

Actran ile Egzoz Sisteminin Akustik Modellenmesi

Hazırlayan
ERMAN YAYLAĞAN Yapısal Analiz Mühendisi

Tarih: 24/02/2022

Genel Bakış

Egzoz hattı motordan gelen yanma sonrası gazları atmosfere taşıyan bir sistemdir ve işletme anında farklı amaçlarla da çalışmaktadır:

- 500°C sıcaklığa sahip yanma sonrası gazları egzoz çıkışında 50°C 'ye kadar soğutur.
- Katalizör, yanma sonrası gazları filtreler.
- Motorda oluşan yüksek ses düzeylerini akustik filtre ile kabul edilebilir düzeylere gelmesini sağlar.

Egzoz hattı birbirine egzoz borularıyla bağlı çeşitli susturuculardan oluşur. Günümüzde egzoz hattının ön kısımda susturucu kullanmak yerine katalitik-konvertör sistemler kullanılmaktadır.

Akustik açıdan, egzoz hattı ve içindeki bileşenlerin iletim esnasında sağladığı en üst seviyede ses iletim kayıplarıyla ilgileniriz. Actran, susturucuların (reaktif ve yansıtıcı) ses iletim kayıplarını, transfer matris yöntemiyle hesaplar.

Mekanik titreşimler, egzoz hattının çalışması esnasında hat içerisinde oluşan dinamik basınç dağılımına bağlı oluşur. Böylece egzoz hattı üzerinde kabuk gürültüsü yayılır. Egzoz hattındaki sac yapıların mekanik titreşimlere maruz kalması sonucu kabuk gürültüsü meydana gelir. Actran akustik ortamda yayılan gürültü düzeylerini hesaplayabildiği gibi aynı zamanda kabuk gürültüsünü de hesaplar.

Emme sistemi, havayı (taze ve sıcak hava) kendi içerisine alan hava filtresinden ve temiz havayı (yakıtla karışmış) silindirlere dağıtan emme manifoldundan oluşur. Akustik açıdan, giriş hattı egzoz hattına çok benzer şekilde, girişten çıkışa transfer fonksiyonlarıyla karakterize edilir. Ancak aynı zamanda kabuk gürültüsünü azaltmak için optimize edilmelidir.

Actran ile Transfer Matrisleri Hesaplama

Transfer Matris Nedir?

Çoğu pratik durumda, bir susturucunun giriş ve çıkış kanalının kesitinde basınç alanının sabit olduğu düşünülebilir. Herhangi bir kesitte akustik alan iki skaler nicelikle tanımlanır; akustik basınç p , akustik hız v .



Resim 1 - Giriş ve çıkış kesitleri belirtilmiş susturucu

Transfer matris, 4X4 bir matris olup, giriş ve çıkışta kesitindeki basınç ve hız birbirleri ile ilişkilidir.

$$\begin{Bmatrix} p_i \\ v_i \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} p_o \\ v_o \end{Bmatrix}$$

Alternatif olarak, transfer matris giriş ve çıkış kesitinde, akustik basınç ve akustik akış hızı

($q = v \cdot S$, S lokal kesit alanı) ile de ilişkilendirilebilir.

$$\begin{Bmatrix} p_i \\ q_i \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B/S_o \\ CS_i & D \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} p_o \\ q_o \end{Bmatrix}$$

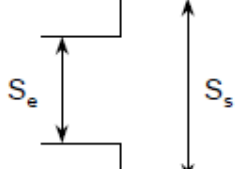
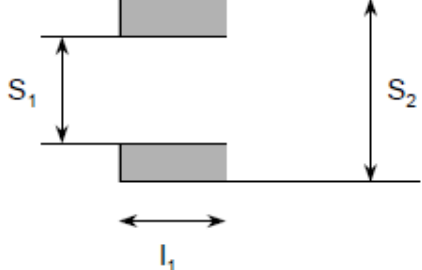
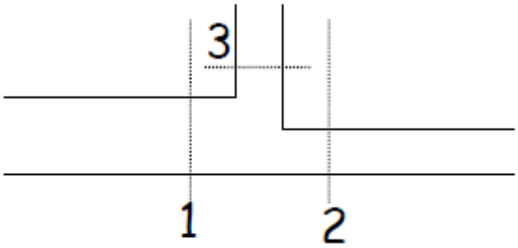
Üçüncü bir alternatif, akustik alanı ilerleyen (p^+) ve gerileyen (p^-) dalga büyüklüklerine bölmektir. Bu başka bir transfer matrisin oluşması demektir.

$$\begin{Bmatrix} p_i^+ \\ p_i^- \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha & \beta \\ \gamma & \delta \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} p_o^+ \\ p_o^- \end{Bmatrix}$$

Birçok basit bileşenin transfer matrisleri analitik olarak hesaplanabilir. Örneğin; sabit kesit alana ve l uzunluğuna sahip basit bir kanalın transfer matrisi şu şekildedir.

$$\begin{Bmatrix} p_i \\ v_i \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos kl & i\rho c \sin kl \\ \frac{i \sin kl}{\rho c} & \cos kl \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} p_o \\ v_o \end{Bmatrix}$$

Bazı diğer bileşenlere ait analitik transfer matrisler aşağıda listelenmiştir:

	$\begin{Bmatrix} p_e \\ v_e \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \frac{S_s}{S_e} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} p_s \\ v_s \end{Bmatrix}$
	$\begin{Bmatrix} p_e \\ q_e \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -i \frac{S_2 - S_1}{\rho c} \tan kl_1 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} p_s \\ q_s \end{Bmatrix}$
	$\begin{Bmatrix} p_1 \\ v_1 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{S_3}{S_1} & \frac{S_2}{S_1} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} p_2 \\ v_2 \end{Bmatrix}$

Resim 2 - Bazı kanal yapılarındaki transfer matrisleri

Transfer matris metodu, kompleks bileşenleri sırasıyla basit transfer matrislere ayrıştırarak tüm yapının transfer matrisini bulur. Genel transfer matris, alt bileşenlerin transfer matrisinin çarpımıdır.

İletim kaybı, susturucunun akustik niteliğini ölçen skaler bir büyüklüktür. Transfer matrisin A, B, C ve D bileşenlerinden hesaplanır.

$$TL = 20 \log \left[\frac{1}{2} \left(A + \frac{B}{\rho c} + \rho c C + D \right) \right]$$

Transfer Matrisler Nasıl Hesaplanır?

Transfer matrisin 4 katsayısı 2 adımda; en uç durumlar düşünülerek hesaplanır. İlk durumda, çıkış kesitinin kapalı olduğu ($v_o = 0$) ve giriş kesitinden de sabit birim hız geçişi ($v_i = 1$) kabul edilir. Bu sınır koşulları için giriş ve çıkış kesitlerindeki p_i ve p_o hesaplanırsa, transfer matrisin A ve C katsayıları hesaplanır.

$$A = \frac{p_i}{p_o}$$

$$C = \frac{1}{p_o}$$

İkinci durumda, akustik basıncın çıkış kesitinde sıfıra eşit olması ($p_o = 0$) ve giriş kesitinde sabit birim hız geçişi ($v_i = 1$) kabul edilir. Bu sınır koşulları için p_i ve v_o hesaplanırsa, transfer matrisin B ve D katsayıları hesaplanır.

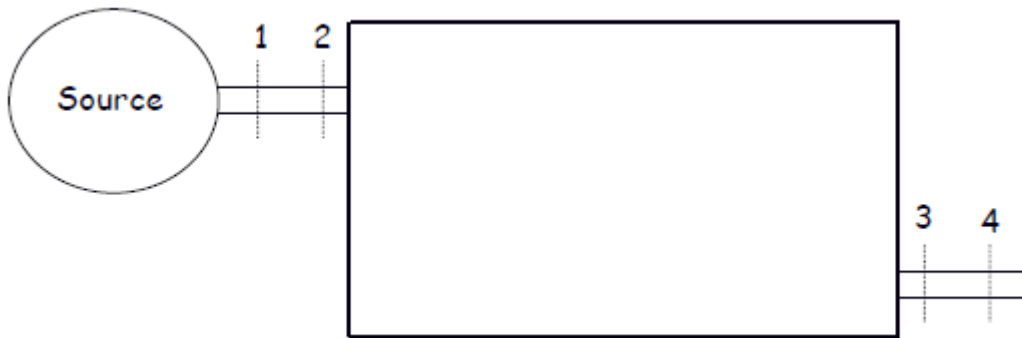
$$B = \frac{p_i}{v_o}$$

$$D = \frac{1}{v_o}$$

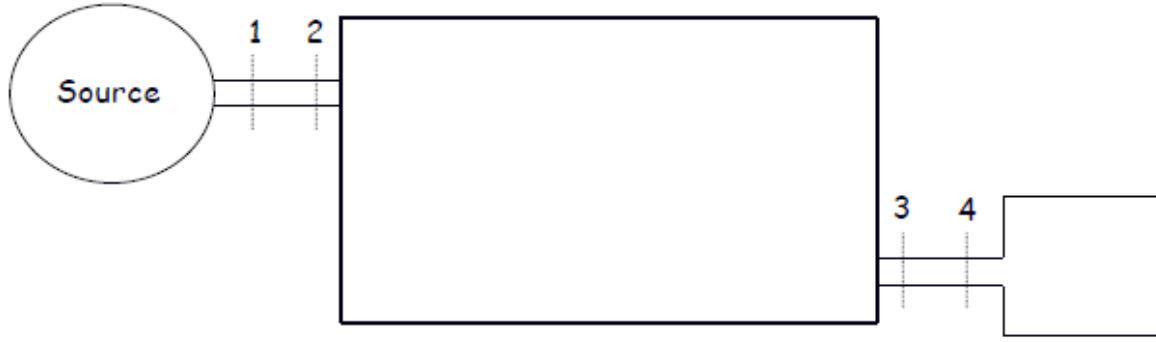
Transfer Matrisler Nasıl Ölçülür?

İdeal sınır koşulları (0 basınç seviyesi ve 0 veya 1 birimlik hız) deneysel olarak uygulanamaz. Aynı zamanda tek bir kesit üzerinde akustik basınç ve hız seviyelerini ölçmek zordur.

Deneysel yöntem, basınç seviyelerini 4 farklı kesitte ölçüme dayanır: ikisi üst akış, ikisi alt akış olacak şekilde bileşenler üzerinden incelenir. Bu dört mikrofon üzerindeki akış 2 farklı çıkış kesiti sınır koşulu (açık veya kapalı) için 2 defa ölçülür. Yine 2 farklı giriş kesiti sınır koşuluyla da tekrarlanır.



Resim 3 - Deneysel Yöntem 1



Resim 4 - Deneysel Yöntem 2

8 basınç ölçümüyle transfer matrisin A, B, C, D veya $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ katsayıları hesaplanır.

Not: Akustik basıncın 0 ve sonrasında akustik hızın 0 olması transfer matrisin katsayılarını belirlemek için basit bir yöntemdir, Actran 4 mikrofonlu yöntemi uygular.

Analitik Modellerle Korelasyon

Actran'da uygulanan sayısal yöntemlerin doğruluğunu test etmek için aşağıda gösterilen genişleme odasının iletim kaybını inceledik.

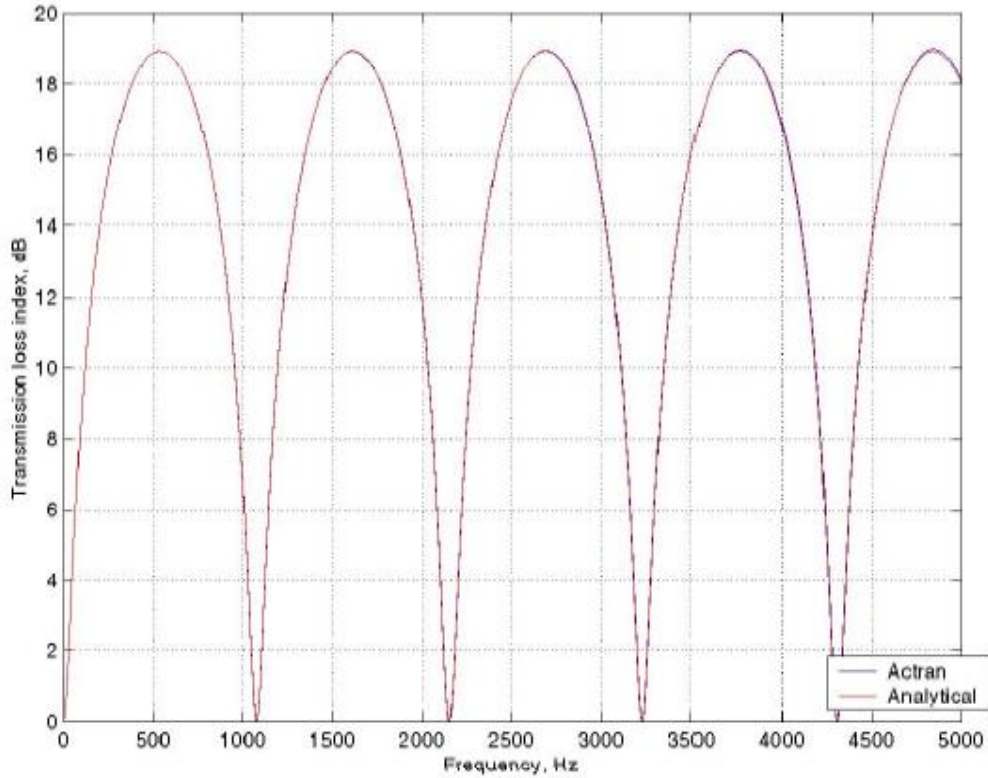


Resim 5 - Genişleme odalı kanal tipi

Bunun gibi genişleme odalarındaki iletim kaybı, kanal kesitinin genişleme kesitine oranı m katsayısı ile karakterize edilir.

$$TL = -10 \log \left[1 + \left(\frac{m^2 - 1}{2m} \sin kl \right)^2 \right]$$

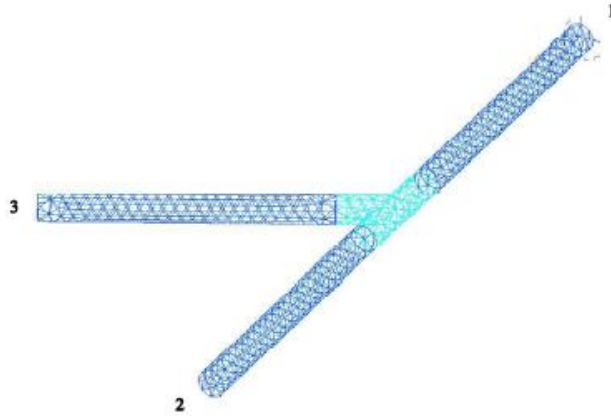
Grafik, analitik sonuçlarla numerik sonuçların uyumlu olduğunu göstermektedir.



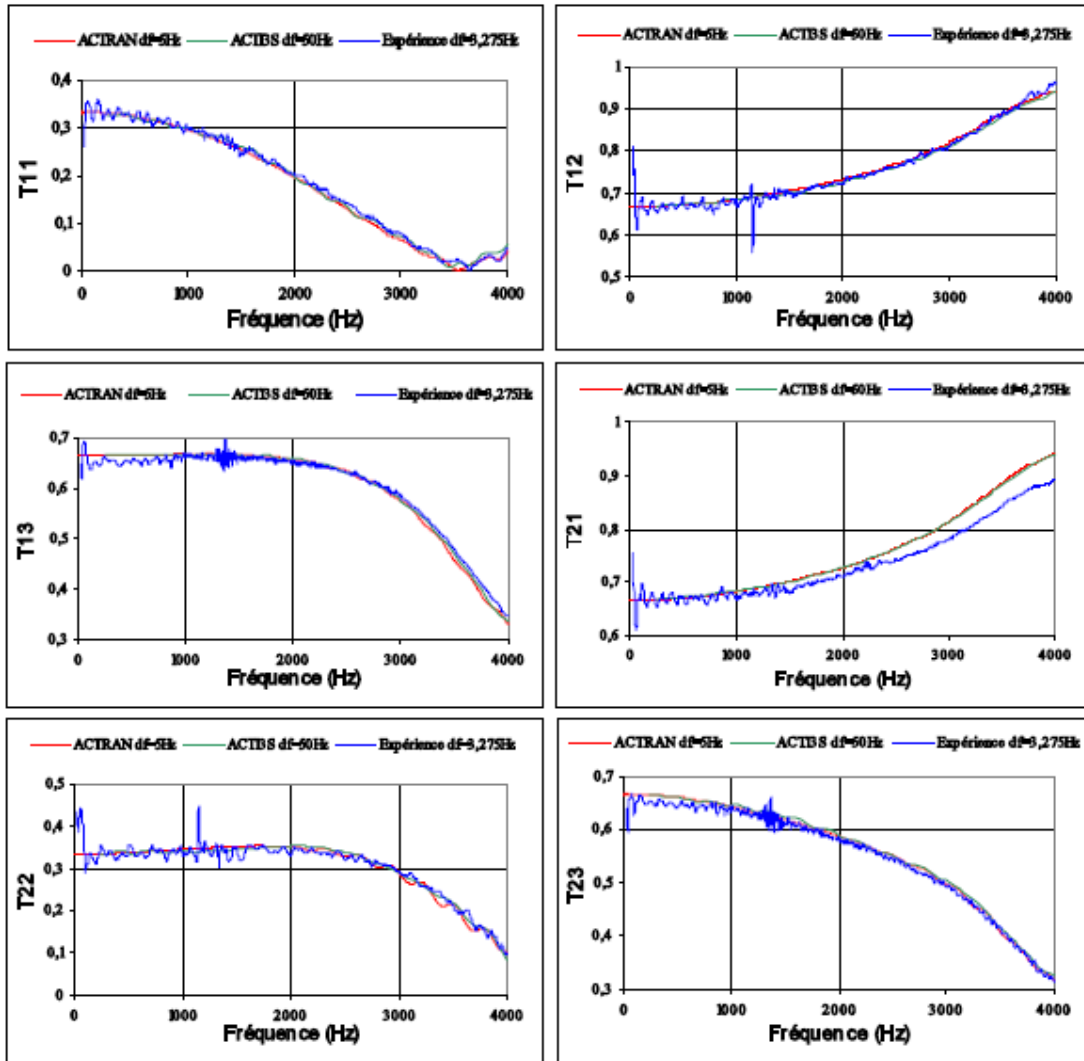
Resim 6 - Frekans düzleminde ses iletim kaybı endeksi

Ölçümlerle Korelasyon

Actran ile Y şeklinde bağlanmış bir kanal transfer matrisini, test verileriyle karşılaştırmak için hesaplanır. Transfer matrisin simetrikliğinden dolayı 3 satır ve 3 sütundan oluşan 6 farklı katsayının hesaplanması gerekir. Sonlu elemanlar modeli ve her bir katsayı için [0, 4 kHz] aralığında değerler gösterilmiştir. Actran'ın sonuçlarında ölçümlerle iyi bir korelasyon olduğu görülmektedir.



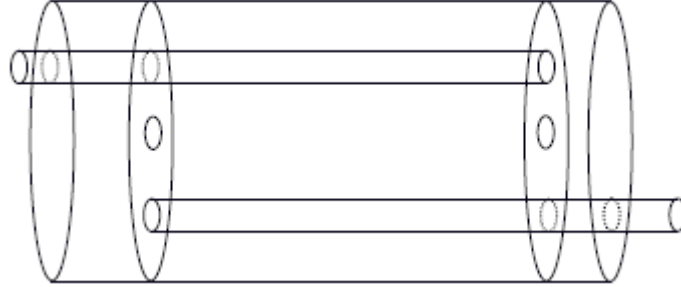
Resim 7 - Y şeklinde kanal tipi



Resim 8 - Actran ve test sonuçları korelasyonu

Çok Bölmeli Susturuculara Uygulanması

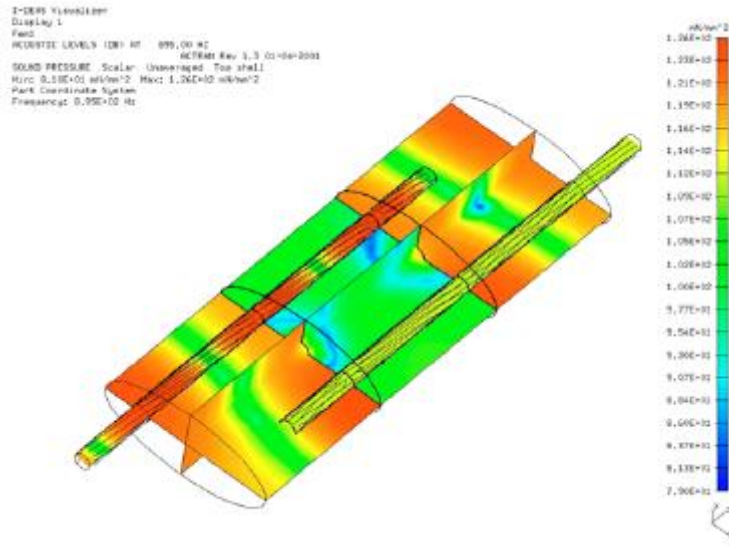
Actran egzoz bileşeninin transfer matrisini hesaplamada kullanılabilir. Örnek olarak 3 bölmeli eliptik kesite sahip susturucuyu seçebiliriz.



Resim 9 - Çok bölmeli susturucu

Transfer matris katsayılarını hesaplamak için, bölmelerin içerisindeki hava sonlu elemanlar modeli ile modellenir ve prosedürler uygulanır. Çünkü sınır koşulları frekanstan bağımsızdır. Actran zamandan bağımsız frekans adımında çözümü gerçekleştirir ve frekans cevap fonksiyonun hesaplar.

Resimde, giriş kesitinde düzlemsel dalga tahriki verilmiş bir susturucudaki basınç dağılımı görülmektedir.



Resim 10 - Bir susturucu üzerindeki basınç dağılımı

Transfer Matris vs. Sonlu Elemanlar Yöntemi

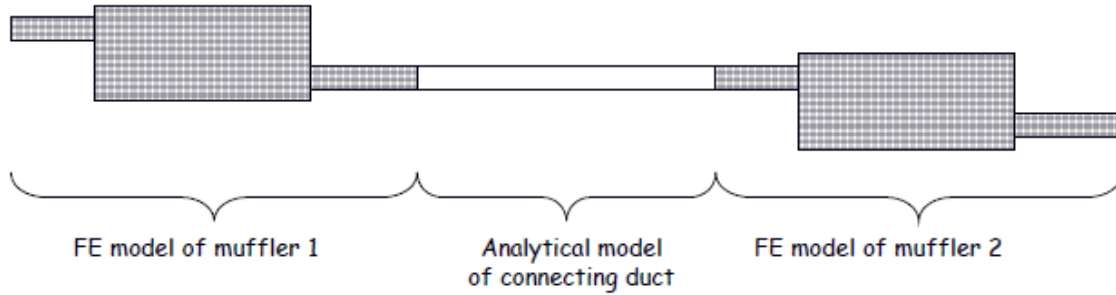
Sonlu elemanlar metodu (FEM) transfer matris metodu (TMM) yerine kullanılamaz. Fakat her iki metotta egzoz hattının tasarımını optimize etmek için birlikte kullanılabilir:

1. Transfer matris metodu, egzoz hattının genel transfer matrisini hesaplamasında kullanılmalıdır.
2. Eğer egzoz hattı içerisindeki bileşenlerden birinin transfer matrisi biliniyorsa, o bileşenin sonlu elemanlar modelini oluşturmaya gerek kalmaz.
3. Sonlu elemanlar metodu, analitik çözümü uygun olmayan bileşenler için kullanılmalıdır. Buna örnek olarak:
 - Bileşenin geometrisi, düzlem dalga yaklaşımına uygun olmadığında,
 - Bileşen yüzey veya hacim yutucuları içeriyorsa,
 - Bileşen duvarlarındaki katılık çözüme katılmalıdır.
 - Egzoz gazının gazının bir bileşenden diğer bir bileşene doğru gerçekleşen ortalama akışı, o bileşenin transfer matrisine etkilidir.

Neden Actran?

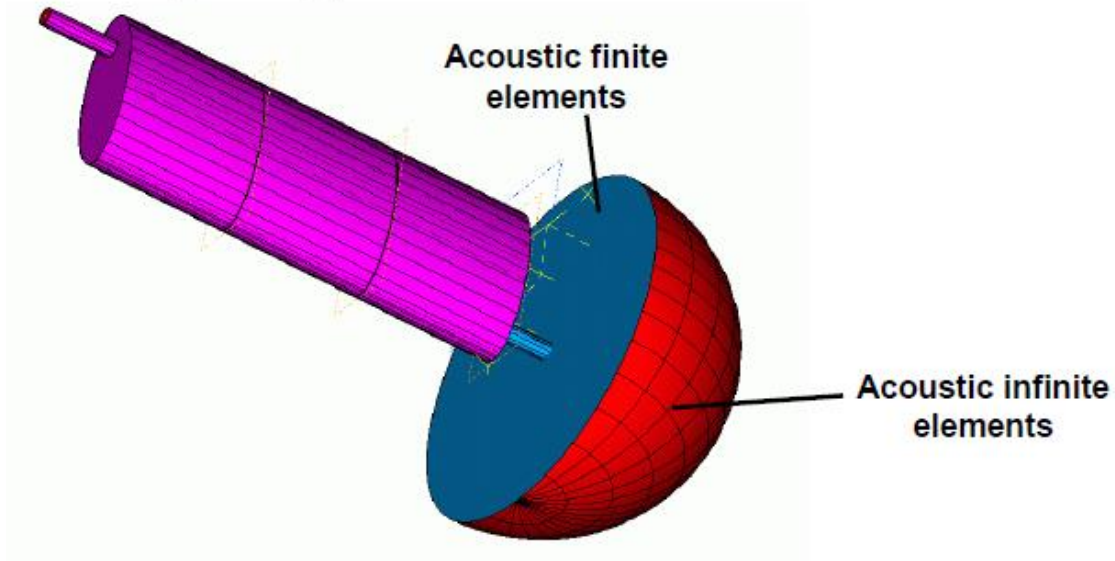
Actran en ileri tekniklerle akustik simülasyonu gerçekleştiren bir yazılımdır. Egzoz sistemleri için özelleştirilmiş modelleme teknikleri sunar:

1. Actran FEM ve TMM modellerini birlikte çalıştırabilir. Altta örnekte kenarlarda sonlu elemanlar modeli bulunurken, bunlara bağlı kanalın transfer matrisi analitik olarak modellenir.



Resim 11 - Egzoz hattı bileşenlerinin FEA ve TMM modelleri

2. Actran, akış çözücüsüne sahiptir ve egzoz hattında bir bileşenden diğer bileşene doğru non-uniform akışları hesaplar ve transfer matris üzerindeki etkisini değerlendirir. (Konveksiyonel dalga yayılımı)
3. Actran, egzoz hattı çıkışındaki gürültü yayılımını hesaplar. Bu modellemeye zemindeki veya araç üzerindeki yansıtıcı ve yutucu yüzeyler de eklenir. Bu yol ile sadece iletim kaybı değil, ekleme kaybı da hesaplanabilir. Finite ve Infinite elemanlar yardımıyla egzoz çıkışında gürültü düzeyleri modellenir.



Resim 12 - Bazı kanal yapılarındaki transfer matrisleri

4. Actran hacim sönümleyicilerin modellendiği gözenekli yapılar kütüphanesine sahiptir. Frekansa bağlı yüzey admitans koşulları, model üzerindeki farklı yüzeylere tanımlanabilir.
5. Delikli borular ve duvarlar, iki komşu odada akustik basınç alanını birbirine bağlayan transfer admitans koşulları ile modellenebilir.
6. Actran düzlemsel olmayan dalga tahriklerini modelleyebilir. Yüksek frekanslarda veya büyük çapa sahip kanallarda uygulanabilir.
7. Actran titreşim akustiği simülasyonları bütünlüktür ve egzoz duvarlarında elastik kabuk modellemesi yapılır. Ses iletimindeki duvar esnekliğinin etkisi hesaplanır. Bu hesaplama esnasında akustik ortam mesh yapısı ile egzoz duvarındaki kabuk mesh uyumlu olması gerekmez. Actran uyumsuz mesh yapıları arasında da hesaplama yapılabilir.

Actran ile Kabuk Gürültüsü Hesaplama

Kabuk gürültüsü, egzoz duvarlarının titreşimiyle yayılan ses gücüne denir. Saç plakalar dışardan gelen tahriklerle titreşir. Bu tahriklere:

- Egzoz hattının içindeki ve dışındaki akustik hacimler sebep olabilir.
- Egzoz hattının üzerindeki mekanik etkiler sebep olabilir. Örneğin: egzoz hattının araç üzerinde sabitlendiği bölgelerden titreşim aktarılabilir.

Kabuk gürültüsünü doğru modellemek için gereklilikler:

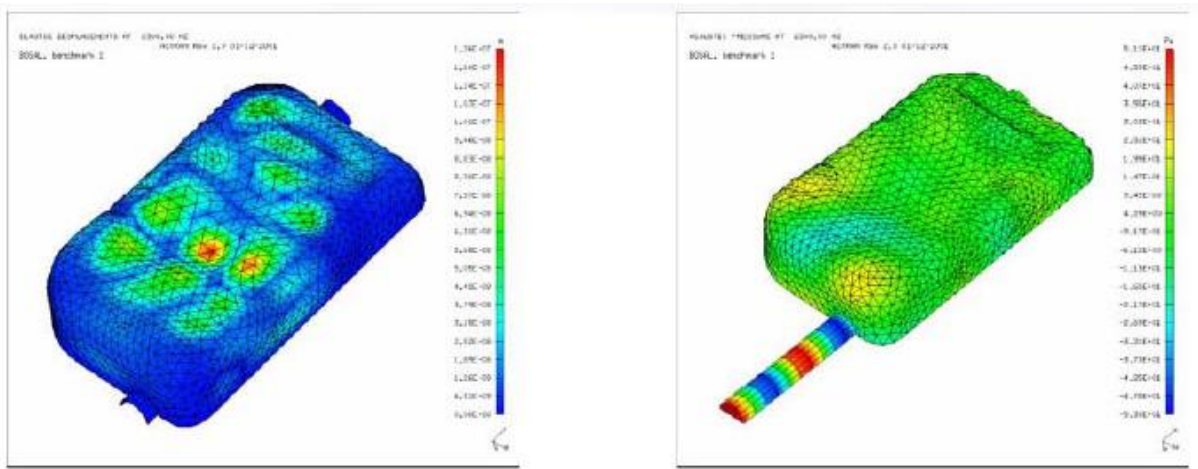
- Kabuk yapının malzeme sönüm etkileri de dahil doğru modellenmesi;
- Egzoz hattına içerden ve dışardan akustik basınç dağılımı veya noktasal yük gibi detayların bilinmesi

Actran, taslak araçlarıyla kabuk gürültüsünü doğru olarak modelleyebilir:

- İçerde ve dışardaki akustik hacimlerin, yapıdaki tahriklerle etkileşimi
- Sönümlenme katmanları, sandviç yapılar, çift duvarları modellemek için uygun kabuk ve katılık elemanları kullanımı
- Mesh uyumsuzluğu desteği: yapısal mesh, iç ve dış akustik mesh birbirinden bağımsız oluşturulabilmesi.

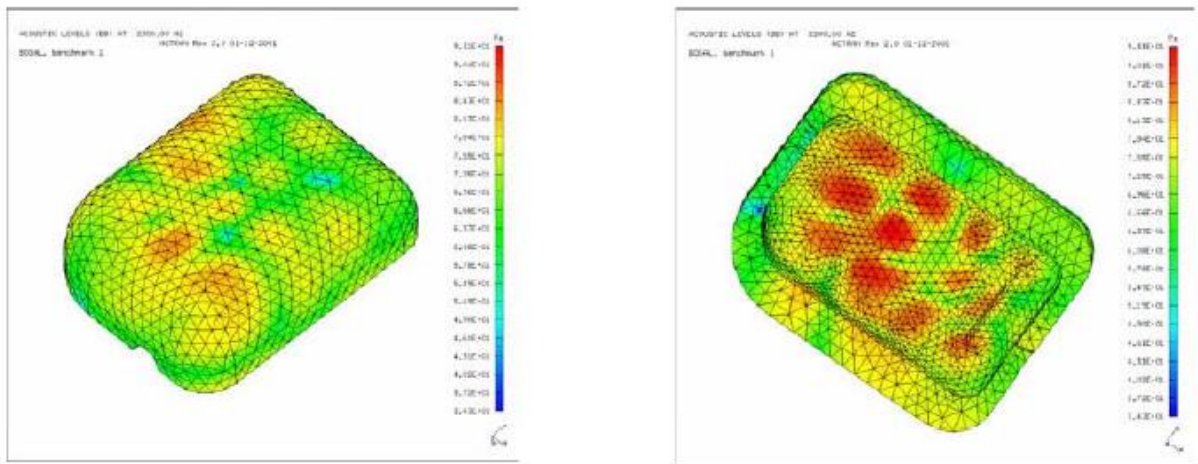
Actran içerisinde çeşitli sonuç görüntülemeleri aşağıda verilmiştir.

- İçerideki ses basınç dağılımının, kabukta oluşturduğu titreşimler (soldaki resim)
- Egzoz susturucunun içerisindeki ses basınç düzeyi dağılımı (sağdaki resim)



Resim 13 - Susturucu kabuğunda oluşan titreşimler (sol), susturucu içerisindeki ses basınç düzeyi dağılımı (sağ)

- Alt ve üst bakış açılarından olmak üzere ses basınç düzeyi dağılımları



Resim 14 - Susturucu içerisindeki ses basınç düzeyi dağılımı (Alt ve Üst Bakış)

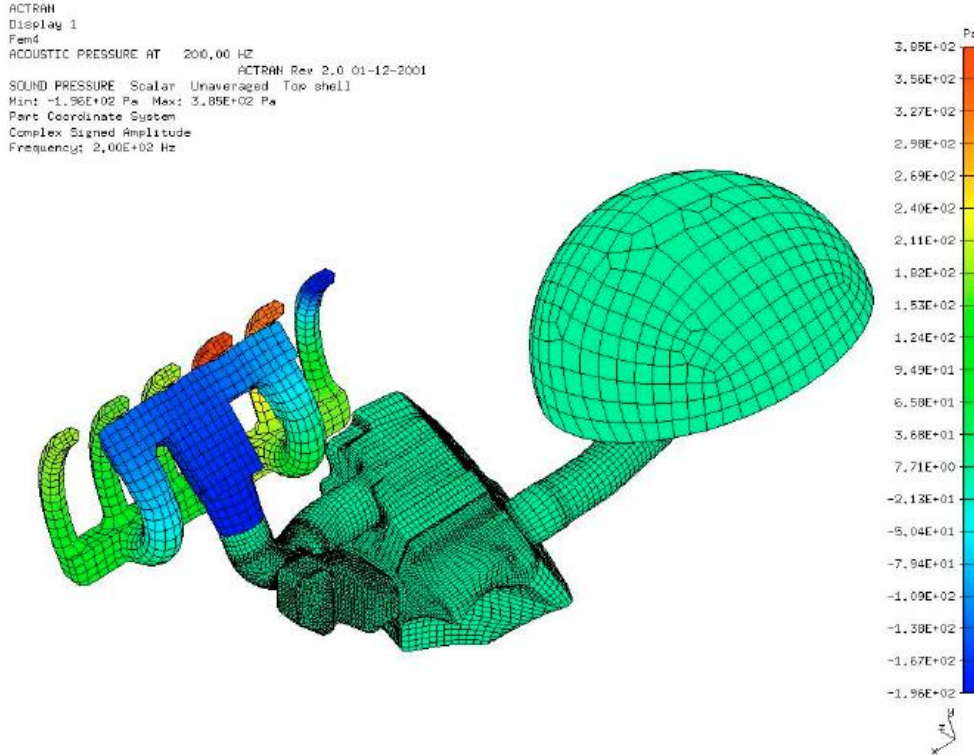
Actran ile Akustik Hava Emme Sistemi Tasarımı

Egzoz sistemleri için söylenenlerin çoğu aynı zamanda emme sistemleri tasarımı için de söyleyebiliriz. Modelleme benzerliklerinden ve farklılıklarından bahsederek:

- Egzoz sistemlerinde giriş ve çıkış kesitlerinde sıcaklık ve gaz kompozisyonları farkı oluşurken, emme sisteminin giriş kesitinde her seferinde aynı sıcaklık girdisi olmaktadır.
- Egzoz hattında ses, yanma gazıyla aynı yönde yayılım gösterirken, emme sistemlerinde ses havaya yönüne zıt yönlü olarak yayılır. (Hava emme kesiti = akustik çıkış kesiti)
- Egzoz sisteminde egzoz gazı için bir giriş kesiti ve bir çıkış kesiti olurken, emme sisteminde modele bağlı olarak çoklu giriş ve çıkış kesitleri bulunabilir.
- Egzoz sistemlerinde metal bileşenler kullanılırken, emme sistemlerinde plastik parçalar daha sık kullanılır.
- Düzlem dalga hipotezi, egzoz sistemlerinde oldukça geçerli olurken, emme sistemlerinde ise yüksek mertebeden kanal modları önemli bir yer tutar.

Sonuç olarak, egzoz sistemleri tasarımında hava emme sistemi giriş ve çıkış kesitlerinden transfer fonksiyon ile karakterize edilir ya da emme sistemi tasarımıyla kabuk gürültüsünün etkisi hesaplanır.

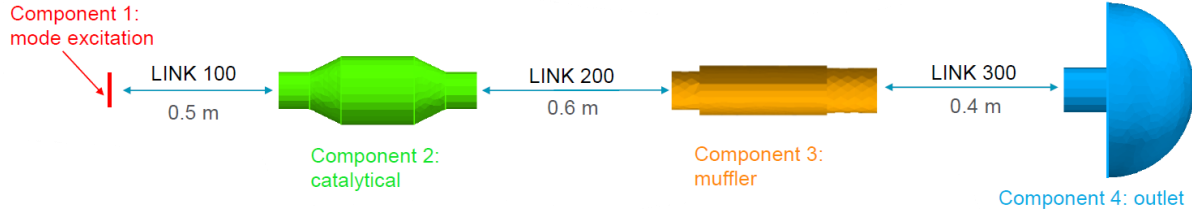
Altta hava emme sistemine ait bir sonlu elemanlar modelini görebilirsiniz



Resim 15 - Hava Emme Sistemi Akustik Sonlu Elemanlar Modeli

Örnek Çalışma

Resimde egzoz sistemine ait akustik model görülmektedir. İlk olarak Actran ile egzoz sistemindeki tüm bileşenlerin sonlu elemanlar yöntemiyle modellenmesi ve transfer matris yöntemiyle modellenmesi incelenmiştir. İkinci olarak da klasik susturucu olarak tasarlanan bileşen 3 (Component 3) yerine egzoz sistemine yerleştirilen yeni perforated plaka (Component 5) ile modellenmesi incelenmiştir.

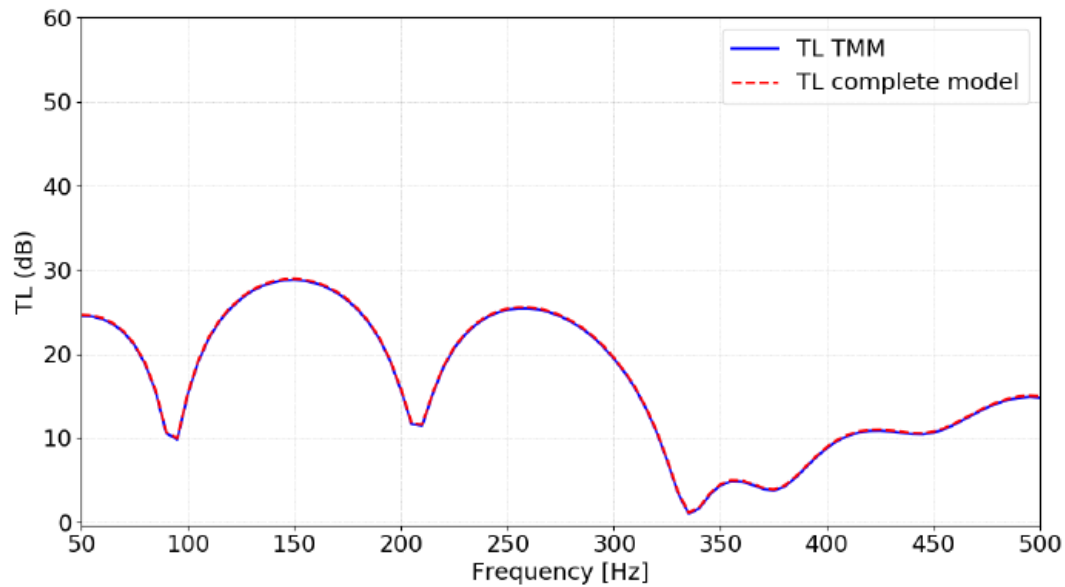


Resim 16 - Egzoz Sistemi Akustik Modeli

- Bağlantılar (Link) bileşenleri birbirine bağlayan kanalları (Duct) temsil eder.
- Bağlantılar (Link) bileşenler arasında oluşan faz farklarını yaratır.

Sonuç

Actran ile egzoz sisteminin tüm bileşenlerinin 50-500 Hz frekans aralığında sonlu elemanlar modeli sonuçları ile transfer matris yönteminin sonuçları karşılaştırılmıştır. İletim kaybı sonuçlarında sonlu elemanlar yöntemi ve transfer matris yöntemleri arasında hiçbir farklılık gözlenmemiştir.



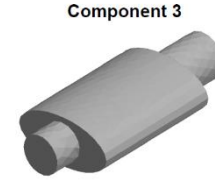
Resim 17 - Sonlu Elemanlar Yöntemi ve Transfer Matris Yöntemi ile İletim Kaybı Hesabı

Sonlu Elemanlar Yöntemi ve Transfer Matris Yöntemi ile İletim Kaybı Hesabı

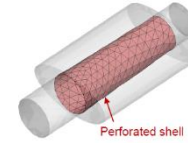
Actran ile TMM kullanarak egzoz hattında bileşen-3 çıkartılarak bileşen-5 ile değiştirilmesinin çözüm süreleri karşılaştırmaları incelenmiştir.

Bileşen-3: Klasik Susturucu

Bileşen-5: Perfore Plakalı Susturucu



Component 3



Perforated shell

Resim 18 - Klasik Susturucu ve Perfore Plakalı Susturucu

Çözüm Süreleri

Hesaplama performansları aşağıdaki tabloda verilmiştir.

	Complete Line	TMM
Baseline	29min 22s	26min 03s
Perforated Plates	28min 21s	2min 47s
Total time (baseline + iteration with perforated plate)	57min 43s	28min 50s

Sonlu Elemanlar ve Transfer Matris Yöntemlerinin Performans Karşılaştırması

- Tüm egzoz hattının transfer matris metodu ile çözülmesi %11 daha hızlıdır.
- Tüm egzoz hattının transfer matris metodu ve perfore plakalı susturucu ile modellenmesi %90 daha hızlıdır.

Sonuç ve Yorum

Transfer matris metodunun avantajları :

- ❖ Analitik transfer matris metodu frekans limiti sınırlıdır.
 - ✓ Maksimum frekans, her bileşenin kesme frekansıdır. (sadece düzlemsel dalga yayılımı)
 - ✓ Actran'da frekans sınırlaması yoktur çünkü TMM aracı matrise tüm modlarını katılımını sağlayabilir.
- ❖ TMM aracı ile hesaplama, tüm sonlu elemanlar modeli hesaplamasından daha hızlıdır.
- ❖ Bileşenler kolayca değiştirilebilir. Böylece bir bileşenin başka biriyle değiştirilmesinin etkileri global olarak görülebilir.
- ❖ TMM modelleri Actran VI içerisinde desteklenmez. Analiz girdi dosyası olarak text dosyası içerisinde düzenlenir.