 Al 6065 ara kesitinden alınan mikro yapı görüntüsü

4.4.3 Isıdan Etkilenen Bölge (IEB)

Kaynak metaline daha yakın, ısıdan etkilenmeyen ana metale komşu olan bölgedir. Bu bölgedeki malzeme karıştırma esnasında meydana gelen ısıdan etkilenir ve malzemenin yapı ve özelliklerinde kısmi değişimler ortaya çıkar. Bu bölgede plastik deformasyon meydana gelmez. (Mahoney ve diğ. 2001). Çökelme sertleşmesi ısı işlemi uygulanan bazı alüminyum alaşımlarında bu bölgenin sıcaklığı 250 °C'yi geçmediği takdirde taneler, esas malzemenin özelliklerini göstermektedir. Fakat 250 °C aşıldığı zaman bu bölgede tane irileşmesi ve tane sınırlarında çökeltiler meydana gelmektedir (Şekil 4.5) (Mahoney ve diğ., 2001)



Şekil 4. 5 IEB de tane sınırlarında toplanan çökeltiler (Mishra ve diğ., 2003).

4.4.4 Esas Malzeme

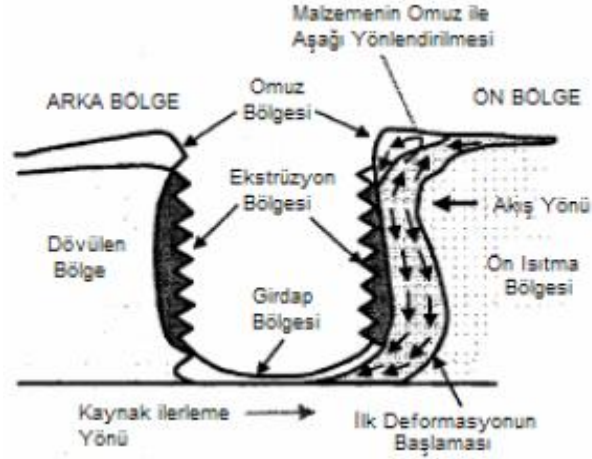
Bu bölgede, malzeme mikro yapı özelliklerinde herhangi bir değişme veya dönüşüm meydana gelmemektedir. Bu bölge kaynak metalinden oldukça uzakta olduğundan ve çok düşük sıcaklıklara maruz kaldığından karıştırma esnasında oluşan yüksek ısıdan ve plastik deformasyondan etkilenmemektedir.

4. 5 Karıştırıcı Uç Malzemesi ve Tasarımı

SKK yönteminde, yüksek sıcaklıklarda aşınma direncine sahip malzemelerden üretilen ve aşınmayan döner takımlar kullanılır. Alüminyum alaşımları için yüksek karbonlu çeliklerden imal edilen takımlar ve bazı yüksek hız (HSS) çeliklerinin kullanımı yeterli olurken, günümüzde bakır ve paslanmaz çeliklerin kaynağında yüksek sıcaklık ve aşınma derecelerine sahip sert karbür uçlara ihtiyaç duyulmaktadır. Bu konudaki gelişmeler hızla devam etmektedir ve geliştirilen takım malzemeleri ile ilgili bilgilere ulaşmak oldukça zordur (Mert ve Kaluç, 2003).

Sürtünme karıştırma kaynak tekniğinde, karıştırıcı ucun iki bölgesi kaynak işlemini gerçekleştirmektedir. Bunlardan birisi karıştırıcı uç pimi, diğeri ise karıştırıcı uç omuzudur. Bu kısımlar kaynak sırasında birleştirilecek malzemeyle

sürekli temas halindedirler. Belirli bir geometride imal edilen karıştırıcı uç pimi, kaynak esnasında yumuşayarak akıcı hale gelen malzemenin karıştırma işlemini yaparak aynı zamanda malzemenin taşınmasında ve ekstrüzyonunda etkin rol almaktadır (Şekil 4. 6).



Şekil 4. 6 SKK işleminde karıştırıcı ucun malzemedeki deformasyon evreleri (Mishra ve diğ., 2003).

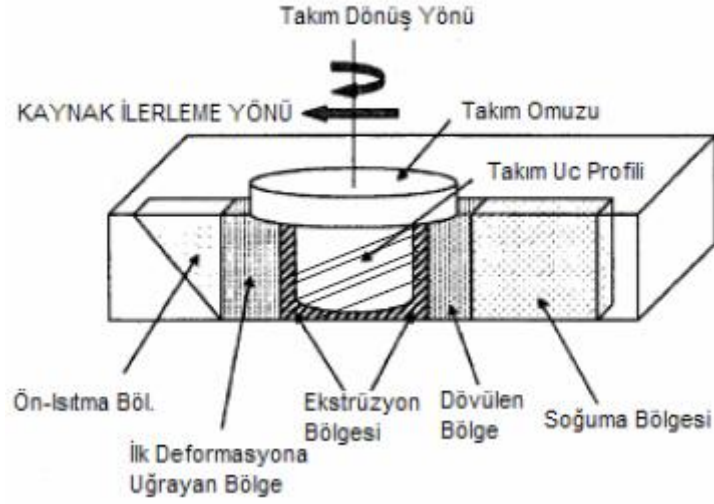
Karıştırıcı ucun uç kısmı ve pim profilleri gelişi güzel dizayn edilmezler. Levhalarda düzgün ve kaliteli kaynak formları elde etmek için, farklı şekilde tasarımlara ve profillere ihtiyaç duyulmaktadır. Sürtünme karıştırma kaynak tekniğinde birleştirme kalitesini etkileyen en önemli faktör, karıştırıcı ucun dizayn profili ve dış formudur. Bu faktörlere bağlı olarak birleştirme kalitesini değiştirmektedir. Bu nedenle en uygun ve ideal sonuçları verecek özelliklere sahip bir karıştırıcı uç seçmek oldukça önemlidir (Özdemir, 2003).



Şekil 4. 7 Farklı geometrilere sahip karıştırıcı uçlar (Zhao ve diğ., 2005).

Karıştırıcı ucun omuz bölgesinin genişliği kaynak işleminde önündeki malzemenin ön ısıtmasını sağlamaktadır. Şekil 4. 8'de karıştırıcı pim ve omuzun

malzemede yol açtığı deformasyon aşamaları görülmektedir. Ayrıca omuz iç tasarımı, kaynak esnasında yüksek basınca maruz kalarak alttan yukarı taşınan malzemenin yüzeye belirli periyotlarla sıvanmasında etkin rol oynamaktadır. Öte yandan; karıştırıcı uç omuzu, karıştırma sonucu viskoz hale gelen ve dışarıya doğru çıkmak isteyen metalin kaçışını engellemelidir.



Şekil 4. 8 SKK işleminde karıştırıcı omzunun malzemedeki deformasyon aşamaları (Mishra ve diğ., 2003).

4. 6 Yöntemin Avantajları

Sürtünme karıştırma kaynağı yönteminin başlıca üstünlükleri aşağıdaki gibi sıralanabilir.

- ✚ Enerji tasarrufu sağlayan basit bir işlem olduğundan, kaynak işlemi ucuzdur.
- ✚ Kaynak işlemi; dolgu telleri ve gazdan korunan kaynak banyosu gerektirmez.
- ✚ Bütün pozisyonlara uygundur.
- ✚ Gözenek oluşmaz.
- ✚ Hassas kaynak ağzı hazırlığına gerek yoktur.
- ✚ Koruyucu gaz ve ek metale gerek yoktur.
- ✚ Sıçrama olmaksızın düz yüzey elde edilebilir.
- ✚ Verimi yüksektir ve çok az bakım ister.
- ✚ Kaynaktan hemen sonra oksit tabakasının kaldırılmasına gerek yoktur.
- ✚ Yüksek bağlantı mukavemetleri ısıtılarak elde edilir.

4. 7 Yöntemin Dezavantajları

- ✚ Bazı alaşımlı saclarda tek pasolu kaynak hızı, diğer mekanikleşmiş ark kaynağı tekniğinden daha yavaştır.
- ✚ Her kaynak sonunda takımın piminin girdiği delik kapatılmalıdır. Bunun için alternatif kaynak tekniklerinden olan konik tapa sürtünme kaynağı kullanılmalıdır.
- ✚ Levhanın bir ucundan diğerine kaynak edilmek isteniyorsa, ileri geri hareket eden tablalara gereksinim vardır.
- ✚ İş parçaları tablaya bağlandığından, ekipmanların taşınması zordur.
- ✚ Kaynak öncesi yüzey hazırlama işlemi kritik ve önemli olup, bu hususta yeterli özenin gösterilmesi gerekmektedir (Özsoy ve Kaluç, 2002).

4. 8 Yöntemin Uygulama Alanları

- **Gemi İnşasında ve Deniz Endüstrisindeki Uygulamalar**

- Güverte, kenar, bölme ve döşeme panelleri
- Alüminyum ekstrüzyonları
- Tekne elemanları
- Helikopter platformu
- Gemi direkleri
- Soğuk hava tesisleri

- **Havacılık Endüstrisi**

- Uçakların kanat, gövde ve kuyruk takımları
- Taşıtlar için yakıt tanklarını soğutma ünitesi
- Uçuş yakıt tankları
- Askeri uçakların yan bölümlerinde yer alan yakıt tankları
- Askeri ve araştırma roketleri
- Hatalı MIG kaynaklarının tamiri.

- **Demiryolu Endüstrisi**

- Yüksek hızlı trenler
- Tren yolunun mevcut yokuşlu yerleri, pis altyapısı, tramvaylar
- Demiryolu tankerleri ve vagonlar
- Konteyner grupları

- **Otomotiv Endüstrisi**

- Motor ve şasi kızakları
- Kamyon gövdesi
- Mobil vinçler
- Zırhlı taşıtlar, yakıt tankları, karavanlar
- Otobüs ve hava taşımacılığı taşıtları
- Motosiklet ve bisiklet yapıları

- **İnşaat Endüstrisi**

- Alüminyum köprüler
- Alüminyum, kurşun veya titanyumdan yapılmış ön cephe panelleri
- Cam çerçeveleri, alüminyum nakil boruları
- Güç fabrikaları kimya endüstrisi için alüminyum reaktörler
- Sıcaklık değişimleri ve hava şartlandırıcıları

- **Elektrik Endüstrisi**

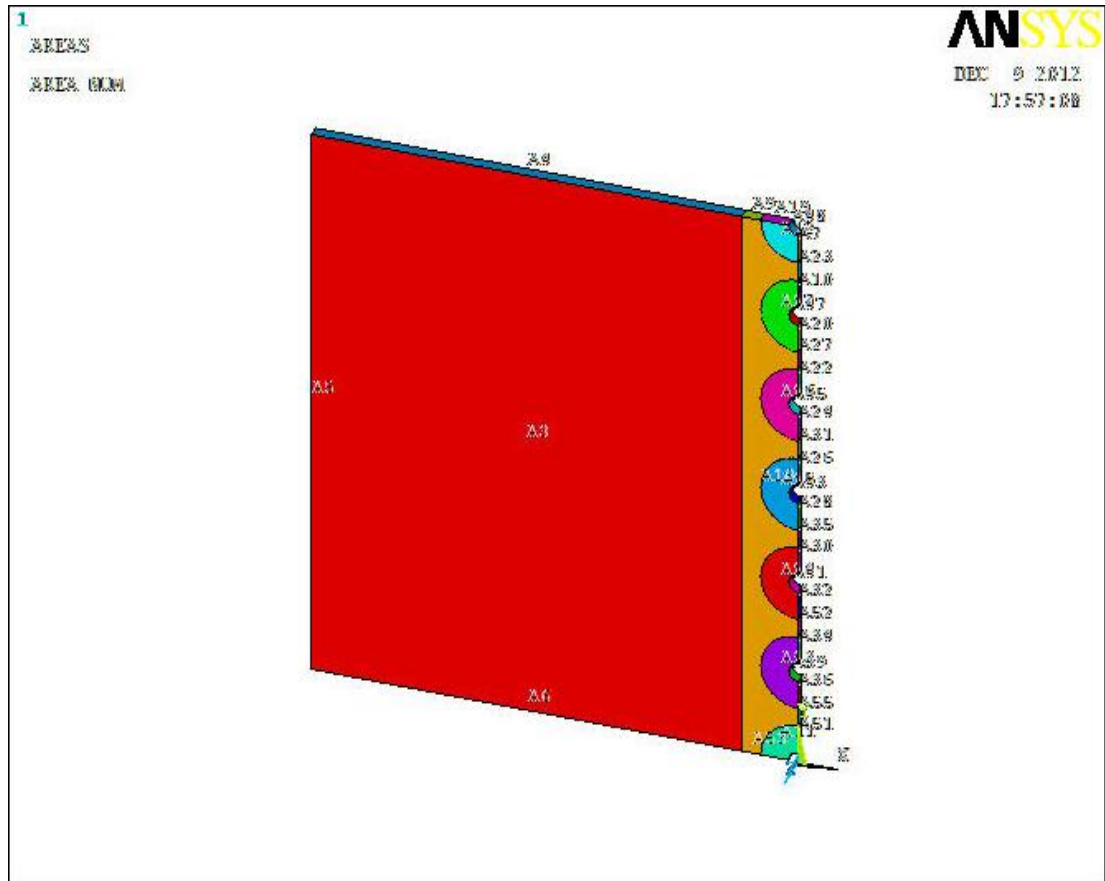
- Elektrik motorları,
- Motor dağıtma çubukları, elektrik iletkenleri.

BÖLÜM BEŞ

SÜRTÜNME KARIŞTIRMA KAYNAĞININ MODELLENMESİ

5. 1 Modelin Oluşturulması

Bu çalışmada Al-6061 ve Al-7075 alaşımlarının sürtünme karıştırma kaynağının termal ve termo mekanik analizlerinin gerçekleştirilmesi amaçlanmıştır. Termal analizler için kaynak esnası ve sonrasında ısı transferi ile ilgili bilgilerin belirlenmesi gerekmektedir. Üç boyutlu katı olarak ANSYS programı kullanılarak hazırlanan model öncelikle bölgelere ayrılmıştır. Şekil 5. 1 bu bölgeleri ve katı modeli göstermektedir.

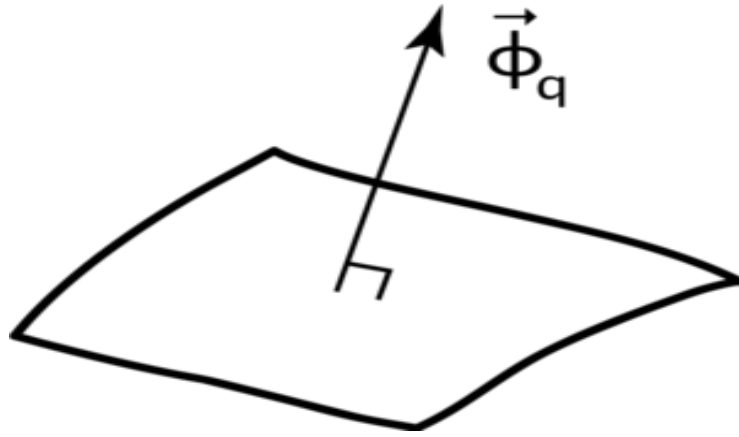


Şekil 5. 1 Üç boyutlu model ve alt bölgeler

5. 2 Termal Sınır Koşulları

Öncelikli olarak sürtünme karıştırma kaynağı süresince meydana gelen zamana bağlı sıcaklık değişimini belirlemek üzere termal analizler gerçekleştirildi. Termal analizler için, batıcı uç ile plaka arasındaki sürtünmeden ve kaynak bölgesindeki plastik deformasyondan kaynaklanan ısı akısı hesaplanmıştır (Chao ve diğerleri, 2003).

Isı akısı birim alan başına ısı oranı olup birimi $[W / m^2]$ ' dir. Isı oranı skaler bir büyüklük iken ısı akısı vektörel bir büyüklüktür. Fourier yasası bu içeriğin en önemli uygulamalarından biridir.



Şekil 5. 2 Herhangi bir yüzeyde oluşan ısı akısının vektörel gösterimi

Bilimsel olarak incelediğimizde öncelikle aşağıda gösterildiği gibi enerji denklemi yazılır:

$$\frac{\partial E_{in}}{\partial t} - \frac{\partial E_{out}}{\partial t} - \frac{\partial E_{accumulated}}{\partial t} = 0$$

Burada $\frac{\partial E}{\partial t}$ toplam enerjinin birim zamana göre değişimini vermektedir.

E_{in}: Sisteme giren enerji

E_{out}: Sistemden çıkan enerji

E_{accumulated}: Sistemde birikmiş enerji

Denklem düzenlendiğinde aşağıdaki denklem elde edilir.

$$\frac{\partial E_{in}}{\partial t} - \frac{\partial E_{out}}{\partial t} = \oint_S \vec{\phi}_q \cdot \vec{dS}$$

Bu çalışmada ısı akısı aşağıda gösterildiği gibi belirlendi.

$$q = 128 \times Q_1$$

$$Q_1 = 13,1595 \cdot \mu \cdot P \cdot r_o^3$$

Katsayılar ucun dönüş hızına bağlı olarak belirlenmektedir. Burada;

μ = Sürtünme katsayısı (0,5 olarak alındı.)

P = Basınç (100 N/ mm²) olarak kabul edildi.

r_o = Omuz yarıçapı (8 mm)

Termal analizlerde, ısı akısı dışındaki diğer sınır koşulları ise tabla ile kaynaklanan plaka arasındaki iletim yoluyla ısı transferi ve ortam ile kaynak edilen parça arasında taşınım ile ısı transferidir.

5. 3 Sayısal ve Deneysel Çalışmalarda Kullanılan Kaynak Parametreleri

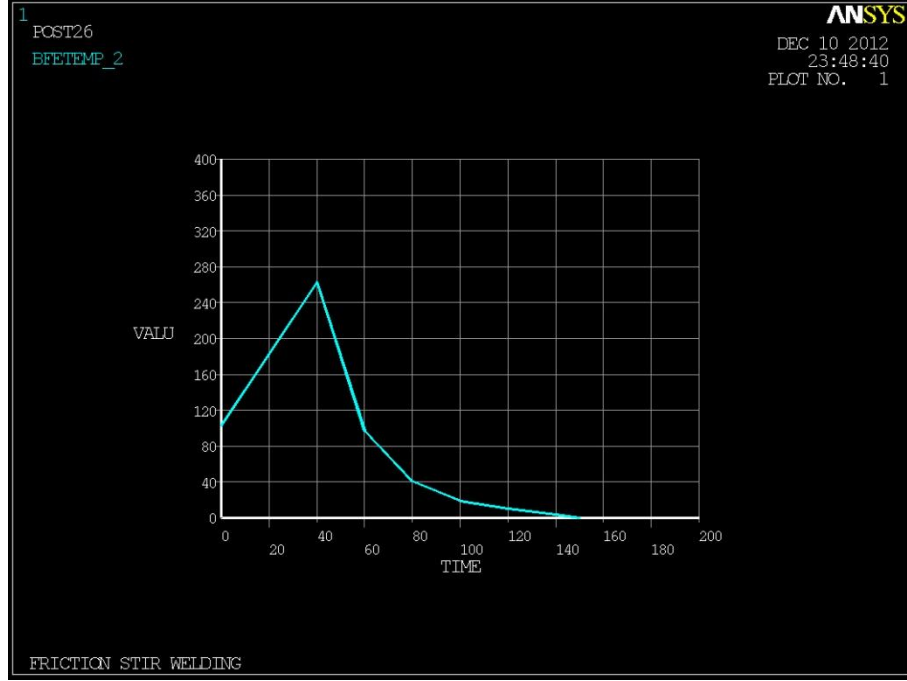
Sayısal ve deneysel çalışmalarda kullanılan kaynak parametreleri Tablo 5. 1’ de verilmiştir.

Tablo 5. 1 Kaynak parametreleri

Malzeme	Uç Profili	Bekleme Süresi (s)	Devir Sayısı (dev/dak)	İlerleme Hızı (mm/dak)	Numune Kod Numarası
A6061 A7075	Konik vidalı	20, 40, 60	1500	75	A1, B1, C1
		20, 40, 60		100	A2, B2, C2
		20, 40, 60		150	A3, B3, C3
		20, 40, 60	1750	75	A4, B4, C4
		20, 40, 60		100	A5, B5, C5
		20, 40, 60		150	A6, B6, C6
		20, 40, 60	2000	75	A7, B7, C7
		20, 40, 60		100	A8, B8, C8
		20, 40, 60		150	A9, B9, C9

5. 4 Ansys Programı ile Sayısal Çalışmalar

5. 4. 1 [N=1500 dev/dak, t= 20 s, V=75 mm/dak] için Elde Edilen Sonuçlar

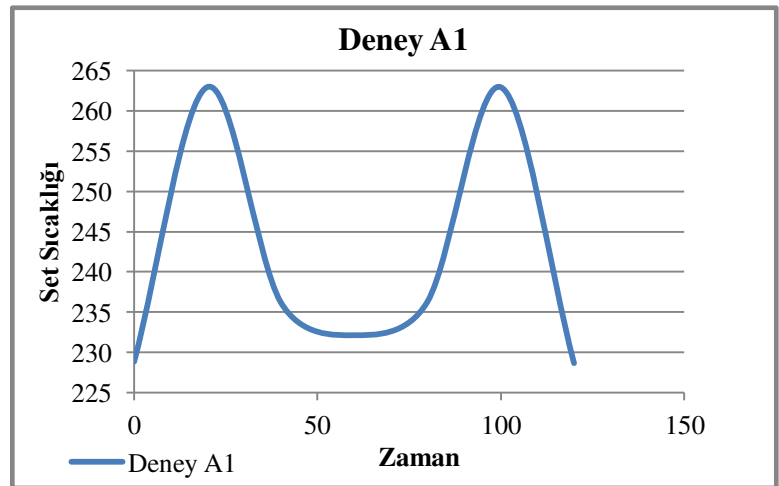


Şekil 5. 1 Deney A1 sıcaklık değişimi

Elde edilen maksimum set sıcaklıkları

Tablo 5. 2 Deney A1 set sıcaklıkları

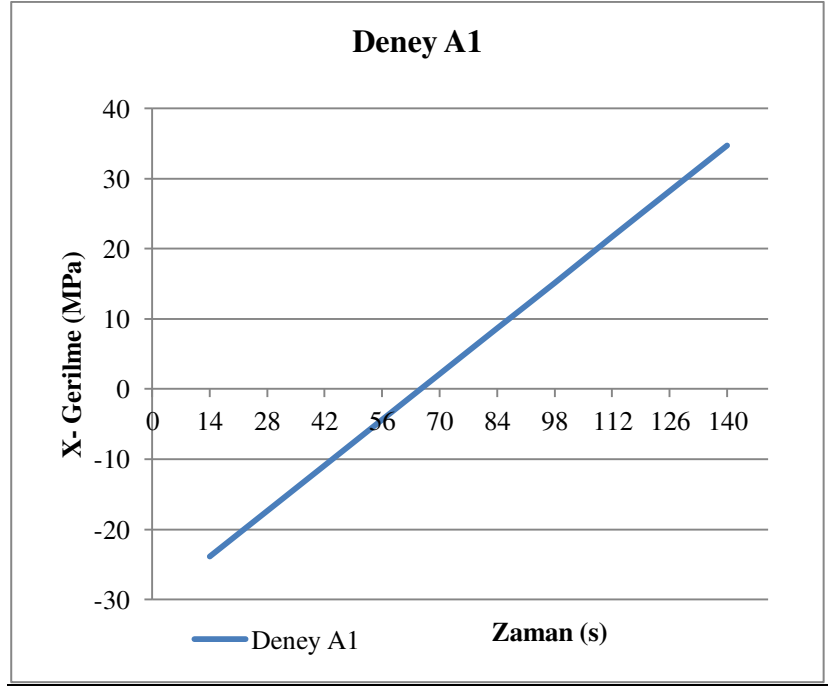
Set No	Sıcaklık Değeri (°C)
1	228,874
2	262,947
3	236,244
4	232,156
5	236,300
6	262,923
7	228,689



Şekil 5. 2 Deney A1 zamana bağlı maksimum set sıcaklıkları değişimi

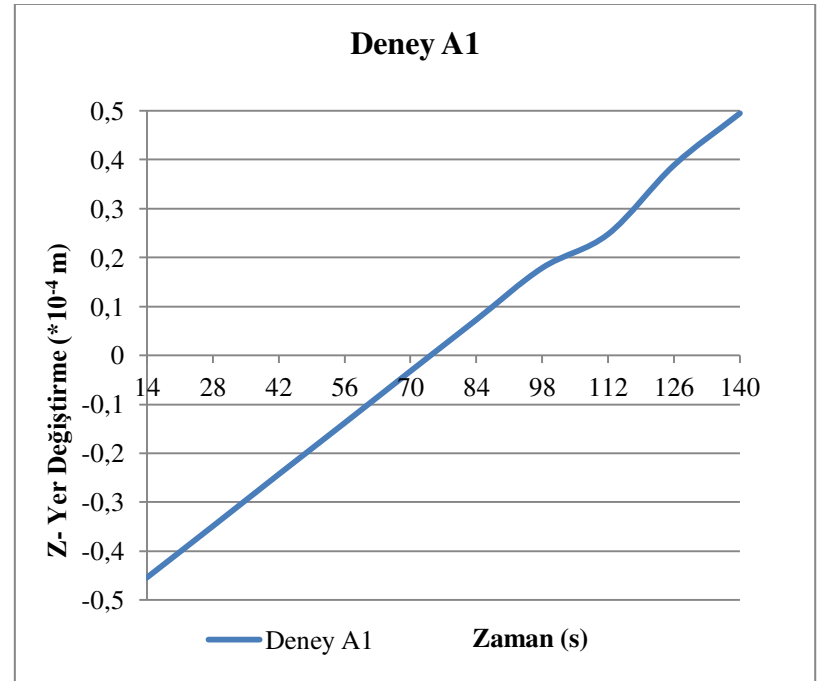
Tablo 5. 3 Deney A1 σ_x değerleri

t (s)	Gerilme (MPa)
14	-23,9
28	-17,4
42	-10,9
56	-4,38
70	2,13
84	8,64
98	15,1
112	21,7
126	28,2
140	34,7

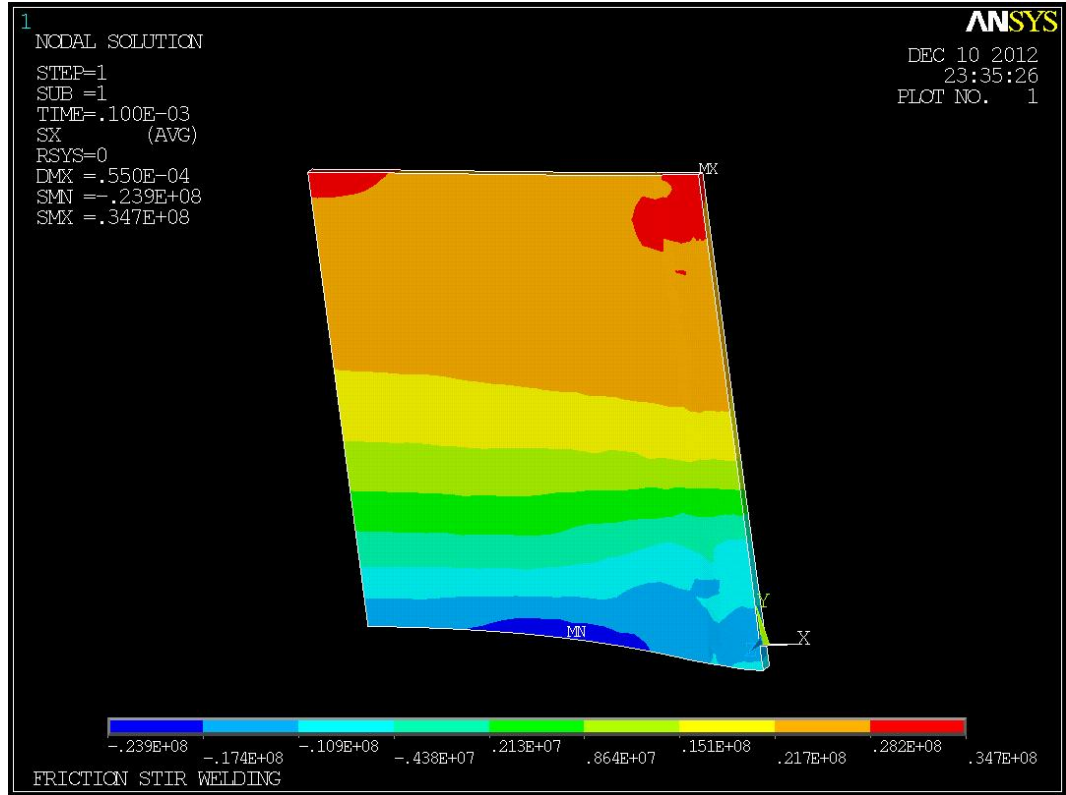
Şekil 5. 3 Deney A1 zamana bağlı σ_x değişimi

Tablo 5. 4 Deney A1 yer değiştirme değerleri

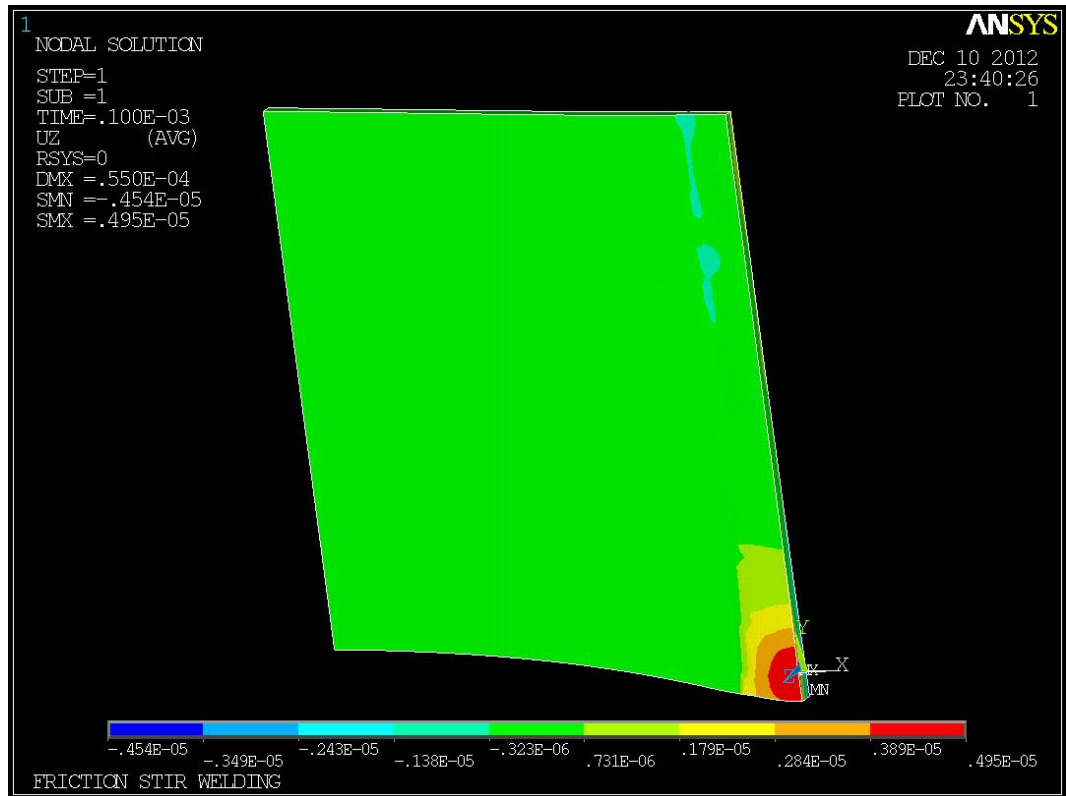
t (s)	Yer Değ. (*10 ⁻⁴ m)
14	-0,454
28	-0,349
42	-0,243
56	-0,138
70	-0,032
84	0,0731
98	0,179
112	0,248
126	0,389
140	0,495



Şekil 5. 4 Deney A1 zamana bağlı Z yönündeki yer değiştirme değişimi

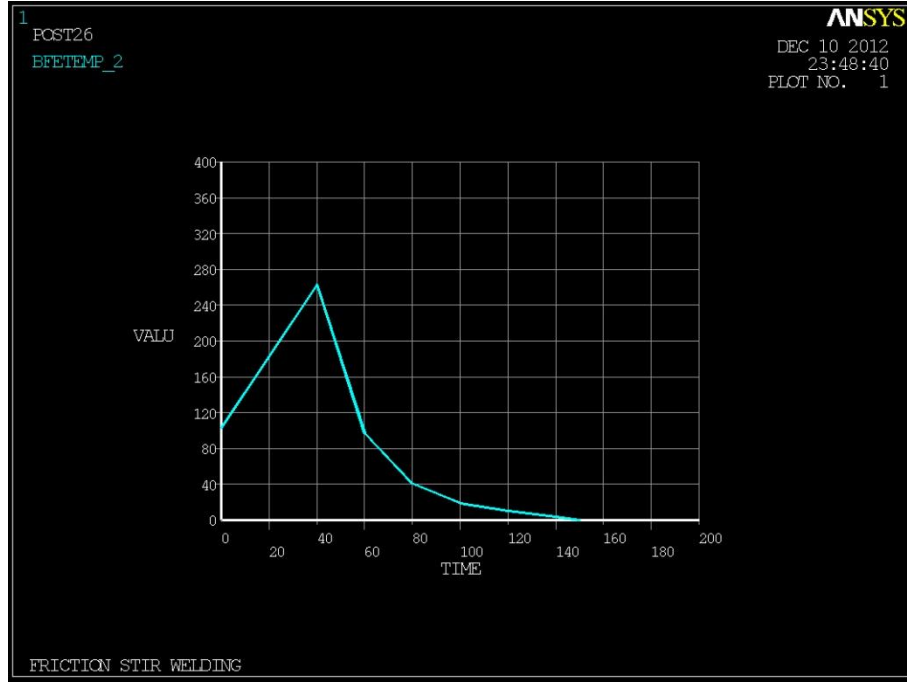


Şekil 5. 5 Deney A1 X yönündeki gerilmeler



Şekil 5. 6 Deney A1 Z yönündeki yer değiştirmeler

5. 4. 2 [N=1500 dev/dak, t= 20 s, V=100 mm/dak] için Elde Edilen Sonuçlar

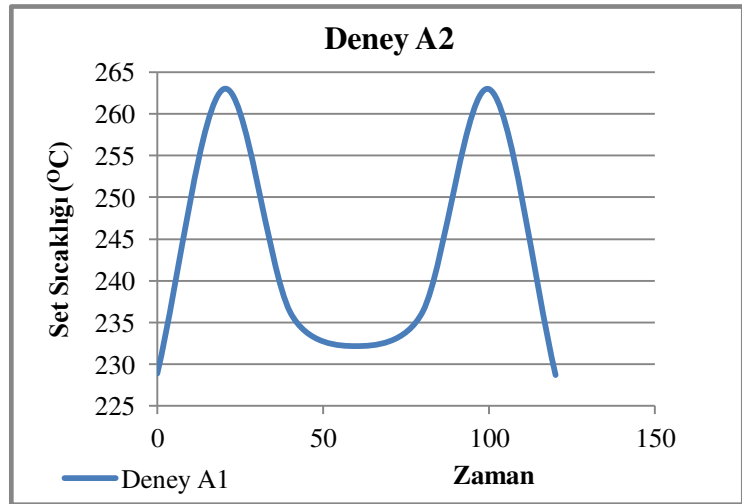


Şekil 5. 7 Deney A2 sıcaklık değişimi

Elde edilen maksimum set sıcaklıkları

Tablo 5. 5 Deney A2 set sıcaklık değerleri

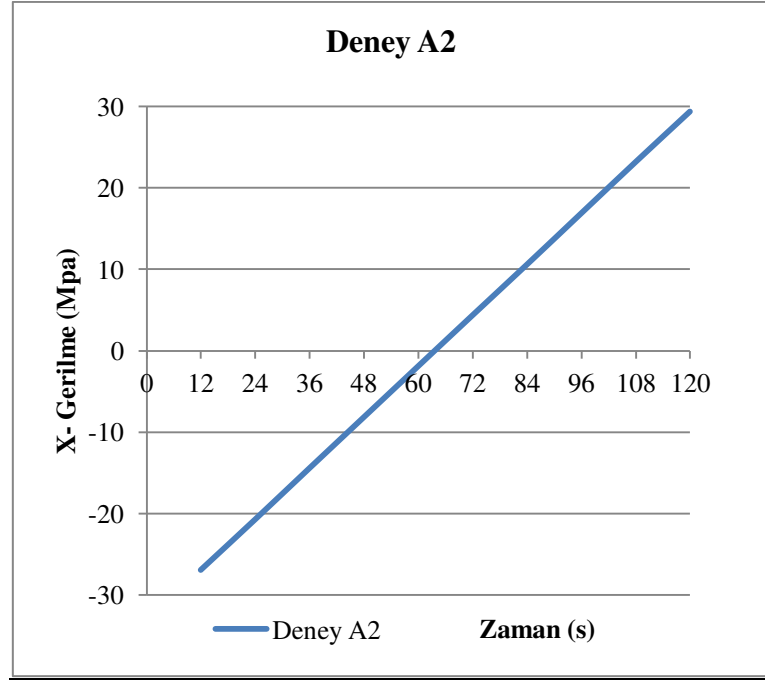
Set No	Sıcaklık Değeri (°C)
1	228,874
2	262,947
3	236,244
4	232,156
5	236,300
6	262,923
7	228,689



Şekil 5. 8 Deney A2 zamana bağlı maksimum set sıcaklıkları değişimi

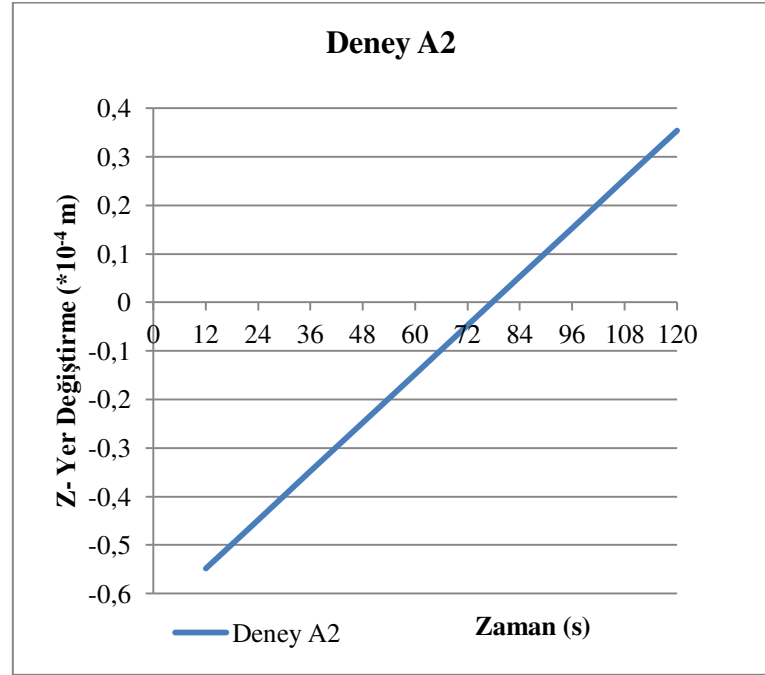
Tablo 5. 6 Deney A2 σ_x değerleri

t (s)	Gerilme (MPa)
12	-26,9
24	-20,7
36	-14,4
48	-8,14
60	-1,88
72	4,38
84	10,6
96	16,9
108	23,2
120	29,4

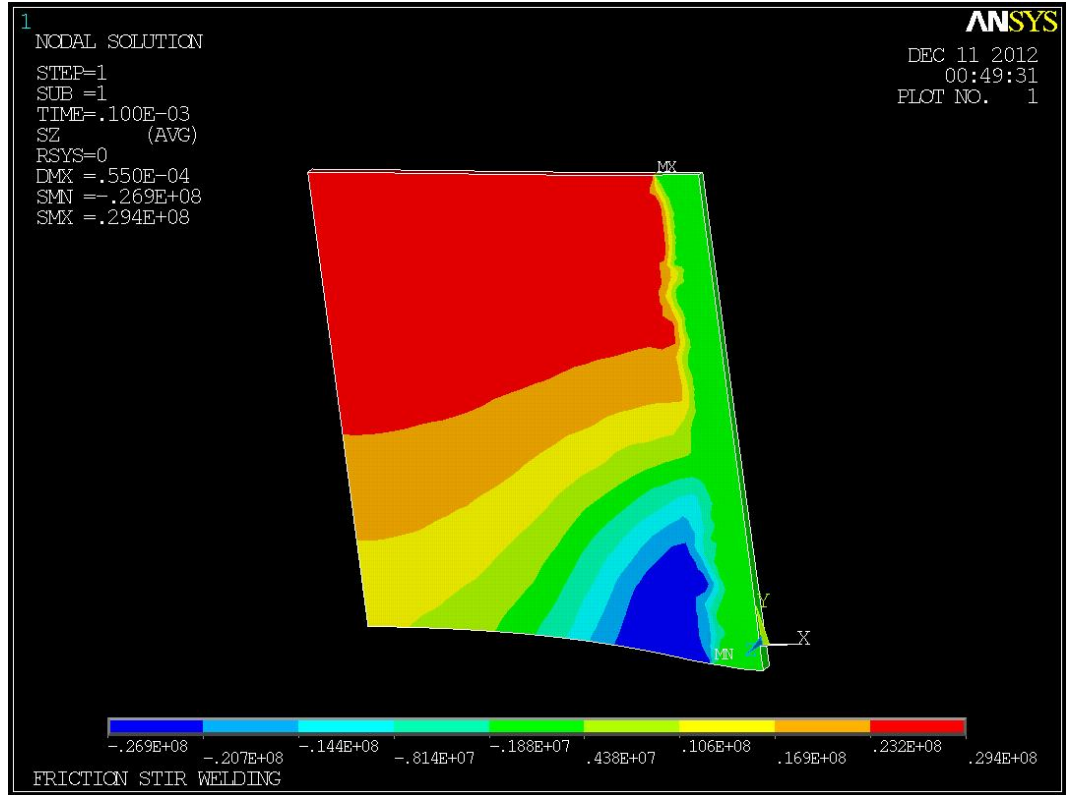
Şekil 5. 9 Deney A2 zamana bağlı σ_x değişimi

Tablo 5. 7 Deney A2 yer değiştirme değerleri

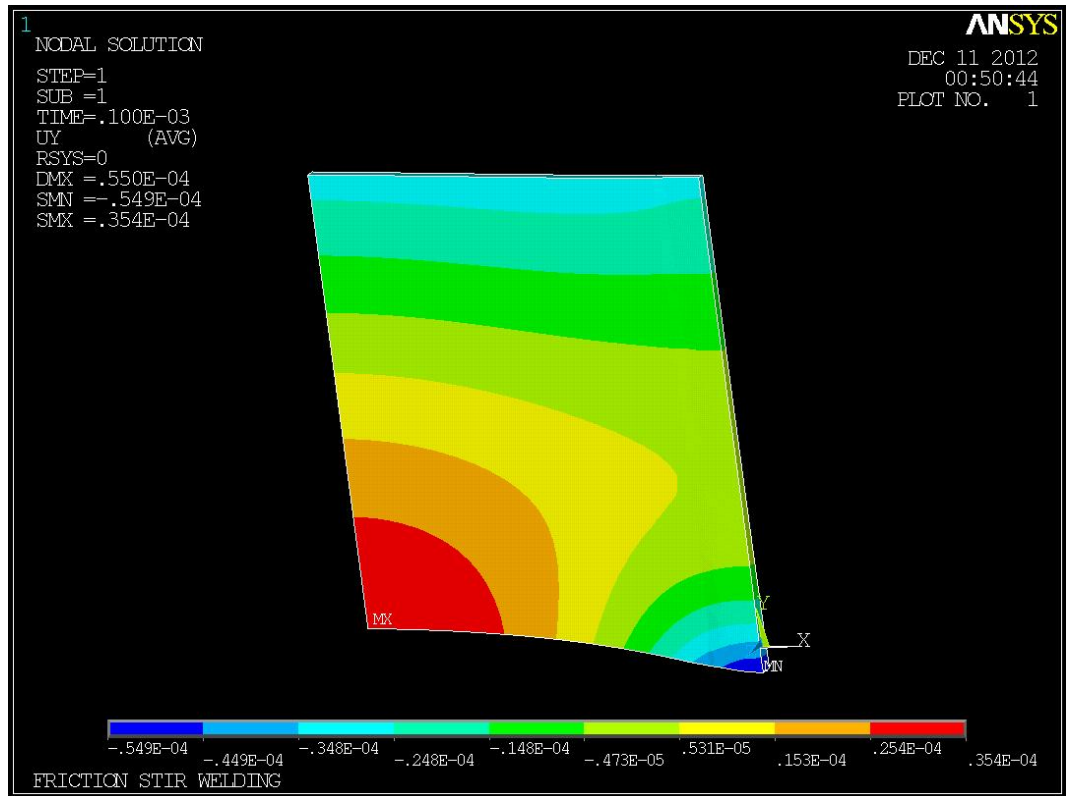
t (s)	Yer Değ. (*10 ⁻⁴ m)
12	-0,549
24	-0,449
36	-0,348
48	-0,248
60	-0,148
72	-0,0473
84	0,0531
96	0,153
108	0,254
120	0,354



Şekil 5. 10 Deney A2 zamana bağlı Z yönündeki yer değiştirme değişimi



Şekil 5. 11 Deney A2 X yönündeki gerilmeler

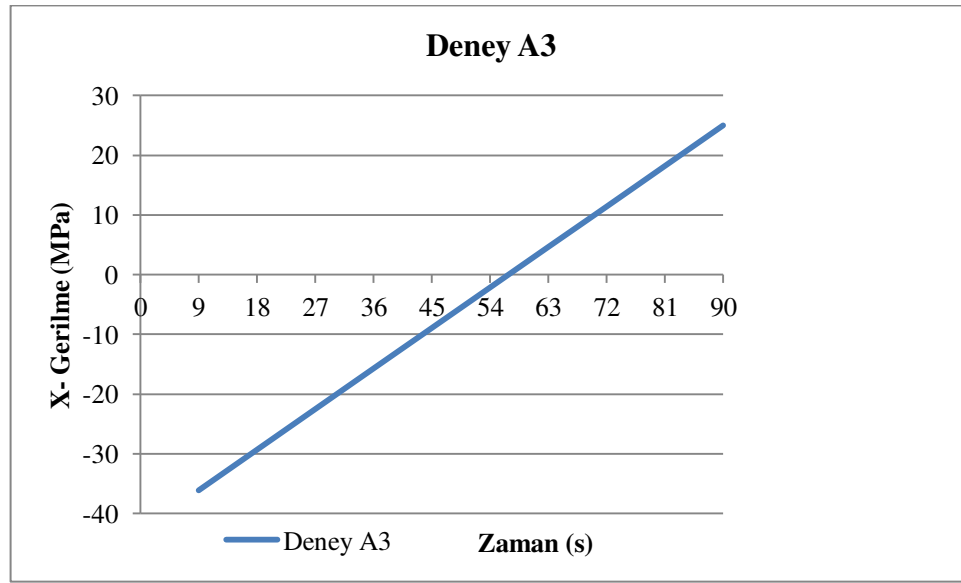


Şekil 5. 12 Deney A2 Z yönündeki yer değiştirmeler

5. 4. 3 [N=1500 dev/dak, t= 20 s, V=150 mm/dak] için Elde Edilen Sonuçlar

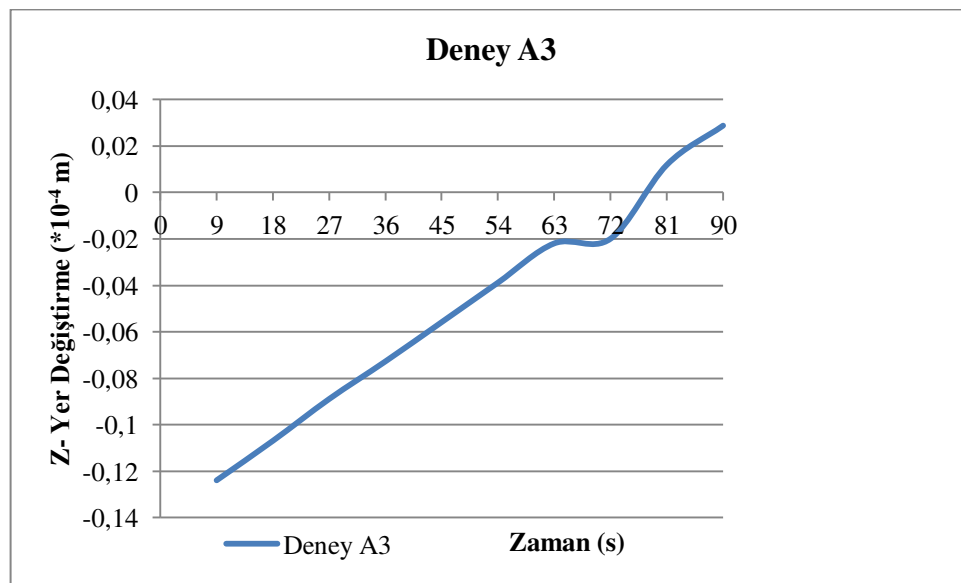
Yapılan analizler sonucunda ilerleme hızının set sıcaklıkları ve sıcaklık üzerinde bir etkisinin olmadığı görüldü. Bundan dolayı tekrardan aynı analiz sonuçlarını koymak istemiyorum.

X yönündeki gerilmeler

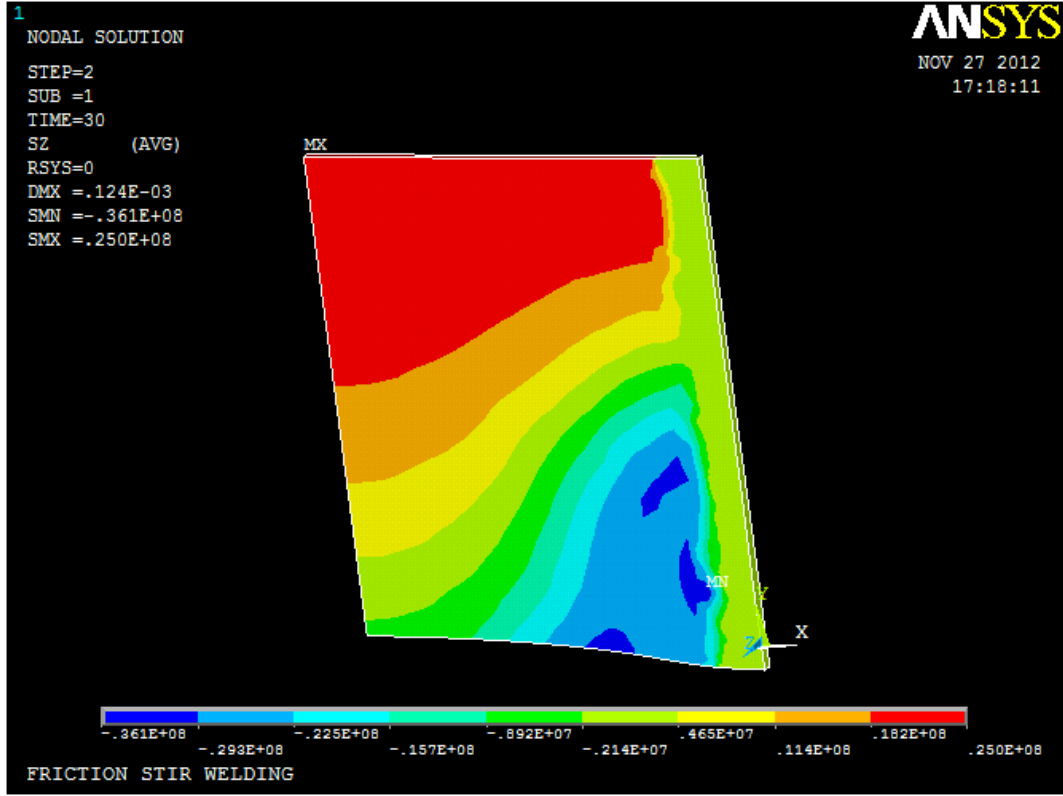


Şekil 5. 13 Deney A3 zamana bağlı σ_x değişimi

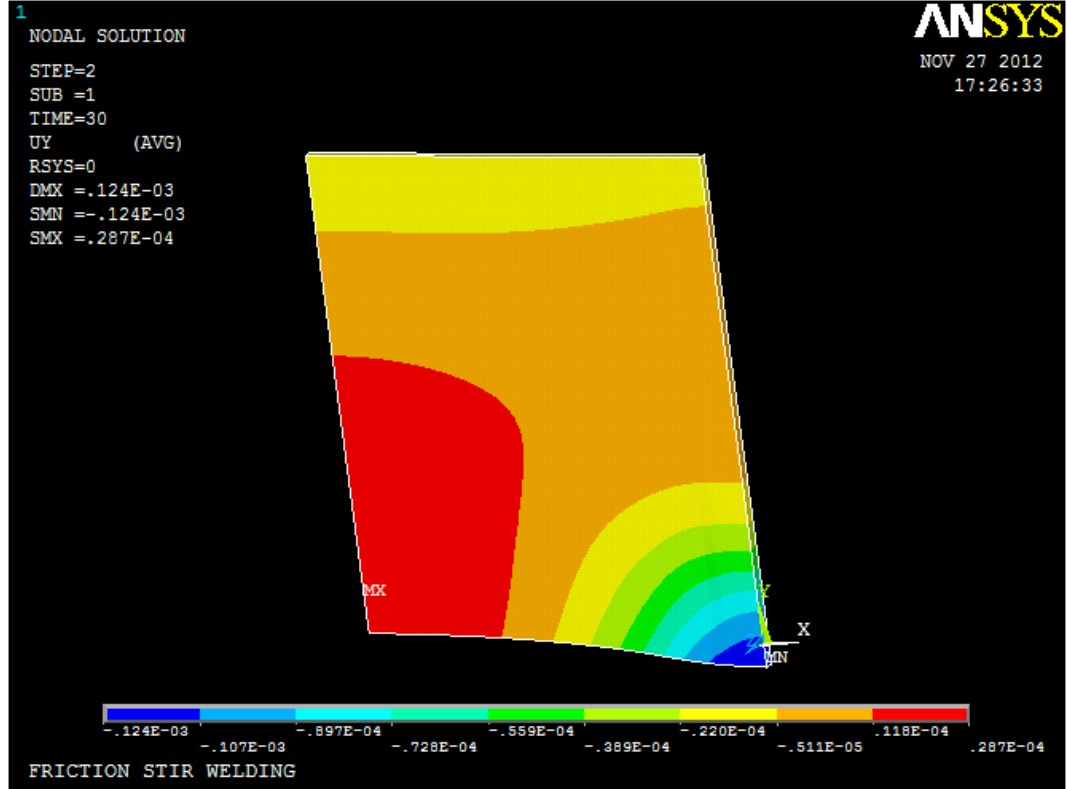
Z yönündeki yer değiştirmeler



Şekil 5. 14 Deney A3 zamana bağlı Z yönündeki yer değiştirme değişimi

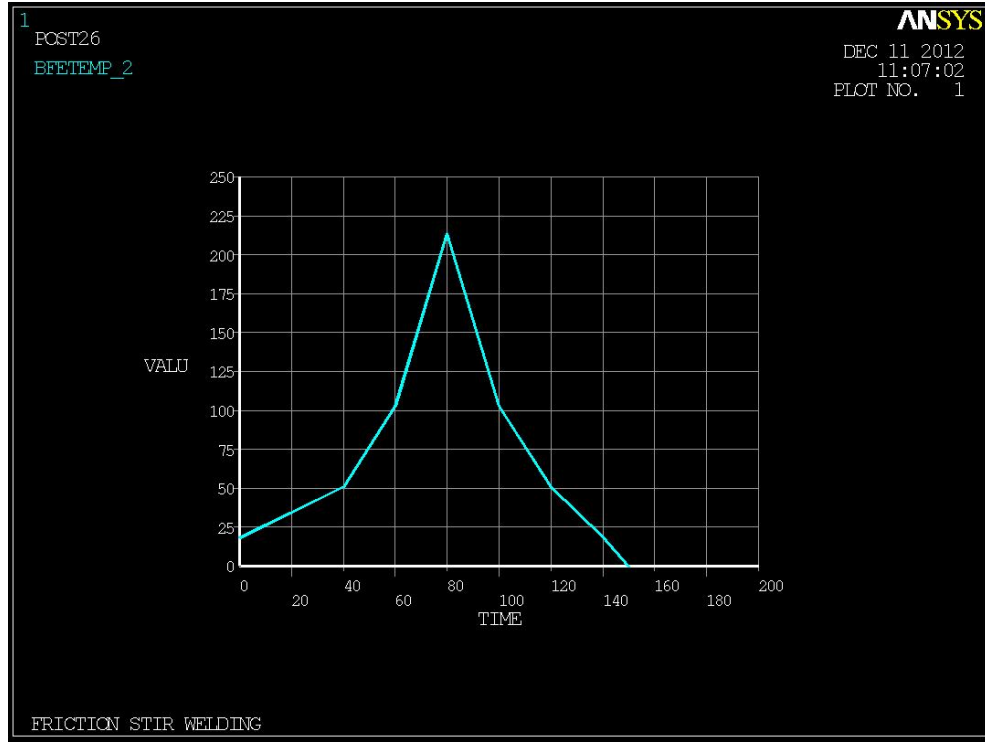


Şekil 5. 15 Deney A3 X yönündeki gerilmeler



Şekil 5. 16 Deney A3 Z yönündeki yer değiştirmeler

5. 4. 4 [N=1750 dev/dak, t= 20 s, V=75 mm/dak] için Elde Edilen Sonuçlar

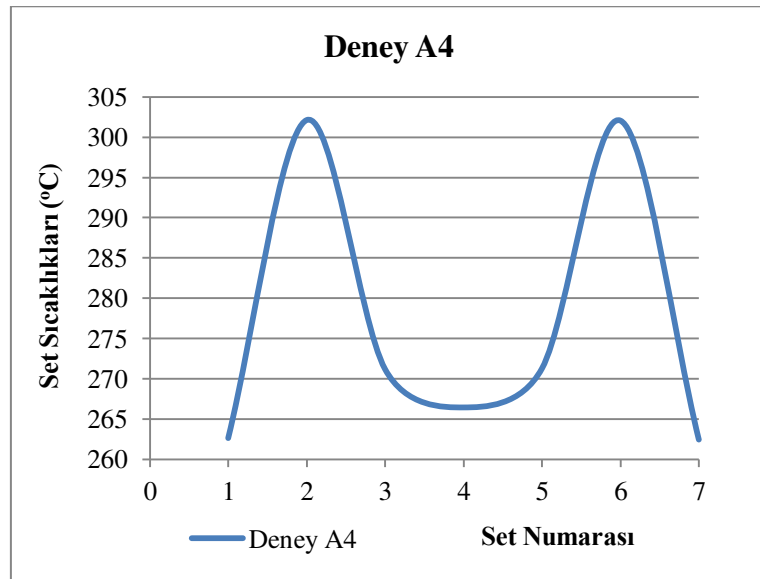


Şekil 5. 17 Deney A4 sıcaklık değişimi

Elde edilen maksimum set sıcaklıkları

Tablo 5. 8 Deney A4 set sıcaklıkları

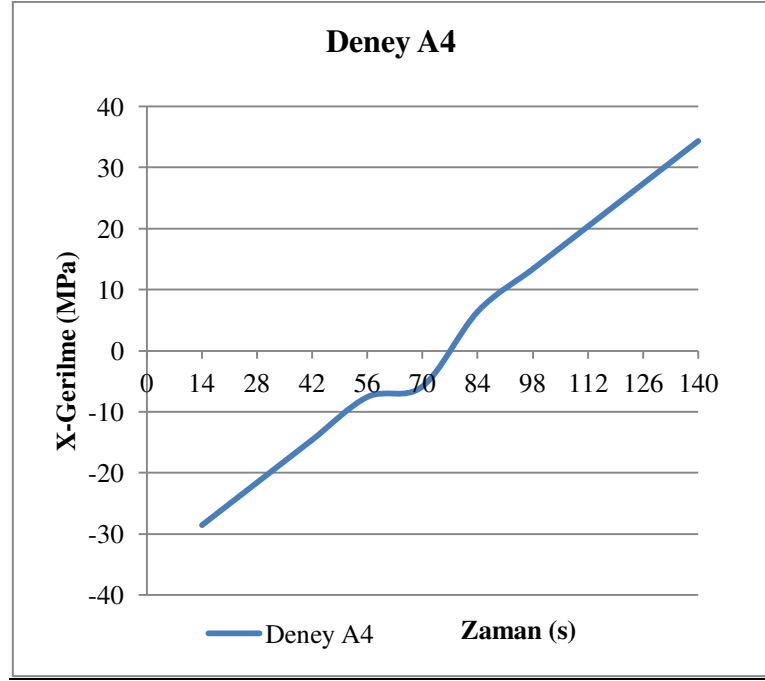
Set No	Sıcaklık Değeri (°C)
1	262,618
2	302,107
3	271,175
4	266,426
5	271,258
6	302,044
7	262,432



Şekil 5. 18 Deney A4 zamana bağlı maksimumu set sıcaklıkları değişimi

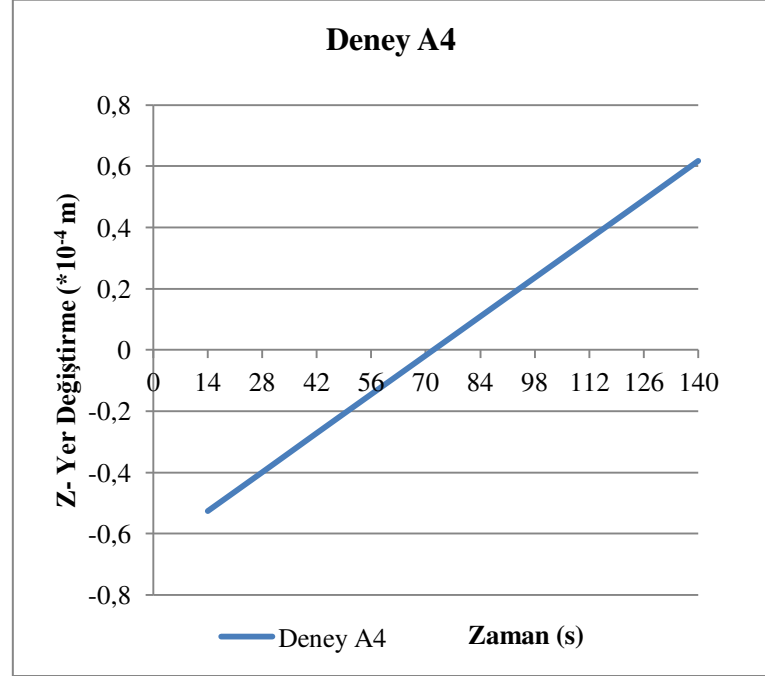
Tablo 5. 9 Deney A4 σ_x değerleri

t (s)	Gerilme (MPa)
14	-28,6
28	-21,6
42	-14,6
56	-7,58
70	-5,84
84	6,42
98	13,4
112	20,4
126	27,4
140	34,4

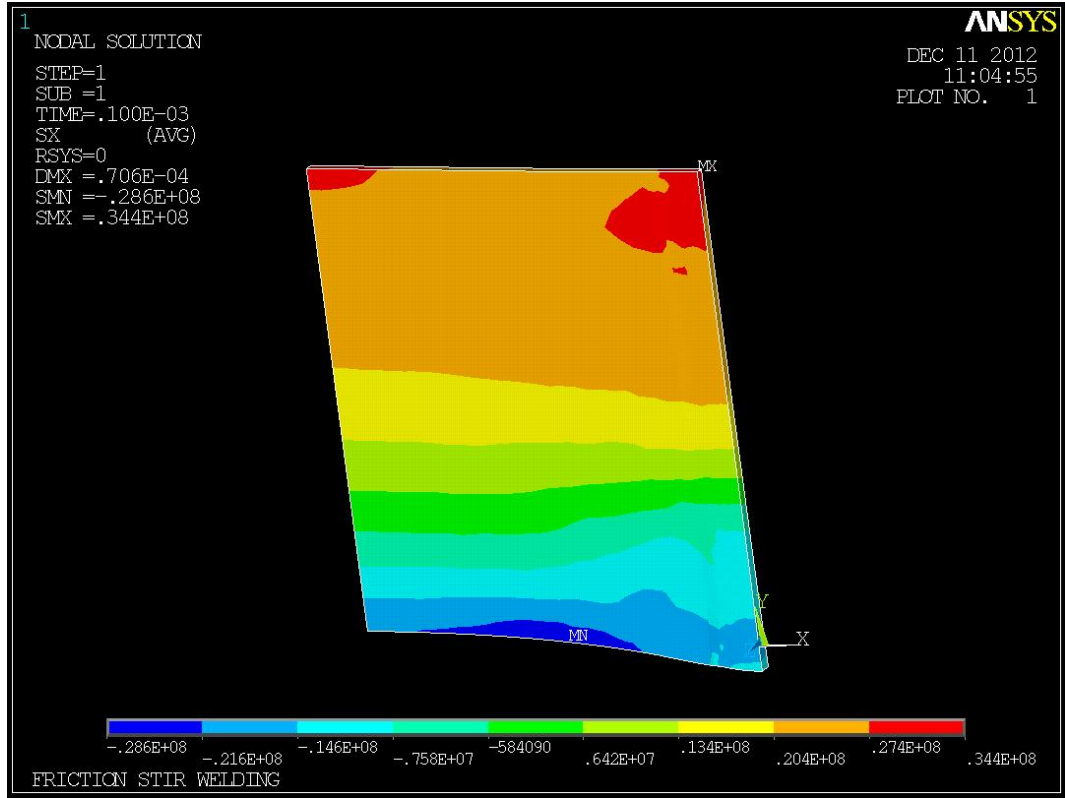
Şekil 5. 19 Deney A4 zamana bağlı σ_x değişimi

Tablo 5. 10 Deney A4 yer değiştirme değerleri

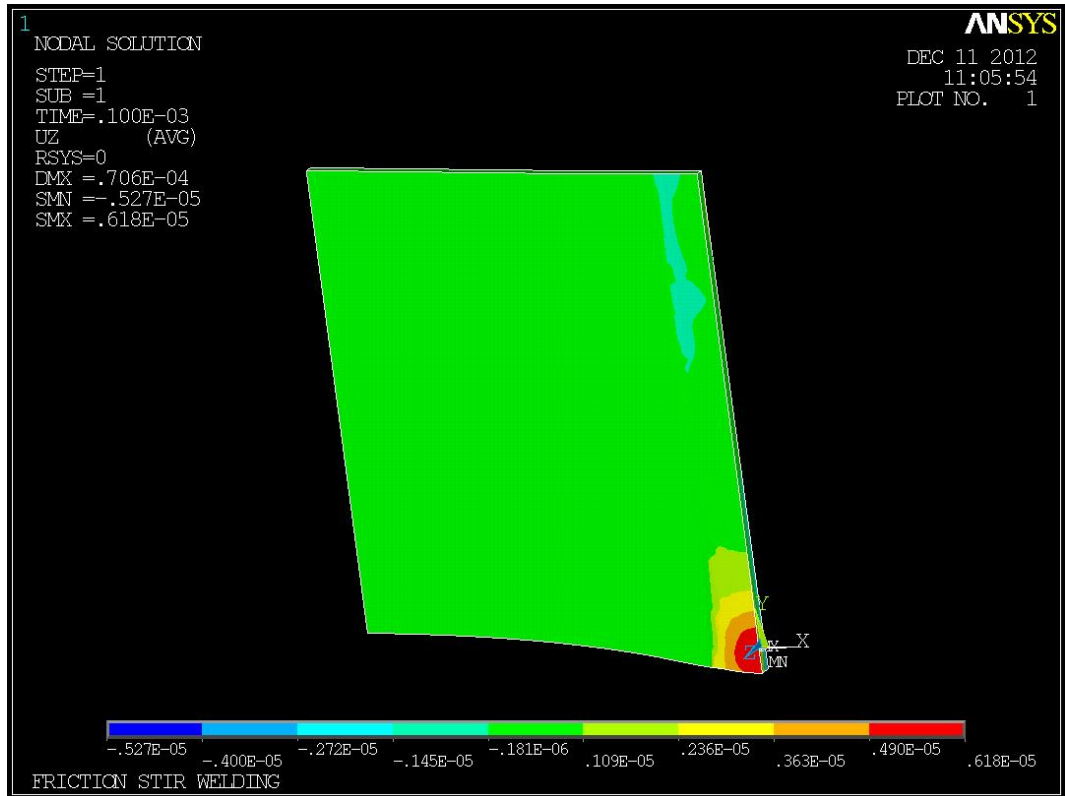
t (s)	Yer Değ. (*10 ⁻⁴ m)
14	-0,549
28	-0,449
42	-0,348
56	-0,248
70	-0,148
84	-0,0473
98	0,0531
112	0,153
126	0,254
140	0,354



Şekil 5. 20 Deney A4 Zamana bağlı Z yönündeki yer değiştirme değişimi



Şekil 5. 21 Deney A4 X yönündeki gerilmeler

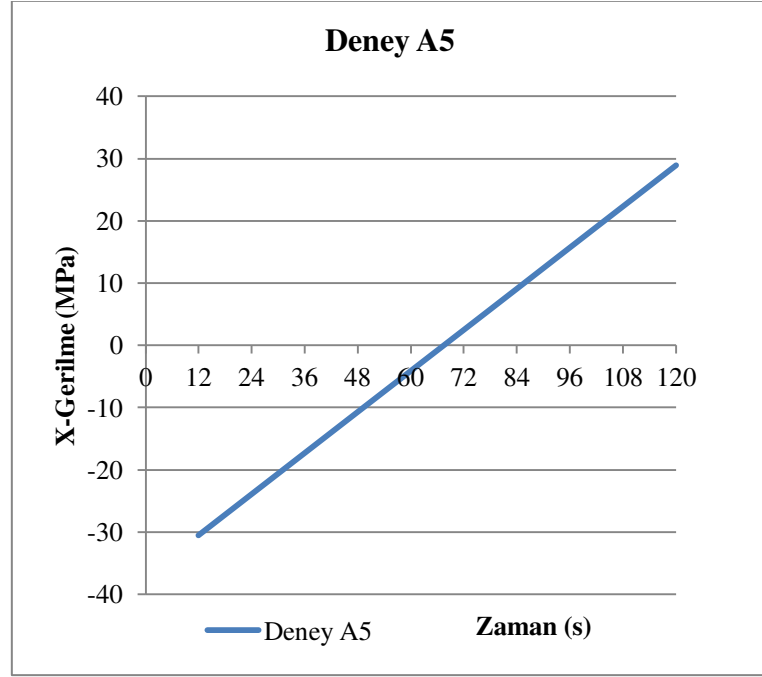


Şekil 5. 22 Deney A4 Z yönündeki yer değiştirmeler

5. 4. 5 [N=1750 dev/dak, t= 20 s, V=100 mm/dak] için Elde Edilen Sonuçlar

Tablo 5. 11 Deney A5 σ_x değerleri

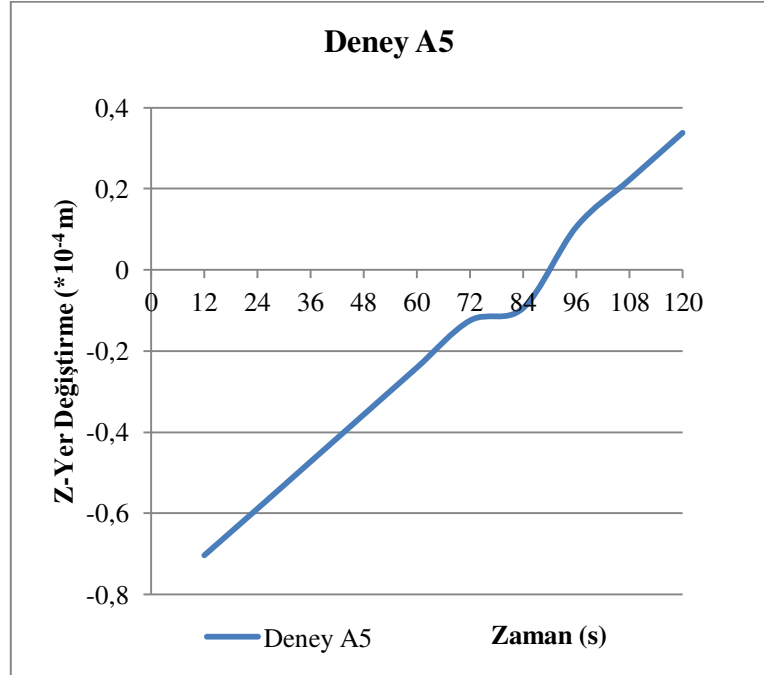
t (s)	Gerilme (MPa)
12	-30,5
24	-23,9
36	-17,3
48	-10,7
60	-4,11
72	2,48
84	9,08
96	15,7
108	22,3
120	28,9



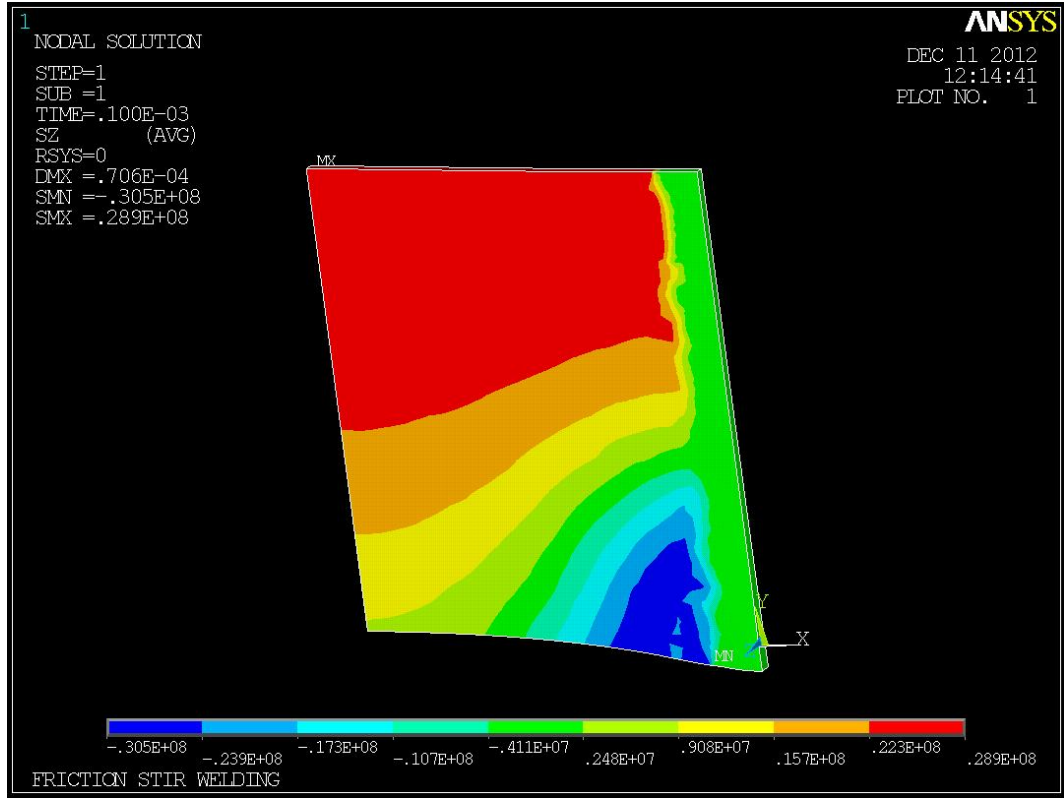
Şekil 5. 23 Deney A5 Zamana bağlı σ_x değişimi

Tablo 5. 12 Deney A5 yer değiştirme değerleri

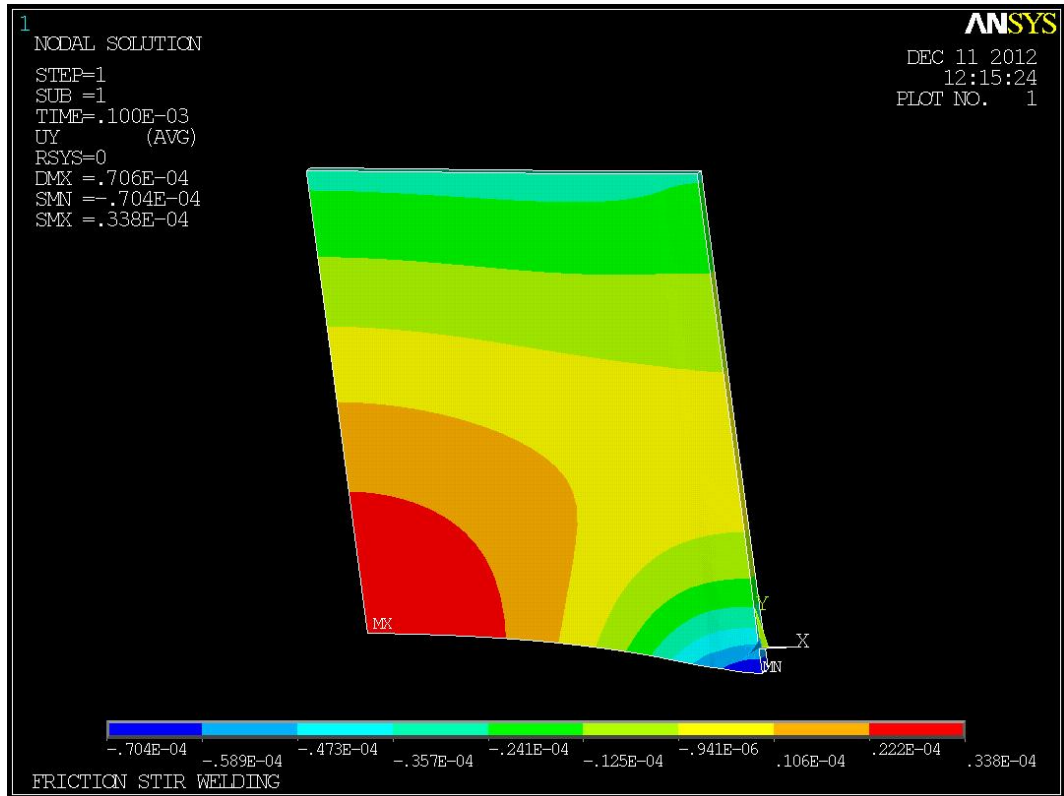
t (s)	Yer Değ. (*10 ⁻⁴ m)
12	-0,706
24	-0,589
36	-0,473
48	-0,357
60	-0,241
72	-0,125
84	-0,0941
96	0,106
108	0,222
120	0,338



Şekil 5. 24 Deney A5 zamana bağlı Z yönündeki yer değiştirme değişimi



Şekil 5. 25 Deney A5 X yönündeki gerilmeler

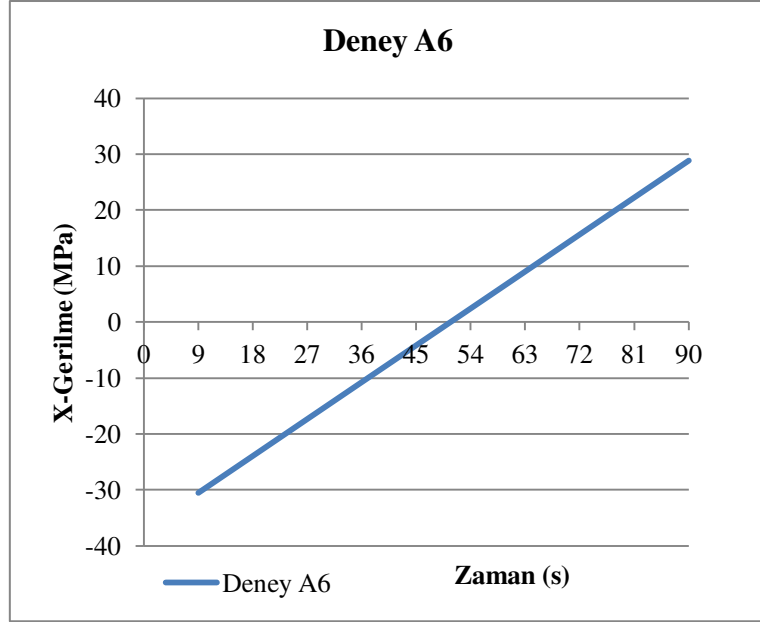


Şekil 5. 26 Deney A5 Z yönündeki yer değiştirmeler

5. 4. 6. $[N=1750 \text{ Dev/dak}, t=20 \text{ s}, V=150 \text{ mm/dak}]$ için Elde Edilen Sonuçlar

Tablo 5. 13 Deney A6 σ_x değerleri

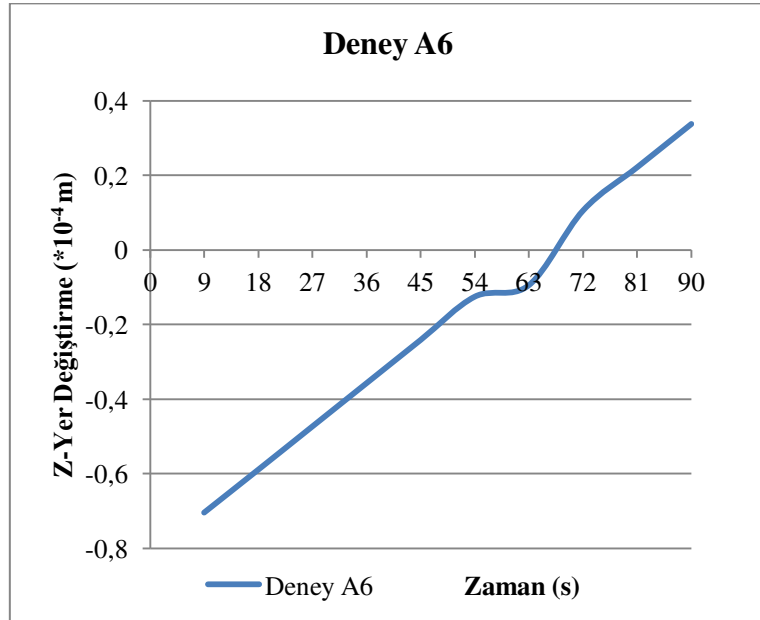
t (s)	Gerilme (MPa)
9	-30,5
18	-23,9
27	-17,3
36	-10,7
45	-4,11
54	2,48
72	9,08
81	15,7
90	22,3



Şekil 5. 27 Deney A6 zamana bağlı σ_x değişimi

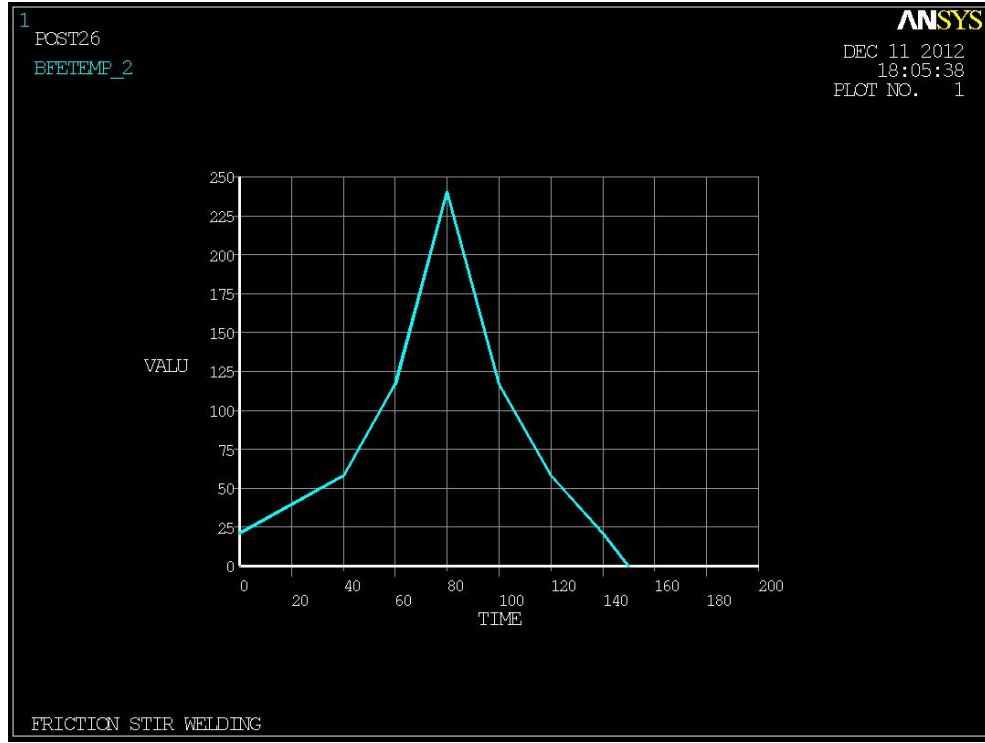
Tablo 5. 14 Deney A6 yer değiştirme değerleri

t (s)	Yer Değ. (*10 ⁻⁴ m)
9	-0,706
18	-0,589
27	-0,473
36	-0,357
45	-0,241
54	-0,125
72	-0,0941
81	0,106
90	0,222



Şekil 5. 28 Deney A6 zamana bağlı Z yönündeki yer değiştirme değişimi

5. 4. 7. [N=2000 dev/dak, t= 20 s, V=75 mm/dak] için Elde Edilen Sonuçlar

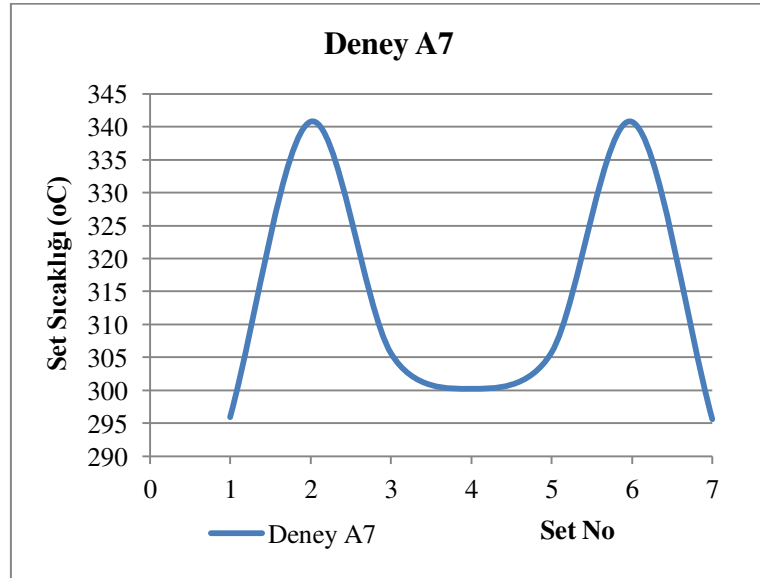


Şekil 5. 29 Deney A7 sıcaklık değişimi

Elde edilen maksimum set sıcaklıkları

Tablo 5. 15 Deney A7 set sıcaklıkları

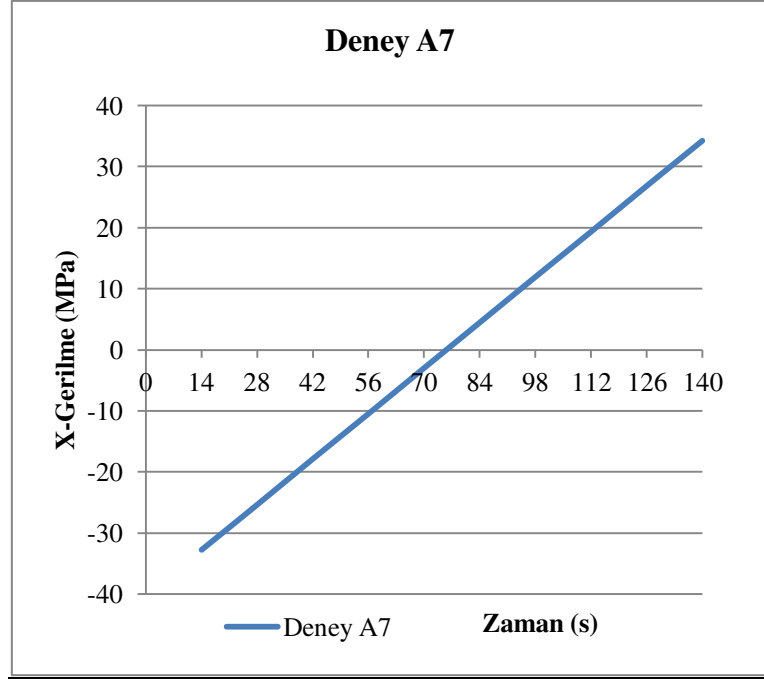
Set No	Sıcaklık Değeri (°C)
1	295,941
2	340,810
3	305,676
4	300,255
5	305,774
6	340,796
7	295,624



Şekil 5. 30 Deney A7 zamana bağlı maksimum set sıcaklık değişimi

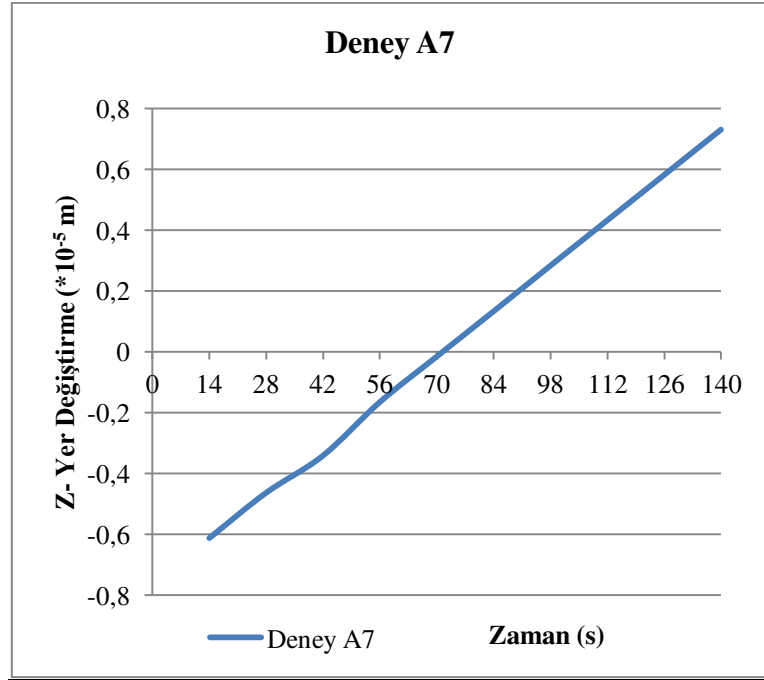
Tablo 5. 16 Deney A7 σ_x değerleri

t (s)	Gerilme (MPa)
14	-32,8
28	-25,4
42	-17,9
56	-10,5
70	-3,02
84	4,43
98	11,9
112	19,3
126	26,8
140	34,2

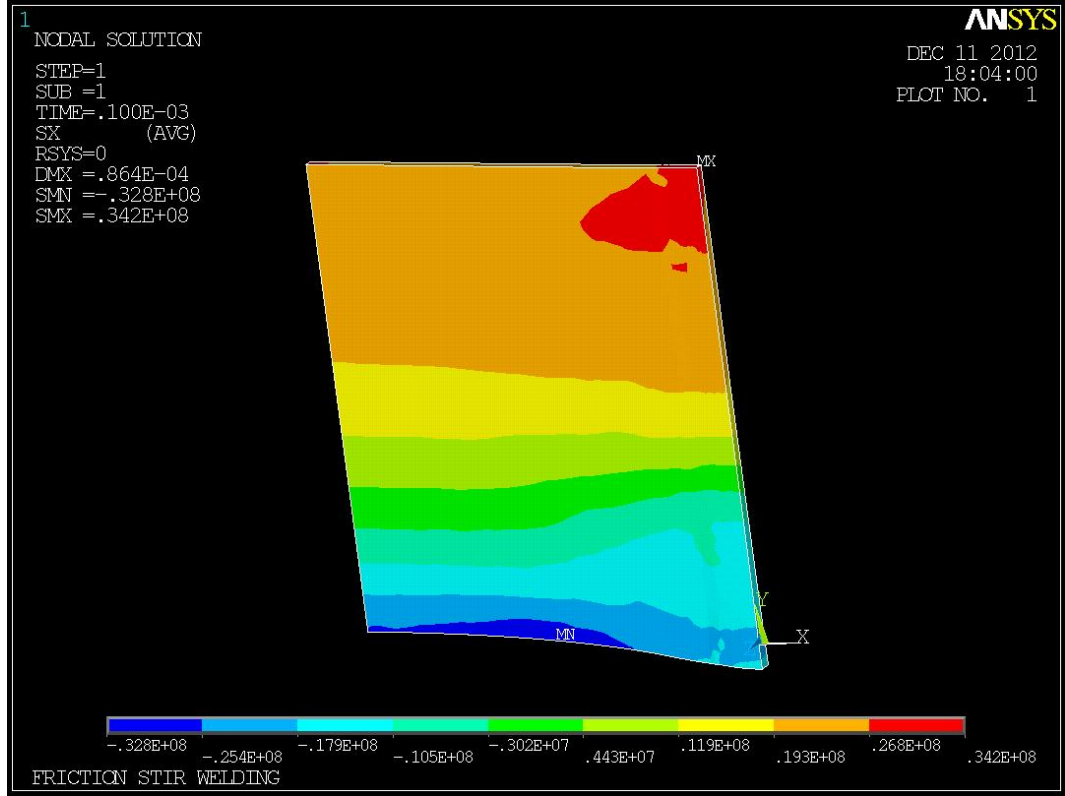
Şekil 5. 31 Deney A7 zamana bağlı σ_x değişimi

Tablo 5. 17 Deney A7 yer değiştirme değerleri

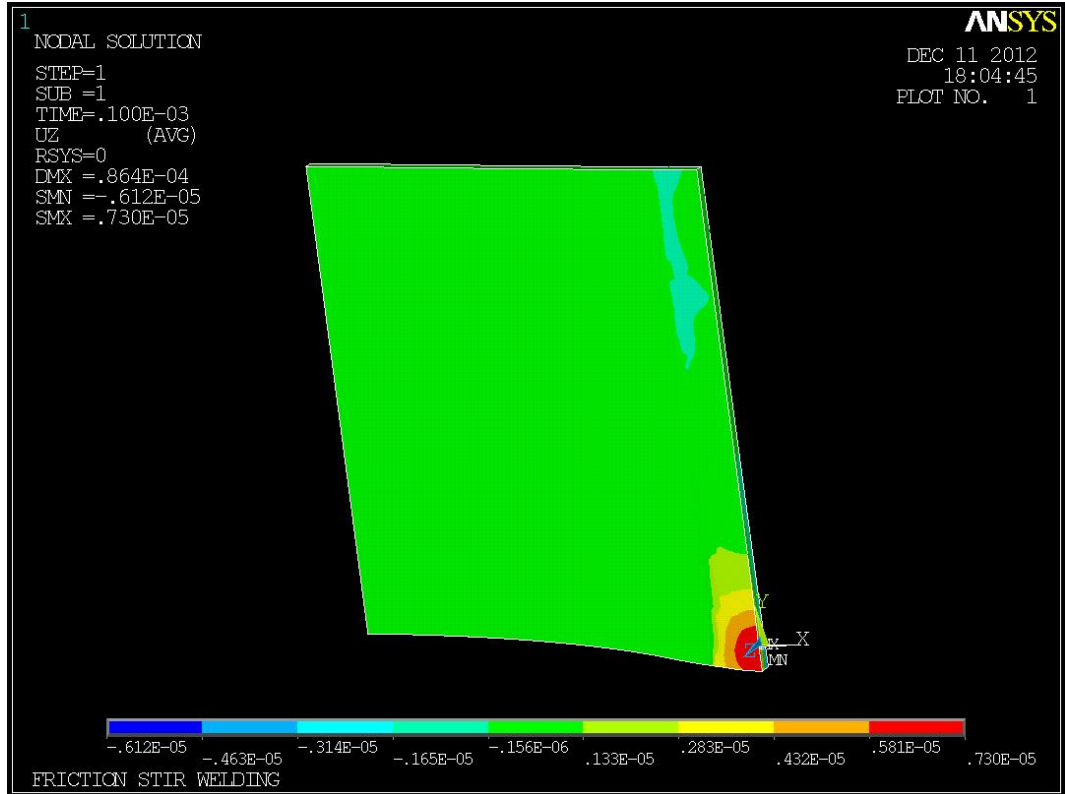
t (s)	Yer Değ. (*10 ⁻⁵ m)
14	-0,612
28	-0,463
42	-0,341
56	-0,165
70	-0,0156
84	0,133
98	0,283
112	0,432
126	0,581
140	0,73



Şekil 5. 32 Deney A7 zamana bağlı Z yönündeki yer değiştirme değişimi



Şekil 5. 33 Deney A7 X yönündeki gerilmeler

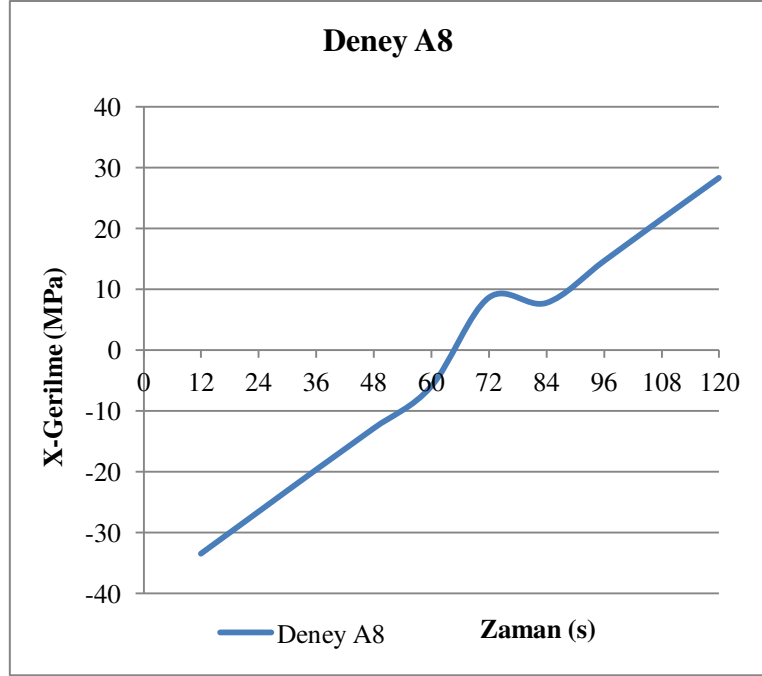


Şekil 5. 34 Deney A7 Z yönündeki yer değıştirmeler

5. 4. 8 [N=2000 dev/dak, t= 20 s, V=100 mm/dak] için Elde Edilen Sonuçlar

Tablo 5. 18 Deney A8 σ_x değerleri

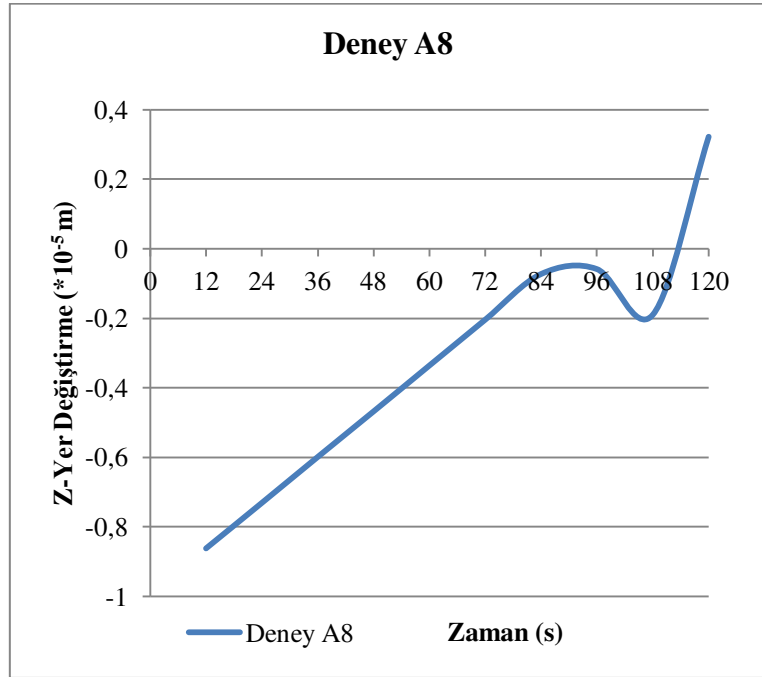
t (s)	Gerilme (MPa)
12	-33,5
24	-26,6
36	-19,7
48	-12,9
60	-6,01
72	8,59
84	7,73
96	14,6
108	21,5
120	28,3



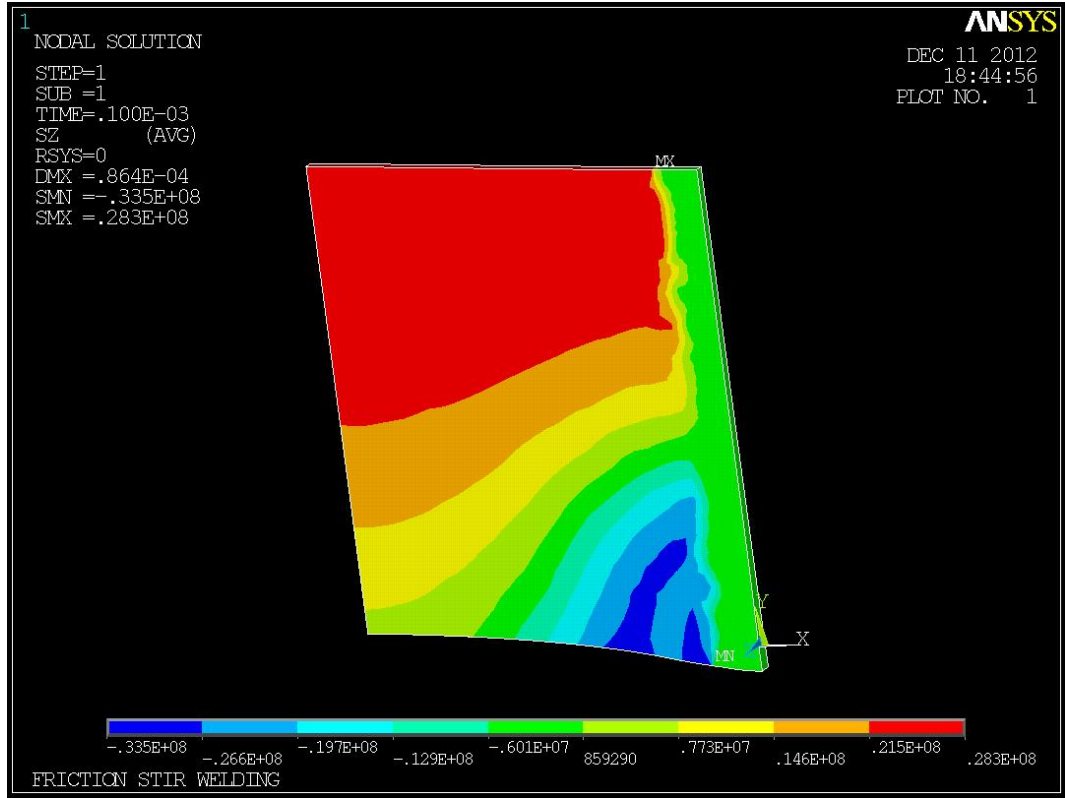
Şekil 5. 35 Deney A8 zamana bağlı σ_x değişimi

Tablo 5. 19 Deney A8 yer değiştirme değerleri

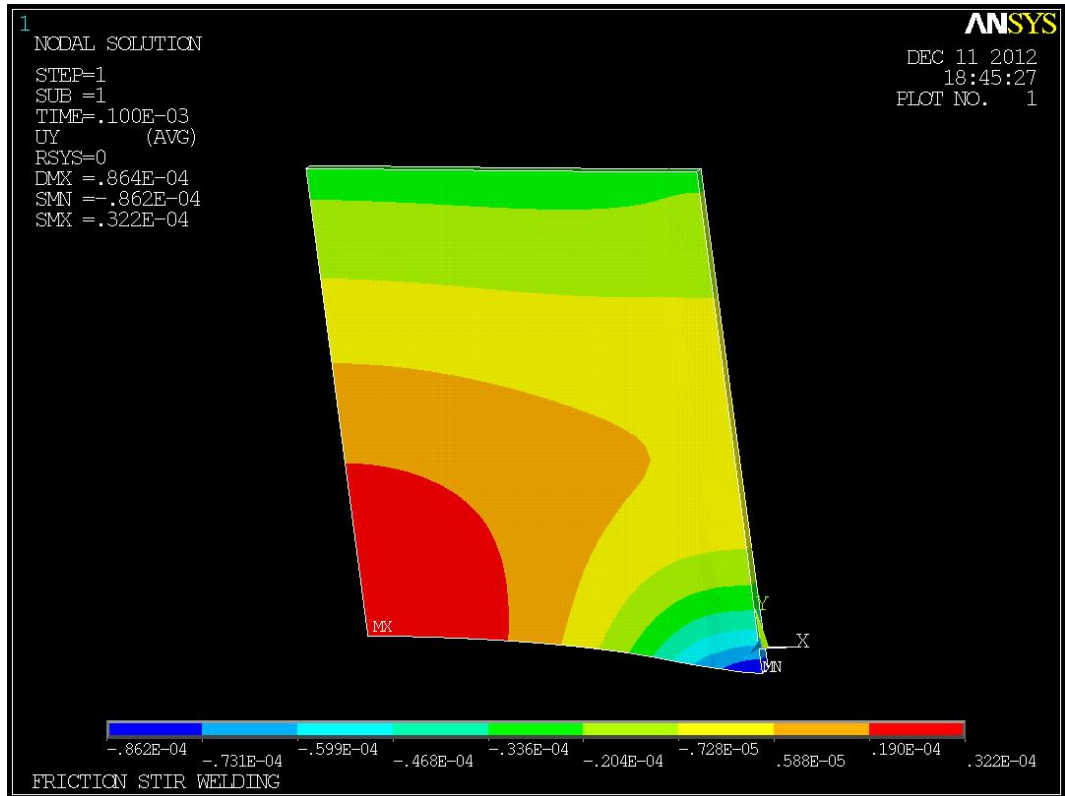
t (s)	Yer Değ. (*10 ⁻⁵ m)
12	-0,862
24	-0,731
36	-0,599
48	-0,468
60	-0,336
72	-0,204
84	-0,0728
96	-0,0588
108	-0,19
120	0,322



Şekil 5. 36 Deney A8 zamana bağlı Z yönündeki yer değiştirme değişimi



Şekil 5. 37 Deney A8 X yönündeki gerilmeler

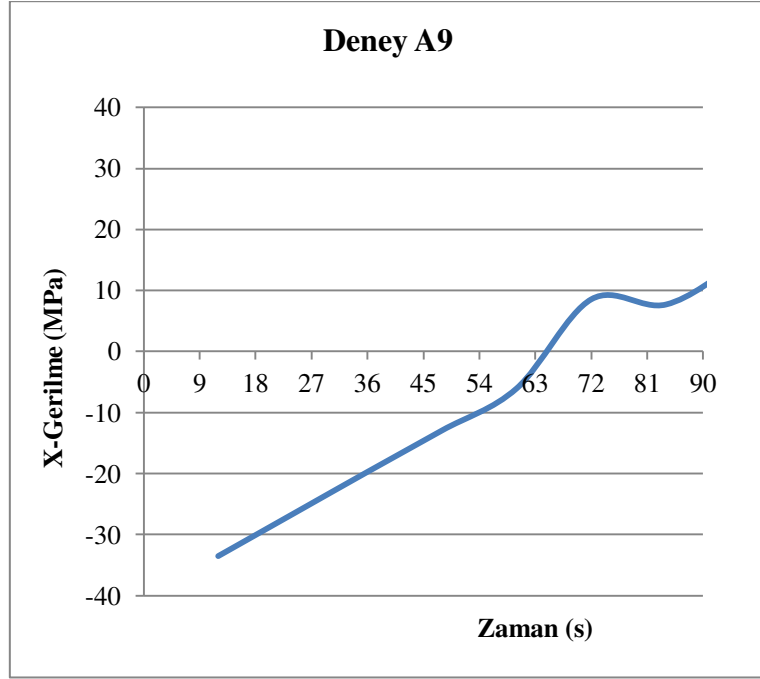


Şekil 5. 38 Deney A8 Z yönündeki yer değiştirmeler

5. 4. 9. [N=2000 dev/dak, t= 20 s, V=150 mm/dak] için Elde Edilen Sonuçlar

Tablo 5. 20 Deney A9 σ_x değerleri

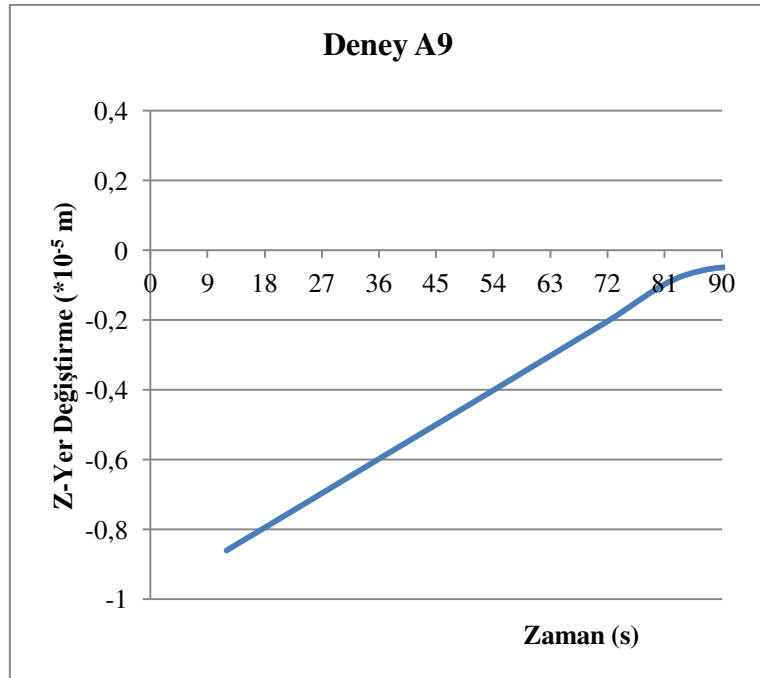
t (s)	Gerilme (MPa)
9	-33,5
18	-26,6
27	-19,7
36	-12,9
45	-6,01
54	8,59
63	7,73
72	14,6
81	21,5
90	28,3



Şekil 5. 39 Deney A9 zamana bağlı σ_x değişimi

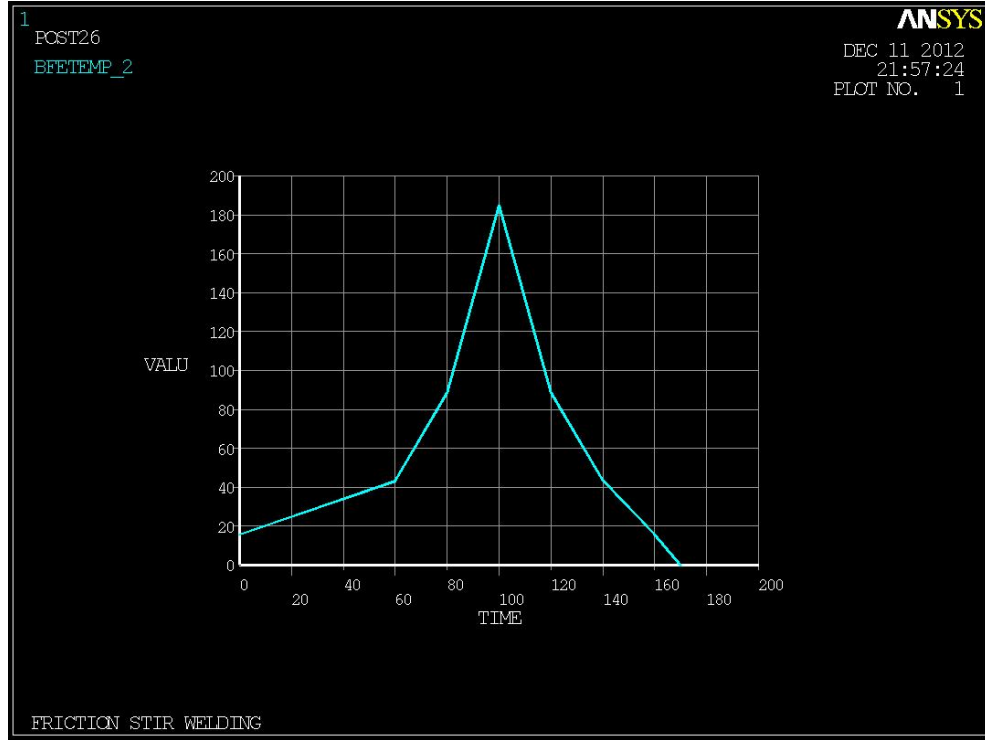
Tablo 5. 21 Deney A9 yer değiştirme değerleri

t (s)	Yer Değ. (*10 ⁻⁵ m)
9	-0,862
18	-0,731
27	-0,599
36	-0,468
45	-0,336
54	-0,204
63	-0,0728
72	-0,0588
81	-0,19
90	0,322



Şekil 5. 40 Deney A9 zamana bağlı Z yönündeki yer değiştirme değişimi

5. 4. 10 [N=1500 dev/dak, t= 40 s, V=75 mm/dak] için Elde Edilen Sonuçlar

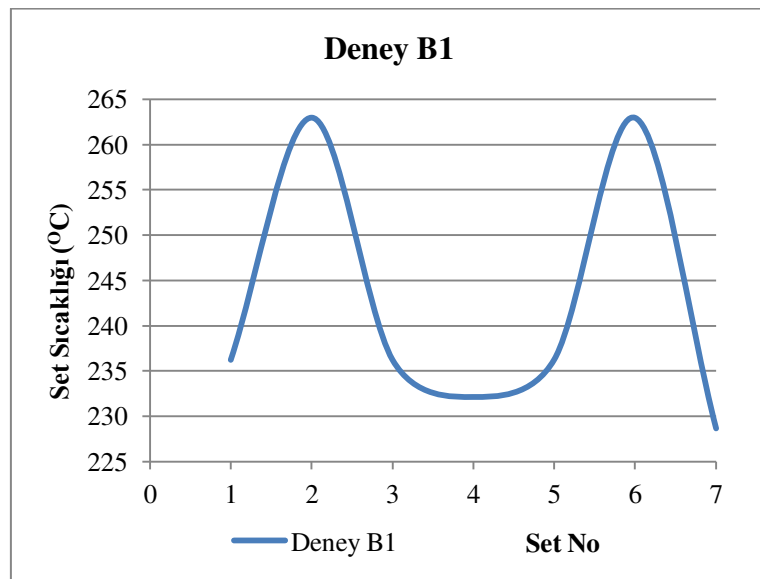


Şekil 5. 41 Deney B1 sıcaklık değişimi

Maksimum İlk Set Sıcaklıkları

Tablo 5. 22 Deney B1 set sıcaklıkları

Set No	Sıcaklık Değeri (°C)
1	236,244
2	262,947
3	236,244
4	232,156
5	236,300
6	262,923
7	228,689

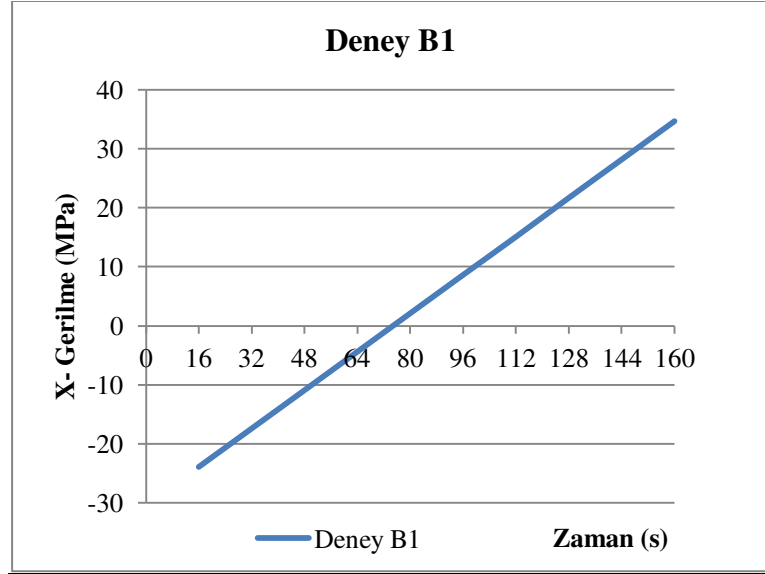


Şekil 5. 42 Deney B1 zamana bağlı maksimum set sıcaklık değişimi

X yönündeki Gerilmeler

Tablo 5. 23 Deney B1 σ_x değerleri

t (s)	Gerilme (MPa)
16	-23,9
32	-17,4
48	-10,9
64	-4,38
80	2,13
96	8,64
112	15,1
128	21,7
144	28,2
160	34,7

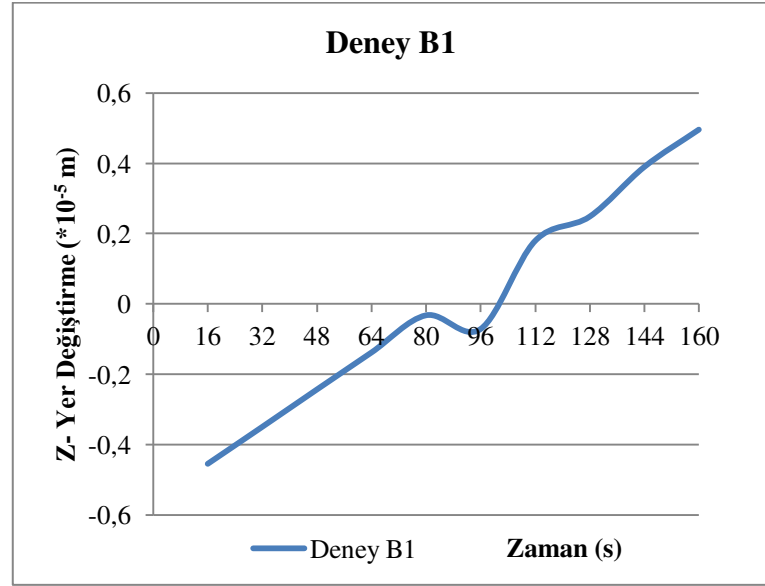


Şekil 5. 43 Deney B1 zamana bağlı σ_x değişimi

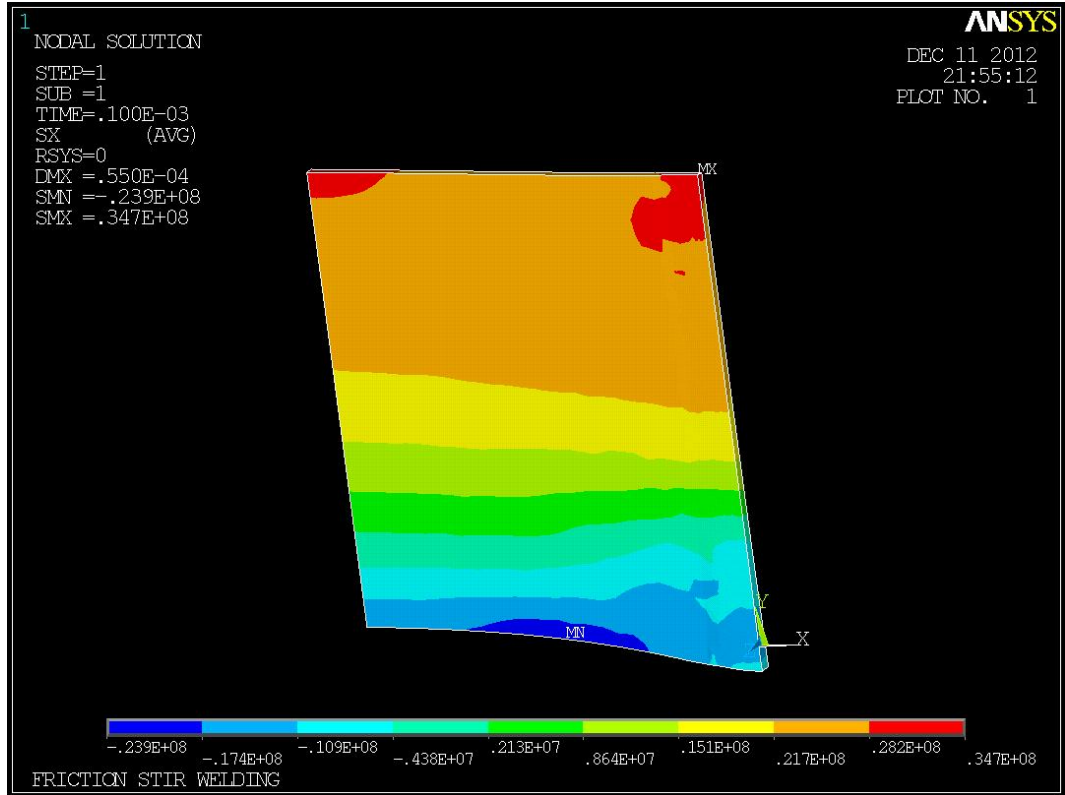
Z yönündeki Yer Değiştirmeler

Tablo 5. 24 Deney B1 yer değiştirme değerleri

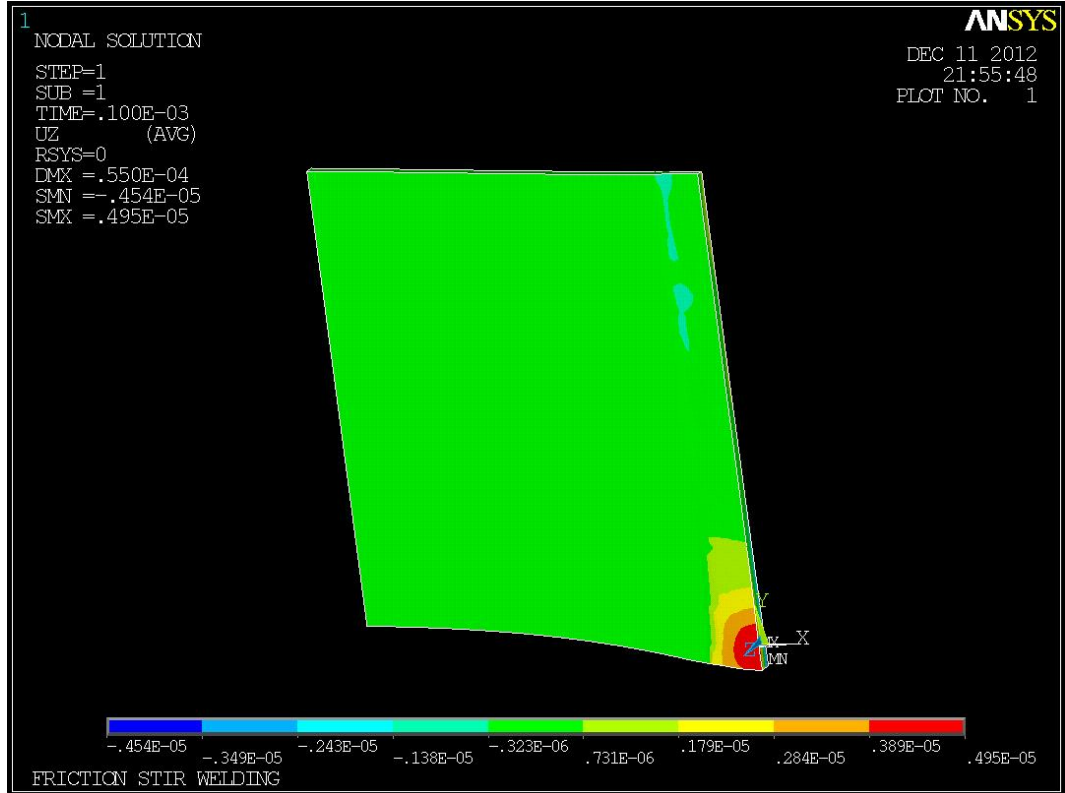
t (s)	Yer Değ. (*10 ⁻⁵ m)
16	-0,454
32	-0,349
48	-0,243
64	-0,138
80	-0,0323
96	-0,0713
112	0,179
128	0,248
144	0,389
160	0,495



Şekil 5. 44 Deney B1 zamana bağlı Z yönündeki yer değiştirme değişimi



Şekil 5. 45 Deney B1 X yönündeki gerilmeler



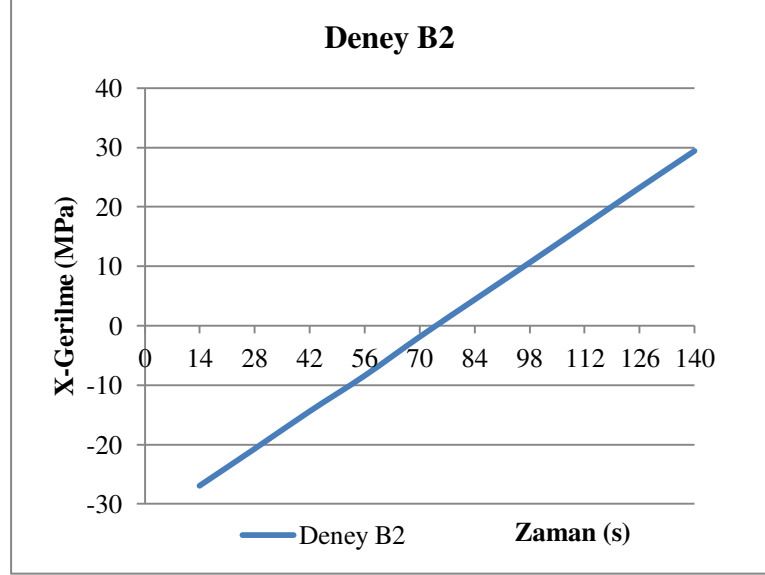
Şekil 5. 46 Deney B1 Z yönündeki yer değiştirmeler

5. 4. 11. [N=1500 dev/dak, t= 40 s, V=100 mm/dak] için Elde Edilen Sonuçlar

X yönündeki Gerilmeler

Tablo 5. 25 Deney B2 σ_x değerleri

t (s)	Gerilme (MPa)
14	-26,9
28	-20,7
42	-14,4
56	-8,41
70	-1,88
84	4,38
98	10,6
112	16,9
126	23,2
140	29,4

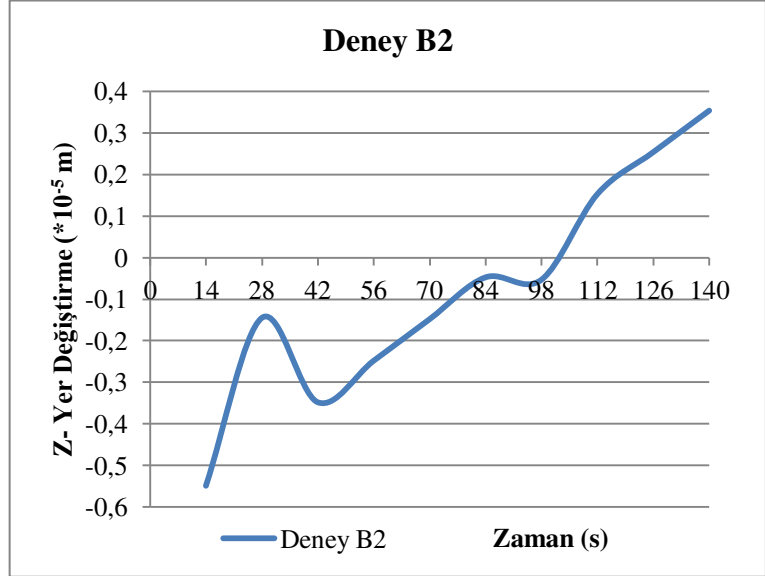


Şekil 5. 47 Deney B2 zamana bağlı σ_x değişimi

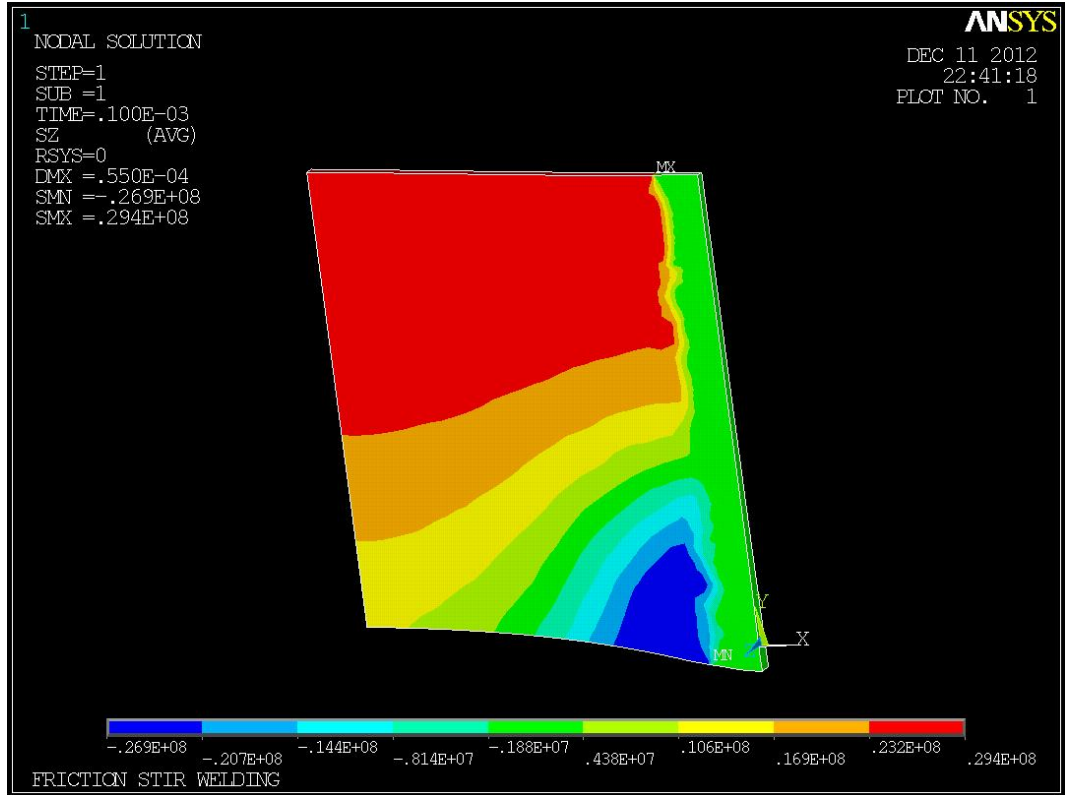
Z yönündeki Yer Değiştirmeler

Tablo 5. 26 Deney B2 yer değiştirme değerler

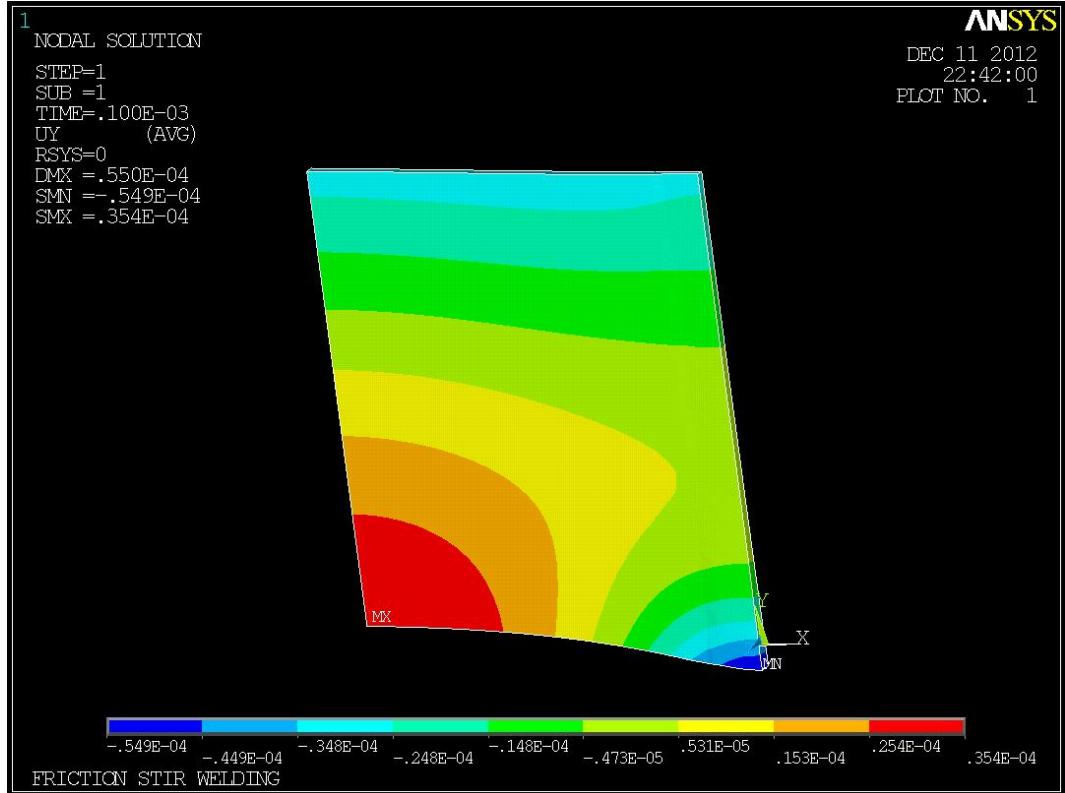
t (s)	Yer Değ. (*10 ⁻⁵ m)
14	-0,549
28	-0,1449
42	-0,348
56	-0,248
70	-0,148
84	-0,0473
98	-0,0531
112	0,153
126	0,254
140	0,354



Şekil 5. 48 Deney B2 zamana bağlı Z yönündeki yer değiştirme değişimi



Şekil 5. 49 Deney B2 X yönündeki gerilmeler



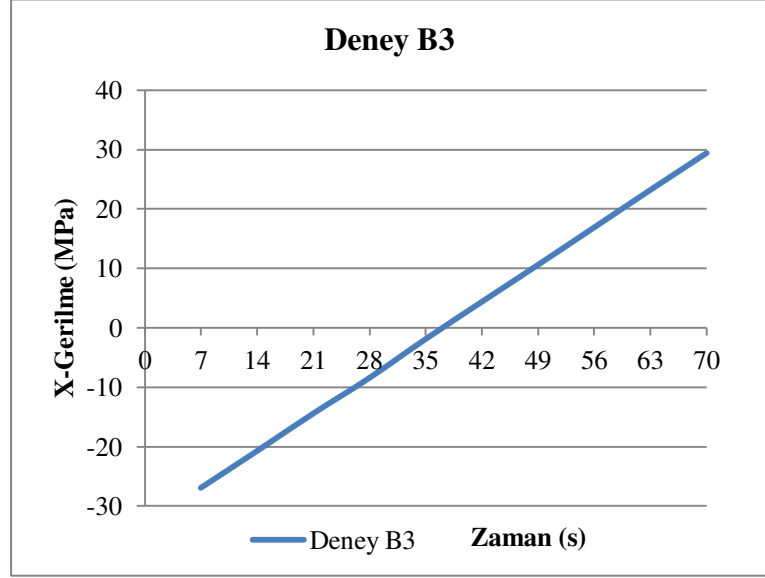
Şekil 5. 50 Deney B2 Z yönündeki yer değiştirmeler

5. 4. 12. $[N=1500 \text{ dev/dak}, t=40 \text{ s}, V=150 \text{ mm/dak}]$ için Elde Edilen Sonuçlar

X yönündeki Gerilmeler

Tablo 5. 27 Deney B3 σ_x değerleri

t (s)	Gerilme (MPa)
7	-26,9
14	-20,7
21	-14,4
28	-8,41
35	-1,88
42	4,38
49	10,6
56	16,9
63	23,2
70	29,4

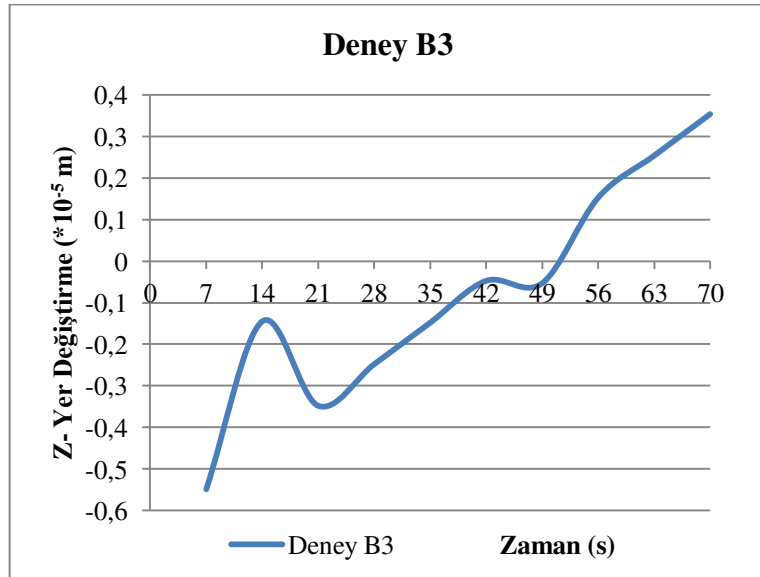


Şekil 5. 51 Deney B2 zamana bağlı σ_x değişimi

Z yönündeki Yer Değiştirmeler

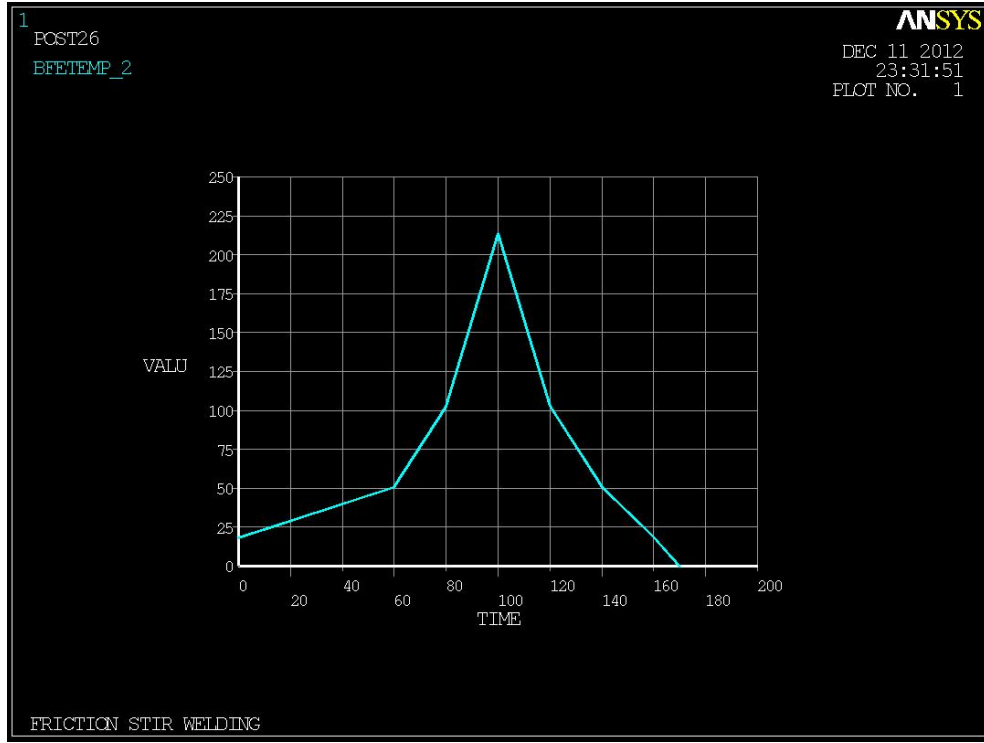
Tablo 5. 28 Deney B3 yer değiştirme değerleri

t (s)	Yer Değ. (*10 ⁻⁵ m)
7	-0,549
14	-0,1449
21	-0,348
28	-0,248
35	-0,148
42	-0,0473
49	-0,0531
56	0,153
63	0,254
70	0,354



Şekil 5. 52 Deney B2 zamana bağlı yer değiştirme değişimi

5. 4. 13 [N=1750 dev/dak, t= 40 s, V=75 mm/dak] için Elde Edilen Sonuçlar

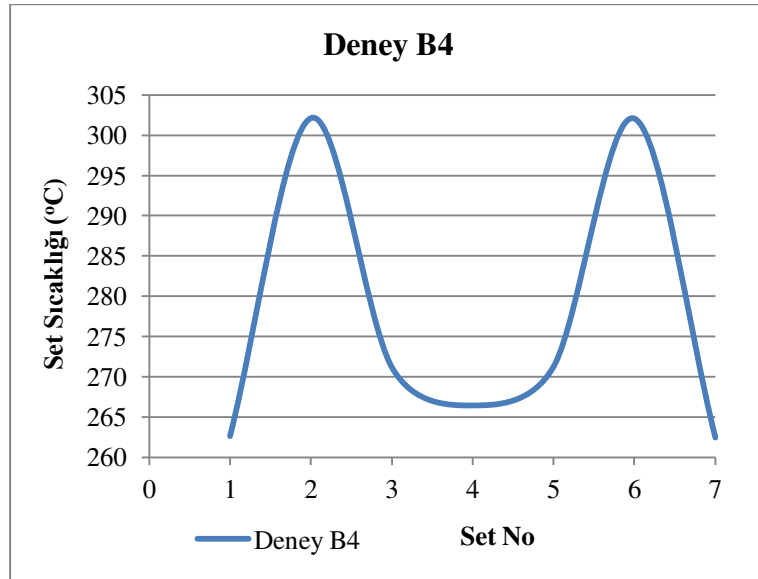


Şekil 5. 53 Deney B4 sıcaklık değişimi

Maksimum İlk Set Sıcaklıkları

Tablo 5. 29 Deney B4 set sıcaklıkları

Set No	Sıcaklık (°C)
1	262,618
2	302,107
3	271,175
4	266,426
5	271,258
6	302,044
7	262,432

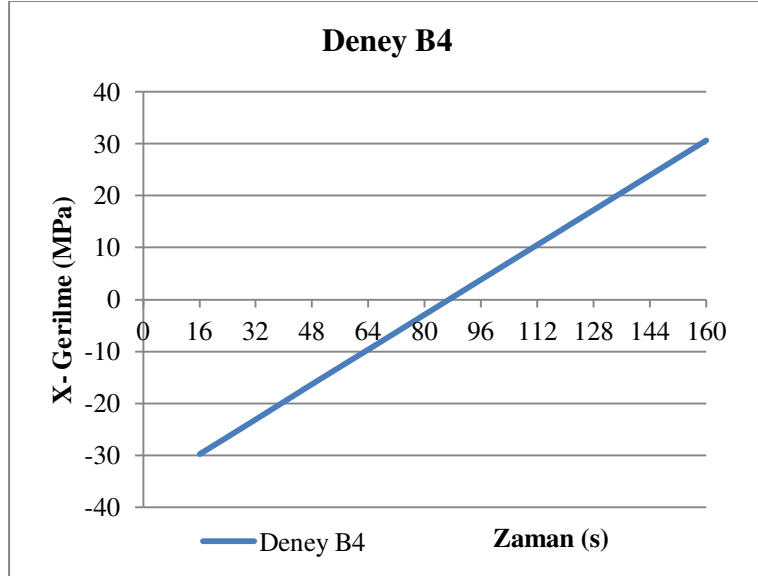


Şekil 5. 54 Deney B4 zamana bağlı maksimum set sıcaklık değişimi

X yönündeki Gerilmeler

Tablo 5. 30 Deney B4 σ_x değerleri

t (s)	Gerilme (MPa)
16	-29,8
32	-23,1
48	-16,3
64	-9,63
80	-2,92
96	3,8
112	10,5
128	17,2
144	23,9
160	30,6

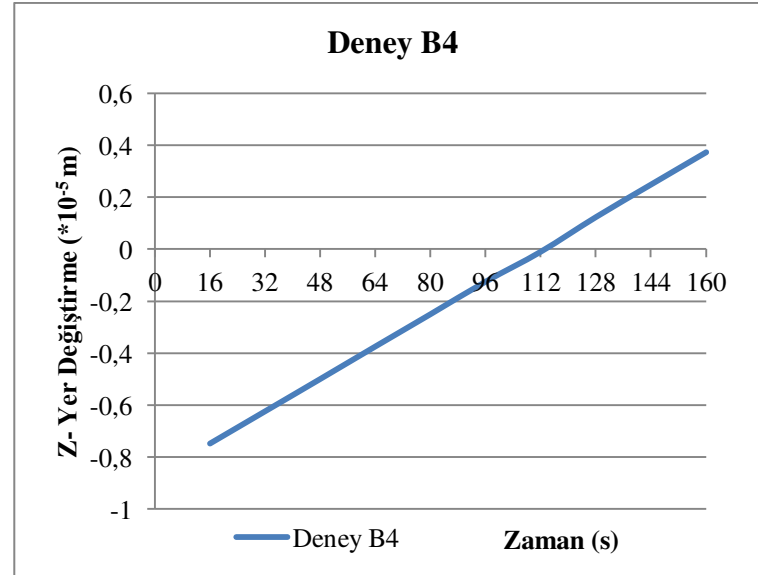


Şekil 5. 55 Deney B4 zamana bağlı σ_x değişimi

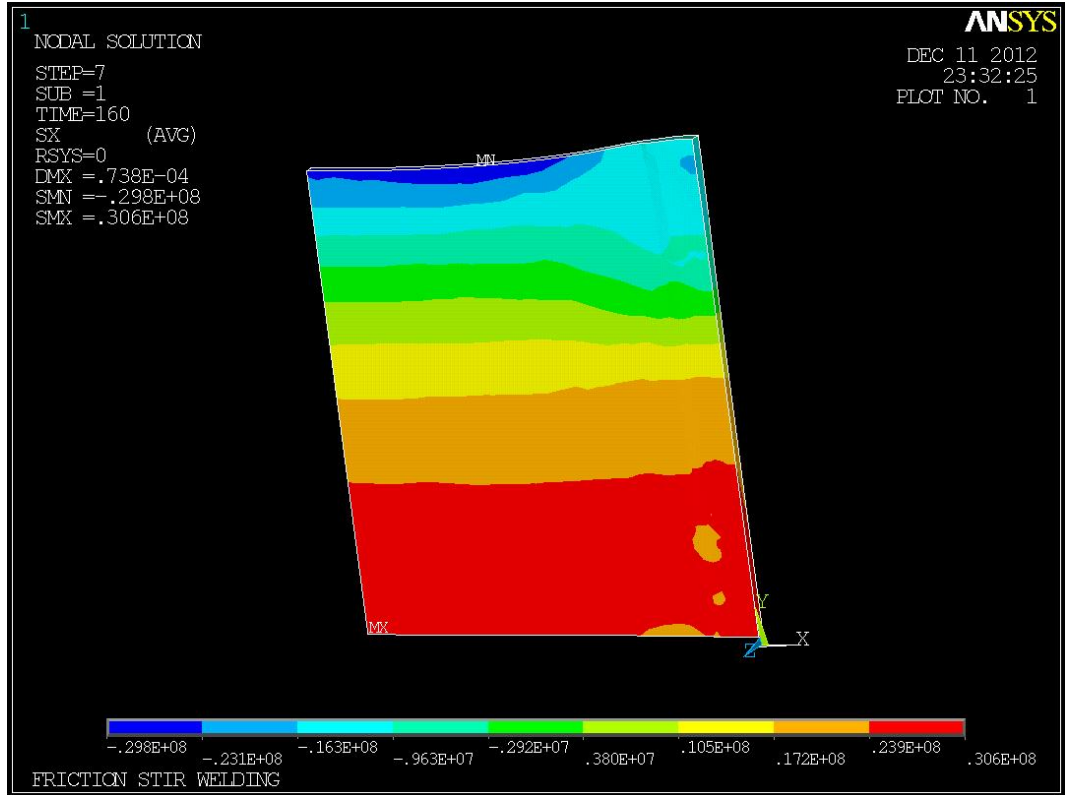
Z yönündeki Yer Değiştirmeler

Tablo 5. 31 Deney B4 yer değiştirme değerleri

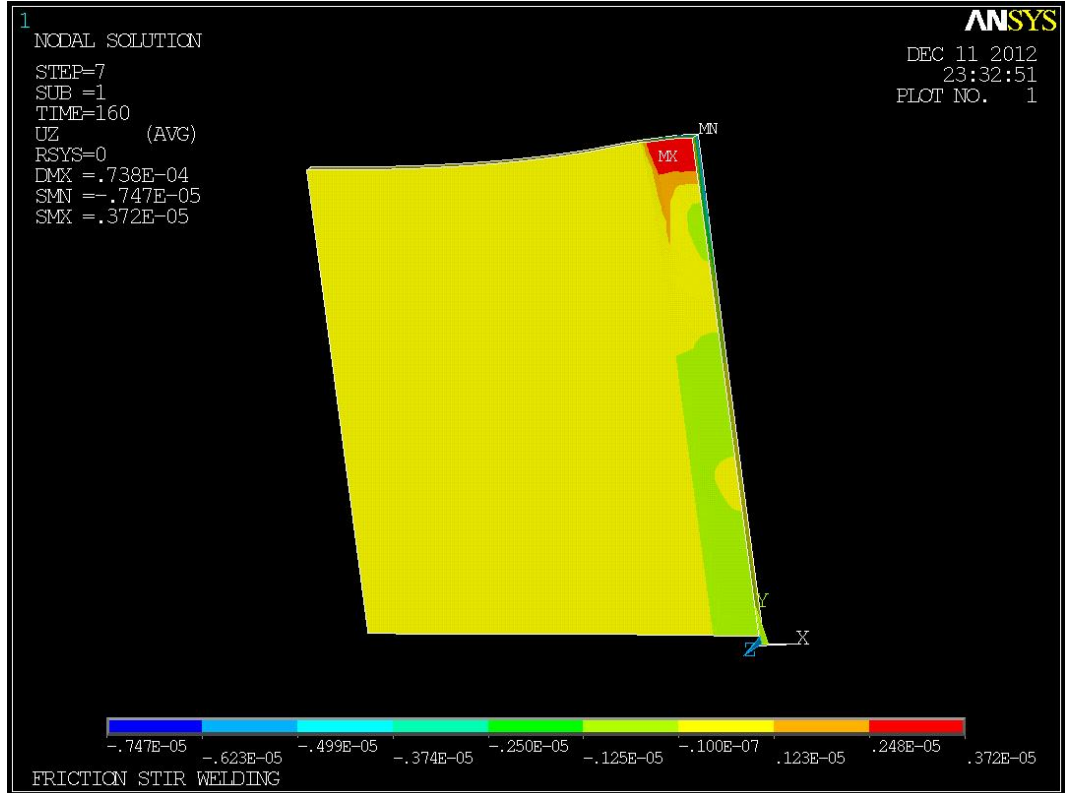
t (s)	Yer Değ. (*10 ⁻⁵ m)
16	-0,747
32	-0,623
48	-0,499
64	-0,374
80	-0,25
96	-0,125
112	-0,01
128	0,123
144	0,248
160	0,372



Şekil 5. 56 Deney B4 zamana bağlı yer değiştirme değişimi



Şekil 5. 57 Deney B4 X yönündeki gerilmeler



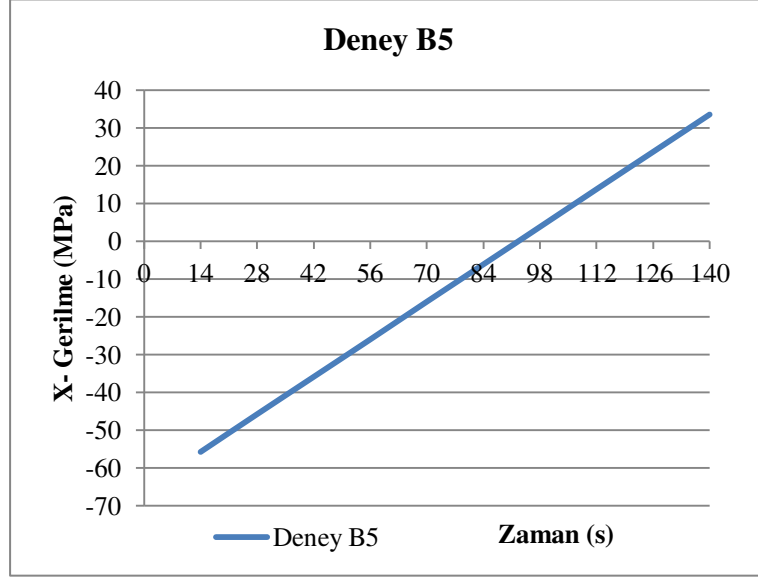
Şekil 5. 58 Deney B4 Z yönündeki yer değiştirmeler

5. 4. 14 [N=1750 dev/dak, t= 40 s, V=100 mm/dak] için Elde Edilen Sonuçlar

X yönündeki Gerilmeler

Tablo 5. 32 Deney B5 σ_x değerleri

t (s)	Gerilme (MPa)
14	-55,8
28	-45,8
42	-35,9
56	-26
70	-16
84	-6,11
98	3,82
112	13,8
126	23,7
140	33,6

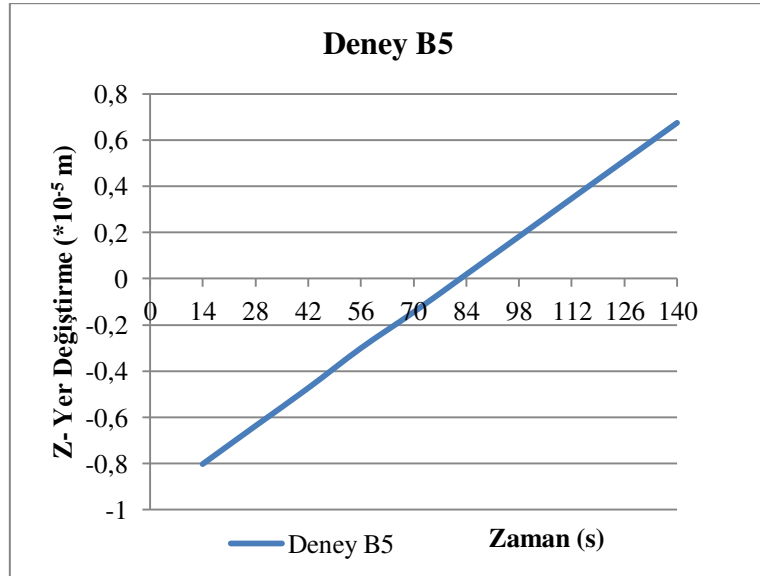


Şekil 5. 59 Deney B5 zamana bağlı σ_x değişimi

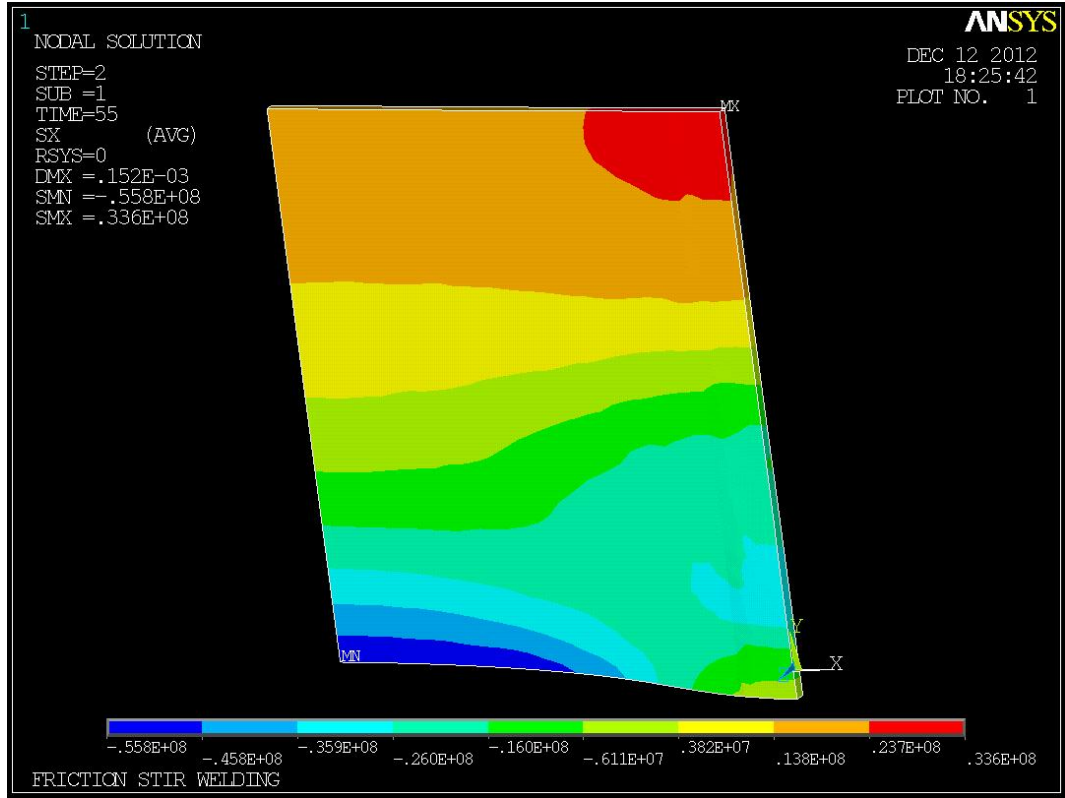
Z yönündeki Yer Değiştirmeler

Tablo 5. 33 Deney B5 yer değiştirme değerleri

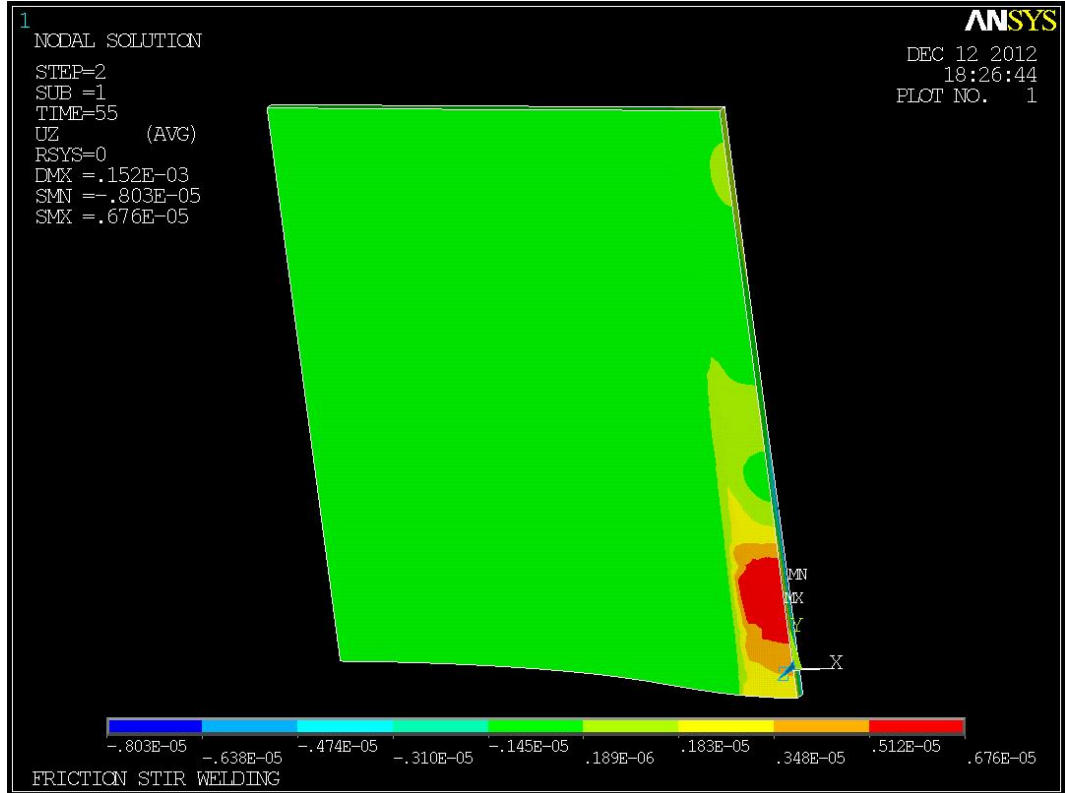
t (s)	Yer Değ. (*10 ⁻⁵ m)
14	-0,803
28	-0,638
42	-0,474
56	-0,301
70	-0,145
84	0,0189
98	0,183
112	0,348
126	0,512
140	0,676



Şekil 5. 60 Deney B5 zamana bağlı yer değiştirme değişimi



Şekil 5.61 Deney B5 X yönündeki gerilmeler



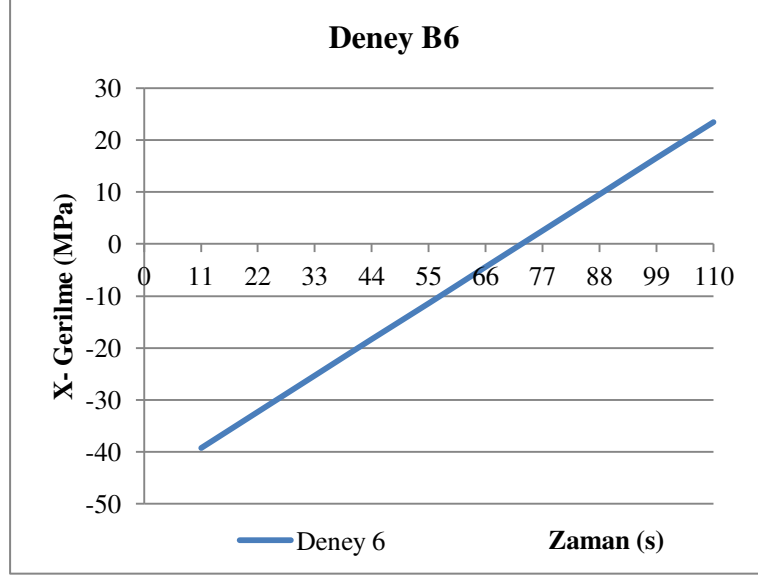
Şekil 5. 62 Deney B5 Z yönündeki yer değiştirmeler

5. 4. 15. [N=1750 dev/dak, t= 40 s, V=150 mm/dak] için Elde Edilen Sonuçlar

X yönündeki Gerilmeler

Tablo 5. 34 Deney B6 σ_x değerleri

t (s)	Gerilme (MPa)
11	-39,3
22	-32,3
33	-25,3
44	-18,3
55	-11,4
66	-4,38
77	2,6
88	9,58
99	16,6
110	23,5

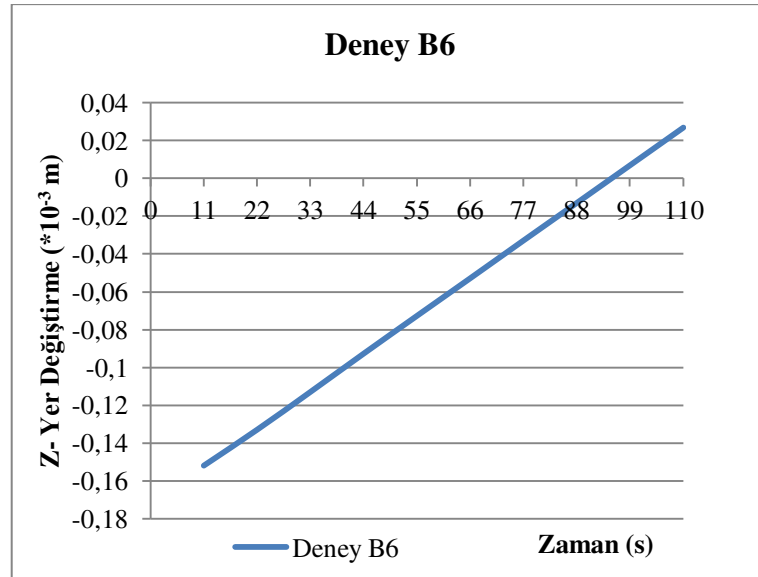


Şekil 5.63 Deney B6 zamana bağlı σ_x değişimi

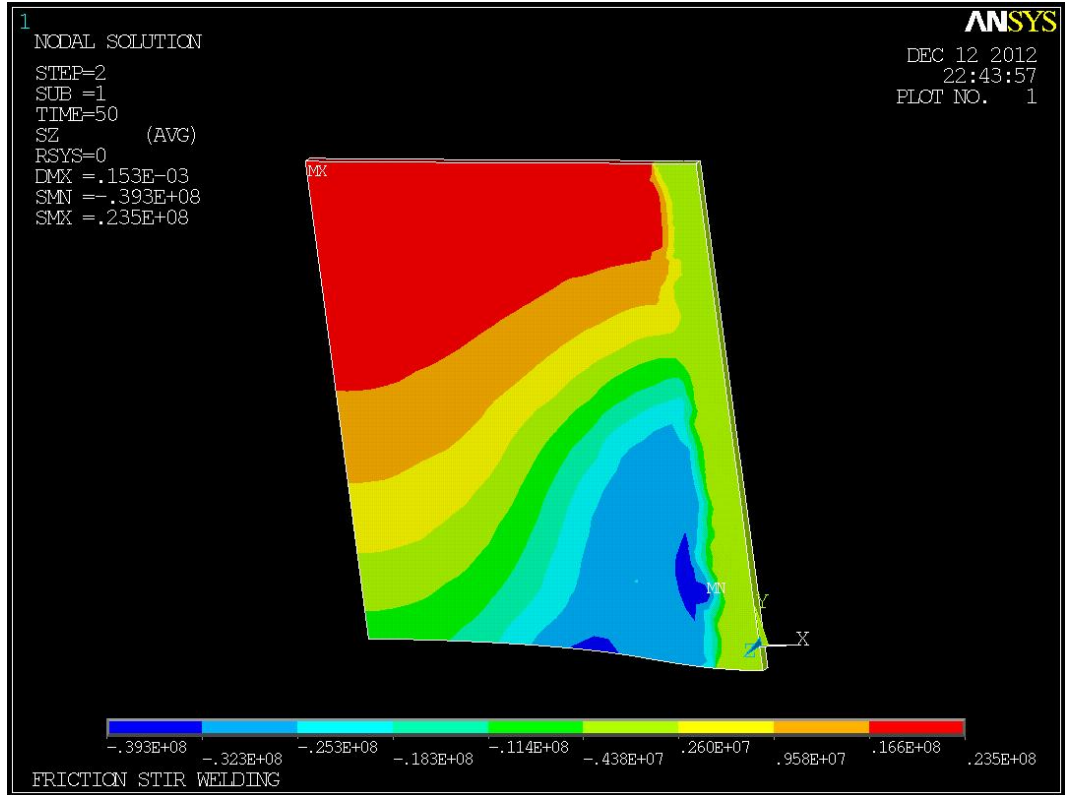
Z yönündeki Yer Değiştirmeler

Tablo 5. 35 Deney B6 yer değiştirme değerleri

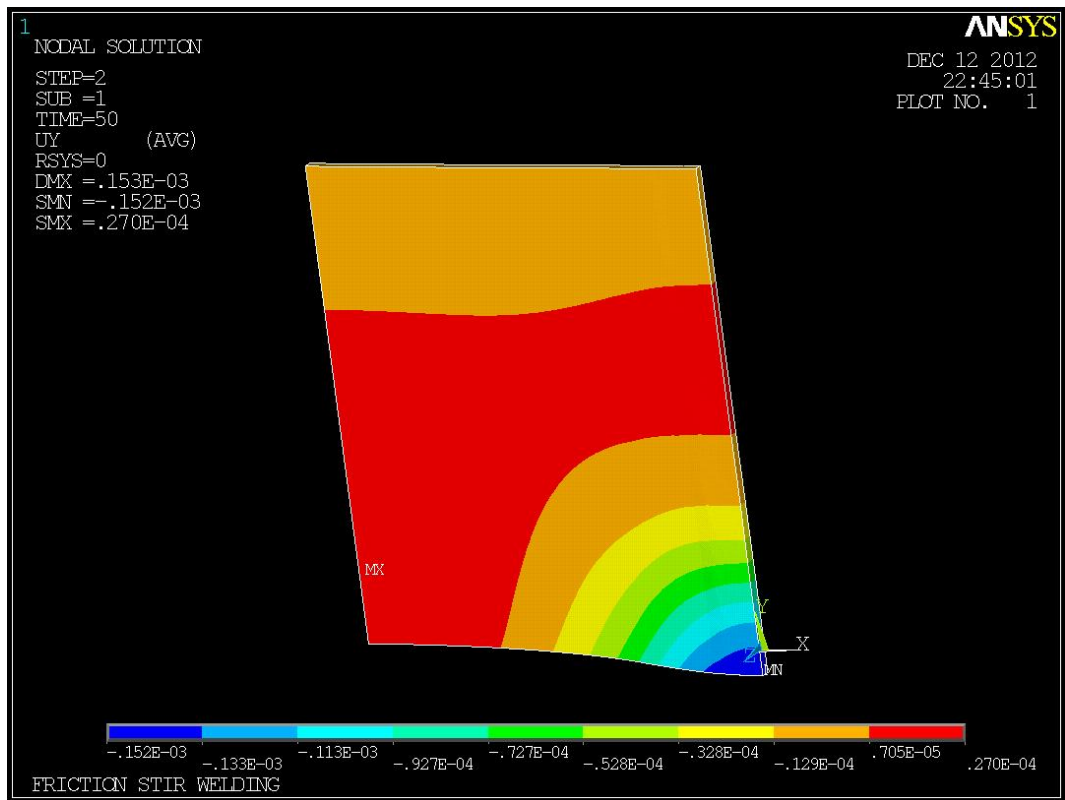
t (s)	Yer Değ. (*10 ⁻³ m)
11	-0,152
22	-0,133
33	-0,113
44	-0,0927
55	-0,0727
66	-0,0528
77	-0,0328
88	-0,0129
99	0,00705
110	0,027



Şekil 5. 64 Deney B6 zamana bağlı yer değiştirme değişimi

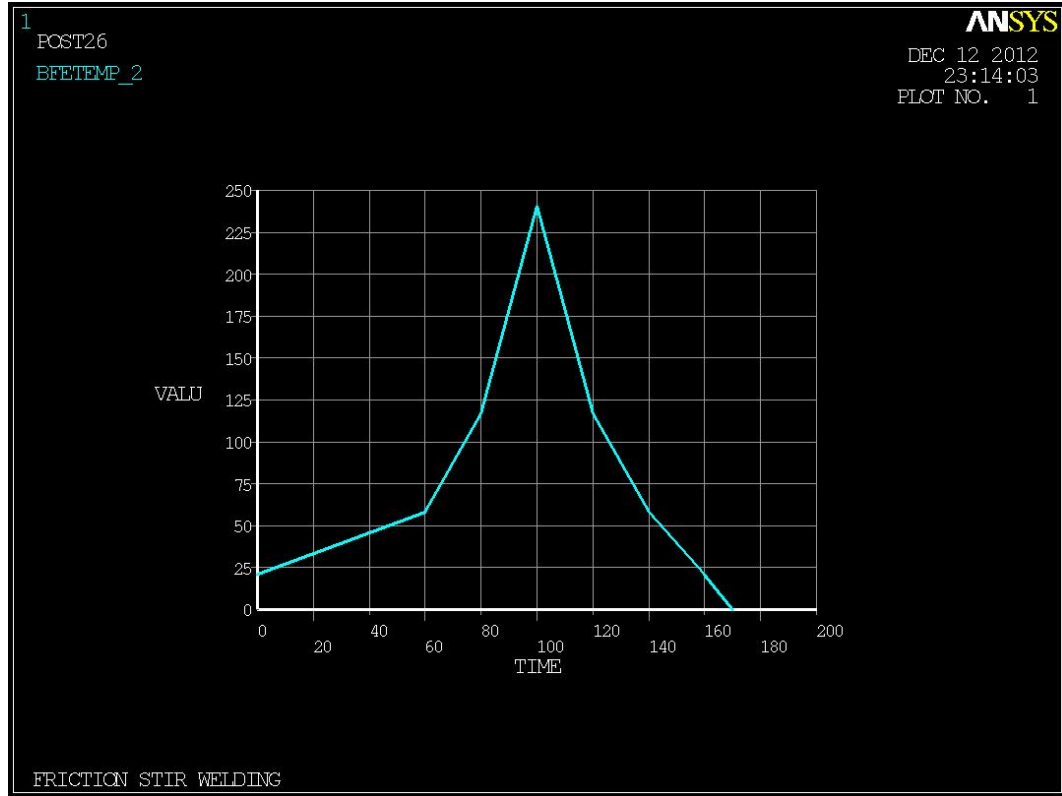


Şekil 5. 65 Deney B6 X yönündeki gerilmeler



Şekil 5. 66 Deney B6 Z yönündeki yer değiştirmeler

5. 4. 16 [N=2000 dev/dak, t= 40 s, V=75 mm/dak] için Elde Edilen Sonuçlar

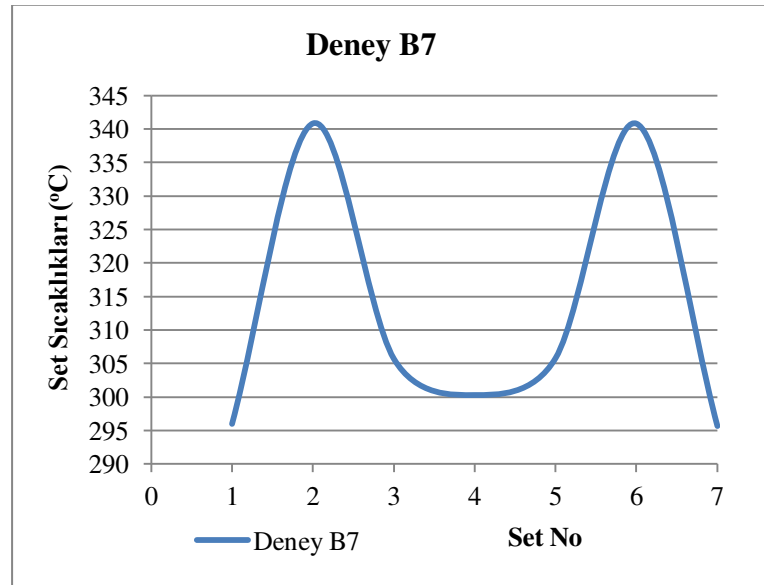


Şekil 5. 67 Deney B7 sıcaklık değişimi

Maksimum Set Sıcaklıkları

Tablo 5. 36 Deney B7 set sıcaklıkları

Set No	Sıcaklık (°C)
1	295,941
2	340,81
3	305,676
4	300,255
5	305,774
6	340,776
7	295,624

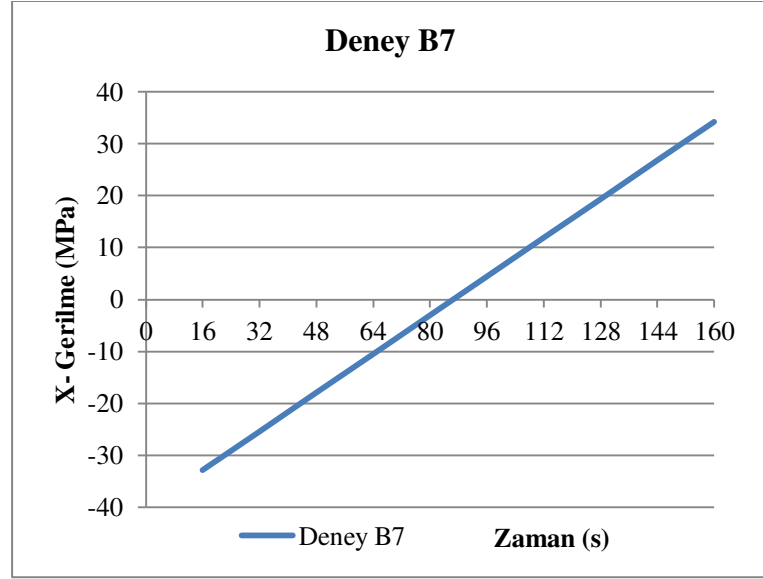


Şekil 5. 68 Deney B7 zamana bağlı maksimum set sıcaklık değişimi

X yönündeki Gerilmeler

Tablo 5. 37 Deney B7 σ_x değerleri

t (s)	Gerilme (MPa)
16	-32,8
32	-25,4
48	-17,9
64	-10,5
80	-3,02
96	4,43
112	11,9
128	19,3
144	26,8
160	34,2

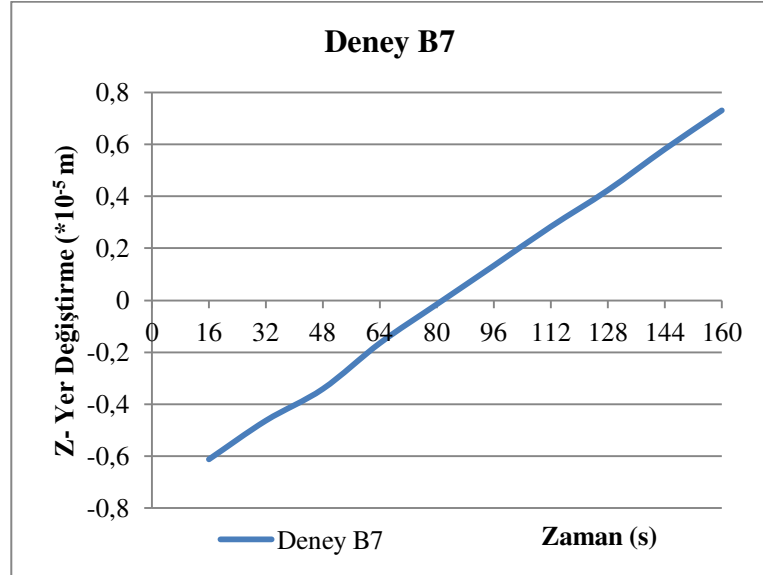


Şekil 5. 69 Deney B7 zamana bağlı σ_x değişimi

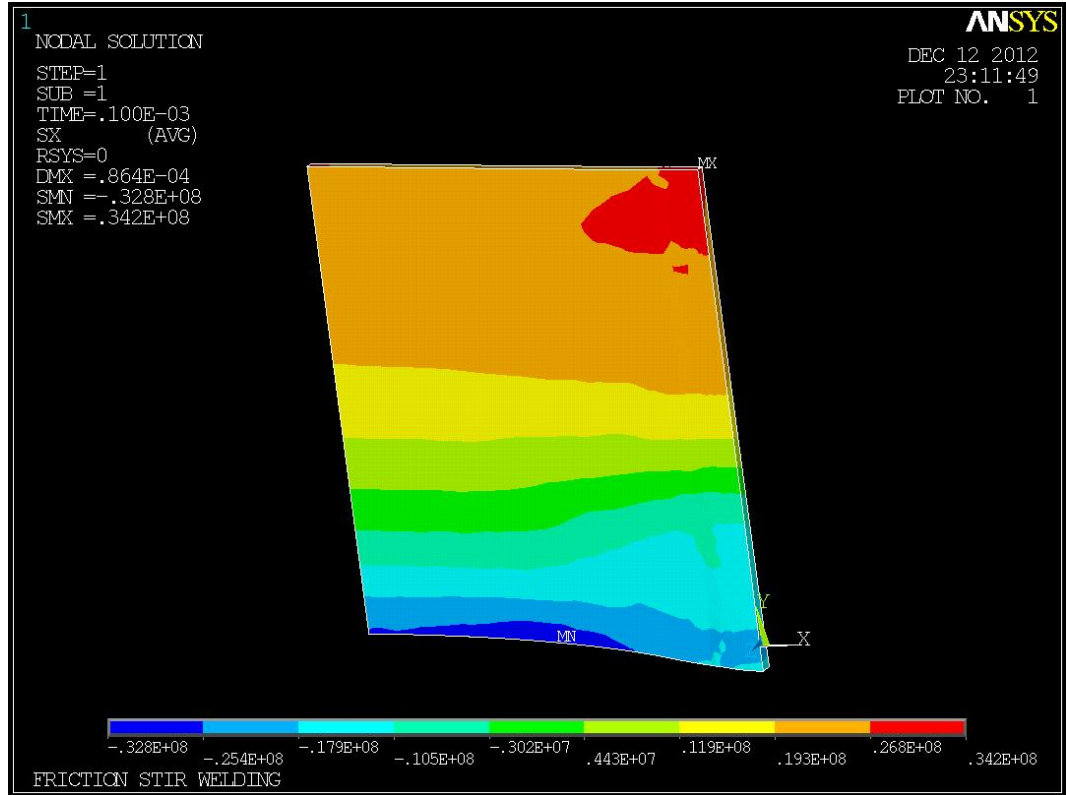
Z yönündeki Yer Değiştirmeler

Tablo 5. 38 Deney B7 yer değiştirme değerleri

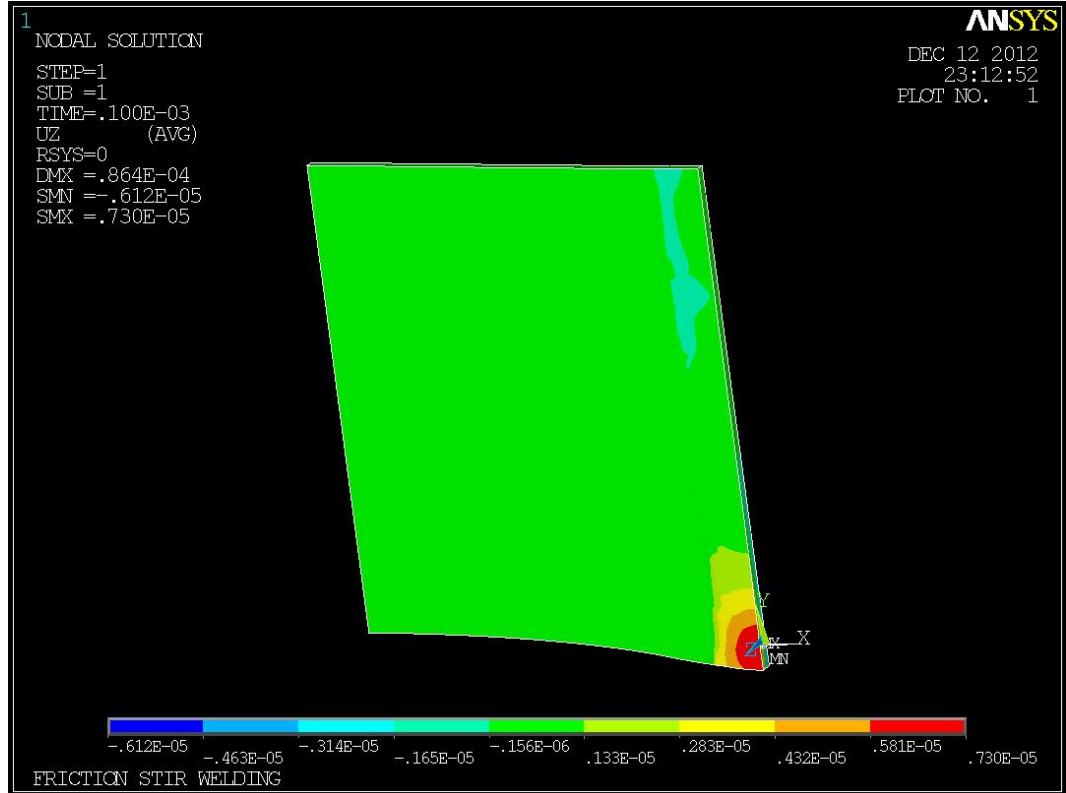
t (s)	Yer Değ. (*10 ⁻⁵ m)
16	-0,612
32	-0,463
48	-0,341
64	-0,165
80	-0,0156
96	0,133
112	0,283
128	0,423
144	0,581
160	0,73



Şekil 5. 70 Deney B7 zamana bağlı yer değiştirme değişimi



Şekil 5. 71 Deney B7 X yönündeki gerilmeler



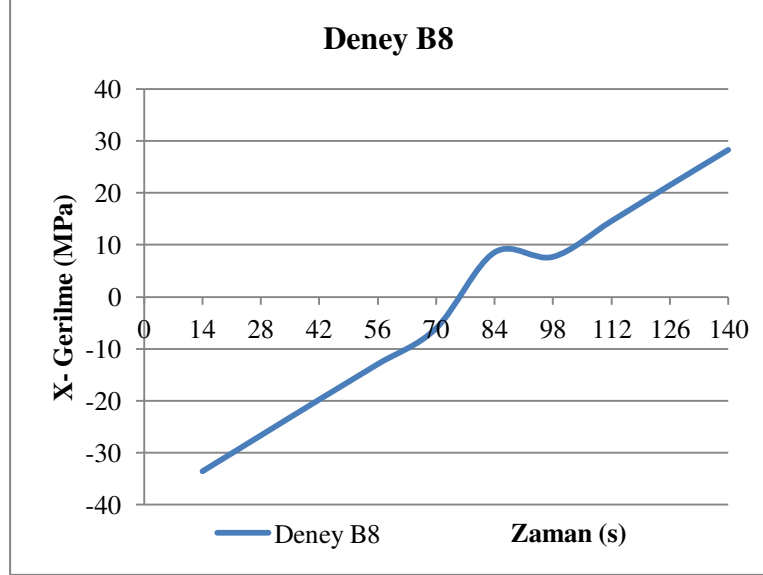
Şekil 5. 72 Deney B7 Z yönündeki yer değiştirmeler

5. 4. 17 [N=2000 dev/dak, t= 40 s, V=100 mm/dak] için Elde Edilen Sonuçlar

X yönündeki Gerilmeler

Tablo 5. 39 Deney B8 σ_x değerleri

t (s)	Gerilme (MPa)
14	-33,5
28	-26,6
42	-19,7
56	-12,9
70	-6,01
84	8,59
98	7,73
112	14,6
126	21,5
140	28,3

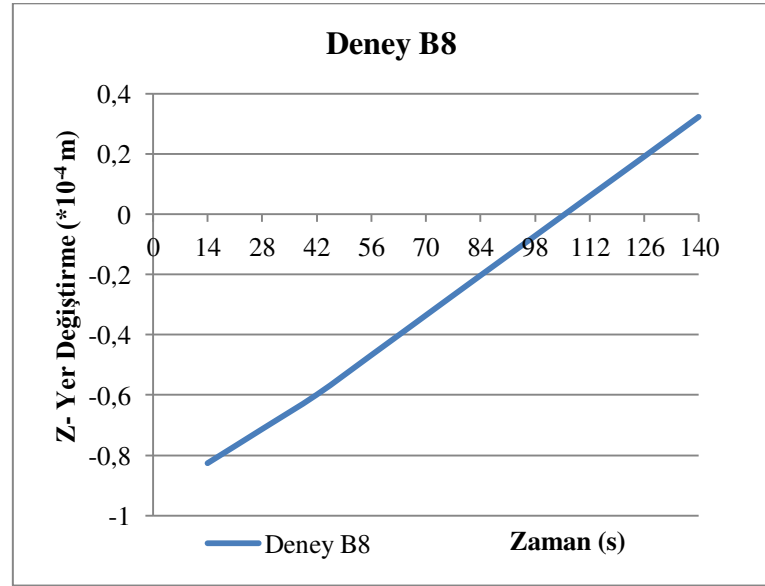


Şekil 5. 73 Deney B8 zamana bağlı σ_x değişimi

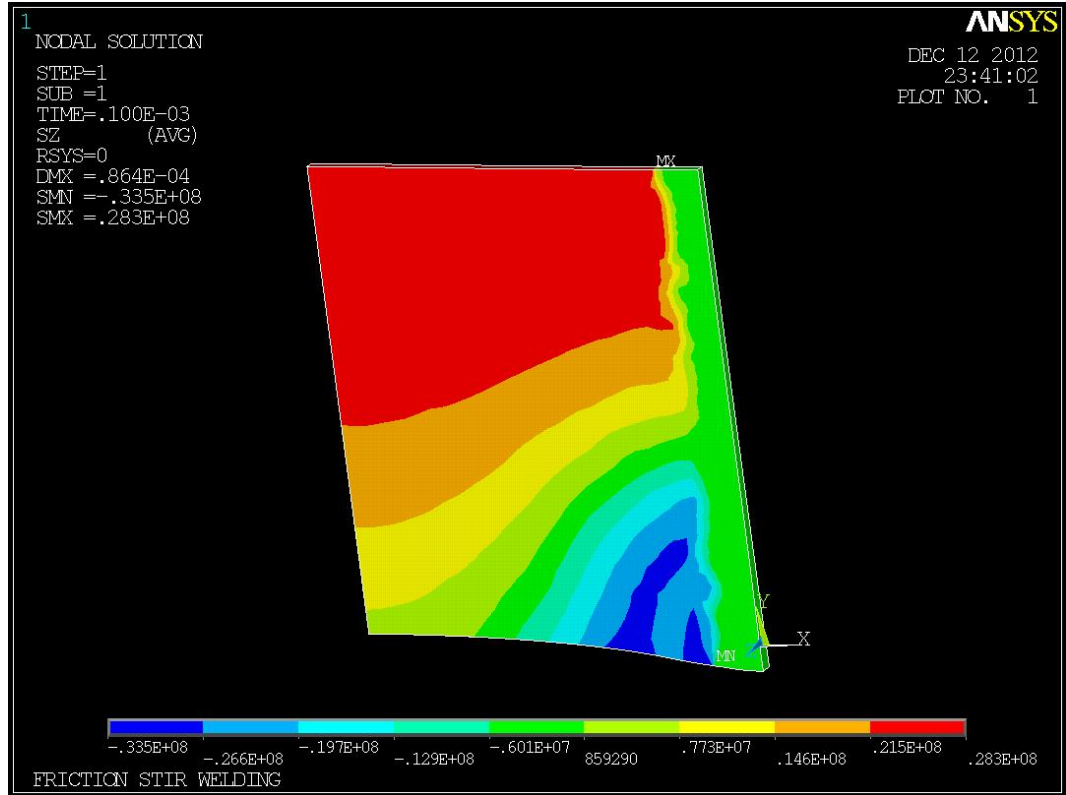
Z yönündeki Yer Değiştirmeler

Tablo 5. 40 Deney B8 yer değiştirme değerleri

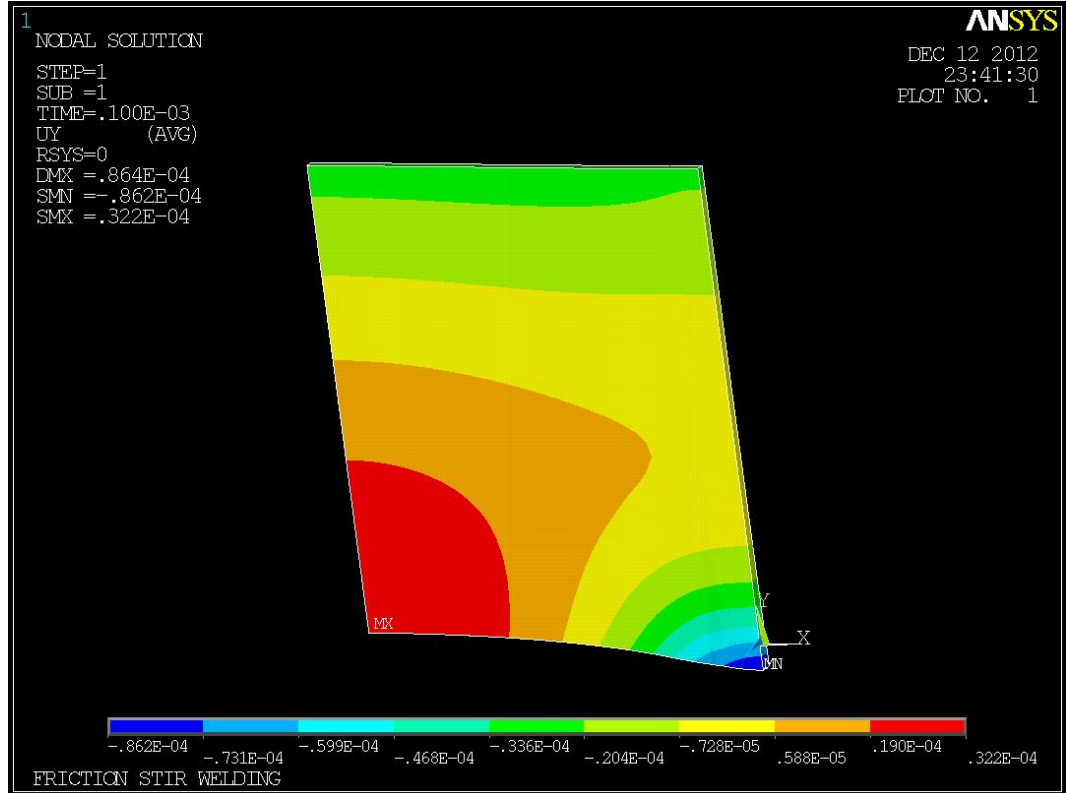
t (s)	Yer Değ. (*10 ⁻⁴ m)
14	-0,826
28	-0,713
42	-0,599
56	-0,468
70	-0,336
84	-0,204
98	-0,0728
112	0,0588
126	0,19
140	0,322



Şekil 5. 74 Deney B8 zamana bağlı yer değiştirme değişimi



Şekil 5. 75 Deney B8 X yönündeki gerilmeler



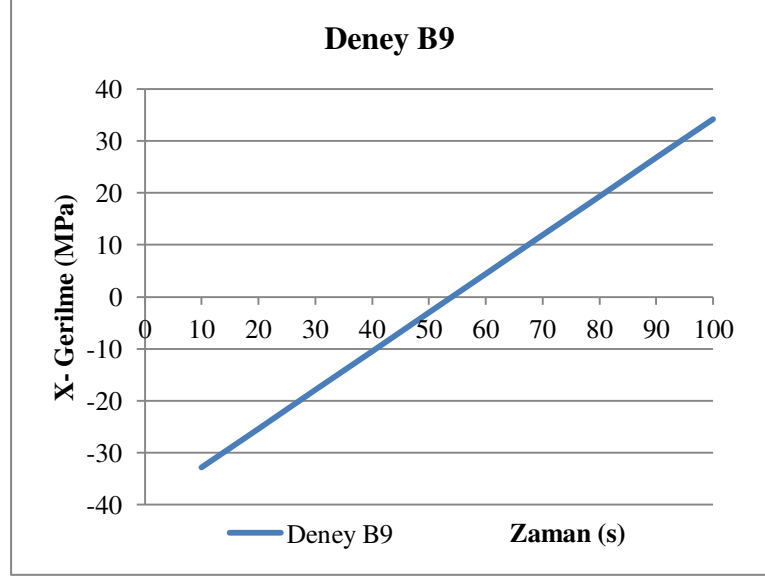
Şekil 5. 76 Deney B8 Z yönündeki yer değiştirmeler

5. 4. 18 [N=2000 dev/dak, t= 40 s, V=150 mm/dak] için Elde Edilen Sonuçlar

X yönündeki Gerilmeler

Tablo 5. 41 Deney B9 σ_x değerleri

t (s)	Gerilme (MPa)
10	-32,8
20	-25,4
30	-17,9
40	-10,5
50	-3,02
60	4,43
70	11,9
80	19,3
90	26,8
100	34,2

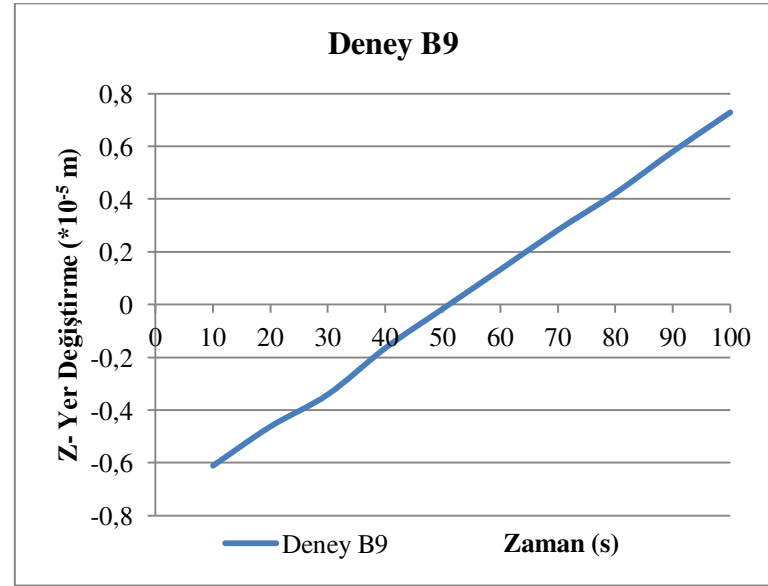


Şekil 5. 77 Deney B9 zamana bağlı σ_x değişimi

Z yönündeki Yer Değiştirmeler

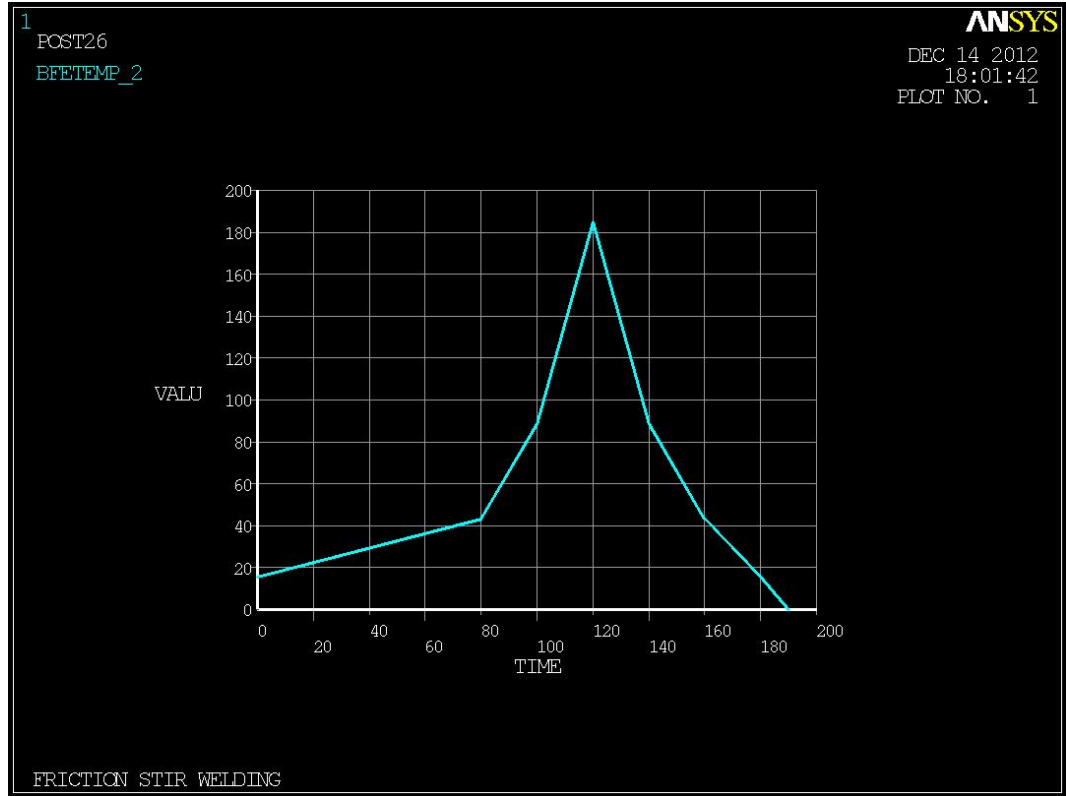
Tablo 5. 42 Deney B9 yer değiştirme değerleri

t (s)	Yer Değ. (*10 ⁻⁵ m)
10	-0,612
20	-0,463
30	-0,341
40	-0,165
50	-0,0156
60	0,133
70	0,283
80	0,423
90	0,581
100	0,73



Şekil 5. 78 Deney B9 zamana bağlı yer değiştirme değişimi

5. 4. 19 [N=1500 dev/dak, t= 60 sn, V=75 mm/dak] için Elde Edilen Sonuçlar

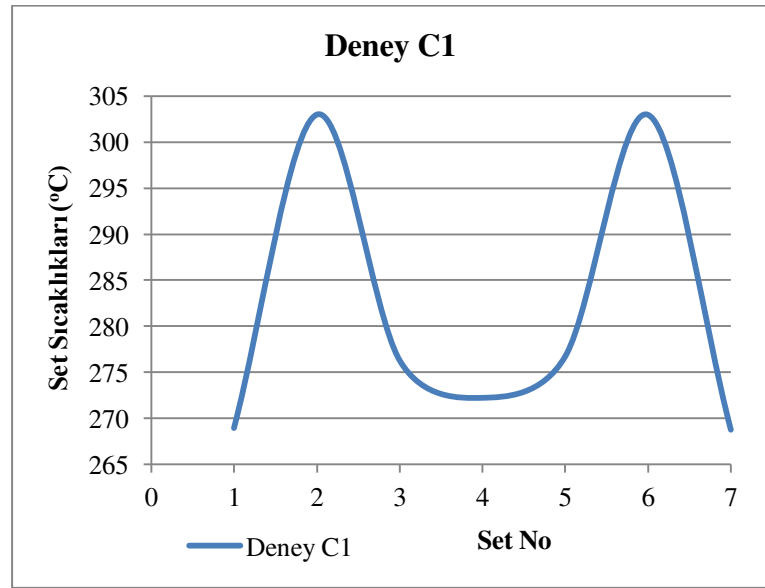


Şekil 5. 79 Deney C1 sıcaklık değişimi

Maksimum İlk Set Sıcaklıkları

Tablo 5. 43 Deney C1 set sıcaklıkları

Set No	Sıcaklık (°C)
1	268,914
2	302,987
3	276,284
4	272,200
5	276,7
6	302,963
7	268,729

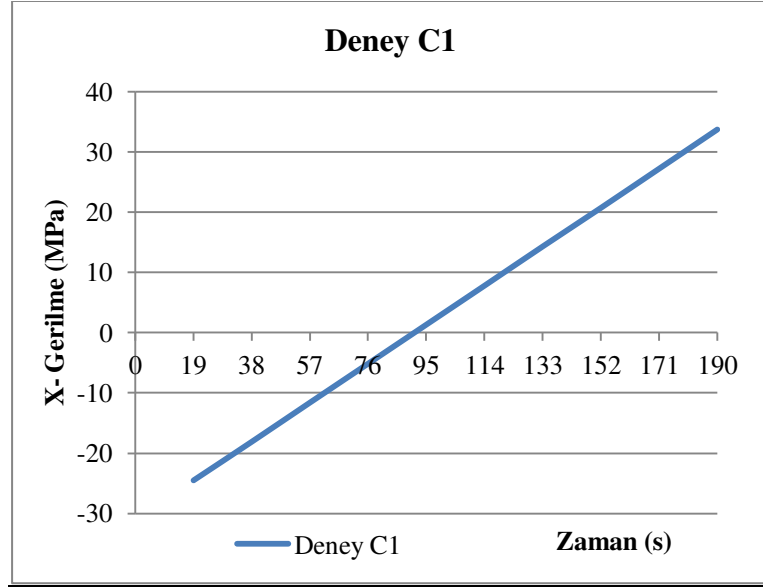


Şekil 5. 80 Deney C1 zamana bağlı set sıcaklık değişimi

X yönündeki Gerilmeler

Tablo 5. 44 Deney C1 σ_x değerleri

t (s)	Gerilme (MPa)
19	-24,5
38	-18,1
57	-11,6
76	-5,14
95	1,33
114	7,8
133	14,3
152	20,7
171	27,2
190	33,7

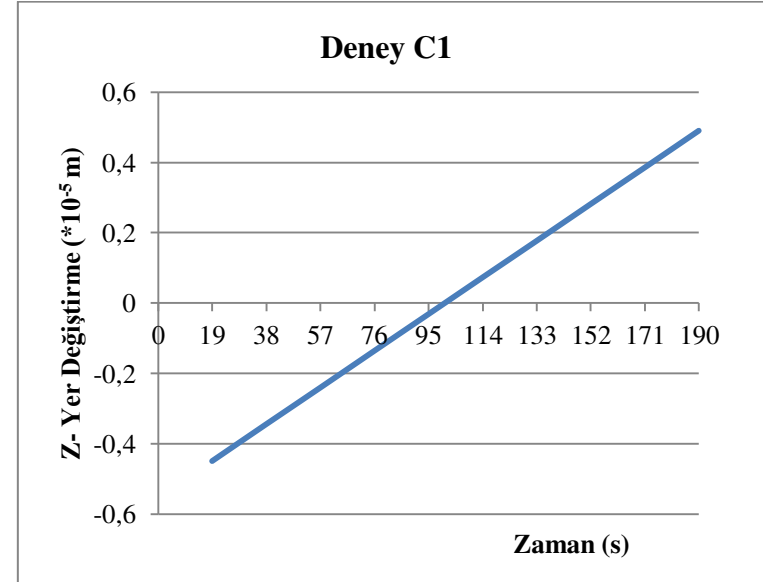


Şekil 5. 81 Deney C1 zamana bağlı σ_x değişimi

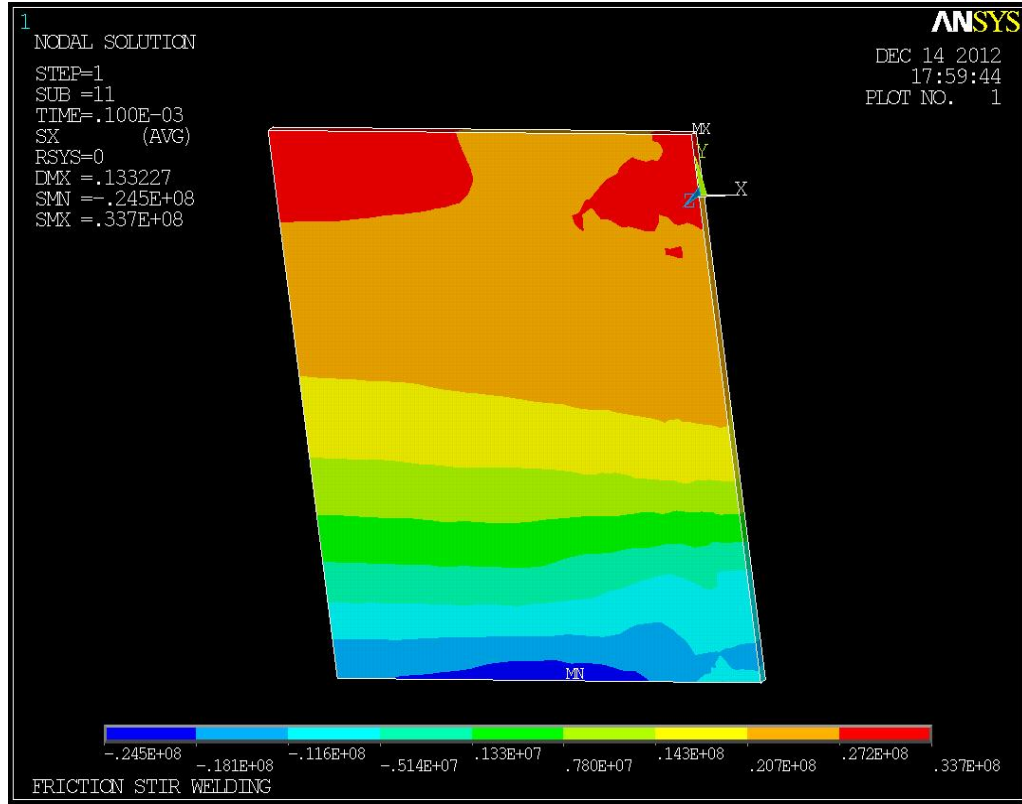
Z yönündeki Yer Değiştirmeler

Tablo 5. 45 Deney C1 yer değiştirme değerleri

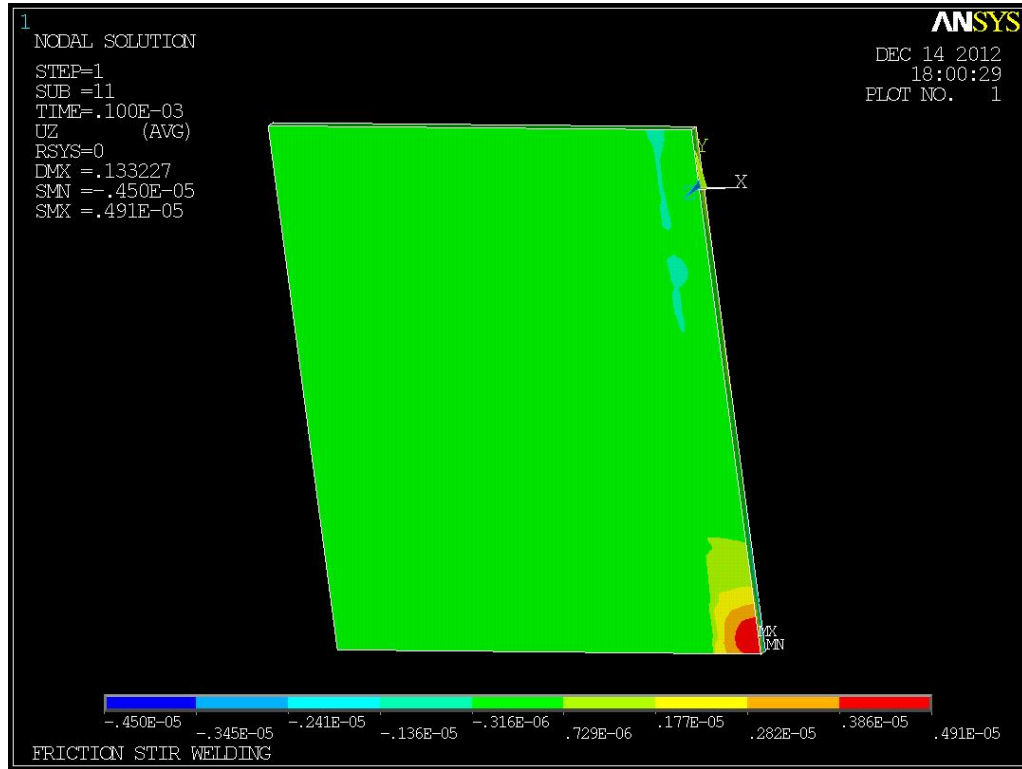
t (s)	Yer Değ. ($\cdot 10^{-5}$ m)
19	-0,45
38	-0,345
57	-0,241
76	-0,136
95	-0,0316
114	0,0729
133	0,177
152	0,282
171	0,386
190	0,491



Şekil 5. 82 Deney C1 zamana bağlı yer değiştirme değişimi



Şekil 5. 83 Deney C1 X yönündeki gerilmeler



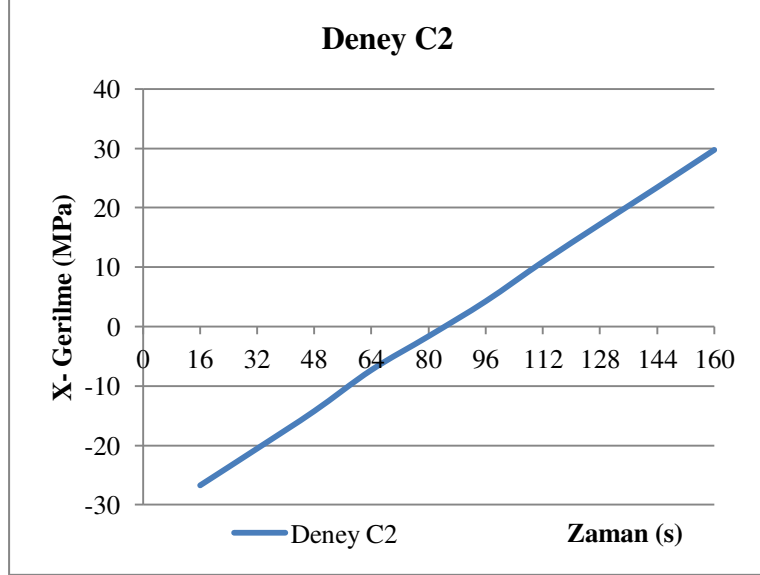
Şekil 5. 84 Deney C1 Z yönündeki yer değiştirmeler

5. 4. 20 [N=1500 dev/dak, t= 60 s, V=100 mm/dak] için Elde Edilen Sonuçlar

X yönündeki Gerilmeler

Tablo 5. 46 Deney C2 σ_x değerleri

t (s)	Gerilme (MPa)
16	-26,7
32	-20,5
48	-14,2
64	-7,29
80	-1,62
96	4,26
112	10,9
128	17,2
144	23,4
160	29,7

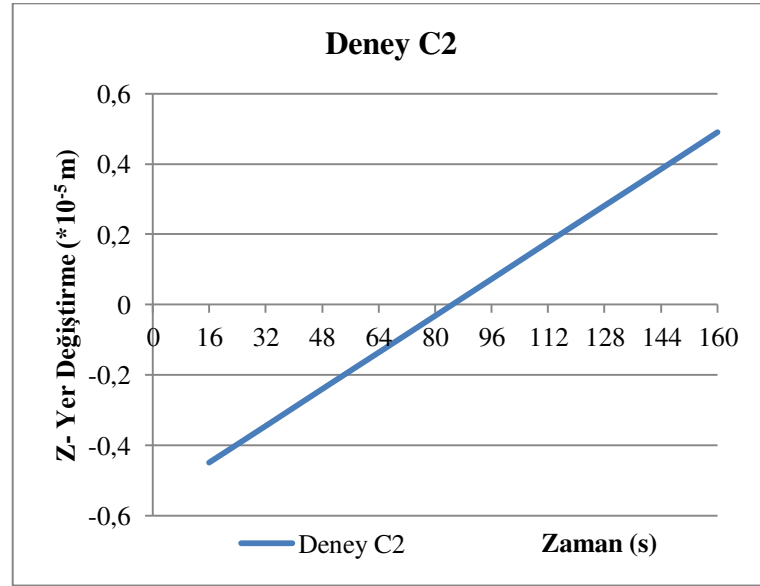


Şekil 5. 85 Deney C2 zamana bağlı σ_x değişimi

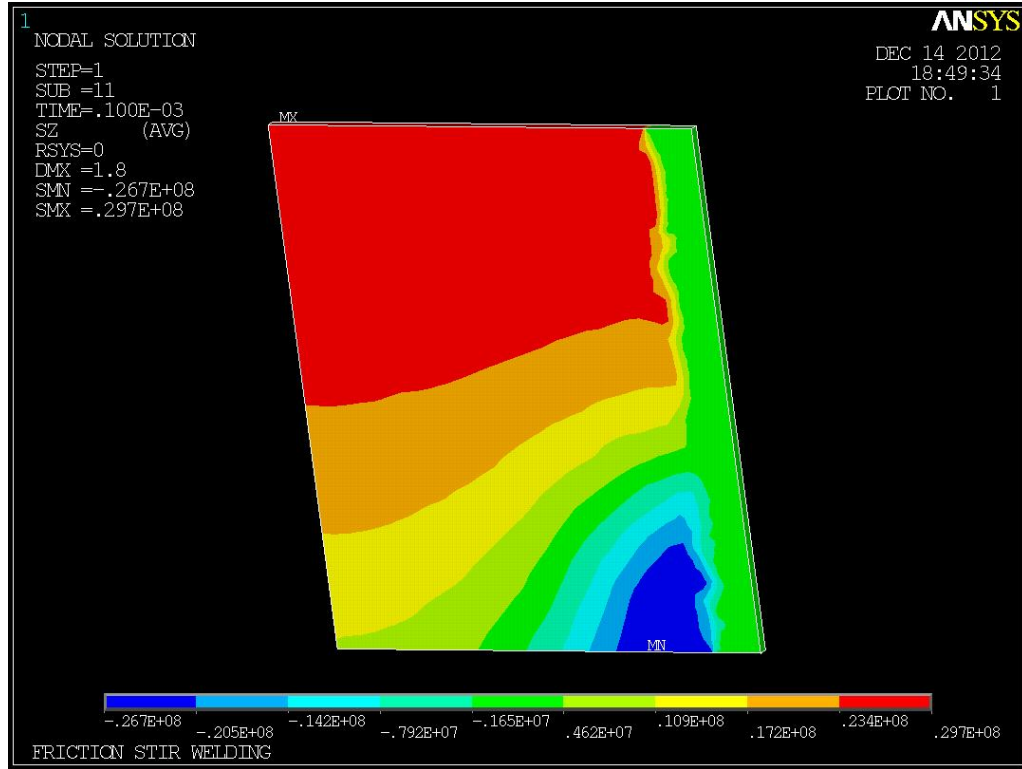
Z yönündeki Yer Değiştirmeler

Tablo 5. 47 Deney C2 yer değiştirme değerleri

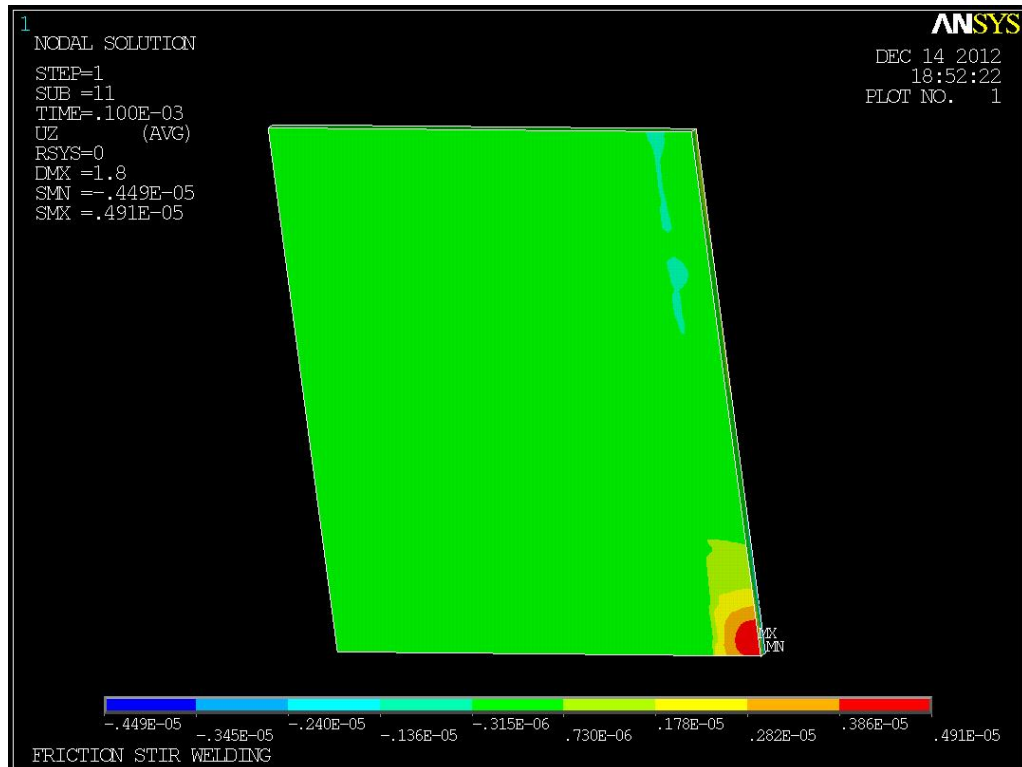
t (s)	Yer Değ. (*10 ⁻⁵ m)
16	-0,449
32	-0,345
48	-0,24
64	-0,136
80	-0,0316
96	0,073
112	0,178
128	0,282
144	0,386
160	0,491



Şekil 5. 86 Deney C2 zamana bağlı Z yönündeki yer değiştirme değişimi



Şekil 5. 87 Deney C2 X yönündeki gerilmeler



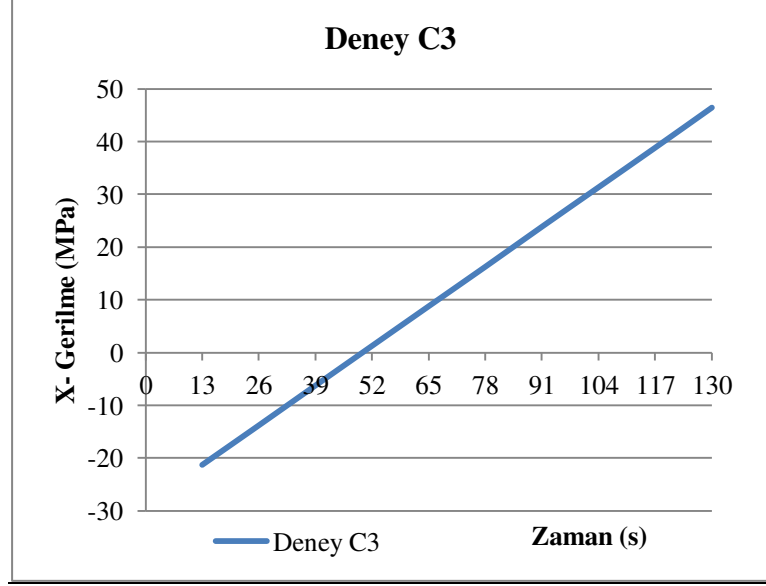
Şekil 5. 88 Deney C2 Z yönündeki yer değiştirmeler

5. 4. 21 [N=1500 dev/dak, t= 60 s, V=150 mm/dak] için Elde Edilen Sonuçlar

X yönündeki Gerilmeler

Tablo 5. 48 Deney C3 σ_x değerleri

t (s)	Gerilme (MPa)
13	-21,3
26	-13,8
39	-6,24
52	1,29
65	8,81
78	16,3
91	23,9
104	31,4
117	38,9
130	46,5

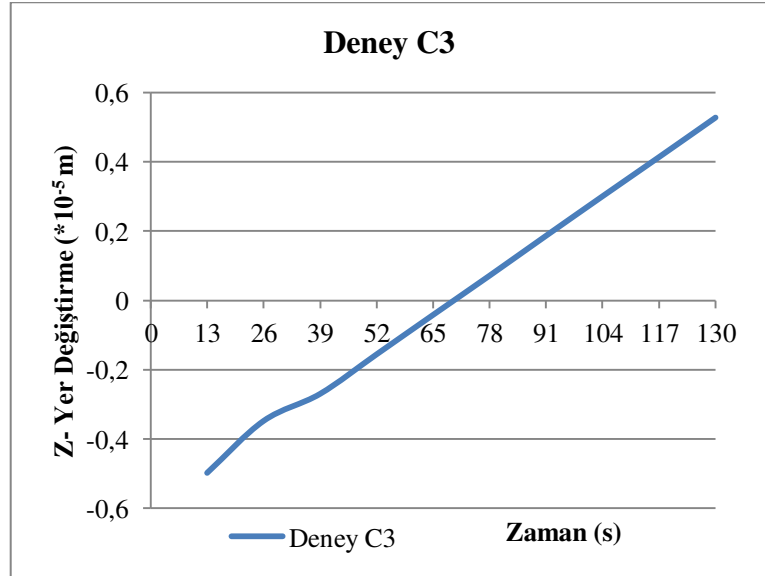


Şekil 5. 89 Deney C3 zamana bağlı σ_x değişimi

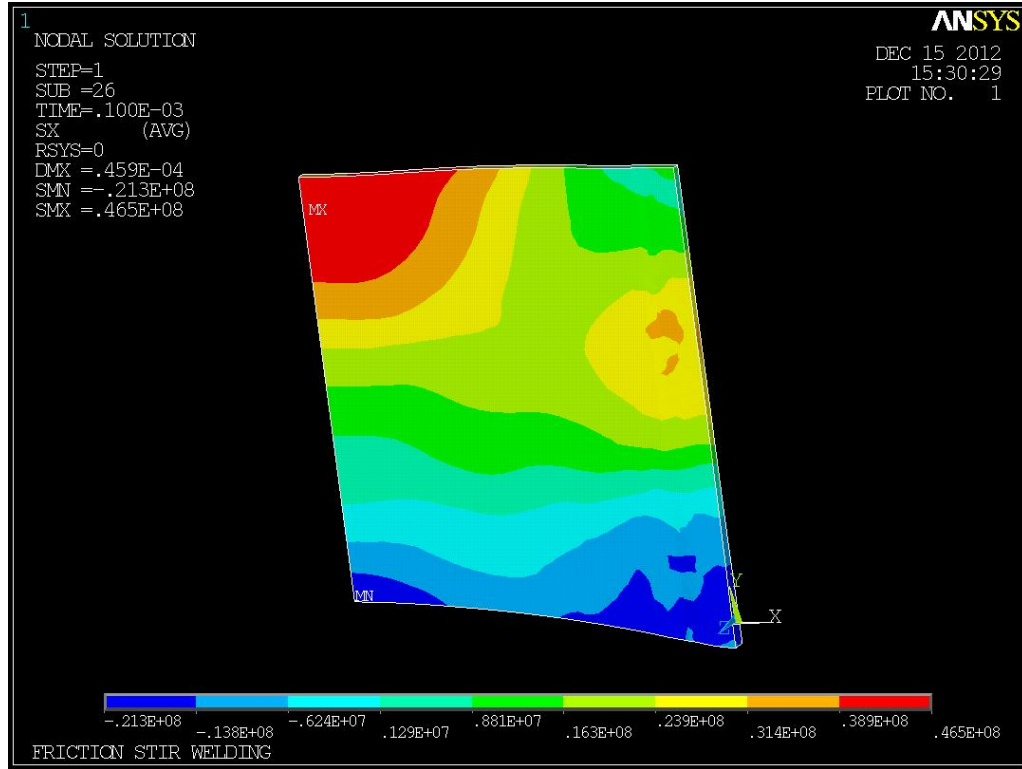
Z yönündeki Yer Değiştirmeler

Tablo 5. 49 Deney C3 yer değiştirme değerleri

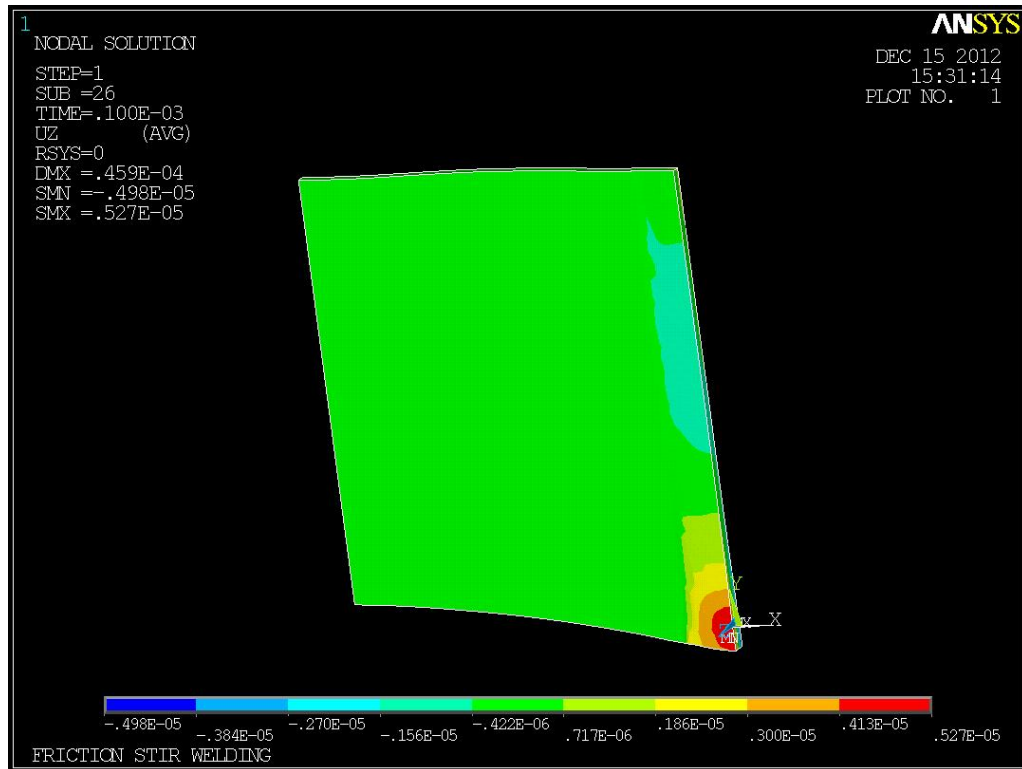
t (s)	Yer Değ. (*10 ⁻⁵ m)
13	-0,498
26	-0,348
39	-0,27
52	-0,156
65	-0,0422
78	0,071
91	0,186
104	0,3
117	0,413
130	0,527



Şekil 5. 90 Deney C3 zamana bağlı Z yönündeki yer değiştirme değişimi

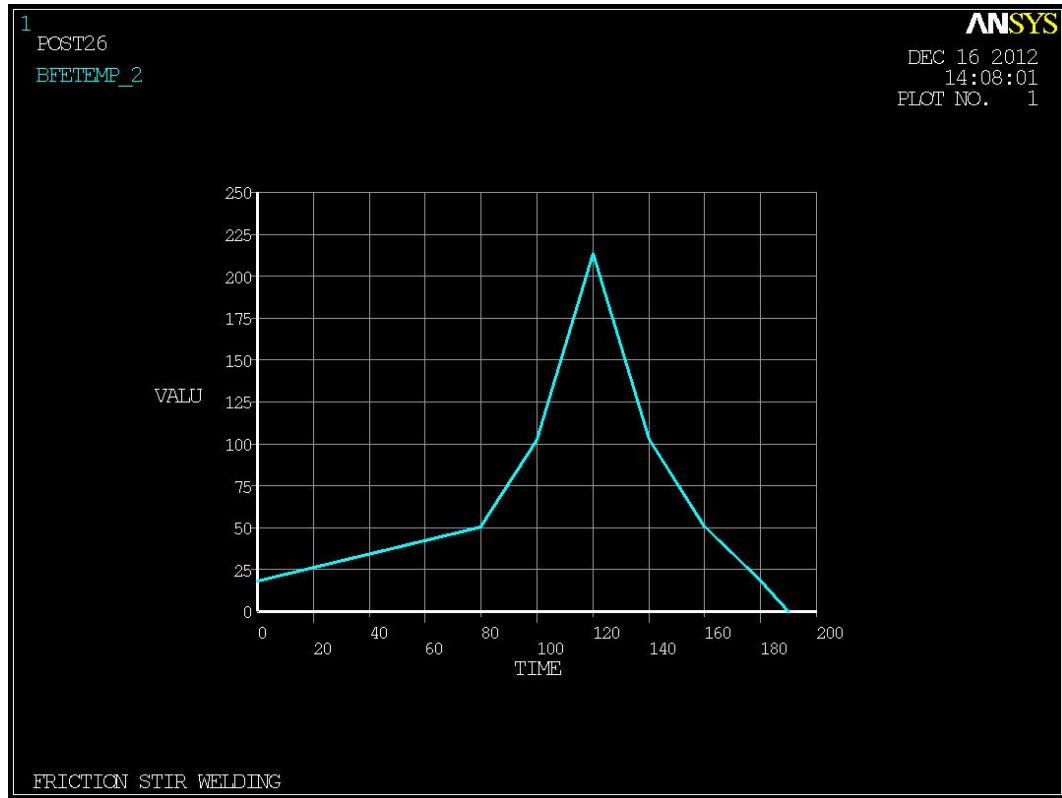


Şekil 5. 91 Deney C3 X yönündeki gerilmeler



Şekil 5. 92 Deney C3 Z yönündeki yer değiştirme değişimi

5. 4. 22 [N=1750 dev/dak, t= 60 s, V=75 mm/dak] için Elde Edilen Sonuçlar

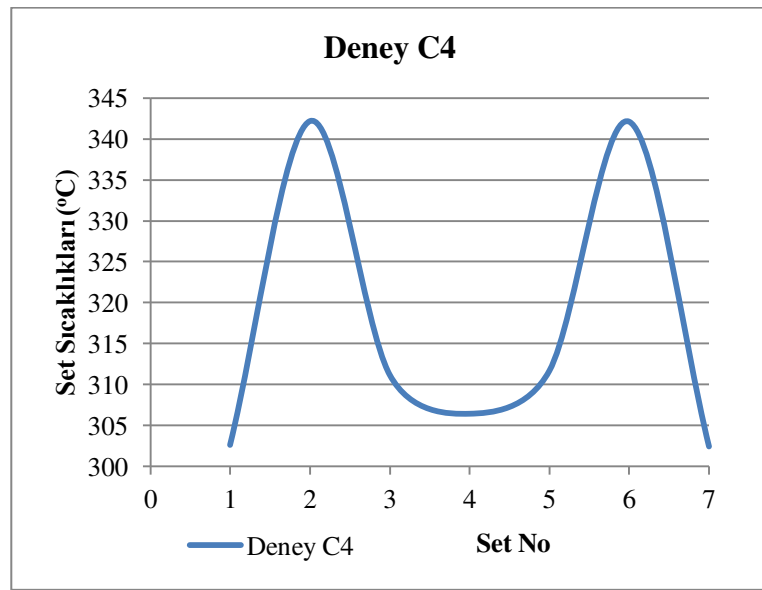


Şekil 5. 93 Deney C4 sıcaklık değişimi

Maksimum Set Sıcaklıkları

Tablo 5. 50 Deney C4 set sıcaklıkları

Set No	Sıcaklık (°C)
1	302,658
2	342,147
3	311,215
4	306,466
5	311,300
6	342,084
7	302,473

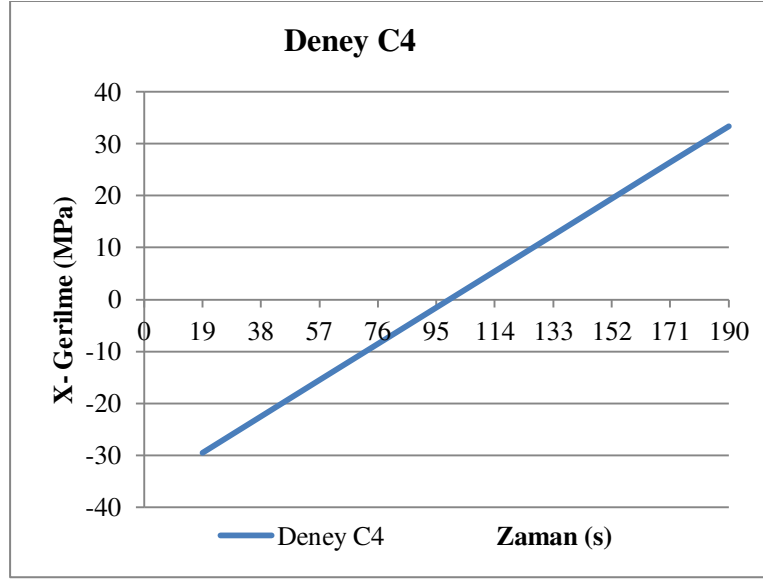


Şekil 5. 94 Deney C4 zamana bağlı maksimum set sıcaklık değişimi

X yönündeki Gerilmeler

Tablo 5. 51 Deney C4 σ_x değerleri

t (s)	Gerilme (MPa)
19	-29,5
38	-22,5
57	-15,5
76	-8,53
95	-1,55
114	5,43
133	12,4
152	19,4
171	26,4
190	33,3

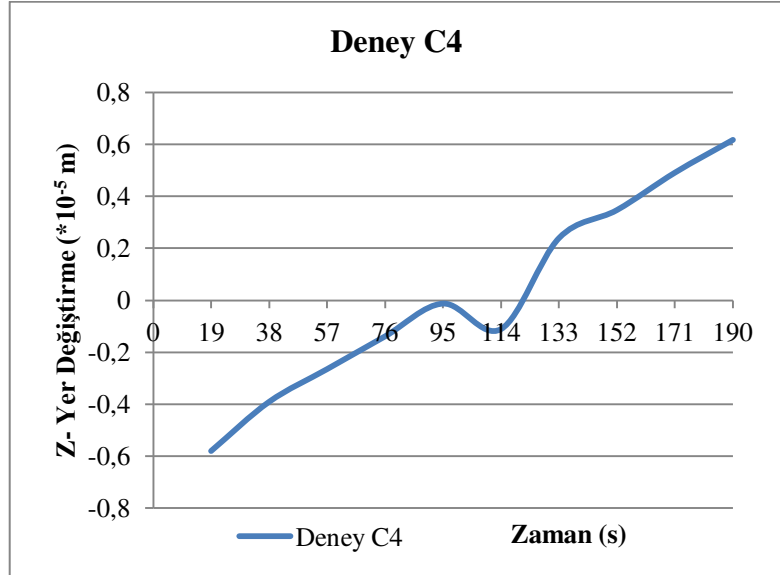


Şekil 5. 95 Deney C4 zamana bağlı σ_x değişimi

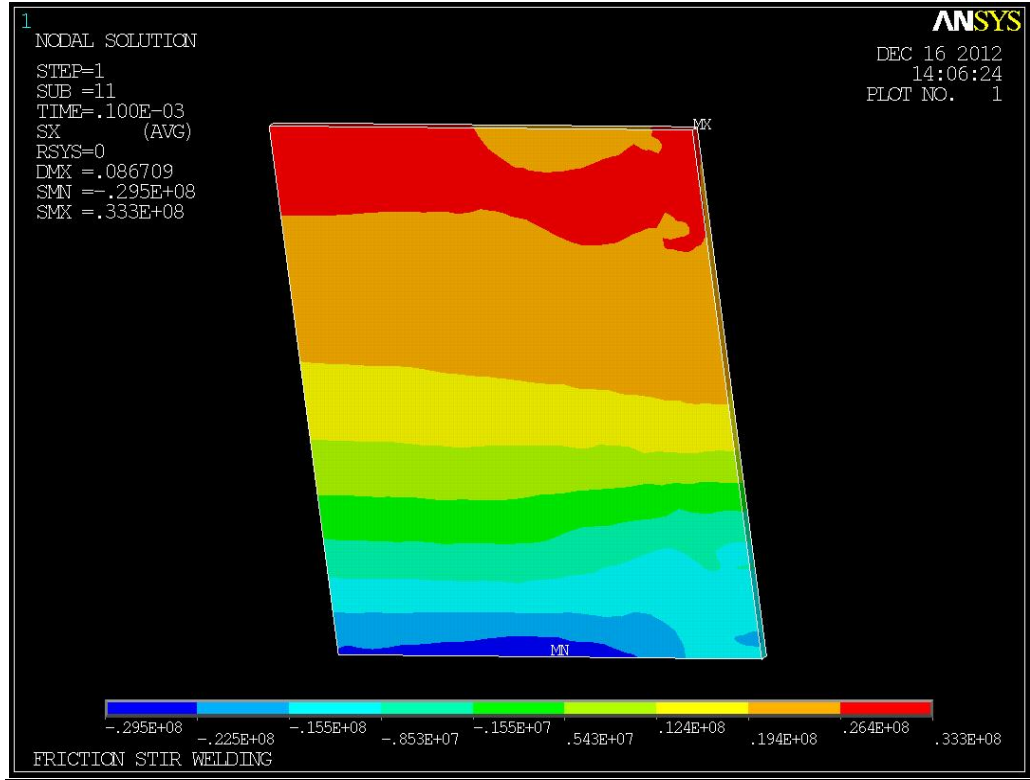
Z yönündeki Yer Değiştirmeler

Tablo 5. 52 Deney C4 yer değiştirme değerleri

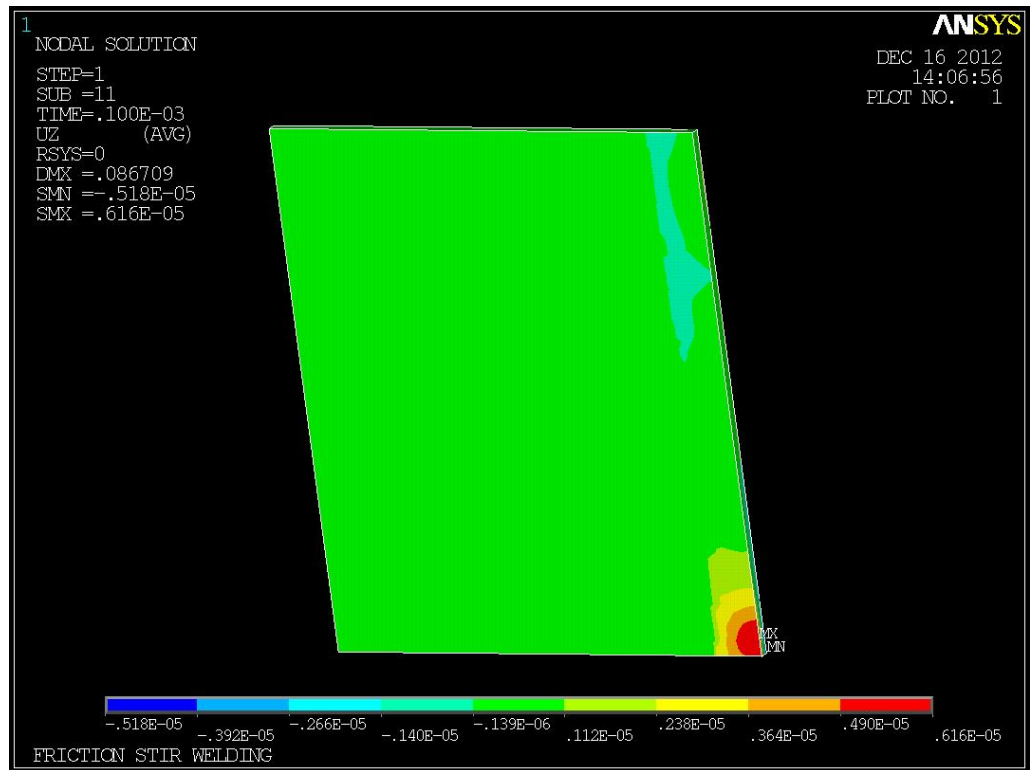
t (s)	Yer Değ. (*10 ⁻⁵ m)
19	-0,581
38	-0,392
57	-0,266
76	-0,14
95	-0,0139
114	-0,112
133	0,238
152	0,346
171	0,49
190	0,616



Şekil 5. 96 Deney C4 zamana bağlı Z yönündeki yer değiştirme değişimi



Şekil 5. 97 Deney C4 X yönündeki gerilmeler



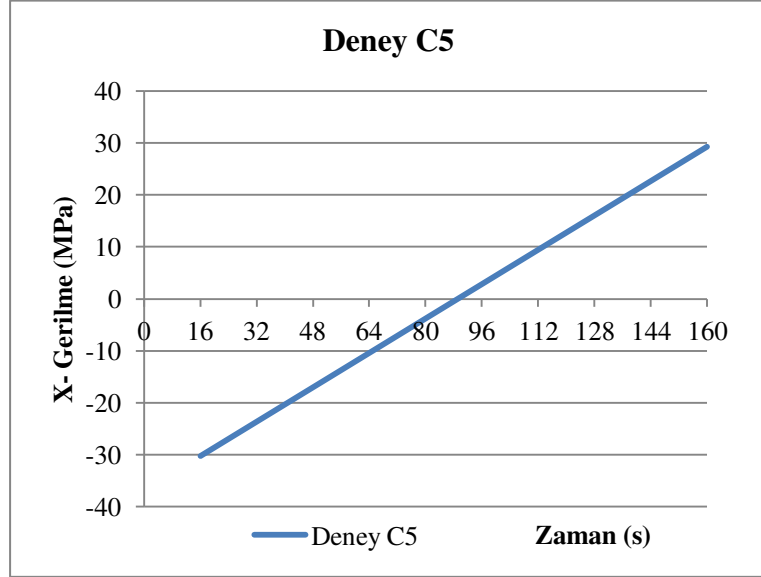
Şekil 5. 98 Deney C4 Z yönündeki yer değiştirmeler

5. 4. 23 [N=1750 dev/dak, t= 60 s, V=100 mm/dak] için Elde Edilen Sonuçlar

X yönündeki Gerilmeler

Tablo 5. 53 Deney C5 σ_x değerleri

t (s)	Gerilme (MPa)
16	-30,2
32	-23,6
48	-17
64	-10,4
80	-3,79
96	2,81
112	9,41
128	16
144	22,6
160	29,2

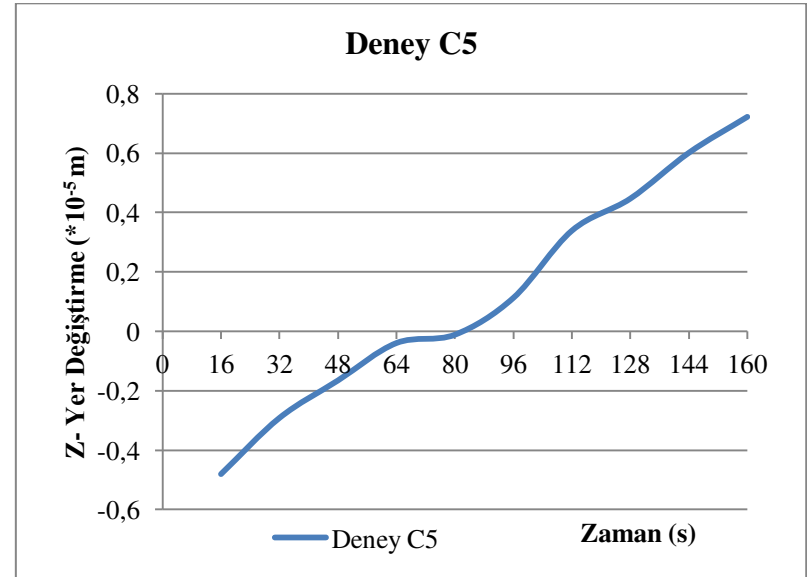


Şekil 5. 99 Deney C5 zamana bağlı σ_x değişimi

Z yönündeki Yer Değiştirmeler

Tablo 5. 54 Deney C5 yer değiştirme değerleri

t (s)	Yer Değ. (*10 ⁻⁵ m)
16	-0,481
32	-0,292
48	-0,166
64	-0,04
80	-0,012
96	0,112
112	0,338
128	0,446
144	0,6
160	0,721



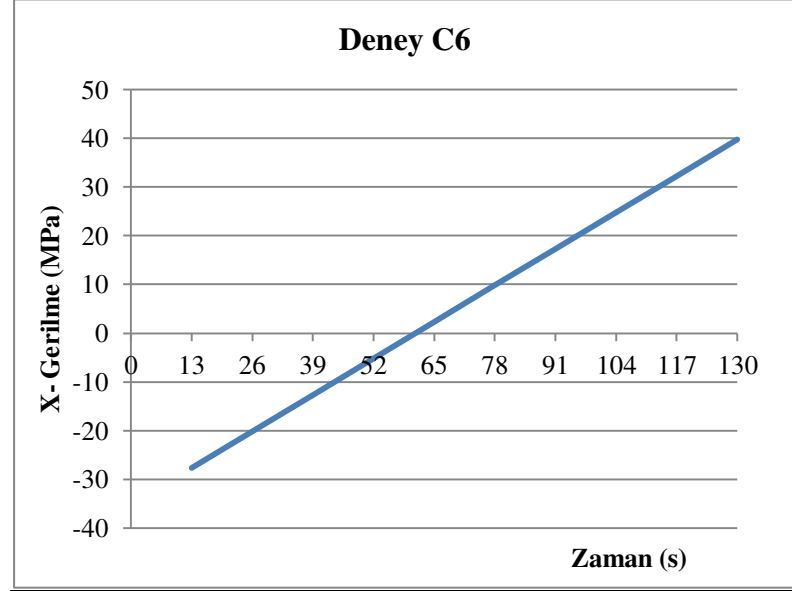
Şekil 5. 100 Deney C5 zamana bağlı Z yönündeki yer değiştirme değişimi

5. 4. 24. $[N=1750 \text{ dev/dak}, t=60 \text{ s}, V=150 \text{ mm/dak}]$ için Elde Edilen Sonuçlar

X yönündeki Gerilmeler

Tablo 5. 55 Deney C6 σ_x değerleri

t (s)	Gerilme (MPa)
13	-27,7
26	-20,2
39	-12,72
42	-5,03
65	2,29
78	9,86
91	17,3
104	24,8
117	34,3
130	39,8

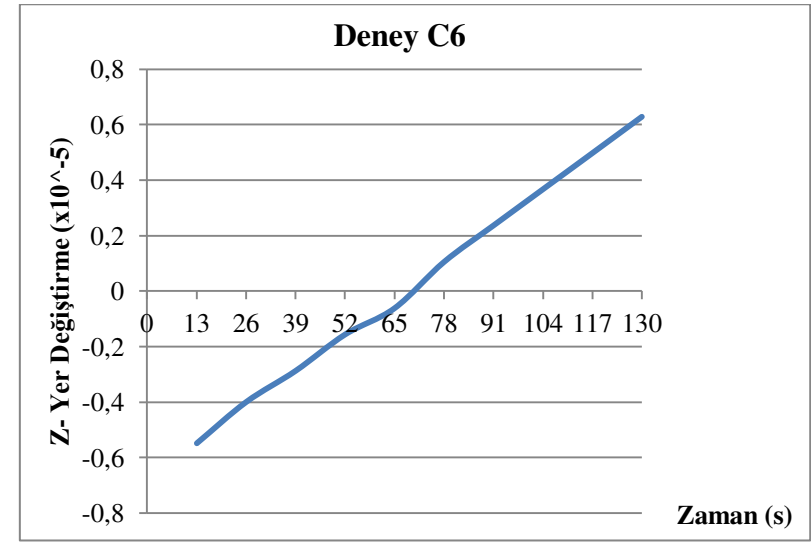


Şekil 5. 101 Deney C6 zamana bağlı σ_x değişimi

Z yönündeki Yer Değiştirmeler

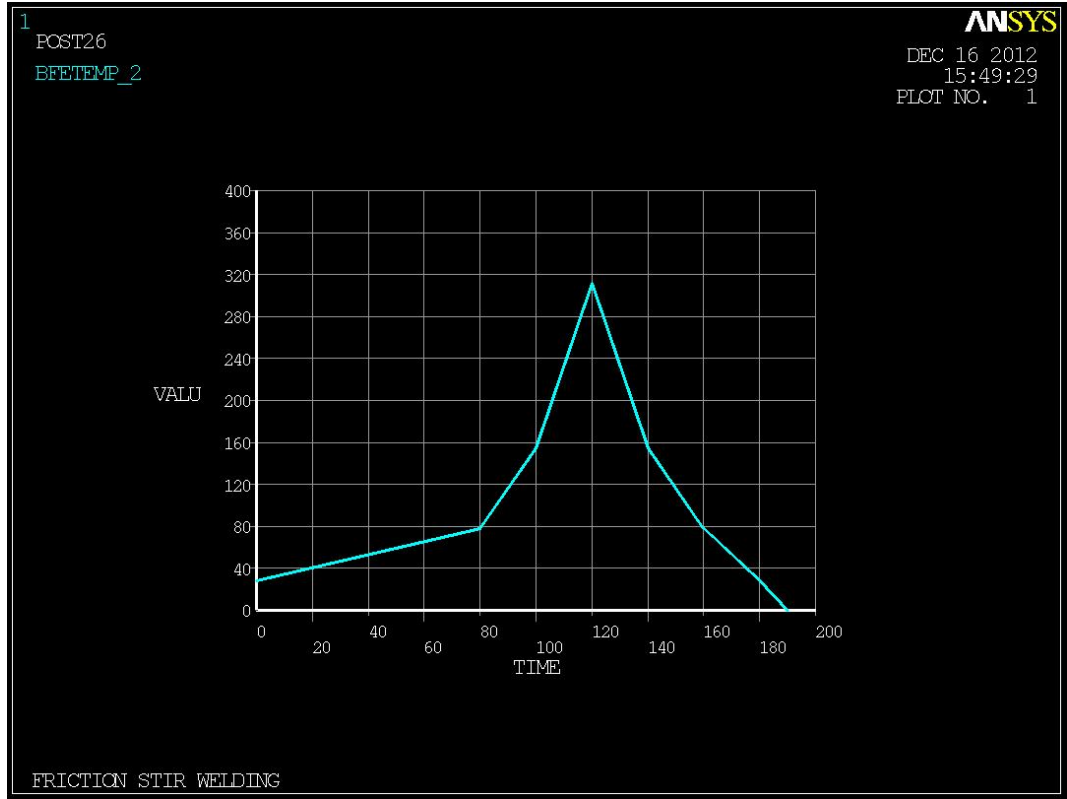
Tablo 5. 56 Deney C6 yer değiştirme değerleri

t (s)	Yer Değ. ($\cdot 10^{-5} \text{ m}$)
16	-0,481
32	-0,292
48	-0,166
64	-0,04
80	-0,012
96	0,112
112	0,338
128	0,446
144	0,6
160	0,721



Şekil 5. 102 Deney C6 zamana bağlı Z yönündeki yer değiştirme değişimi

5. 4. 25 [N=2000 dev/dak, t= 60 s, V=75 mm/dak] için Elde Edilen Sonuçlar

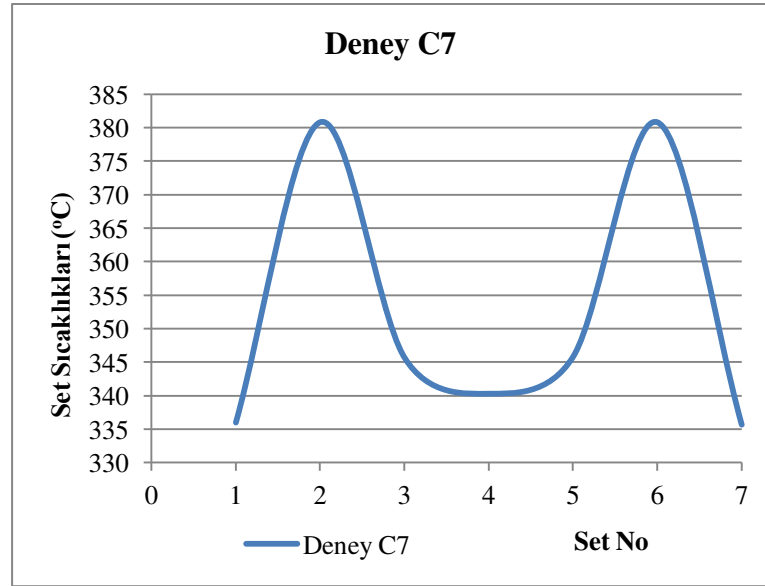


Şekil 5. 103 Deney C7 sıcaklık değişimi

Maksimum Set Sıcaklıkları

Tablo 5. 57 Deney C7 set sıcaklıkları

Set No	Sıcaklık (°C)
1	335,981
2	380,852
3	345,686
4	340,295
5	345,814
6	380,840
7	335,664

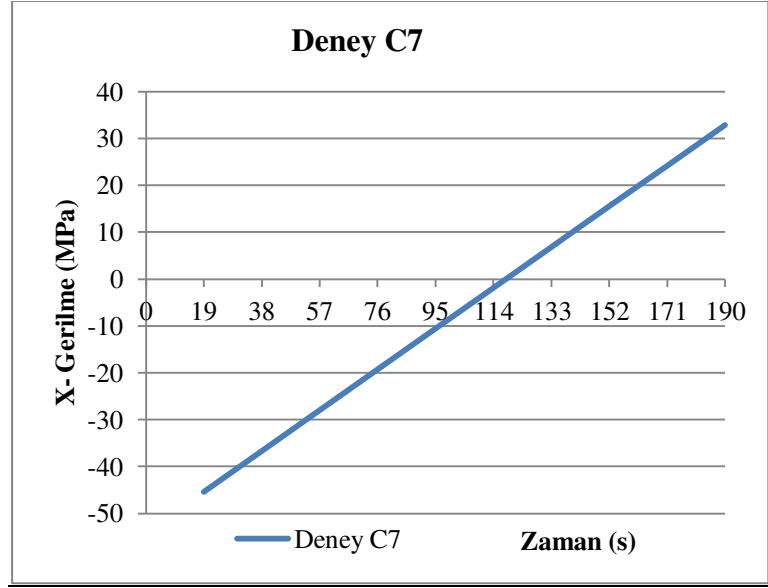


Şekil 5. 104 Deney C7 zamana bağlı maksimum set sıcaklık değişimi

X yönündeki Gerilmeler

Tablo 5. 58 Deney C7 σ_x değerleri

t (s)	Gerilme (MPa)
19	-45,4
38	-36,7
57	-28
76	-19,3
95	-10,6
114	-1,92
133	6,77
152	15,5
171	24,1
190	32,8

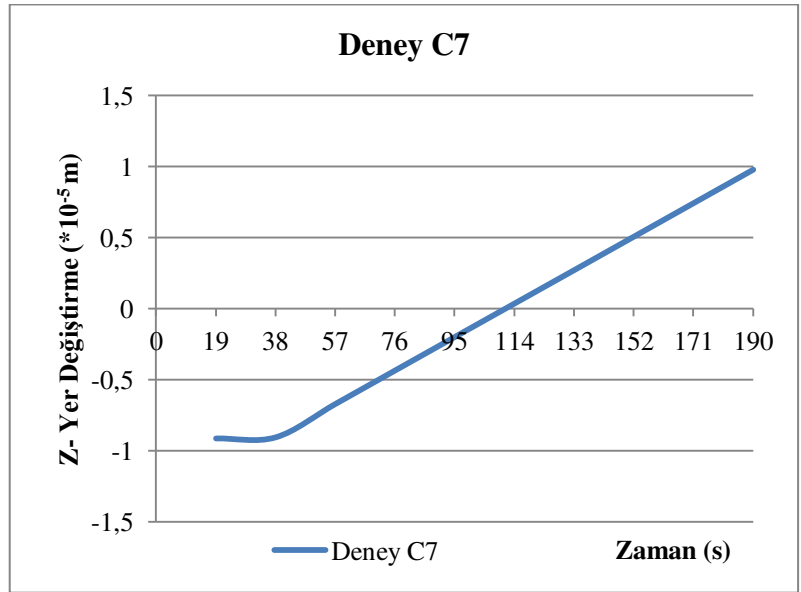


Şekil 5. 105 Deney C7 zamana bağlı σ_x değişimi

Z yönündeki Yer Değiştirmeler

Tablo 5. 59 Deney C7 yer değiştirme değerleri

t (s)	Yer Değ. (*10 ⁻⁵ m)
19	-0,914
38	-0,906
57	-0,671
76	-0,435
95	-0,199
114	0,0367
133	0,272
152	0,508
171	0,744
190	0,98



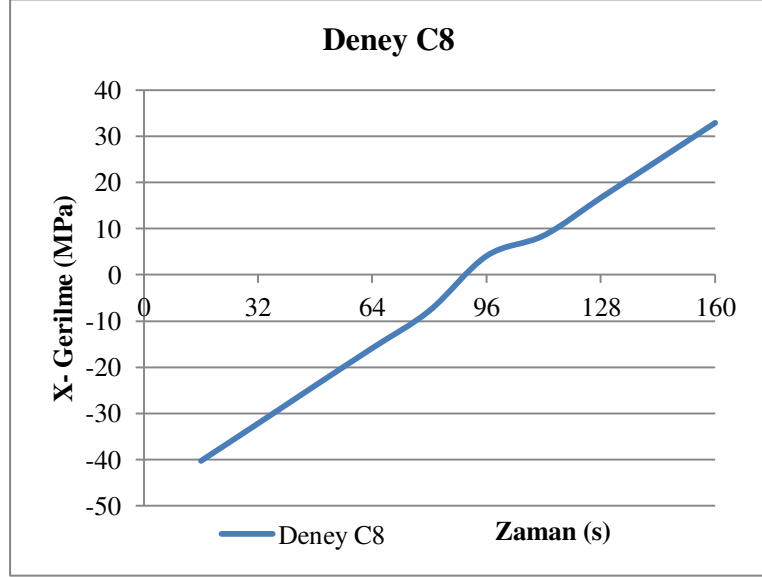
Şekil 5. 106 Deney C7 zamana bağlı Z yönündeki yer değiştirme değişimi

5. 4. 26 [N=2000 dev/dak, t= 60 s, V=100 mm/dak] için Elde Edilen Sonuçlar

X yönündeki Gerilmeler

Tablo 5. 60 Deney C8 σ_x değerleri

t (s)	Gerilme (MPa)
16	-40,2
32	-32,1
48	-23,9
64	-15,8
80	-7,71
96	4,12
112	8,53
128	16,7
144	24,8
160	32,9

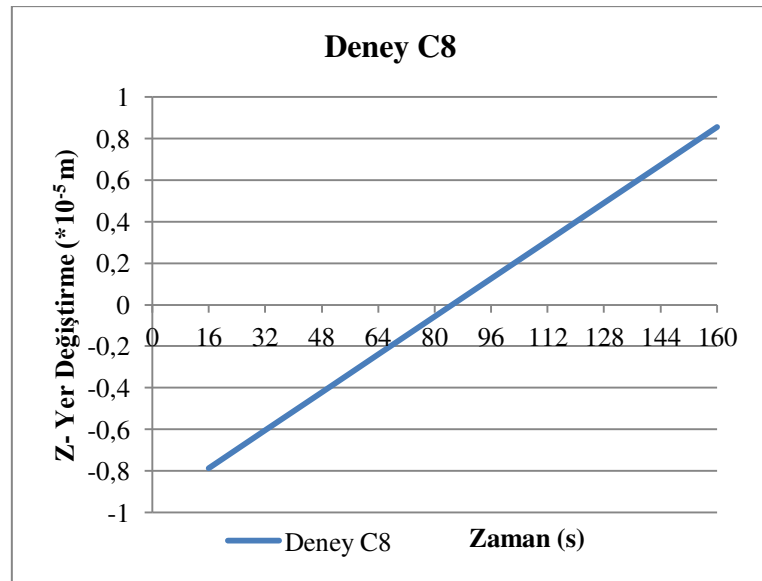


Şekil 5. 107 Deney C8 zamana bağlı σ_x değişimi

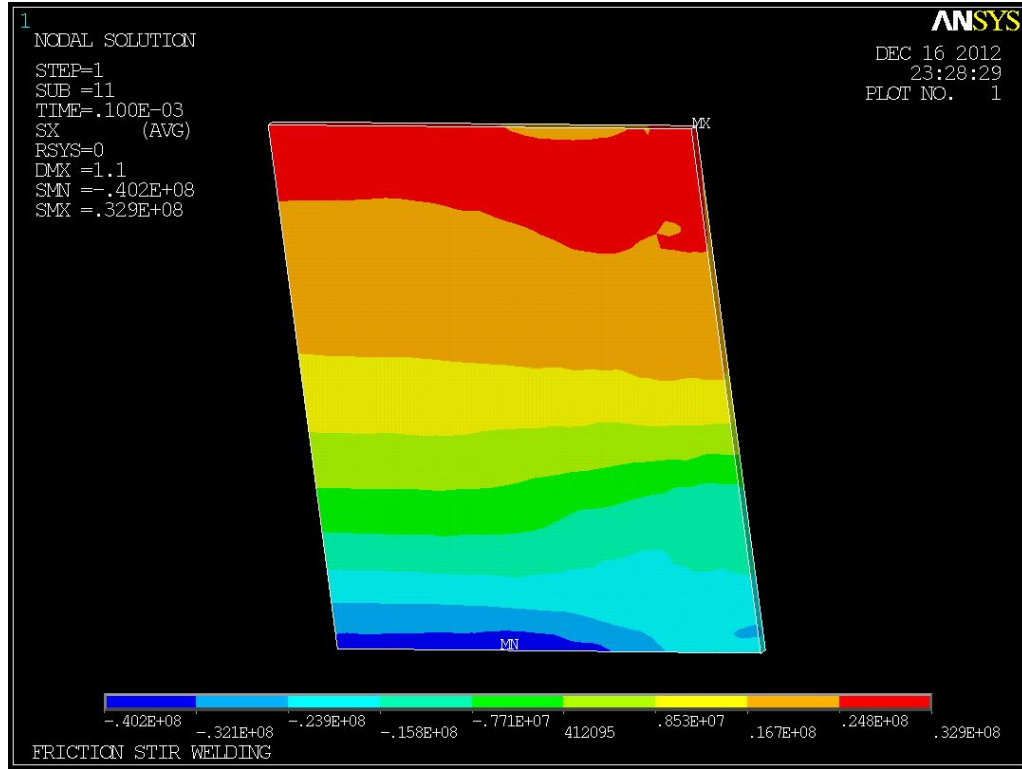
Z yönündeki Yer Değiştirmeler

Tablo 5. 61 Deney C8 yer değiştirme değerleri

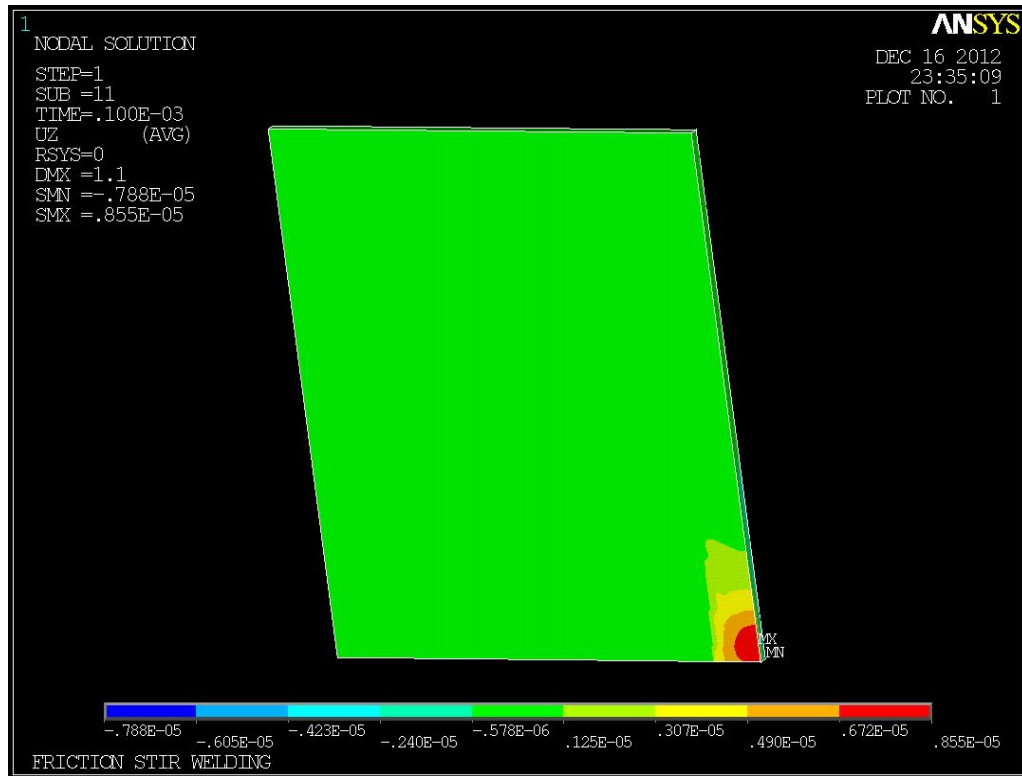
t (s)	Yer Değ. (*10 ⁻⁵ m)
16	-0,788
32	-0,605
48	-0,423
64	-0,24
80	-0,0576
96	0,125
112	0,307
128	0,49
144	0,672
160	0,855



Şekil 5. 108 Deney C8 zamana bağlı Z yönündeki yer değiştirme değişimi



Şekil 5. 109 Deney C8 X yönündeki gerilmeler



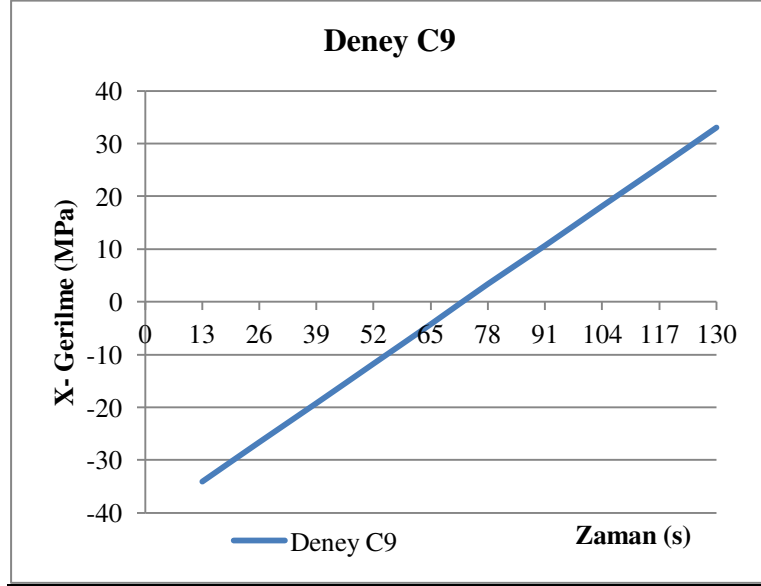
Şekil 5. 110 Deney C8 Z yönündeki yer değiştirmeler

5. 4. 27. [N=2000 dev/dak, t= 60 s, V=150 mm/dak] için Elde Edilen Sonuçlar

X yönündeki Gerilmeler

Tablo 5. 62 Deney C9 σ_x değerleri

t (s)	Gerilme (Mpa)
13	-34,1
26	-26,6
39	-19,2
52	-11,7
65	-4,22
78	3,42
91	10,7
104	18,2
117	25,6
130	33,1

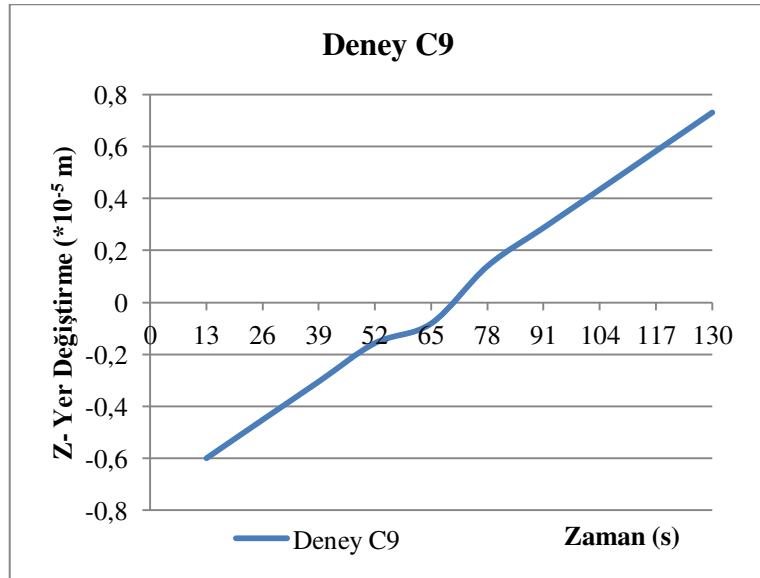


Şekil 5. 111 Deney C9 zamana bağlı σ_x değişimi

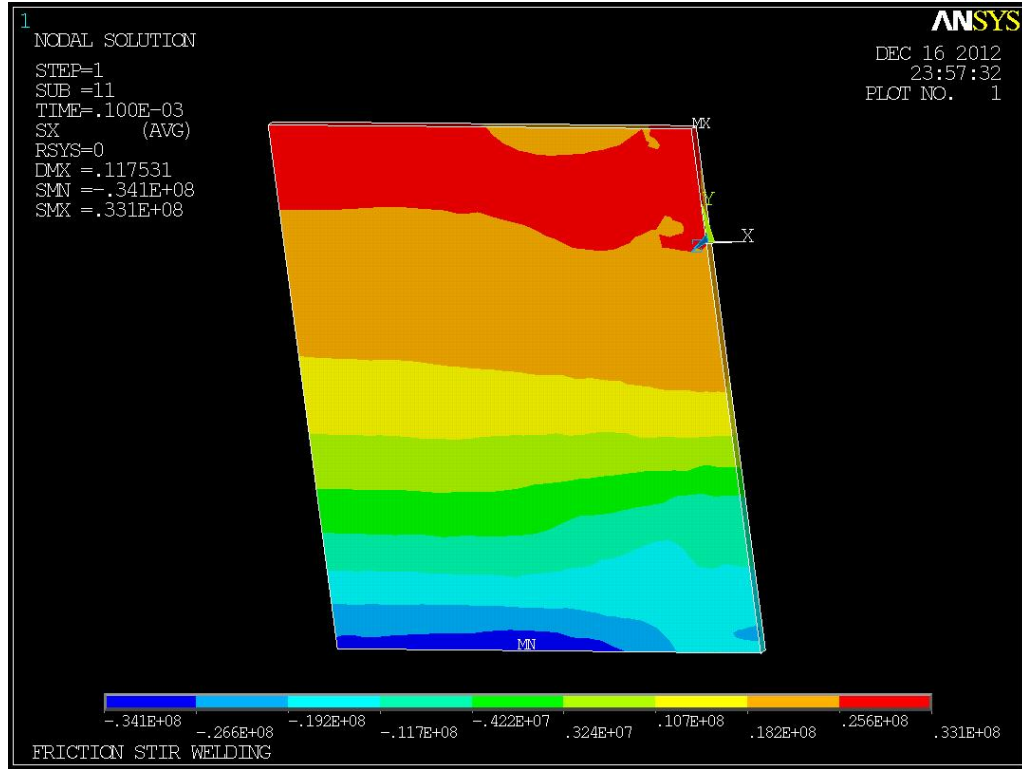
Z yönündeki Yer Değiştirmeler

Tablo 5. 63 Deney C9 yer değiştirme değerleri

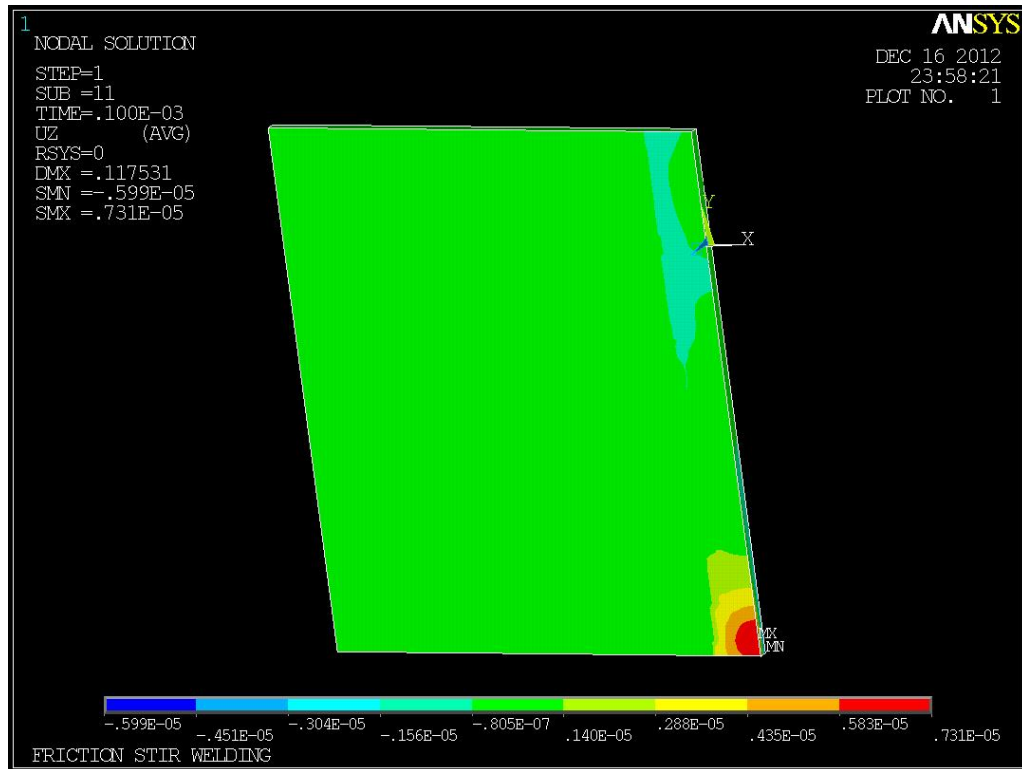
t (s)	Yer Değ. (*10 ⁻⁵ m)
13	-0,599
26	-0,451
39	-0,304
52	-0,156
65	-0,0805
78	0,14
91	0,288
104	0,435
117	0,583
130	0,731



Şekil 5. 112 Deney C9 zamana bağlı Z yönündeki yer değiştirme değişimi



Şekil 5. 113 Deney C9 X yönündeki gerilmeler



Şekil 5. 114 Deney C9 Z yönündeki yer değiştirmeler

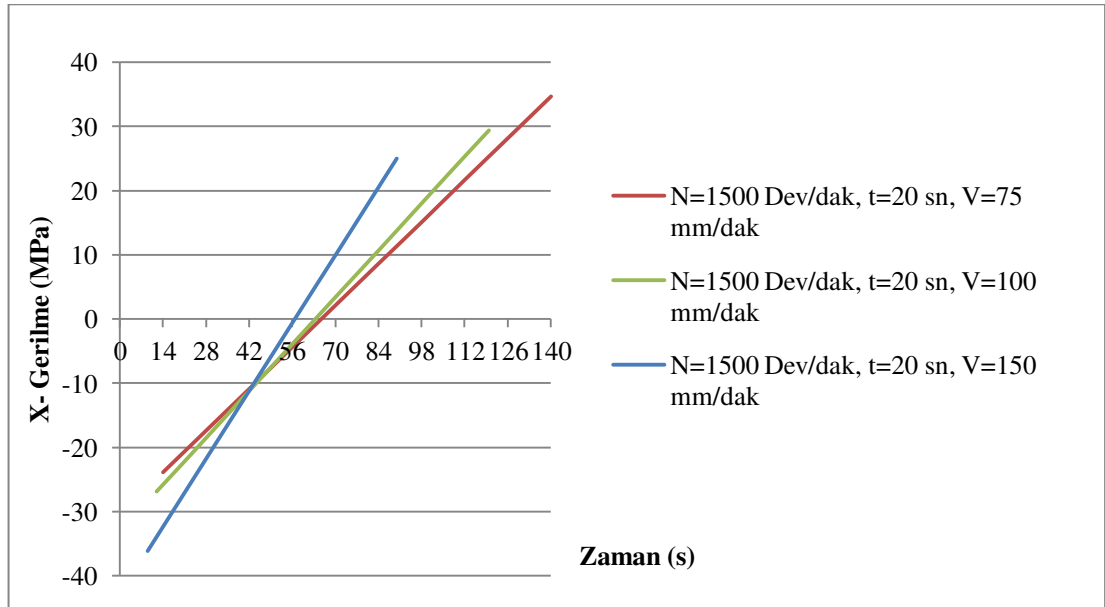
5. 5 Sayısal Sonuçların Değerlendirilmesi

5. 5. 1 İlerleme Hızı Etkisinin İncelenmesi

Maksimum Set Sıcaklıkları

Devir sayısı ve bekleme süresi sabit tutulup, ilerleme hızı değişken kabul edilip yapılan çalışmalarda ilerleme hızının artması veya azalmasının set sıcaklıkları üzerinde bir etkisinin olmadığı görüldü.

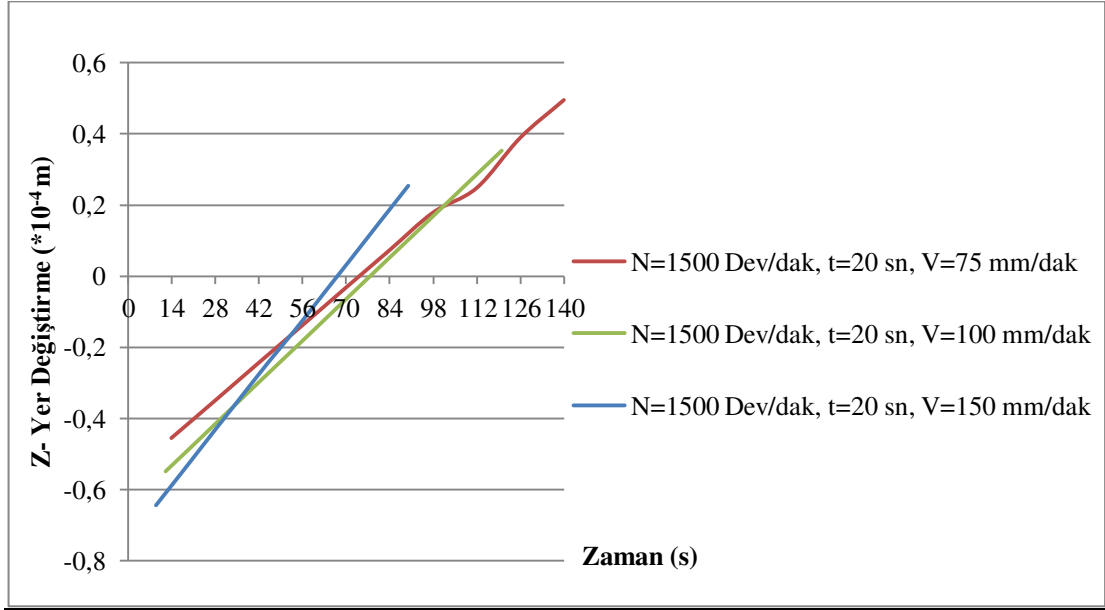
X yönündeki Gerilmeler (A1- A2- A3)



Şekil 5. 115 N=1500 dev/dak, t=20 s iken; σ_x değişimi

N= 1500 Dev/dak, t=20 sn sabit tutulup ilerleme hızı artırıldığında X yönündeki gerilmelerin azaldığı görülmektedir. En büyük gerilme **34,7 Mpa** ile [N=1500 Dev/dak, t=20 sn, V=75 mm/dak] parametrelerine sahip numunede oluşurken; en küçük gerilmeye **25 Mpa** ile [N=1500 Dev/dak, t=20 sn, V=150 mm/dak] parametrelerine sahip numunede oluşmuştur. Verilere bakılarak inceleme yapıldığında da N, t sabit iken V artırıldığında gerilmelerin azaldığı görülmektedir.

Z yönündeki Yer Değiştirmeler (A1- A2- A3)



Şekil 5. 116 N=1500 dev/dak, t=20 s iken; yer değiştirme değişimi

Bu şartlarda en küçük yer değiştirme (negatif yönde) 75 mm/dak ilerleme hızında elde edilmiştir. Pozitif yönde en küçük gerilme 150 mm/dak ilerleme hızına sahip numunede elde edilmiştir. Burada eksi ve artı yön bir bütün olarak düşünülüp toplam yer değiştirmeye bakılmalıdır. Bu durum uygulandığında toplam yer değiştirme aşağıda görüldüğü gibi 150 mm/dak hızında elde edilmiştir.

V= 75 mm/dak;

$$(0,454 + 0,495) \times 10^{-4} = 0,0949 \text{ mm}$$

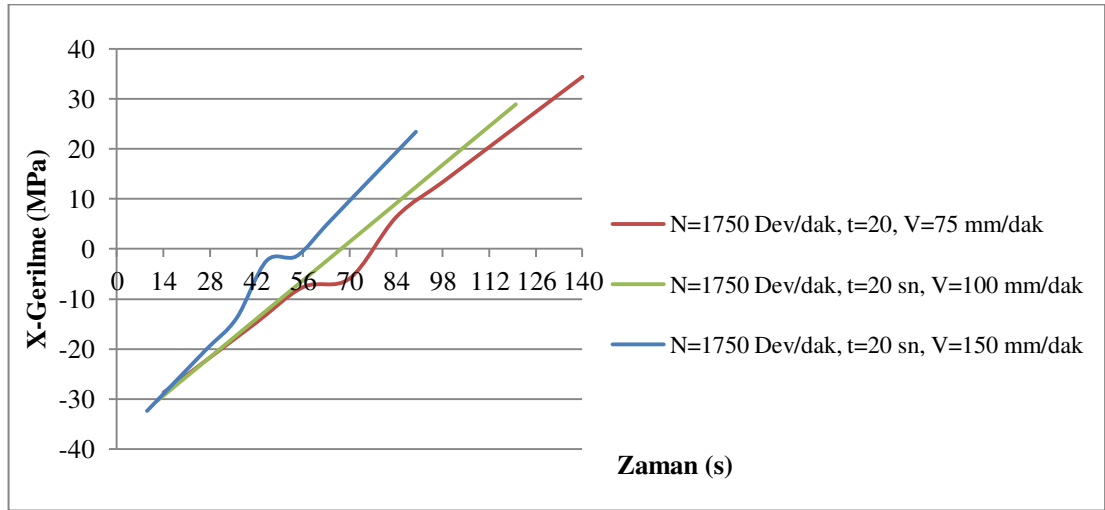
V= 100 mm/dak;

$$(0,549 + 0,354) \times 10^{-4} = 0,0903 \text{ mm}$$

V= 150 mm/dak;

$$(0,644 + 0,254) \times 10^{-4} = 0,0898 \text{ mm}$$

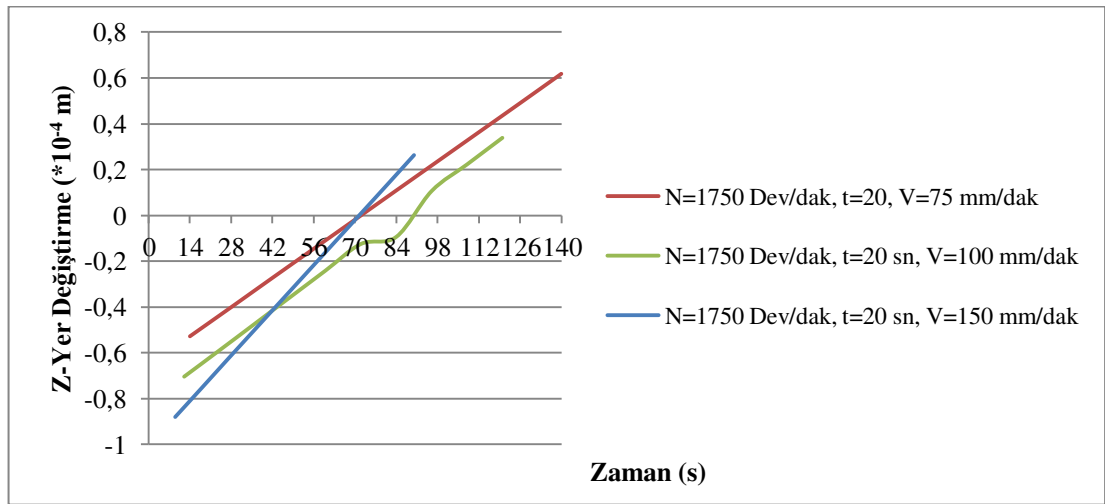
X yönündeki Gerilmeler (A4- A5- A6)



Şekil 5. 117 N=1750 dev/dak, t=20 s iken σ_x değişimi

Yukarıdaki grafikte de görüldüğü üzere – yönde başlangıç noktaları aynı olmasına karşın + bölgede 150 mm/dak hızında en küçük gerilme oluşurken; V=75 mm/dak hızında en büyük gerilme oluşmaktadır.

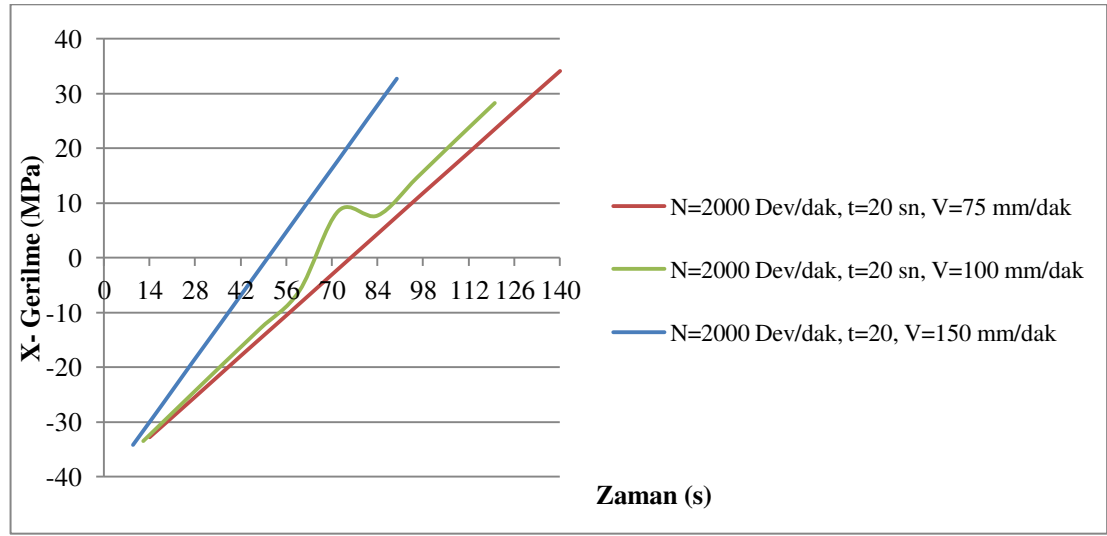
Z yönündeki Yer Değiştirmeler (A4- A5- A6)



Şekil 5. 118 N=1750 dev/dak, t=20 s iken; yer değiştirme değişimi

Hem negatif hem de pozitif bölgede en büyük yer değişimi V=75 mm/dak hızında oluşurken en küçük yer değişimi V=150 mm/dak hızında oluşmuştur.

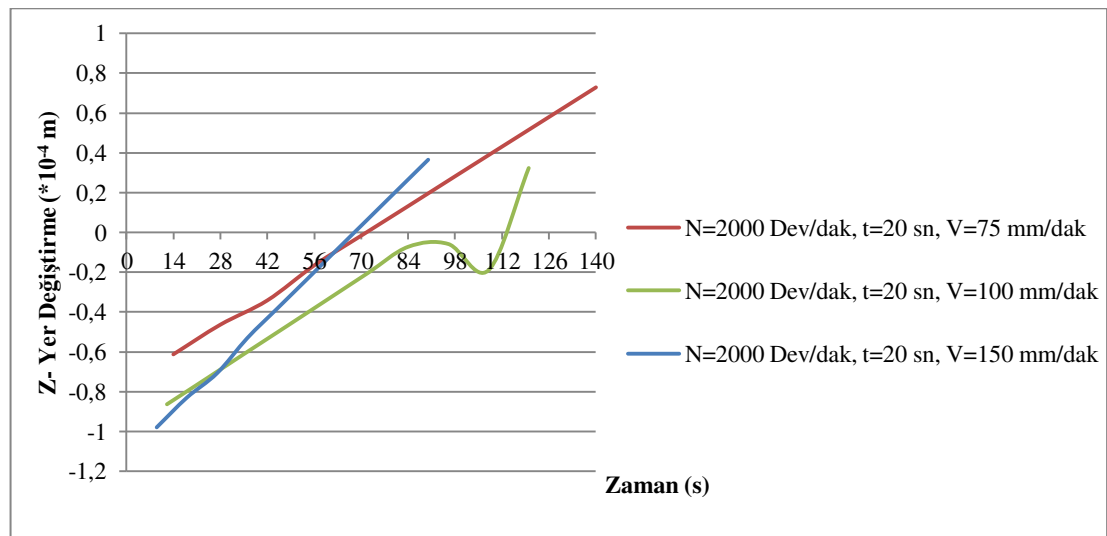
X yönündeki Gerilmeler (A7- A8- A9)



Şekil 5. 119 N=2000 dev/dak, t=20 s iken; σ_x değişimi

Her iki grafik için de N,t sabit iken V artırıldığında hem gerilme hem de yer değiştirmelerde en iyi sonuçlar V=150 mm/dak hızında elde edilmektedir.

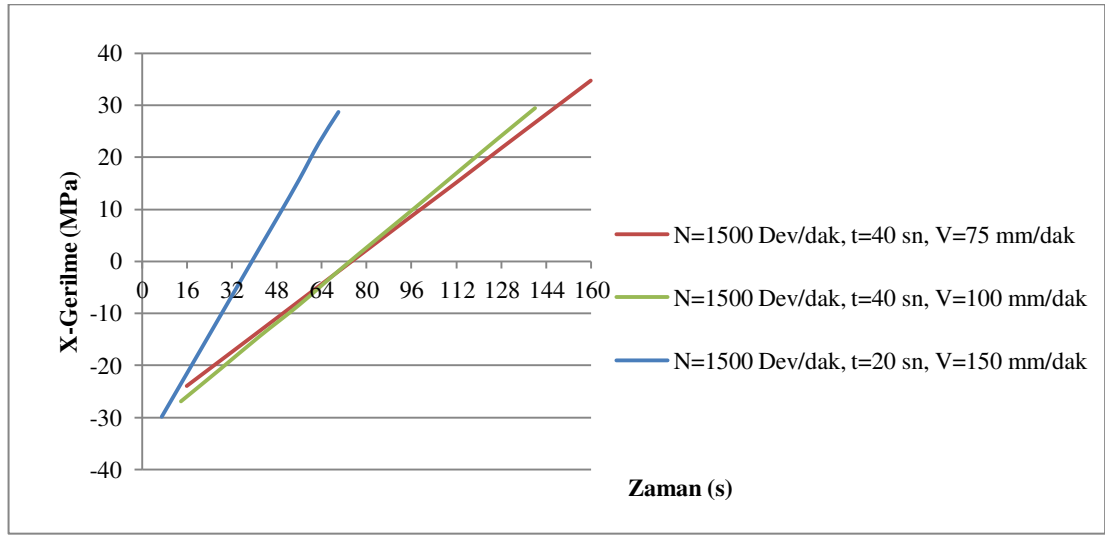
Z yönündeki Yer Değiştirmeler (A7- A8- A9)



Şekil 5. 120 N=1750 dev/dak, t=20 s iken yer değiştirme değişimi

N,t sabit tutulup V artırıldığında hız arttıkça yer değiştirmeler azalmaktadır.

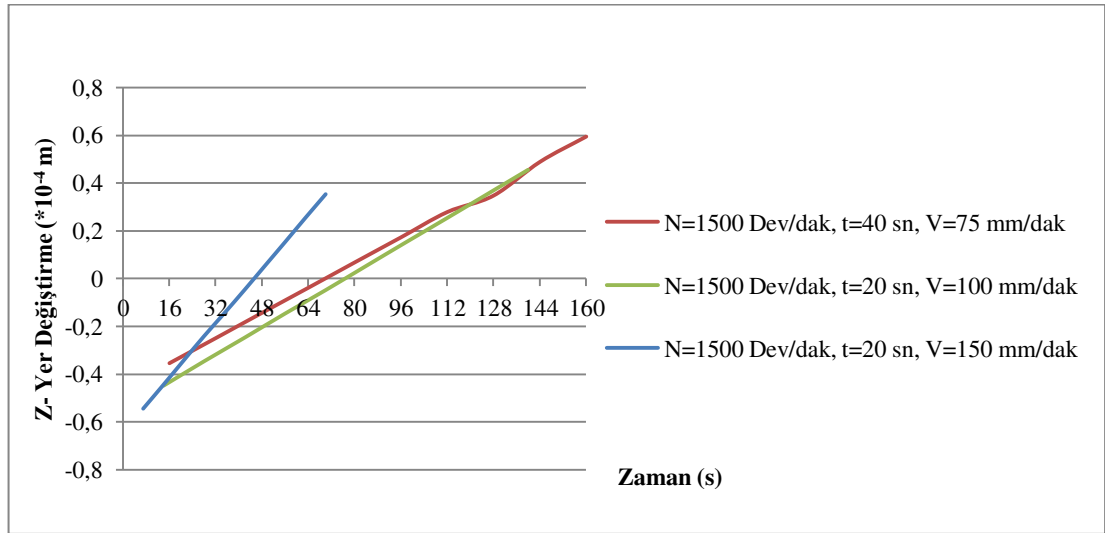
X yönündeki Gerilmeler (B1- B2- B3)



Şekil 5. 121 N=1500 dev/dak, t=40 s iken; σ_x değişimi

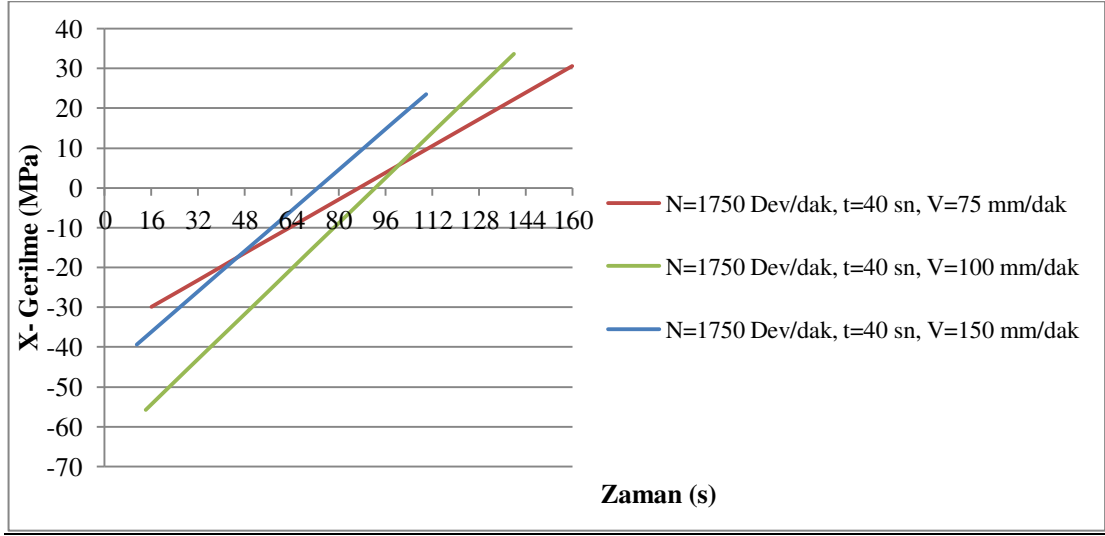
Negatif yönde başlangıç noktaları aynı gibi olmasına rağmen pozitif bölgede V=75 mm/dak hızında en büyük gerilme oluşurken, V=150 mm/dak hızında em küçük gerilme oluşmaktadır.

Z yönündeki Yer Değiştirmeler (B1- B2- B3)



Şekil 5. 122 N=1500 dev/dak, t=40 s iken; yer değiştirme değişimi

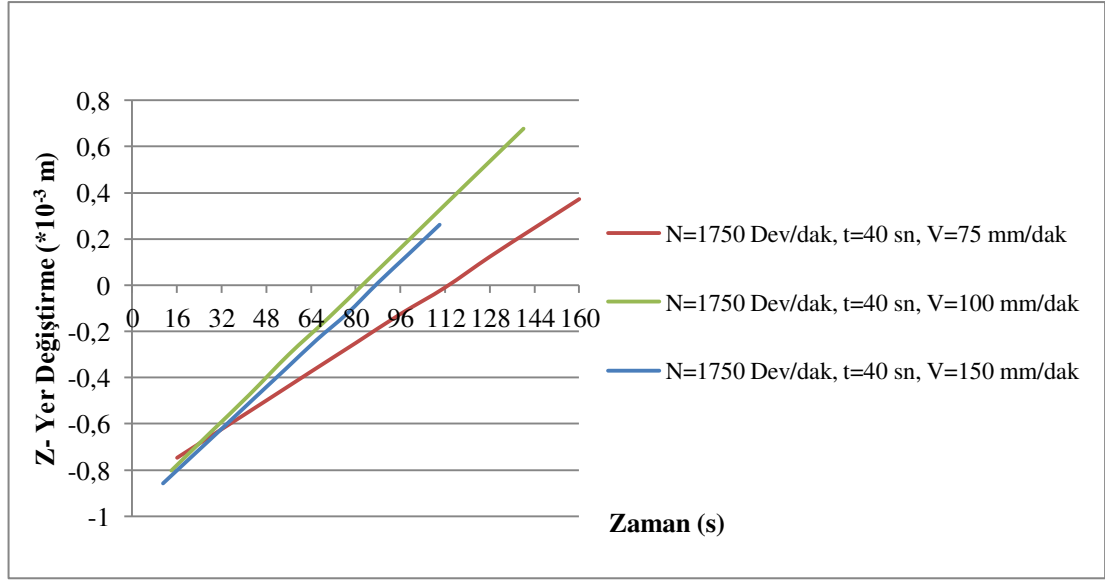
X yönündeki Gerilmeler (B4- B5- B6)



Şekil 5. 123 N=1750 dev/dak, t=40 sn iken σ_x değişimi

Yukarıda da görüldüğü gibi en büyük gerilme bu sefer V=100 mm/dak hızında çıkarken, en küçük gerilme ise V=150 mm/dak hızında çıkmıştır.

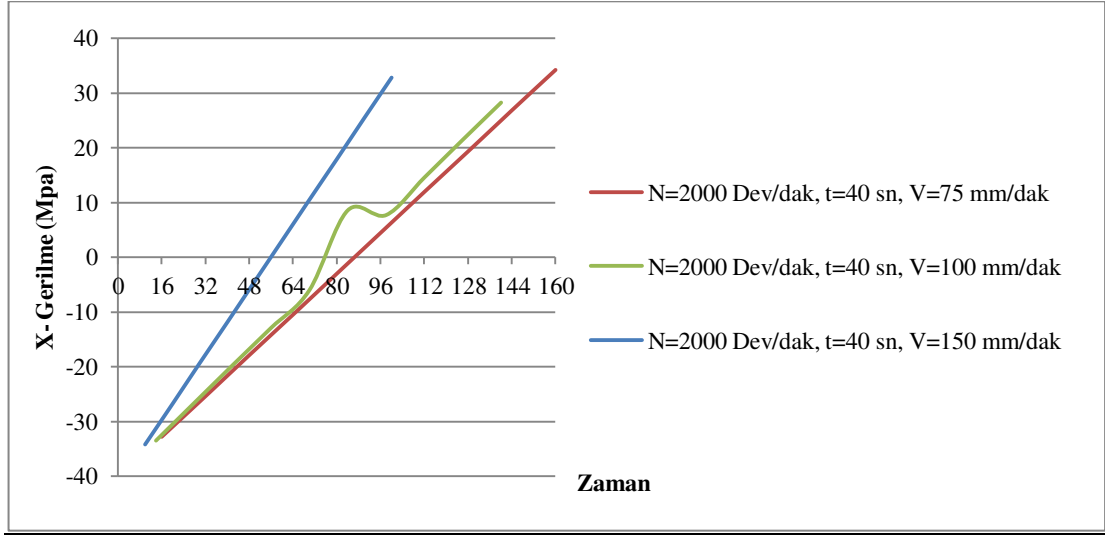
Z yönündeki Yer Değiştirmeler (B4- B5- B6)



Şekil 5. 124 N=1750 dev/dak, t=40 s iken; yer değiştirme değişimi

Bu şartlarda en küçük yer değişimi V=150 mm/dak hızında, en küçük yer değişimi ise V=100 mm/dak hızında oluştu.

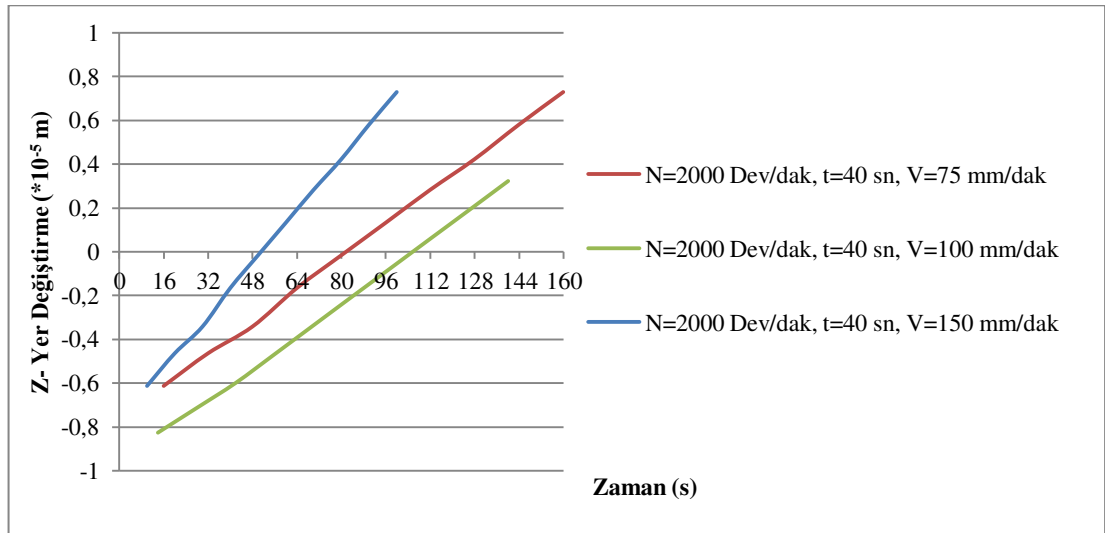
X yönündeki Gerilmeler (B7- B8- B9)



Şekil 5. 125 N=2000 dev/dak, t=40 s iken σ_x değişimi

En büyük gerilme V=75 mm/dak hızında oluşurken, en küçük gerilme ise V=100 mm/dak hızında oluşmuştur.

Z yönündeki Yer Değiştirmeler (B7- B8- B9)

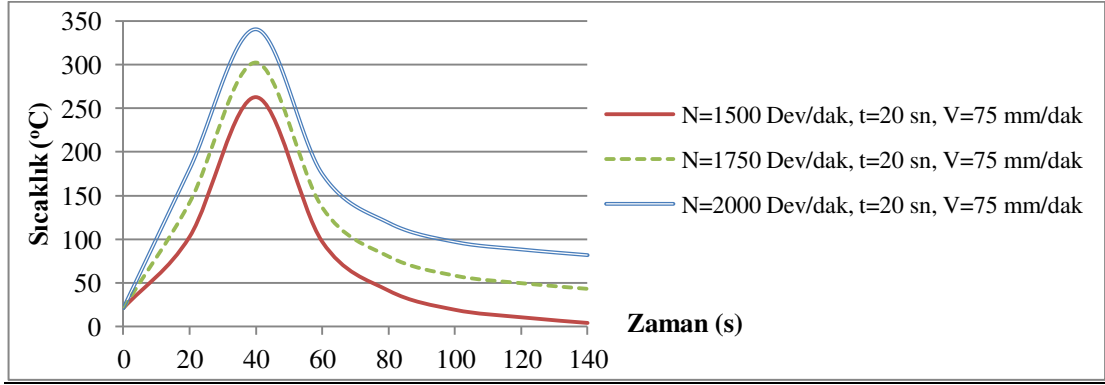


Şekil 5. 126 N=2000 dev/dak, t=40 s iken; yer değiştirme değişimi

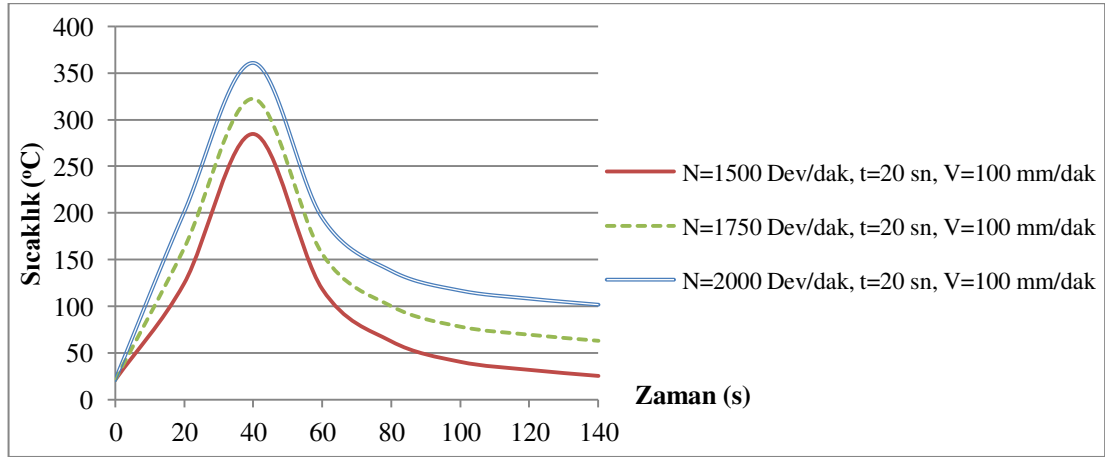
En büyük yer değişimi V=75 mm/dak hızında, en küçük yer değişimi V=100 mm/dak hızında gerçekleşmiştir.

5. 5. 2 Devir Sayısının Etkisinin İncelenmesi

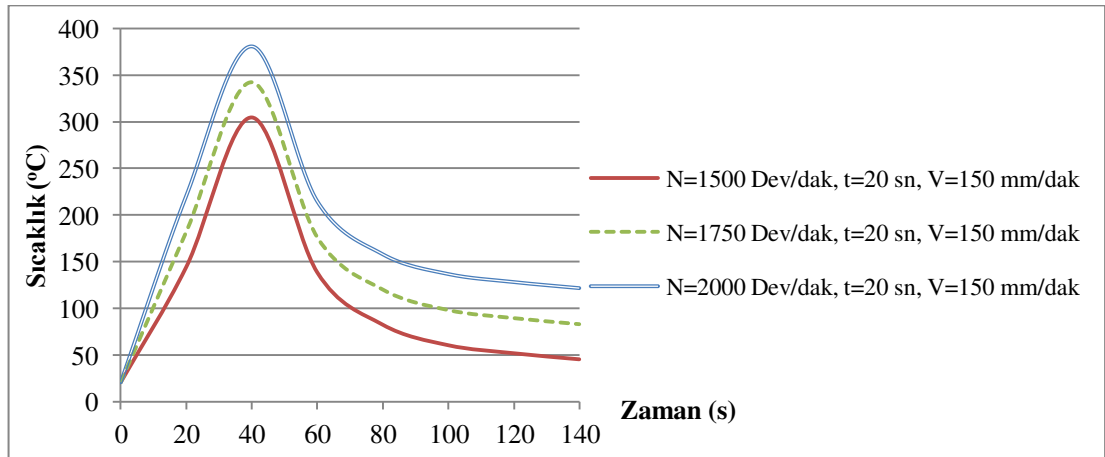
Body Temperature



Şekil 5. 127 $V=75 \text{ mm/dak}$, $t=20 \text{ s}$ iken; zamana bağlı sıcaklık değişimi

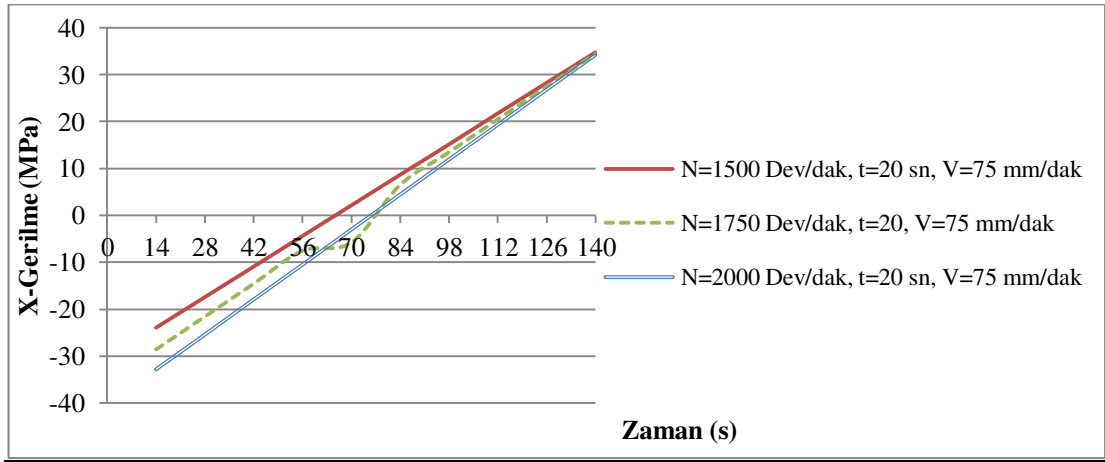


Şekil 5. 128 $V=100 \text{ mm/dak}$, $t=20 \text{ s}$ iken; zamana bağlı sıcaklık değişimi

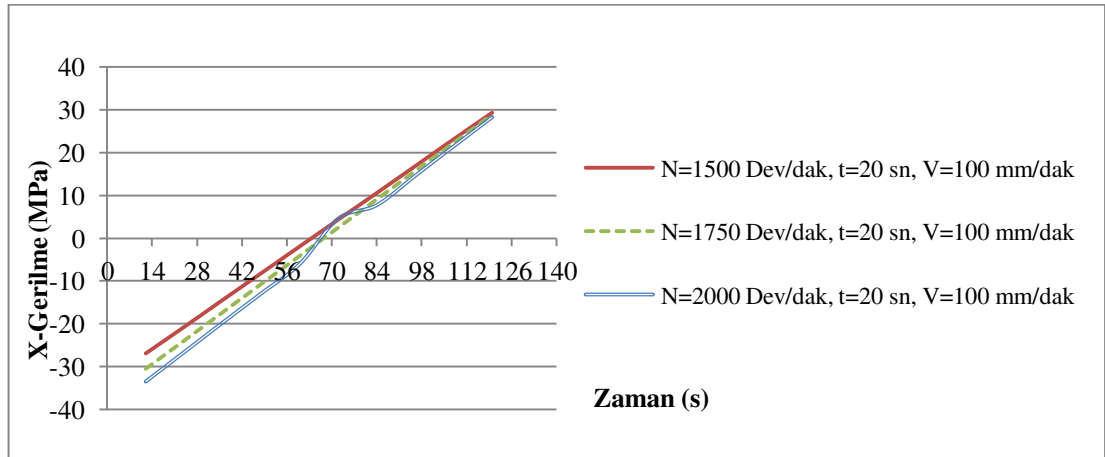


Şekil 5. 129 $V=150 \text{ mm/dak}$, $t=20 \text{ s}$ iken; zamana bağlı sıcaklık değişimi

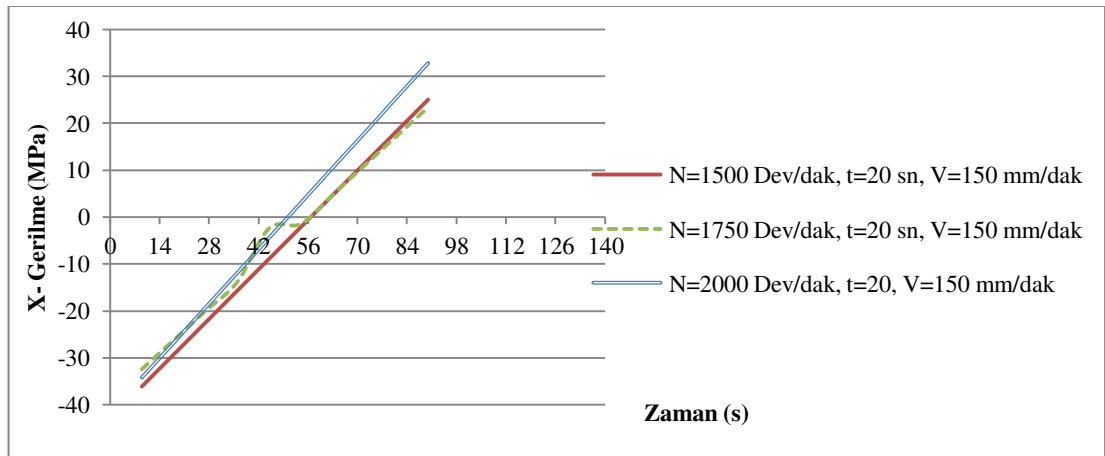
X yönündeki Gerilmeler



Şekil 5. 130 $V=75$ mm/dak, $t=20$ s iken; σ_x değişimi

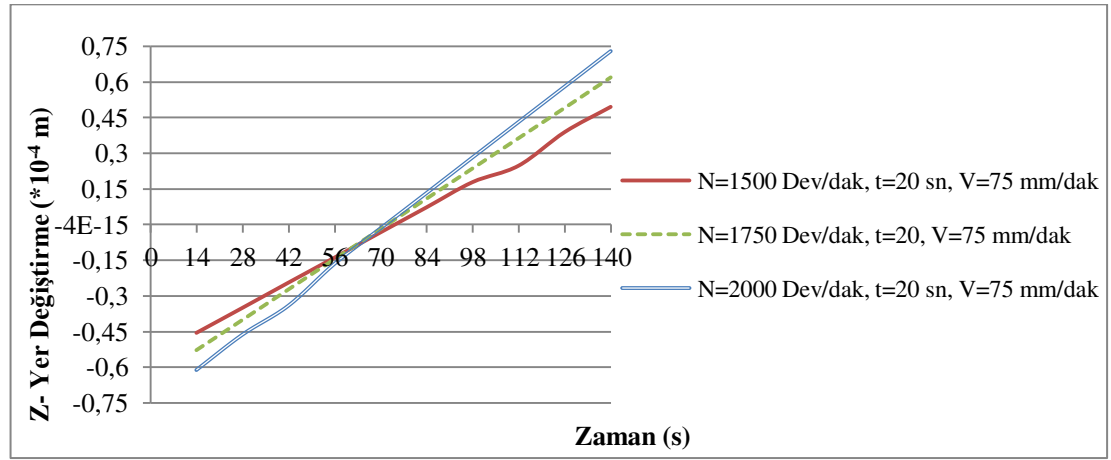


Şekil 5. 131 $V=100$ mm/dak, $t=20$ s iken; σ_x değişimi

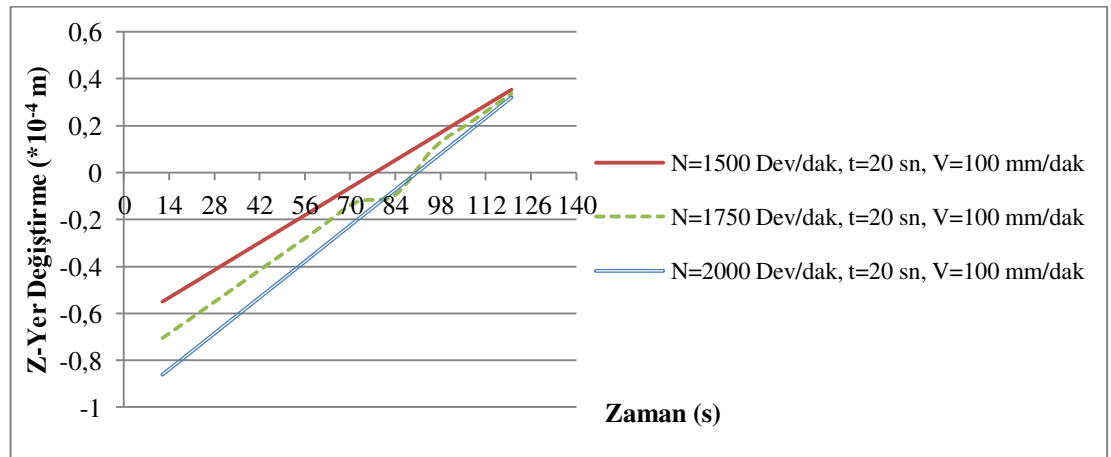


Şekil 5. 132 $V=150$ mm/dak, $t=20$ sn iken; σ_x değişimi

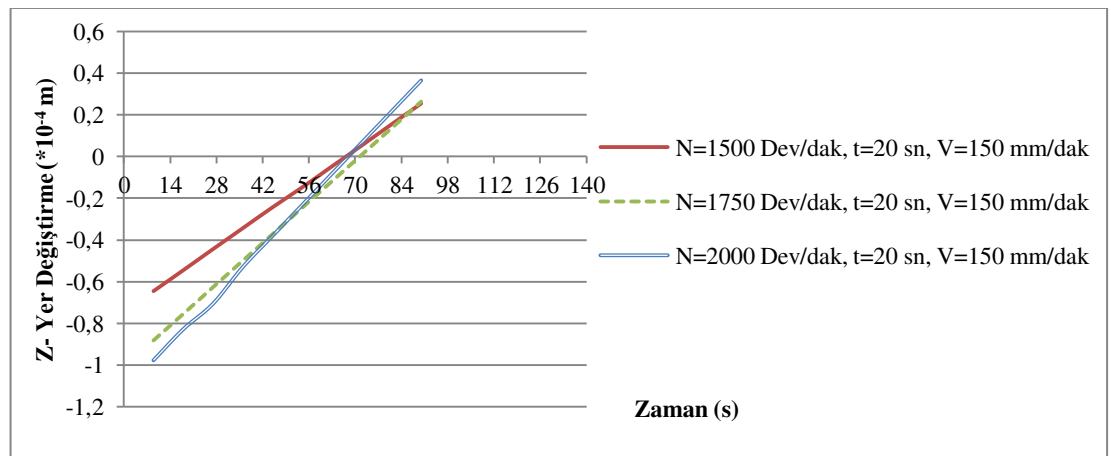
Z yönündeki Yer Değiştirmeler



Şekil 5. 133 V=75 mm/dak, t=20 s iken; yer değiştirme değişimi

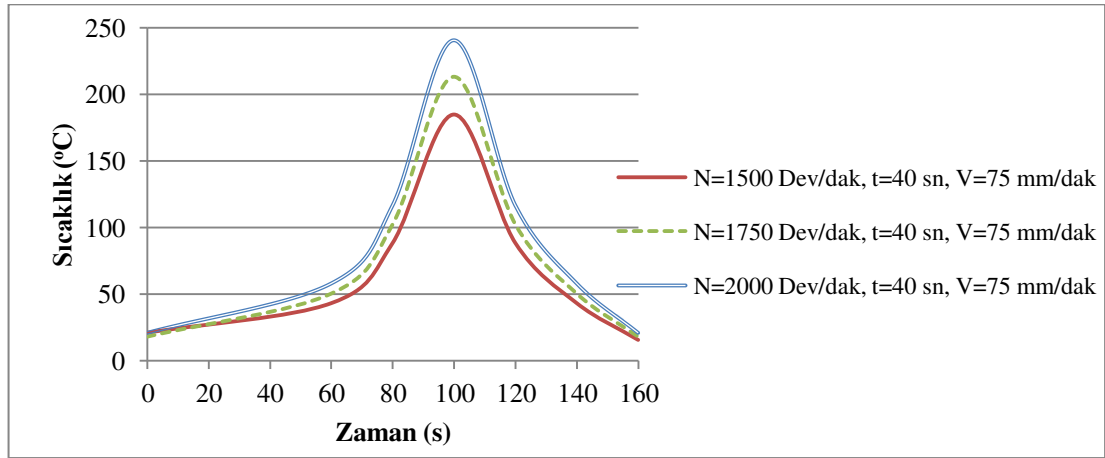


Şekil 5. 134 V=100 mm/dak, t=20 s iken; yer değiştirme değişimi

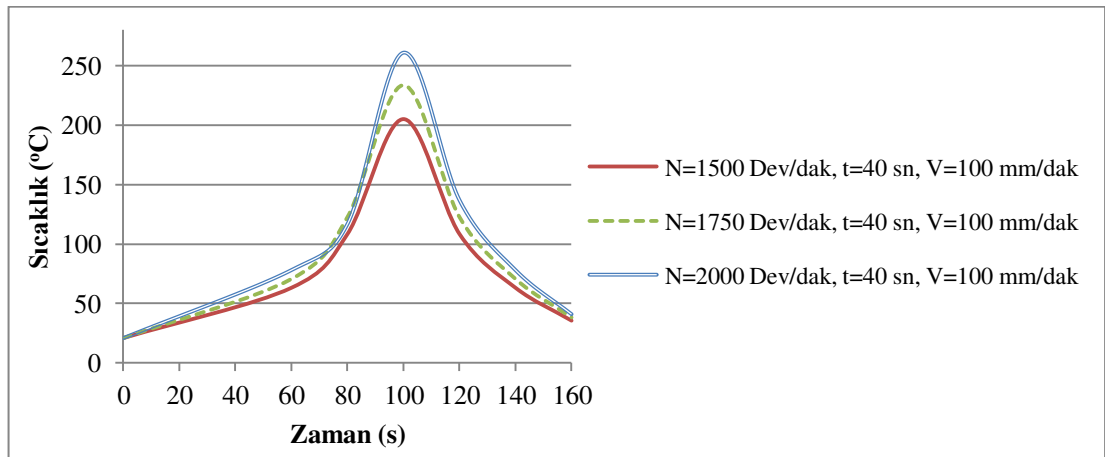


Şekil 5. 135 V=150 mm/dak, t=20 s iken; yer değiştirme değişimi

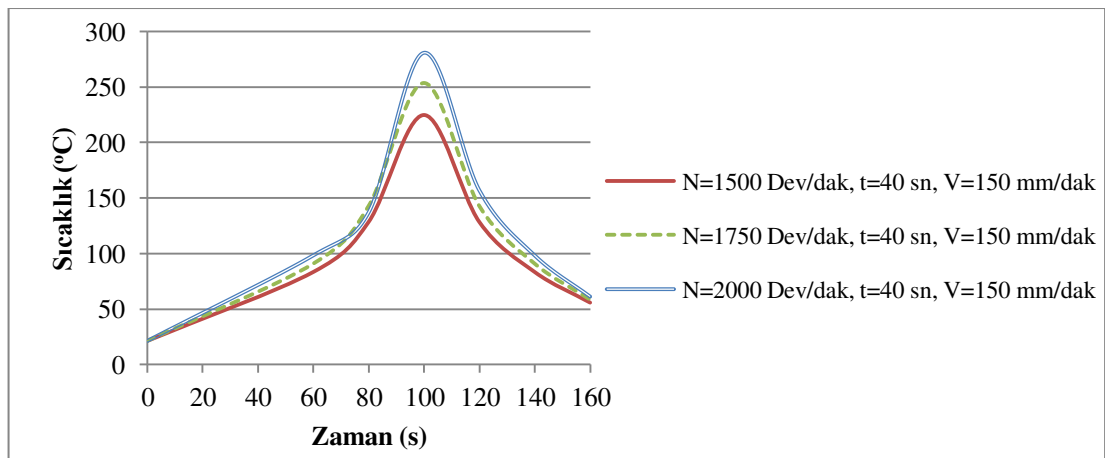
Body Temperature



Şekil 5. 136 $V=75$ mm/dak, $t=40$ s iken; zamana bağlı sıcaklık değişimi

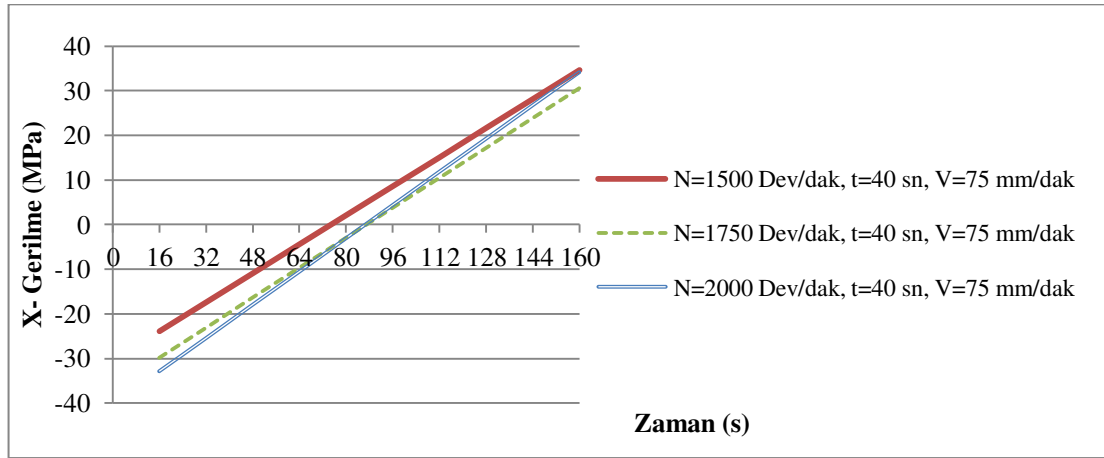


Şekil 5. 137 $V=100$ mm/dak, $t=40$ s iken; zamana bağlı sıcaklık değişimi

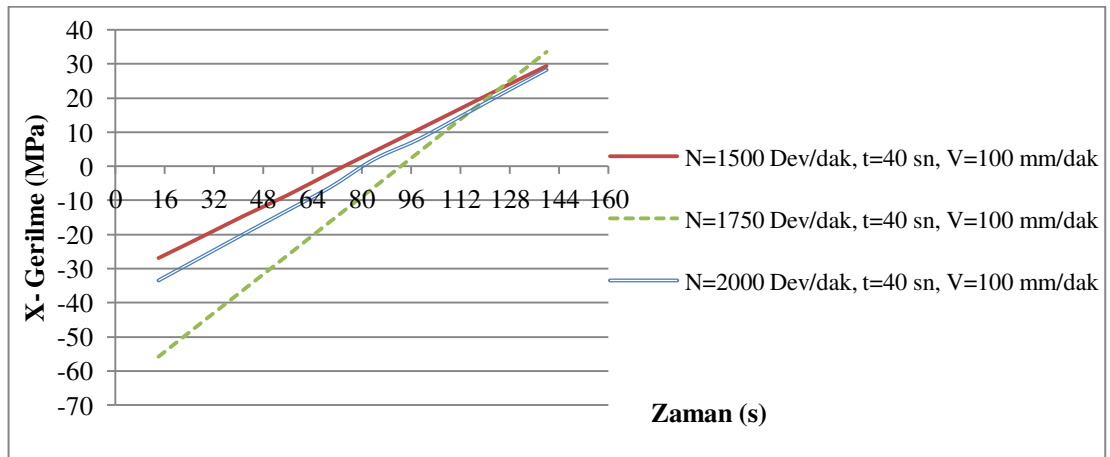


Şekil 5. 138 $V=150$ mm/dak, $t=40$ s iken; zamana bağlı sıcaklık değişimi

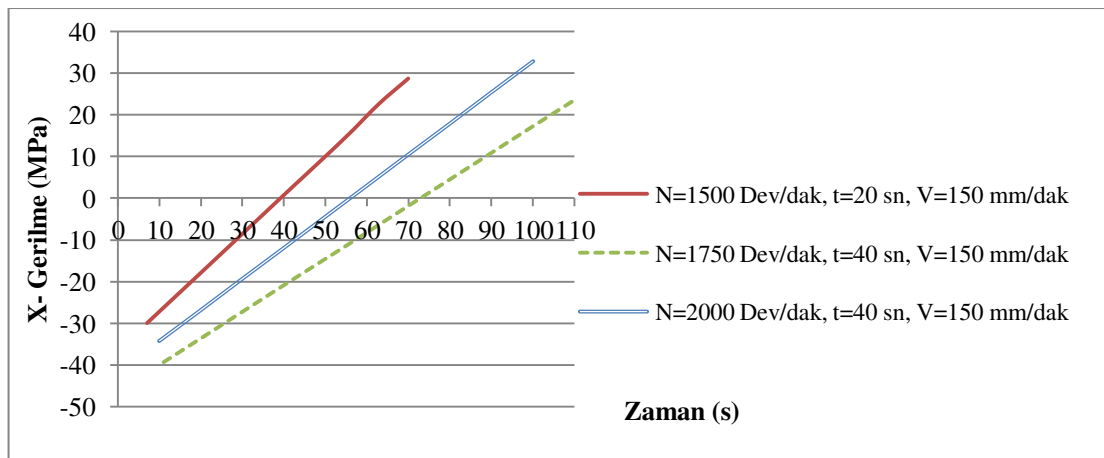
X yönündeki Gerilmeler



Şekil 5. 139 V=75 mm/dak, t=40 s iken; σ_x değişimi

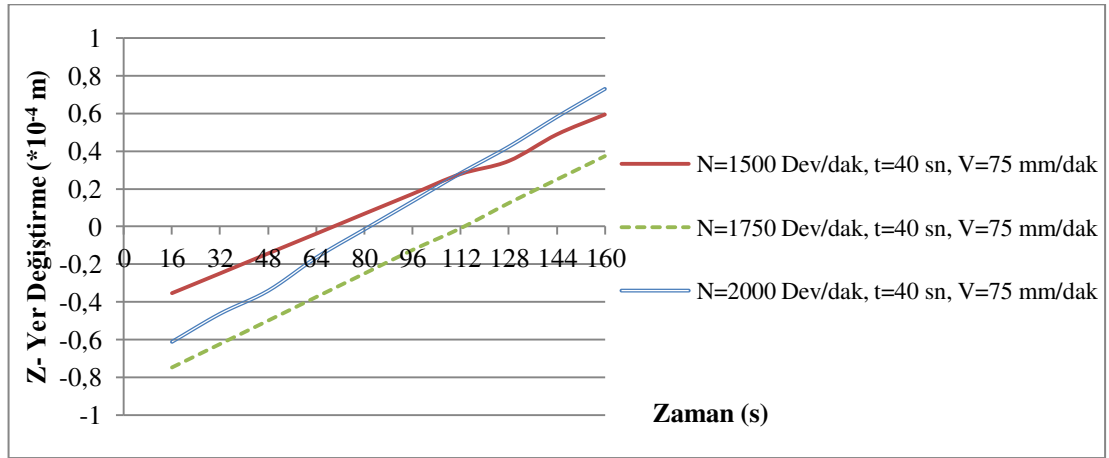


Şekil 5. 140 V=100 mm/dak, t=40 s iken; σ_x değişimi

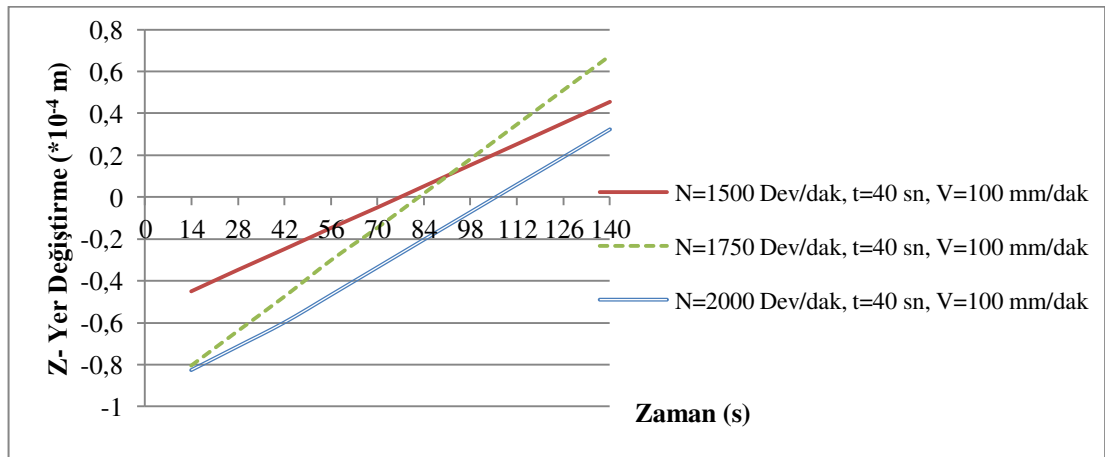


Şekil 5. 141 V=150 mm/dak, t=40 s iken; σ_x değişimi

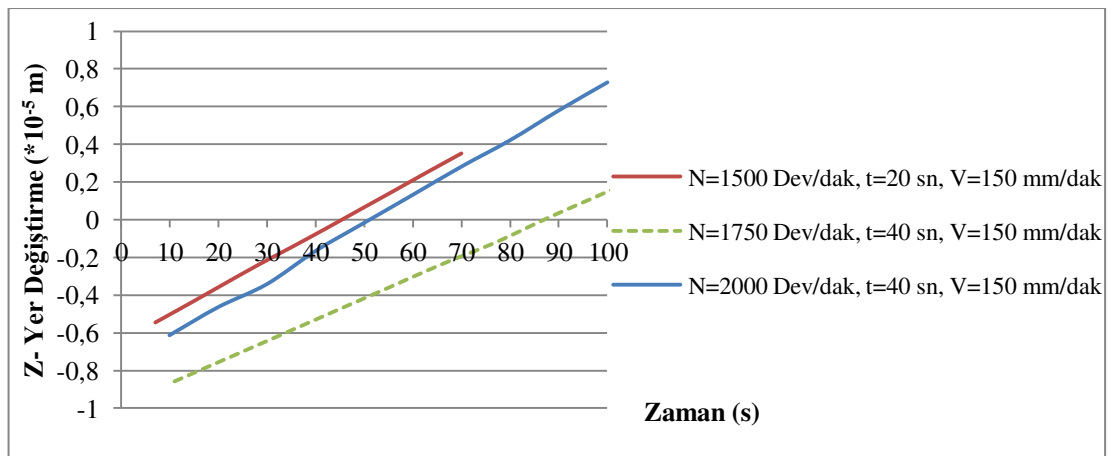
Z yönündeki Yer Değiştirmeler



Şekil 5. 142 V=75 mm/dak, t=40 s iken; yer değiştirme değişimi

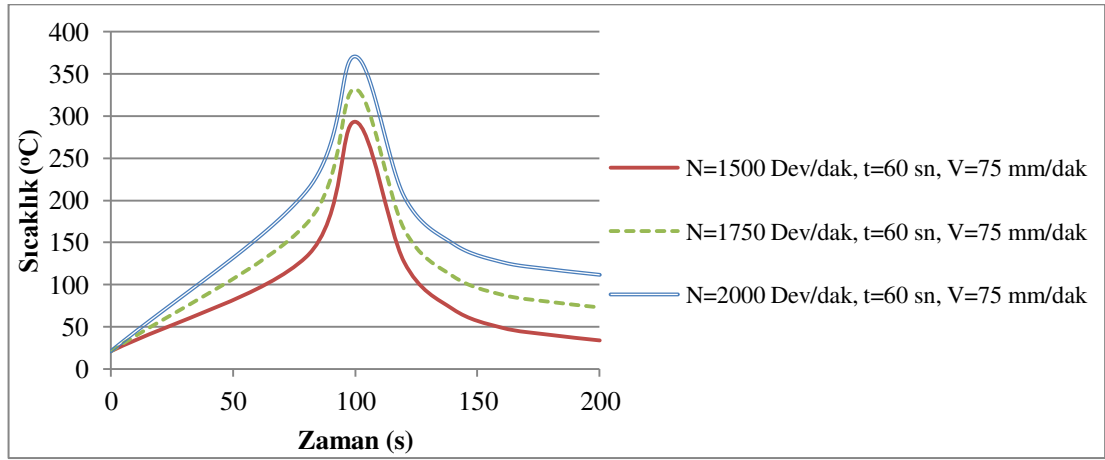


Şekil 5. 143 V=100 mm/dak, t=40 s iken; yer değiştirme değişimi

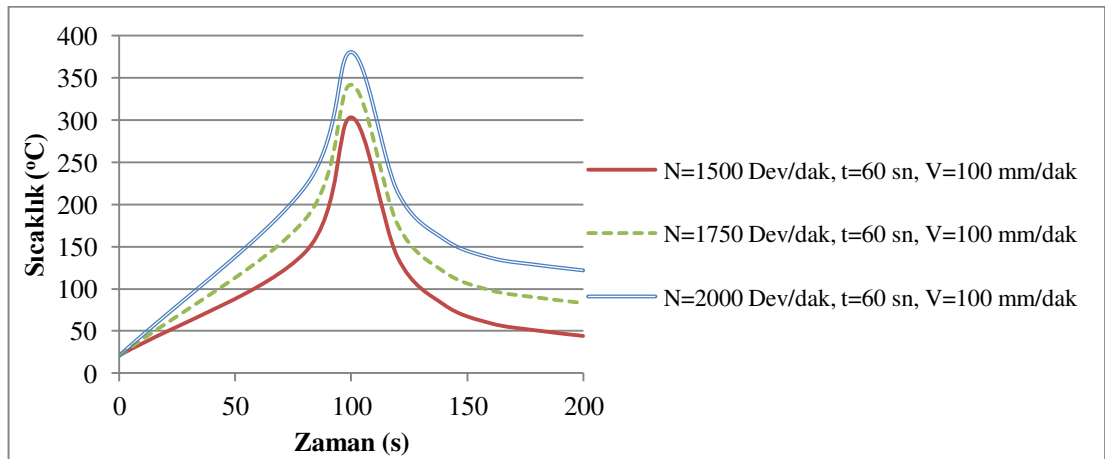


Şekil 5. 144 V=150 mm/dak, t=40 s iken; yer değiştirme değişimi

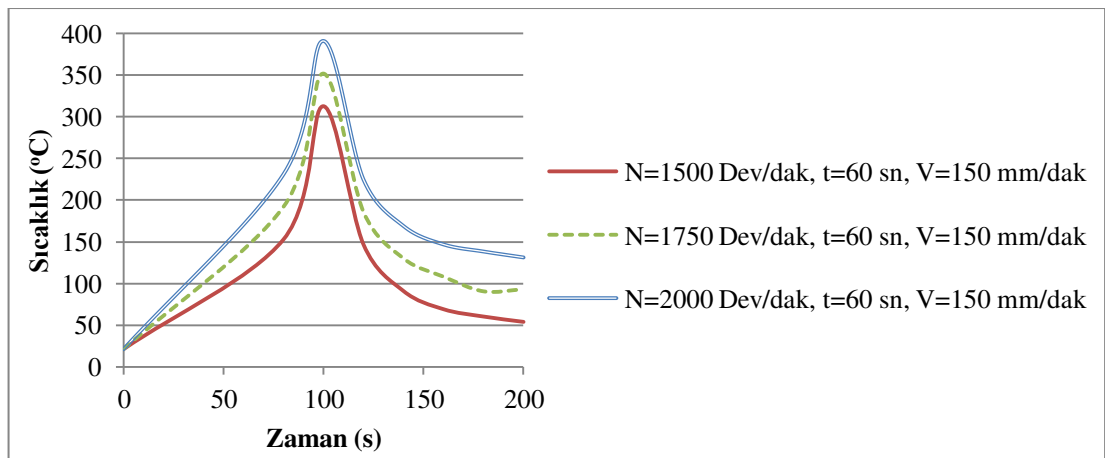
Body Temperature



Şekil 5. 145 $V=75$ mm/dak, $t=60$ s iken; zamana bağlı sıcaklık değişimi

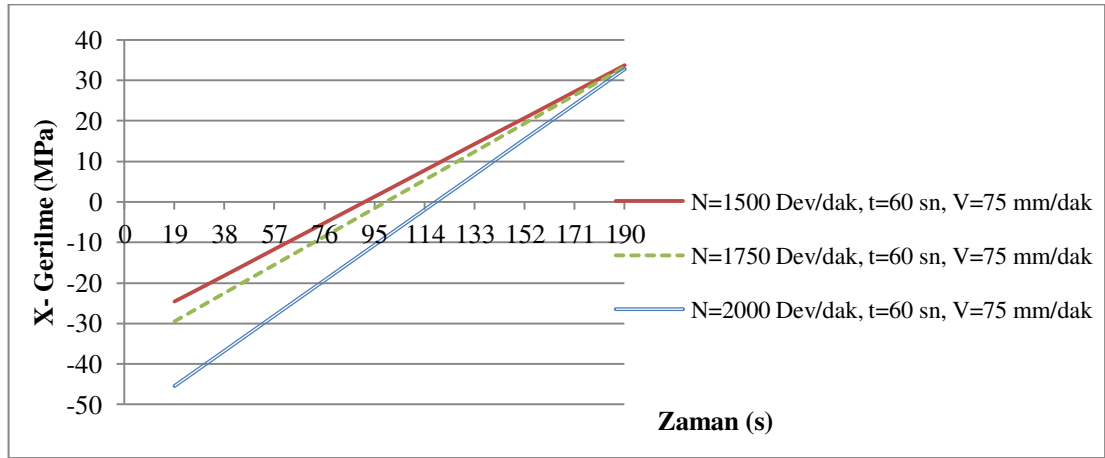


Şekil 5. 146 $V=100$ mm/dak, $t=60$ s iken; zamana bağlı sıcaklık değişimi

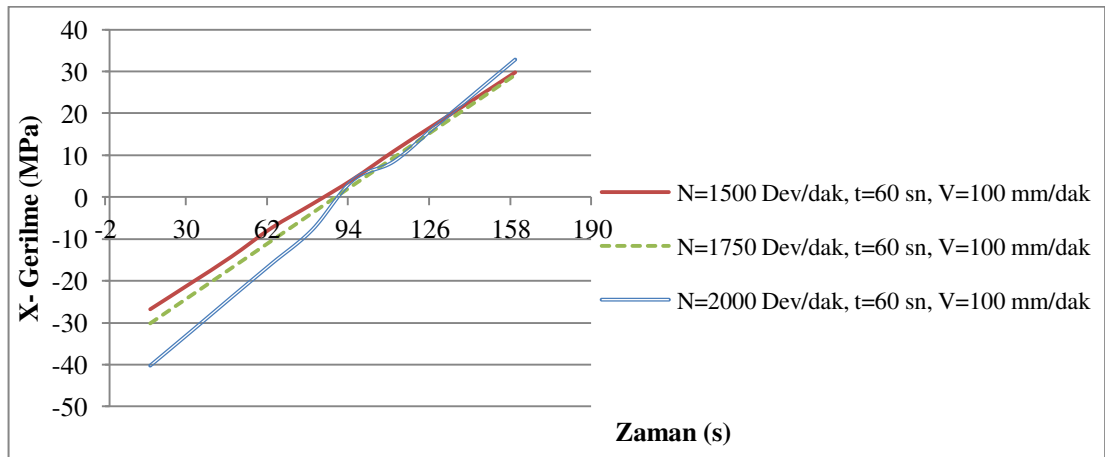


Şekil 5. 147 $V=150$ mm/dak, $t=60$ s iken; zamana bağlı sıcaklık değişimi

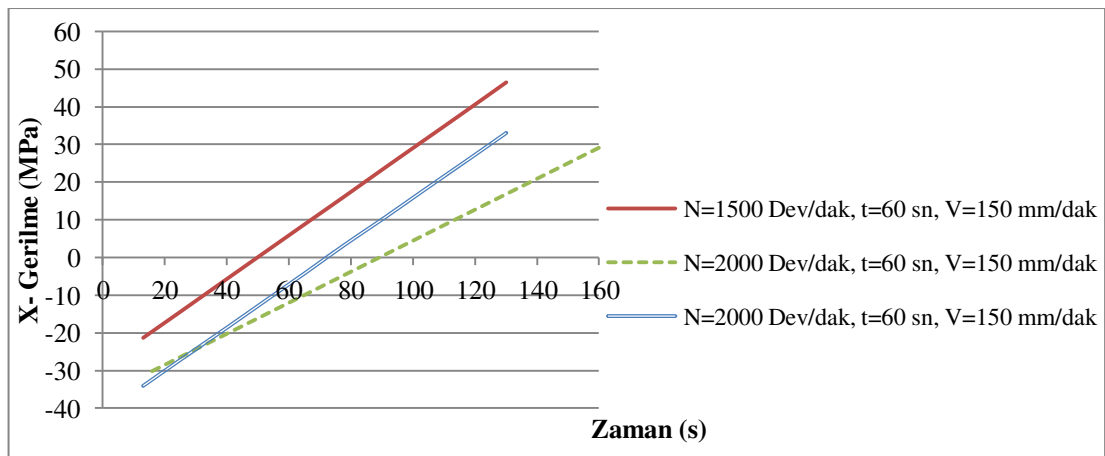
X yönündeki Gerilmeler



Şekil 5. 148 V=75 mm/dak, t=60 s iken; σ_x değişimi

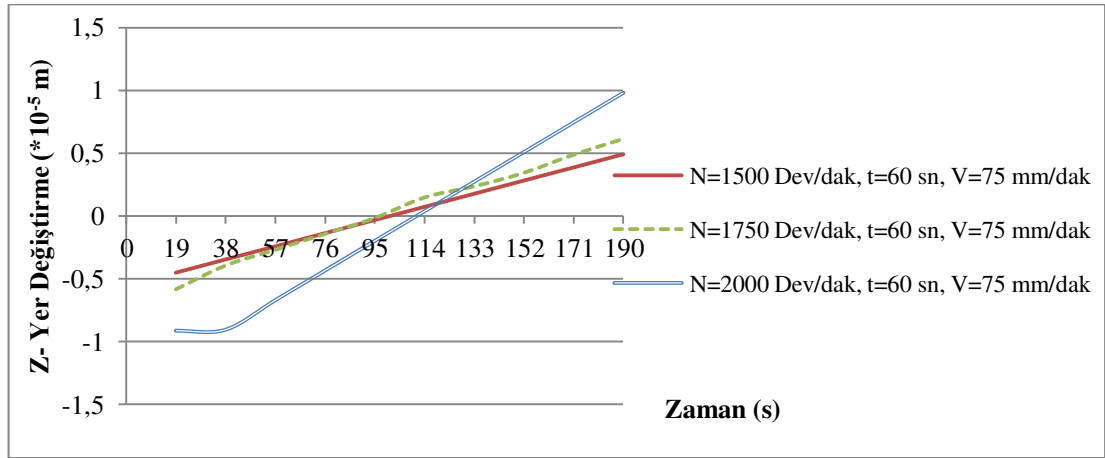


Şekil 5. 149 V=100 mm/dak, t=60 s iken; σ_x değişimi

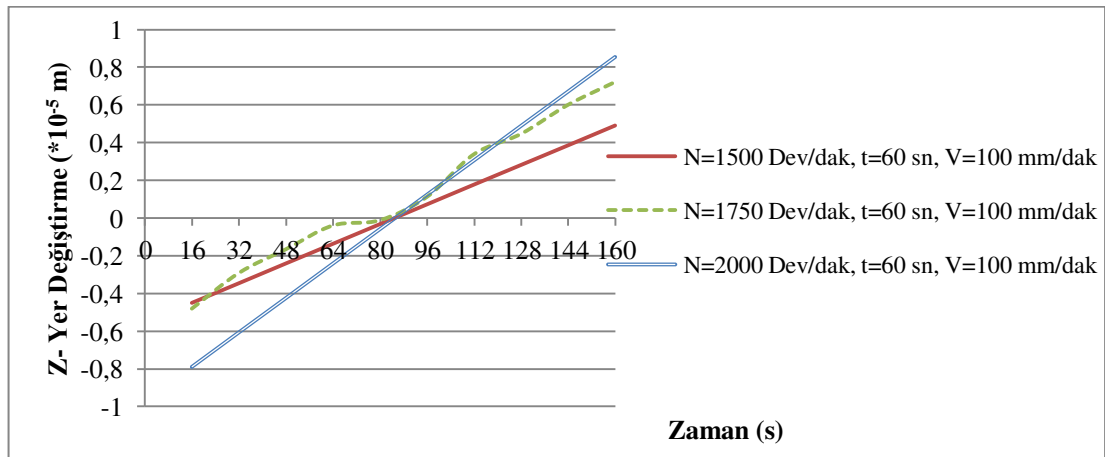


Şekil 5. 150 V=150 mm/dak, t=60 s iken; σ_x değişimi

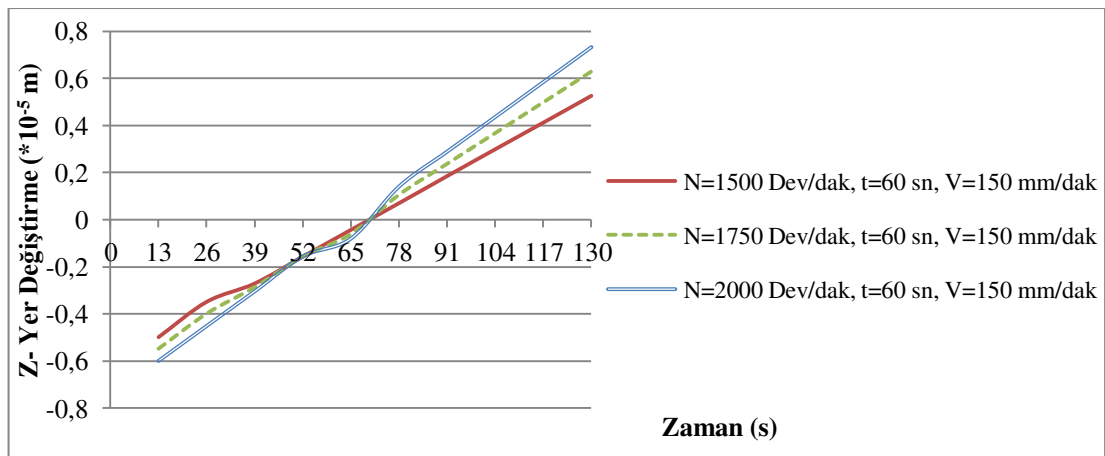
Z yönündeki Yer Değiştirmeler



Şekil 5. 151 $V=75 \text{ mm/dak}$, $t=60 \text{ s}$ iken; yer değiştirme değişimi



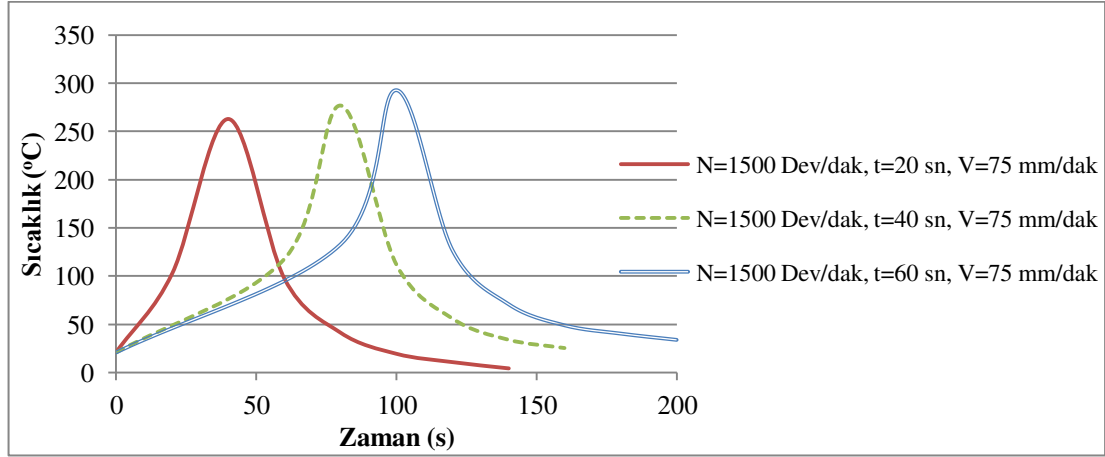
Şekil 5. 152 $V=100 \text{ mm/dak}$, $t=60 \text{ s}$ iken; yer değiştirme değişimi



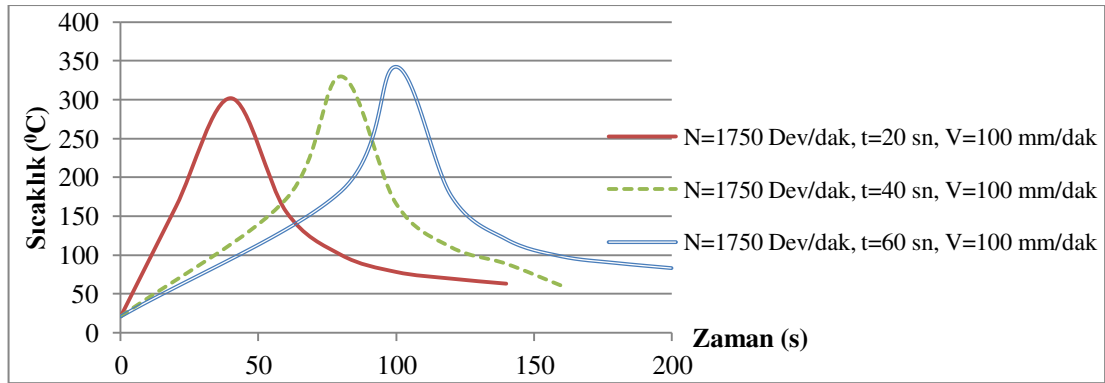
Şekil 5. 153 $V=150 \text{ mm/dak}$, $t=60 \text{ s}$ iken; yer değiştirme değişimi

5. 5. 3 Bekleme Süresinin Etkisinin İncelenmesi

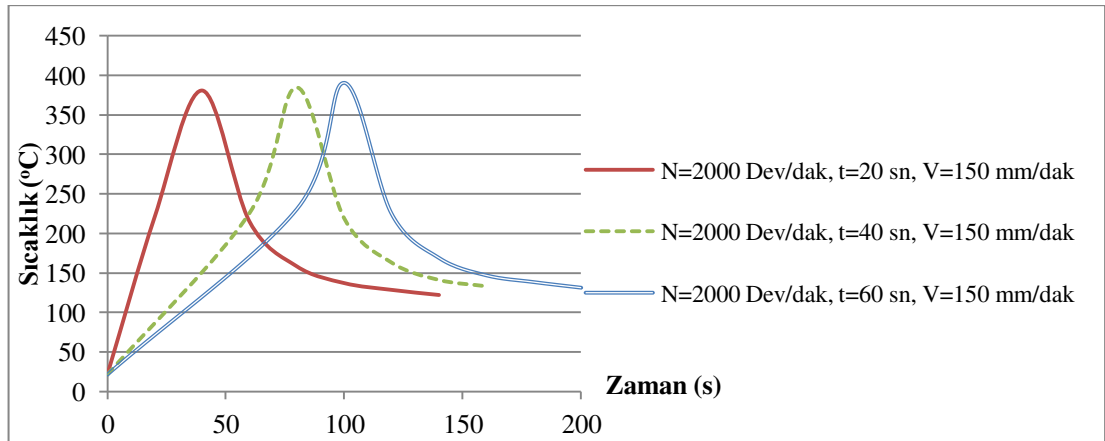
Body Temperature



Şekil 5. 154 N=1500 dev/dak, V=75 mm/dak iken; zamana bağlı sıcaklık değişimi

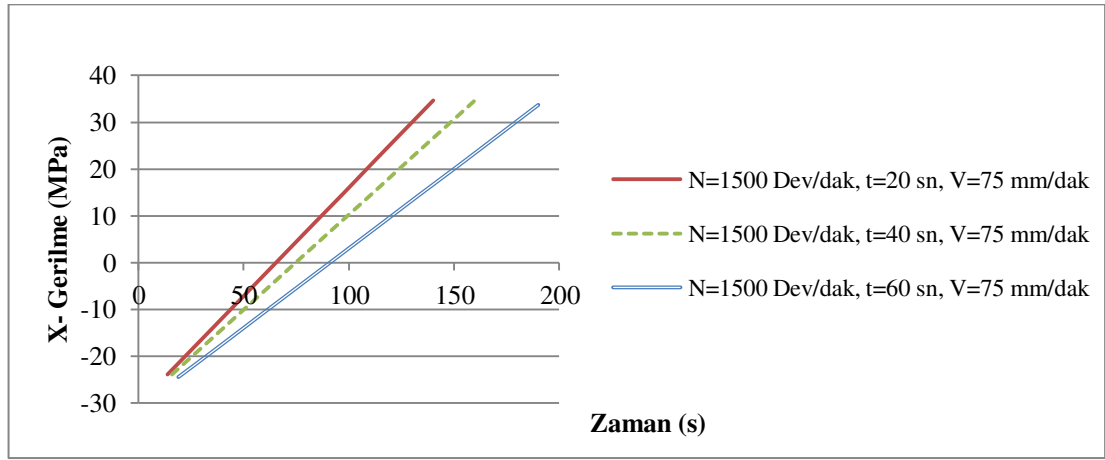


Şekil 5. 155 N=1750 dev/dak, V=100 mm/dak iken; zamana bağlı sıcaklık değişimi

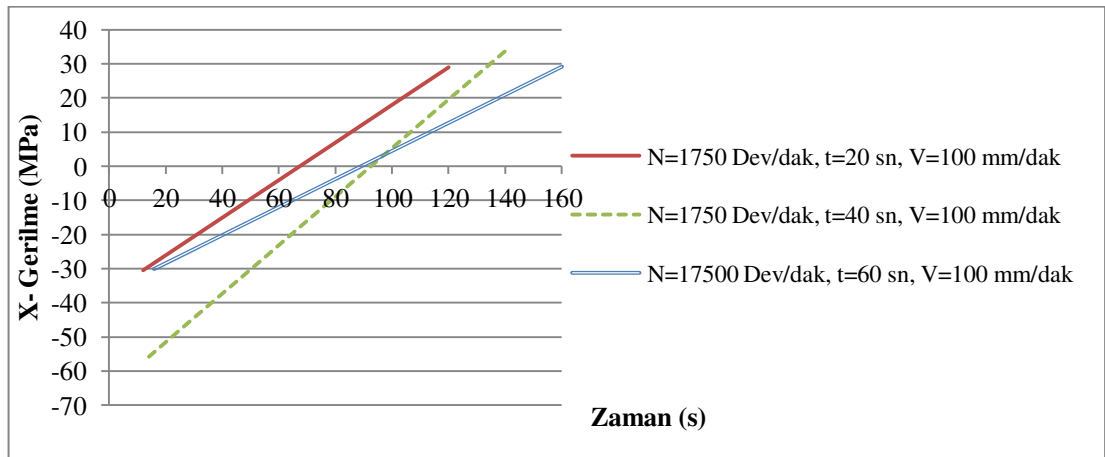


Şekil 5. 156 N= 2000 dev/dak, V=150 mm/dak iken; zamana bağlı sıcaklık değişimi

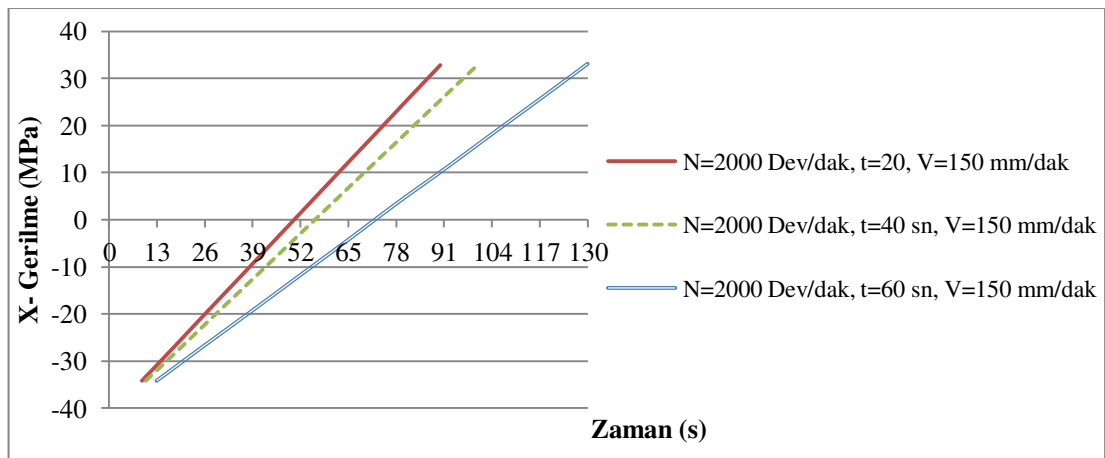
X yönündeki Gerilmeler



Şekil 5. 157 $N=1500$ dev/dak, $V=75$ mm/dak iken; σ_x değişimi

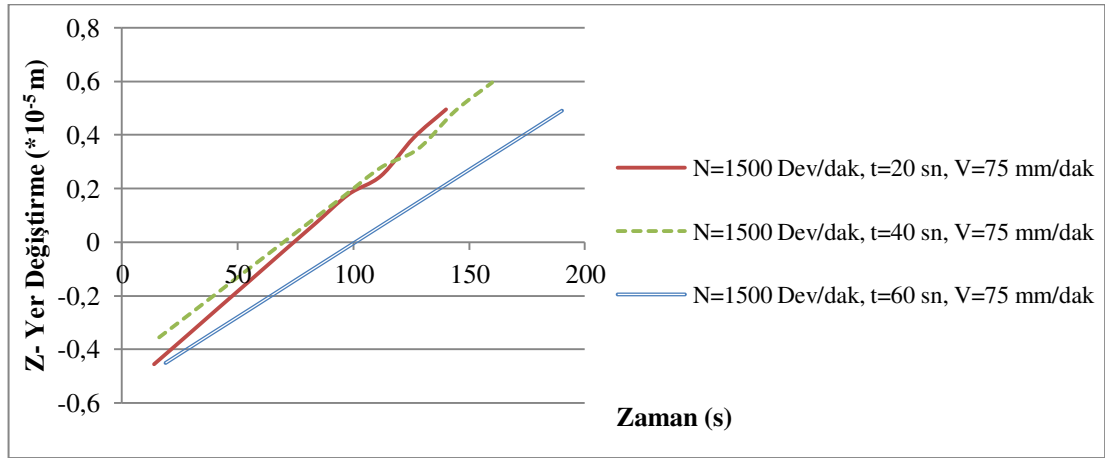


Şekil 5. 158 $N=1750$ dev/dak, $V=100$ mm/dak iken; σ_x değişimi

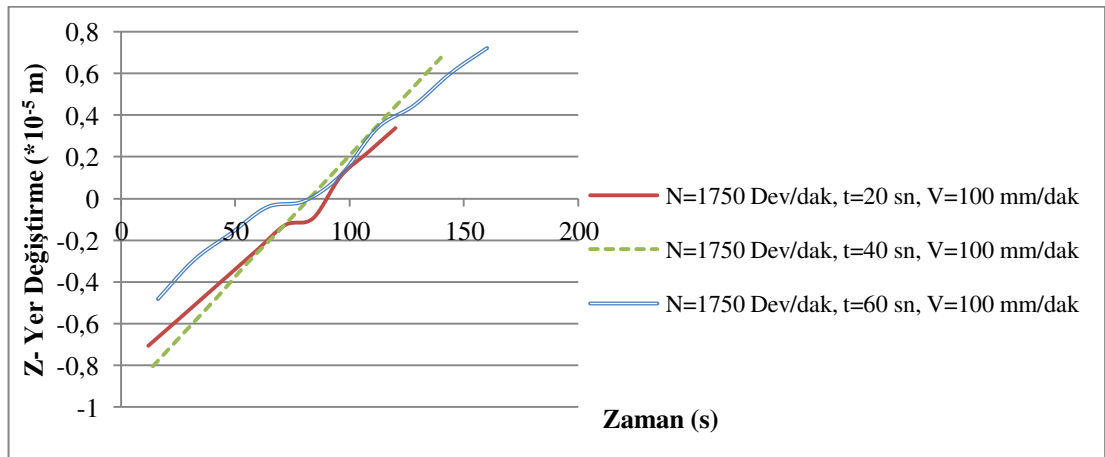


Şekil 5. 159 $N=2000$ dev/dak, $V=150$ mm/dak iken; σ_x değişimi

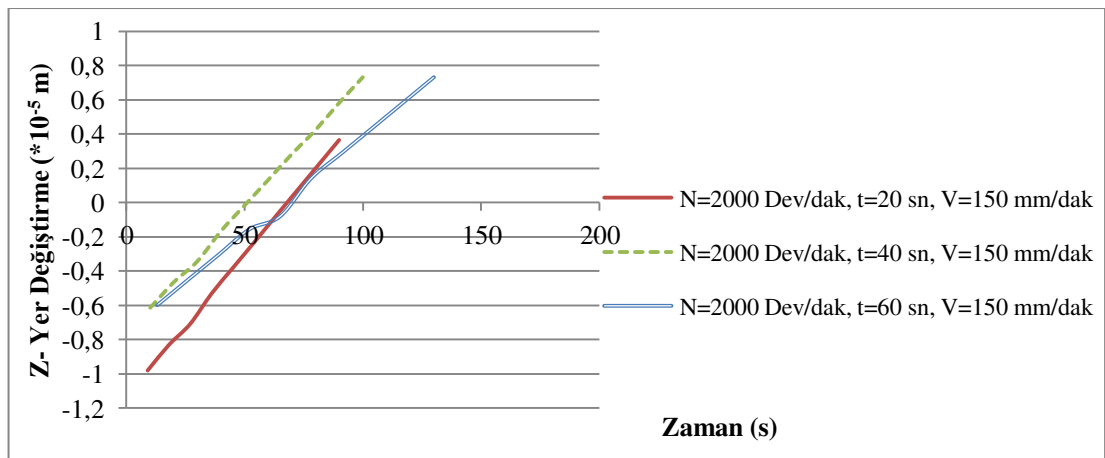
Z yönündeki Yer Değiştirmeler



Şekil 5. 160 N=1500 dev/dak, V=75 mm/dak iken; yer değiştirme değişimi



Şekil 5. 161 N=1750 dev/dak, V=100 mm/dak iken; yer değiştirme değişimi



Şekil 5. 162 N=2000 dev/dak, V=150 mm/dak iken; yer değiştirme değişimi

BÖLÜM ALTI

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

6. 1 Giriş ve Amaç

Son yıllarda araştırmacılar, alüminyum alaşımlarının geleneksel ergitme kaynak yöntemleriyle birleştirilmelerinde karşılaşılan problemlerin azaltılması amacıyla, yeni ve alternatif kaynak yöntemleri üzerindeki çalışmalara yönelmişlerdir. Katı hal kaynak yöntemlerinden biri olan sürtünme karıştırma kaynak tekniği, özellikle alüminyum ve alaşımlarının problemsiz bir şekilde birleştirilmesinde önemli avantajlar sağlamaktadır. Literatürde aynı özelliklere sahip alüminyum alaşımlarının sürtünme karıştırma kaynağı (SKK) yöntemiyle birleştirilmesiyle ilgili pek çok çalışma mevcuttur. Ancak farklı özelliklerdeki alüminyum çiftlerinin kaynağı üzerine yapılan araştırmalar sınırlı sayıdadır. Bu nedenle çalışmada; havacılık, uzay ve savunma sanayisi gibi geniş kullanım alanına sahip, fiziksel ve kimyasal içeriği birbirinden farklı AA6061/AA7075 alüminyum plaka çiftleri, farklı işlem parametreleri altında yeni ve alternatif bir katı hal kaynak yöntemi olan sürtünme karıştırma kaynağı ile birleştirilmişlerdir. Birleştirilen numunelere literatüre uygun olarak mikro yapı ve mekanik testler uygulanmıştır. Bağlantı bölgesi mikro yapısını incelemek amacı ile birleştirilen numuneler, metalografik muayeneye tabi tutulmuştur. Bu amaçla, hazırlanan deney parçalarına, optik mikroskop ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) incelemeleri yapılmıştır. Metalografik işlem sonrası numunelerin kaynak bölgesinden eşit aralıklarda mikro sertlik ölçümleri alınmıştır. Birleştirilen numunelerin bağlantı mukavemetlerini belirlemek amacı ile sırasıyla çekme ve yorulma deneyleri uygulanmıştır. Ayrıca kaynak esnasında yüzeyde oluşan sıcaklık değerleri bir lazer pirometre yardımıyla belirli aralıklarda ölçülmüştür. Bu ölçümler, mikro yapı ve mekanik test yorumlarıyla ilişkilendirilmiştir. Deneysel çalışma sonucunda elde edilen veri ve bulgular, ilgili literatür ışığında değerlendirilerek çalışma sonuçlandırılmıştır.

6. 2 Kaynak Öncesi İşlemler

6. 2. 1 Malzeme

Deneylerde standart Al6061 ve Al7075 alaşımları 3 mm x 260 mm x 300 mm boyutlarında ticari olarak temin edilmiştir. Bu alaşımlara ait kimyasal bileşimler, Tablo 6. 1’ de mekanik ve fiziksel özellikler ise, sırasıyla Tablo 6. 2 ve Tablo 6. 3’ de verilmiştir.

Tablo 6. 1 Deneyisel çalışmalarda kullanılan malzemelerin kimyasal bileşenleri

Malzeme	Alaşım Elementleri (% Ağırlık)						
	Cu	Fe	Si	Zn	Mn	Mg	Al
Al6061	0.15	0.6	0.8	0.1	0.1	1.1	Kalan
Al7075	1.3	0.45	0.4	5.5	0.3	2.4	Kalan

Tablo 6. 2 Deneyisel çalışmalarda kullanılan malzemelerin mekanik özellikleri

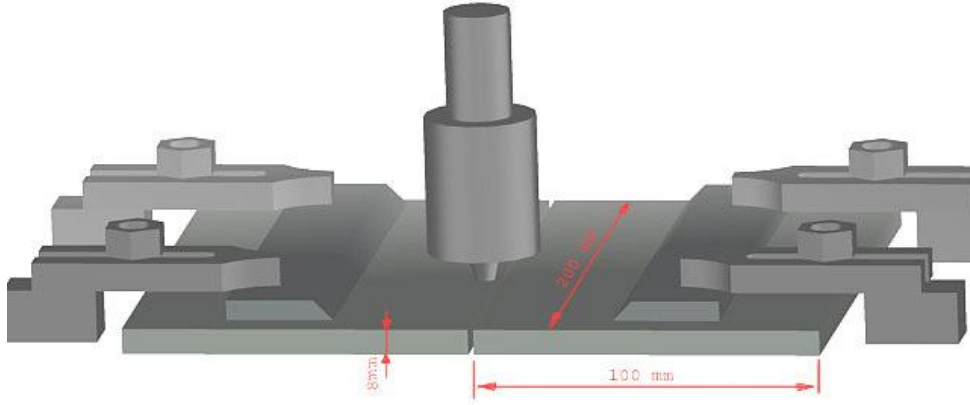
Malzeme	Çekme Dayanımı (Mpa)	Kopma Uzaması (%)	Akma Dayanımı (Mpa)	Elastise Modülü (Gpa)	Sertlik (HV)
Al6061	235	21	140	70	75
Al7075	570	10	505	72	150

Tablo 6. 3 Deneyisel çalışmalarda kullanılan malzemelerin fiziksel özellikleri

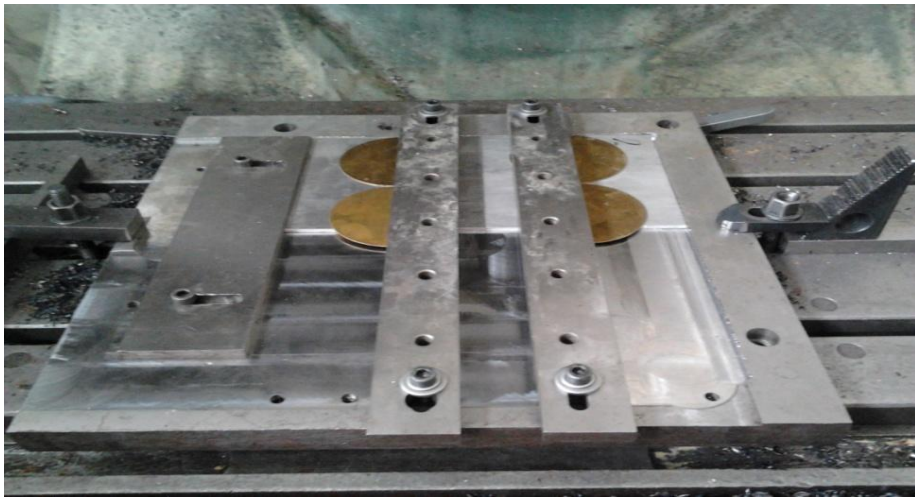
Malzeme	Özgül Ağırlık (kg / m ³)	Genleşme Katsayısı($\mu\text{m m}^{-1} \text{ K}^{-1}$)	Elektriksel İletkenlik (% IACS)	Isıl İletkenlik (W m ⁻¹ K ⁻¹)
Al6061	2700	23.3	40	155
Al7075	2810	23.5	33	134

6.2.2 Malzemelerin Kaynağa Hazırlanması

Kaynak işleminden önce, ticari olarak temin edilen plaka halindeki standart alüminyum alaşımları kesme işlemine tabi tutularak 5 mm x 130 mm x 150 mm boyutlarına getirilmektedir. Birleştirilmek üzere eşleştirilen alın yüzeyler, kir, pas ve oksit tabakasından arındırılmıştır. Bu işlemden sonra bütün plakalar, dâhil olduğu parametre numarasına göre markalanmıştır. 10 mm kalınlıktaki altlık malzeme düzlem yüzey taslama tezgâhında yüzeyi taşlanarak, freze tablası üzerine yerleştirilmiştir. Birleştirilecek plakalar bu altlık üzerine konduktan sonra Şekil 6. 1’deki düzende, bağlama pabuçları yardımıyla sıkıştırılarak kaynak işlemine hazır hale getirilmiştir.



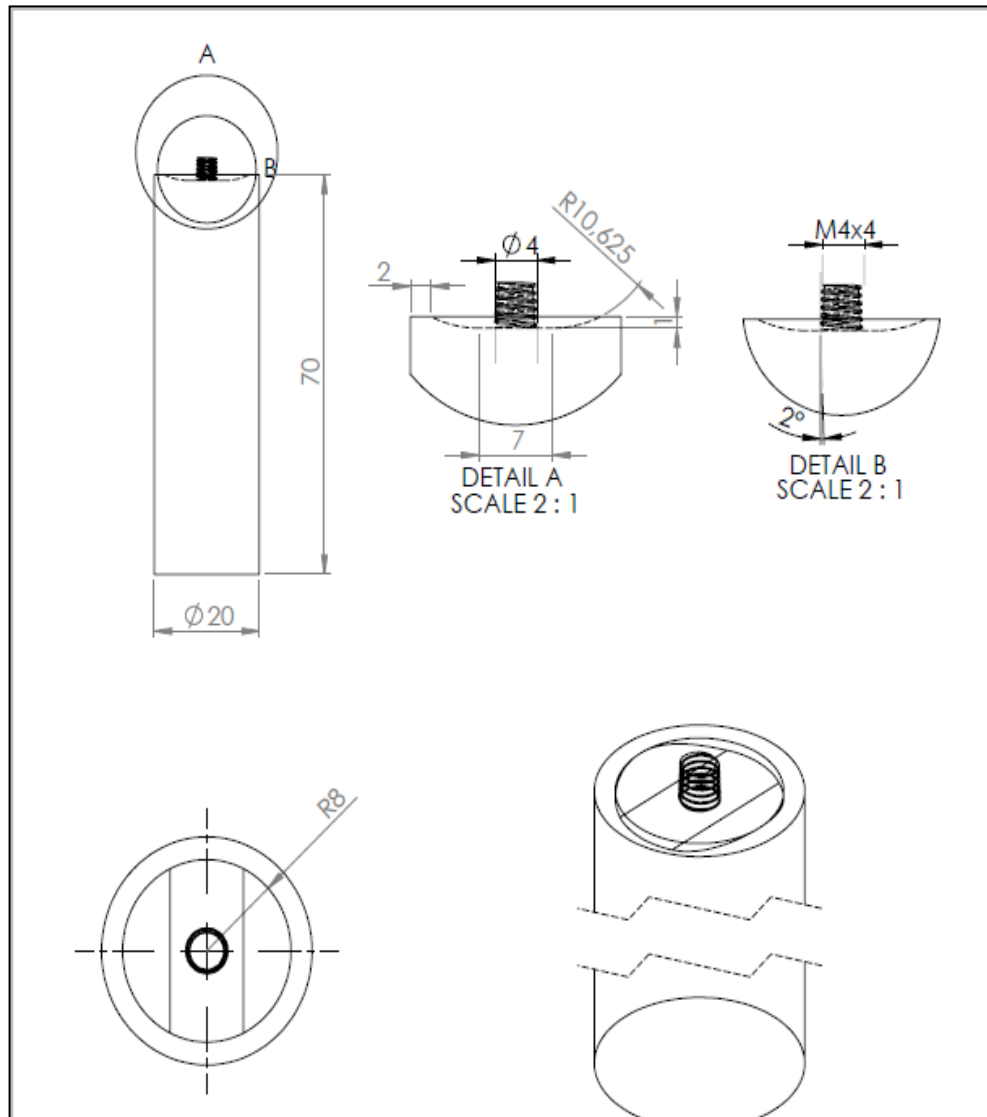
Şekil 6. 1 Kaynak uygulaması şematik gösterimi



Şekil 6. 2 Parçaların tezgâha bağlanma hali

6.2.3 Karıştırıcı Uçların Hazırlanması

Bu çalışmada kullanılacak karıştırıcı uçlar Şekil 6. 2' de gösterildiği gibi konik vidalı olmak üzere tek çeşit geometride imal edilmişlerdir. İmal edilen karıştırıcı uçlara kaynak işlemi için mukavemet kazandırmak için ısıtıl işlem uygulanmıştır. Karıştırıcı uçlara ait teknik resim Şekil 6. 3' de verilmiştir.



Şekil 6. 4 SKK' da kullanılan karıştırıcı ucun teknik resmi

6.2.4 Deneyler için Belirlenen Kaynak Parametreleri

Literatür incelemeleri sonucunda mekanik davranışları üzerinde önemli etkiye sahip olan devir sayısı, ilerleme hızı ve bekleme süresi değiştirilerek sürtünme karıştırma kaynak bağlantıları elde edilmiştir. Çalışmada, devir sayısı (1500, 1750, 2000 dev/dak) olmak üzere üç farklı düzeyde; ilerleme hızı (75, 100, 150 mm/dak) olmak üzere üç farklı düzeyde; bekleme süresi de (20, 40, 60) olmak üzere üç farklı düzeyde seçilerek 27 adet sayısal deney gerçekleştirildi. Devir sayısı (1500, 1750, 2000 dev/dak), bekleme süresi (60 sn) ve ilerleme hızı (75 ve 100 mm/dak) kabul edilerek 18 adet deney yapıldı. Çalışmada kullanılan değişik parametreler tablo 6. 4’ te verilmiştir.

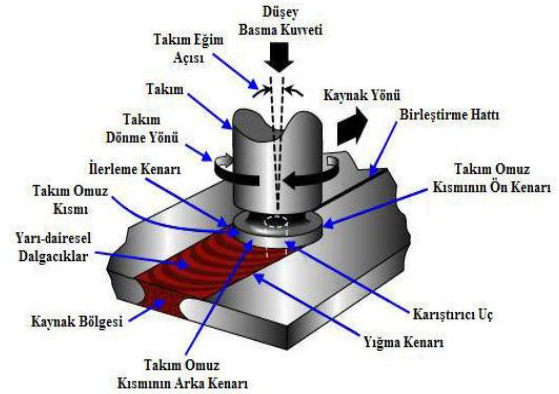
Tablo 6. 4 Sürtünme Karıştırma Kaynağında kullanılan kaynak parametreleri

Malzeme	Uç Profili	Bekleme Süresi (s)	Devir Sayısı (dev/dak)	İlerleme Hızı (mm/dak)	Numune Kod Numarası
Al6061 Al6061	Konik vidalı	60	1500	75	A1
			1750		A2
			2000		A3
			1500	100	A4
			1750		A5
			2000		A6
Al7075 Al7075	Konik vidalı	60	1500	75	B1
			1750		B2
			2000		B3
			1500	100	B4
			1750		B5
			2000		B6
Al7075 Al6061	Konik vidalı	60	1500	75	C1
			1750		C2
			2000		C3
			1500	100	C4
			1750		C5
			2000		C6

6.3 Kaynak İşlemi

Kaynak işlemi için Umut Kama San. Tic. Lmd. A.Ş.' de bulunan FU 315x1250 V/2 marka 7,5 kW, motor gücünde konsol tipi üniversal baslıklı Taksan tarafından üretilmiş freze tezgâhı kullanılmıştır. Freze tezgâhı yarı otomatik X, Y, Z koordinatlarında minimum 28 dev/dak, maksimum 3500 dev/dak dönme hızı ve minimum 20 mm/dak, maksimum 600 mm/dak ilerleme hızında ve iki farklı dönme yönünde çalışabilmektedir.

Birleştirilmek üzere eşleştirilen AA6061 ve AA7075 levhalar, alın altına Sekil 6.4' deki düzende, tezgah tablası üzerine sabitlendirilmiştir. Freze tezgâhı tablası üzerine yerleştirilen levhaların birleşme hattı ile karıştırıcı ucun paralellliği, komparatör kullanılarak kontrol edilmiştir. Böylece karıştırıcı ucun, birleşme çizgisiyle paralel hareket etmesi sağlanmıştır. Tezgâh saat yönünde çalıştırılarak, ucun Z yönünde parçaya daldırılmasıyla 0,1 mm omuz batma derinliği verilmiştir. Bu konumda yaklaşık 1 dakika beklenerek karıştırıcı ucun omuz bölgesinin levhaları ısıtması sağlanmıştır. Sürtünme sıcaklığı sağlandıktan sonra, tezgâhın otomatik ilerleme hızında birleşme çizgisi boyunca ilerlemesi sağlanmış ve bitim noktasında kaynak işlemi tamamlanmıştır.



Şekil 6. 4 Sürtünme karıştırma kaynağının uygulandığı

6.4 Kaynak Sonrası Yapılan Muayeneler

6.4.1 Çekme Deneyleri

Çekme testi, mekanik malzeme muayene yöntemleri arasında metalik veya metalik olmayan malzemelerin mukavemetlerini belirleyen bir tahribatlı muayene testidir. Çekme deneyleri genel olarak metal ve alaşımların dayanımlarını belirlemek amacıyla yapılır. Bu yöntemde çoğu kez silindirik bazen de belirli bir geometrik kesite sahip numuneler, sürekli artan bir statik çekme zorlanmasına maruz bırakılarak numunenin çekmeye karşı gösterdiği dayanım araştırılır. Bu test sonucunda malzemenin elastisite modülü, akma dayanımı, en yüksek çekme dayanımı ve yüzde uzama değerleri tespit edilebilmektedir (Savaşkan, 1999).

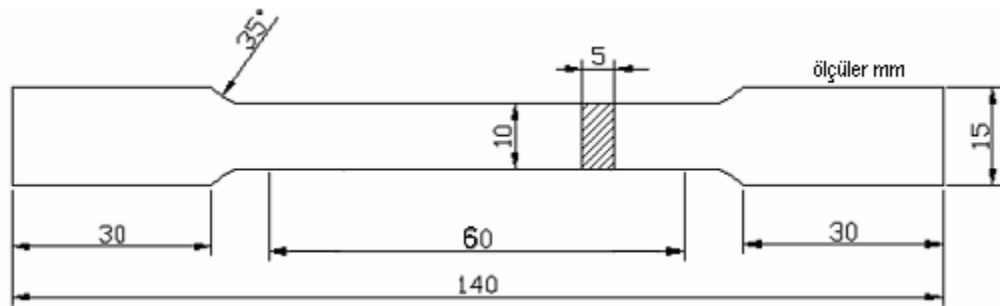
Çekme deneyleri; Dokuz Eylül Üniversitesi Mekanik Laboratuvarında bulunan 100 kN yük kapasitesine sahip SSG50- 10H modeline sahip cihaz ile 2 mm/dak ilerleme hızı ile çekilmişlerdir.



Şekil 6. 5 Çekme testlerinin yapıldığı çekme makinası



Şekil 6. 6 Kaynaklara ait numuneler



Şekil 6. 7 Çekme testi için numune ölçüleri



Şekil 6. 8 Numunenin plakadan çıkarılışı (SolidWorks Tasarımı)

6.4.2 Yüzey Sıcaklık Ölçümleri

Sürtünme karıştırma kaynağı işlemi esnasında karıştırıcı uç ile iş parçası arasında oluşan sürtünme sıcaklıklarının tespiti amacıyla, sıcaklık ölçer lazer pirometre kullanılmıştır. Ölçümler esnasında cihaz, benim tarafımdan tutularak CNC freze tezgâhının ilerleme hızına uygun olarak ölçüm alınmıştır. üzerinde bulunan data logger sayesinde otomatik 0.5 sn aralıklarda ölçülen değerler kaydedilerek, veriler daha sonra bilgisayar ortamına aktarılmıştır. Sıcaklık ölçümleri, dikiş boyunca karıştırıcı uç merkezi ve omuzun iki kenarının temas noktası olmak üzere üç bölgeden alınmıştır. Ölçümlerde maksimum sıcaklık değerleri esas alınmıştır. 0 - 800 °C sıcaklık ölçümü yapabilen Trotec BP20 marka lazer pirometrenin görüntüleri şekil 6. 9’ da verilmiştir.



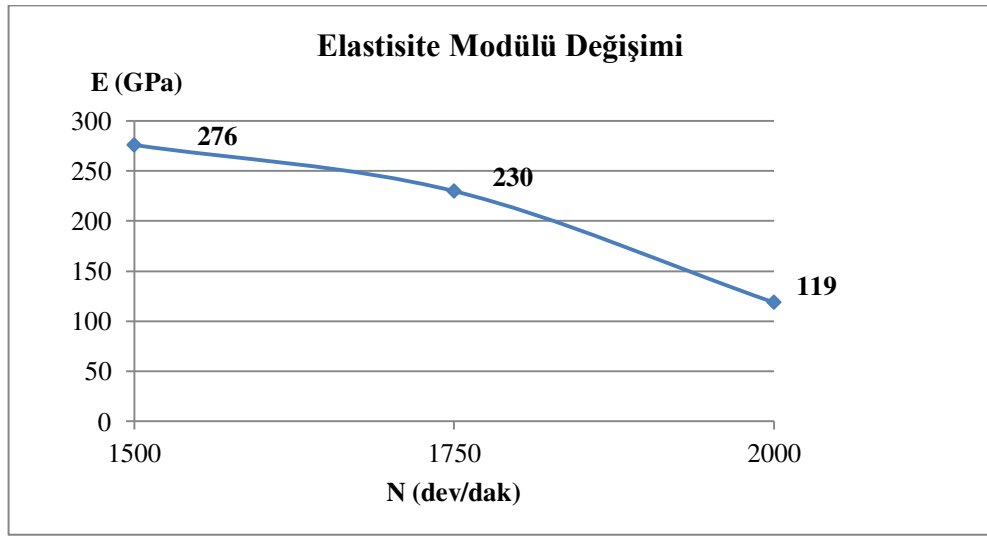
Şekil 6. 9 Yüzey sıcaklık ölçümlerinin alındığı lazer pirometre

BÖLÜM YEDİ

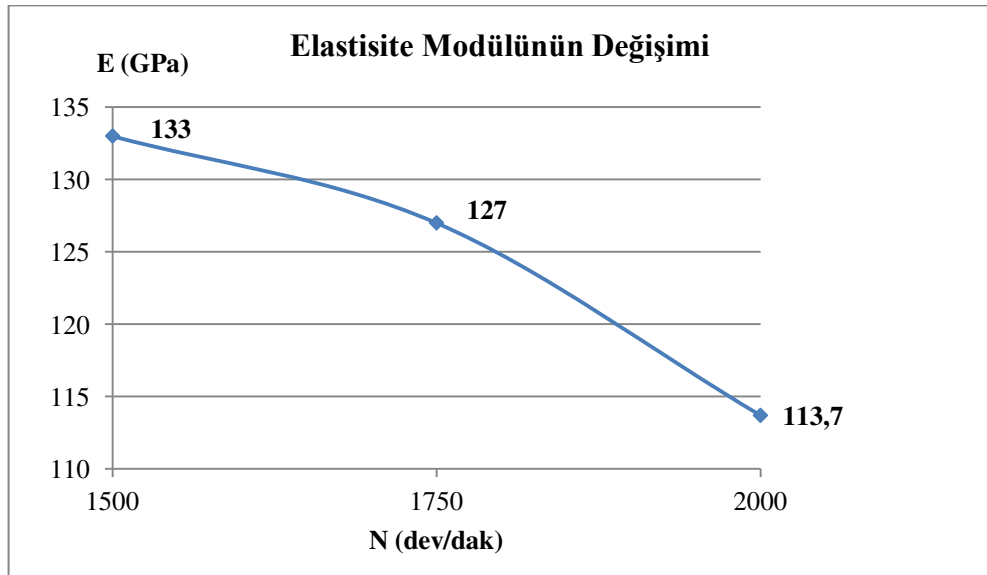
DENEY SONUÇLARI VE İRDELENMESİ

7. 1. Devir Sayısının Mekanik Özellikler Üzerine Etkisinin İncelenmesi

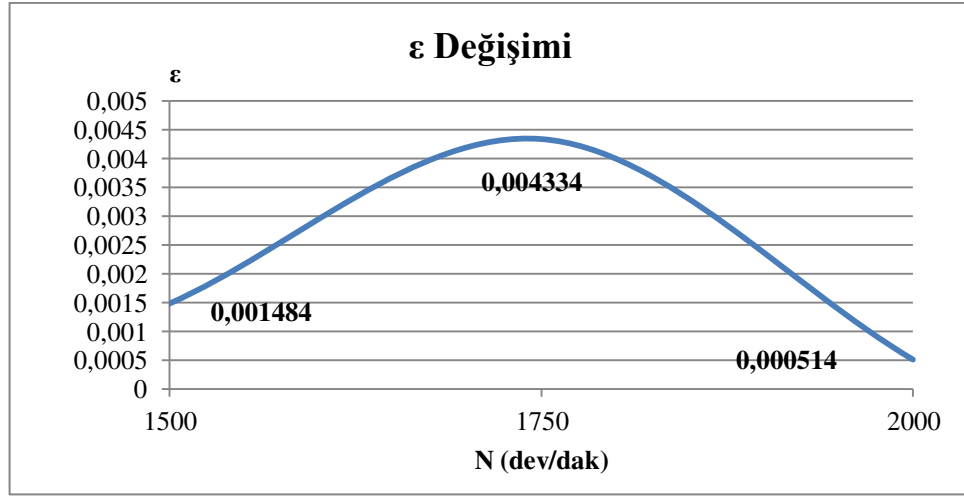
Al6061 – Al6061 Kaynağı



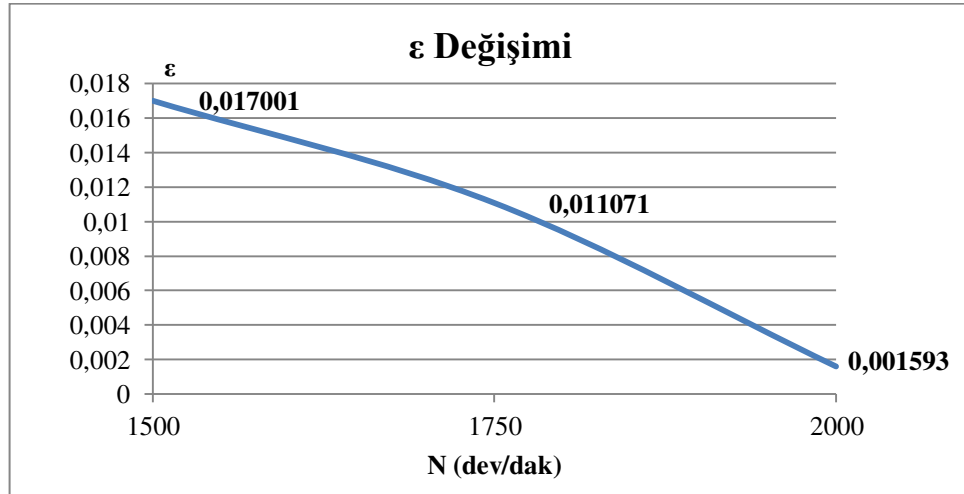
Şekil 7. 1 N değişken; t=60 s, V=75 mm/dak iken E' nin değişimi



Şekil 7. 2 N değişken; t=60 s, V=100 mm/dak iken E' nin değişimi



Şekil 7. 3 N değişken; $t=60$ s, $V=75$ mm/dak iken ε değişimi

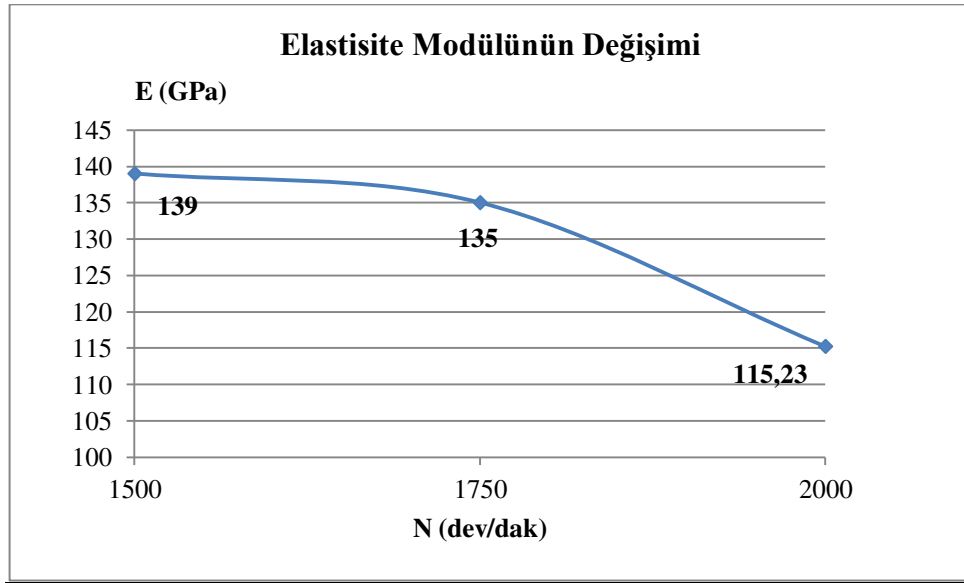


Şekil 7. 4 N değişken; $t=60$ s, $V=100$ mm/dak iken ε ' nün değişimi

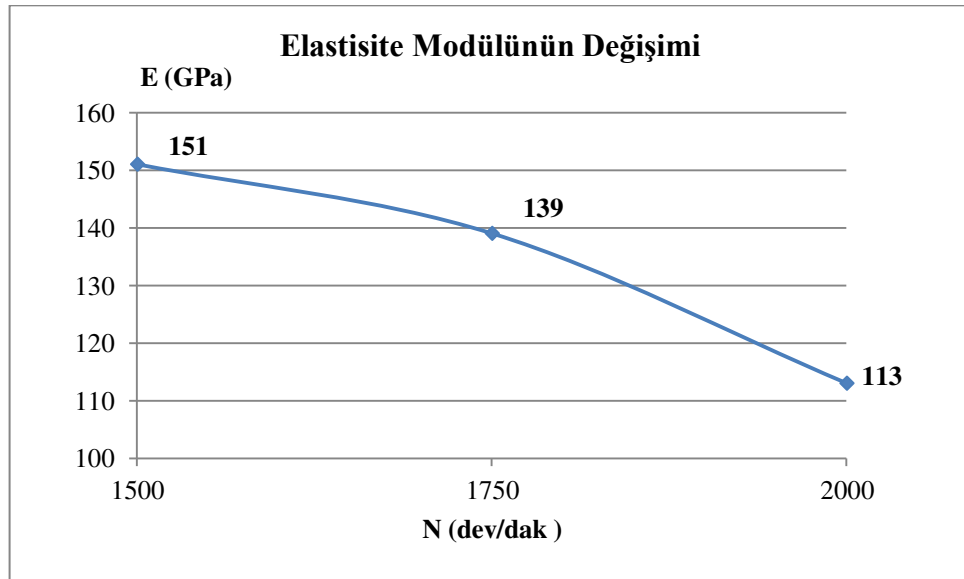
Yukarıdaki grafiklerde görüldüğü üzere hem 75 hem de 100 mm/dak hızlarında elastise modülü exponansiyel olarak azalış göstermiştir. [1500 dev/dak, $t=60$ s, $V=75$ mm/dak] parametrelerine sahip numunenin $E=276$ GPa iken; [1500 dev/dak, $t=60$ s, $V=100$ mm/dak] parametrelerine sahip numunenin $E=133$ GPa olarak elde edilmiştir.

Birim şekil değiştirmelere baktığımızda ise 75 mm/dak hızında en büyük değişim 1750 dev/dak görülürken; 100 mm/dak da ise 1500 dev/dak görülmüştür. Devir sayısı arttıkça birim şekil değiştirmede azalma görülmektedir.

Al7075 – Al7075 Kaynağı

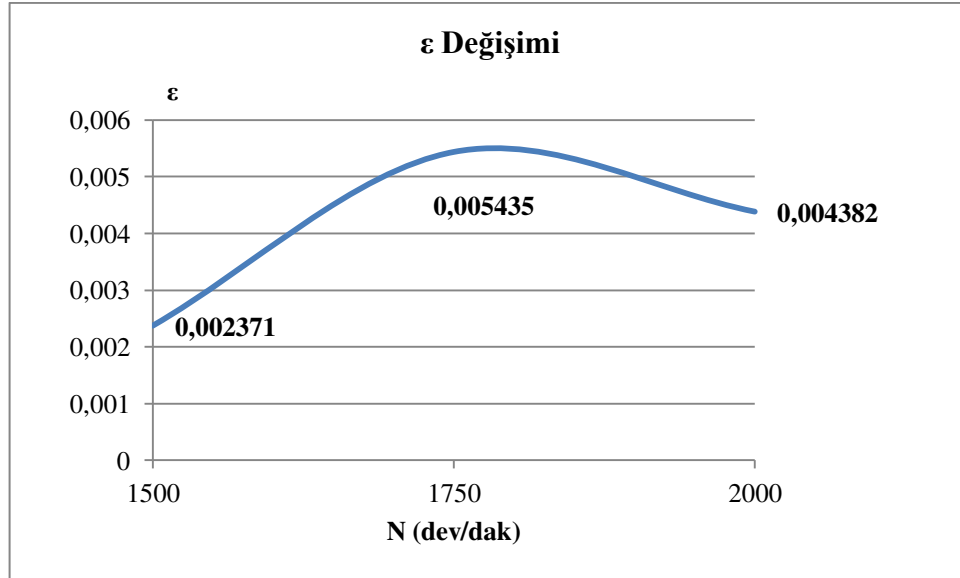


Şekil 7. 5 N değişken; t=60 s, V=75 mm/dak iken E' nin değişimi

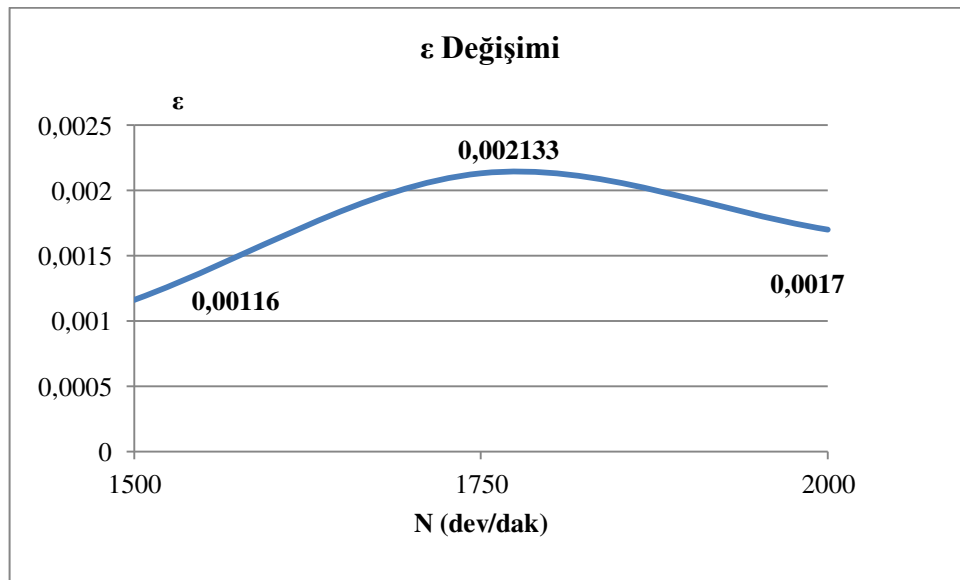


Şekil 7. 6 N değişken; t=60 s, V=100 mm/dak iken E' nin değişimi

Her iki hız durumunda da devir sayısı arttıkça elastisite modülünde azalma görülmektedir. İlerleme hızı arttığında aynı devir sayısındaki elastisite modülleri artış göstermektedir.



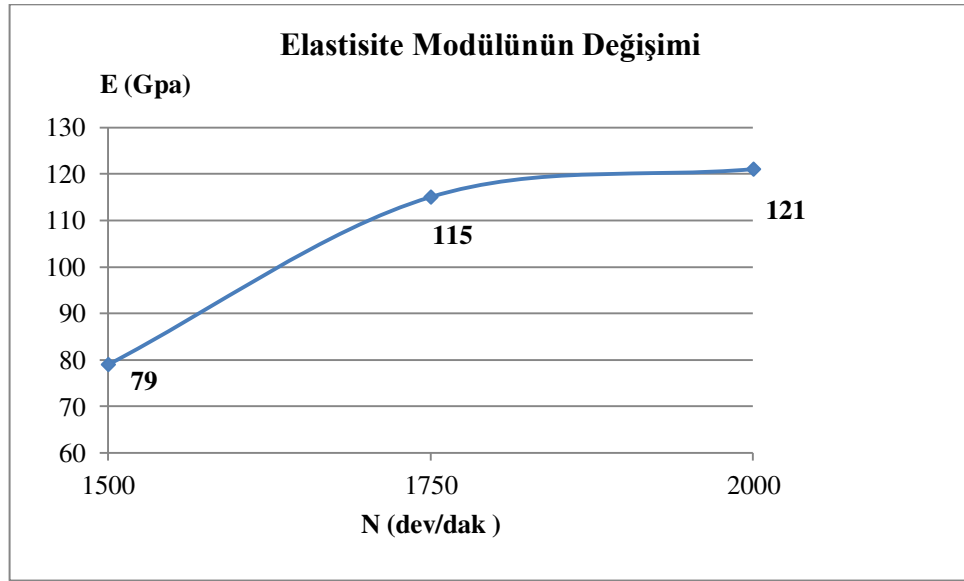
Şekil 7. 7 N değişken; $t=60$ s, $V=75$ mm/dak iken ϵ değişimi



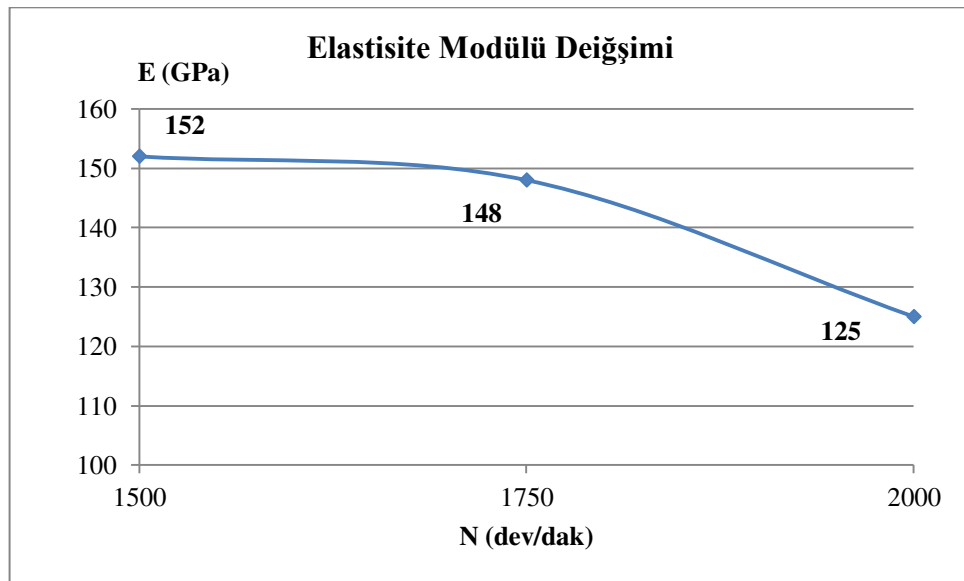
Şekil 7. 8 N değişken; $t=60$ s, $V=100$ mm/dak iken ϵ değişimi

Grafiklerden de görüldüğü üzere değişim formları her iki durumda da aynıdır. Her iki durumda da mak E 1750 dev/dak devir hızında gerçekleşmektedir. İlerleme hızı arttıkça birim şekil değişimi üç farklı devir hızında azalış göstermektedir.

Al7075 – Al6061 Kaynağı

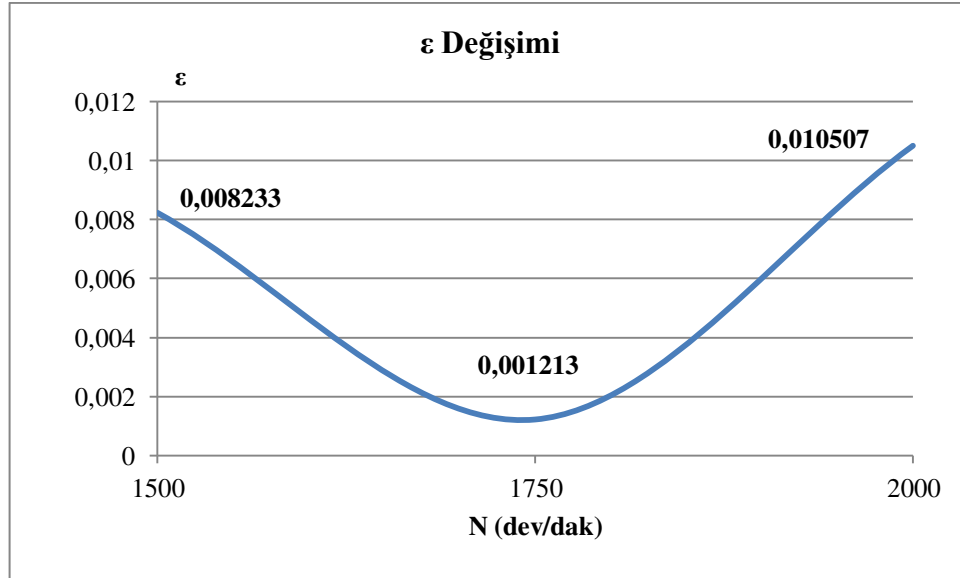


Şekil 7. 9 N değişken; $t=60$ s, $V=75$ mm/dak iken E' nin değişimi

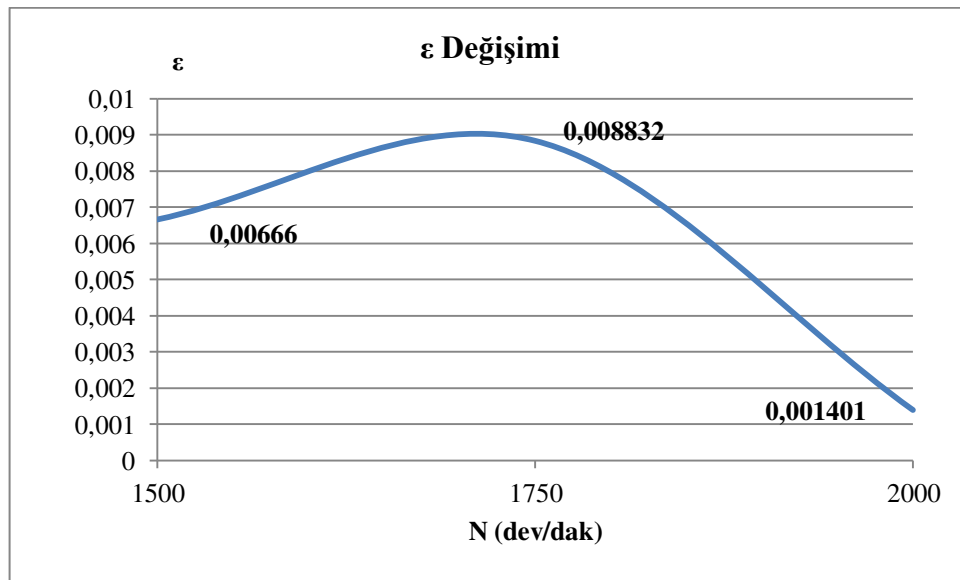


Şekil 7. 10 N değişken; $t=60$ s, $V=100$ mm/dak iken E' nin değişimi

Burada her iki ilerleme hızında farklı formlar elde edildi. 75 mm/dak ilerleme hızında devir sayısı arttıkça elastise modülü de artarken; 100 mm/dak ilerleme hızında devir sayısı arttıkça elastise modülü exponansiyel olarak azalış göstermektedir.



Şekil 7. 11 N değişken; $t=60$ s, $V=75$ mm/dak iken ϵ değişimi



Şekil 7. 12 N değişken; $t=60$ s, $V=100$ mm/dak iken ϵ değişimi

Burada da elastisite modülünde olduğu gibi her iki durumda farklı formlar elde edildi. 75 mm/dak hızında en küçük değişim 1750 dev/dak elde edilirken; 100 mm/dak hızında en büyük değişim 1750 dev/dak hızında elde edilmiştir. Her iki durumda da grafik exponansiyel olarak artış ve azalış göstermektedir.

7. 2 İlerleme Hızının Mekanik Özellikler Üzerine Etkisinin İncelenmesi

Tablo 7. 1 İlerleme hızının E ve ϵ değişimine etkisi

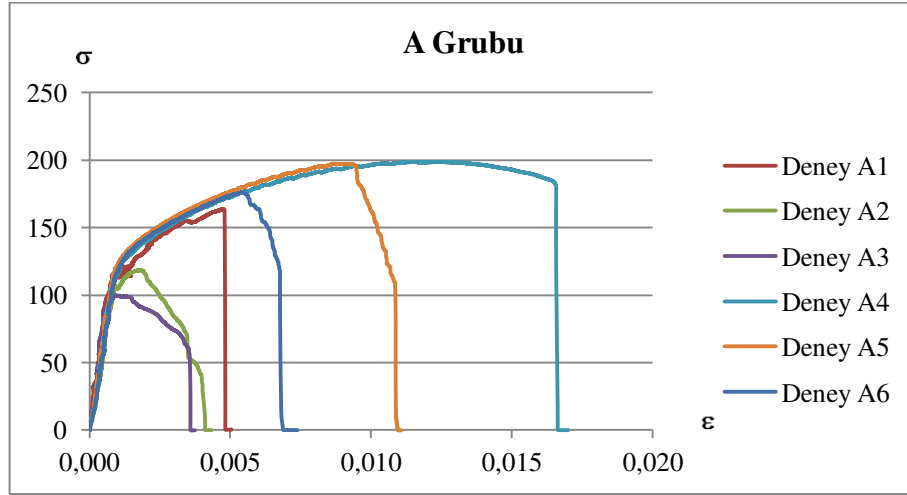
Malzeme	Bekleme Süresi (sn)	Devir Sayısı (dev/dak)	İlerleme Hızı (mm/dak)	Numune Kod Numarası	Elastise Modülü (GPa)	ϵ
Al6061 Al6061	60	1500	75	A1	276	0,001484
			100	A4	133	0,017001
		1750	75	A2	119	0,004334
			100	A5	127	0,011071
		2000	75	A3	185	0,000514
			100	A6	113,7	0,001593
Al7075 Al7075	60	1500	75	B1	139	0,002371
			100	B4	151	0,00116
		1750	75	B2	203	0,003368
			100	B5	139	0,001233
		2000	75	B3	115,23	0,004382
			100	B6	113	0,00170
Al7075 Al6061	60	1500	75	C1	79	0,008223
			100	C4	152	0,00666
		1750	75	C2	115	0,001213
			100	C5	148	0,008832
		2000	75	C3	121	0,010507
			100	C6	125	0,001401

Yukarıdaki grafikte de görüldüğü gibi A grubu deneylerde V arttıkça E modülü azalmış, birim şekil değiştirme artış göstermiştir. B grubu deneylerde ilerleme hızı arttıkça elastisite modülü artış gösterirken, birim şekil değiştirme azalma göstermiştir. C grubu deneylerde ise ilerleme hızı arttıkça elastisite modülü artarken, birim şekil değiştirme azalmıştır.

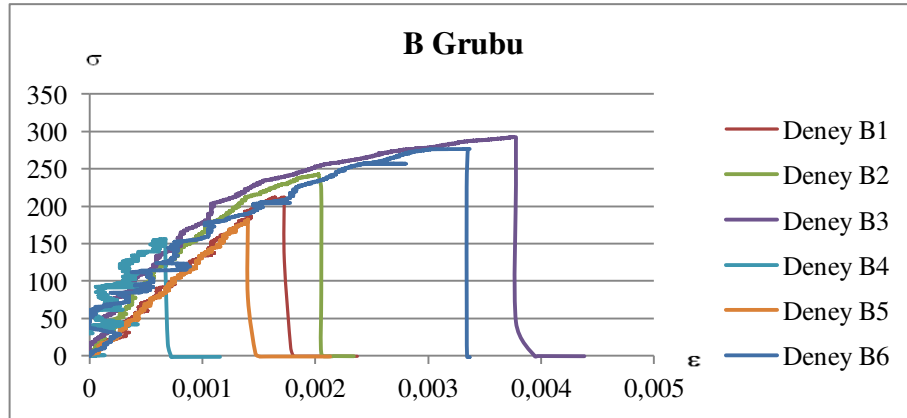
Sonuç olarak en büyük E [1500 Dev/dak, 60 sn, 75 mm/dak] parametrelerine sahip A1 numunesinde 276 GPa en küçük E ise [2000 Dev/dak, 60 s, 75 mm/dak] parametrelerine sahip C1 numunesinde 79 GPa olarak elde edildi. En büyük ϵ ise [1500 Dev/dak, 60 s, 100 mm/dak] sahip A4 numunesinde 0,017001 mm, en küçük ϵ [2000 Dev/dak, 60 s, 75 mm/dak] sahip A3 numunesinde 0,000514 mm bulundu.

7. 3 Çekme Testleri

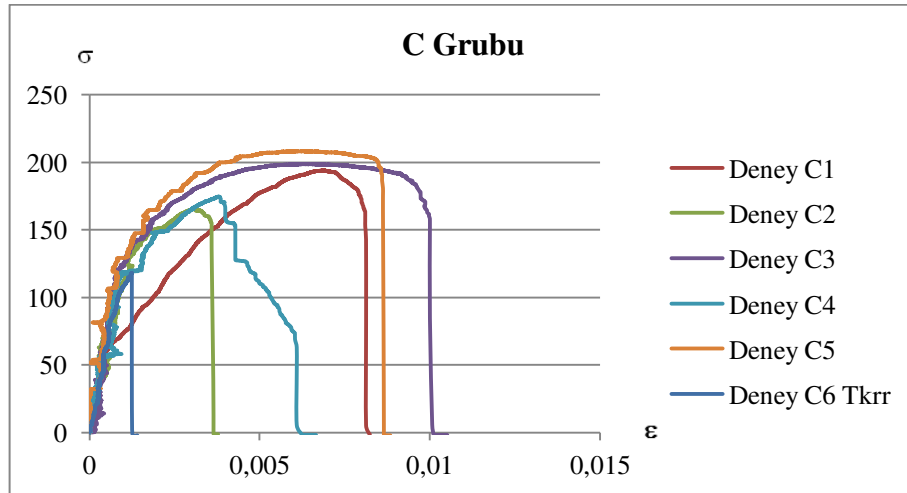
Aşağıda A, B, ve C gruplarına ait çekme testi sonuçları görülmektedir. Üç grupta da farklı mekanik özellikler elde edilmiştir.



Şekil 7.13 A grubu çekme testi deney sonuçları



Şekil 7.14 B grubu çekme testi deney sonuçları



Şekil 7.15 C grubu çekme testi deney sonuçları

Numunelere ait çekme testi sonucundaki fotoğraflar aşağıda verilmiştir.



Şekil 7.16 Çekme testi sonucu kırılan numune



Şekil 7.17 Çekme testi sonucu kırılan numune

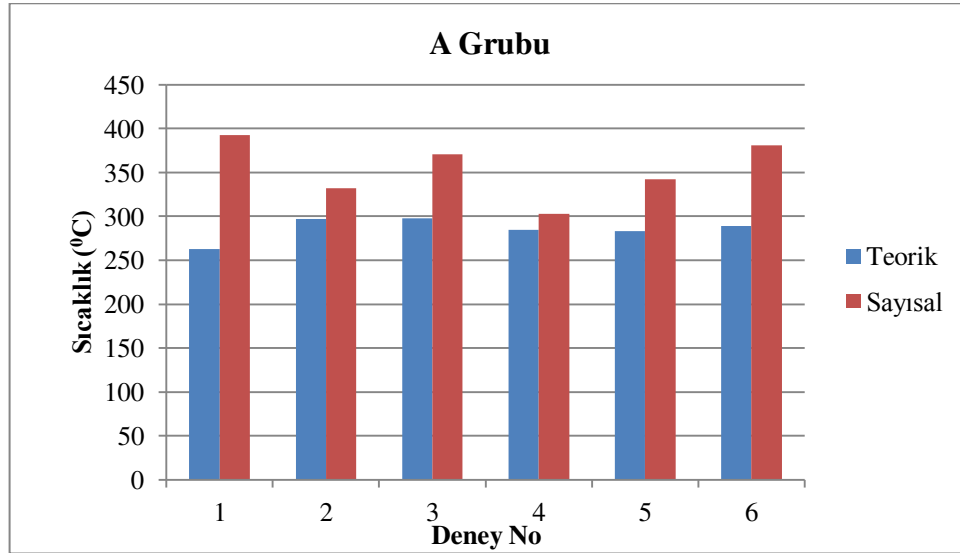


Şekil 7.18 Çekme testi sonucu kırılan numune

Yukarıdaki şekillerde de görüldüğü gibi alüminyum sünek bir malzeme olduğundan dolayı 45° eğim ile kırılma gerçekleşmiştir.

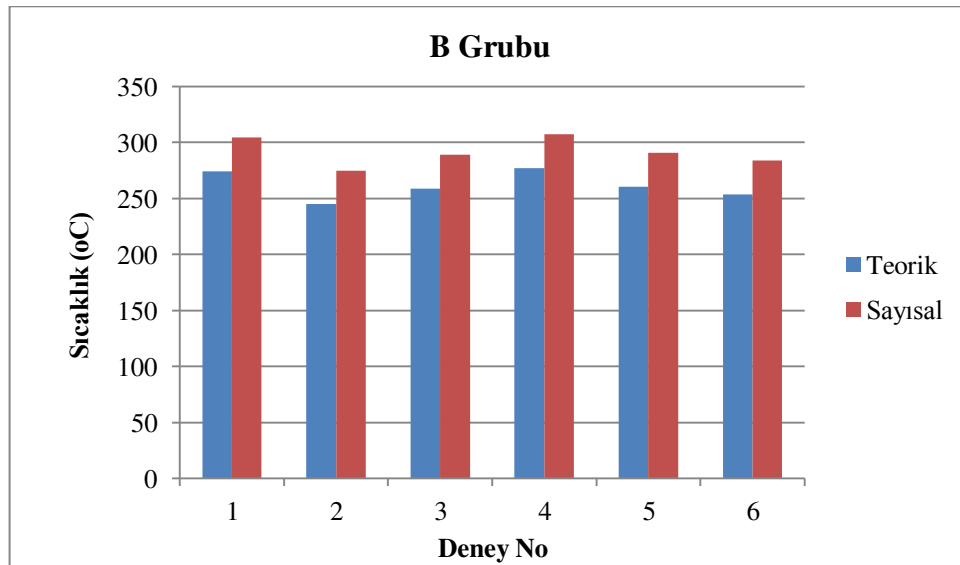
7. 4 Sayısal ve Deneysel Sıcaklıkların Karşılaştırılması

Aşağıdaki grafiklerde teorik ve sayısal sıcaklık değerleri aynı grafikte verilerek aradaki farkın rahatça görülebilmesi amaçlanmıştır.

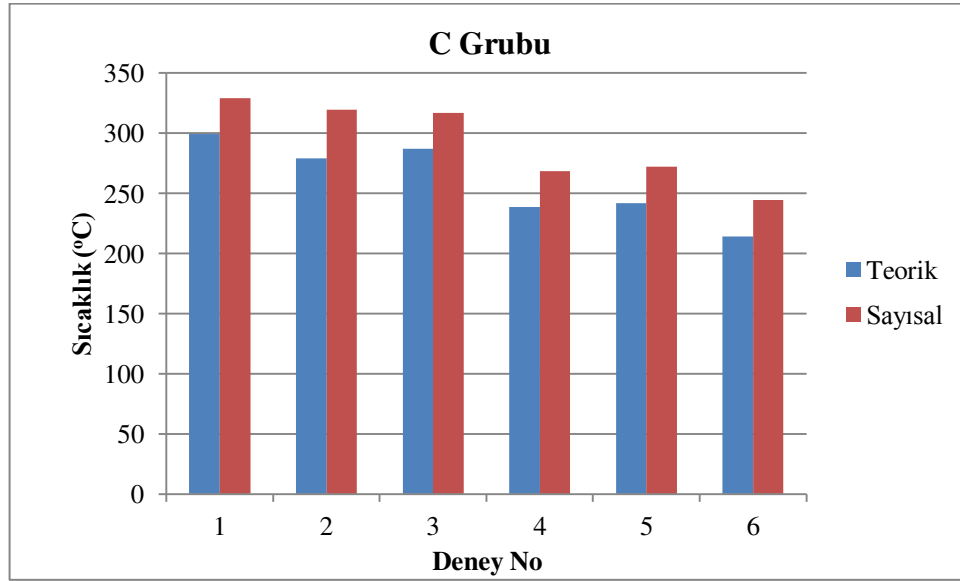


Şekil 7.19 A grubu deneylere ait deneysel ve sayısal sıcaklıklar

Yukarıdaki grafikten de görüldüğü gibi teorik maksimum sıcaklık A3 numunesinde 298,1 °C elde edilirken; sayısal olarak maksimum sıcaklık A6 numunesinde 380,5 °C olarak ölçüldü.



Şekil 7.20 B grubu deneylere ait deneysel ve sayısal sıcaklıklar



Şekil 7.20 C grubu deneylere ait deneysel ve sayısal sıcaklıklar

Yukarıdaki grafikten de görüldüğü gibi teorik maksimum sıcaklık C1 numunesinde 299,3 °C elde edilirken; sayısal olarak maksimum sıcaklık C1 numunesinde 329,3 °C olarak ölçüldü.

BÖLÜM SEKİZ

SONUÇLAR

Yapılan çalışmada 6061 ve 7075 Al- alaşımları sürtünme karıştırma kaynak yöntemi ile farklı kaynak parametreleri kullanılarak birleştirildi. Kaynak işleminde kullanılan kaynak parametrelerinin mekanik özelliklere etkisi incelenmiş ve elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmıştır:

- ✓ Devir sayısı ve bekleme süresi sabit kalıp, ilerleme hızı artırıldığında oluşan maksimum set sıcaklıklarında bir artış olmadığı görüldü. İlerleme hızı artırıldığında kaynağa dik yöndeki gerilmelerde de çok artış görülmemektedir. Ancak ilerleme hızı artırıldığında Z yönündeki yer değiştirmelerde artış görülmektedir. Z yönündeki yer değiştirme artışı parçanın çarpılmasını direk olarak etkilediğinden dolayı önem taşımaktadır.
- ✓ Devir sayısı ve bekleme süresi sabit kalıp, ilerleme hızı artırıldığında birim şekil değişiminin azaldığı görüldü. Genel olarak bakıldığında ise $y = x^2$ formunda bir değişim görüldü. Maksimum birim şekil değişimleri A grubu deneylerde (Al6061-Al6061) birleştirilmelerinde elde edildi.
- ✓ Yapılan çalışmalar sonucunda ilerleme hızının elastisite modülü üzerinde önemli bir etkisinin olmadığı açıkça anlaşılmıştır.
- ✓ Bekleme süresi ve ilerleme hızı sabit tutulup, devir sayısı artırıldığında maksimum set sıcaklıklarında artış görülmüştür. Devir sayısının etkili olduğu en önemli etken sıcaklığı artırmasıdır.
- ✓ Bekleme süresi ve ilerleme hızı sabit tutulup, devir sayısı artırıldığında kaynağa dik yöndeki gerilmelerin (X yönü) arttığı görüldü. Ancak; negatif bölgedeki gerilmelerin pozitif bölgedeki gerilmelere göre daha fazla artış gösterdiği görülmektedir. Bunun nedenini açıklayacak olursak; bizim parçamızda hem omuzun baskısından dolayı bir normal gerilme oluşmakta,

hem de sıcaklık değişiminden dolayı normal gerilme oluşmaktadır. Negatif bölgedeki değişim daha fazla olduğunda göre sıcaklık değişiminden dolayı oluşan gerilmeler omuz baskısından dolayı oluşan gerilmelere göre daha baskındır. Elde edilen en önemli sonuçlardan birisi budur.

- ✓ Bekleme süresi ve ilerleme hızı sabit tutulup, devir sayısı artırıldığında elastisite modülünde azalma görülmektedir. Duruma genel olarak bakıldığında 7. Bölümde de anlatıldığı ve gösterildiği üzere devir sayısı artırıldığında elastisite modülünde exponansiyel bir azalma görülmektedir. Buradan da çıkarılacak sonuç birim şekil değişimi gerilmeye göre daha fazla artış göstermektedir.
- ✓ Devir sayısı artırıldığında kaynak yüzeyi düzgün kaynaklar elde edilmesine rağmen elde edilen avantajlar peşinde dezavantajları getirmektedir. İyi kaynak yüzeyi, optimum gerilme ve yer değişimi sağlanırken; elastisite modülü düşük kaynaklı parçalar elde edilmiştir. Bu yöntem ile ısıl işlemsiz yüksek mekanik özelliklere sahip birleşme düşünülemez.
- ✓ Bekleme süresi ve ilerleme hızı sabit tutulup, devir sayısı artırıldığında sıcaklık arttığından dolayı Z yönündeki yer değişimi de artış göstermiştir.
- ✓ Devir sayısı ve ilerleme hızı sabit tutulup, bekleme süresi artırıldığında kaynağa dik yöndeki (X) gerilmelerde ve Z yönündeki yer değiştirmelerde bir değişiklik olmadığı görüldü. Bekleme süresinin sıcaklık değişimlerinde etkili olduğu yapılan çalışmalar sonucunda görüldü. Bekleme süresi artırıldığında maksimum set sıcaklıklarında artış görüldü. Ancak; sıcaklık artışlarında bekleme süresinin mi yoksa devir sayısının mı etkili olduğu sorulduğunda açıkça devir sayısının daha etkili olduğu söylenir.
- ✓ Yapılan çalışmalar sonucunda en düşük gerilme 1500 dev/ dak, 20 s, V=75 mm/ dak parametrelerinde; en düşük yer değişimi 1500 dev/ dak, 20 s, V=75 mm/ dak parametrelerinde; en yüksek sıcaklık ise 2000 dev/ dak, 60 s, V=150 mm/ dak parametrelerinde elde edilmiştir.

KAYNAKLAR

- Anık, S. (1960). *Alüminyum ve Alaşımlarının Kaynağı*. İTÜ Yayınları, İstanbul.
- Anık, S.,1996, Makine mühendisliği el kitabı üretim ve tasarım, Kaynak Teknolojisi, Cerit (Der.) TMMOB Makine Mühendisleri Odası, 2, 222s.
- Anık, S. Vural, M., (1993). *Elektron ışıını ile kaynak*, İ.T.Ü. Makine Fakültesi, s.107.
- Boz, M., Kurt, A.,(2003), *The influence of stirrer geometry on bonding and mechanical* properties in friction stir welding process, Materials & Design, 25, No: 4, 343-347
- Brooks, C.R., (1984). *Heat Treatment, Structure and Properties of Nonferrous Alloys*, ASM, Ohio, USA, 115-137.
- Büyükarıslan, S., 2006, *Sürtünme Karıştırma Kaynağı ile Birleştirilmiş Alüminyum Alaşımlarının Mikroyapı ve Mekanik Özelliklerinin Araştırılması*. F.Ü. Fen Bilimleri Ens., Yüksek Lisans Tezi.
- Çam, G.(2002). *Sürtünme karıştırma kaynağı ve uygulamaları*, PAÜ Mühendislik Fakültesi 9. Denizli Malzeme Sempozyumu Bildiriler Kitabı, 450-458.
- Çam, G., Yavuz, H.,(2001). *Yeni bir kaynak teknolojisi: Sürtünme karıştırma kaynağı*, *Endüstri ve Otomasyon*, No 51, 18-20.
- Çam, G.(2007). Sürtünme karıştırma kaynağı uygulamalarındaki son gelişmeler, Kaynak Teknolojisi VI. Ulusal Kongresi (9-10 Kasım), Ankara.
- Çam, G. (2007). Sürtünme karıştırma kaynağı uygulamalarındaki son gelişmeler, Mak. Tek., 120, 48-58.

Çam, G. (2001). *Al-Alaşımları için geliştirilen yeni kaynak yöntemleri*, TMMOB Makine Mühendisleri Odası, Kaynak Tek. III. Ulusal Kongresi, İstanbul, 267-277.

<http://www.aluminium.org/>

<http://aluminium.matter.org.uk/>

<http://www.industrialmotionsystems.com>

Kırtay, S., 1997, Etial-24 ve Etial-44 Alüminyum Alaşımlarına Yarı-Katı Halde Şekil Verilmesi, Mikroyapı ile Mekanik Özelliklerin İncelenmesi. İstanbul Üniv. Fen Bilimleri Ens. Yüksek Lisans Tezi.

Kurt, A., Boz, M., Özdemir, M., (2004). *Sürtünme Karıştırma Kaynağında Kaynak Hızının Birleşebilirliğe Etkisi*, Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der. Cilt 19, No 2, 191- 197

Mahoney, M., Mishra, R.S., Nelson, T., Flintoff, J., Islamgaliev, R., Hovansky, Y., Jata, K.V., (Eds.), 2001, *Friction Stir Welding and Processing*, TMS, Warrendale, PA, USA, p. 183.

Mert, S. ve Kaluç, E., (2003). *Sürtünme karıştırma kaynağında kullanılan takımlardaki gelişmeler*, TMMOB Makine Mühendisleri Odası Kaynak Teknolojisi IV. Ulusal Kongresi Bildiriler Kitabı, 103-115.

Mishra, R. S., Ma, Z. Y., 2005, *Friction stir welding and processing*, Mater. Sci. and Eng. R: Rep. 50, 1-78.

Oğuz, B. (1990). *Demir dışı Metallerin Kaynağı Metalurji- Uygulama*, Oerlikon Yayınları, İstanbul.

Orhan, N. (1996). *Difüzyon Kaynağı için Yeni Bir Model ve Duplex Alaşımlara Uygulanması*, F.Ü. Fen Bilimleri Ens., Doktora Tezi.

Oysu, M. (1996). *7075 Alüminyum Alaşımlarına Uygulanan MIG Kaynağının mekanik Özelliklere Etkisinin Araştırılması*. K.Ü. Fen Bilimleri Ens. Yüksek Lisans Tezi.

- Öksüz, C. (1996). *Yüksek Mukavemetli (2024,6061,7075) Alüminyum Alaşımlarının Jominy Yöntemi ile Su verme Duyarlılığı*. İ.T.Ü. Fen Bilimleri Ens., Yüksek Lisans Tezi.
- Özarpa, C. (2005). *Al 2024-0 ve Al 5754-H22 Alüminyum Alaşımlarının Sürtünme Karıştırma Kaynağı*, Sakarya Ün. Fen Bilimleri Ens. Doktora Tezi.
- Özdemir, N. (2002). *Tane Küçültülmüş Düşük Alaşımlı Yüksek Karbonlu Çeliklerin Sürtünme Kaynağı ile Birleştirilebilirliğinin Araştırılması*, F.Ü. Fen Bilimleri Ens., Doktora Tezi.
- Özdemir, N., Büyükarslan, S., Sarsılmaz, F., 2007, *Sürtünme Karıştırma Kaynak Yöntemi ile Birleştirilmiş AA1030 Alüminyum Alaşımında Karıştırıcı Uç Profili ilerleme Hızının Arayüzey Mikroyapı Değişimi Üzerine Etkisi*, Fırat Ün. Fen ve Müh. Bil. Dergisi, 19, (3), 407-415.
- Özdemir, N., Büyükarslan, S., Sarsılmaz, F., 2007 *Sürtünme Karıştırma Kaynak Yöntemi ile Birleştirilmiş AA1030 Alüminyum Alaşımında Karıştırıcı Uç Profili ve ilerleme Hızının Mekanik Davranışlar Üzerine Etkisi*, Fırat Ün. Fen ve Müh. Dergisi, 19, (4), 575-582.
- Özdemir, N., Taskın, M., 2004, *Sürtünme karıştırma kaynak yöntemi ile birleştirilen AA7075 alüminyum alaşımlarının mikroyapı ve mekanik özelliklerinin araştırılması*, 10.Denizli Malzeme Sempozyumu Bildiriler Kitabı, 966-971.
- Özdemir, M. (2003). *Sürtünme karıştırma kaynak yöntemi ile alüminyum alaşımlarının kaynaklanabilirliği*, , Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Ens. Yüksek Lisans Tezi.
- Saldır, R.,2002, *Alüminyum ve Alaşımlarının Kaynak Kabiliyeti*, Fen Bilimleri Ens., Yüksek Lisans Tezi.
- Tülbentçi, K. (1990). *Alüminyum ve Alaşımlarının Kaynağı*, Böhler Yayınları. İstanbul.
- Yıldırım, M.M. (1981). *Malzeme Bilgisi I*. F.Ü. Yayınları, Elazığ.s.104.
- Yıldırım, M.M. (2001). *Mühendislik Malzemeleri*. M.K.Ü. Yayınları, İskenderun , S 192.