

YÜZEY AKUSTİK DALGA TEMELLİ PIEZOELEKTRİK KÜTLE ÖLÇÜM SENSÖRÜNÜN MODAL ANALİZİ

Ufuk Tan Baler¹, A. Fethi Okyar¹, B. Emek Abali²

¹Yeditepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Ataşehir, İstanbul, Türkiye
e-posta: ufuktan@utblr.xyz

²Uppsala University, Department of Materials Science and Engineering, Applied Mechanics
e-posta: b.emek.abali@angstrom.uu.se

ÖZET

Yüzey akustik dalgaları (YAD) kullanımının özgün uygulamalarında sıvı ve gaz ortamlarında biyolojik maddelerin ölçümü yer almaktadır. YAD sensörleri port denilen iç içe geçmiş elektrot bacaklarıyla tahrik edilir ve piezoelektrik etki sayesinde mekanik dalgalar kullanılan malzemelere göre farklı tiplerde yayılabilir. Dalga tiplerinin çalışma frekansına göre incelenmesi sistemin modal analiziyle mümkün olmaktadır. Bu çalışmada tahrik frekansında Love tipi dalga üretmesi beklenen bir sensörün açık-kaynak sonlu eleman çözüm kütüphanesi olan FEniCS ile modal analizi yapılmaktadır. 6 tane dalga kipi tahrik frekansı etrafında görülmüştür. Bunların arasında oluşması beklenen Love tipi dalgayı içeren kip tespit edilmiş, böylece sayısal analiz sonuçlarının cihaz tasarımında kullanılabilirliği gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Yüzey akustik dalgaları, modal analiz, özdeğer problemi, dinamik karakterizasyon.

MODAL ANALYSIS OF A SURFACE ACOUSTIC WAVE BASED PIEZOELECTRIC MASS SENSING SENSOR

ABSTRACT

Novel applications of surface acoustic waves (SAW) include sensing of biological agents in different media. A SAW sensor is excited by inter-digital-transducer (IDT), which has nested electrode legs can generate waves via the piezoelectric effects. Depending on the selection of materials different types of waves may propagate in the sensor. Examination of the type of propagated waves in the frequency domain is made possible by modal analysis. In this study, an open-source finite element solver library called FEniCS is utilized to make a modal analysis of a sensor, which is expected to generate Love type waves. As a result of the conducted analysis, six wave modes are solved around the excitation frequency, and the eigenfrequency at which Love type wave occurs is found among these, which proves the usefulness of the computational simulation as a SAW type sensor design tool.

Keywords: *Surface acoustic waves, modal analysis, eigenvalue problem, dynamic characterization.*

1. GİRİŞ

Çalışmanın amacı alttaş ve dalga kılavuz katmanından oluşan bir biyosensörde oluşan dalgaların hangi frekansta ve tipte olduğunun özdeğer problemiyle bulunmasıdır. Diğer ticari lisanslı yazılımlara göre problem tanımı FEniCS kütüphanesi sayesinde daha net olmakla beraber kodun ulaşılabilir ve değiştirebilir olması açık-kaynak yazılımların değerini ortaya koymuştur. FEniCS [1] kütüphanesiyle hesaplanan dalga kiplerinin çıktığı frekansların gerçekte uygulanan tahrik frekansına yeterli düzeyde yaklaşması bu bildirinin sonuçlarında hedeflenmiştir.

Sensör üzerindeki biyoduyarlı katman ortamdaki uyumlu biyomaddeleri yakalar ve yüzeydeki kütle birikir [3][4]. Kütle birikmesi yayılan dalgaların frekansını yani hızını değiştirebilir [5] fakat biyoduyarlı katman, dalga kılavuz katmanına kıyasla çok daha ince olduğundan çalışmadaki modele dahil edilmemiştir. Frekans değişimindeki duyarlılık analizleri [6,8] bu çalışmanın kapsamı dışındadır.

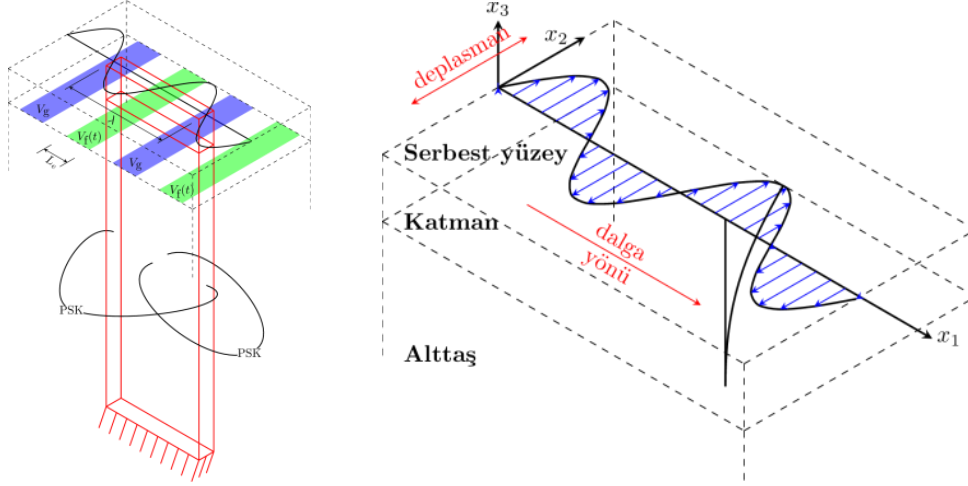
Bu çalışmada Love tipi yüzey akustik dalga (YAD) ile çalışan sensörler incelenmiştir [9]. Şekil 1'de alttaş/katman bileşimini barındıran temsili hacim elemanı (THE) ve üzerinde oluşan dalga kinematığı gösterilmektedir. Love dalgasındaki deplasmanlar serbest $x_1 - x_2$ yüzeyinde oluşur. Dolayısıyla dalga x_1 yönünde ilerler. Serbest yüzeyden aşağı doğru gidildikçe dalga genliği üstel olarak azalır. Love tipi dalgaların seçilme nedeni sensörün sıvı ortamda çalışmasıdır. Yüzeydeki deplasmanların sıvı ortama enerji aktarmasının en az seviyede olması için x_3 deplasmanının sıfır olması ideal durumdur ve Love tipi dalgalar bu kriteri karşılar.

Sensör üzerinde oluşan dalgalar iç içe geçmiş tarak benzeri λ mesafesinde kendini tekrar eder. Dolayısıyla bir tane λ -periyodik dalganın çözülmesi adına THE'nin x_1 yönündeki uzunluğu λ olarak sınırlandırılmıştır. x_2 yönünde de sensörün geometrisi uzun bir mesafe boyunca değişmemektedir ve o yöndeki uzunluğu kısa tutmak çözümlerin doğruluğunu azaltmayacaktır. Yapılan basitleştirme periyodik sınır koşulunun (PSK) x_2 ve x_3 yönlerindeki karşılıklı yüzeylerde uygulanmasını gerektirmektedir. Dalganın zamana bağlı yaratılabilmesi için ara katmana elektrotların konulması gerekmektedir ancak özdeğer probleminde zamandan bağımsız bir çözüm yapıldığı için elektrotların modellenmesine gerek yoktur. Çözümde dalga kiplerinin THE sınırlarının içinde ortaya çıkması beklenmektedir.

Analizlerde kullanılan programlar ön-işlem, çözüm ve arka-işlem olmak üzere üç ana kategoriye ayrılmaktadır. Gmsh [10] ön-işlemde ağ oluşturulması için kullanılan programlardır. Çözüm kısmında sonlu eleman analizi için açık kaynak kodu ile yazılmış FEniCS kütüphanesi kullanılmaktadır. Arka-işlemde elde edilen nümerik sonuçların işlenmesinde Paraview'a [11] başvurulmaktadır.

2. YÖNTEM

THE ağı Betik 1 tarafından gmsh ile oluşturulmaktadır. Dört adet parametre betiğin başında belirlenir. Bunlar lambda, g_h, s_h ve m_h sırasıyla λ , kılavuz katman kalınlığı, alttaş katman kalınlığı ve THE'nin derinlik yönündeki uzunluğudur.



Şekil 1. Altaş ve katmandan oluşan kütle ölçüm sensörünün THE görüntüsü (sol), Love dalga kinematığı (sağ)

```

// length: mum
lambda = 104;
g_h = 21.617231999999998;
s_h = 700;
m_h = 20;

Point (11) = {0,0,0};
Point (12) = {lambda,0,0};
Point (13) = {lambda,m_h,0};
Point (14) = {0,m_h,0};

Point (21) = {0,0,s_h};
Point (22) = {lambda,0,s_h};
Point (23) = {lambda,m_h,s_h};
Point (24) = {0,m_h,s_h};

Point (31) = {0,0,s_h + g_h};
Point (32) = {lambda,0,s_h + g_h};
Point (33) = {lambda,m_h,s_h + g_h};
Point (34) = {0,m_h,s_h + g_h};

Line (11) = {11, 12};
Line (12) = {21, 22};
Line (13) = {31, 32};
Line (15) = {13, 14};
Line (16) = {23, 24};
Line (17) = {33, 34};

Line (21) = {11, 14};
Line (22) = {21, 24};
Line (23) = {31, 34};
Line (25) = {12, 13};
Line (26) = {22, 23};
Line (27) = {32, 33};

Line (31) = {11, 21};
Line (32) = {21, 31};
Line (34) = {12, 22};
Line (35) = {22, 32};
Line (37) = {13, 23};
Line (38) = {23, 33};
Line (310) = {14, 24};
Line (311) = {24, 34};

Line Loop (11) = {21, 310, -22, -31};
Line Loop (12) = {22, 311, -23, -32};
Line Loop (14) = {25, 37, -26, -34};
Line Loop (15) = {26, 38, -27, -35};
Line Loop (21) = {31, 12, -34, -11};
Line Loop (22) = {32, 13, -35, -12};
Line Loop (24) = {310, -16, -37, 15};
Line Loop (25) = {311, -17, -38, 16};

Line Loop (31) = {11, 25, 15, -21};
Line Loop (32) = {12, 26, 16, -22};
Line Loop (33) = {13, 27, 17, -23};

Plane Surface (11) = {11};
Plane Surface (12) = {12};
Plane Surface (14) = {14};
Plane Surface (15) = {15};

Plane Surface (21) = {21};
Plane Surface (22) = {22};
Plane Surface (24) = {24};
Plane Surface (25) = {25};

Plane Surface (31) = {31};
Plane Surface (32) = {32};
Plane Surface (33) = {33};

```

```

Surface Loop (2) = {12, 15, 22, 25, 32, 33};
Surface Loop (3) = {11, 14, 21, 24, 31, 32};

Volume (2) = {2};
Volume (3) = {3};

// Mesh specifications
Transfinite Curve {12, 13, 16, 17} = 9; // n_x
Transfinite Curve {22, 23, 26, 27} = 3; // n_y

Transfinite Surface {32};

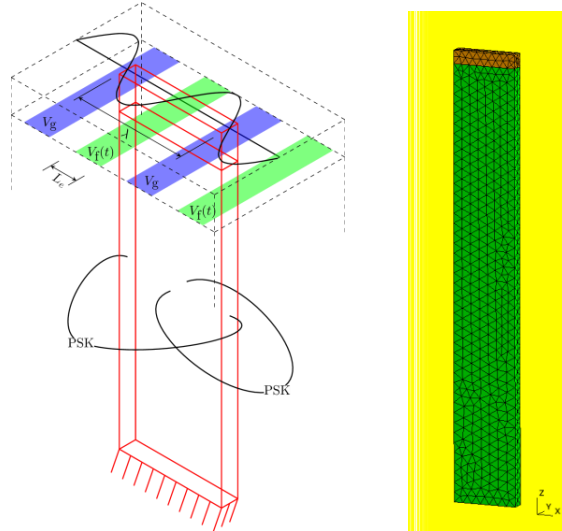
// Marking
Physical Volume ("guide", 2) = {2};
Physical Volume ("sub", 3) = {3};
Physical Surface ("bottom", 4) = {31};
Physical Surface ("y0subsurface", 5) = {21};
Physical Surface ("y0guidesurface", 6) = {22};

Periodic Surface {24} = {21} Translate {0, m_h, 0};
Periodic Surface {25} = {22} Translate {0, m_h, 0};
Periodic Surface {14} = {11} Translate {lambda, 0, 0};
Periodic Surface {15} = {12} Translate {lambda, 0, 0};

```

Betik 1. twolayer.geo

Betik 1'in gmsh ile çalıştırılmasından twolayer.msh oluşur ve dolfin-convert komutu yardımıyla twolayer.xml'e çevrilir ve Şekil 2'de THE ağı gösterilmektedir.



Şekil 2. THE (sol, tekrar gösterim) ve gmsh ile yaratılan THE ağı (sağ)

FEniCS'in kullanıldığı saw_rve_In_silica.py Betik 2 ile başlamaktadır. Öncelikle FEniCS'in içindeki bütün fonksiyonlar yüklenmiştir. Sonrasında varyasonal formların kodalanabilmesi için indisler ufl kütüphanesinden çağırılmıştır.

```

from fenics import *
from ufl import i, j, k, l, p, q, r, s

```

Betik 2. Çağırılan kütüphaneler

Özdeğer çözümünün ve THE geometrisinin parametreleri Betik 3'de verilmiştir. freq değeri özdeğer çözücüsüne giden hedef frekans değeridir. Bu değer lmbda açısal hızına çevrilmiştir. N_eig çözücüye giden hedef frekansın üstünde bulunacak özdeğer sayısıdır. xmin, xmax, vb. değerler THE geometrisinin ölçüleridir.

```

freq = 30 # 1 / mus
lmbda = (2*np.pi*freq)**2 # rad / mus2
N_eig = 50 # number of eigenvalues
xmin = 0; ymin = 0; zmin = 0 # mum
xmax = 104; ymax = 20; # mum

```

Betik 3. Problem parametreleri

PSK bir class olarak Python3'de Betik 4 ile implemente edilmiştir. PSK sayesinde seçilen karşılıklı yüzeylerdeki çözülen serbestlik dereceleri aynı olmaktadır.

```
TOL = 1E-10

# class used to define the periodic boundary map
class PeriodicBoundary(SubDomain):
    def inside(self, x, on_boundary):
        return bool( on_boundary and
            (
                ( near(x[0], xmin, TOL) and not ( near(x[1], ymax, TOL) and near(x[0], xmin, TOL) ) )
                or ( near(x[1], ymin, TOL) and not ( near(x[1], ymin, TOL) and near(x[0], xmax, TOL) ) )
            )
        )

    def map(self, x, y):
        if near(x[1], ymax, TOL) and near(x[0], xmax, TOL):
            y[0] = x[0] - (xmax-xmin)
            y[1] = x[1] - (ymax-ymin)
            y[2] = x[2]
        elif near(x[0], xmax, TOL):
            y[0] = x[0] - (xmax-xmin)
            y[1] = x[1]
            y[2] = x[2]
        else:
            y[0] = x[0]
            y[1] = x[1] - (ymax-ymin)
            y[2] = x[2]
```

Betik 4. PSK class'ı

Alttaş 64YX-kesim lityum niyobat (LN), katman ise silisyum dioksit (silika) olarak seçilmektedir [12]. Kesimden dolayı dönüştürülmeyen piezoelektrik malzeme parametreleri [13]'den alınmıştır. Silika için homojen izotropik elastik matrisi kullanılmıştır.

2.1. Varyasyonel formülasyon

Denklem -, indis notasyonu kullanılarak problemin güçlü formunu göstermektedir. Problem üç boyutlu ortamda tanımlandığı için i indisi $\{1,2,3\}$ sayılarını alır. Denklem -'de verilen semboller kütle yoğunluğunu, ρ ($\text{mg}/\mu\text{m}^3$), mekanik deplasmanı, u_i (μm), mekanik gerilmeyi, σ_{ji} (TPa), ivmeyi, \ddot{u}_i ($\mu\text{m}/\mu\text{s}^2$), elektriksel deplasmanı, D_i ($\mu\text{C}/\mu\text{m}^2$), elektriksel potansiyeli, ϕ (V), çözülen objenin iç hacmini, Ω , ve çözülen objenin hacmin dış sınırını, $\partial\Omega$, temsil eder.

$$\rho\ddot{u}_i - \sigma_{ji,j} = 0, \Omega \text{ içerisinde} \quad (1)$$

$$D_{i,i} = 0, \Omega \text{ içerisinde} \quad (2)$$

$$u_i = U_i \text{ ve } \phi = \Phi, \partial\Omega \text{ üzerinde} \quad (3)$$

Güçlü formdaki Denklem 1 tüm hacimde geçerli olan lineer momentum dengesidir. Denklem 2, iletken olmayan maddelerdeki elektriksel deplasmanın konuma bağlı değişmediğinin ifadesidir. Denklem 3 ise sırasıyla mekanik deplasmanların ve elektriksel potansiyelin sınır bölgelerde önceden tanımlanmış değerler, U_i ve Φ , olarak verildiğini göstermektedir.

σ_{ij} , Hooke yasasına ve piezoelektrik efektine bağlıdır. Denklem 4'de bu fenomen bünye denklemi olarak; elastik modül, C_{ijkl} (TPa), gerinim, ϵ_{kl} , elektromekanik kuplaj katsayısı, \mathcal{T}_{kij} (TPa/V- μm), ve elektriksel alan vektörü, E_k (V/ μm) ile verilmektedir.

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl}\epsilon_{kl} - \mathcal{T}_{kij}E_k \quad (4)$$

Piezoelektrik malzemenin mikro seviyede oluşan elektriksel alan vektör olan D_i , Denklem 5 ile bünyesel olarak ifade edilmektedir. Denklem 5'de yeni gösterilen ifade elektriksel geçirgenliktir, ϵ_{ik} .

$$D_i = \mathcal{T}_{ikl} \varepsilon_{kl} + \epsilon_{ik} E_k \quad (5)$$

ε_{kl} ve E_k sırasıyla Denklem 6 ve 7 ile tanımlanmıştır. ε_{kl} 'nin FEniCS kodu **Betik 5**'de verilmiştir.

$$\varepsilon_{kl} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_k}{\partial x_l} + \frac{\partial u_l}{\partial x_k} \right) \quad (6)$$

$$E_k = -\phi_{,k} \quad (7)$$

```
def epsl(u):
    return sym(grad(u))
```

Betik 5. Denklem 'nın kodu

Problemin varyasyonel forma çevrilmesi prosedürü basitçe Denklem 'ü mekanik değişken test fonksiyonuyla, δu_i , çarpmaktır. Denklem de benzer şekilde elektriksel potansiyel test fonksiyonuyla, $\delta \phi$, çarpılır. Gauss diverjans yöntemi kullanılır ve Denklem 4 ve 5'deki bünye denklemleri kullanılarak Denklem 8 elde edilir.

Vektörel ve skalar çözüm değişkenleri için sırasıyla U_e ve V_e *Continuous Galerkin* sonlu elemanları **Betik 6**'de tanımlanmıştır. u_i , ϕ , δu_i ve $\delta \phi$ fonksiyonlarını tanımlayabilmek için fonksiyon kümeleri, PSK'nın Betik 4 ile dahil edilmesiyle, W_u ve W_e olarak oluşturulmuştur. u , ϕ , du ve $dphi$ sırasıyla u_i , ϕ , δu_i ve $\delta \phi$ olarak tanımlanmıştır.

```
Ue = VectorElement("CG", mesh.ufl_cell(), 1)
Ve = FiniteElement("CG", mesh.ufl_cell(), 1)
Wu = FunctionSpace(mesh, Ue, constrained_domain=PeriodicBoundary())
We = FunctionSpace(mesh, Ve, constrained_domain=PeriodicBoundary())
u_ = TestFunction(Wu); phi_ = TestFunction(We)
du = TrialFunction(Wu); dphi = TrialFunction(We)
```

Betik 6. Test ve Trial fonksiyon tanımlamaları

$$\int_{\Omega} (\rho \ddot{u}_i \delta u_i + C_{ijkl} \varepsilon_{kl} \delta u_{i,j} - \mathcal{T}_{kij} E_k \delta u_{i,j} + \mathcal{T}_{ikl} \varepsilon_{kl} \phi_{,i} + \epsilon_{ik} E_k \delta \phi_{,i}) dV = 0 \quad (8)$$

Denklem 8'deki ifadelerden bazıları ilgilenilen sistemin sertliğini ve kütleli yapısını oluşturur. Sonlu elemanlar metodu kullanılarak Denklem 8'den sistemin sertlik ve kütle matrisleri k_{uu} , k_{up} , k_{pp} ve M_{form} olarak FEniCS ile **Betik 7**'de derlenmektedir. k_{pu} derlenmemiştir çünkü k_{up} 'nin transpozudur. İvme ifadesi, \ddot{u}_i , iki tane kısmi zaman türevi içermektedir. u_j ve ϕ sırasıyla değişken ayrımıyla Denklem ve ile gösterilmektedir. Buradaki üstel ifadeler zaman içindeki döngüsel değişimi temsil etmektedir. Bütün değişkenler Denklem 9 ve 10'da üstel ifadeyle yazılabilir ve dolayısıyla zamana bağlı bileşen sadeleşebilir. Bu sebeple ivme ifadesi $\ddot{u}_i = -\omega^2 u_i$ olarak yeniden yazılmıştır.

$$u_i(x, t) = u_i(x) e^{-j\omega t} \quad (9)$$

$$\phi(x, t) = \phi(x) e^{-j\omega t} \quad (10)$$

```
k_uu = C_s[i, j, k, l]*epsl(du)[k,l]*epsl(u_)[i,j]*dV(3) + C_g[i, j, k, l]*epsl(du)[k,l]*epsl(u_)[i,j]*dV(2)
k_up = -Ttilde_s[k, i, j]*(-dphi.dx(k))*epsl(u_)[i,j]*dV(3) -Ttilde_g[k, i, j]*(-dphi.dx(k))*epsl(u_)[i,j]*dV(2)
k_pp = -eps_0 * eps_rel_el_s[i, j]*(-dphi.dx(i))*(-dphi.dx(j))*dV(3) -eps_0 * eps_rel_el_g[i, j]*(-dphi.dx(i))*(-dphi)
M_form = rho_0_s*u_[j]*du[j]*dV(3) + rho_0_g*u_[j]*du[j]*dV(2)
M_, K_UU, K_UP, K_PU, K_PP = EigenMatrix(), EigenMatrix(), EigenMatrix(), EigenMatrix(), EigenMatrix()
assemble(k_uu, tensor = K_UU, keep_diagonal=True)
assemble(k_up, tensor = K_UP, keep_diagonal=True)
assemble(k_pp, tensor = K_PP, keep_diagonal=True)
assemble(M_form, tensor = M, keep_diagonal=True)
```

Betik 7. Denklem Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı.'deki sertlik ve kütle matrislerinin derlenmesi

THE'nin alt yüzeyi **Betik 8** ile sabitlenmiştir.

```
bcl = DirichletBC(Wu, Constant((0,0,0)), facets, 4)
bcl.apply(K_UU)
bcl.apply(K_UP)
bcl.apply(M_)
```

Betik 8. Dirichlet sınır koşulu uygulaması

Betik 7'de derlenen matrisler Denklem 'de cebirsel bir genel özdeğer problemi tanımında yazılmıştır. \hat{u} ve $\hat{\phi}$ değişkenleri bütün sistemin serbestlik derecelerini içeren vektörlerdir.

$$\left(\begin{bmatrix} K_{uu} & K_{u\phi} \\ K_{\bar{u}\phi} & K_{\phi\phi} \end{bmatrix} - \omega^2 \begin{bmatrix} M & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \right) \begin{Bmatrix} \hat{u} \\ \hat{\phi} \end{Bmatrix} = 0 \quad (11)$$

Denklem 11 kullanılarak yeni bir sertlik matrisi oluşturan statik yoğunlaşma yapılmıştır ve yeni genel özdeğer problemi Denklem 13 ile verilmiştir.

$$K = K_{uu} - K_{u\phi} K_{\phi\phi}^{-1} K_{\bar{u}\phi} \quad (12)$$

$$(K - \omega^2 M) \hat{u} = 0 \quad (13)$$

\hat{u} 'nun çözümü için kullanılan çözücü ve parametreleri **Betik 9**'da verilmiştir. Çözücü kütüphanesi olarak SLEPc kullanılmaktadır ve çözücü parametrelerine verilen değerler problemin bünyesel nitelikleriyle alakalıdır. Kullanılan matrisler Hermitian tipindedir, yani transpozu kendisinin kompleks eşleniğidir ve bundan dolayı gen_hermitian parametresi verilmiştir. arpack çözücüsü iteratif yöntemler kullanır ve hedef özdeğer olan spectral_shift üzerinde N_eig tane özdeğer bulur. target_real, hesaplanan özdeğerlerin reel kısmının spectral_shift'e yakın olanlarının bulmasını söyleyen tayf parametresidir. shift-and-invert, arpack için kullanılan özdeğer problem dönüşüm yöntemidir.

```
eigensolver = SLEPcEigenSolver(K_pet, M_pet)
eigensolver.parameters['problem_type'] = 'gen_hermitian'
eigensolver.parameters['spectrum'] = "target real"
eigensolver.parameters['spectral_transform'] = 'shift-and-invert'
eigensolver.parameters['solver'] = 'arpack'
eigensolver.parameters['spectral_shift'] = lambda
eigensolver.solve(N_eig)
```

Betik 9. Özdeğer çözücüsü kurulumu ve parametreleri

3. SONUÇ

30 Mhzden başlayan frekans taramalı çözümde bulunan kip frekans ve hız değerleri **Tablo 1**'de verilmiştir. Yığinsal, kesme, kalınlık ve Love dalga tipleri olmak üzere altı farklı sonuç bulunmuştur. Dalga hızları Denklem 14 ile hesaplanmıştır.

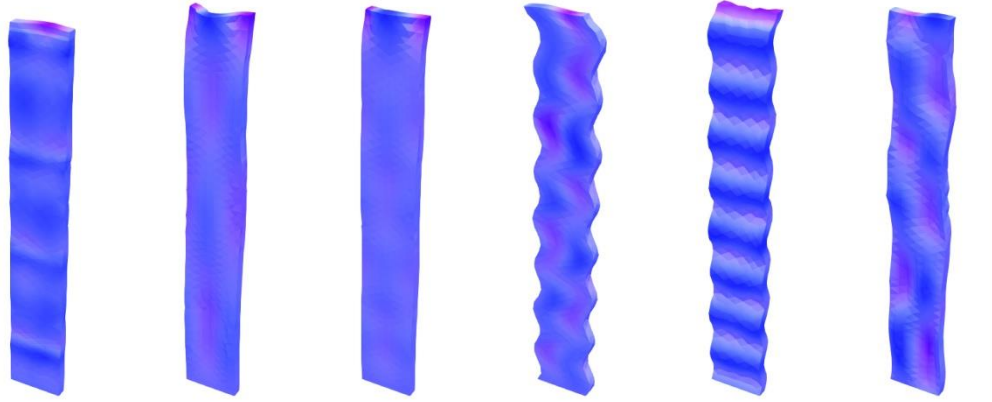
$$v = \lambda f \quad (14)$$

Şekil 3, dalga tiplerini göstermektedir. Love dalgası 41.5657 MHz'de bulunmuştur ve dalga hızı 4322.83 m/s'dir.

Tablo 1. Özdeğer problem çözümü değerleri ve tipleri

Özdeğer sayısı	Özdeğer frekansı (MHz)	Dalga hızı (m/s)	Dalga tipleri
1	38.5505	4009.25	Yığinsal
2	40.6008	4222.48	Kesme
3	41.5657	4322.83	Love
4	43.2792	4501.04	Kalınlık

5	44.7757	4656.67	Kalınlık
6	48.4617	5040.02	Kesme



38.5505 MHz 40.6008 MHz 41.5657 MHz 43.2792 MHz 44.7757 MHz 48.4617 MHz
Şekil 3. Deplasmanları temsil eden özvektörler Tablo 1'deki gibi sıralanmışlardır.

4. KAYNAKLAR

- [1] Alnæs, M., Blechta, J., Hake, J., Johansson, A., Kehlet, B., Logg, A., Richardson, C., Ring, J., Rognes, M.E. and Wells, G.N., 2015. The FEniCS project version 1.5. Archive of numerical software, 3(100).
- [2] Liu, B., Chen, X., Cai, H., Ali, M.M., Tian, X., Tao, L., Yang, Y. and Ren, T., 2016. Surface acoustic wave devices for sensor applications. Journal of semiconductors, 37(2), p.021001.
- [3] Go, D.B., Atashbar, M.Z., Ramshani, Z. and Chang, H.C., 2017. Surface acoustic wave devices for chemical sensing and microfluidics: a review and perspective. Analytical methods, 9(28), pp.4112-4134.
- [4] Mandal, D. and Banerjee, S., 2022. Surface acoustic wave (SAW) sensors: Physics, materials, and applications. Sensors, 22(3), p.820.
- [5] Du, J., Harding, G.L., Ogilvy, J.A., Dencher, P.R. and Lake, M., 1996. A study of Love-wave acoustic sensors. Sensors and Actuators A: Physical, 56(3), pp.211-219.
- [6] Rocha-Gaso, M.I., Fernandez-Diaz, R., Arnau-Vives, A. and March-Iborra, C., 2010, June. Mass sensitivity evaluation of a Love wave sensor using the 3D finite element method. In 2010 IEEE international frequency control symposium (pp. 228-231). IEEE.
- [7] Wang, Z., Cheeke, J.D.N. and Jen, C.K., 1994. Sensitivity analysis for Love mode acoustic gravimetric sensors. Applied physics letters, 64(22), pp.2940-2942.
- [8] Rocha, M.I.G., Jimenez, Y., Laurent, F.A. and Arnau, A., 2013. Love wave biosensors: a review. State of the Art in Biosensors-General Aspects.
- [9] Fu, Y.Q., Luo, J.K., Nguyen, N.T., Walton, A.J., Flewitt, A.J., Zu, X.T., Li, Y., McHale, G., Matthews, A., Iborra, E. and Du, H., 2017. Advances in piezoelectric thin films for acoustic biosensors, acoustofluidics and lab-on-chip applications. Progress in Materials Science, 89, pp.31-91.
- [10] Geuzaine, C. and Remacle, J.F., 2009. Gmsh: A 3-D finite element mesh generator with built-in pre-and post-processing facilities. International journal for numerical methods in engineering, 79(11), pp.1309-1331.
- [11] Ayachit, U., 2015. The paraview guide: a parallel visualization application. Kitware, Inc..

- [12] Zhang, J., Zhang, X., Wei, X., Xue, Y., Wan, H. and Wang, P., 2021. Recent advances in acoustic wave biosensors for the detection of disease-related biomarkers: A review. *Analytica Chimica Acta*, 1164, p.338321.
- [13] Kushibiki, J.I., Takanaga, I., Arakawa, M. and Sannomiya, T., 1999. Accurate measurements of the acoustical physical constants of LiNbO₃ and LiTaO₃ single crystals. *IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control*, 46(5), pp.1315-1323.