



**Makale
(Article)**

ekil Hafızalı Metallerin Mekanik Yapısındaki Faz Değişimlerinin Sonlu Elemanlar Yöntemi ile İncelenmesi

Ersin TOPTA^{*}, Nihat AKKU^{*}

^{*}Marmara Üniversitesi Tek. E. t. Fak. Mekatronik E. t. Böl., 34722 İstanbul/TÜRK YE
etoptas@marmara.edu.tr

Geliş Tarihi: 21.03.2012

Kabul Tarihi: 20.09.2012

Özet

Bu çalışmada, ekil Hafızalı Metallerin (HM) uygulanan gerilmeye bağlı olarak yapısında meydana gelen faz değişimleri ve birim ekil değişimlerini sonlu elemanlar yöntemi ile incelenmiştir. Bu malzemelerin ekil değişiminden faydalanılarak Güç/Ağırlık kriterinin günümüz aktüatörlerinden daha iyi sonuçlar vermesi endüstrinin ilgisini çekmiştir. HM'ler sahip olduğu üstün özelliklerden dolayı karmaşık bir yapıya sahip olduğundan kontrol edilmesi zordur. Bu tür malzemelerin aktüatör olarak kullanılabilmesi, bu malzemenin mekanik yapısındaki faz değişimlerinin kontrollüne bağlıdır. Faz dönüşümlerinin kontrol edilebilmesi için faz değişimlerinin iyi bilinmesi ve gözlemlenmesi gerekir. Bu sebeple çalışmamızda malzeme yapısındaki faz değişimleri Msc.Marc/Mentat Sonlu Elemanlar Analiz programı ile araştırılarak gerilme-faz değişimleri ortaya konmuştur.

Anahtar Kelimeler: ekil Hafızalı Metal, Aktüatör, Sonlu Elemanlar Yöntemi, Faz Dönüşümü

Investigation Of Phase Transformations On Mechanical Behavior Of Shape Memory Alloys With Finite Element Method

Abstract

In this study, Shape Memory Metals phase changes occurring in the structure depending on the applied stress, and it changes depending on the strain investigated by finite element method. Deformation exchange utilizing the power/weight criteria to give better results than today's actuators have attracted the attention of the industry. SMAs have a complex structure because of superior features are difficult to control. This type of phase changes in the structure of the materials to be used as the actuator must be controlled. To control the phase variation of phase transformation should be observed. For this reason, the phase changes in the structure of study material Msc.Marc/Mentat Finite Element Analysis program to investigate the changes in stress-to-phase have been revealed.

Keywords : Shape Memory Metal, Actuator, Finite Element Method, Phase Transformation

Bu makaleye atıf yapmak için

Topta E., Akku N., " ekil Hafızalı Metallerin Mekanik Yapısındaki Faz Değişimlerinin Sonlu Elemanlar Yöntemi ile İncelenmesi" Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi 2013, (10) 25-33

How to cite this article

Topta E., Akku N., "Investigation Of Phase Transformations On Mechanical Behavior Of Shape Memory Alloys With Finite Element Method" Electronic Journal of Machine Technologies, 2013, (10) 25-33

1. G R

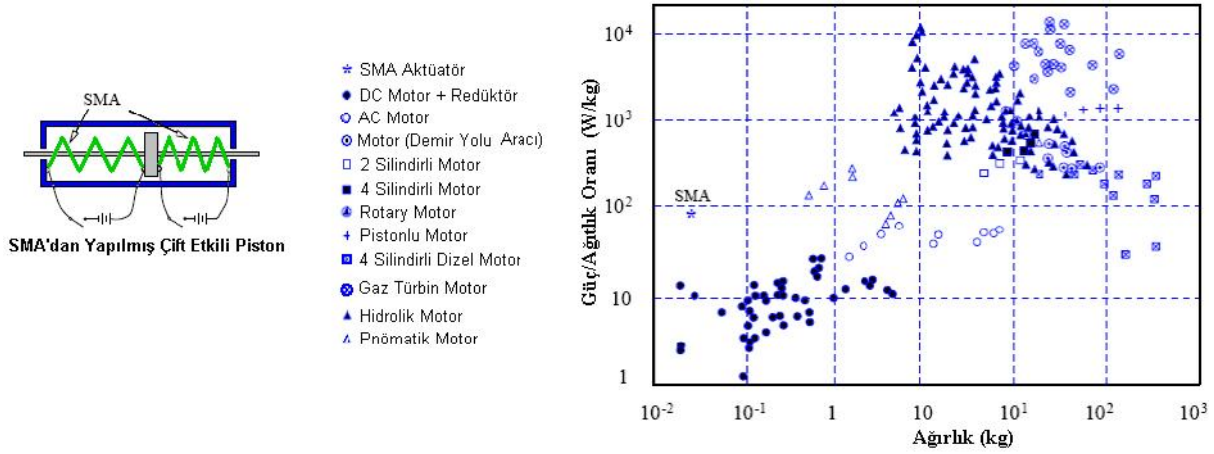
ekil Hafızalı Metaller (HM) günümüzde daha sık duymaya ba lamakla beraber, bu malzemenin kullanım alanlarının gün geçtikçe artmasıyla, bu konu üzerinde daha çok çalı ılmaya ve ara tırılmaya ba landı. Bu malzemeler genel olarak, dı etkenlerden dolayı geometrisinin bozuldu u durumlarda uygun bir ısı prosedürü uygulanarak, gerçek ekline veya boyutuna geri dönebilme yetene ine sahip malzemelerdir. Bu malzemeler, sahip oldukları üstün özellikler sayesinde uzay ara tırmalarında, otomotiv endüstrisinde, mikroelektromekanik ve biyomedikal uygulamalarda geni bir kullanım alanı bulmu tur. Bu ala ımlar korozyona kar ı son derece dayanıklı olup mükemmel bir biyoyumluluk gösterir.



ekil 1. Ortodontik düzeltme i levli kavisli tellerin di lerde kullanılarak alınan sonuçlar [1]

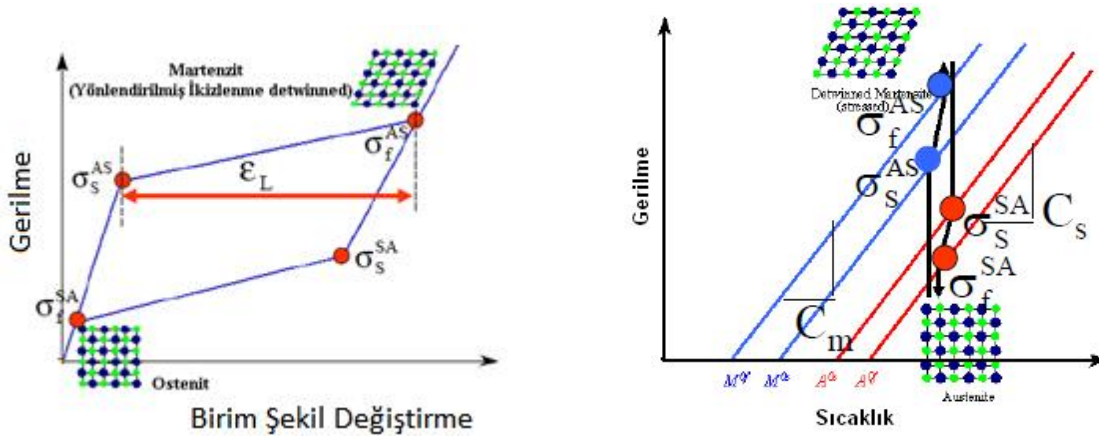
Endüstri ve bilim insanlarının dikkatini çeken HM'ler di er ala ımlarda olmayan üstün özelliklerinin bilinmesiyle gelece in malzemesi olarak öngörülmektedir. Malzemenin yapısındaki ekil hafıza etkisi, süperelastisite, histeriz ve faz de i imleri gibi özelliklerden dolayı bilim insanları ilk olarak bu karma ık yapının anla ılması üzerine çalı maya ba ladı [2, 3, 4]. Bu çalı maların neticesinde malzeme yapısında meydana gelen de i imler matematiksel olarak ifade edilmesiyle, birçok malzeme modeli ortaya konuldu. Olu turulan bu modeller malzemeyi daha çok malzemenin termomekanik yapısını tanımlamaktadır [5, 6]. Bu karma ık termomekanik yapıdan dolayı sonlu elemanlar modelleri geli tirilerek bilgisayar ortamında incelenmesine ba lı olarak uygulama alanları geni letildi [1, 7]. Uygulamalarda HM'ler sistemde daha çok bir eyleme geçirici (aktüatör) olarak tasarlanarak ürünün kontrol edilebilirli i üzerine olmu tur. Mohammad ve arkadaş larının yaptı ı çalı mada HM özellikli bir teli elektrik akımı ile kontrol edilmesi suretiyle tek eksenli bir robot kol tasarımı ortaya çıkarmı tır [8]. Fakat malzemenin kontrolünün zor ve karma ık olmasından dolayı bu tür aktüatör uygulamalarının kontrolü bulanık mantık ve buna benzer algoritmalarla sa lanması günümüz çalı malarında yer almaktadır.

Bu malzemeler boyutunun ve a ırlı ının kar ısında üretti i kuvvet de erinin büyük olmasından dolayı sistemlerde aktüatör amaçlı kullanılmaktadır. Aktüatörlerin tasarımları yapılırken önemli kıstaslarından biri ürünün sistem içerisinde kaplamı oldu u hacmi ve sisteme ek olarak getirmi oldu u a ırlık önemli bir sorun olarak kar ımıza çıkmaktadır. Bu önem uçaklar ve uzay araçları söz konusu oldu unda daha da önem kazanmaktadır. Bu sistemlerde amaç, kullanılan aktüatörlerin asgari a ırlıkta ve hacimde elde edilmesiyle görevini yapabilmesidir. Günümüzde üretilen aktüatörler kendi aralarında derecelendirilirken Güç/A ırlık performans kriterine göre de erlendirilmektedir (ekil 2) [9, 10].



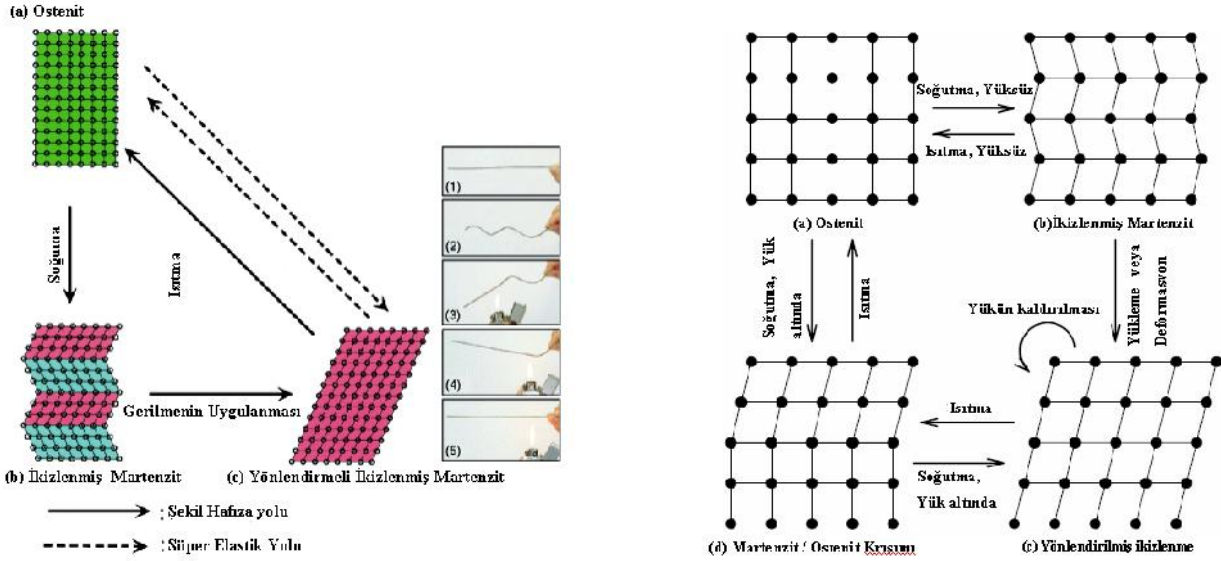
ekil 2. Çe itli aktüatörlerin güç/a ırlık performansları [9]

HM'ler sistemlerde eyleme geçirici olarak tasarlanabilmesi için yapısının iyi bilinmesi gereklidir. Bu malzeme yapısındaki kendine has özelli i sebebiyle çekme ve basma deneyine maruz kaldı ında normal malzemelere göre farklılık göstermektedir. Yapısındaki faz de i imleri sonucunda süperelastik ve ekil hafıza etkisi özellikleri ortaya çıkarmaktadır. HM'ler ekil 3'de genel olarak tanımladı ımızda, ekil de i iminde faz dönü üm-gerilme de erleri farklılık göstermektedir. Bunu olu turan sebep malzem yapısında meydana gelen martenzit-ostenit faz dönü ümlerinin olmasından ötürüdür (ekil 3) [10, 11].



ekil 3. HM'nin thermomekanik yapısı [12]

Bu tür malzemelerde martenzit ile ostenit dönü ümlerinin tekrarlanması sırasında geni bir histeriz çevrim ortaya çıkmaktadır (ekil 3). Martenzit yapılı ekil hafızalı ala ımlar ısıtıldı ı zaman metalin kristal yapısı belirli bir sıcaklıktan itibaren ostenite dönü üür. Bu dönü ümün oldu u sıcaklı a ostenit ba langıç sıcaklı ı (A_S) ve dönü ümün bitti i sıcaklı a da ostenit biti sıcaklı ı (A_F) olarak isimlendirilmektedir. Ostenit yapılı HM so utuldu u takdirde malzemenin kristal yapısı martenzit yapı haline dönü ecektir. Bu dönü ümün oldu u sıcaklı a martenzit ba langıç sıcaklı ı (M_S) ve dönü ümün bitti i sıcaklı a da martenzit biti sıcaklı ı (M_F) olarak isimlendirilmektedir [13]. Bu sıcaklıkların olu umu esasında $A_S - A_F$ ve $M_S - M_F$ sıcaklıkları arasında ekil hafızalı metaller, martenzit ve osteniti ihtiva eden karı ık bir düzene sahiptir. NiTi için bu dönü üm sıcaklıklarına örnek verecek olursak $M_F = 25^\circ\text{C}$, $M_S = 50^\circ\text{C}$, $A_S = 58^\circ\text{C}$, $A_F = 78^\circ\text{C}$ 'dir [14].



ekil 4. SHM'lerin hal de i imleri [15, 14]

ekil Hafızalı Ala ımlar endüstride ticari de ere sahip iki tür ala ım bulunmaktadır. Bunlar ekil hafızalı NiTi (Nikel-Titanyum) ala ımları ve bakır esaslı ala ımlar olmaktadır. Bu ala ımlar sahip oldukları özellikleri bakımından birbirinden oldukça farklıdır. Bakır esaslı ala ımlarda % 4–5 olan birim ekilde de i tirme oranı, NiTi ala ımlarda yakla ık %8'dir. Daha fazla ısıl kararlılı a sahip olan NiTi ala ımlar bakır esaslı ala ımlarla kar ıla tırıldı ında mükemmel bir korozyon direncine ve çok daha yüksek süneklili e sahiptir. Di er taraftan bakır esaslı ala ımlar daha ucuzdur, eritilmeleri ve açık havada ekstrüde edilmeleri daha kolaydır, daha geni potansiyel dönü üm sıcaklık aralı ına sahiptirler [9, 3, 15].

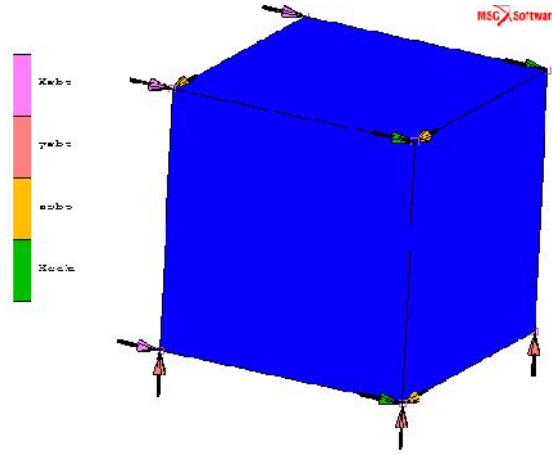
2. SONLU ELEMENLAR YÖNTEM İLE S MÜLASYON

ekil Hafızalı Metaller genel olarak incelendi inde normal metal ve ala ımlardan farklı niteliklere sahip olan ekil hafıza etkisi, süperelastisite histeriz ve faz de i imleri gibi özelliklerin ortaya koymaktadır. Bu özelliklerin bir metal içerisinde birlesmesinden ötürü kendisini karma ık yapıya sürükledi inden, davranı larının incelenmesinde zorluklar ortaya koymaktadır. Bu karma ık yapının termomekanik olarak matematiksel modellemelerin geli tirilmesiyle beraber HM'lerin sonlu eleman yöntemleri ile incelenmesi, malzemenin davranı ının öngörülmesi sistemin güvenilirli i açısından önemlidir. Bu çalı mada HM'in ekil de i imleri altında malzeme yapısında olu an gerilme- ekil de i imi ve faz de i imlerinin MSC.Marc Mentat analiz programı ile ara tırılmı tır.

Malzememizi MSC.Marc Mentat sonlu elemanlar programının 7 numaralı element teknolojisi kullanılarak, ebatları her yönden 1mm olan dört nodlu tek bir element üzerinde çalı ıldı. Element tek bir yönden sabitlenip di er yönden çekilecek ekilde sınırlandırılarak Tablo 1'de verilen malzeme özellikleri ile malzeme modeli olu turuldu.

Tablo 1. Nitinol telin malzeme özellikleri [11]

Özellik	De er	
Erime sıcaklığı (°C)	1300	
Yo unluk (g/cm ³)	6,45	
Elektrik direnci (micro-ohm*cm)	Ostenit	82
	Martenzit	76
Isıl genleşme (°C)	Ostenit	11*10 ⁻⁶
	Martenzit	6,6*10 ⁻⁶
Isıl iletkenlik (W/cm*°C)	Ostenit	0,18
	Martenzit	0,85
Isı kapasitesi (cal/g*°C)	0,077	
Elastik modülü (GPa)	Ostenit	83
	Martenzit	30
Dönüşüm sırasındaki gizli ısı (kJ/kg*atom)	167	
ekil hafıza gerinimi (%)	Maksimum 8%	
C _m (MPa/°C)	6	
C _a (MPa/°C)	8	
M _s (°C)	38	
M _f (°C)	28	
A _s (°C)	67	
A _f (°C)	75	

**ekil 5.** 1x1x1mm'lik sonlu elemanlar modeli

Modelimizin termomekanik olarak incelenece inden çekme esnasında birim ekilde de i imi hesaplanırken, Denklem I de verildi i gibi elastik (ΔV^{EL}), genleşme (ΔV^{TH}), plastik (ΔV^{PL}) ve faz dönüşüm (ΔV^{PH}) birim ekil de i imlerin toplam etkisi hesaba katılacaktır. Ayrıca Faz dönüşüm birim ekilde de i imi hesaplanırken malzeme yapısında meydana gelen ve Denklem II de görüldü ü üzere ikizlenme (ΔV^{TWIN}) ve sürünme (ΔV^{TRIP}) birim ekil de i imleri ayrıca hesaplanabilmektedir.

$$\Delta V = \Delta V^{EL} + \Delta V^{TH} + \Delta V^{PL} + \Delta V^{PH} \quad \text{I}$$

$$\Delta V^{PH} = \Delta V^{TRIP} + \Delta V^{TWIN} \quad \text{II}$$

Simülasyonda, nitinol malzemesinin ostenit bitiş sıcaklığı (A_F) de erinin üstünde bir de er olan 100°C'de analiz edilecektir. Tablo 1 de verilen malzememize ait de erler neticesinde malzememizin analiz sonucunda hangi gerilme de erinde faz dönüşümü yapacağı hesaplanabilmektedir.

$$\sigma_s^{AS^+} = (T_0 - M_s^0)C_m = (100 - (38))6 = 372 \text{ MPa} \quad \text{(III)}$$

$$\sigma_f^{AS^+} = (T_0 - M_f^0)C_m = (100 - (28))6 = 432 \text{ MPa} \quad \text{(IV)}$$

$$\dagger_s^{SA^+} = (T_0 - A_s^0)C_a = (100 - (67))8 = 264 \text{ MPa} \quad (\text{VI})$$

$$\dagger_f^{SA^+} = (T_0 - A_f^0)C_a = (100 - (75))8 = 200 \text{ MPa} \quad (\text{VII})$$

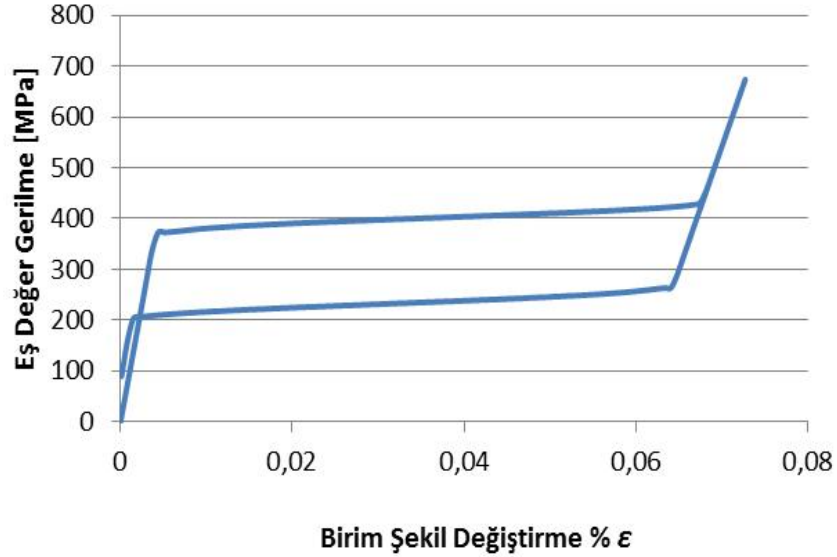
Analizi yapılacak olan Nitinol malzemesi tek yönde %8 uzamaya zorlanıp daha sonra tekrar orijinal ekline geri dönmesi sağlanmasıyla analiz süresi toplam 2 saniye olup, analiz süresi 200 adımda ve 0.01 saniye hassasiyetle hesaplatılarak simülasyon çözüldü.

Tablo 2: Analizde uygulanan yer de i tirmelerin zamana ba ımlı uygulanması

Zaman (s)	Yer de i tirme (mm)
0	0.0
1	0.08
2	0.0

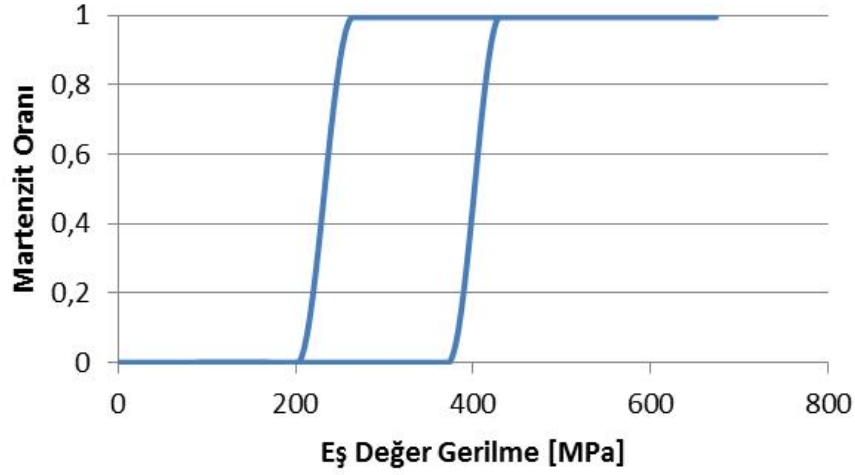
3. S MÜLASYON SONUÇLARI

Tek boyutlu olarak ekil de i imine zorlanan model çözülmü olup nitinol malzemesinin yapısında meydana gelen faz de i imlerinin Denklem III-VII arası hesaplanan gerilme de erleriyle aynı sonuçlar vermektedir (ekil 6). Buda yapılan analizin ilk tespitinde do rulanması açısından önemli bir sonuç te kil etmektedir. Analiz sonucunda ekil 6'da görüldü ü üzere model %8 civarında birim ekil de i imine zorlanıp tekrar orijinal ekline geri döndü ündeki farklılık gözlenmi tir. Bu farklılık birim ekil de i tirme enerjisinde farklılık oldu unu göstermektedir. Bu farklılı ın faz de i imi esnasından kaynaklandı mı söyleyebiliriz.



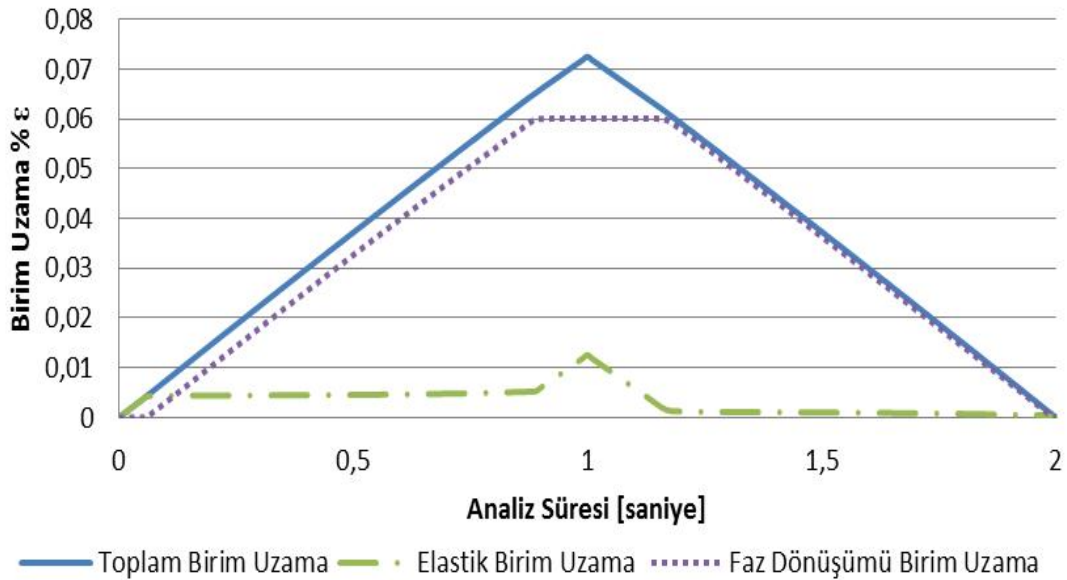
ekil 6. Gerilme-Birim ekil de i tirme analiz sonuçları

Analizde modele uygulanan gerilmenin artırılmasıyla faz dönü ümlerinin kritik de erlerde ba ladı ını ve biti i görülmektedir (ekil 7). Bu kritik de erlerde malzemenin yapısı ostenit–martenzit fazları arasında de i ime u ramaktadır. Bu de i imler neticesinde malzemede ki en büyük birim ekil de i imi faz de i imlerinde ortaya çıkarak %8 civarında uzamasına sebebiyet vermektedir.

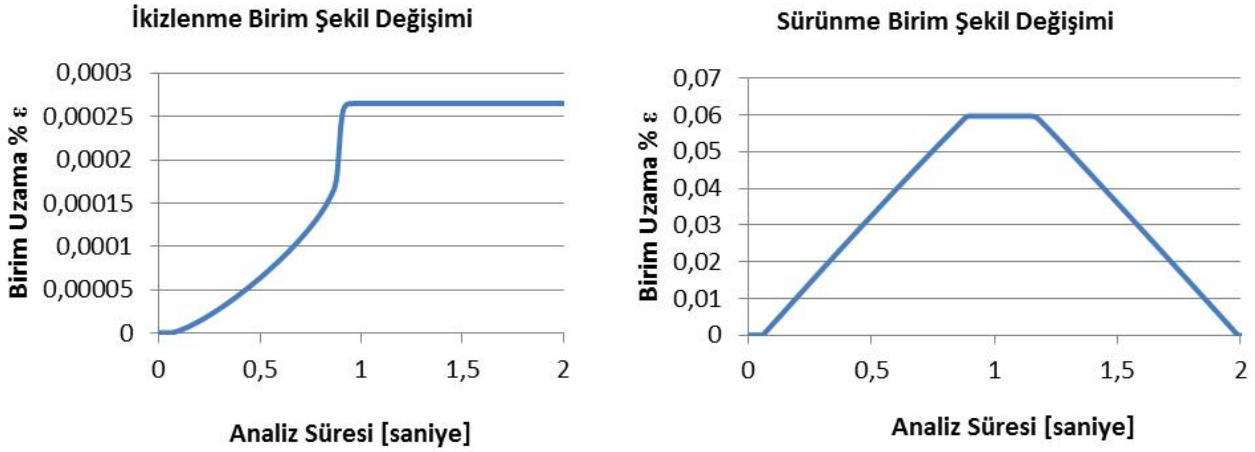


ekil 7. Martenzit Oranı – Gerilme analiz sonuçları

Modelimizde kullandı ımız termomekanik modelin malzeme yapısında meydana gelen birim ekil de i imi Denklem I'de gösterildi i gibi hesaplanarak malzeme yapısında meydana gelen birim ekil de i imleri ekil 8'de gösterildi i ekilde olu tu. Bu analiz sabit sıcaklıkta ve a ırı yükleme yapılmadı ndan dolayı genle me ve plastik deformasyon olmadı ndan buna ait birim ekil de i imleri olu madı. Grafikten de anla ılaca ı gibi birim ekil de i iminde en büyük pay faz dönü ümünde ortaya çıkmı tır. Faz dönü ümünden kaynaklanan birim ekil de i imleri Denklem II'de anlatıldı ı gibi ikizlenme ve sürünme birim ekil de i iminden kaynaklanmaktadır (ekil 9). Bu de i imler içerisinde en büyük payda sürünme birim ekil de i imine ait oldu u görüldü.



ekil 8. Birim ekil De i imleri analiz sonuçları



ekil 9: Faz birim ekil de i imleri analiz sonuçları

4. SONUÇ ve DE ERLEND RME

HM'ler özellikle Güç/A ırlık performans kriteri, korozyona direnci ve biyoyumlulu un yüksek olmasından ötürü büyük avantajları ortaya çıkmakta. Bu avantajlarından dolayı HM'lerin aktüatör olarak kullanılması, endüstri alanında büyük yenilikler ortaya koyacaktır. HM'ler yapılacak bir aktüatörün kontrol edilebilmesi için malzeme yapısındaki faz dönü ümleri kontrol edilmesi gerekir. Faz dönü ümlerinin kontrolünün sa lanabilmesi için malzeme üstündeki sıcaklı ın kontrol edilmesi gereklidir. Bu de i imlerinin sisteme olan etkisinin hesaplanması açısından malzemenin sonlu elemanlar analiz programı ile incelenmesi büyük katkı sa layacaktır. Özellikle HM'lerin aktüatör uygulamalarında malzemenin sıcaklık kontrolü elektrik akımı ile sa lanmaktadır. Bu tür elektrik-termal-mekanik etkinin bir arada oldu u durumlarda HM'ler bu üç etki içindeki davranı ın SEM de gözlemlenmesi aktüatörün tasarımı açısından önemlidir.

5. KAYNAKLAR

1. Auricchio, F., 2002, "Shape Memory Alloys: Applications and Finite-Element Modeling", Meccanica Strutturake, Universita delgi Studi di Pavia, Italy.
2. Otsuka, K.,Kakeshita, T., 2002, "Science and Technology of Shape-Memory Alloys:New Developments", MRS Bulletin, February.
3. Vizyon 2023 Projesi Malzeme Teknolojileri Strateji Grubu, 2004, "Malzeme Teknolojileri Stratejisi", TUB TAK, Ankara.
4. Funakubo, H., 1987, "Shape Memory Alloys",Translated by J.B. Kennedy, Gordon and Breach Science Publishers, New York.
5. Sivakumar, S., Kumar, K., Rao, L., Rao, M., 2005, "A Review of the Constitutive Models for Shape Memory Alloys", International Conference on Smart Materials Structures and Systems, Bangalore, India.
6. Fugazze, D., 2003, "Shape Memory Alloys Devices in Earthquake Engineering: Mechanical Properties, Constitutive Modelling and Numerical Simulations ", Doktora Tezi, Istituto Universitario di Studi Superiori di Pavia.

7. Brinson, L. C., Lammering, R., 1993, "Finite Element Analysis of the Behavior of Shape Memory Alloys and their Applications.", *International Journal of Solids and Structures*, vol. 30:23, pp. 3261-3280.
8. Mohammad, H. E., Ahmadian, M., 2005, "An Enhanced SMA Phenomenological Model: I. The Shortcomings Of The Existing Models", *Smart Material Structures*, vol. 14, pp. 1297-1308.
9. Huang, W., 1998, "Shape Memory Alloys and their Application to Actuators for Deployable Structures", Doktora Tezi, University of Cambridge , Peterhouse.
10. Akdoğan A., Nurveren K., 2003, " Akıllı Hafızalı Ala ımlar", *Mühendis ve Makine Dergisi*, Ankara.
11. Hodgson, D.E., 2002, "Shape Memory Applications", Inc., Wu, M.H., Memory Technologies, and Biermann R.J., Harrison Alloys, Inc.
12. Choudry, S., 2004, "An Efficient Constitutive Model for Shape Memory Alloy Materials", MSC Software Virtual Product Development Conference, Huntington Beach, California.
13. Mihalcz, I., 2001, "Fundamental Characteristics And Design Method For Nickel-Titanium Shape Memory Alloy", *Periodica Polytechnica Ser. Mech. Eng.*, Vol. 45, No 1, pp. 75-86.
14. Gorbet, R., 1996, "A Study of the Stability and Design of Shape Memory Alloy Actuators", Doktora Tezi, University of Waterloo , Canada.
15. Aydınçak, ., 2003, "Akıllı Malzemeler ve Havacılık", *Mühendis Makine Dergisi*, Ankara.