



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



Yapısal sağlık izlemede kullanılan piezoelektrik sensörlerin değişen sıcaklıklarda davranışının incelenmesi

Investigation of the behavior of piezoelectric sensors used in structural health monitoring at different temperatures

Yazar(lar) (Author(s)): Mesut TEKKALMAZ¹, Gökhan HAYDARLAR², M. Alper SOFUOĞLU³

ORCID¹: 0000-0003-3781-0384

ORCID²: 0000-0001-7430-8145

ORCID³: 0000-0003-4681-6390

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Tekkalmaz M., Haydarlar G. ve Sofuoğlu M. A., “Yapısal sağlık izlemede kullanılan piezoelektrik sensörlerin değişen sıcaklıklarda davranışının incelenmesi”, *Politeknik Dergisi*, 22(3): 597-606, (2019).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.513956

Yapısal Sağlık İzlemede Kullanılan Piezoelektrik Sensörlerin Değişen Sıcaklıklarda Davranışının İncelenmesi

Araştırma Makalesi / Research Article

Mesut TEKKALMAZ, Gökhan HAYDARLAR*, M. Alper SOFUOĞLU

Mühendislik Fakültesi, Makine Müh. Bölümü, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 13.03. 2018 ; Kabul/Accepted : 08.05.2018)

ÖZ

Yapısal sağlık izleme (SHM), yapıdaki hasarın yeri ve boyutunu, yapının ömrünü tespit etmek için kullanılan izleme yöntemidir. Bu çalışmada, serbest bir piezoelektrik sensörün davranışı değişen çevre koşullarına maruz kalmış yapılar göz önüne alınarak elektromekanik empedans metodu (EMI) kullanılarak deneysel olarak test edilmiştir ve ANSYS sonlu elemanlar programı kullanılarak simülasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmada; oda sıcaklığında piezoelektrik sensörün empedans ölçümleri tamamlandıktan sonra, -10 °C ve -45 °C arasındaki empedans ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Sıcaklık düştükçe frekans ve genlik artmıştır. Simülasyon çalışmalarında ise, deneysel çalışmada kullanılan piezoelektrik sensörün ANSYS sonlu elemanlar programı yardımıyla harmonik analiz sonuçları elde edilmiştir. Deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlarda olduğu gibi, sıcaklık düştükçe frekans ve genlik artmıştır. Deneysel çalışmalardan ve simülasyon çalışmalarından elde edilen sonuçların birbirine yakın olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Piezoelektrik sensör, elektromekanik empedans, sıcaklık etkisi.

Investigation of the Behavior of Piezoelectric Sensors Used in Structural Health Monitoring at Different Temperatures

ABSTRACT

Structural health monitoring (SHM); is the tracking method used to determine the location and size of the damage to the structure and the life of the structure. In this study, the behavior of a free piezoelectric sensor was experimentally tested using the electromechanical impedance method (EMI), taking into account the structures exposed to varying environmental conditions, and simulation studies were performed using the ANSYS finite element program. In the experimental study; impedance measurements were performed between -10 °C and -45 °C after impedance measurements of the piezoelectric sensor were completed at room temperature. The frequency and amplitude have increased with decreasing temperature. In the simulation studies, harmonic analysis results were obtained by using the ANSYS finite element program of the piezoelectric sensor used in the experimental study. The frequency and amplitude increased as the temperature decreased, as in the results obtained from the experimental studies. The results obtained from experimental and simulation studies were found to be close to each other.

Keywords: Piezoelectric sensor, electromechanical impedance, temperature effect.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Yakın zamana kadar ve büyük ölçüde bugün bile binalar, köprü ve endüstriyel yapılardaki değişimin dışsal belirtilerini tanımlayan en yaygın araç eğitimli personel tarafından görsel olarak incelenmesidir. Hasar yerinin kabaca değerlendirilmesi yapıldıktan sonra, hasar yeri ve şiddetinin daha hassas bir şekilde değerlendirilmesi için akustik, ultrasonik, radyografi, girdap akımları, termal, manyetik alan veya elektro-manyetik empedans gibi lokalize sağlık izleme teknikleri kullanılır. Gerekli durumlarda test numuneleri yapıdan çıkartılıp laboratuvarında incelenir. Bu yaklaşımın temel gerekliliklerinden biri, incelenecek bölgenin

erişilebilirliğidir. Birçok durumda yapının kritik parçalarına erişilebilirlik olmayabilir. Bu nedenle sağlık izleme prosedürü çok uğraştırıcı ve pahalıdır. Ayrıca, gözle muayene güvenilirliği büyük ölçüde denetçinin tecrübesine bağlıdır [1].

Son kırk yılda yapının sağlığının daha güvenilir ve hızlı değerlendirilmesini sağlayan görsel incelemenin yerini almaya çalışan birtakım otomatik yöntemlerle bir dizi çalışma gerçekleştirilmiştir. Akıllı yapılar fikri görsel denetim yöntemlerine bir alternatif olarak düşünülmüştür. Akıllı malzemeler (piezoelektrik malzemeler, şekil hafızalı alaşımlar, fiber optik malzemeler gibi) kendi içsel özellikleri nedeniyle çevre konusundaki her türlü değişikliğe karşı yüksek hassasiyet gösterirler [1].

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : ghaydarlar@ogu.edu.tr

Yapısal sağlık izleme (SHM); hasarın oluşmasından sonra hasarın tespitini, konumunu, büyüklüğünü ve yapının kalan ömrünü belirlemek için belirli stratejilerin uygulandığı bir süreçtir. SHM ile yapısal sistemin veya bileşenlerinin değişen yüklenme ve/veya çevresel şartlarda tepkisi sürekli olarak ölçülür. SHM genellikle yapının veya bileşenlerinin; beklenmedik durumlar sırasında ve sonrasında durumunu, hasardan dolayı çalışma sırasındaki durumunu ve anormallikleri izlemek ve değerlendirmek için kullanılır [2]. Hasar tespiti SHM'nin temel hedefidir.

SHM, sensörler yardımıyla sistemin dinamik tepkisinin düzenli aralıklarla gözlemlenmesini ve istatistiksel analizler yardımıyla yapının mevcut durumunun belirlenmesini içerir. Uzun vadede bu sürecin çıktılarının yapının önceden belirlenen fonksiyonlarını yerine getirip getirmediği hakkında bilgi sağlaması için düzenli olarak güncellenir. Depremler ya da darbe yüklemesi gibi önceden belirlenemeyen olaylardan sonra, SHM, hızlı durum taraması için kullanılır ve gerçek zamanlı olarak yapının bütünlüğü ile ilgili güvenilir bilgileri sağlamayı amaçlar [3].

Yapısal sağlık izleme ile ilgili literatürde birçok çalışma mevcuttur. Hooker [4], -150 °C ile 250 °C arasında PZT-4, PZT-5A, PZT-5H piezoelektrik seramiklerinin piezoelektrik yük sabitlerinin (ve) sıcaklıkla değişimini ve 25 °C ile 600 °C arasında bağıl termal genişlemeyi deneysel olarak incelemiştir. Bu çalışmada değerlendirilen malzemenin tümünün havacılık uygulamalarında kullanıma uygun özelliklere sahip olduğunu, ayrıca belirli bir operasyon koşulları seti için optimum materyalleri belirlemek için dikkatle düşünülmesi gerektiğini belirtmiştir. Özellikle çeşitli malzemelerin özelliklerinin oda sıcaklığı davranışlarından önemli ölçüde saptığı, düşük sıcaklık (-50 °C'nin altında) veya yüksek sıcaklık (150°C'nin üstünde) uygulamaları için malzeme seçerken irdeleme yapılmanın daha önemli olduğu sonucuna varmıştır [4]. Sherrit ve arkadaşları deneysel çalışmaları sonucunda, PZT-4D seramiklerinin 0 °C ile 100 °C arasında değişen sıcaklıklarda elastik, dielektrik ve piezoelektrik yük katsayılarını belirlemişlerdir. Elde edilen bu verilerden eğri uydurma yöntemiyle bu parametrelerin sıcaklığa bağlı fonksiyonunu türetmişlerdir [5]. Baptista ve arkadaşları, yapısal sağlık izlemede elektromekanik empedans sinyalleri üzerinde sıcaklığın etkisini araştırmışlardır. Alüminyum numuneler kullanılarak 25 °C ile 102 °C aralığında empedans sinyalleri elde ettikten sonra frekans ve genlikteki değişimi deneysel olarak analiz etmişlerdir. Deneysel çalışmalarının sonucunda genlikteki değişimin piezoelektrik sensörün kapasitansının sıcaklıkla değişiminden kaynaklandığını, rezonans piklerindeki frekans değişiminin sıcaklık değişiminden kaynaklandığını ve bu frekans değişiminin tüm frekans bandı boyunca sabit olmadığını, artan frekans ile değişimin arttığını belirlemişlerdir. Sıcaklık etkisini kompanse etmek için frekans aralığı seçiminin önemli olduğunu, sağlığı izlenen yapıda yanlış tespitlerden kaçınmak için yeterli dar frekans bandı

seçilmesi zorunluluğunu vurgulamışlardır [6]. Wandowski ve arkadaşları, karbon fiber ile güçlendirilmiş polimerlerin hasarlı ve hasarsız durumları için sıcaklık değişiminin elektromekanik empedansın real kısmı (rezistans) üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Sıcaklık değişiminin rezistans sinyallerinde frekans değişimine neden olduğunu tüm inceledikleri numunelerde gözlemlemişlerdir. Hasarlı yapının değişen sıcaklıklarda tespiti için çapraz korelasyon değişimi (CCD) değerlerini sıcaklık kompanzasyonu yaparak ve yapmayarak hesaplamışlardır. Sıcaklık kompanzasyonunun uygulanması EMI yönteminde hasarın tespit edilebilme yeteneğini arttırdığına ulaşımlardır [7]. Xu ve arkadaşları, yüzeye yapıştırılan piezoelektrik sensör ve yapı üzerinde sıcaklığın etkisini düşünerek admittansı tahmin etmek için spektral eleman metodu önermişlerdir. Artan sıcaklıkla admittans piklerinin sola kaydığını ve genliğin azaldığını gözlemlemişlerdir. Sola kaymasının sebebinin yapının mekanik özelliklerinin sıcaklıkla değişiminden, genlikteki azalmanın sebebinin piezoelektrik sensörün mekanik ve elektromekanik özelliklerinin sıcaklıkla değişiminden kaynaklandığını göstermişlerdir [8]. Haider ve arkadaşları, dairesel piezoelektrik sensörün değişen sıcaklıklarda (50°C - 250°C) malzeme özelliklerini deneysel olarak belirlemiş ve sensörün empedans ve admittansını oda sıcaklığında ve yüksek sıcaklıklara ısıtıp oda sıcaklığına geldikten sonra tekrar ölçmüşlerdir. Bu ölçümler sonucunda, değişen sıcaklıklarda empedans ve admittansın sıcaklığa bağlı fonksiyonunu türetmişlerdir. Sensörün malzeme özelliklerindeki bozulmanın sıcaklığa bağlı analitik model ve deneysel sonuçların karşılaştırılmasıyla belirlenebileceği sonucuna ulaşımlardır [9].

Empedans karakteristiklerinin piezoelektrik sensörde hata, kusur vb. olmadığı sürece aynı kalması beklenir. Ancak değişen ortam sıcaklıklarına maruz kalan yapılarda sıcaklık etkisinden dolayı bu karakteristikler değişir. Herhangi bir zamanda yapının sağlığı değerlendirilmek istendiğinde, ilgili sıcaklıktaki karakteristik kullanılarak yanlış teşhisler önlenmelidir. Eğer sıcaklık etkisinden dolayı meydana gelen empedans karakteristiklerindeki değişim göz önüne alınmazsa hata, kusur vb. varmış gibi yanlış yorumlara sebep olur [1].

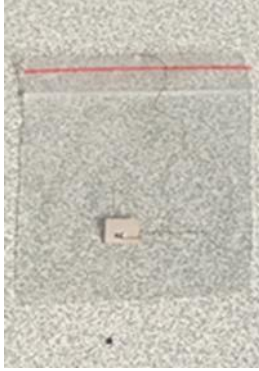
Serbest sensörün değişen sıcaklıklardaki davranışının belirlenmesi önemlidir. Piezoelektrik sensörlerin değişen sıcaklıklardaki davranışlarını inceleyen çalışmaların çoğunda yüksek sıcaklıklara odaklanılmıştır. Piezoelektrik sensörlerin havacılık alanındaki uygulamaları düşünüldüğünde düşük sıcaklıklardaki davranışlarının da incelenmesi gerektiği açıktır. Bu çalışmada düşük sıcaklıklara odaklanılarak, piezoelektrik sensörün davranışı deneysel olarak test edilmiştir. Sıcaklığın piezoelektrik sensörün malzeme özelliklerini değiştirdiği bilinmektedir. Literatürde piezoelektrik sensörlerin sıcaklık etkisiyle değişen malzeme özelliklerinin belirlenerek yapılmış bir simülasyon çalışmasına rastlanmamıştır. Bu çalışma kapsamında, değişen sıcaklıklar için malzeme özellikleri tekrar

hesaplanarak ANSYS sonlu elemanlar programı yardımıyla simülasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın ikinci bölümünde deneysel ve nümerik yöntem anlatılmıştır. Üçüncü bölümde, deneysel ve nümerik sonuçlar özetlenmiştir. Son bölümde sonuç ve önerilere yer verilmiştir.

2. MATERYAL VE METOD (MATERIAL and METHOD)

2.1. Deneysel Yöntem (Experimental Method)

Bu çalışmada serbest sensörün değişen sıcaklıklardaki davranışı EMI yöntemi kullanılarak incelenmiştir. 10x10x0,5 mm boyutlarındaki PIC255 malzeme özellikli piezoelektrik sensör PI Ceramic firmasından temin edilmiştir. Şekil 1'de kullanılan serbest sensör gösterilmiştir.



Şekil 1. Serbest sensör (Free sensor)

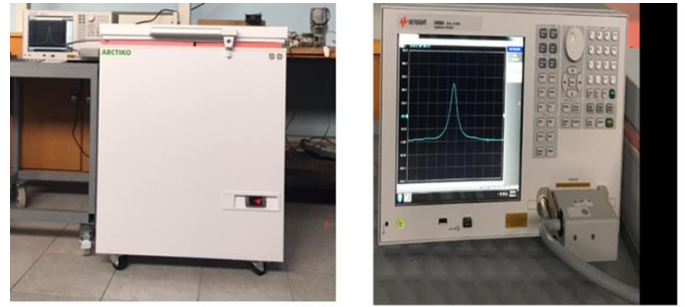
Sensöre probalar, Şekil 2'de gösterildiği gibi, bağlanarak empedans ölçümleri oda sıcaklığında Keysight E4990A model empedans analizör kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Tüm deneylerin aynı standartta olması için, oda sıcaklığındaki empedans ölçümleri de soğutucu içerisinde (soğutucu kapalı iken) yapılmıştır. Değişen sıcaklıklar için empedans ölçümleri tekrar edileceği için probalar bağlantı noktalarından çıkartılmayarak ölçümün daha hassas olması amaçlanmıştır. Frekans aralığı 100 kHz-900 kHz, ölçüm hızı empedans analizörün en hassas değeri olan 5 ve adım sayısı (başlangıç ve bitiş frekansları arasındaki veri sayısı) 1000 olarak belirlenmiştir.



Şekil 2. Piezoelektrik sensöre probaların bağlanış şekli (Connection of the probes to the piezoelectric sensor)

Oda sıcaklığındaki ölçümler tamamlandıktan sonra sensörün değişen sıcaklıklardaki empedans ölçümleri,

ARTICO LFE140 laboratuvar tipi soğutucu yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Deneysel ölçümler -10°C ile -45°C arasında 5°C aralıklarla sıcaklık düşürülerek gerçekleştirilmiştir. Sensörün istenen sıcaklığa tam olarak ulaştığına emin olmak için, temaslı hassas termometre ile numunenin sıcaklığı farklı noktalardan ölçüm alınarak cihazın sıcaklığı farklı sıcaklıklarla karşılaştırılmıştır. Sensör soğutucu içindeyken soğutucunun açık kalan kısımlarından olan ısı transferini en aza indirmek için bu yüzeyler süngerlerle kapatılmıştır. Şekil 3'te serbest sensörün -40°C 'deki empedans ölçümü gösterilmiştir.



Şekil 3. Serbest sensörün -40°C 'deki deneysel ölçümleri (Experimental measurements of the free sensor at -40°C)

2.2. Nümerik Yöntem (Numerical Method)

Serbest piezoelektrik sensörün değişen sıcaklıklardaki davranışı ANSYS sonlu elemanlar programı kullanılarak analiz edilmiştir. Piezoelektrik sensör deneysel çalışmalarda kullanılan sensörün boyutlarıyla birebir olarak programa girilmiştir. Piezoelektrik sensör için 8 düğüm noktası ve her düğüm noktasında 6 serbestlik derecesine sahip SOLID5 elemanı kullanılmıştır. Uygulanan voltaj değeri olarak 0 ve 0,5 V girilmiştir. Frekans aralığı deneysel çalışmada seçilen frekans aralığı ve adım sayısı deneysel çalışmada tercih edilen adım sayısı olarak çözüm şartları tanımlanmıştır.

Piezoelektrik sensörün oda sıcaklığındaki malzeme özellikleri, deneysel çalışma için temin edilen sensörlerin üretici firması olan PI Ceramic firmasının internet sayfasında yayınladığı veriler [10] kullanılarak ANSYS programına tanıtılmıştır. Üretici firmadan temin edilen veriler ANSYS programına doğrudan girilememektedir. ANSYS programına girilebilecek şekilde gerekli dönüşümler Imoka tarafından önerilen şekilde [11] yapılmıştır. Bu dönüşümler kullanılarak PIC255 piezoelektrik sensörün üretici verileri (25°C) ANSYS programına girilmiştir.

2.2.1 Rijitlik/Uyum matrisi (Rigidity / Compliance matrix)

Elastik uygunluk (s) piezoelektrik malzemeye 11 ve 33 doğrultularında uygulanan birim gerilme sonucunda oluşan gerinin olarak tanımlanır. Ayrıca, Elastisite modülünün tersi olarak da tanımlanabilir [12].

$$[s^E] = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} & s_{13} & 0 & 0 & 0 \\ s_{12} & s_{11} & s_{13} & 0 & 0 & 0 \\ s_{13} & s_{13} & s_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & s_{66} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & s_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & s_{44} \end{bmatrix}$$

$[s^E]$ matrisi; Elastisite modülü, kesme modülü ve poisson oranı ile yakından ilişkilidir (Eş.1-6).

$$E_X = \frac{1}{s_{11}^E} = E_Y \quad (1)$$

$$E_Z = \frac{1}{s_{33}^E} \quad (2)$$

$$G_{XY} = \frac{1}{s_{66}^E} \quad (3)$$

$$G_{YZ} = \frac{1}{s_{44}^E} = G_{XZ} \quad (4)$$

$$s_{12}^E = NU_{XY} (-s_{11}^E) \quad (5)$$

$$s_{13}^E = NU_{YZ} (-s_{33}^E) \quad (6)$$

s_{66}^E ve s_{44}^E değerine üretici verilerinden ulaşılamamaktadır. Bu değerler Eş. 7-8 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$s_{66}^E = 2(s_{11}^E - s_{12}^E) \quad (7)$$

$$s_{44}^E = 2(s_{33}^E - s_{13}^E) \quad (8)$$

Literatürde PIC255 piezoelektrik sensörlerin s^E değerlerinin sıcaklıkla değişimi ile ilgili bir fonksiyon veya grafik bulunamamıştır. Bu yüzden Elastisite modülü ve kesme modülünün sıcaklık ile değişimini içeren eşitlikler kullanılarak s^E değerleri belirlenmiştir. Poisson oranının sıcaklık ile değişimi ihmal edilmiş ve üretici verilerinde yöne bağlı olarak farklı bir değer verilmediği için yönden bağımsız olduğu kabul edilmiştir ($NU_{XY} = NU_{XZ} = NU_{YZ} = \nu = 0,34$). Kesme modülü ve Elastisite modülü arasındaki ilişki Eş.9-10'da tanımlanmıştır.

$$G_{XY} = \frac{E_X}{2(1+\nu)} \quad (9)$$

$$G_{YZ} = G_{XZ} = \frac{E_Z}{2(1+\nu)} \quad (10)$$

Elastisite modülünün sıcaklıkla değişimi Eş. 11'de verilmiştir [13].

$$E_p(T) = E_p - \frac{(T_0 - T) E_p}{160 \cdot 4} \quad (11)$$

Burada; E_p referans sıcaklığındaki Young modülü, $E_p(T)$ ölçülen sıcaklıktaki Young modülü, T ortam sıcaklığı, T_0 referans sıcaklığı, p piezoelektriği temsil etmektedir. Referans sıcaklık 25 °C alınmıştır. Referans sıcaklıktaki Elastisite modülleri, PIC255 piezoelektrik sensör için üretici tarafından verilen s_{11}^E ve s_{33}^E değerleri kullanılarak hesaplanmıştır. Eş. 11 kullanılarak PIC255 piezoelektrik sensörün 5 °C aralıklarla 0 °C ile -45 °C arasındaki değişen sıcaklıklardaki Elastisite modülleri hesaplanmıştır. Bu değerler Çizelge 1'de verilmiştir.

Çizelge 1. PZT sensörün değişen sıcaklıklardaki elastisite modülü (Young's modulus of PZT sensor at varying temperatures)

Sıcaklık (°C)	$E_X = E_Y$ (GPa)	E_Z (GPa)
25	62,10	48,30
0	60,16	46,79
-5	59,67	46,41
-10	59,18	46,03
-15	58,70	45,65
-20	58,21	45,28
-25	57,73	44,90
-30	57,24	44,52
-35	56,76	44,14
-40	56,27	43,77
-45	55,79	43,39

Elastisite modülleri belirlendikten sonra Eş. 9-10 kullanılarak değişen sıcaklıklar için kesme modülleri hesaplanmıştır. Eş. 1 - 8 kullanılarak $[s^E]$ matrisindeki tüm parametreler değişen sıcaklıklar için belirlenmiştir. Bu veriler daha sonra hesaplanacak olan iletkenlik matrisi ve gerilme/elektrik alanla ilgili piezoelektrik matrislerin $[e]$ belirlenmesinde kullanılacaktır.

2.2.2 Piezoelektrik yük sabitleri (Piezoelectric charge coefficients)

Piezoelektrik malzemeler d_{31} , d_{33} ve d_{15} olmak üzere üç tane piezoelektrik yük sabitiyle tanımlanır. Üretici firmanın katalog değerlerinden d_{31} , d_{33} ve d_{15} parametreleri alınarak $[d]$ matrisi oluşturulmuştur.

$$[d] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & d_{31} \\ 0 & 0 & d_{31} \\ 0 & 0 & d_{33} \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & d_{15} & 0 \\ d_{15} & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

ANSYS programında, mekanik gerilmeyi elektrik alanla ilişkilendiren matris $[e]$ matrisidir. Eşitlik 12 kullanılarak üretici verileri ANSYS programı için uygun hale getirilmiştir.

$$[e] = [s^E]^{-1} [d] \quad (12)$$

Değişen sıcaklıklar için hesaplanan $[s^E]$ matrisleri kullanılarak $[e]$ matrisleri yeniden oluşturulmuştur.

$[d]$ matrisi tüm sıcaklıklar için aynı şekilde tanımlanmış olup aşağıda gösterildiği gibi ifade edilmiştir.

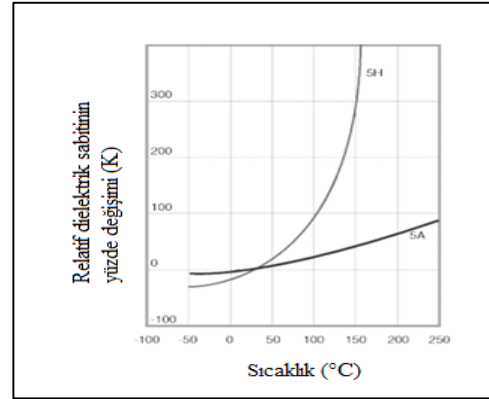
$$[d] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -180 \\ 0 & 0 & -180 \\ 0 & 0 & 400 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 550 & 0 \\ 550 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

25 °C için oluşturulan $[e]$ matrisi aşağıda verilmiştir.

$$[e] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -7,53378 \\ 0 & 0 & -7,53378 \\ 0 & 0 & 14,19998 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 9,912232 & 0 \\ 9,912232 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

2.2.3 Dielektrik sabitler (Dielectric constants)

Relatif dielektrik sabiti; piezoelektrik elemanın depolayabileceği yük miktarının vakumda depolanan yük miktarına ($\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12}$ F/m) oranı olarak tanımlanır [14]. Piezoelektrik malzemeler için üretici verileri ϵ_{11}/ϵ_0 ve ϵ_{33}/ϵ_0 şeklindedir. Bu değerlerin sıcaklıkla değişimini içeren grafikten relatif dielektrik sabitlerinin sıcaklığa bağlı fonksiyonu PZT-5A için türetilmiştir. Şekil 4'de relatif dielektrik sabitlerinin sıcaklığa göre yüzde değişimi gösterilmiştir.



Şekil 4. Relatif dielektrik sabitlerinin sıcaklıkla değişimi [15] (The change of relative dielectric constants with temperature)

Relatif dielektrik sabitlerinin sıcaklığa bağlı olarak türetilen fonksiyonları PZT 5A için Eş. 13-14'te verilmiştir. Türetilen iki eşitliğin de belirleme katsayısı değeri (r^2) 0,99'dur. Bu eşitliklerde T sıcaklığı temsil etmektedir. Bu eşitlikler kullanılarak değişen sıcaklıklar için ϵ_{11}/ϵ_0 ve ϵ_{33}/ϵ_0 değerleri hesaplanmıştır.

$$\epsilon_{11}/\epsilon_0 = 0,0103T^2 + 3,4885T + 1585,4 \quad (13)$$

$$\epsilon_{33}/\epsilon_0 = 0,011T^2 + 3,6999T + 1681,5 \quad (14)$$

Üretici firmanın katalog değerlerinden ϵ_{11}/ϵ_0 ve ϵ_{33}/ϵ_0 parametreleri alınarak doğrudan ANSYS programına girilememektedir. Üretici verileri $[\epsilon^T]$ matrisi ile tanımlanır.

$$[\epsilon^T] = \begin{bmatrix} \epsilon_{11}/\epsilon_0 & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon_{11}/\epsilon_0 & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_{33}/\epsilon_0 \end{bmatrix}$$

Üretici verilerini ANSYS programına uygun hale getirmek için Eş. 15 kullanılmıştır.

$$[\epsilon^S] = [\epsilon^T] - [d]^t [s^E]^{-1} [d] \quad (15)$$

25 °C için oluşturulan $[\epsilon^S]$ matrisi aşağıda gösterilmiştir.

$$[\epsilon^S] = \begin{bmatrix} 1033,986 & 0 & 0 \\ 0 & 1033,986 & 0 \\ 0 & 0 & 801,7345 \end{bmatrix}$$

Diğer sıcaklıklar için $[s^E]^{-1}$ ve $[\epsilon^T]$ matrisleri tekrar hesaplandıktan sonra Eş. 15 kullanılarak değişen sıcaklıklar için $[\epsilon^S]$ matrisleri oluşturulmuştur.

2.2.4. Yoğunluk (Density)

Değişen sıcaklıklardaki yoğunluk değişimini hesaplamak için Ajitsaria tarafından önerilen eşitlik kullanılmıştır [13] (Eş. 16).

$$\rho = \frac{\rho_0}{\left[(1 + \alpha \Delta T)^3 \right]} \quad (16)$$

Eş. 16 kullanılarak değişen sıcaklıklar için yoğunluk değerleri hesaplanmıştır. Burada ρ ilgili sıcaklıktaki yoğunluğu, ρ_0 referans sıcaklıktaki yoğunluğu (kg/m^3) temsil etmektedir. α (ısı genleşme katsayısı)'nın piezoelektrik sensör için üretici firma verilerinde 4×10^{-6} (1/K) ile 8×10^{-6} (1/K) arasında değişen bir değere sahip olduğu belirtilmiştir. Eş. 16'da α değeri ortalama ısı genleşme katsayısı olarak tanımlandığı için α değeri 6×10^{-6} (1/K) olarak kabul edilmiştir. Hesaplanan yoğunluk değerleri değişen sıcaklıklar için hiçbir dönüşüm yapılmadan ANSYS programına girilmiştir.

2.2.5. Hasar metrikleri (Damage metrics)

Hasar metrik değerleri, hasar indeksini gösteren skaler bir değerdir. Bu değerler iki empedans spektrumunun işlenmesi sonucu ortaya çıkan farkı ifade ederler. Hasar metrikleri, hasar tarafından ortaya çıkan spektrum özelliklerini yakalar ve normal koşullardaki değişimleri yok sayar. Bu hedefe ulaşmak mümkünse bile kolay değildir. Bugüne kadar, empedans spektrumlarını karşılaştırmak ve hasar varlığını değerlendirmek için birçok hasar metriği kullanılmıştır. Bunlar arasında en çok kullanılan metrikler; ortalama kareler sapmasının karekökü (RMSD), ortalama mutlak yüzde sapma (MAPD), kovaryans (CC) ve korelasyon katsayısı sapmasıdır (CCDM). Bu metriklerin matematiksel ifadeleri Eş. 17-20 arasında verilmiştir [16].

$$RMSD = \sqrt{\frac{\sum_N [Re(Z_i) - Re(Z_i^0)]^2}{\sum_N [Re(Z_i^0)]^2}} \quad (17)$$

$$MAPD = \frac{1}{N} \sum_N \left| \frac{Re(Z_i) - Re(Z_i^0)}{Re(Z_i^0)} \right| \quad (18)$$

$$CCDM = 1 - \frac{\sum_N [Re(Z_i) - \overline{Re(Z)}][Re(Z_i^0) - \overline{Re(Z^0)}]}{\sqrt{\sum_N [Re(Z_i) - \overline{Re(Z)}]^2 \sum_N [Re(Z_i^0) - \overline{Re(Z^0)}]^2}} \quad (19)$$

$$CC = 1 - CCDM \quad (20)$$

N örneklem nokta sayısını, üst olarak 0 yapının bozulmamış halini (referans halini), Z değerleri empedans değerlerini, \bar{Z} ve $\overline{Z^0}$ empedans değerlerinin ortalamalarını göstermektedir. Eş. 17-20 yardımıyla skaler değerler elde edilir. Bu değerler karşılaştırılan spektrum değerleri arasındaki ilişkileri temsil eder. Eş. 17-20'de girdi empedans spektrumlarının bir ön işleme ihtiyacı yoktur. Deneysel ölçüm sonucu elde edilen veri doğrudan hasar metriklerinin hesaplanmasında kullanılabilir. Öte yandan rezonans tepe değerlerinde

frekans kaymalarının istatistiksel hasar indeksleri üzerine etkisi belirgin olmayabilir. Bu durumda doğru frekans bandının seçilmesi büyük önem taşır. Genellikle rezonans tepelerinin yoğun olduğu frekans bandlarının istatistiksel hasar indekslerinin hesaplanmasında kullanılması tavsiye edilir. Bir diğer olgu da başlangıç spektrumundaki kaymalardır ve bu durum istatistiksel formüllerle yakalanamaz. Bu kayma durumu genellikle piezoelektrik sensörlerin kurulumundaki ve çevresel koşullardaki değişikliklerden kaynaklanır. Bu durum hasarla ilgili olmasa bile başlangıç spektrumu için hasar indeksini değiştirir [16].

Birçok uygulamada manyetik alanın etkisi ihmal edilirken, sıcaklığın etkisi ihmal edilmemektedir. Sıcaklık değişiklikleri sensörün elektriksel empedansında bazı karşılıklı değişimlere yol açar. Sıcaklık değişimleri RMSD indeksinde bazı değişikliklere yol açabilir. RMSD indeksi sağlıklı bir yapı için bile yüksek olabilir, bu durum hatalı teşhise yol açar. CCDM indeksi elektriksel empedans değerlerinin genliğinde değişimlere karşı duyarlıdır, empedans şeklinin değişimlerine karşı duyarlıdır. Böylece, sıcaklık değişimi nedeniyle elektriksel empedans değerlerinin genliğinde değişim olduğu düşünülüyorsa CCDM indeksi sıcaklık etkisiyle kontrol edilen yapıda hatalı teşhisten kaçınmak için iyi bir seçenektir. Buna karşın, yapının doğal frekansları sıcaklığa bağlıdır. Doğal frekanstaki bu değişimler elektriksel empedanslarda frekans kaymalarına sebep olur [16].

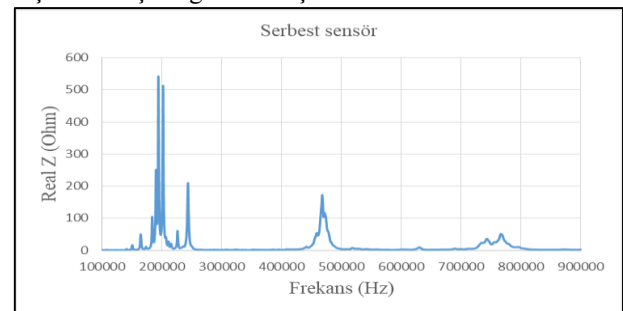
3. DENEYSEL VE NÜMERİK SONUÇLAR

(EXPERIMENTAL and NUMERICAL RESULTS)

Bu çalışmada serbest piezoelektrik sensör üzerinde sıcaklığın etkisi, deneysel çalışmalar ve sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak araştırılmıştır. Empedansın real kısmı (Real Z), serbest sensörün titreşim spektrumunu yansıtmaktadır [16]. Bu yüzden deneysel ve nümerik çalışmalarda empedansın real kısmına (Real Z) odaklanılmıştır.

3.1. Deneysel Sonuçlar (Experimental Results)

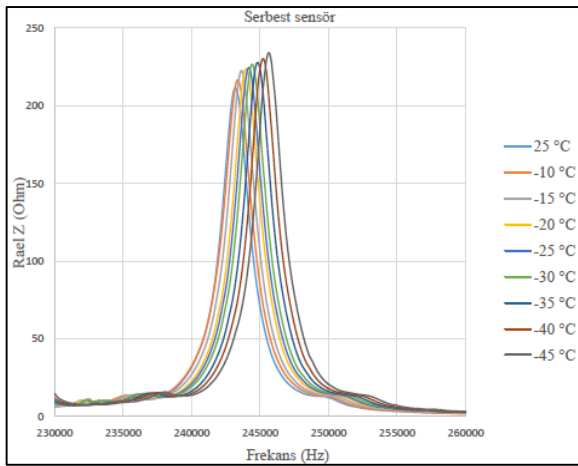
Oda sıcaklığında gerçekleştirilen ölçüm referans kabul edilerek diğer sıcaklıklar için yapılan ölçümler bu referans ölçüme göre karşılaştırılmıştır. Şekil 5'te piezoelektrik sensörün oda sıcaklığındaki empedans ölçüm sonuçları gösterilmiştir.



Şekil 5. Serbest sensörün 25 °C'deki empedans ölçüm sonuçları (Impedance measurement results of the free sensor at 25 °C)

Şekil 5'te 190 kHz-200 kHz arasında iki tane büyük mod görülmektedir. Bu modların birbirine çok yakın olduğu görülmektedir. Bu yüzden üçüncü en büyük modun görüldüğü 230 kHz-260 kHz frekans aralığına odaklanılmıştır. Deneyler 230 kHz-260 kHz frekans aralığında, 1000 adımda gerçekleştirilmiştir. Şekil 6'da deneysel ölçüm sonuçları gösterilmiştir.

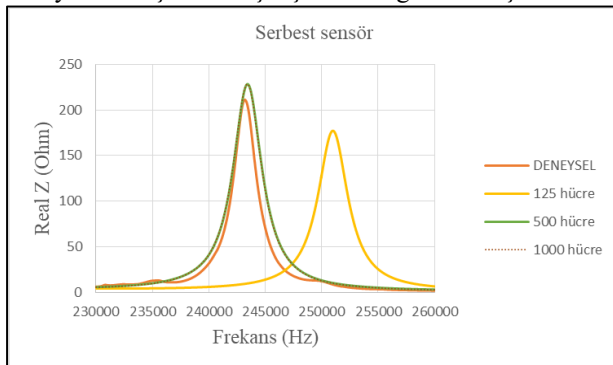
Şekil 6'da görüldüğü gibi, sıcaklık azaldıkça frekansın sağa doğru kaydığı ve genliklerin de arttığı gözlemlenmiştir. Literatürdeki bezer çalışmalarda sıcaklık arttıkça frekans ve genlik değerlerinin azaldığı tespit edilmiştir. [6,8,9]. Yapılan bu çalışmada, sıcaklığın azalması ile aynı eğilim gözlemlenmiştir. Bu değişim oda sıcaklığındaki referans ölçümle karşılaştırılmış ve hasar metrikleri kullanılarak değişim yorumlanmıştır.



Şekil 6. Serbest sensörün değişen sıcaklıklardaki deneysel ölçüm sonuçları (Experimental results of the free sensor at varying temperatures)

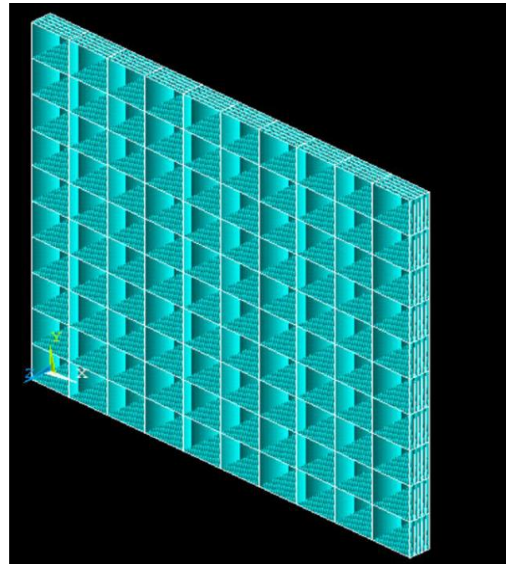
3.2. Nümerik Sonuçlar (Numerical Results)

25 °C'de gerçekleştirilen deneysel çalışmanın sonuçları ile farklı hücre yapılarıyla oluşturulan modeller karşılaştırılarak en uygun hücre yapısı belirlenmiştir. Uygun hücre yapısı tespit edildikten sonra değişen sıcaklıklar için hesaplanan yeni malzeme özellikleri kullanılarak simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Şekil 7'de farklı hücre yapıları için simülasyon sonuçlarının, deneysel sonuçlarla karşılaştırılması gösterilmiştir.

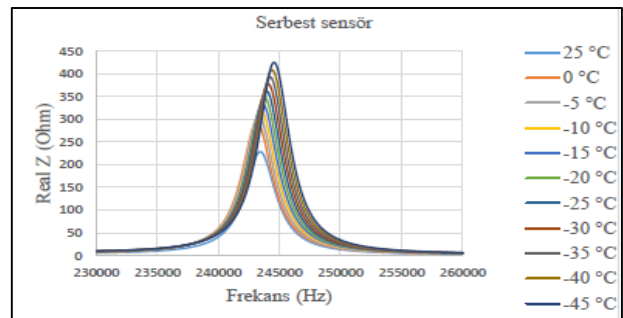


Şekil 7. Serbest sensör için hücre sayısı seçimi (Cell numberselection for the free sensor)

Deneysel sonuçlara en yakın simülasyon sonuçlarının 500 hücre (10x10x5) ve 1000 hücre (10x10x10) yapısıyla elde edilen çözümlerin olduğu Şekil 7'de görülmektedir. 10x10x5 hücre yapısı ve 10x10x10 hücre yapısı ile yapılan çözümlerin aynı değeri verdiği görülmüştür. 25 °C ve diğer sıcaklıklar için yapılan simülasyon çalışmalarında, çözüm süresi daha kısa olduğu için 10x10x5 hücre yapısı tercih edilmiştir. Seçilen ağ yapısı ile elde edilen sonuçların hücre sayısından bağımsız olduğu gösterilmiştir. Şekil 8'de seçilen ağ yapısı gösterilmiştir. Diğer sıcaklıklar için yapılan simülasyon çalışmalarında aynı ağ yapısı kullanılmıştır. 10x10x5 hücre yapısı kullanılarak değişen sıcaklıklar için elde edilen simülasyon sonuçları Şekil 9'da gösterilmiştir. Deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlarla benzer şekilde sıcaklık azaldıkça, frekans sağa doğru kaymakta ve genlik değeri de artmaktadır (Şekil 9).



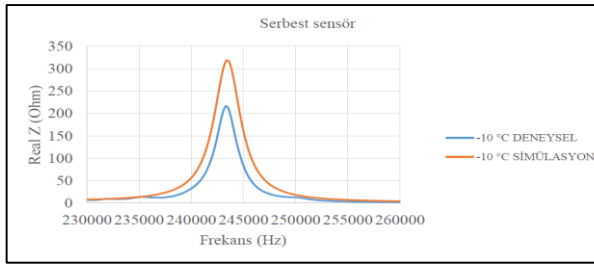
Şekil 8. Serbest sensörün ağ yapısı (Mesh structure of the free sensor)



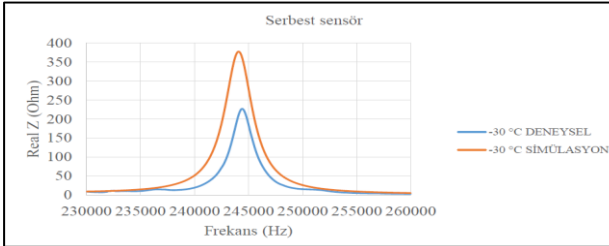
Şekil 9. Serbest sensörün değişen sıcaklıklar için simülasyon sonuçları (Simulation results of the free sensor for varying temperatures)

Şekil 10,11,12'de sırasıyla -10 °C, -30 °C ve -45 °C 'de deneysel ve simülasyon çalışmalarının karşılaştırması yapılmıştır. Şekil 10-12 incelendiğinde, simülasyon çalışmaları sonucundaki real empedans değerlerinin deneysel sonuçlardan yüksek olduğu görülmektedir.

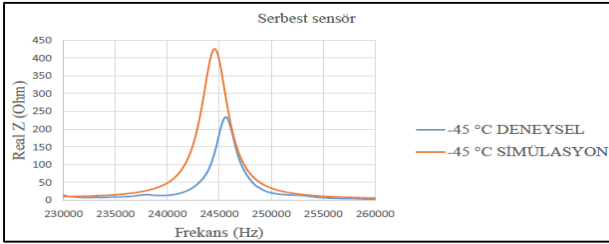
Bunun nedeni, simülasyon çalışmalarında değişen sıcaklıklar için hesaplanan malzeme özelliklerinin tamamının üretici firmanın katalog bilgilerinde yer almamasındandır. Buna karşın deneysel ve simülasyon çalışmalarından elde edilen frekans değerlerinin çok yakın olduğu görülmektedir. Yapısal sağlık izlemede frekans değişimi genlik değişiminden daha önemlidir. Bu durum göz önüne alındığında, deneysel çalışmalardan ve simülasyon çalışmalarından elde edilen sonuçların birbirine yakın olduğu görülmektedir. Bu sonuçlar, sıcaklık etkisinin incelendiği araştırmalarda simülasyon çalışmaları ile deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlara yakın sonuçlar elde edilebileceğini göstermektedir.



Şekil 10. Serbest sensörün deneysel ve simülasyon sonuçlarının karşılaştırılması (-10 °C) (Comparison of experimental and simulation results of the free sensor at -10 °C)



Şekil 11. Serbest sensörün deneysel ve simülasyon sonuçlarının karşılaştırılması (-30 °C) (Comparison of experimental and simulation results of the free sensor at -30 °C)



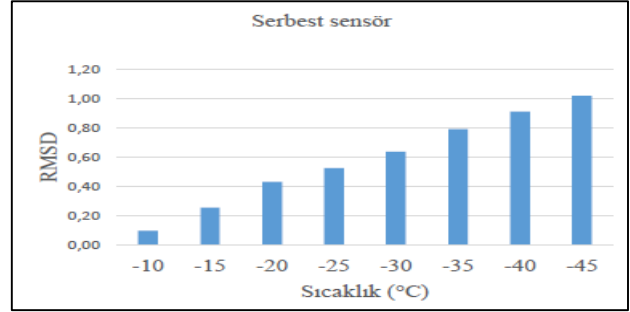
Şekil 12. Serbest sensörün deneysel ve simülasyon sonuçlarının karşılaştırılması (-45 °C) (Comparison of experimental and simulation results of the free sensor at -45 °C)

3.3. Deneysel Sonuçlar için Hasar Metrikleri (Damage Metrics of Experimental Results)

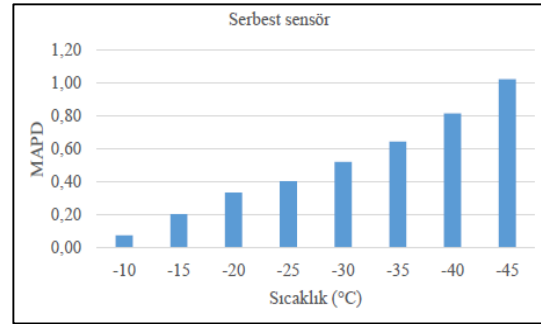
Serbest sensör için farklı sıcaklık değerlerine göre RMSD değerleri Şekil 13'de verilmiştir. RMSD değerleri incelendiğinde sıcaklık düşüştüyle birlikte değerlerin yükseldiği görülmektedir. -10 °C'de RMSD değeri 0,1

seviyelerinde iken, -45 °C'de bu hasar metriği 1 değerlerine yükselmektedir.

Serbest sensör için farklı sıcaklık değerlerine göre MAPD değerleri Şekil 14'de verilmiştir. MAPD değerleri incelendiğinde sıcaklık düşüştüyle birlikte değerlerin yükseldiği görülmektedir. -10 °C'de MAPD değeri 0,1 seviyelerinde iken, -45 °C'de bu hasar metriği 1 değerlerine yükselmektedir.

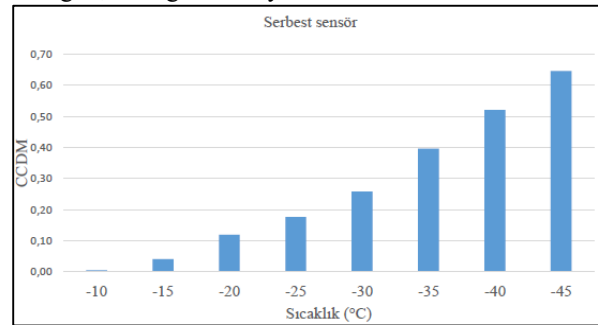


Şekil 13. Serbest sensörde farklı sıcaklık değerlerine göre RMSD hasar metriği değerleri (RMSD damage metric values of the free sensors with respect to to different temperature values)



Şekil 14. Serbest sensörde farklı sıcaklık değerlerine göre MAPD hasar metriği değerleri (MAPD damage metric values of the free sensor according to different temperature values)

Serbest sensör için farklı sıcaklık değerlerine göre CCDM değerleri Şekil 15'de verilmiştir. CCDM değerleri incelendiğinde sıcaklık düşüştüyle birlikte değerlerin yükseldiği görülmektedir. -10 °C'de CCDM değeri 0,01 seviyelerinde iken, -45 °C'de bu hasar metriği 0,65 değerlerine yükselmektedir.

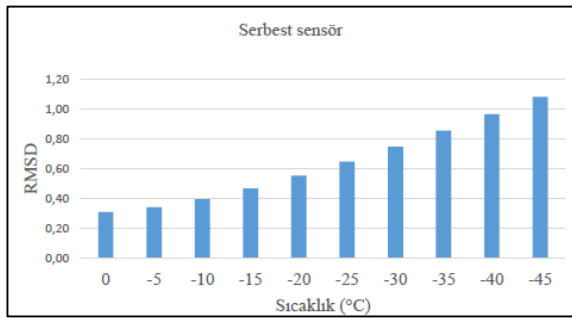


Şekil 15. Serbest sensörde farklı sıcaklık değerlerine göre CCDM hasar metriği değerleri (CCDM damage metric values of the free sensor with respect to to different temperature values)

Serbest sensör için hasar metrikleri açısından sonuçlar incelenirse, hasar metriklerinin sıcaklık düşüşüyle artış gösterdiği ve metriklerin bu açıdan birbirleriyle uyumlu olduğu görülmüştür.

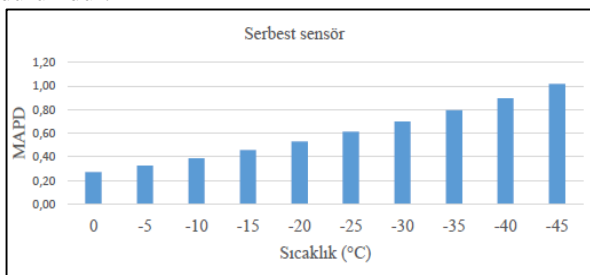
3.4. Nümerik Sonuçlar için Hasar Metrikleri (Damage Metrics of the Numerical Results)

Serbest sensör için farklı sıcaklık değerlerine göre RMSD değerleri Şekil 16'da verilmiştir. Şekilde RMSD değerleri incelenirse sıcaklık düşüşüyle birlikte değerlerin yükseldiği görülmektedir. 0 °C'de RMSD değeri 0,3 seviyelerinde iken, -45 °C'de bu hasar metriği 1,1 değerlerine yükselmektedir.



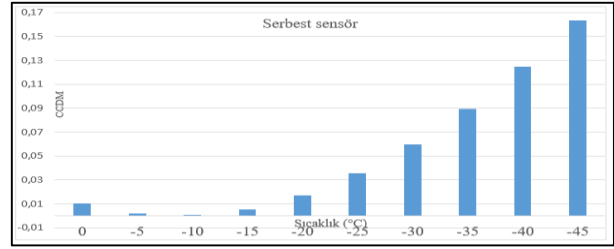
Şekil 16. Serbest sensörde farklı sıcaklık değerlerine göre simülasyon sonuçlarının RMSD hasar metriği değerleri (RMSD damage metric values of the simulation results of the free sensor with respect to the different temperature values)

Serbest sensör için farklı sıcaklık değerlerine göre MAPD değerleri Şekil 17'de verilmiştir. Şekilde MAPD değerleri incelenirse sıcaklık düşüşüyle birlikte değerlerin yükseldiği görülmektedir. 0 °C'de MAPD değeri 0,25 seviyelerinde iken, -45 °C'de bu hasar metriği 1 değerlerine yükselmektedir. Sıcaklık düşüşüne bağlı olarak hasar metriğinin artması beklenen bir durumdur.



Şekil 17. Serbest sensörde farklı sıcaklık değerlerine göre simülasyon sonuçlarının MAPD hasar metriği değerleri (MAPD damage metric values of the simulation results of the free sensor with respect to the different temperature values)

Serbest sensör için farklı sıcaklık değerlerine göre CCDM değerleri Şekil 18'de verilmiştir. CCDM değerleri incelenirse sıcaklık düşüşüyle birlikte değerlerin genelde yükseldiği görülmektedir. CCDM değerleri 0-0,16 bandı arasında değişmektedir.



Şekil 18. Serbest sensörde farklı sıcaklık değerlerine göre simülasyon sonuçlarının CCDM hasar metriği değerleri (CCDM damage metric values of the simulation results of the free sensor with respect to the different temperature values)

Üç hasar metriğine göre sonuçlar karşılaştırıldığında hasar metriklerinin birbirleriyle tutarlı olduğu görülmektedir. Tüm sonuçlar irdelendiğinde sıcaklık azalışı ile beraber real empedans grafikleri sağa doğru kaymıştır. Sıcaklık değişimi arttıkça frekans kayma miktarı artmıştır. Sıcaklık düşüşü ile beraber hasar metrikleri artmıştır. Bu kapsamda sonuçların literatürdeki çalışmalar ile uyumlu olduğu görülmüştür [6-9].

4. SONUÇ ve ÖNERİLER (RESULT and SUGGESTIONS)

Bu çalışma kapsamında sıcaklık etkisini dikkate alan deneysel çalışma yapılmış ve ANSYS sonlu elemanlar programı yardımıyla simülasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Simülasyon çalışmaları için piezoelektrik malzeme özelliklerinin değişen sıcaklıklardaki değerleri belirlenmiştir. Bu değerler kullanılarak değişen sıcaklıklar için serbest sensörün davranışı incelenmiştir. 0 °C ile -45 °C arasında empedansın real kısmındaki değişimler, oda sıcaklığındaki sonuçlar ile karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Sıcaklık azaldıkça frekansın sağa doğru kaydığı (arttığı) ve genliğinin de arttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, sıcaklık düşüşü ile birlikte hasar metriklerinin arttığı görülmektedir. Deneysel çalışmalardan ve simülasyon çalışmalarından elde edilen sonuçların birbirine yakın olduğu görülmüştür. Deneysel çalışma imkanı olmadığı durumlarda simülasyon çalışmalarının da yeterli olabileceği düşünülmektedir. Daha sonraki çalışmalarda sıcaklık aralığı daha geniş seçilerek çalışmalar yapılabilir. Ayrıca değişen sıcaklıklarda piezoelektrik sensör eklenmiş kusurlu numunelerin davranışı incelenerek iki etki birlikte değerlendirilebilir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışma, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyonu tarafından 201715A119 nolu proje olarak desteklenmiştir. Bu çalışma, "Yapısal Sağlık İzlemede Kullanılan Piezoelektrik Sensörlerin Sıcaklık Etkisinin İncelenmesi" başlıklı yüksek lisans tezinden üretilmiştir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Shankar R., “An integrated approach for structural health monitoring”, PhD thesis, Indian Institute of Technology Delhi, (2009).
- [2] Aktan A. E., Helmicki A. J. and Hunt V. J., “Issues in health monitoring for intelligent infrastructure”, *Smart Materials and Structures*, 7(5): 674-692, (1998).
- [3] Doebbling S. W., Farrar C. R. and Prime, M. B., “A summary review of vibration-based damage identification methods”, *The Shock and Vibration Digest*, 30(2): 91-105, (1998).
- [4] Hooker, M. W., “Properties of PZT-based Piezoelectric Ceramics between -150 and 250 °C”, Technical Report, (1998).
- [5] Sherrit S., Yang G., Wiederick H. D. and Mukherjee B. K., “Temperature dependence of the dielectric, elastic and piezoelectric material constants of lead zirconate titanate ceramics”, *In Proceedings of the international conference on smart materials, structures and systems*, 121-126, (1999).
- [6] Baptista F. G., Budoya D. E., De Almeida V. A. and Ulson J. A., “An experimental study on the effect of temperature on piezoelectric sensors for impedance-based structural health monitoring”, *Sensors (Basel)*, 14(1): 1208-1227, (2014).
- [7] Wandowski T., Malinowski P. H. and Ostachowicz W. M., 2016, “Delamination detection in CFRP panels using EMI method with temperature compensation”, *Composite Structures*, 151: 99-107, (2016).
- [8] Xu G., Xu B., Xu C. and Luo Y., “Temperature effects in the analysis of electromechanical impedance by using spectral element method”, *Multidiscipline Modeling in Materials and Structures*, 12(1): 119-132, (2016).
- [9] Haider M. F., Giurgiutiu V., Lin B. and Yu L., “Irreversibility effects in piezoelectric wafer active sensors after exposure to high temperature”, *Smart Materials and Structures*, 26(9): 095019, (2017).
- [10] <https://www.piceramic.com/en/products/piezoceramic-materials/#c15162>
- [11] <http://ansys.net/ansys/tips/Week13 TNT Conversion of Piezoelectric Material Data. pdf>
- [12] Türker Ö., “PZT/Polimer Esaslı Aktif Titreşim Kontrolüne Uygun Akıllı Kiriş Tasarımı ve İmalatı”, *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, (2009).
- [13] Ajitsaria J.K., “Modelling and analysis of PZT Micropower Generator”, *PhD Thesis*, Auburn University, (2008).
- [14] <http://www.americampiezo.com>
- [15] <http://www.piezo.com/catalog8.pdf>
- [16] Giurgiutiu V., “Structural health monitoring with piezoelectric wafer active sensors”, Second Edition, Elsevier, U.S.A., (2014).