

**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**MALZEME ÖZELLİKLERİ İKİ DOĞRULTUDA DEĞİŞEN KİRİŞLER İÇİN  
TAŞIMA MATRİSİ**



**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Gülfem BARIŞ**

**İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Yapı Mühendisliği Programı**

**Tez Danışmanı: Prof. Dr. Reha ARTAN**

**MAYIS 2022**



**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**MALZEME ÖZELLİKLERİ İKİ DOĞRULTUDA DEĞİŞEN KİRİŞLER İÇİN  
TAŞIMA MATRİSİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Gülfem BARIŞ  
(501171049)**

**İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Yapı Mühendisliği Programı**

**Tez Danışmanı: Prof. Dr. Reha ARTAN**

**MAYIS 2022**



İTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 501171049 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Gülfem BARIŞ, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “MALZEME ÖZELLİKLERİ İKİ DOĞRULTUDA DEĞİŞEN KİRİŞLER İÇİN TAŞIMA MATRİSİ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

**Tez Danışmanı :** **Prof. Dr. Reha ARTAN** .....

İstanbul Teknik Üniversitesi

**Jüri Üyeleri :** **Prof. Dr. Fethi KADIOĞLU** .....

İstanbul Teknik Üniversitesi

**Prof. Dr. İrfan COŞKUN** .....

Yıldız Teknik Üniversitesi

**Teslim Tarihi** : **05.05.2022**  
**Savunma Tarihi** : **23.05.2022**





*Aileme,*



## ÖNSÖZ

İ.T.Ü. İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Yapı Mühendisliği Yüksek Lisans Programı kapsamında hazırlanan bu tez çalışmasında Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzemelerde malzeme özellikleri iki doğrultuda değişen kirişler Başlangıç Değerler Yöntemi ve Taşıma Matrisi kullanılarak incelenmiştir.

Yüksek lisans bitirme sürecimde desteğini her zaman hissettiğim değerli danışmanım Prof. Dr. Reha Artan'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca tezim süresince her türlü yardımlarını esirgemeyen yakınlarım Av. Kuzey Erol Ateş ve Zuhal Doğantuğ'a, hayatımın her döneminde yanımda olan kardeşim Pilot Oğuzhan Barış'a, başarılarımda üstün rolleri olan değerli insanlar Vesile Çetin Kazak ve Prof. Dr. Defne Tamar Gürol'a en içten dileklerle teşekkür ederim.

Mayıs 2022

Gülfem BARIŞ  
(Yüksek Mimar ve İnşaat Mühendisi)



## İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER .....	ix
KISALTMALAR .....	xi
SEMBOLLER .....	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xv
ŞEKİL LİSTESİ.....	xvii
ÖZET.....	xix
SUMMARY .....	xxi
<b>1. GİRİŞ .....</b>	<b>1</b>
1.1 Tarihçe .....	2
<b>2. FONKSİYONEL DRECELENDİRİLMİŞ MALZEMELER .....</b>	<b>5</b>
2.1 Çift-Yönlü Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzemeler.....	5
2.2 Tasarım Prosedürü ve Genel Yaklaşım.....	5
2.3 FDM Tipi için Geleneksel ve Kompozit Malzemelerin Karşılaştırılması .....	6
2.4 FDM Üretim Süreci.....	7
2.4.1 Buhar biriktirme tekniği .....	8
2.4.2 Tozların metalurjisi .....	8
2.4.3 Savurma döküm.....	8
2.4.4 Katı serbest biçimli imalat yöntemi.....	9
2.5 FDM Teorisi.....	9
2.6 FDM’de Kullanılan Üretim İşleminin ve Malzemelerin Tanımı .....	9
2.7 FDM’lerin Özelliklerini Tahmin Etmek İçin Teorik Teknikler .....	10
2.8 İnşaat Mühendisliğinde FDM’ler.....	11
2.9 Sonlu Elemanlar Kullanılarak FDM’lerin Analizi.....	12
2.10 FDM Üretim Yöntemleri.....	13
2.10.1 TM prosedürü .....	13
2.10.2 Kademeli bir gradyan oluşturma prosedürü .....	15
2.10.3 Sürekli gradyan oluşturma prosedürü.....	15
2.10.4 Yüksek sıcaklıklarda kendi kendine yayılan sentez .....	16
2.10.5 Plazma kıvılcımlarının sinterlenmesi .....	16
2.10.6 Düşük basınç yöntemi .....	17
2.10.7 Sürtünmeli karıştırma işlemi .....	18
2.11 FDM Uygulama Alanları .....	19
2.11.1 Havacılık ve uzay sanayi.....	20
2.11.2 Nükleer enerji sanayi.....	20
2.11.3 Biyolojik etki alanı .....	20
2.11.4 Manyetik alan .....	20
2.11.5 Enerji sektörü .....	21
2.11.6 Optik alan .....	21
2.12 Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzemeler Kullanarak Malzeme Performansı Değerlendirmesi .....	21
2.12.1 FDM’lerin stabilite analizi .....	22
2.12.2 FDM plakları .....	22

2.13 FDM ile İlgili Çalışmalar .....	23
2.13.1 Çalışmaların kapsamı .....	23
2.14 FDM'ler İle İlgili Güçlükler .....	24
<b>3. BAŞLANGIÇ DEĞERLER YÖNTEMİ VE TAŞIMA MATRİSİ .....</b>	<b>25</b>
<b>4. MALZEME ÖZELLİKLERİ İKİ DOĞRULTUDA DEĞİŞEN KİRİŞLER İÇİN TAŞIMA MATRİSİ .....</b>	<b>29</b>
4.1 Temel Denklemler .....	29
Enkesiti x ve y düzleminde, eksen z koordinatı üzerinde olan bir kirişin Elastisite modülü E, iki doğrultuda değişiyor: .....	29
4.2 Taşıma Matrisinin Bulunması .....	30
4.3 Çözümlü Örnekler .....	32
4.3.1 Sol ucu ankastre, sağ ucu serbest olan L boyunda, sağ ucunda tekil P yükü olan çubuk .....	32
4.3.1.1 Malzeme özelliği sabit çubuk .....	32
4.3.1.2 Malzeme özellikleri değişen çubuk .....	32
4.3.2 Sol ucu ankastre, sağ ucunda sabit mesnet olan L boyunda, düzgün yayıllı yükle yüklü çubuk .....	33
4.3.2.1 Malzeme özelliği sabit çubuk .....	33
4.3.2.2 Malzeme özellikleri değişen çubuk .....	35
<b>5. SONUÇ .....</b>	<b>39</b>
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>41</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>	<b>45</b>

## KISALTMALAR

<b>2DFG</b>	: Çift Yönlü Fonksiyonel Derecelendirilmiş
<b>EPD</b>	: Elektroforetik Biriktirme
<b>SPS</b>	: Plazma Kırılçılıklarının Sinterlenmesi
<b>FDM (FGM)</b>	: Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzeme
<b>FG</b>	: Fonksiyonel Derecelendirilmiş
<b>FRP</b>	: Fiber Takviyeli Polimer
<b>FSP</b>	: Sürtünmeli Karıştırma İşlemi
<b>FSW</b>	: Sürtünme Karıştırma Kaynaklama
<b>SFF</b>	: Katı Serbest Biçimli İmalat
<b>SHS</b>	: Kendiliğinden Yayılan Yüksek Sıcaklık Sentezi
<b>TM (PM)</b>	: Toz Metalurjisi



## SEMBOLLER

<b>L</b>	: Uzunluk
<b>P</b>	: Kuvvet
<b><math>\sigma_z</math></b>	: Normal gerilme
<b>E</b>	: Elastisite modülü
<b><math>\alpha(y)</math>, <math>\beta(z)</math></b>	: Elastisite modülü fonksiyonları
<b>I</b>	: Atalet momenti
<b>F</b>	: Alan
<b>v</b>	: Çökme
<b><math>\varphi</math></b>	: Dönme
<b>M</b>	: Moment
<b>T</b>	: Kesme kuvveti
<b>q</b>	: Yayılı yük
<b><math>v_0</math></b>	: Çökmenin başlangıç değeri
<b><math>\varphi_0</math></b>	: Dönmenin başlangıç değeri
<b><math>M_0</math></b>	: Momentin başlangıç değeri
<b><math>T_0</math></b>	: Kesme kuvvetinin başlangıç değeri
<b>TM</b>	: Taşıma Matrisi
<b><math>S_i(x)</math></b>	: Durum vektörü
<b>D</b>	: Diferansiyel Geçiş Matrisi
<b>F(x)</b>	: Taşıma Matrisi
<b>A</b>	: Katsayılar matrisi
<b><math>\vec{f}(z)</math></b>	: Denklemin ikinci tarafı
<b><math>v_1(a)</math>, <math>v_2(a)</math></b>	: Çökme için boyutsuz ifadeler
<b><math>\varphi_1(a)</math>, <math>\varphi_2(a)</math></b>	: Dönme için boyutsuz ifadeler



## ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 2.1 : FDM üretim yöntemleri. ....	8
Çizelge 2.2 : Bileşim ve katman kalınlığı.....	10





## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

Şekil 1.1 : Termal stres gevşemesi için bir metal/seramik FDM'nin şeması .....	2
Şekil 2.1 : Akış şeması, termal stres serbest bırakma FDM'sini oluşturmak için kullanılan "ters tasarım tekniğini" göstermektedir.....	6
Şekil 2.2 : FDM kompozit malzeme özellikleri .....	7
Şekil 2.3 : Bileşen malzemelerinin dağılımı.....	7
Şekil 2.4 : Fiber Takviyeli Polimer Köprü .....	11
Şekil 2.5 : Toz metalurjisi için işlem akış şeması.....	14
Şekil 2.6 : Sistem yapılandırması. ....	17
Şekil 2.7 : Düşük basınçlı döküm yöntemi şeması. ....	18
Şekil 2.8 : FSP yöntemi bir Al-SiC FDM kesiti oluşturdu. ....	19
Şekil 2.9 : FDM'lerin kullanılabileceği alanlar.....	19
Şekil 4.1 : Ankastre çubukta çökmeler. ....	33
Şekil 4.2 : Ankastre çubukta dönmeler.....	33
Şekil 4.3 : Bir ucu ankastre, diğer ucu sabit mesnetli, düzgün yayılı yükle yüklü kirişte çökmeler.....	36
Şekil 4.4 : Bir ucu ankastre, diğer ucu sabit mesnetli, düzgün yayılı yükle yüklü kirişte dönmeler.....	36
Şekil 4.5 : Bir ucu ankastre, diğer ucu sabit mesnetli, düzgün yayılı yükle yüklü kirişte momentler. ....	37
Şekil 4.6 : Bir ucu ankastre, diğer ucu sabit mesnetli, düzgün yayılı yükle yüklü kirişte kesme kuvvetleri.....	37



## MALZEME ÖZELLİKLERİ İKİ DOĞRULTUDA DEĞİŞEN KİRİŞLER İÇİN TAŞIMA MATRİSİ

### ÖZET

Malzemelerin gün geçtikçe gelişen evrimi malzeme özelliklerini geliştirmekte, yapısı değişmeyen ve pek çok alan için kısıtlı uygulama imkanı olan saf metaller, alaşımlar, geleneksel kompozitler gibi özellikleri kontrol edilemeyen malzemelere karşı yeni malzemeler ortaya çıkmaktadır. Geçmişte mühendislik malzemeleri, homojen karakteristikleri olan ürünleri imal etmek için geliştirilmişlerdir. Bu geleneksel malzemeler endüstriyel uygulamalar için optimum performans sağlar iken karakteristiklerinde çok az veya sıfır değişim gösteren malzemelerdir.

Bugünün teknolojisinde ihtiyaç duyulan, malzemelerde homojen olmayan kademeli veya devamlı değişen bir yapı olduğundan bilim insanlarının arayışı, kimsiyal ve fiziksel olarak farklı özelliklerde, birbirleriyle birleştirilmiş iki madde arasında, farklı ısıl genleşme özelliklerinden kaynaklanan ısıl gerilmeleri ve yine iki madde arasındaki kimyasal ve fiziksel özelliklerdeki ani değişim nedeniyle oluşabilecek diğer olumsuz durumları derecelendirilmiş yapılarıyla en aza indiren yeni nesil malzemeler yönündedir.

Gelişmiş bir heterojen kompozit malzeme kategorisindeki Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzemeler (FDM) olarak bilinen malzemeler, kademeli olarak değişen bileşim veya yapı ile bir parçada çok işlevli özelliklere sahiptir ve tek bir bileşimde çelişen özellikler gerektiren mühendislik uygulamaları için çok uygundur. Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzemeler fikri başlangıçta ısıya dayanıklı malzemeler için tasarlanmış olsa da, zamanla bu malzemeler deformasyonu, basıncı, aşınmayı ve korozyonu kontrol etmek ve ayrıca tüm ürün boyutları boyunca derecelendirilen yumuşak geçiş yoluyla gerilim konsantrasyonunu azaltmak için kullanılmıştır.

Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzemeler belirli bir oranda karıştırılan iki veya daha fazla malzemeyle elde edilmektedir. Bu malzemeler birbirleri ile malzeme boyutları doğrultusunda bir fonksiyona göre değişmektedir. Böylece malzemelerin birbirleriyle derecelendirilmiş olarak dağılımı sürekli bir değişme neden olmaktadır. Bu sayede malzemeler arasında çatlaklar gibi istenmeyen durumların oluşabileceği bir ara yüzey meydana gelmemektedir. Sonuçta tüm bu yanlarıyla Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzemeler ileri teknolojik uygulamalar için tercih imkanı sunan ideal malzemeler haline gelmektedir.

Bu çalışmada Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzemeler geniş ölçekte ifade edilmiştir. Malzeme özellikleri çift doğrultuda değişen malzemelerin mekanik davranışları son yıllarda birçok araştırmanın konusu olmuştur. Çalışmada bu

malzemeleri analiz etmek için kullanılan yöntemlerden bahsedilmiştir. İlgili yöntemler kapsamında Başlangıç Değerler ve Taşıma Matrisi konusu irdelenmiştir. Malzeme özellikleri iki doğrultuda değişen kirişlerde eğilme problemi için Euler-Bernoulli kiriş teorisiyle Başlangıç Değerler Yöntemi kullanılarak incelenmiştir. Malzeme özellikleri keyfi olarak değişen kirişler için Taşıma Matrisi verilmiştir.



# TRANSPORT MATRIX FOR BI-DIRECTIONAL BEAMS

## SUMMARY

The ever-developing evolution of materials improves material properties, and new materials emerge against uncontrollable materials such as pure metals, alloys, conventional composites, which do not change in structure and have limited application possibilities for many areas. In the past, engineering materials have been developed to manufacture products with homogeneous characteristics. While these conventional materials provide optimum performance for industrial applications, they are materials that show little or no change in their characteristics.

Since there is an inhomogeneous gradual or constantly changing structure in materials, which is needed in today's technology, scientists' search is in the direction of new generation materials that minimize other negative situations that may occur due to thermal stresses arising from different thermal expansion properties between two materials with chemically and physically different properties, combined with each other, and the sudden change in chemical and physical properties between two substances with their graded structures.

Materials known as Functionally Graded Materials (FGM), an advanced category of heterogeneous composite materials, have multifunctional properties in one part with gradually varying composition or structure and are well suited for engineering applications that require conflicting properties in a single component.

While the idea of Functionally Graded Materials was originally conceived for heat resistant materials, over time these materials have been used to control deformation, pressure, wear and corrosion as well as reduce stress concentration through graded smooth transition across all product dimensions.

Functionally Graded Materials are obtained by mixing two or more materials in a certain ratio. These materials change with each other according to a function in line with the material dimensions. Thus, the distribution of materials graded with each other causes a continuous change. In this way, an interface where undesirable situations such as cracks can occur between materials does not occur. As a result, with all these aspects, Functionally Graded Materials become ideal materials that offer the opportunity to choose for advanced technological applications.

In this study, Functionally Graded Materials are expressed on a broad scale. The mechanical behavior of materials whose material properties change in two directions has been the subject of many studies in recent years. In the study, the methods used to analyze these materials are mentioned. Within the scope of related methods, Initial Values and Transport Matrix are discussed. For the bending problem of beams whose material properties change in two directions, Euler-Bernoulli beam theory and Initial Values Method are used. Transport Matrix is given for beams whose material properties vary arbitrarily.



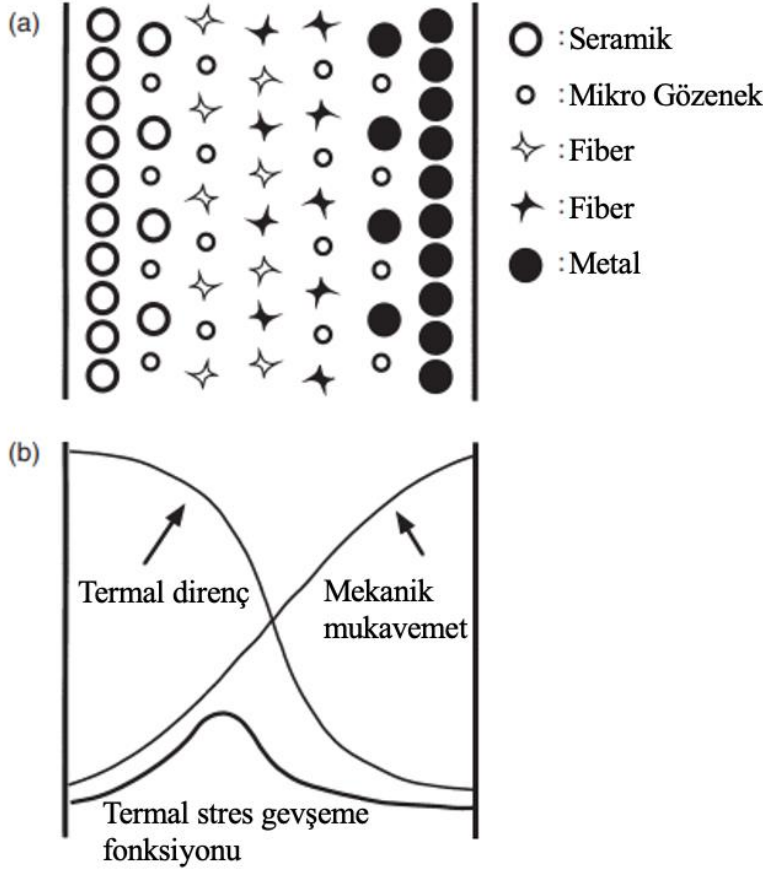
## 1. GİRİŞ

Malzemenin özelliklerinde uniformite elde etme çabası genellikle yeni malzemelerin geliştirilmesi sırasında sarf edilir. Malzeme teknolojisi ve bilimindeki ilerlemeye, kimyasal tutarlılığın yanı sıra yapısal ve morfolojik uniformite arayışı da yardımcı olmuştur. Geleneksel homojen malzemeler son yıllarda genellikle zorlu ortamlarda hayatta kalamamıştır, çünkü bu durumlar giderek daha talepkar hale gelmiştir (Sam ve diğ, 2021). Örneğin, ateşleme odaları ve türbinler de dahil olmak üzere havacılık-uzay uygulamalarında, (yanmada 1800 C'ye kadar) mevcut sıcaklıklara kullanılabilir bir stres seviyesinde dayanabilecek onaylanmış homojen bir malzeme bulunmamaktadır. Kaplanmış ve bağlı malzemeler, homojen olmayan kompozitler gibi endüstriyel malzemelere olan artan ihtiyacı karşılamak için incelenmiştir. Bu homojen olmayan kompozitler, ayrı yüzeyler veya kısımlar üzerinde çeşitli niteliklere sahip olmaları ile ayırt edilirler ve dolayısıyla aynı malzeme içinde iki veya daha fazla farklı fonksiyona sahiptir. Ne yazık ki, bu malzemelerin keskin sınırları vardır ve sınırdaki fiziksel ve kimyasal özelliklerdeki süreksizlikler tipik olarak çok sayıda istenmeyen davranışa yol açar (Liu ve diğ, 2019). Bu tür dezavantajların yaygın bir örneği, kaplanmış bir malzemede ısı stresi nedeniyle sınır yırtılmasıdır.

En düşük ağırlığa ve en yüksek mukavemet ve dayanıklılık oranlarına sahip kompozit malzemeler, sanayide ve diğer teknik uygulamalarda etkin bir şekilde kullanılmaktadır. Diğer yandan tipik kompozit malzeme, metal mukavemetinde yüksek sıcaklıkların neden olduğu azalma nedeniyle yüksek sıcaklık uygulamalarında başarısız olur (Lin ve diğ, 2019). Yeni bir kompozit malzeme sınıfı olan "Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzemeler (FDM'ler)" son zamanlarda epey ilgi görmüştür. Malzeme bilimlerinde, "Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzeme", hacim boyunca kademeli olarak yapı ve bileşimde, malzemenin özelliklerinde orantılı değişikliklere neden olan varyasyon ile tanımlanabilir. FDM'ler içinde, çeşitli mikroyapısal aşamaların çeşitli işlevleri bulunmaktadır ve toplam FDM'ler mikroyapı durumunu özellik derecelendirmesinden edinir (Hamzah ve diğ, 2019).

1980'lerde, havacılık uygulamaları için termal olarak strese dayanıklı malzemeler üretme çabasında sınır sorununu ele almak için yeni bir malzeme konsepti sunulmuştur. Böylece, metal/seramik sınırının yakınında yapışmayı iyileştirmek ve ısı stresini azaltmak için metal veya sürekli bir desene sahip seramik/metal bağlantılı bir malzeme üzerinde seramik bir kaplama oluşturulmuştur. "Fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeler", bu yeni malzeme türüne (FDM'ler) verilen isimdir (Zghal ve Dammak, 2020). Gradyan yapısının temel düşüncesi ilk olarak 1970'lerde polimerik ve kompozit malzemeler için öne sürülmesine rağmen, 1980'lere kadar tasarım, üretim ve ilgili yönlerin değerlendirilmesine yönelik sistematik bir deneysel araştırma yoktu. Geniş anlamda, bir FDM, bir yönde kademeli olarak değişen iki veya daha fazla faz, yapı veya dokudan oluşan bir bileşik olarak tanımlanabilir. Bileşim ve yapıdaki işlevlerin, malzemenin kendisinin dereceli yönünde işlevsel farklılıklara yol açması da mümkündür (Sun, ve diğ, 2020). Örneğin, bir metal/seramik FDM, bir

malzeme içindeki çeşitli bileşenlerin, seramiklerin yüksek sıcaklıklarına üstün dirence ve kendi koşullarını takiben metalin üstün mekanik ve ısı transferi becerilerine sahip olduğu şekilde, sıcak uçta saf seramikten ve soğuk uçta en saf metalden oluşur. Aşağıdaki şekil, termal stresi azaltmak için kullanılan bir seramik/metal FDM için bir şemadır (Saleh ve diğ., 2020).



**Şekil 1.1** : Termal stres gevşemesi için bir metal/seramik FDM'nin şeması.

Njim ve diğ. (2021) bir FDM'de kompozitin mikroyapısal özelliklerinin yanı sıra bileşen dağılımının işlevini araştırmaktadır. Daha sonra, toz işlemleri ve kimyasal buhar birikimine odaklanılarak FDM'lerin üretilmesine yönelik prosedürler tartışılmaktadır. Tartışılan tozların yapılandırması hakkında da yeni bulgular bulunmaktadır (Hadji ve diğ., 2019).

## 1.1 Tarihçe

Çelişen özellik gereksinimleri nedeniyle, saf metaller mühendislik uygulamalarında nadiren kullanılır. Örneğin bir uygulama, hem sert hem de sünek bir malzeme gerektirebilir, ancak böyle bir malzeme doğada mevcut değildir. Bunu çözmek için, bir metal diğer malzemelerle veya metal olmayanlarla erimiş halde karıştırılır. Alaşımlama (halihazırda "standart alaşımlama" olarak anılmaktadır), erimiş aşamadaki malzemeleri, yapıcı malzemelerden farklı bir özellik üretmek için birleştirme işlemidir (Tang ve diğ., 2019). Bronz, o zamanlar dünya üzerinde önemli bir etkiye sahipti; MÖ 4000 yıllarında "Bronz Çağının" başlangıcına denk gelen

şekilde, insanlığın ilerlemesinde bir dönüm noktasıydı. O zamandan beri insanlık, malzemenin niteliklerini geliştirmek için farklı alaşımlarla uğraşmaktadır.

Termodinamik denge sınırı nedeniyle, başka bir malzemenin çözeltisinde çözülebilecek malzeme miktarının bir sınırı vardır. Daha fazla miktarda süper alaşım malzemesi istendiğinde, konvansiyonel alaşımlama etkisizdir. Geleneksel alaşımlamanın bir başka dezavantajı, çok farklı erime sıcaklıklarına sahip iki uyumsuz malzeme alaşımlandığında, işlemin aşırı derecede pahalı hale gelmesidir (Loh ve diğ, 2018). Toz Metalurjisi (TM), alaşımlar toz formunda üretildiğinden, normal alaşımlama yoluyla mümkün olmayan parçaların üretilmesi için başka bir tekniktir ve konvansiyonel alaşımlama ile bağlantılı sorunların bir kısmı çözülmektedir. "Toz metalurjisinin" iyi özelliklerine rağmen, karmaşık formlar ve özellikler, gözenekli ve zayıf bileşenler yapamama dahil olmak üzere çeşitli sınırlamalar bulunmaktadır. Bu kısıtlamalar, filtreleme ve yapısal olmayan uygulamalar gibi bazı uygulamalar için avantajlı iken, diğerleri için olumsuzdur. Çeşitli niteliklere sahip malzemeler oluşturmanın bir başka yolu, bunları kompozit malzeme olarak bilinen bir süreç olan katı formda birleştirmektir (Tang ve Yang, 2018).

Kompozit malzemeler, katı formlarda karıştırıldığında farklı fiziksel ve kimyasal özelliklere sahip olan bir veya daha fazla malzemedan oluşan gelişmiş malzemelerdir. Kompozit malzemeler, kendilerini oluşturan malzemelerden farklı olan olağanüstü nitelikleri bir araya getirir ve aynı zamanda daha hafiftir. Ahşap, bir odunözü çerçevesine gömülü selülozdan oluşan doğal bir kompozit malzemedir. Zorlu çalışma koşulları altında, kompozit malzemeler delaminasyon olarak bilinen bir prosedür nedeniyle başarısız olabilir (Zhao ve diğ, 2020). Bu, örneğin, değişen genleşme katsayılarına sahip iki metalin kullanımını içeren yüksek sıcaklık uygulamalarında meydana gelebilir. Bu sorunu çözmek için, 1980'lerde Japonya'daki bilim adamları bir hipersonik uzay aracı projesinde, (2000K'lik bir dış sıcaklığa ve kesitinde veya 10 mm'den az kalınlıkta 1000K'lik bir iç sıcaklığa sahip) bir termal bariyer gereksinimine yanıt olarak Fonksiyonel derecelendirilmiş Malzeme olarak bilinen yeni bir malzeme geliştirdiler (FDM) (Li ve diğ, 2020).

Çığır açan bir malzeme olan "fonksiyonel derecelendirilmiş malzeme (FDM)", değişen bir boyut boyunca çeşitli niteliklere sahip bir karmaşık malzeme sınıfıdır. Kemikler ve dişler gibi doğal malzemeler fonksiyonel olarak derecelendirilir; doğa bu malzemeleri beklenen hizmet ihtiyaçlarını karşılamak için yaratmıştır (Avcar, 2019). Bu kavram, tıpkı yapay sinir ağlarının insan beyninden türetildiği şekilde, mühendislik problemlerini çözmek için doğadan türetilmiştir. Fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeler, kompozit malzemelerde görülen, malzeme arızası olan pürüzlü arayüzleri azaltır. Keskin temas için bir gradyan arayüzünü değiştirir ve bir malzemedan diğerine kusursuz bir deneyim sağlar. FDM'nin en ayırt edici özelliklerinden biri, belirli bir kullanım için malzeme yaratma olasılığıdır (Zghal ve diğ, 2018).



## 2. FONKSİYONEL DRECELENDİRİLMİŞ MALZEMELER

### 2.1 Çift-Yönlü Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzemeler

"Çift-yönlü fonksiyonel derecelendirilmiş (2D FG) malzemeler" kavramı, akıllı yapılar inşa etmenin daha karmaşık bir yöntemi olarak evrilmiştir. 2D FG'nin tek-yönlü FDM'ye göre bariz bir avantajı, daha yüksek kompozit mukavemetiyle sonuçlanır şekilde hem eksenel hem kalınlık yönlerinde etkili mekanik özellikleri ayarlama yeteneğidir. "Çift-yönlü fonksiyonel derecelendirilmiş (2D FG) malzemelerden" oluşan yapıların bazı mekanik davranışları da doğru bir şekilde araştırılmaktadır (Özdemir ve diğ, 2020).

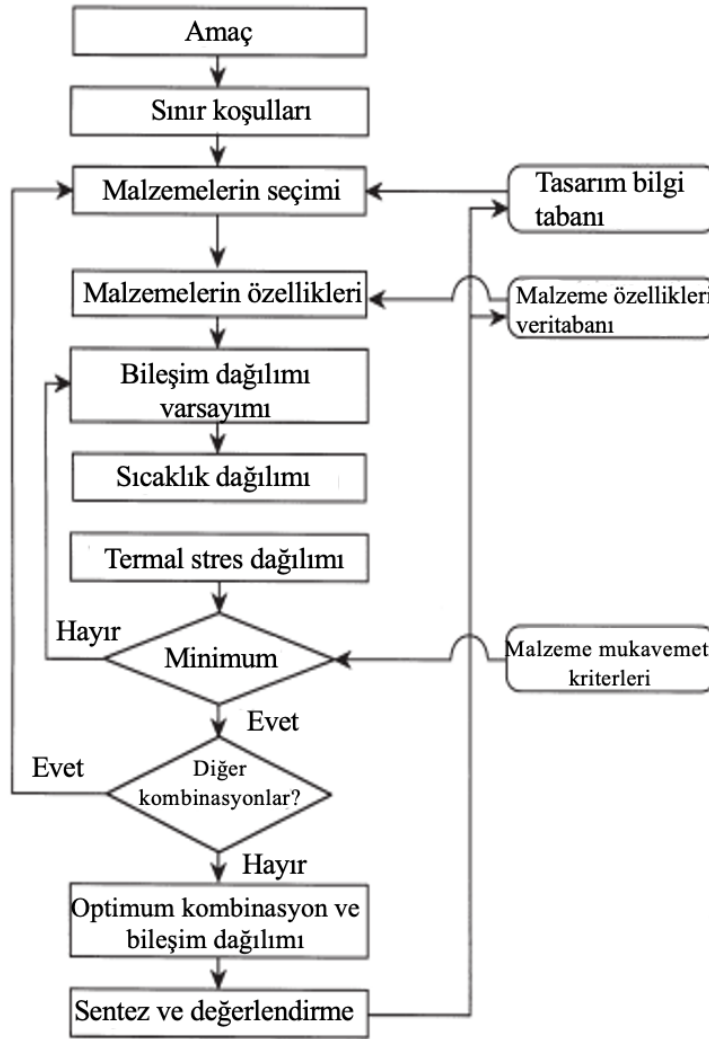
Örneğin, homojen burulma modu formları, 2D FG nanotüpüne yönelik bir titreşim modeli geliştirmek için araştırmalarda kullanılmıştır. Ayrıca, çalışmaların çoğu lineer durumlarla sınırlı olduğundan, önemli deformasyonun ürettiği lineer olmayan dinamikler çoğu 2B FG giriş çalışmasında bilinmemektedir (Kuang ve diğ, 2019). Belirli senaryolardaki lineer olmama, mekanik davranışı artırmak için yararlıdır. Örneğin, bir konsol girişin rezonans frekansı geometrik lineer olmama ile genişletilebilir. Diğer yandan, 2D FG malzemelerinin etkileyici bir unsuru, önemli deformasyonla etkileşimleridir. Bu sorunu çözmek için yapılan araştırmanın amacı, 2B FG girişinin lineer olmayan bir modelini sağlamak ve bugüne kadar erişilemeyen keşfedilmemiş lineer olmayan dinamiği araştırmaktır (Zhang ve diğ, 2019).

### 2.2 Tasarım Prosedürü ve Genel Yaklaşım

Malzeme sistemi seçiminin yanı sıra, bir FDM'nin tasarımı sırasında iki kritik konuya çözüm getirilmelidir. Biri, bir FDM'nin özelliklerini bileşen profiline dayalı olarak belirlemektir. Mikro yapı, yapıya ve bir FDM'nin bulunduğu yere bağlı olarak çok farklıdır. Bu, bir FDM'nin özelliklerini tanımlamayı zorlaştırır (Özdemir ve diğ, 2020). Mikroyapı-bağımlı termofiziksel parametreleri belirlemek için çeşitli modeller oluşturulmuş olsa da, tüm malzeme ve özelliklere uyan evrensel bir model bulunmamaktadır. Diğer bir konu, bir bileşimin optimal uzaysal bağımlılığını öznetelik tanımına dayalı olarak belirlemektir. Bu, malzemenin amaçlanan işlevine en iyi hizmet eden bileşim özelliği olarak düşünülebilir. FDM'lerin tasarımının termal, elektrik ve kimyasal özellikler gibi çeşitli faktörleri içermesi gerekse de, böyle bir bölümün içeriği, bu sektörde yıllar içinde gerçekleştirilen önemli çalışmalar nedeniyle yalnızca termofiziksel özelliklere odaklanacaktır (Zhang ve diğ, 2018).

Malzeme tasarımının termal stres gevşemesiyle sınırlanmasıyla, tasarımın nihai amacı, belirli bir mekanik ve termal ortam için belirli bir malzeme içinde optimum bileşim varyasyonunu oluşturmaktır (Tang ve diğ, 2018). Böyle bir optimal dağılım fonksiyonunu elde etmenin geçerli bir yolu, birkaç bilim adamı tarafından oluşturulmuş bir sistem analizi stratejisini uygulamaktır. Aşağıdaki şekil, bu sistem analizi tekniğine dayalı bir "ters tasarım yöntemini" göstermektedir. Bu teknik, geometrik yapılandırmanın ve sınır koşullarının belirlenmesiyle başlar. Bunu takiben malzeme bileşenleri seçilir ve başlangıçta bağımlı karışım oranı varsayılır. Termal stres ve sıcaklık dağılımları daha sonra malzemelerin bilinen termofiziksel özellikleri kullanılarak hesaplanır (Saleh ve diğ, 2020).

Daha sonra bulgular, optimal koşullara ulaşıp ulaşılmadığını belirlemek için malzeme mukavemet gereksinimleriyle karşılaştırılır. Ulaşılmadığı sürece, hesaplama değiştirilmiş bir karışım oranı profili ile yeniden yapılır. Bu hesaplama yöntemi, optimal duruma ulaşılan kadar devam ettirilir. Her yol adımı, önceki hesaplamanın sonucuna bağlı olarak bileşim dağılımını değiştirir (Akbaş ve diğ., 2020). Mikroyapı-bağımlı malzeme özellikleri ve esnek bileşim dağılımı için uygun modellerin kullanılması, bu tasarım yönteminin doğru bulgular elde etmek için kritik bileşenleridir.



**Şekil 2.1 :** Akış şeması, termal stres serbest bırakma FDM'sini oluşturmak için kullanılan "ters tasarım tekniğini" göstermektedir.

### 2.3 FDM Tipi için Geleneksel ve Kompozit Malzemelerin Karşılaştırılması

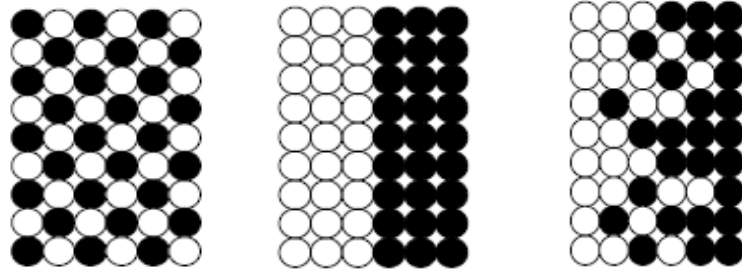
Genel olarak FDM'ler, seramik ve metaller dahil olmak üzere çeşitli farklı malzemelerden oluşan kompozit malzemelerdir. Sonuç olarak heterojen makroskopik özelliklere sahip kompozitlerdir (Lee ve Lee, 2019). Aşağıdaki şekilde görüldüğü gibi, FDM'deki malzemenin bileşimindeki ve dolayısıyla mikroyapısındaki sürekli değişiklik, bunu sıradan kompozit malzemelerden ayırır. Sonuç olarak, FDM'nin malzeme özellikleri tarafından tanımlanan bir gradyan yaratılır. Nadir durumlarda, bir

FDM aynı malzemeden ancak farklı bir mikroyapıya sahip şekilde yapılabilir (Tang ve diğ, 2019).

Özellikler	<p>1 Mekanik mukavemet</p> <p>2 Termal iletkenlik</p>		
Yapı	<p>Yapıcı eleman</p> <p>Seramik ○</p> <p>Metal ●</p> <p>Mikro gözeneklilik ◊</p> <p>Fiber ■</p>		
Malzemeler	Örnek	FDM	FDM Olmayan

Şekil 2.2 : FDM kompozit malzeme özellikleri.

Yoshihisa (2004), konvansiyonel malzemeler ile tahmini gradyan malzemeleri (FDM) arasındaki farkları gösteren basit bir model geliştirmiştir. Düzlemsel malzeme yassı bir özellik ile karakterize edilir, ancak bağlı malzemenin iki malzeme arasındaki temas noktasında bir sınırı vardır (Liu ve diğ, 2019). FDM, bunları bileşiklerden ve benzer malzemelerden ayıran üstün özelliklere sahiptir. Sonuç olarak FDM, endüstriyel uygulama potansiyelleri nedeniyle dikkat çekmektedir. FDM her iki hammaddeye de sahip olduğundan, bunlar birleştirilir ve element dağılımı kesintisiz olarak derecelendirilir. Örneğin, metal ve seramiği birleştiren FDM'lerden biri mükemmel termal ve mekanik iletkenliğe sahiptir.



Düz malzeme bileşeni (a), birleştirilmiş malzeme (b), özellik gradyan malzemesi (c)

Şekil 2.3 : Bileşen malzemelerinin dağılımı.

## 2.4 FDM Üretim Süreci

FDM araştırması büyük ölçüde üretim sürecine bağlıdır. FDM işleme teknikleri, yeni FDM üretim yöntemlerinin icadına yol açan çeşitli çalışmaların konusu olmuştur. FDM'nin yapımında ve toplu taşımacılığında kullanılan tekniklere bağlı olarak iki temel kategoriye ayrılabilir: (Zghal ve Dammak, 2020). Toplu taşıma söz konusu olduğunda, bir bileşen içindeki varyasyonlar, yapıcı hesaplamada olduğu gibi bir dağıtım süreci yerine, ısı iletimi, atom türlerinin difüzyonu ve sıvı hareketi gibi doğal taşıma süreçleriyle tanımlanır. Ancak, son yirmi yılda otomasyon teknolojisi,

bileşenlerin derecelendirilmesini daha pratik ve karlı hale getirmiştir (Saleh ve diğ, 2020). FDM üretimi aşağıda görüldüğü şekilde sınıflandırılabilir.

**Çizelge 2.1 : FDM üretim yöntemleri.**

Sıvı Hal İşlemi	Katı Hal İşlemi	Biriktirme İşlemi
Çöktürme	Difüzyon Bağlama	Elektro Biriktirme
Savurma Döküm		Lazer Biriktirme
İnfiltrasyon		Buhar Biriktirme
Yönlü	Toz Metalurjisi	
Doldurma		
Katılaştırma		Püskürtme Biriktirme
Kontrollü Yöntem		

#### 2.4.1 Buhar biriktirme tekniği

Üreticiler halihazırda püskürtme, "Fiziksel buhar biriktirme, kimyasal buhar biriktirme ve plazma ile güçlendirilmiş kimyasal buhar biriktirme" dahil olmak üzere çeşitli buhar biriktirme süreçlerini kullanmaktadır. Malzeme, buhar biriktirme kullanılarak katı bir malzeme üretmek için kimyasal reaksiyon, yoğunlaşma veya dönüştürme yoluyla bir buhar fazında yoğunlaştırmak için kullanılır (Liew ve diğ, 2020). Yukarıda bahsedilen prosedürler, malzemelerin mekanik, elektriksel, termal ve optik özelliklerini değiştirmek için etkilidir. Bu teknikler, daha ince yüzey kaplamalarına yönelik harika bir mikroyapı sağlayan fonksiyonel derecelendirilmiş yüzey kaplamaları oluşturmak için kullanılır. Zehirli gazlar, buhar biriktirme yöntemleri kullanılarak yan ürün olarak üretilir (Zghal ve Dammak, 2020).

#### 2.4.2 Tozların metalurjisi

Toz metalurjisi, "fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeler" ile sonuçlanan dört aşamalı bir süreçtir. Bunlara toz hazırlama, toz tartma ve karıştırma, önceden karıştırılmış toz istifleme ve sıkıştırma ve nihayetinde sinterleme dahildir. Tozlar, kimyasal reaksiyonlar, elektrolitik çökeltme, katı hal indirgeme, atomizasyon, öğütme, santrifüjlü ayırıştırma ve tozlaştırma gibi çeşitli teknikler kullanılarak üretilir (Hamzah ve diğ, 2019). Şekillendirme, tozun geometrik şekiller halinde sıkıştırılmasıdır ve presleme tipik olarak oda sıcaklığında gerçekleştirilir. Uyumluluk, preslenmiş ve birbirine geçmemiş parçaların sağlamlığını sağlamıştır. Tipik olarak, sinterlenmiş bileşen belirli bir yapı olmadan oluşturulur. İşlem boyunca bazı gözenekler oluşabilir ve ikinci adımda ortadan kaldırılabilir.

#### 2.4.3 Savurma döküm

Savurma döküm fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeyi, kalıbı yerçekimine karşı döndürerek üretir. Erimiş haldeki metal, metal katılaşana kadar dönmeye devam eden bir döndürme kalıbına dökülür (Rabia ve diğ, 2019). Bu yaklaşım genellikle silindirik bileşenler oluşturmak için kullanılır. Metalin yoğunluğu bu yaklaşımla artırılır ve dökümün mekanik nitelikleri %10 ile %15 arasında yükseltilebilir. Katı ve erimiş partiküller arasındaki yoğunluk farkının neden olduğu merkezkaç kuvveti farkı,

FDM'de bir bileşimsel gradyan oluşumuyla sonuçlanır. Literatür değerlendirmesine göre, gradyanlar ürettikleri doğal süreçler (yani yoğunluk farkı ve merkezkaç kuvveti) nedeniyle bir kısıtlamaya sahiptir (Sam ve diğ., 2021).

#### **2.4.4 Katı serbest biçimli imalat yöntemi**

Katı serbest biçimli imalat yöntemi, öge hakkında bilgisayar tarafından oluşturulan verileri kullanarak fiziksel formlar oluşturmak için en yaygın olarak kullanılan teknikler arasındadır. Bu teknik, malzemelerin iç yapısını değiştirme becerisine sahiptir (Avcar, 2019). Bu yaklaşım diğer yöntemlere göre, daha düşük enerji kullanımı, artan üretim hızı, etkin malzeme kullanımı ve karmaşık formlar ve tasarımlar üretme yeteneği dahil olmak üzere çeşitli avantajlar sunar. Lazer tabanlı yaklaşım, FDM'yi katı serbest biçimli imalat teknikleri ile imal etmek için sıklıkla kullanılır.

### **2.5 FDM Teorisi**

FDM'ler, çeşitli yükleme koşulları (mekanik, termal, optik, elektrik vb.) altında yapıların tepkisini optimize eden özellik varyasyonları sergileyen tasarlanmış mikroyapılara sahip çok-fazlı kompozitlerdir. Termomekanik strese maruz kalan FDM'lerin incelenmesi için çok sayıda metodoloji geliştirilmiştir. Sonlu hacim teorisi, mevcut FDM çözüm yaklaşımlarına karşı cazip bir alternatiftir. Çözüm stratejisi, gerçek mikroyapıya mümkün olduğunca doğru bir şekilde yaklaşmak için, derecelendirilmiş çok-fazlı mikroyapının uygun termo-inelastik özelliklere sahip alt hacimlere bölünmesine dayanır. Klasik sonlu hacim teorisi malzeme mikroyapılarını dikdörtgen alt hacimleri kullanarak ayrıklaştırır (Nikbakht ve diğ., 2019). Bunun, farklı fazlara sahip alanlar arasındaki kıvrımlı sınırların veya arayüzlerin tanımlanabileceği üretkenlik üzerinde kötü bir etkisi vardır. Ek olarak, polimerleri elastik modülünde önemli bir farkla bölen eğri sınırların aşamalı tahmini, alt hacim kenarlarında sentetik stres konsantrasyonları ile sonuçlanır. Bu iki bağlantılı sorun, parametrik haritalamayı sonlu hacim teorisine dahil ederek, rastgele oluşturulmuş dörtgen alt hacimlerle malzeme ayrıklaştırmasını mümkün hale getirmiş olan Zhao ve diğerleri tarafından çözülmüştür (2020). Sonlu hacim teorisinin sürekli genişlemedeki bu paradigma değişikliği, doğruluk ve esneklik açısından bunu sonlu elemanlar tekniği ile aynı seviyeye getirmiştir. Li ve diğ. (2020) sonlu hacim teorisinin sonlu elemanlar tekniğinden daha verimli olduğunu kanıtlamıştır.

### **2.6 FDM'de Kullanılan Üretim İşleminin ve Malzemelerin Tanımı**

FDM'ler için üretim yöntemi, malzeme yeni olduğundan ve endüstri henüz tek bir uygulanabilir yaklaşımda birleşmediğinden, halen deneysel halde kalmaktadır. Günümüzde "kimyasal buhar biriktirme, toz metal sinterleme, yüksek sıcaklıkta plazma püskürtme, kendiliğinden yayılan yanma sentezi, termo-kimyasal difüzyon ve çamur haline getirilmiş tozların çökeltilmesi" gibi işlemler uygulanmaktadır (Tang ve Yang, 2018). Gerçek bir FDM'yi imal etmek için mevcut olan çeşitli yollara rağmen, iki elemanın hacim oranı yüzdelerinde böyle sabit bir dalgalanmaya sahip

malzemelerin sentezi sorunlu olabilir. Yapı boyunca tamamen pürüzsüz bir FDM fonksiyonu üretmenin zorlukları nedeniyle, incelemeyi yapan araştırma "titanyum ve titanyum-borür (Ti-TiB)'den oluşan ayrı bir katmanlı fonksiyonu kullanmayı amaçlamıştır (Li ve diğ., 2020). Ti-TiB FDM, saf bir titanyum yüz ve "%15 titanyum ve % 85 titanyum-borürden" oluşan bir titanyum-borür yüz içeriyordu. Her numune yaklaşık 3.175 milimetre kalınlığındaydı ve yedi farklı katmandan oluşuyordu. Farklı katmanların çapları ve TiB yüzde bileşimi aşağıdaki tabloda listelenmektedir.

**Çizelge 2.2 : Bileşim ve katman kalınlığı.**

<b>KATMAN SAYISI</b>	<b>%TiB</b>	<b>KALINLIK(mm)</b>
<b>1</b>	<b>85</b>	<b>0,9398</b>
<b>2</b>	<b>75</b>	<b>0,4064</b>
<b>3</b>	<b>60</b>	<b>0,4064</b>
<b>4</b>	<b>45</b>	<b>0,4064</b>
<b>5</b>	<b>30</b>	<b>0,4064</b>
<b>6</b>	<b>15</b>	<b>0,4064</b>
<b>7</b>	<b>0</b>	<b>0,2032</b>

## **2.7 FDM'lerin Özelliklerini Tahmin Etmek İçin Teorik Teknikler**

Metal ve seramik elemanların farklı termal genişleme katsayıları nedeniyle, "Al/SiC veya Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> tipi matris kompozitler" büyük artık gerilimler içerir. Bu malzemelerin, arıza davranışındaki değişiklikler de dahil olmak üzere mekanik özellikleri üzerinde bir miktar etkiye sahip oldukları düşünülmektedir. İki boyutlu FDM'lerin sayısal kırılma analizini yapmak için bir sınır integral denklem yaklaşımı kullanılır. Önemli gradyanların ve kırılma yönünün stres yoğunluğu parametreleri üzerindeki etkileri sayısal örnekler kullanılarak araştırılır. Çeşitli inklüzyon geometrilerine sahip kompozitlerin verimli sıcaklık iletkenlikleri bu yöntem kullanılarak tahmin edilmektedir (Saleh ve diğ., 2020). Isı transfer performansının sadece kütle fraksiyonuna ve bileşen özelliklerine değil, aynı zamanda inklüzyonun geometrik boyutlarına da bağlı olduğu gösterilmiştir. Homojen bir alt tabakaya bağlı derecelendirilmiş kaplamaların yüzey kırılması, "üç boyutlu bir model" kullanılarak incelenir. Birincil amaç, döngüsel termal veya mekanik yükler altında kaplanmış ortamda kritik altı çatlakların oluşumunu simüle etmektir. "Fonksiyonel derecelendirilmiş malzemelerin (ZrO<sub>2</sub>/Ni sistemi)" yüksek sıcaklıkta sürünme davranışını araştırmak için bir hesaplamalı mikromekanik yaklaşım kullanılır. Zhang ve diğ. (2020), hem giriş hem çıkış taraflarında eksen-simetrik kuvvet yüklerine maruz kalan sınırlı uzunlukta bir "fonksiyonel derecelendirilmiş silindir" içindeki stres alanlarına analitik çözümler sunmaktadır. Farklı yüklerde silindir gerilmeleri için sayısal bulgular gösterilmiştir. Martínez-Pañeda (2019) fonksiyonel derecelendirilmiş zirkonya stabilize zirkonya - NiCoCrAlY bağlı termal bariyer kaplamaların termal kırılmasını ve bunun zamana bağlılığını araştırmaktadır. Lazer termal deneylerine eşit termal performansa sahip üç kaplama tasarımının pratik ve teorik tepkileri araştırılmaktadır. Yerel ikili parçacık etkileşimleri olan "iki fazlı fonksiyonel derecelendirilmiş kompozitler" için, etkili bir elastik model olduğu kanıtlanmış bir model tasarlanmıştır. Gradyan yönündeki enine kesme yükü ve tek eksenli gerilme için ortalama elastik enerjiler üretilir. FDM'lerin imalatında çok parçacıklı bir kurulumun birlikte çökeltme süreci modellenmiştir. Modeller, toz bileşimlerin yanı

sıra FDM'lerde hacim fraksiyonlarını tahmin etmek için kullanılabilir. Örneğin TiC-Ni sistemi için FDM'ler geliştirilir ve üretilir (Naebe ve Shirvanimoghaddam, 2016). Tahminler gerçek sonuçlarla oldukça yakından eşleşmiştir. Tahmin modeli ayrıca bir Mo-Ti sistemleri FDM deneyi kullanılarak doğrulanır.

## 2.8 İnşaat Mühendisliğinde FDM'ler

FDM araştırmaları bu günlerde büyük ölçülerde yürütölmektedir. Biyomalzemeler, optoelektronikler, endüstriyel malzemeler ve enerji malzemeleri dahil olmak üzere diğer sektörler de FDM'lerle ilgilidir. FDM'ler, daha zorlu çalışma koşullarına sahip uygulamalarda çok fazla potansiyele sahiptir. Bariyer özellikleri veya peklik ile sertlik veya sertlik ile inertlik gibi uyumsuz işlevlerin kombinasyonuna ihtiyaç duyan yapısal ve teknik uygulamalar potansiyel uygulamalardır (Sola ve diğer, 2016). FDM'ler, ısı eőanjör tüpleri, roket ısı kalkanları, termoelektrik jeneratörler, aşınmaya dayanıklı kaplamalar, türbin ve dizel motorlar gibi termal sistemler dahil olmak üzere çeşitli inşaat ve mekanik sistemlerinde kullanılabilir. Aşağıdaki şemada gösterildiği gibi, "fiber takviyeli polimer (FRP)" de beton malzemeleri güçlendirmek için FDM'lerin başka bir kullanımınıdır. Malzemeler, çeliğin korozyon direncini iyileştirir ve malzemenin yaşam döngüsü gücünü artırır (Mahamood ve Akinlabi, 2017).



şekil 2.4 : Fiber Takviyeli Polimer Köprü.

Fiber takviyeli polimer kompozitler, kompozitler arasında popüler bir yeni malzemedir. İnşaat ve makine mühendisliği endüstrilerinin yanı sıra denizcilik ve biyoloji alanlarında çok çeşitli uygulamalar bulunmaktadır. Sentetik fiberlerin en büyük sonuçlara sahip olduğu gerçeğine rağmen (Shen, 2016), doğal fiberler etkileyici sonuçlar sağlayabilir (Mahamood ve Akinlabi, 2017). Nano kompozit geliştirmenin farklı bir çalışma alanı olduğu keşfedilmiştir (Sola ve diğer, 2016). Fiberli kompozitlerin geleceğin yeni malzemeleri olduğunu söylemekte bir sorun yoktur. Kompozitler, nitelikleri ve kolay uygulanabilmeleri nedeniyle inşaat mühendisliğinde uzun süredir kullanılmaktadır. Bu durum mimari, bina ve köprü mühendisliği için de geçerlidir. Kompozitlerle ilgili olarak, ikinci grup özellikle bunların potansiyel uygulamalarını keşfetmekle ilgilenmiştir. Köprülerin eksiksiz inşasıyla birlikte, FRP kompozitleri, onarım ve güçlendirme olanakları ve tekniklerinin yanı sıra bileşen oluşturmak için araştırma ve çözümler dahil olmak üzere çok çeşitli uygulamalar için kullanılabilir. Köprü inşaatlarındaki statik ve dinamik yükler, son zamanlardaki titiz araştırmaların

konusu olan kritik güçlüklerdir. FRP kompozitlerin köprü yapımında kullanımı şimdiden başlamış gibi görünmektedir.

## 2.9 Sonlu Elemanlar Kullanılarak FDM'lerin Analizi

Sonlu elemanlar kullanarak FDM'lerin analizinde araştırmanın odak noktası, fonksiyonel derecelendirilmiş diskin yapısal stabilitesini oluşturmaktır. Eğilme gerilmelerine maruz kalan bir diskin ve merkezkaç basıncına maruz kalan bir diskin her ikisi de incelenmiştir. Genel olarak, farklı elyaf dağılımları stres dağılımlarını azaltmıştır, bu da çalışmanın optimizasyon hedefi olan elementteki stresi azaltmak için ideal bir fiber dağılımı bulmanın mümkün olduğunu göstermiştir. "Üçüncü kayma deformasyon teorisi" ile ilgili olarak, Tang ve Yang (2018), fonksiyonel derecelendirilmiş plakaların araştırılması için teorik bir çerçeve ve sonlu eleman modelleri oluşturmuştur.

Bileşen hacim konsantrasyonunun ve modül oranlarının sapmalar ve çevresel kayma gerilmeleri üzerindeki etkisini göstermek amacıyla, basit destekli plakalar için Navier çözümü, lineer üçüncü merteye teorisinin yanı sıra birinci merteye teorisi kullanılarak "lineer olmayan dinamik ve statik sonlu eleman" bulguları kullanılarak sağlanmıştır (Shen, 2016). Araştırma, dikdörtgen şeklinde tamamen korunan "fonksiyonel derecelendirilmiş plakalar" için stabilize ve denge modelleri vermiştir. Argüman, "klasik plaka teorisine" ve malzemenin bir kuvvet yasası bileşimi varsayımına dayanmaktaydı. Düzlem içi basınca maruz kalan "fonksiyonel derecelendirilmiş plakaların" bir burkulma çalışması da gerçekleştirilmiştir (Yan ve diğ., 2016).

Araştırma ekibi, ağ içermeyen bir yaklaşım kullanarak FDM'lerin sıcaklığa bağlı niteliklerle nasıl optimize edileceğini araştırmıştır. Söz konusu araştırmada kütle en aza indirilmiştir ve bir kısıtlama, basınç gerilmelerinin ve kritik gerilimin ihlali olarak tanımlanır. Araştırma, yüzeyde saf seramik ve saf metalden oluşan ince tabakalar ile iç tarafta kalın bir FDM tabakasından oluşan bir yapılandırma ile başlamıştır (Şimşek, 2015). Dokuz farklı tasarım kullanılmıştır. İnce bir FDM tabakasına sahip bir profilde birleşirler. Metal (ZrO<sub>2</sub>) seramikten (Ti-6Al-4V) daha ağır olduğu için, elde edilen FDM yüksek oranda metal içerir. Bu çalışma, raporun amacının önemini ortaya koymaktadır.

Sürekli topoloji optimizasyonu kavramını kullanan araştırma, FDM yapıları için önerilen bir tasarım oluşturmuştur. Fonksiyonel derecelendirilmiş malzeme kavramının araştırılmasıyla benzersiz yapısal türlerin üretilebileceği belirlenmiştir. Sonuç olarak, FDM'lerden oluşan kompozit birim hücre tasarımının, sürekli topoloji optimizasyonu kavramları kullanılarak incelenmesi tavsiye edilmiştir (Daneshmehr ve diğ., 2015). Bu tavsiye, raporun optimizasyon amacını doğrulamaktadır.

Avcar ve Mohammed (2018) tarafından yapılan çalışma, "lineer olmayan yarı-uyumlu formülasyonu" FDM yapıları senaryosuna ve bunlarla birlikte gelen FE modeline uygulamaktadır. Yarı uyumlu lineer olmayan formülasyon, geliştirilmiş bir Lagrange yaklaşımına dayanmaktadır ve küçük gerilmeler ve büyük yer değiştirmeler olduğunu varsayar. Green gerinim tensörünün geometrik sertlik karakterizasyonunda, geometrik olarak lineer olmayan bir formülasyonla sonuçlanan şekilde eğilme ve kesme kuvveti stresleri dahil edilmiştir. Sertlik matrisinin belirsiz olmayan özelliğinden dolayı Gauss entegrasyonu gerçekleştirilmemiştir. Sonuç olarak, aşamalı lineer olmayan analiz için hesaplama süresi önemli ölçüde azalmaktadır. Sigmoid

fonksiyonları ile gösterildiği üzere bileşen malzemelerinin hacim yüzdesine göre, FDM kabuklarının ve plakalarının malzeme özellikleri kalınlıkla birlikte sürekli olarak değişmelidir.

## 2.10 FDM Üretim Yöntemleri

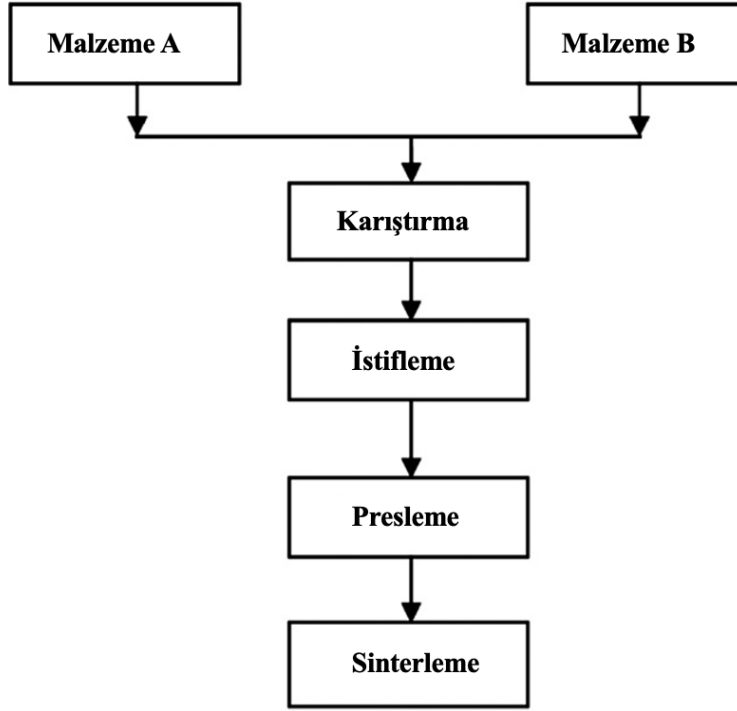
Derecelendirilmiş bir gradyan malzemesi için üretim süreçleri genellikle iki aşamaya ayrılabilir: heterojen bir alandaki yapının yapısı (derecelendirilmiş karışım) ve bu tasarımın "tek bir malzemedan" geçişi (katılaşma). Aşamalı karıştırmanın üç aşaması bileşenler, homojenlik ve ayrışmadır. Temel prosedürler, yapıya öncü bileşenlerin veya tozların adım adım eklenmesinin üretilmesine dayanmaktadır. Son yıllarda, gelişmiş otomasyon teknolojileri, ekonomik ve teknolojik olarak sürdürülebilir genişleme sürecini basitleştirmiştir (Zghal ve Dammak, 2020). İki malzeme arasındaki keskin bir arayüz, homojenizasyon aşamasında taşıma ekipmanı kullanılarak bir gradyana dönüştürülür. Homojenizasyon ve ayrışmanın her ikisi de sürekli gradyanlar yaratırken, oluşturulabilecek gradyan türleri açısından kısıtlamaları bulunmaktadır.

Tipik olarak bunu, kurutma ve katılaşma derecelendirilmiş karışım aşamaları izler. Bu konsolidasyon prosedürlerine duyulan ihtiyaç fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeye uygun hale getirilmelidir. Ek olarak, konsolidasyon boyunca FDM'nin eşit olmayan küçülmesine özel dikkat gösterilmelidir. Son yıllarda, araştırmacıların çalışmaları, sürekli bir bileşim gradyanına sahip kompozitler oluşturmak için devrim niteliğinde bir yaklaşımın geliştirilmesine olanak sağlamıştır (Nejad ve diğ., 2016). Bu yaklaşım, malzeme özelliklerinin yanı sıra partikül çapının karesiyle de ilişkili olan ortam tozlarının birlikte çökeltilmesine dayanmaktadır. Münferit tozların partikül boyutlarının düzenlenmesiyle ve değiştirilmesiyle, oluşturulan çökelti tortuda farklı konsantrasyon gradyanları oluşturmak mümkündür.

FDM kavramını uygulamanın önündeki birincil engel, gerekli gradyan ile üretim için verimli bir teknik geliştirmektir. Bu tür savurma döküm ve TM dahil olmak üzere homojen yapılar üretmek için kullanılan teknolojilerin tümü, homojen olmayan yapıların üretilmesinde az çok başarılıdır; yine de bu prosedürler, ihtiyaç duyulan yapı için yeterince çok yönlü değildir (Zhao ve diğ., 2016). İşleme yoluna bağlı olarak, "toz metalurjisi (TM), kendiliğinden yayılan yüksek sıcaklık sentezi (SHS), kıvılcım plazma sinterleme (SPS), sürtünmeli karıştırma işlemi (FSP), savurma döküm, CVD ve PVD" dahil olmak üzere farklı üretim süreçleri mevcuttur. Bu yaklaşımlar aşağıdaki alt bölümlerde detaylı olarak açıklanmaktadır. Gradyan malzemelerin büyümesini değerlendirmek için çeşitli yaklaşımlar bulunmaktadır; en sık kullanılan stratejiler burada özetlenmiştir (Li ve Hu, 2017).

### 2.10.1 TM prosedürü

TM tekniği, FDM'leri üretmenin çok uygun ve umut vaat eden bir yöntemidir. TM yöntemini kullanarak FDM üretiminde yer alan aşamalar şekilde gösterilmektedir.



**Şekil 2.5 :** Toz metalurjisi için işlem akış şeması.

İşlem, malzemelerin tanımlanması ile başlar ve en avantajlı bileşim dağılımının tasarımı; toz karışımlarının önceden tanımlanmış yapı dağılımına göre sabit veya kademeli bir şekilde istiflenmeye çalışılması; daha sonra yığılmış tozun CIP tarafından emilmesi ve son olarak, oluşturulan kompaktın bir sinterleme fırınında konsolidasyonu ile devam eder. TM işleme sırasında küçük gözeneklilik ve küçük kırıklar gibi hataları en aza indirirken her zaman iki önemli faktör ele alınmalıdır (Van Do ve diğ., 2017). Birincisi, derecelendirilmiş yeşil kompaktlar için üretim prosedürüdür; ikincisi, baştan sona tutarlı bir sıcaklık sağlayacak şekilde sinterlenmiş kompaktlardır.

TM tekniği, gözeneklilik veya gözenek boyutu, kimyasal bileşim ve faz hacmi içeriğini temsil edenler de dahil olmak üzere bir dizi gradyan üretimine izin verir. Uygulama için iki tür gradyan çok önemlidir: kademeli ve sürekli gradyanlar. Derecelendirilmiş yeşil kompaktlar elde etmek için birkaç yöntem bulunmaktadır. Sürekli derecelendirme, "ıslak toz püskürtme, biçimlendirme, ıslak filtreleme, santrifüj işleme, titreşimli istifleme, bulamaç daldırma ve sıralı kayma dökümü" dahil olmak üzere çeşitli yöntemlerle gerçekleştirilebilir. Sürekli bir derecelendirmeye eşdeğer olan adım adım bir derecelendirme oluşturmak basittir (Nejad ve Hadi, 2016). Yukarıda bahsedilen tekniklerin yarattığı yeşil bileşenlerin tümünü stabilize etmek için bağlayıcılar gereklidir. Ek olarak, değişen bileşen malzeme karışım oranları ile karmaşık bir süreç olduğundan, tek tip sinterleme çok önemlidir. Çarpmanın, kesik büyümenin, yarılmanın ve çatlamanın temel nedeni düzensiz sinterlemedir. Bu zorluklar, etkinleştirici bir eleman (çoğu durumda bakır veya demir gibi metaloitler) ve diğerlerinin yanı sıra "sıcak presleme" ve "sıcak izostatik presleme" gibi basınçlı sinterleme işlemleri kullanılarak tozların partikül boyutunun düzenlenmesiyle ele alınabilir (Zghal ve Dammak, 2020).

### 2.10.2 Kademeli bir gradyan oluşturma prosedürü

"Katmanların kalıpla sıkıştırılması (toz istifleme)", bir kademeli gradyan oluşturmak için yaygın ve başarılı bir tekniktir. Bu işlemde gradyanı oluşturmak için, bir sıkıştırma kalıbına çeşitli bileşimler içeren bir dizi toz katmanı konulur. Kademeli bir gradyan oluşturur şekilde kademeli toz biriktirmeye yönelik sabit bir malzeme tedariki sağlamak için konveyör bant kullanılabilir (Njim ve diğ, 2021). Örneğin, kalıp sıkıştırma işlemi, bırakılabilecek toz katmanlarının sayısı üzerinde bir kısıtlamaya sahiptir; örneğin, laboratuvarıda on katmana kadar kombinasyon mümkündür, ancak ileriye dönük uygulamalarda yalnızca üç katman mümkündür. Ek kısıtlamalara, münferit katmanların kalınlığını yönetme becerisi, imal edilen bileşenlerin sınırlı boyutu ve düşük üretkenlik dahildir (Naebe ve Shirvanimoghaddam, 2016).

Kademeli bir gradyan oluşturmak için bir diğer teknik tabaka laminasyonudur. Farklı kalınlıklarda ayrı olarak hazırlanmış ince tabakalar, kademeli bir gradyan oluşturacak şekilde birleştirilir. İnce bir tabaka yapmak için haddeleme sıkıştırma veya bant döküm gibi ıslak ve kuru toz işlemleri kullanılır. Yukarıda bahsedilen işlemler, çok ince bir kalınlığa sahip büyük bir yüzey alanının oluşturulmasını sağlar. Bu toz haddeleme prosedürü endüstride büyük ölçekte kullanılmaktadır. Bu prosedür, metal tozunun sürekli olarak bir haddeleme makinesine beslenmesini ve aynı anda ısıtılmasını içerir (Martínez-Pañeda, 2019). Sinterlemeden sonra toz katmanı ezilir ve bir şerit oluşturmak üzere silindirler içinde sıkıştırılır. Bant dökümde, bulamaç kullanılarak ince bir şerit hazırlanır; bu yöntemde, gerekli bileşimin bir bulamacı, içinden bulamacın tedarik edildiği depolama bölmesinde biriktirilir. Bu boşluğun altından bir sürekli polimer bant geçer ve bulamaç bant üzerinde bir şerit oluşturur. Bant ve bulamaç daha sonra bir fırında kurutulur ve kurutulmuş bulamaç şeridi bir makara üzerine sarılır. Bu işlem, elektronik seramikler (çok katmanlı kapasitörler ve yalıtılmış alt tabakalar), bıçaklar, yapısal laminatlar, membranlar ve katı oksit yakıt hücreleri üretmek için kullanılır. Bu işlem, kalınlıkları 25 m ile 1 mm arasında değişen şeritler üretir. Bulamaç daldırma ve kayar döküm, yalnızca birkaç katmanın yerleştirilmesi gerektiğinde kullanılabilir. Kayar döküm, alt tabaka olarak tek bir gözenekli ortam kullanır. Bu platform, seçilen toz karışımının bu tip bir bulamacına daldırıldığında, kılcal hareket bulamacı gözeneklere çeker.

### 2.10.3 Sürekli gradyan oluşturma prosedürü

Sürekli bir gradyan, santrifüjlü toz oluşturma yöntemi kullanılarak hazırlanabilir. Bu yöntemi kullanırken, dairesel borunun dağıtım plakası, çeşitli bileşimlerden oluşan bir sürekli toz kaynağını alır (Shen, 2016). Toz parçacıkları yeterli kapasiteye sahip bir gövdeyi şekillendirmek için silindirin iç astarına çarptıkça, aynı anda organik bir yapıştırıcı püskürtülür. Tek kısıtlama, silindirik olması gereken parçaların yapısıdır. Çökeltme sırasında, gözenek boyutu gradyanlarını oluşturmak için farklı hızlar ve yoğunluklar karışır. Bu, ortalama gözenek gradyanı ile sonuçlanır.

Sürekli bir gradyan oluşturmak için başka bir teknik, elektroforetik biriktirmedir (EPD). Ucuz olduğu ve karmaşık geometriler üretebildiği için bu uygun bir seçenektir. Kademeli gradyan FDM de mümkündür. G.M. Bose bunu 1740'ta, bir sıvı sifon deneyinde keşfetmiştir. Elektroforez ve biriktirme bu tekniği oluşturan iki işlemdir. Elektroforezde, elektriğin süspansiyon parçacıklarının hareketini nasıl etkilediğini görmek için bir süspansiyon incelenir. Biriktirme, süspansiyon parçacıklarının çökeltme sürecini ifade eder. Süspansiyondaki parçacıklar

elektrostatik veya elektrostatik olarak kararlı olmalı ve bir elektrik alanına tepki vermelidir. EPD yapabilmek için parçacıkların bir elektrik alanında kararlı olması gerekir (Şimşek, 2015).

Uygulanan bir elektrik akımına farklı tozların elektroforetik reaksiyonu, derecelendirilmiş bir bileşim ile sonuçlanan şekilde değişir. DLVO teorisi, EPD yöntemini açıklamak için ileri sürülen birkaç teoriden biridir. İtici ve çekici enerjinin etkilerini keşfederek koloidal süspansiyonların tutarlılığını açıklamaktadır (Saleh ve diğ., 2020). "Sürekli bir Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> stabilize zirkonya (YSZ) gradyanına sahip FDM" hazırlamak için etanol ve asetik asit içinde bir Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve ZrO<sub>2</sub> süspansiyonu kullanılmıştır. Hazırlanan FDM, EPD ve sinterlemeden sonra 16 ile 24 HV sertlik aralığına ve 2 ile 10 MPa-m<sup>1/2</sup> kırılma tokluğu aralığına sahip olmuştur (Natarajan ve diğ., 2019).

#### **2.10.4 Yüksek sıcaklıklarda kendi kendine yayılan sentez**

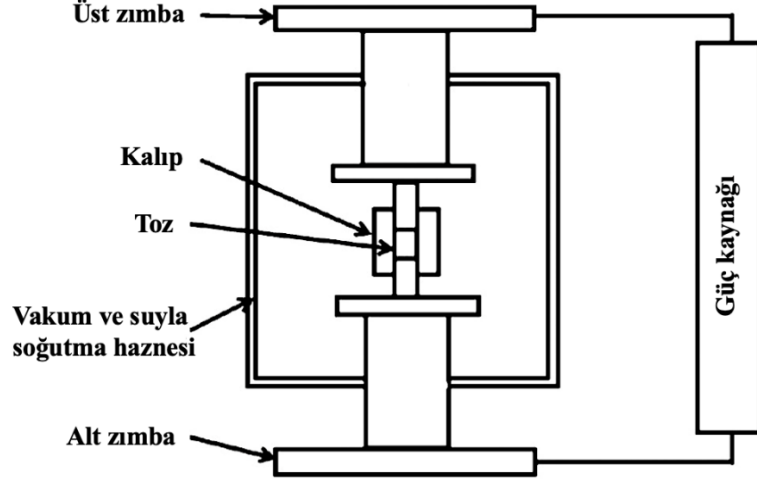
SHS, refrakter maddeler ve fonksiyonel kaplamalar oluşturan sıvı reaksiyon ürünlerini katılaştırmasıyla çelik bileşenlerin sertleştirilmesi için etkili bir yöntemdir. 1967'de ortaya çıkmıştır ve pratikte çok çeşitli tozlar, fonksiyonel kaplamalar ve refrakter bileşikler üretmek için kullanılmıştır (Zhang ve diğ., 2020). SHS'nin önemli bir avantajı, pahalı ve karmaşık yüksek sıcaklıklı ısıtma sistemlerine ihtiyaç duymamasıdır. Reaksiyon sisteminin iç enerjisi, işlem bu aralıkta gerçekleşmesine rağmen, sıcaklığı 1500–4000°C'ye yükseltir. Tüm bu sıcaklıklarda, sentez için tahmini süre, birçok saatten saniyelere veya dakikalara düşürülerek yüksek saflıkta ürünler elde edilir. Metaller, metalik olmayanlar ve metal oksitler çoğu durumda en yaygın başlangıç malzemeleridir. Bu bileşenlerin reaksiyona girdiği aşırı koşulların bir sonucu olarak yeni maddeler ve fazlar oluşur (Martínez-Pañeda, 2019). Pek çok faydası olduğu için bu işlemi uygulamak ve iyileştirmek için ardı ardına çalışmalar yapılmıştır.

#### **2.10.5 Plazma kıvılcıklarının sinterlenmesi**

Konvansiyonel sinterlemenin aksine, SPS, tozu ısıtmak ve içeriden kompakt kalıp yapmak için verimli DC kullanır, bu da aynı anda yüksek bir ısıtma hızı ve yüksek sinterleme hızı sağlar. SPS ayrıca sıcaklık ve basıncı aynı anda kullanarak yüksek bir ısıtma hızı ve yüksek bir sinterleme hızı sağlar (Nejad ve Hadi, 2016). Dahili ısıtma sayesinde sinterleme işlemi sadece birkaç dakika içinde tamamlanabilir. Alt tabaka sıcaklığında kalan süre çok kısadır, bu nedenle hızlıca yapılır, bu da işlemi daha hızlı hale getirir. Araştırmacılar, etkililiklerinin bir sonucu olarak artık dikkatlerini SPS kullanarak FDM'lerin imale edilmesine yöneltmektedir. SPS sistemi, çeşitli bileşenlerle aşağıdaki şekilde gösterilmektedir. Isıtma sırasında iki adet hareketli zımba yardımı ile basınç uygulanır. Bir grafit zımbadan geçerken, bir DC güç kaynağı tozu içten dışa ısıtır. Hareketsiz ortam ve soğutma, bir soğutma ve vakum odası tarafından sağlanır.

Grafit kalıp, tozu daha sonra (vakum veya argon gibi) gerekli atmosferle doldurulan ve sıkıştırılarak kapatılan SPS odası içine paketlemek için kullanılır. Bir kontrol modülü kullanıldığında, ürün modül olmadan olduğundan daha kısa sürede hazır olur. Daha geleneksel sinterleme işlemine kıyasla malzeme özellikleri açısından üstün sonuçları nedeniyle, SPS imalat camiasında büyük ilgi uyandırmıştır. Aşınma direnci, eğilme mukavemeti ve yüksek kırılma tokluğu gerektiren biyomalzemeler ve

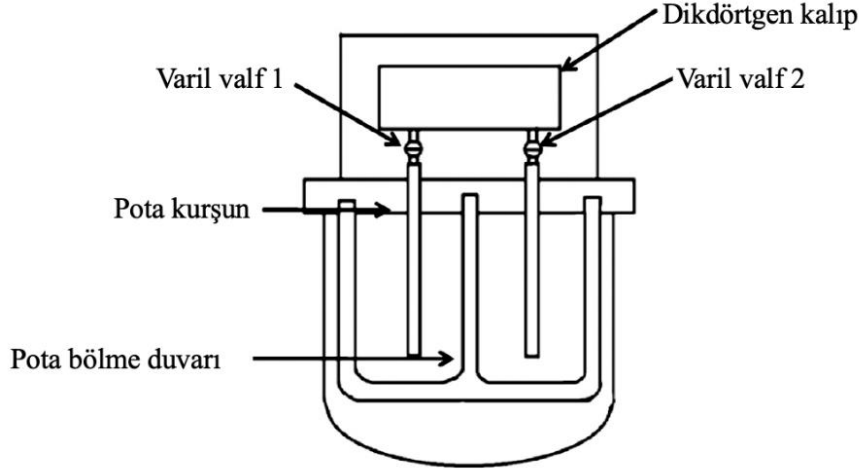
metal-seramik kompozitler de SPS'den faydalanabilir (Pydah ve Sabale, 2017). Bir kemik implant malzemesi olarak, biyomalzeme eklem protezlerinde kullanıma uygundur. En iyi bileşim dağılımını ve yoğunlaştırmayı elde etmek amacıyla, termoelektrik enerji dönüşümüne uyumlu pedde kullanılan nikel ve alüminyum SPS kullanılarak hazırlanabilir.



Şekil 2.6 : Sistem yapılandırması.

#### 2.10.6 Düşük basınç yöntemi

Ekipmanın şematik diyagramı aşağıda gösterilmektedir. Bir pota, iki benzersiz malzemeyi ve ayrıca hava geçirmezlik için refrakter bir kurşunu barındırmak için iki bölüme ayrılır. Ek olarak, çapraz bulaşmayı önlemek için bir varil valfi bulunmaktadır. Başlamak için iki benzersiz malzemeyi ikiye ayrılır ve ardından pota fırına konulur (Nejad ve Hadi, 2016). Bu aşamada, valf 2 kapatılır ve eriyik, seramik tüp 1 vasıtasıyla sıkıştırılmış nitrojen aracılığıyla kalıba zorlanır. Eriyik istenilen kalınlığa ulaştığında valf 1 açılır ve kalan eriyik boşaltılır. Daha sonra valf 1 kapatılır ve eriyiği ikinci bölmeden ikinci seramik tüp yoluyla kalıba zorlamak için basınçlı nitrojen kullanılır. Bu teknolojinin en önemli avantajı, kullanılan ekipman standart dökümhane ekipmanı olduğundan maliyet etkinliği ve "ilk katılmış katmanın" kalınlığı ile tanımlanan gradyan katmanının ayarlanabilir kalınlığıdır. İkinci eriyik döküldükten sonra sıcaklık, birinci sert katmanın eridiği noktaya kadar yükseltilir ve bu da daha yoğun bir gradyan katmanı ile sonuçlanır (Li ve Hu, 2017).



Şekil 2.7 : Düşük basınçlı döküm yöntemi şeması.

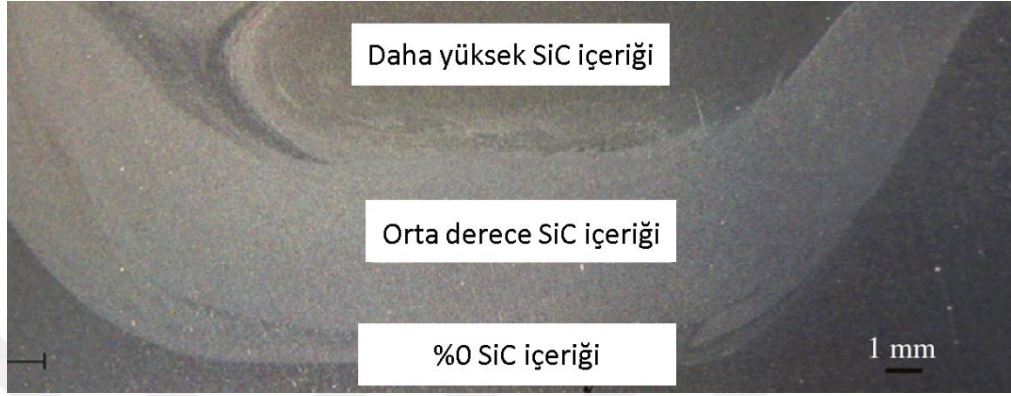
### 2.10.7 Sürtülmeli karıştırma işlemi

FSP, FDM üretimine yönelik bir diğer katı hal yaklaşımıdır. FSP, "sürtünme karıştırma kaynaklama (FSW)" yönteminden türetilmiştir. Her iki yöntem de aynı temel kavram ve ilkeye dayanmaktadır, ancak amaçları farklıdır. FSW bir metal bağlantı tekniğidir, FSP ise bir mikroyapı modifikasyon yöntemidir. Ek olarak, FSP dişli ve omuz pimli bir metalik alet içerir (Nejad ve Hadi, 2016). Bu pim, plaka yüzeyinin hemen altında bulunan ve takviye gerektiren oyuğa yerleştirilir. Bu alet kendi eksenini etrafında sürekli olarak döner ve önceden tanımlanmış bir yol boyunca hareket etmeden önce, takviye malzemesi ile birlikte uygun alet eğim açısında oyuğa dalar. Malzeme, pim hareketi tarafından üretilen sürtünme ısısının bir sonucu olarak pimin etrafında akar ve daha sonra hidrostatik basınç altında dövülür ve katılaştırılır. FSP diğer yöntemlere göre, hassas kontrol, mikroyapısal iyileştirme, uniformite, yoğunlaştırma ve işlenen bölgenin derinliğinin ayarlanabilirliği dahil olmak üzere bir dizi avantaj sağlar. FSP ayrıca daha az enerji tükettiği ve işlenen nesnenin boyutunu veya şeklini değiştirmediği için çevre dostudur (Naebe ve Shirvanimoghaddam, 2016).

FSP büyük ölçüde alüminyum endüstrisinde kullanılmaktadır ve yöntem ilk olarak "AA5083/SiC" FDM üretimi için geliştirilmiştir. Alüminyum matristeki SiC, FSP yaklaşımı kullanılarak verimli bir şekilde güçlendirilir. Bu FSP yaklaşımı alüminyum içeren alaşımlar için optimize edilmiş olsa da, "bronz, bakır alaşımları, magnezyum alaşımları, alet alaşımları ve zirkonyum alaşımları" için de uygulanabilir. Bu teknik, "mikro/nanoparçacık takviyeli" kompozitlerin üretimi ve dökümlerinin mikroyapısal değişimi için çok uygundur. İlgili araştırmada, bu FSP fonksiyonel derecelendirilmiş köpük yapmak için kullanılmıştır. Gözenek konsantrasyonunda bir gradyan ile fonksiyonel derecelendirilmiş bir alüminyum (FG) köpüğü oluşturmak için "sürtünme karıştırma işleme tekniği" kullanılmış ve fonksiyonel derecelendirilmiş köpüklerin deformasyon bölgesinin kesin kontrolüne olanak sağladığı gözlemlenmiştir. Daha sonraki çalışmalar FSP'yi, içine güvencenin yerleştirildiği U şeklinli oluğun çıkarılması gibi FSP prosedüründe belirli değişiklikler gerektiren bir sarf malzemesi aracı yaklaşımıyla birleştirmiştir (Gupta ve Talha, 2015).

Ayrıca, polimerik kompozit malzemeleri imal etmek için FSP kullanılabilir. Vanadyum alaşımlarının işlenmesi ve birleştirilmesi de dahil olmak üzere nükleer füzyonda kullanılanlar gibi enerji ile ilgili malzemelerde de çok önemli bir rol

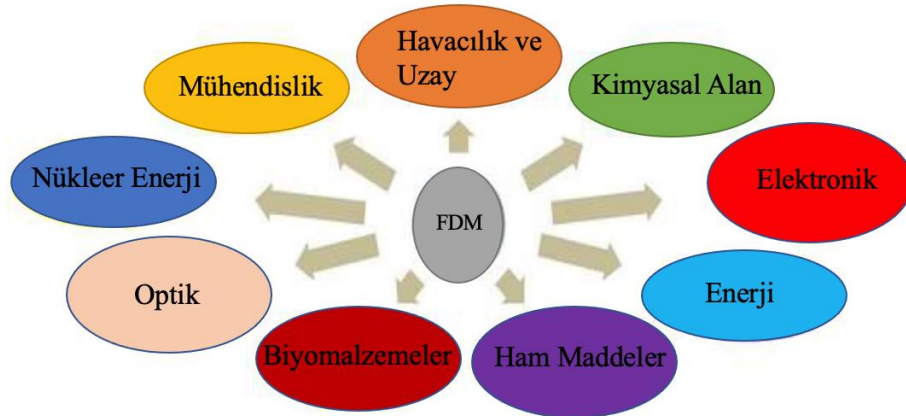
oynayabilir. FSP teknolojisinin birçok sorunu bulunmaktadır. Takviyeli kompozit imalatı sırasında ortaya çıkan temel zorluklar, takım aşınması, stres ve azalan bağlantı mukavemetidir (Avcar ve Mohammed, 2018). FSW, alüminyum köpükle aynı gözeneklilik dağılımına sahip bir "A1050/A6061 gradyan köpük" geliştirmiştir. Bir sıkıştırma testi, taban malzemesinin yerleştirilmesinin köpüğün deformasyon davranışını değiştirebileceğini ve bunun da bir iyileşmeye yol açabileceğini göstermiştir.



Şekil 2.8 : FSP yöntemi bir Al-SiC FDM kesiti oluşturdu.

## 2.11 FDM Uygulama Alanları

FDM'ler olarak değerlendirilmiş olan derecelendirilmiş malzemeler kavramı, "inşaat malzemeleri, enerji dönüşüm malzemeleri, havacılık, uzay, nükleer enerji ve yarı iletkenler" dahil olmak üzere çok çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadır. Sonuç olarak, bu malzemeler taban tabana zıt iki özellik sergilemektedir: ısı yalıtımı ve ısı iletkenliği (Özdemir ve diğ., 2020). Şu anda hafif, güçlü ve dayanıklı ürünlerin üretilmesini sağlamaktadırlar. Malzemeler endüstriyel üretimin kritik bileşenleridir. Toplumsal üretim arttıkça, malzeme talebi de orantılı olarak artacaktır. Malzeme biliminin daha karmaşık bir disiplini olarak, fonksiyonel derecelendirilmiş malzemelere yüksek performanslı malzemeler geliştirme sorumluluğu verilmektedir. Metaller, seramikler ve plastikler gibi doğal ve inorganik malzemelerin akıllıca karıştırılmasıyla FDM, biyoloji, nükleer enerji, elektromanyetizma, havacılık, optik ve enerji dahil olmak üzere çeşitli sektörlerde kullanılmıştır.



Şekil 2.9 : FDM'lerin kullanılabileceği alanlar.

### **2.11.1 Havacılık ve uzay sanayi**

Bir uzay mekiğinin ve havacılık motoru bileşenlerinin ısıya dayanıklı yüzeyleri, "korozyon direnci, termal şok direnci, yüksek sıcaklık direnci ve termal yorulma direncine sahip fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeler" ile kaplanabilir. 2000K'yı aşan yüksek sıcaklıklara ve termal aşınmaya maruz kalacak uzay aracının yanma özellikleri odası duvarının yan tarafı, olağanüstü sıcaklık ve enerji yalıtım özelliklerine sahip bir malzeme gerektirirken, diğer taraf düşük sıcaklıkta sıvı hidrojen soğutmasına maruz kalacaktır (Li ve diğ, 2020). Düşük sıcaklıklar ve güçlü termal iletkenlik için gereklilikler doğacaktır. Yüksek sertliğe ve dayanıklılığa sahip, mekanik yük ve termal stresin neden olduğu termal yayılım koşulları altında bu kadar büyük bir sıcaklık farkına dayanabilen ve böylece uzun bir hizmet ömrü sağlayan "fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeler", bu açıdan diğer malzemelerden daha üstündür. Eşzamanlı olarak, uçak motoru yüksek derecede sertlik, korozyon direnci, aşınma direnci ve düşük bir termal genleşme ve yoğunluk katsayısı gerektiren hassas bir aksamdır. Sonuç olarak, FDM, konvansiyonel malzemelerde bulunmayan fiziksel ve kimyasal niteliklere sahiptir ve bir havacılık motor kanadının kolayca aşınabilen ve tüketilebilir bir bileşeni olarak kullanılabilir (Nikbakht ve diğ, 2019).

### **2.11.2 Nükleer enerji sanayi**

FDM'nin yüksek mukavemeti, sıcaklık direnci ve korozyona karşı direnci, yeni nesil nükleer endüstrinin genişlemesini sağlamaktadır. Nükleer enerji üretimi, nükleer enerji ve nükleer silahların depolanması çok tehlikelidir. Felaket bir kez gerçekleştiğinde, sonuçları geniş kapsamlı olacaktır (Chen ve diğ, 2018). Bu açıdan güvenliğini sağlamak hayati önem taşımaktadır. Nükleer füzyon reaktörlerinin kullanımı, füzyon enerjisi sürecinin güvenliğine katkıda bulunan termal stres gevşemesinin faydalı bir etkisini sergiler. Boudia ve diğ. (2018), FDM'nin mükemmel mukavemeti, ısı direnci ve koruyucu özellikleri nedeniyle nükleer fırın inşaat malzemeleri ve iç duvar malzemelerinde üstün olduğunu ve nükleer endüstrinin güvenliğini önemli ölçüde artırdığını bulmuştur.

### **2.11.3 Biyolojik etki alanı**

Kabuğun katmanlı yapısı, güçlü ve dayanıklı hayvan kemikleri ve katmanlı insan derisi de dahil olmak üzere, gradyan malzemeler doğada bulunur. FDM'nin tıptaki gelişimi, insanların tıbbi bakımı daha hızlı ve etkili bir şekilde almasını sağlamaktadır. Malzeme fonksiyonel derecelendirilmiştir ve yüksek özgül mukavemete, yüksek spesifik sertliğe, aşınma direncine ve biyouyumluluğa sahiptir (Sun ve diğ, 2020). Sonuç olarak, bu şekilde üretilen yapay eklem, yapay protez ile kişinin iskeleti arasında güçlü ve güvenilir bir bağlantı sağlar. Dayanıklı ve biyouyumludur, aynı zamanda mükemmel kendi kendini iyileştirme ve yenilenme özelliklerine sahiptir. FDM, olağanüstü nitelikleri nedeniyle protez kemikler, dişler ve kalp gibi biyolojik sektörlerde parlak bir geleceğe sahiptir.

### **2.11.4 Manyetik alan**

Özel yapılar, "fonksiyonel derecelendirilmiş malzemelerin" derecelendirilmiş dağılımının bir sonucu olarak benzersiz özelliklere sahiptir. Gradyan yapısı,

elektromanyetik alanda hem piezoelektrik hem elektromanyetik gradyan işlevleri sergiler ve diğer uygulamalar arasında seramik filtreler, elektromanyetik koruyucu kompozitler ve ultrasonik osilatörler üretmek için kullanılabilir. "Fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeleri" disk mıknatıslar, elektromıknatıslar ve osilatörler gibi eşyaları aynı anda daha küçük ve daha verimli hale getirmek için kullanmak da mümkün olabilir (Eldeeb ve diğ, 2021).

### **2.11.5 Enerji sektörü**

Ek olarak, "fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeler", "ısı, korozyon ve sıcaklık direnci" açısından ayrı özelliklere sahiptir. Birkaç özel amaçlı derecelendirilmiş malzemenin ortaya çıkması sonucunda, FDM enerji sektöründe daha önemli hale gelmiştir (Sun ve diğ, 2020). Örneğin, bir güç üretim sistemi bağlamında, "termodinamik enerji dönüşüm malzemesi" gradyanının kullanılması, emitörün 1860°C'lik yüksek sıcaklıktaki çalışma ortamında kırılmasını önler ve sistemin termal stresini önemli ölçüde düşürür. Egzoz sıcaklığı alt katmanı, sistemin düşük sıcaklık elektrotuna takıldığında çok fazla ısı kapasitesine ve ekzotermik radyasyona sahiptir.

### **2.11.6 Optik alan**

Sıradan cam yüksek bir sertliğe sahipken, aynı zamanda yüksek bir kırılma gücüne de sahiptir. Çevredeki ortamın öngörülemezliği nedeniyle, camın hizmet ömrü önemli ölçüde kısalmıştır. Aynı zamanda, sıradan camın geçirgenliği, çevredeki üretim, yaşam ve çalışmayı etkileyecek değişikliklere yanıt olarak değiştirilemez (Li ve diğ, 2020). Sonuç olarak, camın optik ve elektronik niteliklerini optimize etmek, camı geliştirmenin birincil odak noktası olmuştur. Nadir toprak mineralleri ve değişen kırılma indislerine sahip malzemeleri FDM'ye dahil ederek, camın optik özellikleri çevredeki ortama uyacak şekilde değiştirilebilir. İlgili akademisyenler, cam lazerler, optik fiber lensler, renksiz camlar ve yansıma önleyici filmler dahil olmak üzere çok çeşitli malzemeler üretebilmiştir (Loh ve diğ, 2018).

## **2.12 Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzemeler Kullanarak Malzeme**

### **Performansı Değerlendirmesi**

FDM'nin performansı daha tipik konvansiyonel malzemelerden farklı olduğundan, verimliliğini değerlendirmek için ayrı bir yaklaşımın oluşturulmasını gerektirir. Dünyanın her yerinden uzmanlar tarafından kesin ve sistematik performans değerlendirme metodolojilerinin yokluğu, FDM'nin devam eden gelişimini önemli ölçüde engellemiştir (Hadji ve diğ, 2019). Ultra yüksek sıcaklıkta yapısal malzemeler üretmek için, FDM başlangıçta havacılık ve uzay sanayisinde önerilmiştir. Bu nedenle, dünyanın dört bir yanından araştırmacılar, bir dizi çalışmada FDM'lerin mekanik özelliklerini, ısı yalıtım becerilerini, termal stres özelliklerini, termal şok direncini ve termal stres bırakma özelliklerini incelemiştir. "Fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeler" söz konusu olduğunda, performans değerlendirme artık temel laboratuvar çalışmalarıyla sınırlıdır. Sıkı bir değerlendirme mekanizması geliştirmek, FDM'nin geleceği açısından kritik öneme sahiptir (Eldeeb ve diğ, 2021).

### 2.12.1 FDM'lerin stabilite analizi

İki boyutlu yüksek mertebeli deformasyon teorisi, FG dairesel silindirik kabuktaki frekans tepkisini, burkulma stres dağılımını, hareketi ve stres bileşenlerini doğru bir şekilde öngörebilir. "Burkulma basıncını, temel döngüsel frekansları ve FG konik kabuklarının ilgili dalga sayısını" hesaplamak için Galerkin Yöntemi kullanılmıştır. Önemli aksenal yükler söz konusu olduğunda, FG kabuklarının geometrik özellikleri veya hacim oranı bir etkiye sahiptir (Bouida ve diğ, 2018). Statik yük faktörü ve boyutsuz yükseklik ölçeği parametresi, FG mikro kabuğunun kararsızlık bölgesi ile doğrudan ve ters orantılıdır. Dungetal'ın FG-bükülmüş konik kabukları, stabiliteyi açısından çalışılmıştır. Sonuçlar, konik bir kabuk üzerindeki katılaştırıcıların sayısı arttıkça hem burkulma yükünün hem stabilitenin arttığını ve bunun temel özelliklerinden büyük ölçüde etkilendiğini göstermektedir. FDM kabukları, kabuğun uzunluğunu uzatarak ve periyodikliği benimseyerek daha kararlı olabilir, ancak bir kabuğun dinamik kararlılığı yoğunluğuyla ters orantılı olarak azalır. FDM kabuklarının çatallanma burkulma yükü, sıcaklık direnci ve mekanik stresinin tamamı, dış basınçtan ve elastik bir tabandan etkilenir (Nikbakht ve diğ, 2019).

### 2.12.2 FDM plakaları

FG plaka kirişlerin elastik eğilmesi üzerine yapılan araştırma sonuçlarına göre homojen ve lineer yükler altında geometrik parametreler yükseldikçe stabilite de artmaktadır. Bu bozulma, FG kalın plakalar arasındaki burkulma sıcaklık farkını önemli ölçüde değiştirebilir. Genel çalışmada, değişen sabit sıcaklıklara ve kalınlıklara sahip lamine, fonksiyonel derecelendirilmiş dairesel plakalar incelenmiştir (Li ve diğ, 2020). Artan indeks ve azalan sac kalınlık oranı ile termal eğilme faktörünün arttığı keşfedilmiştir. İnce plakalı FG yapılarındaki stabilite sorunları araştırmacılar tarafından modellenmiştir. Araştırma yoluyla, elastik bir temelde ayarlanmış FG sektör plakalarının stabilite çalışması çözülmüştür. Winkler değişkeni ve güç kanunu indeksi, kritik burkulma yükünü azaltmak için yükseltilebilir. Kritik yük ve stabiliteyi belirlerken serbest dairesel kenarlara sahip FG plakalarının elastik tabanını ve kalınlığını dikkate almak önemlidir.

Kapsamlı araştırmalara göre, FG plakalarının burkulma analizi için düzlem içi sınır koşulları kritik öneme sahiptir. Önceki çalışmaların bir incelemesine göre, FG mikropalakaları hidrostatik bir basınca ve sabit bir çekme voltajı aralığına sahiptir. Bulguların mikroelektronik sistemlerin tasarımında faydalı olduğu söylenmiştir. FG plakalarının çatallanmasını ve stabilitesini araştırmak için Runge-Kutta tekniği kullanılmış ve sayısal çözümün analitik öngörüyle tutarlı olduğu bulunmuştur. FG plakalarının lineer olmayan termal atalet dayanıklılığı derinlemesine incelenmiştir (Hadji ve diğ, 2019). Dönen FG plakalarının, bunları termal olarak kararsız bir bölgede stabilize edebildikleri gösterilmiştir. Dönme sırasında, "ayrılma" olarak bilinen bir olgu meydana gelebilir. FDM plakalarının stabilitesi, araştırmacılar tarafından geliştirilen bir bilgisayar modeli kullanılarak incelenmiştir. FDM plakalarının kritik eğilme momenti, uzunlamasına ve kayma deformasyonunun etkilerini hesaba katan değişken serbestlik derecelerine sahip birkaç bilgisayar modeline göre yüksek dereceli deformasyon teorisi ile elde edilebilir. S-dinamik FDM'nin stabilitesinin analizi, dört-değişkenli rafine plaka teorisi kullanılarak yapılmıştır. S-FDM'nin sertliği değişse de, sonuçlar boyutsuz frekansın dinamik yük altında aynı kaldığını göstermektedir.

## 2.13 FDM ile İlgili Çalışmalar

Fonksiyonel derecelendirilmiş kirişler, araştırmacılar tarafından önerilen bir elastisite çözümüne, enine gerilmeler altında tabii tutulur. Düzlem kısımlarının düzlemsel ve kiriş eksenine paralel olduğu öncülünde, temel bir Euler-Bernoulli kiriş teorisi geliştirilmiştir (Li ve diğ, 2020). "Fonksiyonel derecelendirilmiş kiriş" yapılarının termoelastik özelliklerini araştırmak için yeni kiriş elemanı, yapıştırıcıyla tutturulmuş sandviç kiriş stres-gerinim modelleme incelemeleri araştırmada kısaca tartışılmaktadır (Avcar, 2019). Zghal ve Dammak'ın 2020'de bahsettiği iki boyutlu çözümler bulunmaktaydı. Basit destekli "fonksiyonel derecelendirilmiş seramik ve metalden" yapılmış plakaların analizinin nasıl büküleceğini açıkladılar. "Fonksiyonel derecelendirilmiş dikdörtgen bir plakanın", üzerinden geçen bir kuvvete nasıl tepki verdiğini görmek için testler yapılmıştır. Araştırma, "viskoelastik katmana" sahip bir sandviç kirişin büküldüğünde ve titreştiğinde nasıl davrandığını incelemektedir. Ortam sıcaklığında fonksiyonel derecelendirilmiş metal-seramik kirişleri (FDM) incelemek için kullanılan yer değiştirme alan teorisi, "yüksek dereceli kayma deformasyon teorisi" olarak adlandırılır (Sam ve diğ, 2021). Yeni bir kiriş teorisi kullanılarak, "fonksiyonel derecelendirilmiş kirişlerin serbest titreşimi" incelenmiştir. Bu teori, birinci mertbe kayma deformasyon kiriş teorisinden farklıdır. Fonksiyonel derecelendirilmiş sandviç plakaların kararlı durumda nasıl davrandığını anlamak için yeni yer değiştirme tabanlı yüksek dereceli kayma sapma teorisi kullanılmıştır. Araştırmadaki FDM'ler ve yapılar için en önemli konuları belirlemek ve vurgulamak için ilgili dergi makaleleri gözden geçirilmiştir. Homojen olmayan "fonksiyonel derecelendirilmiş (FG)" çekirdeklere sahip sandviç kirişler, geçiş duyarlılıkları ve doğal frekansları açısından incelenmiştir (Tang ve Yang, 2018).

### 2.13.1 Çalışmaların kapsamı

FDM, malzemenin özelliklerini her uygulamanın özel ihtiyaçlarına göre uyarlayarak malzeme araştırması alanında devrim yaratan yeni bir hibrit malzemedir. Ancak, bu hedefe ulaşma yolunda halen güçlükler bulunmaktadır. Ana maliyet güçlüğüne yanı sıra, tasarım verilerinin olmaması, seri üretim vb. gibi ek sorunlar da mevcuttur. Bu arada, FDM için uygun imalat süreçlerinin geliştirilmesinde ele alınması gereken güçlükler olsa da, halihazırda çok sayıda çalışma yapılmıştır. Daha etkili FDM'lerin oluşturulması, büyük bir veri tabanı oluşturmak ve optimal işlem kontrolüne yönelik öngörüye dayalı modeller oluşturmak için daha fazla çalışma gerektirecektir (Hadji ve diğ, 2019). Sonuç olarak, uzun vadede işlem kontrolünü iyileştirmek için kapsamlı araştırmalar gereklidir. İyileştirilmiş genel işlem performansı FDM'lerin üretim maliyetini düşürecek ve bu araçları kullanarak imalat sürecinin güvenilirliğini artıracaktır.

Oluşturulan her prosedürün önemli dezavantajları bulunmaktadır ve FDM üretimini iyileştirmek için daha fazla çalışmaya ihtiyaç vardır. FDM'lerin üretimi için toz metal metalurjisi oldukça başarılı bir yöntemdir, ancak sinterleme kusurları ve boyut ve şekil sınırlamaları gibi birtakım problemlerin ele alınması gerekmektedir (Sun ve diğ, 2020). Seri üretime ulaşmak amacıyla, sinterleme hatalarını önemli ölçüde azaltmak için SPS'de daha fazla iyileştirme gereklidir. Sürekli gradyan FDM üretmek için savurma döküm oldukça verimlidir. Ancak, üretilen bileşen ya simetrik ya da

silindirik olmalıdır. Döküm-boşaltma-döküm alanında, doğru eğimlerin ve kalınlığın elde edilebilmesi için daha yapılacak çok iş vardır. FSP ile ilgili olarak, zayıf birleştirme mukavemeti ve yorulma özelliklerinin yanı sıra takviyeli kompozitlerin işlenmesi sırasında takım aşınması da dahil olmak üzere çeşitli sorunlar bulunmaktadır. Vakum biriktirme, biriktirme ve termal püskürtme mükemmel kaplama yöntemleridir, ancak yüksek maliyetleri ve uygun gradyan kalınlığını elde edememeleri bu yöntemlere sekte vurmaktadır.

## 2.14 FDM'ler İle İlgili Güçlükler

Fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeler (FDM'ler), endüstriyel sanayi üzerinde derin bir etkisi olacak 21. yüzyıl devrimlerinden biridir. Kullanımları ve uygulamaları çok iyi bilinir hale geldiğinden, FDM'lerin belirtilen üretimde devrim yaratma hedeflerini gerçekleştirmelerini engelleyen birtakım kısıtlamaları bulunmaktadır (Bouida ve diğ, 2018). Kısıtlamaların çoğu, uygulama sektörüne bağlı olarak büyük ölçüde değişebilen şekilde tozun işlenmesi ve üretilmesi maliyeti ile ilgilidir. FDM'leri yapmak için kullanılan bir diğer yaklaşım Katı Serbest Biçimli İmalattır (SFF), ancak daha iyi bir yaklaşım bulmayı gerektiren bir dizi dezavantajı bulunmaktadır. FDM'nin özelliklerini yöneten bir veri tabanı oluşturmak amacıyla SFF'nin performansını artırmak için birçok çalışmaya ihtiyaç vardır. FDM imalat sürecinin hala manuel olduğunu ve genel performansı artırmak ve FDM'lerin maliyetini en aza indirmek amacıyla süreci tamamen otomatik hale getirmek için birçok değişiklik yapılması gerektiğini belirtmek önemlidir.

### 3. BAŞLANGIÇ DEĞERLER YÖNTEMİ VE TAŞIMA MATRİSİ

Mühendisliğe ait çeşitli problemlerde, sınır şartları yardımı ile belirtilmesi gereken sabitlerin sayısı çok olursa hesap yorucu ve hata yapmaya uygun hale gelir. Bu yüzden problemlerin kuruluşunda sabit miktarını minimumda tutmanın yöntemleri aranır. Başlangıç değerleri metodu adı verilen konu bu amacı sağlayan bir yöntemdir. Tek değişkenli problemlere uygulanan bu yöntemde ana fikir, sınır değerleri problemlerinin her birini başlangıç değerleri problemlerine dönüştürerek ara şartlardan doğabilecek yeni sabitlerin önüne geçmek ve problemlerin denklemlerini hep aynı başlangıçtaki sabitlerle ifade etmektir. Bu metod sayesinde problemlerin kuruluş ve çözümü aynı genel denklemler yardımı ile olmaktadır.

Hesapların sistemli ve doğru ilerleyebilmesi açısından bu yöntem uygulanırken matris hesabı esaslarına dayanmak çok daha iyi sonuç verecektir. Değişkenin çeşitli değerleri arasında geçişi sağlayan bu matrise Taşıma Matrisi adı verilir. Bu matrisin özelliklerinden ve belirtilmesi için gerekli bazı adımlardan söz edilecektir.

Herhangi bir sistem ele alınsın ve bu sistemin durumunu ifade etmek için  $n$  tane değer olsun.

$$S_1, S_2, S_3, \dots, S_{n-1}, S_n \quad (3.1)$$

$S_i$  değerlerine sistemin koordinatları denilmektedir. Sistemin durumunu gösteren bu değerler bir  $x$  serbest değişkenine bağlı olarak gösterilsin. Genelde bu parametre  $t$  zaman parametresi olacağı gibi yeri gösteren değişken de olabilir.

$$S_i[x], i = 1, 2, 3, \dots, n - 1, n \quad (3.2)$$

Bu  $n$  tane bir değişkenli fonksiyon sistemin durumunu belirtmektedir. Bunlar bir vektörün koordinatları gibi göz önüne alındığında aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$S(x) = \begin{bmatrix} S_1(x) \\ S_2(x) \\ \vdots \\ S_n(x) \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

Kolon matrisi olan bu büyüklüğe Durum Vektörü denilir ve bu vektörün koordinatları boyutsuz şekilde oluşturulmalıdır.

Artık asıl konu  $S(x)$  vektörünün belirtilmesidir. Bu amaçla  $S_i[x]$  fonksiyonlarının birinci türevlerinin bulunduğu kabul edilsin. Yine bu türev durum vektörü de aşağıdaki gibi bir kolon matrisle gösterilsin.

$$S'(x) = \begin{bmatrix} S'_1(x) \\ S'_2(x) \\ \vdots \\ S'_n(x) \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

Kanonik (düzgün, düzenli) Tasvirle  $S'(x)$  vektörü ile  $S(x)$  vektörü arasındaki bağıntı verilebilir. Bunun anlamı parametrenin  $x$  değerine ait durumdan,  $x + dx$  değerine ait duruma geçmenin nasıl olacağını tarif etmektir.

Durum vektörü ile türevi arasındaki bağıntının lineer olduğu kabul edilsin. Yani aşağıdaki gibi  $n$  tane lineer denklem verilsin.

$$\begin{aligned} S'_1(x) &= d_{11} \cdot S_1(x) + d_{12} \cdot S_2(x) + \dots + d_{1n} \cdot S_n(x) \\ S'_2(x) &= d_{21} \cdot S_1(x) + d_{22} \cdot S_2(x) + \dots + d_{2n} \cdot S_n(x) \\ &\vdots \\ S'_n(x) &= d_{n1} \cdot S_1(x) + d_{n2} \cdot S_2(x) + \dots + d_{nn} \cdot S_n(x) \end{aligned} \quad (3.5)$$

Burada bulunan  $d_{ij}$  katsayıları  $S_i$  durumlarından bağımsız olmakla birlikte  $x$  parametresine bağlı olabilirler. Bu sistemin daha toplu halde gösterilmesi istendiğinde şu yazılabilir:

$$S'(x) = D \cdot S(x) \quad (3.6)$$

Burada belirtilen  $D$  kare matrisiyle sistemin yakın durumları arasında geçiş özelliği tarif edilebildiğinden bu matris Diferansiyel Geçiş Matrisi olarak tanımlanır.

$$D = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & \dots & \dots & d_{1n} \\ d_{21} & d_{22} & \dots & \dots & d_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ d_{n1} & d_{n2} & \dots & \dots & d_{nn} \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

$S'(x) = D \cdot S(x)$  ifadesinde türevin tanımı hatırlanacak olursa aşağıdaki eşitliğe ulaşılır:

$$S(x + dx) = S(x) + [D \cdot S(x)]dx \quad (3.8)$$

Burada sistemin yakın durumları arasındaki geçiş tarif edilir. Parametrenin belirli bir değerinden, örneğin  $x = 0$ 'dan başlayarak herhangi bir  $x$  değerindeki duruma parçalı diferansiyel geçişle, sonsuz küçük adımlarla ulaşılabilir. Bunun yanı sıra böyle bir geçiş yerine  $x = 0$  başlangıç durumundan parametrenin  $x$  gibi sonlu değerine tek bir integral geçiş ile de geçilebilir. Bu direkt geçişi sağlayan matrise Taşıma Matrisi adı verilir ve şu şekilde gösterilir:

$$S(x) = F(x) \cdot S(0) \quad (3.9)$$

Burada belirtilmiş olan ifadeye  $S(0)$  durum vektörü ile sistemin başlangıç değerleri ifade edilir.

$$S(0) = \begin{bmatrix} S_1(0) \\ S_2(0) \\ \cdot \\ \cdot \\ S_n(0) \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

Yine aynı ifadeye  $F(x)$  ile de Taşıma Matrisi ifade edilmektedir. Taşıma matrisi kare formdadır.

$$F(x) = \begin{bmatrix} f_{11}(x) & f_{12}(x) & \cdot & \cdot & \cdot & f_{1n}(x) \\ f_{21}(x) & f_{22}(x) & \cdot & \cdot & \cdot & f_{2n}(x) \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ f_{n1}(x) & f_{n2}(x) & \cdot & \cdot & \cdot & f_{nn}(x) \end{bmatrix} \quad (3.11)$$



## 4. MALZEME ÖZELLİKLERİ İKİ DOĞRULTUDA DEĞİŞEN KİRİŞLER İÇİN TAŞIMA MATRİSİ

### 4.1 Temel Denklemler

Enkesiti x ve y düzleminde, eksenini z koordinatı üzerinde olan bir kirişin Elastisite modülü E, iki doğrultuda değişiyor:

$$E(y, z) = \alpha(y)\beta(z) \quad (4.1)$$

Euler Kiriş Teorisinde normal gerilme ( $\sigma_z$ ),

$$\sigma_z = E(y, z)y \frac{d^2v}{dz^2} = E(y, z)yv'' \quad (4.2)$$

şeklinde yazılabilir. Her iki taraf y ile çarpılarak enkesit üzerinde integre edilirse

$$M = \int \sigma_z y dF = \int \alpha(y)\beta(z)y^2 v'' dF \quad (4.3)$$

$$dF = dx dy \quad (4.4)$$

$$M = v''\beta(z) \int \alpha(y)y^2 dF \quad (4.5)$$

$$I = \int \alpha(y)y^2 dF \quad (4.6)$$

$$M = v''\beta(z)I \quad (4.7)$$

olur. Temel denklemler ise aşağıdaki gibidir:

$$\frac{dv}{dz} = \varphi \quad (4.8)$$

$$\frac{d\varphi}{dz} = \frac{M}{I\beta(z)} \quad (4.9)$$

$$\frac{dM}{dz} = T \quad (4.10)$$

$$\frac{dT}{dz} = 0 \quad (4.11)$$

## 4.2 Taşıma Matrisinin Bulunması

Bu denklem sistemi matris formunda

$$\frac{d}{dz} \begin{pmatrix} v(z) \\ \varphi(z) \\ M(z) \\ T(z) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{I\beta(z)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v(z) \\ \varphi(z) \\ M(z) \\ T(z) \end{pmatrix} \quad (4.12)$$

şeklinde yazılabilir. Bu sistemin  $\vec{f}(z)$  şeklinde bir ikinci tarafı da varsa, sistem daha kısa olarak,

$$\frac{d\vec{y}(z)}{dz} = \mathbf{A}\vec{y}(z) + \vec{f}(z) \quad (4.13)$$

şeklinde yazılabilir. Burada  $\mathbf{A}$  katsayılar matrisidir ve  $\vec{y}(z)$  şu şekildedir:

$$\vec{y}(z) = \begin{pmatrix} v(z) \\ \varphi(z) \\ M(z) \\ T(z) \end{pmatrix} \quad (4.14)$$

$TM(z)$  yardımıyla 4.13 numaralı denkleminin çözümü aşağıdaki gibidir.  $TM(z)$  taşıma matrisidir.

$$\vec{y}(z) = \mathbf{TM}(z)\vec{y}_0 + \int_0^z \mathbf{TM}(z-\tau)f(\tau)d\tau \quad (4.15)$$

4.11 numaralı denklem yardımıyla

$$T(z) = T_0 = \text{Sabit} \quad (4.16)$$

4.10 numaralı denklem yardımıyla

$$M(z) = M_0 + T_0 z \quad (4.17)$$

olur. 4.9 numaralı denklem yardımıyla

$$\frac{d\varphi}{dz} = \frac{M_0}{I\beta(z)} + \frac{T_0}{I\beta(z)} z \quad (4.18)$$

olur. Buradan

$$\varphi(z) = \varphi_0 + \frac{M_0}{I} \int_0^z \frac{dz}{\beta(z)} + \frac{T_0}{I} \int_0^z \frac{z}{\beta(z)} dz \quad (4.19)$$

elde edilir. 4.8 numaralı denklem yardımıyla

$$\frac{dv}{dz} = \varphi(z) = \varphi_0 + \frac{M_0}{I} \int_0^z \frac{dz}{\beta(z)} + \frac{T_0}{I} \int_0^z \frac{z}{\beta(z)} dz \quad (4.20)$$

bağıntısı elde edilir. Her iki yanın integre edilmesiyle

$$v(z) = v_0 + \int_0^z \varphi_0 dz + \frac{M_0}{I} \int_0^z \left( \int_0^u \frac{dz}{\beta(z)} \right) du + \frac{T_0}{I} \int_0^z \left( \int_0^u \frac{z}{\beta(z)} dz \right) du \quad (4.21)$$

elde edilir. İlk terimdeki integral hesap edilirse  $v(z)$

$$v(z) = v_0 + \varphi_0 z + \frac{M_0}{I} \int_0^z \left( \int_0^u \frac{dz}{\beta(z)} \right) du + \frac{T_0}{I} \int_0^z \left( \int_0^u \frac{z}{\beta(z)} dz \right) du \quad (4.22)$$

şeklinde yazılabilir. Böylece problemin tüm bilinmeyenleri ( $v(z)$ ,  $\varphi(z)$ ,  $M(z)$ ,  $T(z)$ ) 4.16, 4.17, 4.19 ve 4.22 bağlantılarıyla bulunmuş oldu.

$$\mathbf{TM}(z) = \begin{pmatrix} 1 & z & \frac{\int_0^z \left( \int_0^u \frac{1}{\beta(w)} dw \right) du}{I} & \frac{\int_0^z \left( \int_0^u \frac{w}{\beta(w)} dw \right) du}{I} \\ 0 & 1 & \frac{\int_0^z \frac{1}{\beta(w)} dw}{I} & \frac{\int_0^z \frac{w}{\beta(w)} dw}{I} \\ 0 & 0 & 1 & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (4.23)$$

4.23 te verilen taşıma matrisinde, çift katlı integrallerde integrasyon sırası değiştirilirse 4.24 bağlantısı elde edilir.

$$\mathbf{TM}(z) = \begin{pmatrix} 1 & z & \frac{\int_0^z \frac{z-w}{\beta(w)} dw}{I} & \frac{\int_0^z \left( \int_0^u \frac{w}{\beta(w)} dw \right) du}{I} \\ 0 & 1 & \frac{\int_0^z \frac{1}{\beta(w)} dw}{I} & \frac{\int_0^z \frac{w}{\beta(w)} dw}{I} \\ 0 & 0 & 1 & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (4.24)$$

4.13 ile verilen denklem sisteminin  $\vec{y}_0 = \vec{y}(0)$  başlangıç koşulları altında çözümünü 4.15'te de belirttiği gibi

$$\vec{y}(z) = \mathbf{TM}(z)\vec{y}_0 + \int_0^z \mathbf{TM}(z-\tau)f(\tau)d\tau \quad (4.25)$$

şeklindedir.

### 4.3 Çözümlü Örnekler

#### 4.3.1 Sol ucu ankastre, sağ ucu serbest olan L boyunda, sağ ucunda tekil P yükü olan çubuk

##### 4.3.1.1 Malzeme özelliği sabit çubuk

Bu durumda başlangıç değerleri  $v_0 = v(0) = 0$ ,  $\varphi_0 = \varphi(0) = 0$ ,  $M_0 = M(0) = -PL$ ,  $T_0 = T(0) = P$  dir. Bu durumda, dört başlangıç değerinin dördü de bilinmektedir. Bu problemde yayılı dış yük olmadığı için  $\vec{f}(z) = \vec{0}$  dır. İlk olarak elastisite modülünün sabit olduğu duruma bakalım.  $\beta(z) = E$  olarak seçilirse, 4.25 bağıntısı yardımıyla problemin bilinmeyenleri

$$v(z) = 6 \frac{Pz^3}{6EI} - \frac{LPz^2}{2EI} \quad (4.26)$$

$$\varphi(z) = \frac{Pz^2}{2EI} - \frac{LPz}{EI} \quad (4.27)$$

$$M(z) = Pz - LP \quad (4.28)$$

$$T(z) = P \quad (4.29)$$

olarak elde edilir. Bu sonuçlar mukavemet kitaplarında elastisite modülü sabit olan çubuklar için bulunan değerlerle aynıdır. Malzeme özellikleri sabit çubukta çökmeler ve dönmeler için boyutsuz ifadeler

$$v_1(\alpha) = v(\alpha) \frac{EI}{PL^3}, \varphi_1(\alpha) = \varphi(\alpha) \frac{EI}{PL^2} \quad (4.30)$$

olarak tanımlanmıştır.

##### 4.3.1.2 Malzeme özellikleri değişen çubuk

İkinci olarak elastisite modülünün çubuk boyunca değişiminin  $\beta(z) = e^{\frac{z}{L}} E$  olduğu duruma bakalım. 4.25 bağıntısı yardımıyla problemin bilinmeyenleri

$$v(z) = \frac{L^2 P (e^{-\frac{z}{L}} (2L + z) - 2L + z)}{EI} - \frac{L^2 P (L (e^{-\frac{z}{L}} - 1) + z)}{EI} \quad (4.31)$$

$$\varphi(z) = \frac{LP (L - e^{-\frac{z}{L}} (L + z))}{EI} - \frac{LP (L - L e^{-\frac{z}{L}})}{EI} \quad (4.32)$$

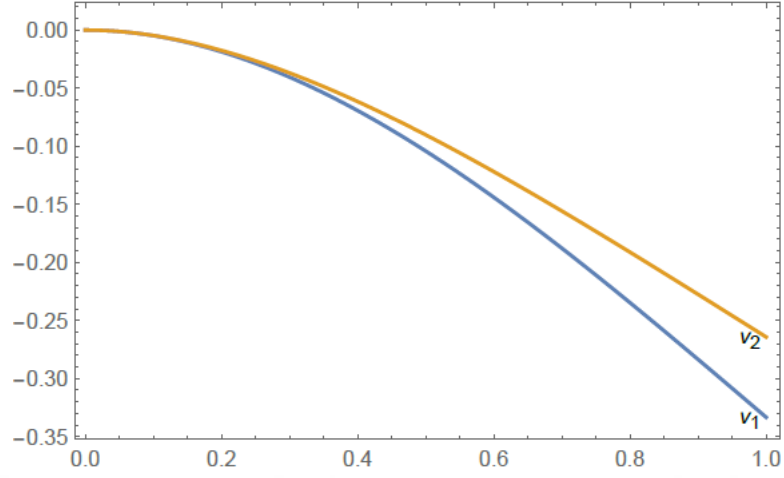
$$M(z) = Pz - LP \quad (4.33)$$

$$T(z) = P \quad (4.34)$$

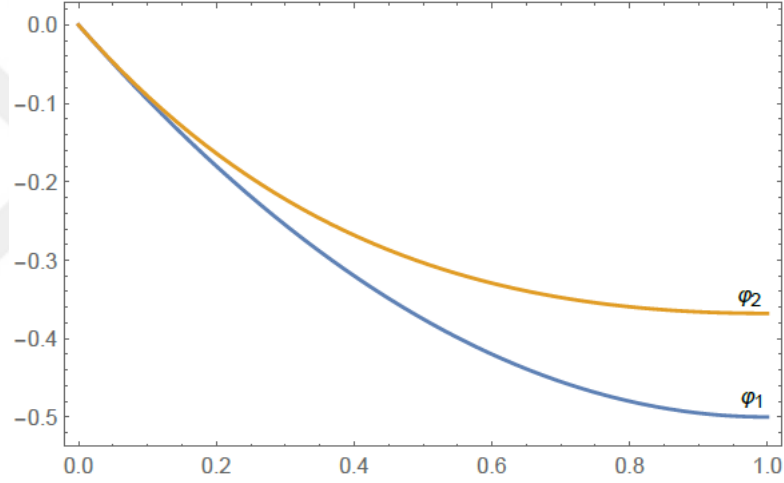
olarak elde edilir. Malzeme özellikleri değişken çubukta çökmeler ve dönmeler için boyutsuz ifadeler ise

$$v_2(\alpha) = v(\alpha) \frac{EI}{PL^3}, \varphi_2(\alpha) = \varphi(\alpha) \frac{EI}{PL^2} \quad (4.35)$$

olarak tanımlanmıştır. 4.29 ve 4.34 de  $\alpha = \frac{z}{L}$  dir.  $v_1(\alpha), v_2(\alpha)$  nin değişimi ve  $\varphi_1(\alpha), \varphi_2(\alpha)$  değişimi Şekil 4.1 ve Şekil 4.2’de verilmiştir,



Şekil 4.1 : Ankastre çubukta çökmeler.



Şekil 4.2 : Ankastre çubukta dönmeler.

### 4.3.2 Sol ucu ankastre, sağ ucunda sabit mesnet olan $L$ boyunda, düzgün yayılı yükle yüklü çubuk

#### 4.3.2.1 Malzeme özelliği sabit çubuk

Bu örnekteki kiriş hiperstatik olup, düzgün yayılı  $q$  yükü ile yüküdür. Bu durumda iki başlangıç değeri  $v_0 = v(0) = 0$  ve  $\varphi_0 = \varphi(0) = 0$  dir. Diğer iki başlangıç değeri  $M_0$  ve  $T_0$  uç koşulları yardımıyla bulunacaktır. Uç koşulları

$$v(L) = 0, M(L) = 0 \quad (4.36)$$

olarak yazılabilir. Bu problemde 4.13 bağıntısı ile verilen denklemde görülen  $\vec{f}$  vektörü

$$\vec{f} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ -q \end{pmatrix} \quad (4.37)$$

şeklinde yazılabilir. Önce elastisite modülünün sabit olduğu ( $\beta(z) = E$ ) durumuna bakalım. 4.25 bağıntısı yardımıyla problemin bilinmeyenleri

$$v(z) = \frac{M_0 z^2}{2EI} - \frac{qz^4}{24EI} + \frac{T_0 z^3}{6EI} \quad (4.38)$$

$$\varphi(z) = \frac{M_0 z}{EI} - \frac{qz^3}{6EI} + \frac{T_0 z^2}{2EI} \quad (4.39)$$

$$M(z) = M_0 - \frac{qz^2}{2} + T_0 z \quad (4.40)$$

$$T(z) = T_0 - qz \quad (4.41)$$

olarak elde edilir. 4.36 da verilen koşullar yardımıyla  $M_0$  ve  $T_0$

$$M_0 = -\frac{L^2 q}{8} \quad (4.42)$$

$$T_0 = \frac{5Lq}{8} \quad (4.43)$$

olarak elde edilir. Bu durumda problemin bilinmeyenleri

$$v(z) = -\frac{qz^2(3L - 2z)(L - z)}{48EI} \quad (4.44)$$

$$\varphi(z) = -\frac{qz(6L^2 - 15Lz + 8z^2)}{48EI} \quad (4.45)$$

$$M(z) = -\frac{1}{8}q(L - 4z)(L - z) \quad (4.46)$$

$$T(z) = \frac{5Lq}{8} - qz \quad (4.47)$$

olarak bulunur. Bu değerler mukavemet kitaplarından bilinen değerlerdir. Boyutsuz çökme, dönme, moment ve kesme kuvveti aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.

$$v_1(z) = \frac{Elv(z)}{L^4 q}, \quad \varphi_1(z) = \frac{El\varphi(z)}{L^3 q}, \quad M_1(z) = \frac{M(z)}{L^2 q}, \quad T_1(z) = \frac{T(z)}{Lq} \quad (4.48)$$

#### 4.3.2.2 Malzeme özellikleri değişen çubuk

İkinci olarak elastisite modülü çubuk boyunca değişen kirişi inceleyelim. Bu durumda  $\beta(z) = Ee^{z/L}$  olarak seçilecektir. 4.25 bağıntısı yardımıyla problemin bilinmeyenleri şu şekilde olacaktır:

$$v(z) = L \left[ -\frac{1}{2} L(q(6L^2 - 4Lz + z^2) + T_0(4L - 2z)) \right. \\ \left. + M_0(L(e^{-\frac{z}{L}} - 1) + z) \right. \\ \left. + Le^{-\frac{z}{L}}(Lq(3L + z) + T_0(2L + z)) \right] \\ / (EI) \quad (4.49)$$

$$\varphi(z) = [Le^{\frac{z}{L}}(L(2Lq - qz + T_0) + M_0) \\ - L(Lq(2L + z) + T_0(L + z) + M_0)] \\ / (EIe^{\frac{z}{L}}) \quad (4.50)$$

$$M(z) = M_0 - \frac{qz^2}{2} + T_0z \quad (4.51)$$

$$T(z) = T_0 - qz \quad (4.52)$$

olarak elde edilir. 4.36 da verilen koşullar yardımıyla  $M_0$  ve  $T_0$

$$M_0 = \frac{(4e - 11)L^2q}{2(e - 2)} \quad (4.53)$$

$$T_0 = -\frac{3(eLq - 3Lq)}{2(e - 2)} \quad (4.54)$$

olarak bulunur. Bu durumda aşağıdaki sonuçlara ulaşılır.

$$v(z) = [L^2q(e^{\frac{z}{L}}((5 - 4e)L^2 + 5(e - 2)Lz - (e - 2)z^2) \\ + L((4e - 5)L - (e - 5)z))] \\ / (2(e - 2)EIe^{\frac{z}{L}}) \quad (4.55)$$

$$\varphi(z) = [L^2q((e - 2)e^{\frac{z}{L}}(5L - 2z) - 5eL + 10L + ez - 5z)] \\ / 2(e - 2)EIe^{\frac{z}{L}} \quad (4.56)$$

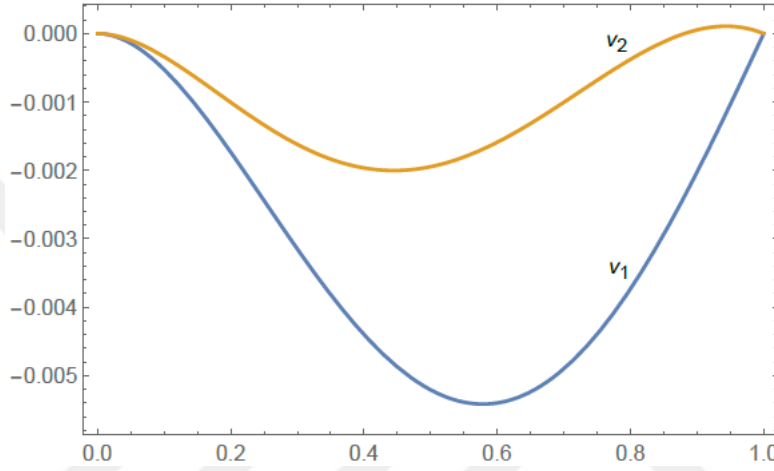
$$M(z) = \frac{q(L - z)((4e - 11)L + (e - 2)z)}{2(e - 2)} \quad (4.57)$$

$$T(z) = -\frac{3(e-3)Lq}{2(e-2)} - qz \quad (4.58)$$

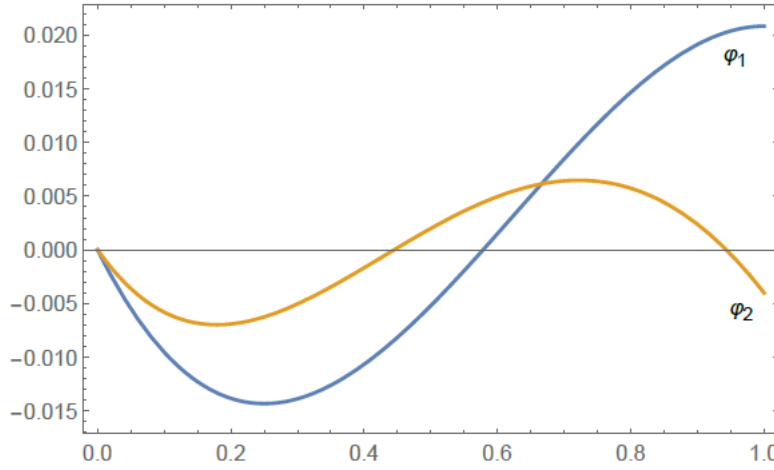
Boyutsuz çökme, dönme, moment ve kesme kuvveti aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.

$$v_2(z) = \frac{EIv(z)}{L^4q}, \quad \varphi_2(z) = \frac{EI\varphi(z)}{L^3q}, \quad M_2(z) = \frac{M(z)}{L^2q}, \quad T_2(z) = \frac{T(z)}{Lq} \quad (4.59)$$

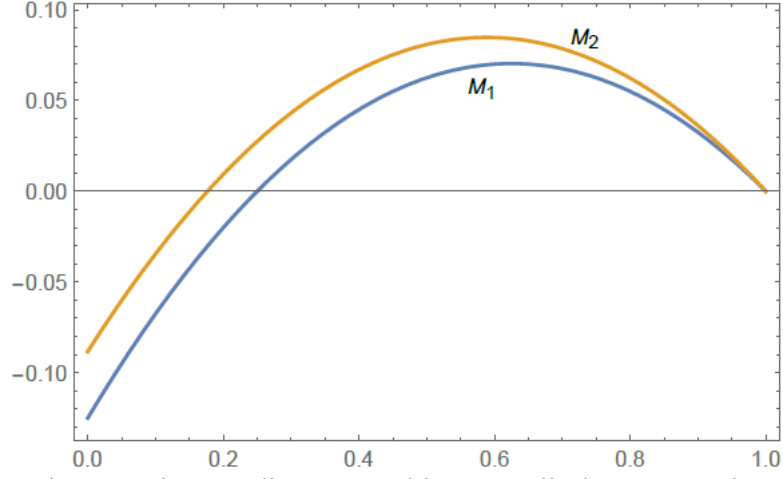
Sol ucu ankastre, diğer ucu sabit mesnetli, düzgün yaylı yükü yüklü kirişte malzeme özelliklerinin kiriş boyunca sabit ve değişken olması durumunda çökme, dönme, moment ve kesme kuvvetinin değişimi aşağıdaki şekillerle gösterilmiştir.



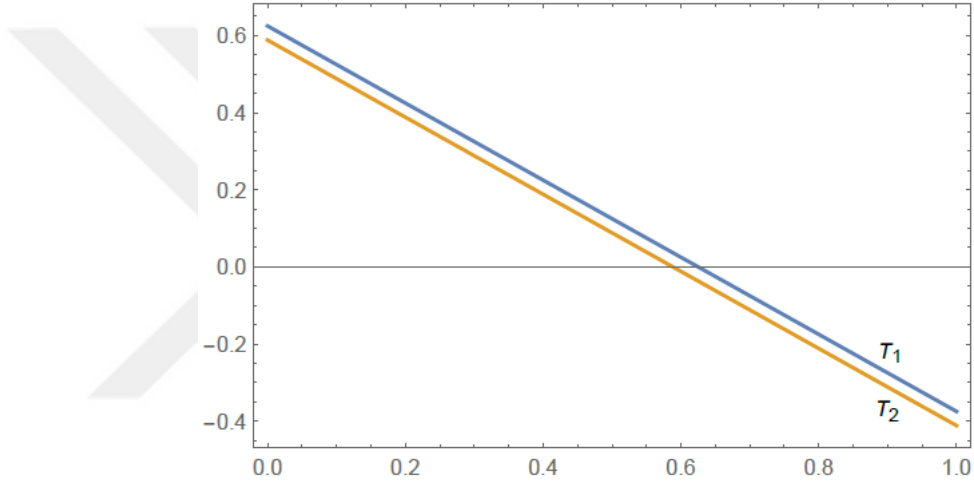
Şekil 4.3 : Bir ucu ankastre, diğer ucu sabit mesnetli, düzgün yaylı yükü yüklü kirişte çökmeler.



Şekil 4.4 : Bir ucu ankastre, diğer ucu sabit mesnetli, düzgün yaylı yükü yüklü kirişte dönmeler.



Şekil 4.5 : Bir ucu ankastre, diğer ucu sabit mesnetli, düzgün yayılı yükle yüklü kirişte momentler.



Şekil 4.6 : Bir ucu ankastre, diğer ucu sabit mesnetli, düzgün yayılı yükle yüklü kirişte kesme kuvvetleri.



## 5. SONUÇ

Endüstriyel gelişmeden kaynaklı uygulamaların gereksinimlerini karşılamak için, saf metaller, alaşımlar, seramikler, polimerler ve geleneksel kompozitlerin kısıtlamalarına çözüm olması amacı ile kademeli bir yapıya sahip karşıt özelliği olan malzemelerin geliştirilmesi gerekliliği ortaya çıkmıştır. Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzemeler (FDM'ler), malzeme özellikleri istenen yönlerde sürekli değişen gelişmiş kompozit malzemeler sınıfıdır. Bu tür malzemelerin kullanımı, geleneksel kompozitlerde katman arayüzleri aracılığıyla stres konsantrasyonunu, çatlama ve arayüz sorunlarını ortadan kaldırdığından inşaat, askeri, havacılık, nükleer enerji, biyomedikal, otomotiv ve denizcilik gibi birçok modern mühendislik uygulamasında kullanılmaktadır. Dahası, FDM'ler daha düşük enine kesme gerilimlerine ve sıcaklık şoklarına karşı yüksek dirence sahiptir. Çarpıcı özellikleri nedeniyle araştırmacılar, FDM'lerin davranışlarını daha kesin olarak tahmin etmek ve anlamak için gelişmiş teoriler ve analiz yöntemleri geliştirmişlerdir.

Bu çalışmada malzeme özellikleri iki doğrultuda değişen kirişlerde eğilme problemi için Euler-Bernoulli kiriş teorisi kullanılarak analiz edilmiştir. Problem Başlangıç Değerler Yöntemi kullanılarak incelenmiştir. Malzeme özellikleri iki doğrultuda değişen malzemelerin mekanik davranışları son dönemde birçok araştırmacı tarafından ele alınmış ve çok sayıda yayın yapılmıştır. Bu çalışmada malzeme özellikleri keyfi olarak değişen kirişler için taşıma matrisi verilmiştir. Bu taşıma matrisi yardımıyla her tip yük ve sınır koşulu için problemler kolayca çözülebilir. Takdim edilen taşıma matrisinin araştırmacılar için çok yararlı olacağı düşünülmektedir.



## KAYNAKLAR

- Akbaş, Ş.D., Fageehi, Y.A., Assie, A.E. and Eltaher, M.A.,** (2020). Dynamic analysis of viscoelastic functionally graded porous thick beams under pulse load. *Engineering with Computers*, (pp.1-13).
- Avcar, M. and Mohammed, W.K.M.,** (2018). Free vibration of functionally graded beams resting on Winkler-Pasternak foundation. *Arabian Journal of Geosciences*, 11(10), (pp.1-8).
- Avcar, M.,** (2019). Free vibration of imperfect sigmoid and power law functionally graded beams. *Steel and Composite Structures*, 30(6), (pp.603-615).
- Bouida, N., Bouchikhi, A.S., Megueni, A. and Gouasmi, S.,** (2018). A finite element analysis for evaluation of j-integral in plates made of functionally graded materials with a semicircular notch. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 18(6), (pp.1573-1586).
- Chen, X., Luo, T., Ooi, E.T., Ooi, E.H. and Song, C.,** (2018). A quadtree-polygon-based scaled boundary finite element method for crack propagation modeling in functionally graded materials. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 94, (pp.120-133).
- Daneshmehr, A., Rajabpoor, A. and Hadi, A.,** (2015). Size dependent free vibration analysis of nanoplates made of functionally graded materials based on nonlocal elasticity theory with high order theories. *International Journal of Engineering Science*, 95, (pp.23-35).
- Eldeeb, A.M., Shabana, Y.M. and Elsayaf, A.,** (2021). Thermo-elastoplastic behavior of a rotating sandwich disc made of temperature-dependent functionally graded materials. *Journal of Sandwich Structures & Materials*, 23(5), (pp.1761-1783).
- Gupta, A. and Talha, M.,** (2015). Recent development in modeling and analysis of functionally graded materials and structures. *Progress in Aerospace Sciences*, 79, (pp.1-14).
- Hadji, L., Zouatnia, N. and Bernard, F.,** (2019). An analytical solution for bending and free vibration responses of functionally graded beams with porosities: Effect of the micromechanical models. *Structural Engineering and Mechanics*, 69(2), (pp.231-241).
- Hamzah, S., Azis, M.I. and Syamsuddin, E.,** (2019), October. On some examples of BEM solution to elasticity problems of isotropic functionally graded materials. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 619, No. 1, p. 012018). IOP Publishing.
- Kuang, X., Wu, J., Chen, K., Zhao, Z., Ding, Z., Hu, F., Fang, D. and Qi, H.J.,** (2019). Grayscale digital light processing 3D printing for highly functionally graded materials. *Science advances*, 5(5), p.eaav5790.
- Lee, J.K. and Lee, B.K.,** (2019). In-plane free vibration of uniform circular arches made of axially functionally graded materials. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 19(08), p.1950084.
- Li, J., Liang, H., Chen, Y. and Du, B.,** (2020). Promising functional graded materials for compact gaseous insulated switchgears/pipelines. *High Voltage*, 5(3), (pp.231-240).

- Li, L. and Hu, Y.**, (2017). Torsional vibration of bi-directional functionally graded nanotubes based on nonlocal elasticity theory. *Composite Structures*, 172, (pp.242-250).
- Liew, K.M., Pan, Z. and Zhang, L.W.**, (2020). The recent progress of functionally graded CNT reinforced composites and structures. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 63(3),(pp.1-17).
- Lin, Q., Zhang, L., Chen, F. and Yin, H.**, (2019). Micromechanics-based elastoplastic modeling of functionally graded materials with pairwise particle interactions. *Journal of Engineering Mechanics*, 145(5), p.04019033.
- Liu, Z., Wei, G. and Wang, Z.**, (2019). Numerical analysis of functionally graded materials using reproducing kernel particle method. *International Journal of Applied Mechanics*, 11(06), p.1950060.
- Loh, G.H., Pei, E., Harrison, D. and Monzón, M.D.**, (2018). An overview of functionally graded additive manufacturing. *Additive Manufacturing*, 23, (pp.34-44).
- Mahamood, R.M. and Akinlabi, E.T.**, (2017). Types of functionally graded materials and their areas of application. In *Functionally graded materials* (pp. 9-21). Springer, Cham.
- Martínez-Pañeda, E.**, (2019). On the finite element implementation of functionally graded materials. *Materials*, 12(2), (p.287).
- Naebe, M. and Shirvanimoghaddam, K.**, (2016). Functionally graded materials: A review of fabrication and properties. *Applied materials today*, 5, (pp.223-245).
- Natarajan, S., Annabattula, R.K. and Martínez-Pañeda, E.**, (2019). Phase field modelling of crack propagation in functionally graded materials. *Composites Part B: Engineering*, 169, (pp.239-248).
- Nejad, M.Z. and Hadi, A.**, (2016). Non-local analysis of free vibration of bi-directional functionally graded Euler–Bernoulli nano-beams. *International Journal of Engineering Science*, 105, (pp.1-11).
- Nejad, M.Z., Hadi, A. and Rastgoo, A.**, (2016). Buckling analysis of arbitrary two-directional functionally graded Euler–Bernoulli nano-beams based on nonlocal elasticity theory. *International Journal of Engineering Science*, 103, (pp.1-10).
- Nikbakht, S., Kamarian, S. and Shakeri, M.**, (2019). A review on optimization of composite structures Part II: Functionally graded materials. *Composite Structures*, 214, (pp.83-102).
- Njim, E.K., Al-Waily, M. and Bakhy, S.H.**, (2021), February. A critical review of recent research of free vibration and stability of functionally graded materials of sandwich plate. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 1094, No. 1, p. 012081). IOP Publishing.
- Özdemir, M., Kefal, A., Imachi, M., Tanaka, S. and Oterkus, E.**, (2020). Dynamic fracture analysis of functionally graded materials using ordinary state-based peridynamics. *Composite Structures*, 244, p.112296.
- Pydah, A. and Sabale, A.**, (2017). Static analysis of bi-directional functionally graded curved beams. *Composite Structures*, 160, (pp.867-876).
- Rabia, B., Daouadji, T.H. and Abderezak, R.**, (2019). Effect of porosity in interfacial stress analysis of perfect FDM beams reinforced with a porous functionally graded materials plate. *Structural Engineering and Mechanics*, 72(3), (pp.293-304).
- Saleh, B., Jiang, J., Fathi, R., Al-hababi, T., Xu, Q., Wang, L., Song, D. and Ma, A.**, (2020). 30 Years of functionally graded materials: An overview of

- manufacturing methods, Applications and Future Challenges. *Composites Part B: Engineering*, 201, p.108376.
- Saleh, B., Jiang, J., Ma, A., Song, D., Yang, D. and Xu, Q.**, (2020). Review on the influence of different reinforcements on the microstructure and wear behavior of functionally graded aluminium matrix composites by centrifugal casting. *Metals and Materials International*, 26(7), (pp.933-960).
- Sam, M., Jolith, R. and Radhika, N.**, (2021). Progression in manufacturing of functionally graded materials and impact of thermal treatment—A critical review. *Journal of Manufacturing Processes*, 68, (pp.1339-1377).
- Shen, H.S.**, (2016). *Functionally graded materials: nonlinear analysis of plates and shells*. CRC press.
- Şimşek, M.**, 2015. Bi-directional functionally graded materials (BDFDMs) for free and forced vibration of Timoshenko beams with various boundary conditions. *Composite Structures*, 133, (pp.968-978).
- Sola, A., Bellucci, D. and Cannillo, V.**, (2016). Functionally graded materials for orthopedic applications—an update on design and manufacturing. *Biotechnology advances*, 34(5), (pp.504-531).
- Sun, L., Grasselli, G., Liu, Q. and Tang, X.**, (2020). Thermal cracking simulation of functionally graded materials using the combined finite–discrete element method. *Computational Particle Mechanics*, 7(5), (pp.903-917).
- Tang, L., Ren, L. and Zhu, Q.L.**, (2018). EDM multi-pulse temperature field simulation of SiC/Al functionally graded materials. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 97(5), (pp.2501-2508).
- Tang, Y. and Yang, T.**, (2018). Post-buckling behavior and nonlinear vibration analysis of a fluid-conveying pipe composed of functionally graded material. *Composite Structures*, 185, (pp.393-400).
- Tang, Y., Lv, X. and Yang, T.**, (2019). Bi-directional functionally graded beams: asymmetric modes and nonlinear free vibration. *Composites Part B: Engineering*, 156, (pp.319-331).
- Van Do, T., Nguyen, D.K., Duc, N.D., Doan, D.H. and Bui, T.Q.**, (2017). Analysis of bi-directional functionally graded plates by FEM and a new third-order shear deformation plate theory. *Thin-Walled Structures*, 119, (pp.687-699).
- Yan, W., Ge, W., Smith, J., Lin, S., Kafka, O.L., Lin, F. and Liu, W.K.**, (2016). Multi-scale modeling of electron beam melting of functionally graded materials. *Acta Materialia*, 115, (pp.403-412).
- Zghal, S. and Dammak, F.**, (2020). Vibrational behavior of beams made of functionally graded materials by using a mixed formulation. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 234(18), (pp.3650-3666).
- Zghal, S., Frikha, A. and Dammak, F.**, (2018). Mechanical buckling analysis of functionally graded power-based and carbon nanotubes-reinforced composite plates and curved panels. *Composites Part B: Engineering*, 150, (pp.165-183).
- Zhang, C., Chen, F., Huang, Z., Jia, M., Chen, G., Ye, Y., Lin, Y., Liu, W., Chen, B., Shen, Q. and Zhang, L.**, (2019). Additive manufacturing of functionally graded materials: A review. *Materials Science and Engineering: A*, 764, p.138209.
- Zhang, H.H., Han, S.Y., Fan, L.F. and Huang, D.**, (2018). The numerical manifold method for 2D transient heat conduction problems in functionally graded materials. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 88, (pp.145-155).

- Zhang, L., Lin, Q., Chen, F., Zhang, Y. and Yin, H.,** (2020). Micromechanical modeling and experimental characterization for the elastoplastic behavior of a functionally graded material. *International Journal of Solids and Structures*, 206, (pp.370-382).
- Zhao, L., Zhu, J. and Wen, X.D.,** (2016). Exact analysis of bi-directional functionally graded beams with arbitrary boundary conditions via the symplectic approach. *Structural Engineering and Mechanics*, 59(1), (pp.101-122).
- Zhao, S., Zhao, Z., Yang, Z., Ke, L., Kitipornchai, S. and Yang, J.,** (2020). Functionally graded graphene reinforced composite structures: A review. *Engineering Structures*, 210, p.110339.



## ÖZGEÇMİŞ

**Ad-Soyad** : Gülfem BARIŞ

### ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2015, İstanbul Teknik Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi, Mimarlık Bölümü
- **Lisans** : 2016, İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Bölümü
- **Yükseklisans** : 2017, İstanbul Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İnşaat Projeleri Yönetimi Tezsiz Yüksek Lisans Programı
- **Yükseklisans** : 2022, İstanbul Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Yapı Mühendisliği Yüksek Lisans Programı

### MESLEKİ DENEYİM :

- **NTA Yapı:** 2016-2017, Saha Mühendisi
- **Galataport İstanbul:** 2017-2019, Saha Mühendisi
- **Nişantaşı Üniversitesi:** 2019-2020, Araştırma Görevlisi
- **İstanbul Teknik Üniversitesi:** 2020- , Araştırma Görevlisi