

# ACTRAN İLE META-MALZEMELERİN AKUSTİK ANALİZLERİ

Hazırlayan
Fatih Furkan BARUT Yapısal Analiz Mühendisi

Tarih: 21/06/2022

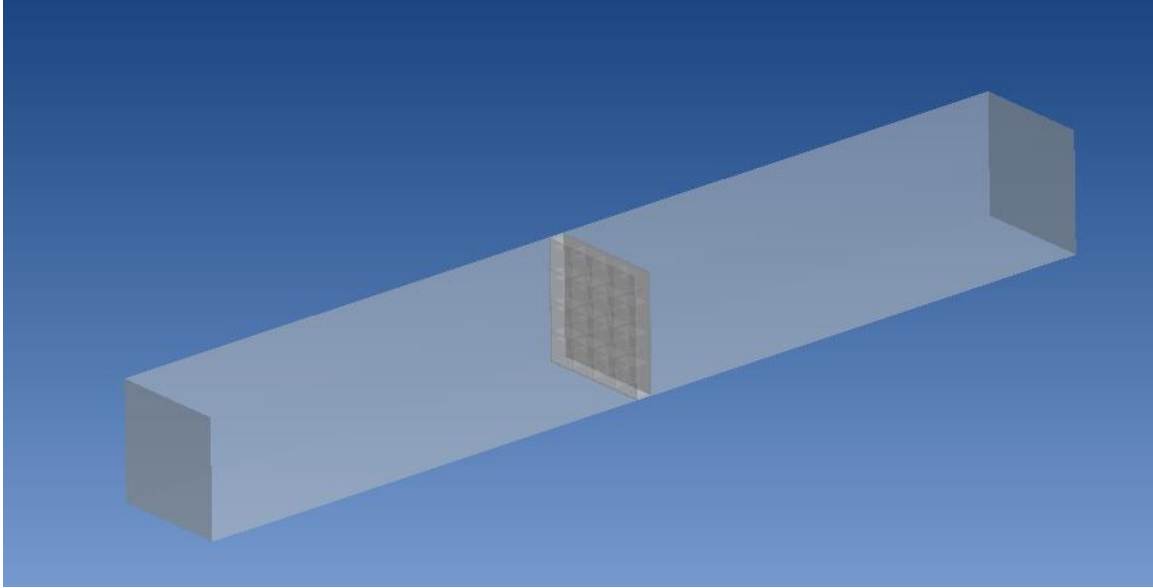
Gündelik hayatta insan kulağı birçok gürültüye maruz kalmaktadır. Belirli seviyedeki gürültülere sürekli olarak maruz kalmak insan kulağında kalıcı hasara sebep olabilmektedir. Bunun yanında gürültü konforu azaltmaktadır. Bu gibi durumları ortadan kaldırmak ve yaşam konforunu arttırmak için birtakım çalışmalar yapılmaktadır. Burada yazılan yazı ile bir gürültü azaltma aracı olarak kullanılan meta-malzemenin akustik performansı Apex ve Actran yardımıyla değerlendirilmektedir.

## 1. PROBLEM TANIMI

Bir yapının akustik performansı değerlendirilirken birçok farklı ölçüt incelenebilmektedir. Bunlardan bazıları:

- Ekleme Kaybı (Insertion Loss): Ölçüm yapılacak bir sistemin sabit bir noktasına ölçüm cihazı yerleştirilir ve gerekli ölçüm yapılır. Daha sonra gürültü azaltmak için tasarımı yapılan parça sisteme eklenerek aynı noktadan ölçüm gerçekleştirilir. Ölçümler arasındaki ses basınç düzeyleri arasındaki fark ekleme kaybı olarak adlandırılmaktadır.
- Gürültü Azaltımı (Noise Reduction): Gürültü azaltımı için tasarlanmış bir parçanın bulunduğu sistemin girişinden ölçülen ses basınç düzeyinden, sistemin çıkışından bulunan bir noktadaki ses basınç düzeyinin çıkarılması ile elde edilir.
- Ses İletim Kaybı (Sound Transmission Loss): Sistemin girişinde bulunana bir noktadan ölçülen ses gücü ile aynı sistemin çıkışında bulunan bir noktadan ölçülen ses gücü değerleri arasındaki farktır.

Burada yapılan çalışmada, belirli bir frekanstaki gürültüyü azaltmak için tasarlanan meta-malzemenin akustik performansı ses iletim kaybı ile değerlendirilmektedir. Bu değerlendirmeyi yapmak için şekil 1’de görülen bir dikdörtgen kanal içerisinde meta-malzeme yerleştirilmiş ve Actran içerisinde analiz gerçekleştirilmiştir.



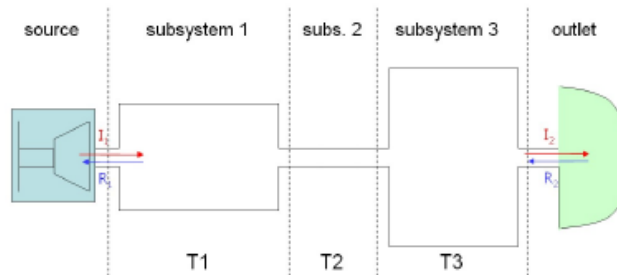
Şekil 1. Analizlerde kullanılan geometri

## 2. ACTRAN VE MATEMATİKSEL İFADELER

Actran çözüm yaparken sonlu elemanlar yöntemiyle birlikte transfer matris metodunu kullanır. Bu hibrit yaklaşımın bazı avantajları:

- Gerçek hayatta bulunan karmaşık sistemleri değerlendirebilme imkânı sağlar.
- Sistem içerisinde yer alan parçalar üzerine akustik iyileştirmelerin, akış ve ısı etkilerinin Actran’da kolayca modellenebilmesini sağlar.
- Maksimum frekans sınırı yoktur.

Kanal akustiği üç kategoriye ayrılmaktadır. Bunlar akustik kaynak, alt sistemler ve çıkış koşullarıdır. Şekil 2’de örnek bir sistem görülmektedir.



Şekil 2. Örnek sistem

Akustik kaynak tanımlanırken kaynağın değeri (C) ve kaynak yansım oranı (r) olmak üzere iki temel parametre bulunmaktadır. Kaynak yansım oranı kaynağın empedansı ile ilişkilidir. Yansım oranı -1,0 veya 1 değerini alabilmektedir.

Alt sistemler transfer matrisleri tanımlanmaktadır.

$$T_i = \begin{bmatrix} \alpha & \beta \\ \gamma & \delta \end{bmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} I_1 \\ R_1 \end{pmatrix} = T_i \begin{pmatrix} I_2 \\ R_2 \end{pmatrix}$$

Çıkış portu yansım faktörü ile karakterize edilmektedir. Genelde “free-field radiation” koşulu ile modellenir.

$$\epsilon I_2 = R_2$$

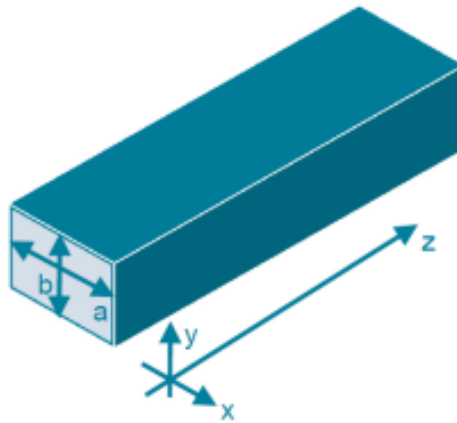
Eşitlikte yer alan  $\epsilon$  yansım faktörüdür.

## 2.1. Dikdörtgen Kesitli Kanal Modlarının Analitik Hesabı

Kesiti basit geometrilere sahip kanalların kanal akustiği modları analitik olarak hesaplanabilmektedir. Dikdörtgen kesite sahip bir kanalın analitik hesaplamaları aşağıda verilmiştir. Şekil 3’de dikdörtgen kanal gösterilmektedir.

Helmholtz Denklemi:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} + k^2 p = 0 ; k = \frac{\omega}{c}$$



Şekil 3. Dikdörtgen kanal ve ölçüleri

Dalga denkleminin çözümü:

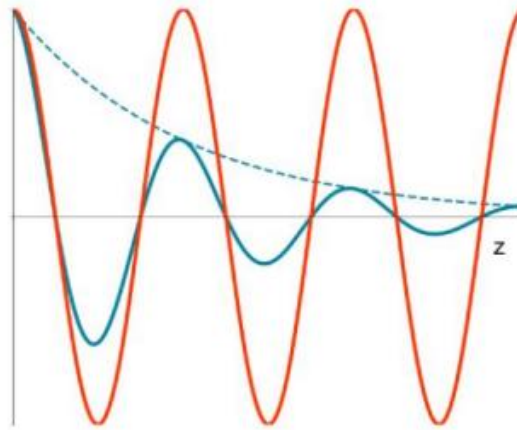
$$p(x, y, z) = \underbrace{A}_{\text{Genlik}} \underbrace{\cos(k_z x) \cos(k_y y)}_{\text{Mod Şekli}} \underbrace{e^{ik_z z}}_{\text{Yayıma Eksenindeki Değişim}}$$

Eşitlikte yer alan A terimi genliği ifade etmektedir, kosinüs terimleri ise mod şeklini belirlenmesini sağlar. Ekspansiyel terim z-ekseni boyunca akustik basıncın değişimiyle ilgili ifadedir.

$k_z$ 'nin iki farklı durumu bulunmaktadır. Bunlar:

- $k_z$  *real*:  $e^{ik_z z} = \cos k_z z + i \sin k_z z$   
 → Z yönünde harmonik yayılmadır, mod "cut-on" olarak isimlendirilmektedir.
- $k_z$  *imaginary*:  $e^{ik_z z} = e^{i(ia)z} = e^{-az}$   
 → Bu durumda Z yönündeki akustik basınç ekspansiyel olarak azalır, mod "cut-off" olarak isimlendirilmektedir.

$k_z$ 'yi imajiner yapan modlar z mesafesi arttıkça yayılmayan modlardır. Şekil 4'de gösterilen turuncu eğri  $k_z$ 'nin real olduğu durumu temsil ederken mavi eğri imajiner durumu göstermektedir.



Şekil 4. Örnek şekil

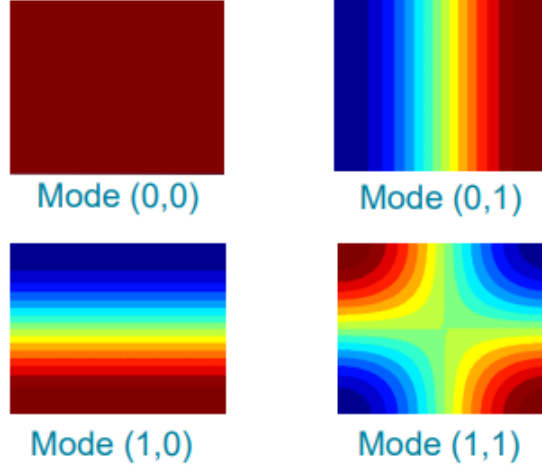
Kanal duvarlarındaki koşullar:

$$k_x = m \frac{\pi}{a}, k_y = n \frac{\pi}{b} \rightarrow k_z = \sqrt{k^2 - \left(m \frac{\pi}{a}\right)^2 - \left(n \frac{\pi}{b}\right)^2}$$

Mod frekansını hesaplamak için  $k_z$ 'nin değeri sıfıra eşitlenir ve frekansa geçilir. Şekil 5'de örnek mod şekilleri görülmektedir.

$$k_z = \sqrt{k^2 - \left(m \frac{\pi}{a}\right)^2 - \left(n \frac{\pi}{b}\right)^2} \quad k = \frac{\omega}{c} = \frac{2\pi f}{c}$$

$$f_{m,n} = \sqrt{\frac{m^2 c^2}{4a^2} + \frac{n^2 c^2}{4b^2}}$$



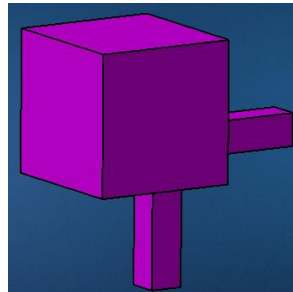
Şekil 5. Dikdörtgen kesitli kanalın bazı mod şekilleri

### 3. ANALİZ ÇALIŞMALARI

Meta-malzemeler özünde kütle-yay metodolojisine göre çalışan bir malzemedir. Tasarımı yapılan parça bacaklar yardımıyla hürelere bağlanmaktadır. Böylece parça kütle görevi görürken bacaklar yay görevi görmektedir. Ses dalgaları aracılığıyla bu kütleler titreşim hareketi yaparak bağlı oldukları plakanın titreşim hareketi yapmasını sağlamaktadır.

Tasarımda dikkat edilmesi gereken husus hangi frekanstaki gürültünün sönümlenmesi gerektiğidir. Sönümlenmesi gereken frekans belirlendikten sonra parçanın doğal frekansını bu sönümlenmesi gereken frekansa eşitlemek gerekmektedir.

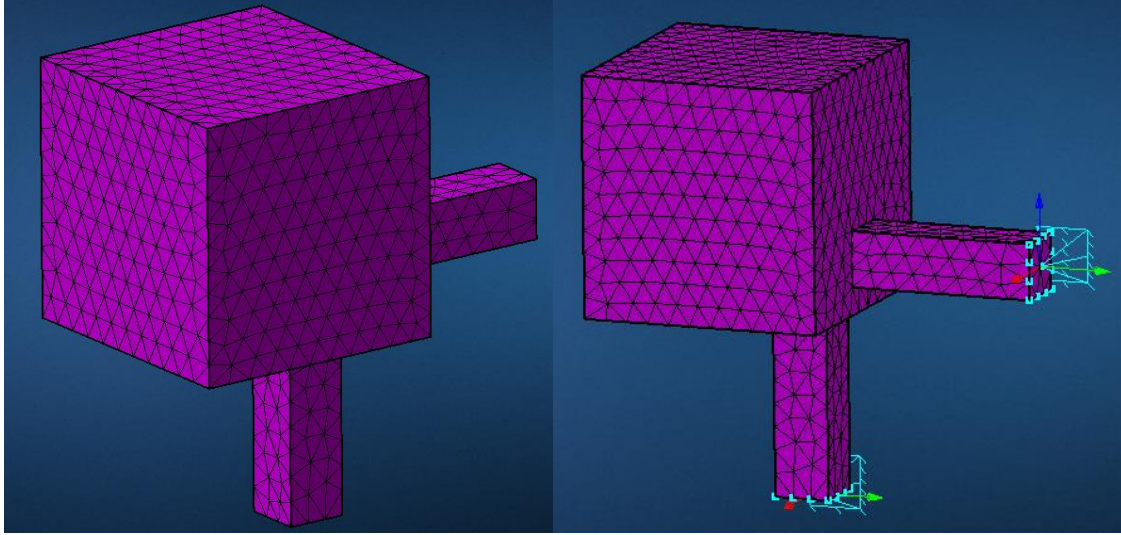
Buradaki çalışmada parça MSC Apex üzerinde tasarlanmış ve yine MSC Apex üzerinde doğal frekans analizleri yapılmıştır. Şekil 6'da tasarımı yapılan parça görülmektedir.



Şekil 6. Tasarımı yapılan parça ve hücresi

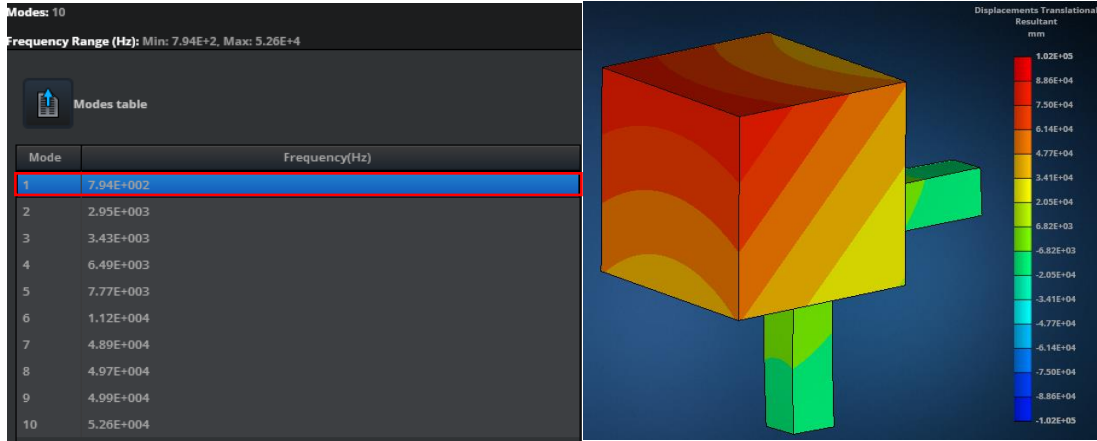
### 3.1. Modal Analizler

Tasarımı yapılan parçanın modal analizleri gerçekleştirilmiştir. Ağ yapısı örüldükten sonra parça için sınır koşulları tanımlanırken ayaklardan desteklenmiştir. Uygulanan ağ yapısı ve sınır koşulları şekil 7’de görülmektedir. Malzeme olarak ise 3D yazıcı malzemesi olan Duraform PA tanımlanmıştır.



Şekil 7. Modal analizlerde kullanılan ağ yapısı

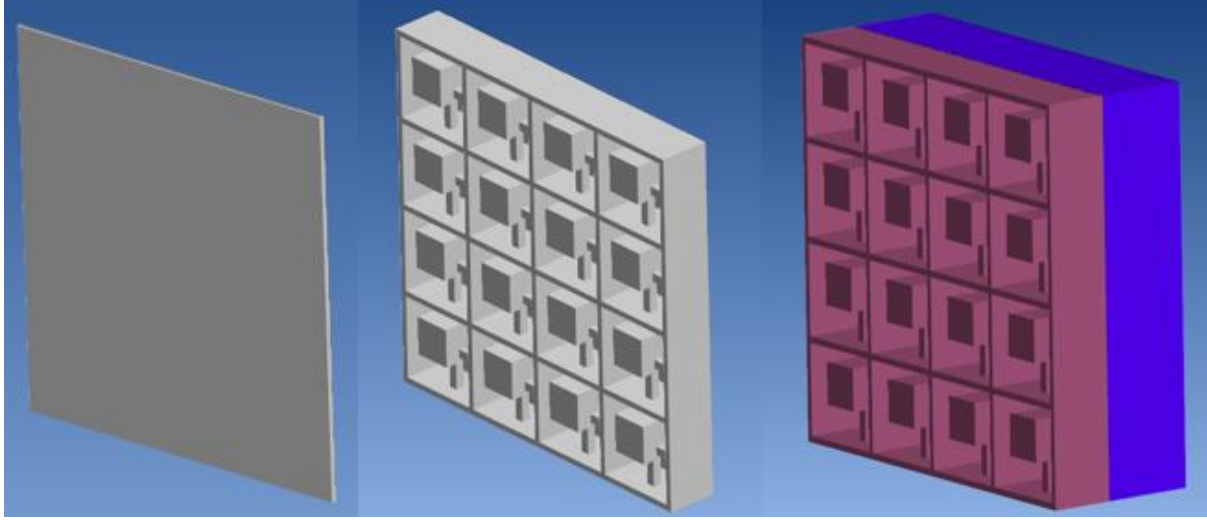
Analiz çözdürüldüğünde tasarımı yapılan parçanın ilk doğal frekansının 794 Hz olduğu görülmüştür. Yani akustik analizler yapıp TL grafiği incelendiğinde bu frekans bölgesinde maksimum TL değerine ulaşılabileceği görülecektir. Şekil 8’de parçaya ait ilk modun mod şekli ve ilk on modun değerleri tablo olarak verilmiştir.



Şekil 8. Parçaya ait ilk modun mod şekli ve ilk on modun doğal frekansları

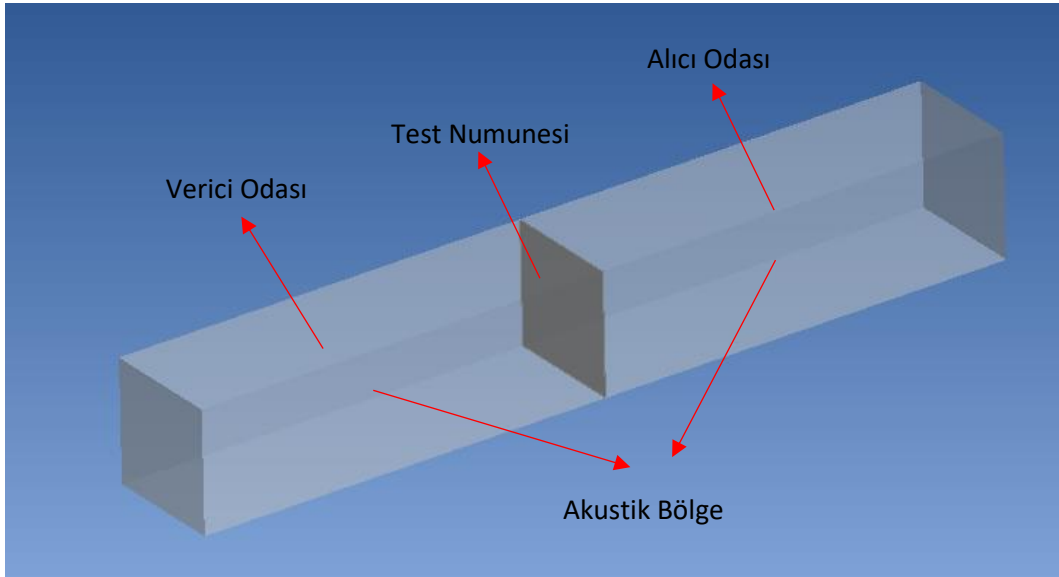
### 3.2. Akustik Analizler

Bu bölümde Actran üzerinden, çelik plaka, meta-malzeme ve meta-malzemeyle birleşik gözenekli bir malzeme kullanılarak akustik analizler gerçekleştirilmiştir. Analiz sonucu olarak TL grafikleri incelenmiştir. Her analizde aynı sınır koşulları ve ağ yapısı kullanılmaktadır. Şekil 9'da analizleri yapılan parçalar görülmektedir.



Şekil 9. Analizlerde kullanılan parçalar

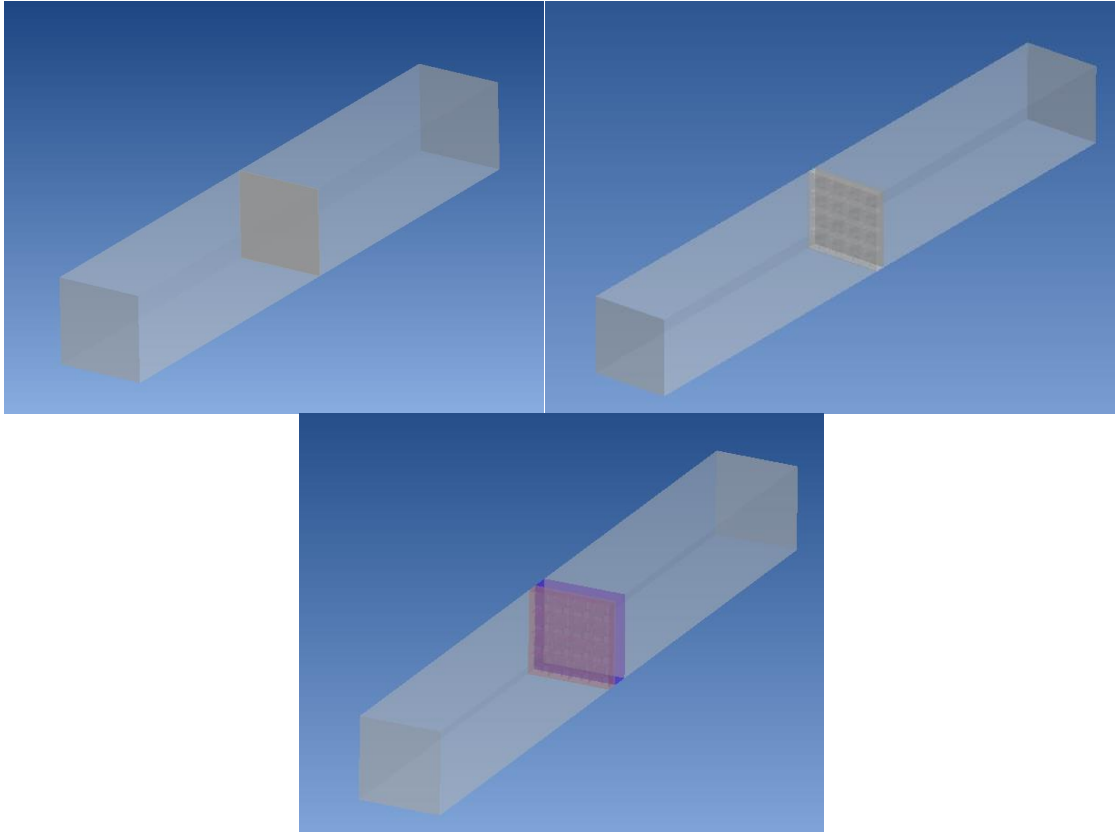
Kalınlığı 1 mm olan düz bir çelik plakanın TL grafiğini elde etmek için şekil 10'da görüldüğü gibi bir analiz metodolojisi kullanılmıştır. Bu model diğer geometrilerin analizinde de kullanılmıştır. Actran hibrit bir çözüm yaptığı için içerisinde birçok sınır koşulu barındırmaktadır. Yani daha farklı analiz metodolojileri de kullanılarak aynı analizler gerçekleştirilebilir.



Şekil 10. Akustik analizlerde kullanılan model

Odalar ve test numunesi şekil 10'da görüldüğü gibi tasarlandıktan sonra parçaların birbiri ile olan temas yüzeylerinde bulunan nodları birbirine bağlamak için "coupling surface" ve "interface" tanımlamaları yapılmıştır. Ayrıca test numunelerinin dörtkenarının da yer değiştirmedeği varsayılarak sınır koşulu uygulanmıştır.

Analizler yapılırken "Direct Frequency Response" kullanılmıştır. İncelenmek istenilen frekans bölgesi 400 Hz'den başlayarak 25 Hz'lik adımlar ile 1000 Hz'e kadar olacak şekilde ayarlanmıştır. Şekil 11'de analiz modelleri görülmektedir.



Şekil 11. Analiz modelleri

Analizlerde plakaya çelik malzeme tanımlanırken meta-malzemeye Duraform PA, sönüm malzemesine ise Actran kütüphanesinde bulunan melamine foam tanımlanmıştır.

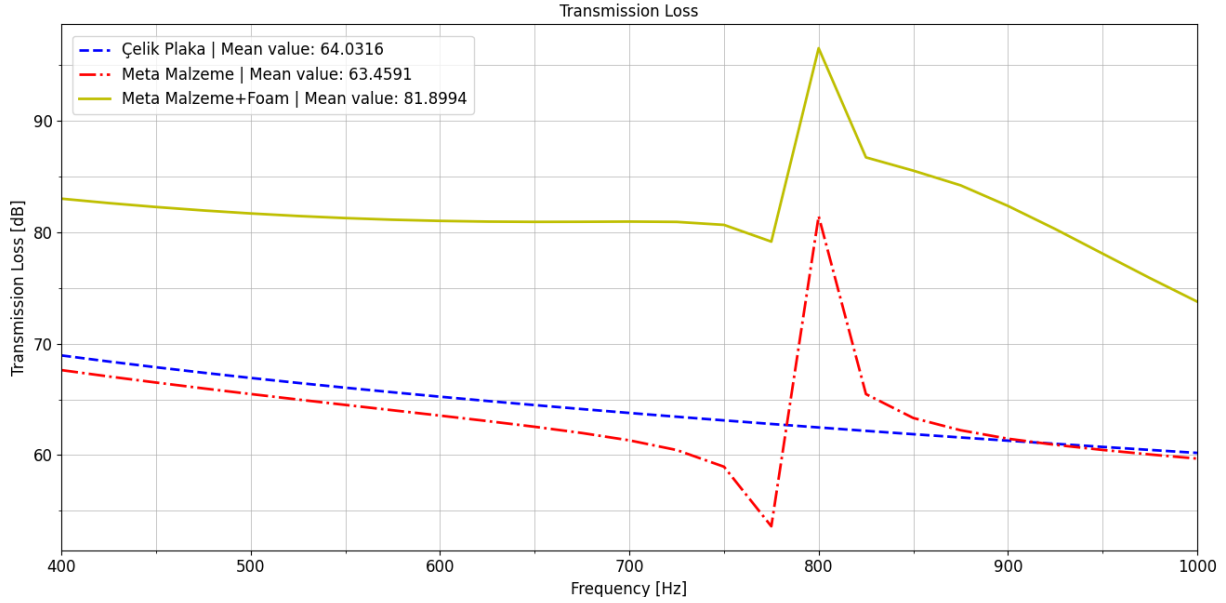
Analizler çözdürüldükten sonra TL grafikleri incelenmiştir. TL verisi aşağıda verilen formülasyon yardımıyla hesaplanmaktadır.

$$TL = 10 \log \left( \frac{W_{giris}}{W_{cikis}} \right) = 20 \log \left( \frac{p_{giris}}{p_{cikis}} \right) \quad [dB]$$

Bu eşitlikte bulunan  $W$  toplam ses gücünü  $p$  ise toplam ses basıncını temsil etmektedir.

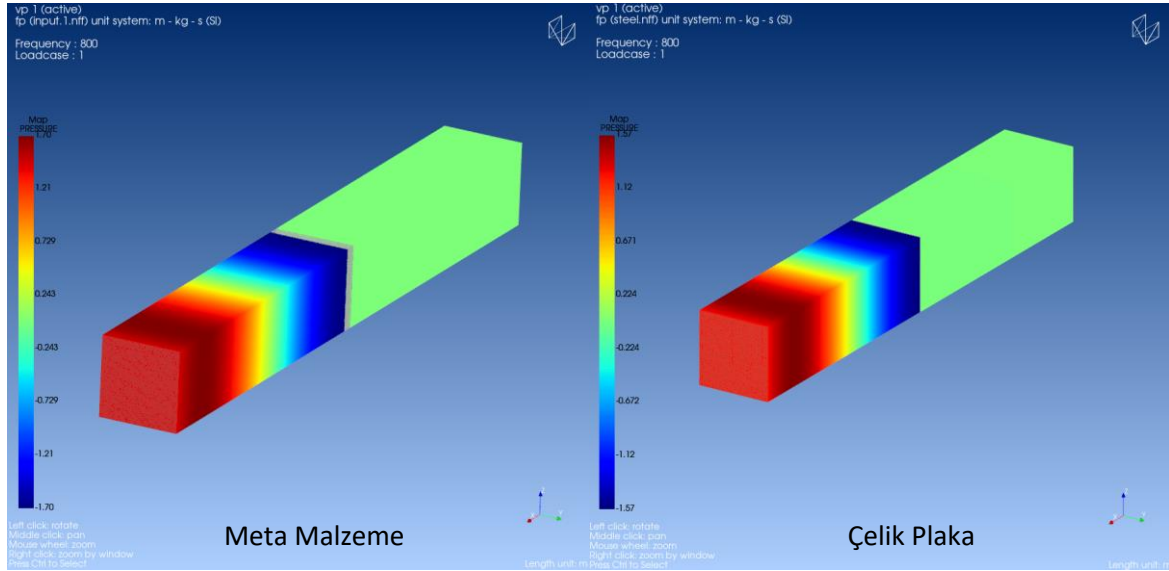


Model kurulumu tamamlandıktan sonra analizler çözdürülmüştür. Şekil 12’de üç farklı tasarıma ait TL grafikleri görülmektedir.



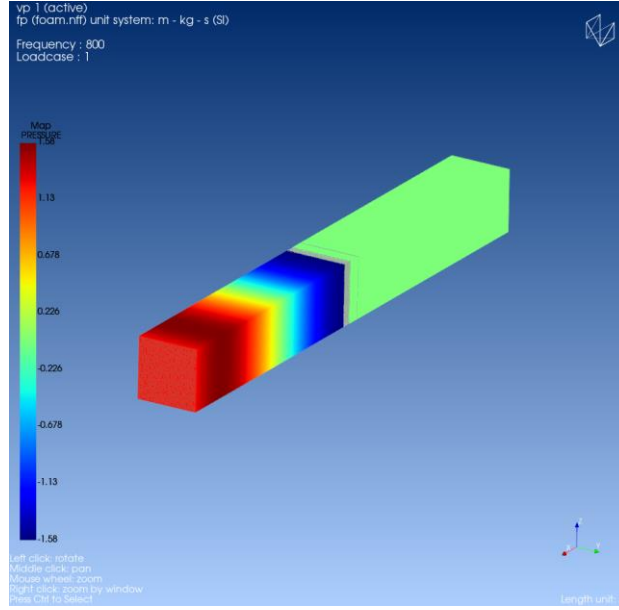
Şekil 12. Analiz sonuçları

Grafiklerde de görüldüğü gibi maksimum ses iletim kaybına 800 Hz’de ulaşılmıştır. Sönüm malzemesinin de etkisiyle ses iletim kaybı değerleri 15-20 dB civarında arttığı görülmüştür. Şekil 13’de 800 Hz’de kanal içerisinde oluşan basınç dağılımı görülmektedir.



Şekil 13. 800 Hz’de kanal içerisinde bulunan basınç dağılımı

Şekil 14’de meta-malzeme ve sönüm malzemesinin birlikte kullanıldığı durum için 800 Hz’de kanal içerisinde oluşan basınç dağılımı görülmektedir



Şekil 14. Meta-malzeme ve sönüm malzemesinin birlikte kullanıldığı durum

Tüm sonuçlar incelendiğinde 800 Hz’de çelik plakanın 63 dB, meta-malzemenin 82 dB ve meta-malzeme sönüm malzeme bileşimi ise 96 dB ses iletim kaybı değerine sahip olduğu görülmüştür.

Sönüm malzemelerinin gözenekli yapısı sayesinde enerjinin bir kısmı burada sönümlenmektedir. Bu nedenle sönüm malzemesi eklenen modelin ses iletim kaybı daha fazla olmaktadır.

Belirtilen frekans için en iyi ses yalıtımını meta-malzeme sönüm malzemesi bileşimi sağlayacaktır. Normalde malzeme ve havanın da bir sönümü olduğu için gerçekte, grafikte elde edilen değerden bir miktar az ses iletim kaybı elde edilecektir.

Sonuç olarak 800 Hz gibi herhangi bir frekanstaki gürültü, doğru tasarım yapıldıktan sonra, meta-malzeme yardımı ile azaltılabilir.

#### 4. REFERANS

- N. DERİN, “Meta Malzemelerin Ses İletim Kayıplarının İncelenmesi”, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye
- Actran 2022.1 User’s Guide Vol.1
- Actran 2022.1 User’s Guide Vol.2
- Actran Acoustics - Theory 4, Coupling With Ducts Modes