

Araştırma Makalesi / Research Article

Şekil Hafızalı Alaşımlar ile Titreşim Sönümleyici Plak Tasarımı

Oğuzhan NAZLIM^{1*}, Ahmet TAŞKESEN¹

¹ Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Endüstriyel Tasarım Mühendisliği Bölümü, Ankara, TÜRKİYE
oguzhan.nazlim@gazi.edu.tr, taskesen@gazi.edu.tr

Received/Geliş Tarihi: 26.11.2023

Accepted/Kabul Tarihi: 27.12.2023

Özet: Kendilerine özgü karakteristik özelliklere sahip olan Şekil Hafızalı Alaşımlar (ŞHA), son yıllarda üzerinde en çok çalışma gerçekleştirilen malzemeler olarak dikkati çekmektedir. Bu alaşımların Aktif Titreşim Sönümleyici (ATS) olarak tasarlanması, üretilmesi ve kullanımı ile ilgili bilgi vermek amacı ile hazırlanan bu makalede şekil hafızası mekanizması, titreşim sönümleme yeteneği ve ŞHA'ların kullanım alanlarından bahsedilmiştir. Materyal Metot kısmında NiTi ve cam fiber katkı, epoksi matris malzemeli ince dikdörtgen bir ATS plağın üretim aşamalarına ışık tutulmuştur ve üretim değişkenleri tablo halinde sunulmuştur. ŞHA katkı ATS plağın üretim öncesi test faaliyetlerinden bahsedilmiş ve üretim sürecinin her adımını kapsayan detaylı bir akış şeması (metodolojisi) geliştirilmiştir. Bulgular ve Tartışma kısmında, ŞHA takviyeli ATS üretiminde önerilen metodolojinin kritik bir rehber olarak işlev göreceği belirtilmiştir. Deney ve sonuç eleman titreşim verileri grafikler ile sunulmuş ve yorumlanmıştır. Çalışmanın sonuç bölümünde, akış şemasının oluşturulmasının önemi vurgulanmış ve bu metodoloji sayesinde ATS üretimi kolay ve anlaşılır hale getirilmiştir. Önerilen metodoloji ile üretilmiş olan plak gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Aktif titreşim sönümleyici, Kompozitler, Nitinol, Titreşim deneyi

Design of Vibration Damping Plates with Shape Memory Alloys

Abstract: Shape Memory Alloys (SMAs), characterized by their unique properties, have been the focus of extensive research in recent years. This article aims to provide information on the design, production, and application of these alloys as Active Vibration Dampers (AVDs). It mentions the mechanism of shape memory, the vibration damping capabilities, and the various applications of SMAs. The Material and Methods section sheds light on the production stages of a thin rectangular AVD plate made of NiTi and glass fiber-reinforced, epoxy matrix material, with the production variables presented in a table format. The pre-production testing activities of the SMA-reinforced AVD plate are described, and a detailed flowchart (methodology) covering each step of the production process has been developed. In the Findings and Discussion section, it is stated that the proposed methodology in the production of SMA-reinforced AVD will serve as a critical guide. Experimental and finite element vibration data are presented and interpreted through graphs. In the conclusion part of the study, the importance of creating a flow chart is emphasized and thanks to this methodology, ATS production is made easy and understandable. The plate produced with the proposed methodology is shown.

Keywords: Active vibration damping, Composites, Nitinol, Vibration experiment

1. Giriş

Şekil Hafızalı Malzemeler, fiziksel deformasyonlara maruz kaldıktan sonra dışarıdan ısı alımı ile ilk fiziksel hallerine geri dönebilen malzemelerdir. Bu malzemeler polimer ya da alaşım formundadır. Şekil Hafızalı Alaşımlar (ŞHA) ise özel termomekanik yöntemlerle işlenerek belirli sıcaklık değişikliklerine fiziksel tepki verecek şekilde tasarlanmış metal alaşımlardır.

ŞHA malzemelerin kendilerine özgü karakteristik özellikleri, bu malzemelerin içinde bulunduğu fazlara göre değişmektedir. Bu malzemelerin martenzit ve östenit fazları arasındaki temel fark değişen mekanik özelliklerdir. Günümüzde en bilinen ŞHA malzeme, 1960larda keşfedilen NiTi olsa da şekil hafıza mekanizmasının ilk keşfi, Au-Cd alaşımı sayesinde 1932 yılına kadar dayanmaktadır.

Zamanla bakır alaşımlarının da gösterdiği şekil hafızası ilk yıllarda kendisine çok fazla kullanım alanı bulamasa da zamanla bu şekil hafızasının sebebi olan iç kuvvetlerin etkisi, aktüatör tasarımlarını beraberinde getirmiştir.(Kaya, 2008; Ryhänen, 1999).

Maruz kalınan gerilmeler ve ortam sıcaklığı değişkenleri, ŞHA malzemelerin mekanik sistemlerde kullanımı için önemli olmuştur. Ayrıca mekanik sistemlerin ŞHA malzemelerden bekledikleri faydanın cinsine göre ŞHA kullanım alanları farklılık göstermektedir. Bu farklılıklar maddeler halinde aşağıdaki gibi belirtilmiştir. (Akdoğan ve Nurveren, 2002; Kaya vd., 2016)

- Şekil hafızası özelliği, martenzit halindeki bir malzemenin fiziksel deformasyona uğramış olduğu durumda, malzemenin östenit fazına geçirilerek orijinal fiziksel formuna dönmesi olayını ifade etmektedir. Bu özellik sayesinde ŞHA malzemeler, robotik alanında yavaş ve kademeli hareket gerektiren yerlerde ve uçak kanat kontrolleri için aktüatör olarak kullanılmıştır.
- Titreşim sönümleyiciler, farklı fazlarındaki elastisite modülü kaynaklı olarak, iki farklı fazın özelliklerini sisteme katabildiklerinden, sıcaklıkları arttırıldığında östenit faza geçip titreşimin sönümlenmesinde kullanılmıştır.
- Biyo-uyumlulukları ile stent ve ortodonti alanlarında Titanyum gibi biyo-uyumlu bileşenlerden üretilen ŞHA'lar ile sağlık alanında kullanımı yaygınlaşmıştır.
- İletkenlik gerektiren alanlarda altın veya bakır esaslı ŞHA'lar kullanılmışken, Nikel gibi korozyona dayanıklı bileşenlerle paslanmaya karşı yüksek dayanımlı sistemler oluşturulmuştur. İçerdikleri elementlerin yüzde miktarlarına göre yüksek mukavemet istenen alanlarda özelleştirilerek kullanılmıştır.

ŞHA'ların, bir mekanik sistemde kullanılabilmesi için, dikkat edilecek ilk faktör sistemin çalışma sıcaklığı olmuştur. Ortam sıcaklığı ŞHA malzemenin faz yapısını değiştirebileceği için bu malzemelerin kullanıldığı alanlarda sürekli sıcaklık kontrolü yapılması gerekmektedir. Birçok farklı ŞHA malzeme olmakla birlikte Nikel-Titanyum, Bakır-Çinko-Alüminyum ve Bakır-Alüminyum-Nikel en yaygın kullanım alanına sahip 3 alaşım olarak ön plana çıkmaktadır. Bu üç malzemenin karşılaştırmalı özellikleri Tablo 1'de görülmektedir (Huang, 2002; Vasudha ve Uma Rao, 2020).

Tablo 1. En çok kullanılan ŞHA türlerinin karşılaştırma tablosu (Huang, 2002; Vasudha ve Uma Rao, 2020)

	NiTi	CuZnAl	CuAlNi
Termal iletkenlik (20°C) (W/mK)	8.6-18	84-120	30-75
Yoğunluk (Kg/m ³)	6400-6500	7540-8000	7100-7200
Elektriksel direnç (10 ⁶ Ωm)	0.5-1.1	0.07-0.12	0.1-0.14
Young modülü (Gpa)	28-83	70-100	80-100

ŞHA'ların başlıca yetenekleri, yüksek deformasyon oranlarında bile dışarıdan etki olmadan ilk haline gelebilmesi (süperelastisite) ve şekil hafızasıdır. Bu yeteneklerinden kaynaklı olarak titreşim sönümleme yeteneği gibi özellikleri de görülmüştür. ŞHA'ların yukarıda bahsedilen iki ana fonksiyonunda da ilk forma dönmesi, malzemenin kristal yapısında meydana gelen katı faz değişimi sayesinde olmuştur. Ancak süperelastik davranış için tetikleyici, kuvvet iken, şekil hafızası için sıcaklık değişimidir (Otsuka ve Wayman, 1999).

Bu çalışma kapsamında ŞHA'lar tanıtılmış, temel özelliklerinden ve kullanım alanlarından bahsedilmiştir. Literatürde ŞHA malzemelerden üretilen Aktif Titreşim Sönümleyici (ATS) kompozitlerin üretimi ile ilgili karmaşıklık fark edilmiştir. Makalede bu konunun üzerine gidilerek,

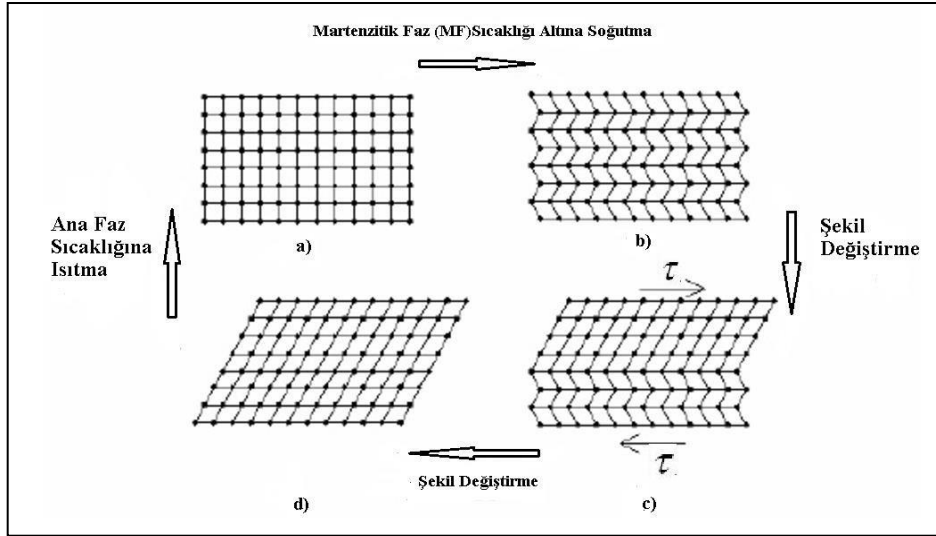
ATS üretiminin bir metodoloji ile yürütülebilmesi amaçlanmıştır. Üretim sürecin her aşaması titizlikle incelenmiş, potansiyel iyileştirme noktaları belirlenmiş ve bu bilgiler ışığında detaylı ve yenilikçi bir akış şeması oluşturulmuştur. Çalışmanın faydası bundan sonra tasarlanacak olan ATS elemanların üretiminin kolaylaştırılması olmuştur.

2. Şekil Hafızalı Malzemelerin Karakteristik Özellikleri

Çalışma kapsamında ŞHA'ların yalnızca şekil hafızası ve titreşim sönümleme özelliği ele alınmıştır.

2.1. Şekil Hafıza Özelliği

Akıllı malzemeler olarak da bilinen Şekil hafızalı alaşımlar, deformasyona maruz kaldıklarında çevre sıcaklığına bağlı olarak orijinal şekillerine geri dönebilen metalik malzemelerdir. Temel olarak iki farklı kristal yapıya sahip olan bu alaşımların, iç yapılarındaki elementlerin oranları, alaşımın karakteristik özelliklerini belirler. Kristal yapıdaki dönüşümler, alaşımın faz dönüşüm sıcaklık aralıklarının üzerinde veya altında gerçekleşmektedir. Eğer alaşım, faz dönüşüm sıcaklık aralığının üzerinde bir sıcaklıkta ise östenitik yapıda, altında ise martenzit yapıdadır. Alaşıma martenzit fazdayken uygulanan deformasyonun eski haline döndürülebilmesi için malzemenin dönüşüm sıcaklığının üzerinde ısıtılmasını yani östenit faza geçirilmesi gerekir. Bu olaya "şekil hafıza etkisi" denir. Şekil 1'de gösterilen şekil hafızalı alaşımın iki boyutlu incelemesinde, Şekil 1a'da östenit fazdaki alaşım, iç yapısını Şekil 1b'de gösterildiği gibi martenzite dönüştürmek üzere soğutulmuştur. Aynı sıcaklıkta, Şekil 1c'de gösterildiği gibi alaşıma bir şekil değişikliği uygulanmış ve çevrimin tamamlanması için Şekil 1d'de alaşım ısıtılarak yeniden östenit fazına döndürülmüştür (Arın, 2008).



Şekil 1. Şekil hafızalı etkisi gösterimi (Arın, 2008)

Bazı ŞHA'ların tek yön yerine çift yönlü şekil hafızasına sahip olduğu görülmüştür. Bu malzemelerde hem soğutma hem de ısıtma hallerinde farklı şekil değişimleri gözlenmiştir. İki yönlü hafızaya sahip malzemelerin şekil hafızası kapasitesi, tek yönlü şekil hafıza yeteneği olan malzemelere göre daha azdır (Arın, 2008).

2.2. Titreşim Sönümleme Özelliği

ŞHA malzemelerin titreşim sönümleme alanında kullanılmasına literatürde çokça rastlanılmıştır. Bu malzemeler sayesinde titreşim üreten sistemlerin titreşimleri kontrollü şekilde azaltılmıştır. Titreşim kontrolü sıcaklık kontrolü ile yapılmıştır. Titreşim sönümleme özelliği alaşımın östenit fazındaki yüksek elastisite modülü sayesinde ortaya çıkmıştır. ATS elemanları bu sayede ortaya çıkmıştır. Bu

elemanlar dış bir enerji kaynağından güç alarak çalışan ve dinamik bir sistemin istenmeyen titreşimlerini azaltmak veya ortadan kaldırmak için tasarlanmış bir cihaz olarak tanımlanmıştır (Hashemi ve Khadem, 2006).

Titreşim, bir sistemin denge noktası etrafında mekanik salınım gerçekleştirdiği bir süreç olarak tanımlanmıştır ve bu süreç hem rastgele hem de periyodik biçimde ortaya çıkabilmektedir. Titreşim genellikle istenmeyen bir etki olarak algılansa bile, amacı titreşim üretmek olan motorlar ve ses iletimi gibi alanlarda titreşimin gerekli olduğu gözlemlenmiştir.

Mekanik sistemlerde titreşim istenmeyen bir faktör olarak ele alındığında ise titreşimin enerji israfının bir göstergesi olduğu belirtilmektedir. İstenmeyen titreşimlerin ölçümü yapılarak muayene gerçekleştirilen endüstriyel alanlar vardır. İçten yanmalı motorlar çalışırken, ısı üretiminin yanı sıra titreşimlerin de meydana geldiği, bu titreşimlerin azaltılması için balans ayarlamalarının veya titreşim sönümleyici elemanların kullanılabileceği gözlemlenmiştir.

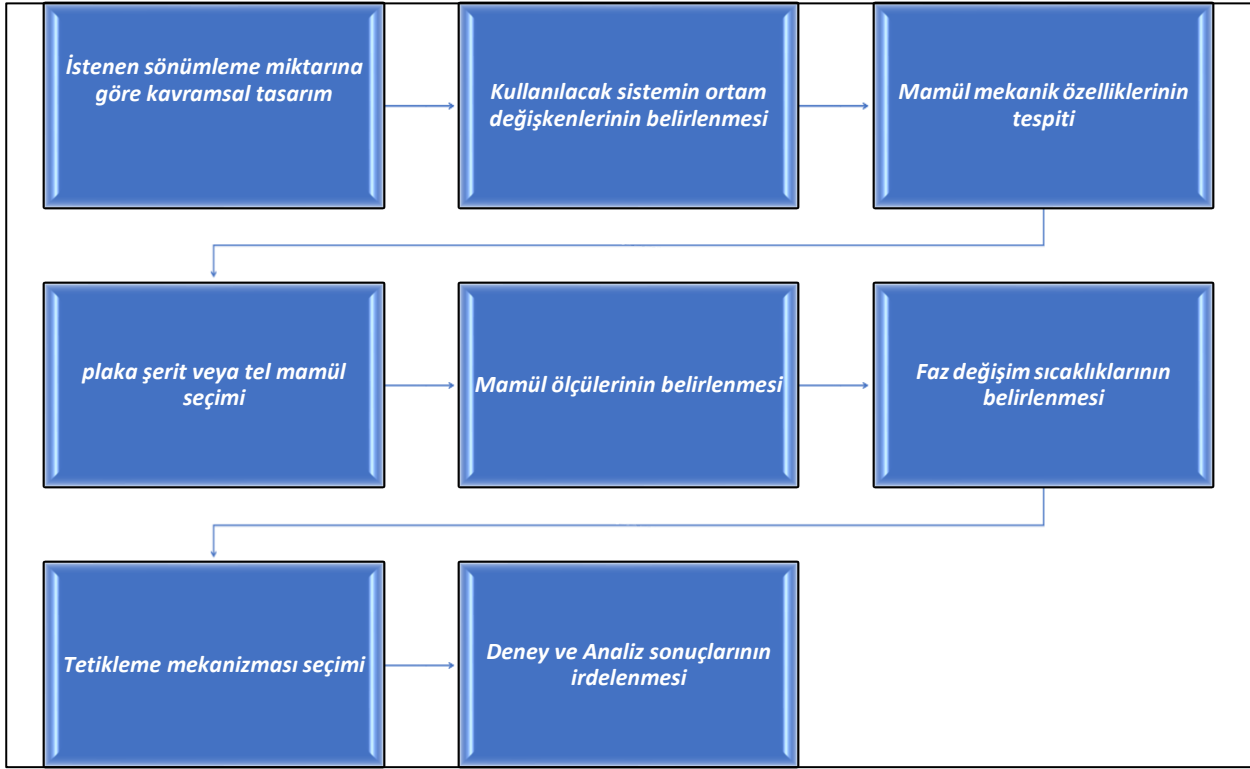
İstenmeyen titreşimlerin önüne geçilmesi konusunda farklı yöntemler vardır. Yapılacak tasarımlarda geometrilerin değiştirilmesi veya farklı mekanik özelliklere sahip malzemelerden yapıya kirişler eklenmesi gibi yöntemler kullanılmıştır. Bu tarz yaklaşımlar ile yapılan iyileştirmeler, pasif titreşim sönümleme mekanizmalarına örnektir. Aktif sistemlerde ise sistemdeki artan titreşim sensörler ile algılandıktan sonra, aktüatör olarak kullanılan malzeme indüklenerek sisteme fayda sağlar (Balaji vd., 2015).

Pasif Titreşim Sönümleyici Sistemler: bir sönümleyici, bir elastik elemandan oluşur. Hareket denklemleri bu elemanların sistem tepkilerine göre şekillendirilip, Newton'un 2 yasası, D'Alembert veya Lagrange gibi yöntemlerle ortaya konulmuştur. Örnek olarak plakların yüzlerine eklenebilen profil bazlı kirişler görülmüştür. Temel fonksiyon sisteme eklenen kiriş veya farklı profiller ile kütle artımı vasıtası ile titreşimin sönümlenmesi olarak belirtilmiştir (Kidner ve Brennan, 1999).

Aktif Titreşim Sönümleyici Sistemler: Sistemlerinde sensörler ve güç kaynağı bulundurmaktadır. Sensörler titreşimi algılar ve istenmeyen seviyede ise güç kaynağı ile ısı vererek sistemi aktif hale getirirler. Aktif sistemler optimizasyona daha açık sistemlerdir. Otomasyon sistemleri ile uyumludur. (Herold ve Mayer, 2016).

3. Materyal ve Metot

Titreşim sönümlenmesinde kullanılan NiTi malzemelerin özellikleri ve fiziksel yapılarına bakılacak olursa faz değişim sıcaklıkları ve mamul çeşidi önem kazanmaktadır. Tüm değişkenler bir arada düşünüldüğünde üretim işleyişi Şekil 2' de görünen Akış Şemasında olduğu gibi oluşturulmuştur.



Şekil 2. Titreşim sönümleyici tasarımı genel üretim akış şeması

Şekil 2’de görünen akış şeması daha da kapsamlı hale getirilmiştir. Bunun için Tablo 2’de görülmekte olan değişkenler kullanılmıştır. Tüm bu değişkenler ve tasarım süreci boyunca ortaya çıkacak problemler akış şemasının hatlarını belirlemiştir. Ortaya çıkacak işleyiş ise genel bir metodoloji oluşturmak için yeterli olmuştur.

Tablo 2. Kapsamlı akış şemasının değişkenleri

Adım	Akış Şeması Değişkenleri
1	ATS kompozit plak tasarımına karar verme
2	Sistem çevresel faktörlerini inceleme (örn., sıcaklık, nem)
3	Sistemin nem seviyesini değerlendirme
4	Kompozitin tek takviyeli olup olmayacağına karar verme
5	Diğer kompozit bileşenlerini belirleme
7	ŞHA (Şekil Hafızalı Alaşım) ürününün formunu belirleme
8	ŞHA serilim stilini seçme
9	Kompozit üretim yöntemini seçme
10	Kompozit için aktivasyon mekanizmasını seçme
11	Aktivasyon hızının gereksinimini belirleme
12	Üretim metodolojisi için gerekli kabulleri belirleme
13	Sonlu eleman analizleri yapma
14	Titreşim testi türünü seçme (örn., lazer genlik ölçümü, çekiç testi)
15	Titreşim testi ve sonlu eleman verilerini karşılaştırarak yeterli sönümlenmeyi sağlama

Makale kapsamında kavramsal tasarımı yapılmış olan ATS’nin takviye malzemeleri NiTi, cam fiber olarak belirlenmiştir. Matris malzemesi ise epoksi reçinedir. ATS bir dikdörtgen ince plak olarak tasarlanmıştır. İlk olarak kompozitin hangi şartlarda çalışacağı kesinleştirilmiştir. Oda sıcaklığında

çalışacak bir sistem için, eğer östenit fazın sıcaklığı oda sıcaklığından daha düşük kalırsa sistem sürekli olarak aktif kalır. Bu sebeple malzeme seçiminde östenit sıcaklık her zaman çalışma sıcaklığının üstünde seçilmiştir.

ATS plağın kullanılacağı ortam ve bu ortama uygun östenit sıcaklık seçildikten sonra geometri olarak dikdörtgen plak seçildiğinden takviye malzemelerin sayısı ve kullanılacak malzemenin cinsi bu aşamada belirlenmiştir. Örneğin elektrik verilerek aktifleştirilecek bir titreşim sönümleyicide matris malzemenin ve diğer takviyenin elektrik iletkenliğine dikkat edilmiştir. Karbon fiber olarak düşünülen bir takviye elemanı bu anlamda uygun olmamıştır. Bunun sebebi karbonun iletkenliği yüzünden telden geçen akımı kendi üzerine alma (kısa devre) ihtimali olmuştur. Takviye sayısı ve cinsi belirlendikten sonra kompozit serilimi ve kullanılacak NiTi mamulün şekli belirlenmiştir.

Sıralanan ve örneklenen değişkenler dışında kompozit plağın üretim yöntemi de önemli olmuştur. Elle yatırma yönteminin takviye elemanlarının homojen dağılmasını ve üzerlerine gelen yüklerin homojen dağılmasını engelleyebileceği düşünülmüştür. Bu yöntem yerine vakum infüzyon yöntemi kullanılmıştır. Vakum infüzyonun avantajı takviye ve matris malzemelerin birbirleri içinde daha homojen dağılımının sağlanması ve hava kabarcığı gibi etkenlerden kaynaklı kayma risklerinin en aza inmesidir. Kompozitin kendi içinde mümkün olduğunca homojen hale gelmesinin aktif titreşim sönümleyiciler için pozitif yönü, östenit fazın etkisinin daha belirgin olarak ortaya çıkabilmesi olmuştur.

Bir diğer aşama olan aktifleştirme yönteminin seçiminde NiTi için elektrik verme yöntemi seçilmiştir. Alternatif olarak harici sıcaklık artırma (ısıtıcı ped) yöntemlerine de rastlanmıştır. Harici sistemde ısıtıcı pedler kullanılarak kompozitin tamamının ısıtıldığı görülmüştür. Bu yöntemin kullanılabilmesi için kompozit plağın ısıl geçirgenliği çok iyi olmalıdır. Aksi takdirde nötr düzlemdeki NiTi malzemede sıcaklık artışı olmayacağından titreşim sönümlemesi beklenemez. Eğer NiTi takviye tel değil de şeritler veya plak şeklinde kompozite yerleştirilecekse yüksek watt değerlerine sahip film pedlerin kullanılabilmesi düşünülmüştür. Yalıtkan bir matris malzeme içinde tel formundaki NiTi malzemeye elektrik verilmesi durumunda, direnç kaynaklı sıcaklık artışı sağlanarak NiTi östenit faza geçirilmiştir.

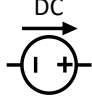


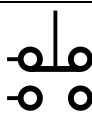




Aktif titreşim sönümleyici her sistemin kullanılacağı ortama göre aktifleşme süresi de önemlidir. Tellerin kullanımına karar verildikten sonra tellerin elektrik akımı karşısındaki ısınma karakteristiklerinin raporlanması gerekmektedir. Hangi çaptaki ve hangi uzunluktaki telin kaç saniyede östenit sıcaklığına geçtiğinin bilinmesi kullanım sırasındaki beklentilerin karşılanması noktasında fikir verir.

0,5mm çapta ve östenit sıcaklığı 45 santigrat derece olan bir NiTi telin 40cm uzunluğunun aktifleşip aktifleşmediğinin anlaşılması için sıcaklık ölçerlerin yanı sıra malzemenin üretimi sırasında kazandığı şekil hafızasını gösterip göstermediğine de bakılmıştır.

Geometri, çevre ve kullanım şartları, mamul seçimi, kompozit üretim yöntemi ve tetikleme yöntemi belirlendikten sonra kullanılan mamullerin teorik olarak sağlamlasının yapılması gerekmektedir. Örneğin alınan NiTi telin özelliklerinin doğrulanması çekme testi ile yapılmıştır. (Johe, 2009) Kullanılacak cam fiberin örgü çeşit ve metrekare ağırlığının doğrulanması elzemdir. Tüm malzemelerin bir araya gelip oluşturduğu kompozit plağın mekanik özelliklerinin daha sonra yapılacak olan analiz sonuçları ile tutarlı olarak ilerlemesi için ön kontrol şart olmuştur.

Hatasız olarak üretildiği kabul edilen, titreşim sönümlemesi amacı ile üretilen, NiTi ve cam fiber katkılı kompozit plağın deneylerinin yapılması noktasında ihtiyaç duyulan malzeme ve ekipmanlar Tablo 3'te gerekçe ve kullanım alanlarına göre belirtilmiştir. Ayrıca Şekil 3 aracılığıyla elemanların görünümüleri verilmiştir.

Tablo 3. Aktifleştirme mekanizması deneyleri için gereken teçhizatlar

	Gerekeçe	Nitelik	Şematik Gösterim	Adet	Nesne
Ayarlanabilir Güç Kaynağı	Tellere elektrik akımı verilmesi	0-15V 0-60A ayarlı		1	a
Termostat Röle devresi	Elektrik akımının sıcaklığa göre kontrolü	0-100 santigrat derece arasında alarmlı ve tepe sıcaklığı ayarlı		1	b
Yüksek akım rölesi	Anlık yüksek akım ve kısa devre koruması	Ayarlı minimum 30 amper değerinde		1	c
Devre Anahtarı Tesisatı	Devre açıp kapanması	-		1	d
Yüksek Akım Telleri	Sıcaklığa dayanıklı olup üzerine en az elektriksel direnci alacak	Bakır tek tel 100 amperlik		2	e
100K ohm Termistör	Sıcaklık ölçümü	Pin uçlu 0-200 santigrat derece aralığı ölçebilen		2	f
Termal veya kızılötesi sıcaklık ölçer	Bölgesel sıcaklık ölçümü	0-200 santigrat derece arasını 1 erece farkla ölçebilen		1	g
NiTi tel	Sönümleme elemanı	Östenit sıcaklığı belirlenmiş		1	h

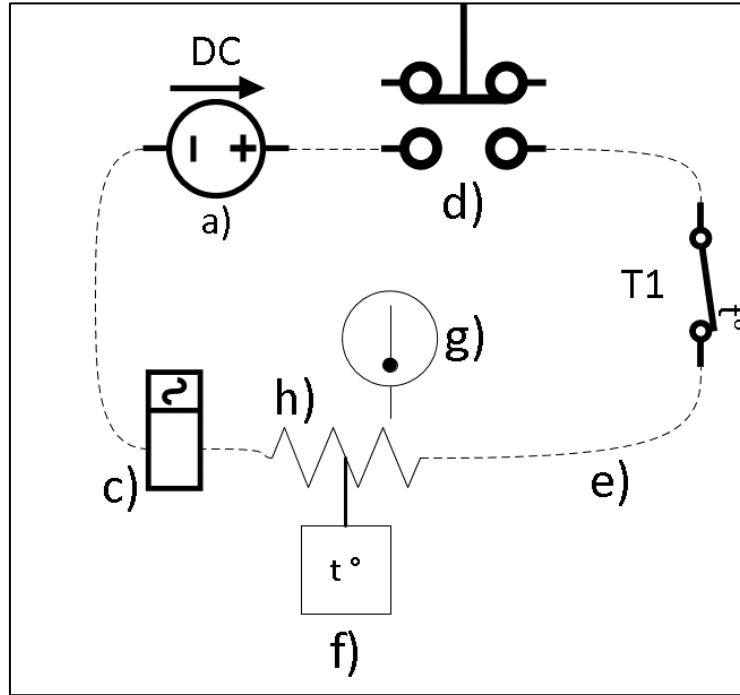


Şekil 3. Tablo 3'te gösterilen elemanların gösterimi; a) Güç kaynağı, b) Termostat röle devresi, c) Yüksek akım rölesi, d) Devre anahtarı, e) Yüksek akım kablosu, f) Termistör, g) Kızılötesi sıcaklık ölçer, h) NiTi tel

Kullanılan sistemin gereksinimlerine göre aktifleşme süresinin ölçümü noktasında, üretilecek kompozitin boyutlarına göre kullanılacak olan NiTi tele akım verilmiş ve şekil hafızası tepkisine bakılmıştır. Boy ve çapın önemli olmasının sebebi, bu değişkenlerin her birinin elektriksel direnci etkilemesidir. Tablo 4’te örnek olarak alınan 40 cm ve 1 mm çaptaki NiTi telin aktifleştirme süreleri verilen akıma göre gösterilmiştir. Ayrıca aktifleşme süresi ölçümü deney düzeneği Şekil 3’te verilen elamanların harf kodları ve Tablo 3’te verilen şematik gösterimleri ile Şekil 4’te gösterilmiştir.

Tablo 4. 1 mm çapta NiTi tel için akım ve aktifleşme süresi tablosu

Volt-Akım	Ø 1mm NiTi östenit 50°C aktifleşme süresi
1V-1A	15sn
1V-2A	9sn
1V-3A	5sn
2V-1A	8sn
2V-2A	4sn
3V-1A	5sn
3V-2A	2sn
3V-3A	1sn
5V-4A	0.3 sn



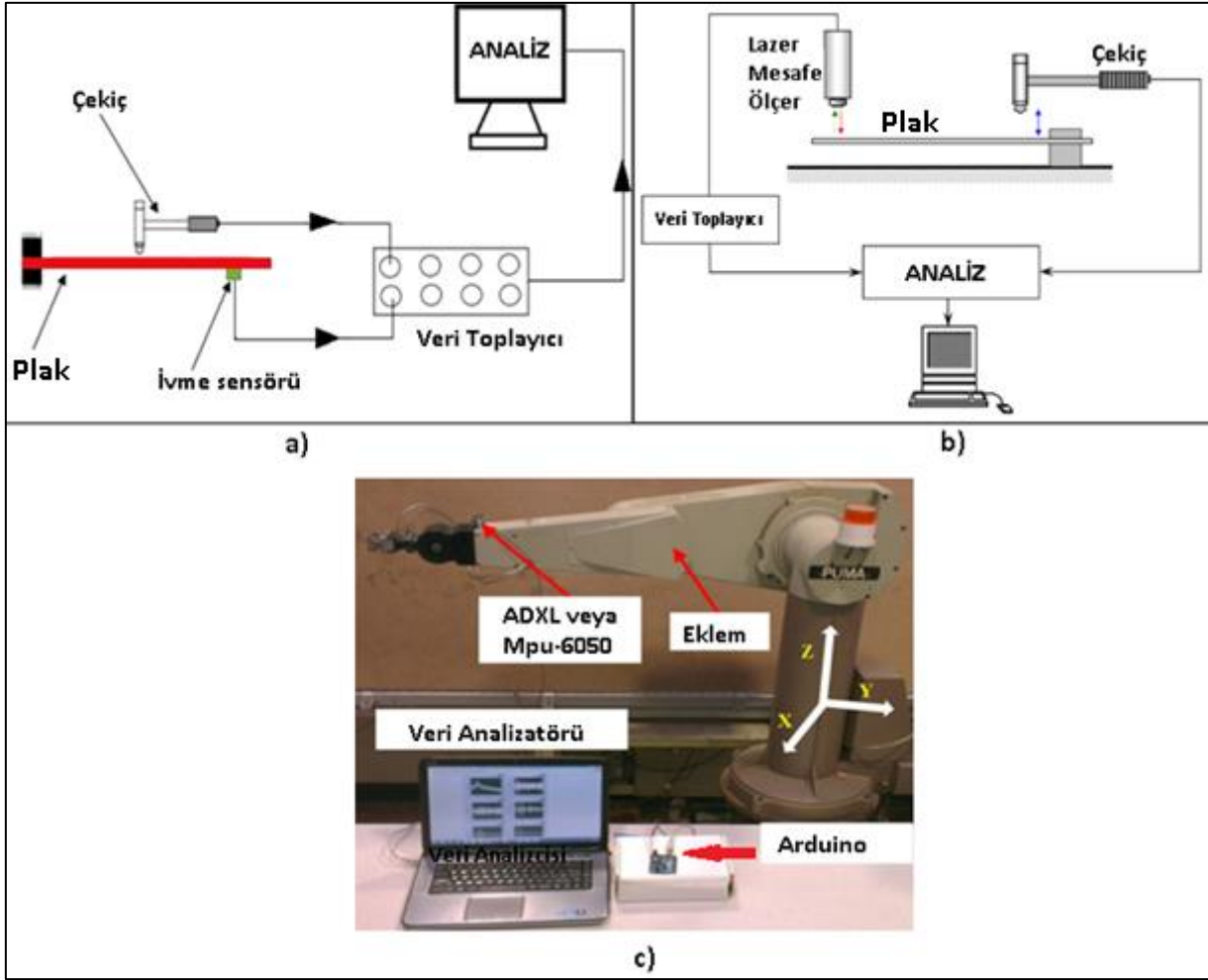
Şekil 4. Aktifleşme süresi deneyi görseli

Aktifleşme süresi tespitinden sonra üretilecek ATS eleman için kullanılacak değişkenlerin çoğu belirlenmiş olarak ortaya çıkar. Bu kabuller aşağıda sıralanmıştır.

- Üretim metodolojisi oluşturulmaya çalışılan ATS plak 100x300x2mm kalınlığındadır.
- Takviye sayısı iki ile sınırlandırılmıştır.
- Titreşim deney ve sonlu eleman analizleri kısa kenarından ankastre ve diğer kenarları serbest olacak şekilde sınır şartlarına sahiptir.
- Kompozit matris olarak epoksi reçinedir
- NiTi tel mamul kullanılır ve nötr eksendedir.
- Telin östenit sıcaklığı 45 °C -50 °C arasında seçilmiştir.

- Tel 1mm çaptadır.
- Vakum infüzyon ile üretilmiştir.
- 3v 3A lik bir elektrik kullanılacaktır.
- Tele elektrik verilerek östenit hale geçiş sağlanmıştır.

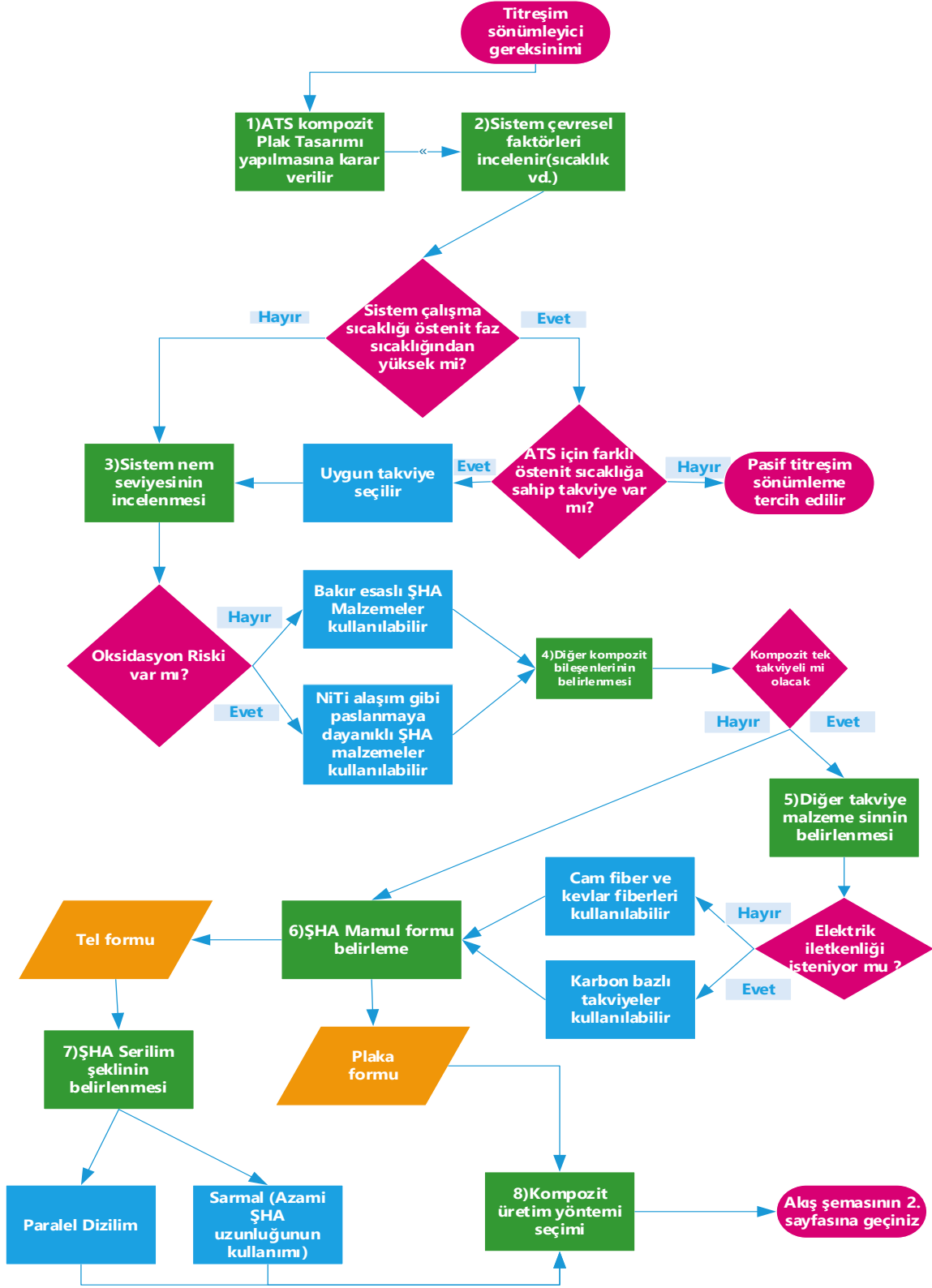
Aktifleştirme mekanizması deneylerinin yanı sıra titreşim sönümlenmesi yeteneğinin araştırılması için de bir deney düzeneği oluşturulması gerekmiştir. Titreşim deneylerinde kullanılan teçhizatlar farklılık gösterir ve en çok kullanılan üç yöntem maddeler halinde aşağıda verilmiştir.



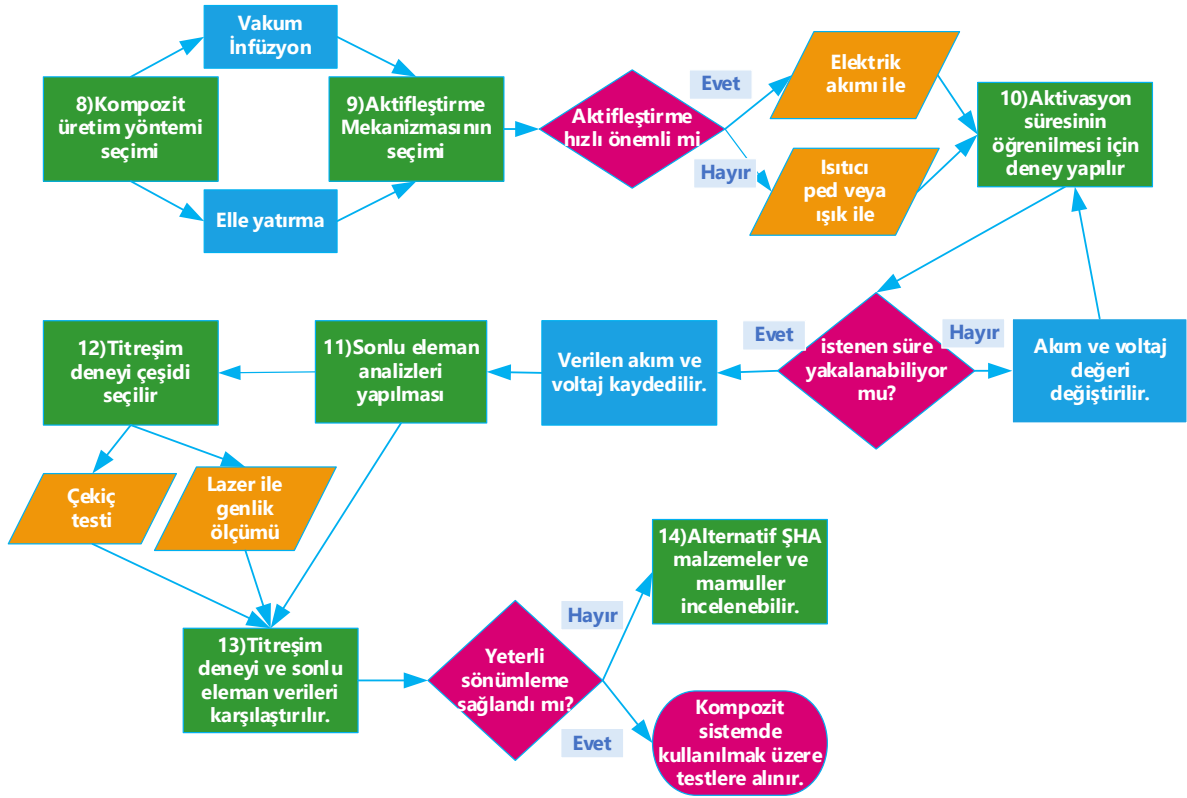
Şekil 5. a) Çekiç testi şeması (Prabhu, 2016), b) Lazerli titreşim ölçme mekanizması (Berthelot vd., 2008), c) Arduino ile titreşim ölçer şeması (Komarizadehasl vd., 2021)

- Çekiç testi ile titreşim deneyi: Bu yöntemde çekiç vasıtası ile titreşim ölçümü yapılacak eleman titreştirilmiş ve ivme ölçerler ile genlikler kaydedilmiştir. Bu işleyiş Şekil 5a'da görülmektedir.
- Lazer ölçümlü titreşim deneyi: Lazer ile genlik ölçümü yapılan yöntemdir. Sıradan çekiç testine göre daha pahalı ancak doğruluğu yüksek bir yöntem olarak öne çıkmıştır. Yüksek doğruluğun sebebi ivme sensörlerinin kullanılmaması ve uzaktan ölçüm yapılmasıdır. Şekil 5b'de temel elemanları gösterilmiştir.
- Arduino kartlar ile titreşim deneyi: Titreşim motoru ve nano titreşim sensörleri (Mpu veya adxl) kullanılarak yapılır. Bilgisayar kontrollü bir sistem oluşturulmuştur. Tüm titreşim verileri kayıt altına alınır. Hazırlanması karmaşık ancak ucuzdur. Şekil 5c'de elemanları gösterilmiştir.

Materyal metot bölümünde gerekliliğinden bahsedilen ve daha önce bir şema halinde ayrıntılı şekilde gösterilmemiş olan, Şekil 2’de genel formu gösterilen akış şeması, Şekil 6 ve devamı niteliğinde olan Şekil 7’de ayrıntılı şekilde gösterilmiştir.



Şekil 6. Epoksi malzeme kullanılan ve vakum infüzyon yöntemi ile üretilen ATS'nin temel üretim akış şeması



Şekil 7. Epoksi malzeme kullanılan ve vakum infüzyon yöntemi ile üretilen ATS'nin temel üretim akış şeması

Şekil 6 ve Şekil 7'de gösterilmiş olan akış şemasında gösterilen aşamalar ve kararlar, kullanılacak yönteme göre değişiklik göstermiştir.

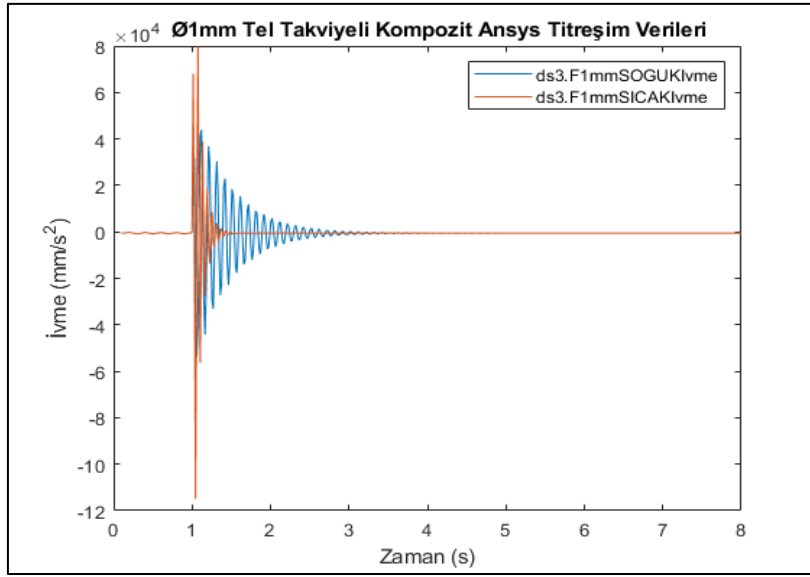
3. Bulgular ve Tartışma

Makalede ŞHA malzemeler hakkında temel bilgiler, kullanım alanları ve kullanılırken dikkat edilmesi gerekenlerden bahsedilmiştir. Bu genel anlatım daha sonra ŞHA malzemelerden NiTi üzerinde yoğunlaşmış ve takviye olarak NiTi kullanılan kompozit bir plaktan ATS sistem üretilmesi aşamalandırılmıştır. ATS sistemlerin gereksiniminden yola çıkarak üretim ve test faaliyetleri makalede belirtilmiştir. Üretilmesi hedeflenen plak için değişkenler belirtilmiş ve açıklanmıştır. Bahsedilen tüm aşamalar farklı sistem gereksinimlerine göre değiştirilebilse de oluşturulan akış şemasının hedefi daha dardır. Bu hedef dikkörtgen cam fiber katkılı kompozit plağın NiTi ile ATS sisteme dönüştürülmesidir. Hedefin dar tutulması işleyişin daha anlaşılır olmasını sağlamıştır. Pratik kullanıma yönelik bu akış şemasının bilimsel olarak da irdelenebilmesi mümkündür. Kompozitin teorik analizinin yapılabilmesi için Brinson yaklaşımı (Brinson, 1993) ve hareketlerinin irdelenmesi için de klasik kompozit plak teorisi ya da birinci dereceden kayma deformasyon teorisi kullanılabileceği görülmüştür (Akavci vd., 2007). Bu çalışmada amaç üretim metodolojisi olduğundan bu faktörler çalışma dışında tutulmuştur.

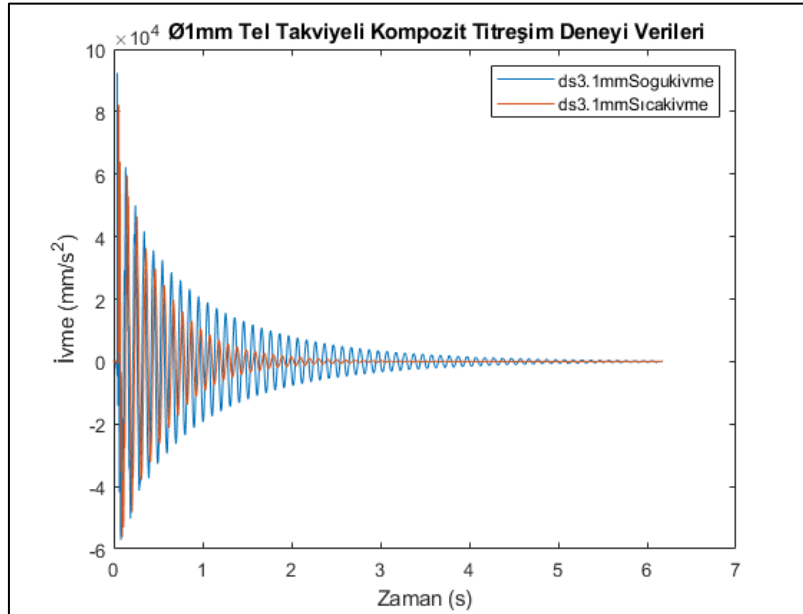
Yapılan irdellemeler ve deneyler sonucunda, plak titreşimlerinin sönümlenmesi mekanizması oluşturulması safhası incelenmiş ve alternatifler sunulmuştur. Makalede plak titreşimleri üzerinde durulsa bile ATS elemanların geometri kısıtlaması olmadan titreşim sönümlenmesinde kullanılabileceği görülmüştür.

Ancak tel veya şerit mamul için martenzit halde iken vakum infüzyon yöntemi zorlayıcı olduğu görülmüştür. Bunun sebebi ŞHA malzeme geometrisinin (martenzit halinin) kompozit geometrisine uygulanmasının zorluğu olmuştur. Tel rulo halde gelen belirli çaptaki ŞHA malzemenin plak içine gergin ve düz halde yerleştirilmesi zor olduğundan, NiTi mamul alınırken istenilen serilim formatında kalıplama yapılmalıdır. Bu üretim safhası için bahsedilebilecek en önemli öneridir.

İdeal şekilde üretildiği kabul edilen ATS plak üzerinde Ansys sonlu eleman analizi ve deneyler yapılmıştır. Grafiklerde turuncu ile gösterilen veriler 50 °C, mavi ile gösterilen veriler 20 °C ŞHA sıcaklığında ölçülmüş verilerdir. Bir başka deyişle ATS plağın aktif hali 50 °C ve aktifleştirilmemiş hali 20 °C ve mavi ile çizdirilmiştir. Yapılan analizler neticesinde, ivme genliklerinin 50 °C de hem analizde hem deneyde daha hızlı düşüş gösterdiği görülmüştür. 1mm tel ile oluşturulmuş dikdörtgen plağa ait Ansys sonlu eleman analiz sonuçları grafiği Şekil 8’de ve deney sonuçları Şekil 9’da görülmektedir.



Şekil 8. 1mm tel ile oluşturulmuş dikdörtgen plağa ait Ansys verileri (ivme zaman grafiği)

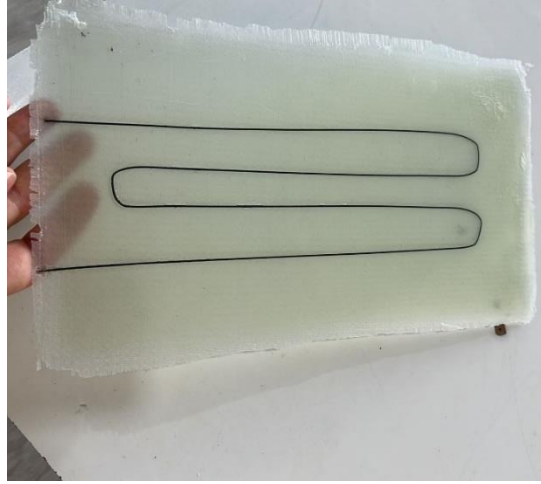


Şekil 9. 1mm tel ile oluşturulmuş dikdörtgen plağa ait deney verileri (ivme zaman grafiği)

Deney verileri ile Ansys verileri arasındaki farklar deney mamulü üretimindeki hatalardan kaynaklanmaktadır.

4. Sonuçlar

ŞHA takviyeli kompozit (ATS) bahsedilen metodolojiye göre üretilmiştir. Akış şemasının kullanılması halinde üretim hedefi belirli ve açık olduğu için üretim masrafları ve zamandan tasarruf edilmiştir. Metodolojinin genişletilebileceği veya sadeleştirilebileceği öngörülmektedir. Bu durum sonraki çalışmalar için öneri niteliğindedir. Bu çıktı sayesinde ATS üretimi kolaylaşmış ve kavram kargaşası ortadan kaldırılmıştır. Ayrıca deney ve sonlu eleman sonuçları ile de ATS sistemlerin etkinliği gösterilmiştir. Üretilen plak Şekil 10'da görüldüğü gibidir.



Şekil 10. Geliştirilen metodoloji ile üretilen plak

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Kaynaklar

Akavci, S.S., Yerli, H.R. & Dogan, A. (2007). The First Order Shear Deformation Theory for Symmetrically Laminated Composite Plates on Elastic Foundation. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 32, 341-348.

Akdoğan, A. & Nurveren, K. (2002). Akıllı Malzemeler ve Uygulamaları. *Machinery MakinaTek*, 57, 35.

Arın, T. (2008). Şekil bellekli NiTi alaşımlarında kimyasal bileşim-ısı işleme koşullarının optimizasyonu, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.

Balaji, P.S., Rahman, M.E., Moussa, L. & Lau, H.H. (2015). Wire Rope Isolators for Vibration Isolation of Equipment and Structures – A review. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 78. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/78/1/012001>

Berthelot, J.M., Assarar, M., Sefrani, Y. & Mahi, A.E. (2008). Damping Analysis of Composite Materials and Structures. *Composite Structures*, 85(3), 189-204.

- Brinson, L. C. (1993). One-Dimensional Constitutive Behavior of Shape Memory Alloys: Thermomechanical Derivation with Non-Constant Material Functions and Redefined Martensite Internal Variable. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 4(2), 229-242. <https://doi.org/10.1177/1045389X9300400213>
- Hashemi, S.M.T. & Khadem, S.E. (2006). Modeling and Analysis of the Vibration Behavior of a Shape Memory Alloy Beam. *International Journal of Mechanical Sciences*, 48(1), 44-52. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2005.09.011>
- Herold, S. & Mayer, D. (2016). Adaptive Piezoelectric Absorber for Active Vibration Control. *Actuators*, 5(1). <https://doi.org/10.3390/act5010007>
- Huang, W. (2002). On the Selection of Shape Memory Alloys for Actuators. *Materials & Design*, 23(1), 11-19. [https://doi.org/10.1016/S0261-3069\(01\)00039-5](https://doi.org/10.1016/S0261-3069(01)00039-5)
- Johe, R. (2009). Tensile Testing of Nitinol Tubes and Wires with Higher Strain Rates. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 18(5), 836-842. <https://doi.org/10.1007/s11665-009-9406-x>
- Kaya, M. (2008). Toz metalürjisi ile üretilen şekil hatırlamalı alaşımların metalürjik ve mekanik karakteristiklerinin incelenmesi, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye.
- Kaya, M., Cakmak, Ö., Saygili, T.Y. & Atli, K.C. (2016). Şekil Hafızalı Alaşımlarda Martensitik Faz Dönüşümü ve Şekil Hafıza Mekanizması. *Selçuk-Teknik Dergisi*, 15(3), 157-172.
- Kidner, M. & Brennan, M.J. (1999). Improving the Performance of a Vibration Neutraliser by Actively Removing Damping. *Journal of Sound and Vibration*, 221(4), 587-606. <https://doi.org/10.1006/jsvi.1998.2027>
- Komarizadehasl, S., Mobaraki, B., Ma, H., Lozano-Galant, J.A. & Turmo, J. (2021). Development of a Low-Cost System for the Accurate Measurement of Structural Vibrations. *Sensors*, 21(18). <https://doi.org/10.3390/s21186191>
- Prabhu, R. (2016). Processing and Testing of Hybrid Sandwich Composites for Vibration Damping and Mechanical Properties. *Journal of Mechanical Engineering and Automation*, 6, 22-27. <https://doi.org/10.5923/c.jmea.201601.05>
- Ryhänen, J. (1999). Biocompatibility Evaluation of Nickel-Titanium Shape Memory Metal Alloy, Oulu University Press, ISBN: 951-42-5206-03, Oulu, Finland.
- Vasudha, N. & Uma Rao, K. (2020). Shape Memory Alloy Properties, Modelling Aspects and Potential Applications - A Review. *Journal of Physics: Conference Series*, 1706, 012190. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1706/1/012190>
- Otsuka, K. & Wayman, C.M. (1999). Shape Memory Materials, Cambridge University Press, ISBN: 0-521-44487, Cambridge, England.