



Experimentally control of a shape memory alloy (SMA) wire in three specific regions of phase change and under varying loads

Eray Teoman Önder^{1*}, Bilsay Sümer², Selahattin Çağlar Başlamışlı²

¹Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering and Architecture, Erzurum Technical University, 25100, Erzurum, Türkiye

²Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Hacettepe University, 06800, Ankara, Türkiye

Highlights:

- Experimental investigation of SMA controllability
- Evaluation of controller performance for different SMA phases
- Robust control

Keywords:

- SMA wire
- SMA actuator
- Actuation control

Article Info:

Research Article

Received: 07.08.2024

Accepted: 16.08.2025

Acknowledgement:

Authors express their thanks to Hacettepe University Scientific Research Projects Coordination Unit for their contribution within projects with FHD-2018-17611 and FHD-2021-19382 project numbers)

DOI:

10.17341/gazimmfd.1529527

Correspondence:

Author: Eray Teoman Önder
e-mail: teoman.onder@erzurum.edu.tr
phone: + 444 5 388 / 2412

Graphical/Tabular Abstract

This study investigates the performance of controllers for an SMA wire exhibiting nonlinear and hysteretic behavior across martensite, austenite, and phase transition regions. To fully characterize the strain hysteresis under heating and cooling, a sinusoidal reference signal was applied while the SMA wire experienced simultaneous load variations. Figure A presents an output of a control performance, demonstrating that the controller remains robust against both phase and load changes under these thermal cycling conditions.

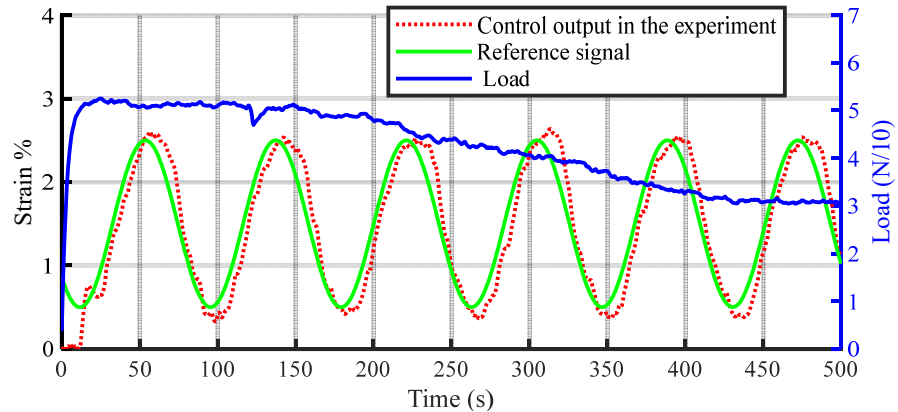


Figure A. Control of strain under varying load and at different phases

Purpose: To experimentally evaluate the performance of a controller for an SMA wire in three critical regions, fully martensite, phase transition, and fully austenite, demonstrating its ability to track a strain reference under varying heating and cooling frequencies and changing load conditions.

Theory and Methods: The characterization of the SMA wire identified based on phase transformation temperatures, material properties, and dimensions. Reference signals corresponding to phase regions were generated and applied through the electronic circuit. Joule heating was used to heat the wire, while the current was controlled via pulse-width modulation. Measurements of current, temperature, and strain were collected to evaluate controller performance.

Results: The performance of the PI controller was evaluated across three critical regions of the hysteresis curve, using step and sinusoidal reference signals. For step references, tracking errors and rise times increased with higher strain references; at low strain levels, norm errors were similar, whereas higher strain references led to larger errors. Notably, significant error increases were observed in the phase transition region and at high frequencies. Examination of control inputs revealed that duty cycle steps varied with frequency and reference amplitude. Under variable load conditions, the controller remained stable and maintained reference tracking.

Conclusion: Experiments with a single PI controller demonstrated generally robust performance, although increased tracking errors were observed in the austenite region at low heating-cooling frequencies and in the phase transition region at high-frequency sinusoidal references. The results suggest that region-specific or gain-scheduled controllers could further improve performance. Reference tracking was also maintained under variable loads, and future improvements may be achieved through precise current control and model-based controller designs.



Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi

Journal of The Faculty of Engineering
and Architecture of Gazi University

Elektronik / Online ISSN : 1304 - 4915
Basılı / Printed ISSN : 1300 - 1884

Bir şekil bellek alaşım (ŞBA) telin faz değişimi bakımından üç özel bölgede ve değişken yük altında deneysel denetimi

Eray Teoman Önder^{1*}, Bilsay Sümer², Selahattin Çağlar Başlamışlı²

¹Ezurum Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 25100, Erzurum, Türkiye

²Hacettepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 06800, Ankara, Türkiye

Ö N E Ç I K A N L A R

- Şekil bellek alaşımının (ŞBA) denetlenebilirliğinin deneysel olarak incelenmesi
- Farklı ŞBA fazları için denetleyici performansının değerlendirilmesi
- Gürbüz denetim

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 07.08.2024

Kabul: 16.08.2025

DOI:

10.17341/gazimmfd.1529527

Anahtar Kelimeler:

ŞBA tel,
ŞBA eyleyici,
gerinim denetimi

ÖZ

Şekil bellek alaşım (ŞBA) teller, hacmine göre yüksek enerji üretim kapasiteleriyle eyleycilerde sıkça kullanılmaktadır. Isıtıldıklarında martenzit fazdan östenit faza geçerken, ürettikleri kuvvetle, verilmiş ön gerinimi geri kazanarak iş yaparlar. Isınmayla soğumada sıcaklık-gerinim yolu aynı değildir; gecikme oluşur. Gecikme yüklemeye değişir; zira, faz geçiş sıcaklıkları değişmektedir. Isınırken soğutma, soğurken ısıtma durumunda, tamamlanmamış faz geçişinde, iç gecikme eğrileri oluşur. Bu termomekanik davranış, gerinimin mesafe talebine göre denetimini ve denetleyici kazançlarını belirlemek için model oluşturmayı zorlaştırmaktadır. Kazançları, deneysel belirlenen pek çok denetleyici literatürde sınırlıdır. Farklı olarak, bu çalışmada, denetleyici başarımı, büyük ölçüde martenzit, faz geçişi ve büyük ölçüde östenit gecikme olmak üzere, kritik üç bölgede değerlendirilmiştir. Tele, enerji Joule ısıtımaya verilmektedir. Akımı, darbe genişlik modülasyonu (DGM) ile veren elektrik devresi kullanılmıştır. PI (oransal-integral) denetleyicinin başarımı yüksek bulunmuştur. Kararlılık bozucu etki gözlemlenmezken, sinüs referans sinyalinin frekansı, 0.075'ten 0.2 rad/s'ye, yükseldiğinde dahi, takibin sürdüğü tespit edilmiştir. Takip hatası analiziyle, en yüksek gerinim talebinde ve faz değiştirme bölgesinde, özellikle yüksek frekanslı gerinim referansında, hatanın yükseldiği gösterilmiştir. Denetleyicinin tüm sonuçlar için gürbüz olduğu bulgulanmıştır. Üç bölgedeki referans takibinin iyileştirmesinin farklı kazançlı denetleyiciler arasında kararlılığı koruyan bir kazanç geçişiyle sağlanabileceğine dair ön bilgi oluşturması açısından da çalışma değerlidir. Denetleyici, değişen yüklem, bozucu olarak eklendiğinde de gürbüzlük sağlamıştır.

Experimentally control of a shape memory alloy (SMA) wire in three specific regions of phase change and under varying loads

H I G H L I G H T S

- Experimental investigation of SMA controllability
- Evaluation of controller performance for different SMA phases
- Robust control

Article Info

Research Article

Received: 07.08.2024

Accepted: 16.08.2025

DOI:

10.17341/gazimmfd.1529527

Keywords:

SMA wire,
SMA actuator,
actuation control

ABSTRACT

Shape memory alloy (SMA) wires are commonly utilized in actuator technologies due to their high energy density relative to their volume. When heated, they transition from the martensitic phase to the austenitic phase, performing work by recovering the applied pre-strain through the force they generate. The temperature-strain path during heating and cooling does not follow the same trajectory, resulting in hysteresis. The hysteresis varies depending on loading conditions, as the phase transition temperatures change. Incomplete phase transitions during heating or cooling can lead to minor hysteresis curves within the major hysteresis curve. This thermomechanical behavior makes the strain control procedure challenging. Developing a model to determine controller gains is complex. Thus, many controllers with experimentally determined gains have been tested in the literature. As a part of novelty, this study assessed controller performance in three critical regions: fully martensitic, phase transition, and fully austenitic hysteresis curves. It was observed that PI (Proportional-Integral) controller exhibited high performance. Generally, no destabilizing effects were observed; even with increasing frequency of the sinusoidal reference signal, tracking remained effective. Tracking error analysis indicated that, particularly with high-frequency strain references at the highest strain demands and phase transition regions, the error increased. The controller proved to be robust across all tested scenarios. This study is valuable as it offers insights suggesting that improving whole reference tracking in these three regions may be achieved through a stable gain scheduling action among controllers having different gains. Additionally, the controller demonstrated robust performance, as well, when subjected to time-varying load as a disturbance.

1. Giriş (Introduction)

Şekil bellek alaşım (ŞBA) telleri hafiftir, az yer kaplarlar ve yüksek enerji yoğunluğuna sahiptirler [1]. Bu nedenlerle, birçok mühendislik uygulamasında, akıllı eyleyiciler olarak kullanılmaktadır: Uçak teknolojilerinde, şekil değiştiren yapılar olarak [2-4], biyomekanik / biyomedikal uygulamalarda [5-7], titreşim sönümlerine veya takviye elemanı olarak, yapısal güvenlik için, inşaat yapılarında da [8-11], robotik ve denetimli robotikte [12], ayrıca yumuşak robotikte [13], minyatür uygulamalarda [14, 15] ve giyilebilir robotlar [16, 17] gibi diğer bazı uygulamalarda kullanılmaktadır. Bazı tasarımlarda alternatif olması da mümkün görülmektedir: elektro-pnömatik, elektro-mekanik ve elektro-hidrolik valf sistemlerinin denetiminde [18] ve değiştirdiği fazlar arasında sertliğin farklı olması ve gerinim denetimi ile yardımcı dış iskelet uygulamalarında kullanılması aranan istekleri karşılayacaktır [19, 20].

Bahsi geçen, eyleyici olarak doğrudan kullanım örnekleri yanında, yine tahrik sağlayacak malzeme olmak üzere ŞBA teller, polimer gibi yumuşak özelliklere sahip ikincil malzemelerle birleştirilebilmekte, özgün eyleyici yapıları tasarlanabilmektedir. Bu tür tasarımlar yumuşak kompozit yapılar olarak adlandırılmaktadır. Yumuşak eyleyiciler, esneklikleri ve kompakt oluşları ile pek çok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır [21, 22]. Yumuşak tahrik konseptiyle, yumuşak robotlar, doğadan esinlenen robotlar [23-26], yapay kaslar [13, 27, 28], şekil değiştiren yapılar [29], mikro robotlar [30], yumuşak giyilebilir tasarımlar [16, 31, 32], yumuşak kavrayıcılar [13, 33-35], origamik yapı tasarımları [35-37], menteşeler [38] ve bir dizi bağımsız hareket edebilen segmentten oluşan, yüksek manevra kabiliyeti sağlayan sürekli robotlar [39] gibi birçok farklı uygulamada karşılaşılabilmektedir.

İstenen kontrolör performans parametreleri olan sönümlerine süresi, yükselme süresi vb. gibi parametrelere göre model tabanlı denetleyici tasarımı veya kazanç değerlerini ayarlama yöntemleri ŞBA tabanlı eyleyiciler için zor olabilmektedir. Zira, bu eyleyiciler doğrusal olmayan yanıtlar verir ve ısınma-soğumanın farklı gerinim sergilemesi nedeniyle, gecikme gösterir. Temel olarak, ŞBA telleri veya ŞBA tabanlı eyleyiciler gerilim geri bildirimi kullanılarak denetlenmektedir [40-44]. Ayrıca, sıcaklık geri bildirimi de kullanılabilmektedir [42, 45]. Ancak, ŞBA tellerinde düşük yüzey alanından dolayı sıcaklık ölçümü termokupl gibi bir ölçüm cihazıyla zor olabilmektedir. Referans sinyalleri bazen ŞBA tellerin kullanıldığı eyleyici sistemine göre belirlenebilir ve geri bildirim sinyalleri, örneğin yer değiştirme [46] veya açılma konum olabilmektedir [47-50]. Oransal-integral-türevsel (İngilizce, Proportional Integral Derivative baş harflerine göre, çok bilinen kısaltmasıyla PID) tipi denetleyiciler [51-54], sıkça tercih edilmiştir [55, 56]. Yine, birçok denetleyici tasarım yöntemi gürbüzlük sağlamak için uygulanmıştır [45, 47, 48]. Ayrıca, kendinden algılama yöntemi, direnç ile gerilim arasındaki neredeyse doğrusal ilişkiyi kullanarak doğrudan yer değiştirme ölçümü olmaksızın iyi denetim başarımı sağlayabilmektedir [44, 52-54]. Eyleyici tasarımlarında denetim önemi güncelliğini korumaktadır. Akıllı kaslar olarak ŞBA malzemenin kullanıldığı tasarımlar, biyonomik hareketlerin gerçek zamanlı geri besleme sinyalleri ile hassaslaştırılabileceği vurgulanmaktadır [57]. Tahrik eden kas yerine ŞBA telin kullanıldığı, doğrudan darbe genişlik modülasyonu (DGM) sinyali ile hareketlendirilen robotik parmak çalışmasında, geri besleme ile daha başarılı parmak hareketi sağlanabileceği, bu noktada derin öğrenmenin kullanılabileceği ön görülmektedir [58]. Aç/kapa, bang-bang yöntemleri denetim için örnekler verilmektedir [59]. Biyonomik bağlantısında ŞBA tel kullanıldığı yapıda, PI (oransal-integral) denetleyici uygulanmış, açılma pozisyon talebinde denetleyicinin

başarımı gösterilmiştir [60]. ŞBA tel ile sürülen denge düzeneği, dengede tutulması istenen bir topun konum belirsizliği ve ŞBA malzemenin doğrusal çalışmayan doğasına rağmen kaymalı mod denetleyici ile konum denetimi gerçekleştirmektedir [61]. Tahrik için yine ŞBA telin kullanıldığı başka bir çalışmada, yumuşak eyleyicinin sağ/sol çift taraflı pozisyon denetimi PI denetleyici ile yapılmaktadır [62]. Doğrusal olmayan ŞBA tel doğasının modellenme zorluğuna, düşük dereceli sistem modeli ile yaklaşılabilir bir diğer çalışmada, oluşacak belirsizlikler için genişletilmiş durum gözlemcisi kullanılarak referans mesafe takibi sağlanmıştır [63].

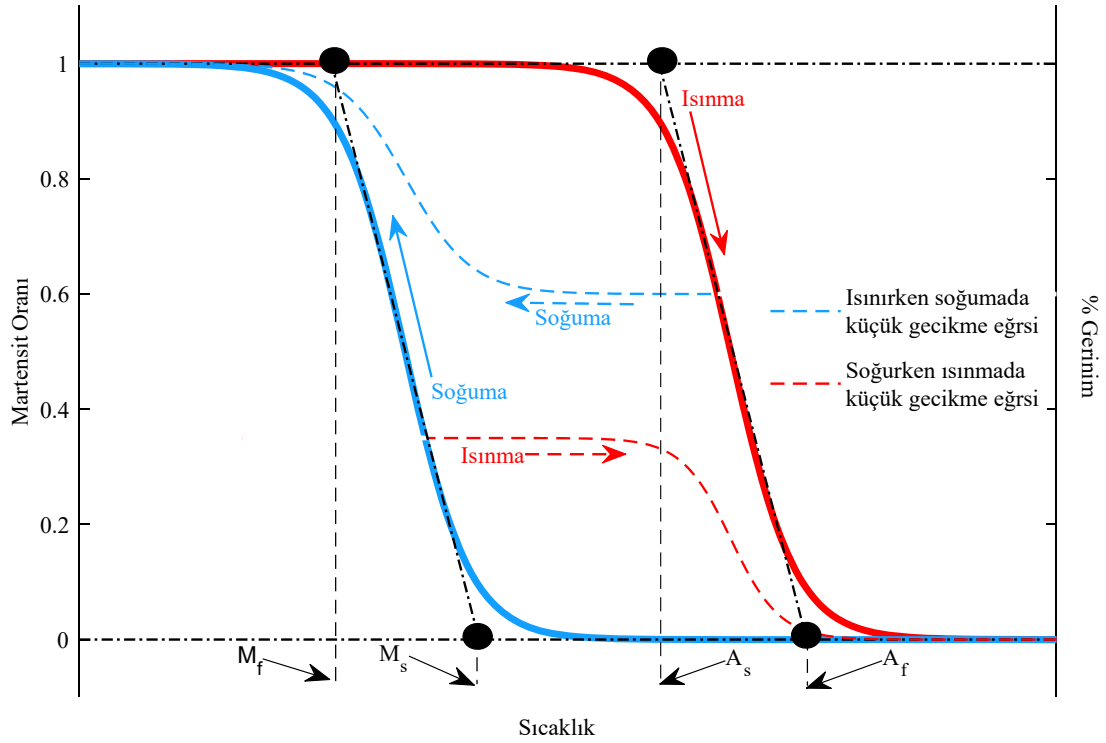
Şekil bellek alaşımlar, burkulma, gerilme veya bükülme gibi herhangi bir tür deformasyona maruz kalsa da orijinal şekillerini hatırlayabilmektedirler. Düşük sıcaklıklarda martenzit fazına ve yüksek sıcaklıklarda östenit fazına sahiptirler. İlk şekle geri dönme, bu fazlar arasındaki geçiş sırasında gerçekleşir. Faz geçişi, gecikmeye sahiptir: Östenit fazının başladığı ve bittiği sıcaklıklar, martenzit fazının başladığı ve bittiği sıcaklıklardan farklıdır. Bu, tam gecikme eğrisini vermektedir. Ayrıca, ısınma esnasında östenit faz değiştirme tamamlanmadan soğutma yahut soğuma sırasında martenzite faz değiştirme tamamlanmadan ısıtma yapıldığında küçük gecikme eğrileri oluşmaktadır. Gecikme eğrileri farklı yüklemeler, başka bir deyişle, değişen gerinimler altında farklılaşabilmektedir: Yükleme arttıkça faz değiştirme sıcaklıkları yükselmektedir [1]. ŞBA malzemeleri, termomekanik özellikler sergiler. Diğer bir deyişle, ısıtma veya soğutma sırasında değişen martenzit ve östenit fazları arasındaki dayanıklılık farkından dolayı mekanik bir etki üretirler. ŞBA malzemeler yüksek enerji yoğunluğuna sahiptir. Düşük hacim ve kesit alanlı bir ŞBA tel bu niteliklerine nispeten yüksek miktarda iş yapabilmektedir [1].

Bu deneysel çalışmada, PI denetleyici kullanılmıştır. ŞBA tel doğası gereği doğrusal çalışmamakta, ısınıp soğurken faz değiştirmektedir. ŞBA telin bu davranışına rağmen, değişmeyen kazanç değerlerine sahip tek bir denetleyicinin, değişen durumlardan etkilenmeden, ŞBA tel üzerindeki denetleme etkisini yürütüp yürütemediğini, başka bir deyişle, değişen durumlara karşı denetleyicinin gürbüz olup olmadığını gözlemlemek amaçlanmaktadır. Dahası, bir bozucu etki olarak, denetim devam ederken, deneye zamanla değişen yükleme durumu eklenmektedir. Denetleyicinin, bu etkiye karşı da kararlılığı, referans sinyal takibindeki başarımı ve tepki hızı ile gürbüz olup olmadığına bakılmaktadır.

2. Deneysel Metot (Experimental Method)

2.1. Şekil Bellek Alaşım Tel (Shape Memory Alloy Wire)

Şekil bellek alaşımlar, burkulma, gerilme veya bükülme gibi herhangi bir tür deformasyona maruz kalsa da orijinal şekillerini hatırlayabilmektedirler. Düşük sıcaklıklarda martenzit fazına ve yüksek sıcaklıklarda östenit fazına sahiptirler. İlk şekle geri dönme, bu fazlar arasındaki geçiş sırasında gerçekleşir. ŞBA teldeki faz geçişi, Şekil 1'de olduğu gibi bir gecikmeye sahiptir: Östenit fazının başladığı ve bittiği sıcaklıklar, martenzit fazının başladığı ve bittiği sıcaklıklardan farklıdır. Bu, tam gecikme eğrisini vermektedir ve tamamen martenzit fazda olduğunda 1 değerini, tam östenit fazda olduğunda ise 0 değerini alan martenzit oranı ile verilmektedir. Ayrıca, ısınma esnasında östenit faz değiştirme tamamlanmadan soğutma yahut soğuma sırasında martenzite faz değiştirme tamamlanmadan ısıtma yapıldığında küçük gecikme eğrileri oluşmaktadır. Gecikme eğrileri farklı yüklemeler başka bir deyişle değişen gerinimler altında farklılaşabilmektedir: Yükleme arttıkça faz değiştirme sıcaklıkları yükselmektedir [1].



Şekil 1. ŞBA malzemenin gecikme döngüsü ve dönüşüm sıcaklıkları (Hysteresis loop and transformation temperatures of an SMA material)

ŞBA malzemeleri, termomekanik özellikler sergiler. Diğer bir deyişle, ısıtma veya soğutma sırasında fazları değişir ve böylece martenzit ve östenit fazları arasındaki dayanıklılık farkından dolayı Şekil 1'deki gibi % gerinimle ifade edilen mekanik bir etki üretirler. ŞBA malzemeler yüksek enerji yoğunluğuna sahiptir. Örneğin, bu çalışmada da kullanılacak olan bir ŞBA tel üzerinde yüklemeye gerinim oluşturulduğunda, yük, ısıtmayla, gerinimin olmadığı başlangıç noktasına kadar geri getirilebilmektedir. Düşük hacim ve kesit alanlı bir ŞBA tel bu niteliklerine nispeten yüksek miktarda iş yapabilmektedir [1]. Daha önce de bahsedildiği gibi, ŞBA teller, kompakt ve hafif oluşlarıyla da eyleyici tasarımlarında geniş bir şekilde kullanılmaktadır. Eyleyicilerdeki mekanik talepleri karşılamak için gerekli denetim doğrusal olmayan ve gecikmeli doğası nedeniyle zorlayıcıdır. Bu çalışmada zorlayıcı deney dinamikleri ile denetim başarımı üstünde durulmaktadır.

ŞBA telin malzeme özellikleri ve boyutları Tablo 1'dedir. Tel, Nexmetal marka bir nikel-titanyum alaşımı (Nitinol) telidir [64]. Karakterizasyon ile belirlenen faz değiştirme sıcaklıkları Tablo 2'de verilmektedir [65].

Tablo 1. ŞBA telin malzeme özellikleri ve boyutları (Dimensional and material properties of the SMA wire)

Parametreler	Sembol	Değer	Birim
Çap	D	0.5	mm
Elektriksel Direnç	R	1.34	Ω
Yoğunluk	ρ	6450	kg/m^3

Deney oda sıcaklığında gerçekleştirilir. Bu çalışmada kullanılan belirli SMA tel için faz geçiş sıcaklıkları oda sıcaklığının üzerindedir (Şekil 1'de de görülebileceği gibi). Dolayısıyla, oda sıcaklığında tel tamamen martenzit durumundadır. Östenit başlangıç sıcaklığının üzerine ve östenit bitiş sıcaklığına kadar ısıtıldığında, tel martenzit fazından tamamen östenit fazına dönüşür.

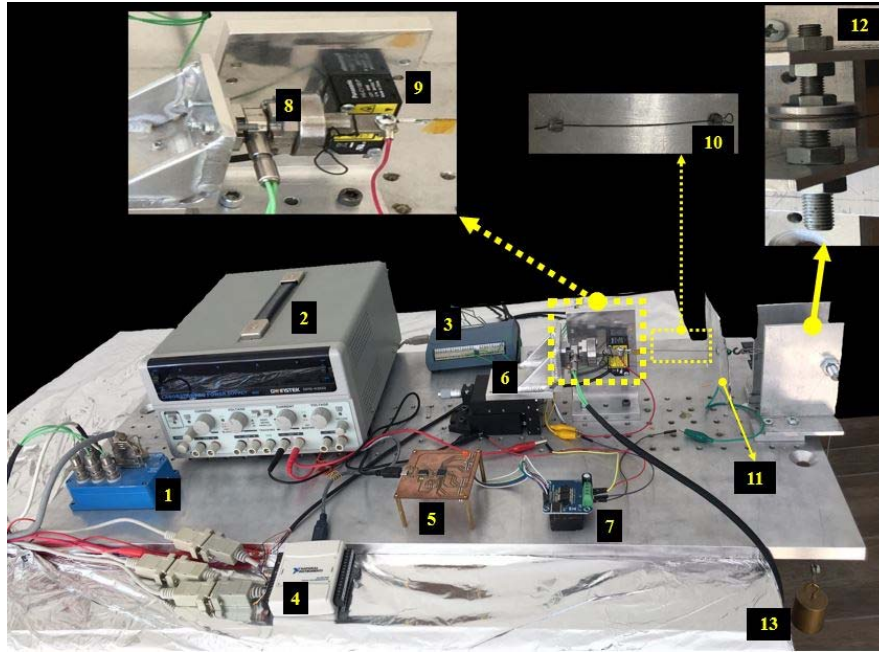
Tablo 2. ŞBA telin faz dönüşüm sıcaklıkları (Phase transformation temperatures of the SMA wire)

Faz Değiştirme Sıcaklıkları	°C
A_s	56
A_f	73
M_s	53
M_f	32

Karakterizasyon için kullanılan deney düzeneği, bu çalışmadaki denetim prosedüründe de kullanılmaktadır [65]. Deney düzeneği ile ilgili Bölüm 2.1.1'de bilgi verilmektedir.

2.2. Deney Düzeneği (Experimental Setup)

Deney düzeneği Şekil 2'de gösterilmektedir. Deney düzeneği kurulumu, gözlemin kolay olması amacıyla yatay eksenle tercih edilmektedir. Telin yük bağlanan serbest ucu bir makaradan geçirilmektedir. Makaradaki sürtünme ihmal edilebilir olarak değerlendirilir ve yüzeyi sürtünme karşı önlem olarak yağlanmıştır. Telin diğer ucu, 3 eksenli doğrusal konumlandırıcı (Thorlabs, 3 eksenli RollerBlock) üzerine ara bağlantı parçasıyla sabitlenmektedir. Bir yük hücresi (Kistler 9317C) ve bir amplifikatör (Kistler 5037A) ara bağlantı parçası ile 3 eksenli doğrusal konumlandırıcıya bağlanmaktadır. Tel, yük hücresinde her eksene düşen kuvvet gözlemlenerek, doğrusal konumlandırıcı ile tam olarak yatay eksenle konumlandırılmaktadır. Bu çalışma için tek eksenli bir yükleme hücresi yeterlidir; ancak, ek olarak 3 eksenli yükleme hücresi kullanarak diğer iki eksen üzerinde yük olmadığı görülebilmektedir. Telin serbest ucuna, lazer algılayıcı ışının önüne, yansıtıcı bir yüzey olarak alüminyum folyodan ince bir plaka sabitlenmektedir. Lazer mesafe algılayıcısı (Panasonic HG-C 1100), telin uzunluğundaki değişimi ölçmektedir. Daha sonra, uzama telin ilk uzunluğuna bölünerek mühendislik gerinimi hesaplanmaktadır. Joule ısıtması için elektrik akımı sağlayan için bir motor sürücüsüdür (IBT-2). Ana komut MATLAB yazılımından mikrodenetleye verilir. Bu cihaz, %



Şekil 2. Deney düzeneği 1: Amplifikatör, 2: Güç kaynağı, 3: Termokuplre Veri Toplama Kartı, 4: Veri Toplama Kartı, 5: Elektronik devre, 6: 3-eksenli doğrusal konumlandırıcı, 7: Motor sürücü, 8: 3-eksenli yük hücresi, 9: Lazer mesafe algılayıcısı, 10: ŞBA tel, 11: ŞBA tel ile birleştirilmiş yansıtıcı yüzey, 12: Makara, 13: Sabit ağırlık, 14: Kapton bant ile termokuplre bağlantısı

(Experimental setup. 1: amplifier, 2: power supply, 3: thermocouple DAQ card, 4: DAQ board, 5: electronic circuit, 6: 3-axis linear stage, 7: motor driver, 8: 3-axis load cell, 9: laser displacement sensor, 10: SMA wire, 11: reflective surface combined with SMA wire, 12: pulley, 13: dead weight, 14: thermocouple connection with kapton tape)

görev çevrimindeki her artışa karşılık, yaklaşık 300 mA elektrik akımını uygulamak için güç kaynağını kontrol eden DGM sinyali üretir. IBT-2 ve mikrodenetleyici bağlantıları, özel bir baskı devre kartı üzerindedir. Son olarak, bir K-tipi termokuplre, ŞBA tele bir Kapton bantla bağlanmaktadır. Bu şekilde, küçük çaplı tel ile termokuplre arasında temas sağlanırken, ölçümün çevreyle ısı aktarımına karşı da ısı yalıtım sağlanmaktadır. Sıcaklık verileri, bir veri toplama kartı (MCC USB-TC DAQ) aracılığıyla Labview kullanıcı arayüzüne gönderilmektedir.

2.3. SMA Telin Denetimi (Control of SMA Wire)

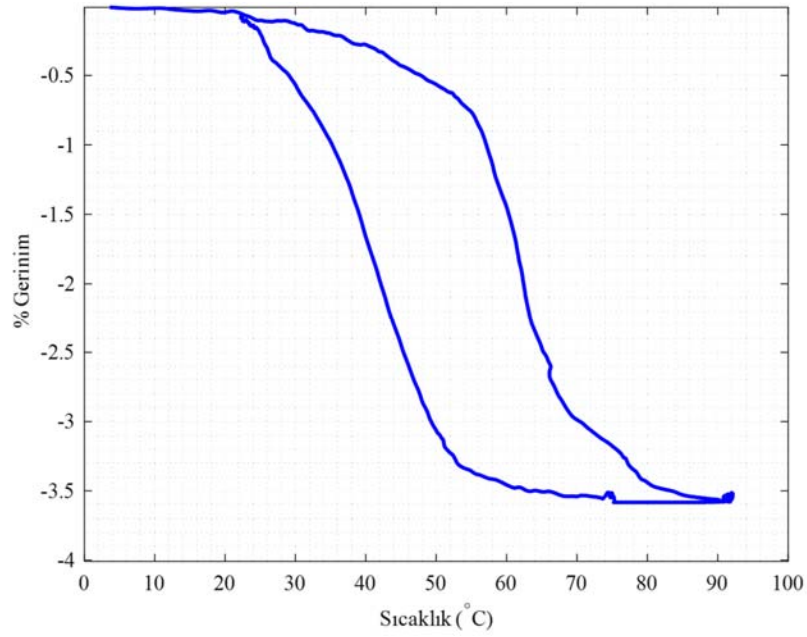
Bir SMA telinin gerinim denetimi ele alınmaktadır. Belli bir denetimin yapılacağı gerinim aralığını belirlemek için ŞBA telin gecikme eğrisi elde edilmeli ve tam gecikme eğrisine göre mevcut yüklem altında en büyük gerinim değeri belirlenmelidir. Bunun için telin gecikme eğrisi elde edilirken, serbest ucuna 3 kg ağırlık asılmaktadır. Yaklaşık olarak Şekil 3'teki, 3.5 mm uzama görülmektedir. Gerinim denetimi bu yük altındaki en büyük gerinim sınırında gerçekleştirilmektedir. Burada, % gerinimin, telin uzunluğu 100 mm olduğundan, değişen mesafeyle aynı değerde olduğu vurgulanmalıdır. Dolayısıyla, örneğin, 0.5 mm'lik referans sinyali aynı zamanda % 0.5 gerinim talebi anlamına gelmektedir.

Denetim için kullanılan elektronik devre, darbe genişliği modülasyonu (DGM) sinyaline dayalı olarak çalışmaktadır. Başka bir deyişle, bilgisayardan bir % görev döngüsü komutu alır ve tel içine karşılık gelen akımı verir. Elektronik devre ayrıca tel içinden geçen akımı ölçmek üzere tasarlanmıştır. Bu nedenle, % görev döngüsü ile ölçülen akım arasında bir ilişki kurulabilmektedir. Şekil 4'te sabit % görev döngüleri, kalibrasyon çizgisini elde etmek için işaretlenmiştir. Görülebileceği gibi, elektronik devre %20 görev döngüsüne kadar akım üretmez. Her bir % görev döngüsü artışında ortalama olarak akım 0.064 A kadar artmaktadır.

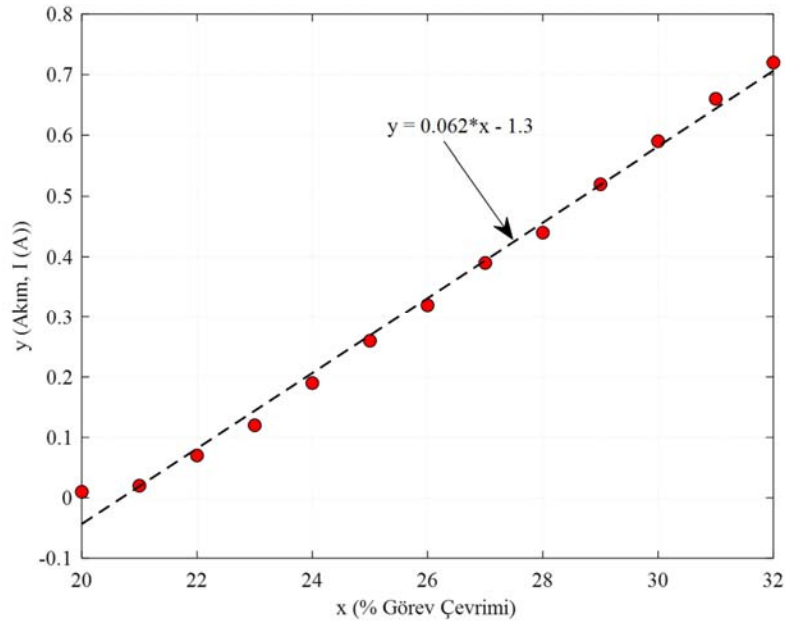
Deneyisel veriler, Matlab'da bir Butterworth filtresi ile filtrelenir. Filtre, ölçümü kaybetmemek için optimal olarak tasarlanmıştır. Referans takibine ilişkin tüm şekillerdeki verilerdeki titreşimler, denetim sırasında akımın açılıp kapanmasından kaynaklanan ve mesafe ölçümü sırasında lazerin vurduğu yansıtıcı yüzeydeki salınımlardan kaynaklanmaktadır. Yansıtıcı yüzey, ayrıca, SMA tel ile ip arasındaki serbestlik ve makara ile telin ucuna asılı ağırlık arasındaki temas ve sürtünme nedeniyle tolere edilebilir mertebede titreşmektedir. Gerçek sistem (ŞBA tel) için denetim şeması Şekil 5'te verilmektedir. Deneylerdeki gerçek görev döngüleri, tele akımın verebileceği olası hasarı önlemek için %40 (veya 1.2 A elektrik akımı) ile sınırlandırılmaktadır.

2.2.1. Denetleyici kazanç ayarlama ve tam gerinim aralığında denetim (Controller gain tuning and control in fully strain region)

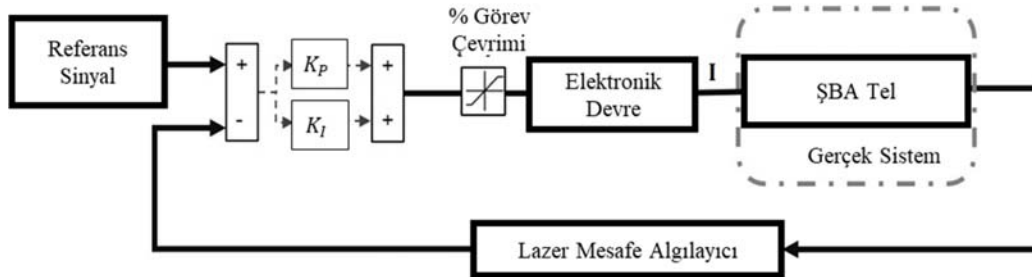
ŞBA telinin tam gerinim bölgesinde, denetleyici kazançları, en iyi başarıyı sağlayacak şekilde ayarlanmaktadır. Bunun için, birkaç deney optimal denetleyici kazançlarını bulmak için gerçekleştirilmektedir. Böylece, PI (oransal-integral (proportional integral)) denetleyicisi en uygun olarak görülmüş ve oransal ve integral kazançları sırasıyla $K_p = 0.4$ ve $K_I = 0.1$ olarak belirlenmiştir. Üçgen ve sinüs gerinim referans girişleri için izleme performansları sırasıyla Şekil 6(a) ve Şekil 7(a)'da ve denetleyici girişleri Şekil 6(b) ve Şekil 7(b)'de verilmektedir. Denetim, özellikle %0.5'in altındaki düşük gerilmelerde gecikme gösterir çünkü özellikle gerçek akım önceden belirtilen 0.064'ten daha düşük bir adım değişikliğine duyarlı değildir. Ayrıca, hareketin başlangıcında sistem ip ile makara arasındaki sürtünmeyi ve göreceli hareketi aşmak zorundadır. Bu, hareketi başlatmada bir gecikmeye neden olur. Üçgen sinyalde soğutma (Şekil 6(a)) 250. saniyede ve sinüs sinyalinde (Şekil 7(a)) ilk olarak 52. saniyede başlamaktadır. Soğutma sadece doğal konveksiyon ile sağlandığından, akım hızlı bir şekilde düşse bile soğuma zaman almaktadır. Bu nedenle, gecikmeden dolayı takip hatası gözlemlenmektedir.



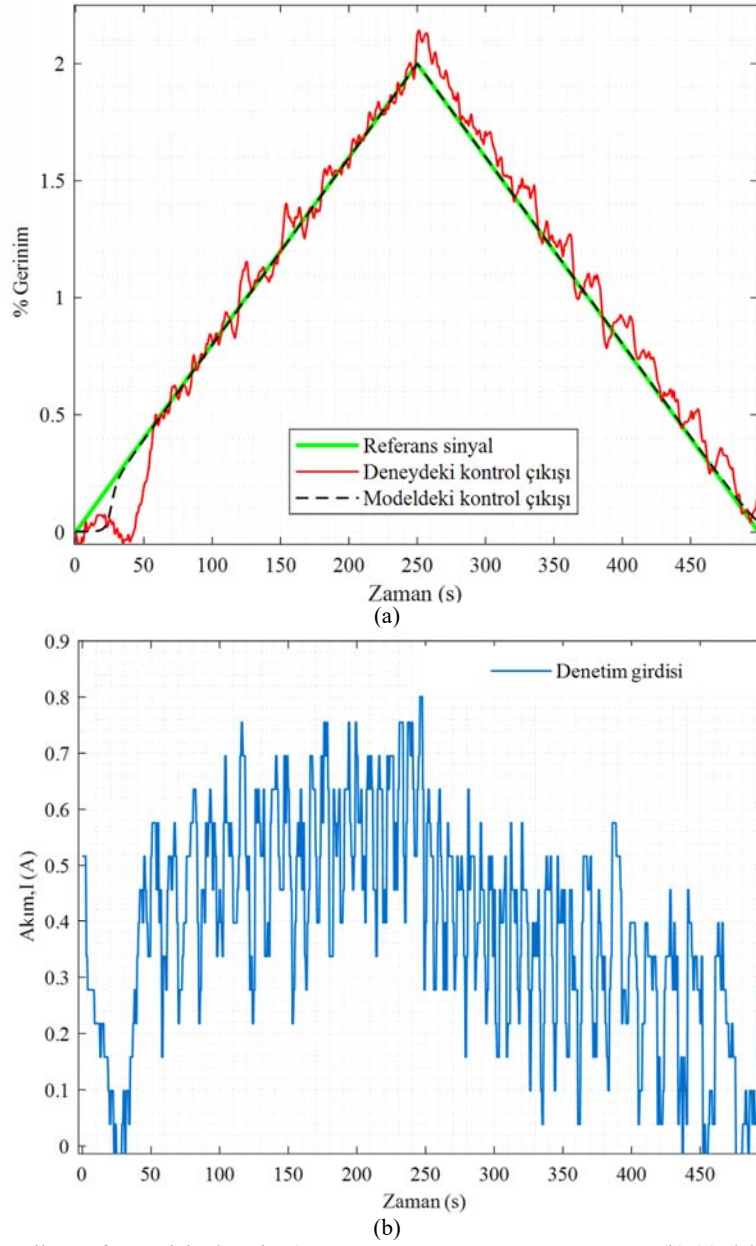
Şekil 3. 150 MPa yüklem altında ŞBA telin gecikme eğrisi (SMA wire hysteresis curve under 150 MPa load)



Şekil 4. Görev döngüsü ve elektriksel akım (Duty cycle vs electrical current)



Şekil 5. Gerçek sistem için denetim şeması (Control diagram for the actual system)



Şekil 6. (a) Üçgen şekilli gerilme referansı için denetim (Triangular strain reference control results), (b) (a)'daki denetim eylemi için akım denetim girdisi (Current control inputs for the control action in (a))

2.2.2. ŞBA telin gecikme eğrisinin üç farklı bölgesinde denetimi (Control of the SMA wire in three different regions of the hysteresis curve)

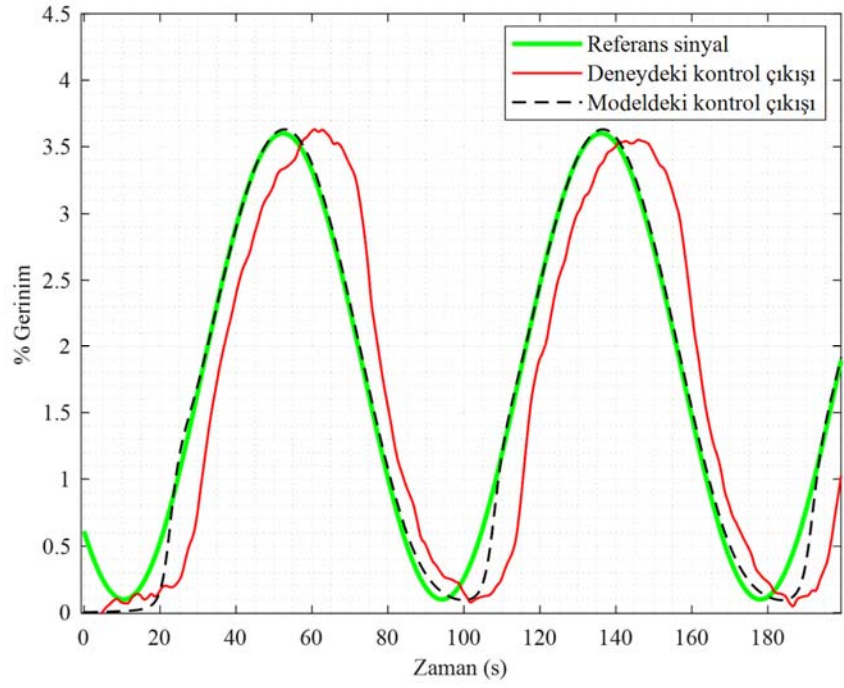
Bu bölümde, referans sinyalleri büyük ölçüde martenzit, faz geçişi ve büyük ölçüde östenit olmak üzere üç belirli aralığa sınırlanmakta ve denetim başarımı gözlemlenmektedir. Böylece, ŞBA telin gecikme eğrisi dikkate alındığında, referans sinyal takibi için daha iyi bölgelerin olup olmadığı veya denetim eyleminin faz geçişinden etkilenip etkilenmediği belirlenmektedir. Ayrıca, denetleyici değerleri için yeniden ayar yapılmadığında denetim ne ölçüde başarılıdır, denetleyici tüm kritik bölgeler için gürbüz müdür soruları değerlendirilmektedir. Buna ek olarak, referans girişi için sinüs sinyali kullanılarak yine bahsi geçen üç bölgede deneyler artan sinus frekansları için tekrarlanmaktadır. Böylece, telin ısıtma-soğutma durumlarının ikisinde de aynı denetleyici kazançları ile telin

denetlenebilir denetlenemediği, başka bir deyişle denetleyicinin bu durumdaki gürbüzlüğü gözlemlenmektedir.

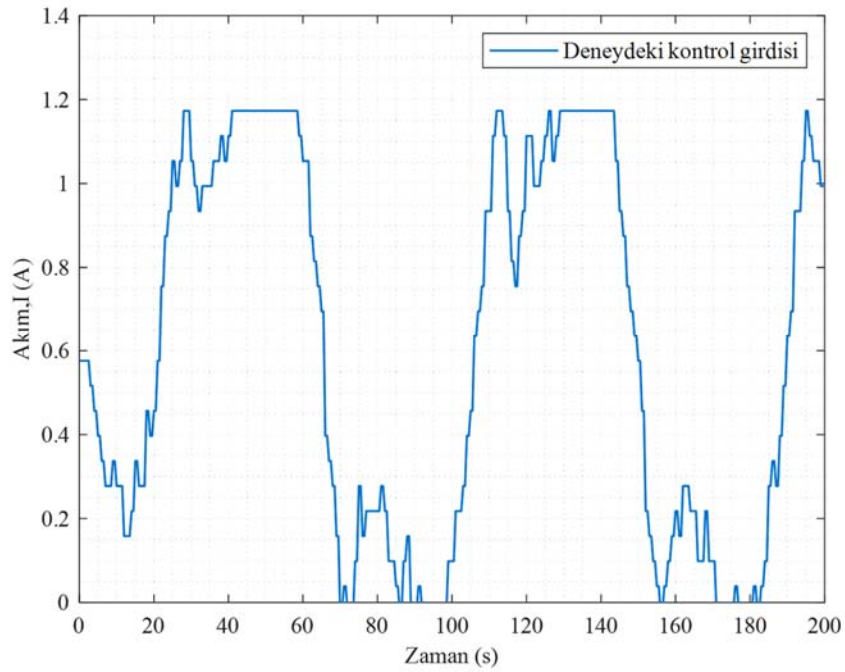
2.3.2.1. Adım referansı için denetim (Control for step reference)

Şekil 8, Şekil 9 ve Şekil 10(a)'larda görüldüğü üzere, adım referans sinyalleri büyük ölçüde martenzit kısmı için 0,5 mm mesafe (veya %0,5 gerinim), faz geçiş kısmı için 2 mm mesafe (veya %2 gerinim) ve büyük ölçüde östenit kısmı için 3,35 mm mesafe (veya %3,35 gerinim) olarak belirlenmektedir.

%2 gerinim referansı anlık bir akım çeker, bu da aşırı dalgalanmaya neden olur, ancak yükselme süresini azaltır. %3 gerinim en uzak taleptir ve ısıtma süresi nedeniyle daha fazla yükselme ve yerleşme süresine sahiptir. Anlık akım kısmı hariç olmak üzere, tüm adım



(a)



(b)

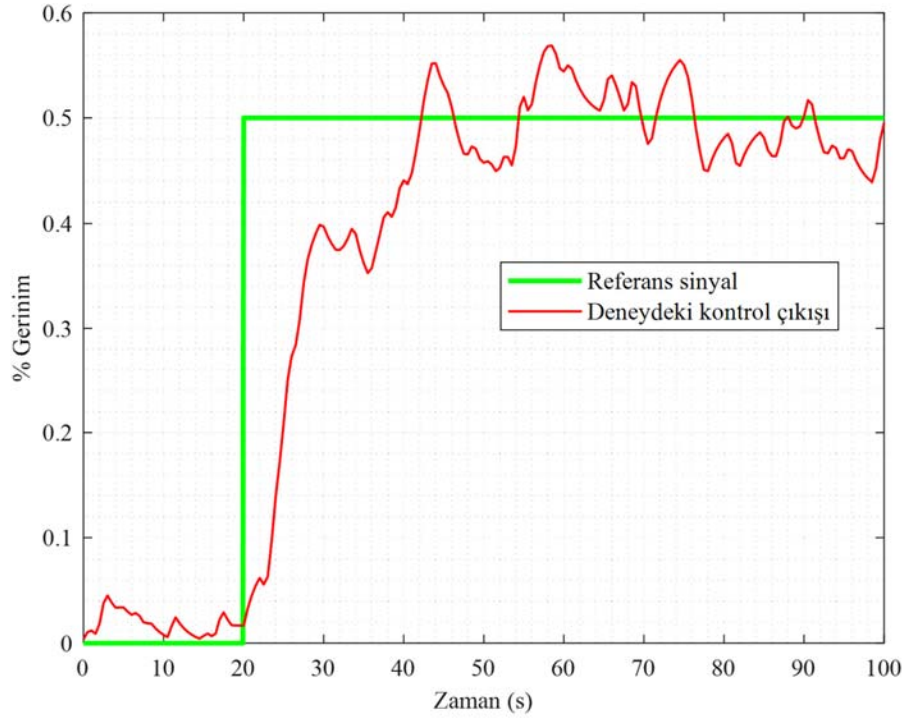
Şekil 7. (a) Sinüsel gerilme referansı için denetim (Sine strain reference control results), (b) (a)'daki denetim eylemi için akım denetim girdisi (Current control inputs for the control action in (a))

referansları için DGM'nin % görev çevriminin çalışmasıyla adımli değişen akımlar, Şekil 8, Şekil 9 ve Şekil 10(b)'lerde görülmektedir.

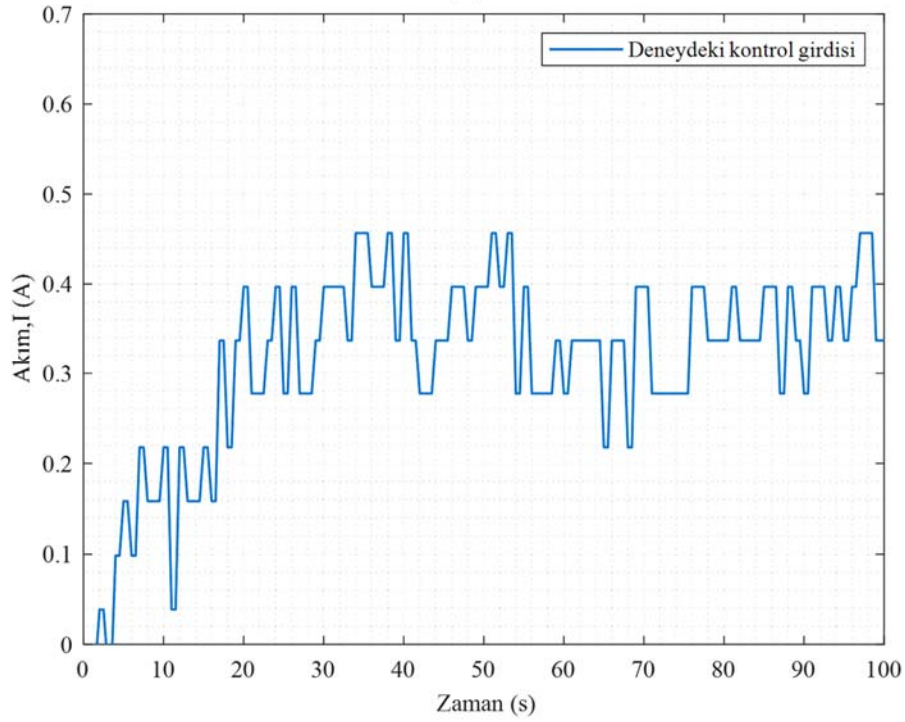
2.3.2.2. Sinüs referansı için denetim (Control for sine reference)

Bu bölümde, sistem için sinüs gerinim referansları verilmektedir. Bunların ortalama çizgileri önceki bölümdeki adım referanslarıyla

aynıdır, yani sırasıyla %0.5, %2 ve %3,35'tir. Ayrıca, referans girdi sinyalleri, sinüs genliğini ± 0.25 olarak büyük ölçüde martenzit, faz geçiş ve büyük ölçüde östenit bölgelerine sınırlandırılmaktadır. Artan frekansların izleme performansları üzerindeki etkileri de bu bölümde tartışılmaktadır. Referans sinyal takibi, Şekil 11, Şekil 12, Şekil 13 ve Şekil 14(a)'larda; karşılık gelen elektriksel akım denetim girdileri Şekil 11, Şekil 12, Şekil 13 ve Şekil 14(b)'lerde verilmektedir.

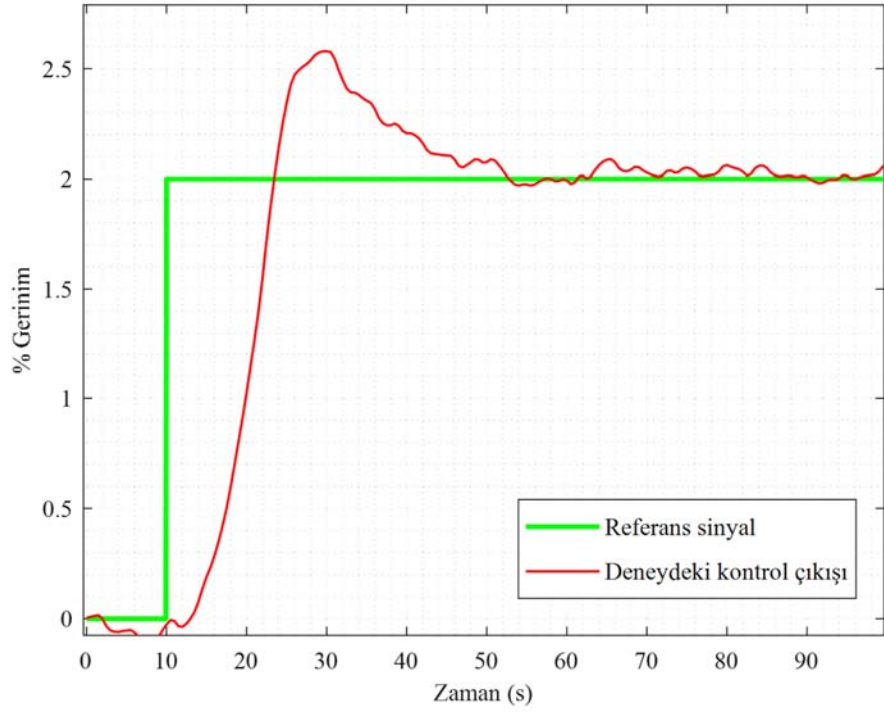


(a)

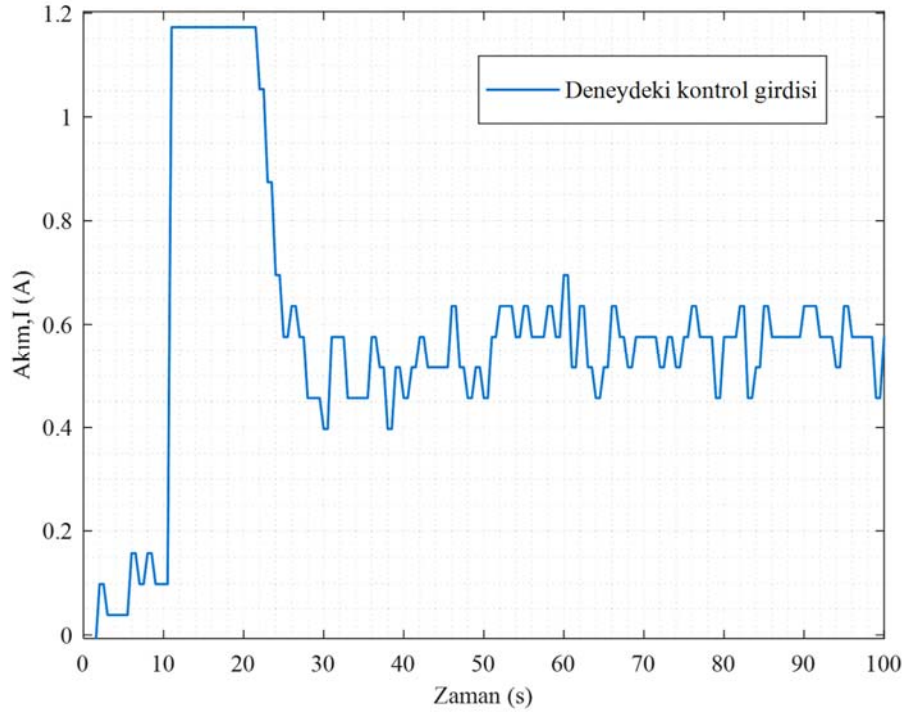


(b)

Şekil 8. (a) % 0.5’lik adım gerilme referansı için denetim (0.5 % step strain reference control), (b) (a)’daki denetim eylemi için akım denetim girdisi (Current control input for the control action in (a))

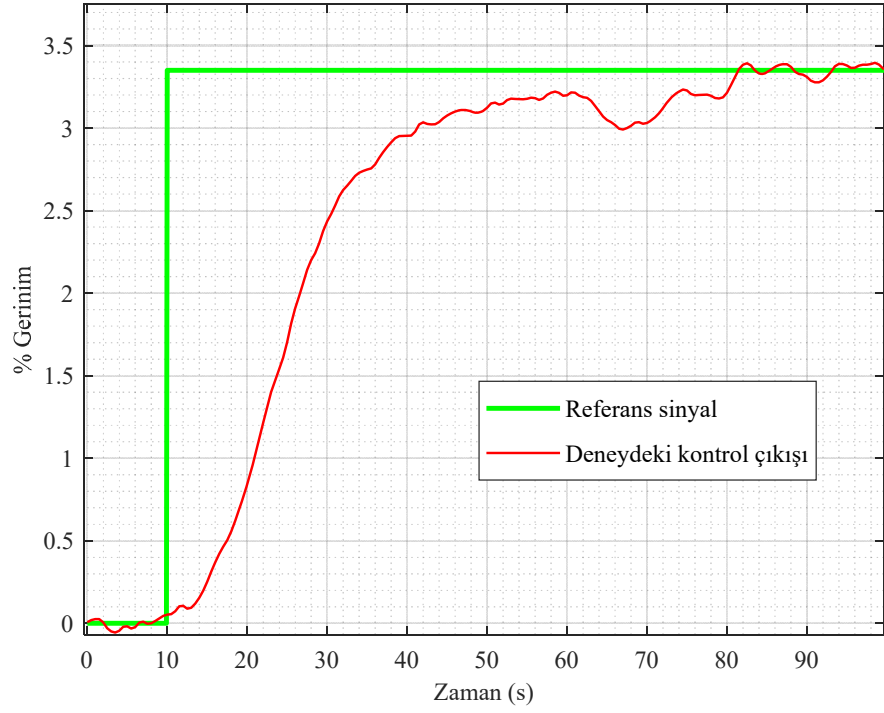


(a)

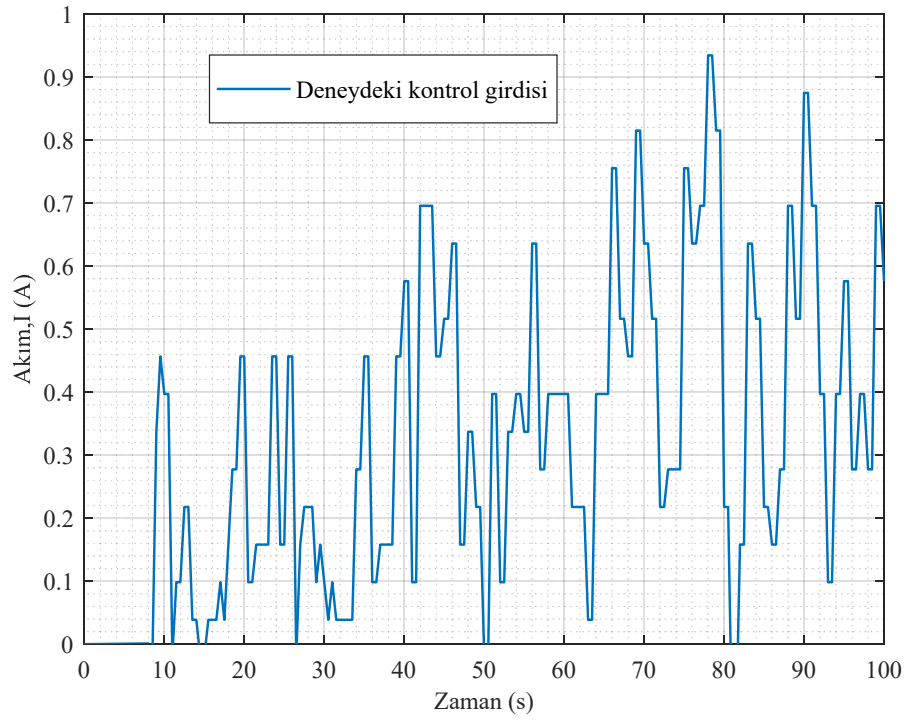


(b)

Şekil 9. (a) % 2'lik adım gerilme referansı için denetim (2 % step strain reference control), (b) (a)'daki denetim eylemi için akım denetim girdisi (Current control input for the control action in (a))

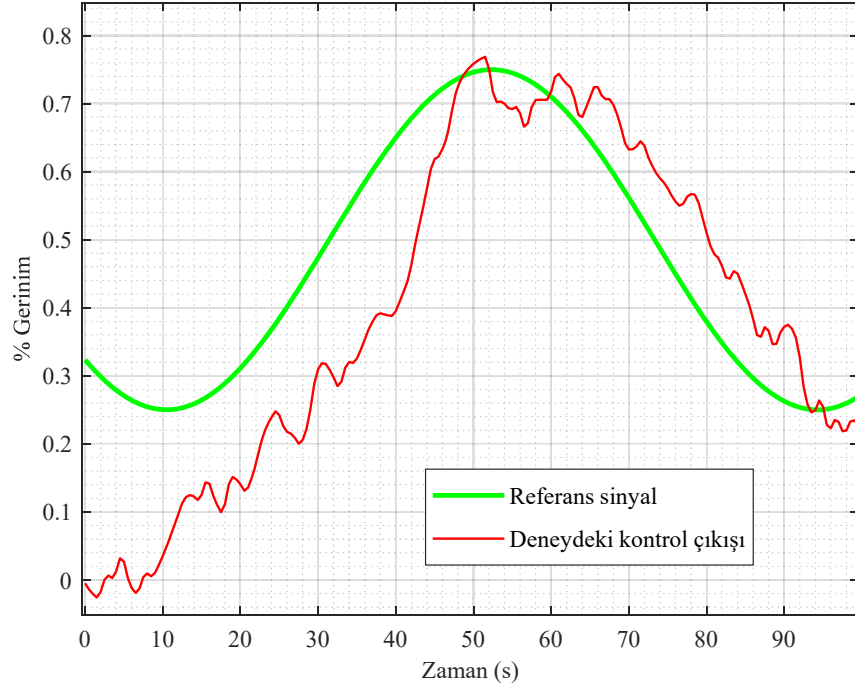


(a)

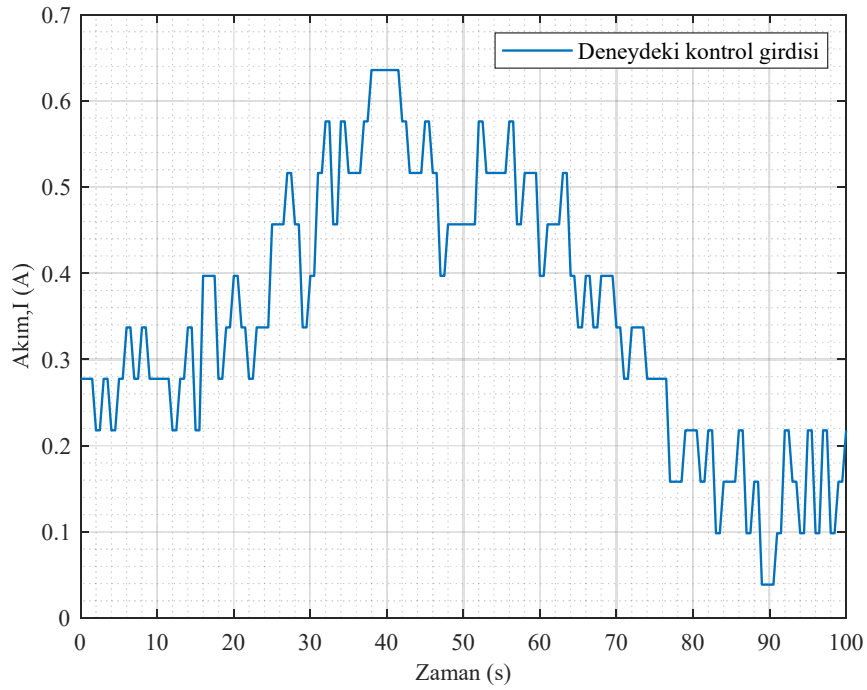


(b)

Şekil 10. (a) % 3.35'lik adım gerilme referansı için denetim (3.35 % step strain reference control), (b) (a)'daki denetim eylemi için akım denetim girdisi (Current control input for the control action in (a))

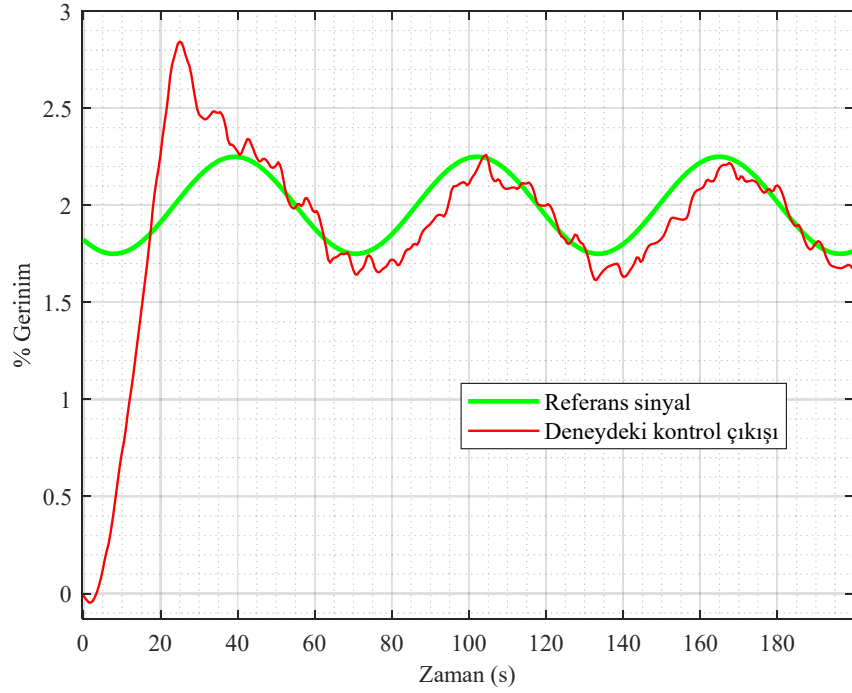


(a)

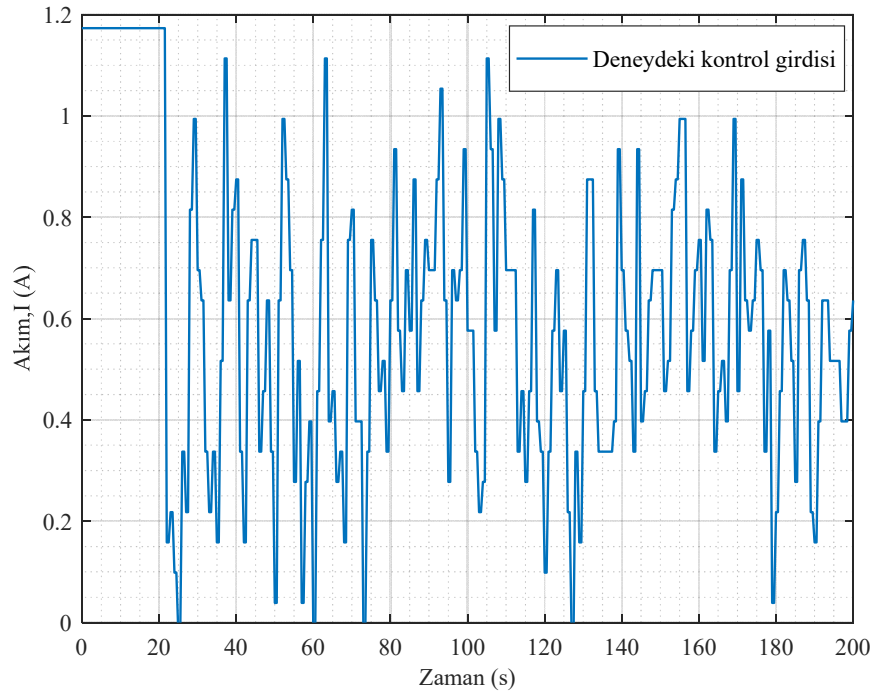


(b)

Şekil 11. (a) 0.5 mm ortalamalı ve 0.075 rad/s frekanslı sinüsel gerilme referans için denetim (Sine strain reference control with the equilibrium line of 0.5 mm and the frequency of 0.075 rad/s), (b) (a)'daki denetim eylemi için akım denetim girdileri (Current control inputs for the control action in (a))

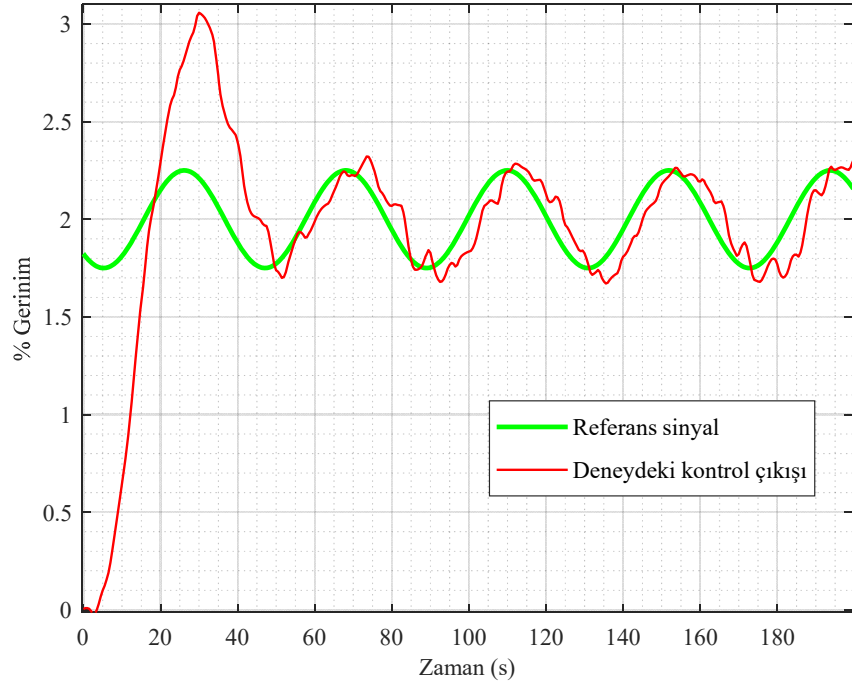


(a)

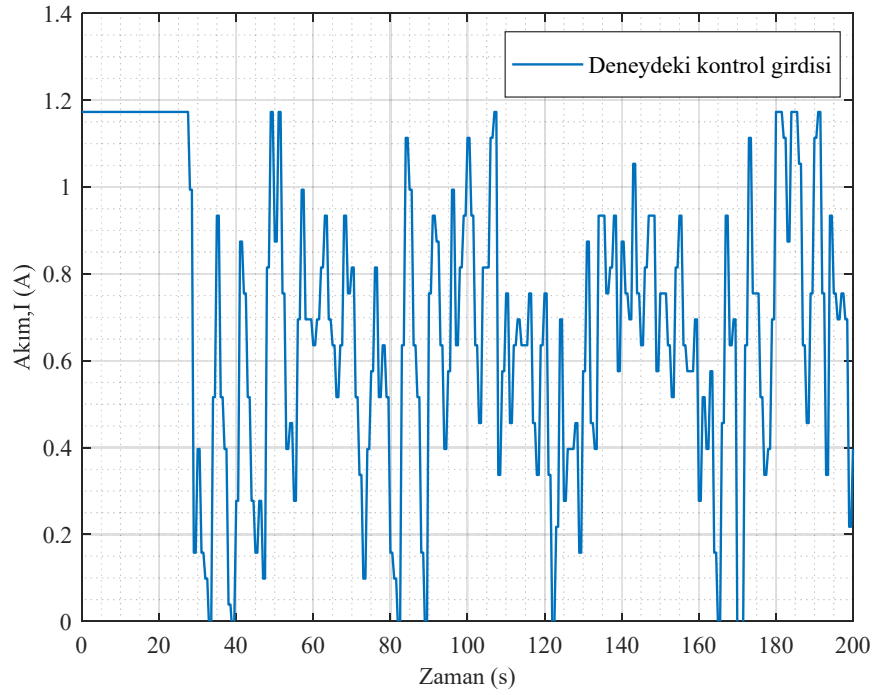


(b)

Şekil 12. (a) 2 mm ortalama ve 0.1 rad/s frekanslı sinüsel gerilme referans için denetim (Sine strain reference control with the equilibrium line of 2 mm and the frequency of 0.1 rad/s), (b) (a)'deki denetim eylemi için akım denetim girdileri (Current control inputs for the control action in (a))

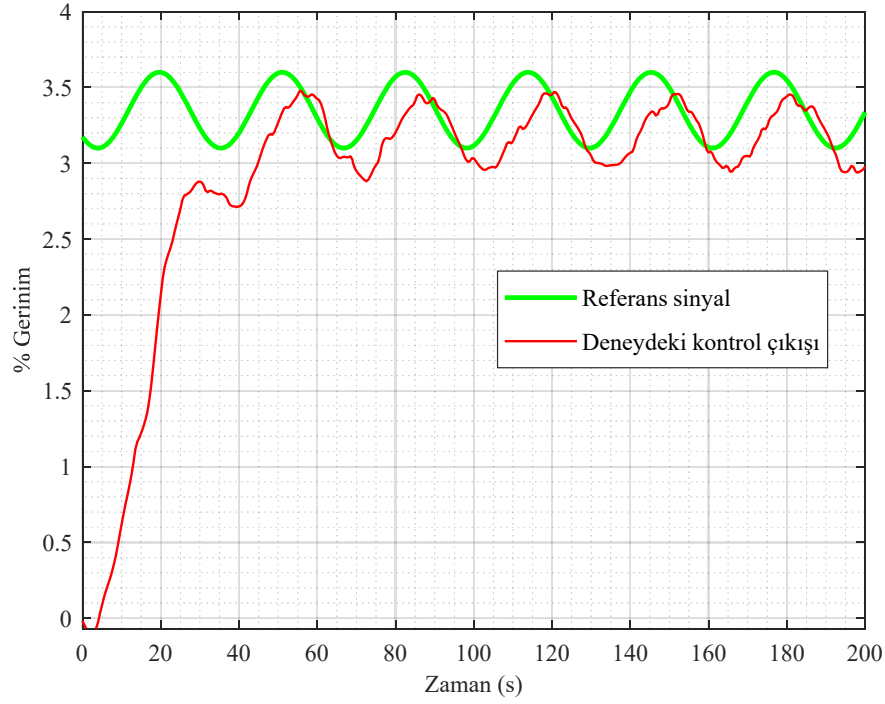


(a)

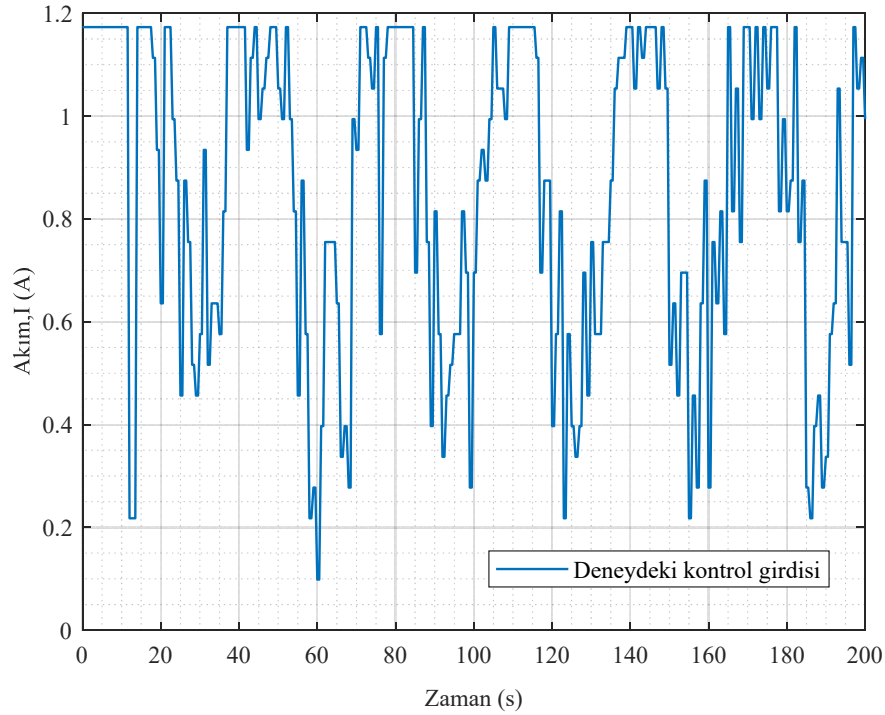


(b)

Şekil 13. (a) 2 mm ortalamalı ve 0.15 rad/s frekanslı sinüsel gerilme referans için denetim (Sine strain reference control with the equilibrium line of 2 mm and the frequency of 0.15 rad/s), (b) (a)'deki denetim eylemi için akım denetim girdileri (Current control inputs for the control action in (a))



(a)



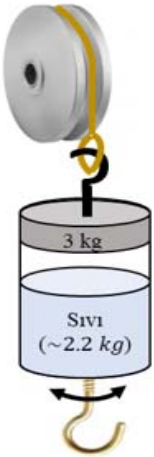
(b)

Şekil 14. (a) 3.35 mm ortalamalı ve 0.2 rad/s frekanslı sinüsel gerilme referans için denetim (Sine strain reference control with the equilibrium line of 3.35 mm and the frequency of 0.2 rad/s), (b) (a)'deki denetim eylemi için akım denetim girdileri (Current control inputs for the control action in (a))

2.3.3. Değişken yük altında denetim (Control under variable load)

Son olarak, bu bölümde denetleyici başarımı değişken yük altında analiz edilmektedir. Bunun için, SMA telin bağlı olduğu ipin serbest ucuna sabit 3kg'lık yüke ek olarak su ile dolu şişe asılmaktadır. Suyun

özkütlesi 1000 kg/m^3 olarak alınmaktadır ve buna göre kütle yaklaşık olarak 2.2 kg olarak hesaplanmaktadır. Deney düzeneğindeki makaradan asılan sabit ve su dolu kütleler için Şekil 15'te bir gösterim verilmektedir.



Şekil 15. Sabit ağırlıkla birlikte ŞBA tele asılan değişken yükün gösterimi
(Representation of variable load hung with SMA wire together with the dead weight.)

Gerinim denetim deneyinin başlamasından sonra, şişenin alt kısmına bağlanmış olan, bir tıpa gibi kullanılan vidalı kanca gevşetilerek sıvının akışı sağlanmaktadır. Böylece, yük azaltılarak değiştirilmektedir. Yükteki değişim Şekil 16(a)'da görüldüğü gibi yük hücresi ile ölçülmektedir. Yük değişimi başlamadan önce, önce sabit yüklükten referans sinyal takibi görülmek istenmektedir. Daha sonra bozucu etki olarak yüklemeye değiştirilecektir. Referans takibi gözlemlenmiş ve tercihen 120 saniye beklenmiştir. Ardından, sıvın akışı 120. saniyede başlatılmaktadır. Burada ölçümdeki ani düşüşün sebebinin vidalı kancanın el yordamıyla gevşetilmesi olduğu belirtilmelidir. Bu tetikleme anı dışında, deney esnasında ise el ile müdahale olmamıştır. Şekil 16(b)'de, vidalı kanca dönmeye başladığında bir aşırı salınım gözlemlenmekte fakat hemen sonra referans takibi devam etmektedir. Ayrıca, yük azaldıkça, ŞBA bir teldeki gerinim azalacağından, şekil bellek etkisiyle gerinimi geri getirmek için gereken enerji azalacaktır. Bununla tutarlı olarak, beklenen elektriksel akım ve sıcaklıktaki azalma, sırasıyla Şekil 17(a) ve Şekil 17(b)'de görülmektedir. Şekil 18(b)'de, gecikme eğrisini tamamen taramak için sinüs referans sinyali uygulanmaktadır. Dikkate değer olan hızlı sıvı akışı 300. saniyede başlatılmaktadır. Buradaki akış Şekil 16(a)'dakine göre daha hızlı verilerek sınamada bir değişiklik daha yaratılmaktadır. Yükteki değişim, Şekil 18(a)'da görüldüğü gibi, yük hücresi ile ölçülmektedir. Bir önceki deneydeki gibi burada da yük azaldıkça elektriksel akım ve sıcaklıktaki azalma, sırasıyla Şekil 19(a) ve Şekil 19(b)'de görülmektedir.

3. Sonuçlar ve Tartışmalar (Results and Discussions)

ŞBA telin denetimi, tam bir faz değişim döngüsü için, başka bir deyişle tümüyle martenzitten tümüyle östenit faz dönüşümünün olduğu bir gerinim için yapılmıştır. Gözlemlere göre denetleyici olarak PI en uygunudur ve denetleyici kazançları en iyi başarıyı verecek şekilde belirlenmiştir.

Gecikme eğrisinin, büyük ölçüde martenzit, faz geçişi ve büyük ölçüde östenit olmak üzere farklı üç bölgesi için tek denetleyicinin başarımlı öncelikle adım referans sinyali ile değerlendirilmiştir. Referans takibindeki bölgeye göre farklı Şekil 8, Şekil 9 ve Şekil 10(a)'da görülmektedir ancak daha da netleştirmek için deneysel veri ile referans sinyali arasındaki fark norm hata olarak hesaplanmıştır. Buna göre, referans gerinim arttıkça, bu değere ulaşma süresi de artar. Bu etki, Şekil 20'deki, referans takibi için verilen norm hatalarında görülebilmektedir. %0.5 referansının yanıtlarının norm hataları ile %2 referansının norm hatası birbirine yakındır, ancak %2 referansının

norm hatası daha yüksektir. %3,35 gerinim referansı için ise nispeten fazla yükselme süresinden dolayı norm hatalarında büyük bir artış görülmektedir. Yine gecikme eğrisinin, büyük ölçüde martenzit, faz geçişi ve büyük ölçüde östenit olmak üzere farklı üç bölgesi için bu kez %0.5, %2 ve %3.35 ortalama çizgisine sahip sinüs gerinimler referans sinyali olarak verilmiştir. Ayrıca, her referans sinyalin frekansı sırasıyla 0.075rad/s, 0.1 rad/s, 0.15 rad/s ve 0.2 rad/s olarak artırılmış, böylece ŞBA telin denetleyiciye verdiği tepkinin hızının da her bölgede gözlemlenmesi istenmiştir. Üç bölge ve dört farklı frekanstaki, örnekleri Şekil 11, Şekil 12, Şekil 13 ve Şekil 14(a)'da verilen referans sinyalleri için, artan frekanslarla da ilişkili norm hataları Şekil 21'te gösterilmektedir.

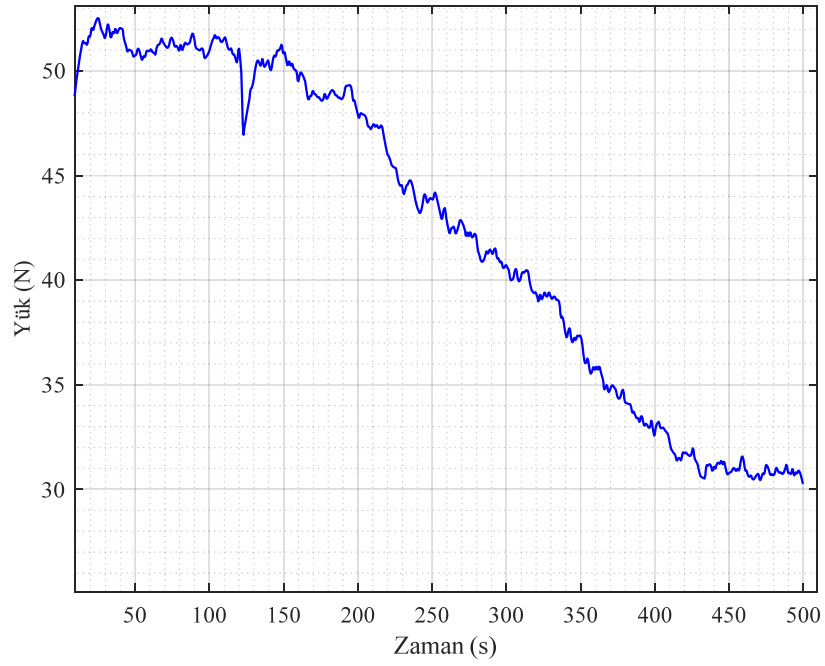
Buna göre, farklı sinüs referansları için norm hatalarında artış ve azalma olmasına rağmen, %0.5 ortalama çizgisine sahip sinüs referansı ve %3.35 ortalama çizgisine sahip sinüs referansı için ortalama hatalar 0.7-1.6 arasında dar bir aralıkta ilerler. Ayrıca, bu hatalar yüksek frekanslarda birbirine yaklaşır. Ancak, %2 ortalama çizgisine sahip sinüs referansı için hata artışı, artan frekanslarla birlikte büyük bir ayrışma sergiler. Bu, denetleyicinin aktif faz geçişinin olduğu bu bölgeyi izlemeye zorluk yaşadığını ve yüksek frekanslı 0.2rad/s referans talebi sırasında artan bir ayrışma sergilediğini gösterir. İkinci olarak, sonuçlar denetim girişleri, % görev döngüsü ve karşılık gelen akımlar açısından değerlendirilir. Buna göre, görev döngüsündeki artış adımları hızlıdır. Girişler, sık artan/azalan davranıştan hızlı adımlara geçer, yani sabit bir görev döngüsündeki bekleme süresi azalır. %2 ortalama çizgisine sahip referans sinyalinde, görev döngüsü adımları arasında hızlı geçiş gözlemlenir. Buna rağmen, % 0.5ortalama çizgisine sahip referans sinyali için artan/azalan adımlardaki adım sayısı düşüktür. Belirli bir görev döngüsünde daha uzun süre bekleme eğilimlidir. Referans sinyali %3.35 ortalama çizgisine sahip olduğunda, denetim girişi doymuş yüksek elektrik akımına ulaşma eğilimindedir ve orada kalır. Bu durumda yüksek % görev döngüsü 'den hızlı düşüş gözlemlenir.

Son olarak değişen yük altında denetleyici başarımlı sınanmıştır. Takip, faz geçişine sahip %2 gerinim adım referans sinyali ve gecikmenin tüm davranışını kapsayan sinüs referans sinyali için sağlanmıştır (Şekil 18 ve Şekil 19). Deneydeki gözlemlere göre değişen yüke karşı denetleyici gürbüzdür.

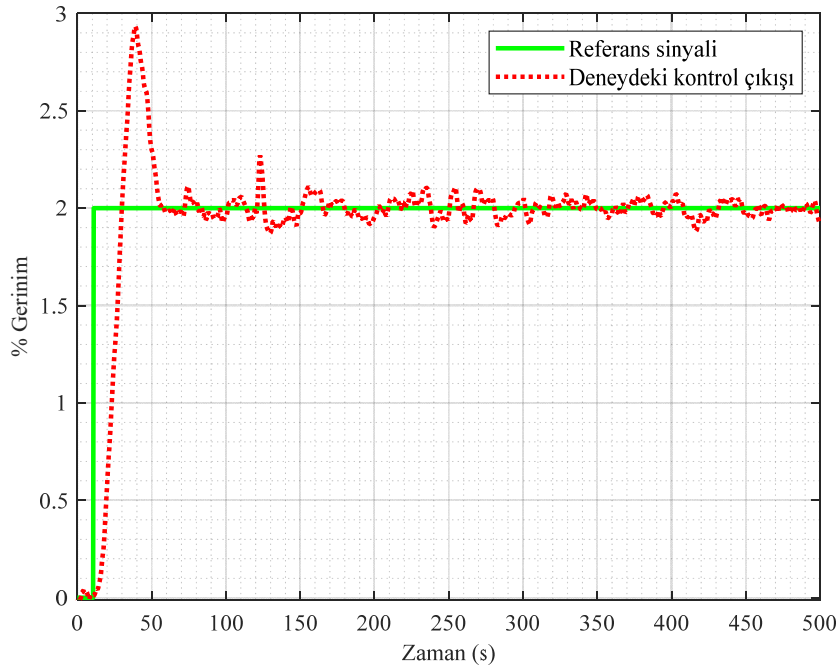
4. Sonuçlar (Conclusions)

ŞBA telin termomekanik özelliğine ek olarak, ısınma-soğumanın gecikmeli doğası, tam faz değiştirmenin gecikmeli eğrisi içinde oluşan küçük gecikme eğrileri, değişen yüklemeye altında gerinimle değişen gecikme eğrileri gerinim denetimini karmaşıklaştıran, başarımlı etkileyen önemli faktörlerdir.

Büyük ölçüde martenzit, faz geçişi ve büyük ölçüde östenit gecikme eğrisi kısımları mekanik tepki için kritik farklı üç bölge olarak görülmektedir. ŞBA telin denetimi ile ilgili literatürde pek çok yöntemin sınıdığı görülmektedir [40, 41, 44, 46, 48, 51]; uyarlamalı kontrol, bulanık mantık, PID gibi farklı denetim yöntemleri kullanılırken, bölgesel bir değerlendirme yapılmamakta, denetleyicinin başarımlı ayrı ayrı değerlendirilmemektedir. Bu çalışmada öncelikle tam gecikme eğrisi denetimi için PI denetleyici kazançları belirlenmiştir. Daha sonra üç bölge için bu tek denetleyicinin başarımlı, adım ve sinüs referans gerinim sinyalleri ile, gözlemlenmektedir. Denetleyici her bölge için çalışmakta, referans takibinde kararsız bir durum yaratmamaktadır; denetleyici gürbüzdür. Ancak, adım referans sinyallerinden ve düşük frekanslı sinüs referans sinyallerinden, büyük ölçüde östenit fazda olacak gerinim taleplerinde, takibin hatası daha yüksektir. Yüksek frekanslı sinüs referanslarda ise faz geçişi bölgesinde takip hatası dikkate değer ölçüde artmaktadır.



(a)



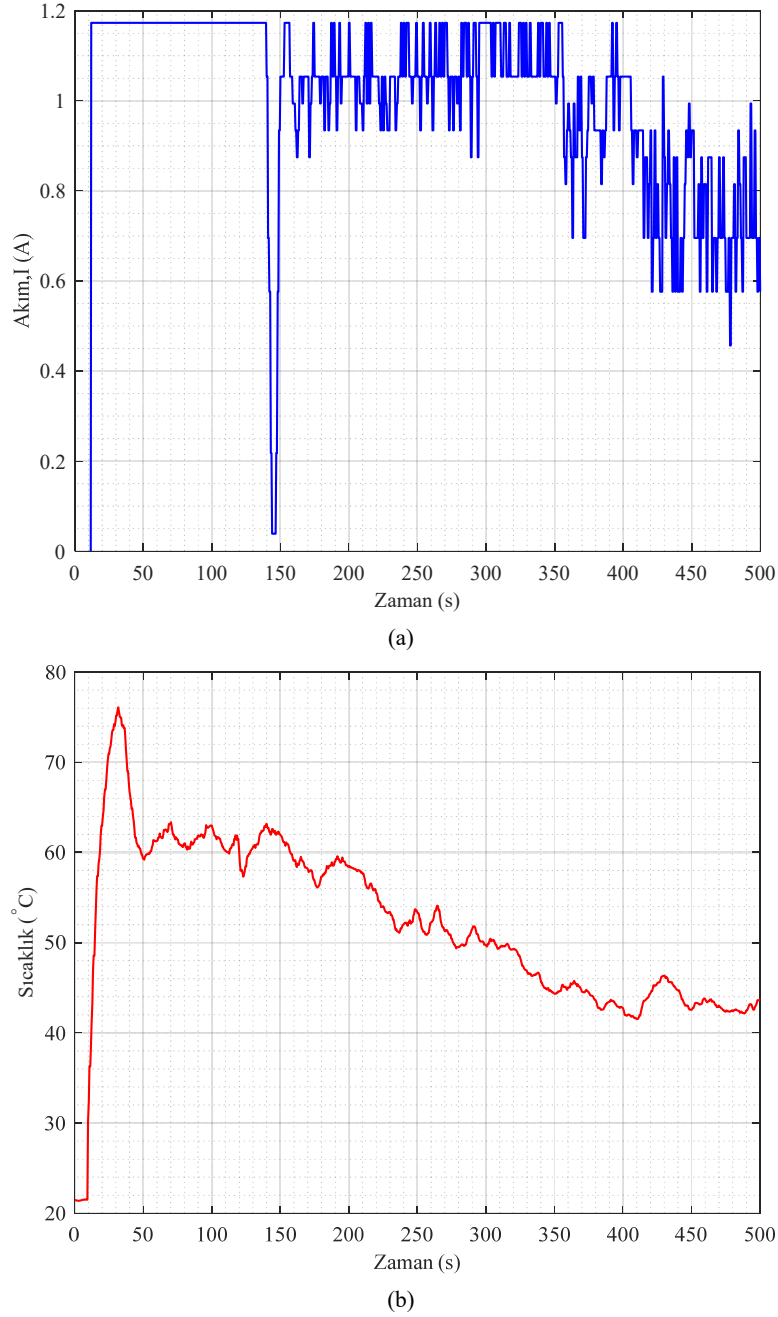
(b)

Şekil 16. (a) Yükteki değişim (The change in load), (b) Adım gerinim referans denetimi (Reference control)

Bu gözlem daha hızlı ısınma-soğuma talebi olduğunda faz geçişinde gizil ısı da kullanılmasıyla, kaybedilen zamanı bulgulası açısından önemlidir. Zira, Şekil 21'de görüldüğü üzere, yüksek frekanslı sinüsel referans gerinim sinyallerinde büyük ölçüde östenit, norm hatası 1.30 ve büyük ölçüde martenzit, norm hatası 1.35 durumlarında takip hatası birbirlerine çok yakın, faz değişimi bölgesindeki, 3.55 değerindeki norm hatadan oldukça düşüktür. Yine, Şekil 9(b)'de 10'uncu ve 20'inci saniyeler arası, Şekil 12(b)'de ilk 20 ve Şekil 13(b)'de ilk 30 saniyede görülebileceği gibi, faz geçişi bölgesinde, akımın, sınırlandırılmış elektriksel akım değerine kadar

aniden çıkıp, diğer durumlara nispetle daha uzun süre bu akımda kalması da dikkate değerdir. Bahsedildiği gibi faz geçişinde gizil ısı enerji harcarken soğuma geçildiğinde % görev döngüsünün, ani düşme talebi nedeniyle, başarımını zorlamakta ve zaman kaybettirmektedir.

Bölgelere ayrılarak denetleyicinin sınanmasının bir başka ön görüşü daha vardır. Bölgelere göre daha iyi çalışan ayrı denetleyiciler kullanıldığında ve bunlar arasında kararlılık şartını sağlayan, kazanç geçişli denetleyiciler denetim başarımını yükseltir mi sorusunun da



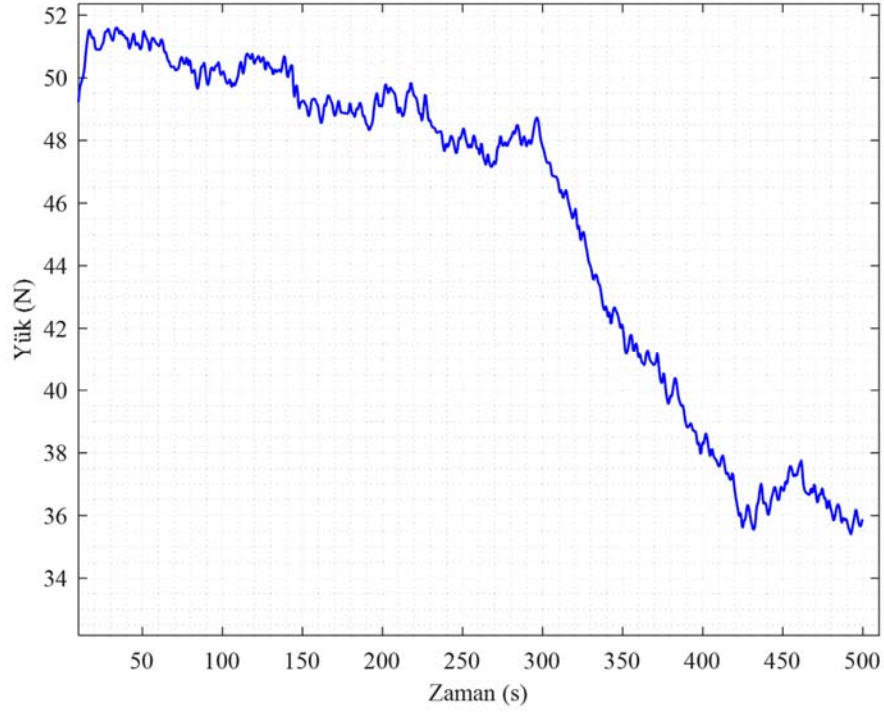
Şekil 17. (a) Akım denetim girdisi (Current control input), (b) Yük değişirken sıcaklık (Temperature during changing load).

cevabı aranmaktadır. Bölgelere göre, özellikle hızlı ısıtma-soğutma talebinin olduğu yüksek frekanslı sinüsel referans gerinim durumu için farklılaşan hataları yaklaştırmak ve genel olarak daha da düşürmek için kazanç geçişli denetleyicinin uygun olabileceği bulgulanmıştır. Bu sonraki bir çalışmanın konusu olabilecek şekilde dikkate değerdir. Ayrıca başarımı daha yüksek yeni denetleyici kazançları, model tabanlı bir denetleyici tasarımı üzerinde çalışılarak elde edilebilir. ŞBA tel denetimi değişken yük altında da sınanmıştır. Denetleyicinin gürbüz olduğu görülmüştür.

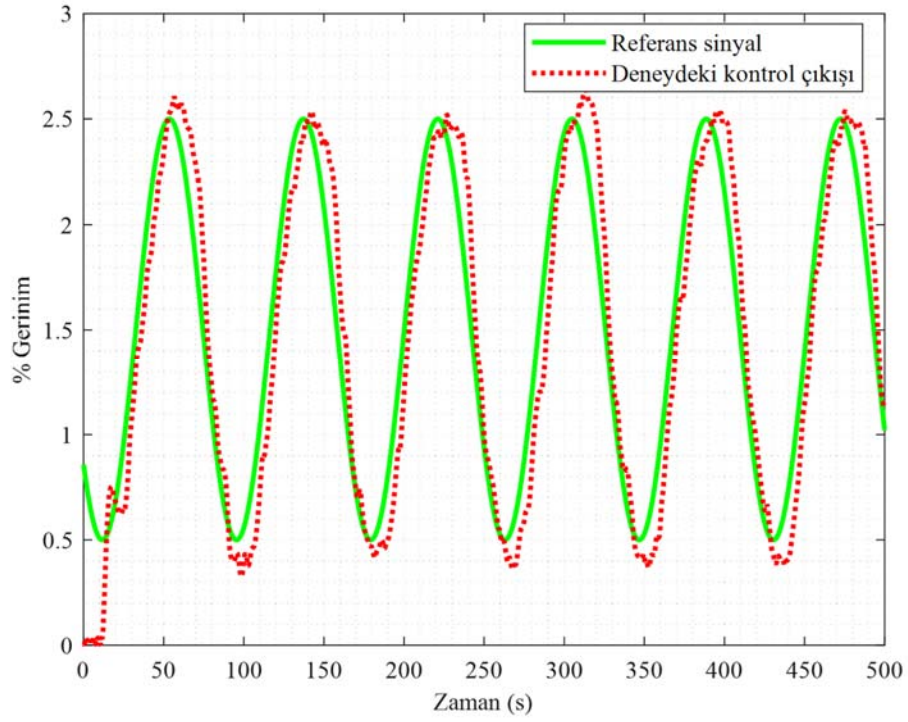
Genel anlamda bir kararsızlık gözlenmemektedir, referans takibi vardır. Ancak, deneyde fiziksel iyileştirmeye, gelecek çalışmalar

açısından, dikkat çekmek yerinde olacaktır. Deneydeki ŞBA tel için referans takibinde bir iyileştirme, elektriksel akımı mümkün olduğunca sürekli ve dinamik tutmaktır.

Bu çalışmadaki DGM sinyalinin, her % görev döngüsüne karşılık gelen 0.064A gibi bir akım bölüntüsünden daha küçük mertebelerle değişen akım, takip başarımını geliştirecektir. Başka bir deyişle, daha az elektriksel enerji kullanarak, referans sinyali etrafında, daha az salınımla takibin mümkün olabileceği değerlendirilmektedir. Bu, daha küçük akımlar verebilen, DGM sinyalinin % görev döngüsü daha hızlı değiştirebilen bir elektronik devre tasarımı ile mümkün olabilir.

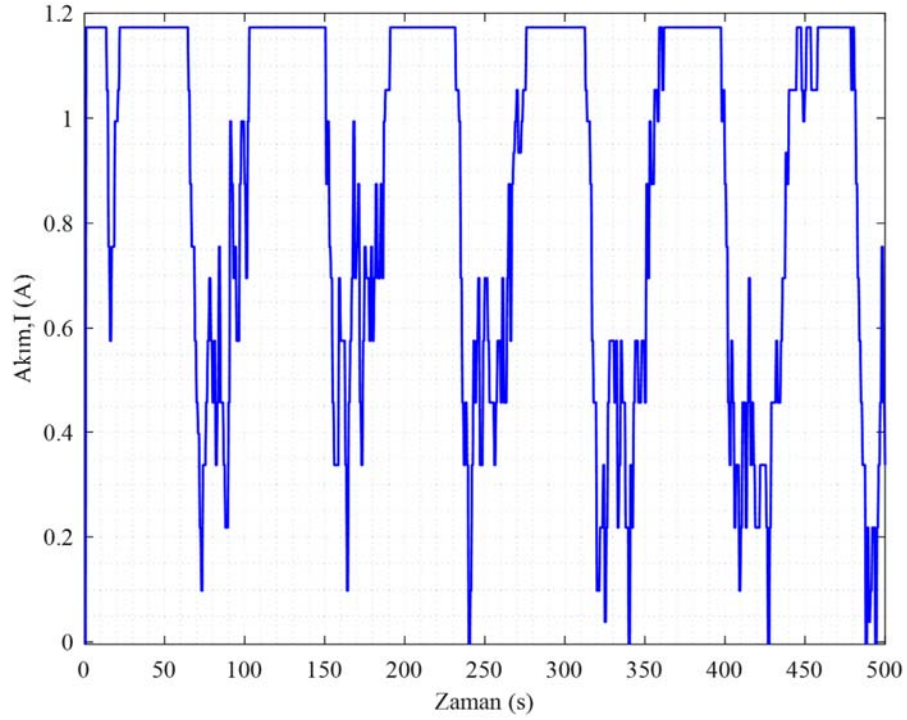


(a)

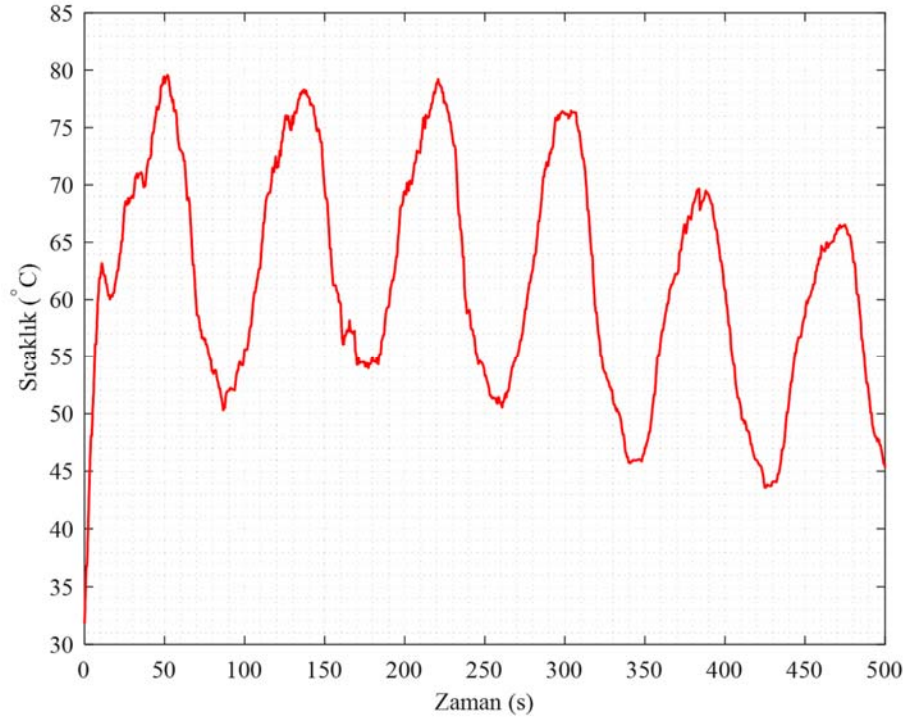


(b)

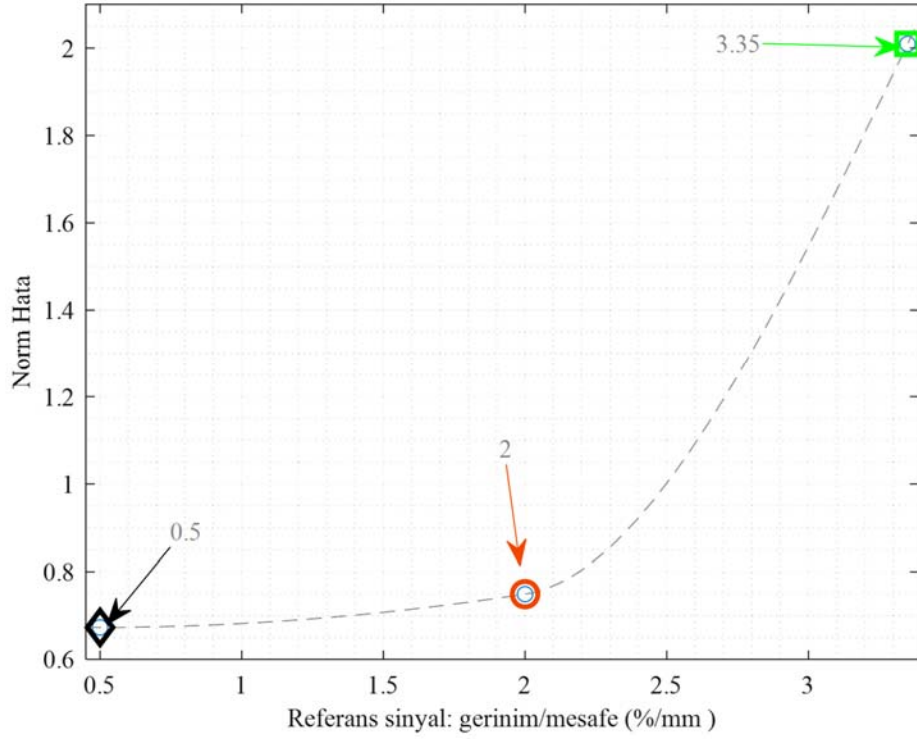
Şekil 18. (a) Yükteki değişim (The change in load), (b) Sinüsel gerinim referans denetimi (Reference control)



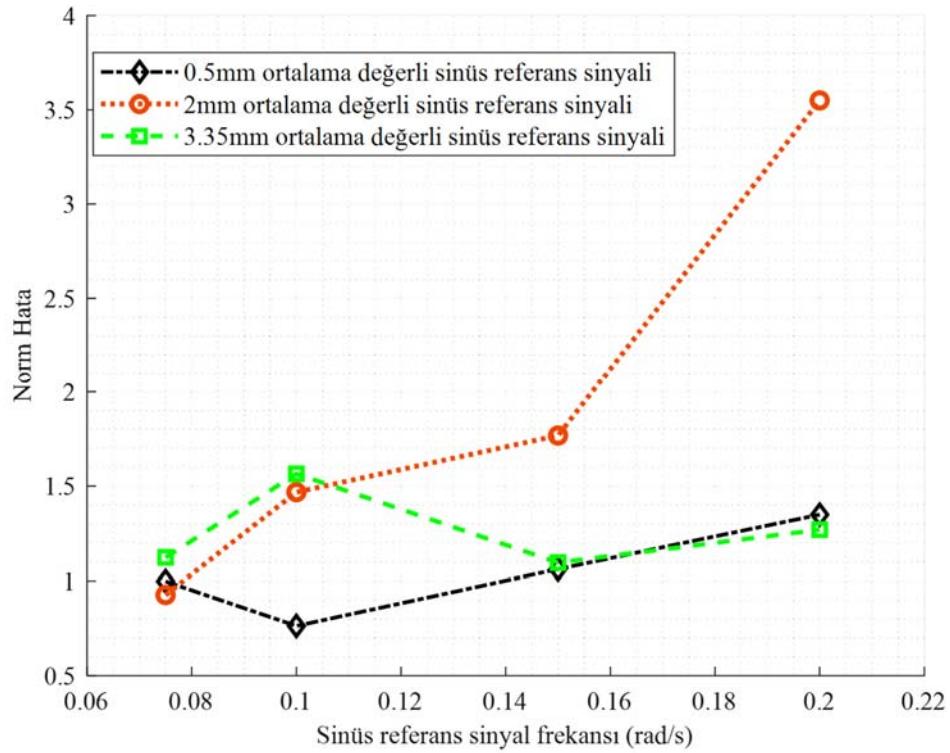
(a)



Şekil 19. (a) Akım denetim girdisi (Current control input), (b) Yük değişirken sıcaklık (Temperature during changing load)



Şekil 20. Adım gerilme referansları için norm hataları (Norm errors for the step strain references)



Şekil 21. Farklı frekanslardaki denetim eylemlerinin norm hataları (Norm errors of the control actions in different frequencies)

Teşekkür (Acknowledgement)

Yazarlar, FHD-2018-17611 ve FHD-2021-19382 numaralı projeler kapsamında sağlanan katkılarından dolayı Hacettepe Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi'ne teşekkürlerini sunarlar.

Kaynaklar (References)

- Lagoudas D.C., Shape memory alloys: modeling and engineering applications, 1st ed., Springer Science and Business Media, LLC, New York, A.B.D., 2008.
- Barbarino S., Flores E. S., Ajaj R. M., Dayyani I. and Friswell M. I., A review on shape memory alloys with applications to morphing aircraft. *Smart materials and structures*, 23 (6), 063001, 2014.
- Epps, J. J., and Chopra, I., In-flight tracking of helicopter rotor blades using shape memory alloy actuators. *Smart Materials and Structures*, 10 (1), 104, 2001.
- Sellitto A. and Riccio A., Overview and future advanced engineering applications for morphing surfaces by Shape Memory Alloy Materials, *Materials*, 12 (5), 2019.
- Koç İ. M., Eray T., Sümer B. and Çerçi N., An active force controlled laparoscopic grasper by using a smart material actuation, *Tribology International*, 100, 317–327, 2016.
- Li, H., Liu, W., Wang, K., Kawashima, K. and Magid, E., A cable-pulley transmission mechanism for surgical robot with backdrivable capability, *Rob. Comput. Integr. Manuf.*, 49, 328-334, 2018.
- Veeramani, A. S., Buckner, G. D., Owen, S. B., Cook, R. C., and Bolotin, G., Modeling the dynamic behavior of a shape memory alloy actuated catheter, *Smart Mater. Struct.*, 17 (1), 015037, 2008.
- Hasnat A., Ahmed S.T., and Ahmed H., A review of utilizing shape memory alloy in structural safety, *AIUB Journal of Science and Engineering*, pages 116–125, 2020.
- Mirzai N. M., Cho H.M., and Jong Wan Hu J. W., Experimental study of new axial recentering dampers equipped with shape memory alloy plates, *Struct. Control Health Monit.*, 28 (3), 1–16, 2021.
- Ozbulut O. E., Hurlbaeus S., and Desroches R., Seismic response control using shape memory alloys: A review, *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, 22 (14), 1531–1549, 2011.
- Tabrizikahou, A., Hadzima-Nyarko, M., Kuczma, M., & Lozančić, S., Application of shape memory alloys in retrofitting of masonry and heritage structures based on their vulnerability revealed in the Bam 2003 earthquake, *Materials*, 14 (16), 4480, 2021.
- Quintanar-Guzmán, S., Kannan, S., Aguilera-González, A., Olivares-Mendez, M. A., & Voos, H., Operational space control of a lightweight robotic arm actuated by shape memory alloy wires: A comparative study, *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, 30 (9), 1368–1384, 2019.
- Lee, J. H., Chung, Y. S., & Rodrigue, H., Long shape memory alloy tendon-based soft robotic actuators and implementation as a soft gripper, *Scientific reports*, 9 (1), 11251, 2019.
- Kohl, M., Popp, M., & Krevet, B., Shape memory micromechanisms for microvalve applications. In *Smart Structures and Materials 2004: Active Materials: Behavior and Mechanics*, 5387, 106-117, SPIE, 2004.
- Nespoli, A., Besseghini, S., Pittaccio, S., Villa, E., & Viscuso, S., The high potential of shape memory alloys in developing miniature mechanical devices: A review on shape memory alloy mini-actuators, *Sensors and Actuators A: Physical*, 158 (1), 149-160, 2010.
- Jeong, J., Yasir, I. B., Han, J., Park, C. H., Bok, S. K., & Kyung, K. U., Design of shape memory alloy-based soft wearable robot for assisting wrist motion, *Applied Sciences*, 9 (19), 4025, 2019.
- Park, S. J., & Park, C. H., Suit-type wearable robot powered by shape-memory-alloy-based fabric muscle, *Scientific reports*, 9 (1), 9157, 2019.
- Ercis O., Keleş Ö., The investigation of open loop performance of electro-pneumatic control actuator system with air intake, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 39 (4), 2329-2342, 2024
- Kılıç E., Şekerci B., Kızılhan H., Başer Ö., Evaluation of position tracking control performance of a variable stiffness ankle exoskeleton robot with various controller types, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 35 (3), 1551-1563, 2020.
- Kılıç E., Başer Ö., Kızılhan H., EMG-based stiffness estimation of ankle joint and real-time implementation on a variable stiffness ankle exoskeleton robot, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 36 (1), 225-240, 2020.
- El-Atab, N., Mishra, R. B., Al-Modaf, F., et al., Soft actuators for soft robotic applications: A review, *Adv. Intell. Syst.*, 2(10), 2000128, 2020.
- Li, M., Pal, A., Aghakhani, A., Pena-Francesch, A., & Sitti, M., Soft actuators for real-world applications, *Nat. Rev. Mater.*, 7 (3), 235-249., 2022.
- Smith, C., Villanueva, A., Joshi, K., Tadesse, Y., & Priya, S., Working principle of bio-inspired shape memory alloy composite actuators, *Smart Mater. Struct.*, 20 (1), 012001, 2010.
- Ilami, M., Bagheri, H., Ahmed, R., Skowronek, E. O., & Marvi, H., Materials, actuators, and sensors for soft bioinspired robots, *Adv. Mater.*, 33 (19), 2003139, 2021.
- Ahmed, F., Waqas, M., Jawed, B., et al., Decade of bio-inspired soft robots: A review, *Smart Mater. Struct.*, 31(7), 073002, 2022.
- Patel, D. K., Huang, X., Luo, Y., Mungekar, M., Jawed, M. K., Yao, L., & Majidi, C., Highly dynamic bistable soft actuator for reconfigurable multimodal soft robots. *Adv. Mater. Technol.*, 8 (2), 2201259, 2022.
- Higueras-Ruiz, D. R., Shafer, M. W., & Feigenbaum, H. P., Cavatappi artificial muscles from drawing, twisting, and coiling polymer tubes, *Sci. Rob.*, 6 (53), eabd5383, 2021.
- Youn, J. H., Jeong, S. M., Hwang, G., Kim, H., Hyeon, K., Park, J., & Kyung, K. U., Dielectric elastomer actuator for soft robotics applications and challenge, *Applied Sciences*, 10 (2), 640, 2020.
- Mukherjee, A., Ali, S. F., & Arockiarajan, A., Modeling of integrated shape memory alloy and Macro-Fiber Composite actuated trailing edge, *Smart Mater. Struct.*, 29 (8), 085005, 2020.
- Tyagi, M., Spinks, G. M., & Jager, E. W., 3D printing microactuators for soft microrobots, *Soft Rob.*, 8 (1), 19-27, 2021.
- Thalman, C., & Artemiadis, P., A review of soft wearable robots that provide active assistance: Trends, common actuation methods, fabrication, and applications, *Wearable Technol.*, 1, 1–27, 2020.
- Villoslada, A., Flores, A., Copaci, D., Blanco, D., & Moreno, L., High-displacement flexible shape memory alloy actuator for soft wearable robots, *Rob. Auton. Syst.*, 73, 91-101, 2015.
- Onder, E. T., Sümer B., Başlamışlı S. Ç., Development of a novel two-way 3D printed flexible spiral composite actuator based on shape memory alloy wire and its control, *Smart Mater. Struct.*, 33 075011, 2024.
- Wang, W., & Ahn, S. H., Shape memory alloy-based soft gripper with variable stiffness for compliant and effective grasping, *Soft Rob.*, 4 (4), 379-389, 2017.
- Chen, B., Shao, Z., Xie, Z., et al., Soft origami gripper with variable effective length, *Adv. Intell. Syst.*, 3 (10), 2000251, 2021.
- Banerjee, H., Pusalkar, N., & Ren, H., Single-motor controlled tendon-driven peristaltic soft origami robot, *J. Mech. Rob.*, 10 (6), 064501, 2018.
- Li, J., Godaba, H., Zhang, Z. Q., Foo, C. C., & Zhu, J., A soft active origami robot, *Extreme Mech. Lett.*, 24, 30-37., 2018.
- Liu, Q., Ghodrati, S., & Jansen, K. M., Design and modelling of a reversible shape memory alloy torsion hinge actuator, *Mater. Des.*, 237, 112590, 2024.
- Goergen, Y., Rizzello, G., & Motzki, P., Systematic Methodology for an Optimized Design of Shape Memory Alloy-Driven Continuum Robots, *Adv. Eng. Mater.*, 26 (2), 2301502, 2024.
- Song, G., Chaudhry, V., & Batur, C., Precision tracking control of shape memory alloy actuators using neural networks and a sliding-mode based robust controller, *Smart Mater. Struct.*, 12 (2), 223, 2023.
- Abdullah, E. J., Soriano, J., Fernández de Bastida Garrido, I., & Abdul Majid, D. L., Accurate position control of shape memory alloy actuation using displacement feedback and self-sensing system, *Microsyst. Technol.*, 27 (7), 2553-2566, 2021.
- Abdullah, E. J., Gaikwad, P. S., Aziz, N., Majid, D. A., & Rafie, A. M., Temperature and strain feedback control for shape memory alloy actuated composite plate, *Sens. Actuators, A*, 283, 134-140, 2018.
- Lynch, B., Jiang, X. X., Ellery, A., & Nitzsche, F., Characterization, modeling, and control of Ni-Ti shape memory alloy based on electrical resistance feedback, *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, 27 (18), 2489-2507, 2016.

44. Awan, A. U., Park, J., Kim, H. J., Ryu, J., & Cho, M., Adaptive control of a shape memory alloy actuator using neural-network feedforward and RISE feedback, *Int. J. Precis. Eng. Manuf.*, 17, 409-418, 2016.
45. Selden, B., Cho, K., & Asada, H. H., Segmented shape memory alloy actuators using hysteresis loop control, *Smart Mater. Struct.*, 15 (2), 642, 2006.
46. Elahinia, M. H., Ashrafiuon, H., Ahmadian, M., & Tan, H., A temperature-based controller for a shape memory alloy actuator, *ASME J. Vib. Acoust.*, 127 (3), 285-291, 2005.
47. Jokar, M., Ayati, M., Yousefi-Koma, A., & Basaeri, H., Experiment-based hysteresis identification of a shape memory alloy-embedded morphing mechanism via stretched particle swarm optimization algorithm, *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, 28 (19), 2781-2792, 2017.
48. Nakshatharan, S. S., Dhanalakshmi, K., & Ruth, D. J. S., Fuzzy based sliding surface for shape memory alloy wire actuated classical super-articulated control system, *Appl. Soft Comput.*, 32, 580-589, 2015.
49. Rahman, S. M., Ahn, K. K., & Anh, H. P. H., A comparative study of position control of a sma actuated manipulator, In 2008 Second International Conference on Communications and Electronics, 29-32, IEEE, 2008.
50. Yousefian, R., Kia, M. A., & Zadeh, M. H., Sensorless resistive-based control of shape memory alloy actuators in locking mechanism, *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, 26 (4), 450-462, 2015.
51. Gómez-Espinosa, A., Castro Sundin, R., Loidi Eguren, I., Cuan-Urquiza, E., & Treviño-Quintanilla, C. D., Neural network direct control with online learning for shape memory alloy manipulators, *Sensors*, 19 (11), 2576, 2019.
52. Lan, C. C., & Fan, C. H., An accurate self-sensing method for the control of shape memory alloy actuated flexures, *Sens. Actuators, A*, 163 (1), 323-332, 2010.
53. Ma, N., Song, G., & Lee, H. J., Position control of shape memory alloy actuators with internal electrical resistance feedback using neural networks, *Smart Mater. Struct.*, 13 (4), 777, 2004.
54. Liu, S. H., Huang, T. S., & Yen, J. Y., Tracking control of shape-memory-alloy actuators based on self-sensing feedback and inverse hysteresis compensation, *Sensors*, 10 (1), 112-127, 2009.
55. Briggs, J. P., & Ostrowski, J. P., Experimental feedforward and feedback control of a one-dimensional SMA composite, *Smart Mater. Struct.*, 11 (1), 9, 2002.
56. Mersch, J., Keshtkar, N., Grellmann, H., et al., Integrated temperature and position sensors in a shape-memory driven soft actuator for closed-loop control, *Materials*, 15 (2), 520, 2022.
57. Du, H., Li, G., Sun, J., Zhang, Y., Bai, Y., Qian, C., & Liang, Y., A review of shape memory alloy artificial muscles in bionic applications, *Smart Mater. Struct.*, 2023.
58. Liu, R., Zheng, H., Hliboký, M., Endo, H., Zhang, S., Baba, Y., & Sawada, H., Anatomically-Inspired Robotic Finger with SMA Tendon Actuation for Enhanced Biomimetic Functionality, *Biomimetics*, 9 (3), 151, 2024.
59. Andreyeva, K., MacRae, G., Migeon, N., Nicol, T., Cros-Coitton, M., & Barnhart, D., Mobility of a Soft Conformable Multi-Limbed Robot Actuated by Shape Memory Alloy Wires, In 2024 IEEE Aerospace Conference (pp. 1-9), IEEE., 2024.
60. Zhu, Y., Jia, Z., Niu, X., & Dong, E., Design and Position Control of a Bionic Joint Actuated by Shape Memory Alloy Wires, *Biomimetics*, 9 (4), 210, 2024.
61. Sundareswari, M. B., Mozhi, G. T., & Dhanalakshmi, K., Adaptive Dual-Layer Sliding Mode Control for Ball on Plate System Driven by Shape Memory Alloy Wire, *J. Inst. Eng. India Ser. B*, 1-9, 2024.
62. Acevedo-Velazquez, A. I., Wang, Z., Winkler, A., Modler, N., & Röbenack, K., Manufacture and Deformation Angle Control of a Two-Direction Soft Actuator Integrated with SMAs, *Materials*, 17 (3), 758, 2024.
63. Shahir, M. M., Mirzaei, M., Farbodi, M., & Rafatnia, S., Extended state observer-based feedback linearization control of shape memory alloy actuator: design and experiment, *Int. J. Dyn. Control*, 1-12, 2023.
64. Nexmetal Corp., <https://nexmetal.com/>, 2024.
65. Önder, E. T., Sümer, B., & Başlamışlı, S. Ç., Estimation of heat transfer model parameters by using recursive least square (RLS) method for a shape memory alloy wire, *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, 34 (4), 379-392, 2023.

