



## **Dizel Jeneratör Setlerinde Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Gürültü Analizi ve Test Değerlerinin Karşılaştırılması**

### **Comparison of Noise Analysis with Finite Elements Method and Test Values in Diesel Generator Sets**

**Murat Uysal<sup>1\*</sup>, Oya Bakar<sup>2</sup>, Yalçın Doğan<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> Teksan Jeneratör Araştırma ve Geliştirme Merkezi, Arge Yöneticisi İstanbul, Türkiye

<sup>2,3</sup> Teksan Jeneratör Araştırma ve Geliştirme Merkezi, Arge Mühendisi İstanbul, Türkiye

Sorumlu Yazar / Corresponding Author \*: [muratuysal@teksan.com](mailto:muratuysal@teksan.com)

Geliş Tarihi / Received: 07.06.2021

Araştırma Makalesi/Research Article

Kabul Tarihi / Accepted: 06.12.2021

DOI:10.21205/deufmd.2022247112

*Atıf şekli/How to cite: UYSAL, M., BAKAR, O., DOĞAN, Y. (2022). Dizel Jeneratör Setlerinde Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Gürültü Analizi ve Test Değerlerinin Karşılaştırılması. DEUFMD, 24(71), 463-474.*

#### **Öz**

Elektrik enerjisinin olmadığı veya kesintiye uğradığı durumlarda kullanılan dizel jeneratörler, çalışma esnasında, çevreye beyan güçleri ve dizel motorların teknik özelliklerine bağlı olarak yüksek miktarda gürültü yaymaktadır. Dizel jeneratörlerin oluşturdukları bu gürültü, çevreye ve canlılara fiziksel ve psikolojik olarak zarar vermektedir. Bundan dolayı, bu gürültü düzeyi çevre yönetmelikleri ve standartlar tarafından sınırlandırılmıştır. Jeneratör imalatçıları bu yasal limitlere uyabilmek için dizel jeneratör setinin çevresine ses izolasyon kabinleri tasarlamaktadırlar. Bu izolasyon kabinlerinin gürültü düzeyini ne kadar düşüreceğini hesaplayabilmek için farklı yöntemler kullanılmaktadır. Ses izolasyon kabinlerinin gürültü düşüm değerlerinin sonlu elemanlar metotlarında tespit edebilmek ve optimize edebilmek için gürültü kaynağının yüzey hızlarının bilinmesi gerekmektedir. Bu çalışmada, kabinli dizel jeneratör setinin sonlu elemanlar metodu ile gürültü düşüm değerleri hesaplanmış, testleri gerçekleştirilerek analiz çıktıları ile test sonuçları karşılaştırılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Dizel Jeneratör, Akustik Kabin, Ses İzolasyonu, Sonlu Elemanlar Metodu

#### **Abstract**

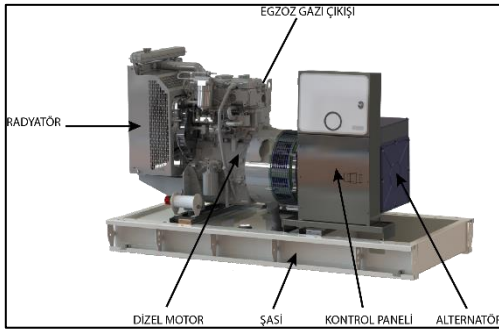
Diesel generator used in where there is no electricity or when the generator is interrupted emit a high amount of noise to the environment during operation, depending on their rated power and the technical characteristics of diesel engines. This noise created by diesel generators harms the environment and living things physically and psychologically. Therefore, this noise level is limited by environmental regulations and standards. Generator manufacturers design sound insulation cabinets around the diesel generator set in order to comply with these legal limits. Different methods are used to calculate how much these isolation cabinets will reduce the noise level. It is necessary to know the surface velocities of the noise source to determine the noise reduction values of the sound insulation cabinets in finite elements method and to perform their optimization. In this study, the noise reduction values of the diesel generator set with cabin were calculated using finite elements method. Analysis and test results are compared by carrying out tests.

**Keywords:** Diesel Generator, Acoustic Enclosure, Sound Insulation, Finite Elements Method

## 1. Giriş

Günümüzde hayatımızın her alanında elektrik enerjisine ihtiyacımız bulunmaktadır. Ağır sanayi, konutlar, oteller, belediyeler, hastaneler, veri merkezleri gibi konumlarda acil durum jeneratörlerinin bulunması hayati önem arz etmektedir. Dizel jeneratör setlerinin özellikle konut, hastane, okul gibi kritik noktalarda kullanımı, bu lokasyonlarda yaşayan canlıların fiziksel ve psikolojik sağlıklarını çevreye yaydıkları yüksek gürültü nedeniyle olumsuz etkilemektedir. İnsan sağlığının korunması ve iç pazarın düzgün işleyişine katkıda bulunmak üzere açık alanda kullanılan teçhizatların yarattığı gürültüye ilişkin gürültü emisyonları standartlarının uygulanması ile ilgili yönetmelik yayımlanmıştır [1]. Yönetmelikte yer alan 400 kW'tan düşük güç üreten jeneratörlerin ses güç seviyeleri beyan güç değerlerine bağlı olarak sınırlandırılmıştır. Bu sınır güç değerleri, ölçerken uyulması gereken kurallar ve ölçüm noktaları da yönetmeliğin atıfta bulunduğu harmonik standartlarda verilmiştir [2]. Tüm jeneratör imalatçıları ürettikleri jeneratör setlerinde bu yönetmelikte verilen ses güç düzeyini aşmamakla yükümlüdürler.

Dizel jeneratörlerde gürültüye neden olan birden fazla bileşen vardır. Bu bileşenler; motor bloğu, radyatör fanı, egzoz gazı ve şasi üzeri titreşim kaynaklı gürültüler olmakla beraber, her biri farklı frekanslardadır ve farklı genliktedir. Kabinsiz dizel jeneratörü oluşturan temel bileşenler Şekil 1'de gösterilmiştir.



**Şekil 1.** Kabinsiz Dizel Jeneratör Temel Bileşenlerin Tanıtımı

Jeneratör setinin oluşturduğu gürültü için alınan önlemler arasında egzoz susturucu tasarımları önemli bir rol oynamaktadır. Yapılan literatür araştırmalarında gürültü azaltım ihtiyacına göre sonlu elemanlar metodu ile reaktif veya

absorber tip susturucuların 1/3 oktav bandında iletim kaybı değerleri hesaplanmaktadır [3]. Absorber tip susturucularda genellikle gürültü düşümünün orta ve yüksek frekansta olduğu durumlarda tercih edilmekte olup kullanılan absorber malzeme tipi seçimi ve boyutlandırması sonlu elemanlar metodu ile belirlenerek tasarlanabilmektedir [4]. Reaktif susturucular gürültü düşümü ihtiyacının düşük frekansta olduğu durumlarda kullanılmaktadır ve sonlu elemanlar metodu ile gürültü azaltımı yapılması düşünülen frekans bandlarına uygun geometrisi belirlenerek tasarımları gerçekleştirilmektedir [5].

Egzoz susturucuları ile alınan önlemlerin yanı sıra jeneratör setinin gürültü azaltımı için kabin tasarımları çok önemli rol oynamaktadır. Genellikle bu akustik kabin tasarımı deneme yanılma yoluyla yapılmaktadır. Bu durum da tasarım maliyetlerini ve tasarımın süresini arttırmaktadır. Diğer bir yöntem ise, akustik kabin tasarımını sonlu elemanlar metodu ile modelleyerek tasarlamaktır. Yapılan literatür araştırmalarında kabin içerisindeki gürültünün homojen olduğu varsayımları ile analizler gerçekleştirilmiştir [6]. Fakat jeneratör setini oluşturan bileşenler radyatör, dizel motor ve alternatör farklı frekanslarda, farklı genliklerde gürültü yaymaktadır. Dolayısıyla bu bileşenlerin kabin içerisindeki yerleşimleri de göz önünde bulundurularak farklı gürültü düzeylerinin tanımlanmasının daha uygun olduğu görülmektedir. Bu çalışmada test metodu ile ölçülen gürültü seviyelerinden faydalanarak elde ettiğimiz analiz modeli ile jeneratör setindeki belirli komponentlerin yüzey hızları bulunmuştur. Bu çalışmada, literatürdeki çalışmalardan farklı olarak yüzey hızları, test sonuçlarına göre belirlenmektedir. Bu yüzey hızlarını kullanarak akustik kabinin 1/3 oktav bandında gürültü düşüm değerleri hesaplanmış ve değerler kabinli jeneratör seti ölçüm sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

## 2. Materyal ve Metot

Dizel jeneratör setlerinde baskın gürültünün başında gelen egzoz gazı çıkışından kaynaklanan gürültü, yüksek akustik performansla sahip uzatılmış silindirik yutucu malzemeli birleşik tip susturucu kullanılarak limitlerin altına düşürülmüştür [7]. Motor ve alternatörün şasiye montajı esnasında kullanılan sönüm oranı

yüksek vibrasyon takozları ve mevcut yüklerde esnemeye müsaade etmeyen rijitlikte şasi tasarımı ile titreşim seviyesi baskın frekanslarda minimize edilmiştir. Hastanelerde, veri merkezlerinde, çatıüstü kurulumlarında ve birden çok jeneratör seti kurulumlarında daha fazla titreşim sönümlenmesi yapılması gerekir. Vibrasyon takozları ile zemine iletilen vibrasyon enerjisi %98-%99 oranında elimine edilerek bu sönümlenme ihtiyacı karşılanır [8]. Bu çalışmada, test verilerini etkilememesi için şasi ve kabinin iletilen vibrasyonun düşürülmesi önem arz etmektedir. Bundan dolayı yüksek sönümlenme oranına sahip vibrasyon takozu kullanılmıştır ve gerçekleştirilen analizlerde, vibrasyondan kaynaklanan gürültünün etkisi ihmal edilmiştir.

Geriye kalan gürültü kaynakları olan radyatör fanı, dizel motor bloğu, alternatör bileşenlerinin 1/3 oktav bandında ölçüm noktalarına etkilerini görebilmek amacıyla standartlara uygun olarak testleri gerçekleştirilmiştir. Testler neticesinde, ölçüm standartlarında belirtildiği gibi 10 farklı noktadan ölçüm alınmıştır. Ölçülen değerler 1/3 oktav bandında listelenmiştir.

İkinci aşamada testi gerçekleştirilen jeneratör setinin CAD modeli oluşturulmuştur. 1/3 oktav bandında listelenen ses basınç seviyelerini oluşturacak yüzey hızlarını tespit edebilmek için ticari bir sonlu elemanlar yazılımı olan ANSYS ve eklentisi Direct Optimization yazılımından faydalanılmıştır.

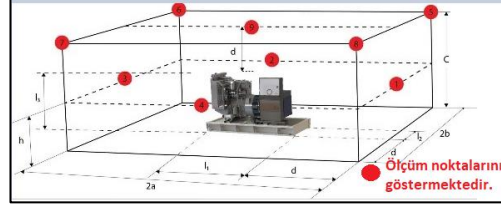
Sonlu elemanlar metodu ile elde edilecek yüzey hızları, kabinli jeneratör seti çözümü için girdi olarak kullanılarak kabinli bir jeneratör setinin çevreye yaydığı gürültü 1/3 oktav bantlarında elde edilmiştir. Daha sonra kabinli jeneratör setinin gürültü testleri gerçekleştirilerek analiz çıktısı ve test ölçümleri frekans bandında karşılaştırılıp hata oranları tespit edilmiştir.

### 2.1. Kabinsiz Jeneratör Setinin Gürültü Ölçümü

Gürültü ölçümleri, anekoik odalarda, yarı anekoik odalarda ve açık ortam şartlarında olmak üzere 3 farklı ortamda gerçekleştirilmektedir. Bu çalışmada, dizel jeneratörlerin kapladığı alan ve egzoz çıkışının tahliye problemlerinden dolayı açık ortam şartlarında ölçüm gerçekleştirilmiştir.

TS EN ISO 3744 standardında tarif edilen 2 farklı ölçme yüzey alanı metodundan paralelkenar

metodu seçilmiştir ve mikrofonun kaynağa olan dik uzaklığı 1 metre olarak alınmıştır [2].



Şekil 2. Paralelyüz Metodu ile Ölçüm Noktalarının Belirlenmesi

Paralelyüz ölçme metodunda, zahiri bir ölçüm yüzey alanı oluşturulmuştur ve bu yüzey üzerinde yer alan mikrofon konumları aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır [2].

$$S = 4(ab + bc + ac) \quad (1)$$

$$a = 0.5l_1 + d \quad (2)$$

$$b = 0.5l_2 + d \quad (3)$$

$$c = l_3 + d \quad (4)$$

$$h = c/2 \quad (5)$$

Burada  $l_1$ ,  $l_2$  ve  $l_3$  sırasıyla, ölçülen dizel jeneratör setinin en (0,75 m), boy (1,75 m) ve yükseklik (1,05 m) ölçüleridir. Bu ölçülere göre, 36,96 m<sup>2</sup> ölçüm yüzey alanı bulunmuştur. Mikrofon konumları için ölçüm yüzeyi ebatları sırasıyla;  $2a=3,76$  m ,  $2b=2,75$  m ,  $c=2,05$  m olarak bulunmuştur. Tek bir mikrofon, belirlenen ölçüm noktalarına sırasıyla konularak ses seviyesi ölçümleri alınmıştır.

Bu çalışmada, 21 kVA'lık MITSUBISHI marka bir jeneratör seti açık bir ortamda düz bir zemin üzerine yerleştirilmiştir. Egzoz çıkışı, spiral boru ile 15 metre uzağa taşınmış olup spiral boru taş yünü ile izole edilmiştir. Jeneratör setinin %75 yükte çalışabilmesi için seyyar bir yük bankası kullanılmış olup yük bankasının soğutma fanları ölçüm esnasında devre dışı bırakılmıştır. Arka plan gürültüsünün, ölçüm değerlerini etkilememesi için testler ortamda hareketliliğin olmadığı bir anda 3'er tekrarlı olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Ölçümler esnasında, eş zamanlı olarak arka plan gürültüleri de kayıt

altına alınmıştır ve testlerde DELTAOHM marka HD2010 model Tip1 gürültü ölçüm cihazı kullanılmıştır [2].



**Şekil 3.** DELTAOHM HD2010 Model Gürültü Ölçüm Cihazı

DELTAOHM HD2010 model gürültü ölçüm cihazı özellikleri [9]:

- Gerçek zamanlı 1/3 frekans analizi
- 21 dB-140 dB gürültü ölçüm aralığı
- 80 dB lineer aralık
- Prepolarize kondansör ½ in mikrofona

Ölçüm yüzeyi boyunca ölçülen ortalama ses basınç seviyelerinin ( $L_{p1}$ ) ve ortalama arka plan ses basınç seviyelerinin ( $L_{p2}$ ) hesaplanması için (6) ve (7) numaralı denklemler kullanılır. Mikrofon sayısı N ile ifade edilmiştir [2].

$$L_{p1} = 10 \log \left[ \frac{1}{N} \times \sum_{i=1}^N 10^{0,1 \times L_{pi1}} \right] \quad (6)$$

$$L_{p2} = 10 \log \left[ \frac{1}{N} \times \sum_{i=1}^N 10^{0,1 \times L_{pi2}} \right] \quad (7)$$

(6) ve (7) nolu denklemler kullanıldığında  $L_{p1}$

86,21 db(A),  $L_{p2}$  ise 52,40 db(A) olarak bulunmuştur.

Fon gürültüsü düzeltilmesi ( $K_1$ ); ölçülen ortalama ses basınç seviyesi ( $L_{p1}$ ) ve ölçülen ortalama arka plan ses basınç seviyesi ( $L_{p2}$ ) arasındaki fark 15 dB(A)' dan fazla olduğu için 0 alınmıştır [2].

Çevre düzeltilmesi ( $K_2$ ); ölçüm dış alanda ve yansıtıcı düzlemlerden uzakta gerçekleştirildiği için 0 alınmıştır [2].

Düzeltilmiş ortalama ses basınç değeri ( $L_{pf}$ ) ve ses gücü seviyesi ( $L_w$ ) aşağıdaki formüller

yardımı ile bulunur. Burada S, (1) nolu denklem ile bulunur. So ise  $1 \text{ m}^2$ 'dir [2].

$$L_{pf} = L_{p1} - K_1 - K_2 \quad (8)$$

$$L_w = L_{pf} + 10 \left[ \log \frac{S}{S_0} \right] \quad (9)$$

Standartlara göre, gürültü limitasyonu ses gücü ile yapılır. 21 kVA'lık bir jeneratör için aşılması gereken ses gücü limiti (10) numaralı denklem ile hesaplanır [2].

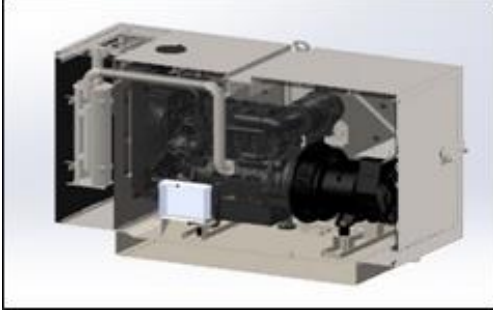
$$L_{w(\text{lim})} = 10 \log(P) \quad (10)$$

Burada  $L_{w(\text{lim})}$  sınır ses gücü değeri, P ise jeneratörün prime yükteki kW cinsinden beyan gücünü ifade etmektedir. (10) numaralı denklem yardımı ile limit ses gücü değeri bulunur. Jeneratör setinin ses gücü seviyesi bu limiti geçmemelidir. Geçtiği takdirde bu ses gücünün limit altına düşürülmesi gerekmektedir. Ses izolasyon kabini ihtiyacı da bu noktada devreye girmektedir.

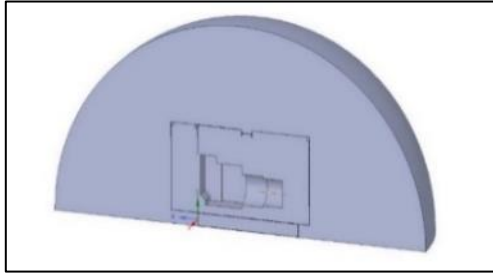
## 2.2. Ses İzolasyon Kabini Akustik Analizleri

Kabinsiz dizel jeneratör seti ölçümünden elde edilen ses basınç seviyelerinden radyatör, motor bloğu, alternatör ve emiş filtresi gürültülerinin daha iyi anlaşılacağı 4 nokta seçilmiş olup bu noktaların 250 Hz- 2000 Hz arası fft analizleri alınmıştır. Burada 250 Hz altı gürültülerin doğrulama katsayıları çok düşük olduğu için ihmal edilmiştir [10]. Jeneratör setinin her iki yanından okunan ses basınç seviyesi değerleri arasında maksimum 0,5 db(A) mertebesinde fark görüldüğünden analizlerde çözüm süresini kısaltmak amacıyla jeneratör seti simetrik olarak düşünülerek analiz gerçekleştirilmiştir.

Ses izolasyon kabininin akustik tasarımını, sonlu elemanlar metodlarını kullanarak gerçekleştirilebilmek için radyatör, motor, alternatör gibi gürültü kaynaklarının yüzey hızlarının bilinmesi gerekmektedir. Kabinsiz jeneratör setinin 1/3 oktav bandında ortalama ses basınç değerlerini elde edebileceğimiz yüzey hızları, ticari sonlu elemanlar yazılımı olan ANSYS ve Direct Optimization eklentileri kullanılarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4. Jeneratör Seti CAD Modeli



Şekil 5. Jeneratör Setinin Akustik Modeli

Radyatör, motor, alternatör, şasi, kabin ve kabin izolasyon malzeme yüzeyleri SpaceClaim programı ile modellenmiştir. Jeneratör seti üzerinde yer alan ve gürültü üretmeyen ekipmanlar çözüm hızını arttırabilmek amacıyla modele ilave edilmemiştir. Jeneratörden çevreye yayılan ses basınç seviyesinin modelleyebilmek için çeyrek küre hava modellenmiştir. TS EN ISO 3744 standardına göre konumları hesaplanan ölçüm noktalarına uygun olacak şekilde çeyrek küre hava boyutlarına karar verilmiştir. Kürenin çapı; test edilecek ekipmanın boyutu, mikrofona konumları göz önünde bulundurularak 4600 mm olarak belirlenmiştir.

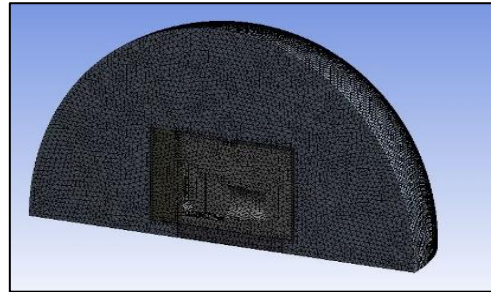
Düzenli bir mesh boyutu oluşturabilmek için, sonlu elemanlar analizinde dalga boyu, dolayısıyla ses hızı ve çözüm frekansını doğru belirlemek çok önemlidir. Sonlu elemanlar metodunun analizini doğru bir şekilde gerçekleştirebilmek için en az her bir dalga boyu başına 6 mesh elemanı alınması gerekir [11]. Mesh boyutu, her bir frekans için aşağıdaki formül ile hesaplanıp çizelgede gösterilmiştir. Burada maksimum mesh eleman boyutu ( $X_{max}$ ), ses hızı (C), frekans (f), dalga boyu ( $\lambda$ ) ile gösterilmiştir.

$$X_{max} = \frac{\lambda}{6} \quad (11)$$

$$\lambda = \frac{C}{f} \quad (12)$$

Tablo 1. Frekansa Göre Maks. Mesh Eleman Boyutu

f ( Hz)	C (m/s)	$\lambda$ (mm)	$X_{max}$ (mm)
250	343	1372	228,67
315	343	1088,9	181,5
400	343	857,5	142,92
500	343	686	114,33
630	343	544,44	90,74
800	343	428,75	71,46
1000	343	343	57,2
1250	343	274,4	45,73
1600	343	214,375	35,73
2000	343	171,5	28,58



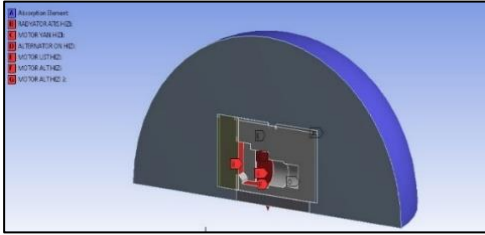
Şekil 6. Jeneratör Seti Mesh Modeli

Öncelikle, model üzerinde kabinsiz jeneratör setinin gürültü ölçüm sonuçlarına neden olabilecek yüzey hızları bulunmaktadır. Daha sonra bu yüzey hızları kullanılarak kabinli model için çözüm alınmaktadır.

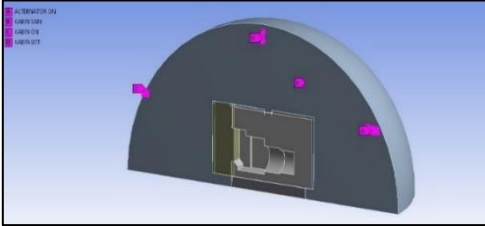


### 2.2.1. Kabinsiz Jeneratör Setinin Yüzey Hızlarının Bulunması

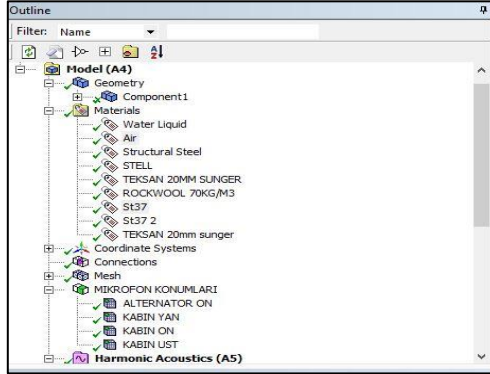
Kabinsiz jeneratör setinin gürültü ölçüm testinde ölçüm yapılan konumlardaki aynı ses basınç değerlerini bulabilmek için gürültü kaynaklarına 6 farklı başlangıç yüzey hızları Şekil 7'de tanımlanmıştır. Test ölçüm koordinatları ile aynı olacak şekilde, 4 kritik noktaya 4 analiz mikrofonu yerleştirilmiştir. Ölçüm sonucu değerleri hedef ses basınç seviyesi olarak girilmiştir ve Şekil 10'da gösterilmiştir.



Şekil 7. Kabinsiz Jeneratör Seti Yüzey Hızları



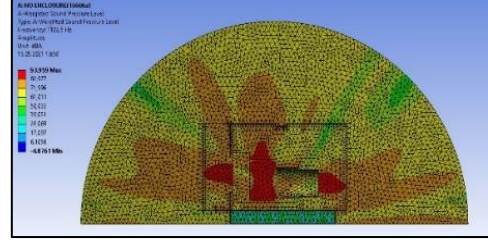
Şekil 8. Kabinsiz Jeneratör Mikروفon Konumları



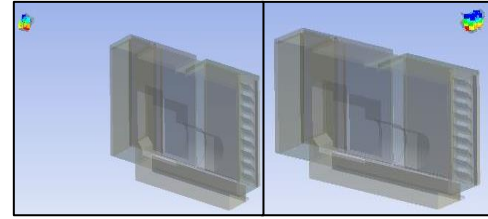
Şekil 9. Kabinsiz Jeneratör Malzeme Tanımı

Kabinsiz model için şasi sac kısmı ST37 [12], diğer tüm yüzeyler hava olarak seçilmiştir (Şekil 9)[13]. Hesaplamalar 20°C ortam koşulunda gerçekleştirilmiştir.

Yüzey hızları parametrik değişken seçilmiş olup ölçüm değerlerini sağlayan yüzey hızları 1000 Hz merkez frekans için Ansys Direct Optimizasyon modülü ile bulunmuştur [15].

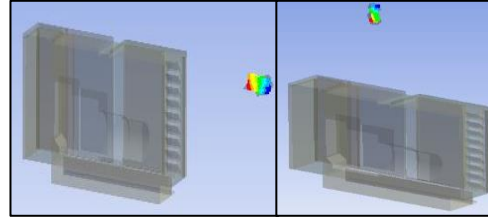


Şekil 10. Kabinsiz Jeneratör Ses Basınç Dağılımı



Şekil 11. Kabinsiz Jeneratör Radyatör Ön ve Motor Yan Mikروفon Ses Basınç Seviyesi (SPL)

Radyatör ön ses basınç seviyesi 73,2 dBA @1000 Hz olarak bulunmuştur. Motor yan ses basınç seviyesi 78,7 dBA@1000 Hz olarak bulunmuştur.



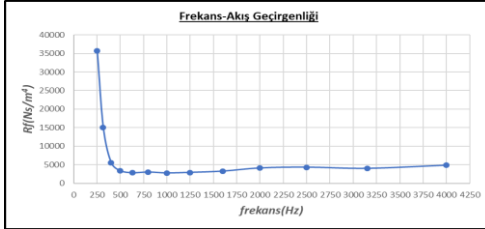
Şekil 12. Kabinsiz Jeneratör Alternatör Arka Mikروفon ve Jeneratör Üst Ses Basınç Seviyesi

Alternatör arka ses basınç seviyesi 76,8 dBA @1000 Hz olarak bulunmuştur. Jeneratör üst ses basınç seviyesi 79 dBA@1000 Hz olarak bulunmuştur.

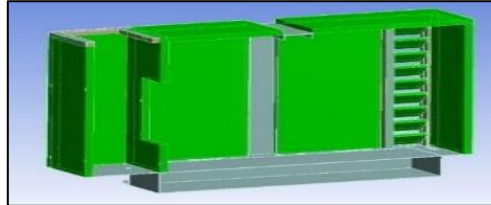
1000 Hz için uygulanan Direct Optimization modülü ile yüzey hızlarının tayini için tüm 1/3 oktav bantlarında çözüm alınmıştır.

## 2.2.2. Kabinli Jeneratör Setinin Akustik Analizleri

Kabinli jeneratör akustik analizleri için kaynak yüzey hızları bulunduğundan sonra mevcut CAD modeline kabin hava emiş panjuru ses izolasyon malzemesi, hava atış davlumbazı ses izolasyon malzemeleri, kabin cidar ses izolasyon malzemeleri, kabin ve şasiyi oluşturan tüm sac parça malzeme özellikleri ayrı ayrı modele girilmiştir. Ses izolasyon malzemesi olarak 20 mm Teksan sünger kullanılmıştır. Empedans tüpünde ses yutum katsayıları ölçülerek akış geçirgenlik değerleri, ses yutum katsayılarına göre ANSYS programı kullanılarak elde edilmiştir [16]. Her bir frekans için elde edilen akış geçirgenlik değerleri eğrisi Şekil 14'te paylaşılmıştır. Elde edilen akış geçirgenlikleri, ses izolasyon malzeme özelliklerine tanıtılıp Şekil 16' da paylaşılmıştır.



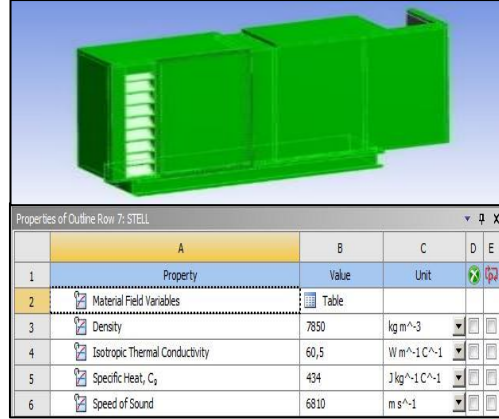
Şekil 13. Ses İzolasyon Malzemesi Frekans-Akış Geçirgenlik Eğrisi



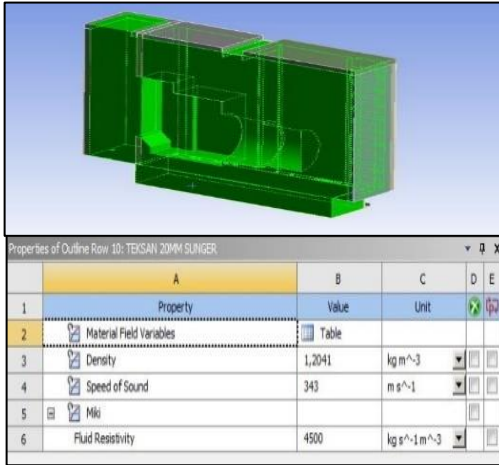
Properties of Outline Row 3: Air				
	A	B	C	D E
1	Property	Value	Unit	
2	Material Field Variables	Table		
3	Density	1,225	kg m <sup>-3</sup>	
4	Isotropic Thermal Conductivity	0,0242	W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>	
5	Specific Heat, C <sub>p</sub>	1006,4	J kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>	
6	Speed of Sound	346,25	m s <sup>-1</sup>	
7	Viscosity	1,789E-05	kg m <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup>	

Şekil 14. Hava Özelliklerinin Modele Tanıtılması

Şasiyi oluşturan 3 mm ST37 sac, kabini oluşturan 1,5 mm ST37 sac malzeme özellikleri Şekil 15'te ve kabin içi kaviteyi oluşturan 22°C'deki havanın özellikleri Şekil 14'te modele tanıtılmıştır.

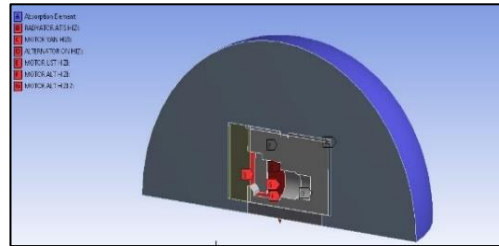


Şekil 15. Sac Malzeme Özelliklerinin Modele Tanıtılması



Şekil 16. Ses İzolasyon Malzemesinin Akustik Modele Tanıtılması

Kabinsiz jeneratör seti analizlerinden elde edilen yüzey hızları 1/3 oktav bant frekansları için sırasıyla Şekil 17'deki modele girilmiştir.



Şekil 17. Yüzey Hızlarının Modele Girilmesi

### 3. Bulgular

ANSYS Direct Optimization yardımıyla bulunan kabinsiz jeneratör setinin yüzey hızları, kabinli jeneratör modeline girilerek kritik 4 noktanın ses basınç seviyeleri ANSYS sonlu elemanlar metodu yardımıyla bulunmuştur. Aynı kVA değerine sahip kabinli jeneratör setinin bu 4 kritik noktadaki ses basınç seviyesi deneysel olarak ölçülerek analiz sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

#### 3.1. Kabinsiz Jeneratör Seti Gürültü Test Sonuçları

İlk olarak kabinsiz jeneratörün etrafında, jeneratörün boyutuna bağlı olarak uzaklıkları belirlenen noktalardan tek bir mikrofonun bu noktalara teker teker yerleştirilmesi ile ölçüm alınmaktadır. Ölçüm sırasında oluşan arka plan gürültüleri de hesaba katılarak bulunan ölçüm sonuçları Tablo 2’de paylaşılmıştır.

**Tablo 2.** 21 kVA Kabinsiz Dizel Jeneratör Gürültü Ölçüm Sonuçları

Ölçüm No	Arka Plan Gürültüsü(dBA)	%75 Yükte Ölçüm Sonuçları (dBA)
1,0	53,1	85,4
2,0	52,3	87,5
3,0	51,4	87,9
4,0	51,2	87,4
5,0	52,3	82,5
6,0	50,4	83,7
7,0	52,3	83,2
8,0	54,0	82,8
9,0	53,4	89,6

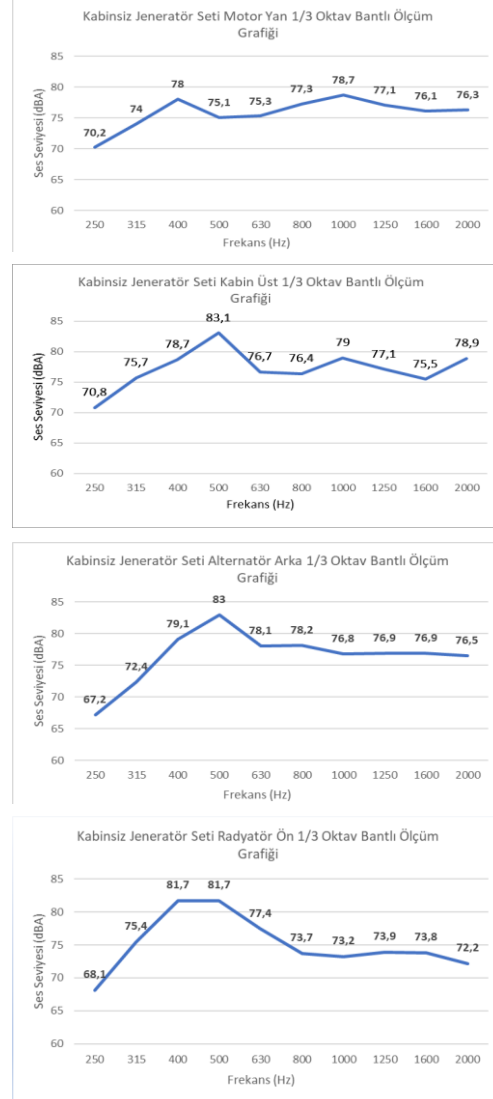
$L_{Pf}$  ve  $L_w$  (8) ve (9) numaralı denklemler yardımıyla sırasıyla 86,21 dB(A), 101,96 dB (A) olarak bulunur.

Tablo 2’deki değerler kullanıldığında, (10) numaralı denklem yardımı ile  $L_{w(lim)}$  96,18 dB(A) olarak bulunur.

Kabinsiz ölçümü gerçekleştirilen dizel jeneratör setinin ses gücü seviyesi olan 101,96 dB(A)’nın, yasal limit olan 96,18 dB(A)’ dan fazla olduğu

görülmüştür. Bu sebeple ses izolasyon kabine ihtiyacı duyulmuştur.

Ses izolasyon kabine tasarımını gerçekleştirebilmek için önce yüzey hızlarının bilinmesi gerekmektedir. Öncelikle, kabinsiz dizel jeneratör setinin 4 noktadaki 1/3 oktav bantlı ses seviyeleri bulunmuştur. Bu ses seviyeleri yüzey hızlarının tayini için önemli bir adımdır.

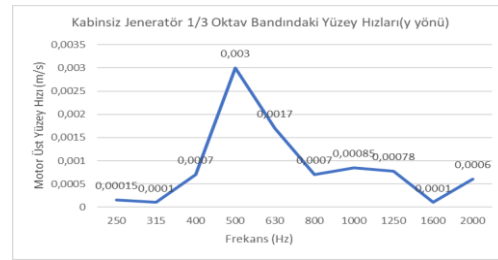
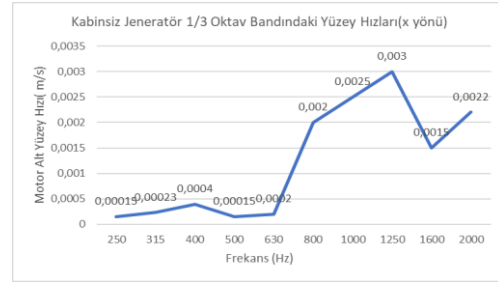
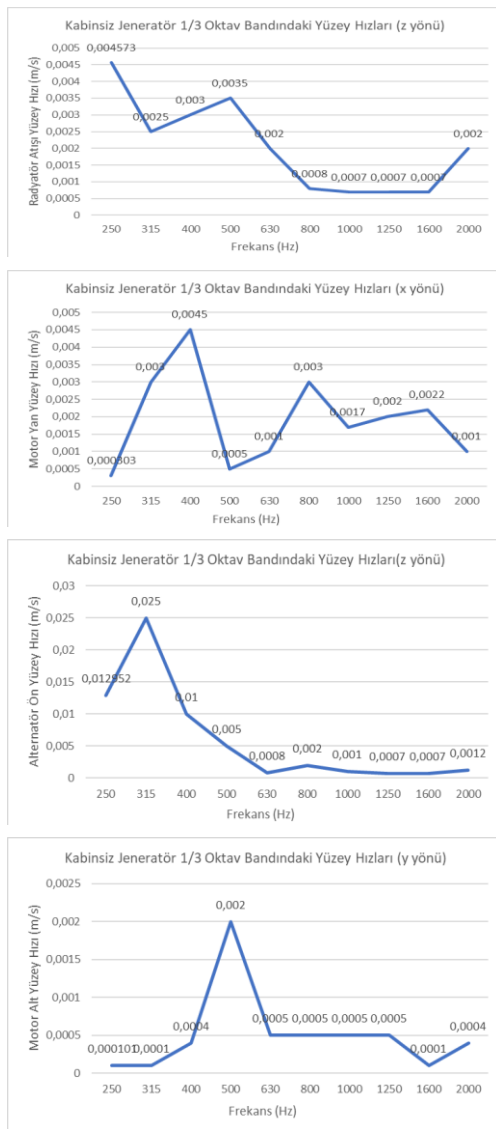


**Şekil 18.** Kabinsiz Jeneratör Seti 1/3 Oktav Bantlı Ölçüm Sonuçları



### 3.2. Kabinsiz Jeneratör Setinin Giriş Yüzey Hızları

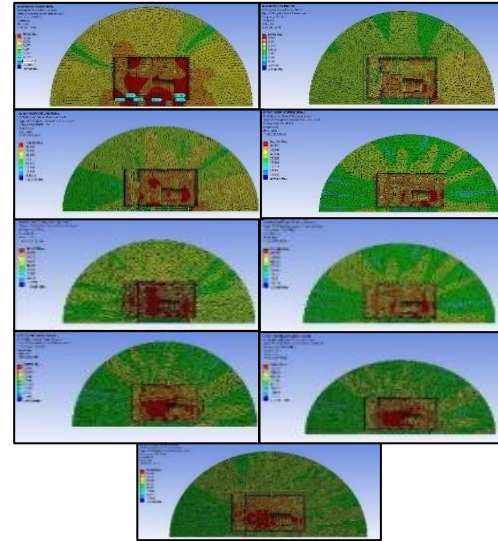
Yerleştirilen mikrofonların ses basınç değerlerini elde edeceğimiz radyatör motor ve alternatör yüzey hızları 1/3 oktav bantlı frekanslarda ANSYS Direct Optimization programı kullanılarak Şekil 19'daki gibi bulunmuştur. 5 mikrofon konumundaki farklı genliklerde ses basınç seviyesi değerlerinin sağlanabilmesinin, her bir gürültü kaynağının yüzey alanına ve gürültü kaynağının ölçüm mikrofonlarına uzaklığına göre değişkenlik gösterdiği görülmüştür.



Şekil 19. Kabinsiz Jeneratör ANSYS Direct Optimization Modülü ile Bulunan Yüzey Hızları - 1/3 Oktav Bantları

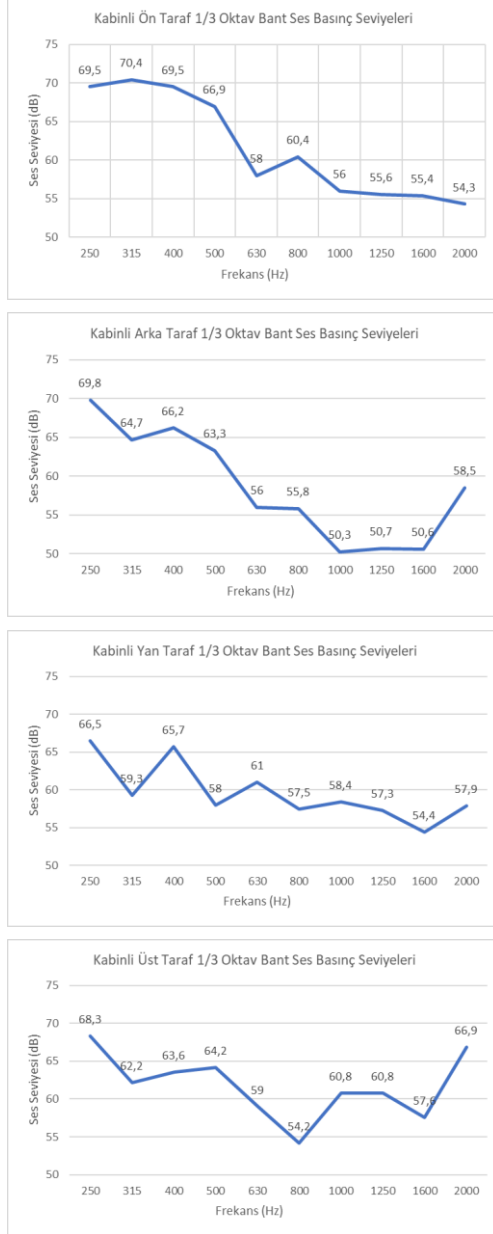
### 3.3. Kabinli Jeneratör Seti Analiz Sonuçları

Kabinli jeneratör seti için model hazırlanıp veri girişleri tamamlandıktan sonra tüm frekanslar için çözüm alınarak elde edilen ses basınç gürselleri Şekil 20'de verilmiştir.



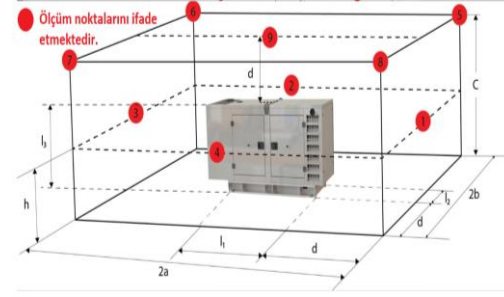
Şekil 20. Kabinli Jeneratör Seti 1/3 Oktav Bant Ses Basınç Seviyesi Gürselleri (Sırasıyla 250 Hz-1600 Hz Arası)

Tüm frekanslar için sırasıyla yüzey hızları model üzerinde girilerek mikrofon konumlarından okunan ses basınç değerleri bulunmuştur.



**Şekil 21.** Kabinli Jeneratör Seti 1/3 Oktav Bantlı Analiz Sonuçları

### 3.4. Kabinli Jeneratör Seti Gürültü Test Sonuçları



**Şekil 22.** Kabinli Jeneratör Ses Seviyesi Ölçüm Noktaları

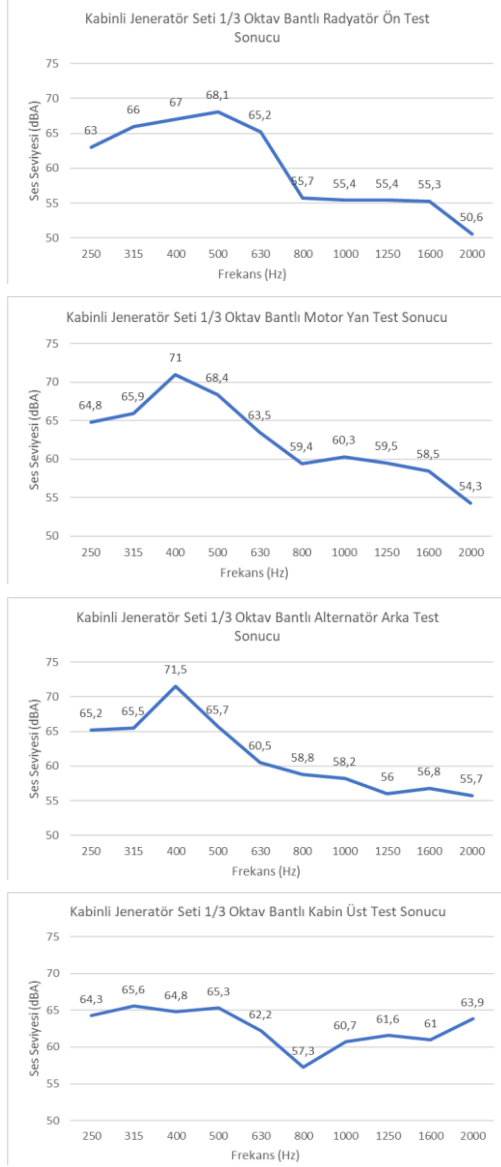
Analizleri gerçekleştirilen kabinli jeneratör seti, imal edilip açık bir ortamda düz bir zemin üzerine yerleştirilmiştir. 2.1'deki ölçüm yöntemleri tekrarlanarak testler gerçekleştirilmiştir. Ölçüm sonuçları Tablo 3'te paylaşılmıştır.

**Tablo 3.** 21 kVA Kabinli Dizel Jeneratör Gürültü Ölçüm Sonuçları

Ölçüm No	Arka Plan Gürültüsü (dBA)	%75 Yükte Ölçüm Sonuçları (dBA)
1,0	52,3	74,1
2,0	52,1	74,5
3,0	52,7	73,4
4,0	50,9	74,8
5,0	53,5	70,5
6,0	53,2	71,1
7,0	52,8	71,2
8,0	53,3	71
9,0	54,3	74,2

(6), (7), (8), (9) numaralı denklemler kullanılarak, ortalama ses basınç seviyesi ( $L_{Pf}$ ) 73,10 dB(A) ve ses gücü ( $L_w$ ) 88,78 dB(A) olarak bulunmuştur. (10) numaralı denklem ile limit ses gücü ( $L_{W(lim)}$ ) 96,18 dB(A) olarak bulunmuştur. Bu da ses gücünün, limit ses gücünün altında olduğunu gösterir.

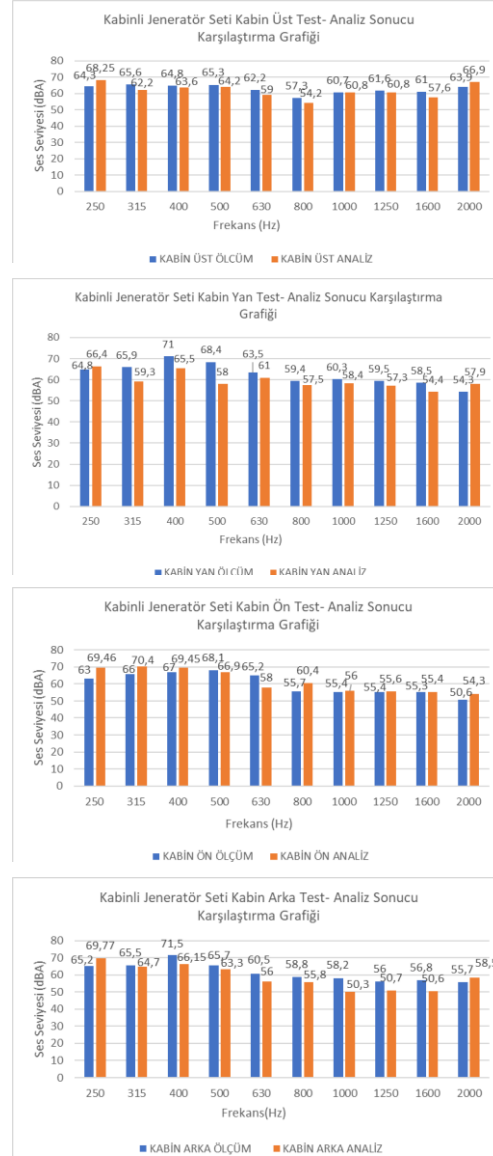
Analiz sonuçları ile karşılaştırabilmek için 4 mikrofon konumunun 1/3 oktav bandındaki ses basınç değerleri ölçülerek Şekil 23'te paylaşılmıştır.



Şekil 23. Kabinli Jeneratör Seti 1/3 Oktav Bantlı Test Sonuçları

### 3.5. Kabinli Jeneratör Setinin Ses Basınç Seviyelerinin Ölçümü ve Analiz Sonuçları ile Karşılaştırılması

Kabinli jeneratör setinin analiz sonuçları ile test sonuçları karşılaştırılarak Şekil 24'te grafik şeklinde gösterilmiştir. Analiz ve test sonuçları karşılaştırıldığında maksimum %15 lik bir hata oranı tespit edilmiştir.



Şekil 24. Kabinli Jeneratör Seti Test-Analiz Sonucu Karşılaştırma Grafiği

#### 4. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışmada, dizel jeneratörün kabinsiz ses ölçümleri yapıp bu sonuçlara göre jeneratör seti üzerindeki yüzey hızları belirlenmiştir. Bu yüzey hızları, akustik kabin analizlerinde girdi olarak kullanılarak tasarlanan kabinin çevreye yaydığı gürültü 1/3 oktav bandında tespit edilmiştir.

Yapılan analizlerde hava doğuşumlu gürültüler baz alınmış olup vibroakustik etkiler ihmal edilmiştir. Egzoz gazının susturucu içerisindeki hareketinden dolayı egzoz susturucusu gövdesinde ve dizel motor titreşimlerinin tamamının vibrasyon takozlarında sönümlenmemesinden dolayı şasi-kabin komponentlerine titreşim iletilerek vibroakustik etkiye neden olmaktadır. Belirlenen noktalarda gerçekleştirilen analiz ve test sonuçları karşılaştırıldığında maksimum %15 bir fark tespit edilerek çalışmalarda vibroakustik etkilerin de incelenmesinin önem arz ettiği görülmektedir.

Yarım küre modelinde ekipmandan çevreye yayılan gürültünün analizde doğru bir şekilde yayılması için maksimum mesh boyutunun, çözüm frekansının dalga boyunun 1/6'sı olması gerekmektedir. Yarım küre modelinde düşük ve orta frekanslar için mesh sayısı makul seviyede zaman gerektirirken, yüksek frekanslarda uzun çözüm süreleri gerektirir.

Dolayısıyla düşük ve orta frekanslı gürültü analizinin çözüm süresi bakımından kullanışlı olduğu düşünülmektedir. Mesh sayısı akustik modelin büyüklüğüne göre çok yüksek seviyelere çıkmaktadır. Bu yüzden süre artmaktadır.

Analizi yapılan kabinli jeneratör imal edilip standarda uygun ölçüm noktalarından ölçümleri alınarak analiz sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar ve hata oranları maksimum %15 olup bu hata oranını da göz önünde bulundurarak yöntemin uygulanabilir olduğu görülmüştür.

#### Teşekkür

Bu araştırmanın dizayn ve üretim aşamasında yardımlarını esirgemeyen tüm Teksan Jeneratör ailesine teşekkür ederim.

#### Kaynakça

- [1] Sanayi ve Ticaret Bakanlığı, 2006. Açık Alanda Teçhizat Tarafından Oluşturulan Çevredeki Gürültü Emisyonu ile İlgili Yönetmelik (2000/14/AT). <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2006/12/20061230M4-6.htm> (Erişim Tarihi: 03.06.2020).
- [2] TSE, 2011. Akustik - Gürültü Kaynaklarının Ses Gücü Seviyelerinin ve Ses Enerji Seviyelerinin Ses Basıncı Kullanılarak Belirlenmesi - Yansıtıcı Bir Düzlem Üzerindeki Temel Olarak Serbest Bir Alanda Uygulanan Mühendislik Yöntemleri (Direktif :2006/42/EC). <https://intweb.tse.org.tr/> (Erişim Tarihi: 04.04.2021).
- [3] Ranjbar, M., Kermani, M., 2015. Muffler Design by Noise Transmission Loss Maximization, Eastern Mediterranean University.
- [4] Gupta, A.K, Jha, S., 2019. Acoustical Transmission Loss Performance by Using Various Absorptive Material, International Journal Of Scientific & Technology Research Volume 8, Issue 08.
- [5] Özkan, Y., Özsert,İ., Vezir,A., Cesur,İ., 2016. Reaktif Tip Susturucunun İç Tasarımının Akış ve Akustik Özelliklerine Etkisinin İncelenmesi, SAÜ Fen Bil Der 20. Cilt, 1. Sayı, s. 65-74.
- [6] Arslan, E., Uyulan, Ç., Çalışkan, M., 2018. Sound Field Calculations of a Diesel Generator With Enclosure by Finite Element Analysis, Inter-Noise 2018 Impact of Noise Control Engineering, 26-29 August Chicago, Illinois.
- [7] Akbaş,A., 2005. Susturucuların Akustik Performanslarının İncelenmesi
- [8] Bloxson, W. 2019. Controlling Generator Set Vibration to Minimize Dynamic Loading on Building Structures, MTU Onsite Energy, 3s, Mankato.
- [9] <https://www.esaelektronik.net/delta-ohm-tip-1-gurultu-olcum-cihazı> (Erişim Tarihi:11.11.2021)
- [10] Çalışkan, M., Gürültü: Temel Kavramlar,8s,TTMD Dergisi, s.39, İstanbul.
- [11] Pal, S., 2015. Design and Acoustic Analysis of Hybrid Muffler . Christ University, 42s, Bangalore.
- [12] [https://www.engineeringtoolbox.com/sound-speed-solids-d\\_713](https://www.engineeringtoolbox.com/sound-speed-solids-d_713). (Erişim Tarihi: 07.08.2020)
- [13] [https://en.wikipedia.org/wiki/Speed\\_of\\_sound](https://en.wikipedia.org/wiki/Speed_of_sound) (Erişim Tarihi: 07.08.2020)
- [14] [https://ansyshelp.ansys.com/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v191/wb\\_dx/dx/Optimization\\_SSet\\_o\\_r.html](https://ansyshelp.ansys.com/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v191/wb_dx/dx/Optimization_SSet_o_r.html). (Erişim Tarihi: 07.01.2021)
- [15] Mustafa, O., Khalid, U., Naeem, M.A., Awad, B., Alkhateeb, M., 2020. Direct Optimization of an Automative Sheet Metal Part Using ANSYS, International Journal of Engineering and Management Sciences, Cilt. 5, s. 136. DOI: 10.21791/IJEMS.2020.3.14.
- [16] Arslan,E., Çalışkan,M., 2017. Prediction of Sound Absorption Coefficient of Porous Materials by Means of Emprical and Numerical Methods, 12. Ulusal Akustik Kongresi ve Sergisi, s. 8.