

**MARTENSİTİK FAZ DÖNÜŞÜMLERİNİN SONLU ELEMANLAR
YÖNTEMİ İLE MODELLENMESİ**

NAZIM BABACAN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ

TOBB EKONOMİ VE TEKNOLOJİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ŞUBAT 2013

ANKARA

Fen Bilimleri Enstitü onayı

Prof. Dr. Ünver Kaynak

Müdür

Bu tezin Yüksek Lisans derecesinin tüm gereksinimlerini sağladığını onaylarım.

Prof. Dr. Ünver Kaynak

Anabilim Dalı Başkanı

Nazım BABACAN tarafından hazırlanan MARTENSİTİK FAZ DÖNÜŞÜMLERİNİN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE MODELLENMESİ adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Yrd. Doç. Dr. İstemi Barış ÖZSOY

Tez Danışmanı

Tez Jüri Üyeleri

Başkan : Yrd. Doç. Dr. İzzet ÖZDEMİR

Üye : Doç. Dr. Mehmet Ali GÜLER

Üye : Yrd. Doç. Dr. İstemi Barış ÖZSOY

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada orijinal olmayan her türlü kaynağa eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Nazım BABACAN

Üniversitesi : TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi
Enstitüsü : Fen Bilimleri
Anabilim Dalı : Makine Mühendisliği
Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. İstemi Barış ÖZSOY
Tez Türü ve Tarihi : Yüksek Lisans – Şubat 2013

NAZIM BABACAN

MARTENSİTİK FAZ DÖNÜŞÜMLERİNİN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE MODELLENMESİ

ÖZET

Martensitik faz dönüşümleri, yüksek sıcaklıkta kararlı olan östenit fazından, düşük sıcaklıkta kararlı olan martensit fazına difüzyonsuz olarak gerçekleşen dönüşümlerdir. Katıdan katıya olan bu dönüşümler şekil hafızalı alaşımların (ŞHA) deformasyon mekanizmasını oluşturmaktadır ve sıcaklık değişimi ile veya gerilme altında gerçekleşmektedir. ŞHA sahip oldukları sıradışı özelliklerden dolayı son yıllarda üzerinde araştırma yapılan önemli malzemelerdendir.

Bu çalışmada elastik davranış sergileyen malzemelerdeki martensitik faz dönüşümü sonlu elemanlar (SE) yöntemi ile modellenmiştir. Uygulanan deformasyon altında malzemede meydana gelen martensitik faz dönüşümü incelenmiştir. Farklı kristal oryantasyonlarına sahip tek kristalli malzemeler için gerilme-gerinim grafikleri elde edilmiştir. Çok kristalli ŞHA'nın genel malzeme davranışını anlamak için gerilme-gerinim grafikleri ve yükleme esnasındaki östenit ve martensit hacim oranları elde edilmiştir.

Yapılan çalışmalar sonucunda kristal oryantasyonunun faz dönüşümünün başlangıç ve bitiş gerilmelerini değiştirdiği görülmüştür. ABAQUS SE programında, tek eksenli çekme uygulanan çok kristalli ŞHA'da elde edilen gerilme-gerinim grafiklerinin genel eğiliminin deneysel sonuçlara oldukça benzediği tespit edilmiştir. Ayrıca, ara yüzey ilerlemesini engelleyen atermal sürtünme değerinin artması da faz dönüşümünün başlamasını geciktirmiş ve sürtünme değerine göre farklı histerisizler oluşturmuştur. Genel olarak, deneylerle tespit edilen malzeme davranışının bu model ile elde edilebildiği gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Martensitik Faz Dönüşümleri, Sonlu Elemanlar Yöntemi, Şekil Hafızalı Alaşımlar, Çok Kristalli Malzemeler

University : TOBB Economics and Technology University
Institute : Institute of Natural and Applied Sciences
Science Programme : Mechanical Engineering
Supervisor : Assist. Prof. Dr. İstemi Barış ÖZSOY
Degree Awarded and Date : M.Sc. – February 2013

NAZIM BABACAN

**FINITE ELEMENT MODELLING OF MARTENSITIC PHASE
TRANSFORMATIONS**

ABSTRACT

Martensitic phase transformations are diffusionless transformations that occur from austenite phase, which is stable at high temperatures, to martensite phase, which is stable at low temperatures. These solid-solid transformations represent the deformation mechanism of shape memory alloys (SMA) and occur by temperature change or under stress. In recent years, SMA are one of the important materials that is researched due to their extraordinary features.

In this study, martensitic phase transformations in elastic materials are modelled using finite element (FE) method. Martensitic phase transformation that occur in the material under deformation is inspected. Stress-strain diagrams are obtained for single crystal materials which have different crystal orientations. To understand general material response of polycrystal SMA, stress-strain diagrams and volume fractions of austenite and martensite during loading are examined.

As a result of the study, it is seen that crystal orientations affect the start and finish stresses of phase transformation. Stress-strain diagrams of uniaxially loaded polycrystal SMA obtained by using ABAQUS FE program are found to be very similar to experimental results. In addition, increase in athermal friction, which prevents the interface propagation, delays the phase transformation and it is seen that different hysteresis occur at different friction values. In general, it is shown that material response determined by experiments can be obtained using this model.

Keywords: Martensitic Phase Transformations, Finite Element Method, Shape Memory Alloys, Polycrystal Materials

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans çalışmam boyunca her konuda yardımını esirgemeyen, sabır ve hoşgörü ile beni yönlendiren, akademik yaşamım boyunca hep örnek alacağım değerli danışman hocam Yrd. Doç. Dr. İstemi Barış ÖZSOY'a çok teşekkür ederim. Tezimi değerlendiren, bu çalışmaya katkıda bulan jüri üyeleri Sayın Doç.Dr. Mehmet Ali GÜLER'e ve Yrd. Doç. Dr. İzzet ÖZDEMİR'e teşekkür ederim.

“İnelastik Malzemelerde Martensitik Faz Dönüşümleri” başlıklı 109M483 no'lu proje ile destek veren TÜBİTAK'a ve verdiği burs ve sağladığı çalışma ortamı ile TOBB ETÜ'ye teşekkür ederim. Proje ve oda arkadaşım olan İlkay GÜNEL'e bana öğretmiş olduğu bilgiler ve bunun yanı sıra bu tezde en yakın yol arkadaşım olduğu için teşekkürü borç bilirim. Ayrıca güzel bir çalışma ortamına sahip olmamızı sağlayan eski ve yeni bütün 117 no'lu oda mensuplarına teşekkür ederim.

Tez çalışmalarım boyunca bana hep destek veren, umutsuz günlerimde cesatlendiren, bu günlere gelmemde en önemli katkı sahipleri olan canım annem Zeliha BABACAN ve babam M.Zafer BABACAN'a ne kadar teşekkür etsem azdır. Hayatımda karşıma çıkan en değerli insan olan ve zor günlerinde sıkıntımı paylaşan, desteğini sürekli hissettiğim Fatma Demir'e özel olarak teşekkür ederim. Son olarak hayata gelmesiyle birlikte bana uğur getiren ablam Ö.Begüm BABACAN ve eniştem Doç. Dr. Murat GÖKÇEK'in çocukları biricik yeğenim Saffet Kutay GÖKÇEK'e de çok teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
TEZ BİLDİRİMİ.....	iii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	xi
SEMBOL LİSTESİ	xv
1. GİRİŞ	1
1.1. Martensitik Faz Dönüşümleri.....	1
1.1.1. Çeliklerde Martensitik Faz Dönüşümleri.....	1
1.1.2. Gerilme Kaynaklı Martensitik Faz Dönüşümleri.....	3
1.1.3. Martensit Oluşumunun Mekanizması	4
1.1.4. Martensitik Faz Dönüşümlerinin Kristalografisi	5
1.2. Şekil Hafızalı Alaşımlar	7
1.2.1. Süperelastisite	8
1.2.2. Şekil Hafıza Etkisi.....	9
1.3. Literatür Taraması	10

1.3.1. Elastik Malzemeler için Geliştirilen Martensitik Faz Dönüşümü Modelleme Yöntemleri	11
1.3.2. SE Yöntemi ile Yapılan Çalışmalar	13
1.3.3. Deneysel Çalışmalar.....	19
1.4. Tezin Amacı	23
1.5. Tez Planı.....	24
2. KULLANILAN MİKROMEKANİK MODEL	26
2.1. İki Fazlı Sistem.....	26
2.2. Üç Fazlı Sistem	33
3. TEK KRİSTALLİ $CuAlNi$ ŞEKİL HAFIZALI ALAŞIMINDA MARTENSİTİK FAZ DÖNÜŞÜMLERİNİN MODELLENMESİ	36
4. MALZEME DAVRANIŞININ SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE ANALİZİ.....	39
4.1. ABAQUS'te Doğrusal Olmayan Bir Problemin Çözümü.....	40
4.2. Problemlerin Çözülmesi için İzlenen Yol	41
4.3. Yakınsama Çalışmaları.....	43
4.3.1. Jacobian Matrisinin Sayısal Hesabı	44
4.3.2. Kinetik Denklemlerin Sayısal İntegrasyonu	45
5. ŞEKİL HAFIZALI ALAŞIMLARIN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE MODELLENMESİ	49
5.1. Tek Kristalli Şekil Hafızalı Alaşımlar	51
5.2. Tek Kristalli Şekil Hafızalı Alaşımlarda Çekirdeğin Etkisi	53

5.3. Çok Kristalli Şekil Hafızalı Alaşımlar	57
5.3.1. Birinci Tip Modelleme	57
5.3.2. İkinci Tip Modelleme	62
6. SONUÇLAR VE YORUMLAR	68
KAYNAKLAR	70
ÖZGEÇMİŞ	75

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.1. Kübik yapı için elastisite matrisinin değerleri [57].....	37
Çizelge 3.2. Ortorombik yapı için elastisite matrisinin değerleri [58].....	37
Çizelge 4.1. Problemin çözülmesi için takip edilen algoritma [55].....	42

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 1.1. YMK östenit yapısından HMK veya HMT martensit yapısına dönüşüm ...	2
Şekil 1.2. Çelikler için zaman-sıcaklık-dönüşüm diyagramının şematik gösterimi.....	2
Şekil 1.3. Sıcaklığa bağlı olarak bulunan faz diyagramı.....	3
Şekil 1.4. Martensitik faz dönüşüm sıcaklıklarının gerilmeye bağlı değişim grafiği ..	4
Şekil 1.5. Martensit oluşumunun şematik gösterimi [3]	4
Şekil 1.6. Kübik östenitten üç farklı tipte tetragonal martensit oluşumu [2]	5
Şekil 1.7. Martensit kristali içerisinde oluşan a) kayma (dislokasyon hareketi) b) ikizler [3].....	6
Şekil 1.8. Şekil Hafızalı Alaşımların Süperelasite ve Histerisiz Özelliği	9
Şekil 1.9. NiTi malzemesi için şekil hafıza etkisini gösteren gerilme-gerinim-sıcaklık grafiği [22]	10
Şekil 1.10. Roytburd ve Slutsker'un [31] gerinim kontrollü çalışmalarında elde ettikleri gerilme-gerinim grafiği.....	13
Şekil 1.11. Idesman vd'nin [25] Faz dönüşümü analizi a) tek eksenli çekme yapılan östenitik dikdörtgen plaka b) CD kısmında oluşan yer değiştirme-kuvvet grafiği	14
Şekil 1.12. Idesman vd'nin [25] 1. martensitik varyantın hacim oranının gelişimini gösteren grafik a) $\varepsilon = 0.00075$ b) $\varepsilon = 0.00375$ c) $\varepsilon = 0.0075$	15
Şekil 1.13. Idesman vd'nin [25] rasgele oryantasyonlu çok kristalli bir plakaya $\varepsilon = \% 0.1$ 'lik gerinim uygulandıktan sonra oluşan a) östenitin b) 1. martensitik varyantın c) 2. martensitik varyantın hacimsel oranlarının dağılımı	16

Şekil 1.14. Lim ve McDowell'ın [29] çekme simülasyonunda %3'lük eşdeğer gerinimde elde ettikleri martensitin hacimsel dağılımı.....	17
Şekil 1.15. Wang ve Yue'nun [39] hazırladıkları SE modeli	19
Şekil 1.16. Fang vd'nin [41] çalışmasında bir numune için hesaplanmış gerilme-gerinim grafiği.....	20
Şekil 1.17. Tek eksenli çekme altında oluşan gerilme-gerinim grafiği [42].....	21
Şekil 1.18. Ichinose vd'nin [44] mekanik olarak gerinim uygulanmış bir CuAlNi martensit tek kristalindeki şekil değişikliğini gösteren bir dizi kaba dağlama fotoğrafı	22
Şekil 1.19. Saburi vd'nin NiTi malzemesi için elde ettiği gerilme-gerinim grafiği [46]	23
Şekil 2.1. a) Martensitik mikroyapı b) Temsili hacmin seçimi [49]	26
Şekil 2.2. İki fazlı temsili hacim	27
Şekil 2.3. İki martensitik varyant ve östenit fazından oluşan temsili hacim.....	33
Şekil 3.1. Shield'in [48] deneysel sonuçları ile kullanılan mikromekanik modellerde elde edilen gerilme-gerinim sonuçlarının karşılaştırılması [56]	37
Şekil 4.1. Heun metodunun grafik gösterimi a) öngörme b) düzeltme [59]	46
Şekil 5.1. Modellenen malzemenin a) boyutları b) sınır koşulları.....	50
Şekil 5.2. Tek kristalli 0°'lik oryantasyona sahip malzemenin gerilme-gerinim grafiği	51
Şekil 5.3. Tek kristalli farklı oryantasyonlara sahip malzemelerin gerilme-gerinim grafikleri.....	52
Şekil 5.4. İçerisinde iki farklı eleman bulunan plaka yapısı.....	53

Şekil 5.5. İçerisinde iki farklı eleman bulunan plaka yapının gerilme-gerinim grafiği	54
Şekil 5.6. İçerisinde iki farklı eleman bulunan plaka için a,b,c) $\varepsilon_x = 6.15 \times 10^{-3}$ d,e,f) $\varepsilon_x = 6.20 \times 10^{-3}$ g,h,i) $\varepsilon_x = 6.37 \times 10^{-3}$ j,k,l) $\varepsilon_x = 6.62 \times 10^{-3}$ gerinim değerlerindeki östenit ve 1. ve 2. martensitik varyantın hacim oranları dağılımı.....	55
Şekil 5.7. Küçük açılara (0° - 5° arası) sahip 20 tanecik	58
Şekil 5.8. Küçük açılı analizlerde kullanılan a)169 b)324 elemanlı model	59
Şekil 5.9. 0° - 5° arası oryantasyonlara sahip modelde kullanılan eleman sayısına göre oluşan gerilme-gerinim grafiği.....	60
Şekil 5.10. 0° - 5° arası oryantasyonlara sahip model için a,b,c) $\varepsilon_x = 0.0056$ d,e,f) $\varepsilon_x = 0.0096$ g,h,i) $\varepsilon_x = 0.0192$ j,k,l) $\varepsilon_x = 0.0240$ gerinim değerlerindeki östenit ve 1. ve 2. martensitik varyantın hacim oranları dağılımı.....	61
Şekil 5.11. Büyük açılara (-25° - 25° arası) sahip 20 tanecik	63
Şekil 5.12. -25° - 25° arası oryantasyonlara sahip modelde oluşan gerilme-gerinim grafiği	64
Şekil 5.13. -25° - 25° arası oryantasyonlara sahip model için a,b,c) $\varepsilon_x = 0.0057$ d,e,f) $\varepsilon_x = 0.0096$ g,h,i) $\varepsilon_x = 0.0192$ j,k,l) $\varepsilon_x = 0.0240$ gerinim değerlerindeki östenit ve 1. ve 2. martensitik varyantın hacim oranları dağılımı	65
Şekil 5.14. Farklı k değerleri için -25° - 25° arası oryantasyonlara sahip modelde oluşan gerilme-gerinim grafiği.....	66

KISALTMALAR

Kısaltmalar Açıklama

ŞHA	Şekil Hafızalı Alaşımlar
SE	Sonlu Elemanlar
SMA	Shape Memory Alloys
FE	Finite Element
YMK	Yüzey Merkezli Kübik
HMK	Hacim Merkezli Kübik
HMT	Hacim Merkezli Tetragonal
UMAT	User Material (Kullanıcının oluşturmuş olduğu malzeme)
STATEV	State Variables (Durum Değişkenleri)
RK	Runge-Kutta

SEMBOL LİSTESİ

Bu çalışmada kullanılmış olan simgeler açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler Açıklama

M_s	Martensit başangıç sıcaklığı
M_f	Martensit bitiş sıcaklığı
A_s	Östenit başangıç sıcaklığı
A_f	Östenit bitiş sıcaklığı
α, β, γ	Kafes parametreleri
E	Young (Elastik) modülü
ν	Poisson oranı
ψ	Helmholtz serbest enerjisi
c	Fazların hacim oranı
ε	Gerinim
σ	Gerilme
n	Östenit – martensit ara yüzeyinin normal vektörü
a	Östenit – martensit ara yüzeyindeki gerinim sıçramasını gösteren vektör
ε^e	Elastik gerinim
ε^t	Dönüşüm gerinimi
θ	Sıcaklık
s	Entropi
D_v	Birim hacimdeki yitim oranı
X_c	Ara yüzeyin ilerlemesi için Eshelby termodinamik itici kuvveti
X_n	Ara yüzeyin oryantasyonu için evrensel termodinamik itici kuvveti
ψ^θ	Serbest enerjinin termal kısmı
ψ^e	Serbest enerjinin elastik kısmı
h_c, m_c, h_n	Skaler, vector ve ikinci dereceden simetrik tensör parametreleri

k	Atermal sürtünme
C	Jacobian matrisi
h	Adım byklg

1. GİRİŞ

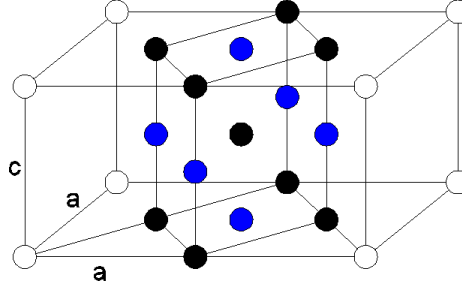
1.1. Martensitik Faz Dönüşümleri

Malzeme içerisinde özellikleri farklı olan bölgelere faz denmektedir. Faz dönüşümleri, bir malzemedeki bir veya daha fazla fazın yeni bir faza veya birkaç fazın karışımına dönüşümüdür [1]. Malzemeler katı, sıvı ve gaz fazlarında bulunabildiğinden bu fazlar arasında dönüşüm olabilmektedir. Katı bir fazın yine katı bir faza dönüştüğü martensitik faz dönüşümünde östenit fazı martensit fazına difüzyonsuz olarak dönüşmektedir. Martensitik faz dönüşümü çeşitli metallerde, seramiklerde, alaşımlarda ve biyolojik sistemlerde görülmektedir. Bilinen en eski martensitik faz dönüşümü, çelikte en sert yapı olan martensitin oluşturulması için gerçekleştirilen dönüşümlerdir. Martensitik faz dönüşümünde sıcaklık değişimi veya yük altında atomların yeniden düzenlenmesi meydana gelmeden malzemenin kristal yapısı ani olarak değişmektedir. Yüksek sıcaklıklardaki kararlı faz östenit iken, düşük sıcaklıklarda ise kararlı faz martensittir [2]. Martensitik faz dönüşümü teriminin çıkış noktası çelikteki dönüşümlerdir. Martensit ismini, 1850-1914 yılları arasında yaşamış olan Alman metalbilimci Adolf Martens'ten almaktadır. Martens'in çalışmaları sonucunda bulunduğu suverilmiş karbon çeliklerindeki oluşan sert mikroyapı "martensit" ismiyle adlandırmıştır [3,4]. Fakat zamanla herhangi bir bileşim değişimi olmadan ve kaymadan dolayı meydana gelen bütün faz dönüşümleri martensitik faz dönüşümü olarak adlandırılmıştır. Aynı şekilde, östenit ve martensit terimleri, yüksek ve düşük sıcaklıklarda kararlı olan fazları tanımlamak için kullanılmaktadır [5]. En fazla kullanılan malzeme olan çeliklerde martensitik faz dönüşümünün incelenmesi literatürde önemli bir yere sahiptir.

1.1.1. Çeliklerde Martensitik Faz Dönüşümleri

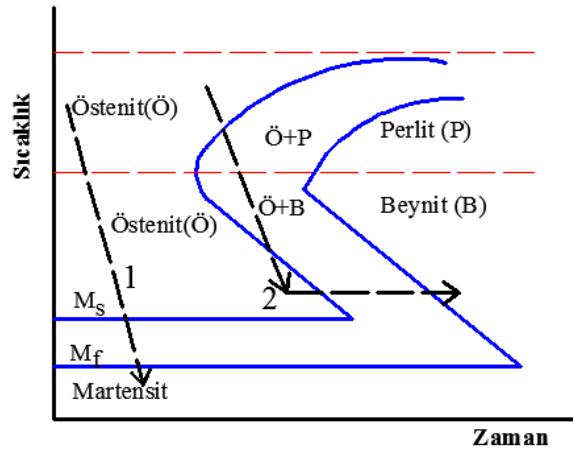
Çeliklerde martensit oluşumu, östenitin düşük sıcaklıklarda karbon difüzyonu engellenerek kafes dönüşümüne uğraması ile oluşur [6]. Yüksek sıcaklıkta yüzey merkezli kübik (YMK) yapıda olan östenit düşük sıcaklıkta Şekil 1.1'deki gibi hacim merkezli kübik (HMK) yapıya dönüşmektedir. Fakat HMK yapıda karbon çözünürlüğü az olduğundan bu yapı hacim merkezli tetragonal (HMT) yapıya

dönüşür [3]. Şekil 1.1’de görülen içi boş daireler YMK yapıdaki atomları, siyah daireler ise oluşmakta olan HMK yapıya ait atomlardır. Mavi atomlar ise ara yer konumlarında yer alan karbon atomlarından bazılarıdır. Karbon miktarı arttıkça c/a oranı artmaktadır [7].



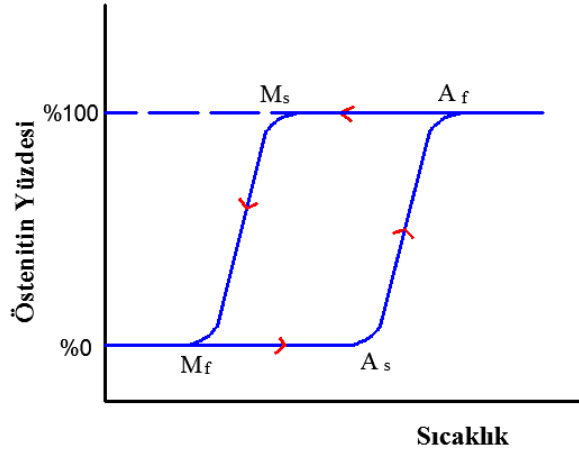
Şekil 1.1. YMK östenit yapısından HMK veya HMT martensit yapısına dönüşüm

Çeliklerde martensitik faz dönüşümleri genel olarak sıcaklığa bağlı bir dönüşümdür. Şekil 1.2’de çeliğin şematik olarak gösterilmiş zaman-sıcaklık-dönüşüm grafiğinde “1” nolu dönüşümde olduğu gibi eğer östenit, perlit ve beynite dönüşmeye yeterli zaman bırakılmayacak şekilde hızlı bir biçimde soğutulursa martensit oluşumu sağlanır [8]. Martensit plakalarının oluşum hızı çeliklerde yaklaşık olarak 1100 m/s’dir. Eğer Şekil 1.2’deki “2” no’lu dönüşüm gibi soğutma işlemi belirli bir sıcaklık değerinin altına inmeden yavaş bir şekilde yapılırsa bu dönüşümde martensit fazı oluşmaz. Karbon atomlarının yayınıma izin verilerek yapılan bu tip eşsıl dönüşümlerde ise kaydedilmiş en hızlı katılma hızı 80 m/s’dir [9].



Şekil 1.2. Çelikler için zaman-sıcaklık-dönüşüm diyagramının şematik gösterimi

Şekil 1.3'te gösterildiği gibi soğutma süresince martensit oluşumu M_s sıcaklığında başlar ve M_f sıcaklığında son bulur. M_f sıcaklığında %100 oranında martensit fazı bulunmaktadır. Martensit fazındaki bir malzemenin ısıtıldıkça A_s sıcaklığında östenit fazı oluşmaya başlar ve A_f sıcaklığına kadar devam ederek malzemenin tamamı östenit fazına dönüşür [5,8].

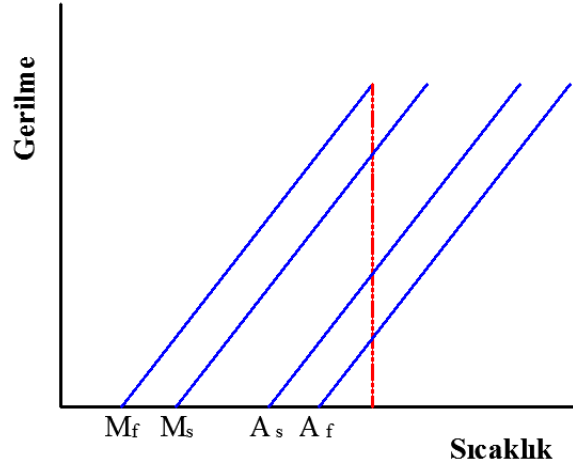


Şekil 1.3. Sıcaklığa bağlı olarak bulunan faz diyagramı

Yüksek karbonlu çeliklerin M_f sıcaklığı oda sıcaklığının altındadır. Dolayısıyla oda sıcaklığında yapılan soğutmalarda martensit oluşumu son bulmaz. M_s sıcaklığı ise çeliğin içerdiği karbon miktarına göre değişmektedir [6].

1.1.2. Gerilme Kaynaklı Martensitik Faz Dönüşümleri

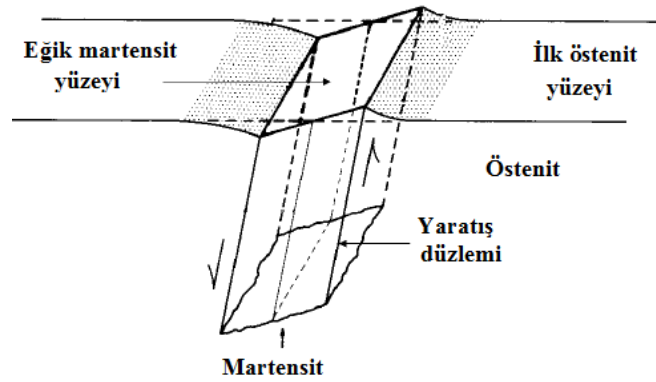
Martensitik faz dönüşümleri, sıcaklık değişimi ile oluşabildiği gibi malzemeye uygulanan gerilme ile de oluşabilmektedir. Şekil 1.4'te gerilme ile malzemenin faz değişim sıcaklıklarının nasıl değiştiği görülmektedir. Mavi çizgiler faz değişim sıcaklıklarını göstermektedir. Şekil 1.4'te görüldüğü gibi malzemeye uygulanan gerilme miktarı arttıkça malzemenin martensit ve östenit başlama ve bitiş sıcaklıkları da artmaktadır. Eğer A_f sıcaklığının üzerinde olan bir malzemeye gerilme uygulanmaya başlanırsa gerilme arttıkça kırmızı çizgiyle gösterildiği gibi malzemede martensit fazı görülmeye başlanacaktır. Uygulanan gerilme kaldırılınca malzeme tekrar yüksek sıcaklıktaki kararlı durumuna yani östenit fazına dönüşecektir [5].



Şekil 1.4. Martensitik faz dönüşüm sıcaklıklarının gerilmeye bağlı değişim grafiği

1.1.3. Martensit Oluşumunun Mekanizması

Martensitin oluşumu kaydırımlı (displacive) olup, östenitin martensite kayma mekanizması ile dönüşümü Şekil 1.5'te görülmektedir. Kayma oklarının gösterildiği birbirine karşılıklı iki düzlem arasında ilk martensit oluşumu gözlenmektedir. Martensit kristallerinin tercihli olarak oluştukları bu östenit kristal düzlemlerine yaratılış düzlemi denmektedir. Kayma ile birlikte başlangıçta dik olan düzlem dönmekte veya eğilmektedir [3].

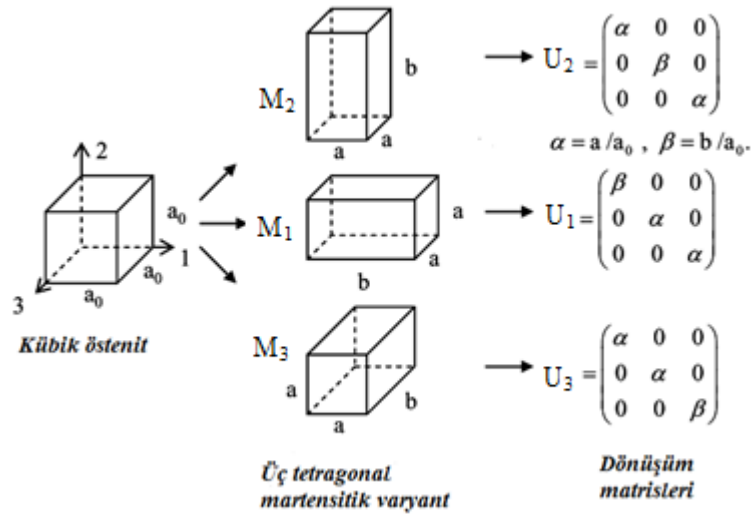


Şekil 1.5. Martensit oluşumunun şematik gösterimi [3]

Ayrıca Şekil 1.5'te gösterilen martensit oluşumu sırasında östenit fazında yüksek gerinimler oluşmaktadır. Östenit fazının sünek olduğu malzemelerde bu durum çok sorun olmasa da seramiklerde bu durum çatlaklara yol açmaktadır [3].

1.1.4. Martensitik Faz Dönüşümlerinin Kristalografisi

Tipik bir martensitik faz dönüşümünde östenit fazı martensit fazından kristalografik olarak daha simetriktir. Bundan dolayı her bir martensitik kristal yapısı farklı kristalografik oryantasyonlarda oluşabilmektedir. Farklı yönlerde oluşan her bir martensitik kafes yapısı varyant olarak adlandırılmaktadır. Varyantların boyu birkaç nanometreden birkaç milimetreye kadar bir ölçek arasında değişebilmektedir. Östenitin kafes yapısının martensitin kafes yapısına göre daha simetrik olması daha fazla martensitik varyantın oluşmasına etken olmaktadır. Oluşan varyantların sayısı deneysel olarak bulunabilmektedir [10]. Örneğin kübik yapıdaki östenit, kübik yönlerden bir tanesi boyunca deformasyona uğratılırsa Şekil 1.6'daki gibi 3 farklı tipte tetragonal martensitik yapısından biri oluşabilir. Şekil 1.6'daki α, β ve γ değerleri malzemenin malzemeye değişmektedir ve malzemenin kafes parametreleri ölçülerek bu değerler elde edilebilir. Ayrıca kübik kafes yapısına sahip östenitten 6 farklı ortorombik yapıya sahip martensitik varyant oluşabilir. Bunun yanı sıra eğer östenit tetragonal yapıdaysa 6 farklı ortorombik martensitik varyanta veya 12 farklı monoklinik yapıya sahip martensitik varyanta dönüşebilir [10].

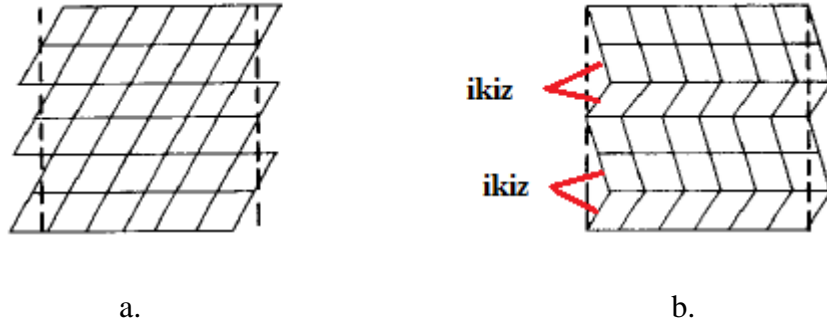


Şekil 1.6. Kübik östenitten üç farklı tipte tetragonal martensit oluşumu [2]

Martensitik faz dönüşümü esnasında malzemenin belirli bölgelerinin termomekanik özelliklerinde ani bir değişim meydana gelmekte ve bu dönüşümden ötürü malzeme

belirli bir miktarda deformasyona uğramaktadır. Bu deformasyon, dönüşüm (Bain) gerinimi ile tanımlanmaktadır [11].

Martensit oluşumu sırasında yayılım engellendiğinden dolayı martensit kristali içerisinde Şekil 1.7’de görüldüğü gibi kayma (dislokasyon hareketi) ve/veya ikizler oluşabilmektedir [3]. Martensit oluşumu sırasında tek varyant oluşuyorsa dönüşüm gerçekleştirilmemiş komşu kafesin gerinimi, yapıya uyum sağlayamayacak şekilde çok yüksek olacaktır. Kafeslerde oluşan gerinim değerleri arasındaki fark, iç gerilmelere ve gerinimlere neden olacaktır. Makroskopik gerinim oluşmadan yüksek gerinimleri azaltıp, uyumluluğu sağlamak için ikiz yapıların oluşması ikizlenme olarak adlandırılmaktadır. İkizlenme, düzlemlerin kaymaya maruz kalarak başka bir varyantın ayna görüntüsünü oluşturması olayıdır [5].



Şekil 1.7. Martensit kristali içerisinde oluşan a) kayma (dislokasyon hareketi) b) ikizler [3]

Faz dönüşümü esnasında ince yapıdaki (iğnemi) çıta veya yapraksı yapıdaki plaka şeklindeki martensitik birimler, iç gerilmelerdeki elastik enerjinin olabildiğince az seviyede olması için birkaç martensitik varyantın birleşiminden meydana gelmektedir. Dolayısıyla faz dönüşümü sırasında oluşan mikroyapı, enerji minimizasyonunun bir sonucudur. Tek kristalli bir malzemenin veya çok kristalli bir malzemenin her bir taneciği pek çok sayıdaki martensitik birimlerden oluşmaktadır. Bundan dolayı martensitik faz dönüşümleri çok ölçekli ve çok değişkenli bir problem haline gelmektedir [12].

Martensitik faz dönüşümleri doğada, fiziksel deneylerde ve modern teknolojilerde sıkça görülen bir olaydır. Çeşitli metallerde, alaşımlarda, seramiklerde ve biyolojik

sistemlerde martensitik faz dönüşümleri görülmektedir [10]. Bu dönüşümler ayrıca ŞHA'nın ana deformasyon mekanizmasını oluştururlar. İkizlenme, süperelastisite ile bir ve iki yönlü şekil hafıza etkisine sebep olurlar.

1.2. Şekil Hafızalı Alaşımlar

Birçok malzeme martensitik faz dönüşümüne uğramasına rağmen yalnızca birkaç malzemede şekil hafıza özelliği görülmektedir [10]. Ni-Ti, CuZnAl and CuAlNi gibi malzemeler ŞHA'dan bazılarıdır.

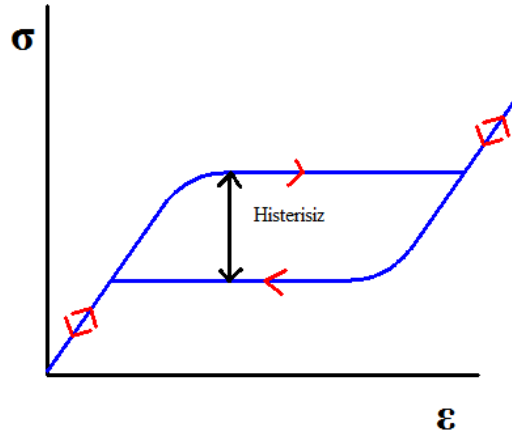
Şekil hafızalı alaşımlar (ŞHA), yüksek deformasyonlara maruz kalsalar bile uygulanan yük kaldırıldığı zaman orijinal şekillerine dönebilen malzemelerdir ve deformasyon mekanizmaları martensitik faz dönüşümlerine dayanmaktadır. Yani yüksek simetriye sahip östenit ile düşük simetriye sahip martensit arasında dönüşüm söz konusudur. Bu alaşımlarda genellikle östenit, hacim merkezli kübik yapıya sahipken bu yapı, kafes kayma mekanizmasıyla martensitik yapıya dönüşmektedir. Eğer bu dönüşüm sıcaklığın düşürülmesiyle sağlanıyorsa martensitik varyantlar birbirini kompanse etmektedirler ve makroskopik olarak belirgin deformasyonlar görülmemektedir. Fakat dönüşüm bir yükleme yardımıyla sağlanıyorsa, yükleme yönüne, tipine ve büyüklüğüne göre belirli martensitik varyantlar oluşabilmekte ve uygulanan yük yönünde gözle görülebilecek düzeyde deformasyonlar meydana gelmektedir. Eğer yük kaldırılırsa veya malzeme ısıtılırsa oluşan bu şekil değişikliği kaybolur ve martensitik varyantlar tekrar östenit fazına döner [13]. ŞHA, termomekanik yükler altında karmaşık ve doğrusal olmayan bir gerilme-gerinim davranışı gösterirler. Termoelastisite, süperelastisite ve şekil hafıza etkisi özel durumlarda karşılaşılan bu davranış tiplerindedir [14]. Sıcaklık değişimiyle birlikte termal gerilme, gerinim ve deformasyon oluşumu termoelastisite özelliğini tanımlamaktadır. Süperelastisite, A_f sıcaklığının üzerinde olan malzemeye deformasyon uygulandıktan sonra yüklemenin kaldırılması ile birlikte malzemenin eski halini tekrar alması durumudur [15]. Şekil hafıza etkisi ise genel olarak A_f sıcaklığının altına soğutulan malzemeye deformasyon uygulanıp daha sonra A_f sıcaklığının üzerine ısıtılması ile malzemenin ilk durumdaki şekline geri dönmesidir [16].

ŞHA sahip oldukları süperelastisite, şekil hafıza etkisi, biyouyumluluk ve yüksek sönümlenme kapasitesi özellikleri ile birçok alanda kullanılmaktadır. Dirimsel tıp, mikroeletromekanik sistemleri, uzay mühendisliği ŞHA'nın kullanıldığı alanlardan bazılarıdır [16]. Bunun yanı sıra ŞHA kendine has özellikleri sayesinde eşzamanlı bir şekilde çalıştırıcı (actuator) ve sensör olarak kullanılabilirler. Destek, splint, boru birleştirici ve sıcaklık kontrollü vanalar ŞHA'nın malzeme olarak kullanıldığı parçalardandır [17].

ŞHA'nın süperelastisite ve şekil hafıza etkisi özelliklerine sahip olmasının en önemli nedeni malzemenin varyant sınırlarının oldukça hareketli olmasıdır. Bu nedenle kristalografik kayma yerine ikizlenmenin oluşması veya bozulması gerçekleşmektedir. Böylece bu özelliklere sahip malzemelere yüksek deformasyon uygunsu bile geri yükleme sonucunda malzemeler eski durumlarına geri dönebilmektedir [5,18].

1.2.1. Süperelastisite

ŞHA'nın sahip oldukları süperelastisite özelliği malzemenin yüksek deformasyonlarda bile elastik olarak kalmasını böylelikle yükleme kaldırıldığında tekrar eski haline dönmesini sağlayan bir özelliktir. Martensitik faz dönüşümü geçiren malzemenin süperelastisite özelliğinin olması için deformasyon uygulanan sıcaklık A_f sıcaklığının üzerinde olmalıdır. Bu özelliğinden dolayı ŞHA, gözlük çerçevelerinde ve cep telefonu antenlerinde kullanılmaktadırlar. Ayrıca Şekil 1.8'de görüldüğü gibi ŞHA'nın yüklenmesi ve yükün kaldırılması durumunda gerilme farkı meydana gelerek histerisiz oluşur ve enerji harcanımı oluşur. Bu sebepten, bu malzemeler titreşim sönümlenmesinin gerekli olduğu hava araçları ve otomotiv sektörlerinde ve yapıların depreme karşı korunması amacıyla kullanılabilirler [19].

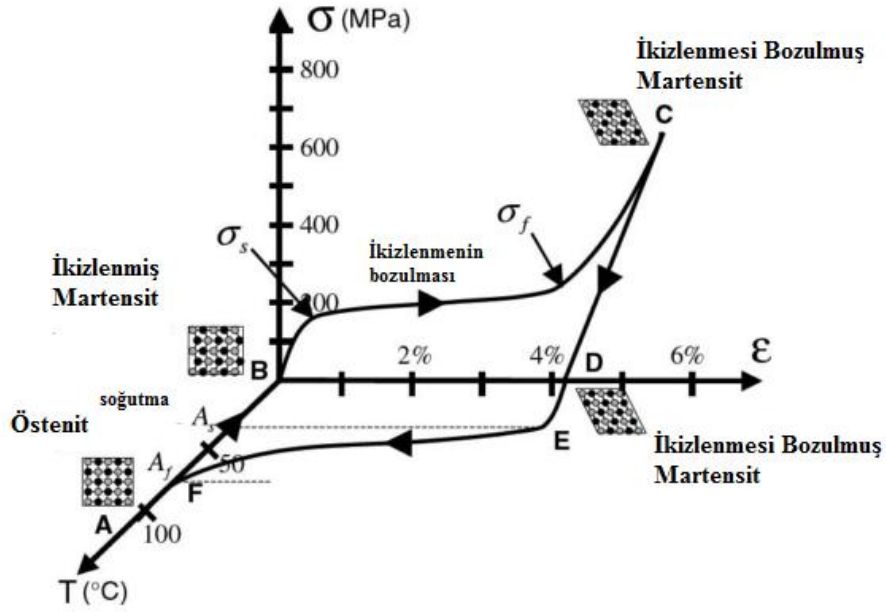


Şekil 1.8. Şekil Hafızalı Alaşımların Süperelasite ve Histerisiz Özelliği

1.2.2. Şekil Hafıza Etkisi

Şekil hafıza etkisi bir malzemenin sahip olabileceği en ilginç özelliklerdendir. ŞHA, ikizlenmiş martensitik fazındayken deformasyona uğrarsa ve daha sonra A_s östenit başlangıç sıcaklığının altında bu yüklemeyi kaldırırsa malzeme üzerinde kalıcı deformasyon oluşur. Eğer ardından bu malzeme A_f östenit bitiş sıcaklığının üzerindeki bir sıcaklığa ısıtılırsa östenit fazında sahip olduğu orijinal şekline geri dönmektedir. Şekil hafıza etkisi durumu Şekil 1.9'daki gerilme-gerinim-sıcaklık grafiğindeki termomekanik yüklemeyi izlendiğinde daha iyi anlaşılabilir. Malzeme östenit fazında iken, soğutularak ikizlenmiş martensit fazı (B) elde edilir. İkizlenmiş martensite σ_s gerilme seviyesinden başlanarak yüklemeyi uygulanırsa taneciklerin yeniden düzenlenmesi meydana gelir ve oluşması daha muhtemel varyantlar diğer varyantlara baskı kurarak büyürler. İkizlenmenin bozulması σ_f gerilme seviyesinde tamamlanır ve tamamen ikizlenmesi bozulmuş (detwinned) martensit oluşur. C noktasından D noktasına kadar yüklemeyi kaldırılırken malzemede elastik deformasyon olur, ancak ikizlenmesi bozulmuş martensit fazı korunur. Gerilmenin yokluğunda yapılan ısıtma işleminde ise E noktasındaki A_s sıcaklığına erişilince geri dönüşüm başlar ve F noktasındaki A_f sıcaklığında bu dönüşüm tamamlanır. Böylelikle tamamen östenit fazı elde edilir. Eğer ikizlenmenin bozulması esnasında kalıcı plastik gerinimler oluşmadıysa malzeme bu işlemler sonucunda tamamen A noktasındaki ilk şekline geri dönmüş olur [20].

Şekil hafıza etkisine sahip olması sayesinde ŞHA, ameliyatlarda stent malzemesi olarak kullanılabilir. Eskiden damar cerrahisinde balon yardımıyla genişletilen stentler, malzeme olarak ŞHA kullanıldıktan sonra daha rahat bir şekilde vücuda adapte edilmişlerdir. Çünkü stentler damarın içine yerleştirilebilmekte ve vücut sıcaklığında bu malzemeler şekil hafıza etkisiyle birlikte tasarlanan ilk şekillerine geri dönebilmektedir [21].



Şekil 1.9. NiTi malzemesi için şekil hafıza etkisini gösteren gerilme-gerinim-sıcaklık grafiği [22]

1.3. Literatür Taraması

Bu bölümde, elastik malzemelerde meydana gelen martensitik faz dönüşümlerinin teorileri, sonlu elemanlar (SE) yöntemiyle nasıl modellendikleri ve deneysel çalışmalar neticesinde ortaya çıkan sonuçlar incelenmiştir. Bu çalışmaların kendi çalışmalarımıza ışık tutması hedeflenmiştir.

ŞHA'ya yükleme uygulanarak gerçekleştirilen faz dönüşümlerinin SE yöntemi ile modellenmesi çok eski olmayan bir yöntem olduğu için bu alanda yapılan çalışmalar çoğunlukla 2000'li yıllardan sonra gerçekleşmiştir. Yükleme altında malzemenin göstereceği davranışı modellemek için ABAQUS SE yazılımının sağlamış olduğu bir altyordam olan UMAT (UserMaterial) kullanıcı ara yüzü kullanılmaktadır. Bu tezde

yapılmış olan çalışmalarda da UMAT altyordamı kullanılarak martensitik faz dönüşümlerinin modellenmesi yapılmıştır.

1.3.1. Elastik Malzemeler için Geliştirilen Martensitik Faz Dönüşümü Modelleme Yöntemleri

Martensitik faz dönüşümüne uğrayan elastik malzemelerin modellenmesi için geliştirilen pek çok teori bulunmaktadır. ŞHA'nın modellenmesinde kullanılan bu teoriler genel olarak mikromekanik veya fenomenolojik modellerdir. Mikromekanik esaslı modellerde genellikle tek kristalin mikromekaniğinden ve termodinamik yasalardan yola çıkılarak faz dönüşümüne neden olan enerji hesaplanır. Mikromekanik modellerde sadece kristal kafes parametreleri ve kristal yapılarda meydana gelen martensitik dönüşümler ile ilgili bilgiler kullanılarak malzemenin davranışı hakkında bilgi edinilmektedir. Fakat bu modeller oldukça karmaşık olup çözüme ulaşabilmek için çok fazla nümerik hesaplama yapılması gerekmektedir. Diğer bir yandan fenomenolojik modellemede ise ŞHA'nın davranışları termodinamiğin 2. yasasından yola çıkılarak oluşturulan kısıtlara ve bazı iç değişkenlere bağlı olan makroskopik serbest enerjiye göre modellenmektedir. Bu modellerde malzemenin davranışı doğrudan malzemenin mikromekanik seviyelerine bağlı değildir. Bu nedenle daha hızlı çözümlenmeler yapılabilir [23]. Martensitik faz dönüşümüne uğrayan elastik malzemelerin modellenmesi için geliştirilen teorilerin temellerinden aşağıda bahsedilmiştir.

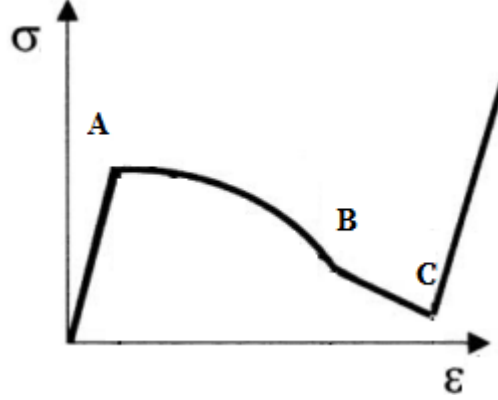
Nano ölçekte malzemelerin davranışlarını modelleyen Ginzburg-Landau teorisinde faz-alan yaklaşımı kullanılmaktadır. Faz-alan teorisi çok varyantlı martensitik dönüşümünün modellenmesi için geliştirilmiştir. Bu modelde homojen yaklaşım kullanılarak çözülen elastik problemlerin kesin sonucu esas alınmıştır [24]. Bu modelin en önemli avantajı özel sayısal bir algoritma geliştirilmesine ihtiyaç duymamasıdır [25]. Chen ve Shen [26] çalışmalarında zamana bağlı Ginzburg-Landau eşitliğini çözmek için verimli ve doğru nümerik bir metot uygulamışlardır. Rasmussen vd [27] Ginzburg-Landau modelini kullanarak kübik yapıdan tetragonal yapıya geçişin olduğu martensitik faz dönüşümünü üç boyutlu olarak modellemişlerdir.

Ancak bu modelin daha büyük ölçeklerde eksiklikleri vardır. ŞHA'nın ve çeliklerin karakteristik tane boyutu 10-1000 nm arasında değiştiği düşünülürse, yaklaşık 1 nm ara yüzey uzunluğunu hesaba katılarak hazırlanan bu teori ile martensitik mikroyapı modellenmesi oldukça zordur [25].

Termomekanik fenomenolojik modellere göre termomekanik özellikler, martensitik faz dönüşümü gerçekleştiren malzemelerin bünye denklemlerini oluşturmada önemli bir paya sahiptir. Çünkü malzemenin termodinamiği malzeme davranışlarını kısıtlamaktadır. Malzemenin termodinamik bünye denklemleri, malzemenin serbest enerji fonksiyonu ve bozulma potansiyeli tanımlanarak bulunmaktadır [28]. Serbest enerji fonksiyonu hesaplanırken, martensitik varyantlar ve östenit ile martensit arasındaki etkileşim dikkate alınarak etkileşim enerjisi hesaba katılır. Bunun yanı sıra dönüşümü başlatan kritik gerilme değeri sıcaklık değerine bağlı olduğundan kimyasal enerjinin hesaplanması bu teoride önemli bir yere sahiptir [29]. Thamburaja ve Anand'ın [30] geliştirdikleri malzeme modelinde en önemli değişkenler Cauchy gerilmesi, deformasyonun gradyanı, sıcaklık ve kristal dönüşüm sistemleridir. Bu malzeme modelini kullanarak NiTi ŞHA'sının makroskopik gerilme-gerinim davranışını SE programı kullanarak hesaplamışlardır. Termomekanik fenomenolojik modeller, martensitik varyantların hacimsel oranlarının sürekli dağılımı esas alınarak hazırlanmış modellerdir [25].

Enerji minimizasyonuna dayalı Roytburd ve Slutsker'un [31] kullanmış oldukları modelde ise fazların hacim oranları uygulanan gerilme (gerinim) ve sıcaklığın fonksiyonu olarak tanımlanmaktadır. Bu modelde gerilme kaynaklı dönüşümlerde, dönüşüm boyunca martensitik varyantların hacim oranlarının değiştiği tespit edilmiştir. Bu durum elastisite modülünün negatif olması gibi bazı kararsızlıklara neden olmaktadır. Roytburd ve Slutsker'un [31] gerinim kontrollü yaptıkları çalışma sonucunda martensitik faz dönüşümü süresince çoğunlukla bir martensitik varyantın olduğu bunun yanında çok az hacim oranına sahip bir başka varyantın olduğu sonucunu elde etmişlerdir. Gerinim kontrollü çalışmalarında elde ettikleri gerilme-gerinim grafiği Şekil 1.10'da görülmektedir. Şekil 1.10 incelendiği zaman faz dönüşümü sırasında iki farklı aşamanın bulunduğu, A noktasından B noktasına

kadar doğrusal olmayan, B noktasından C noktasına kadar ise doğrusal bir eğrinin oluştuğu gözlemlenmektedir.



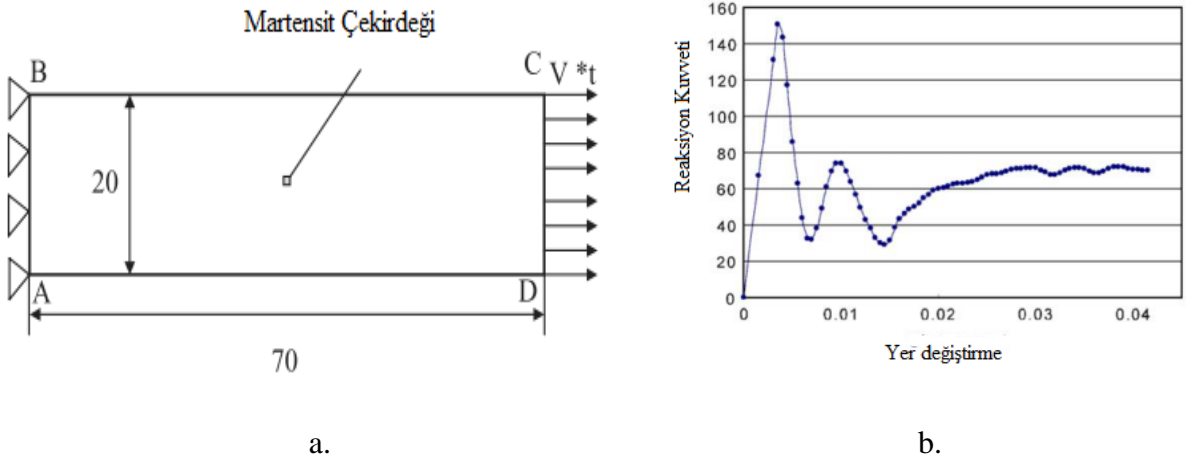
Şekil 1.10. Roytburd ve Slutsker'un [31] gerinim kontrollü çalışmalarında elde ettikleri gerilme-gerinim grafiği

1.3.2. SE Yöntemi ile Yapılan Çalışmalar

Idesman vd [25], yaptıkları 2 boyutlu çalışmalarda çok varyantlı martensitik faz dönüşümü ve elastik malzemelerdeki martensitik mikroyapı ile ilgili yeni bir model geliştirmişlerdir. Geliştirilen bu model, faz dönüşümü sırasında oluşan gerinim yumuşamasını ve gerinim bölgeselleşmesini içeren bir termomekanik modeldir. Kullanılan matematiksel teori Landau-Ginzburg modelinden farklı olarak 100 nm'den büyük ölçülerde de kullanılabilir bir faz-alan modelidir. Nümerik modellemede bütün hesaplamalar, 6 düğüm noktalı ikinci dereceden üçgen sonlu elemanları kullanılarak yapılmıştır. Kübik yapıdan tetragonal yapıya dönüşen ŞHA, tek eksenli çekme yükü altında modellenmiştir. Sıcaklığın homojen olarak dağıldığı ve oluşabilecek üç dönüşüm geriniminden ikisinin oluşacağı kabul edilmiştir. Modelleme yapılırken $E = 2 \times 10^5 \text{ MPa}$, $\nu = 0.3$ değerleri kullanılmıştır.

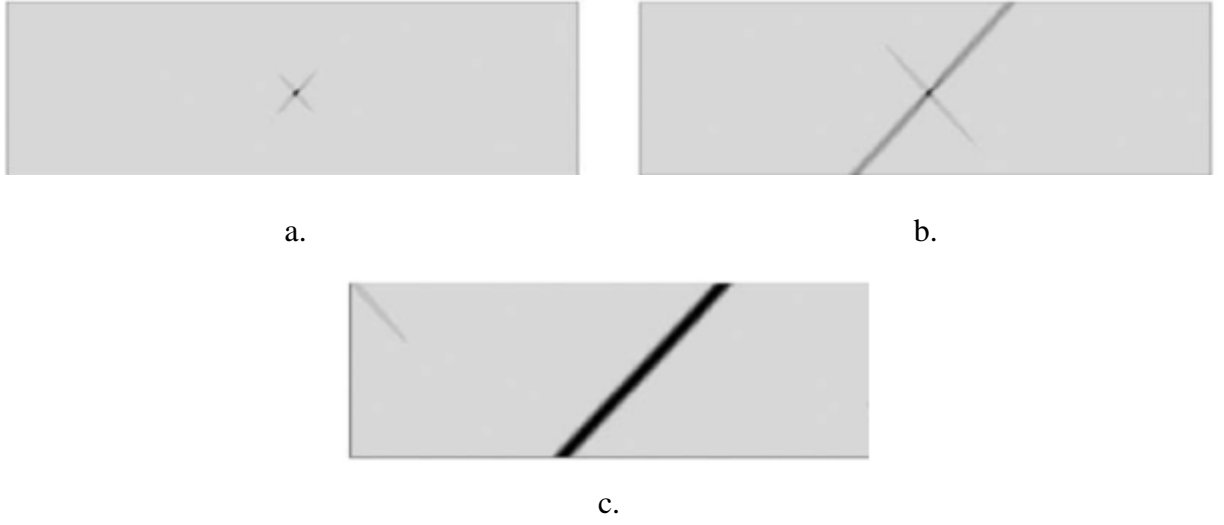
Idesman vd [25], ilk önce Şekil 1.11.a'da görülen dikdörtgen bir plakada oluşan faz dönüşümünü hesaplamışlardır. Çekme yüklemesi $0,5 \times 10^{-8} \text{ s}^{-1}$ değerinde bir gerinim hızı verilerek gerçekleştirilmiştir. Plakanın orta bölgesinde küçük bir martensit hacminin olduğu varsayılarak hesaplamalar yapılmıştır. Martensitik mikroyapı %1'lik bir gerinim değerine ulaşıldığında görülmeye başlanmıştır. Şekil 1.11.b'de

yer alan plakanın sağ tarafındaki CD bölgesinin yerdeğiştirme-kuvvet grafiğinden ise faz dönüşümünün başladığı zaman gerilmenin önemli bir miktarda azaldığı görülmektedir. Ayrıca yeni martensitik plakaları oluşumu sırasında da yerdeğiştirme-kuvvet grafiğinde daha düşük genlikte salınımların meydana geldiği görülmektedir. Bu grafik makro seviyedeki gerilme-gerinim grafiğine benzer sonuçlar vermektedir. Mikroyapıdaki değişim incelendiğinde yükleme sırasında sadece tek bir martensitik varyantın oluştuğu görülmüştür. Oluşan bu martensitik varyant Şekil 1.12.a,b'deki gibi ilk zamanlarda ortada birbirine dik iki ince bant halinde bulunurken, zamanla Şekil 1.12.c'de görüldüğu gibi bu iki bant arasındaki etkileşimden dolayı bir bant büyümeye devam ederken diğerini kaybolmuştur.



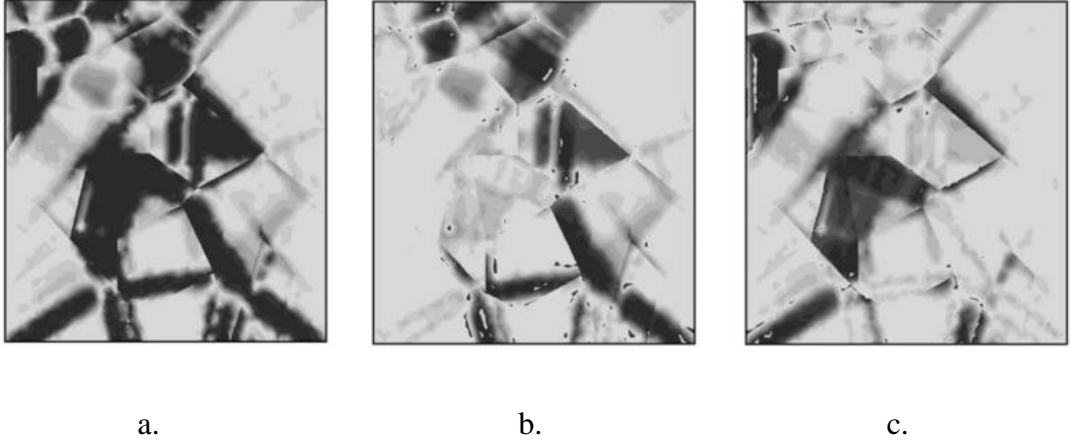
Şekil 1.11. Idesman vd'nin [25] Faz dönüşümü analizi a) tek eksenli çekme yapılan östenitik dikdörtgen plaka b) CD kısmında oluşun yer değiştirme-kuvvet grafiği

Idesman vd [25], daha sonra östenitin kristal eksenini ile çekme ekseninin farklı yönlerde olmasının ne gibi etkiler doğuracağını incelemişlerdir. Yapmış oldukları yaklaşımlara göre çekme ekseninin oryantasyonu ile dönüşüm gerinimlerinin oryantasyonları aynı şekilde değişmektedir. Yani, yeni dönüşüm gerinim vektörleri, dönme matrisleri kullanılarak hesaplanmaktadır. x_3 eksenini etrafında 30° ve 60° döndürülmüş açılarda tek eksenli çekme yüklemesi uygulandığı zaman 30° döndürülmüş olan mikroyapıda birinci martensitik varyant oluşurken, 60° döndürülmüş olan mikroyapıda ikinci martensitik varyant oluşmuştur. Sonuç olarak iki analizde de tek bir martensitik varyant diğerine baskın çıkmıştır.



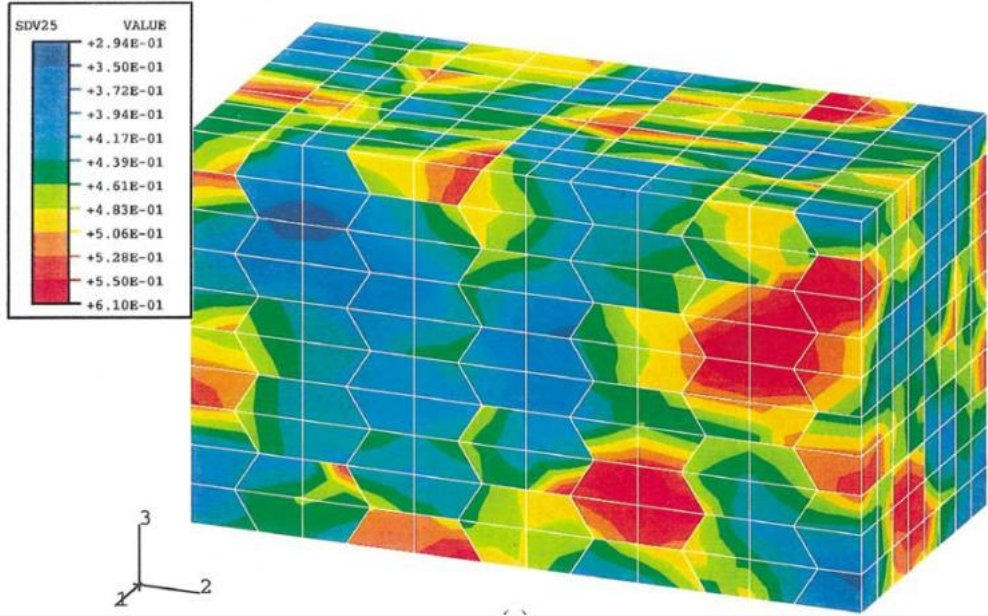
Şekil 1.12. Idesman vd'nin [25] 1. martensitik varyantın hacim oranının gelişimini gösteren grafik a) $\varepsilon = 0.00075$ b) $\varepsilon = 0.00375$ c) $\varepsilon = 0.0075$

Idesman vd [25], rasgele tanecik oryantasyonları verdikleri çok kristalli dikdörtgen plakaya çekme analizini SE yöntemi kullanarak yapmışlardır. Faz dönüşümü sırasında yalnızca iki martensitik varyantın oluşabileceği kabul edilmiştir. Faz dönüşümünün başladığı ilk basamaklarda martensitik plakalar bir tanecikten diğer taneciğe doğru büyüyerek ilerlemiştir. Ayrıca martensitik bölgeler arasında küçük kalıntı östenit bölgeleri kalmış ve çoğu martensitik bölge iki varyanttan oluşacak şekilde çok kristalli bir mikroyapı meydana gelmiştir. Oluşan mikroyapılar Şekil 1.13'te görülmektedir. Idesman vd'nin [25], yapmış oldukları bu nümerik çalışma sonucunda, McDougall ve Wayman'ın [32] çok kristalli malzemeler üzerinde yapmış oldukları deneysel çalışmalarla mikroyapısal olarak oldukça benzer sonuçlar elde etmişlerdir.



Şekil 1.13. Idesman vd'nin [25] rasgele oryantasyonlu çok kristalli bir plakaya $\varepsilon = \% 0.1$ 'lik gerinim uygulandıktan sonra oluşan a) östenitin b) 1. martensitik varyantın c) 2. martensitik varyantın hacimsel oranlarının dağılımı

Lim ve McDowell [29], sayısal çalışmalarında süperelastik rejimde olan çok kristalli NiTi ŞHA'sının termomekanik davranışını SE modeli kullanarak incelemişlerdir. ŞHA'nın bünye denklemlerini oluştururken taneler arasındaki etkileşimi hesaba katarak termomekanik model geliştirmişlerdir. Modelleme yaparken her bir eleman için farklı kristalografik oryantasyonlar seçilmiştir. Ayrıca martensitten östenite ve östenitten martensite geçiş için kritik dönüşüm enerji değerleri tanımlanmıştır. SE modelinde malzemeye aksenal yükleme uygulanmıştır. Zamandan bağımsız ve izotermal olarak yapılan simülasyonlar Lim ve McDowell'ın [33] yapmış olduğu deneysel çalışmalarla karşılaştırılmıştır. Yapılan çalışmanın sonucunda yükleme durumunda ortaya çıkan SE sonuçlarındaki çekme-basma asimetrisinin ve gerinim sertleşme hızının deney sonuçlarıyla uyduğu, fakat yüklemenin kaldırılması esnasında oluşan SE sonuçlarının deneysel sonuçlardan farklı çıktığı gözlemlenmiştir. Oluşan bu farklılıkların martensit ikizlenmesinin bozulması, yeniden oryantasyon ve diğer bozunum mekanizmaları gibi kompleks durumlardan meydana geldiği düşünülmektedir. Lim ve McDowell [29], yaptıkları bu çalışmada martensitik hacimlerin yükleme sonucundaki dağılımlarını da incelemişlerdir ve bu dağılımların hemen hemen rasgele olduğu sonucunu elde etmişlerdir. Çekme analizinde %3'lük eşdeğer gerinim uygulandıktan sonra elde edilen martensitik hacim dağılımı Şekil 1.14'te görülmektedir.



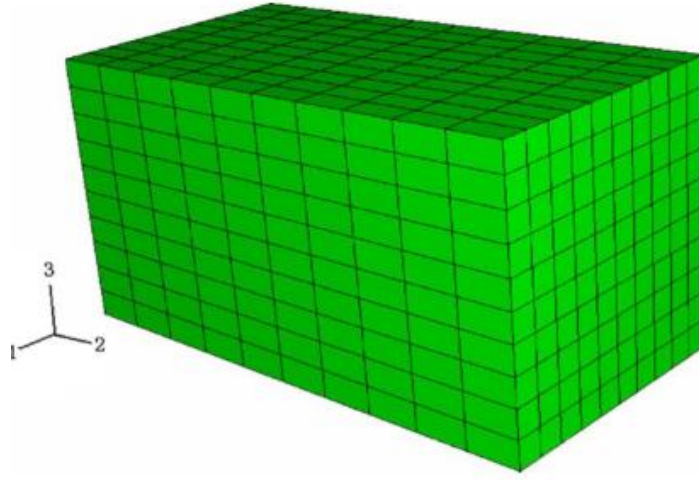
Şekil 1.14. Lim ve McDowell'ın [29] çekme simülasyonunda %3'lük eşdeğer gerinimde elde ettikleri martensitin hacimsel dağılımı

Stein ve Zwickert [34], çalışmalarında makroskopik seviyedeki martensitik faz dönüşümünün nümerik simülasyonlarını gerçekleştirmek için uygun bir matematiksel modeli kullanmayı amaçlamışlardır. Bunun için Govindjee ve Miehe'nin [35] geliştirmiş oldukları matematiksel modeli esas alarak 3 boyutlu SE analizi yapmışlardır. Yapılan çalışmalarda 2 farklı CuAlNi tek kristalli ŞHA numunesine ABAQUS SE programı kullanılarak tek eksenli çekme uygulanmıştır. Numunelerden biri şekil hafıza etkisi göstermekte, diğeri ise süperelastik özelliğe sahiptir. Kullanılan model, yassı dikdörtgen biçiminde olup ağ örgüsü 3 boyutlu dörtyüzlü elemanlar kullanılarak yapılmıştır. Faz dönüşümünün başladığı yerler olan numunelerin orta bölgelerinde ağ örgüsü artırılarak iyileştirme işlemi yapılmıştır. CuAlNi malzemesinde kübik yapıdan ortorombik yapıya dönüşüm olduğu için 6 farklı dönüşüm matrisi tanımlanabilmektedir. ABAQUS SE kullanılarak yapılan hesaplamalar sabit sıcaklıkta gerinim kontrollü yapılmış olup 2 basamağa ayrılmıştır. İlk basamakta aksenal bir yer değiştirme verilmiş, ikinci basamakta ise ilgili yüklemeye sıfıra indirgenmiştir. Şekil hafıza etkisine sahip numunede analiz sonucunda sadece tek bir varyantın oluştuğu görülmüştür. Bu analizde ikinci basamak sırasında her iki fazın da hacim oranları değişmemiştir. Malzemenin A_f sıcaklığı üzerinde bir

sıcaklığa ısıtılması durumunda, malzeme tekrar ilk östenit halindeki duruma gelmektedir. Süperelastisite özelliğine sahip malzemede yapılan analizlerde ise bir önceki analizden farklı olarak ikinci basamakta geri dönüşüm meydana gelmiştir.

Gall vd [36], tanecik sınırlarının NiTi ŞHA malzemesinde gerilme kaynaklı martensitik faz dönüşümünü nasıl etkilediğini deneysel ve SE modeli kullanarak incelemiştir. Bünye denklemleri olarak daha önceden gerilme kaynaklı martensitik faz dönüşümünün bünye denklemlerini ifade eden modeli çok kristalli malzemeler için geliştiren Patoor vd'nin [37] ve Gall ve Şehitoğlu'nun [38] matematiksel modellerini kullanmışlardır. Yapılan deneysel ve sayısal analizler sonucunda çekme testi uygulanan $\langle 111 \rangle$ yönünde baskın fiber yapısına sahip çok kristalli malzeme ile [111] yönündeki tek kristalli malzeme için aynı gerilme-gerinim grafikleri elde edilmiştir. Ayrıca martensite dönüşmeye başlayan taneciklerde yerel gerilme bölgelerinin oluşumu, martensitin komşu taneciklere doğru yayılmasını sağlamakta olduğu anlaşılmıştır.

Wang ve Yue [39], NiTi ŞHA'sının farklı sıcaklıktaki süperelastik davranışını tahmin edebilmek için Gall ve Lim'in [10,29,36] Gibbs serbest enerjisini kullanarak hazırladığı modeli geliştirerek östenit ve martensitin elastik özelliklerini de dikkate alacak şekilde SE modeli hazırlamışlardır. NiTi ŞHA'sında martensitin elastisite modülü, östenitin elastisite modülünün üçte biri ile yarısı civarındadır. Örneğin, Thamburaja ve Anand'ın [40] yapmış olduğu çalışmada kullanılan NiTi alaşımında östenitin elastisite modülü martensitin elastisite modülünün iki katıdır. SE analizlerinde Şekil 1.15'teki gibi farklı oryantasyonlara sahip 1000 tane C3D8 tipi eleman kullanmışlardır. Yaptıkları analizler sonucunda östenit ve martensitin elastisite modüllerinin farklı alınarak yapılan analizlerdeki sonuçların aynı alınarak yapılan analizlere göre deneysel sonuçlara daha yakın olduğunu gözlemlemişlerdir.



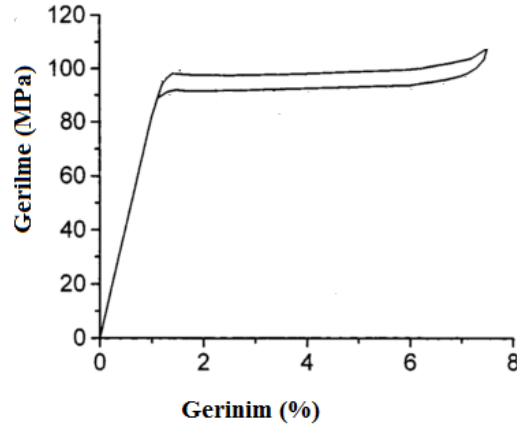
Şekil 1.15. Wang ve Yue'nun [39] hazırladıkları SE modeli

Wang ve Yue [15], NiTi ŞHA'sının farklı sıcaklıktaki süperelastik davranışını tahmin edebilmek için yine östenit ve martensitin elastik özelliklerini farklı olarak ele alarak üç farklı sıcaklıkta SE modeli hazırlamışlardır. SE modelinde kullandıkları malzeme parametrelerini tek sıcaklıkta yapılan deneysel verileri kullanarak hesaplanmıştır. Hesaplanan bu malzeme parametreleri kullanılarak yapılan analizler sonucunda ortaya çıkan gerilme-gerinim grafiğinin daha sonra bu sıcaklıklarda yapılan testlerdeki sonuçlarla oldukça yakın olduğunu görmüşlerdir. Yapılan bütün çalışmalar sonucunda, tek sıcaklıkta yapılan deney sonucundaki veriler kullanılarak daha sonra herhangi bir deneye gerek kalmadan NiTi alaşımlarının süperelastik rejimine sahip gerilme-gerinim grafiğini SE analizleri yardımıyla bulunabildiğini göstermişlerdir.

1.3.3. Deneysel Çalışmalar

Fang vd [41], tek kristalli CuAlNi ŞHA'sının süperelastik davranışını tek eksenli yüklemeler uygulayarak deneysel olarak incelemişlerdir. Oda sıcaklığında malzeme östenit fazda bulunmaktadır. Çekme testleri sonucunda elde edilen gerilme-gerinim grafiklerinden bir tanesi Şekil 1.16'da gösterilmiştir. Bu grafikten, deneyde kullanılan ŞHA'nın süperelastik davranış gösterdiği görülmektedir. Yükleme az olduğu esnada malzeme östenit halde bulunmaktadır ve doğrusal bir eğri mevcuttur. Gerilme değeri dönüşüm gerilme değerine ulaştığı zaman martensit fazı görünmeye

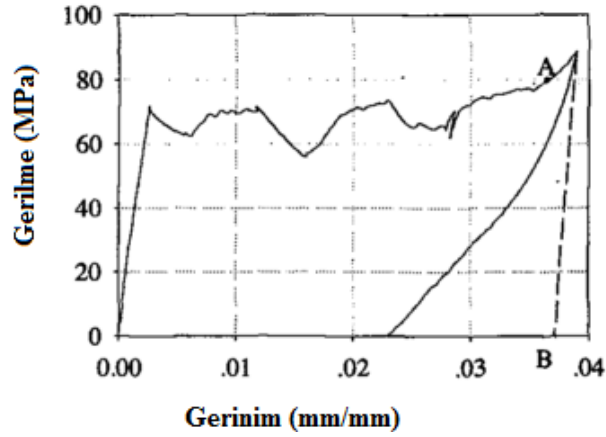
başlar. Faz dönüşümü başladığında malzemenin kristal yapısı değişirken gerilme değeri sabit olmaktadır. Oluşan mikroyapıda martensit bantları birbirine paraleldir ve sadece tek bir varyant görülmektedir. Faz dönüşümünün tamamlanması sırasında gerilme değeri çok az artmaktadır ve tamamen tek kristalli martensit elde edilmektedir. Kalıcı plastik deformasyonların başladığı gerilme değerine gelmeden önce geri yükleme işlemine başlanırsa, gerilme-gerinim eğrisi ters faz dönüşümü başlayana kadar doğrusal elastik bir şekilde olmaktadır. Daha sonra sabit gerilme değeri tekrar ortaya çıkmaktadır ve malzeme östenit haline tekrar dönmektedir. Şekil 1.16'daki grafikten de görüleceği gibi ters faz dönüşümü esnasındaki gerilme değeri ileri faz dönüşümü esnasındaki gerilmeden daha düşüktür. Bunun nedeni yükleme ve geri yükleme çevrimi sırasında enerji kaybının meydana gelmesidir ve süperelastisite kavramı bu histeresiz sebebiyle kullanılmaktadır.



Şekil 1.16. Fang vd'nin [41] çalışmasında bir numune için hesaplanmış gerilme-gerinim grafiği

Zhang vd [42] ise, tek kristalli CuAlNi ŞHA'sına çekme testi uygulamışlardır. Östenit fazının kafes eksenine göre çekme ekseninin yönü (0.087,-0.796, -0.605)'dir. Yükleme boyunca gerilmeden dolayı oluşan elastik deformasyon ve dönüşümden kaynaklanan deformasyon bütün yer değiştirme alanlarına katkıda bulunmuştur. Şekil 1.17'de malzemenin çekme yüklemesi altında oluşan gerilme-gerinim grafiği görünmektedir. Başlangıçta doğrusal olan eğri daha sonra zikzaklı bir şekilde ilerlemiştir. Yüklemenin son kısmında gerilme değeri birden artmıştır ve bu kısımda martensitik dönüşüm tamamlanmıştır. Oda sıcaklığında martensit kararlı hale

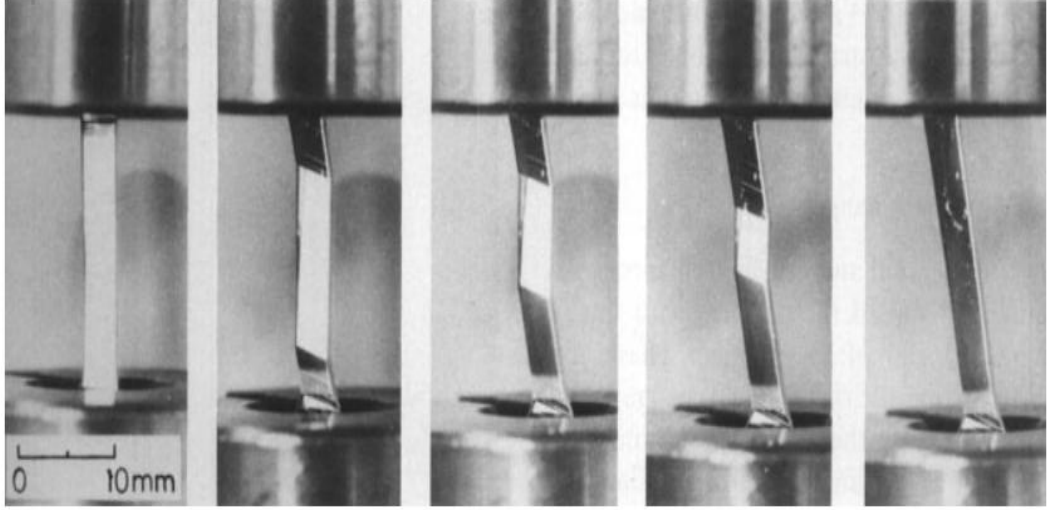
gelmiştir. Faz dönüşümü başlamadan önce malzemenin mikroyapısı incelendiği zaman tek eksenli çekme altında kayma gerinimlerinin de olduğu gözlemlenmiştir. Bunun nedeni şu şekilde açıklanabilir: Kübik fazı elastik olarak izotropik değildir ve gerilme tensörünün asal eksenleri malzemenin kafes eksenleriyle çakışık değildir. Uygulanan gerilmenin artırımıyla birlikte faz dönüşümü ani bir şekilde başlamakta ve martensitin ilerlemesi hızlı gerilme düşüşüyle birlikte olmaktadır. Ayrıca, yaratılış düzlemi ile yükleme eksenini arasında 55.5° lik bir açı vardır ve martensit bölgesinin içerisinde hala küçük östenit bölgeleri bulunmaktadır. Östenit ile martensit arasında oluşan ara yüzeyin düz bir şekilde olduğu görülmüş olup fazlar arasında ise deformasyon uyumsuzluğu söz konusu değildir.



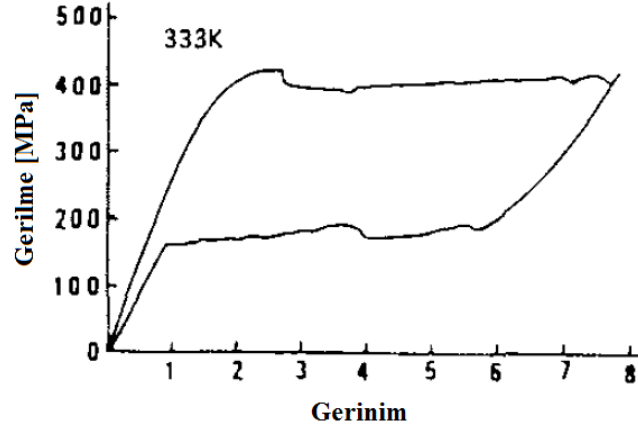
Şekil 1.17. Tek eksenli çekme altında oluşan gerilme-gerinim grafiği [42]

Dealey [43] kitabında martensitik faz dönüşümü geçiren bir malzemeye mekanik deformasyon uygulandığı zaman ne gibi değişiklikler olduğu hakkında bilgiler vermiştir. Östenit fazındaki bir malzemeye deformasyon uygulandığı zaman makroskopik olarak oluşan şekil değişikliği, Bain geriniminin olduğunu göstermektedir. Eğer içerisinde ikizler oluşmuş bir martensit fazına dışarıdan bir gerilme uygulanırsa ikizlenmenin bozulması esnasında ek bir şekil değişikliği oluşmaktadır. Martensit fazındaki tek kristale Ichinose vd'nin [44] Şekil 1.18'de gösterilmiş olan çalışmalarında yaptıkları gibi mekanik olarak gerinim uygulanırsa farklı oryantasyona sahip yeni bir martensit fazı oluşmaktadır. Martensitik faz dönüşümü gibi birinci dereceden olan faz dönüşümlerinde dönüşüm Şekil 1.18'de görüldüğü gibi ilk önce belirli bir bölgede başlar. Daha sonra bu dönüşüm, küçük

sıcaklık aralıklarında bütün malzeme üzerine yayılır. Fakat ikinci dereceden faz dönüşümlerinde ise kritik geçiş sıcaklığına ulaşıncaya malzemedeki şekil değişikliği homojen ve sürekli olarak devam eder. Faz dönüşümünün kaçınıcı dereceden olduğu Helmholtz serbest enerjisi (ψ) gibi termodinamik potansiyellerin kaçınıcı dereceden türevinin ilk olarak tekillikler içerdiğine bağlıdır. Birinci dereceden faz dönüşümünde Helmholtz serbest enerjisinin ilk türevleri tekillikler içerirken, ikinci dereceden faz dönüşümünde ise ilk türevleri sürekli ve ikinci türevleri tekillikler içermektedir [45].



Şekil 1.18. Ichinose vd'nin [44] mekanik olarak gerinim uygulanmış bir CuAlNi martensit tek kristalindeki şekil değişikliğini gösteren bir dizi kaba dağlama fotoğrafı Saburi vd [46] süperelastisite özelliğine sahip NiTi malzemesinin gerilme-gerinim davranışlarını deneysel olarak incelediği çalışmada farklı termomekanik işlemler sonucunda birçok grafik elde etmiştir. 60°C'de yaptığı deney sonucunda ise Şekil 1.19'daki gerilme-gerinim grafiğini elde etmiştir.



Şekil 1.19. Saburi vd'nin NiTi malzemesi için elde ettiği gerilme-gerinim grafiği [46]

1.4. Tezin Amacı

Literatür taramasında martensitik faz dönüşümlerini modellemek için yapılan çalışmalara bakıldığı zaman bazı eksiklerin olduğu görülmektedir. Bazı modellerde ara yüzey dönmesi, bazı modellerde atermal sürtünme gibi parametreler dikkate alınmamıştır. Levitas ve Özsoy'un [12,47] geliştirmiş olduğu ve bu tezde kullanılan mikromekanik model ise temsili hacim eleman tabanlı, üç boyutlu, genel bir model olup ŞHA'da dönüşüm sırasında oluşan ara yüzeyin normal vektörü, östenit ve martensitin hacim oranları, her bir fazdaki gerilme ve gerinimler gibi çeşitli parametreler bu model sayesinde hesaplanabilmektedir. Ayrıca yine bu model ile ŞHA'nın sahip olduğu süperelastisite ve şekil hafıza etkisi, istenen sıcaklık ve yük altında tanımlanabilmektedir. Levitas ve Özsoy [12,47] bu modelde mikro ölçekteki malzeme davranışını sadece tek bir malzeme noktası için incelemişlerdir. Dolayısıyla bu çalışma ile sadece tek kristalli malzemelerin davranışını tespit edilebilirken, çok kristalli bir malzemeye uygulaması mevcut değildir. Ayrıca malzeme tek kristalli olsa bile, malzeme içindeki martensitik çekirdeklenme noktalarının etkisinin incelenmesi için makroskopik ölçekte SE yöntemi kullanılarak çalışmaların yapılması gerekmektedir. Bu tez çalışmasında ise Levitas ve Özsoy'un [12,47] çalışmalarında eksik olan makro seviyedeki malzeme davranışı incelenmiştir. Bunun için de birçok tanecik SE yöntemi ile birleştirilerek tek ve çok kristalli malzemelerin davranışı modellenmiştir.

Bu tezde amaç, ABAQUS SE programını ve UMAT altyordamını kullanarak martensitik faz dönüşümü geçiren ŞHA'nın tek eksenli çekme yüklemesi altında malzeme davranışını modellemektir. Tezde yapılan çalışmalar ŞHA'nın östenit yapısındayken deforme edilmesiyle martensit oluşumunu ve daha sonra kaldırılan yüklemeye ile bu malzemelerin tekrar ilk durumlarına geri dönebilmesi özelliği olan süperelastisite davranışını modellemek üzerine yapılmıştır. Tezin amaçları ayrıntılı olarak aşağıdaki maddeler ile belirtilmiştir.

- Tek kristalli ŞHA'da kristal oryantasyonunun malzeme davranışı üzerine etkisinin incelenmesi
- İçerisinde martensitik bir çekirdeğin bulunduğu östenit fazındaki bir ŞHA'da faz dönüşümünün ilerlediğini tespit edilmesi
- Tek kristalli analizlerden yola çıkılarak birçok farklı oryantasyona sahip kristalin bir araya gelerek oluşturduğu çok kristalli ŞHA'nın modellenmesi
- Çok kristalli ŞHA'ya uygulanan tek eksenli çekme yüklemesi ve yüklemenin kaldırılması esnasında oluşan gerilme-gerinim grafiği ve östenit ile martensitin hacim oranları dağılımının tespiti
- Atermal sürtünmenin ŞHA'nın gerilme-gerinim grafiği ve histerisiz üzerindeki etkisinin incelenmesi

Bulunan sonuçların, ŞHA'nın malzeme davranışı hakkında literatüre katkı sağlaması ve yapılacak deneylere yol göstermesi amaçlanmaktadır.

1.5. Tez Planı

Bölüm 2'de Levitas ve Özsoy'un [12,47] ŞHA için geliştirmiş olduğu ve bu tezde yapılan çalışmaların temeli olan mikromekanik model temel yönleriyle anlatılmıştır. Bölüm 3'te bu mikromekanik model kullanılarak yapılan tek kristalli bir modellemeden ve bu modellemenin Shield'in [48] deneysel çalışmayla uyumundan yola çıkılarak yapılan doğrulama çalışması verilmiştir. Bölüm 4'te UMAT altyordamı ile malzeme davranışının nasıl modellenebileceği hakkında bilgiler verilerek problemlerin çözümü için bir algoritma geliştirilmiştir. Ayrıca bu problemlerin çözümünde önemli rol oynayan yakınsama çalışmaları anlatılmıştır.

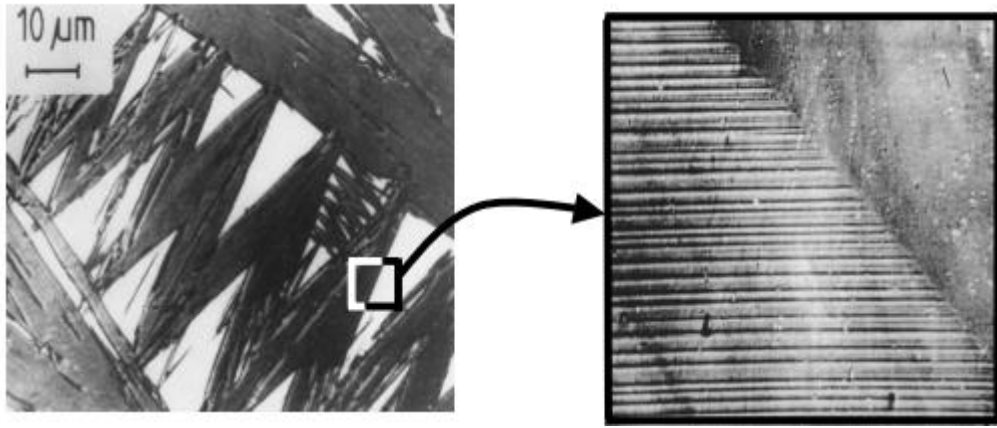
Bölüm 5'te tek kristalli ve çok kristalli ŞHA'nın çekme altında gösterdiği malzeme davranışı modellenmiş, ayrıca içerisinde martensitik çekirdek bulunan bir ŞHA'da ara yüzeyin nasıl ilerlediği incelenmiştir. Bölüm 6'da ise elde edilen sonuçlardan bahsedilmiş ve bu sonuçlar hakkında yorumlarda bulunulmuştur.

2. KULLANILAN MİKROMEKANİK MODEL

Elastik malzemeler için geliştirilen modellerden birisi de Levitas ve Özsoy'un [12,47] geliştirmiş olduğu, östenit ile martensit arasındaki ara yüzeyin yeniden oryantasyonun ve ilerlemesinin termodinamik ve kinetik olarak tanımlandığı mikromekanik modeldir. Bu çalışmada daha önceden hesaba katılmayan ara yüzeyin oryantasyonu dikkate alınmış ve termodinamik itici kuvvet elde edilmiştir. Yük altında ŞHA'nın mikro ölçekteki davranışını tanımlayan bu çalışma, tezde yapılan incelemelerde kullanılmıştır. Levitas ve Özsoy'un geliştirdiği [12,47] mikromekanik model iki fazlı ve üç fazlı sistemler halinde aşağıda anlatılmıştır.

2.1. İki Fazlı Sistem

Şekil 2.1.a'da gösterilen mikroyapıda beyaz kısımlar östenit, gri kısımlar ise martensit fazıdır. Geliştirilen modelde Şekil 2.1.b'deki gibi temsili bir hacim seçilmiştir. Bu şekilde yatay çizgiler martensitik varyantlar arasındaki ara yüzeylerdir. Sağ taraftaki koyu kısım östeniti, östenit ile martensiti ayıran çizgi ise östenit ile martensit arasındaki ara yüzeyi göstermektedir.

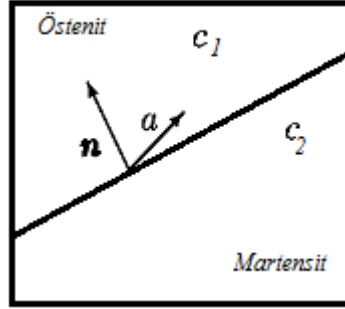


a.

b.

Şekil 2.1. a) Martensitik mikroyapı b) Temsili hacmin seçimi [49]

İki fazlı sistemde östenit ve martensit fazlarının bulunduğu Şekil 2.2'deki gibi temsili bir hacim düşünülmüştür.



Şekil 2.2. İki fazlı temsili hacim

c_1 östenitin, c_2 ise martensitin hacimsel oranını göstermektedir. Östenit – martensit ara yüzeyinin normal vektörü n ile, östenit – martensit ara yüzeyindeki gerinim sıçramasını veren vektör ise a ile gösterilmiştir. σ_i ve ε_i her bir faz için sabit gerilim ve gerinim tensörleri olursa, ortalama (toplam) gerinim ve gerilme

$$\varepsilon = c_1 \varepsilon_1 + c_2 \varepsilon_2 \quad (2.1)$$

$$\sigma = c_1 \sigma_1 + c_2 \sigma_2 \quad (2.2)$$

şeklinde hesaplanabilir. 2.1 ve 2.2 no'lu denklemlerde toplam gerilme ve gerinimi hesaplamak için östenit ve martensit fazlarının hacimsel oranları dikkate alınacak şekilde homojenizasyon işlemi yapılmıştır. Östenit ve martensit fazının hacimsel oranları toplamı 1 olacağından $c = c_2 = 1 - c_1$ şeklinde de yazılabilir.

Ara yüzeydeki traksiyon süreklilik koşulu şu şekildedir:

$$\sigma_1 \cdot n = \sigma_2 \cdot n \quad (2.3)$$

Traksiyon süreklilik koşuluna göre ara yüzeydeki traksiyon vektörleri birbirine eşittir. 2.4 no'lu denklem ise Hadamard uyumluluk koşulunun ifadesini göstermektedir. İki faz arasındaki gerinim farkı, gerinim sıçraması vektörü ile

normal vektörünün diyadik çarpımının simetrik kısmına eşittir. Eğer deformasyon sürekli ise, ara yüzeyin her iki tarafındaki deformasyon gradyanları Hadamard uyumluluk koşulunu sağlamalıdır [10].

$$\varepsilon_2 - \varepsilon_1 = (an)_s \quad (2.4)$$

2.1 ve 2.4 no'lu denklemler kullanıldığı zaman denklem 2.5'te görülen eşitlikler ortaya çıkmaktadır.

$$\varepsilon_1 = \varepsilon - c_2(an)_s \quad ; \quad \varepsilon_2 = \varepsilon + c_1(an)_s \quad (2.5)$$

2.6 no'lu denklemde görüldüğü gibi östenit fazında sadece elastik gerinim bulunmakta iken martensit fazında ise toplam gerinim, elastik ve dönüşüm gerinimlerinin toplamı şeklinde ifade edilmektedir.

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_1^e \quad ; \quad \varepsilon_2 = \varepsilon_2^e + \varepsilon_2^t \quad (2.6)$$

ε_e elastik gerinimi, ε_t ise dönüşüm gerinimini ifade etmektedir. Hooke kanunu kullanılarak gerilmeler, elastik rijitlik tensörü ve elastik gerinim cinsinden 2.7 no'lu denklemdeki gibi ifade edilmektedir. Elastik gerinim değerleri 2.6 no'lu denklemden elde edilebilmektedir.

$$\sigma_1 = E_1 : \varepsilon_1 \quad ; \quad \sigma_2 = E_2 : (\varepsilon_2 - \varepsilon_2^t) \quad (2.7)$$

Daha sonra 2.3 no'lu denklemdeki traksiyon süreklilik koşulu ve 2.7 no'lu denklemdeki Hooke kanunu kullanılırsa 2.8 no'lu denklemdeki gibi bir eşitlik ortaya çıkmaktadır.

$$n \cdot E_1 : (\varepsilon - c_2(an)_s) = n \cdot E_2 : (\varepsilon + c_1(an)_s - \varepsilon'_2) \quad (2.8)$$

Ortaya çıkan 2.8 no'lu denklemde n ve c_1 ($c_2 = 1 - c_1$) değerlerinin önceden bilindiği varsayılarak a vektörü hesaplanmaktadır.

$$\psi = c_1\psi_1(\varepsilon_1, \theta) + c_2\psi_2(\varepsilon_2, \theta); \quad s = c_1s_1(\varepsilon_1, \theta) + c_2s_2(\varepsilon_2, \theta) \quad (2.9)$$

2.9 no'lu eşitlikler ise Helmholtz serbest enerji (ψ) ve entropiyi (s) tanımlayan denklemlerdir. Toplam Helmholtz serbest enerji ve entropi her bir fazın hacimsel oranına, gerinimine ve θ ile gösterilen sıcaklık değerine bağlıdır. Termodinamik kurallar kullanılarak her bir fazın gerilme ve entropileri 2.10 no'lu denklemde gösterildiği gibi ifade edilebilir.

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= \frac{\partial \psi_1}{\partial \varepsilon_1}; & \sigma_2 &= \frac{\partial \psi_2}{\partial \varepsilon_2} \\ s_1 &= -\frac{\partial \psi_1}{\partial \theta_1}; & s_2 &= -\frac{\partial \psi_2}{\partial \theta_2} \end{aligned} \quad (2.10)$$

Birim hacimdeki yitim oranını (D_v) ifade etmek için termodinamiğin ikinci kuralı, 2.11 no'lu denklemdeki gibi Planck eşitsizliği formunda yazılabilir.

$$D_v = \sigma : \dot{\varepsilon} - \dot{\psi} - s \dot{\theta} \geq 0 \quad (2.11)$$

2.1, 2.2, ve 2.9 no'lu denklemler kullanılarak 2.12 no'lu denklem elde edilir.

$$D_v = X_c \dot{c} + c_1(\sigma - \sigma_1) : \dot{\varepsilon}_1 + c_2(\sigma - \sigma_2) : \dot{\varepsilon}_2 \geq 0 \quad (2.12)$$

$$X_c := \sigma : [\varepsilon] - [\psi] \quad (2.13)$$

2.12 no'lu denklemdeki X_c ifadesi Eshelby itici kuvvetidir (driving force) ve 2.13 no'lu denklemdeki gibi yazılmaktadır. Bu ifade östenit-martensit (1-2) faz dönüşümü boyunca ara yüzeyin ötelenmesi için bulunmuştur. Köşeli parantezler arasındaki ifade [] o değer için ara yüzeydeki sıçramayı ifade etmektedir. Örneğin $[A]$ ifadesi $A_2 - A_1$ şeklindedir.

2.2, 2.3 ve 2.4 no'lu denklemler kullanılırsa 2.12 no'lu denklem 2.14 ve 2.15 no'lu denklemlerdeki gibi yazılabilir.

$$D_v = X_c \dot{c} - c_1 c_2 a \cdot [\sigma] \cdot \dot{n} \geq 0 \quad (2.14)$$

$$D_v = X_c \dot{c} + X_n \cdot \dot{n} \geq 0 \quad (2.15)$$

2.16 no'lu denklemdeki X_n değeri ara yüzeyin oryantasyonu için evrensel termodinamik itici kuvveti vermektedir.

$$X_n = -c_1 c_2 a \cdot [\sigma] \quad (2.16)$$

2.17 ve 2.18 no'lu denklemler kullanılarak Eshelby itici kuvveti (X_c) doğrusal elastik malzemeler için uyarlanabilir.

$$\psi_1 = \psi_1^e(\varepsilon^e) + \psi_1^\theta(\theta) ; \quad \psi_2 = \psi_2^e(\varepsilon^e) + \psi_2^\theta(\theta) \quad (2.17)$$

$$\psi_1^e(\varepsilon^e) = 0.5 \varepsilon_1^e : E_1 : \varepsilon_1^e ; \quad \psi_2^e(\varepsilon^e) = 0.5 \varepsilon_2^e : E_2 : \varepsilon_2^e \quad (2.18)$$

Burada ψ^θ ve ψ^e serbest enerjinin termal ve elastik kısımlarıdır. 2.2 no'lu denklem n vektörüyle çarpılır ve 2.3 no'lu denklemdeki traksiyon süreklilik koşulu kullanılarak tekrar yazılırsa 2.19 no'lu denklem ortaya çıkmaktadır.

$$n \cdot \sigma = c_1 n \cdot \sigma_1 + c_2 n \cdot \sigma_2 = n \cdot \sigma_1 = n \cdot \sigma_2 \quad (2.19)$$

Daha sonra 2.4 no'lu Hadamard uyumluluk koşulu ve gerilme tensörünün simetrik olma özelliği kullanıldığı zaman 2.20 no'lu denklemdeki eşitlikler ortaya çıkmaktadır.

$$\sigma : [\varepsilon] = n \cdot \sigma \cdot a = n \cdot \sigma_1 \cdot a = n \cdot \sigma_2 \cdot a = \sigma_1 : [\varepsilon] = \sigma_2 : [\varepsilon] = 0.5(\sigma_1 + \sigma_2) : [\varepsilon] \quad (2.20)$$

Böylelikle 2.13 no'lu denklem 2.17-19 no'lu denklemler kullanılarak 2.21 no'lu denklemdeki gibi yazılabilir.

$$\begin{aligned} X_c = 0.5(\sigma_1 + \sigma_2) : [\varepsilon] - [\psi] &= 0.5(\sigma_1 + \sigma_2) : (\varepsilon_2^e - \varepsilon_1^e) \\ + 0.5(\sigma_1 + \sigma_2) : (\varepsilon_2^t - \varepsilon_1^t) &- (\psi_2^e - \psi_1^e) - (\psi_2^\theta - \psi_1^\theta) \end{aligned} \quad (2.21)$$

2.21 no'lu denklem tezde hesaplanan ara yüzeyin ilerlemesi için termodinamik itici kuvvetin açık formülünü göstermektedir.

Termodinamik kuvvetler ile oranlar arasındaki en basit ilişki, yitim oranı için termodinamik kuvvetler cinsinden ikinci dereceden bir ifade yazıldığı zaman kurulabilir. Bu eşitlik 2.22 no'lu denklemde görülmektedir.

$$D_{X_c}(X_c, X_n) = h_c X_c^2 + 2m_c \cdot X_n X_c + X_n : h_n : X_n \geq 0 \quad (2.22)$$

2.22 no'lu denklemdeki h_c , m_c ve h_n skaler, vektör ve ikinci dereceden simetrik tensör parametreleridir. Doğrusal termodinamiğin ekstremum ilkesi kullanılırsa [50] 2.23 no'lu denklemdeki eşitlikler ortaya çıkmaktadır.

$$\dot{c} = \frac{1}{2} \frac{\partial D x_c}{\partial X_c} = h_c X_c + m_c \cdot X_n ; \quad \dot{n} = \frac{1}{2} \frac{\partial D x_c}{\partial X_n} = m_c X_c + h_n : X_n \quad (2.23)$$

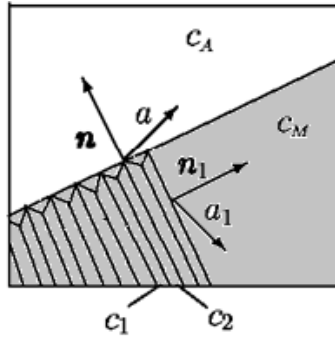
Ara yüzey dönmesinin gerçekleşmediği durumlarda faz dönüşüm kriteri ise 2.24 no'lu denklemde belirtildiği gibi olmaktadır. Bu denklemlerde görülen k değeri ise ara yüzeyde oluşan atermal sürtünme değeri (athermal threshold) olup malzeme parametresi olarak deneylerle tespit edilebilmektedir. Atermal sürtünmenin kaynağı, hareket eden ara yüzeyin nokta ve çizgi kusurlarının neden olduğu gerilme alanlarıyla ve çeşitli sınırlarla yapmış olduğu etkileşimdir [51]. Eğer itici kuvvetler bu sürtünmeyi aşarsa ara yüzey ilerler ve faz dönüşümü oluşur. Ayrıca sürtünmeye bağlı direnç gerilme-gerinim grafiğinde oluşan histerisizin de bir nedenidir [52].

$$\begin{aligned} \dot{c}_2 &= h_c (X_c - k) & X_c > k \text{ için} \\ \dot{c}_2 &= h_c (X_c + k) & X_c < -k \text{ için} \\ \dot{c}_2 &= 0 & |X_c| \leq k \text{ için} \end{aligned} \quad (2.24)$$

2.24 no'lu denklemlerde görüldüğü gibi $X_c > k$ koşulu sağlandığı zaman martensit fazı artmakta $X_c < -k$ durumunda ise martensit fazı azalmaktadır. Diğer durumlarda ise faz dönüşümü olmamaktadır. Sürtünme değeri bu mikromekanik modelde, martensitik varyantlar ve ara yüzeyin dönmesi için de benzer şekilde tanımlanabilmektedir. Fakat bu çalışmada sadece östenit ile martensit arasındaki ara yüzeyin ötelenmesi için k değeri kullanılmıştır. İki fazlı sistem için elde edilen denklemlerin çözüm algoritması Bölüm 4.2'de yer almaktadır.

2.2. Üç Fazlı Sistem

Bu tez çalışmasında yapılan analizlerde temsili hacmi Şekil 2.3'te gösterilen iki martensitik varyant ve bir östenit fazından oluşan Levitas ve Özsoy'un [12,47] geliştirdiği üç fazlı mikromekanik model kullanılmıştır. Bu mikromekanik modelde kullanılan denklemler iki fazlı sistemdekine benzerdir ve aşağıda açıklanmıştır.



Şekil 2.3. İki martensitik varyant ve östenit fazından oluşan temsili hacim

Şekil 2.3'te c_A östenitin, c_M martensitin, c_1 ve c_2 ise 1. ve 2. martensitik varyantların hacimsel oranını göstermektedir. n , östenit – martensit ara yüzeyinin normal vektörünü, n_1 martensitik varyantlar arası normal vektörünü, a östenit – martensit ara yüzeyindeki gerinim sıçramasını gösteren vektörü, a_1 ise martensitik varyantlar arasındaki ara yüzeyin gerinim sıçramasını gösteren vektörü belirtmektedir. σ_i ve ε_i ise her bir faz için sabit gerilim ve gerinim tensörleri olsun. A ve M indisleri östenit ve martensiti, 1 ve 2 indisleri ise 1. ve 2. martensitik varyantlara ait olan değerleri ve vektörleri göstermektedir. İki varyantlı sistem için traksiyon süreklilik ve Hadamard uyumluluk koşulu 2.25 no'lu denklemde belirtilmiştir.

$$\begin{aligned} \sigma_A \cdot n &= \sigma_M \cdot n & \sigma_1 \cdot n_1 &= \sigma_2 \cdot n_1 ; \\ \varepsilon_M - \varepsilon_A &= (an)_s & \varepsilon_2 - \varepsilon_1 &= (a_1 n_1)_s \end{aligned} \quad (2.25)$$

Birim hacimdeki yitim oranını (D_v) 2.26 no'lu denklem kullanılarak hesaplanabilir.

$$D_v = X_c \dot{c}_M + X_c^1 \dot{c}_2 + X_n \cdot \dot{n} + X_n^1 \cdot \dot{n}_1 \geq 0 \quad (2.26)$$

2.26 no'lu denklemde X_c ve X_n östenit ve martensit arasındaki ara yüzeyin, X_c^1 ve X_n^1 ise martensitik varyantlar arasındaki ara yüzeyin ilerlemesi ve dönmesi için termodinamik itici kuvvetleri göstermektedir. X_c itici kuvveti, 2.27 no'lu denklem kullanılarak hesaplanabilmektedir. E elastik rijitlik tensörünü, ε^e elastik gerinimi, ε^t dönüşüm gerinimini, $(\psi_2^\theta - \psi_1^\theta)$ ise martensitik varyantlar arasındaki serbest enerjinin termal bileşenleri arasındaki farkı göstermektedir.

$$X_c = 0.5 (\sigma_A + \sigma_M) : \varepsilon_M^t - \varepsilon_A^e : (E_M - E_A) : \varepsilon_M^e - (\psi_2^\theta - \psi_1^\theta) \quad (2.27)$$

Martensit fazının dönüşüm gerinimi vektörü 2.28 no'lu denklemle bulunur.

$$\varepsilon_M^t = \frac{c_1}{c_M} \varepsilon_1^t + \frac{c_2}{c_M} \varepsilon_2^t \quad (2.28)$$

Martensitik varyantlar arasındaki ara yüzeyin ilerlemesi için hesaplanan termodinamik itici kuvvet ise 2.29 no'lu denklemde gösterilmektedir.

$$X_c^1 = 0.5 (\sigma_1 + \sigma_2) : (\varepsilon_1^t - \varepsilon_2^t) - \varepsilon_1^e : (E_2 - E_1) : \varepsilon_2^e \quad (2.29)$$

Ara yüzeylerin dönmesi için itici kuvvetler 2.30 no'lu denklemle hesaplanmaktadır.

$$X_n := -c_A c_M a \cdot (\sigma_M - \sigma_A) \quad X_n^1 := -c_1 c_2 a_1 \cdot (\sigma_2 - \sigma_1) \quad (2.30)$$

Östenitin, martensitin ve martensitik varyantları gerinimleri ise 2.31 no'lu denklemler ile hesaplanır.

$$\begin{aligned}
 \varepsilon_A &= \varepsilon - c_M (an)_s \quad ; \quad \varepsilon_M = \varepsilon + c_A (an)_s \\
 \varepsilon_1 &= \varepsilon + c_A (an)_s - c_2 / c_M (a_1 n_1)_s \quad ; \\
 \varepsilon_2 &= \varepsilon + c_A (an)_s + c_1 / c_M (a_1 n_1)_s
 \end{aligned}
 \tag{2.31}$$

2.31 ve 2.25 no'lu denklemleri kullanarak 2.32 no'lu denklemler elde edilir.

$$\begin{aligned}
 n \cdot E_A : (\varepsilon - c_M (an)_s) &= n \cdot E_M : (\varepsilon + c_A (an)_s - \varepsilon_M^t) \quad ; \\
 n_1 \cdot E_1 : (\varepsilon + c_A (an)_s - c_2 / c_M (a_1 n_1)_s - \varepsilon_1^t) &= \\
 n_1 \cdot E_2 : (\varepsilon + c_A (an)_s + c_1 / c_M (a_1 n_1)_s - \varepsilon_2^t) &=
 \end{aligned}
 \tag{2.32}$$

2.31 no'lu denklemde bulunan gerinim değerleri Hooke kanununda yerine konulursa gerilme vektörleri 2.33 no'lu denklemler kullanılarak elde edilir.

$$\begin{aligned}
 \sigma_A &= E_A : (\varepsilon - c_M (an)_s) \quad ; \\
 \sigma_M &= E_M : (\varepsilon + c_A (an)_s - \varepsilon_M^t) \quad ; \\
 \sigma_1 &= E_1 : (\varepsilon + c_A (an)_s - c_2 / c_M (a_1 n_1)_s - \varepsilon_1^t) \quad ; \\
 \sigma_2 &= E_2 : (\varepsilon + c_A (an)_s + c_1 / c_M (a_1 n_1)_s - \varepsilon_2^t)
 \end{aligned}
 \tag{2.33}$$

Bu denklemlerin tamamı, östenit fazından martensit fazına dönüşüm geçiren elastik malzemelerin tamamı için bünye denklemi olarak kullanılabilir. Sıcaklık, gerilme veya gerinim geçmişi tanımlanarak ara yüzey normal vektörleri, her bir fazın hacimsel oranları, gerilmeleri ve gerinimleri hesaplanarak malzeme davranışı tespit edilebilmektedir.

3. TEK KRİSTALLİ CuAlNi ŞEKİL HAFIZALI ALAŞIMINDA MARTENSİTİK FAZ DÖNÜŞÜMLERİNİN MODELLENMESİ

Bu bölümde, CuAlNi (Cu-%13,95Al-%3,93Ni) ŞHA'da yüklemmeden kaynaklanan martensitik faz dönüşümü, Levitas ve Özsoy'un [12,47] geliştirmiş olduğu mikromekanik model kullanılarak modellenmiş ve sonuçlar Shield'in [48] yapmış olduğu deneysel çalışmalar ile karşılaştırılmıştır. Böylelikle daha önce gerçek bir malzeme ile karşılaştırılmamış olunan bu modelin doğruluğu tespit edilmiştir. Yapılan bu çalışma [53-55]'te yayınlanarak literatüre katkı sağlanmıştır.

Yapılan çalışmada, Shield'in [48] kullanmış olduğu parametreler kullanmıştır. Bu parametreler kristal eksenlerine göre yükleme yönü olarak (0.925, 0.380, 0), ortam sıcaklığı olarak $T=30^{\circ}\text{C}$ ve 40°C 'dir. Deney sonuçlarıyla uyumu açısından da birkaç değişik ara yüzey sürtünme değeri kullanılmış ve en uygun değer olan $k=0.1 \text{ MPa}$ seçilmiştir. Sürtünme değerleri deneylerle tespit edilmemiş olup literatürde yer almadığı için deneylere en yakın sonucu veren değer kullanılmıştır. Bu modelde kullanılan sürtünme değerlerinin deneylerle tespit edilmesi gerektiğinden dolayı yeni deneysel çalışmalara yön verme potansiyeli bulunmaktadır.

Başlangıçtaki sıcaklık değeri, Stupkiewicz ve Petryk'in [56] tek kristalli CuAlNi malzemesi için farklı sıcaklıklardaki deneysel çalışmalarından elde ettikleri değerleri kullanarak uyarladıkları 3.1 no'lu formül ile hesaplanmıştır.

$$(\psi_2^{\theta} - \psi_1^{\theta}) = \Delta\psi^{\theta} = 0.1436 (T - 278) \quad (3.1)$$

Deneyde kullanılan CuAlNi (Cu-%13,95Al-%3,93Ni) malzemesindeki faz dönüşümü sırasında kübik östenit yapısı, ortorombik kafes yapısına sahip martensite dönüşür ve 6 farklı dönüşüm gerinim matrisine sahip martensitik varyant oluşabilir. Bu çalışmada en büyük itici kuvvet elde edilen aşağıdaki iki dönüşüm gerinim matrisi kullanılmıştır. ($\alpha=1.0619$, $\gamma=1.0230$, $\beta=0.9178$)

$$U_1 = \begin{pmatrix} (\alpha + \gamma)/2 & 0 & (\alpha - \gamma)/2 \\ 0 & \beta & 0 \\ (\alpha - \gamma)/2 & 0 & (\alpha + \gamma)/2 \end{pmatrix} \quad U_3 = \begin{pmatrix} (\alpha + \gamma)/2 & (\alpha - \gamma)/2 & 0 \\ (\alpha - \gamma)/2 & (\alpha + \gamma)/2 & 0 \\ 0 & 0 & \beta \end{pmatrix}$$

Östenit ve martensit yapıya ait elastisite matrisi değerleri ise Tablo 3.1 ve 3.2’de görülmektedir.

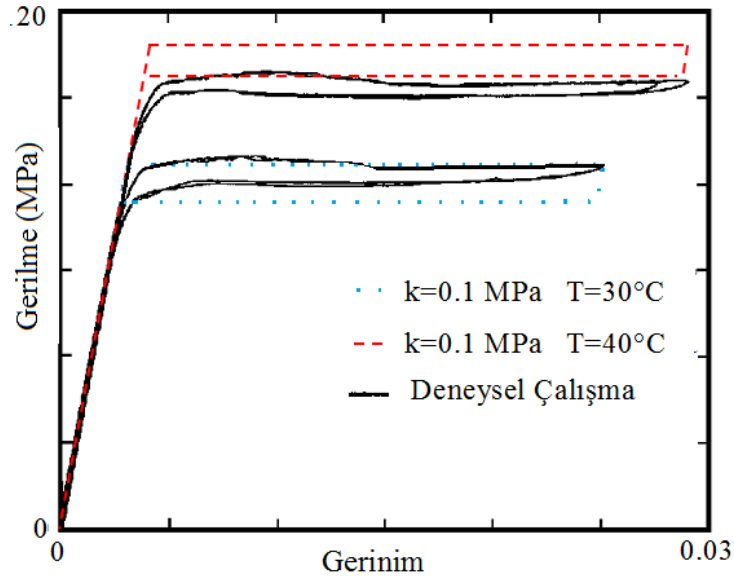
Çizelge 3.1. Kübik yapı için elastisite matrisinin değerleri [57]

C11	C12	C44
142 GPa	126 GPa	96 GPa

Çizelge 3.2. Ortorombik yapı için elastisite matrisinin değerleri [58]

C11	C22	C33	C44	C55	C66	C12	C13	C23
189 GPa	141 GPa	205 GPa	54.9 GPa	19.7 GPa	62.6 GPa	124 GPa	45.5 GPa	115 GPa

Bu veriler kullanılarak yapılan analiz sonucunda elde edilen gerilme-gerinim grafiği ile Shield’in [48] deneysel çalışması sonucunda elde etmiş olduğu sonuçların karşılaştırması Şekil 3.1’de görülmektedir.



Şekil 3.1. Shield’in [48] deneysel sonuçları ile kullanılan mikromekanik modelle elde edilen gerilme-gerinim sonuçlarının karşılaştırılması [56]

Yapılan çalışma sonucunda, Levitas ve Özsoy'un [12,47] geliştirmiş olduğu mikromekanik modelle elde edilen sonuçların Shield'in [48] deneysel olarak elde ettiği sonuçlarla oldukça yakın olduğu görülmektedir. Faz dönüşümü başlayınca enerji minimizasyonunu sağlamak için gerilme değeri sabit kalmıştır. Yüksek sıcaklıkta faz dönüşümünün gerçekleşmesi için yani martensite dönüşümün başlaması için daha yüksek gerilme uygulanmıştır. Çünkü yüksek sıcaklıklarda östenit fazı kararlı haldedir. Ayrıca yükleme ile geri yükleme esnasında gerilmeye oluşan fark ise histerisiz oluşumunu göstermektedir.

Yapılan bu çalışma, SE yöntemi kullanılmadan tek bir malzeme noktası için gerçekleştirilmiştir. Ancak, SE yöntemi kullanılsa bile, makroskopik modelde kusur (çekirdeklenme noktaları) kullanılmadığı sürece aynı sonuçlar elde edilmektedir. Tek kristalli malzemede kusurun (çekirdeğin) olduğu durum aşağıdaki diğer örneklerde SE yöntemi kullanılarak incelenmiştir. Çünkü bu durum, tek başına Levitas ve Özsoy'un [12,47] elde ettiği bünye denklemleriyle çözülemez ve makroskopik ölçekte modellenmesi gerekmektedir. Levitas ve Özsoy'un [12,47] modelinde ele alınan çekirdek gerçek bir çekirdek değil, sadece temsili hacim elemanındaki faz dönüşümünün başlangıcının hesaplanması için kullanılan sanal bir çekirdektir.

4. MALZEME DAVRANIŞININ SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE ANALİZİ

Bu tez çalışmasında, ŞHA'ya tek eksenli çekme yüklemesi uygulanarak oluşan gerilme-gerinim grafiklerini ve martensit ve östenitin hacimsel oranlarını tespit etmek için elastik malzemeler için kullanılan Levitas ve Özsoy'un [12,47] geliştirmiş olduğu Bölüm 2'de anlatılan mikromekanik model kullanılmıştır. Bu modeldeki bünye denklemleri temel alınarak ve UMAT altyordamı kullanılarak bir algoritma geliştirilmiştir. Bu algoritma farklı özellikteki ŞHA için uygulanarak tek kristalli malzemeler için çekme yüklemesi altında malzeme davranışları elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, literatürdeki deneysel ve sayısal sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Sonuçların doğruluğu görüldükten sonra ise farklı kristal oryantasyonlarına sahip çok kristalli ŞHA için analizler yapılmıştır.

UMAT, ABAQUS SE programında malzeme davranışını modellemek için kullanılan bir altyordamdır. ABAQUS SE programının içerisinde bulunan UMAT altyordamı kullanılırken; her bir gerinim artırımının başlangıcında gerinim artırımını, gerilme ve varsa durum değişkenleri (STATEV) ABAQUS tarafından UMAT'a aktarılırken; her bir gerinim artırımının bitiminde güncellenmiş gerilme değeri UMAT'tan ABAQUS'e aktarılmaktadır.

Durum değişkenleri, ABAQUS'un hesaplama yapmak için UMAT kodundan doğrudan doğruya istemediği fakat gerinim artırımını sonucunda hesaplanan ve bir sonraki gerinim artırımını esnasında kullanılacak değerleri tanımlamak için kullanılır. Her kullanılan durum değişkeni için kullanılan "input" dosyasında *DEPVAR olarak bir değer atamak gerekmektedir. Yapılan çalışmada kullanılan durum değişkenleri şunlardır:

- Östenitin, martensitin ve 1. ve 2. martensitik varyantın gerilmeleri ve toplam gerilmeler ($\sigma_A, \sigma_M, \sigma_1, \sigma_2, \sigma$)
- Östenitin, martensitin ve 1. ve 2. martensitik varyantın gerinimleri ve toplam gerinimler ($\varepsilon_A, \varepsilon_M, \varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon$)

- Östenit-martensit arasındaki ara yüzeyin ve martensitik varyantlar arasındaki ara yüzeyin normal vektörleri (n, n_1)
- Hacimsel oranlar (c_A, c_M, c_1, c_2)

4.1. ABAQUS'te Doğrusal Olmayan Bir Problemin Çözümü

ŞHA'nın malzeme davranışı tam olarak elastik olduğundan ve faz dönüşümü esnasında doğrusal olmayan davranışlar sergilediğinden bu tür problemleri çözmek için ABAQUS'te doğrusal olmayan bir problemin nasıl çözüldüğünün bilinmesi gerekir.

Bir cisime uygulanan dış kuvvetler P , iç (nodal) kuvvetler I ise, statik bir analizde dengenin sağlanması için $P-I = 0$ eşitliğinin sağlanması gerekmektedir. Oluşan iç kuvvetler, elemanlarda yer alan düğüm noktalarında oluşan gerilmelerden dolayı meydana gelmektedir.

ABAQUS/Standart doğrusal olmayan bir problemi çözmek için Newton-Raphson metodunu kullanır. Newton-Raphson metodu bütün kök bulma yöntemlerinin içerisinde en çok kullanılan yöntemdir. $P-I = 0$ denkleminin kökünü bulmak için tahmini bir x_i değerinden yola çıkarak x_{i+1} değeri 4.1 no'lu denklem kullanılarak iteratif olarak bulunmaya çalışılır. Bağlı hata miktarı istenilen değer altına indiği zaman x_{i+1} değeri hesaplanmış olur. Burada $f'(x_i)$; kökü bulunmaya çalışılan fonksiyonun türevidir [59].

$$x_{i+1} = x_i - \frac{f(x_i)}{f'(x_i)} \quad (4.1)$$

Doğrusal olmayan bir analizde, doğrusal analizlerdeki gibi tek takım eşitliklerin çözümüyle sonuca ulaşamaz. Bunun yerine sonucun bulunabilmesi için, yükleme kademe kademe artacak bir şekilde uygulanmaktadır. Bunun için yapılan analiz, en az istenilen yükleme adımı sayısı kullanılarak yapılmaktadır. Her yükleme adımının bitiminde ABAQUS/Standart yaklaşık denge durumunu bulmaya çalışmaktadır. Her

yükleme adımı içerisinde, $P-I$ değerinin sıfıra yaklaşması için, diğer bir deyişle çözümün yakınsaması için birkaç iterasyon yapılmaktadır. İterasyonlar sonucunda ABAQUS/Standart'ın elde ettiği çözümün denge durumuna yakınsaması gerekmektedir. Aksi durumda, ABAQUS/Standart iterasyonları durdurup daha küçük bir yüklem adımını kullanarak denge durumuna yaklaşmaya çalışır. Yani doğrusal olmayan bir problemi çözmek için ABAQUS/Standart artırımsal ve iteratif işlemleri birleştirmektedir [60].

ABAQUS/Standart küçük bir ΔP yüklem adımında denge koşulunu sağlamak için malzemenin tanjant rijitliğini kullanarak yeni bir iç kuvvet değeri hesaplamaktadır. Bu değere I_a denirse, uygulanan yüklem ile yeni bulunan iç kuvvetin arasındaki fark, iterasyon sonucunda bulunan kalıntı kuvvettir ve R_a ile gösterilmektedir. ($R_a = P - I_a$). Eğer R_a değeri oluşturulan modelin her bir serbestlik derecesi için sıfıra eşitse yapı dengede demektir. Fakat doğrusal olmayan bir problemde R_a 'nın sıfır değerine ulaşması zordur. Bundan dolayı denge koşulunu sağlamak için ABAQUS/Standart bu değeri bir tolerans değeriyle karşılaştırır. Eğer bütün düğüm noktalarında R_a istenilen tolerans değerinden küçükse denge sağlanmış olur. Bununla birlikte dengenin sağlanması için ABAQUS/Standart son iterasyon değerindeki yerdeğiştirme düzeltme değerinin (c_a), varsayılan olarak toplam artırımsal değerinin % 1'inden düşük olması gerekmektedir. Eğer bu iki koşul da sağlanmış ise yakınsama gerçekleşmiştir ve bir sonraki yüklem adımı için hesaplamalar başlayabilir. Eğer sağlanamamış ise o yüklem (zaman) artırımını için yeni bir iterasyon yapılır ve bu iki koşul sağlanana kadar iterasyonlar devam eder. Doğrusal olmayan bir analizde her bir iterasyon değerinde ABAQUS/Standart, model için rijitlik matrisini şekillendirir ve oluşan eşitlikleri çözer [60].

4.2. Problemlerin Çözülmesi için İzlenen Yol

Her bir malzeme noktası için elde edilen denklemleri kullanarak, ABAQUS içerisinde UMAT'ta malzeme davranışı makroskopik ölçekte hesaplanmıştır. Hazırlanan herhangi bir modelin tek eksenli çekme yükü altında malzeme davranışını

tespit etmek için östenit ve martensit fazından oluşan iki fazlı sistemde izlenen algoritma Çizelge 4.1’de gösterildiği gibidir.

Çizelge 4.1. Problemin çözülmesi için takip edilen algoritma [55]

1. Östenit ve martensitin malzeme özellikleri, sıcaklık değeri ve her bir elemanın oryantasyonuna göre dönüşüm gerinimi tanımlanır.
2. Başlangıçta bütün modelin östenit fazda olduğu düşünülür. Fakat $c_2 = 0.0001$ hacimsel oranında martensit olduğu varsayılmaktadır. Çok küçük bir martensit fazın konulmasının nedeni mikromekanik modeldeki denklemler yardımıyla yapılan hesaplamaları başlatabilmektir.
3. Gerinim artırımı uygulandığında sırasıyla; a) a : denklem 2.8 b) $\varepsilon_1, \varepsilon_2$: denklem 2.5 c) σ_1, σ_2 : denklem 2.7 d) X_n, X_c : denklem 2.16 ve 2.21 e) \dot{c}, \dot{n} : denklem 2.23 kullanılarak hesaplanmaktadır.
4. \dot{c}, \dot{n} değerleri kullanılarak Bölüm 4.3.2’de ayrıntılı olarak anlatılmış metotlardan yararlanılarak yeni c_1, c_2, n hesaplanmaktadır. Durum değişkenleri yeni değerlerine atanmaktadır.
5. 2.24 no’lu denklemle faz dönüşümü kriteri kontrol edilir. Faz dönüşümü kriteri sağlanıyorsa bir sonraki gerinim artırımından itibaren faz dönüşümü başlamış kabul edilir.
6. Tanjant rijitliği (Jacobian) tensörü hesaplanır. (Bu çalışmada yapılan Jacobian hesabı Bölüm 4.3.1’de anlatılmaktadır.)
7. 3. adımdan itibaren gerçekleştirilen işlemler her bir gerinim artırımında tekrarlanır. İki varyantlı martensitik fazın olduğu üç fazlı sistem de aynı algoritma kullanılır. Yalnızca hesaplama yapılırken üç faz için de değerler bulunur.

Yapılan çalışmalarda östenit ve martensit fazları izotropik kabul edilmiştir. Elastik modül (E) ile Poisson oranı (ν) değerlerine göre aşağıdaki eşitlik kullanılarak bu fazların elastik rijitlik matrisleri hesaplanabilir.

$$\begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{11} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{12} & C_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{44} \end{bmatrix} = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & 1-\nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{(1-2\nu)}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{(1-2\nu)}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{(1-2\nu)}{2} \end{bmatrix}$$

2.21 no'lu denklemdaki itici güç hesabında kullanılan $(\psi_2^\theta - \psi_1^\theta)$ değeri seçilmektedir.

Hesaplamaların çok falza zaman almaması için kristal yönlerinin sadece xy düzleminde değiştiği varsayılmıştır. Her bir kristalin oryantasyonu, z eksenini etrafında döndürüldüğü açığa göre şu matrisle hesaplanır:

$$R_z(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Malzeme izotropik varsayıldığı için kristalin oryantasyonu yalnızca dönüşüm matrisini etkilemektedir. Oluşabilecek üç dönüşüm matrisi lokal koordinatlardan global koordinatlara tensör dönüşüm kuralına göre

$$\mathcal{E}_{ii}^{global} = [R]^T \mathcal{E}_{ii}^{lokal} [R]$$

formülüyle dönüştürülmektedir.

4.3. Yakınsama Çalışmaları

UMAT altyordamı ile yapılan çalışmalarda Jacobian matrisinin doğru hesaplanması yakınsamanın sağlanabilmesi için önemlidir. Ayrıca kullanılan mikromekanik modelde her bir gerinim artırımını esnasında değişkenlerin nümerik olarak hassas

hesaplanması Jacobian matrisini etkilediğinden yakınsamayı da etkileyen diğer faktördür.

4.3.1. Jacobian Matrisinin Sayısal Hesabı

ABAQUS/Standart küçük bir $\Delta\varepsilon$ gerinim artırımında iç kuvvetler ile dış kuvvetler arasında olması gereken denge koşulunu sağlamak için malzemenin tanjant rijitliğini kullanarak yeni bir iç kuvvet değeri hesaplamaktadır. UMAT altyordamı kullanılırken bu tanjant rijitliği, malzeme Jacobian'ı adı altında tanımlanmak zorundadır. Bu nedenle iç kuvvetleri hesaplarken kullanılan Jacobian hesabının doğruluğu yakınsamanın sağlanması için çok önemlidir. Malzeme Jacobian'ı 4.2 no'lu denklemle ifade edilmektedir.

$$C = \frac{\partial\Delta\sigma}{\partial\Delta\varepsilon} \quad (4.2)$$

Genel bir analizde C matrisi 6x6 boyuta sahiptir. $C(I, J)$ matrisi, gerinim artırımının J . bileşendeki küçük bir artırımdan dolayı oluşan I . gerilme bileşenindeki değişimi ifade etmektedir. Kullanılan mikromekanik modelde 4.2 no'lu denklemi analitik olarak çözmek oldukça zor olduğundan Jacobian hesabı sayısal türev alınarak yapılmıştır.

C matrisini nümerik olarak hesaplarken kısmi türev alındığı için her seferinde diğer bileşenleri sabit olacak şekilde gerinim vektörünün bir bileşeninde küçük bir artırım olduğu düşünülerek her gerilme bileşeni değeri hesaplanır. Bu küçük artırımın, çift hassasiyetli (double precision) bir hesaplama kullanıldığı zaman Hoppe'nin [19] belirttiği gibi 10^{-8} olarak alınması hesaplamanın doğruluğu bakımından önemlidir. Altı tane gerinim artırımını dikkate alındığında toplam 36 adet gerilme değeri hesaplanır. Böylelikle bu değerler kullanılarak $C(I, J)$ matrisinin bütün değerleri hesaplanmış olur. Bu durumda Levitas ve Özsoy'un [12,47] çalışmasında geliştirilen algoritmanın Jacobian matrisinin elde edilmesi için 36 defa kullanılması gerekmekte ve çözüm süresi uzamaktadır.

4.3.2. Kinetik Denklemlerin Sayısal İntegrasyonu

UMAT altyordamının içerisinde kullanılan mikromekanik modeldeki algoritma gereğince her bir gerinim artırımında nümerik olarak c_1, c_2, n değerleri hesaplanmaktadır. Bu değerlerin hesaplanması hassas olduğundan, küçük değişiklerin olması Jacobian matrisinin hesabını önemli derecede etkileyecektir. Bu nedenle yapılan hesaplamaların hassas ve doğru şekilde yapılması gerekmektedir.

Her bir gerinim artırımında c_1, c_2, n değerlerini hesaplamak için, adi diferansiyel denklemler olarak türetilen 2.23'deki denklemlerin çözülmesi gerekmektedir ve çözümde Runge-Kutta (RK) metotlarından faydalanılmıştır. RK metotları ile genel olarak 4.3 no'lu denklemden görülen Euler metodununun algoritmasından yararlanarak yeni c_1, c_2, n değerleri hesaplanmaktadır. 6.1 no'lu eşitlikteki eğim değeri, c_1, c_2, n değerlerinin türevlerini ifade etmektedir.

$$\text{Yeni değer} = \text{Eski değer} + (\text{Eğim} \times \text{Adım büyüklüğü}) \quad (4.3)$$

Yeni değerleri hesaplamak için iki farklı RK metodu kullanılmıştır. Bu metotlar Heun ve RK Fehlberg metotlarıdır. Bu iki farklı metodu kullanmadaki amaç; 2. dereceden olan Heun metodu ile daha kısa sürede analizleri gerçekleştirmek ve daha sonra hesaplama zamanı daha yüksek fakat daha güvenilir bir yöntem olan RK Fehlberg metoduyla (adım büyüklüğü kontrolü kullanarak) elde edilen sonuçlarla bu analizlerin sonuçlarını karşılaştırmak ve daha uygun olan metodu UMAT altyordamında kullanmaktır.

4.3.2.1. Heun Metodu

Öngörme-düzeltilme (predictor and corrector) yöntemi de denilen Heun metodunda oluşan yerel ve global hatalar; $O(h^3)$ ve $O(h^2)$ mertebesindedir. Kullanılan bu yöntem, açık metot olan öngörme yöntemi ile kapalı bir metot olan düzeltilme yönteminin birleştirilmesinden oluşturulmuştur. Öngörme-düzeltilme yönteminde

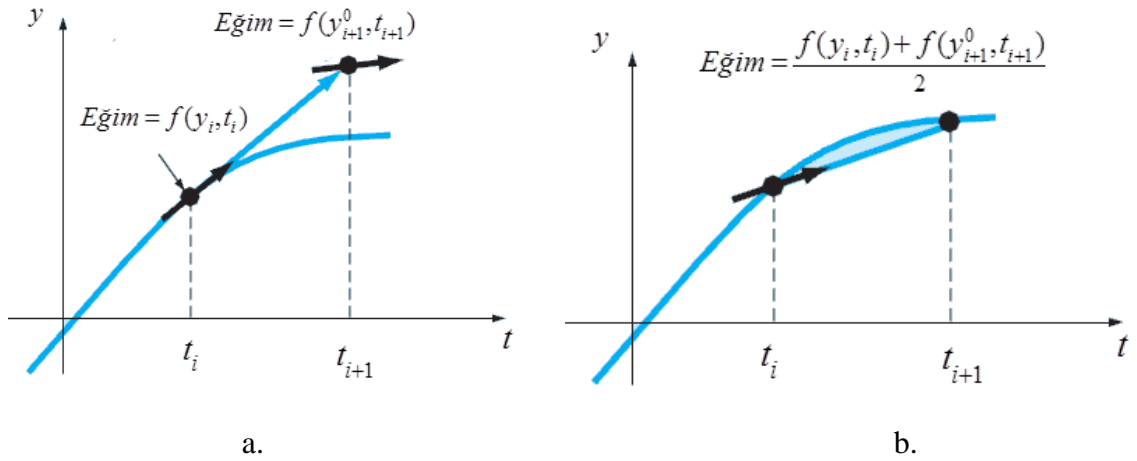
öngörme bölümünde y_i değerinden başlanılarak Şekil 4.1.a'da görüldüğü gibi y_{i+1} değeri tahmin edilir. Bunun için 4.4 no'lu Euler metodu kullanılır [59].

$$y_{i+1}^p = y_i + hf(y_i, t_i) \quad (4.4)$$

Burada h adım büyüklüğüdür. İlk önce tahmin edilen noktanın eğimi hesaplanır. 4.4 no'lu Euler metodunda kullanılan ilk eğim değeri ile daha sonra hesaplanan eğimin Şekil 4.1.b'deki gibi ortalaması alınır ve bu değer yeni eğim olarak kabul edilir. Böylece ilk tahmin 4.5 no'lu eşitlikteki düzeltme metodu kullanılarak iyileştirilmiş olunur.

$$y_{i+1}^c = y_i + \frac{h}{2}[f(y_{i+1}^p, t_{i+1}) + f(y_i, t_i)] \quad (4.5)$$

3.2 ve 3.3 no'lu diferansiyel denklemlerde türevi alınan bağımlı değişken olan y yerine c_1 ve n yazılarak işlemler gerçekleştirilir.



Şekil 4.1. Heun metodunun grafik gösterimi a) öngörme b) düzeltme [59]

4.3.2.2. Runge Kutta Fehlberg Metodu ve Adım Büyüklüğü Kontrolü

Heun metoduyla yapılan analizlerde oluşacak hatanın fazla olması analizlerin de yanlış olması sonucunu doğurmaktadır. Bu nedenle daha yüksek dereceden bir RK metodu kullanılması ile birlikte bir hata analizi yapılabilir. Dolayısıyla kullanılan Heun metodunun bu analizler için yeterli olup olmadığı sonucu görülebilir.

Karşılaştırma yapmak için RK Fehlberg metodu kullanılmıştır. Bu metotta 4.6 ve 4.7 no'lu denklemlerde gösterilen 4. ve 5. dereceden RK metotları kullanılmaktadır ve iki farklı dereceden yapılan hesaplamalarda çıkan sonuçlar arasındaki fark hata miktarını vermektedir [59].

$$y_{i+1} = y_i + h \left(\frac{37}{378} k_1 + \frac{250}{621} k_3 + \frac{125}{594} k_4 + \frac{512}{1771} k_6 \right) \quad (4.6)$$

$$y_{i+1} = y_i + h \left(\frac{2825}{27648} k_1 + \frac{18575}{48384} k_3 + \frac{13525}{55296} k_4 + \frac{277}{14336} k_5 + \frac{1}{4} k_6 \right) \quad (4.7)$$

$$k_1 = f(t_i, y_i), \quad k_2 = f\left(t_i + \frac{1}{5}h, y_i + \frac{1}{5}k_1h\right), \quad k_3 = f\left(t_i + \frac{3}{10}h, y_i + \frac{3}{40}k_1h + \frac{9}{40}k_2h\right)$$

$$k_4 = f\left(t_i + \frac{3}{5}h, y_i + \frac{3}{10}k_1h - \frac{9}{10}k_2h + \frac{6}{5}k_3h\right),$$

$$k_5 = f\left(t_i + h, y_i - \frac{11}{54}k_1h + \frac{5}{2}k_2h - \frac{70}{27}k_3h + \frac{35}{27}k_4h\right),$$

$$k_6 = f\left(t_i + \frac{7}{8}h, y_i + \frac{1631}{55296}k_1h + \frac{175}{512}k_2h + \frac{575}{13824}k_3h + \frac{44275}{110592}k_4h + \frac{253}{4096}k_5h\right)$$

RK Fehlberg metodunda adım büyüklüğü kontrol edilmediği zaman işlem zamanı oldukça uzamaktadır. Bu nedenle adım büyüklüğü kontrolü yapmak gerekmektedir. Adım büyüklüğü kontrolünü yapmak için 4. ve 5. dereceden RK metotları kullanılarak elde edilen sonuçlar arasındaki fark, parametre olarak kullanılmaktadır.

Adım büyüklüğünün yeterli miktarda küçük olmasını sağlamak oluşabilecek ıraksamaları engellemektedir. İterasyonlarda kullanılan yeni adım büyüklüğü değeri, 4.8 no'lu denklem ile hesaplanabilmektedir [59].

$$h_{yeni} = h_{eski} \left| \frac{\Delta_{istenen}}{\Delta_{mevcut}} \right|^{\alpha} \quad (4.8)$$

4.8 no'lu denklemle iterasyon içerisinde hesaplanan hata miktarı (Δ_{mevcut}) kullanılarak ve çok küçük bir hata değeri ($\Delta_{istenen}$) girilerek yeni adım büyüklüğü bulunabilmektedir. α değeri ise eğer $\Delta_{mevcut} < \Delta_{istenen}$ ise 0.25, tersi durumda ise 0.20 olarak alınmaktadır.

Heun metodu ve adım büyüklüğü kontrollü RK Fehlberg metoduyla yapılan analizler sonucunda çok fazla elemanın ve taneciğin kullanılmadığı problemlerde her iki yöntemle de aynı sonuçlar alınmıştır. Heun metodu hesaplama zamanı olarak daha hızlı bir metot olduğundan bu metot tercih edilmiştir. Fakat daha çok elemanın ve farklı oryantasyondaki taneciklerin kullanıldığı analizlerde Heun metoduyla yeni c_1, c_2, n değerlerini hesaplarken nümerik olarak çok iyi yakınsama elde edilememiştir. Bu nedenle gerilme değerleri olması gereken değerlerden uzaklaşmış ve ABAQUS SE programının kendi hesaplamalarında ıraksaklık oluşumundan dolayı analiz sonlanamamıştır. Bundan dolayı bu tip problemlerde adım büyüklüğü kontrollü RK Fehlberg metodu tercih edilmiştir.

5. ŞEKİL HAFIZALI ALAŞIMLARIN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE MODELLENMESİ

SE yöntemi ile yapılan çalışmalarda ŞHA'nın tek eksenli çekme altında genel olarak nasıl bir davranış sergilediğini modellemek amaçlanmıştır. Yapılan bütün analizlerde aşağıdaki problem tanımı kullanılmıştır.

Problem Tanımı:

Yük altında kübik östenit yapısından tetragonal martensit kristal yapısına faz dönüşümünün gerçekleştiği düşünülmüştür. Sıcaklığın malzeme içerisinde homojen olarak dağıldığı ve faz dönüşümü esnasında değişmediği varsayılmıştır. Kübik-tetragonal faz dönüşümü sırasında üç farklı varyant oluşabilmektedir. Levitas ve Özsoy'un [12,47] geliştirmiş olduğu modelde varyantlar içerisinde itici kuvvet değerini en yüksek yapan varyant ikilisi seçilmektedir. Bu çalışmada itici kuvvet değerini en büyük yapan varyant ikilisinin dönüşüm gerinimleri aşağıda gösterilmektedir.

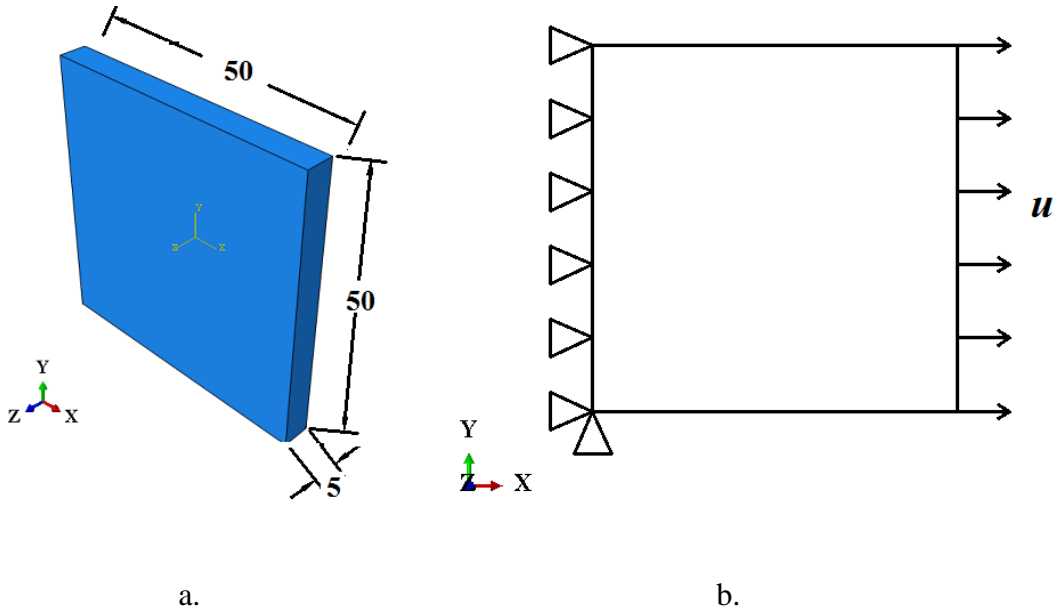
$$\begin{aligned} 1. \text{ varyant için: } & (\varepsilon_t^1)_{11} = 0.0221 & (\varepsilon_t^1)_{22} = -0.0111 & (\varepsilon_t^1)_{33} = -0.0111 \\ 2. \text{ varyant için: } & (\varepsilon_t^2)_{11} = -0.0111 & (\varepsilon_t^2)_{22} = -0.0111 & (\varepsilon_t^2)_{33} = 0.0221 \end{aligned}$$

Bölüm 2.2'de üç fazlı sistemde anlatılan ve bu tezde kullanılan mikromekanik modelin temelini oluşturan denklemler kullanılarak hesaplamalar ve analizler yapılmıştır.

Östenit ve martensit fazları izotropik düşünülerek her iki faz için de malzeme parametreleri olarak $E = 200 \text{ GPa}$ ve $\nu = 0.3$ değerleri kullanılmıştır. Belirli bir sıcaklıkta tanımlanan $\Delta\psi^\theta$ değeri ise 15 MPa olarak kabul edilmiştir. Bu değer belirlenen bir seviyenin altında olması durumunda östenit fazı martensit fazına dönüşmektedir. Bu yüzden östenitin kararlı olduğu yüksek sıcaklığa denk gelen bir değer seçilmiştir. Bu değer çok yüksek olması durumunda ise elastik limitlerde yük uygulayarak martensit oluşturmak imkansızlaşmaktadır.

Yükleme tek eksenli yapılsa bile oluşan gerilme durumu, dönüşüm geriniminden dolayı 3 boyutlu olabilir. Bu yüzden yapılan modellemeler ve analizler 3 boyutlu olarak gerçekleştirilmiştir ve bu analizlerde 3 boyutlu doğrusal tuğla (C3D8) elemanları kullanılmıştır.

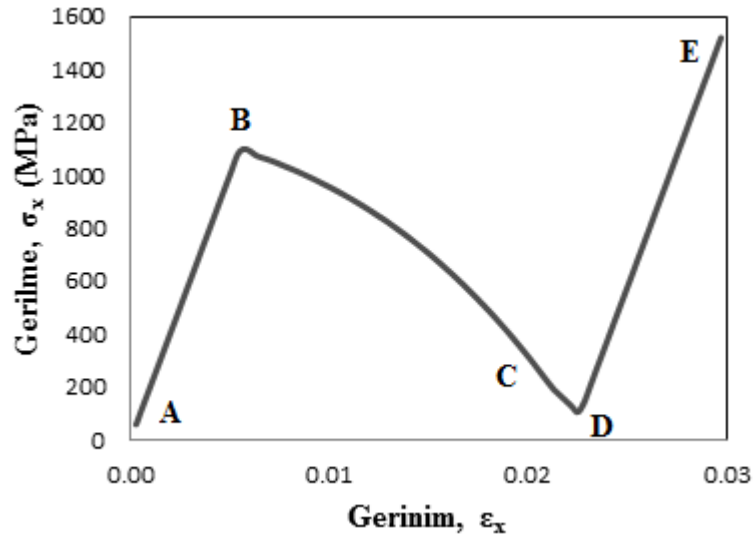
Bölüm 5.1 ve 5.3'te yapılan tek kristalli ve çok kristalli çalışmalarda modellenen malzemenin boyutları ve sınır koşulları Şekil 5.1'de gösterilmiştir. Boyutları 50x50x5 birim olan Şekil 5.1.a'daki numune kullanılmıştır. ŞHA'daki faz dönüşümünün modellenmesi için kullanılan matematiksel model parçanın boyutlarından bağımsızdır. Parçanın boyutları ve Şekil 5.1.b'de görülen deformasyon miktarına (u) göre yalnızca gerinim değişmektedir. Gerinim aynı kaldığı sürece farklı boyutlarda yapılan analizler kullanılan matematiksel modele göre aynı sonucu vermektedir. ŞHA'ya uygulanan tek eksenli çekme analizlerinde Şekil 5.1.b'de görüldüğü gibi parçanın bir yüzeyi çekilecek ekseninde sabitlenirken bu yüzeye karşılık gelen diğer yüzeye ise çekme yönünde deformasyon uygulanmaktadır.



Şekil 5.1. Modellenen malzemenin a) boyutları b) sınır koşulları

5.1. Tek Kristalli Şekil Hafızalı Alaşımlar

Çok kristalli malzemelerin modellenmesinden önce tek kristalli malzemelerin davranışları hakkında fikir sahibi olmak için öncelikle Şekil 5.1'deki malzemenin tek bir tanecikten oluştuğu varsayılarak x eksenini yönünde SE metodu kullanarak çekme analizleri yapılmıştır ve Şekil 5.2'deki gerilme-gerinim grafiği elde edilmiştir. A noktasından B noktasına kadar malzeme östenit fazındadır ve gerilme doğrusal olarak artmaktadır. B noktasında ise faz dönüşümü başlamıştır. B noktasından faz dönüşümünün tamamlandığı D noktasına kadar malzemenin gerilmesinde azalma meydana gelmektedir, yani gerinim yumuşaması oluşmaktadır. Faz dönüşümünün başladığı B noktasında az da olsa 2. martensitik varyantın oluşmaya başladığı gözlemlense de C noktasında 2. martensitik varyant kaybolmakta ve yalnızca 1. martensitik varyant kalmaktadır. B noktasından C noktasına kadar Roytburd'un [31] çalışmasında elde ettiği sonuçlardakine paralel olarak grafik doğrusallıktan biraz sapmıştır. D noktasından E noktasına kadar malzeme martensit fazında olduğundan östenit fazında olduğu gibi gerilme artışı doğrusal olmaktadır.

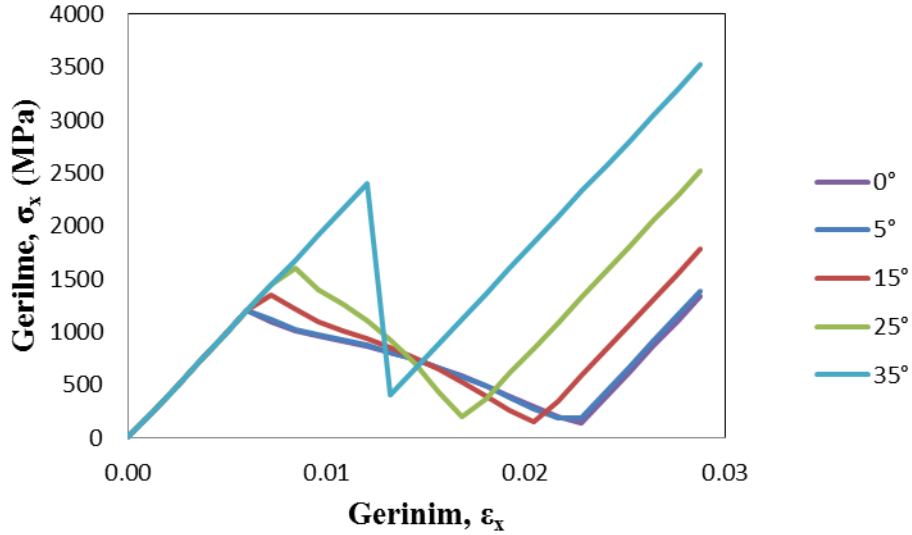


Şekil 5.2. Tek kristalli 0° 'lik oryantasyona sahip malzemenin gerilme-gerinim grafiği

Daha sonra kristal oryantasyonlarının malzeme davranışına etkisini incelemek için farklı oryantasyonlara sahip tek kristalli malzemeler modellenmiştir. Sırasıyla z

ekseni etrafında 0° , 5° , 15° , 25° ve 35° döndürülmüş tek kristalli malzemeler ABAQUS'te x eksenini yönünde çekmeye maruz bırakılmıştır.

Farklı kristal oryantasyonlarına sahip tek kristalli malzemeler modellenirken kullanılan matematiksel modele göre, malzemenin kristal oryantasyonu değiştiğinde yalnızca dönüşüm matrisi o açıya göre döndürülmekte ve yeni dönüşüm gerinim matrisi elde edilmektedir. Malzeme izotropik varsayıldığı için elastisite matrisinde değişiklik yoktur. Şekil 5.3'te farklı oryantasyonlara sahip tek kristalli malzemelere x eksenini yönünde çekme analizi uygulanarak elde edilen gerilme-gerinim grafikleri verilmiştir.



Şekil 5.3. Tek kristalli farklı oryantasyonlara sahip malzemelerin gerilme-gerinim grafikleri

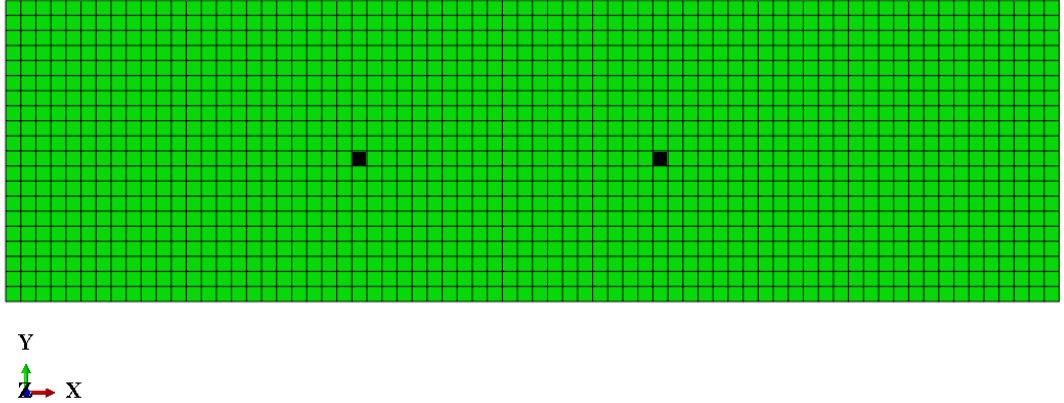
Tek kristalli malzemelerde x eksenini yönünde çekme yükü uygulandığı zaman meydana gelen Şekil 5.3'teki gerilme-gerinim grafiği incelenirse, değişik açılarda döndürülmüş tek kristalli yapılarda dönüşüm gerinim değerleri farklı olduğundan her bir kristalde farklı gerilme değerinde dönüşüm gerilme değerine ulaşılmıştır. Açı büyüdükçe kristallerde dönüşümün daha geç başladığı, bunun yanı sıra daha erken tamamlandığı gözlemlenmiştir.

Bu çalışmadaki SE yöntemiyle elde edilen sonuçlar Levitas ve Özsoy'un [12,47] mikromekanik modeliyle SE kullanılmadan elde edilen sonuçlarla aynı çıkmaktadır.

Çünkü yerel gerilme bölgeleri oluşturarak faz dönüşümünü etkileyen herhangi bir kusur veya çekirdek bu analizlerde kullanılmamıştır.

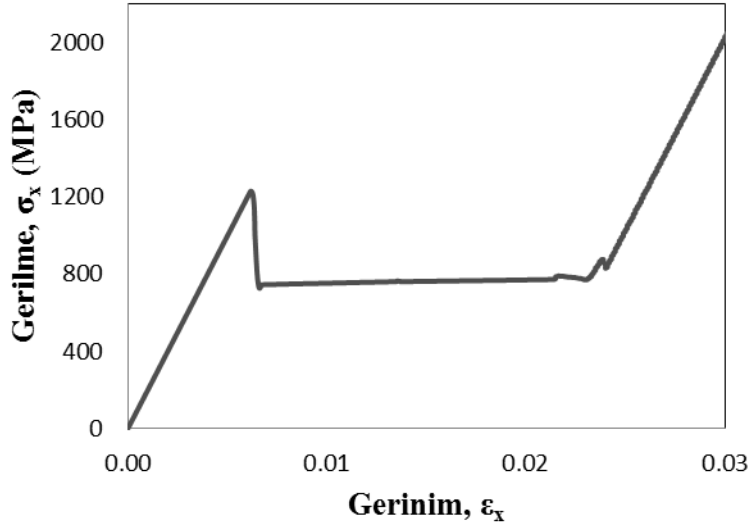
5.2. Tek Kristalli Şekil Hafızalı Alaşımlarda Çekirdeğin Etkisi

Faz dönüşümü genellikle malzeme kusurlarının olduğu bölgelerde başlamaktadır ve faz dönüşüm kinetiğini etkilemektedir [49]. Bu bölgelerde martensitik çekirdek oluşarak yayılmaya başlar. Tek kristalli malzemede çekirdeğin etkisini inceleyebilmek için Şekil 5.4'te görülen yapı modellenmiştir. 1400 elemana sahip ince bir plakaya x eksen yönünde çekme yükü uygulanmıştır. Bu modelde bütün elemanlar z eksen etrafında 18° döndürülmüş şekilde kristal oryantasyonuna sahiptir. Yalnızca Şekil 5.4'te siyah renkli gösterilen iki küçük eleman döndürülmemiş kristal oryantasyonuna sahiptir ve bu yüzden faz dönüşümü ilk olarak bu elemanlarda başlayacaktır. Dolayısıyla, bu elemanların martensitik çekirdek olduğu varsayılmış ve böylece tek kristalli malzemede çekirdeğin etkisi incelenmiştir. Bu çekirdeklerin olmadığı durum için gerilme-gerinim grafiği Şekil 5.3'te verilen 15° 'lik kristalinkine yakın olacaktır.



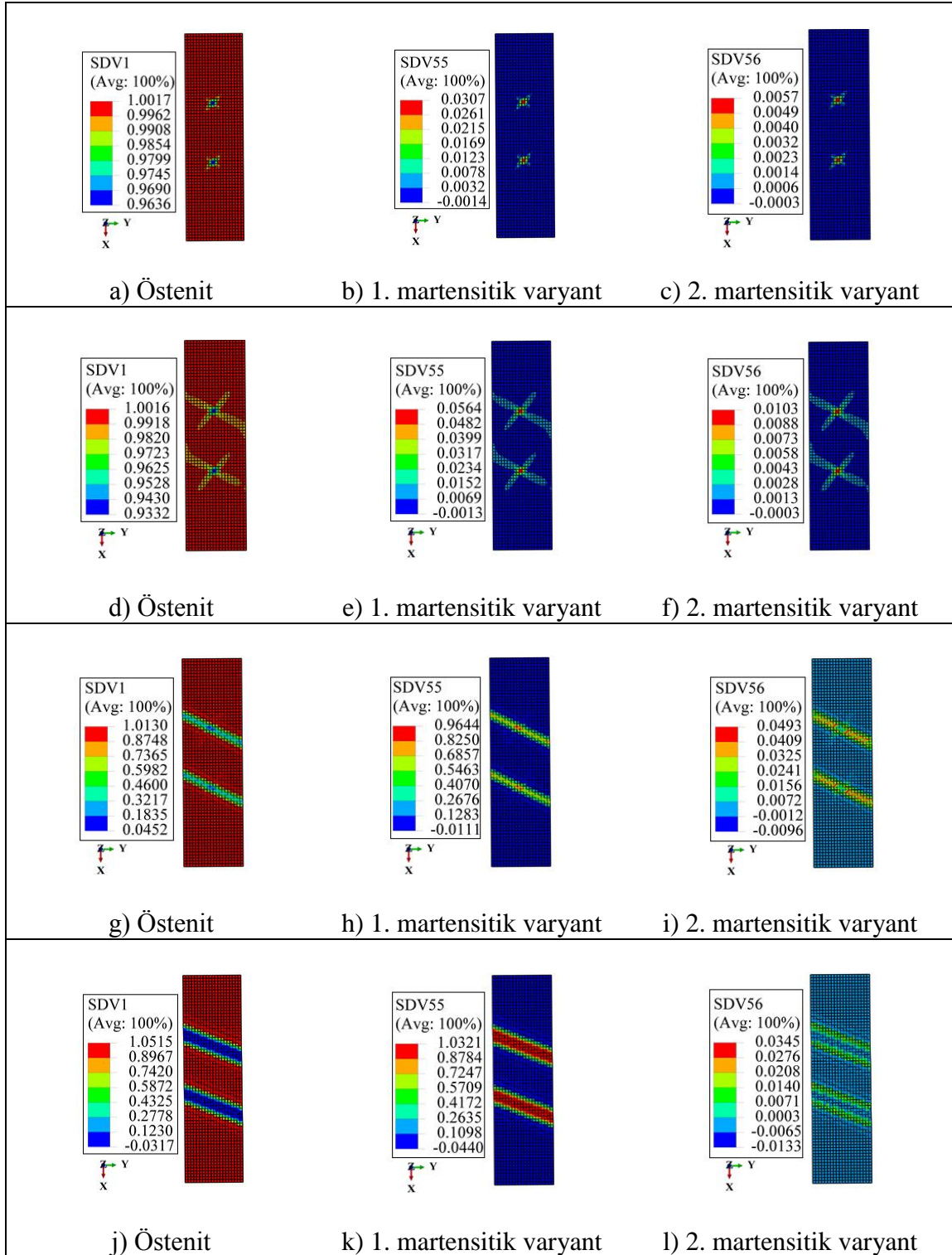
Şekil 5.4. İçerisinde iki farklı eleman bulunan plaka yapı

ABAQUS SE programı kullanılarak plakaya x eksen yönünde uygulanan çekme yüklemesi sonucunda Şekil 5.5'teki gerilme-gerinim grafiği elde edilmiştir. Bu grafiğe göre faz dönüşümü başlangıcında gerilmede ani bir düşüş olmaktadır. Daha sonra faz dönüşümü bitene kadar gerilme değeri sabit kalmaktadır.



Şekil 5.5. İçerisinde iki farklı eleman bulunan plaka yapının gerilme-gerinim grafiği

x ekseninde çekme uygulanan bu plaka yapıdaki östenit ve martensitik varyantların 6.15×10^{-3} ile 6.62×10^{-3} gerinim değerleri arasındaki (faz dönüşümün yeni başladığı) hacim oranlarının değişimini gösteren resimler Şekil 5.6'da yer almaktadır. Şekil 5.6.a,b,c'de görüldüğü gibi faz dönüşümü, öncelikle plaka içerisine yerleştirilmiş olan döndürülmemiş kristal oryantasyona sahip elemanlarda başlamaktadır. Bunun sebebi, Şekil 5.3'te gösterilen farklı açılardaki taneciklerin gerilme-gerinim grafiği ile açıklanabilir. Bu grafiğe göre faz dönüşümü en önce 0° 'lik oryantasyona sahip kristalde başlamaktadır. Daha sonra faz dönüşümü, elemanlardan birbirine dik iki bant halinde yayılmaktadır (bkz. Şekil 5.6.d,e,f). 6.37×10^{-3} gerinim değerinde ise dik bantlardan bir tanesinin kaybolduğu ve onun yerine sadece tek bir bandın kaldığı Şekil 5.6.g,h,i'de görülmektedir. Gerinim değeri arttıkça Şekil 5.6.j,k,l'deki gibi bandın tamamının martensit fazına dönüştüğü ve büyüdüğü gözlemlenmektedir. Faz dönüşümü boyunca oluşan martensitik yapının çok büyük bir bölümü 1. martensitik varyant iken, küçük bir bölümü 2. varyanttır.



Şekil 5.6. İçerisinde iki farklı eleman bulunan plaka için a,b,c) $\varepsilon_x = 6.15 \times 10^{-3}$
d,e,f) $\varepsilon_x = 6.20 \times 10^{-3}$ g,h,i) $\varepsilon_x = 6.37 \times 10^{-3}$ j,k,l) $\varepsilon_x = 6.62 \times 10^{-3}$ gerinim
değerlerindeki östenit ve 1. ve 2. martensitik varyantın hacim oranları dağılımı

Bu analiz sonucunda farklı yapıya sahip az sayıdaki taneciğin bile bütün bir malzemenin gerilme-gerinim davranışını oldukça etkilediği görülmektedir. Böylelikle tek kristal yapıdaki, faz dönüşümü boyunca oluşan gerinim yumuşamasından farklı bir durum ortaya çıkmıştır. İçerisinde iki farklı eleman bulunan plakada faz dönüşümü başlayınca gerilmede bir düşüş olmakta ve bununla birlikte birbirine dik iki bant oluşmaktadır. Daha sonra Idesman vd'nin [25] çalışmalarında olduğu gibi bu iki banttan biri kısa bir zamanda kaybolmaktadır. Bu durum, Lim ve McDowell'in [29], Boyd ve Lagoudas'ın [61,62], Hall ve Govindjee'nin [63] ve Levitas vd'nin [64] mikromekanik modelleriyle elde edilememiştir. Ayrıca bant oluşumu sırasında faz dönüşümü başladıktan hemen sonra gerilmede ani bir düşüş meydana gelmektedir. Oluşan martensitik bant hızla büyümekte ve dengeye gelince de gerilme yaklaşık olarak sabit kalmaktadır. Faz dönüşümü tamamlanana kadar gerilmede bazı dalgalanmalar olmaktadır ve bu dalgalanmalar Saburi vd'nin [46] ve Krishnan ve Brown'ın [65] deneysel çalışmalarında da görülmektedir. Daha sonra gerinim değeri arttıkça bu bant büyüyerek malzemenin tamamı martensit fazına dönüşmektedir. Faz dönüşümü beklenildiği gibi öncelikle daha küçük açıda döndürülmüş kristal oryantasyonlarına sahip iki küçük elemanda başlamıştır. Yapılan bu çalışma, içerisinde martensitik çekirdek bulunan malzemelerin davranışını tespit etmek için yapılan bir çalışma olarak düşünülebilir. Çünkü bu çalışmada da malzemenin içerisinde benzer şekilde çekirdek etkisi oluşturulmaktadır. Bu çalışma ile çok kristalli malzemelerde de benzer sonuçların elde edilebileceği tahmin edilebilmiştir.

Aynı model kullanılarak kusur olduğu düşünülen 2 elemanın ilk yapılarının farklı durumları için de birkaç farklı çalışma yapılmıştır. Buradaki amaç bu kusurların farklı durumlarının faz dönüşüm kinetiğini nasıl etkilediğini görmektir. Bu çalışmalar aşağıdaki gibidir:

- (a) Her iki eleman da yükleme başında tamamen martensitik fazdadır.
- (b) Elemanlardan birinin kristal oryantasyonu 0° iken, diğeri tamamen martensitik fazdadır.

(c) Sadece bir eleman başlangıçta martensitik fazdadır, diğeri geri kalan elemanların özelliklerine sahiptir. Ancak faz dönüşümü başladıktan sonra bu elemanın aniden martensite dönüştüğü varsayılmıştır.

Bu çalışmalar sonucunda elde edilen gerilme-gerinim grafiklerinde bir farklılık görülmemiş, Şekil 5.5'teki grafiğin aynısı elde edilmiştir. (a) örneğinde elemanların başlangıçta martensitik fazda olmaları çevre elemanlardaki gerilme durumlarını etkilemiş ancak faz dönüşümünün yayılması için yeterli olmamıştır. Bu yüzden dış yük faz dönüşümünün başlaması için gerekli seviyeye ulaşınca dönüşüm her iki elemanın komşu elemanlarına aniden yayılmış ve bant şeklinde dönüşen bölümler oluşmuştur. (b) ve (c) örneklerinde ise dönüşüm martensitik fazda olan elemandan başlayarak yayılmış, diğer elemanın ise etkisinin olmadığı görülmüştür. Benzer durum Idesman vd'nin [25] çalışmasında da görülmüştür. Her kusurda faz dönüşümünün başlamayabileceği bu şekilde tespit edilmiştir.

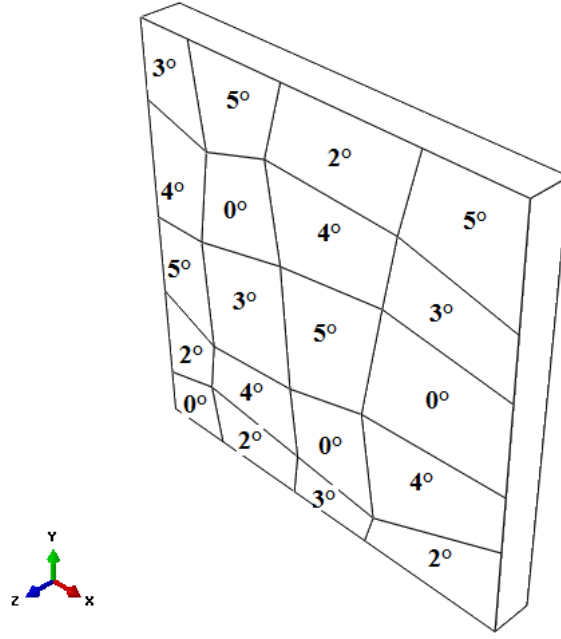
5.3. Çok Kristalli Şekil Hafızalı Alaşımlar

Çok kristalli malzemelerde malzemenin içerisinde birçok tanecik bulunmaktadır ve bu tanecikler farklı oryantasyonlara sahip olmaktadır. Çok kristalli analizlerde birçok tanecik bir araya getirilerek malzemenin makroskopik davranışı tespit edilmeye çalışılmaktadır. Çok kristalli modellerde yapılan çalışmalarda malzemede Şekil 5.7'deki gibi 20 farklı tanecik kullanılarak analizler gerçekleştirilmiştir. Bu taneciklerin oryantasyonlarının küçük açılar (0° ile 5° arasında) olduğu birinci tip model ile daha büyük açılar (-25° ile 25° arasında) olduğu ikinci tip model kullanılarak iki farklı problem çözülmüştür. Küçük açılı problemin çözülmesinin nedeni sayısal olarak fazla işlem yapmadan çok taneli yapı ile tek taneli yapı arasındaki malzeme davranışı farkını tespit edebilmektir.

5.3.1. Birinci Tip Modelleme

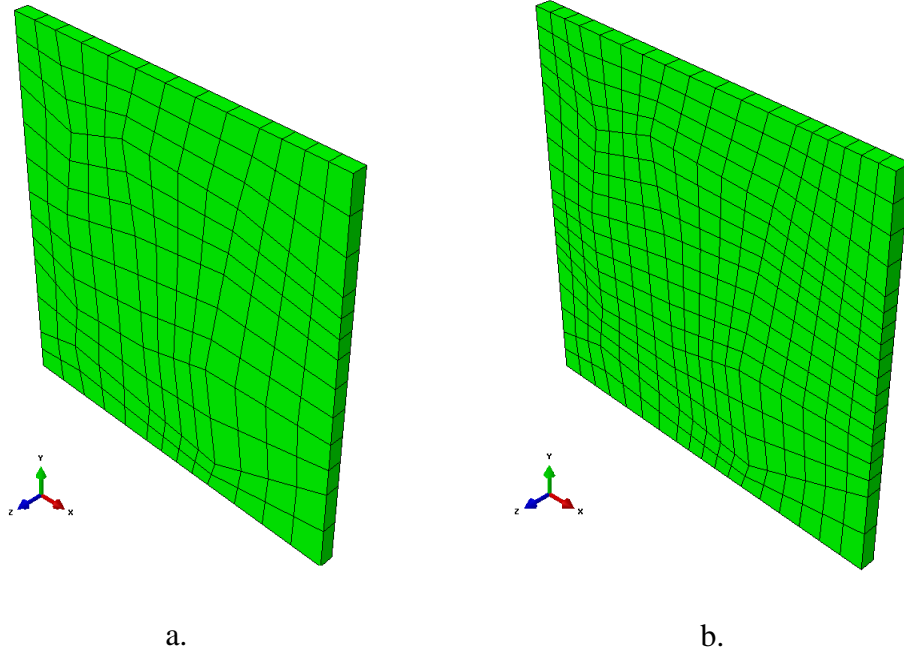
Bu çalışmada taneciklerin oryantasyonlarının Şekil 5.7'de görüldüğü gibi 0° ile 5° arasında değiştiği varsayılmıştır. Bu oryantasyonlar taneciklerin z eksenine etrafında döndürülmesiyle elde edilmiştir. Bu çalışmanın amacı büyük açı farkı yaratmadan ve dolayısıyla muhtemel iraksamalara karşı eleman sınırlarında çok fazla ayrık yapı

meydana getirmeden ŞHA'nın çekme yüklemesine karşı en genel davranışını tespit etmektir. Böylece tek kristalli malzeme davranışından farklı olarak çok kristalli malzeme davranışı yaklaşık olarak elde edilebilecektir. Bu çalışma, tek kristalli malzeme davranışından çok kristalli malzeme davranışına bir geçiş adımı olarak düşünülebilir.



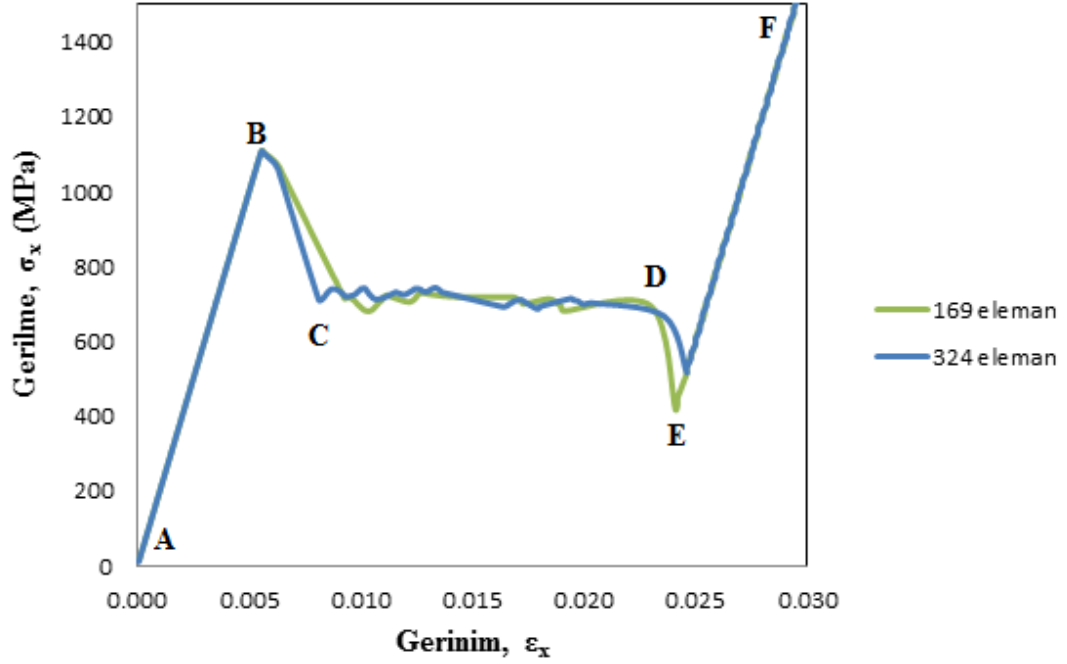
Şekil 5.7. Küçük açılara (0°- 5° arası) sahip 20 tanecik

Bu çalışmada Şekil 5.7'de görülen model için Şekil 5.8'de görüldüğü gibi 169 ve 324 eleman kullanılarak analizler yapılmıştır. Böylelikle kullanılan eleman sayısının analiz üzerindeki etkisi de görülmüştür.



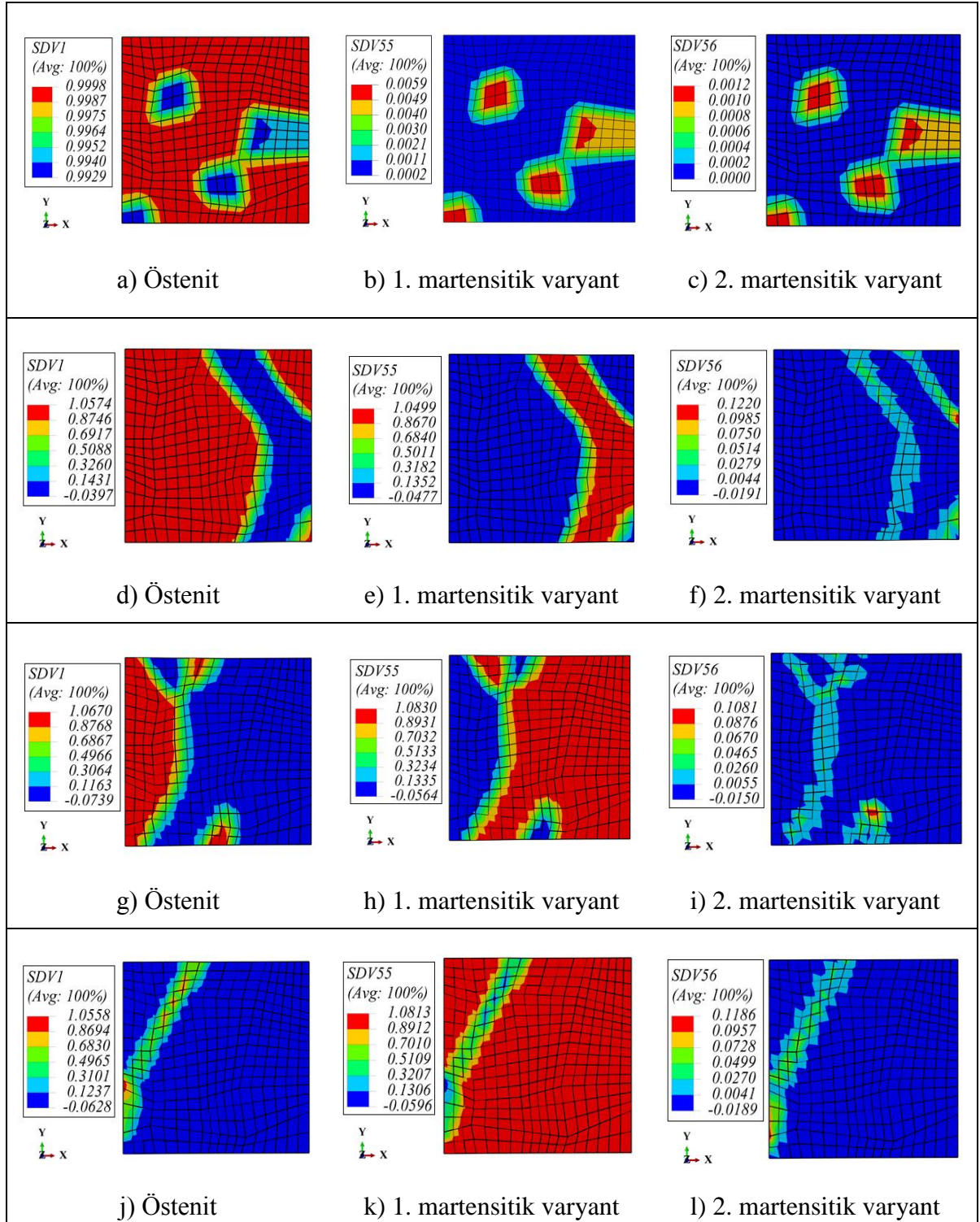
Şekil 5.8. Küçük açılı analizlerde kullanılan a)169 b)324 elemanlı model

Uygulanan gerinim sonucunda x yönünde oluşan gerilme-gerinim grafiği Şekil 5.9'daki gibi oluşmuştur. Bu grafik incelenecek olursa faz dönüşümü başlayana kadar A noktasından B noktasına kadar malzemede sadece östenit fazı olduğundan gerilme doğrusal olarak artmaktadır. Faz dönüşümü başladıktan sonra ise C noktasına kadar gerilmenin azaldığı görülmektedir. Daha sonra C noktasından D noktasına kadar gerilme belli bir aralıkta yaklaşık olarak sabit değerde kalmaktadır. Faz dönüşümü tamamlanmaya yakın gerilmede tekrar bir düşüş olduktan sonra E noktasında malzemenin tamamı martensit fazına geçmiş ve uygulanan gerinimin tamamlandığı F noktasına kadar tekrar doğrusal bir artış olmuştur. 169 ve 324 eleman sayısına sahip analizler karşılaştırıldığında bu iki farklı eleman sayısının kullanıldığı modellerde birbirine çok yakın gerilme-gerinim grafikleri elde edilmiştir. Yalnızca faz dönüşümünün başladığı ve sonlandığı bölgelerde grafiğin eğiminin bir miktar değiştiği gözlemlenmiştir. Dolayısıyla analizlerin daha kısa sürdüğü 169 elemanlı modelin kullanılmasında bir sakınca görülmemiştir.



Şekil 5.9. 0°-5° arası oryantasyonlara sahip modelde kullanılan eleman sayısına göre oluşan gerilme-gerinim grafiği

Uygulanan gerinim boyunca 324 elemanlı analizde 0.0056, 0.0096, 0.0192 ve 0.0240 gerinim değerlerinde östenit ile 1. ve 2. martensitik varyantların hacim oranlarının dağılımı Şekil 5.10'da görülmektedir. z ekseninde hacimsel oranların dağılımı x-y eksenine aynı olduğundan şekiller yalnızca x-y ekseninden kaydedilmiştir. Şekil 5.10.a,b,c'de görüldüğü gibi faz dönüşümünün başladığı 0.0056 gerinim değerinde martensite ilk dönüşen tanecikler döndürülmemiş yani 0° açığa sahip taneciklerdir. Oluşan martensitin çoğu 1. varyant olup 2. varyanttan oldukça az miktarda oluşmuştur. 0.0096 gerinim değerinde yani faz dönüşümünün ilerlemeye başladığı gerinim değerinde ise Şekil 5.10.d,e,f'de görüldüğü gibi martensitik dönüşümlerin malzemenin belirli bir bölgesinde (modelin sağ tarafı) yoğunlaştığı ve malzemenin diğer bölgelerinde ise (modelin sol tarafı) faz dönüşümünün oldukça az olduğu görülmektedir. Faz dönüşümü ilerledikçe Gall vd'nin [36] çalışmalarında olduğu gibi faz dönüşümü en uygun taneciklerde başlamış ve tanecik sınırlarından diğer taneciklere yayılmıştır. Tanecik sınırlarında oluşan yüksek gerilmeler, faz dönüşümünün diğer tanelerde başlamasına sebep olduğu görülmüştür.



Şekil 5.10. 0° - 5° arası oryantasyonlara sahip model için a,b,c) $\epsilon_x = 0.0056$ d,e,f) $\epsilon_x = 0.0096$ g,h,i) $\epsilon_x = 0.0192$ j,k,l) $\epsilon_x = 0.0240$ gerinim değerlerindeki östenit ve 1. ve 2. martensitik varyantın hacim oranları dağılımı

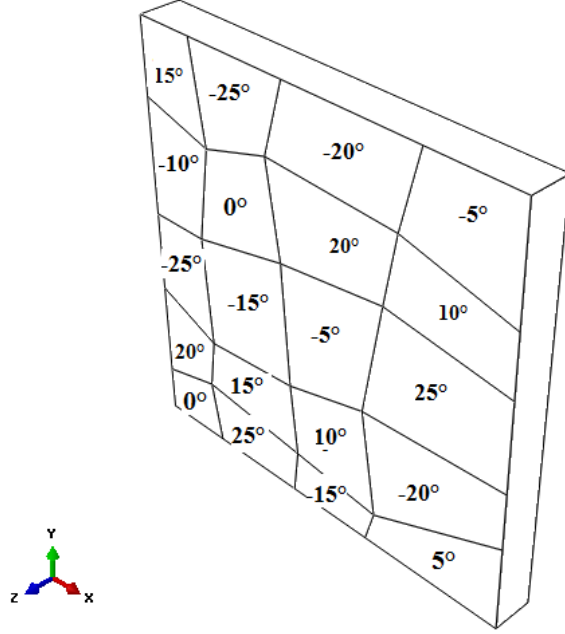
Ayrıca martensite dönüşümün tamamlandığı bölgede sadece 1. varyantın olduğu, faz dönüşümünün yeni başladığı bölgelerde ise az da olsa 2. varyantın da bulunduğu gözlemlenmektedir. Daha sonra uygulanan gerinim miktarı arttıkça (0.0192 gerinim değerinde) faz dönüşümünün malzemenin sol bölgesine doğru ilerlediği ve martensit oluşumunun birçok bölgede tamamlandığı Şekil 5.10.g,h,i’de görülmektedir. Yine bu gerinim değerinde de faz dönüşümünün tamamlandığı bölgelerde 2. varyantın olmadığı ve faz dönüşümünün başladığı bölgelerde bu varyantın çok az olduğu görülmektedir. Dolayısıyla buradan, faz dönüşümü başladığında 2. martensitik varyantların oluşmaya başladığını, ama faz dönüşümü tamamlanmaya yakın bu varyantların tamamen kaybolarak sadece 1. varyantın oluştuğu sonucu çıkmaktadır. Bütün malzemede faz dönüşümünün tamamlanmasına oldukça yakın olunan 0.0240 gerinim değerinde ise Şekil 5.10.j,k,l’de görüldüğü gibi yalnızca malzemenin küçük bir bölgesinde faz dönüşümü tamamlanmamıştır ve bu bölgelerde çoğunluğu 1. varyanttan oluşan martensitik yapı bulunmaktadır. Faz dönüşümü boyunca östenit ile martensit arasında oluşan ara yüzey Zhang vd’nin [42] yaptıkları deneyde elde ettikleri gibi düz bir şekilde oluşmuş, fazlar arasında ise deformasyon uyumsuzluğu olmamıştır.

0°-5° arası oryantasyonlara sahip model için yapılan analizlerin sonucunda tek kristalli analizlerden çok farklı sonuçlar elde edilmiştir. Faz dönüşümü sırasında gerilme değeri bazı zikzaklar dışında neredeyse sabit olarak devam etmiştir. Faz dönüşümü başlarken ve tamamlanmaya yakın ise gerilme değeri bir miktar düşmektedir. Bunun sebebi çok fazla tanecik kullanılmamasıdır. Eğer tanecik sayısı çok fazla arttırılırsa faz dönüşümünden itibaren gerilme değerinin sabit olacağı düşünülmektedir. Böylece deneylerle elde edilen gerilme-gerinim grafiklerine benzer grafikler elde edilmektedir.

5.3.2. İkinci Tip Modelleme

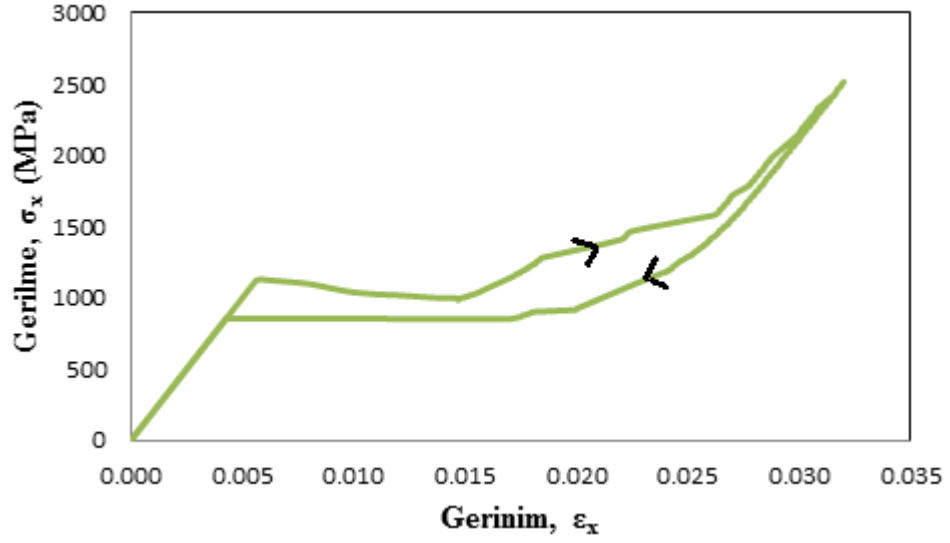
Bu çalışmada taneciklerin sahip olduğu açıların Şekil 5.11’de görüldüğü gibi -25° ile 25° arasında değiştiği varsayılmıştır. Malzeme içerisindeki tanecikler her oryantasyonda olabileceğinden izotropik malzemelerde oryantasyonlar için daha

geniş bir aralıkta yapılan analizler çok kristalli malzemelerin makroskopik davranışını daha iyi temsil edebilmektedir.



Şekil 5.11. Büyük açılara (-25° - 25° arası) sahip 20 tanecik

Şekil 5.12’de büyük açılara sahip çok kristalli malzemeye uygulanan yükleme ve yüklemeyi kaldırma sonrası oluşan gerilme-gerinim grafiği görülmektedir. Bu grafikte yükleme sırasında faz dönüşümü ilk başladıktan sonra x yönünde uygulanan yaklaşık 0.015’lik gerinim değerine kadar gerilme değerinin değişmediği gözlemlenmektedir. Daha sonra ise faz dönüşümü sonlanıncaya kadar gerilme değerinde belirli aralıklarda artış olmuştur. Faz dönüşümü başlamadan önce ve sonlandıktan sonra ise yalnızca östenit ve yalnızca martensit fazı bulunduğu gerilme doğrusal olarak artmaktadır. Uygulanan yükleme kaldırıldıktan sonra ise küçük bir histerisiz oluşarak gerilme değerlerinde azalma meydana gelmiştir. Gerilme-gerinim eğrisi geri yüklemeye yaklaşık olarak aynı yolu takip etmiştir.

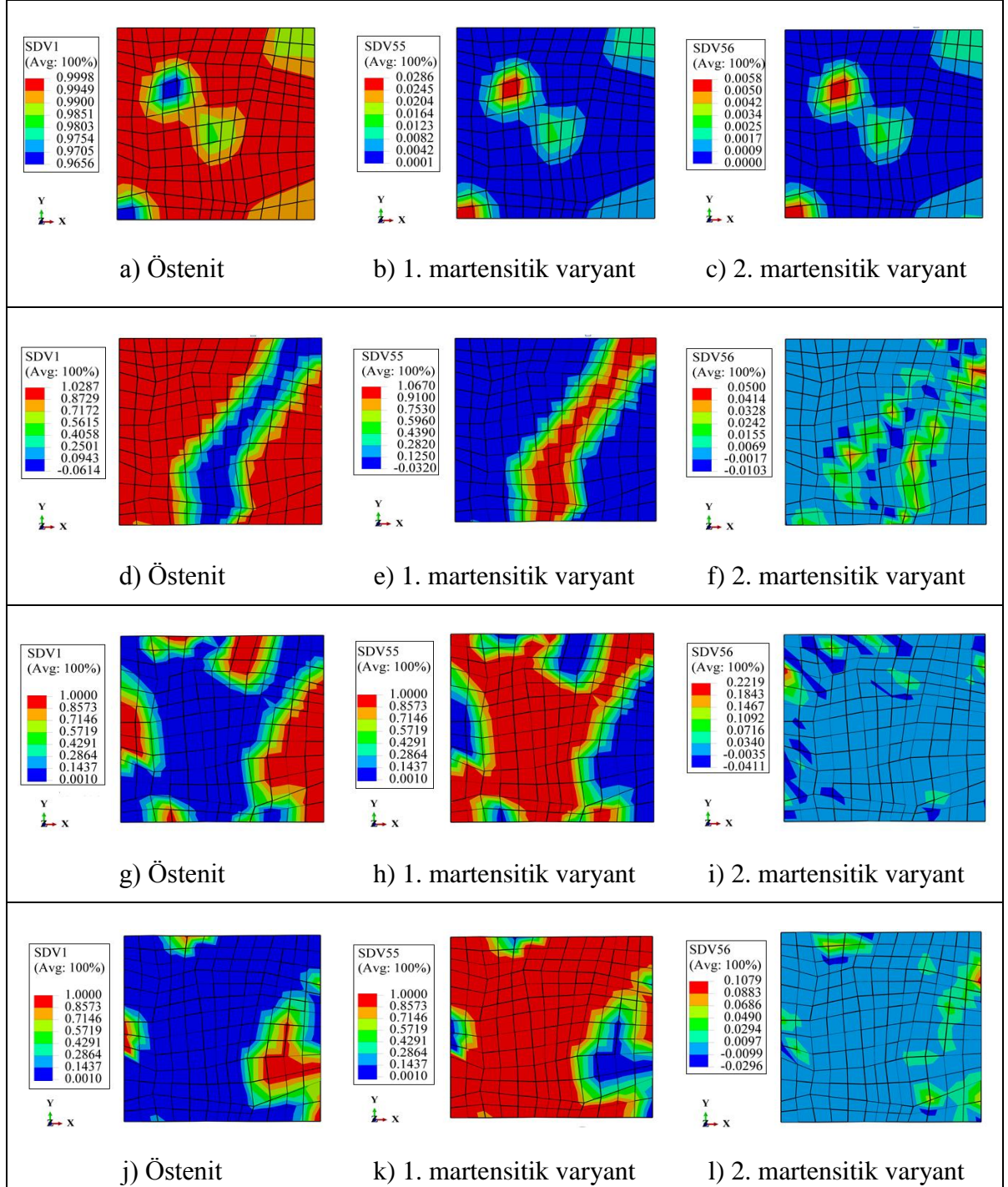


Şekil 5.12. -25° - 25° arası oryantasyonlara sahip modelde oluşan gerilme-gerinim grafiği

-25° ile 25° arasındaki oryantasyonlara sahip model için 0.0057, 0.0096, 0.0192 ve 0.0240 gerinim değerlerinde östenit ile 1. ve 2. martensitik varyantın hacim oranlarının dağılımı Şekil 5.13'te görülmektedir.

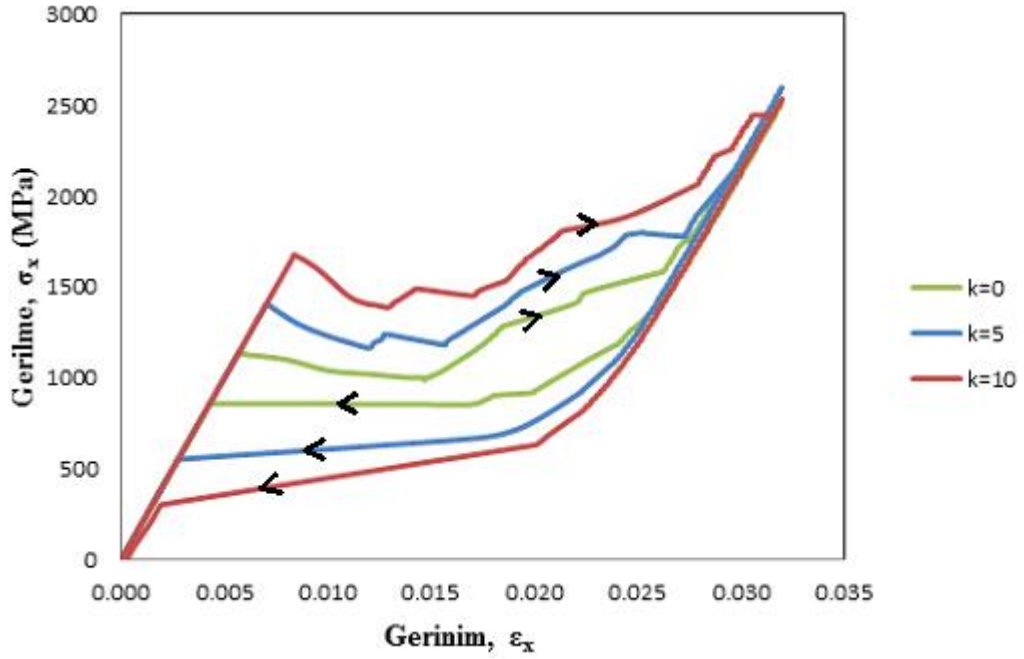
Faz dönüşümünün hemen hemen yeni başladığı 0.0057 gerinim değerinde martensite ilk dönüşüm taneciklerin diğerlerine göre daha küçük açılar olan 0° ve 5° ile -5° 'lik açılara sahip tanecikler olduğu Şekil 5.13.a,b,c'de görülmektedir. Oluşan martensitin çoğu 1. varyant olup aynı bölgelerde 2. varyanttan oldukça az miktarda oluşmuştur. Faz dönüşümünün ilerlediği 0.0096 gerinim değerinde ise Şekil 5.13.d,e,f'de görüldüğü gibi martensitik hacimlerin malzemenin orta bölgesinde bir bant şeklinde yoğunlaştığı, diğer bölgelerde ise sadece östenit fazının bulunduğu görülmektedir. Ayrıca küçük açılarda yapılan analizdeki gibi martensite dönüşümün bittiği kısımlarda sadece 1. varyantın olduğu, faz dönüşümünün yeni başladığı kısımlarda ise çok az 2. varyantın, büyük miktarda ise 1. varyantın bulunduğu görülmektedir. 0.0192 gerinim değerinde ise 25° ve -25° 'lik açılara sahip taneciklerde martensit oluşumunun tamamlandığı, kristal açısı azaldıkça martensitik hacim oranının azaldığı Şekil 5.13.g,h,i'de görülmektedir. Yine bu gerinim değerinde 2. varyant çok az oluşmuştur. Malzemede faz dönüşümü tamamen sonlanmadan 0.0240 gerinim değerinde ise Şekil 5.13.j,k,l'de görüldüğü gibi yalnızca malzemenin bazı küçük

bölgelerinde faz dönüşümü tamamlanmamıştır ve oluşan martensitik yapının hemen hemen tamamı 1. varyanttır.



Şekil 5.13. $-25^\circ - 25^\circ$ arası oryantasyonlara sahip model için a,b,c) $\varepsilon_x = 0.0057$ d,e,f) $\varepsilon_x = 0.0096$ g,h,i) $\varepsilon_x = 0.0192$ j,k,l) $\varepsilon_x = 0.0240$ gerinim değerlerindeki östenit ve 1. ve 2. martensitik varyantın hacim oranları dağılımı

Aynı malzeme için atermal sürtünmenin, yani malzeme üretilirken kullanılan proseslerden kaynaklı etkenlerin bir ölçütünün, ŞHA'da malzeme davranışı üzerindeki etkisini görebilmek için $k=5 \text{ MPa}$ ve $k=10 \text{ MPa}$ değerleri kullanarak iki farklı analiz daha gerçekleştirilmiştir. Bu iki analizle birlikte sürtünmesiz olarak yapılan analizden çıkan sonuçlar Şekil 5.14'teki gerilme-gerinim grafiğinde karşılaştırılmıştır.



Şekil 5.14. Farklı k değerleri için -25° - 25° arası oryantasyonlara sahip modelde oluşan gerilme-gerinim grafiği

Şekil 5.14'teki farklı atermal sürtünme değerleri kullanılarak tek eksenli yükleme ve geri yükleme uygulanan çok kristalli malzemedeki x yönünde oluşan oluşan gerilme-gerinim eğrilerine bakıldığında zaman, yükleme esnasında en büyük k değeri kullanılarak yapılan analizde faz dönüşümünün daha geç başladığı görülmektedir. Bunun nedeni ara yüzeyin hareket etmesi için gerekli olan itici kuvvet değerinin k değeri ile artmasıdır. Faz dönüşümünün başlaması için itici kuvvetin sürtünmeyi yenebilmesi gerekmektedir. Ayrıca geri yükleme esnasında da ters yönde faz dönüşümünün başlaması için var olan sürtünmenin aşılması gerekmektedir. Böylelikle ŞHA'nın süperelastisite özelliğinin bir unsuru olan histerisiz meydana gelmektedir. Atermal sürtünmenin büyük olduğu durumlarda Şekil 5.14'te görüldüğü

gibi bu histerisiz daha fazla olmaktadır. Levitas vd'nin [52] yaptıkları çalışmada da sürtünmeye bağlı oluşan direncin, gerilme-gerinim grafiğinde oluşan histerisizin en önemli nedeni olduğu belirtilmektedir. Bu sürtünme değerleri deneylerle belirlenmelidir ve bu değerler kullanılarak elde edilen grafikler ile deneysel sonuçlar karşılaştırılmalıdır. Ayrıca Şekil 5.14'te $k=10 \text{ MPa}$ değeri için elde edilen grafik, Saburi vd'nin [46] çok kristalli NiTi ŞHA için Şekil 1.19'daki deneysel olarak elde ettiği grafiğe, her ikisi farklı dönüşüm olsa da benzemektedir.

Birinci ve ikinci tip modeller kullanılarak elde edilen sonuçlar karşılaştırılacak olursa gerçek mikroyapıya daha yakın model olan -25° - 25° arası açılarının kullanıldığı ikinci tip modelde gerilme-gerinim grafiği biraz daha farklı çıkmıştır. İkinci tip model kullanılarak yapılan analizde birinci tip modelden farklı olarak faz dönüşümü başladıktan sonra gerilme değerinde bir düşüş olmadığı ve gerilmenin neredeyse sabit olarak ilerlediği görülmüştür. Faz dönüşümü tamamlanmaya yakın ise bir düşüşün aksine bu modelde gerilmede bir artış olmuştur.

Eğer geliştirilen çok kristalli model bir bütün olarak incelenirse, Wang ve Yue'nun [39] çalışmalarında dikkate aldıkları gibi östenit ve martensit fazlarının elastik özellikleri arasındaki fark bu modelde de dikkate alınabilir. Böylelikle kullanılan bu model, aradaki bu farkı göz ardı eden Lim ve McDowell'in [29], Thamburaja ve Anand'ın [30], Boyd ve Lagoudas'ın [61,62], Hall ve Govindjee'nin [63], ve Levitas vd'nin [64] modellerine göre daha doğru sonuçlar vereceği düşünülmektedir.

Ayrıca dönüşüm gerinimi üç boyutlu olduğundan Idesman vd'nin [25] 2 boyutlu olarak yaptıkları çalışmalarda üçüncü boyuttan kaynaklanan farklılıklar incelenememiştir. Bundan dolayı bu modelin 3 boyutlu olması malzeme davranışını daha doğru modellemek için avantaj sağlamaktadır.

6. SONUÇLAR VE YORUMLAR

Bu tez çalışmasında ABAQUS SE programı ve UMAT altyordamı kullanılarak tek ve çok kristalli ŞHA'nın malzeme davranışı hakkında sonuçlar elde edilmiştir.

Tek kristalli CuAlNi malzemesi üzerinde yapılan çalışmalarda, malzemenin saf olması durumunda SE yöntemi ile çözüme gerek kalmadan malzeme davranışı tespit edilmiştir ve deneylerle iyi uyum sağlandığı görülmüştür. Daha doğru bir uyum için k parametresinin deneylerle tespit edilmesi gereklidir.

Tek kristalli ŞHA'ya uygulanan x eksenine yönündeki çekme yükü sonucunda oluşan gerilme-gerinim grafiğinde faz dönüşümü boyunca gerinim yumuşaması olduğu, gerilme azalırken doğrusal ve doğrusal olmayan iki aşama olduğu görülmektedir. Farklı kristal oryantasyonlarına sahip tek kristalli malzemeler içinde faz dönüşümünün ilk olarak, z eksenine etrafında en az döndürülmüş kristal oryantasyonuna sahip kristalde başladığı, fakat bu kristalde faz dönüşümünün en geç tamamlandığı sonucu çıkarılmıştır. Farklı kristal oryantasyonlarına sahip malzemeler için elde edilen sonuçların, SE yöntemi kullanılmadan yapılan çözümlerle bulunan sonuçlar ile aynı olduğu görülmüştür. Bunun sebebi, çözümü yapılan saf tek kristal malzemelerde faz dönüşümünün lokalleşebileceğine neden olan kusurların (martensitik çekirdeklerin) olmamasıdır.

İçerisinde çekirdek etkisi yaratacak farklı kristal oryantasyonuna sahip iki elemanın bulunduğu analizin yapılmasının nedeni, makroskopik seviyedeki tek kristalli bir ŞHA'da bulunan martensitik çekirdeğin genel malzeme davranışını nasıl etkilediğini incelemektir. Bu çalışmanın sonucunda malzeme davranışının tamamen değiştiği gözlemlenmiştir. Çekirdek etkisi yaratan kristallerden dolayı, faz dönüşümü başlangıcında gerilmede ani bir düşüş olmuş ve bu düşüş esnasında faz dönüşümüyle beraber birbirine dik iki bant halinde martensitik yapılar oluşmuştur. Faz dönüşümünün ilerlemesiyle birlikte bu bantlardan bir tanesi kaybolmuş ve malzeme denge haline gelerek gerilme yaklaşık olarak sabit kalmıştır. Daha sonra gerinim arttıkça bu bant büyüyerek faz dönüşümü sonucunda bütün malzeme martensit fazına dönüşmüştür. Çok kristalli ŞHA için iki tip model kullanılmış, kullanılan kristal oryantasyonlarının

daha dar bir aralıkta olduğu birinci tip modelde faz dönüşümü başlangıcında gerilmede bir düşüş olmuş, daha sonra gerilme sabit olarak devam etmiş, faz dönüşümü tamamlanmasına yakın gerilmede yine bir düşüş daha gözlemlenmiştir. Aynı çalışmada eleman sayısının analiz üzerindeki etkisi gözlemlenmiş ve kullanılan iki farklı eleman sayısındaki analiz için de yaklaşık olarak aynı sonuçlar elde edilmiştir. Daha geniş bir aralıkta kristal oryantasyonuna sahip ikinci tip modelde ise faz dönüşümü başladıktan sonra gerilme genel olarak sabit olmakta, yalnızca bazı bölgelerde gerilme değerlerinde küçük artışlar meydana gelmektedir. Ayrıca, malzemeye önceden uygulanan termomekanik işlemlerin bir ölçütü olan k atermal sürtünme değerinin etkileri incelenmiş ve bu değerin malzeme üzerinde oldukça karmaşık bir etkisi olduğu ve deneylerde de görülen histerisiz etkisini ortaya çıkardığı gözlemlenmiştir. Geri yükleme ile birlikte yapılan bu çalışmada ŞHA'nın süperelastik özelliği de elde edilmiştir. Yapılan bütün tek kristalli ve çok kristalli çalışmalarda yalnızca faz dönüşümünün yeni başladığı bölgelerde 2. martensitik varyantın oluştuğu, onun dışında oluşan bütün martensitik yapının 1. martensitik varyanttan meydana geldiği gözlemlenmiştir.

Bu tez çalışmasında yapılan çalışmalar literatürdeki diğer çalışmalara karşılaştırılırsa; bu modelin bazı üstünlükleri görülmektedir. Kullanılan model üç boyutlu olduğundan, her bir bileşende dönüşüm gerinimine sahip veya her bileşende çekme veya basma yüklemesine maruz kalan martensitik faz dönüşümü geçiren bütün malzemeler modellenilebilmektedir. Ayrıca farklı kristal simetrilerine ve elastik özelliklere sahip östenit ve martensit fazları, sadece farklı elastik rijitlik tensörleri tanımlanarak bu model sayesinde incelenebilir. Sıcaklığın ve deneylerle ölçülebilen atermal sürtünme değerinin de kolaylıkla gerçek deneysel koşullara uyarlanabilmesi bu modelin avantajları arasındadır.

Bu tez çalışması sonucunda kullanılan modelin genel olarak martensitik faz dönüşümünü makroskopik seviyede oldukça iyi bir şekilde ifade ettiği görülmüş, atermal sürtünme hesaba katılmış, bütün malzeme parametreleri (n , c) tespit edilebilmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] Porter, D.A., Easterling, K.E., Phase Transformations in Metals and Alloys, *Chapman & Hall*, 2-6 Boundary Row, London, 1992.
- [2] Cho, J-Y., 2009, Finite Element of Martensitic Phase Transformations, *Doktora Tezi, Texas Tech University*, Mechanical Engineering Department, U.S.A.
- [3] Krauss, G., Steels Processing, Structure and Performance, *ASM International*, Materials Park, Ohio, 2005.
- [4] Osmond, F., Methode generale pour l'analyse micrographique des aciers au carbone, *Bulletin de la societe d'Encouragement pour l'Industrie National*, 10, p 480, 1895.
- [5] Hosford, W.F., Mechanical Behavior of Materials, *Cambridge University Press*, 40 West 20th Street, New York, 2005.
- [6] Weissavach, W., Malzeme Bilgisi ve Muayenesi, *Birsen Yayınevi*, İstanbul, 1993. (Çeviren:Anık, S., Anık, E.S., Vural, M.)
- [7] Gunkelmann, N., Ledbetter, H., Urbassek, H.M., Experimental and atomistic study of the elastic properties of α' Fe – C martensite, *Acta Materialia*, 60, 4901–4907, 2012.
- [8] Hosford, W.F., Materials for Engineers, *Cambridge University Press*, Avenue of the Americas, New York, 2008.
- [9] Bhadeshia, H.K.D.H., Honeycombe, R.W.K., Steels Microstructure and Properties, *Butterworth-Heinemann*, Jordan Hill, Oxford, 2006.
- [10] Bhattacharya, K., Theory of Martensitic microstructure and the Shape-Memory Effect, Draft Monograph, Caltech, Pasadena, 2003. (URL: <http://mechmat.caltech.edu/Publications/index.html>)
- [11] Levitas, V.I. Thermomechanical Theory of Martensitic Phase Transformations Inelastic Materials, *Int J. Solids Structures*, 35 (9-10), 889-940, 1998.
- [12] Levitas, V.I., Ozsoy, I.B., Micromechanical Modeling of Stress-induced Phase Transformations, Part 1 : Thermodynamics and Kinetics of Coupled Interface Propagation and Reorientation, *Int. J. Plasticity*, 25 (2), 239-280, 2009.
- [13] Arghavani, J., Auricchio, F., Naghdabadi, R. Reali, A., An Improved, Fully Wymmetric, Finite-Strain Phenomenological Constitutive Model for Shape Memory Alloys, *Finite Elements in Analysis and Design*, 47, 166-174, 2011.
- [14] Sittner, P., Novak, V., Anisotropy of Martensitic Transformations in Modeling of Shape Memory Alloy Polycrystals, *Int. Journal of Plasticity*, 16, 1243-1268, 2000.
- [15] Wang, X.M., Yue, Z.F., FEM prediction of the pseudoelastic behavior of NiTi SMA at different temperatures with one temperature testing results, *Computational Materials Science*, 39, 697-704, 2007.

- [16] Roh, J.H., Bae, J.S., Thermomechanical Behaviors of Ni–Ti Shape Memory Alloy Ribbons and Their Numerical Modeling. *Mechanics of Materials*, 42, 757-773, 2010.
- [17] Musolff, A., Sahota, H. Phase Transitions in the Shape Memory Alloy CuAlNi, *Continuum Mechanics and Thermodynamics*, 16, 539-549, 2004.
- [18] Daly, S., Ravichandran, G., Bhattacharya, K., Stress-induced martensitic phase transformation in thin sheets of Nitinol, *Acta Materialia*, 55, 3593–3600, 2007.
- [19] Hoppe, U., Ruhr-Universität Bochum, Fakultät für Bauingenieurwesen, Master of Science Programme, Computational Engineering, Lecture Notes Computational Plasticity, Version 4, 2010.
- [20] Arghavani, J., 2010, Thermo-Mechanical Behavior of Shape Memory Alloys under Multiaxial Loadings, *Doktora Tezi, Sharif University of Technology*, Mechanical Engineering Department, Iran.
- [21] Toptaş E., Akkuş N., *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, (4), 15-22 2007.
- [22] Lagoudas, D.C., *Shape Memory Alloys: Modeling and Engineering Applications*, Springer, 2008.
- [23] Roh, J.H., Han, J.H., Lee, I., Nonlinear Finite Element Simulation of Shape Adaptive Structures with SMA Strip Actuator, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 17 (11), 1007-1022, 2006.
- [24] Artemev, A., Jin, Y., Khachaturyan, A., Three-dimensional Phase field Model of Proper Martensitic Transformation, *Acta Mater*, 49 (7), 1165–1177, 2001.
- [25] Idesman, V., Levitas, V.I., Preston, D.L., Cho, J.-Y., Finite Element Simulations of Martensitic Phase Transitions and Microstructures based on a Strain Softening Model, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* 53, 495-523, 2005.
- [26] Chen, L., Shen, J., Applications of Semi-implicit Fourier-spectral Method to Phase Field Equations, *Comput. Phys, Commun.* 108 (2–3), 147–158, 1998.
- [27] Rasmussen, K., Lookman, T., Saxena, A., Bishop, A.R., Albers, R.C., Shenoy, S.R., Three- dimensional Elastic Compatibility and Varieties of Twins in Martensites, *Phys. Rev. Lett.*, 87, 055704, 2001.
- [28] Boyd, J.G., Lagoudas, D.C., Thermodynamical Constitutive Model for Shape Memory Materials: Part I. The Monolithic Shape Memory Alloy, *Int. J. Plasticity*, 12 (6), 805–842, 1996.
- [29] Lim, T., McDowell, D.L., Cyclic Thermomechanical Behavior of a Polycrystalline Pseudoelastic Shape Memory Alloy., *J. Mech. Phys. Solids*, 50 (3), 651–676, 2002.
- [30] Thamburaja, P., Anand, L., Polycrystalline Shape-Memory Materials: Effect of Crystallographic Texture. *J. Mech. Phys., Solids* 49 (4), 2001.
- [31] Roytburd, A. L., Slutsker, J., Deformation of adaptive materials. Part III: Deformation of crystals with polytwin product phases, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 49, 1795–1822, 2001.

- [32] McDougall, P., Wayman, C., The Crystallography and Morphology of Ferrous Martensites. In: Olson, G.B., Owen, W.S. (Eds.), Martensite. CBLs, p. 59, 2003.
- [33] Lim, T.J., McDowell, D.L., Mechanical Behavior of a Ni–Ti Shape Memory Alloy under Axial-torsional Proportional and Nonproportional Loading, J. Eng. Mater. Technol. Transact. ASME, 121 (1), 9–18, 1999.
- [34] Stein, E., Zwickert, O., Theory and Finite Element Computations of a Unified Cyclic Phase Transformation Model for Monocrystalline Materials at Small Strains, Computational Mechanics, 40, 429-445, 2006.
- [35] Govindjee S, Miehe C, A multi-variant Martensitic Phase Transformation Model: Formulation and Numerical Implementation, Comput. Methods Ap. Mech. Eng. 191, 215–238, 2001.
- [36] Gall, K., Lim, T.J., McDowell, D.L., Sehitoglu, H., Chumlyakov, Y.I., The role of intergranular constraint on the stress-induced martensitic transformation in textured polycrystalline NiTi, 16, 1189-1214, 2000.
- [37] Patoor, E., El Armani, M., Eberhardt, A., Berveiller, M., Determination of the Origin for the Symmetry observed between Tensile and Compressive Tests on Shape Memory Alloys, J. De. Phys., 5, 495-500, 1995.
- [38] Gall, K., Sehitoglu, H., The role of Texture in Tension-Compression asymmetry in Polycrystalline NiTi, Int. J. Plasticity, 15, 69-92, 1999.
- [39] Wang, X.M., Yue, Z.F., Three-dimensional thermomechanical modeling of pseudoelasticity in shape memory alloys with different elastic properties between austenite and martensite, Materials Science and Engineering: A, 425, 83–93, 2006.
- [40] Thamburaja, P., Anand, L., Superelastic behavior in tension – torsion of an initially-textured Ti – Ni shape-memory alloy, 18, 1607–1617, 2002.
- [41] Fang, D.N., Lu, W.E.I., Hwang, K.C.H., Pseudoelastic Behavior of a CuAlNi Single Crystal under Uniaxial Loading. Metallurgical and Materials Transactions A, 30, 1933-1943, 1999.
- [42] Zhang, X.Y., Xu, T.T., Sun, Q.P., Tong, P., On the Full-Field Deformation Single Crystal CuAlNi Shape Memory Alloys-Stress Induced Martensitic Transformation, Journal De Physique Iv, 7, 2-7, 1997.
- [43] Delaey, L., Diffusionless Transformations, in Phase Transformations in Materials, Wiley-VCH, Weinheim, Germany, pp.339-404, 2001.
- [44] Ichinose, S., Funatsu, Y., Otsuka, K., Type II deformation twinning in γ_1 martensite in a Cu-Al-Ni alloy, Acta Metall, 33, 1613-1620, 1985.
- [45] Binder, K., Theory of first-order phase transitions, Rep. Prog. Phys., 50, 783-859, 1987.
- [46] Saburi, T., Nenno, S., Nishimoto, Y., Zeniya, M., Effects of thermomechanical treatment on the shape memory effect and the pseudoelasticity of ti-50.2ni and ti-47.5ni-2.5fe alloys, J. Iron Steel Inst. Jpn, 72 (6), 571–578, 1986.

- [47] Levitas, V.I., Özsoy, I.B., Micromechanical Modeling of Stress-induced Phase Transformations, Part 2 : Computational Algorithms and Examples, *Int. J. Plasticity*, 25, (3), 546-583, 2009.
- [48] Shield, T.W., Orientation Dependence of the Pseudoelastic Behavior of Single Crystals of Cu–Al–Ni in Tension, *J. Mech. Phys. Solids*, 43, 869–895, 1995.
- [49] Özsoy, İ.B., 2007, Micromechanics of Stress-Induced Martensitic Phase Transformations, *Doktora Tezi, Texas Tech University, Mechanical Engineering Department, U.S.A.*
- [50] Ziegler, H., An Introduction to Thermomechanics, *North-Holland, Amsterdam*, 1977.
- [51] Ghosh, G., Olson, G.B., Kinetics of F.C.C.-B.C.C. heterogeneous martensitic nucleation. I. The critical driving force for athermal nucleation activation, *Acta Metall. Mater.*, 42 (10), 3361–3370, 1994.
- [52] Levitas, V.I., Lee, D.-W., Preston, D.L., Interface propagation and microstructure evolution in phase field models of stress-induced martensitic phase transformations, *International Journal of Plasticity*, 26, 395–422, 2010.
- [53] Babacan, N., Günel, İ., Özsoy, İ., “Martensitic Phase Transformations in CuAlNi Shape Memory Alloys”, 14th International Conference on Advances in Materials & Processing Technologies, İstanbul, Türkiye, Temmuz 2011.
- [54] Günel, İ., Babacan, N., Özsoy, İ.B., CuAlNi Şekil Hafızalı Alaşımında Martensitik Faz Dönüşümü, 6th International Advanced Technologies Symposium, Elazığ, Türkiye, Mayıs 2011.
- [55] Babacan, N., Günel, İ., Özsoy, İ., Martensitic Phase Transformations in CuAlNi Shape Memory Alloys, *Advanced Materials Research*, 445 1076-1081, 2012.
- [56] Stupkiewicz, S., Petryk, H. Modelling of Laminated Microstructures in Stress-induced Martensitic Transformations. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 50, 2303–2331, 2002.
- [57] Suezawa, M., Sumino, K., Lattice distortion and the effective shear modulus along a coherent twin boundary, *Physica Status Solidi (a)*, 36, 263-268, 1976.
- [58] Yasunaga, M, Funatsu, Y., Kojima, S., Otsuka, K., Suzuki, T., Measurement of elastic constants, *Scr. Metall.*, 17, 1091–1094, 1983.
- [59] Chapra, S.C., Canale, R.P., Numerical Methods for Engineers, *McGraw-Hill Higher Education*, Avenue of the Americas, New York, 2010.
- [60] ABAQUS, 2011. User’s Manual, v.6.11.
- [61] Boyd, J.G., Lagoudas, D.C., Thermodynamical constitutive model for shape memory materials. Part I. The monolithic shape memory alloy, *Int. J. Plasticity*, 12 (6), 805–842, 1996.
- [62] Boyd, J.G., Lagoudas, D.C., Thermodynamical constitutive model for shape memory materials. Part II. The SMA composite material, *Int. J. Plasticity*, 12 (7), 843–873, 1996.

- [63] Hall, G.J., Govindjee, S., Application of a partially relaxed shape memory free energy function to estimate the phase diagram and predict global microstructure evolution, *J. Mech. Phys. of Solids*, 50 (3), 501–530, 2002.
- [64] Levitas, V., Idesman, A., Stein, E., Shape memory alloys: micromechanical modeling and numerical analysis of structures, *Int. J. Intelligent Mater. Systems Struct.*, 10 (12), 983–996, 1999.
- [65] Krishnan, R.V., Brown, L., Pseudoelasticity and strain-memory effect in an ag-45 at. pct. cd alloys, *Metall. Trans.*, 4 (2), 423–429, 1973.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : BABACAN, Nazım
Uyruğu : T.C.
Doğum tarihi ve yeri : 27.07.1988, Bursa
Medeni hali : Bekar
Telefon : 0 (505) 814 91 13
e-mail : nazimbabacan@gazi.edu.tr

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Yüksek Lisans	TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü	2013 (bekleniyor)
Lisans	TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü	2010
Lise	Sivas Fen Lisesi	2005

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2012–	Gazi Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü	Araştırma Görevlisi
2010–2012	TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü	Araştırma Görevlisi
2010	Temsa Ar & Ge	Stajyer
2009	Mikropor A.Ş.	Stajyer
2008	ESTAŞ	Stajyer

Yabancı Dil

İngilizce (ileri düzeyde), Almanca (temel düzeyde)

Uluslararası Yayınlar:

1. **Babacan, N.**, Günel, İ., Özsoy, İ., “Martensitic Phase Transformations in CuAlNi Shape Memory Alloys”, Advanced Materials Research Vol. 445 pp 1076-1081, 2012

Uluslararası Kongre Bildirileri:

1. Günel, İ., **Babacan, N.**, Özsoy, İ., “CuAlNi Şekil Hafızalı Alaşımında Martensitik Faz Dönüşümleri”, 6th International Advanced Technologies Symposium, Elazığ, Türkiye, Mayıs 2011. (Türkçe)

2. **Babacan, N.**, Günel, İ., Özsoy, İ., “Martensitic Phase Transformations in CuAlNi Shape Memory Alloys”, 14th International Conference on Advances in Materials & Processing Technologies, İstanbul, Türkiye, Temmuz 2011.

Ulusal Kongre Bildirileri:

1. Güler, M.A., **Babacan, N.**, Yolum, U., Demiryürek, Y., “Simulation of Landmine Explosion using Conwep Method”, 5. Savunma Teknolojileri Kongresi, Ankara, Türkiye, Haziran 2010.