

## PIEZOELEKTRİK FİBERLİ KOMPOZİTLERİN ETKİN ÖZELLİKLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

Mustafa Kurt<sup>1</sup>, Ercan Gürses<sup>2</sup>  
Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara

### ÖZET

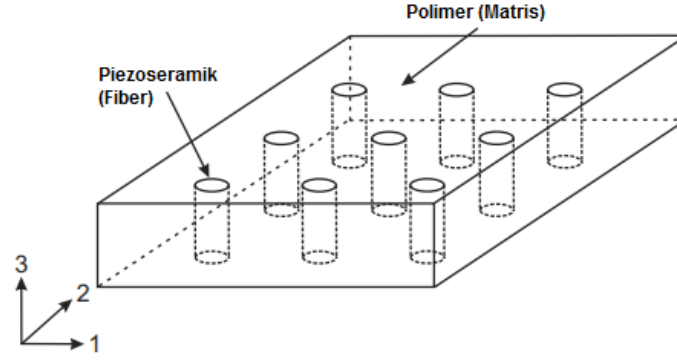
*Bu çalışmada, piezoelektrik malzemelerin homojenleştirilmiş (etkin) malzeme katsayılarını elde etmek için sayısal bir yaklaşım kullanılmıştır. Hesaplama için, ticari sonlu elemanlar yazılımı ABAQUS kullanılarak bir temsili hacim elemanı modellenip belirli yüklemeler ve buna uygun sınır koşulları uygulanarak analizler gerçekleştirilmiştir. İlk bölümde, piezoelektrik olmayan bir matris ve piezoelektrik fiberlerden oluşan bir 1-3 piezokompozit incelenmiştir. Bu durumda fiber ve matris arasında kusursuz bağ olduğu varsayılmıştır. Fiberlerin dairesel kesitli olduğu ve enine izotropik piezoelektrik malzemeler olduğu varsayılmıştır. Ayrıca, farklı fiber hacim oranlarına sahip piezokompozitler analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlar tartışılmış ve kullanılan sayısal yaklaşımın geçerliliğini doğrulamak için literatür verileriyle karşılaştırılmıştır. Sonuçlarda piezoelektrik etkiler görülmüş ve literatürdeki verilerle yakın sonuçlar elde edilmiştir. İkinci bölümde ise içerisinde boşluk bulunan bir piezoelektrik malzemenin etkin malzeme katsayıları ve hidrostatik performans katsayıları hesaplanmıştır. Boşluğun hidrostatik performans katsayılarını arttırdığı ve boşluklu piezoelektrik malzemelerin saf piezoelektrik malzemelere göre enerji toplama ve depolama işlemleri için daha üstün olduğu görülmüştür.*

### GİRİŞ

Piezoelektrik malzemeler hayatımızın birçok yerinde farkında olmadan faydalandığımız malzemelerdir. Bu malzemeler elektrik enerjisini mekanik enerjiye dönüştürme özelliğine veya tam tersi olarak mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürme özelliğine sahiptir. Bu özellikleri piezoelektrik malzemeleri ilginç kılsa da genellikle bazı açılardan kullanım kısıtlamaları vardır. Örneğin seramik piezoelektrik malzemeler gevrek davranış gösterdiği için kullanım hayatında belirli sınırlamalar içerir [Kar-Gupta ve Venkatesh, 2007]. Bu tür saf piezoelektrik malzemelerin çeşitli dezavantajları vardır ve bu nedenle, ultrasonik dönüştürücü, tıbbi görüntüleme, sensör, eyleyici ve sönümlenme gibi birçok uygulamada kompozit yapılar genellikle daha iyi bir teknolojik çözüm sunmaktadır [Berger ve ark., 2004]. Son yıllarda, piezoseramikleri pasif piezoelektrik olmayan polimerlerle birleştirilerek kompozit piezoelektrik malzemeler geliştirilmiştir. Bu kompozitlerle her bir bileşenin en faydalı özelliklerinden yararlanılarak üstün özellikler elde edilmiş ve çok çeşitli yapılar tasarlanmıştır.

<sup>1</sup> Yüksek Lisans Öğrencisi, E-posta: mustafa.kurt@metu.edu.tr

<sup>2</sup> Doç. Dr., Havacılık ve Uzay Mühendisliği Bölümü, E-posta: gurses@metu.edu.tr



Şekil 1: Bir 1-3 piezoelektrik kompozit taslağı [Sakthivel ve Arockiarajan, 2010]

Bu çalışmanın amacı, piezoelektrik fiber kompozitlerin piezoelektrik özelliklerini sayısal olarak hesaplamak, yani elastik, dielektrik ve piezoelektrik davranışla ilişkili homojenleştirilmiş (etkin) tensörleri belirlemektir. Piezoelektrik fiber kompozitlerin davranışını karakterize etmek için deneysel araştırmalar dışında, mikro veya makro mekanik yöntemler de kullanılabilir.

Mikromekanik yöntem, bileşenlerinin (fiber ve matris) bilinen özelliklerinden piezoelektrik fiber kompozitlerin genel davranışını, periyodik temsili hacim elemanı veya bir birim hücre modelini analiz ederek elde edilmesini sağlar. Temsili hacim elemanı veya birim hücre, bütün bir parçayı homojen olarak temsil edebilecek en küçük parçadır ve üç boyutlu sayısal hesaplarda çoğunlukla küp şeklinde modellenir. Bu çalışmada da küp şeklinde bir temsili hacim elemanı sonlu elemanlar programı olan ABAQUS ile analiz edilmiştir.

Bu çalışmanın ilk bölümünde, literatürde sıklıkla karşılaşılan 1–3 piezoelektrik fiber kompozitler ele alınmıştır. Kompozitin bileşenleri olan fiber için PZT-5 malzemesi, matris için epoksi kullanılmıştır ve bu iki bileşen arasında kusursuz bağ olduğu varsayılmıştır. Kompozitteki fiber hacim oranı bir değişkendir ve bu çalışmada %20, %55 ve %70 değerleri incelenmiştir. Hacim oranının %55 olduğu durum ayrıca literatürdeki sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.

İkinci bölümde piezoelektrik malzemelerdeki boşluğun, etkin malzeme katsayılarını ve hidrostatik performans katsayılarını nasıl etkilediği incelenmiştir. Sonuçlar %10, %30 ve %50 boşluk hacim yüzdeleri için elde edilmiş ve literatürdeki bir çalışma ile karşılaştırılmıştır. Performans katsayılarının boşluk oranı ile nasıl bir ilişki içinde olduğu incelenmiştir.

## YÖNTEM

### Teori

Piezoelektrik malzemelerin analizi, mekanik ve piezoelektrik davranışların birbirine bağlaışık olduğu gerçeğini dikkate alacak şekilde yapılmalıdır. Bağlaışık piezoelektrik problemler, bir elektrik potansiyel gradyanının deformasyona neden olduğu (ters piezoelektrik etki), gerilmenin ise malzemede bir elektrik potansiyeli gradyanına neden olduğu (doğrudan piezoelektrik etki) problemlerdir. Mekanik ve elektrik alanları arasındaki bağlantı, piezoelektrik katsayılarla karakterize edilir. Piezoelektrik olmayan malzemeler için bu katsayılar sıfırdır çünkü mekanik ve elektrik alanı arasında bir bağlaışıklık yoktur. Piezoelektrik malzemeler ise elektrik alanındaki, elektrik yer değiştirmesindeki veya mekanik gerilme ve gerinimdeki değişikliklere doğrusal olarak tepki vermektedir [Berger ve ark., 2004].

Doğrusal piezoelektrik teori, mekanik ve elektrik değişkenleri arasındaki etkileşimi aşağıdaki bünye denklemleriyle birleştirir [Mishra ve ark., 2017]:

$$\begin{aligned} T_{ij} &= c_{ijkl}S_{kl} - e_{kij}E_k \\ D_i &= e_{ikl}S_{kl} + \epsilon_{ik}E_k \end{aligned} \quad (1)$$

$T_{ij}$  ve  $S_{ij}$  sırasıyla, gerilme ve gerinim tensörlerini gösterirken,  $E_k$  ve  $D_i$ , sırasıyla, elektrik potansiyel alanı ve elektriksel yer değiştirme vektörleridir;  $c_{ijkl}$  sabit elektrik alanında dördüncü dereceden esneklik tensörünü belirtir,  $e_{kij}$  üçüncü dereceden piezoelektrik bağlaşıklık tensörü ve  $\varepsilon_{ik}$  sabit gerinim alanındaki ikinci dereceden dielektrik tensördür.

Yukarıdaki denklemler ayrıca kompakt bir şekilde de aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\begin{Bmatrix} \{T\} \\ \{D\} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} [c] & -[e] \\ [e]^t & [\varepsilon] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{S\} \\ \{E\} \end{Bmatrix} \quad (2)$$

Piezoelektrik kompozitlerde genellikle fiberler enine izotropik şekilde davranırken matrisin izotropik olarak davrandığı kabul edilir. Enine izotropik piezoelektrik katı için; direngenlik, piezoelektrik ve dielektrik matrisler on bir bağımsız katsayı ortaya çıkarır. Enine izotropik fiberlerin ve dolayısıyla piezokompozitlerin doğrusal bünye denklemleri aşağıda belirtildiği gibi Voigt notasyonu ile daha sade bir şekilde matris formunda yazılabilir. Bu denklemde  $9 \times 9$ 'luk matristeki katsayılar, malzemenin etkin katsayılarını ifade eder.

$$\begin{Bmatrix} T_{11} \\ T_{22} \\ T_{33} \\ T_{12} \\ T_{23} \\ T_{31} \\ D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -e_{13} \\ c_{12} & c_{11} & c_{13} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -e_{13} \\ c_{13} & c_{13} & c_{33} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -e_{33} \\ 0 & 0 & 0 & c_{66} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{44} & 0 & 0 & -e_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_{44} & -e_{15} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & e_{15} & \varepsilon_{11} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & e_{15} & 0 & 0 & \varepsilon_{11} & 0 \\ e_{13} & e_{13} & e_{13} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \varepsilon_{33} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} S_{11} \\ S_{22} \\ S_{33} \\ S_{12} \\ S_{23} \\ S_{31} \\ E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{Bmatrix} \quad (3)$$

### Homojenleştirme Yöntemi ve Birim Hücre Kavramı

Genelde, yapılan çalışmaların hedefinde büyük ölçekli/makroskopik bir yapı bulunur. Piezoelektrik fiber kompozitlerin makroskopik özelliklerini modellemek için gerçekleştirilen ortak yaklaşım, temel yapının ana özelliklerini kapsayan temsili hacim elemanı olarak da adlandırılan bir birim hücre oluşturmaktır. Hem kompozit ayrıklaştırma hem de kompozitlerin gerçekçi koşullarda bilgisayar simülasyonu için modelleme sürecini hızlandırmak için en güçlü araçlardan biri homojenleştirme yöntemidir [Berger ve ark., 2005]. Yöntemin ana fikri, mikro ve makro olarak iki sistemde depolanan gerinim enerjilerinin yaklaşık olarak aynı olduğu, orijinal olarak incelemek istediğimiz büyük ölçekli kompozite eşdeğer olan homojen bir ortam bulmaktır. Kompozit malzemeler için homojenleştirme yaklaşımı, fiziksel davranışı temsil edebilen malzeme modelinin ortalama değişkenleri arasında fonksiyonel bir bağımlılık bulmayı ifade eder [Tita ve ark., 2015]. Bir birim hücrenin ortalama mekanik ve elektriksel özelliklerinin, aşağıdaki gibi kompozit malzemenin ortalama özelliklerine eşit olduğu varsayılır.

$$\langle T_{ij} \rangle = \overline{T_{ij}}, \quad \langle D_k \rangle = \overline{D_k}, \quad \langle S_{ij} \rangle = \overline{S_{ij}}, \quad \langle E_k \rangle = \overline{E_k} \quad (4)$$

Burada  $\langle \ \rangle$  notasyonu piezokompozitin etkin (ya da ortalama) gerilme/gerinim/elektriksel yer değiştirmeleri/elektrik alanı değerlerine,  $\overline{\ \ }$  notasyonu ise sonlu elemanlar programı olan ABAQUS'ten elde edilen ortalama gerilme/gerinim/elektriksel yer değiştirmeleri/elektrik alanı değerlerine tekabül eder. Temsili hacim elemanındaki ortalama gerilmeler, gerinimler, elektrik alanları ve elektriksel yer değiştirmeler şu şekilde hesaplanabilir:

$$\begin{aligned} \bar{T}_{ij} &= \frac{1}{V_{top}} \sum_{n=1}^{el. say.} T_{ij}^n V^n, & \bar{S}_{ij} &= \frac{1}{V_{top}} \sum_{n=1}^{el. say.} S_{ij}^n V^n \\ \bar{D}_i &= \frac{1}{V_{top}} \sum_{n=1}^{el. say.} D_i^n V^n, & \bar{E}_i &= \frac{1}{V_{top}} \sum_{n=1}^{el. say.} E_i^n V^n \end{aligned} \quad (5)$$

Burada  $V_{top}$  birim hücrenin toplam hacmini, “el. say.” ise birim hücredeki toplam eleman sayısını ifade etmektedir.  $V^n$ , birim hücrenin  $n$  numaralı elemanın hacmidir ve  $T_{ij}^n, S_{ij}^n, E_i^n$  ve  $D_i^n$ ,  $n$  numaralı elemanda hesaplaması yapılan ilgili tensörlerdir.

3 eksenli boyunca hizalanmış ve kutuplanmış, ideal bir şekilde bağlanmış sürekli silindirik fiberlere sahip 1-3 periyodik yapılar (bkz. Şekil 1 ve 2) ele alınmaktadır. Malzeme özelliklerinin ilk iki yönde (yani 1 ve 2 eksenleri boyunca) aynı olduğu varsayılır. Simetri vasıtasıyla, [Berger ve ark., 2005] ve [Berger ve ark., 2006]’da belirtildiği gibi bir birim hücre veya temsili hacim elemanı kullanılarak böyle bir düzenli piezoelektrik fiber kompozit düşünülebilir.

Birim hücre, mikroskobik düzeyde geometrik ve malzeme parametreleri hakkında yeterli bilgiyi içeren en küçük parçadır ve bu sayede kompozitin etkin özelliklerinin ortaya çıkarılması sağlanır.

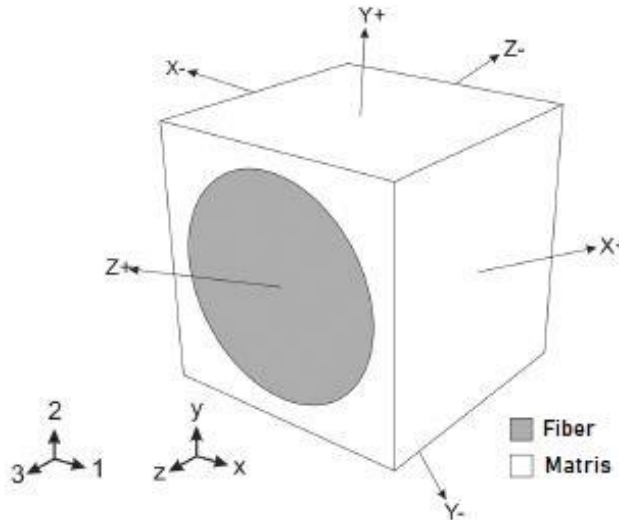
ABAQUS ticari programına yukarıdaki matris denkleminde, sırasıyla,  $S_{ij}$  ve  $E_i$  ile ifade edilen gerinim ve elektrik alanlarını temsili hacim üzerine uygulanır ve daha sonra yine yukarıdaki eşitliğin sol tarafında yer alan  $T_{ij}$  ve  $D_i$  değerleri çıktı olarak alınır. Bunun sonucunda ortadaki matristeki etkin/ortalama malzeme değerleri elde edilir.

### Periyodik Sınır Koşulu

Uygulanacak sınır koşulları modellemenin başarısı için kritik öneme sahiptir [Qin ve ark., 2014]. Bu durumda, bitişik hücreler arasında boşluk veya örtüşme olmamalıdır. Havner tarafından verilen genel periyodik sınır koşulu, temsili hacim elemanı kavramının temellerinden biri olarak kabul edilmiştir [Havner, 1971].

Şekil 2’de, temsili hacim elemanının yüzeylerinin isimleri ( $X^+, X^-, Y^+, Y^-, Z^+$ , ve  $Z^-$ ) ve yerel referans sistemi (1-2-3) gösterilmiştir.

Sınır koşulları doğru sonuç almak için çok kritiktir. Karşılıklı düğüm noktaları arasındaki yer değiştirme farkları birim hücreye uygulanan gerinim ve hücre boyu ile orantılı olmalıdır.



Şekil 2: Temsili Hacim Elemanındaki parça ve yüzey isimlendirmeleri [Medeiros ve ark., 2012]

Temsili hacim elemanındaki periyodiklik, Şekil 3’te gösterilen yüzlerdeki karşıt kenarlara göre uyumluluk koşulları gerektirir. Temsili hacim elemanının piezokompozitin genel davranışını vereceği için ve dolayısıyla bütün bir parçadan çok küçük bir kesitin alındığını düşünürsek kendine bitişik olan hücrelerle eş deformasyona maruz kalması gerekir. Yani bu birim hücrelerin deforme

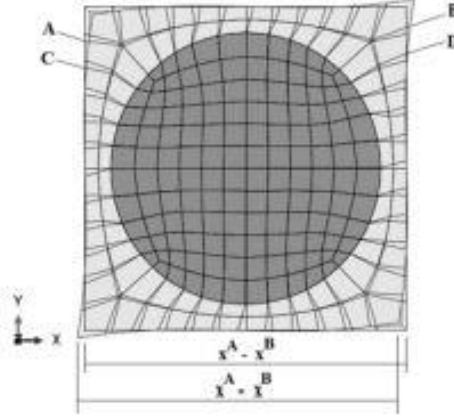
olmuş halleri birbirlerine geçebilecek şekilde olmalıdır. Buna periyodiklik denir ve bunu sağlayacak sınır koşulu verilmelidir. Bu periyodikliği sağlayan sınır koşuluna periyodik sınır koşulu denir. Temsili hacim elemanının tekrarlanabilirliğini sağlamak için periyodik sınır koşulları uygulanmalıdır. A ve B iki noktası ve temsili hacim elemanının yüzündeki diğer C ve D noktaları kümesi (bkz. Şekil 3) göz önüne alındığında, ortalama birim hücre gerinimi ile ilgili yer değiştirme şu şekilde yazılabilir:

$$u_i^{K^+} - u_i^{K^-} = \bar{S}_{ij}(x_j^{K^+} - x_j^{K^-}) \quad (6)$$

burada  $u_i$  üst simge indeksi tarafından belirtilen düğüm noktasındaki yer değiştirmeyi,  $S_{ij}$  gerinimi ve  $x_j$  ise üst simge indeksi tarafından belirtilen düğüm noktasının koordinatını belirtmektedir. ' $K^+$ ' indeksi pozitif  $x_j$  yönü boyunca, ' $K^-$ ' ise negatif  $x_j$  yönü boyunca demektir ve bu yüzeyler A- /A+, B- /B+ ve C- /C+ yüzeylerine karşılık gelmektedir.

Yukarıda verilen denklemler elektriksel serbestlik derecesi için de geçerlidir.  $\varphi$  elektrik potansiyelini,  $E$  ise elektrik alanını ifade eder.

$$\varphi^{K^+} - \varphi^{K^-} = \bar{E}_i(x_i^{K^+} - x_i^{K^-}) \quad (7)$$



Şekil 3: Karşılıklı yüzeyler arasındaki paralellik şartı [Medeiros ve ark., 2012]

Bu koşul, birim hücrenin karşı taraflarındaki (x ve y yönlerinde) her bir düğüm noktası çifti için uygulanmalı ve hücrenin z yönü boyunca tekrarlanmalıdır. Aslında, önerilen yaklaşım için, yer değiştirme ve elektriksel sınır koşullarının zaten paralellik kısıtlamasını sağladığı bazı yükleme durumları için bu koşulların belirtilmesi gerekli değildir. Karşılıklı düğüm noktalarını aramak ve kısıtlamaları uygulamak için otomatik prosedürler işe yarayabilir. Hem bu amaçla hem de düğüm noktalarını seçerken hata yapılmasını önlemek için Python dilinde betik yazılabilir.

Birim hücre boyutu, birim uzunluğa sahip olacak şekilde seçilebilir, çünkü sadece hacim oranı ve fiberlerin dağılımı, mutlak boyutun değil, etkin katsayıların sayısal tahmini üzerinde bir etkiye sahiptir. Yeterince doğru sonuçlar elde etmek için uygun bir çözüm ağı yoğunluğu belirlenmelidir. 1–2 düzlemindeki ortalama eleman boyutu, birim hücre genişliğinin yaklaşık %5'i olacak şekilde seçilmelidir [Berger ve ark., 2006]. 3 yönünde birim hücreler yalnızca bir eleman ile modellenenabilir çünkü etkin malzeme özellikleri varsayılan sonsuz fiber uzunluğu nedeniyle bu yönden bağımsızdır. Fakat sonuçları görselleştirme aşamasında temsili hücre elemanını bir küp şeklinde görmek daha iyi bir tercih olabilir, bu araştırmacının tercihinin kalmıştır.

### Yükleme ve Sınır Koşulları

Etkin malzeme değerlerini elde etmek için bazı yüklemelerin yapılması gerekmektedir. Bütün on bir adet etkin malzemeyi altı farklı yükleme ile elde edilebilir. Bunlar Çizelge 1'de gösterilmiştir. Bu yüklemelerde sadece ilgili katsayıların sıfır olmamasını sağlayacak deplasman ve elektrik potansiyeli uygulanacaktır, ilgilenmediğimiz katsayıların çarpanı olan gerinim ve elektrik deplasman değerleri sıfır olmalıdır.

Çizelge 2’de modele uygulanması gereken sınır koşulları gösterilmiştir. Her etkin katsayı için belli yüzeylere belli deplasmanlar veya elektrik potansiyeli uygulanmalıdır. Ve ayrıca son sütunda etkin katsayıyı elde edecek formül verilmiştir. Örneğin;  $C_{11}^{eff}$  ve  $C_{12}^{eff}$  katsayıları için modelin A- yüzeyine  $u_x = 0$ , A+ yüzeyine ise  $u_x = \tilde{u}_1$  şeklinde herhangi bir deplasman değeri girilmez. B- ve B+ yüzeylerinde ise  $u_y = 0$  olacak şekilde y yönünde modeli sabitleyecek sınır koşulu uygulanmalıdır. C- ve C+ yönlerinde ise  $u_z = 0$  olacak şekilde z yönünde modeli sabitleyecek sınır koşulu uygulanmalıdır. Ayrıca modelde A-, A+, B-, B+ yüzeylerine elektrik potansiyeli (voltaj) sınır koşulu tanımlanmamalıdır. Sadece C- ve C+ yüzeylerinde  $\varphi = 0$  olacak şekilde elektrik potansiyeli (voltaj) sınır koşulu tanımlanmalıdır. Daha sonra modelden elde edilen X yönündeki ortalama gerilme değerini ( $\bar{T}_{11}$ ), X yönündeki ortalama gerilme değerine ( $\bar{S}_{11}$ ) bölünerek  $C_{11}^{eff}$  bulunabilir. Benzer şekilde, modelden elde edilen Y yönündeki ortalama gerilme değerini ( $\bar{T}_{22}$ ), X yönündeki ortalama gerilme değerine ( $\bar{S}_{11}$ ) bölünerek  $C_{12}^{eff}$  bulunabilir. Diğer katsayılar da bu şekilde tablodaki sınır koşullarını ve denklemleri kullanarak bulunabilir.

Çizelge 1: Yüklemeler ve Elde Edilecek Olan Etkin Malzeme Katsayılar Grupları

	1	2	3	4	5	6
Grup	$C_{11}^{eff}, C_{12}^{eff}$	$C_{13}^{eff}, C_{33}^{eff}$	$C_{44}^{eff}, e_{15}^{eff}$	$C_{66}^{eff}$	$e_{13}^{eff}, e_{33}^{eff}, \epsilon_{33}^{eff}$	$\epsilon_{11}^{eff}$

Çizelge 2: Yüzeylere Uygulanacak Sınır Koşulları ve Etkin Katsayıların Formülleri

Etkin Katsayılar	X- $u_i/\varphi$	X+ $u_i/\varphi$	Y- $u_i/\varphi$	Y+ $u_i/\varphi$	Z- $u_i/\varphi$	Z+ $u_i/\varphi$	Formül
$C_{11}^{eff}$	0/-	$\tilde{u}_1/-$	0/-	0/-	0/0	0/0	$\bar{T}_{11}/\bar{S}_{11}$
$C_{12}^{eff}$	0/-	$\tilde{u}_1/-$	0/-	0/-	0/0	0/0	$\bar{T}_{22}/\bar{S}_{11}$
$C_{13}^{eff}$	0/-	0/-	0/-	0/-	0/0	$\tilde{u}_3/0$	$\bar{T}_{11}/\bar{S}_{33}$
$C_{33}^{eff}$	0/-	0/-	0/-	0/-	0/0	$\tilde{u}_3/0$	$\bar{T}_{33}/\bar{S}_{33}$
$C_{44}^{eff}$	$\tilde{u}_3/0$	$\tilde{u}_3/0$	0/-	0/-	$\tilde{u}_1/-$	$\tilde{u}_1/-$	$\bar{T}_{13}/\bar{S}_{31}$
$C_{66}^{eff}$	$\tilde{u}_2/-$	$\tilde{u}_2/-$	$\tilde{u}_1/-$	$\tilde{u}_1/-$	0/0	0/0	$\bar{T}_{12}/\bar{S}_{12}$
$e_{13}^{eff}$	0/-	0/-	0/-	0/-	0/0	0/ $\tilde{\varphi}$	$-\bar{T}_{11}/\bar{E}_3$
$e_{33}^{eff}$	0/-	0/-	0/-	0/-	0/0	0/ $\tilde{\varphi}$	$-\bar{T}_{33}/\bar{E}_3$
$e_{15}^{eff}$	$\tilde{u}_3/0$	$\tilde{u}_3/0$	0/-	0/-	$\tilde{u}_1/-$	$\tilde{u}_1/-$	$\bar{D}_1/\bar{S}_{31}$
$\epsilon_{11}^{eff}$	0/0	0/ $\tilde{\varphi}$	0/-	0/-	0/-	0/-	$\bar{D}_1/\bar{E}_1$
$\epsilon_{33}^{eff}$	0/-	0/-	0/-	0/-	0/0	0/ $\tilde{\varphi}$	$\bar{D}_3/\bar{E}_3$

Eksenel yöndeki katsayıları elde ederken, direkt olarak sınır koşulları uygulanabilir ve istenilen sonuçlar elde edilebilir. Bu değerler  $C_{11}^{eff}, C_{12}^{eff}, C_{13}^{eff}, C_{33}^{eff}, e_{13}^{eff}, e_{33}^{eff}, \epsilon_{11}^{eff}, \epsilon_{33}^{eff}$  dir. Fakat kesme yönündeki katsayılar ( $C_{44}^{eff}, e_{15}^{eff}, C_{66}^{eff}$ ) için temsili hacim elemanının karşılıklı yüzeylerinde yer alan düğüm noktaları arasında periyodik sınır koşulunu yaratacak bir bağlantı kurulması gerekmektedir. Bu

periyodik sınır koşulu oluşturma işlemi için ABAQUS programında gömülü şekilde çalışan Python kodlama dilinde bir betik yazılmıştır.

Çözüm ağı kısmında ise doğrusal piezoelektrik çözüm istediğimiz için C3D8E eleman tipi seçilmiştir. Bu eleman tipi, üç boyutlu 8 düğüm noktalı bir eleman olup mekanik serbestlik derecelerine ek olarak elektrik potansiyeli serbestlik derecesine de sahiptir. Hem fiber hem matris bileşenleri için piezoelektrik malzeme özelliği (matris için sıfır olarak) girildiği için bütün parçaları piezoelektrik çözüm ağı tipleri ile seçilmesinde bir sakınca yoktur.

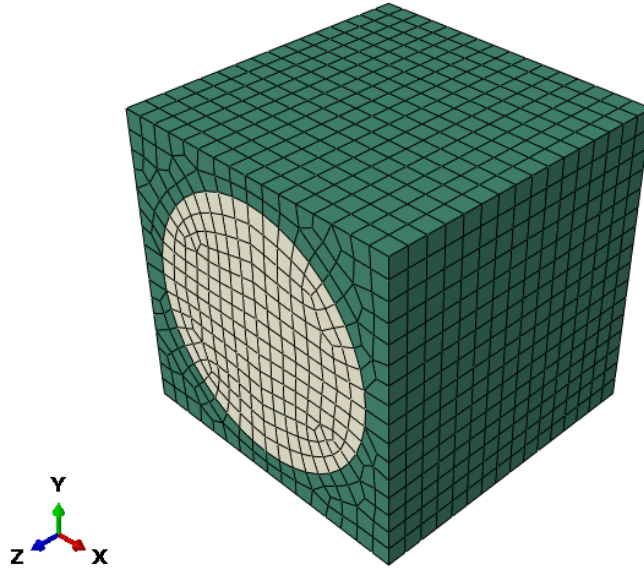
### 1-3 PİEZOELEKTRİK KOMPOZİTLERİN ETKİN KATSAYILARININ HESAPLANMASI

Bu bölümde literatürde verisi bulunan ve üzerinde daha önceden çalışılan bir modelin hesaplaması yapılmıştır. Bu bölüm için ABAQUS ile modellenen temsili hacim elemanı Şekil 4'de görülmektedir. Temsili hacim elemanındaki fiber PZT-5A, matris ise epoksi malzemesinden yapılmıştır ve malzeme değerleri Çizelge 3'de paylaşılmıştır. Görüldüğü üzere piezoelektrik fiberler piezoelektrik bağlaşıklık değerleri bulundururken, piezoelektrik özelliği olmayan epoksida bu değerler sıfırdır. Dielektrik özelliği ise iki malzemede de bulunmaktadır.

Farklı fiber örgülerinin sonuçlara etkisi incelenmemiştir çünkü pratikte ve literatürde büyük çoğunlukla piezoelektrik fiberlerin Z ekseninde yerleştirilmiş ve kutuplanmış konfigürasyonu olan 1-3 piezokompozitler kullanılmıştır. Ayrıca piezoelektrik fiberlerin Z ekseninde hizalı olmaması enine izotropik varsayımı devre dışı bırakacak ve dolayısıyla uygulanan homojenleştirme yöntemin daha kapsamlı şekilde genişletilmesini gerektirecektir.

Çizelge 3: Fiber ve Matris Malzeme Özellikleri

	$C_{11}$	$C_{12}$	$C_{13}$	$C_{33}$	$C_{44}$	$C_{66}$	$e_{15}$	$e_{13}$	$e_{33}$	$\epsilon_{11}$	$\epsilon_{33}$
	[GPa]						[C/m <sup>2</sup> ]			[nF/m]	
<b>PZT-5A</b>	121	75.4	75.2	111	21.1	22.8	-5.4	12.3	15.8	8.11	7.35
<b>Epoksi</b>	3.86	2.57	2.57	3.86	0.64	0.64	-	-	-	0.0797	0.0797



Şekil 4: ABAQUS ile oluşturulan Temsili Hacim Elemanı

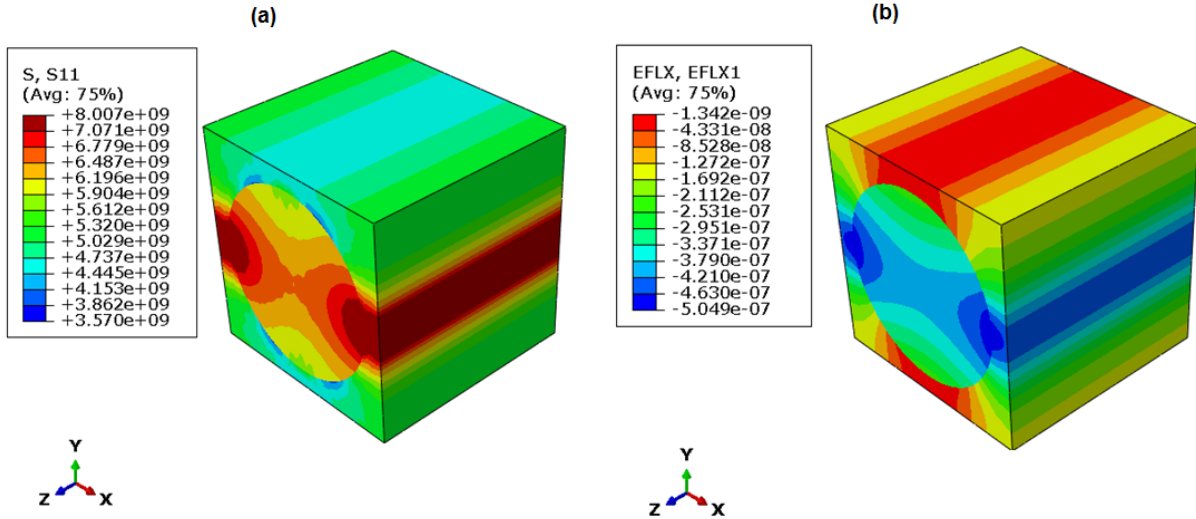
İlk aşamada oluşturulan sonlu elemanlar modeli %55 fiber hacim oranına sahiptir ve yukarıda bahsedildiği şekilde on bir adet homojenleştirilmiş malzeme katsayısı hesaplanmıştır. Çalışmadan elde edilen sonuçların geçerliliğini doğrulamak için [Tita ve ark., 2015] makalesindeki veriler ile karşılaştırma yapılacaktır. Bahsedilen makaledeki ve bu çalışmadan elde edilen piezoelektrik fiberli kompozitin malzeme katsayıları ve bu iki değer arasındaki farklar Çizelge 4'te paylaşılmıştır. Makaledeki ve bu çalışmanın sonuçlarının birbirine yakın olduğu görülmektedir. Fiber yönü 3 yönü olduğu için ve fiberlerin aksenal yönde daha direngen olması sebebiyle  $C_{33}^{eff}$  katsayısı diğerlerine görece yüksek çıkmıştır. Aynı şekilde aksenal yöndeki mekanik ve elektriksel davranışı birbirine

bağlayan  $e_{33}^{eff}$  katsayısı fiber 3 yönünde baskın olduğu için fiberin değerine yakın çıkmıştır. Fakat eksenel yön ile diğer yönlerdeki mekanik/elektriksel davranışı bağlayan  $e_{13}^{eff}$ ,  $e_{15}^{eff}$  katsayıları matrisin piezoelektrik özelliği olmadığı için fiberin değerlerinden daha düşük çıkmıştır. Benzer yorum dielektrik katsayıları için de yapılabilir.

Çizelge 4: Etkin Malzeme Katsayıları Karşılaştırması (%55 Fiber Hacim Oranı İçin)

	$C_{11}^{eff}$ [GPa]	$C_{12}^{eff}$ [GPa]	$C_{13}^{eff}$ [GPa]	$C_{33}^{eff}$ [GPa]	$C_{44}^{eff}$ [GPa]	$C_{66}^{eff}$ [GPa]	$e_{13}^{eff}$ [C/m <sup>2</sup> ]	$e_{33}^{eff}$ [C/m <sup>2</sup> ]	$e_{15}^{eff}$ [C/m <sup>2</sup> ]	$\epsilon_{11}^{eff}$ [nF/m]	$\epsilon_{33}^{eff}$ [nF/m]
[Tita ve ark., 2015]	10.856	4.666	6.043	35.127	2.205	1.528	-0.258	10.864	0.025	0.287	4.270
Bu çalışma	10.699	4.633	5.970	34.840	2.184	1.526	-0.253	10.768	0.024	0.282	4.233
Fark	%1.44	%0.7	%1.2	%0.8	%0.9	%0.4	%2	%0.8	%1.8	%1.6	%0.9

Ayrıca karşılaştırma için iki analizdeki gerilme ve elektriksel deplasman dağılımları gösterilmiştir.  $C_{13}^{eff}$ ,  $C_{33}^{eff}$  malzeme katsayısı karakterizasyonu analizindeki X yönündeki gerilme dağılımı ve  $\epsilon_{11}^{eff}$  malzeme katsayısı karakterizasyonu analizindeki X yönündeki elektriksel deplasman dağılımı Şekil 5'te paylaşılmıştır. Şekil 5'teki dağılımlar, [Tita ve ark., 2015] makalesindeki dağılım görselleri ile karşılaştırılmıştır ve iki dağılım görsellerinin de benzer olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 5: (a) İkinci analizdeki X yönündeki gerilme dağılımı ve (b) Altıncı analizdeki X yönündeki elektriksel deplasman dağılımı

Ayrıca, %20, %55 ve %70 fiber hacim oranları için de analizler yapılmıştır. Bu sonuçlar Çizelge 5'te gösterilmektedir. Tahmin edilebileceği gibi fiber oranı arttıkça kompozitin eşdeğer malzeme özellikleri fiberin malzeme özelliklerine yaklaşmaktadır. Mevcut malzemeler göz önüne alındığında, fiberin tüm malzeme katsayıları matristen yüksek olduğu için, fiber oranı arttıkça elde edilen etkin malzeme katsayıları artmıştır.



Çizelge 5: Farklı Fiber Hacim Oranları İçin Etkin Malzeme Katsayıları

Fiber Hacim Oranı	$C_{11}^{eff}$ [GPa]	$C_{12}^{eff}$ [Gpa]	$C_{13}^{eff}$ [Gpa]	$C_{33}^{eff}$ [Gpa]	$C_{44}^{eff}$ [Gpa]	$C_{66}^{eff}$ [Gpa]	$e_{13}^{eff}$ [C/m <sup>2</sup> ]	$e_{33}^{eff}$ [C/m <sup>2</sup> ]	$e_{15}^{eff}$ [C/m <sup>2</sup> ]	$\epsilon_{11}^{eff}$ [nF/m]	$\epsilon_{33}^{eff}$ [nF/m]
%20	5.11	3.16	3.27	14.70	0.95	0.85	-0.055	4.117	0.0024	0.119	1.66
%55	10.70	4.63	5.97	34.84	2.18	1.53	-0.253	10.768	0.0240	0.282	4.23
%70	18.88	6.58	9.85	45.50	4.13	2.54	-0.541	13.540	0.1096	0.564	5.35

### BOŞLUKLU PİEZOSERAMİKLERİN PERFORMANS KATSAYILARININ HESAPLANMASI

Boşluklu yapı (porozite) genellikle malzemelerde kusur olarak kabul edilir, ancak piezoelektrik malzemelerde iyi tasarlanmış bir boşluklu yapı piezoelektrik malzemenin performansını artırabilir. Malzemenin içindeki boşluklar aslında mekanik ve piezoelektrik malzeme özelliklerini düşürür. Bununla birlikte, piezoelektrik malzemeler için hesaplanan performans katsayıları, boşluklar arttıkça artar. Bunun, boyuna ve enine etkiler arasındaki kısmi bağlantıdan kaynaklandığı söylenmektedir [Mercadelli ve ark., 2010]. Boşluklu yapı, daha yüksek performans katsayısı değerlerine ve daha düşük akustik empedans değerlerine (Z) neden olarak, ultrasonik uygulamalarda iyileştirilmiş bir akustik performansa neden olur. Ve boşluk yoğunluğu/boyutu veya boşlukların morfolojisi kontrol edilerek istenen özellikler elde edilebilir.

Porozite genellikle piezoelektrik malzeme üretildikten sonra bazı harici art-işlemler tarafından oluşturulur. Malzeme içindeki boşluk oluşacak olan bölgeler, genellikle ön işlemlerle başka malzemelerle doldurulur. Bu malzemeler daha sonra ısıl işlemlerle uzaklaştırılır ve o bölgelerde boşluklar elde edilir. Boşluklu yapıların genel üretim yöntemi bu şekildedir.

Bu bölümde porozite oluşumu ve etkin malzeme katsayıları ve performans katsayıları üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bunun için boşluklu yapıda olan piezoseramiklerin sayısal analizleri yapılmıştır. Analizler yine ABAQUS programında gerçekleştirilmiştir.

Porozite etkisi ve sonuçlarından önce karşılaştırma yapılacak olan performans katsayıları tanıtılacaktır.

#### Performans Katsayıları ve Hesaplanması

Piezoelektrik denklemler, Denklem 8'de gösterildiği gibi gerilme-elektrik yer değiştirme biçiminde yazılabileceği gibi gerinim-elektrik yer değiştirme biçiminde de yazılabilir (Denklem 10).

$$\begin{aligned} T &= C_E \cdot \epsilon - e^T \cdot E \\ D &= e \cdot \sigma + k_\epsilon \cdot E \end{aligned} \quad (8)$$

Bu denklemde  $\epsilon$  gerinim tensörünü,  $\sigma$  gerilme tensörünü,  $C_E$  sabit elektrik alan altındaki elastik modülü tensörünü,  $e$  piezoelektrik gerilme bağılamlık tensörünü,  $E$  elektrik alan tensörünü,  $D$  elektrik yer değiştirme tensörünü,  $k_\epsilon$  ise sabit gerinim altındaki dielektrik tensörünü temsil etmektedir.

Piezoelektrik bünye denklemleri, gerilme-elektrik yer değiştirme biçiminden gerinim-elektrik yer değiştirme biçimine Denklem 9'da verilen eşitlikler yardımıyla dönüştürülebilir.

$$\begin{aligned} S_E &= C_E^{-1} \\ d &= e \cdot S_E \\ k_\sigma &= k_\epsilon + d \cdot S_E \cdot d^T \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned}\epsilon &= S_E \cdot \sigma + d^T \cdot E \\ D &= d \cdot \sigma + k_\sigma \cdot E\end{aligned}\quad (10)$$

Bu denklemde  $\epsilon$  gerinim tensörünü,  $\sigma$  gerilme tensörünü,  $S_E$  sabit elektrik alan altındaki esneklik modülü tensörünü,  $d$  piezoelektrik gerinim bağılamlık tensörünü,  $E$  elektrik alan tensörünü,  $D$  elektrik yer değiştirme tensörünü,  $k_\sigma$  ise sabit gerilme altındaki dielektrik tensörünü temsil etmektedir.

Denklem 10'daki değerler bize performans katsayılarını hesaplamamızı sağlamaktadır ve hemen aşağıda bu katsayıların kendileri ve nasıl hesaplandıkları açıklanmıştır. Bu katsayılar, malzemenin geometri, tahrik veya elektrik bağlantısından bağımsız olarak üretebileceği potansiyel enerji miktarını ifade eden malzeme katsayıları arasındaki ilişkileri ifade etmektedir. Bu katsayıların daha yüksek değerleri, daha yüksek enerji üretme kapasitesi anlamına gelmektedir.

**Hidrostatik piezoelektrik gerinim katsayısı ( $d_h$ ):** Hidrostatik gerinim sabiti veya katsayısı, aktif bir dönüştürücü olarak malzemenin performansını belirleyen bir katsayı olarak görülebilir. Birim elektrik alanı (m/V) başına oluşan hidrostatik gerinim (m/m) veya birim hidrostatik kuvvet (C/N) başına oluşan elektrik yüküdür. Hidrostatik gerinim katsayısı, piezoelektrik etki tarafından üretilen toplam enerji miktarını temsil eder.

$$d_h = d_{31} + d_{32} + d_{33} = 2d_{31} + d_{33} \quad (11)$$

Normalde bu performans katsayısı  $d$  tensörünün 3 farklı yöndeki teriminden (31, 32, 33) hesaplanmaktadır fakat enine izotropi durumunda 1 ve 2 yönleri aynı olduğu için 31 ve 32 yönündeki terimler aynı kabul edilmektedir. Böylelikle sadece 2 terim yeterli olmaktadır.

**Hidrostatik piezoelektrik voltaj katsayısı ( $g_h$ ):** Hidrostatik piezoelektrik voltaj sabiti veya katsayısı, pasif hidrofona duyarlılığını ölçen bir faktördür. Birim hidrostatik stres (V/mPa) başına üretilen elektrik alanıdır. Hidrostatik voltaj katsayısı, dielektrik geğirgenlikten kaynaklanan kayıplar dahil edildiğinde enerji çıkışını temsil eder.

$$g_h = 2g_{31} + g_{33} = \frac{d_h}{k_{\sigma 33}} \quad (12)$$

Yüksek hidrostatik voltaj katsayıları için yüksek  $d_h$  değerleri ve düşük geçirgenlik ( $k_{\sigma 33}$ ) gerektiğinden, düşük oranda piezoseramik içeren ve yüksek  $d_h$  değerlerine sahip piezokompozitler önemli ölçüde yüksek hidrostatik voltaj katsayılarına sahiptir.

### Analiz Modeli ve Sonuçlar

Bu bölümde içerisinde boşluk bulunan piezoseramikler analiz edilecek ve boşluğun etkileri incelenecektir.

Porozite sonlu elemanlar modelinde herhangi bir şekilde olabilir. Ancak gerçekte boşluklar genellikle küre veya silindir şeklinde üretildiği ve küresel boşluklar daha yaygın olduğu için bu bölümde sadece küresel boşluklar incelenecektir. Ayrıca gözeneklerin enine izotropi kabulü ile çelişmemesi gerektiği, bu nedenle boşluk şeklinin önemli olduğu unutulmamalıdır.

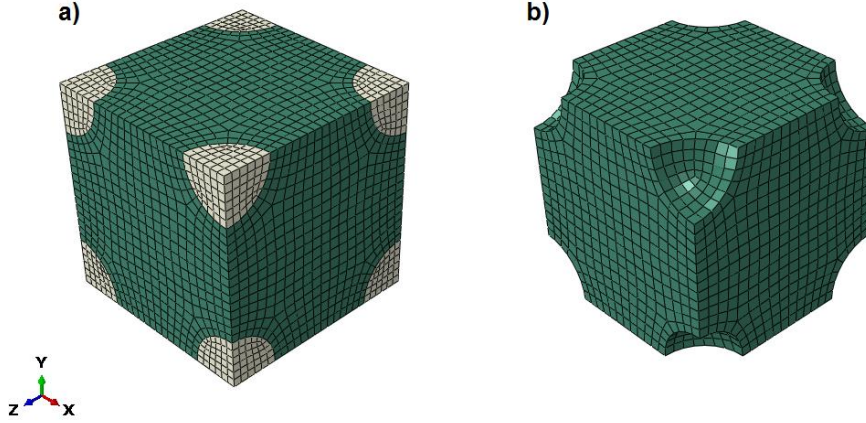
Bir kompozitin anizotropi derecesi, daha yüksek anizotropi seviyesine sahip bileşenleri tarafından belirlenir. Piezoelektrik malzeme enine izotropik olduğundan, boşluklar halihazırda yapılmış olan varsayımları ihlal etmemek için en fazla izotropik veya enine izotropik olmalıdır. Boşluğun kendisi malzeme olarak izotropiktir, ancak geometrik şekli kompozitin genel anizotropisini değiştirebilir. Bu nedenle, çalışmalarda boşlukları mükemmel küreler şeklinde veya izotropi düzleminin normal yönü boyunca uzanan elips veya silindir şeklinde modellenmelidir. Bu çalışmada boşluklar küresel modellendiği için bir sorun teşkil etmemektedir.

Sonlu elemanlar modeli, boşluk geometrisini içerebilir veya içermeyebilir. Örnek birim hücre modelleri, boşlukların açık renk, piezoseramiğin ise koyu renk ile gösterildiği şekil 6'da gösterilmiştir. Boşluğun modellenmediği durumda, boşluğun bulunduğu bölgede herhangi bir

çözüm ağına sahip olmuyoruz. Ancak bu yaklaşım birim hücre modeline karmaşıklık getiriyor. Daha kolay yöntem ise, uygun malzeme özelliklerini atayarak boşluk geometrisini de o bölgede bir çözüm ağı kullanarak modellemektir ve bu çalışmada bu yöntem kullanılmıştır. Boşluk olarak modellenen fazlar için çok düşük elastik özellikler ( $E = 100 \text{ Pa}$ ), sıfır piezoelektrik özellik ve vakum bağıl geçirgenliği ( $\epsilon = 1$ ) kullanılmıştır.

Birim hücre modelinde küresel fazlarda hava malzemesi, matris fazında ise PZT-5A malzeme kullanılmıştır, malzeme özellikleri ise Çizelge 3'te paylaşılmıştır.

Boşlukların yerleşimi ise şu şekildedir: Birim hücrenin merkezinde bir küre, sekiz köşede ise sekiz adet sekizde bir küre olmak üzere toplamda iki adet küre bulunmaktadır.



Şekil 6: Boşluğun a) modellendiği ve b) modellenmediği iki modelleme örneği. (Koyu renk piezoseramiği, açık renk boşluk temsil etmektedir.)

Amaç hidrostatik performans katsayılarını elde etmek olduğundan, yalnızca  $C_{11}^{eff}$ ,  $C_{12}^{eff}$ ,  $C_{13}^{eff}$ ,  $C_{33}^{eff}$ ,  $e_{13}^{eff}$ ,  $e_{33}^{eff}$  ve  $\epsilon_{33}^{eff}$  katsayılarını hesaplamak yeterli olacaktır, çünkü diğer katsayılar hidrostatik katsayılar  $d_h$  ve  $g_h$  parametrelerini etkilememektedir.

Analizlerde kullanılan model Şekil 6a'da gösterilmiştir. Görsel %10 boşluk içermektedir. Ayrıca, boşluğun etkisini görmek için %30 ve %50 oranlarındaki boşluk durumları da incelenecektir.

Sonuçlar literatürdeki bir çalışma ile karşılaştırılacaktır [Martinez ve ark., 2017]. Önce her bir boşluk hacim yüzdesi için etkin malzeme katsayıları hesaplanacak ve ayrı tablolarda karşılaştırılacaktır. Daha sonra ise hidrostatik performans katsayıları olan  $d_h$  ve  $g_h$  parametrelerinin boşluk yüzdesine göre değişimi grafiklerle karşılaştırılacaktır.

%10, %30 ve %50 boşluk yüzdesi için yapılan analiz sonucunda elde edilen etkin malzeme değerleri Çizelge 6, Çizelge 7 ve Çizelge 8'de sırasıyla paylaşılmıştır.

Tablolara ilk baktığımız zaman literatürdeki sonuçları ile bu çalışmanın sonuçlarının uyumlu ve yakın olduğu görülmektedir. Özellikle %10 boşluk oranı için sonuçlar çok yakınken, boşluk yüzdesi arttıkça farklar da artma eğilimindedir.

Çizelge 6: %10 Boşluk Oranı İçin Hesaplanan Etkin Malzeme Katsayıları Karşılaştırması

	$C_{11}^{eff}$ [GPa]	$C_{12}^{eff}$ [GPa]	$C_{13}^{eff}$ [GPa]	$C_{33}^{eff}$ [GPa]	$e_{13}^{eff}$ [C/m <sup>2</sup> ]	$e_{33}^{eff}$ [C/m <sup>2</sup> ]	$\epsilon_{33}^{eff}$ [nF/m]
<b>[Martinez ve ark., 2017]</b>	90.321	52.833	51.902	81.406	-3.050	14.084	7.140
<b>Bu çalışma</b>	91.490	53.692	52.649	82.184	-3.179	14.123	6.627
<b>Fark</b>	%1.3	%1.6	%1.4	%1.0	%4.2	%0.3	%-7.2

Sonuçlara baktığımız zaman boşluğun malzemenin elastik, piezoelektrik ve dielektrik özelliklerini beklendiği gibi düşürdüğü görülmektedir. Çizelge 3'te paylaşılan PZT-5A malzemesinin özelliklerine baktığımız zaman en düşük oran olan %10 oranındaki boşluk miktarı bile etkin malzeme özellikleri kayda değer bir şekilde düşürmüştür. %30 ve %50 boşluk miktarları, etkin malzeme özelliklerini ise ciddi şekilde düşürmüştür. Elastik özelliklerin değişimi, piezoelektrik ve dielektrik özelliklere nispeten daha fazla olmuştur. Dielektrik geçirgenlik  $\epsilon_{33}^{eff}$ 'in malzeme oranıyla orantılı çıktığı tespit edilmiştir. Örneğin %10 boşluk oranında PZT-5A'nın saf halinin değerinin (7.35 nF/m) %90'ı civarında çıkmıştır. Diğer yüzdelerde de benzer ilişki bulunmaktadır. Benzer şekilde  $e_{33}^{eff}$  de doğrusal bir şekilde düşmüştür. Fakat diğer katsayılar için bu doğrusal düşüş eğilimi geçerli değildir.

Çizelge 7: %30 Boşluk Oranı İçin Hesaplanan Etkin Malzeme Katsayıları Karşılaştırması

	$C_{11}^{eff}$ [GPa]	$C_{12}^{eff}$ [GPa]	$C_{13}^{eff}$ [GPa]	$C_{33}^{eff}$ [GPa]	$e_{13}^{eff}$ [C/m <sup>2</sup> ]	$e_{33}^{eff}$ [C/m <sup>2</sup> ]	$\epsilon_{33}^{eff}$ [nF/m]
<b>[Martinez ve ark., 2017]</b>	52.353	28.357	27.120	46.484	-0.631	10.103	5.250
<b>Bu çalışma</b>	53.686	29.289	28.055	47.231	-0.618	10.536	5.157
<b>Fark</b>	%2.5	%3.3	%3.4	%1.6	%-2.1	%4.3	%-1.8

Çizelge 8: %50 Boşluk Oranı İçin Hesaplanan Etkin Malzeme Katsayıları Karşılaştırması

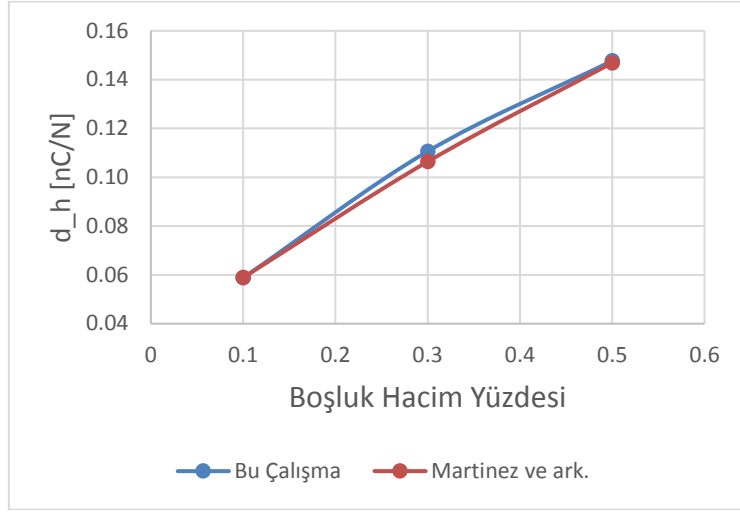
	$C_{11}^{eff}$ [GPa]	$C_{12}^{eff}$ [GPa]	$C_{13}^{eff}$ [GPa]	$C_{33}^{eff}$ [GPa]	$e_{13}^{eff}$ [C/m <sup>2</sup> ]	$e_{33}^{eff}$ [C/m <sup>2</sup> ]	$\epsilon_{33}^{eff}$ [nF/m]
<b>[Martinez ve ark., 2017]</b>	28.556	14.759	13.913	25.625	0.277	6.458	3.486
<b>Bu çalışma</b>	29.697	15.569	14.801	26.188	0.302	6.607	3.463
<b>Fark</b>	%4.0	%5.5	%6.4	%2.2	%9.0	%2.3	%-0.7

Sonuç olarak, boşluk miktarının beklendiği gibi etkin malzeme özelliklerini düşürdüğünü ve bu düşüşün boşluk oranı arttıkça arttığı görülmüştür. Ayrıca, bu çalışmanın sonuçları literatürdeki benzer bir çalışma ile doğrulanmıştır.

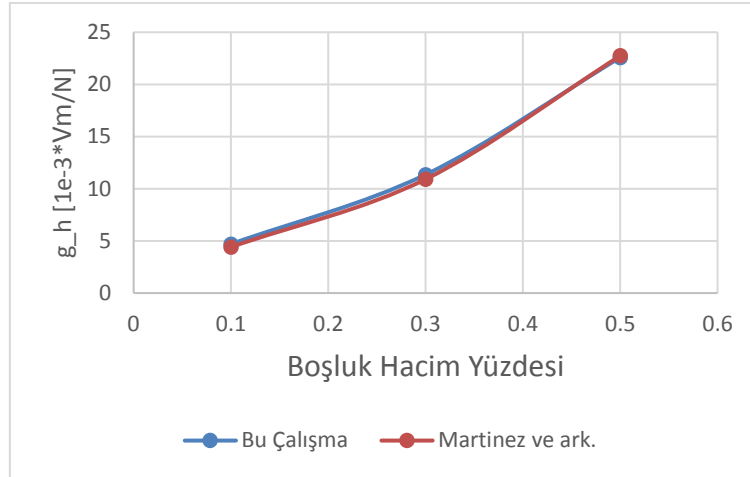
Bu sonuçlar kullanılarak hidrostatik performans katsayıları olan  $d_h$  ve  $g_h$  hesaplanmıştır ve Şekil 7 ve Şekil 8'de boşluk hacim yüzdesi ile ilişkisi gösterilmiştir. Ayrıca sonuçlar literatürdeki çalışmanın sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Grafiklere göre bu çalışma ve literatürdeki çalışmanın sonuçları yakınlık göstermektedir.

Grafiklerdeki sonuçlara göre boşluk oranı arttıkça hidrostatik performans katsayıları  $d_h$  ve  $g_h$  de artmaktadır. Hidrostatik gerinim katsayısı ( $d_h$ ) boşluk oranıyla birlikte doğrusala yakın bir şekilde

artarken (Şekil 7), hidrostatik voltaj katsayısı ( $g_h$ ) boşluk oranıyla birlikte üstel bir şekilde artmıştır (Şekil 8). Katsayı  $g_h$  özellikle %30'dan yüksek boşluk yüzdeleri için yüksek değerlere çıkmaktadır.



Şekil 7:  $d_h$  ve boşluk yüzdesi grafiği



Şekil 8:  $g_h$  ve boşluk yüzdesi grafiği

Hidrostatik voltaj katsayısının ( $g_h$ ) bu kadar yüksek bir şekilde artması, artan boşluk oranıyla birlikte piezoelektrik katsayılarının bir miktar düşerken, dielektrik katsayılarının daha ciddi düşüşler görmesinden kaynaklanmaktadır. Denklem 12'de görüldüğü üzere, hidrostatik gerinim katsayısı ( $d_h$ ) halihazırda artarken, etkin dielektrik katsayısı  $\epsilon_{\sigma,33}^{eff}$  düştüğü için,  $g_h$  parametresinin artış eğilimi ikinci dereeden olmaktadır.

Sonuçlardan görüldüğü üzere, boşluklu piezoelektrik malzemeler, saf piezoelektrik malzemelere kıyasla enerji toplayıp depolama işlemleri için daha üstün özelliklere sahiptir.

## SONUÇ

Yapılan çalışmalarda 1-3 piezoelektrik fiber kompozitlerin ve boşluklu piezoelektrik malzemelerin homojenleştirilmiş (etkin) malzeme katsayılarının hesaplanması açıklanmış ve elde edilen sonuçlar paylaşılmıştır. Sonlu elemanlar modeli ABAQUS programında oluşturup analiz edilmiştir. Yöntem olarak mikroskobik düzeyde geometrik ve malzeme parametreleri hakkında yeterli bilgiyi içeren en küçük parça olan temsili hacim elemanının analizi benimsenmiş ve belirli yüklem/sınır koşulları ile doğrusal piezoelektrik analizler gerçekleştirilmiştir.

İlk bölümde 1-3 piezoelektrik kompozitler incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar öncelikle literatürdeki bir makale ile doğrulanmış olup daha sonra farklı fiber hacim oranlardaki kompozitler için tekrarlanmıştır. Kompozitin elde edilen homojenleştirilmiş malzeme katsayıları beklendiği gibi fiber (PZT-5) ve matris (epoksi) bileşenlerinin malzeme değerlerinin arasında bir yerde çıkmıştır. Daha farklı fiber hacim oranına sahip piezokompozitler incelendiğinde ise fiber hacim oranı arttıkça piezokompozit eşdeğer malzeme katsayılarının fiberin malzeme değerlerine yaklaştığı gözlemlenmiştir.

İkinci bölümde ise içerisinde boşluk bulunan piezoelektrik malzemelerin etkin malzeme katsayıları ve daha sonrasında hidrostatik performans katsayıları hesaplanmıştır. Ve sonuçlar literatürdeki bir çalışma ile karşılaştırılmış ve doğrulanmıştır. Sonuçlara göre boşluk oranı arttıkça etkin malzeme özellikleri düşerken, hidrostatik performans katsayıları ciddi miktarlarda artmaktadır. Bunun sonucunda içerisinde boşluk bulunan piezoelektrik malzemelerin monolitik piezoelektrik malzemelere göre enerji toplayıp depolama işlemleri için daha üstün olduğu ortaya çıkmıştır.

Bundan sonraki çalışmalarda, boşluklu piezoelektrik malzemeler ile piezoelektrik olmayan epoksi gibi malzemeleri birleştirerek boşluklu bir piezokompozit yapı oluşturulup incelenmesi planlanmaktadır.

### Kaynaklar

- Berger, H., Kari, S., Gabbert, U., Rodriguez-Ramos, R., Guinovart-Diaz, R., Otero, J.A. ve Bravo-Castillero, J., 2004. *An analytical and numerical approach for calculating effective material coefficients of piezoelectric fiber composites*, International Journal of Solids and Structures, Cilt 42, s. 5692-5714
- Havner, K. S., 1971. *A discrete model for the prediction of subsequent yield surfaces in polycrystalline plasticity*, International Journal of Solids and Structures, Cilt 7, s. 719-730
- Kar-Gupta, R. ve Venkatesh, T. A., 2007. *Electromechanical response of 1-3 piezoelectric composites: A numerical model to assess the effects of fiber distribution*, Acta Materialia, Cilt 55, s. 1275-1292
- Martínez-Ayuso, G., Friswell, M. I., Adhikari, S., Khodaparast, H. H. ve Berger, H., 2017. *Homogenization of porous piezoelectric materials*, International Journal of Solids and Structures, Cilt 113, s. 218-229
- Medeiros, R. d., Moreno, M. E., Marques, F. D. ve Tita, V., 2012. *Effective properties evaluation for smart composite materials*, Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, Cilt 34, s. 362-370
- Mercadelli, E., Sanson, A. ve Galassi C., 2010. *Porous piezoelectric ceramics*, INTECH Open Access Publisher.
- Mishra, N., Krishna, B., Singh, R. ve Das, K., 2017. *Evaluation of effective elastic, piezoelectric, and dielectric properties of SU8/ZnO nanocomposite for vertically integrated nanogenerators using finite element method*, Journal of Nanomaterials, Cilt 2017, s. 1-14
- Qin, R.-S., Xiao, Y. ve Lan, H., 2014. *Numerical simulation of effective properties of 3D piezoelectric composites*, Journal of Engineering, Cilt 2014, s. 1-14
- Tita, V., de Medeiros, R., Marques, F. D. ve Moreno, M. E., 2015. *Effective properties evaluation for smart composite materials with imperfect fiber-matrix adhesion*, Journal of Composite Materials, Cilt 49, s. 3683-3701