SUSTURUCULAR ÜZERİNDE SES İLETİM KAYBI HESAPLAMALARI

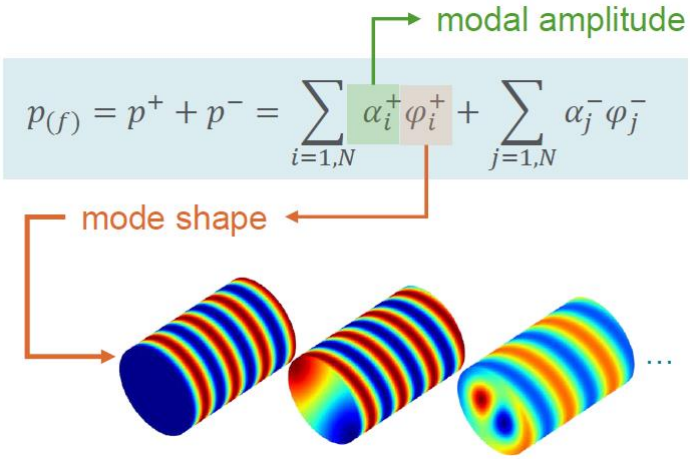
Hazırlayan
Fatih Furkan BARUT Yapısal Analiz Mühendisi

Tarih: 20/02/2024

İçten yanmalı motorların oluşturduğu gazların sistemden dışarıya atılması, havalandırma kanallarında ki havanın taşınımı, kompresörlerin taze havayı emmesi, turbomakinaların emme ve egzoz işlemleri ile hava taşınımı vb. sebeplerden dolayı bir çok sistemde boru ve kanallar yer almaktadır. Bu makinaların çalışmaları esnasında yaydıkları gürültüler boru ve kanallar aracılığı ile taşınmaktadır. Yayılan bu gürültülerin kontrolünü sağlayabilmek için susturucular geliştirilmiş ve sistemlere entegre edilmiştir.

1. GİRİŞ

Boru ve kanallarda herhangi bir akustik dalga "İlerleyen Dalga" ve "Yansıyan Dalga" terimleri ile ifade edilmektedir. Burada bahsi geçen akustik dalgalar ise boru-kanal akustiği modlarının süperpozisyonu ile modal düzlemde ifade edilmektedir.



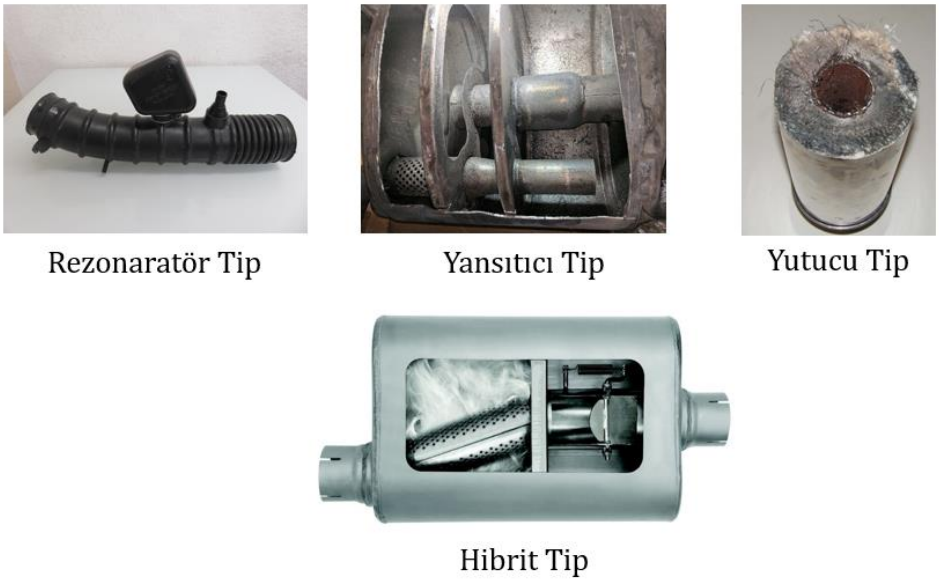
Şekil 1. Modal Gösterim

Susturucular iki ayrı başlıkta incelenmektedir. Bunlar:

- **Aktif Susturucular:** Literatürde aktif gürültü kontrol yöntemi olarak da adlandırılmaktadır. Sisteme mikrofonlar ve bir adet "Loudspeaker" yerleştirilir. Mikrofonlardan ses ölçümü gerçekleştirilir ve sisteme "Loudspeaker" üzerinden ölçülen değerlere göre aynı genlikte fakat ters fazda yeni bir ses dalgası gönderilir. Böylece üretilen ses kontrol altına alınmış olur.
- **Pasif Susturucular:** Bu tip susturcularda elektronik sistemler bulunmaz. Doğrudan sisteme entegre edilerek gürültü kontrolü sağlanır. Kendi içerisinde dört gruba ayrılmaktadır:
    - ***Rezonaratör Tip Susturucular:*** Dar bantta gürültü azaltımı için kullanılmaktadır. Geri basınç seviyeleri düşüktür. Akış etkilerinden daha az etkilenir. Ayarlandıkları frekansta hacim içerisindeki hava rezonansa girerek, gelen ses dalgasını sönümler.
    - ***Yansıtıcı Tip Susturucular:*** Düşük frekans bölgelerinde geniş bantta gürültü azaltımı sağlamaktadır. Geri basınçları rezonaratörlere göre yüksektir. Gelen ses dalgalarının, empedans değişimleri ile kendi üzerine geri yansıtılması prensibi ile çalışır.
    - ***Yutucu Tip Susturucular:*** Gözenekli malzemelerin ses yutma özelliğinden dolayı, yüksek frekanslı gürültünün azaltılması için kullanılır. Ömürleri kullanılan gözenekli malzemelerden dolayı daha kısadır. Geri basınçları diğer susturucu tiplerine göre daha düşüktür. Genellikle perfore saclar ile birlikte kullanılırlar. Seçilen gözenekli malzemenin sıcaklığa karşı olan direnci önemlidir.
    - ***Hibrit Tip Susturucular:*** Hem yutucu tip malzemeler kullanılarak yüksek frekans bölgesinde hem de yansıtıcı tip bir susturucuymuş gibi tasarlanarak düşük frekans bölgesinde, geniş bantta gürültü azaltımı sağlar. Yansıtıcı ve yutucu tip susturucuların avantajlarını birleştirir.

Susturucuların akustik performanslarını aşağıdaki unsurlar etkilemektedir:

- **Akış Parametreleri:** Bilindiği üzere susturucular kanallar üzerine yerleştirilmektedir. Dolayısıyla içten yanmalı motorlara yerleştirilen egzoz susturucuları gibi susturucularda akışkanın sıcaklığı ve hızı gibi parametreler akustik performansı etkilemektedir. Bunun yanında susturucularda oluşan geri basınç sistemde yer alan motor, fan vb. yapıların verimliliğini de düşürebilir.
- **Geometrik Şartlar:** Bir susturucu tasarlanırken dikkat edilmesi gereken bazı kriterler bulunmaktadır. Örneğin uzatılmış borular, susturucu içerisindeki odacıkların hacmi, perfore sacların kullanımı ve susturucunun genel hacmi farklı frekans bölgelerindeki akustik performansı doğrudan etkilemektedir.
- **Mekanik Özellikler ve Malzeme Seçimi:** Susturucuların üretildiği malzemelerde akustik performansı etkileyebilir. Örneğin bir susturucu gereğinden fazla esnek olursa üzerinde oluşan titreşimlerden kaynaklı olarak ortama gürültü yayabilir. Bunun yanında kullanılan malzemelerin korozyon direncinin yüksek olması gereklidir ve korozyona sebep olabilecek tasarımlardan kaçınılmalıdır. Ayrıca titreşim kaynaklı yorulma durumu da göz önüne alınarak tasarımlarının gerçekleştirilmesi gerekmektedir.
- **Sönüm Malzemelerinin Kullanımı:** Bilindiği üzere kaya yünü gibi sönüm malzemeleri akustik açıdan önem arz etmektedir. Dolayısıyla bu tür malzemeler susturucular içerisinde de kullanılmaktadır. Özellikle yüksek frekans bölgesine çıkıldıkça sönüm malzemelerinin akustik performansları artış göstermektedir. Bu nedenle yüksek frekanslardaki gürültüyü sönümlemek için susturucular içerisinde sönüm malzemeleri kullanılmaktadır.



Şekil 2. Susturucu Çeşitleri

2. SUSTURUCU PERFORMANSLARININ BELİRLENMESİ

Frekansa bağlı gürültü azaltımı akustik tasarım hedefidir. Üç farklı parametreye göre susturucu performansları belirlenebilir:

- **Ekleme Kaybı (Insertion Loss):** Sistemde susturucu varken ve yokken sabit bir noktadan ölçülen ses basınç düzeyleri arasındaki farktır. Tasarım kriteri olarak değerlendirilebilir.
- **Gürültü Azaltımı (Noise Reduction):** Susturucunun girişindeki bir noktada ölçülen ses basınç düzeyinden, çıkışındaki bir noktadan ölçülen ses basınç düzeyinin çıkarılması ile hesaplanır.
- **Ses İletim Kaybı (Sound Transmission Loss):** Akustik sistemin girişindeki toplam ses gücü ile çıkışındaki toplam ses gücünün oranlanması ile elde edilir. Yaygın olarak kullanılmaktadır. Aşağıdaki eşitlik yardımıyla hesaplanmaktadır.

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

Bu eşitlikte yer alan $W_{Giriş}$; giriş yüzeyindeki toplam ses gücünü (W), $W_{Çıkış}$; çıkış yüzeyindeki toplam ses gücünü (W), $P_{Giriş}$; giriş yüzeyindeki toplam ses basıncını (Pa) ve $P_{Çıkış}$; çıkış yüzeyindeki toplam ses basıncını temsil etmektedir (Pa). Bu değerler empedans tüpü kullanılarak ölçülebilir.

Şekil 3. Empedans Tüpü

3. TRANSFER MATRİS YÖNTEMİ İLE SES İLETİM KAYBI HESAPLAMA

Düzlem dalga kabulü altında akustik sistemlerin giriş ve çıkışlarını birbirine bağlayan yöntemdir. Transfer matrisi her kesit ve kesit değişimi için elde edilir. Bütün sistemin transfer matrisini elde etmek için ise elemanların transfer matrisleri çarpılır.

X-Ekseninde, L uzunluğunda bir boruda ilerleyen düzlemsel dalga için, dalga denklemi ve çözümü aşağıdaki eşitliklerde yer almaktadır.

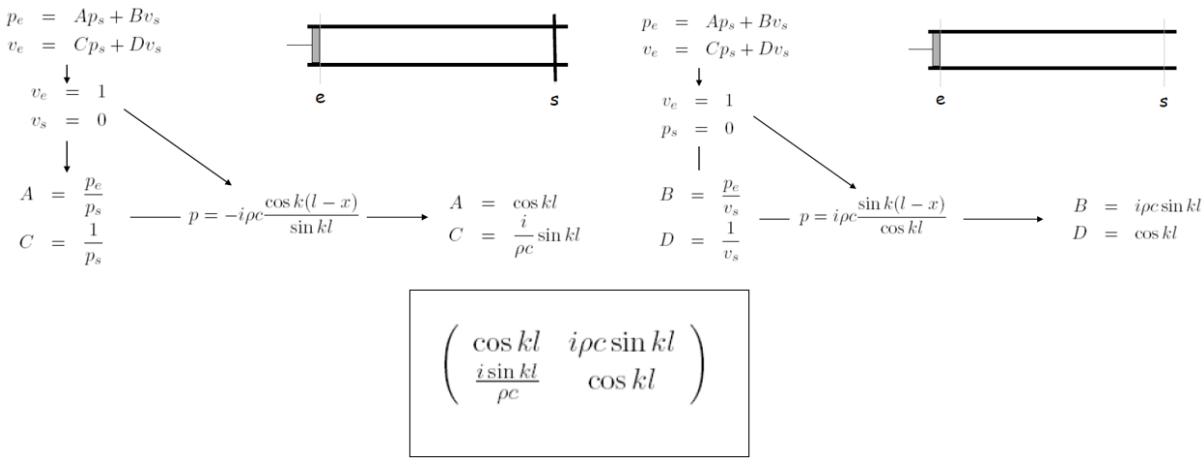
$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \qquad ; \qquad c^2 = \frac{\mathcal{B}}{\rho_0}$$

Ses basıncı:

$$p(x,t) = Ae^{j(\omega t - k(L-x))} + Be^{j(\omega t + k(L-x))}$$

Doğrusal Euler Denkleminden partikül hızı:

$$u(x,t) = \frac{A}{\rho_0 c}e^{j(\omega t - k(L-x))} - \frac{B}{\rho_0 c}e^{j(\omega t + k(L-x))}$$



Şekil 4. “L” Uzunluğundaki Bir Boru İçin Transfer Matrisinin Hesaplanması

Susturucularda kullanılan çeşitli akustik sistemlerin transfer matrisleri literatürden bulunabilir. Bunun yanında kütüphanelerinde çeşitli transfer fonksiyonları bulunan ve bu yöntem ile susturcuların akustik performanslarının değerlendirilmesini sağlayan ticari yazılımlar mevcuttur. Düşük frekans bölgelerinde çalışılırken doğru sonuçlar elde edilebilir ancak yüksek frekans bölgelerinde çalışılacaksa sonlu elemanlar yöntemi daha gerçekci sonuçlar vermektedir.

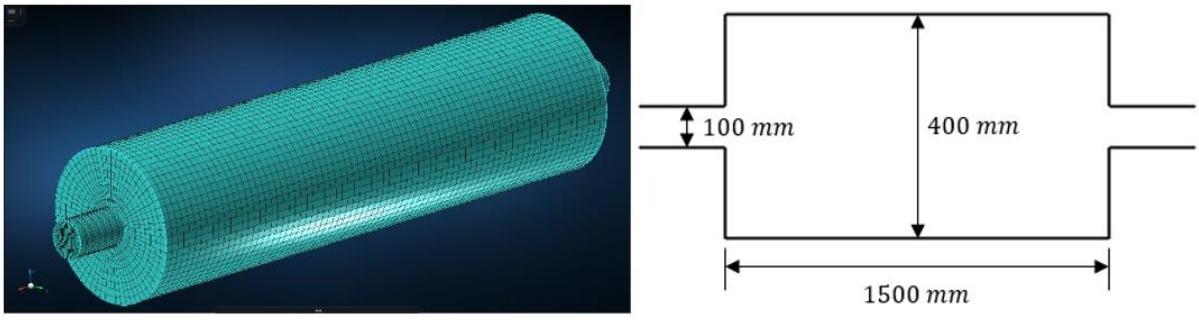
4. EL HESABI VE SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE ELDE EDİLEN SONUÇLARIN KARŞILAŞTIRILMASI

Sonlu elemalar yöntemi kullanarak akustik analizler gerçekleştirmek için Actran kullanılmıştır. Actran akustik, vibro-akustik ve aero-akustik problemlerin çözüme kavuşturabilmek için kullanılan gelişmiş bir yazılımdır. Susturucu özelinde bakacak olursak kaya yünü gibi gözenekli malzemeler farklı teoremler kullanılarak Actran içerisinde modellenebilir. Bunun yanında perfore saclar ve sıcaklık gibi akış parametreleri de analizlere dahil edilerek susturuculara ait akustik analizler gerçekleştirilebilir ve optimizasyon çalışmaları yapılabilir. Çeşitli "Port" tanımlama seçenekleri ile birlikte otomatik ve hızlı bir şekilde "Sound Transmission Loss" değeri elde edilir.

Kesiti değişmeyen ve dairesel olan bir susturucu için ses iletim kaybı Eşitlik 1 yardımı ile hesaplanmaktadır:

$$TL = 10log\left\{1 + \frac{1}{4}\left(m - \frac{1}{m}\right)^2 \sin^2 k_0 l\right\} \quad (dB) \tag{1}$$

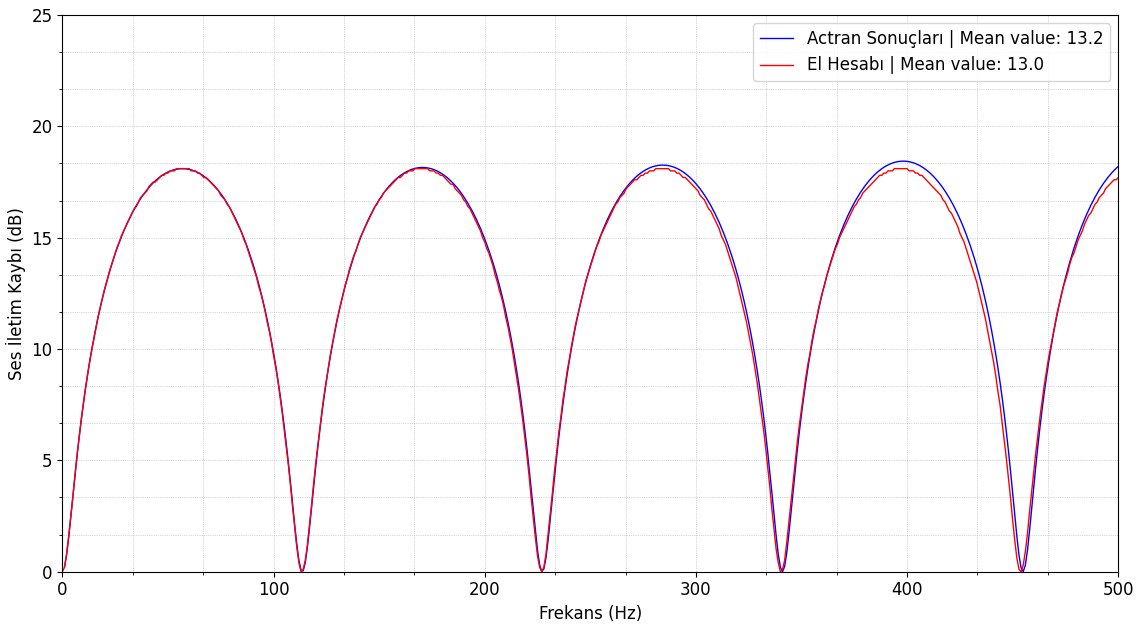
Bu eşitlikte yer alan m; susturucunun giriş portunun kesit alanı ile susturucu gövdesinin kesti alanlarının oranını $\left(\frac{S_1}{S_2}\right)$, l; susturucu gövdesinin boyunu, k_0; dalga boyu sayısını temsil etmektedir ve $\left(\frac{2\pi f}{c}\right)$ ile hesaplanmaktadır. **Bu eşitlik ile yalnızca kesiti değişmeyen ve dairesel olan bir susturucu için ses iletim kaybı hesabı yapılabilir.** Bu çalışma kapsamında aşağıdaki şekilde yer alan susturucu için hesaplamalar ve akustik analizler gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5. Dairesel Kesitli Örnek Bir Susturucu

Ses iletim kaybı hesabı için Eşitlik 1 kullanılmıştır. Eşitlik 1'de de görüldüğü gibi giriş ve çıkış portlarının uzunluklarının ses iletim kaybına herhangi bir etkisi bulunmamaktadır.

Şekil 6'da el hesabı ve Actran ile gerçekleştirilmiş analiz sonucunda elde edilen ses iletim kaybı grafikleri görülmektedir.



Sonuçlar incelendiğinde Eşitlik 1 kullanılarak elde edilen ortalama ses iletim kaybı 13 dB olarak hesaplanırken, sonlu eleman modeli kullanılarak elde edilen ortalama ses iletim kaybının 13.2 dB olduğu gözlemlenmiştir. Sonuçların birbirlerine oldukça yakın olduğu görülmektedir.

6. REFERANSLAR

- M.L. Munjal, “Acoustic of Ducts and Mufflers”, India.
- Actran 2022.1 User’s Guide Vol. 1
- Actran 2022.1 User’s Guide Vol. 2