

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ŞEKİL HAFIZALI METAL ESASLI MALZEMELERİN SÜRÜNME**  
**ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

Mak. Müh. Deniz SÖNMEZ  
05523103

**FBE Makine Mühendisliği Anabilim Dalı**  
**İmal Usulleri Programında Hazırlanan**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Tez Danışmanı:** Prof.Dr. Ayşegül AKDOĞAN EKER

İSTANBUL, 2010

# İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ.....	iii
KISALTMA LİSTESİ.....	iv
ŞEKİL LİSTESİ.....	v
ÇİZELGE LİSTESİ.....	vii
ÖNSÖZ .....	viii
ÖZET .....	ix
ABSTRACT.....	ix
1. GİRİŞ.....	1
2. ŞEKİL HAFIZALI ALAŞIMLAR.....	6
2.1 Nikel-Titanyum şekil hafızalı alaşımlar .....	8
2.1.1 NiTi Kristalografik karakteristikleri.....	10
2.2 Şekil hafızalı alaşımların endüstriyel uygulamaları .....	12
3. SÜRÜNME .....	16
3.1 Sürünme teorisi.....	20
3.1.1 Sürünme verilerinin sunumu .....	21
3.1.1.1 Sürünme davranışının önceden belirlenmesinin teorisi.....	24
3.1.1.2 Tek eksenli gerilme altında sürünme.....	25
3.1.1.3 Çok eksenli gerilme altında sürünme .....	28
3.2 Sürünme deformasyon mekanizması.....	31
3.2.1 Dislokasyon kayması .....	32
3.2.2 Dislokasyon sürünmesi.....	32
3.2.3 Difüzyon sürünmesi .....	34
3.2.4 Tane sınırı kayması .....	35
3.3 Kararlı sürünme için aktivasyon enerjisi.....	37
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR .....	38
4.1 Malzeme ve metot .....	38
4.2 Sürünme deneyi yapılışı .....	46

5.	DENEYSEL SONUÇLAR.....	48
5.1	Sıcaklık ve gerilmeye bağlı deney sonuçları .....	48
5.2	Gerilme üst sabiti ve aktivasyon enerjisi hesabı .....	54
5.3	Larson-Miller eğrisinin çıkarılması.....	55
5.4	SEM analizi ile sürünme kırılma oluşumunun incelenmesi.....	57
5.5	Tartışma ve öneriler.....	63
	KAYNAKLAR.....	66
	ÖZGEÇMİŞ .....	69

## SİMGE LİSTESİ

$Q$	Aktivasyon enerjisi
$n$	Gerilme üst sabiti
$\sigma$	Gerilme
$\delta$	Gerinim
$\dot{\delta}$	Gerinme hızı
$T$	Sıcaklık



## **KISALTMA LİSTESİ**

ŞHA	Şekil hafızalı alışım
SEM	Taramalı Şekil hafızalı alışım
ŞHE	Şekil hafıza etkisi

## ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1	Ni-Ti Alaşımın Faz Denge Diyagramı .....	9
Şekil 2.2	NiTi'un kafes yapıları: (a) B2 kübik ve ideal hmt(hacim merkezli tetragonal) kafesi; (b) orthorhombic kesme ve itmeye müsait B19; (c) kesme ve itmeli monoclinic B19' martenziti.....	11
Şekil 2.3	Hidrolik boru bağlama bileziği olarak NiTi'un kullanılması.....	12
Şekil 2.4	Şekil Hafızalı Alaşım Yay ve Öngerilmiş Yay Kullanılarak Geliştirilmiş Karıştırma Valfi.(a) İç yapı görülmektedir. Makaranın pozisyonu ve çıkış suyunun sıcaklığı sıcaklık kontrolörü döndürülerek ayarlanır. Kontrolörün dönüşü şekil hafızalı alaşımın boyutunu değiştirmektedir. (b) Karıştırma valfinde kullanılan şekil hafızalı elemanın sıcaklık ve sapma .....	13
Şekil 2.5	Ortopedik zımba telleri.....	14
Şekil 2.6	Şekil hafızalı kemik plakaları: a) Bir insan çenesinde tutturulmuş plaka b) Plaka ve vida detayı.....	14
Şekil 2.7	a) Diş düzeltme telleri. b) Süperelastik anten.....	14
Şekil 2.8	Medikal uygulamalarda kullanılan kateterler için süperelastik kılavuz tel. (a) Beyne ait bir uygulama; (b) Kılavuz telin görünümü.....	14
Şekil 2.9	SMA özellikli damar tıkanıklığında kullanılan bir stent.....	15
Şekil 2.10	NiTi'dan yapılmış bir gözlük çerçevesi ve süper elastiklik özelliği .....	15
Şekil 2.11	Bir boyama tabancasında, süperelastik NiTi alaşımı elektrot teli .....	15
Şekil 3.1	Sürünme eğrisi.....	17
Şekil 3.2	Sürünme deney sonuçları .....	18
Şekil 3.3	Gerilme-kopma deney eğrileri.....	19
Şekil 3.4	Sürünme deneyinin kısaltılmış metotla gösterimi .....	22
Şekil 3.5	Sürünme deneyinin hızlandırılmış mekanik metotla gösterimi.....	23
Şekil 3.6	Sürünme deneyinin hızlandırılmış ısıl metotla gösterimi.....	23
Şekil 3.7	Larson-Miller eğrisi.....	24
Şekil 3.8	Üç malzemenin sürünme eğrileri için log-log(logaritmik) koordinatları .....	27
Şekil 3.9	Dislokasyon sürünmesi.....	33
Şekil 3.10	Difüzyon(yayınma) sürünmesi .....	35
Şekil 3.11	Tane sınırı kayması .....	35
Şekil 3.12	Üçlü noktadaki bir bükülme şekillenmesi .....	36

Şekil 4.1	Fırının detay görünüşü.....	38
Şekil 4.2	a)Prototip olarak üretilen değişik fırın düzenekleri b)Fırın düzeneği .....	39
Şekil 4.3	Kontrol panosu .....	39
Şekil 4.4	Deney düzeneğinde kullanılan fırın ve kontrol panosu.....	40
Şekil 4.5	Sürünme deneyi algoritması .....	41
Şekil 4.6	Sürünme deneyinde kullanılan numune .....	42
Şekil 4.7	Hassas terazi .....	42
Şekil 4.8	Sıcaklık kalibrasyon cihazı.....	43
Şekil 4.9	Deformasyon verisi aktarma cihazı a)ESAM ve b)Yazılım arayüzü .....	44
Şekil 4.10	İpli mesafe sensörü .....	44
Şekil 4.11	Çekme - basma kuvvet ölçer .....	45
Şekil 4.12	Sürünme deney düzeneği.....	46
Şekil 4.13	Deney numunesinin tam merkezine yerleştirilmiş termo-eleman.....	47
Şekil 5.1	11.4N'luk çekme kuvveti altında kopmuş numune görüntüleri .....	48
Şekil 5.2	Sürünme kopmasına maruz kalmış numune görüntüleri .....	49
Şekil 5.3	16.8N'luk sabit yük altındaki kopmuş numune görüntüleri.....	49
Şekil 5.4	11.4N'luk sabit çekme kuvveti için sürünme eğrileri .....	50
Şekil 5.5	14.3N'luk sabit çekme kuvveti için sürünme eğrileri .....	50
Şekil 5.6	16.8N'luk sabit çekme kuvveti için sürünme eğrileri .....	51
Şekil 5.7	Kuvvet(N) ve sıcaklığa bağlı sürünme ömrü .....	52
Şekil 5.8	Gerilmenin bir fonksiyonu olarak ikincil sürünme eğrileri.....	53
Şekil 5.9	Sıcaklığın bir fonksiyonu olarak ikincil sürünme eğrileri.....	53
Şekil 5.10	Şekil hafızalı NiTi için Larson-Miller eğrisi .....	56
Şekil 5.11	11.4 N' luk sabit çekme kuvveti ve 650°C sıcaklık için oluşturulan Larson-Miller eğrisi .....	57
Şekil 5.12	11.4 N' luk sabit çekme kuvveti altında farklı sıcaklık değerleri için SEM görüntüleri .....	59
Şekil 5.13	14.3 N' luk sabit çekme kuvveti altında farklı sıcaklık değerleri için SEM görüntüleri .....	59
Şekil 5.14	14.3 N' luk sabit çekme kuvveti altında farklı sıcaklık değerleri için SEM görüntüleri .....	59

## ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 1.1 DS DZ17G (Wt Pct) süper alaşımının kimyasal bileşimi .....	2
Çizelge 1.2 Önceki deneylerde kullanılmış alaşımlara ait özet sunum.....	3
Çizelge 1.3 Önceki deneylerde kullanılmış alaşımlara ait sürünme verileri.....	4
Çizelge 1.4 Deneyde kullanılan süper alaşımların kimyasal % leri .....	4
Çizelge 2.1 Şekil Hafızalı Alaşımlara Ait Bazı Özellikler.....	8
Çizelge 2.2 İkili Ni-Ti Şekil Hafızalı Alaşımların Özellikleri .....	10
Çizelge 4.1 Sabit yük değerleri .....	42
Çizelge 4.2 Sıcaklık ve sabit çekme kuvveti <sup>3</sup> değerleri.....	46
Çizelge 5.1 Sıcaklık ve gerilmeye bağlı ikincil sürünme değerleri.....	52
Çizelge 5.2 NiTi sürünme değerleri .....	55
Çizelge 5.3 NiTi üzerine yapılan sürünme çalışmalarının karşılaştırılması.....	63

## ÖNSÖZ

Bu çalışmada şekil hafızalı alaşımlar arasında yaygın kullanım alanına sahip NiTi alaşımının, daha önce üzerinde pek az araştırmanın yapıldığı sürünme özellikleri incelenmiştir. Farklı sıcaklık ve gerilme değerlerinde sürünme deneyi uygulanarak çıkan sonuçlar literatürdeki çalışmalarla karşılaştırılmış, Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) analizleri ile NiTi alaşımının sürünme öncesi ve sonrası özellikleri ortaya çıkarılmıştır.

NiTi şekil hafızalı alaşımların sürünme özellikleri üzerine yapmış olduğum bu çalışmada bilgi ve tecrübesiyle tüm zorlukları aşmama yardımcı olan çok değerli danışman hocam, Prof. Dr. Ayşegül AKDOĞAN EKER'e teşekkür ederim.

Sürünme deney düzeneğine ait fırın imalatında benimle birlikte yoğun emek sarfeden elektrik mühendisi değerli arkadaşım Çetin KAYGUN'na, maddi ve manevi desteklerinden dolayı Panel Elektro A.Ş firmasına, deneyler boyunca verdikleri teknik destekten dolayı Mercedes Benz Türk çalışanları Kıvanç Agur ve Fatih Öncel'e ve bu süreçte sabırlarından ve desteklerinden dolayı aileme teşekkür ederim.

## ÖZET

Şekil hafızalı alaşımlar, akıllı malzemelerin bir alt ürün grubu olup akıllı malzemeler içinde endüstriyel ürün olarak yaygın kullanım alanına sahiptir.

NiTi şekil hafızalı alaşımlar, düşük sıcaklıktaki martenzit fazında deformasyona maruz kaldıklarında, daha önceden tanımlanmış orijinal şekillerini, yüksek sıcaklıktaki östenit fazında geri kazanabilen malzemelerdir. Tıp ve mühendislik uygulamalarında kullanılan şekil hafızalı veya süperelastik NiTi alaşımları mamül ve yarı mamül haline gelinceye kadar ekstrüzyon, dövme ve sıcak haddeleme gibi birçok termomekanik işlem sürecinden geçerler. NiTi alaşımlarının üretim proseslerinde maruz kaldıkları sıcaklıklarda ki davranışları araştırmacıların ilgisini çekmiştir.

Çalışmada NiTi şekil hafızalı alaşımının 575-650°C sıcaklık ve 11.4-16.8N çekme kuvvetleri arasındaki sürünme özellikleri incelenmiş ve elde edilen sonuçlar alaşıma ait gerilme sabiti ile aktivasyon enerjisi hesaplanarak sonuçlar önceki çalışmalara da atıfta bulunularak değerlendirilmiştir. Oluşan yapısal değişimler ise SEM analizleri ile irdelenmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Sürünme, NiTi, şekil hafızalı alaşım, şekil hafıza etkisi, SEM.

## ABSTRACT

Shape memory alloys are sub-product groups of smart materials and also they have extensive usage as industrial products.

NiTi shape memory alloys, which were exposed deformation at low temperature phase martensite, regain their previously defined original shapes in high temperature austenite phase. As the medical and engineering applications for using shape-memory or superelastic NiTi alloys, they pass lots of thermomechanical processing procedures (e.g. extrusion, forging, hot-rolling) to shape semi-finished and finished product. Behaviors of NiTi alloys which are exposed to high temperatures in production processes, have attracted the attention of researchers.

In this study the creep properties of NiTi shape memory alloy at temperature between 575-650°C and tensile force between 11.4-16.8 N are examined and the stress constant and activation energy is calculated and then evaluated in reference to the previous studies. The occurred structural changes are found out by SEM analyze.

**Keywords:** Creep, NiTi, shape memory alloy, shape memory effect, SEM.

## 1. GİRİŞ

Şekil hafızalı alaşımlar, şekil hafıza etkisi ve süperelastik gibi üstün özellikleri ile önemli bir keşif malzemesi olarak ilk kez 1932 yılında AuCd alaşımında saptanarak bilim literatüründe yerini almışlardır. AuCd alaşımından sonrada CuZn ve alaşımlarında şekil hafıza etkisinin varlığı saptanmıştır. NiTi alaşımının keşfi, şekil hafızalı alaşımlar üzerindeki araştırmalara yeni bir boyut kazandırarak hızla kendilerine olan ilginin artmasını sağlamıştır.

Şekil hafızalı NiTi alaşımlarının endüstriyel alanlarda kullanımlarının artmasıyla, döküm ile elde edilmiş ingot halindeki NiTi'un yarı mamül ve mamül(teller, borular, çubuklar) olarak şekillendirilmesinde kullanılan termomekanik prosesler(ekstrüzyon, haddeleme, sıcak haddeleme) üzerinde araştırma yapılması ihtiyacı duyulmuştur. Ayrıca NiTi alaşımları, yeniden alaşımlandırılmış tozların yüksek sıcaklıkta yoğunlaştırılması ve NiTi köpüklerinin yüksek sıcaklıktaki argon balonlarına yakalanıp büyümesiyle üretilmesi NiTi'un yüksek sıcaklıktaki temel mekanik özelliklerine ait verilerin bilinmesi gerektiğini göstermiştir(Oppenheimer vd.2007).

Liu vd.(1998) çalışmalarında şekil hafızalı alaşımların hafıza mekanizması, süperelastiklik ve yüksek nem kapasiteleri gibi üç önemli özelliği olduğundan bahsetmiş ancak ilk iki özelliğinin bir çok uygulamada yer bulmasına karşın yüksek nem kapasitelerinin uzun süre yeterli dikkati çekemediğini belirtmişlerdir. Ancak son zamanlarda Liu vd.'ne göre, sahip oldukları yüksek nem kapasitesi, güçlü bağlantı elemanları olmaları, kolay şekil verilebilirliği ve çok iyi korozyon dayanımı gibi özellikleri nedeniyle inşaat mühendisliği uygulamalarında kendilerine yer bulabilmişlerdir. Bu çalışmadan önce yapılan araştırmalar daha çok şekil hafızalı alaşımların düşük gerinim oranları üzerine odaklanmıştır. Bununla birlikte Liu vd. araştırmalarında basma gerilmesi altında, çok yüksek gerinme oranındaki martenzitik şekil hafızalı NiTi alaşımının mekanik davranışını incelemiş ve daha önce yapılmış çalışmalarda ki düşük gerinme oranlarında ki deformasyon davranışları ile karşılaştırmışlardır.

Otsuka ve Ren(1999) on yıl içinde, süperelastik ve şekil hafıza etkisi gösteren şekil hafızalı alaşımlar ve martenzitik dönüşümler üzerine yapılmış çalışmalarını incelemiş ve şekil hafızalı alaşımlarda ki güncel gelişmeleri tekrar gözden geçirmişlerdir. Bu gelişmeler kapsamında, şekil hafızalı alaşımların güncel uygulamalarına dair örnekler vermişlerdir.

Dilibal vd.(2003) şekil hafızalı alaşımların teknolojik önemi, şekil hafıza etkisi ve süperelastik özellikleri ile bu özelliklerin sıcaklık ve gerilmeye bağlı olarak kristal yapısının

martenzit ve ostenit fazlarına dönüşümünden bahsetmişler ve Ni-Ti şekil hafızalı alaşımların özellikleri ile kullanım alanlarını incelemişlerdir.

J.T. GUO vd.(2001) yönsel bakımdan katılaştırılmış (DS) nikel esaslı DZ17G süper-alaşımın sürünme kopması davranışını, yüksek sıcaklıkta (650-1050°C) 60 ile 950 MPa gibi geniş bir gerilme aralığında incelemişlerdir. Çalışmada, sabit yük altında ayrıntılı sürünme deformasyon ve kırılma mekanizmaları araştırılmıştır. Buna göre, bütün sürünme eğrilerinin, kısa bir birincil sürünme aşaması gösterdiğini, geleneksel dökme alaşımlarına kıyasla DS DZ17G süper-alaşımının daha sünek olmasına yol açan baskın bir hızlandırılmış sürünme aşamasının ortaya çıktığını belirtmişlerdir. Sürünme parametrelerinden ve TEM gözlemlerinden elde edilen hareketle baskın sürünme deformasyon mekanizmasının, yüksek gerilmeli bölgede matris dislokasyonu tarafından kesilen gama temel parçacıklarından düşük gerilme bölgesinde dislokasyon tırmanış prosesine doğru bir değişime sahip olduğunu ileri sürülmüştür. DS DZ17G süper-alaşımının kırılma modunun trans-granüler bir yapıda olduğu ve bunun da hem yüzeyde hem de dahili mikro-yapı süreksizliklerinde devreye sokulan sürünme çatlaklarının yayılma hızı ile kontrol edildiği ortaya koyulmuştur.

Çizelge 1.1 DS DZ17G (Wt Pct) süper alaşımının kimyasal bileşimi

C	Cr	Co	Mo	V	B	Al	Ti	Fe	Si	Ni
0.17	8.96	9.72	3.08	0.68	0.015	5.38	4.79	0.23	0.04	geri kalanı

C. LExcellent vd. (2005) çalışmalarında 6mm çapında ve 35 mm uzunluğunda ki dört adet şekil hafızalı eş atomlu NiTi alaşımı numunesinin yüksek sıcaklık sürünmesini üç farklı çekme gerilmesi ve sıcaklıkta ölçmüşlerdir.  $\sigma = 10,25,35$  MPa gerilmeler seviyesinde ve 597°C ile 897°C arasındaki sıcaklıklar uygulanmıştır. Geçerli difüzyon katsayısının difüzyon enerjisi  $D_c$ (Herring-Nabarro sürünme büyüklüğü ile tanımlanan)  $Q_c = 226 \text{ kJmole}^{-1}$  alınmıştır. Bu değerle bir karşılaştırma yapıp Ni izleyici difüzyonun ( $155 \text{ kJmol}^{-1}$ ) Ti'dan daha yavaş bir bileşen olarak yüksek difüzyon aktivasyon enerjisi ile  $Q_c$ 'ye çok yakın olduğunu göstermişlerdir.

Scott M. Oppenheimer vd. (2007) değişik sıcaklık ve gerilme değerlerinde B2-NiTi alaşımının sürünme davranışı üzerine çalışmışlardır. Gerilme üs sabiti ( $n=2.7$ ) ve aktivasyon enerjisinin( $Q=155 \text{ kJ mol}^{-1}$ ), yüksek gerilme ve düşük sıcaklık üzerine şekillenmiş literatürde



ki NiTi sürünme çalışmaları ile karşılaştırılmasını yapmışlardır. Çıkan sonuçları, çalışmalar arasındaki farkların karşılaştırılmasında kullanmışlardır. Çalışmayla ilgili veriler aşağıda kısaca açıklanıp, diğer araştırmalara ait veriler Çizelge 1.2 ve Çizelge 1.3’de verilmiştir;

- Araştırma 950-1100 °C arasındaki yüksek sıcaklıklarda ve 3-11 MPa düşük gerilmelerde ki sürünme verilerinin belirlenmesi amacıyla yapılmıştır.
- NiTi çubuk(50.8 %Ni), 12.7 mm çap ve 25.4 mm silindirik numuneler halinde kesilmiş ve uçları birbirine paralel olarak düzleştirilmiştir.
- Her bir numune 950,1000,1050,1100° C DE 10°C dak<sup>-1</sup> oranında bir saat için tavlansmıştır.
- Numune sabit gerinme oranlarına ulaşana kadar sabit bir gerilmeye tabi tutulmuştur. Bu prosedür toplamda gerinmenin %12 ye ulaşmasına kadar gerilme değerlerinde artış sağlayarak tekrar edilmiştir.
- Tane büyüklüğü 48 ± 5 µm kabul edilen NiTi ve 12 h boyunca 1050°C de sürünmeye maruz kalan numune için tane büyüklüğü 140 ± 13 µm bulunmuştur.

Çizelge 1.2 Önceki deneylerde kullanılmış alışımlara ait özet sunum

Araştırmacı	Yıl	Numune		Üretim şekli
		çapı(mm)	Ni içeriği (%)	
Mukherjee	1998	6.35	50.6	Sıcak presle şekil verilmiş, 1000 °C’de tavlansmış
Kato	1999	0.9	49.5, 50, 50.5	Çekme tel, 900 °C’de tavlansmış
Eggeler	2002	13	50.7	Tel çubuklar, 850 °C’de solüsyon hale getirilmiş, sürünme boyunca çökelme ve tane büyümesi olmuştur
Kobus	2002	-	50.7	500–560 ° C’de tavlansmış
Lexcellent	2005	6	50.0	Sıcak çekme
Oppenheimer	2007	12.7	50.8	950–1100 ° C’de tavlansmış

Çizelge 1.3 Önceki deneylerde kullanılmış alaşımlara ait sürünme verileri

Araştırmacı	Sıcaklık(°C)	Gerinme oranı(s <sup>-1</sup> )	Gerilme(Mpa)	n	Q(kJ mol <sup>-1</sup> )
Mukherjee	700-1000	6 x 10 <sup>-5</sup> -6 x 10 <sup>-3</sup>	6-178	3±0.2	251±13
Kato	628-888	1 x 10 <sup>-5</sup> -2 x 10 <sup>-2</sup>	11-81	1 5.9(2.5±0.2 <sup>a</sup> )	230-253
Eggeler	470-530	2 x 10 <sup>-9</sup> -8 x 10 <sup>-6</sup>	90-150	2	334
Kobus	500-560	2 x 10 <sup>-7</sup> -3 x 10 <sup>-5</sup>	120-180	5	421
Lexcellent	597-897	3 x 10 <sup>-3</sup> -4 x 10 <sup>-2</sup>	10-35	3	222±30
Oppenheimer	950-1100	1 x 10 <sup>-6</sup> -1 x 10 <sup>-5</sup>	4.7-11	2.5±0.2	155±14

Yu Xingfu vd.(2008) çalışmalarında sürünme sırasında tekil kristal nikel temelli süper-alaşımların, sürünme davranışları ve etki faktörlerini, iç sürtünme gerilmelerinin ölçülmesi ve sürünme eğrisi ile mikro-yapı gözlemi yoluyla ele almışlardır. Çalışma sonucunda elde edilen verilerden, sabit hal sürünmesi sırasında dislokasyon hareketinin iç sürtünme gerilmesinin ateşe dayanıklı elementlerin artışı ve Ta konsantrasyonu ile geliştirildiğini ortaya koymuşlardır. Ta elementi, yükseltilmiş sıcaklık sürünmesi sırasında  $\gamma'$  fazının hacim fraksiyonunun stabilize edilmesinde Ti elementinden daha iyi bir etkide bulunduğunu ve solüsyon güçlendirmede W elementinin Mo elementinden daha iyi bir etki gösterdiğini belirlemişlerdir. Süper-alaşımının iç sürtünme gerilmesi açıkça W ve Ta elementlerinin konsantrasyonu ile geliştirilebilir olduğunu gösterilmişlerdir. İnce  $\gamma'$  fazının önemli bir miktarı, değiştirme hızını düşürmek için dislokasyonların hareketine etkili bir şekilde engel olabilecek olan sürünme sırasında alaşımın  $\gamma'$  matris kanallarında çökeltmiştir. Sürünmenin daha sonraki aşamasında alaşım 1'in deformasyon özelliği (1 1 0), radyelenmiş  $\gamma'$  fazında keserek yayılan vida ve kenarlı süper dislokasyonlar olduğu, öte yandan alaşım 4'ün deformasyon özellikleri (1 1 0)  $\gamma'$  fazında kısmi olarak aktive edilen dislokasyonlar (1/2)(1 1 0) olduğu gösterilmiştir. Alaşımların farklı sürünme yaşam sürelerinin ortaya çıkmasının nedenlerinden birisi sürünme sırasında meydana gelen farklı deformasyon mekanizmaları olduğunu belirtmişlerdir.

Çizelge 1.4 Deneyde kullanılan süper alaşımların kimyasal % bileşimleri

	Al	Ti	Ta	Cr	Mo	W	Co	Ni
Alaşım 1	6.0	-	7.0	6.5	7.0	4.0	-	geri kalanı
Alaşım 2	3.9	3.4	-	16.0	-	6.0	8.5	geri kalanı
Alaşım 3	4.0	1.0	4.5	7.0	2.5	9.0	5.5	geri kalanı
Alaşım 4	6.0	-	6.7	6.5	8.5	1.0	-	geri kalanı

Oberson ve Ankem (2009) sıkı düzen hekzagonal kafes yapısına sahip  $\alpha$ -Ti-1.6% Vanadium numunesinin sürünme deformasyon davranışı düşük sıcaklıklar için incelemiştir. Sürünme deneyini oda sıcaklığıyla 205°C arasında akma gerilmesinin 95% değerinde ki bir gerilmeye uygulamışlardır. Sürünme gerinme oranının sıcaklıkla doğru orantılı olarak arttığını belirlemiş, SEM ve TEM analizi ile kayma ve ikizlenme büyümesini ortaya çıkarmışlardır. Alaşıma ait aktivasyon enerjisini hesaplamış ve gerinme oranının artmasıyla büyüdüğünü oraya koymuşlardır. Düşük gerinmede sürünme aktivasyon enerjisinin daha önceden kayma için hesaplanmış aktivasyon enerjisine çok yakın olduğunu saptamışlardır. Yüksek gerinmede hesaplanan aktivasyon enerjisi kayma ve ikizlenmenin deformasyon mekanizmasında ne kadar önemli olduğunu göstermişlerdir. Yüksek gerinmelerde ki ikizlenme görünümü, dislokasyon zincirlemesi ile ikiz çekirdeklenmesi için oluşturulmuş bir model ile açıklanmıştır.

Çalışmada NiTi esaslı şekil hafızalı alaşımların yarı mamül ve mamül(teller, borular, çubuklar) haline getirtilmeleri sürecinde uygulanan ekstrüzyon, haddeleme, sıcak haddeleme gibi termomekanik proseslerdeki davranışlarının irdelenmesi ve mekanik özelliklerinin araştırılması amacıyla, 575-650°C sıcaklık ve 11.4-16.8 N çekme kuvvetleri aralığında NiTi esaslı şekil hafızalı alaşımların sürünme özellikleri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar literatürde ki çalışmalarla karşılaştırılmış ve SEM analizleri yapılarak malzeme yapısındaki değişiklikler incelenmiştir.

## 2. ŞEKİL HAFIZALI ALAŞIMLAR

Şekil hafızalı alaşımlar, akıllı malzemelerin bir alt ürün grubu olup, akıllı malzemeler içinde endüstriyel ürün olarak yaygın kullanım alanına sahiptir.

Akıllı malzemeler, şekil hafızalı malzemeler dışında, süperelastik şekil hafızalı malzemeler, akıllı kompozitler, pizoelektrik malzemeler, termopiezoelektrik malzemeler, elektrostriktive seramikler, piezoseramikler, magnetostriktive malzemeler, polikristalimsi ferroelektirik seramikler, nitronal, elektrolojikal akıcılar ve ters çevrilebilir jelleri içerir. Fakat akıllı malzemelerin yalnızca dört tipi ticari olarak kullanılmaktadır. Bunlar pizoelektrik, elektrostriktive, magnetostriktive ve şekil hafızalı malzemelerdir. Diğer tiplerin bir çoğu yalnızca araştırma laboratuvarlarında bulunabilirler(Kurt, vd.2002)

Şekil hafızalı alaşımların kullanıldığı makinelerde en önemli özelliklerinden biri olan enerji tasarrufu diğer malzemelerin kullanıldığı makineler ile kıyaslandığında çok daha fazla önem kazanabilir, çünkü hareket vericiler olarak kullanımda birçok yerde elektrik enerjisi kullanmadan sadece ortam sıcaklığından istifade ederek mekanizmaları hareket ettirmek mümkündür. Akıllı malzemeleri kompozit yapılar şeklinde yaparak, örneğin beton bir köprü içine hissedici veya hareket verici olarak kullanarak, bu köprülerin bünyesinde oluşacak çatlakların veya korozyonun erkenden tespit edilmesi mümkün olabilir. Ticari amaçlı, şekil hafıza özelliği gösteren alaşım sayısı çok olmasına rağmen, bunlardan bazıları şekil değişiminin geri dönüşü sırasında oldukça büyük gerilmeler oluştururlar. Bu grup alaşımlar içinde en önde gelenleri nikel-titanyum alaşımları ve CuZnAl ve CuAlNi gibi bakır esaslı alaşımlardır. Şekil hafızalı alaşımların ilk keşfi Chang ve Read'in 1932'de bulduğu Au-Cd alaşımı ile başlar, daha sonraları 1938 de bu özellik Cu-Zn alaşımlarında gözlenir. En son bilinen ve yaygın kullanılan alaşım ise 1963'de bir tesadüf sonucu bulunan Ni-Ti alaşımıdır (BAKSAN ve GÜRLER, 2006).

Şekil hafızalı alaşım terimi, uygun ısı ve mekaniksel prosedürlere maruz kaldığında önceden tanımlı şekil veya boyutuna geri dönebilme yeteneği gösteren metalik malzeme grupları için kullanılır. Şekil hafızalı alaşımlar kararlı iki faza sahiptir. Bu fazlar ostenit olarak isimlendirilen yüksek sıcaklık fazı ve martenzit olarak isimlendirilen düşük sıcaklık fazıdır. Malzeme biliminde uygun bir ısı prosedür ile gerçek şekline veya boyutuna geri dönebilme yeteneğine sahip metalik malzemeler, şekil hafızalı alaşımlar olarak isimlendirilir. Şekil hafızalı alaşımlar ısı değişimlere duyarlı fonksiyonel malzemelerdir. Temel karakteristikleri, kritik dönüşüm sıcaklığının üzerinde ve altında iki farklı şekil veya kristal yapısına sahip

olmalarıdır. Nispeten düşük sıcaklıklarda deforme edilebilen bu malzemeler, daha yüksek sıcaklıklarda deformasyon öncesi şekillerine dönebilmektedirler. Bu malzemeler sadece ısıtma halinde "tek yönlü şekil hafızaya sahip malzemeler" olarak tanımlanırken, yeniden soğutma halinde ise "iki yönlü şekil hafızalı malzemeler" olarak tanımlanmaktadır. Şekil hafızalı alaşımların çoğu termoelastik martenzitik yapı sergileyen malzemelerdir. Martenzitik yapılı şekil hafızalı alaşım, dönüşüm sıcaklığının altında ikizlenme ve kayma mekanizmaları ile deforme edilebilir. Ana faza dönüşüm için ısıtma uygulandığı zaman ikizlenmiş olan yapı eski haline döner, dolayısıyla deformasyon yok edilebilmektedir(AKDOĞAN, 2002).

Ni-Ti ve diğer Cu-Zn-Al ve Cu-Al-Ni alaşımları gibi Cu-bazlı şekil hatırlamalı alaşımları, ticari şekil hatırlama uygulamaları için kullanışlıdır. Genellikle Ni-Ti alaşımları büyük korozyon direnci sergiler, fakat Ni-Ti alaşımlarının üretimi pahalıdır. Birçok uygulamada Cu-bazlı alaşımları hazırlamak Ni-Ti alaşımlarına göre daha ekonomiktir. İlk zamanlarda üretilen Cu-bazlı alaşımların kaba taneli olmaları ve taneler arası çatlaklardan dolayı kullanımları zordu. Daha sonraları yeterli mekanik özelliklere sahip ince taneli uygun şekil hatırlama davranışları gösteren Cu- bazlı alaşımlar üretildi. (BALO ve CEYLAN, 2006)

Cu-Al-Ni şekil hafızalı alaşımlar, şekil hafıza özellikleri, göreceli olarak kolay üretim prosesleri ve ucuzlayan fiyatlarıyla bir çok uygulama alanı bulmuşlardır. Yinede, gevrek kolay kırılabilen ve mekaniksel özellikleri geliştirilmesi gereken malzemelerdir. Cu-Al-Ni alaşımlarının bu gelişimi sağlayabilmeleri üretimleri sonucu oluşan tane büyüklüğü ve yüksek sertlik derecesiyle yakından ilgilidir(Rodriguez vd., 2000).

Çizelge 2.1 Şekil Hafızalı Alaşımlara Ait Bazı Özellikler

Alaşım	Kimyasal bileşim	Dönüşüm sıcaklık aralığı $M_s$ (°C)	Yaklaşık dönüşüm histerizisi (°C)
Ag-Cd	44-49 %Cd	-190~-50	15
Au-Cd	46.5-50 %Cd	30~100	15
Cu-Al-Ni	14-14.5 %Al	-140~100	35
	3-4.5 %Ni		
Cu-Sn	yaklaşık 15 %Sn	-120~30	
Cu-Zn	38.5-41.5 %Zn	-180~-10	10
Cu-Zn-X(X= Si,Sn,Al)	az %X	-180~200	10
In-Ti	18-23 %Ti	60~100	4
Ni-Al	36-38 %Al	-180~100	10
Ni-Ti	49-51 %Ni	-50~110	30
Fe-Pt	yaklaşık 25 %Pt	yak.-130	4
Mn-Cu	5-35 %Cu	-250~180	25
Fe-Mn-Si	32 %Mn, 6 %Si	-200~150	100

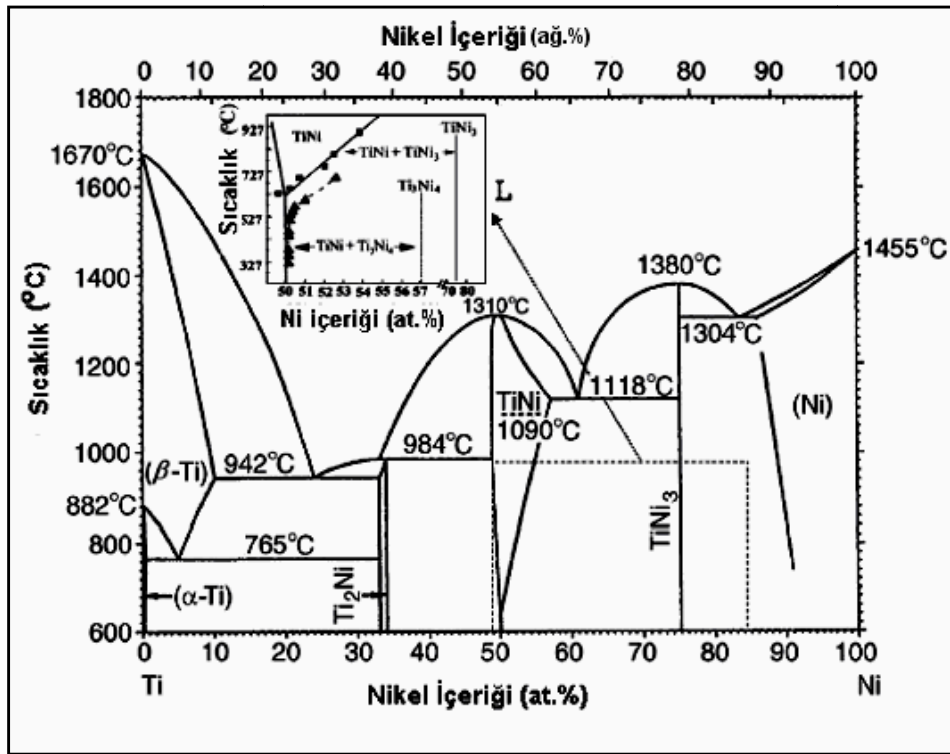
## 2.1. Nikel-Titanyum şekil hafızalı alaşımlar

Şekil hafızalı alaşımlar şekil hafıza ve süperelastik özellikleri sebebiyle yeni nesil malzemeler arasında sayılmaktadır. 50 yıl kadar önce şekil hafıza etkisi Au-Cd alaşımında ortaya çıkarıldıktan sonra, çok sayıda alaşım sisteminin şekil hafıza davranışı gösterdiği tespit edilmiştir. Bununla birlikte sonrasında, on yıl gibi süre zarfında göreceli olarak araştırmalarda durgunluk yaşanmıştır. Ancak NiTi'un keşfi şekil hafızalı alaşımlar üzerinde ki araştırmaların yeniden hızlanmasını sağlamıştır(Adharapurapu vd.2006).

Şekil hafızalı alaşımlar, ilk defa 1962 yılında ABD donanmasındaki laboratuarlarda, ticari ismi Nitinol olarak bilinenen Nikel-Titanyum alaşımının hafıza etkisinin belirlenmesiyle keşfedilmiştir.

NiTi alaşımları ikili alaşım sistemidir ve eşatomlu intermetalik bir bileşiktir. İntermetalik bir bileşik sıra dışıdır. Çünkü bu tür bir bileşik, kabul edilir sınırlar içerisinde fazlardan nikel veya titanyum çözebilir ve alışlagelmiş alaşımlarla mukayese edilebilir

derecede sünekliliğe sahiptir. Bu aşırı çözebilme yeteneği sayesinde alaşım sisteminin hem dönüşüm özelliklerini hem de mekanik özelliklerini istenilen tarzda değiştirmek için diğer elementler katılabilir. Yaklaşık %1 oranında nikel ilavesi bile alaşım sisteminin özelliklerini etkiler. Bünyedeki fazla nikel, dönüşüm sıcaklığını önemli ölçüde düşürür ve ostenitik durumda akma dayanımını artırır. Sıkça kullanılan diğer alaşımlandırma elementlerinden demir ve krom daha düşük dönüşüm sıcaklığı için bakır ise histerizisi azaltmak ve martenzitik durumda daha düşük deformasyon gerilmesi için daha sık kullanılır. Oksijen ve karbon gibi safsızlıkların, dönüşüm sıcaklığını değiştirdiği ve mekanik özellikleri zayıflattığı için bünyede bulunması istenmez(Akdoğan Eker,2002).



Şekil 2.1 Ni-Ti Alaşımın Faz Denge Diyagramı.

Çizelge 2.2 İkili Ni-Ti Şekil Hafızalı Alaşımların Özellikleri

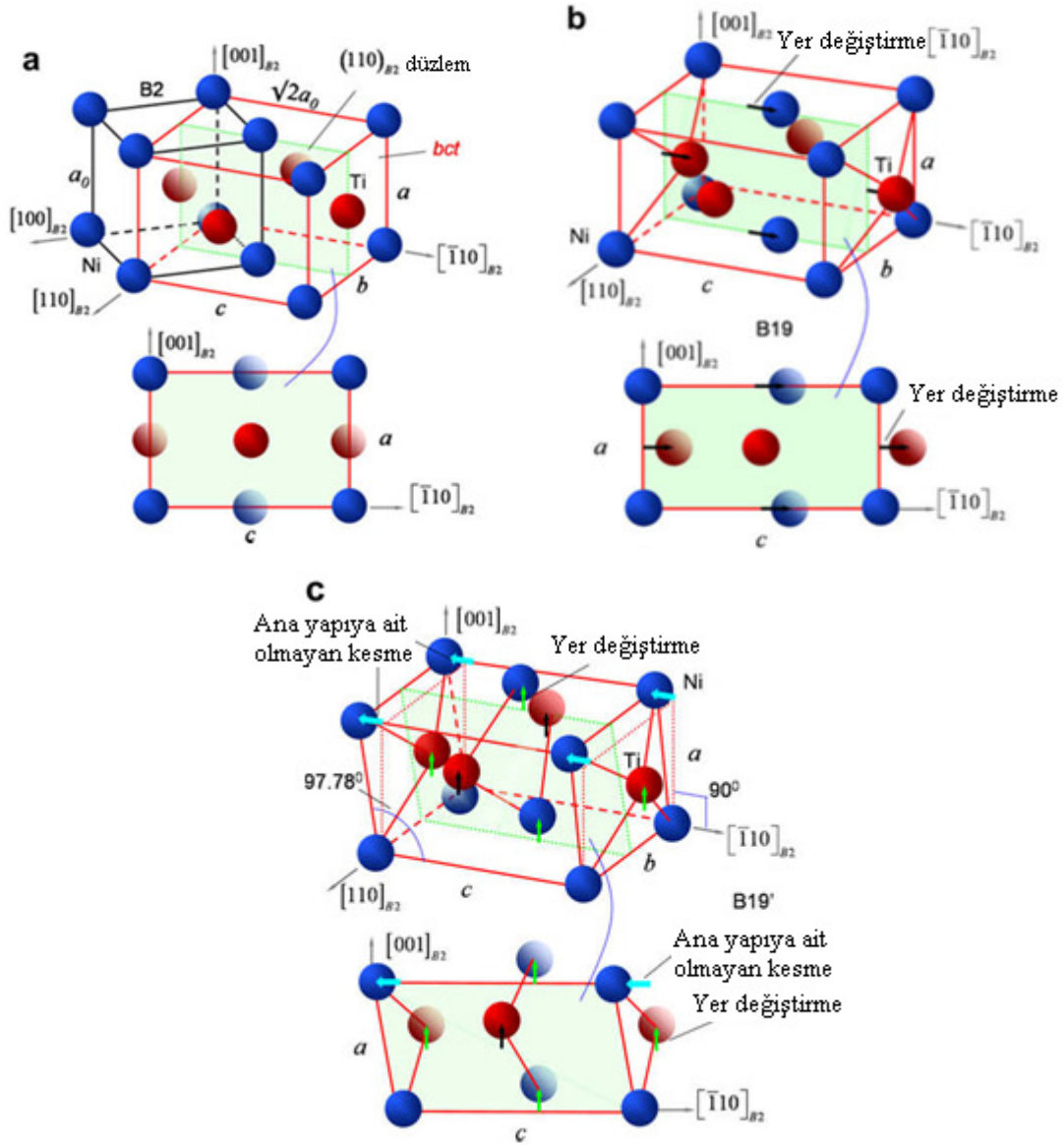
Özellik	Değer
Erime sıcaklığı (°C)	1300
Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	6.45
Elektrik direnci (micro-ohm*cm)	Yaklaşık
Ostenit	100
Martenzit	70
Isıl iletkenlik (W/cm*°C)	
Ostenit	18
Martenzit	8.5
Korozyon direnci	300 serisi paslanmaz çeliklere veya titanyum alaşımlarına yakın
Young modülü (GPa)	Yaklaşık
Ostenit	83
Martenzit	28~41
Akma dayanımı (MPa)	
Ostenit	195~690
Martenzit	70~140
Maksimum çekme dayanımı (MPa)	895
Dönüşüm sıcaklığı (°C)	-200~110
Dönüşüm sırasındaki gizli ısı (kJ/kg*atom)	167
Şekil hafıza gerinimi (%)	Maksimum 8.5%

### 2.1.1. NiTi Kristalografik karakteristikleri

NiTi'un yüksek sıcaklık fazı B2 kristal yapısına sahipken, düşük sıcaklık fazı monoklinik B19' kristal yapısına sahiptir. Şekill 2.2 NiTi'un martenzitik dönüşümüyle ilgili üç temel fazı göstermektedir. Gösterimin daha anlaşılır olması için şekil a, b ve c diye üçe ayrılmıştır. B2 fazı  $a_{B2} = 0.3015$  nm' lik (Şekil 2.2a) bir kafes sabiti ile NiTi'un temel fazıdır. Şekil 2.2b ile gösterilen B19 fazı ortorombik bir fazdır. B19 fazı hacim merkezli tetragonal faza bağıntılı olarak hacimsel bir distorsiyonu(çarpılma) ve [010]B19 yönü boyunca Ni ve Ti



atomlarının lokal sürüklenmesini gerektirir. Şekil 2.2c’de görülen B19’ fazı ortorombik fazın çok az monoclinic distorsiyon halidir. Ortorombik B19 fazı ile monoclinic B19’ fazı arasındaki farklılık,  $\beta$  açısının  $90^\circ$  den  $90.78^\circ$ ’ye monoclinic distorsiyonundan kaynaklanır(Kibey vd., 2009).

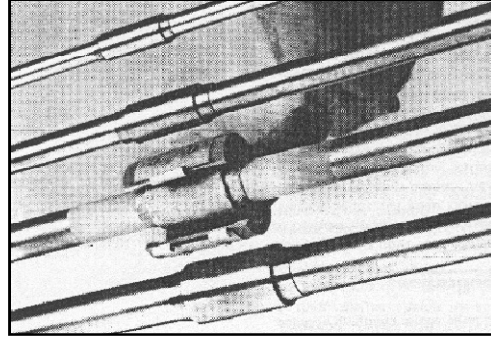


Şekil 2.2 NiTi’un kafes yapıları: (a) B2 kübik ve ideal hmt(hacim merkezli tetragonal) kafesi; (b) orthorhombic kesme ve itmeye müsait B19; (c) kesme ve itmeli monoclinic B19’ martenziti.

## 2.2. Şekil hafızalı alaşımların endüstriyel uygulamaları

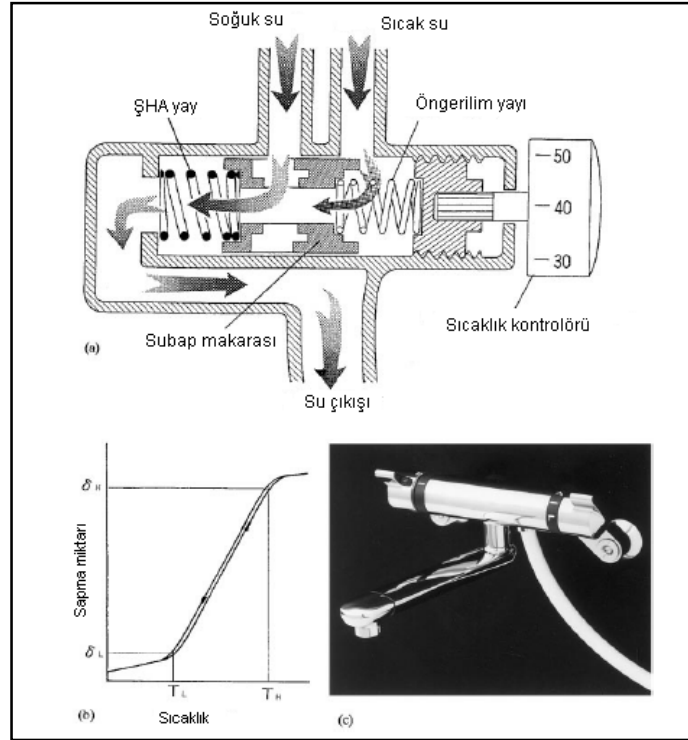
Şekil hafızalı alaşımların, otomotiv endüstrisi, elektrik cihazları, medikal uygulamalar robotik vb. bir çok alanda uygulama alanı bulunur.

NiTi şekil hafızalı alaşımının ilk kullanılma yerlerinden biri 1969'da F-14 Jet uçaklarında hidrolik boru bağlama bileziği olmuştur. Hidrolik borular bağlantı yapmak için standart kaynak tekniklerinin kullanılması zor olan uçağın alüminyum gövdesine çok yakın bölgelerdedir. Şekil hafızası verilmiş bilezik sıvı nitrojen içerisinde martenzit fazda bulunurken çıkartılıp hidrolik boru üzerine takıldığında ortam sıcaklığına ulaşmasıyla birlikte hidrolik boru üzerine sıkı bir şekilde oturur. Bağlama bileziği, sıvı nitrojen içerisindeki çok düşük sıcaklığa artık normal koşullarda ulaşamayacağından, her zaman boru üzerinde sıkı bir şekilde takılı olarak kalır. Endüstride benzer uygulamalar birbirlerine bağlantıları zor olan parçaların birleştirilmesinde kullanılmıştır(Dilibal vd.2003).



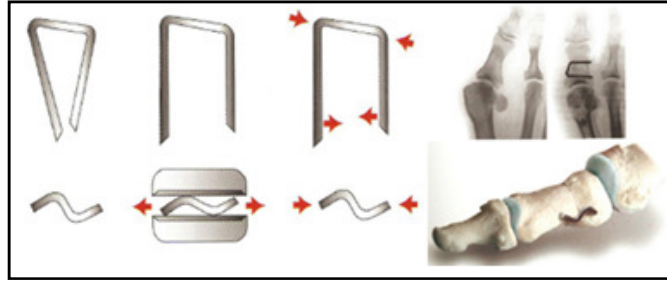
Şekil 2.3 Hidrolik boru bağlama bileziği olarak NiTi'un kullanılması

CuAlZn şekil hafızalı alaşımlarında birçok uygulamaları mevcuttur. Bunlardan biri, yangın durumunda yanıcı ve zehirli gazların çıkışını kapatacak şekilde dizayn edilmiş CuZnAl eyleyicilerden oluşan yangın güvenlik valfleridir. Dönüşümün belirli bir sıcaklık aralığında meydana gelmesinden yararlanarak seçilen belirli bir geri kazanım miktarıyla kesin bir mekanizma hareketi sağlamak için şekilsel geri kazanımın bir kısmı kullanılabilir. Bunu sağlayan düzenek, bir valfi istenilen miktarda kapatmayı veya açmayı sağlayan bir tertibattır. Şekil hafızalı alaşımdan yapılmış yay sıcaklığa duyarlı olduğundan boyutlarını değiştirerek çıkış akışkanının sıcaklığını ayarlar. Alaşımın duyarlı olması sebebiyle istenilen sıcaklık değeri manuel ayarlanır. Şekil 2.4'de karıştırma valfi ve parçaları görülmektedir (Akdogan,2002).

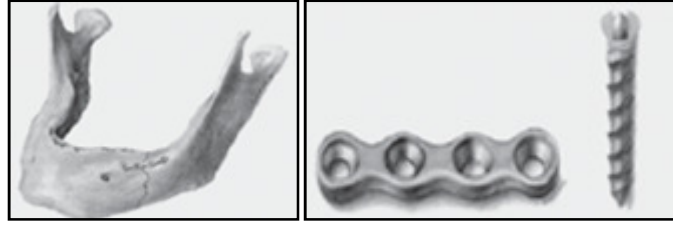


Şekil 2.4 Şekil Hafızalı Alaşım Yay ve Öngerilmiş Yay Kullanılarak Geliştirilmiş Karıştırma Valfi.(a) İç yapı görülmektedir. Makaranın pozisyonu ve çıkış suyunun sıcaklığı sıcaklık kontrolörü döndürülerek ayarlanır. Kontrolörün dönüşü şekil hafızalı alaşımın boyutunu değiştirmektedir. (b) Karıştırma valfinde kullanılan şekil hafızalı elemanın sıcaklık ve sapma miktarı arasındaki ilişki şematik olarak görülmektedir. (c) Geliştirilmiş karıştırma valfinin dış görünümü.

Ortopedi alanında kırılan ve parçalanmış kemiklerde de şekil hafızalı alaşımlar kullanılmaktadır. Değişik tipteki şekil hafızalı zımba teli şeklinde ki malzemeler iyileşmenin hızlandırılmasında önemli katkılar sunar. Şekil hafızalı zımba telleri açık halleri ile kırılan kemiğin olduğu bölgeye yerleştirilir. Sonrasında ısıtma ile tel kapanmaya ve kemik parçalarına baskı uygulamaya başlar. Buradaki ısıtma için vücut ısısı değil dışarıdan özel bir cihazla sağlanan ısı kullanılır. Şekil 2.5’de kırılan bir ayağa takılan şekil hafızalı zımba teli görülmektedir. Şekil 2.6’de ise çene, göz çukuru, yüz bölgesi gibi, herhangi bir kalıbın uygulanamayacağı yerlerde kullanılan şekil hafızalı plakalardan biri ve ona ait vida gösterilmiştir. Bu plakalar kırılan yerlere vidalarla yerleştirilerek kemiklerin orijinal düzeninde tutturulmasını sağlarken yenilenen hücresel oluşuma da müsaade eder(Tarnita vd. 2009).



Şekil 2.5 Ortopedik zimba telleri.

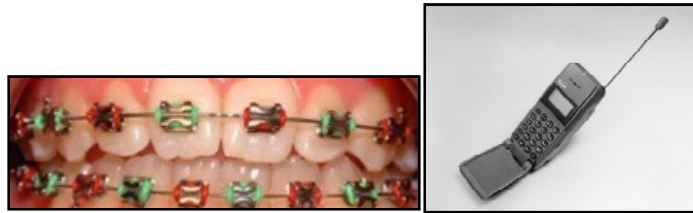


a)

b)

Şekil 2.6 Şekil hafızalı kemik plakaları: a) Bir insan çenesine tutturulmuş plaka b) Plaka ve vida detayı.

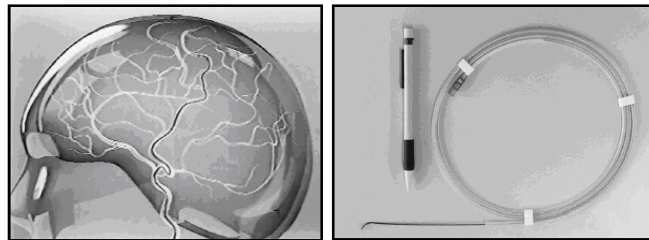
Ortodontik tedavilerde kullanımı kolay ve daha verimli olduğu için diş düzeltme fonksiyonlu ortodontik yay tellerinde uygulanmıştır. Bir başka uygulama ise Şekil 2.7b'de görülen cep telefonu antenleridir. Şekil 2.8'de damarlara yerleştirilen, kateterler için yapılmış kılavuz telleride medikal kullanıma örnek gösterilebilir(Otsuka ve Ren, 1999).



a.

b.

Şekil 2.7 a) Diş düzeltme telleri. b) Süperelastik anten.

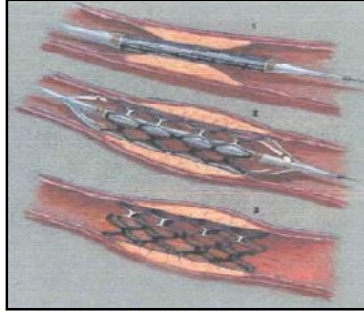


a.

b.

Şekil 2.8 Medikal uygulamalarda kullanılan kateterler için süperelastik kılavuz tel. (a) Beyne ait bir uygulama; (b) Kılavuz telin görünümü.

Şekil 2.9’de NiTi telden yapılmış, kanca şekline gelerek kan pıhtılarını tutmaya yarayan bir filtre gösterilmiştir. Bu parça üretildikten sonra soğuk etkisi ile büzülür ve şırınga ile damar içine girmesi sağlanır, nihayetinde ise vücut ısısına gelindiğinde fonksiyonunu yerine getirecek şekilde açılarak orijinal şekline döner ve kan pıhtılarını tutar(Baksan ve Gürler, 2006).

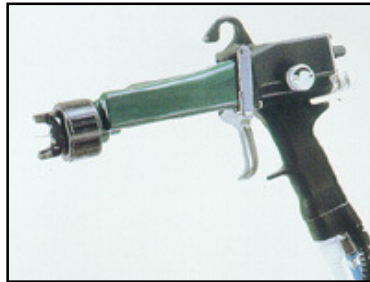


Şekil 2.9 SMA özellikli damar tıkanıklığında kullanılan bir stent.



Şekil 2.10 NiTi’den yapılmış bir gözlük çerçevesi ve süper elastiklik özelliği.

Şekil 2.11’ de bir boyama tabancasında elektrot teli olarak kullanılan süperelastik bir NiTi alaşımı tel gösterilmiştir. Tel dayanımı sayesinde, yüksek basınç sebebiyle oluşan deformasyona uzun süre direnç gösterir.



Şekil 2.11 Bir boyama tabancasında, süperelastik NiTi alaşımı elektrot teli.

### 3. SÜRÜNME

Sürünme numuneye belirli bir zaman dilimi içerisinde yüksek sıcaklıkta sabit bir yük uygulanmasıyla aşamalı olarak artan bir plastik gerinmenin oluşması sürünme olayı olarak ifade edilebilir. Sürünme hasarı artan sürünme geriniminin dizayn limitlerini aşması sonucu oluşur. Sürünme kopması ise, gerilme altındaki parçanın ikiye bölünüp, sürünme sürecinin sınır durumlarını aştığında ortaya çıkar

İlk kez bir Fransız mühendis tarafından yapılan çalışmalarda köprü süspansiyonlarındaki bağlantı tel halatlarının zamana bağlı uzamalarının önceden tahmin edilen elastikliği aştığını fark ederek sürünme hasarı üzerine çalışılmıştır. Sürünme hasarları üzerine çalışmalar ancak Birinci Dünya Savaşı'ndan sonra tasarımlarda kullanılmak üzere geliştirilmiştir.

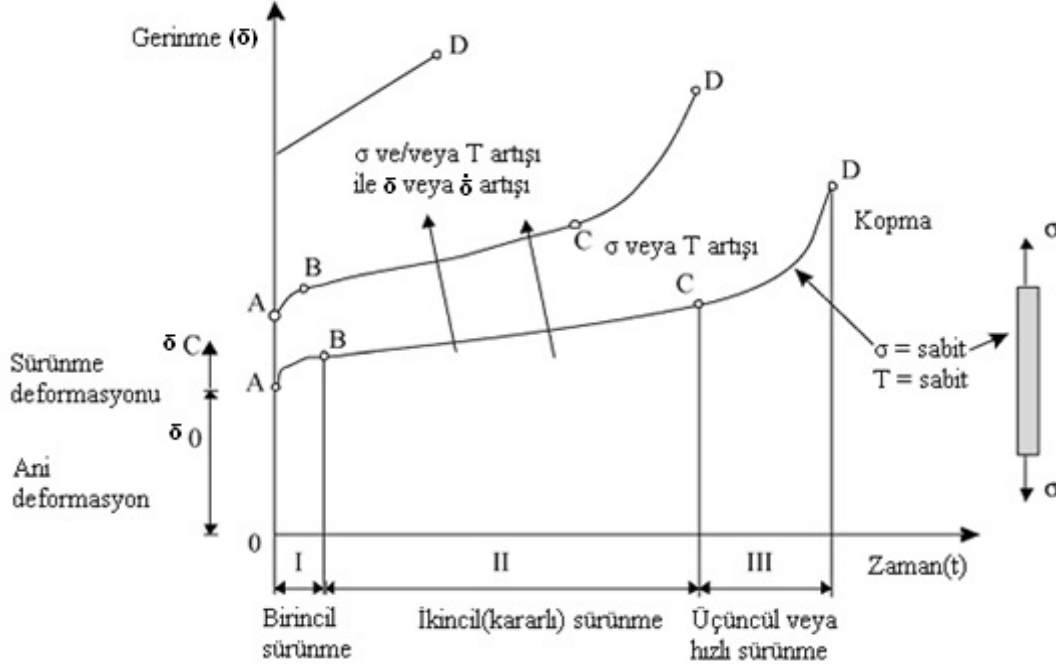
Sürünme hasarının önemli olduğu bir çok uygulama alanı vardır. Örneğin termik santrallerde, rafineelerde, kimyasal işletim alanlarında, 540°C ile 870°C arasında üzerinde yük olan parçalar çalışmaktadır. Fırın parçaları, 870°C ile 1200°C arasındaki sıcaklıklara düzenli olarak maruz kalırlar. Yine gaz türbinlerinin rotor kanatları 650°C ile 1200°C arasındaki sıcaklıklarda, yüksek merkezkaç kuvvetlerinde çalışmaktadırlar. Bunlardan başka roket nozulları ve uzay araçlarının koniksel burunları kısa süreli zaman periyotlarında çok daha yüksek sıcaklıklara tabi olmaktadır. Mach 7 adlı bir uzay aracının yüzey sıcaklığı yaklaşık olarak 2760°C ölçülmüştür. Buda aerodinamik ve yapısal bakımdan sürünme deformasyonun ve gerilme kopmasının ne kadar önemli olduğunu göstermektedir.

Sürünme sebebiyle oluşan aşırı sürünme deformasyonun dışında bir çok önemli proses vardır. Bu prosesler; sürünme kopması, ısıl genleşme, periyodik yükleme veya sıcaklık altındaki dinamik sürünme, çok eksenli yükleme altındaki sürünme, artan sürünme etkileri, birleşik sürünmenin etkileri ve hasarı olarak sıralanabilir.

Sürünme ve gerilme kopmasının, önceden kesin sonuçlar veren teorik hesaplaması çok güçtür. Ayrıca bir malzemenin oda sıcaklığındaki mekanik davranışlarıyla sürünme sıcaklığındaki davranışları arasında neredeyse hiç yada çok az ilişki vardır. Bu problemi aşabilmek için, ağırlıklı olarak deney verileri ve deneysel metotlar, tahmin edilen sürünme davranışlarının ve beklenen değerlerin çıkarılmasında kullanılırlar.

Sürünme deneylerinde, malzemelerin sürünme davranışının anlaşılması amacıyla uzama veya birim uzamanın zamana göre değişimini gösteren eğriler çizilir ve bu eğrilere sürünme eğrileri adı verilir(Şekil 2.1).

Bu eğrilerde sürünme; a) yüklemeyi izleyen ani uzama, b) birincil sürünme veya geçiş sürünmesi, c) ikincil veya kararlı sürünme ve d) üçüncül sürünme olmak üzere dört aşamadan oluşur.

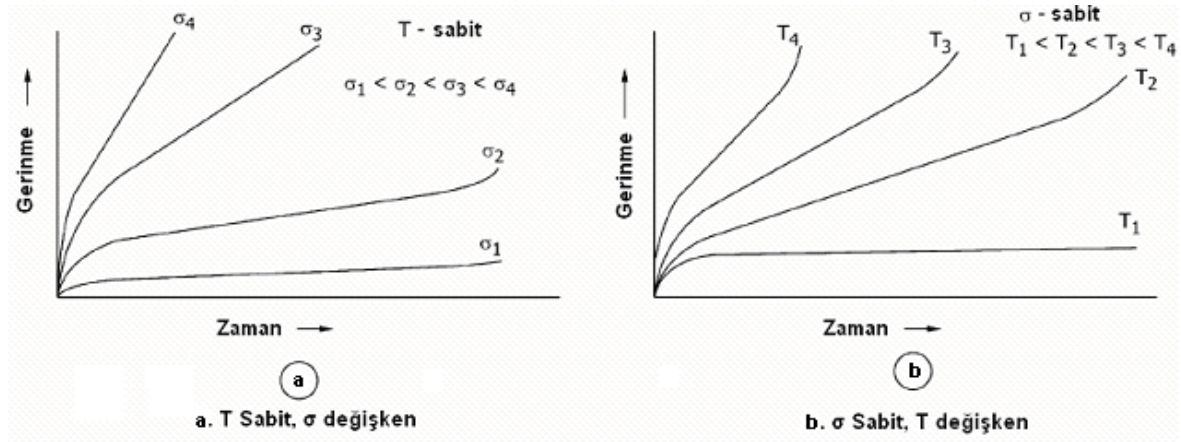


Şekil 3.1 Sürünme eğrisi Brnic vd.(2007)

A'dan B'ye olan birinci bölgeye ait sürünmede dislokasyon hareketliliği çok hızlı olmaktadır. Bu bölümde çalışma sertleşmesine bağlı dislokasyon hareketliliğini engelleyen veya zorlaştıran faktörler malzeme içerisinde sürünme hızına azalan şiddette etki edecek şekilde absorbe edebilir. Dolayısıyla birinci bölgede sürünme gerinim artış hızı ilk etapta yüksektir ve daha sonrasında hızla yavaşlayarak kararlı sürünme bölgesi olan ikinci aşamaya geçiş yapar. İkinci bölgede (B'den C'ye olan bölge) sürünme gerinim hızının zamana bağlı olarak artış oranı sabit kalmaktadır. İkinci bölgede çalışma sertleşmesi nedeni ile artan dislokasyon hareketliliği neticesi olarak dislokasyon ağları ve yığılmaları rahatlatma mekanizmaları olarak adlandırılabilir dislokasyon tırmanması ve dislokasyon kayması ile dengelenir ve bu nedenle gerinim artış oranı sabit kalır. Birinci ve üçüncü bölge sürünme gerinimi artış oranlarının hızlı olması nedeni ile mühendislik tasarımlarında daha çok ikinci bölge dikkate alınmaktadır. C'den D'ye olan üçüncü bölgede iç boşluk oluşumları vuku bulur. Bu ise boyun oluşumu ve buna bağlı olarak gerilme (stres) artışına neden olur ve malzeme

son olarak aniden kopabilir. Sürünme eğrisinin şekli kullanılan malzemenin türüne, ortamın sıcaklığına ve basınç değerine göre farklılıklar gösterebilir(Kurt, 2008).

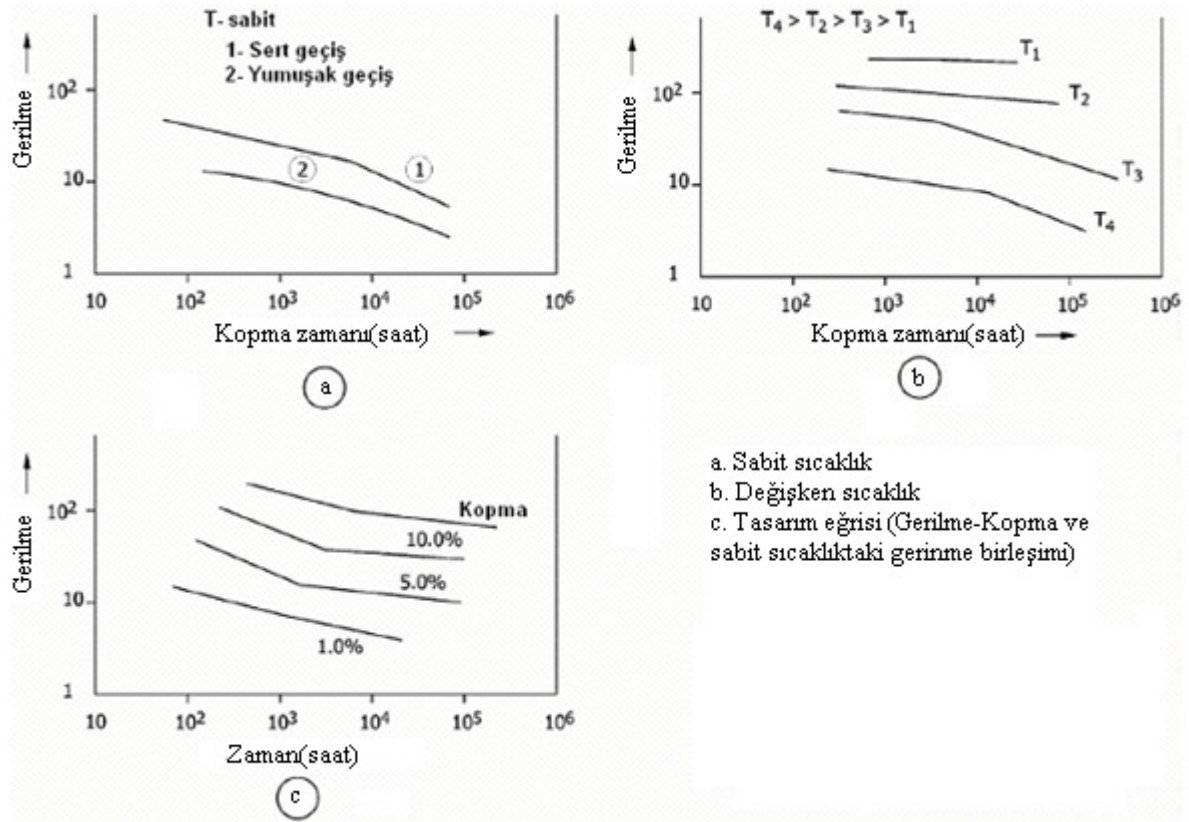
Sıcaklığın ve gerilmenin sürünme davranışı üzerindeki etkileri değişik gerilme(sabit sıcaklıkta) ve sıcaklık(sabit gerilmede) değerlerinde Şekil 3.2(a) ve Şekil 3.2(b)'de gösterilmiştir. Sıcaklığın ve gerilmenin artmasıyla kararlı sürünme oranında büyür ve ikincil sürünme bölgesi azalır sonunda da ani ve erken kırılma oluşur.



Şekil 3.2 a,b.Sürünme deney sonuçları.

Kararlı sürünme bölgesi, malzemelerin ömrü hakkında bilgi alabilmek için iyi ve önemli bir kaynak sağlarken, gerilme-kopma deneyleride zamana bağlı olarak sabit sıcaklıkta farklı gerilmeler altında incelenen sürünme deneylerinde sürünme davranışının belirlenmesinde kullanılır. Tipik bir sürünme-kopma deneyi eğrisi Şekil 3.3(a)'da gösterilmiştir. Şekil, deformasyon mekanizmaları veya farklı kopma sebeplerinden dolayı ortaya çıkan bir veya iki segmentin aşağıya inen bir eğime sahip eğrisi olarak çizilir. Bu deney zamana bağlı olarak, kopmadan önce en son verilmiş bir gerilme ve sıcaklık değerinin gösterimini verir. Şekil 3.3(b)'de farklı deney sıcaklıklarında benzer eğriler elde edilmiştir. Şekil 3.3(c)'de kopma gerilmelerinin ve yüzde uzamanın birleşik hali için bir malzemenin tasarım eğrisi elde edilir. Hem gerilme-kopma hem de sürünme deneyleri, kopma veya aşırı uzama ile herhangi bir malzemede meydana gelen hasarların tespiti için zamana bağlı davranışın belirlenmesinde ve bu davranışın tasarımda kullanılmasında büyük önem arz eder (Deshmukh, 2005).





Şekil 3.3 Gerilme-kopma deney eğrileri.

Malzemelerin sürünme davranışı hakkında dikkate alınması gereken en önemli parametrelerden biri ikincil veya kararlı sürünme hızıdır. İkincil sürünme olarak adlandırılan sürünme bölgesi malzeme araştırmacıları ve bilim adamları için büyük önem arz eder. Araştırmacılar sürünmenin sabit olduğu ikincil sürünmenin, sürünme ömrü içinde neredeyse en baskın bölge olduğunu öne sürerler(Safari vd.2007).

İkincil veya kararlı sürünme hızı, sürünme eğrisinin doğrusal kısmının eğimi olup,

$$\dot{\delta} = \partial\delta/\partial t \quad (3-1)$$

bağıntısı ile belirlenir.

Ancak, metalik malzemelerin çoğunda ikincil sürünme hızı aşağıda verilen bağıntı ile hesaplanır.

$$\dot{\delta} = B \sigma^n \exp(-Q/RT) \quad (3-2)$$

Burada;

$\dot{\delta}$  kararlı sürünme hızı

$B$  malzeme sabiti

$\sigma$  uygulanan gerilme

$n$  gerilme üst sabiti

$Q_s$  sürünme için aktivasyon enerjisi

$R$  gaz sabiti ve  $T$  mutlak sıcaklıktır(Oppenheimer vd.(2007)).

Bazı metalik malzemelerin kararlı sürünme hızlarının belirlenmesinde aşağıda verilen bağıntıda kullanılabilir.

$$\dot{\delta} = B (\sigma - \sigma_0) \exp(-Q/RT) \quad (3-3)$$

Burada  $\sigma$  uygulanan gerilme,  $\sigma_0$  malzeme için ölçülen sürtünme gerilmesi ve  $(\sigma - \sigma_0)$  etkin gerilmedir. Sürtünme gerilmesi  $\sigma_0$  gerilme-gevşeme deneyleriyle belirlenebilir.

### 3.1. Sürünme teorisi

Sürünmede etkili temel mekanizmalar, difüzyon ve dislokasyondur. Basmaya yüklenen boş yerlerde ve çekmeye zorlanan sahada kristal sınırlarında atomlar yer değiştirmeye difüzyona uğrar(difüzyon kontrollü sürünme). Düşük gerilme ve yüksek sıcaklıklarda yalnızca difüzyon sonucu olarak kalıcı form değişimleri görülür. Çekme yüzeylerine yerleşmiş atom tabakaları sürünme olayı yapar ve bu olayın hızı tane büyüklüğünün karesiyle ters orantılıdır (Nabarro-Herring sürünmesi).

Benzer şekilde difüzyona bağımlı bir diğer "mikroplastik proses" tane sınırı kaymasıdır. Oda sıcaklığında dayanım artırıcı etkiye karşılık olarak, yüksek sıcaklıklarda tane sınırları "yumuşak bölge" durumundadır. Bu bölgelerde hata yoğunluğunun yüksek olmasından dolayı, difüzyon için gerekli aktifleştirme enerjisi, kristale nazaran burada daha düşüktür.

Düşük sıcaklıklarda ince taneli, buna karşılık yüksek sıcaklıklarda kaba taneli malzeme daha iyi dayanım özeliği gösterir. Sıcakta şekil değiştirmeye karşı direnç, tane büyüklüğü ile birlikte artar.

Difüzyon kontrollü sürünmede olduğu gibi, tane sınırı kaymalarının kısıtlanması, yalnızca kaba taneli yapının elde edilmesiyle mümkündür. Ancak, kaba taneli malzeme de bazı sorunlar doğurur. Özellikle, süneklik ve yorulma dayanımı, tane büyüklüğünün artmasıyla azalır.

Sürünme şekil değiştirmesinin büyük bir kısmı, dislokasyon reaksiyonlarından meydana gelir. Konservatif olmayan termik aktifleşmiş hareketlerle (tırmanma) dislokasyonlar kayma düzlemlerindeki boş yerleri değişken etki ile terkeder ve dış gerilmelerin eksenine uygun yönelmiş, şekil değiştirmenin etkin olduğu tırmanma etabı meydana getirirler. Tırmanmada, dislokasyonlar tane sınırlarındaki çökelmelerde ya da hareketsiz dislokasyonlarda birikim yapar ve küçük açılı alt tane sınırları meydana getirir (poligonlaşma). Tanelerin kabalaşması (büyümesi), dislokasyon yoğunluğunu tekrar artırır ve yeterli yükseklikteki şekil değiştirme hızlarında rekristalizasyon (büyük açı tane sınırı oluşumu ve hareketi) meydana getirebilecek rekristalizasyon çekirdekleri teşekkül eder.

Tatmin edici düzeyde yüksek sıcaklık-dayanım karakteristiğini garanti etmek için, difüzyonu ve tane sınırı kaymasını zorlaştıran, dislokasyon hareketini engelleyici, tüm önlemler düşünülebilir.

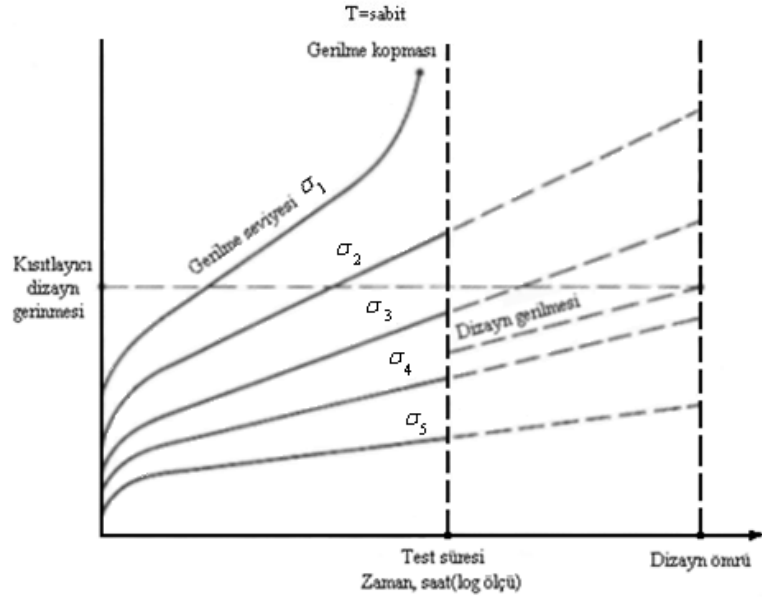
### **3.1.1. Sürünme verilerinin sunumu**

Sürünme deneylerinin verilerini grafiğe dönüştürmek için çeşitli yollar vardır. Temel değişkenler gerilme, gerinme, zaman, sıcaklık ve gerinme oranını kapsar. Seçilen herhangi iki temel değişkenin koordinatları çizilebilir, ardından geri kalan değişkenler parametrik sabitler ele alınarak bir eğri ortaya çıkarılmasını sağlar. Kısa süreli sürünme verilerinden uzun süreli sürünme uygulamalarının verilerini elde etmek için, Kısaltılmış, Mekanik Hızlandırma ve Isıl Hızlandırma olarak bilinen üç metot kullanılır. Herhangi bir deney metodu için sürünme deneyinde kılavuz çizgilerinin belirlenmesinde, genellikle öngörülen ömrün % 1'inden daha az deney periyotlarının kullanılması kıyaslamada önemli sonuçlar elde edilememesine sebep olmuştur. Deneylerin sürelerinin öngörülen ömrün en az % 10'u olması istenir.

#### **Kısaltılmış Metot**

Bu metotla yapılan sürünme deneyleri bir çok gerilme seviyesi değerleri ile tasarlanmış sıcaklık değerlerinde yapılır. Şekil 3.4'de gösterilen grafikte veriler, sürünme geriniminin zamana bağlı değişimi ile çeşitli gerilme değerleri için sabit sıcaklıkta elde edilmiştir. Eğriler laboratuvar deneyi boyunca ortaya çıkmış ve istenilen dizayn ömrü sonucuna

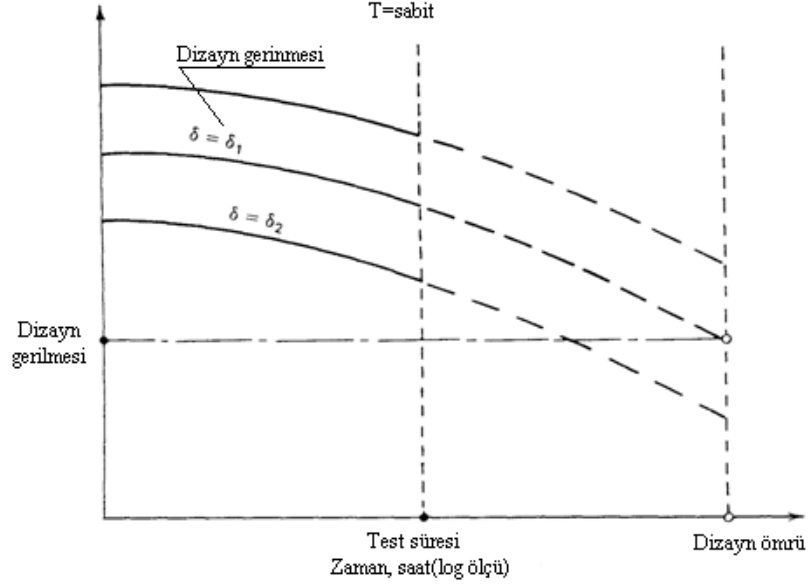
ulaşmıştır. Grafikte de görüldüğü gibi, tasarım özellikleri, sınırlandırılmış tasarım gerinimi ve tasarım ömrünün kabul edilen bir gerilme değerinde kesişmesiyle elde edilmiştir.



Şekil 3.4 Sürünme deneyinin kısaltılmış metotla gösterimi.

### Hızlandırılmış Mekanik Metot

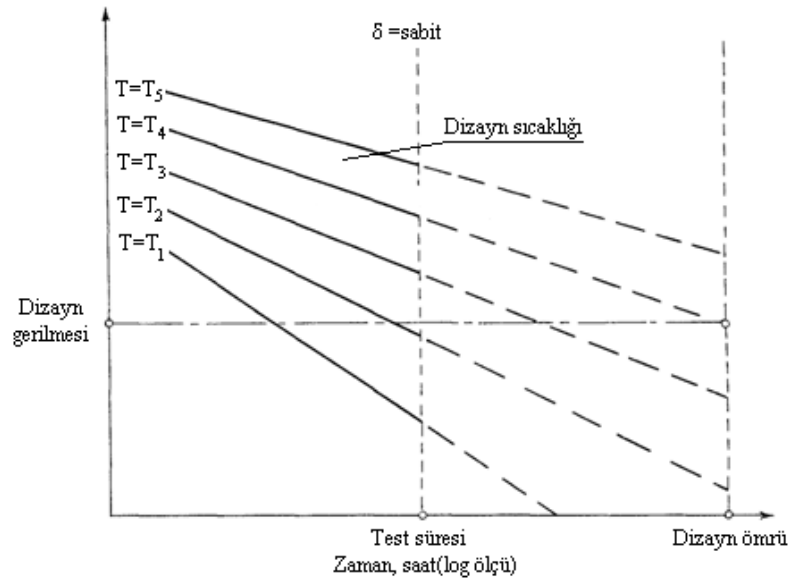
Bu metotla yapılan sürünme deneyinde kullanılan gerilme değerleri, tahmin edilen tasarım değerlerinden çok önemli miktarda yüksektir, bu yüzden tasarım sınır gerinimlerine ulaşma gerçektekinden çok daha kısa süre alır. Mekanik metotla elde edilen veriler Şekil 3.4’ de görüldüğü üzere gerilme değerinin sabit sıcaklıkta zamanla olan değişimini göstermektedir. Bu grafikte gerilme kopma eğrisi çizilebilir. Kararlı gerinim eğrileri laboratuvar deneyi boyunca çizilebilir ve dizayn ömrü çıkarılabilir. Şekil 3.4’de gösterildiği gibi tasarım gerilmesi olarak, tasarım gerinimi ve ömrünün kesiştiği nokta kullanılabilir.



Şekil 3.5 Sürünme deneyinin hızlandırılmış mekanik metotla gösterimi.

### Hızlandırılmış Isıl Metot

Bu metotta kullanılan laboratuvar sıcaklık değerleri gerçekte kullanılan sıcaklık değerlerinden çok daha yüksektir. Şekil 3.6'da grafikte gerilme değerinin, sabit gerilim ve değişen sıcaklıklar altında zamana bağlı değişimi gösterilmiştir. Bu yöntemle gerilme kopması verileri belirlenebilir. Eğriler laboratuvar deneyi boyunca ortaya çıkmış ve istenilen dizayn ömrü sonucuna ulaşılmıştır. Bu grafikte tasarım gerilme seviyesi Şekil 3.5'de gösterildiği gibi, tasarım sıcaklık eğrisi ve ömrünün kesiştikleri noktalar bulunarak belirlenebilir(Collins, 1993)



Şekil 3.6 Sürünme deneyinin hızlandırılmış ısıl metotla gösterimi.

### 3.1.1.1. Sürünme davranışının önceden belirlenmesinin teorisi

Birbirinden farklı bir çok çalışmada orta derece sıcaklıklarda ki kısa süreli sürünme deneylerini uzun süreli sürünme deneyleriyle ilişkilendirmeyi amaçlamıştır. Bu teorilerin arasında en doğru ve kullanışlı olanları Larson-Miller ve Manson-Haferd teorileri olarak kabul edilmiştir.

#### Larson-Miller Parametresi

Larson-Miller teorisi, bütün malzeme ve gerilme kombinasyonun  $P$  olarak belirtilen hem sıcaklıkla hemde zamanla olan ilişkisini gösteren bir tek değerden oluştuğunu kabul eder.

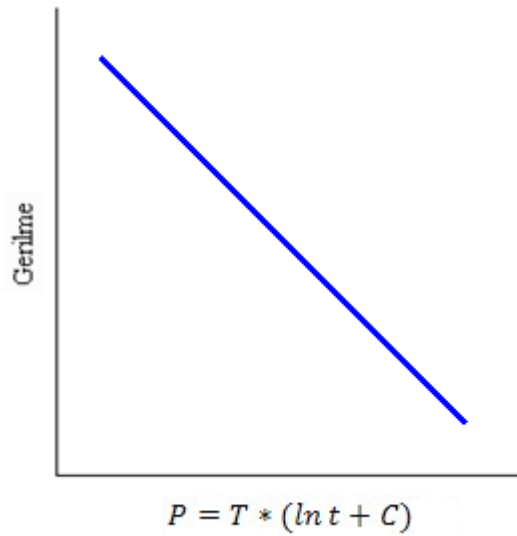
$$P = T * (\ln t + C) \quad (3-4)$$

$P$  = Larson-Miller parametresi, gerilme seviyesi ve malzeme için verilen bir sabit

$T$  = Sıcaklık, °C

$C$  = Sabit

$t$  = Saat(zaman), numune ömrü.



Şekil 3.7 Larson-Miller eğrisi

Larson-Miller teorisine ait (3-4) denklemi ile kısa süreli sıcaklık zaman değerlerinin kullanılmasıyla, uzun süreli sürünme deneylerinin sonuçları tahmin edilebilir.

Larson-Miller parametreleri çok değişken malzemeler için teori ve deneysel değerlerin uyumlu olduğunu göstermektedir. Bu sayede bir çok malzemenin sürünme davranışı ve gerilme kopması kolaylıkla incelenebilir(Hearn, 1997) .

### **Manson-Haferd Parametresi**

Manson-Haferd teorisi, malzeme ve gerilme seviyesi kombinasyonun  $P'$  olarak belirtilen ve sıcaklıkla ve de zamanla olan ilişkisi gösterilen bir tek değerden oluştuğunu varsayar.

$$P' = (T - T_a) / (\ln t - \ln t_a) \quad (3-5)$$

$P'$  = Manson-Haferd parametresi, gerilme seviyesi ve malzeme için verilen bir sabit

$T$  = Sıcaklık, °C

$t$  = Saat(zaman), kopma süresi

$T_a, t_a$  = malzeme sabitleri

#### **3.1.1.2. Tek eksenli gerilme altında sürünme**

Tek eksenli gerilme halinde sürünme, sürünme kopma deneyleri genellikle 100 (4 gün), 1000 (42 gün), 10000 (420 gün) saat, bazı daha uzun sürelerde ise 100000 (11.5 yıl) saatlik işlem yapılabilmektedir. Son zamanlarda kısa zamanlı dakikalık deneyler uzun süreli saatlik ve yıllık deneylere göre daha fazla tercih edilmektedir. Örneğin bazı durumlarda 1, 10, 100, 1000 dakikalık deneyler yapılmaktadır.

Sıcaklığın yükseltilmesiyle, yüksek derece de bir statik zorlanmada eğilme gerilmesi ve elastiklik katsayısı azalmaya eğilim gösterirken, yüzey alanındaki azalma ve uzama artmaya eğilim gösterir. Gerilme yığılmasından dolayı yüksek sıcaklıklarda geometrik çentik etkisi azalır.

Bir çok bağıntı sürünme prosesinde gerilme, gerinim, ve sıcaklığı ilişkilendirmeyi amaçlamıştır. Deneysel sürünme gerinmesinin zamana karşı değişiminin bir inceleme yapılırsa, verilerin logaritmik değerleri koordinat olarak alınırsa bir çok malzeme için oluşan eğrinin lineer olduğu gözlenmiştir. Şekil 3.8' de üç farklı malzeme için eğri oluşturulmuştur. Sürünme geriniminin zamana karşı değişimi (3-6) bağıntısıyla;

$$\delta = A s^{-1} \quad (3-6)$$

$\delta$  = Gerçek sürünme gerinmesi

t = Zaman

A,a = deneysel sabitler

$$\dot{\delta} = a A t^{(a-1)} \quad (3-7)$$

$\dot{\delta}$  = Gerinme hızı

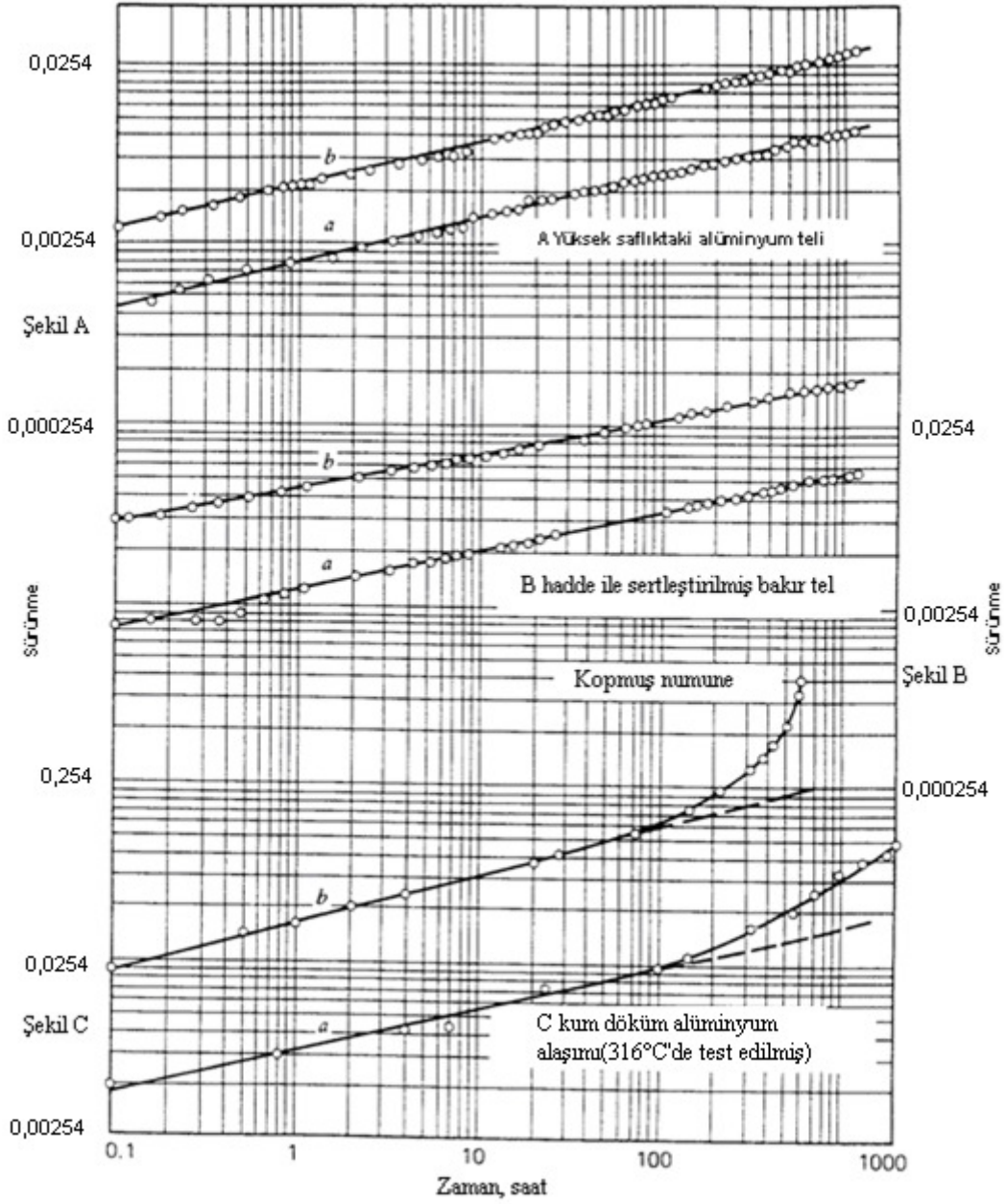
aA = b ve (1 - a) = n , yerine koyarsak,

$$\dot{\delta} = b t^{-n} \quad (3-8)$$

Bu denklemler  $n$  üssünün miktarına bağlı olarak farklı tipteki gerinimin zamana karşı değişimini verir. Eğer  $n$  sıfır olursa, bu hal sabit sürünme oranı olarak adlandırılır ve sürünme gerinimi (3-9) bağıntısı ile verilir;

$$\delta = b_1 t + C_1 \quad (3-9)$$





Şekil 3.8 Üç malzemenin sürünme eğrileri için log-log(logaritmik) koordinatları.

Eğer  $n$  bir ise bu hal logaritmik sürünme oranı olarak adlandırılır. Bu tip sürünme davranışı genellikle yüksek sıcaklıkta bulunur ve sürünme gerinimi (3-10) bağıntısı ile verilir;

$$\delta = b_2 \ln t + C_2 \quad (3-10)$$

Eğer n üssü 0 ile 1 arasında olursa bu hal parabolik sürünme oranı olarak adlandırılır. Bu tip sürünme davranışı lastik, cam, ve belli tip konsantrasyonlarda ayrıca düşük sıcaklıklardaki metallerde görülür ve sürünme gerinimi aşağıda ki şekilde verilir;

$$\delta = b_3 t^m + C_3 \quad (3-11)$$

Bu tip sürünme davranışı orta ve yüksek sıcaklıklarda görülür.  $b_3$  katsayısı sıcaklık ve gerilme ile üssel olarak artar ve m üssü gerilmeyle azalır sıcaklıkla artar. Gerilme seviyesi  $\sigma'$  nın sürünme oranına etkisinin deneysel ifadesi;

$$\delta = B \sigma^N \quad (3-12)$$

$\sigma$  gerilmesini zamandan bağımsız varsayarak integralini alırsak sürünme gerinimi

$$\delta = B t \sigma^N + C' \quad (3-13)$$

Eğer  $C'$ ,  $B t \sigma^N$  ile karşılaştırıldığında ihmal edilebiliyorsa sonuç log-log gerilme-zaman sürünme yasası olarak adlandırılır.

$$\delta = B t \sigma^N \quad (3-14)$$

Belirli bir sıcaklıkta belirli bir sürünme deformasyonunda, belirlenmiş sınırlar dahilinde istenilen gerilme değeri hesaplanabilir(Collins, 1993)

### 3.1.1.3. Çok eksenli gerilme altında sürünme

Basıncılı kaplar, borular, türbin pervaneleri gibi bir çok uygulama çok eksenli gerilme etkisindedir. Çok eksenli gerilme altındaki sürünme gerinmesini ve deformasyonunu belirlemek için plastik deformasyon denklemleri geliştirilerek ortaya çıkan aşağıdaki denklemlerden yararlanır.

$$\delta_1 = 1/D[\sigma'_1 - 1/2(\sigma'_2 + \sigma'_3)] \quad (3-16)$$

$$\delta_2 = 1/D[\sigma'_2 - 1/2(\sigma'_1 + \sigma'_3)] \quad (3-17)$$

$$\delta_3 = 1/D[\sigma'_3 - 1/2(\sigma'_1 + \sigma'_2)] \quad (3-18)$$

$\delta_1, \delta_2, \delta_3 =$  gerçek gerinmeler

$\sigma'_1, \sigma'_2, \sigma'_3 =$  gerçek gerilmeler

$D =$  plastiklik modülü, plastik gerinme miktarının bir fonksiyonu

(3-16), (3-17), (3-18) denklemleri zamana bölünürse, denklemler sürünme oranı denklemleri haline dönüşür.

$$\delta_{1/t} = \dot{\delta}_1 = 1/Dt[\sigma'_1 - 1/2(\sigma'_2 + \sigma'_3)] \quad (3-19)$$

$$\delta_{2/t} = \dot{\delta}_2 = 1/Dt[\sigma'_2 - 1/2(\sigma'_1 + \sigma'_3)] \quad (3-20)$$

$$\delta_{3/t} = \dot{\delta}_3 = 1/Dt[\sigma'_3 - 1/2(\sigma'_1 + \sigma'_2)] \quad (3-20)$$

Sürünme oranı denklemleri tek eksenli gerilme durumlarına adapte edilebilir  $\sigma'_2, \sigma'_3 = 0$  olarak ifade edilirse

$$\dot{\delta}_1 = \sigma'_1/Dt \quad (3-22)$$

Distorsiyon enerjisi teorisinden yararlanarak gerçek gerilme eşitliği,  $\sigma'_e$ , çok eksenli gerilme için

$$\sigma'_e = \sqrt{2/2}[(\sigma'_1 - \sigma'_2)^2 + (\sigma'_2 - \sigma'_3)^2 + (\sigma'_3 - \sigma'_1)^2]^{1/2} \quad (3-23)$$

(3-23) denklemi, tek eksenli gerilme durumlarına adapte edilebilir  $\sigma'_2, \sigma'_3 = 0$  ve ifade

$$\sigma'_e = \sigma'_1 \quad (3-24)$$

(3-25) ve (3-27) denklemlerinin kombinasyonu

$$\sigma'_e = \sigma'_1 = \dot{\delta}_1 Dt \quad (3-25)$$

Buna ilaveten (3-10) denkleminde  $\dot{\delta}$  yazılarak

$$\dot{\delta}_1 = B(\dot{\sigma})^N \quad (3-26)$$

$$\sigma'_1 = B(\dot{\sigma})^N Dt \quad (3-27)$$

Bu ifade de çözülürse

$$1/Dt = B(\dot{\sigma})^{N-1} = B(\sigma'_e)^{N-1} \quad (3-28)$$

(3-31) denkleminde bulunan ifade (3-22), (3-23), (3-24) denklemlerinde yerine konursa aşağıdaki sonuçlar ortaya çıkar

$$\dot{\delta}_1 = B(\sigma'_e)^{N-1} [\sigma'_1 - 1/2(\sigma'_2 + \sigma'_3)] \quad (3-29)$$

$$\dot{\delta}_2 = B(\sigma'_e)^{N-1} [\sigma'_2 - 1/2(\sigma'_3 + \sigma'_1)] \quad (3-30)$$

$$\dot{\delta}_3 = B(\sigma'_e)^{N-1} [\sigma'_3 - 1/2(\sigma'_1 + \sigma'_2)] \quad (3-31)$$

Bu bağıntıları kolaylaştırmak için (3-32) ve (3-33)'de verilen oranlar tanımlanabilir

$$\alpha = \sigma'_2/\sigma'_1 \quad (3-32)$$

$$\beta = \sigma'_3/\sigma'_1 \quad (3-33)$$

Bu ifadelerden ve (3-26) denkleminde yararlanarak (3-32), (3-33), (3-34) denklemleri daha kullanışlı hale gelir.

$$\delta_1 = Bt(\sigma'_1)^N [\alpha^2 + \beta^2 - \alpha\beta - \alpha - \beta + 1]^{(N-1)/2} [1 - \alpha/2 - \beta/2] \quad (3-34)$$

$$\delta_2 = Bt(\sigma_1')^N [\alpha^2 + \beta^2 - \alpha\beta - \alpha - \beta + 1]^{(N-1)/2} [\alpha - \beta/2 - 1/2] \quad (3-35)$$

$$\delta_3 = Bt(\sigma_1')^N [\alpha^2 + \beta^2 - \alpha\beta - \alpha - \beta + 1]^{(N-1)/2} [\beta\alpha - \alpha/2 - 1/2] \quad (3-36)$$

Bu üç denklem gerçek sürünme gerilmelerinin, sürünme gerilmelerinin ve deneysel olarak elde edilmiş tek eksenli gerilme sürünme parametreleri olan  $B$  ve  $N$ ' nin eldesiyle ifade edilir. Herhangi bir, çok eksenli gerilme altındaki sürünme davranışının tespitinde bu denklemler kullanılabilir.

### 3.2. Sürünme deformasyon mekanizması

Sürünme üzerine yapılan araştırmaların büyük kısmı sürünme deformasyon mekanizmasının geliştirilmesi üzerinedir. Önemli deformasyon mekanizmaları aşağıdaki gibi gruplandırılabilir:

Dislokasyon kayması; termal aktivasyon sayesinde dislokasyon hareketine karşı olan direncin aşılması ve kayma düzlemleri boyunca hareketin sağlanması üzerine kuruludur. Mekanizma büyük gerilmelerde oluşur,  $\sigma/G > 10^{-2}$

Dislokasyon sürünmesi; çatlakların veya boşlukların difüzyonu ile ısıl olarak desteklenmiş mekanizmaların etkisiyle dislokasyon sürünmesine karşı olan direncin aşılması, dislokasyon hareketlerinin sebebidir.  $10^{-4} < \sigma/G < 10^{-2}$

Difüzyon sürünmesi; uygulanan gerilmenin etkisi altında bir kristal boyunca çatlakların ve boşlukların akışını ifade eder  $\sigma/G < 10^{-4}$  ve bu kategori Nabarro-Herring ve Coble sürünmesini kapsar.

Tane sınırı kayması; tanelerin sınırları boyunca kayarak birbirleriyle yerlerinin değişmesini ifade eder.

Genellikle aynı anda farklı sürünme mekanizmaları oluşabilir. Bunların birbirine bağımlı olarak uygulanmasıyla, kararlı sürünme oranı aşağıdaki denklem ile verilir,

$$\dot{\delta} = \sum_i \dot{\delta}_i \quad (3-41)$$

### 3.2.1. Dislokasyon kayması

Kayma mekanizması, dislokasyonların kayma düzlemleri üzerinde, belirli kayma doğrultusunda hareketleri sonucu atom düzlemlerinin birbirine göre ötelenmesi şeklinde meydana gelir. Bu nedenle, kuvvet uygulanan bir malzemede dislokasyon hızının artması, plastik deformasyon hızının artması anlamına gelmektedir. Dislokasyon hızı ise kayma düzlemine etkiyen kayma gerilmesi bileşenine ve dolayısıyla malzemeye uygulanan normal gerilmeye bağlıdır. Bu nedenle, çekme sırasında dislokasyon veya deformasyon hızının artırılması için malzemeye uygulanan çekme gerilmesinin artırılması gerekmektedir. Başka bir deyişle, çekme hızı arttıkça dislokasyon hızı artmakta ve buna paralel olarak da ölçülen gerilme (mukavemet) değerleri artmaktadır (Meriç vd.1997).

Bir dislokasyon kayma mekanizmasından oluşan sürünme deformasyon mekanizması, göreceli olarak sürünme deformasyonunda hesaba katıldan daha yüksek değerdeki gerilme seviyelerinde oluşur.

### 3.2.2. Dislokasyon sürünmesi

Dislokasyon sürünmesi boşluk difüzyonu yardımı ile dislokasyon kayması tarafından oluşur. Buna göre kararlı sürünme oranı, gerilme zorlanmanın oranın  $h = \partial\sigma/\partial\delta$  ve termal dönüşüm ile yeniden dönüşüm ve dislokasyonların yok edilmesi  $r = \partial\sigma/\partial t$  arasındaki karşılaştırmanın bir dengesi olarak açıklanır. Bir kararlı sürünme durumunun oluşması dönüşümün oranının yeterince hızlı olması ve gerilme zorlanmasının bu iki faktör arasında bir denge oluşacak kadar yavaş olması ile meydana gelir;

$$\dot{\delta} = \frac{r}{h} = -\frac{d\sigma/dt}{d\sigma/d\delta} \quad (3.42)$$

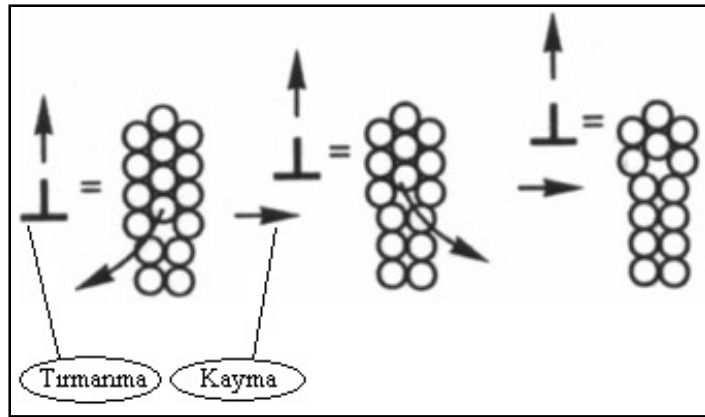
Gittus'a ait model deneysel uygulamalarla aynı değerleri verir. Buna göre bir gerilme modeli ve üç yöndeki bir ağdaki dislokasyonun difüzyon yardımcı hareketi üzerine temellendirilmiştir.

$$\dot{\delta}_s = \frac{16\pi^3 c_j D_v G b}{kT} \left(\frac{\sigma}{G}\right)^3 \quad (3.43)$$

$C_j$  = itme yoğunluğu

$D_v$  = kafes öz yayılım katsayısı  
 $G$  = kesme modülü  
 $b$  = dislokasyon vektörü  
 $\sigma$  = uygulanan gerilme  
 $k$  = Boltzman sabiti  
 $T$  = sıcaklık

Şekil 3.9’da sürünme deformasyonunda tırmanma ve kayma hareketlerinin nasıl bir sıra ile yapıldığı şematik olarak gösterilmiştir. Daire dislokasyonun kayma düzlemindeki engelleri(çözünmüş atomlar, diğer dislokasyonlar, çökeltiler) gösterir. Kristal kafes sistemi bir dislokasyon hareketine karşı temel direnci oluşturur. Kayma gerinmenin neredeyse tamamını üretirken tırmanma hızı kontrol eder.



Şekil 3.9 Dislokasyon sürünmesi

Weertman’a ait dislokasyon modelinde, sürünme deformasyonu dislokasyon kaymasının bir yoğunluk ile tanımlanan  $M(m^{-3})$  kaynağından oluşur. Dislokasyonlar kaynaklarından kenar dislokasyon dipollerini biçimlendirerek, bir başka kaynağın dislokasyonu ile karşılaşınca kadar yayılırlar. Bu dipoller difüzyon büyümesi ile hareket ettirilirlirler (Nabarro, 2004).

$$\dot{\delta} = \frac{\alpha D_v \sigma \Omega}{kT} \left( \frac{\sigma}{G} \right)^n \quad (3-44)$$

$\alpha = b^{-3.5}$  ile  $M^{-1/2}$ , nin nümerik çarpımına eşittir

$D_v$  = difüzyon katsayısı

$\sigma$  = uygulanan gerilme

$\Omega$  = atomik hacim

$n$  = malzeme sabiti= 3.5

$G$  = kesme modülü

$D_v$ , difüzyon katsayısı aşağıdaki gibi tarif edilir;

$$D_v = D_0 \exp(-Q/kT) \quad (3-45)$$

(2.7) denkleminde düzenlenirse,

$$\delta = B\sigma^n \exp(-Q/kT) \quad (3-46)$$

(3.44) denkleminde bir modifikasyon, kafes difüzyonunun ağır bastığı yüksek sıcaklıkta ve difüzyonun dislokasyon çekirdekleri boyunca ağır bastığı düşük sıcaklıklardaki sürünme için kullanılabilir.

### 3.2.3. Difüzyon sürünmesi

Difüzyon(yayınma) sürünmesi, göreceli olarak düşük gerilmelerde  $\sigma/G < 10^{-4}$  ve çok yüksek sıcaklıklarda mekanizmayı yönlendirir hale gelir. Nabarro ve Herring gerilme güdümlü atomik difüzyonun sürünme uygulamasını kontrol ettiğini ileri sürmüşlerdir. Burada boşlukların bir akışı vardır ve bu akış çekme gerilmelerine maruz kalmış tane sınırlarından basma gerilmelerine maruz kalmış tane sınırlarına doğrudur(Şekil 3.10). Bu şekilde gerilmeler, bir çoklu kristaldeki tanelerin yüzeylerinin üzerindeki atomların kimyasal potansiyelini değiştirirler. Aynı anda buna eş bir zıt yönde atomlar akışı meydana gelir ve buda tanenin uzamasına sebep olur. Nabarro- Herring sürünme denklemi;

$$\dot{\delta} \approx \frac{14\sigma b^3 D_v}{kTd^2} \quad (3.48)$$

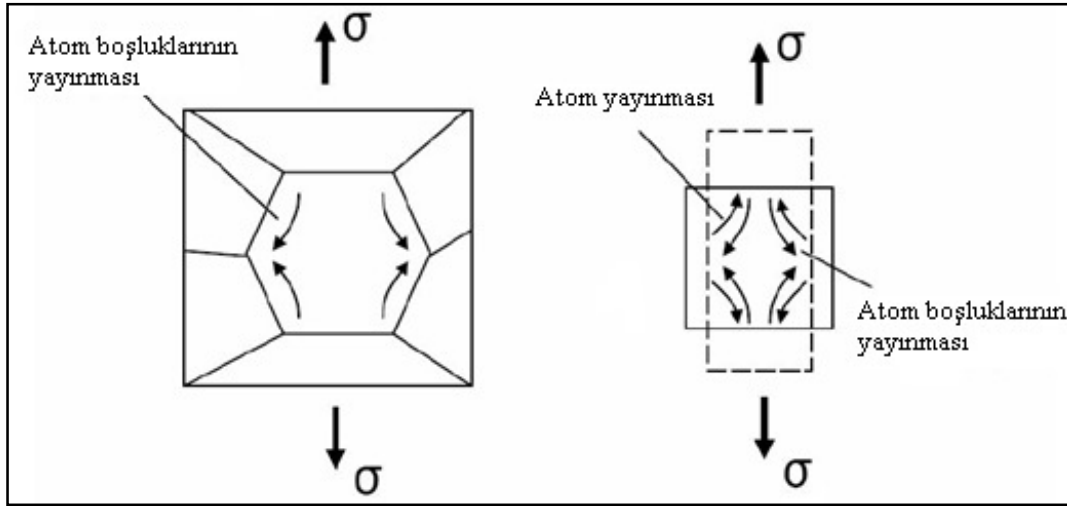
$d$  tane çapı,  $D_v$  kafes difüzyon katsayısı. Şunuda not etmeliyiz ki tane boyutu arttıkça sürünme oranıda azalır.



Düşük sıcaklıklarda tane sınırı difüzyonu üstün hale gelir. Coble tipi sürünme aşağıdaki şekilde tarif edilmiştir;

$$\delta \approx \frac{50\sigma b^4 D_{gb}}{kTd^3} \quad (3.49)$$

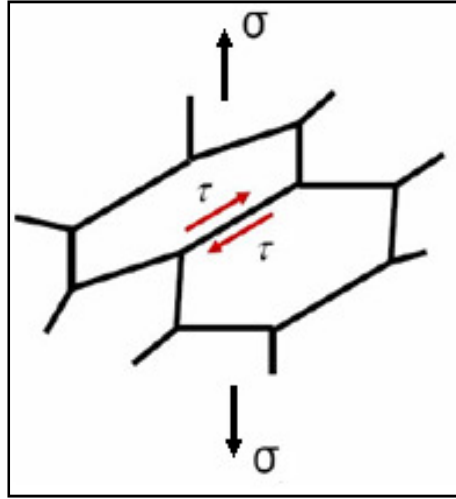
$d$  tane çapı,  $D_{gb}$  tane sınırı difüzyon katsayısı. Nabarro- Herring sürünmesi  $D_v/d^2$  ile, Coble sürünmesi ise  $D_{gb}/d^3$  ile orantılıdır.



Şekil 3.10 Difüzyon(yayınma) sürünmesi

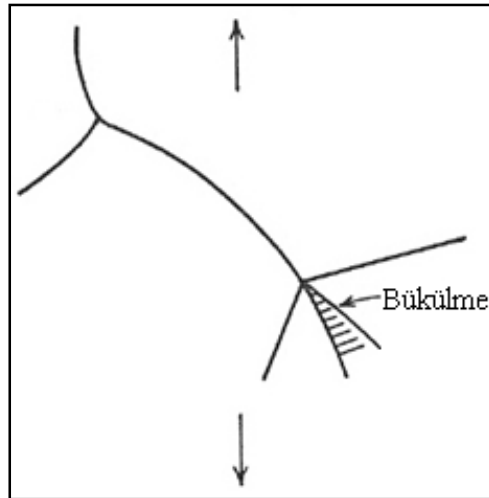
### 3.2.4. Tane sınırı kayması

Tane sınırı kayması düşük gerilme hızı ve yüksek sıcaklıkta meydana gelir. Tane sınırı kayması kararlı sürünmeye önemli bir katkı sunmazken taneler arası kopmanın başlatılmasında önemli bir rol oynar.



Şekil 3.11 Tane sınırı kayması

Tane sınırı deformasyonunun oluşması tane sınırlarında çatlakların oluşmasıyla meydana gelmez; tane sınırı boyunca oluşan gerinmenin başarıyla devam etmesi için bir deformasyon mekanizması olması gerekir. Bunun için uygun bir yol Şekil 3.12’de gösterildiği gibi, yüksek sıcaklıktaki bir tane sınırı gerinmesinin, bir tane sınırının bitimindeki bükülmeleri şekillendirilmesidir.



Şekil 3.12 Üçlü noktadaki bir bükülme şekillenmesi.

### 3.3. Kararlı sürünme için aktivasyon enerjisi

Kararlı sürünme  $0.5T_m$  sıcaklığının üzerindeki sıcaklıklarda baskın hale gelir. Sürünme uygulaması için en basit varsayım aşağıdaki denklemler ifade edilmiştir.

$$\dot{\delta} = A e^{(-Q/RT)} \quad (3-50)$$

$Q$  = sürünme için aktivasyon enerjisi

$A$  = malzeme yapısına bağlı bir faktör; entropi değişimi ve birim akıştaki titreşim frekansını içeren kompleks bir frekanstır

$T$  = mutlak sıcaklıktır

$R$  = gaz sabiti.  $R=k.N$ ,  $k$  Boltzman sabiti ve  $N$  Avogadro sayısı.

Sıcaklık farklılıkları genellikle sürünme deneyinde, aktivasyon enerjisini belirlemek için kullanılır. Gerilmenin sabit sıcaklığın değişken olduğu iki sürünme deneyine ait aktivasyon enerjisinin bulunabilmesi için (3.51) ifadesinden yararlanır;

$$A = \delta_1 e^{(Q/RT_1)} = \delta_2 e^{(Q/RT_2)}$$

$$Q = \frac{R \ln(\delta_1/\delta_2)}{\left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}\right)} \quad (3.51)$$

## 4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

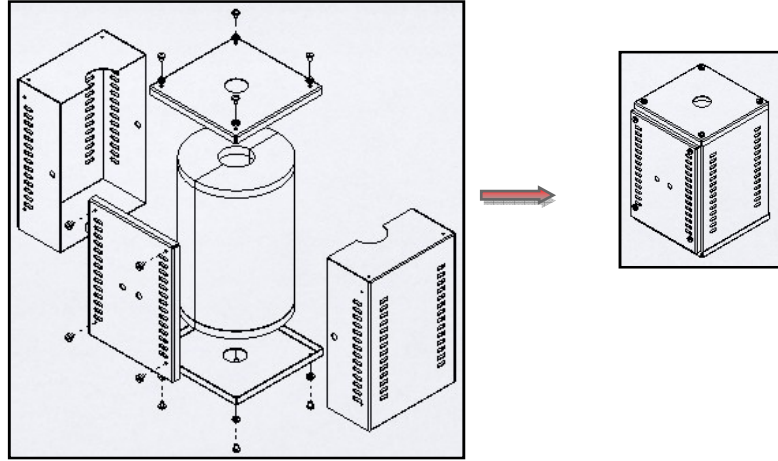
### 4.1. Malzeme ve metot

Çalışmada Alman Memory-Metalle GmbH firmasından temin edilmiş 0.5mm çapında tek yönlü şekil hafıza etkisi kazandırılmış yaklaşık eş atomlu Ni ve Ti içeren NiTi alaşımı kullanılmıştır (~Ni at.%50). Tel üzerinde bulunan ince ancak yoğun oksit tabakası deneyler öncesinde giderilmiştir. Çalışma boyunca her bir deney ikişer defa tekrar edilmiş olup toplamda 24 adet deney yapılmış ve tekrarlanan deneylerin ortalamaları alınarak deney sonuçları çıkarılmıştır.

#### Fırın tasarımı ve imalatı

Sürünme deneyi sırasında kullanılacak ve yüksek sıcaklıkların elde edilmesinde kullanılan fırın ve ona bağlı kontrol panosu ile fırının aşağı yukarı ve dönme hareketlerini rahat yapabileceği ayak ve askı mekanizması da tez kapsamında tasarlanıp üretilmiştir.

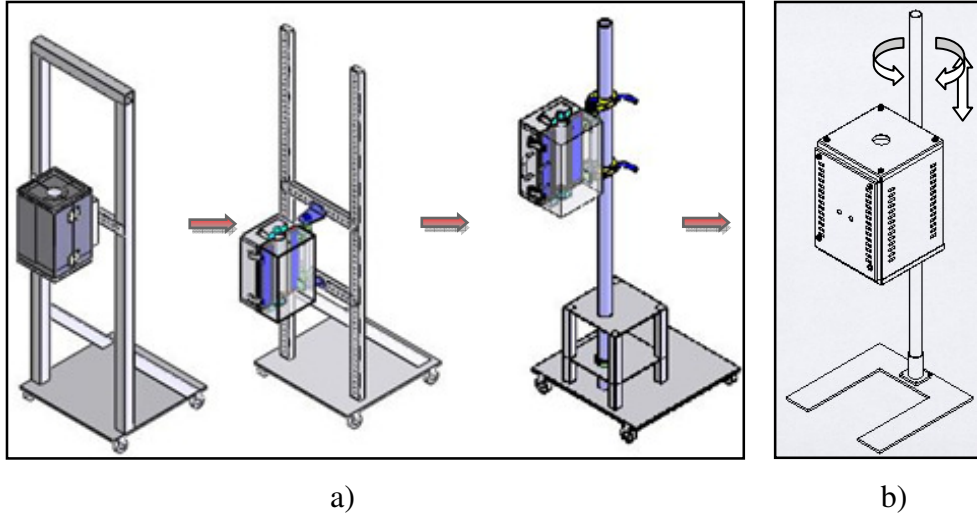
Fırının ana gövdesi içinde rezistansları barındıran, ateş tuğlası ve yalıtım malzemesi ile bu silindirik ana gövdeyi saran galvaniz sactan yapılmış iç gömlekten oluşmuştur. Ana gövdenin üzerine ise paslanmaz sactan yapılmış dış gömlek monte edilerek ısının dışarı iletimi tamamen engellenmiştir.



Şekil 4.1 Fırının detay görünüşü

Fırın tasarımı deney sınır şartlarını göze alarak yapılmış ve maksimum 1200°C'ye kadar çalışması garanti altına alınarak deneylerin sorunsuz tamamlanması sağlanmıştır.

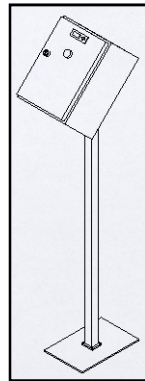
Fırın ile ayak ve askı mekanizması tasarımı yapılırken, fırının çekme düzeneklerine kolay adapte edilebilmesi, değişik boyutlardaki numunelere ait deneylerin yapılabilmesi gibi faktörler dikkate alınmıştır. Fırın ve ona bağlı mekanik aksam değişik bir dizi tasarım çalışmasının ardından Şekil 4.2’de görüldüğü üzere son halini almıştır.



Şekil 4.2 a)Prototip olarak üretilen değişik fırın düzenekleri b)Fırın düzeneği

Kontrol panosuna ait elektrik devresi ve mekanik aksam(pano, ayak ve karkas) tasarımı yapılmış ve elektromontajı gerçekleştirilmiştir(Şekil 4.3). Mekanik aksam tasarlanırken, ayakta duran ve orta boylu bir insanın panodan fırın kontrolünü rahatlıkla yapabilecek olması esas alınmıştır.

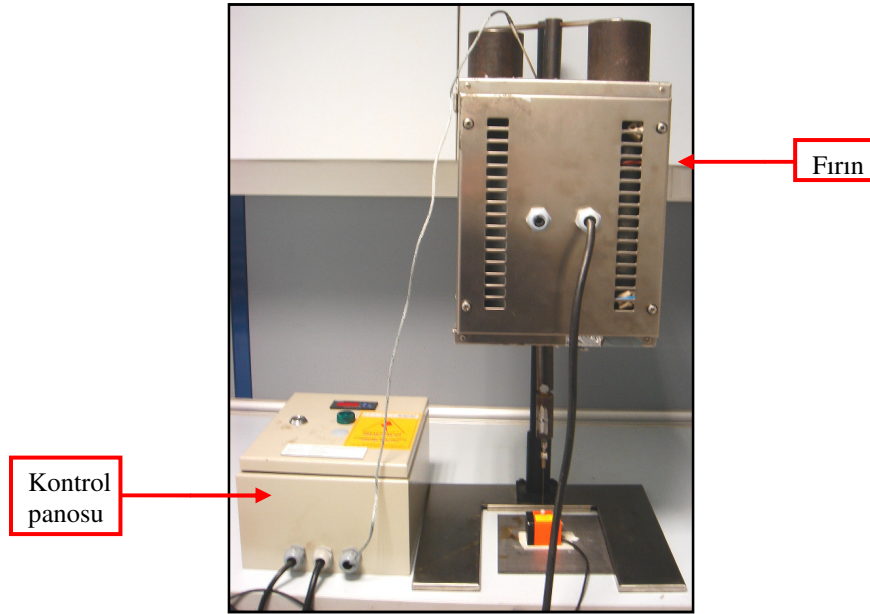
Kontrol panosu sıcaklık bilgisini fırından alan, sıcaklık değerinin ayarlanmasını sağlayan gösterge cihazı ile termoeleman ve fırın rezistanslarının devrede olduğunu gösteren sinyalden oluşmuştur. Fırının devreye girip çıkarılması kontrol panosu içindeki sigortalardan sağlanır ve bu sigortalardan biri fırının elektrik enerjisini temin ederken diğeri sıcaklık gösterge cihazının enerjisini temin eder.



Şekil 4.3 Kontrol panosu

Kontrol panosunun imalatından sonra fırın ve kontrol panosu arasında ki elektrik bağlantıları tamamlanmış ve fırın deneye hazır hale getirilmiştir(Şekil 4.4).

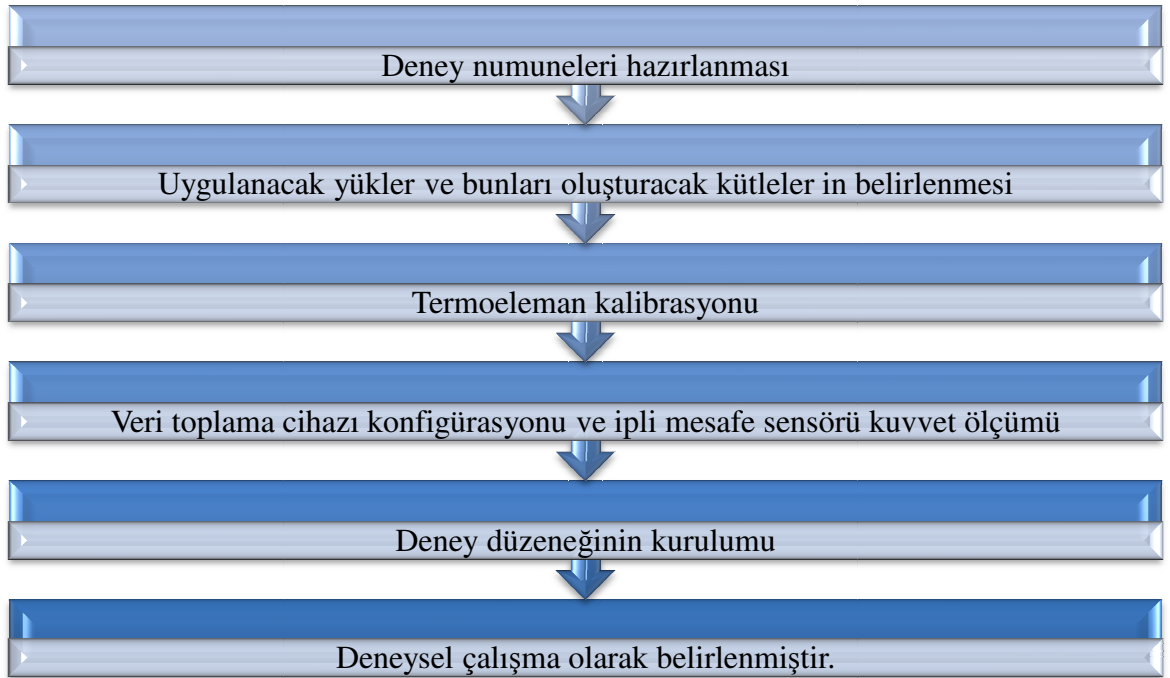
Deney düzeneğinde kullanılan fırının sıcaklık kontrolü, kontrol panosuna bağlı termoeleman ve sıcaklık kontrol cihazıyla yapılır. Deney sıcaklığına ulaşmak için kontrol panosunda sıcaklık değeri girilir ve ardından sıcaklığın yükselerek istenilen sıcaklığa gelmesi beklenir. Deney sıcaklığına ulaşır ulaşılmaz, termoelemandan alınan bilgi ile fırının rezistanslarına elektrik enerjisinin gitmesini sağlayan kontaktörler açık pozisyona gelir ve fırın sıcaklığı tolerans değeri ( $\pm 5^{\circ}\text{C}$ ) kadar düşer ve ardından tekrar kontaktör kapanır ve fırın sıcaklığı deney sıcaklığına ulaşana kadar artar. Bu döngü cihaz kapatılana kadar devam eder ve sıcaklık aralığının belirli toleranslar dahilinde sabit kalması sağlanmış olur.



Şekil 4.4 Deney düzeneğinde kullanılan fırın ve kontrol panosu

## Sürünme deneyi algoritması

Sürünme deneyinde uygulanacak prosedürün algoritması Şekil 4.5’de verilmiştir;



Şekil 4.5 Sürünme deneyi algoritması

## Deney numuneleri hazırlanması

Sürünme deneyi için numuneler TS 279 EN 10291 standardı esas alınarak numune boyutu (4.1) bağıntısı ile hesaplanmıştır ;

$$\left( \frac{L_{r0}}{S_0} \right)^k \quad (4.1)$$

$L_{r0}$  : İlk referans uzunluk

$S_0$  : Paralel uzunluğun ilk kesit alanı

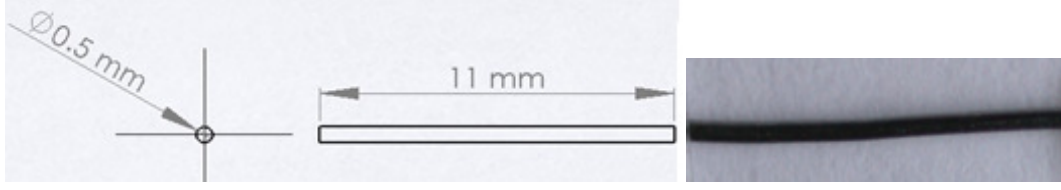
$k$  : 5'e eşit veya büyük olmalıdır

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

hesaplanmıştır.

TS 279 EN 10291'ye göre hesaplanan \_\_\_\_\_ ait ölçünün, çok küçük olması sebebiyle bu ölçünün beş katı alınarak, NiTi alaşımlı deney numuneleri, 11 mm uzunluğunda 0.5 mm çapında 24 adet telden hazırlanmıştır. Numune şekil ve boyutu Şekil 4.6'de verilmiştir.



a) Numune boyutları

b) Numune fotoğrafı

Şekil 4.6 Sürünme deneyinde kullanılan numune

### Uygulanacak yükler ve bunları oluşturacak kütlelerin belirlenmesi

Deney için gerekli olan sabit yük değerlerini oluşturan 0.1 mg ölçüm hassasiyetindeki çekme çeneleri, METTLER TOLEDO marka ve AB304-S/FACT modelde ki hassas terazide tartılmış çıkan sonuçlar Çizelge 4.1’de verilmiştir.



Şekil 4.7 Hassas terazi

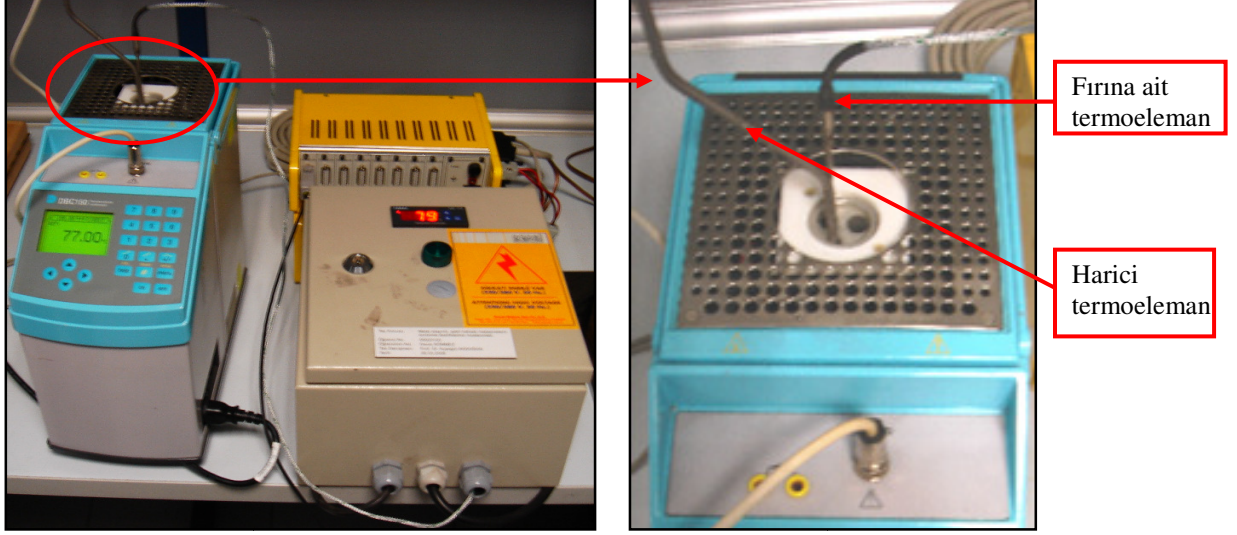
Çizelge 4.1 Sabit yük değerleri

Kütle(kg)	Kuvvet(N)
1.14	11.4
1.43	14.3
1.56	15.6
1.68	16.8



## Termoeleman kalibrasyonu

Sürünme sıcaklıklarının ölçümünde kullanılan termoelemanın kalibrasyonu 100°C için, DRUCK DBC150 sıcaklık kalibrasyon cihazında yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre termoelemanla kalibrasyon cihazı arasındaki sıcaklık farkının maksimum 1-2°C olduğu görülmüştür. 1-2°C' lik farkın TS 279 EN 10291 standardında belirtilen değerden( $\pm 5^\circ\text{C}$ ) küçük olması sebebiyle sıcaklık kontrolünün uygun şekilde yapılabildiği kabul edilmiştir.

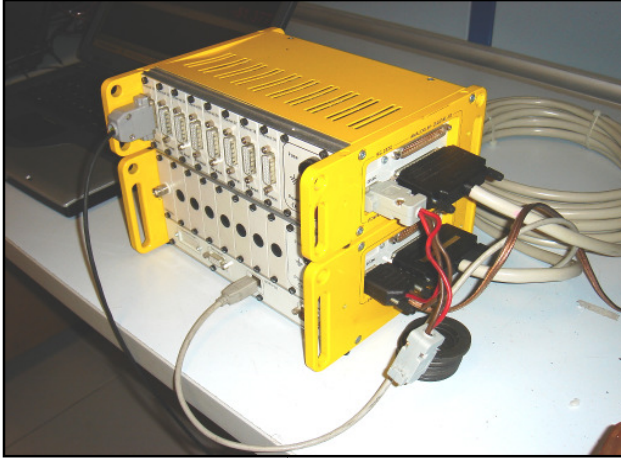


Şekil 4.8 Sıcaklık kalibrasyon cihazı

Kullanılan termoelemanın kalibrasyonunun doğruluğunu kontrol etmek amacıyla sıcaklık kalibrasyon cihazında bulunan iç ve dış iki referans ölçüm noktası esas alınarak iç referans ölçüm noktasında, sıcaklık kalibrasyon cihazının kendi içinde oluşan ısı ile fırına ait termoeleman karşılaştırılmış, dış referans ölçüm noktasında ise fırına ait termoeleman gibi yine başka bir termoeleman cihaza takılmış ve bu iki termoeleman arasındaki sıcaklık farkı gözlenmiştir.

## Veri toplama cihazı konfigürasyonu ve ipli mesafe sensörü kuvvet ölçümü

Sürünmeye bağlı deformasyon ölçümü için ESAM(Electronic Signal Acquisition Module) marka yazılım ve donanım ile buna bağlı ipli mesafe sensörü kullanılmıştır. Esam Software 3.0 yazılımı ile ipli mesafe sensöründen alınan zamana bağlı gerinme değerleri analiz edilebilmekte, verilerin filtre edilmesi, eğrilerin birleştirme-ayırma gibi işlemleri ve farklı mühendislik eğrilerinin çıkarılması kolaylıkla yapılabilmektedir.



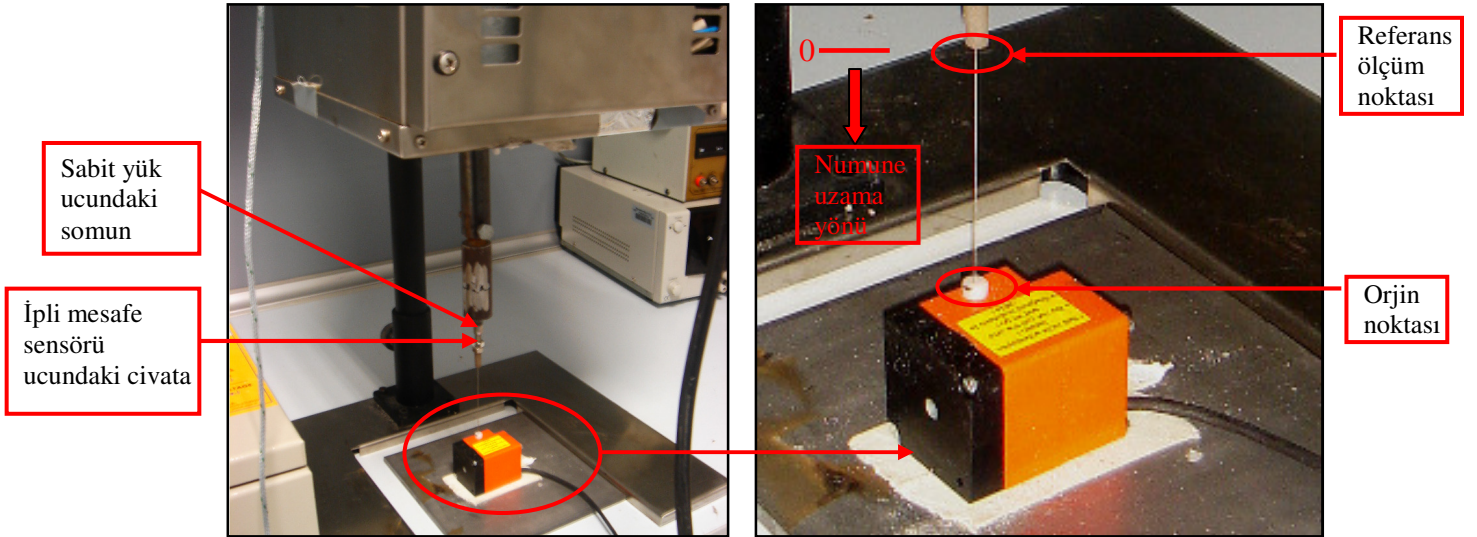
a) ESAM



b) Yazılım arayüzü

Şekil 4.9 Deformasyon verisi aktarma cihazı a)ESAM ve b)Yazılım arayüzü

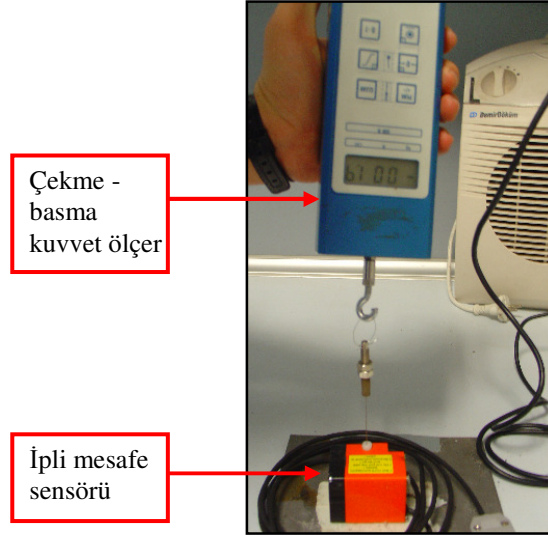
İpli mesafe sensöründen deney sırasında doğru veri alabilmek için deneye başlamadan önce konfigürasyonun yapılması gerekir. Konfigürasyonda en önemli aşama ipli mesafe sensörünün referans ölçüm noktasının belirlenmesidir. Sensör üzerindeki ipin uç noktasındaki civatanın sabit yüke bağlanmasıyla ipte uzama meydana gelir ve bu mesafe 0(sıfır) olarak belirlenip, sensörün referans ölçüm noktası olarak kabul edilir(Şekil 4.10).



Şekil 4.10 İpli mesafe sensörü

İpli mesafe sensörüne ait ip bir çekme kuvveti oluşturacağından burada oluşacak kuvvet, HAHN & KOLL marka 707 model çekme - basma kuvvet ölçer cihazıyla belirlenmiştir(Şekil 4.11). Çekme - basma kuvvet ölçer cihazında ipli mesafe sensörünün

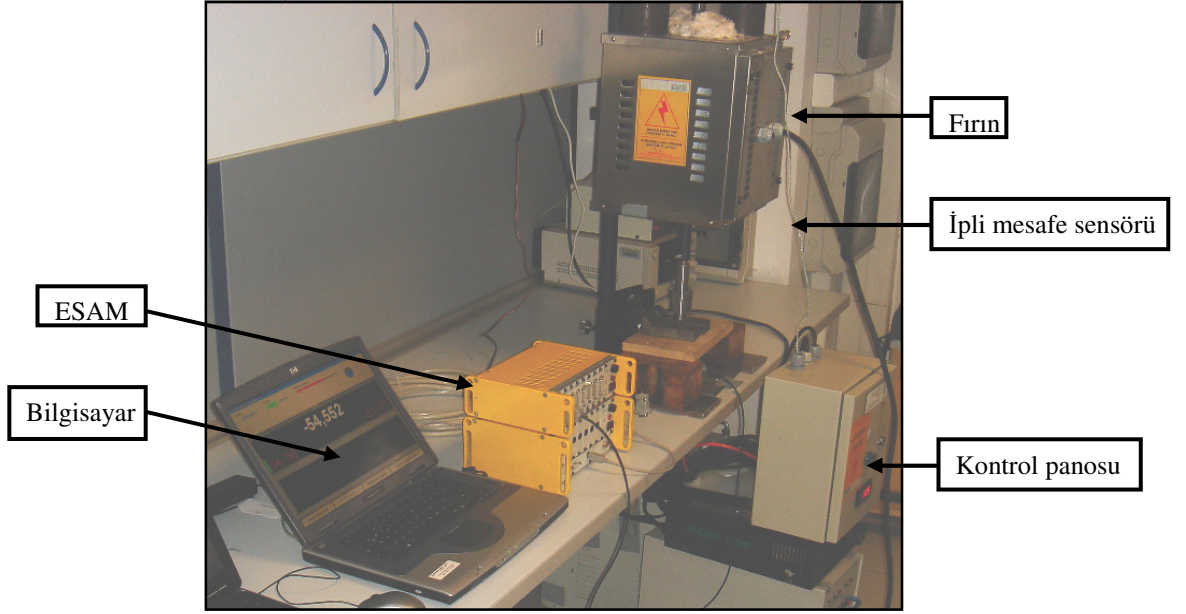
oluşturduğu çekme kuvveti 1.9N olarak belirlenmiştir. İpli mesafe sensörünün oluşturduğu çekme kuvveti, tezin hesap kısmında n ve Q değerlerinin hesaplanmasında kullanılmıştır.



Şekil 4.11 Çekme - basma kuvvet ölçer

#### **Deney düzeneğinin kurulumu**

Çalışma için tasarımı ve imalatı yapılan fırın, Y.T.Ü Makina Fakültesi Makine Mühendisliği Malzeme ve İmalat Anabilimdalı Laboratuvarı'nda bulunan 20kN'luk çekme cihazına bağlanarak sürünme deneyleri gerçekleştirilmek istenmiştir. Ancak çekme cihazının sabit yük veya gerilme şartlarında çalışmaması, ve sabit yüke bağlı olarak oluşan gerinmenin ölçülememesi nedeniyle deney düzeneği Mercedes Benz Türk A.Ş Test Merkezi'nde kurulmuş ve test merkezindeki ölçüm cihazlarından faydalanılmıştır.



Şekil 4.12 Sürünme deney düzeneği

#### 4.2. Sürünme deneyi yapılışı

Deney numunesi, her iki ucu, yüksek sıcaklığa dayanıklı 304 kalite paslanmaz çelikten yapılmış çekme çenelerine vidalanarak elektrik fırını içerisine alınmış ve istenilen sıcaklığa(575-650°C) kadar ısıtılmıştır. Sıcaklık kontrolü için termoeleman kullanılmış olup istenilen sıcaklığa ulaşıldığında numunenin bir ucuna sabit yük uygulanarak zamana bağlı olarak gerinme değerleri iple mesafe sensörü ile ölçülmüştür.

Deney sırasında uygulanan değişik sıcaklık ve çekme kuvveti değerleri Çizelge 4.2’de verilmiştir.

Çizelge 4.2 Sıcaklık ve sabit çekme kuvveti değerleri

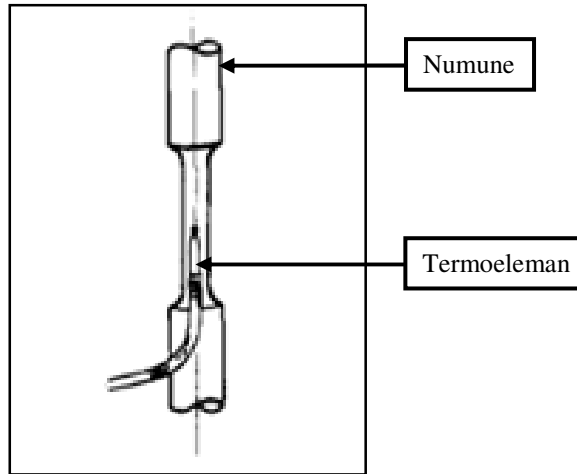
Kuvvet(N)	Sıcaklık(°C)
11.4 N	575-600-625-650 °C
14.3 N	575-600-625-650 °C
15.6 N	650 °C
16.8 N	575-600-625°C

Deney sırasında uygulanan metodoloji genel hatlarıyla aşağıda ki gibi sıralanmıştır;

- NiTi şekil hafızalı alaşıma ait numuneler, sabit yüklerin oluşmasını sağlayan çekme çenelerine bağlanmış ve ardından çenelerle birlikte fırın içerisine yerleştirilmiştir.

Çekme kuvvetini oluşturacak çenenin altına destek konularak termal denge için beklenen süre zarfında her bir deney numunesinin deformasyona uğraması engellenmiştir.

- Ayrıca, deney numunelerinin tam ortasına gelecek şekilde termoeleman konularak fırının iki açık ucu 1200°C sıcaklığa dayanıklı yalıtım malzemesi ile kapatılmıştır. Böylece numuneler sıcaklık kontrolü için hazır hale getirilmiştir.
- TS 279 EN 10291 normunda belirtilen esaslara göre fırın içine yerleştirilen numuneler deney sıcaklığına (575-650°C) ısıtılarak yükü uygulayan kütleler(çekme çenesi) ile birlikte termal dengeye getirilmiştir. Deney numunelerine kuvvet uygulanmadan(alttaki çekme çenesi serbest bırakılmadan) numuneler en az bir saat önceden fırın içerisinde bekletilmiştir. Isıtma süresince, deney numunesinin sıcaklığı, herhangi bir anda, toleranslarıyla( $\pm 5^\circ\text{C}$ ) birlikte istenilen deney sıcaklığını (T) aşmamıştır.



Şekil 4.13 Deney numunesinin tam merkezine yerleştirilmiş termo-eleman(Hufnagel vd. 1984).

- Bir saatlik ısıtma işleminin ardından çekme çenesinin altındaki destek çekilerek serbest bırakılmış ve numune gerinmeye başlamıştır. Çekme çenesinin serbest bırakılma işlemi elle yapıldığı için mümkün olduğunca yavaş hareket edilmiş ve numuneye şok kuvvet uygulanmasının önüne geçilmeye çalışılmıştır.
- Deneyin başlamasıyla aynı anda ESAM'da çalıştırılarak NiTi alaşımının 575-650°C arasındaki sıcaklıklarda ki ve 11.4-16.8N arasındaki farklı sabit çekme kuvvetlerinde ki sürünme gerinim oranları ölçülmüştür.



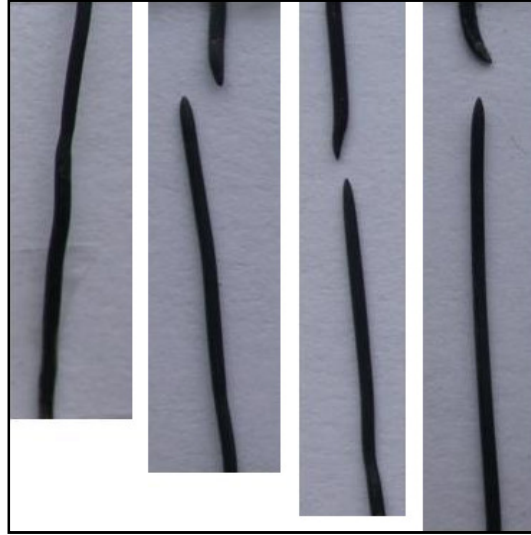
## 5. DENEYSEL SONUÇLAR

### 5.1. Sıcaklık ve gerilmeye bağlı deney sonuçları

Farklı gerilme ve sıcaklıklarda ki  $\Delta t$ (zaman) ve  $\delta$ (gerinme) değerlerinden yararlanılarak sürünme eğrileri, ikincil sürünme eğrileri ve sürünme ömrü eğrileri çıkarılmıştır. Elde edilen eğrilerden yararlanılarak gerilme üst sabiti, aktivasyon enerjisi hesaplanmış ve Larson-Miller eğrisi oluşturulmuştur.

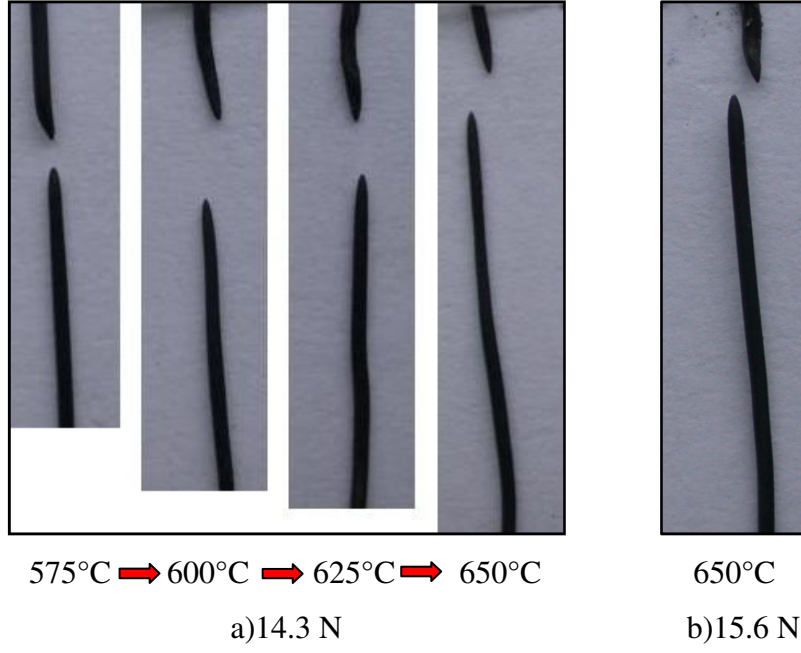
11.4-14.3 ve 16.8 N'luk sabit çekme kuvvetleri ve 575-650°C arasındaki sıcaklıklara maruz kalmış numunelerin makro fotoğrafları sırasıyla Şekil 5.1-5.2-5.3'de verilmiştir.

11.4N'luk çekme kuvveti ve 575°C sıcaklıktaki, sürünme deneyi numune kopmadan sonlandırılmış ve numune fotoğrafı Şekil 5.1'de gösterilmiştir.



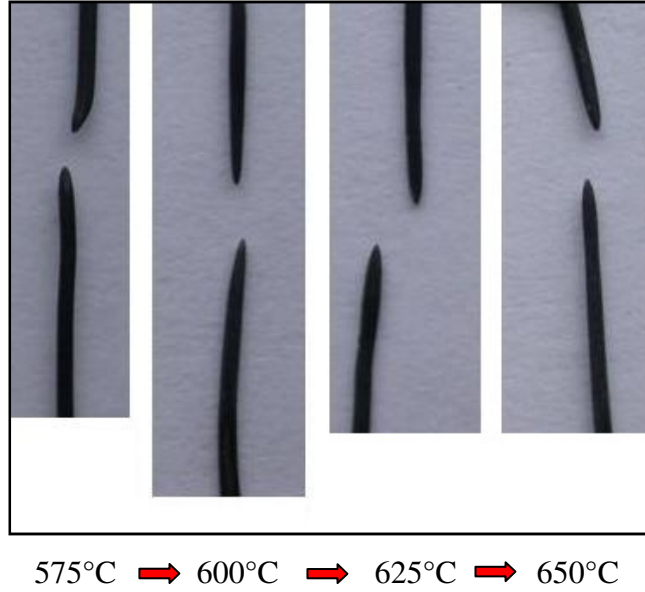
575°C → 600°C → 625°C → 650°C

Şekil 5.1 11.4N'luk çekme kuvveti altında kopmuş numune görüntüleri



Şekil 5.2 Sürünme kopmasına maruz kalmış numune görüntüleri

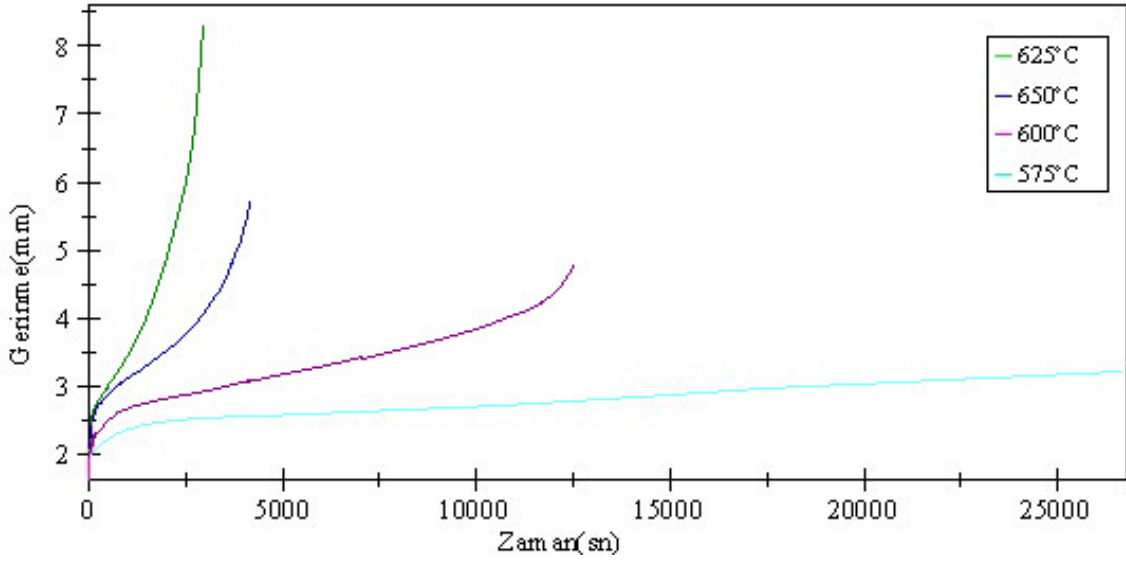
Şekil 5.2a'da 14.3 N'luk sabit çekme kuvvetine maruz kalmış numunenin sıcaklıkla doğru orantılı olarak artan gerinmesi görülebilmektedir. Şekil 5.2b' de 15.6 N'luk sabit çekme kuvveti ve 650°C sıcaklık değerlerinde yapılmış deneye ait kopmuş numunenin fotoğrafı gösterilmiştir.



Şekil 5.3 16.8N' luk sabit çekme kuvveti altındaki kopmuş numune görüntüleri

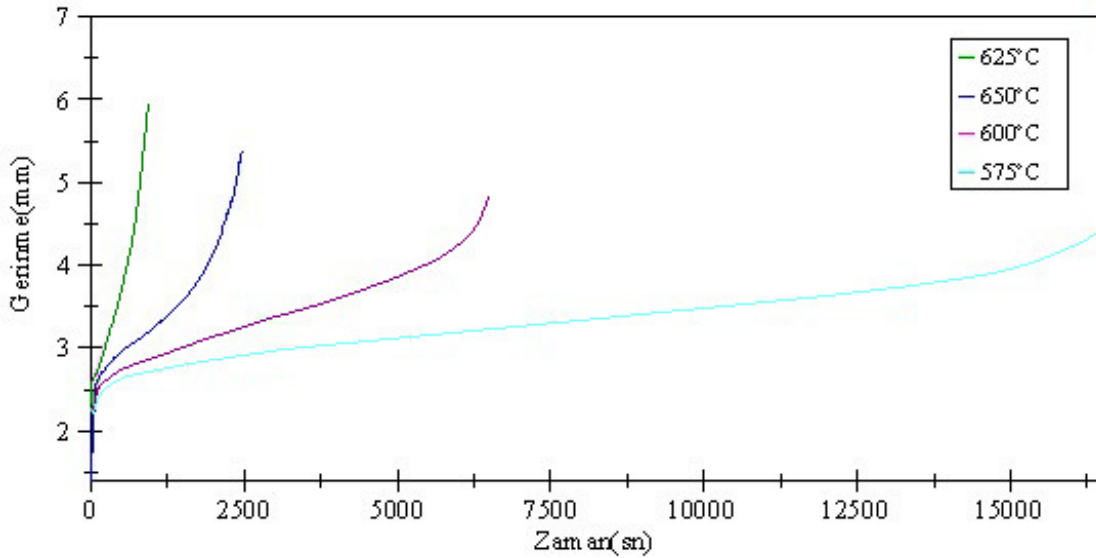
NiTi şekil hafızalı deney numunesinin, 11.4-16.8 N çekme kuvveti ve 575-650°C arasında ki sıcaklık değerleri için sürünme eğrileri Şekil 5.4-5.5-5.6' da gösterilmiştir. Sabit

çekme kuvveti altında yapılan bu deneylerde, sıcaklık artışıyla birlikte numunelerin sürünme ömür süresi azalırken, gerinme hızları(gerinme/zaman) ve gerinmeleri artmıştır.



Şekil 5.4 11.4N'luk sabit çekme kuvveti için sürünme eğrileri

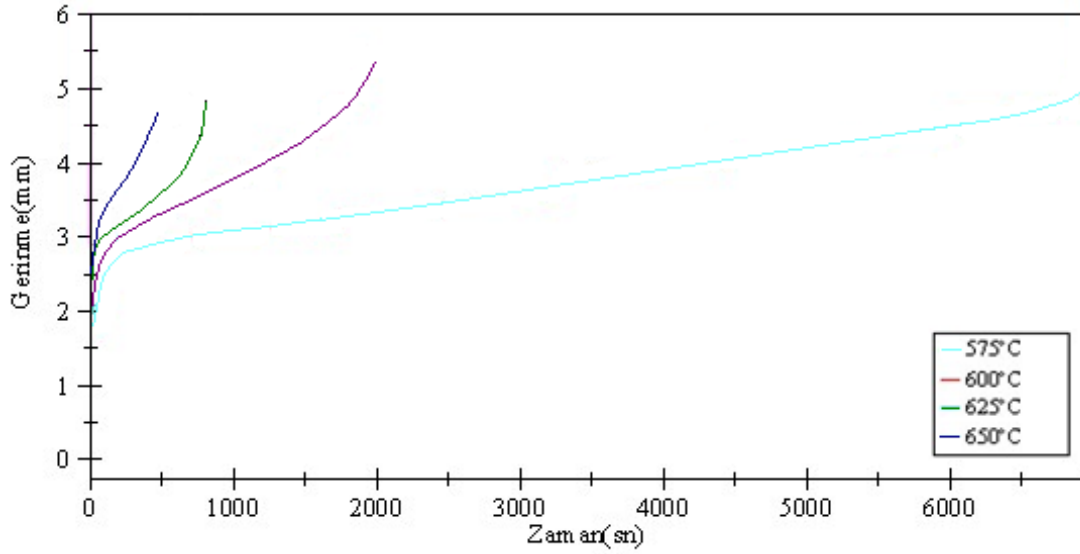
11.4N'luk sabit çekme kuvveti için numuneye ait eğrilerde de görüldüğü üzere 600-625-650°C sıcaklık değerleri için deney numune koptuktan sonra sonlandırılırken, 575°C'de deney çok uzun sürmesi sebebiyle numune sürünme kopmasına maruz kalmadan deney sonlandırılmıştır.



Şekil 5.5 14.3N'luk sabit çekme kuvveti için sürünme eğrileri



14.3N'luk sabit çekme kuvveti altında yapılan sürünme deneyleri, numunelerde sürünme kopması olana kadar devam ettirilmiştir.

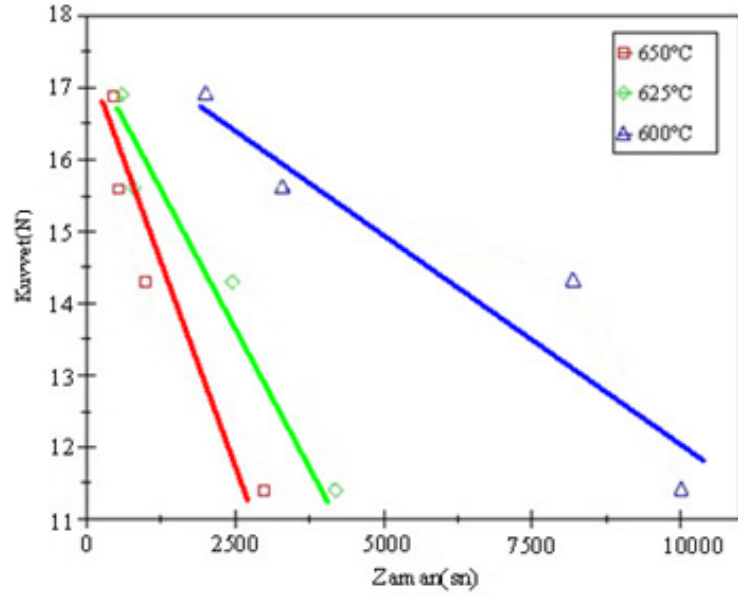


Şekil 5.6 16.8N'luk sabit çekme kuvveti için sürünme eğrileri

Numuneye uygulanan sabit çekme kuvvetinin 16.8N olduğu deneylerde, gerilme hızları sıcaklıkları sıcaklıkla birlikte artmış ancak gerilme 625 ve 650°C sıcaklık değerlerinde Şekil 5.6'da görüldüğü üzere 575 ve 600°C'ye göre artmamıştır. Uygulanan yükün ve deney sıcaklığının çok yüksek olması ve iyi bir sürünme eğrisinin de görülmemiş olması bu çelişki gibi görünen durumun sebebidir. Bölüm 3'te Şekil 3.2'de verilen eğrilerden de görüleceği üzere gerilmenin ve sıcaklığın yüksek olduğu deney şartlarında üçüncül sürünme bölgesi görülmeden, deney numunesi sürünme kopmasına maruz kalmaktadır. Buda sıcaklık ve gerilmenin çok yüksek olduğu durumlarda neden gerilmenin düşük olduğunu açıklamaktadır.

Sürünme deneyleri sonucunda elde edilen 12 eğriden yola çıkarak çeşitli eğriler çıkarılır ve bu eğrilere ait değerler kullanılarak sürünme hesapları yapılır.

Sıcaklık ve yükün bir fonksiyonu olarak Şekil 5.7'de verilen zamana bağlı sürünme ömür eğrileri numunenin sürünme davranışı konusunda özet bir bilgi sunar. Sürünme ömür eğrileri incelendiğinde yük ve sıcaklık artışı numunelerin sürünme ömürlerini ters oranda etkiler ve numunelerin sürünme direncini düşürür.



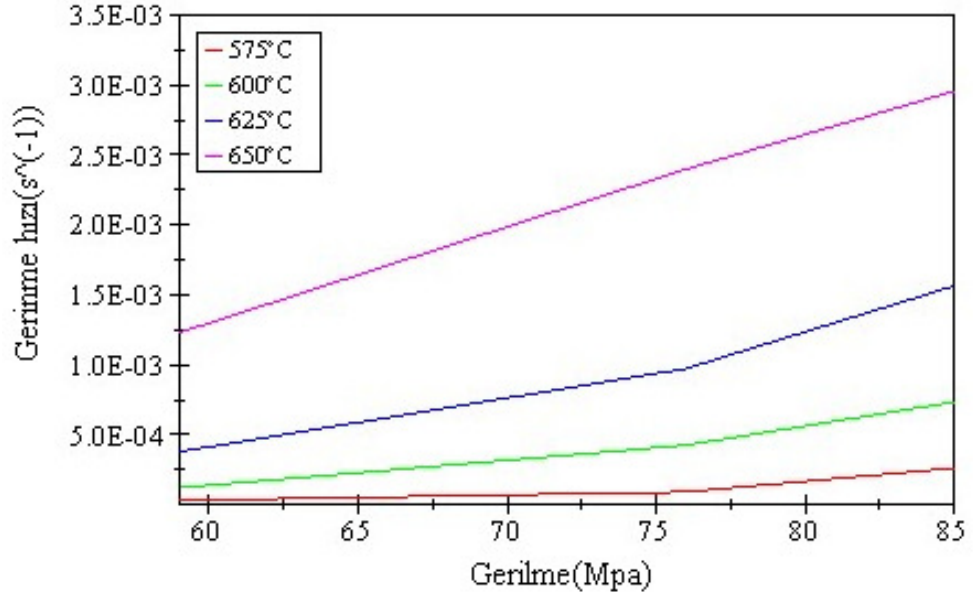
Şekil 5.7 Kuvvet(N) ve sıcaklığa bağlı sürünme ömrü

Sürünme eğrilerini kullanarak çıkarılan diğer bir eğri çeşidi olan ikincil sürünme eğrilerden faydalanarak sıcaklık ve gerilmenin, gerilme hızına olan etkisi incelenebilir ve bu eğrilerden gerilme üst sabiti ve aktivasyon enerjisi hesaplanabilir. İkincil sürünme eğrileri, Kararlı sürünme bölgesine ait olan sıcaklık ve gerilme değerleri (Çizelge 5.1), Şekil 5.4-5.5-5.6'da verilen gerilme hızının sabit olduğu sürünme eğrilerin çıkarılmıştır.

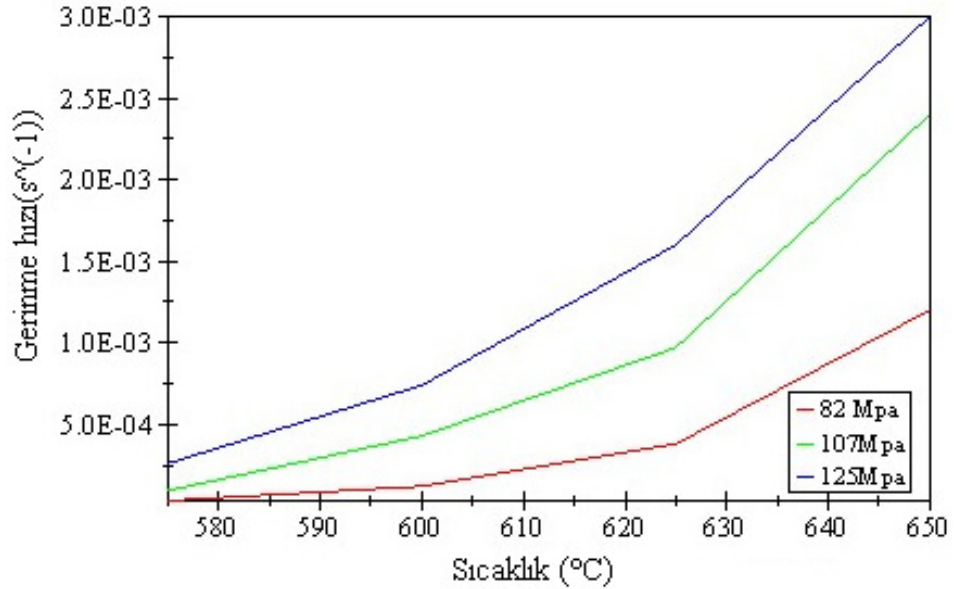
Çizelge 5.1 Sıcaklık ve gerilmeye bağlı ikincil sürünme değerleri

Gerilme(Mpa)	Sıcaklık(°C)	$\Delta t(s)$	$\dot{\epsilon}(mm/s)$
82	575	9755	3.08E-05
82	600	2503	1.20E-04
83	625	844	3.79E-04
102	650	520	1.23E-03
102	575	4283	9.34E-05
107	600	2818	4.26E-04
107	625	462	9.74E-04
104	650	221	2.40E-03
125	575	2278	2.63E-04
124	600	442	7.35E-04
121	625	288	1.56E-03
127	650	88	2.95E-03

İkincil sürünme eğrilerinde hem gerilmenin hem de sıcaklığın artışıyla birlikte gerinme hızının arttığı görülmektedir. İkincil sürünme eğrileri numunelerin sürünme karakteristiklerinin belirlenmesinde iyi bir veri sunarken, gerilme üst sabiti ve aktivasyon enerjisinin bulunmasında da kullanılır(Şekil 5.8 ve 5.9).



Şekil 5.8 Gerilmenin bir fonksiyonu olarak ikincil sürünme eğrileri



Şekil 5.9 Sıcaklığın bir fonksiyonu olarak ikincil sürünme eğrileri

## 5.2 Gerilme üst sabiti ve aktivasyon enerjisi hesabı

Gerilme üst sabiti ve aktivasyon enerjisi, gerilme, sıcaklık ve gerilme hızına bağlı karakteristikler olduğu için sürünmeye maruz kalan bir numunenin sürünme davranışı hakkında önemli bilgiler verir.

Aktivasyon enerjisi, sıcaklığın artışıyla birlikte atomların hareketliliğinin artıp difüzyon sonucu yer değiştirebilmeleri için aşmaları için gereken sınır enerjidir. Atomların bu engeli aşmalarıyla hızları artarken deney numunelerinin gerilme hızı artar.

Gerilme üst sabiti sıcaklığın sabit olduğu ancak gerilme ve sürünme hızının değişken olduğu ikincil sürünme eğrilerden hesaplanır ve malzemelerin sürünme davranışının açıklamasında çok sık kullanılır.

### Gerilme üst sabiti

Gerilme üst sabiti ve aktivasyon enerjisini bulabilmek için numunenin 82 ve 107Mpa gerilme değerleri ile bu gerilmelere ait 600 ve 625°C sıcaklık değerlerinden yararlanılmıştır(Hidaka, 2006).

$$600 \text{ }^\circ\text{C ve } 82\text{MPa için } \dot{\delta} = 1.2\text{E} - 04$$

$$600 \text{ }^\circ\text{C ve } 107\text{MPa için } \dot{\delta} = 4.26\text{E} - 04$$

600 °C' de 82 ve 107MPa için ikincil sürünmeye ait değerler (3-12) bağıntısında yerine yazılırsa;

$$\dot{\delta} = B \sigma^n$$

$$1.2\text{E} - 04 = B * 82^n$$

$$4.26\text{E} - 04 = B * 107^n$$

gerilme üst sabiti  $n=4.5$  bulunur.

### Aktivasyon enerjisi hesabı

$$600 \text{ }^\circ\text{C ve } 82\text{MPa için } \dot{\delta} = 1.20\text{E} - 04$$

$$625 \text{ }^\circ\text{C ve } 82\text{MPa için } \dot{\delta} = 3.79\text{E} - 04$$

İkincil sürünme hızı (3-3) bağıntısından yararlanarak;

$$\dot{\delta} = B \sigma^n \exp(-Q/RT)$$

600 °C ve 82MPa için

$$1.20E - 04 = B \sigma^n \exp(-Q/8.31 * 873)$$

625 °C ve 82MPa için

$$3.79E - 04 = B \sigma^n \exp(-Q/8.31 * 898)$$

aktivasyon enerjisi  $Q = 300.26 \text{ kJ/mol}$  olarak hesaplanır.

### 5.3. Larson-Miller eğrisinin çıkarılması

Larson-Miller eğrisinin çıkarılması ile numunelerin çalışılmayan deney sıcaklıkları ve gerilme aralıklarında ki sürünme ömrüne ait veriler kolaylıkla elde edilebilir. Bu amaçlarda Larson Miller eğrisini çıkarmakta kullanılan değerler Çizelge 5.2’de verilmiştir.

Larson-Miller eğrisinin aksenal değerlerinin bulunmasında (3-4) denkleminde faydalanılır(Hearn, 2006).

$$P = T * (\ln t + C) \quad (3-4)$$

Çizelge 5.2 NiTi sürünme değerleri

Kuvvet(N)	Sıcaklık(K)	Sıcaklık(°C)	Ömür(saat)
14.3	873	600	8185
14.3	923	650	980
15.6	923	650	515
16.8	848	575	6989

(3-4) denklemindeki C katsayısı yükün 14.3 N ve sıcaklığın 600-650°C olduğu değerlerden;

$$\begin{aligned} T_1 * (\ln t_1 + C) &= T_2 * (\ln t_2 + C) \\ 873 * (\ln 8213 + C) &= 923 * (\ln 980 + C) \\ C &= 30.2 \end{aligned}$$

bulunur. C katsayısının bulunmasıyla Çizelge 5.2'de belirtilen yük ve sıcaklıklara ait Larson-Miller parametreleri bulunur.

$$P_1 = T_1 * (\ln t_1 + C)$$

$$P_1 = 873 * (\ln 8213 + 30.2)$$

$$P_1 = 34.26$$

$$P_2 = T_2 * (\ln t_2 + C)$$

$$P_2 = 923 * (\ln 980 + 30.2)$$

$$P_2 = 34.26$$

$$P_3 = T_3 * (\ln t_3 + C)$$

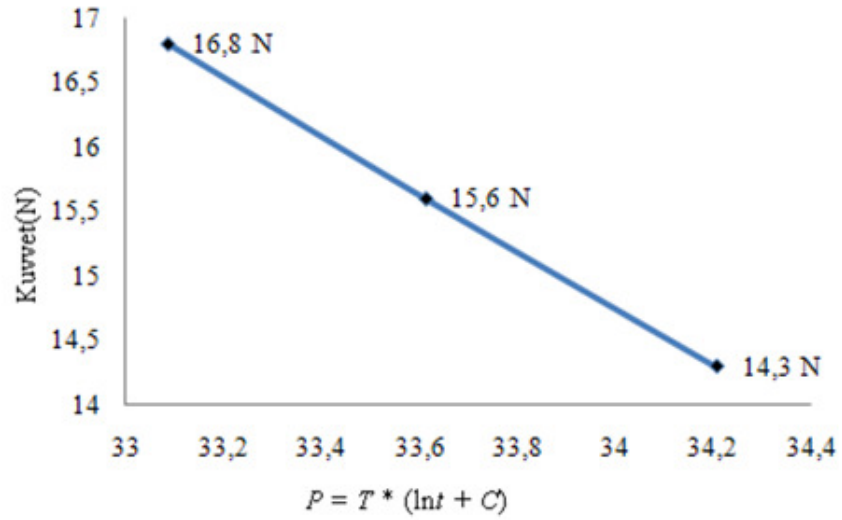
$$P_3 = 923 * (\ln 526 + 30.2)$$

$$P_3 = 33.68$$

$$P_4 = T_4 * (\ln t_4 + C)$$

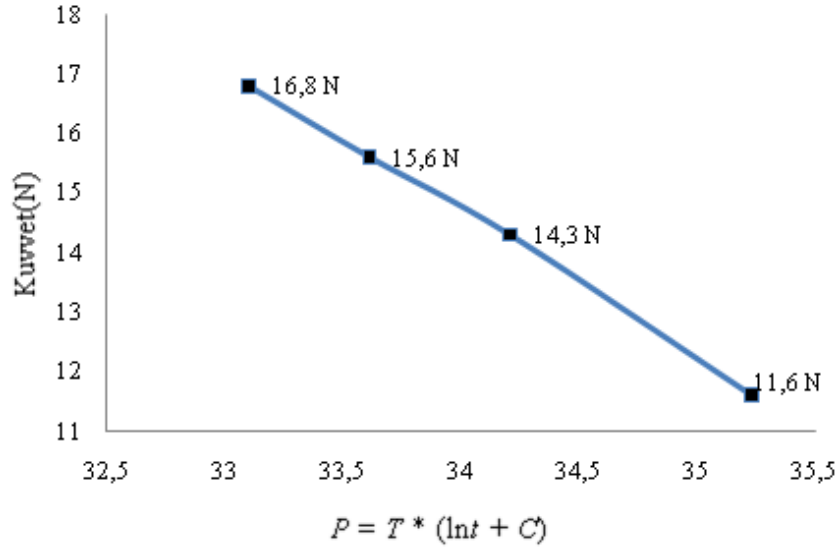
$$P_4 = 848 * (\ln 6918 + C)$$

$$P_4 = 33.13$$



Şekil 5.10 Şekil hafızalı NiTi için Larson-Miller eğrisi

Şekil 5.10’da çıkarılan Larson-Miller eğrisi ile deney sonuçları karşılaştırılarak eğrinin doğruluğu ortaya çıkarılabilir. Deneysel çalışmada uygulanan 11.4 N’ luk sabit yük ve 650°C sıcaklık değerleri için oluşturulan Larson-Miller eğrisi Şekil 5.11’de gösterilmiştir.



Şekil 5.11 11.4 N’ luk sabit çekme kuvveti ve 650°C sıcaklık için oluşturulan Larson-Miller eğrisi

#### 5.4. SEM analizi ile sürünme kırılma oluşumunun incelenmesi

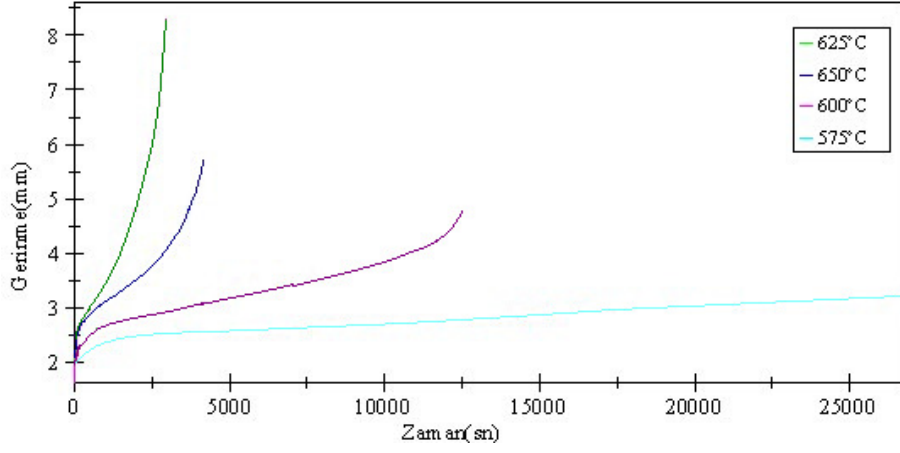
Sürünme deneyi sonunda kopan numunelerin kırılma yüzeylerinde ki mikroyapısal değişiklikleri incelemek amacıyla, numunelerin kırılma yüzeylerine dik ve yatay bakış açılarıyla Jeol marka taramalı elektron mikroskopu (SEM: Scanning Electron Microscope) kullanılarak, x350 ve x750 ölçeğinde, 20 kV’de seconder görüntüsü alınmıştır.

Numunelere ait Şekil 5.4, 5.5, 5.6 eğrileri incelendiğinde aynı çekme kuvvetinin uygulandığı değişik sıcaklık şartlarında artan sıcaklıkla birlikte gerinmenin arttığı dolayısıyla sünek kopmanın meydana geldiği görülmüştür. Sıcaklığın artmasıyla beraber;

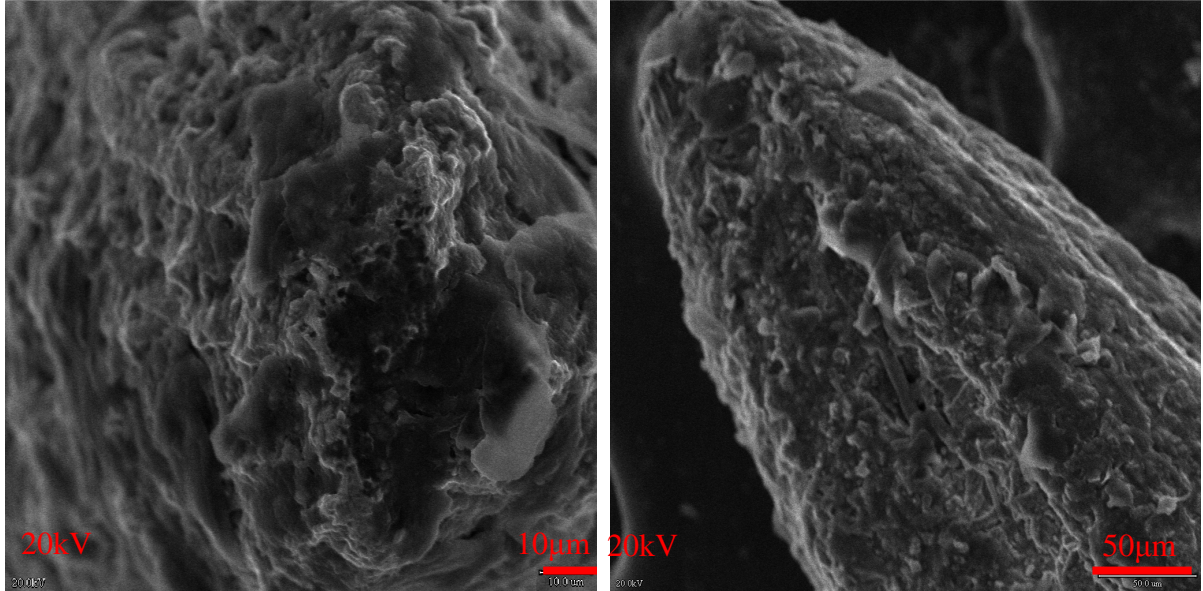
- Kırılma yüzeyi ve çevresinde tanelerin incelmış ve uzamış olduğu
- Uzayan tanelerin kopmanın sünek olduğuna işaret ettiği söylenebilir.

11.4 N’luk sabit çekme kuvveti değeri için verilen Şekil 5.12’de ki SEM görüntüleri incelendiğinde artan sıcaklıkla birlikte, dikey görüntüde kopma yüzeyi kesitinin azaldığı, aynı şekilde yatay görüntüde de numenin ucuna doğru kesitinin azaldığı görülmüştür. Numunelerin SEM görüntüleri Şekil 5.4’de ki sürünme eğrileriyle ilişkilendirdiğinde yine artan sıcaklıkla

birlikte gerinmenin arttığı dolayısıyla numune çapında meydana gelen kesit incelmesinin daha fazla olduğu söylenebilir.



Şekil 5.4 11.4N'luk sabit çekme kuvveti için sürünme eğrileri

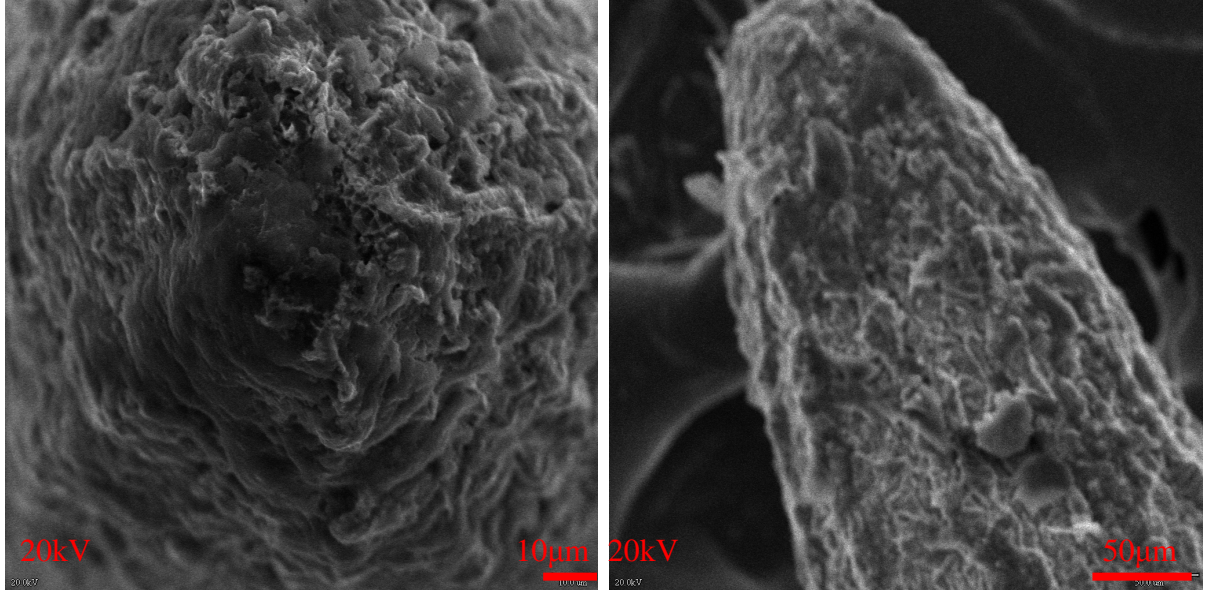


Çekme gerilmesine dikey

Çekme gerilmesine paralel

a) 625°C





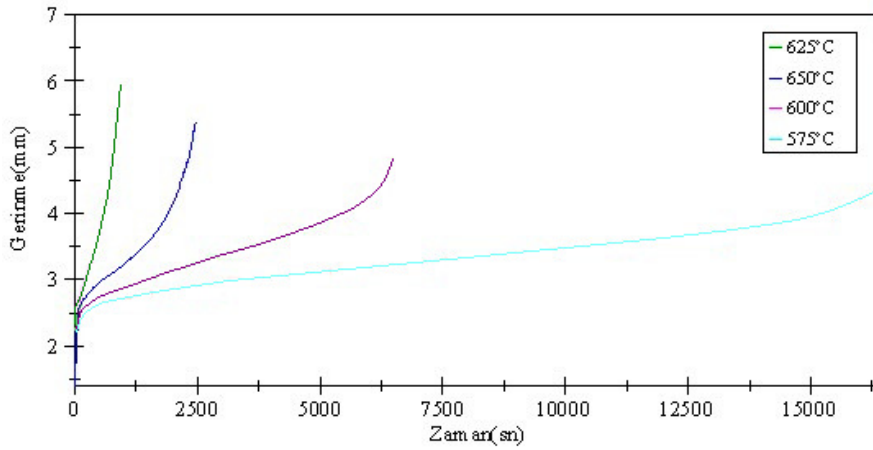
Çekme gerilmesine dikey

Çekme gerilmesine paralel

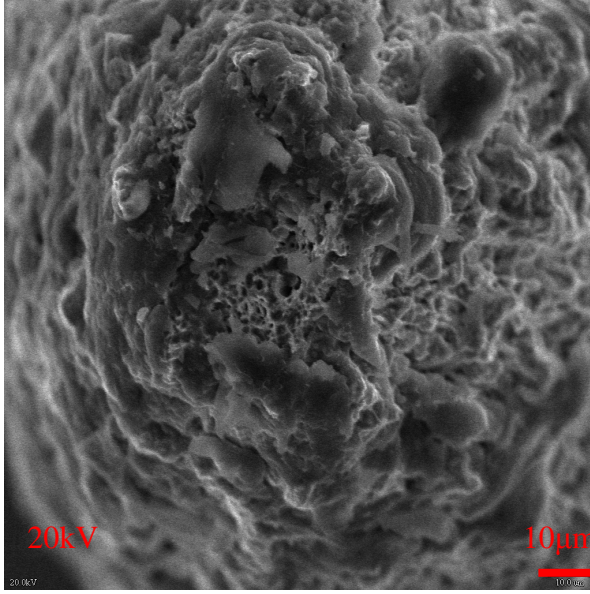
b) 650°C

Şekil 5.12 11.4 N' luk sabit çekme kuvveti altında farklı sıcaklık değerleri için SEM görüntüleri

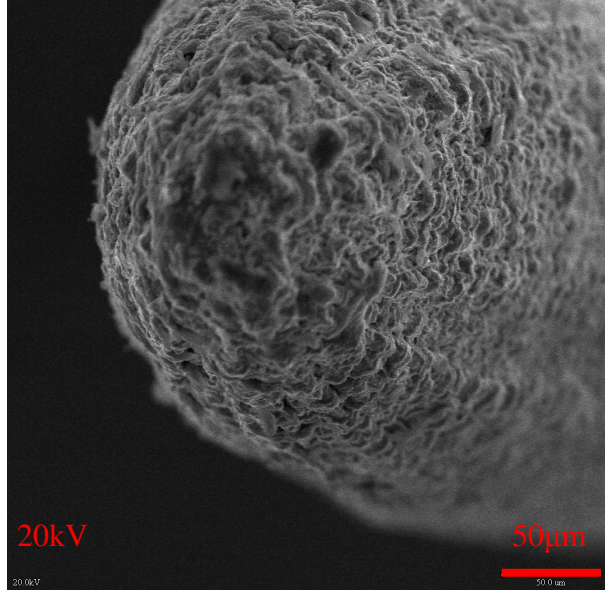
Numunenin 14.3 N' luk sabit çekme kuvveti altında sıcaklık artışına bağlı olarak alınan dikey SEM görüntüsünde kopma yüzeyinin kesitinin, yatay SEM görüntüsünde ise numune kesitinin azaldığı Şekil 5.13'de görülmektedir.



Şekil 5.5 14.3N'luk sabit çekme kuvveti için sürünme eğrileri

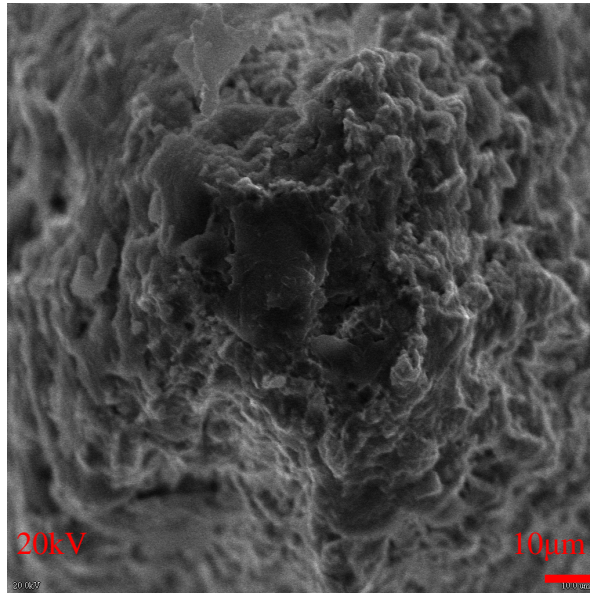


Çekme gerilmesine dikey

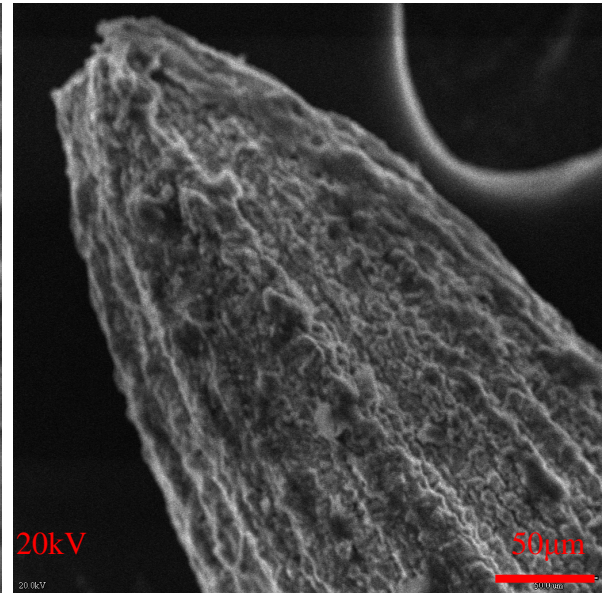


Çekme gerilmesine paralel

a)600 °C

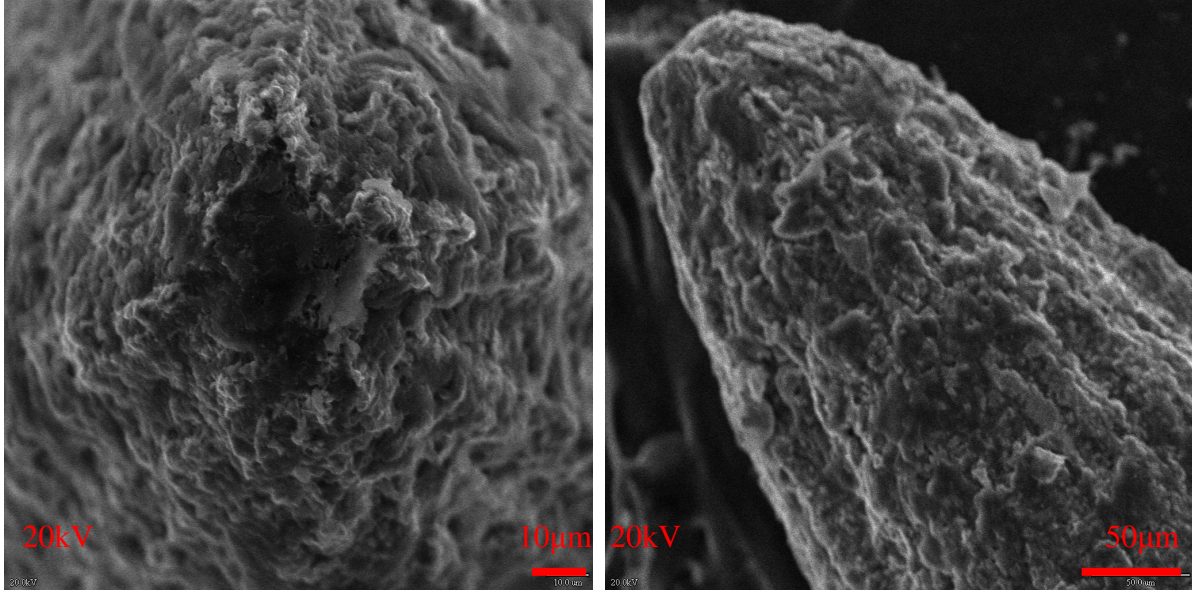


Çekme gerilmesine dikey



Çekme gerilmesine paralel

b)625°C



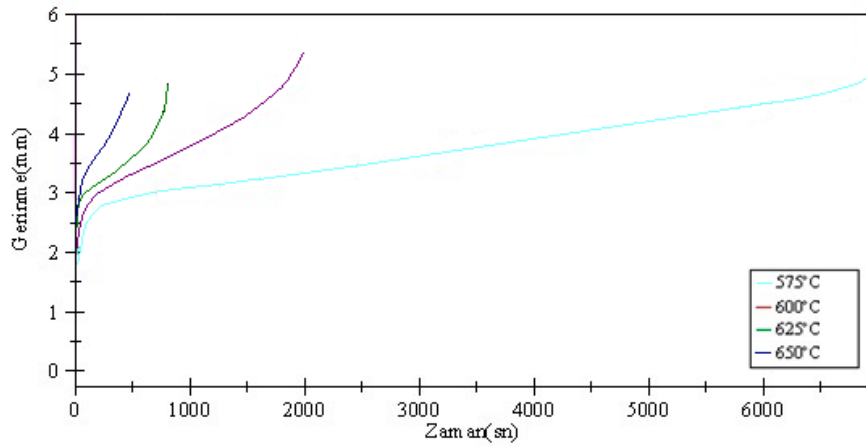
Çekme gerilmesine dikey

Çekme gerilmesine paralel

c)650°C

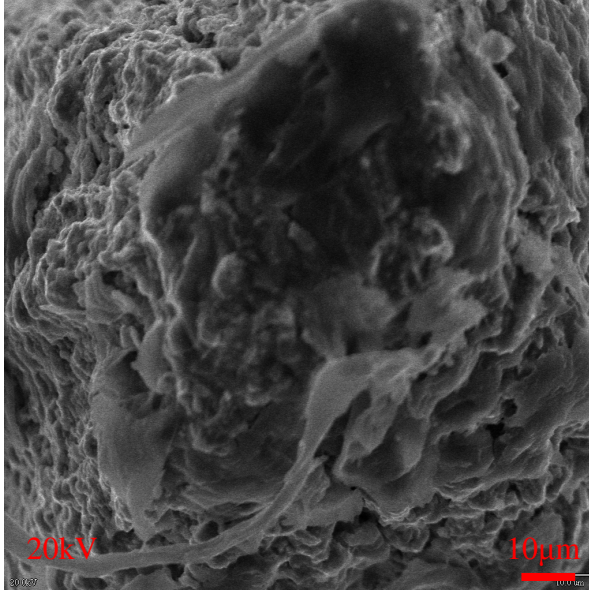
Şekil 5.13 14.3 N' luk sabit çekme kuvveti altında farklı sıcaklık değerleri için SEM görüntüleri

16.8N' luk sabit kuvvete ait sürünme eğrileri ve SEM görüntüleri 11.4N ve 14.3N kuvvet değerlerinden farklı karakter göstermesi(625 ve 650°C'ler) gerilme değeri ve sıcaklığın çok yüksek olmasıyla açıklanabilir.

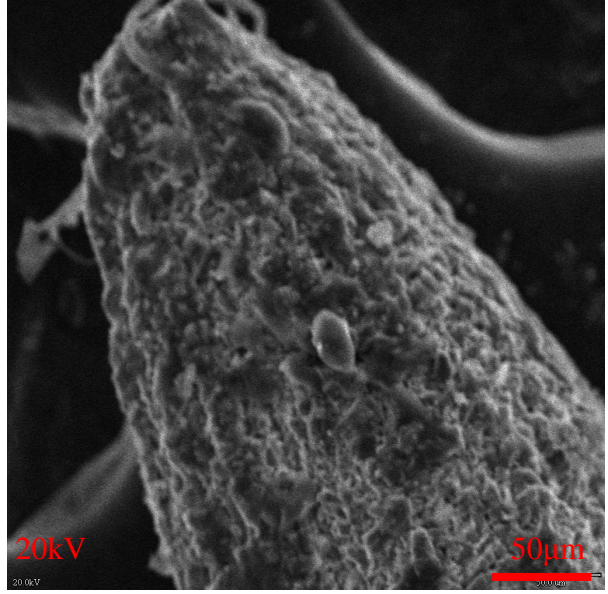


Şekil 5.6 16.8N' luk sabit çekme kuvveti için sürünme eğrileri



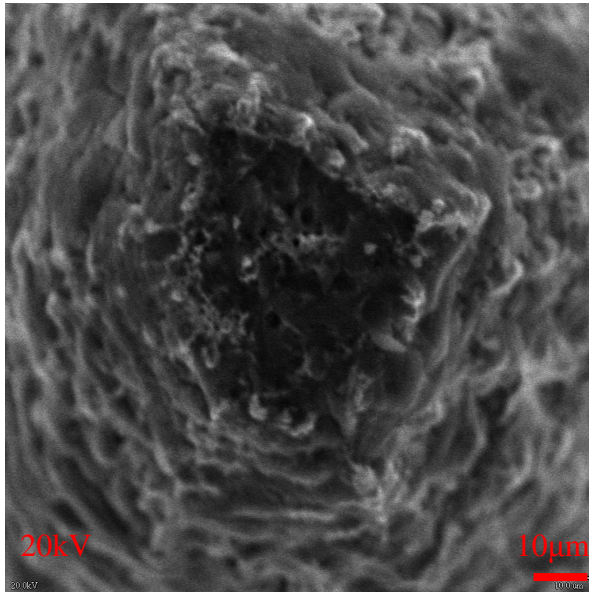


Çekme gerilmesine dikey

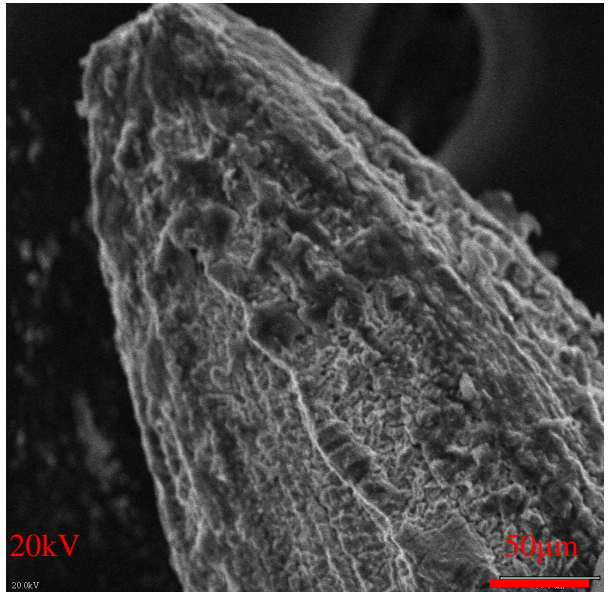


Çekme gerilmesine paralel

a)600°C



Çekme gerilmesine dikey



Çekme gerilmesine paralel

a)625°C

Şekil 5.14 16.8 N' luk sabit çekme kuvveti altında farklı sıcaklık değerleri için SEM görüntüleri

## 5.5. Tartışma ve öneriler

- Çalışmada; 0.5 mm çapında şekil hafızalı NiTi alaşımlı telden hazırlanan 24 adet numunenin 575-650°C sıcaklık ve 11.4-16.8 N' luk sabit çekme kuvvetleri arasındaki sürünme özellikleri incelenmiş ve alaşıma ait gerilme sabiti  $n=4.5$  ve aktivasyon enerjisi 300kJ/mol bulunmuştur.
- Uygulanan farklı gerilmeler sonucunda elde edilen gerinme değerlerine bağlı olarak çizilen gerilme-gerinme hızı eğrileri(Şekil 5.8 ve Şekil 5.9) incelendiğinde sıcaklık ve gerilmenin artmasına bağlı olarak gerinme hızında arttığı görülmüştür.
- Çalışmada elde edilen sonuçların literatürde daha önce yapılan çalışma sonuçlarıyla benzerlik gösterdiği saptanmıştır(Çizelge 5.3).

Çizelge 5.3 NiTi üzerine yapılan sürünme çalışmalarının karşılaştırılması

Araştırmacı	Yıl	Numune		Sıcaklık(°C)	Gerinme oranı(s <sup>-1</sup> )	Gerilme (Mpa)	n	Q(kJ mol <sup>-1</sup> )
		çapı(mm)	Ni içeriği (%)					
Mukherjee	1998	6.35	50.6	700-1000	$6 \times 10^{-5}$ - $6 \times 10^{-3}$	6-178	3±0.2 1 ve	251±13
Kato	1999	0.9	49.5, 50, 50.5	628-888	$1 \times 10^{-5}$ - $2 \times 10^{-2}$	11-81	5.9(2.5±0.2 <sup>a</sup> )	230-253
Eggeler	2002	13	50.7	470-530	$2 \times 10^{-9}$ - $8 \times 10^{-6}$	90-150	2	334
Kobus	2002	-	50.7	500-560	$2 \times 10^{-7}$ - $3 \times 10^{-5}$	120-180	5	421
Lexcellent	2005	6	50	597-897	$3 \times 10^{-3}$ - $4 \times 10^{-2}$	10-35	3	222±30
Oppenheimer	2007	12.7	50.8	950-1100	$1 \times 10^{-6}$ - $1 \times 10^{-5}$	4.7-11	2.5±0.2	155±14
Güncel çalışma	2010	0.5	50.8	575-650	$3 \times 10^{-5}$ - $3 \times 10^{-3}$	82-127	4.5	300

- Ayrıca çalışmada hesaplanarak elde edilen n ve Q değerleri Çizelge 5.3'de verilen sürünme üzerine yapılmış diğer çalışmalarda verilen n ve Q değerlerinden farklılık gösterdiği anlaşılmıştır. Bunun başlıca nedeni olarak;
  - Oppenheimer(2007)'ın yaptığı çalışmada sürünme için çekme değil basma gerilmesi uygulanmıştır. Oysa çalışmamızda numunelere çekme gerilmesi uygulanmıştır. Bu fark nedenle de çekme gerilmesinde kavitasyon oluşabilirken basma gerilmesinde kavitasyon oluşmaz, böylece kesme yüzeyi ve üretilen gerilme yoğunluğu, gerilme ve sıcaklık için daha fazla yoğunluğa ve daha fazla gerinme oranına sebep olur. Yinede bu savın doğruluğunu kanıtlayabilmek için çekme ve

basma deneyleri aynı ingotlardan üretilmiş NiTi numuneleri için yapılabilir.

➤ Eggeler ve Kobus çalışmalarında düşük sürünme sıcaklıkları ile çalışmaları nedeniyle deneyler sonucunda elde edilen aktivasyon enerjilerinin yüksek olduğu görülmektedir. Bazı intermetalik malzemelerin aktivasyon enerjileri için bu sav geçerlidir.

Tez çalışmasında da uygulanan sürünme sıcaklık değerlerinin düşük olması nedeniyle elde edilen aktivasyon enerjisi değeri yüksek bulunmuştur.

- Çalışmada her bir deney benzer koşullarda iki defa tekrarlanmış ve elde edilen sonuçlar incelendiğinde, ikincil sürünme değerleri benzer gerinme zaman eğimi verirken birinci ve üçüncül sürünme değerleri farklı olmuştur. Bu farkın; sabit yükün başlangıçtaki uygulanma hızlarının(N/s) kontrolünün zorunlu olarak elle yapılmasından kaynaklandığı düşünülebilir.
- Çalışma sonucunda elde edilen sonuçların daha önce yapılmış sürünme çalışmalarıyla karşılaştırıldığında ortaya çıkan farklılıkların; basma ve çekme asimetrisindeki etkiler, kimyasal oran, çökelti, farklı sürünme mekanizmaları(difüzyon ve dislokasyon sürünmesi), tane büyüklüğündeki farklılıklar ve deney sıcaklığı dışında başka sebeplerden de kaynaklandığı düşünülmektedir.

NiTi alaşımlarının sürünme davranışlarının daha detaylı incelenebilmesi için sürünme deneylerinin;

- Isıl işlem görmüş numunelere uygulanması ve,
- Yükün başlangıçtan istenilen değere ulaşmasını sağlamak için kuvvet-zaman kontrollü bir mekanizma tasarlanması,
- Ayrıca deney ortamında bulunan havanın oksitleyici özelliğinin, NiTi şekil hafızalı alaşımların sürünme davranışları üzerine olan etkilerinin araştırılması için fırın içindeki hava vakumlama yönetimiyle çekilerek deneyin yapılmasının önerilebilir.

## Kaynaklar

1. Mahmud, A., S., Liu, Y., Nam, T., H., (2007), “Design of functionally graded NiTi by heat treatment”, *Physica Scripta*, Vol. 129, pp. 222-226.
2. Liu Y., Li Y., Ramesh K.T., Humbeeck, J. V. (1999) “High Strain Rate Deformation Of Martensitic NiTi Shape Memory Alloy” , *Scripta Materialia* Vol. 41, pp. 89-95.
3. Dilibal S., Sönmez N., Dilbal H. (2003) “Ni-Ti Şekil Bellekli Alaşım (ŞBA) Ve Teknolojik Kullanım Alanları” , 3. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu, 18-20 Ağustos 2003.
4. Otsuka, K. , Ren X. (1999) “Recent developments in the research of shape memory alloys” *Intermetallics*, vol. 7, pp. 511-528.
5. Otsuka, K. , Ren X. (2005) “Physical metallurgy of Ti–Ni-based shape memory alloys” , *Progress in Materials Science*, vol. 50, pp. 511-678.
6. Otsuka, K. , Ren X. (1999) “Martensitic transformations in nonferrous shape memory alloys” , *Materials Science and Engineering* pp. 89-105.
7. Akdoğan, A. , Nurveren, K. (2003) “Şekil Hafızalı Alaşım”, *Mühendis ve Makine*, Sayı 521.
8. Kibey, S. , Şehitoğlu, H. , Johnson D.D. (2009) “Energy landscape for martensitic phase transformation in shape memory NiTi” *Acta Materialia*, Vol. 57, pp. 1624-1629.
9. Adharapurapu, R.,R., Jiang, F., Vecchio, K., S., Gray, G., T. (2006) “Response of NiTi shape memory alloy at high strain rate: A systematic investigation of temperature effects on tension–compression asymmetry”, *Acta Materialia*, Vol. 54, pp. 4609-4620.
10. Baksan, B., Gürler, R. (2006) “Bakır Esaslı Şekil Bellekli Alaşımın Üretimi ve Çekme Deneyi ile Karakterizasyonu”, *SAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi* 10.Cilt, 1.Sayı 2006
11. Balo, Ş., N., Ceylan, M., (2005) “Basma Zoru Altında Kırılan ve Kırılmayan Cu-Al-Be Şekil Hatırlama Alaşım Numunelerinin Özelliklerinin İncelenmesi”, *Science and Eng. J. of Fırat Univ.*, Vol. (1), 31-36.
12. Oberson, P., G., Akmem, S. (2009) “The Effect of Time-Dependent Twinning on Low Temperature ( $<0.25 * T_m$ ) Creep of an Alpha-Titanium Alloy”, *International Journal of Plasticity*, Vol. 25, pp. 881-900.
13. Nabarro, F.R.N. (2004) “Do we have an acceptable model of power-law creep?”, *Materials Science and Engineering*, Vol. 387-389, pp. 659-664.

14. Brnic, J., Turklaj, G., Canadija, M., Lanc, D. (2009) "Creep Behavior of High-Strength Low-Alloy Steel at Elevated Temperatures", *Materials Science and Engineering*, Vol.499, pp. 23-27.
15. Xingfu, Y., Sugui, T., Minggang, W., Shu, Z., Xudong, L., Shusen, C. (2009) "Creep Behaviors and Effect Factors of Single Crystal Nickel-Base Superalloys", *Materials Science and Engineering*, Vol. 499, pp. 352-359.
16. Guo, J., T., Yuan, C., Yang, H., C., Lupinc, V., Maldini, M. (2001) "Creep-Rupture Behavior of a Directionally Solidified Nickel-Base Superalloy", *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 32A, pp. 1103-1110.
17. Safari, J., Nategh, S. (2009) "Microstructure Evolution and Its Influence on Deformation Mechanisms During High Temperature Creep of a Nickel Base Superalloy", *Materials Science and Engineering*, Vol. 499, pp. 445-453.
18. Kurt, A., O. (2009) "Malzemelerin Yüksek Sıcaklık Davranışları", Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Ders notları.
19. Oppenheimer, S., M., Yung, A., R., Dunand, D., C. (2007) "Power-Law Creep in Near-Equiatomic Nickel-Titanium Alloys", *Scripta Materialia*, Vol. 57, pp. 377-380.
20. Lexcellent, C., Robinet, P., Bernardini, J., Beke, D.,L., Olier, P. (2005) "High Temperature Creep Measurements in Equiatomic Ni-Ti Shape Memory Alloy", Vol. 36, pp. 509-512.
21. Rodriguez, P., P., Perez-Saez, R., B., Recarte, V., Juan, J., S., No, M., L. (2000) "Relationship Between Microstructure and Thermomechanical Properties of Cu-Al-Ni Shape Memory Alloys Obtained by Powder Metallurgy", *EUREM 12*, Brno, Czech Republic, pp. 57-58.
22. Tarnita, D., Tarnita, D. N. , Bizdoaca, N. , Mindrila,I., Vasilescu, M. (2009) "Properties and medical applications of shape memory alloys" ,*Romanian Journal of Morphology and Embryology*, vol. 50(1), pp. 15–21.
23. Meriç, C., Atik, E., Özkaya, E., (1997) "Deformasyon sıcaklığının ve deformasyon hızının Al 99.0'un mekanik özelliklerine etkisinin incelenmesi" , *Mühendislik bilimleri dergisi*, Sayı 1, pp. 293-298.
24. Hearn, E.J., (1997) "Mechanics of materials" , University of Warwick United Kingdom, pp. 497-498.



25. Savaşkan, T., (1999) “Malzeme bilgisi ve muayenesi” , Karadeniz Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü, pp.272-275.
26. Shackelford, F.J., (2008) “Introduction to materials science for engineers” , University of California, pp. 433-465.
27. N. Hidaka, H. Watanabe, M. Yoshida, M. Shimoda, T. Asai, and M. Ono, (2006) “Creep Behavior and Microstructure of Sn-Ag-Cu-Ni-Ge Lead-Free Solder Alloy” , Materials Science and Technology, pp. 185-197.
28. Nabarro, F.R.N., (2004) “Do we have an acceptable model of power-law creep” , Materials Science and Engineering, Vol. 387–389, pp. 659–664.
29. Collins, J.A., (1993) “Failure of materials in mechanical design” , The Ohio State University, pp.459-469.

## **ÖZGEÇMİŞ**

Doğum tarihi 26.04.1980

Lise 1994-1998 Ümraniye Süper Lisesi

Lisans 1999-2005 Trakya Üniversitesi Mühendislik Fak.  
Makine Mühendisliği Bölümü

Yüksek Lisans 2006-2010 Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü  
Makine Müh. Anabilim Dalı, İmalat Programı

## **Çalıştığı kurumlar**

2004–2005 Alfen Makine ve Armatür Sanayi A.Ş

2006-2008 Panel Elektro A.Ş.

2008-2009 Mercedes-Benz Türk A.Ş.

2009- MBtech Mühendislik ve Danışmanlık Ltd. Şti.